



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

ESTUDIO DE VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE PUENTES CHILENOS CON AISLACIÓN SÍSMICA POR MEDIO DE ANÁLISIS DE MICROVIBRACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
MAITANE MIKELA BALSEBRE CAJIAO

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAMIRO BAZÁEZ GALLARDO
MARCELO MARQUEZ MARAMBIO

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en Estructuras,
Construcción y Geotecnia.
ESTUDIANTE: Maitane Mikela Balsebre Cajiao
FECHA: 12 de junio, 2019.
PROFESOR GUÍA: Francisco Hernández Prado

“ESTUDIO DE VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE PUENTES CHILENOS CON AISLACIÓN SÍSMICA POR MEDIO DEL ANÁLISIS DE MICROVIBRACIONES”

En este estudio se obtienen las propiedades dinámicas de tres puentes a través del análisis de datos obtenidos en campañas de mediciones de microvibraciones ambientales realizadas a través de un arreglo de acelerómetros que se disponen en forma transitoria sobre las estructuras. Todos los puentes estudiados tienen un sistema de aislación sísmica y fueron medidos previamente en campañas de microvibraciones en los años 2003 y 2004 conforme a los estudios realizados por Díaz (2004) y Benavides (2004), previos al mega-terremoto del Maule del 2010.

Por lo tanto, el objetivo del estudio es verificar si es posible identificar cambios significativos en las propiedades dinámicas de los puentes que pudieran ser atribuidas a daño o cambios en las estructuras luego de ocurrido 15 años desde las últimas campañas, teniendo en cuenta que además estuvieron sujetos al efecto del terremoto del Maule del 2010 ($M_w=8.8$). Los puentes estudiados corresponden al viaducto El Salto Largo (Región de Valparaíso), el viaducto Marga-Marga (Región de Valparaíso) y el puente Cardenal Raúl Silva Henríquez (Región del Maule). En este contexto, se señala que los viaductos El Salto Largo y Marga-Marga no sufrieron daño aparente durante el tiempo, en cambio el puente Cardenal Raúl Silva Henríquez sufrió daño significativo y posteriores reparaciones debido al terremoto del Maule del 2010.

Las propiedades dinámicas previas al terremoto del 2010 del viaducto El Salto Largo se obtienen de registros de microvibraciones medidas en los años 1999 y 2002 a partir de los acelerómetros instalados en forma permanentemente por la RENADIC. Por otro lado, las propiedades dinámicas de las otras dos estructuras se obtienen a partir de una campaña de mediciones de microvibraciones realizada en los años 2003-2004 y que fue repetida en este estudio durante el año 2018.

Se concluye que puentes o viaductos con un sistema de aislación sísmica poseen modos longitudinales y transversales que dependen fuertemente del sistema de aislación, por lo que no existen variaciones significativas en las propiedades dinámicas (frecuencias y formas modales) que puedan atribuirse a daño (o reparación) de las estructuras utilizando mediciones de microvibraciones en el tablero (al menos que existan cambios en las propiedades de los aisladores), observándose cambios leves en las propiedades dinámicas incluso para el puente que resultó dañado y posteriormente reparado durante el terremoto del 27F.

Agradecimientos

Me gustaría dedicar esta parte del trabajo de título a cada una de las personas que me ayudó de una manera u otra, no solo a terminar este trabajo, sino que han sido parte de toda mi vida universitaria.

En primer lugar agradecerles a los pilares fundamentales de mi vida, mis papás, cada uno a su manera me ha dado todo lo necesario para llegar hasta donde estoy. Este es el momento para aprovechar de agradecer desde lo más pequeño a lo más grande que han hecho por mí, los quiero mucho.

A mis hermanas por ser incondicionales y siempre haber estado cuando las necesito y en particular a mi prima Coté por haber estado siempre cerca (sobre todo cuando no ando con llaves).

A la familia chuquicamatina (familias Hernández, Vallejo y Moore), por haber sido mi familia extendida por muchos años y a pesar de ya no estar tan cerca hacerse presentes siempre de alguna u otra forma, en especial a las Camis y el Pelao (desde muy lejos), por todos los viajes y por mantener viva la flor de la amistad.

A mi pololo Sergio por apoyarme en los peores y los mejores momentos y siempre estar ahí con su energía postivia característica, te quiero mucho.

A los amigos del colegio que perduran a pesar de la distancia, por las “juntas familiares” que marcaron un buen inicio en cada semestre.

A todos los amigos de la universidad, los de plan común (El Peluca), mención honrosa a la luli y el ferrer por todos los almuerzos compartidos y mucho más. A los amigos civiles, los de la pecera y en general todos aquellos con los que compartimos horas de estudio, tesis, tareas, almuerzos y más, gracias por todo su apañe y por generar siempre un ambiente tan grato.

A las niñas de la rama de natación (en especial a la cata y a la clau por toda su buena onda) y ahora último de balón mano por mantenerme motivada en el deporte que ha sido fundamental y del cual he aprendido infinitamente.

A mi profesor guía Francisco Hernández por su infinita ayuda, paciencia y dedicación.

También a mis profesores de comisión por su buena disposición e interés en el desarrollo del tema.

Y finalmente un agradecimiento especial a quienes fueron parte de las mediciones realizadas muchas gracias por su ayuda desinteresada al Beto, Nacho y Mati como también al profesor Pedro Soto y a Victor por su ayuda tanto en terreno como en el laboratorio.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN.....	20
1.1. Objetivos	22
1.1.1. Objetivo General.....	22
1.1.2. Objetivos Específicos.....	22
1.2. Alcances.....	22
1.3. Metodología	23
CAPÍTULO 2: DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS	24
2.1. Método de análisis en frecuencias	24
2.2. Método de sub-espacio estocástico (SSI).....	27
CAPÍTULO 3: VIADUCTO EL SALTO LARGO	36
3.1. Caracterización de la estructura	36
3.1.1. Antecedentes generales.....	36
3.1.2. Descripción de la estructura (Daza, 2003).....	38
3.2. Registros de microvibraciones.....	42
3.2.1. Instrumentación permanente registros años 1999, 2002 y 2018.	42
3.2.2. Instrumentación externa registro año 2018.....	45
3.3. Resultados	49
3.3.1. Instrumentación en cepas.....	49
3.3.2. Instrumentación permanente registros años 1999, 2002 y 2018.	54
3.3.3. Instrumentación externa registro año 2018.....	69
CAPÍTULO 4: PUENTE CARDENAL RAÚL SILVA HENRÍQUEZ.....	76
4.1. Caracterización de la estructura	76
4.1.1. Antecedentes generales.....	76
4.1.2. Descripción de la estructura (Benavides, 2004).....	79
4.1.3. Daños sufridos durante el terremoto el Maule.....	87
4.2. Registros de microvibraciones.....	91
4.2.1. Instrumentación externa registros año 2004.....	91
4.2.2. Instrumentación externa registros año 2018.....	96
4.3. Resultados	103
4.3.1. Tramo norte longitudinal.....	103
4.3.2. Tramo norte transversal.....	115
4.3.3. Tramo norte vertical.....	132
4.3.4. Tramo sur longitudinal	144
4.3.5. Tramo sur transversal.....	156

4.3.6.	Tramo sur vertical.....	168
CAPÍTULO 5: VIADUCTO MARGA-MARGA		179
5.1.	Caracterización de la estructura	179
5.1.1.	Antecedentes generales.....	179
5.1.2.	Descripción de la estructura (Díaz, 2004).....	180
5.2.	Registros de microvibraciones.....	186
5.2.1.	Instrumentación externa registros año 2004.....	186
5.2.2.	Instrumentación externa registros año 2018.....	190
5.3.	Resultados	196
5.3.1.	Tramo norte longitudinal.....	196
5.3.2.	Tramo norte transversal.....	206
5.3.3.	Tramo norte vertical	211
5.3.4.	Tramo sur longitudinal	220
5.3.5.	Tramo sur transversal	230
5.3.6.	Tramo sur vertical.....	242
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....		252
6.1.	Generales	252
6.1.1.	Generales Viaducto El Salto.....	255
6.1.2.	Generales Puente Cardenal Raúl Silva Henríquez.....	256
6.1.3.	Generales Viaducto Marga-Marga.....	257
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA.....		259
CAPÍTULO 8: ANEXOS		261
8.1.	Viaducto Marga-Marga.....	261
8.1.1.	Instrumentación externa registros año 2004.....	261
8.1.2.	Instrumentación externa registros año 2018.....	266
8.2.	Puente Cardenal Raúl Silva Henríquez.....	270
8.2.1.	Instrumentación externa registros año 2004.....	270
8.2.2.	Instrumentación externa registros año 2018.....	299

Índice de tablas

Tabla 2-1: Ejemplo tablas adjuntas a diagrama de estabilidad	35
Tabla 3-1: Dimensiones para cada cepa viaducto El Salto Largo	39
Tabla 3-2: Dimensiones de pilotes por cepa viaducto El Salto Largo	40
Tabla 3-3: Duración y frecuencia de muestreo registro viaducto El Salto 1999, 2002 y 2018	45
Tabla 3-4: Duración y frecuencia de muestreo registro viaducto El Salto 2018	48
Tabla 3-5: Configuración instrumentos registro viaducto El Salto 2018.....	48
Tabla 3-6: Frecuencias y amortiguamientos planta tablero El Salto Largo 1999.....	55
Tabla 3-7: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	56
Tabla 3-8: Frecuencias y amortiguamientos planta tablero El Salto Largo 2002.....	59
Tabla 3-9: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	60
Tabla 3-10: Frecuencias y amortiguamientos planta tablero El Salto Largo 2018	63
Tabla 3-11: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	64
Tabla 3-12: Frecuencias naturales viaducto El Salto Largo instrumentación permanente	66
Tabla 3-13:Frecuencias y amortiguamientos planta tablero El Salto Largo instrumentación externa 2018	70
Tabla 3-14: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	71
Tabla 3-15:Frecuencias naturales El Salto Largo instrumentación permanente y externa 2018.....	74
Tabla 4-1: Duración y frecuencia de muestreo registros puente CRSH.....	95
Tabla 4-2: Duración y frecuencia de muestreo registros puente CRSH 2018	101
Tabla 4-3: Configuración instrumentos registro viaducto CRSH 2018.....	101
Tabla 4-4: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo norte CRSH 2004	104
Tabla 4-5: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	105
Tabla 4-6: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo norte CRSH 2018	107

Tabla 4-7: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	108
Tabla 4-8: Frecuencias modales tramo norte longitudinal puente CRSH	113
Tabla 4-9: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo norte CRSH 2004	116
Tabla 4-10: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	117
Tabla 4-11: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal (car02) tramo norte CRSH 2018.....	119
Tabla 4-12: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	120
Tabla 4-13: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal (Car06) tramo norte CRSH 2018.....	122
Tabla 4-14: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	123
Tabla 4-15: Frecuencias modales tramo norte transversal puente CRSH	130
Tabla 4-16: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo norte CRSH 2004	133
Tabla 4-17: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	134
Tabla 4-18: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo norte CRSH 2018	136
Tabla 4-19: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	137
Tabla 4-20: Frecuencias modales tramo norte vertical puente CRSH.....	142
Tabla 4-21: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo sur CRSH 2004	145
Tabla 4-22: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	146
Tabla 4-23: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo sur CRSH 2018	148
Tabla 4-24: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	149
Tabla 4-25: Frecuencias modales tramo sur longitudinal puente CRSH.....	154
Tabla 4-26: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo sur CRSH 2004	157
Tabla 4-27: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	158
Tabla 4-28: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo sur CRSH 2018	160
Tabla 4-29: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	161

Tabla 4-30: Frecuencias modales tramo sur transversal puente CRSH.....	166
Tabla 4-31: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo sur CRSH 2004...	169
Tabla 4-32: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	170
Tabla 4-33: Frecuencias y amortiguamientos tablero y tramo sur CRSH 2018.....	172
Tabla 4-34: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	173
Tabla 4-35: Frecuencias modales tramo sur vertical puente CRSH	178
Tabla 5-1: Propiedades sismómetros registro viaducto Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004)	186
Tabla 5-2: Duración y frecuencia de muestreo registros viaducto Marga-Marga 2004..	190
Tabla 5-3: Duración y frecuencia de muestreo de los registros viaducto Marga-Marga 2018	195
Tabla 5-4: Configuración instrumentos registro viaducto Marga-Marga 2018	195
Tabla 5-5: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo norte Marga-Marga 2004	197
Tabla 5-6: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	198
Tabla 5-7: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo norte Marga-Marga 2018	200
Tabla 5-8: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	201
Tabla 5-9: Frecuencias modales tramo norte longitudinal viaducto Marga-Marga	204
Tabla 5-10: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo norte Marga-Marga 2004	207
Tabla 5-11: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	208
Tabla 5-12: Frecuencias modales tramo norte transversal viaducto Marga-Marga	210
Tabla 5-13: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo norte Marga-Marga 2004	212
Tabla 5-14: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	213
Tabla 5-15: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo norte Marga-Marga 2018	215
Tabla 5-16: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	216
Tabla 5-17: Frecuencias modales tramo norte vertical viaducto Marga-Marga.....	219

Tabla 5-18: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo sur Marga-Marga 2004	221
Tabla 5-19: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	222
Tabla 5-20: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo sur Marga-Marga 2018	224
Tabla 5-21: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	225
Tabla 5-22: Frecuencias modales tramo sur longitudinal viaducto Marga-Marga.....	229
Tabla 5-23: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo sur Marga-Marga 2004	231
Tabla 5-24: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	232
Tabla 5-25: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo sur Marga-Marga 2018	234
Tabla 5-26: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	235
Tabla 5-27: Frecuencias modales tramo sur transversal viaducto Marga-Marga	240
Tabla 5-28: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo sur Marga-Marga 2004	243
Tabla 5-29: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	244
Tabla 5-30: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo sur Marga-Marga 2018	246
Tabla 5-31: Dirección y canal asociado a cada sensor.....	247
Tabla 5-32: Frecuencias naturales tramo sur vertical viaducto Marga-Marga.....	250

Índice de Ilustraciones

Ilustración 2-1:Diagrama de Flujo de técnica de identificación del sub-espacio estocástico (Hernández, 2009).....	31
Ilustración 2-2: Ejemplo de diagrama de estabilidad, en donde \oplus indica la coincidencia de frecuencia, amortiguamiento y forma modal, Δ indica coincidencia de frecuencia y forma modal. El eje x representa la frecuencia mientras que el eje y representa el grado de libertad. Además se muestra en naranja el PSD promedio y el histograma que muestra la coincidencia de frecuencias.	34
Ilustración 3-1: Ubicación viaducto El Salto Largo (Google Maps, 2019).....	36
Ilustración 3-2: Fotografía viaducto El Salto Largo(Google Maps, 2019).	37
Ilustración 3-3: Corte transversal viaducto El Salto Largo, dimensiones en metros (Daza, 2003).....	38
Ilustración 3-4: Corte visto en planta cepas viaducto El Salto Largo, dimensiones en centímetros.....	39
Ilustración 3-5: Corte transversal y vista en planta pilotes viaducto El Salto Largo, dimensiones en metros (Daza, 2003).....	40
Ilustración 3-6: Corte longitudinal viaducto El Salto Largo, dimensiones en centímetros(Daza, 2003).	41
Ilustración 3-7: Bolsones de arcilla y limo presentes en el suelo de fundación del viaducto. (Berrios, 2003)	42
Ilustración 3-8: Posición sensores registros viaducto El Salto 1999 y 2002 (Sarrazin, Moroni, & Roesset, 2005).	43
Ilustración 3-9: Posición sensores registro viaducto El Salto 2018 (Sarrazin, Moroni, Neira, & Venegas, 2013).....	44
Ilustración 3-10: Camión inspector utilizado para la instalación de instrumentos en las cepas.....	46
Ilustración 3-11: Planta posición sensores registro viaducto El Salto 2018.	47
Ilustración 3-12: Elevación posición sensores registro viaducto El Salto 2018.....	47
Ilustración 3-13: PSD registros años 1999, 2002 y 2018 del canal 4 instalado en sentido longitudinal en el cabezal de la cepa 4.....	49
Ilustración 3-14: PSD registros años 1999, 2002 y 2018 del canal 6 instalado en sentido transversal en el cabezal de la cepa 4.	50

Ilustración 3-15: PSD y coherencia entre canales 7, 2 y 4 instalados en sentido longitudinal en los cabezales de las cepas 1, 2 y 3 respectivamente.....	51
Ilustración 3-16: PSD y coherencia entre canales 6, 5 y 9 instalados en sentido transversal en los cabezales de las cepas 1, 2 y 3 respectivamente.....	52
Ilustración 3-17: Diagrama de estabilidad planta tablero El Salto Largo 1999.....	54
Ilustración 3-18: Espectros de Potencia y Coherencia El Salto Largo 1999.	56
Ilustración 3-19: Formas Modales planta tablero El Salto Largo 1999.....	57
Ilustración 3-20: Diagrama de estabilidad planta tablero El Salto Largo 2002.....	58
Ilustración 3-21: Espectros de Potencia y Coherencia El Salto Largo 2002.	60
Ilustración 3-22: Formas Modales planta tablero El Salto Largo 2002.....	61
Ilustración 3-23: Diagrama de estabilidad planta tablero El Salto Largo 2018.....	62
Ilustración 3-24: Espectros de Potencia y Coherencia El Salto Largo 2018.	64
Ilustración 3-25: Formas Modales planta tablero El Salto Largo 2018.....	65
Ilustración 3-26: Comparación MAC registro 1999 y 2002 planta viaducto El Salto Largo.	66
Ilustración 3-27: Comparación MAC registro 2002 y 2018 planta viaducto El Salto Largo.	67
Ilustración 3-28: Comparación MAC registro 1999 y 2018 planta viaducto El Salto Largo.	67
Ilustración 3-29: Diagrama de estabilidad planta tablero El Salto Largo instrumentación externa 2018.	69
Ilustración 3-30: Espectros de Potencia y Coherencia El Salto Largo instrumentación externa 2018.	71
Ilustración 3-31: Formas Modales planta tablero El Salto Largo instrumentación externa 2018.....	73
Ilustración 4-1: Ubicación puente Cardenal Raúl Silva Henríquez (Google Maps, 2019).	76
Ilustración 4-2: Fotografía puente Cardenal Raúl Silva Henríquez (Google Maps, 2019).	77
Ilustración 4-3: Fotografía tomada desde el estribo noreste del puente CRSH 2018.....	78
Ilustración 4-4: Vista longitudinal tramo norte puente CRSH (Benavides, 2004).....	79

Ilustración 4-5: Vista longitudinal tramo sur puente CRSH (Benavides, 2004).....	79
Ilustración 4-6: Sección transversal puente CRSH, dimensiones en centímetros(Benavides, 2004).....	80
Ilustración 4-7: Planta y elevación cepas de la 1 a la 5 puente CRSH, dimensiones en centímetros(Benavides, 2004).	81
Ilustración 4-8: Planta y elevación cepas de la 6 a la 11 puente CRSH, dimensiones en centímetros (Benavides, 2004).....	82
Ilustración 4-9: Planta y elevación cepas de la 12 a la 19 puente CRSH, dimensiones en centímetros(Benavides, 2004).	83
Ilustración 4-10: Planta y elevación cepas 20 y 21 puente CRSH, dimensiones en centímetros (Benavides, 2004).....	84
Ilustración 4-11: Detalle apoyo vigas sobre cepas puente CRSH, dimensiones en centímetros (previo a 2010).....	84
Ilustración 4-12: Elevación estribo norte puente CRSH.....	85
Ilustración 4-13: Detalle placas de apoyo de neopreno puente CRSH, dimensiones en centímetros.....	86
Ilustración 4-14: Fotografía del pandeo del diafragma transversal y desplazamiento de las vigas del puente CRSH.....	87
Ilustración 4-15: Fotografía del daño de la viga en el estribo noreste del puente CRSH.	88
Ilustración 4-16: Fotografía de la reparación temporal en el estribo noreste del puente CRSH.	88
Ilustración 4-17: Fotografía de la erosión del suelo alrededor de las cepas del puente CRSH.	89
Ilustración 4-18: Fotografía cepa del puente CRSH impactada con escombros del Río Maule.....	89
Ilustración 4-19: Fotografía de la soldadura de filete en la conexión de la viga al estribo del puente CRSH.....	90
Ilustración 4-20: Posiciones sensores registro Con01 puente CRSH (Benavides, 2004)...	92
Ilustración 4-21: Posiciones sensores registro Con03-Con04 puente CRSH (Benavides, 2004).....	92
Ilustración 4-22: Posiciones sensores registro Con05 puente CRSH (Benavides, 2004)...	93

Ilustración 4-23: Posiciones sensores registro Con07 puente CRSH (Benavides, 2004)...	93
Ilustración 4-24: Posiciones sensores registro Con09 puente CRSH (Benavides, 2004)...	94
Ilustración 4-25: Posiciones sensores registro Con10 puente CRSH (Benavides, 2004)...	94
Ilustración 4-26: Sensores instalados a lo largo de la berma del puente CRSH.....	96
Ilustración 4-27: Posiciones sensores registro Car00 puente CRSH 2018, Tramo Sur Oeste.	97
Ilustración 4-28: Posiciones sensores registro Car01 puente CRSH 2018, Tramo Nor-Este.	98
Ilustración 4-29: Posiciones sensores registro Car02 puente CRSH 2018, Tramo Nor-Este.	98
Ilustración 4-30: Posiciones sensores registro Car03 puente CRSH 2018, Tramo Sur-Oeste.	99
Ilustración 4-31: Posiciones sensores registro Car04 puente CRSH 2018, Tramo Sur-Oeste.	99
Ilustración 4-32: Posiciones sensores registro Car05 puente CRSH 2018.	100
Ilustración 4-33: Posiciones sensores registro Car06 puente CRSH 2018, Tramo Nor-Este.	100
Ilustración 4-34: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo norte CRSH 2004.	103
Ilustración 4-35: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal tramo norte CRSH 2004.....	105
Ilustración 4-36: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo norte CRSH 2018.	106
Ilustración 4-37: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal tramo norte CRSH 2018.....	108
Ilustración 4-38: Formas Modales longitudinales tramo norte CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).....	110
Ilustración 4-39: Formas Modales longitudinales tramo norte CRSH 2018.....	112
Ilustración 4-40: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo norte CRSH 2004.	115

Ilustración 4-41: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal tramo norte CRSH 2004.....	117
Ilustración 4-42: Diagrama de estabilidad tablero transversal (car02) tramo norte CRSH 2018.....	118
Ilustración 4-43: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Car02) tramo norte CRSH 2018.....	120
Ilustración 4-44: Diagrama de estabilidad tablero transversal (Car06) tramo norte CRSH 2018.....	121
Ilustración 4-45: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Car06) tramo norte CRSH 2018.....	123
Ilustración 4-46: Formas Modales transversales tramo norte CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).....	125
Ilustración 4-47: Formas Modales transversales (Car02) tramo norte CRSH 2018.	127
Ilustración 4-48: Formas Modales transversales (Car06) tramo norte CRSH 2018.	129
Ilustración 4-49: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo norte CRSH 2004. ...	132
Ilustración 4-50: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Con05) tramo norte CRSH 2004.....	134
Ilustración 4-51: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo norte CRSH 2018. ...	135
Ilustración 4-52: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Car01) tramo norte CRSH 2018.....	137
Ilustración 4-53: Formas Modales verticales tramo norte CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).	139
Ilustración 4-54: Formas Modales verticales tramo norte CRSH 2018.....	141
Ilustración 4-55: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo sur CRSH 2004.	144
Ilustración 4-56: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Con07) tramo sur CRSH 2004.	146
Ilustración 4-57: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo sur CRSH 2018.	147
Ilustración 4-58: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Car03) tramo sur CRSH 2018.	149
Ilustración 4-59: Formas Modales longitudinales tramo sur CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).....	151

Ilustración 4-60: Formas Modales longitudinales tramo sur CRSH 2018.....	153
Ilustración 4-61: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo sur CRSH 2004. .	156
Ilustración 4-62: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Con09) tramo sur CRSH 2004.....	158
Ilustración 4-63: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo sur CRSH 2018. .	159
Ilustración 4-64: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (car04) tramo sur CRSH 2018.....	161
Ilustración 4-65: Formas Modales transversales tramo sur CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).....	163
Ilustración 4-66: Formas Modales transversales tramo sur CRSH 2018.....	165
Ilustración 4-67: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo sur CRSH 2004.....	168
Ilustración 4-68: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Con10) tramo sur CRSH 2004.....	170
Ilustración 4-69: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo sur CRSH 2018.....	171
Ilustración 4-70: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Car 03) tramo sur CRSH 2018.....	173
Ilustración 4-71: Formas Modales verticales tramo sur CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).	175
Ilustración 4-72: Formas Modales verticales tramo sur CRSH 2018.....	177
Ilustración 5-1: Ubicación viaducto Marga-Marga (Google Maps, 2019).	179
Ilustración 5-2: Fotografía viaducto El Salto Largo (Google Maps, 2019).	180
Ilustración 5-3: Sección transversal del tablero viaducto Marga-Marga, dimensiones en centímetros.....	181
Ilustración 5-4: Vista transversal y lateral de cepa tipo viaducto Marga-Marga, dimensiones en centímetros (Díaz, 2004).	182
Ilustración 5-5: Corte transversal de cepa tipo viaducto Marga-Marga, dimensiones en centímetros.....	182
Ilustración 5-6: Corte longitudinal viaducto Marga-Marga (Díaz, 2004).	184
Ilustración 5-7: Vista en planta viaducto Marga-Marga (Díaz, 2004).	185
Ilustración 5-8: Posiciones sensores registro Mar01 viaducto Marga-Marga, Tramo Norte (Díaz, 2004).....	187

Ilustración 5-9: Posiciones sensores registro Mar03 viaducto Marga-Marga, Tramo Norte (Díaz, 2004).....	187
Ilustración 5-10: Posiciones sensores registro Mar04 viaducto Marga-Marga, Tramo Norte (Díaz, 2004).....	188
Ilustración 5-11: Posiciones sensores registro Mar06 viaducto Marga-Marga, Tramo Sur (Díaz, 2004).....	188
Ilustración 5-12: Posiciones sensores registro Mar07 viaducto Marga-Marga, Tramo Sur (Díaz, 2004).....	189
Ilustración 5-13: Posiciones sensores registro Mar09 viaducto Marga-Marga (Díaz, 2004).	189
Ilustración 5-14: Registro de calibración sensores instalados viaducto Marga-Marga. ...	190
Ilustración 5-15: Posiciones sensores registro Marga 0 viaducto Marga-Marga 2018. ...	191
Ilustración 5-16: Posiciones sensores registro Marga 1 viaducto Marga-Marga 2018, Tramo Sur.....	192
Ilustración 5-17: : Posiciones sensores registro Marga 1 viaducto Marga-Marga 2018. .	192
Ilustración 5-18: Posiciones sensores registro Marga 2 viaducto Marga-Marga 2018, Tramo Sur.....	193
Ilustración 5-19: Posiciones sensores registro Marga 2 viaducto Marga-Marga 2018. ...	193
Ilustración 5-20: Posiciones sensores registro Marga 3 viaducto Marga-Marga 2018, Tramo Norte.	194
Ilustración 5-21: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo norte Marga-Marga 2004.	196
Ilustración 5-22: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Mar 01) tramo norte Marga-Marga 2004.	198
Ilustración 5-23: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo norte Marga-Marga 2018.	199
Ilustración 5-24: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Marga 3) tramo norte Marga-Marga 2018.	201
Ilustración 5-25: Formas Modales longitudinales tramo norte Marga-Marga 2004.....	202
Ilustración 5-26: Formas Modales longitudinales tramo norte Marga-Marga 2018.....	203

Ilustración 5-27: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo norte Marga-Marga 2004.	206
Ilustración 5-28: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Mar 03) tramo norte Marga-Marga 2004.	208
Ilustración 5-29: Formas Modales transversales tramo norte Marga-Marga 2004.	209
Ilustración 5-30: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo norte Marga-Marga 2004.	211
Ilustración 5-31: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Mar 04) tramo norte Marga-Marga 2004.....	213
Ilustración 5-32: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo norte Marga-Marga 2018.	214
Ilustración 5-33: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Marga 3) tramo norte Marga-Marga 2018.	216
Ilustración 5-34: Formas Modales verticales tramo norte Marga-Marga 2004.....	217
Ilustración 5-35: Formas Modales verticales tramo norte Marga-Marga 2018.....	218
Ilustración 5-36: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo sur Marga-Marga 2004.	220
Ilustración 5-37: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Mar 07) tramo sur Marga-Marga 2004.....	222
Ilustración 5-38: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo sur Marga-Marga 2018.....	223
Ilustración 5-39: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Marga 1) tramo sur Marga-Marga 2018.....	225
Ilustración 5-40: Formas Modales longitudinales tramo sur Marga-Marga 2004.....	226
Ilustración 5-41: Formas Modales longitudinales tramo sur Marga-Marga 2018.....	228
Ilustración 5-42: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo sur Marga-Marga 2004.	230
Ilustración 5-43: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Mar 09) tramo sur Marga-Marga 2004.....	232
Ilustración 5-44: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo sur Marga-Marga 2018.....	233

Ilustración 5-45: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Marga 2) tramo sur Marga-Marga 2018.....	235
Ilustración 5-46: Formas Modales transversales tramo sur Marga-Marga 2004 (reprocesamiento de datos).....	237
Ilustración 5-47: Formas Modales transversales tramo sur Marga-Marga 2018.....	239
Ilustración 5-48: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo sur Marga-Marga 2004.	242
Ilustración 5-49: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Mar 06) tramo sur Marga-Marga 2004.....	244
Ilustración 5-50: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo sur Marga-Marga 2018.	245
Ilustración 5-51: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Marga 2) tramo sur Marga-Marga 2018.....	247
Ilustración 5-52: Formas Modales verticales tramo sur Marga-Marga 2004.....	248
Ilustración 5-53: Formas Modales verticales tramo sur Marga-Marga 2018.....	249
Ilustración 8-1: Formas Modales longitudinales tramo norte Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004).....	261
Ilustración 8-2: Formas modales transversales tramo norte 2004 (Díaz, 2004).	262
Ilustración 8-3: Formas modales verticales tramo norte Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004).	262
Ilustración 8-4: Formas modales longitudinales tramo sur Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004).	263
Ilustración 8-5: Formas modales transversales tramo sur Marga- Marga 2004 (Díaz, 2004).	264
Ilustración 8-6: Formas modales verticales tramo sur Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004).265	
Ilustración 8-7: PSD calibración horizontal viaducto Marga-Marga 2018.	266
Ilustración 8-8: PSD y coherencia calibración horizontal viaducto Marga-Marga 2018. 266	
Ilustración 8-9: Función de transferencia y fase calibración horizontal viaducto Marga-Marga 2018.....	267
Ilustración 8-10: Función de transferencia y fase calibración horizontal viaducto Marga-Marga 2018.....	267

Ilustración 8-11: PSD calibración vertical viaducto Marga-Marga 2018.	268
Ilustración 8-12: PSD y coherencia calibración vertical viaducto Marga-Marga 2018...	268
Ilustración 8-13: Función de transferencia y fase calibración vertical viaducto Marga-Marga 2018.....	269
Ilustración 8-14: Función de transferencia y fase calibración vertical viaducto Marga-Marga 2018.....	269
Ilustración 8-15: FM1 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	270
Ilustración 8-16: FM2 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	271
Ilustración 8-17: FM3 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	272
Ilustración 8-18: FM4 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	273
Ilustración 8-19: FM5 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	274
Ilustración 8-20: FM6 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	275
Ilustración 8-21: FM7 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	276
Ilustración 8-22: FM1 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	277
Ilustración 8-23: FM2 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	278
Ilustración 8-24: FM3 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	279
Ilustración 8-25: FM4 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	280
Ilustración 8-26: FM5 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	281
Ilustración 8-27: FM6 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	282
Ilustración 8-28: FM1 vertical tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	283
Ilustración 8-29: FM2 vertical tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	284
Ilustración 8-30: FM3 vertical tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	284
Ilustración 8-31: FM4 vertical tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).	285
Ilustración 8-32: FM1 longitudinal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).	286
Ilustración 8-33: FM2 longitudinal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).	287
Ilustración 8-34: FM3 longitudinal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).	288
Ilustración 8-35: FM1 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	289
Ilustración 8-36: FM2 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	290
Ilustración 8-37: FM3 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	291

Ilustración 8-38: FM4 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	292
Ilustración 8-39: FM5 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	293
Ilustración 8-40: FM6 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	294
Ilustración 8-41: FM7 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	295
Ilustración 8-42: FM1 vertical tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	296
Ilustración 8-43: FM2 vertical tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	297
Ilustración 8-44: FM3 vertical tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	297
Ilustración 8-45: FM4 vertical tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).....	298
Ilustración 8-46: PSD calibración horizontal puente CRSH 2018.	299
Ilustración 8-47: PSD y función coherencia calibración horizontal puente CRSH 2018.	300
Ilustración 8-48: Función de transferencia y fase calibración horizontal puente CRSH 2018.	300
Ilustración 8-49: Función de transferencia y fase calibración horizontal puente CRSH 2018.	301
Ilustración 8-50: PSD calibración vertical puente CRSH 2018.....	302
Ilustración 8-51: PSD y función de coherencia calibración vertical puente CRSH 2018.	302
Ilustración 8-52: Función de transferencia y fase calibración vertical puente CRSH 2018.	303
Ilustración 8-53: Función de transferencia y fase calibración vertical puente CRSH 2018.	303

Capítulo 1: Introducción y Motivación

Chile es un país fuertemente conectado a través de puentes y viaductos, los cuales enlazan distintas zonas del país, permitiendo el transporte de personas y recursos. Tal como indica el informe de Sominihac & Dagá (2017) el terremoto del Maule en el año 2010 afectó 210 puentes, perjudicando a más de 4.500 camiones de carga y más de 400.000 vehículos particulares.

Dado lo anterior sumado a la importante sismicidad existente en el país, es que cobra relevancia el realizar un monitoreo de estructuras que pudieron sufrir daño tras el terremoto del 2010.

Entre el año 2003 y 2004 se realizó una campaña de mediciones de microvibraciones en puentes chilenos con aislación sísmica, entre ellos se efectuaron mediciones de microvibraciones en los siguientes puentes: El Teniente a 335km al norte de Santiago en la ruta 5, el puente Amoladas a 309.5 km al norte de Santiago en la ruta 5, el puente El Salto en Viña del Mar, el puente Marga-Marga en Viña del Mar, el puente Raúl Cardenal Silva Henríquez en Constitución, el puente Río Bueno a 850 km al sur de Santiago y el puente Rahue a 920 km al sur de Santiago. Según lo expuesto por Moroni, Sarrazin, Benavides, & Díaz (2004), esta campaña se realizó con el fin de comprobar in situ el comportamiento sísmico de puentes con aislación sísmica. A partir de estas mediciones se pudieron obtener las propiedades dinámicas de los puentes estudiados y se generaron modelos computacionales que reproducen dichas propiedades del cual se realizaron diversos trabajos de título como los de Benavides (2004) y Díaz (2004).

Además de los puentes medidos en el año 2004, existen en Chile algunas estructuras que están instrumentadas permanentemente. Una de ellas es el viaducto El Salto Largo, el que cuenta con una red de acelerógrafos distribuidos a lo largo de la estructura, dado esto, es que hay varias memorias y trabajos de título que estudian este viaducto, entre ellas la de Romo (1999) quien obtuvo las propiedades dinámicas a partir del análisis de microvibraciones obtenidas con la instrumentación permanente efectuadas en 1988.

La identificación de estructuras a partir de mediciones de microvibraciones son técnicas que permiten, a través de mediciones instrumentales de vibraciones, determinar las propiedades dinámicas (frecuencias, razones de amortiguamiento crítico y formas modales) reales de las estructuras, que se relacionan a las propiedades elásticas de la estructura debido a que las vibraciones ambientales son producidas por perturbaciones pequeñas. Según indica Hernández (2009) cuando una estructura presenta una modificación en sus propiedades dinámicas se genera debido a cambios ya sea de su distribución de masas, cambios ambientales, cambios en las condiciones de apoyo o a un comportamiento no lineal

y/o daño. Este comportamiento no lineal genera modificaciones en las propiedades dinámicas de la estructura, lo cual permitiría reconocer posibles variaciones asociadas a diversos efectos como por ejemplo cambio en las cargas, efectos de reforzamiento, daño, etc.

Las técnicas de identificación de propiedades dinámicas se implementan con el fin de poder complementar las inspecciones visuales que se les realizan a puentes y viaductos, permitiendo tener mayor información y poder hacer un monitoreo de su salud estructural.

El monitoreo de la salud estructural, SHM por sus siglas en inglés (Structural Health Monitoring) es el proceso de evaluar el estado de salud o la integridad de una estructura a partir de los datos en tiempo real y de respuesta a eventos. El objetivo de la SHM es mejorar la seguridad y confiabilidad detectando daños antes de que alcancen un estado crítico o que no pueden ser detectados con rapidez, por simples inspecciones visuales. Además, los sistemas SHM permiten una evaluación rápida y mejorada después de un terremoto potencialmente dañino (KINEMATRICS, 2019). Adicionalmente, la identificación de las propiedades dinámicas de la estructura permite generar modelos calibrados que pudiesen ser más exactos para modelar la respuesta sísmica de las estructuras.

Tal como se evidencia en Andersen & Brincker (1999), las técnicas de análisis de microvibraciones para la determinación de las propiedades dinámicas elásticas-lineales reales de las estructuras constituyen una gran ventaja, ya que no se necesitan grandes equipos para excitar las estructuras, no se requieren operaciones complicadas ni maquinarias y no es necesario que la estructura interrumpa sus funciones. Esto tiene como consecuencia una metodología relativamente simple, de rápida aplicación y de bajo costo.

La motivación de realizar este trabajo de título es poder estimar las propiedades dinámicas de puentes anterior y posterior al terremoto del Maule del 2010 para poder comparar y verificar si existieron cambios significativos que pudiesen ser atribuidos a daños locales generados por el terremoto, debido al transcurso del tiempo o por otras cargas operacionales y/o posibles reforzamientos. En particular, es posible analizar cuanto se modificaron las propiedades dinámicas del viaducto El Salto Largo conforme a diversas mediciones de microvibraciones realizadas con instrumentación permanente los años 1999, 2002 y 2018. Entendiendo así los cambios o daños sufridos por las estructuras y pudiendo verificar la efectividad de las reparaciones efectuadas, si es que las hubo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Determinar las propiedades dinámicas de los puentes el Salto Largo (Región de Valparaíso), el Marga-Marga (Región de Valparaíso) y el Cardenal Raúl Silva Henríquez (Región del Maule) a partir del análisis de mediciones de microvibraciones y compararlas con resultados previos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar experimentalmente las propiedades dinámicas de los puentes, a partir de un análisis de microvibraciones ambientales registradas en terreno.
- Comparar las propiedades dinámicas obtenidas con las obtenidas a través del procesamiento de los registros obtenidos en mediciones anteriores y de los resultados obtenidos con estos registros en investigaciones previas.
- Analizar variaciones en las propiedades dinámicas de las estructuras y determinar, en caso que hubiese cambios significativos, si estos son debido a daño estructural u otro efecto.
- Destacar la relevancia de monitorear puentes en forma continua o periódica.

1.2. Alcances

Con el presente trabajo se determinarán las propiedades dinámicas de tres puentes chilenos a partir de registros de microvibraciones como son el viaducto Salto Largo (Región de Valparaíso), el viaducto Marga-Marga (Región de Valparaíso) y el puente Cardenal Raúl Silva Henríquez (Región del Maule), que fueron sujetos a altas demandas sísmicas en el terremoto del Maule de 2010. Con los datos registrados en terreno se obtendrán las propiedades dinámicas de las tres estructuras y serán comparadas con datos obtenidos previos al terremoto del 2010 a partir de los registros de microvibraciones efectuadas en las estructuras en campañas de mediciones efectuadas en los años 2003 y 2004. Lo anterior con el fin de identificar posibles cambios o daños que pudiesen tener las estructuras.

1.3. Metodología

- Revisión Bibliográfica, sobre métodos de instrumentación e identificación de estructuras.
- Recopilación de información de campaña de medición de puentes realizada el año 2003 y 2004. Específicamente datos y propiedades dinámicas de los puentes Marga-Marga y Cardenal Raúl Silva Henríquez. Además de información respecto a la instrumentación y datos obtenidos a partir de la instrumentación permanente del viaducto El Salto Largo.
- Recopilación de antecedentes relevantes de las estructuras como planos, memorias de cálculo, especificaciones técnicas, propiedades del suelo, métodos constructivos y reparaciones o modificaciones realizadas luego del terremoto del año 2010.
- Realizar una nueva campaña de microvibraciones ambientales producidas por viento, microtremblores y tráfico vehicular, a través de la instrumentación con acelerómetros tipo Episensor en las estructuras.
- Determinar las propiedades dinámicas (frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento crítico) de los puentes mediante el método SSI y técnicas de relaciones espectrales en frecuencia, tanto para los datos registrados en las campañas de 2003 y 2004 y las nuevas mediciones efectuadas en el 2018.
- Comparar resultados actuales con los obtenidos anteriormente e identificar posibles cambios o daño producidos por el terremoto del 2010 u otros efectos.

Capítulo 2: Determinación de propiedades dinámicas

Para el procesamiento de datos se cuentan con diferentes técnicas de identificación de propiedades dinámicas dependiendo del tipo de señal medida y/o tipo de ensayo realizado. En este contexto, se utilizarán dos técnicas de identificación de propiedades dinámicas de estructuras a partir de datos de microvibraciones: El método de análisis en frecuencias y el método del sub-espacio estocástico (SSI, *Stochastic Subspace Identification*).

El método de análisis en frecuencias fue utilizado en trabajos anteriores de los puentes estudiados, ya sea tanto por D. Romo en el año 1999 para el análisis del viaducto El Salto, por A. Díaz en el año 2004 para el análisis del viaducto Marga-Marga y por C. Benavides también en el año 2004 para el análisis del puente Cardenal Raúl Silva Henríquez. En este contexto, el análisis en frecuencia se utilizará para procesar las nuevas mediciones efectuadas en el año 2018 de las tres estructuras y para reprocesar los resultados realizados en mediciones de las campañas del año 2003 y 2004.

El método SSI, se utiliza para reprocesar los datos previos al 2018 y para procesar los datos de las mediciones realizadas el 2018 de las tres estructuras en estudio.

Lo anterior con el fin de poder validar las metodologías de obtención de propiedades dinámicas, comparando el análisis de los mismos datos (previos al 2018) con dos técnicas distintas y para poder analizar la variación de las propiedades dinámicas de las estructuras en el tiempo, comparando los datos de las mediciones pre y post terremoto del 27F procesados con SSI.

2.1. Método de análisis en frecuencias

El método de análisis espectral es un método de identificación que trabaja en el espacio de las frecuencias, en el cuál a partir de la transformada discreta de Fourier, se analizan las frecuencias predominantes en las series de tiempo, con lo que se determinan los períodos fundamentales de la estructura. De las funciones de transferencia y coherencia se obtienen las formas modales de la estructura.

Para la determinación de las frecuencias naturales, se procesan los registros obtenidos de mediciones de microvibraciones, a los cuales se les aplica un filtro pasa bajo y un filtro paso alto del tipo “Butterworth” de orden 8, normalizado por una frecuencia ω_n , para limpiar las señales de ruido, corregir su línea de base y corregir deriva. Luego se obtienen los espectros de densidad de potencia (Power Spectral Density, PSD) para cada registro y además se determinan los espectros de densidad de potencia cruzados (CSD) entre pares de canales.

Según describe Díaz (2004) para el viaducto Marga-Marga las frecuencias naturales se obtienen identificando los peaks de los espectros de densidad de potencia y los gráficos de coherencia entre pares de registros. La coherencia tiene valores entre 0 y 1, y debiera presentar valores cercanos a 1 entre pares de sensores en torno a las frecuencias naturales de la estructura, dado que el movimiento debiese ser descrito por un movimiento fuertemente influenciado por el modo asociado y generar en consecuencia una vibración coherente en torno a las frecuencias del modo.

Para determinar las formas modales de una estructura sujeta a acciones del tipo aleatorias se emplea la función de transferencia entre canales. Teniendo en cuenta que el valor absoluto de la función de transferencia entre dos canales (en torno a la frecuencia natural analizada) corresponde a la razón de amplitudes de la forma modal entre el par de canales analizado. Además, el ángulo de fase que se obtiene de la función de transferencia tendría un valor de 0° o 180° , implicando que el signo de la razón de la forma modal analizada entre el par de canales estudiado es positivo o negativo para el modo analizado.

Para obtener los espectros de potencia PSD (Power Spectral Density) y los espectros de potencia cruzado (CSD, Cross Spectral Density) se utiliza el método de Welch, en el cual se subdivide el registro de aceleraciones en una cantidad N de ventanas de largo T con un traslape de largo T/2, las cuales primero se multiplican por una ventana de procesamiento del tipo Hanning de largo T para evitar problemas de dispersión y luego para cada una de estas se calcula la Transformada de Fourier la cual se promedia, resultando el PSD o CSD. Cabe mencionar que la técnica de promediación para la determinación del PSD y CSD disminuye el error del cálculo.

En este contexto un análisis en frecuencia se realiza a partir del siguiente marco teórico:

-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-ésima

$j = \sqrt{-1}$

$$\omega = 2\pi f$$

-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:

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

- Ángulo de Fase

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

- Coherencia:

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

2.2. Método de sub-espacio estocástico (SSI)

El método de sub-espacio estocástico (*Stochastic Subspace Identification*, SSI), según lo indicado por Hernández, 2009, es un método de estimación de parámetros dinámicos, paramétrico, que trabaja en el dominio del tiempo. Asume que la estructura es lineal-elástica y que es excitada por una acción del tipo aleatoria caracterizada como un ruido blanco. El método es consecuentemente empleado para registros de vibraciones ambientales en el cual se supone que la estructura es excitada por acciones de índoles aleatorias que son propias de la naturaleza. El algoritmo identifica las matrices espacio-estado basado sólo en mediciones de registros de salidas.

Mayor información sobre este método puede ser encontrada en: (Van Overschee & De Moor, 1996), (Peeters, 2000), (Valdés, 2004) y (Hernández, 2009).

A continuación se muestra un resumen del desarrollo del método conforme a la descripción realizada por 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:

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

Para el caso no amortiguado se tiene que:

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

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

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, 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.

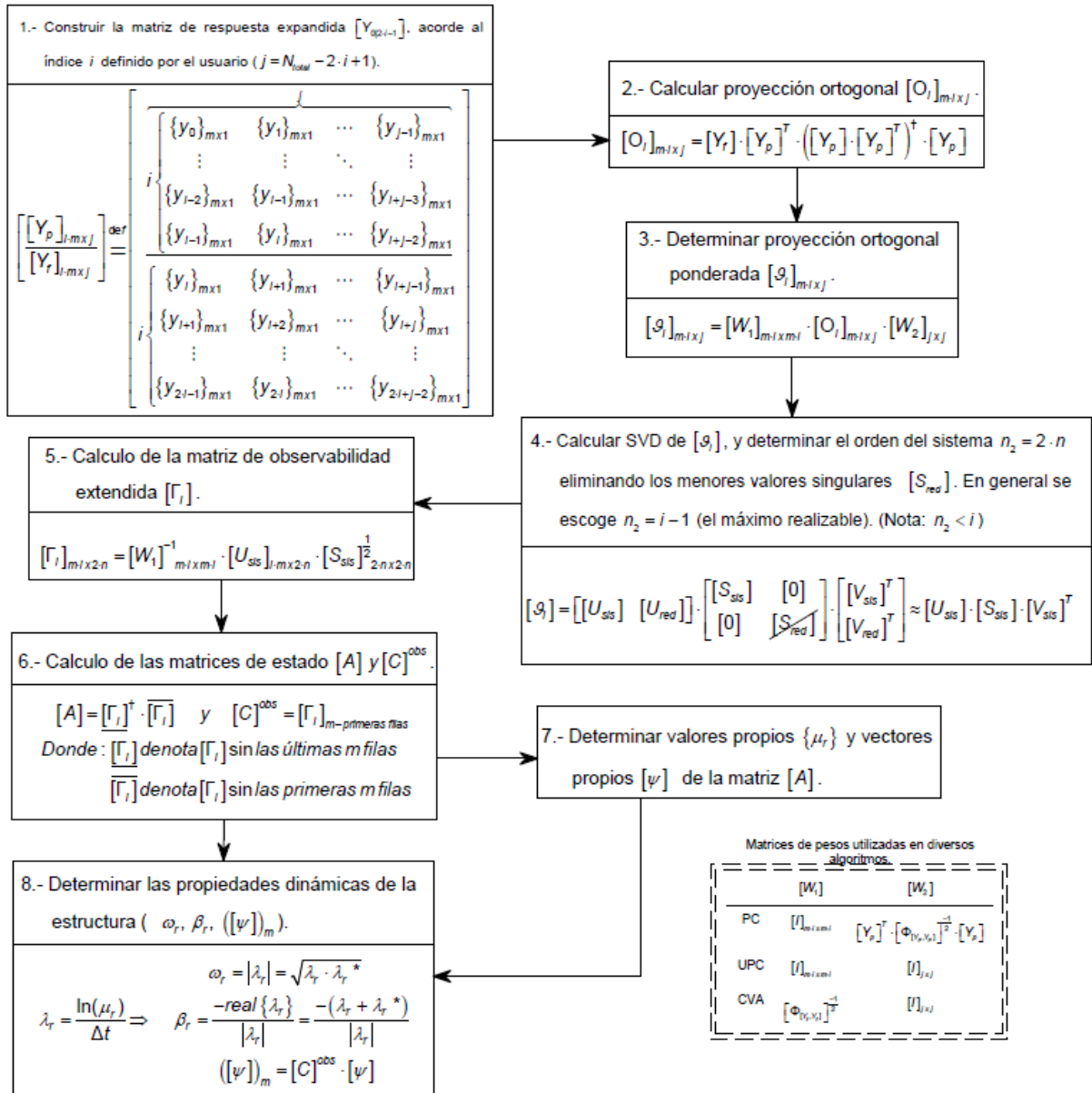


Ilustración 2-1: Diagrama de Flujo de técnica de identificación del sub-espacio estocástico (Hernández, 2009).

De esta forma se definen los siguientes criterios de similitud.

$$\frac{f^{(p)} - f^{(p-1)}}{f^{(p)}} \leq 3\% \quad (2.23)$$

$$\frac{\beta^{(p)} - \beta^{(p-1)}}{\beta^{(p)}} \leq 5\% \quad (2.24)$$

$$100\% \cdot (1 - MAC(\phi_p, \phi_{p-1})) \leq 3\% \quad (2.25)$$

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

Basado en lo anterior se construyen diagramas de estabilidad en la cual se evalúa la similitud de propiedades dinámicas de modelos de órdenes consecutivos.

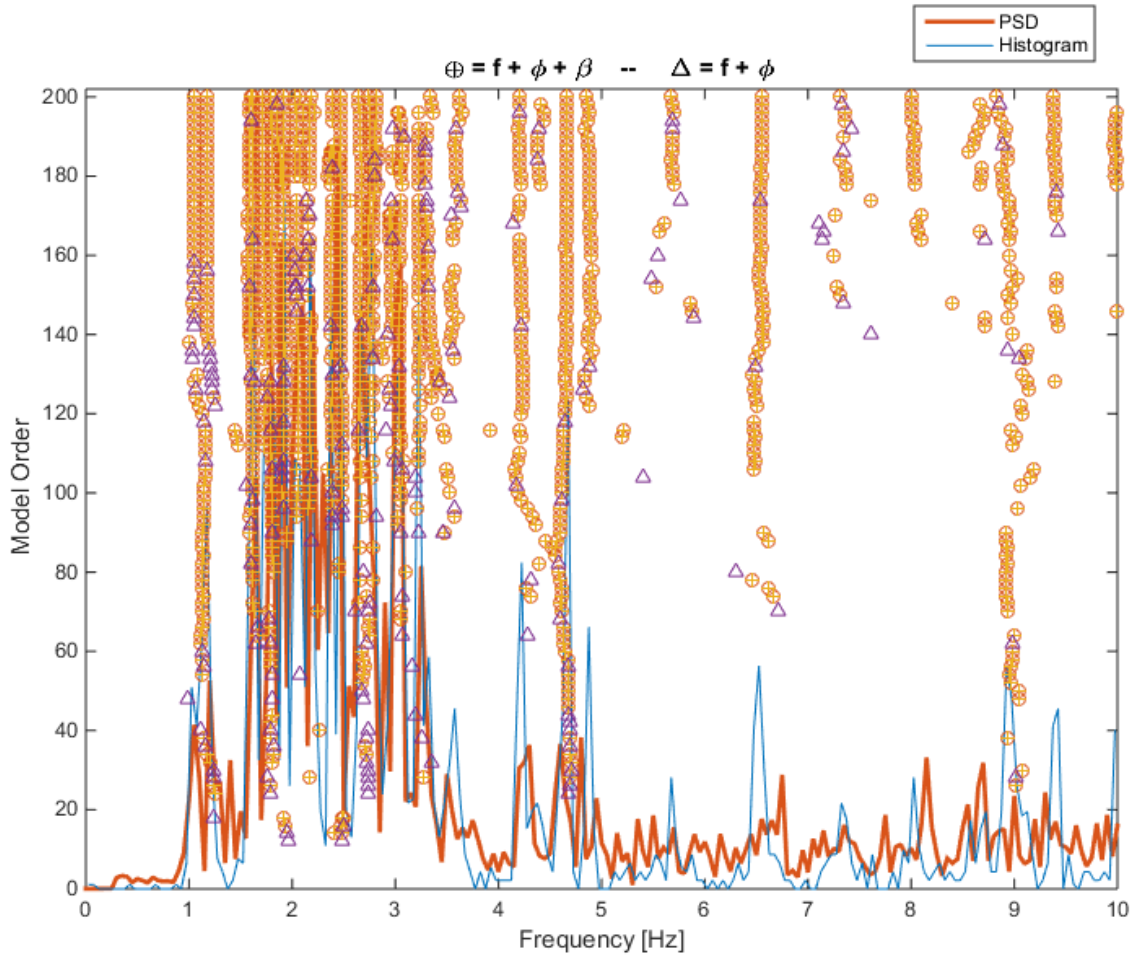


Ilustración 2-2: Ejemplo de diagrama de estabilidad, en donde \oplus indica la coincidencia de frecuencia, amortiguamiento y forma modal, Δ indica coincidencia de frecuencia y forma modal. El eje x representa la frecuencia mientras que el eje y representa el grado de libertad. Además se muestra en naranja el PSD promedio y el histograma que muestra la coincidencia de frecuencias.

Una vez que se construye el diagrama de estabilidad se realiza una inspección y se analiza cuan recurrentes son los resultados de las propiedades dinámicas identificada. De esta forma se puede construir una tabla de resumen de los resultados, donde se señalan las propiedades dinámicas identificadas para modos que hayan sido recurrentes para todos los órdenes del sistema espacio-estado discreto.

Tabla 2-1: Ejemplo tablas adjuntas a diagrama de estabilidad

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.050	0.19	3.77	0.12	17
1.137	0.93	7.53	0.16	20
1.172	0.29	4.12	0.11	25
1.614	0.20	1.85	0.05	22
1.718	0.66	1.83	0.05	14
1.799	0.40	1.83	0.06	22
1.918	0.30	1.41	0.04	21
2.049	1.15	1.82	0.06	13
2.169	0.72	1.87	0.06	12
2.382	0.37	1.93	0.05	20
2.476	0.59	1.33	0.04	21

En donde f es la frecuencia natural identificada, β es la razón de amortiguamiento, σ es la desviación standard de la frecuencia o razón de amortiguamiento y N es el número de veces que se cumple la triple coincidencia.

Para este trabajo se utilizan como 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.

Capítulo 3: Viaducto El Salto Largo

3.1. Caracterización de la estructura

3.1.1. Antecedentes generales

El viaducto El Salto Largo, antiguamente conocido como viaducto Marga-Marga, se encuentra ubicado en Viña del Mar. Este viaducto se encuentra en la ruta 64 que conecta la Ruta 68 con Viña del Mar a través de la Ruta las Palmas (Ruta 60) en el km 7.3 de la autopista pasando sobre la calle Limache, la autopista Troncal Sur y el estero Viña del Mar ($33^{\circ}02'51.1''S$ $71^{\circ}30'32.8''W$).

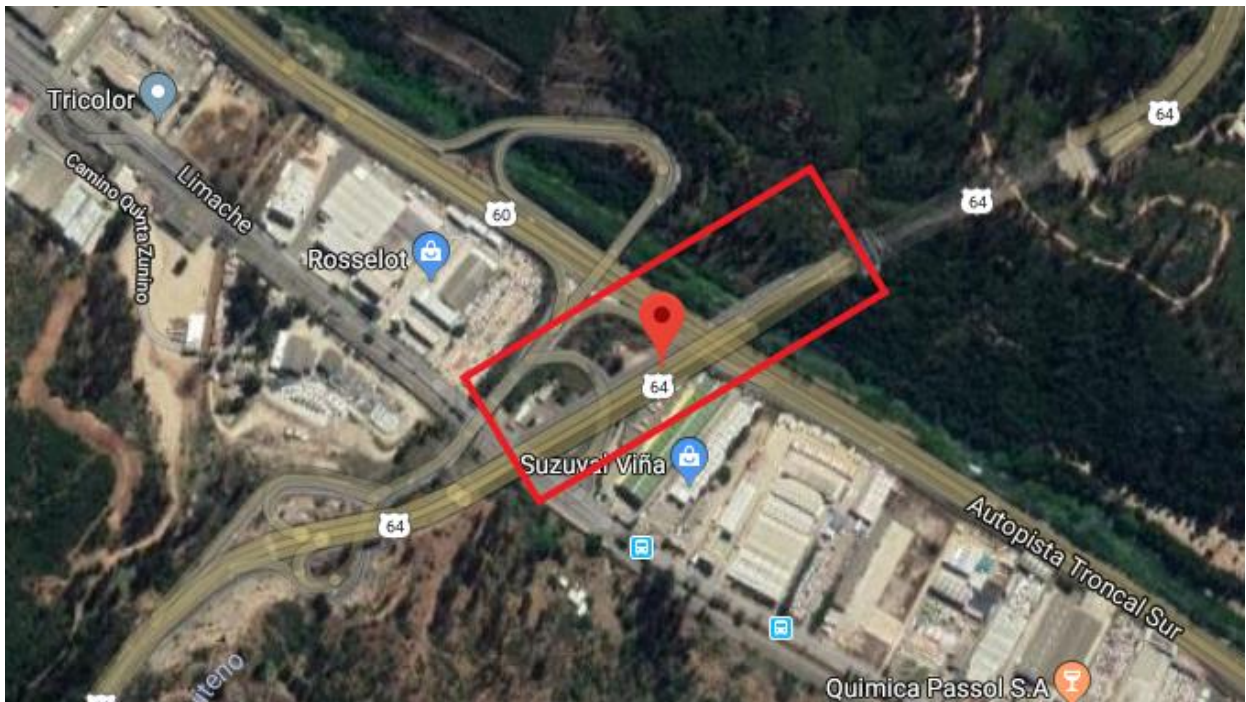


Ilustración 3-1: Ubicación viaducto El Salto Largo (Google Maps, 2019).



Ilustración 3-2: Fotografía viaducto El Salto Largo(Google Maps, 2019).

Esta estructura es la primera obra de infraestructura vial, construida en Chile, que se encuentra aislada sísmicamente, tiene una longitud de 383 metros y un sistema estructural consistente en un único tablero continuo formado por vigas metálicas continuas apoyado sobre 36 aisladores sísmicos, distribuidos en dos estribos y siete cepas. Los aisladores son de goma de alto amortiguamiento con placas metálicas y son de 3 tamaños distintos según su ubicación, los cuales fueron fabricados y probados íntegramente en Chile (Red Nacional de Acelerógrafos 2018).

Dadas las características especiales de este viaducto, el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile bajo el apoyo del Ministerio de Obras Públicas, por intermedio del Departamento de Puentes decidieron instalar una red de acelerógrafos que permite monitorear en forma permanente el comportamiento dinámico de la estructura y con ello poder registrar la respuesta del puente ante eventos sísmicos y obtener registros de vibraciones ambientales en forma periódica (Red Nacional de Acelerofrafos, 2018), además de tener el potencial de registrar la respuesta sísmica de la estructura cuando un evento sísmico genera una aceleración mayor a un 1% de g en alguno de sus sensores.

3.1.2.Descripción de la estructura (Daza, 2003)

El puente tiene un largo de 383 m, se encuentra orientado en dirección Noreste-Suroeste, está conformado por 8 tramos. Cada tramo está soportado por cepas de hormigón armado H30, cuyas alturas varían entre 23.8 y 32.1 m. Además, el puente cuenta con juntas de placa dentada en ambos estribos para permitir el libre desplazamiento longitudinal.

3.1.2.1. Superestructura

El tablero está formado por una losa de hormigón armado H30, de 27 cm de espesor y de 18 m de ancho. El tablero es soportado por cuatro vigas continuas, separadas 4.4 m entre sí, de acero estructural de alta resistencia a la corrosión atmosférica con límite de fluencia mínimo de 3800 kg/cm² (COS-AR-COR 500 S.I.C.), de sección doble T de 2.8 m de altura y alas de ancho variable entre 30 y 80 cm. Estas vigas descansan sobre aisladores elastomericos de alto amortiguamiento.

3.1.2.2. Infraestructura

Las cepas son de hormigón armado y están conformadas por secciones doble cajón de 10 x 2 m cuyo espesor es de 25 cm, en sus extremos poseen cabezales de 15.8 m de ancho con 2 m de altura en su parte superior y de 10.5 a 13.5 m de ancho con 1.5 a 2 m de altura en su parte inferior.

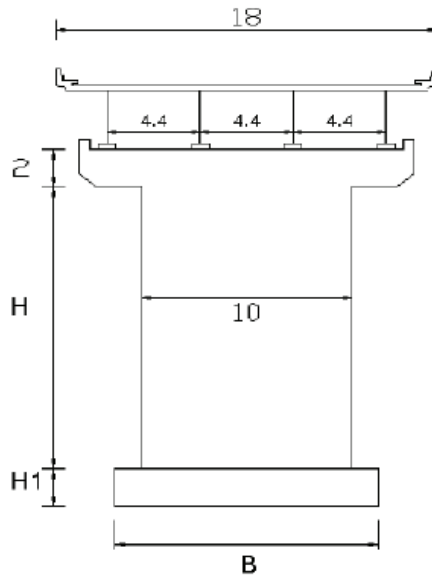


Ilustración 3-3: Corte transversal viaducto El Salto Largo, dimensiones en metros (Daza, 2003).

Tabla 3-1: Dimensiones para cada cepa viaducto El Salto Largo

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

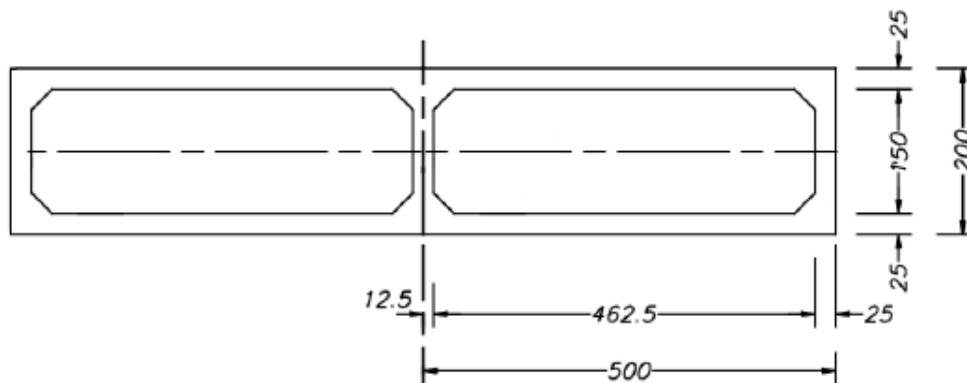


Ilustración 3-4: Corte visto en planta cepas viaducto El Salto Largo, dimensiones en centímetros

(Daza, 2003).

3.1.2.3. Fundaciones

Las 5 cepas centrales, de la 2 a la 6 (Ilustración 3-6), cuentan con fundaciones que consisten en 10 pilotes de hormigón armado de sección circular de 1 m de diámetro, cuya altura varía entre 14 y 32 metros. Las cepas C1, C7 y los estribos tienen una fundación directa.

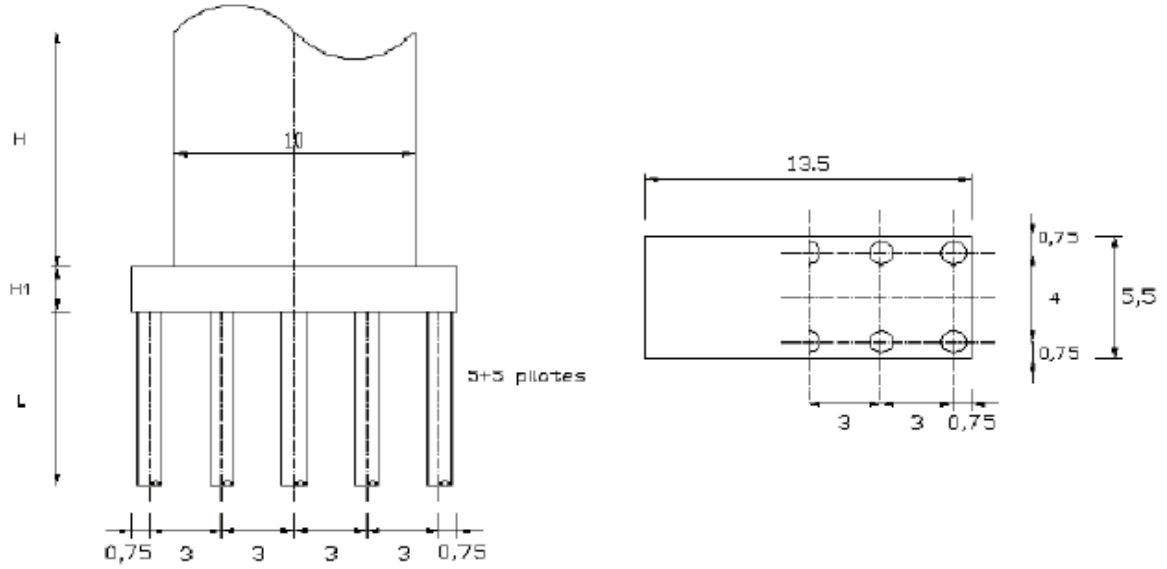


Ilustración 3-5: Corte transversal y vista en planta pilotes viaducto El Salto Largo, dimensiones en metros (Daza, 2003).

Tabla 3-2: Dimensiones de pilotes por ceba viaducto El Salto Largo

Ceba	L [m]	ϕ [m]
2	19.50	1.0
3	30.00	1.0
4	15.06	1.0
5	14.02	1.0
6	31.70	1.0

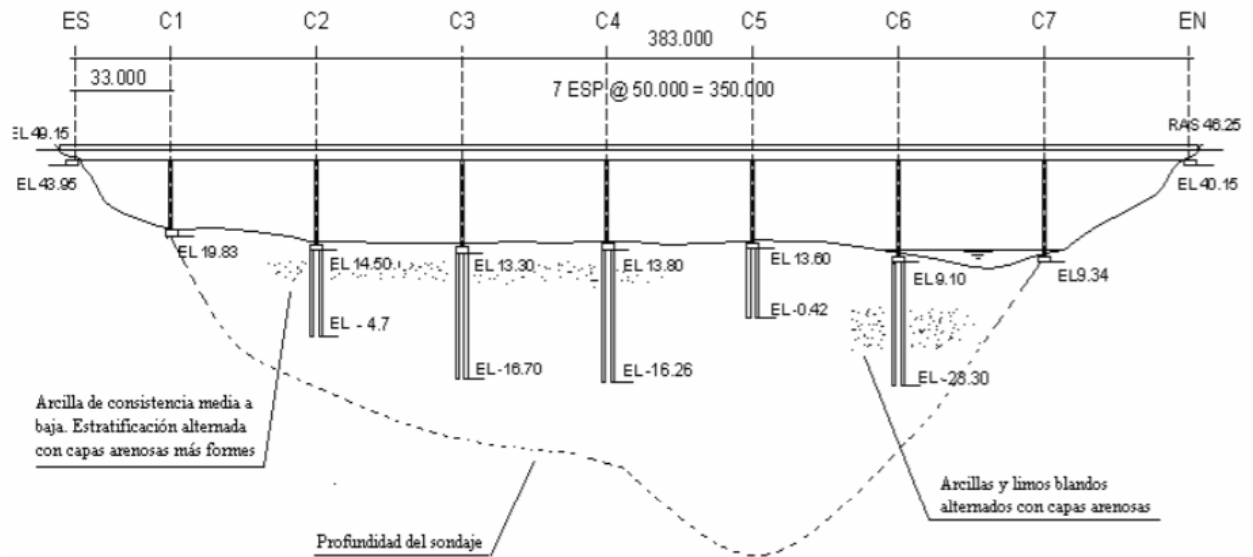


Ilustración 3-7: Bolsones de arcilla y limo presentes en el suelo de fundación del viaducto. (Berrios, 2003)

3.2. Registros de microvibraciones

En esta sección se presentan antecedentes de los instrumentos utilizados, la ubicación de los sensores y las descripciones del trabajo en terreno para la obtención de los registros de microvibraciones procesados posteriormente para la obtención de las propiedades dinámicas de las estructuras en estudio.

3.2.1. Instrumentación permanente registros años 1999, 2002 y 2018.

Los datos de microvibraciones fueron registrados con instrumentos instalados permanentemente en la estructura, los datos analizados corresponden a mediciones realizadas los años 1999, 2002 y 2018.

3.2.1.1. Instrumentos utilizados

Los instrumentos instalados corresponden a una red de acelerómetros mantenida y operada por la Red Nacional de Acelerógrafos (RENADIC), perteneciente al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

Esta red de acelerómetros es capaz de registrar simultáneamente 21 canales (18 sobre el puente y 3 de campo libre). Todo el sistema es controlado por un equipo de Kinematics

Dolomite+ (Red Nacional de Acelerografos 2018). Anteriormente se contaba con un sistema Withney de Kinematics para la recopilación y envío de datos.

Los sensores son de dos tipos: FBA-11 unidireccional y FBA-23 triaxial de Kinematics, los que miden aceleraciones de hasta 2g en variaciones de voltaje, el cual se transforma en su equivalente en aceleración según la ecuación de movimiento interna del instrumento (Romo, 1999).

3.2.1.2. Ubicación de sensores

La disposición de los sensores para los registros del año 1999 y 2002 se muestra a continuación.

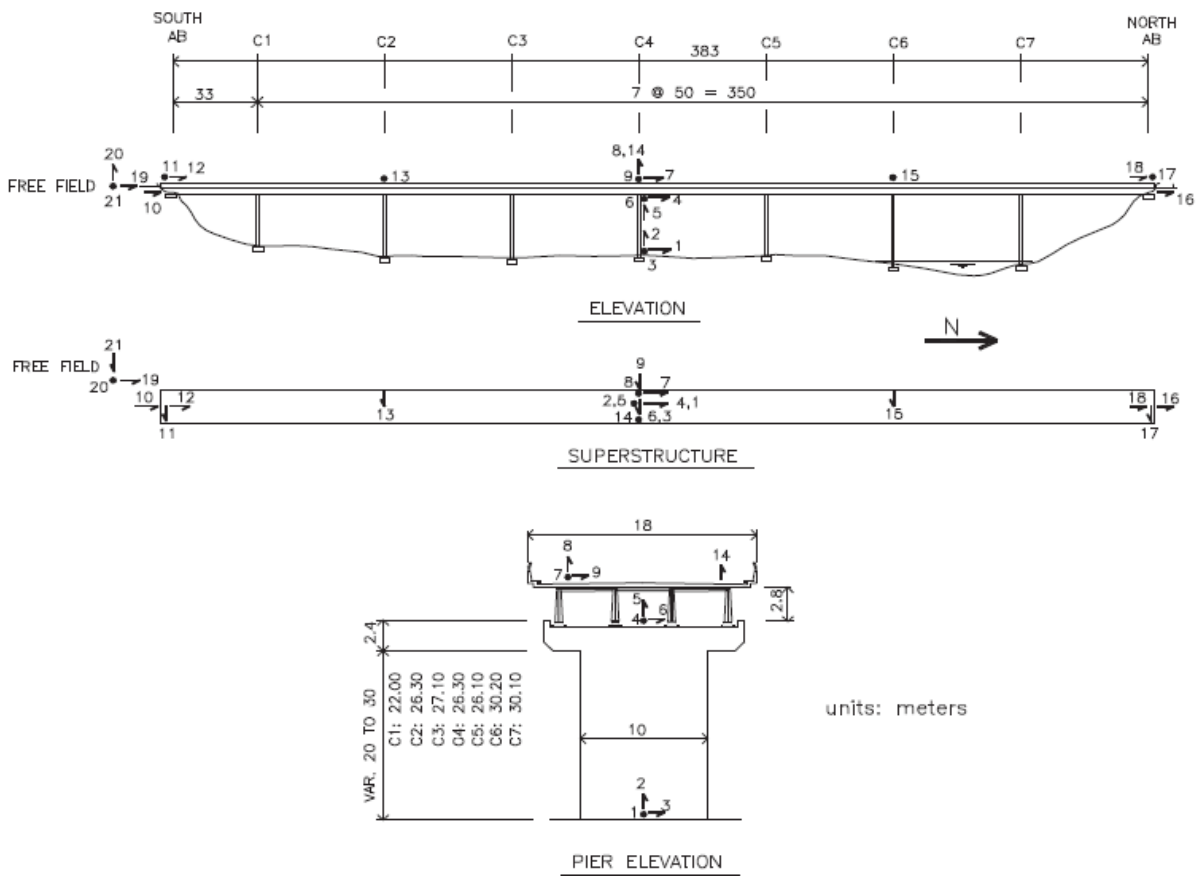


Ilustración 3-8: Posición sensores registros viaducto El Salto 1999 y 2002 (Sarrazin, Moroni, & Roesset, 2005).

La disposición de los sensores para el registro del año 2018 se muestra a continuación.

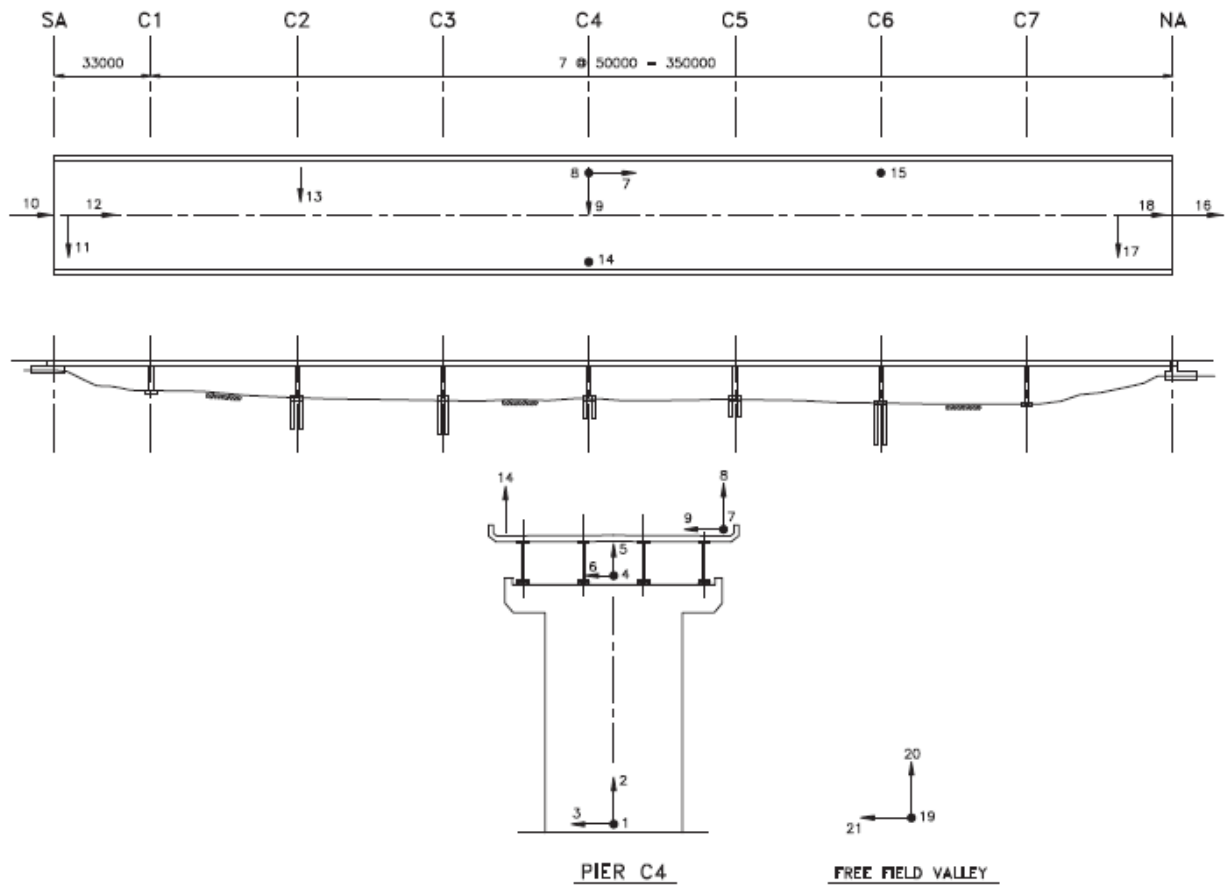


Ilustración 3-9: Posición sensores registro viaducto El Salto 2018 (Sarrazin, Moroni, Neira, & Venegas, 2013).

Notar que el único cambio entre ambas disposiciones de sensores es el sensor 15 que en el año 2003 pasa de estar en posición transversal a vertical.

3.2.1.3. Descripción registro de datos en terreno

Dado que estos registros se realizaron con la instrumentación permanente, no hubo trabajo en terreno para realizar las mediciones. Sin embargo, la duración y frecuencia de muestreo de los registros se muestran a continuación.

Tabla 3-3: Duración y frecuencia de muestreo registro viaducto El Salto 1999, 2002 y 2018

Año	Duración toma de datos [min]	Frecuencia de Muestreo [Hz]
1999	35	100
2002	62	100
2018	30	200

3.2.2. Instrumentación externa registro año 2018.

Esta medición se realizó el martes 08 de mayo del año 2018, fue realizada con instrumentos instalados de forma temporal en la estructura y se llevó a cabo un solo registro de microvibraciones.

3.2.2.1. Instrumentos utilizados

Los instrumentos utilizados para esta medición fueron 11 acelerómetros de fuerza balanceada uniaxiales EpiSensor ES-U2 de Kinematics, un sistema de adquisición de datos y filtrador de señales DAQBOOK multicanal de conversión analógica digital y un computador portátil. Todo lo anterior perteneciente al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. El sistema se energizó a partir de un camión inspector del que se dispuso gracias a la concesionara Vías Chile.



Ilustración 3-10: Camión inspector utilizado para la instalación de instrumentos en las cepas.

3.2.2.2. Ubicación de sensores

La disposición de los sensores para esta medición se muestra a continuación.

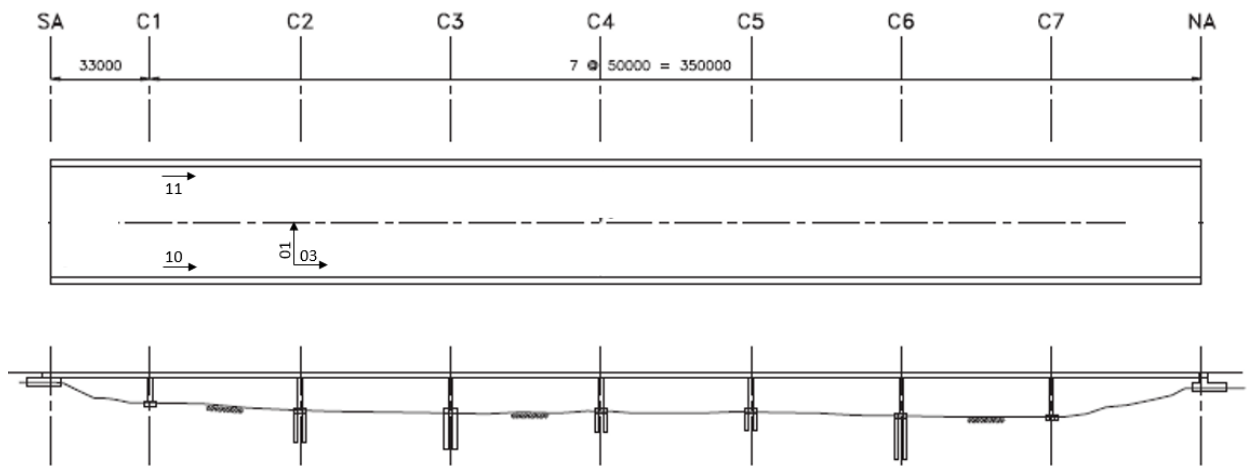


Ilustración 3-11: Planta posición sensores registro viaducto El Salto 2018.

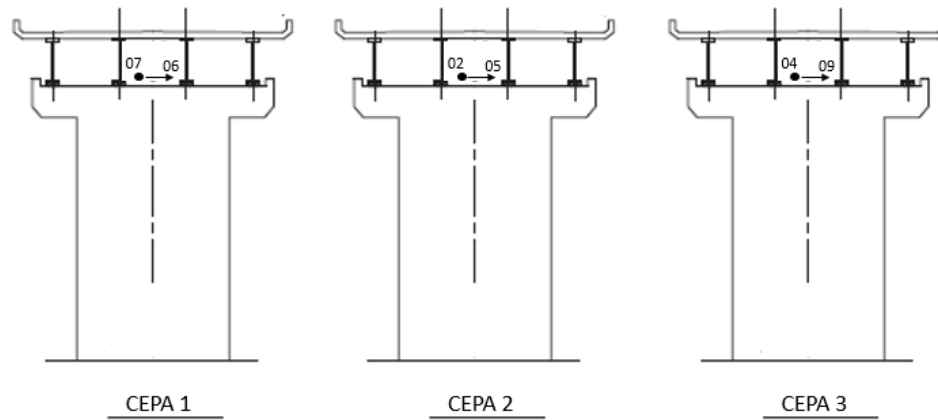


Ilustración 3-12: Elevación posición sensores registro viaducto El Salto 2018.

3.2.2.3. Descripción registro de datos en terreno

Esta medición se realizó en mayo del 2018, el registro tuvo una duración de 40 minutos entre las 16:00 y las 16:40 horas, lo cual corresponde a una hora de alto tráfico vehicular.

En el caso particular de esta medición se contaba con un camión inspector, el cual consiste en un vehículo especializado para la inspección de puentes y cuenta con una pasarela que permite acceder a la parte inferior de la superestructura. Es dado lo anterior que se aprovechó de instalar los sensores en el cabezal de las cepas 1, 2 y 3, lo cual nunca se pudo realizar con anterioridad debido a la imposibilidad de acceso.

La duración y frecuencia de muestreo de los registros se muestran a continuación.

Tabla 3-4: Duración y frecuencia de muestreo registro viaducto El Salto 2018

Año	Duración toma de datos [min]	Frecuencia de Muestreo [Hz]
2018	40	200

La configuración de estos instrumentos para la medición realizada se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3-5: Configuración instrumentos registro viaducto El Salto 2018

Rango de Voltaje	$\pm 2.5V$
Rango Aceleraciones	0.5g

3.3. Resultados

3.3.1. Instrumentación en cepas

3.3.1.1. Instrumentación permanente cepa 4 registros 1999, 2002 y 2018.

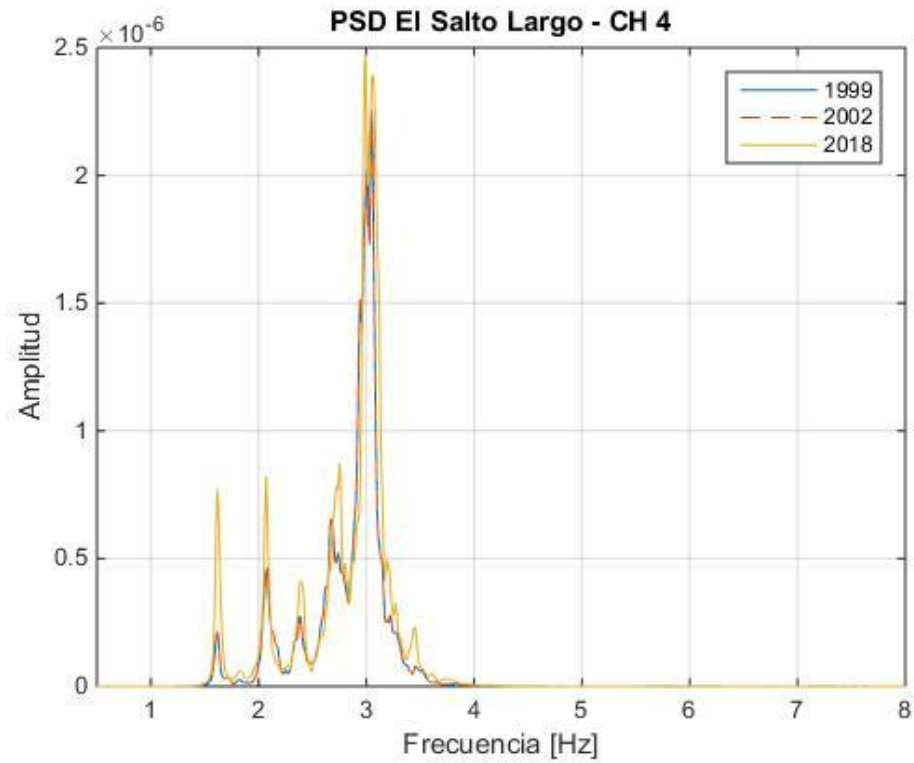


Ilustración 3-13: PSD registros años 1999, 2002 y 2018 del canal 4 instalado en sentido longitudinal en el cabezal de la cepa 4.

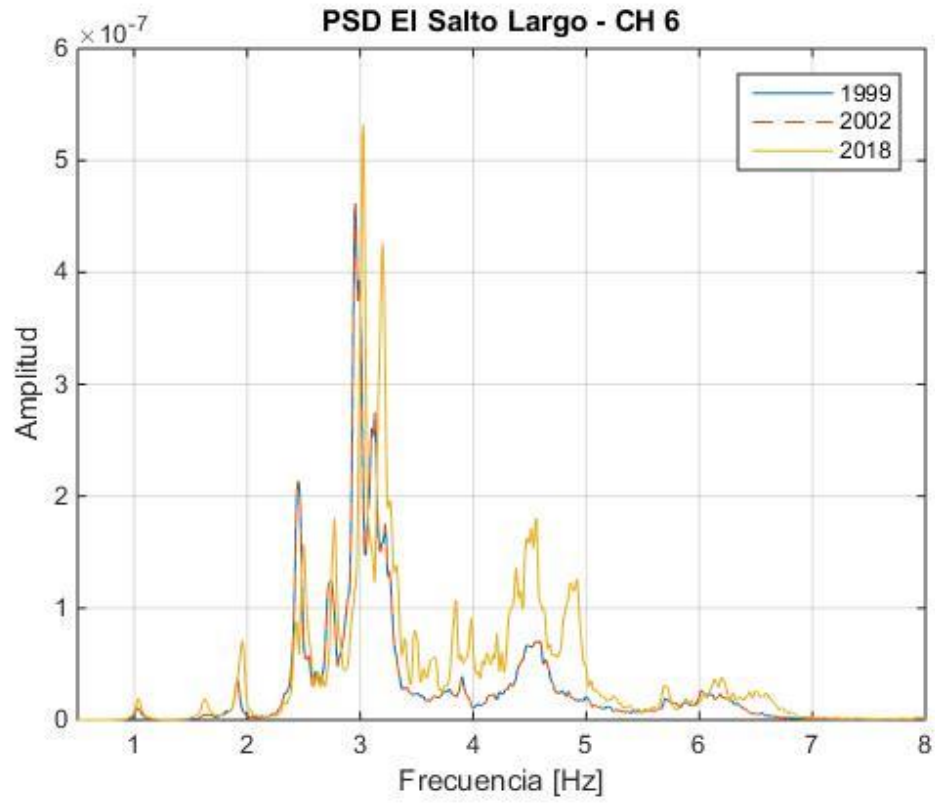


Ilustración 3-14: PSD registros años 1999, 2002 y 2018 del canal 6 instalado en sentido transversal en el cabezal de la cepa 4.

3.3.1.2. Instrumentación externa cepas 1, 2 y 3 registro año 2018.

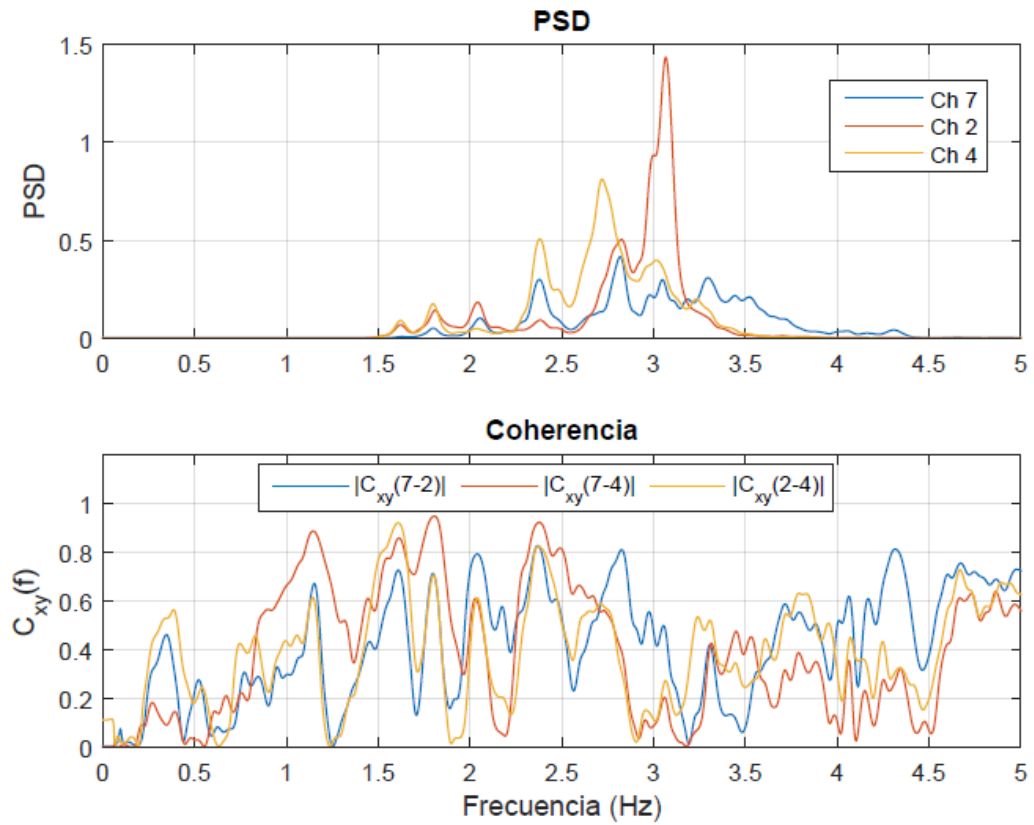


Ilustración 3-15: PSD y coherencia entre canales 7, 2 y 4 instalados en sentido longitudinal en los cabezales de las cepas 1, 2 y 3 respectivamente.

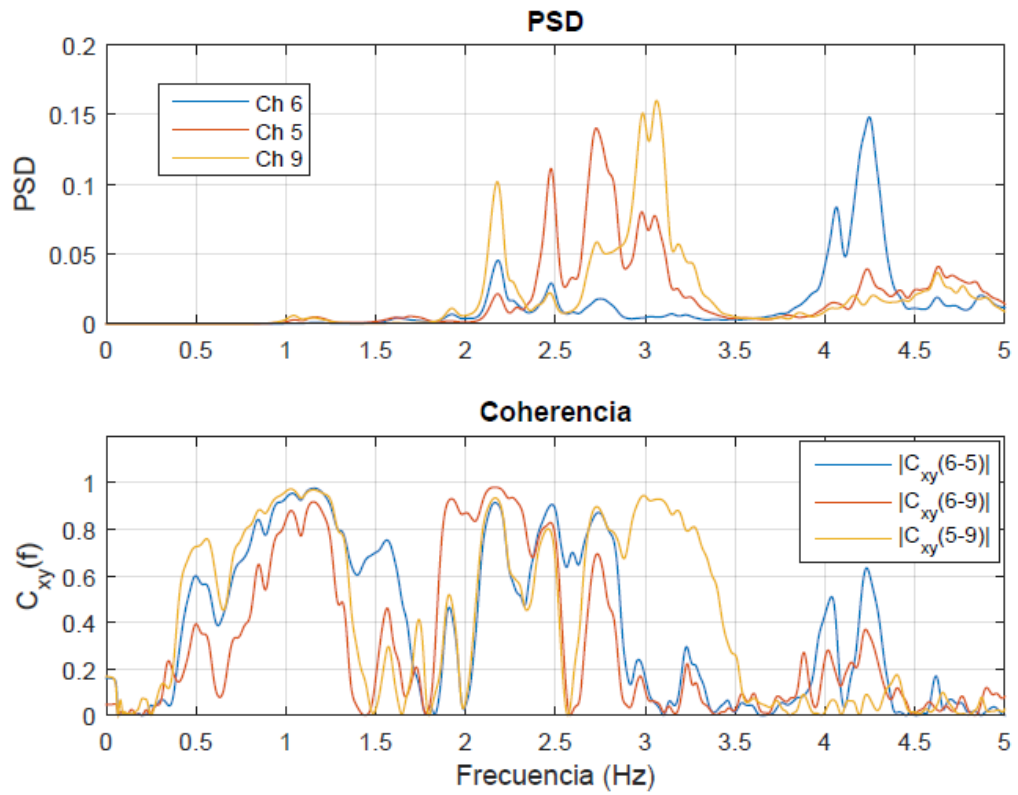


Ilustración 3-16: PSD y coherencia entre canales 6, 5 y 9 instalados en sentido transversal en los cabezales de las cepas 1, 2 y 3 respectivamente.

3.3.1.3. Comparación de resultados

En primer lugar, al comparar los resultados de los PSD obtenidos a partir de la instrumentación permanente de la cepa 4, se observa que en el sentido longitudinal no hay gran diferencia entre los resultados pre y post 2010, mientras que en el caso transversal se ve un aumento leve en las frecuencias fundamentales, es decir en la ubicación de los peaks del PSD. Cabe destacar que en este caso los valores de la amplitud del PSD no son comparables ya que la energía depende del tiempo de medición y de la excitación que tenga la estructura durante los ensayos, que puede estar fuertemente influenciada por el nivel de tráfico vehicular.

Por otro lado, al comparar los resultados obtenidos con la instrumentación externa localizadas en las cepas 1, 2 y 3 se puede ver que hay diferencias considerables en las frecuencias fundamentales que predominan el movimiento en las cepas en comparación a lo observado en la cepa 4.

En este contexto, para el sentido longitudinal se ven al menos 8 peaks que predominan los espectros de potencia para las cuatro cepas analizadas que están en torno a 1.5 Hz y 3.5 Hz. Se observa que debido al hecho que todas las cepas están conectadas con el tablero a través de elastómeros es que en cada una de ellas se observa en algún grado el efecto asociado a la respuesta de otras cepas y/o la respuesta del tablero; como sea, se entiende que el movimiento dominante en la cepa medida sea más independiente dado que la cepa está aislada parcialmente del tablero. En este sentido, de los resultados se concluye que la cepa 1 (cerca al estribo) tendría una frecuencia cercana a los 3.3 Hz, la cepa 2 tendría una frecuencia cercana a los 3.1 Hz, la cepa 3 tendría una frecuencia cercana a los 2.7 Hz, la cepa 4 tendría una frecuencia cercana a los 3.0 Hz. Se observa que en el estribo se tendría una frecuencia cercana a los 4.3 Hz.

Por otro lado, se infiere que otras cepas (no medidas) tendrían una frecuencia cercana a los 2.4, 2.8 y 3.0 Hz y se plantea la hipótesis que la respuesta del tablero estaría descrita por una frecuencia cercana a los 1.6, 1.7 y 2.0 Hz.

Realizando un análisis similar para el sentido transversal, se concluye que la cepa 1 tendría una frecuencia cercana a los 4.1 Hz, la cepa 2 tendría una frecuencia en torno a los 2.7 Hz, la cepa 3 y 4 tendrían una frecuencia cercana a los 3.0 Hz. Se observa que existirían otras cepas con frecuencias cercanas a los 2.2 y 2.5 Hz. Se plantea la hipótesis que el estribo estaría caracterizado por una frecuencia entre los 4.3 Hz a los 4.5 Hz. Además se tendría que la frecuencias del tablero (que se expresan en menores energías en las cepas) serían cercanas a los 1.0, 1.2, 1.6 y 1.9 Hz.

3.3.2. Instrumentación permanente registros años 1999, 2002 y 2018.

3.3.2.1. Diagrama de estabilidad registro (a990313/Canales 7,9,11,12,13,15,17 y 18) planta tablero 1999

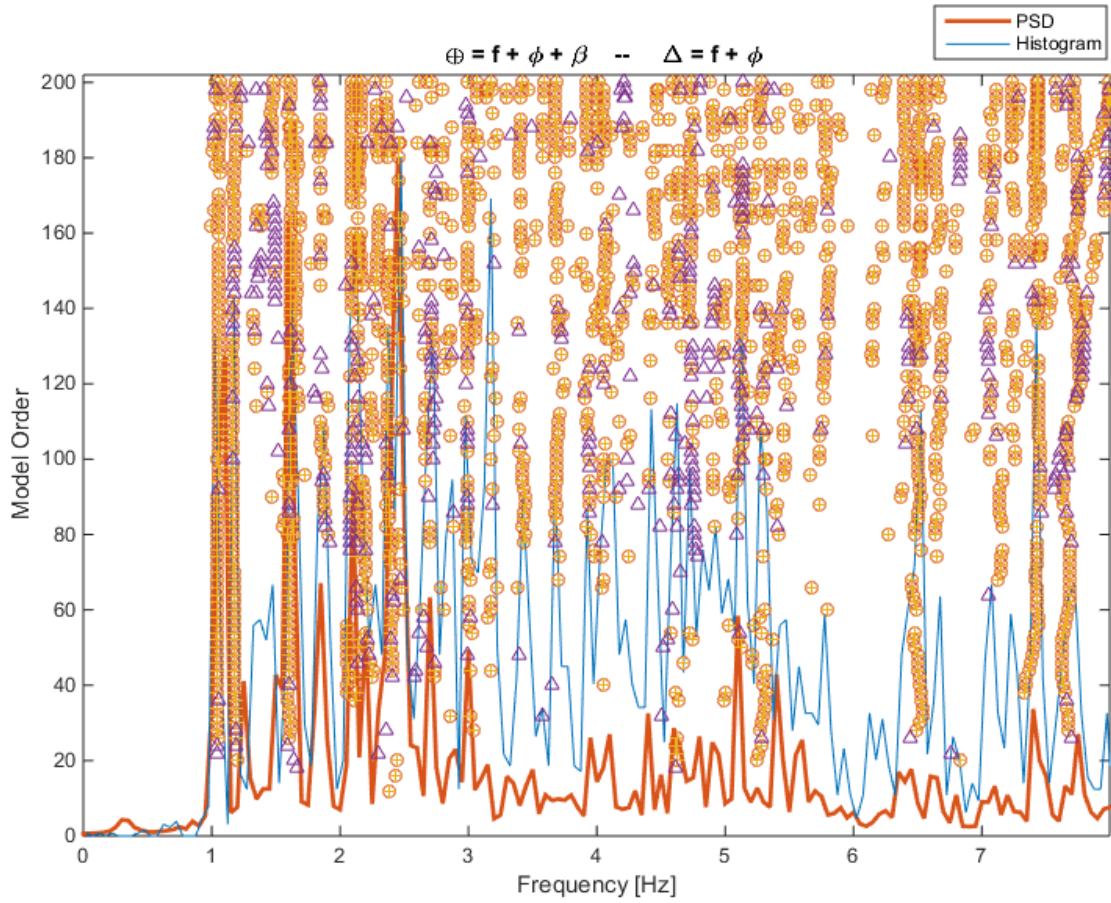


Ilustración 3-17: Diagrama de estabilidad planta tablero El Salto Largo 1999.

Tabla 3-6: Frecuencias y amortiguamientos planta tablero El Salto Largo 1999

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.049	0.36	2.22	0.07	33
1.175	0.82	5.24	0.16	29
1.602	0.37	3.18	0.11	21
2.090	0.21	0.72	0.02	19
2.140	1.25	1.30	0.04	20
2.399	1.99	1.81	0.04	13
2.702	1.71	0.85	0.02	8
2.994	0.76	0.75	0.02	9
3.412	1.91	2.70	0.12	6
3.697	2.54	1.75	0.05	10
4.047	2.68	0.60	0.02	12
4.229	3.41	5.34	0.17	9
4.459	2.44	1.14	0.03	8
4.712	4.35	0.40	0.01	15
5.475	5.28	0.95	0.03	11
5.718	5.35	1.32	0.04	7
6.597	7.95	2.18	0.06	15
7.192	6.97	1.00	0.02	12
7.444	3.81	1.41	0.04	13
7.687	4.38	3.24	0.09	28

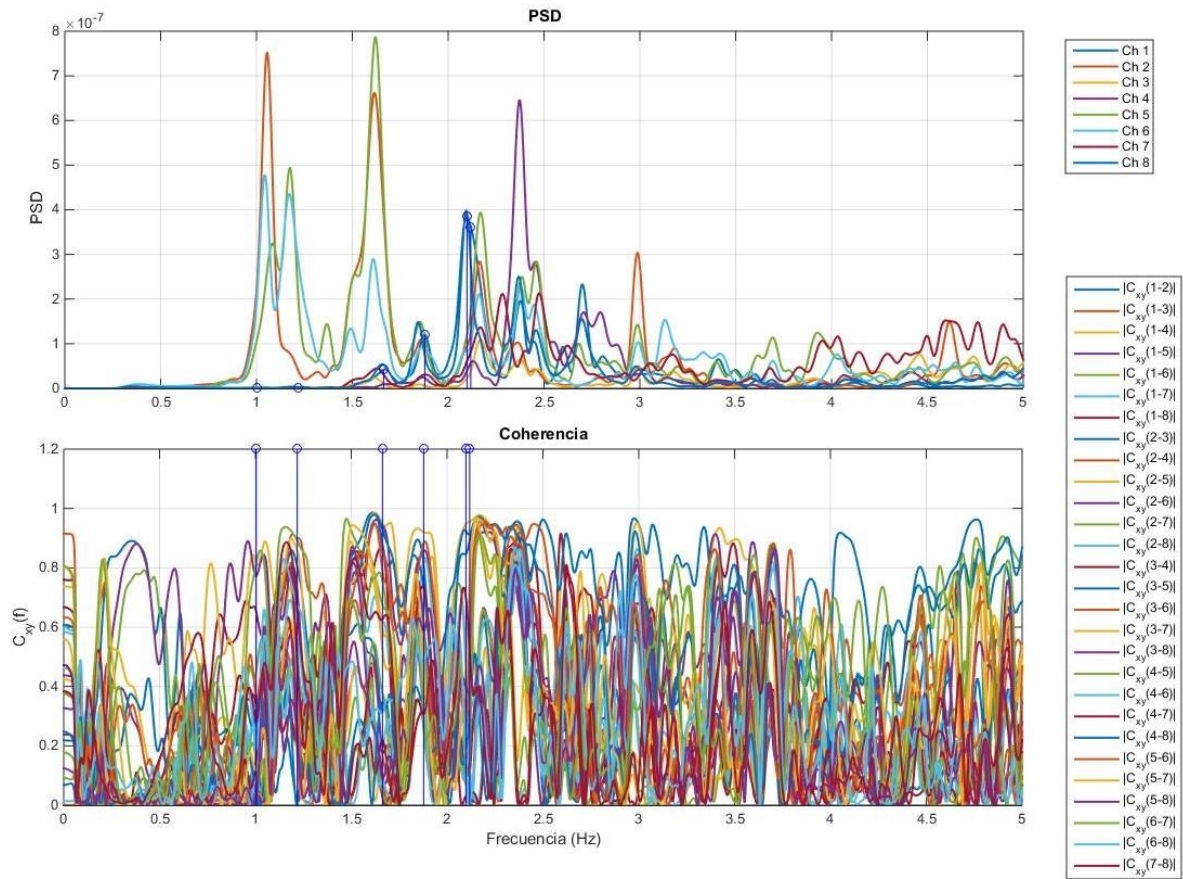


Ilustración 3-18: Espectros de Potencia y Coherencia El Salto Largo 1999.

Tabla 3-7: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	7	L
Ch2	9	T
Ch3	11	T
Ch4	12	L
Ch5	13	T
Ch6	15	T
Ch7	17	T
Ch8	18	L

3.3.2.2. Formas modales planta tablero 1999

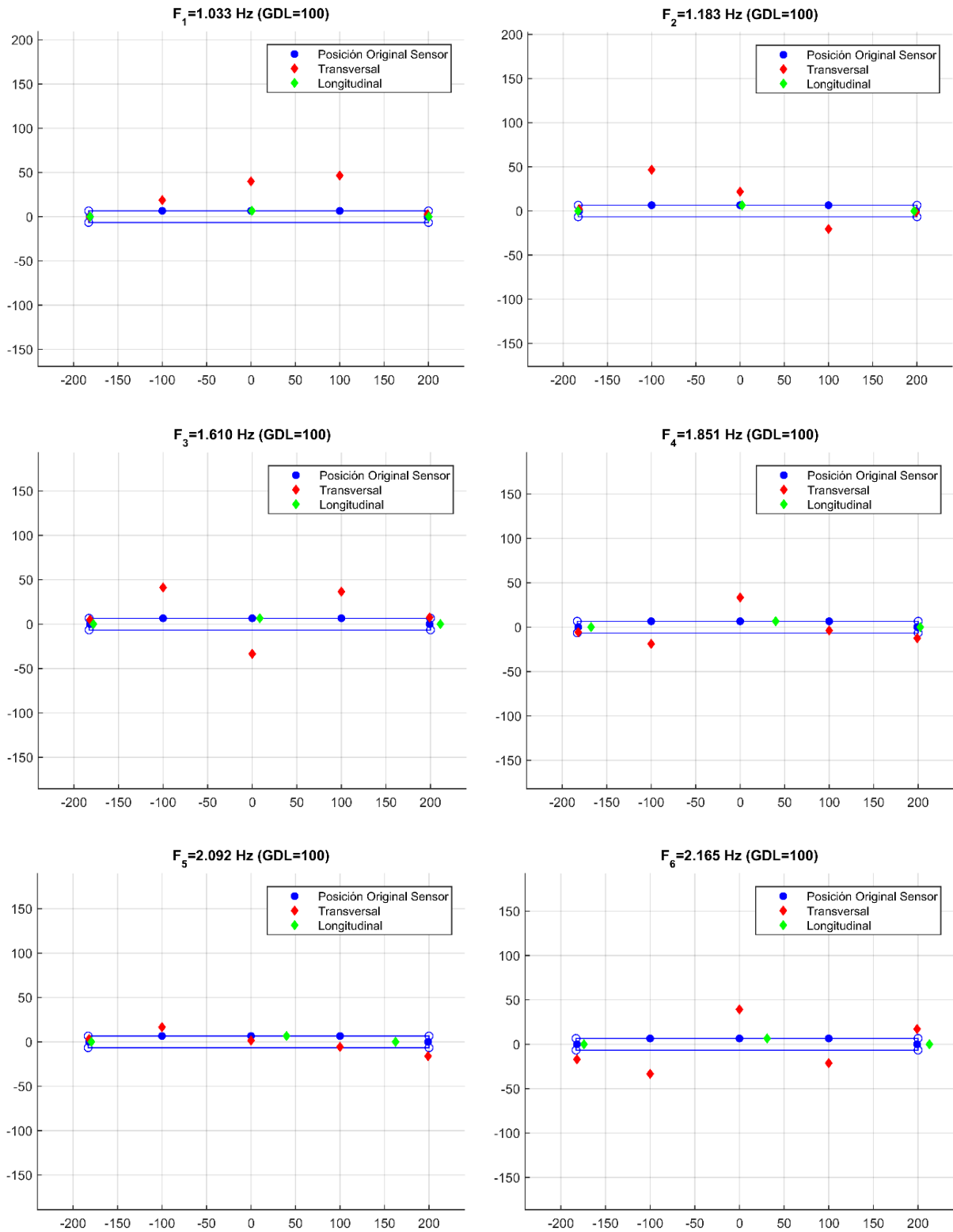


Ilustración 3-19: Formas Modales planta tablero El Salto Largo 1999.

3.3.2.3. Diagrama de estabilidad registro (micro_A021114V1/Canales 7,9,11,12,13,15,17 y 18) planta tablero 2002

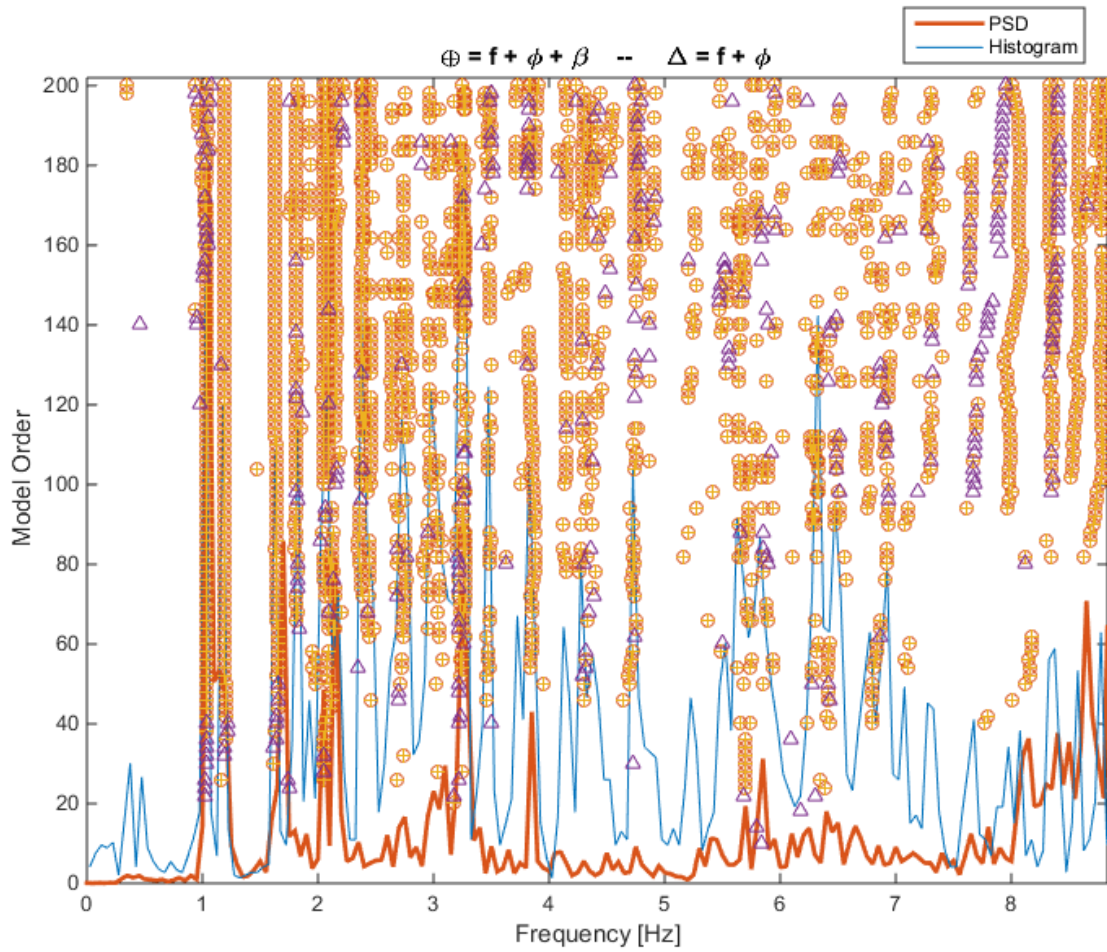


Ilustración 3-20: Diagrama de estabilidad planta tablero El Salto Largo 2002.

Tabla 3-8: Frecuencias y amortiguamientos planta tablero El Salto Largo 2002

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.030	0.29	3.01	0.09	51
1.196	0.35	2.80	0.07	75
1.632	0.56	3.02	0.08	62
1.814	0.36	1.31	0.04	24
2.052	1.35	1.69	0.05	35
2.155	0.54	1.01	0.03	13
2.378	0.36	1.43	0.04	23
2.643	1.12	3.58	0.13	11
2.755	2.52	2.66	0.07	11
2.961	2.12	1.52	0.04	9
3.054	1.12	1.87	0.05	10
3.263	0.56	2.35	0.07	33
3.478	0.64	1.85	0.07	9
3.882	1.51	2.44	0.09	10
4.147	0.51	1.57	0.05	21
4.296	0.66	1.32	0.04	16
4.738	0.40	0.90	0.03	12
4.905	1.72	1.47	0.13	11
5.245	4.19	1.25	0.04	6
5.723	4.20	3.48	0.09	14
5.880	6.77	0.72	0.02	6
6.335	2.39	1.42	0.04	8
6.913	2.32	1.66	0.06	10
7.301	3.03	6.11	0.19	20
7.662	1.93	0.57	0.02	8
8.050	3.56	3.65	0.13	9
8.733	8.34	2.57	0.08	28

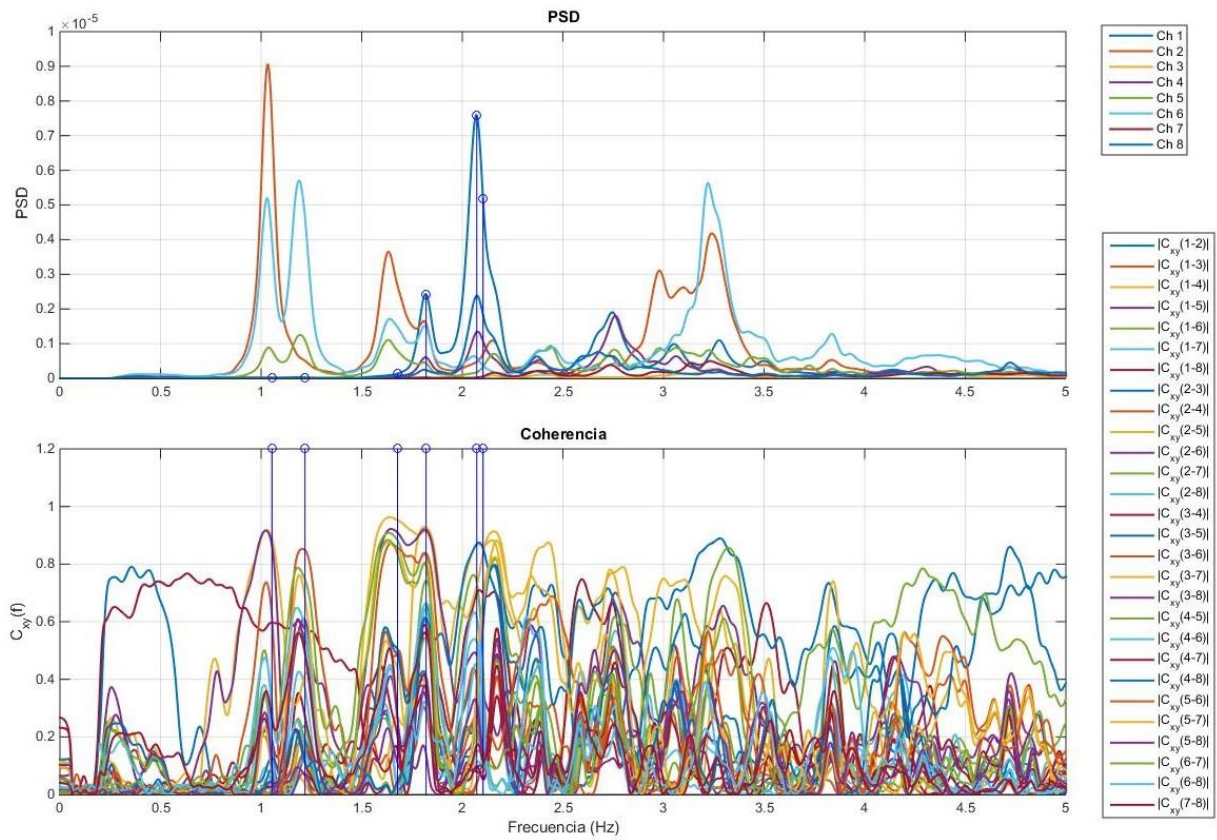


Ilustración 3-21: Espectros de Potencia y Coherencia El Salto Largo 2002.

Tabla 3-9: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	7	L
Ch2	9	T
Ch3	11	T
Ch4	12	L
Ch5	13	T
Ch6	15	T
Ch7	17	T
Ch8	18	L

3.3.2.4. Formas modales planta tablero 2002

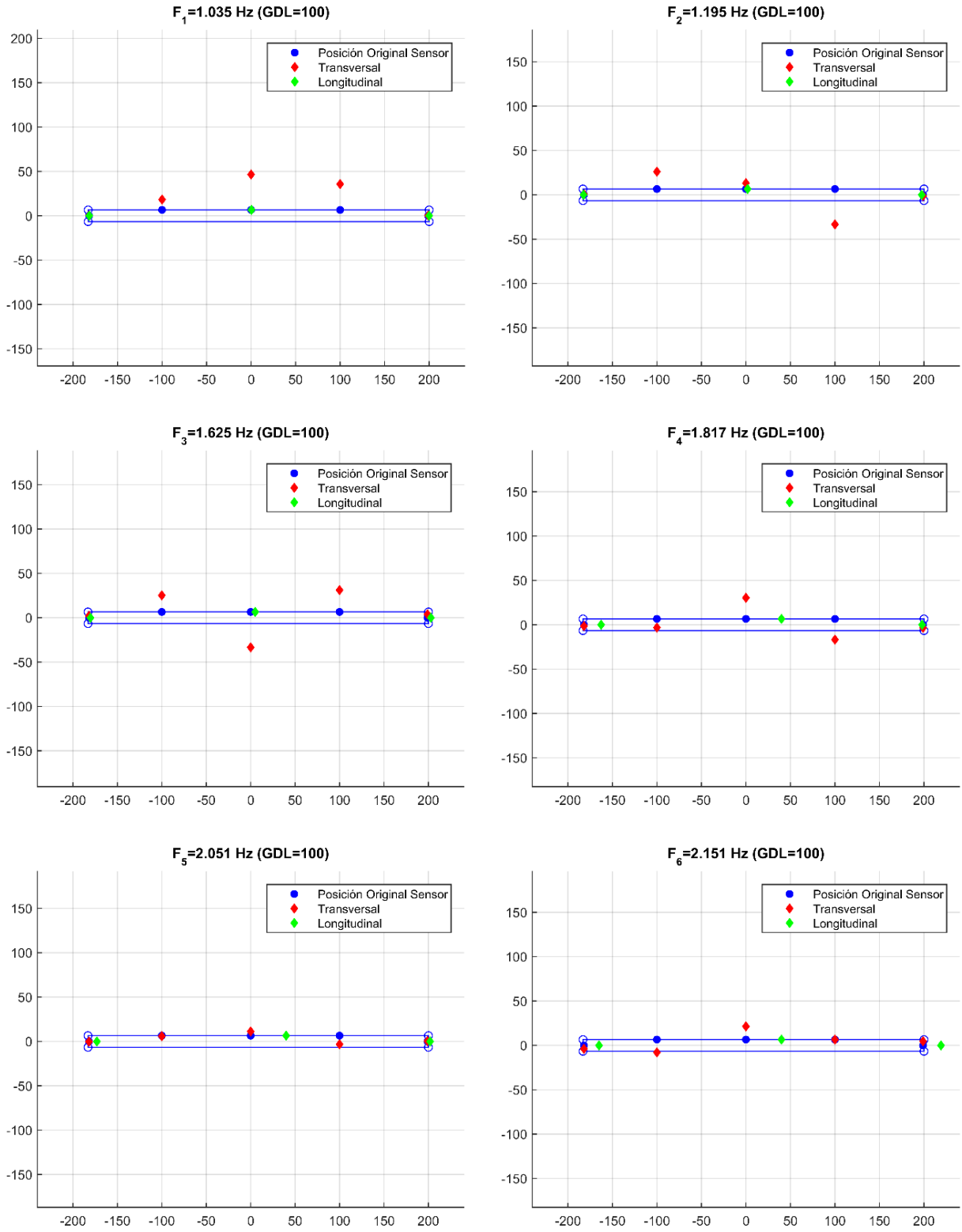


Ilustración 3-22: Formas Modales planta tablero El Salto Largo 2002.

3.3.2.5. Diagrama de estabilidad registro (m2018V1/Canales 7,9,11,12,13,17 y 18) planta tablero 2018

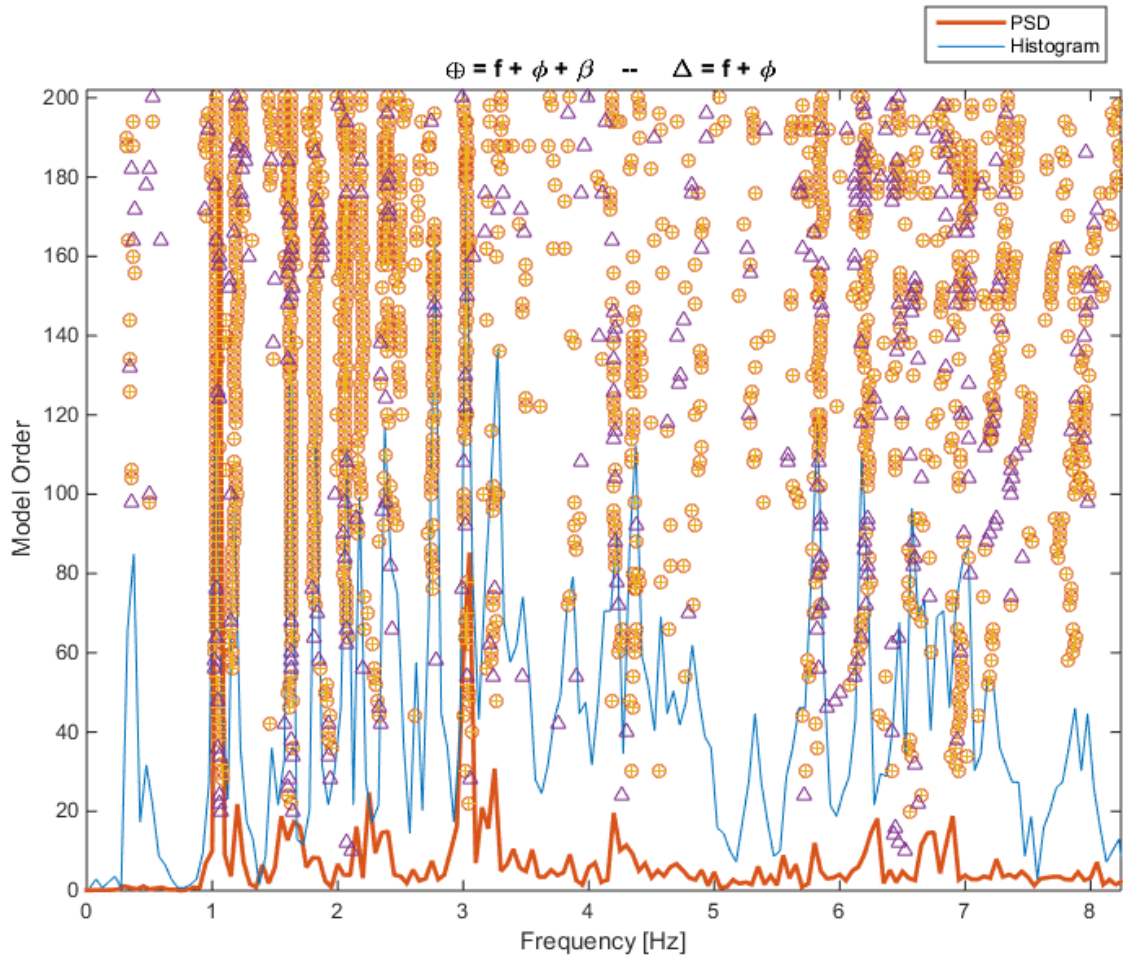


Ilustración 3-23: Diagrama de estabilidad planta tablero El Salto Largo 2018.

Tabla 3-10: Frecuencias y amortiguamientos planta tablero El Salto Largo 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.034	0.28	2.80	0.07	51
1.183	1.01	5.26	0.15	17
1.625	0.90	2.18	0.09	38
1.816	0.64	2.39	0.08	18
2.069	0.83	1.24	0.04	13
2.187	1.42	1.58	0.04	14
2.370	0.78	1.69	0.04	12
2.494	0.96	1.69	0.06	10
2.766	0.72	0.95	0.03	7
3.021	0.68	1.07	0.03	24
3.239	2.69	2.50	0.08	6
4.201	0.75	0.68	0.02	7
4.354	0.81	1.74	0.05	10
5.848	0.60	1.04	0.03	15
6.206	2.93	1.47	0.05	19
6.541	5.07	0.72	0.02	6
6.938	6.02	4.26	0.12	21
7.188	2.33	7.50	0.24	8
7.892	5.64	5.72	0.19	13

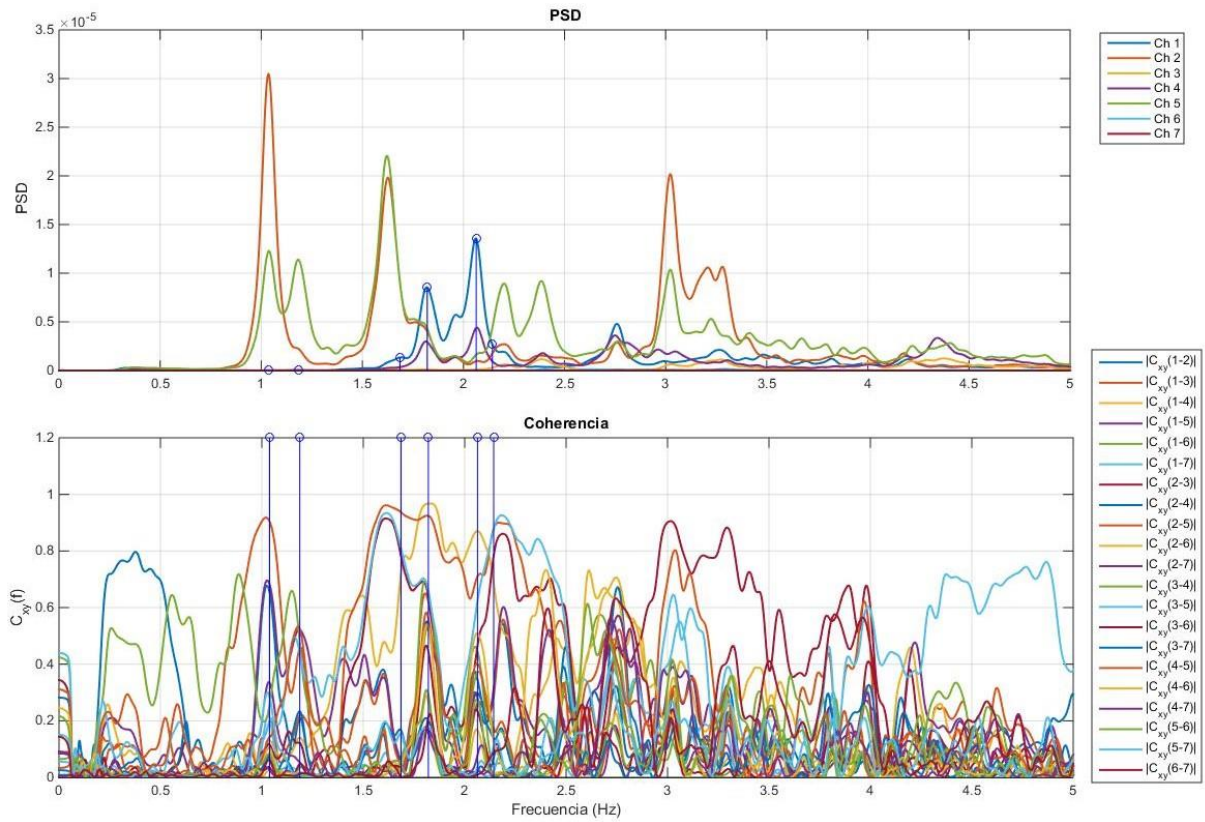


Ilustración 3-24: Espectros de Potencia y Coherencia El Salto Largo 2018.

Tabla 3-11: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	7	L
Ch2	9	T
Ch3	11	T
Ch4	12	L
Ch5	13	T
Ch6	17	T
Ch7	18	L

3.3.2.6. Formas modales planta tablero 2018

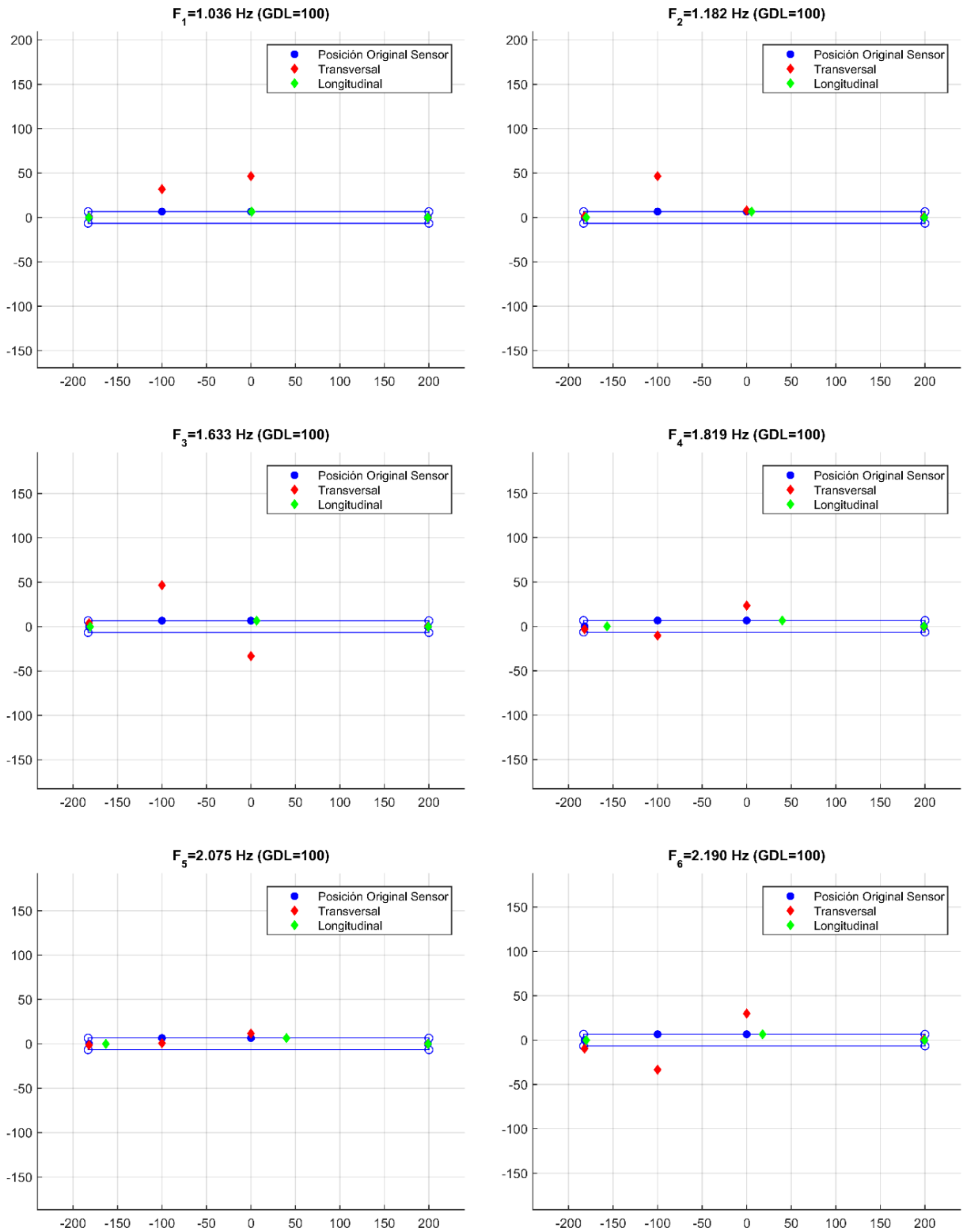


Ilustración 3-25: Formas Modales planta tablero El Salto Largo 2018.

3.3.2.7. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las frecuencias naturales asociadas a los modos identificados para cada registro correspondiente al tablero.

Tabla 3-12: Frecuencias naturales viaducto El Salto Largo instrumentación permanente

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)

También se agregan gráficos del MAC entre los tres años, obteniéndose de esta forma una mejor comparación de los modos fundamentales de la estructura.

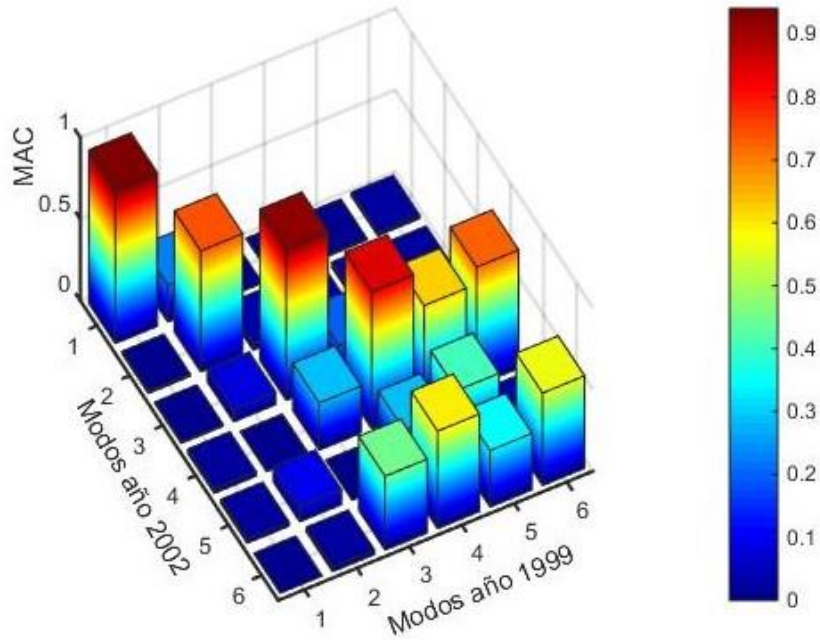


Ilustración 3-26: Comparación MAC registro 1999 y 2002 planta viaducto El Salto Largo.

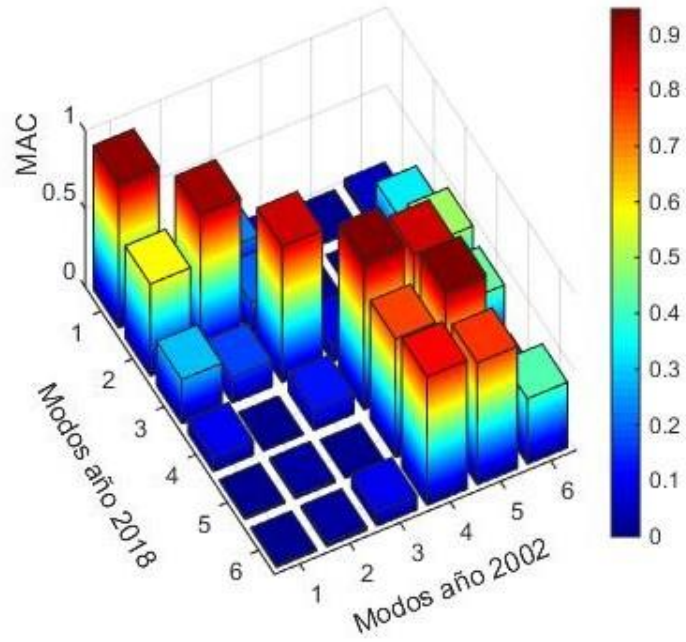


Ilustración 3-27: Comparación MAC registro 2002 y 2018 planta viaducto El Salto Largo.

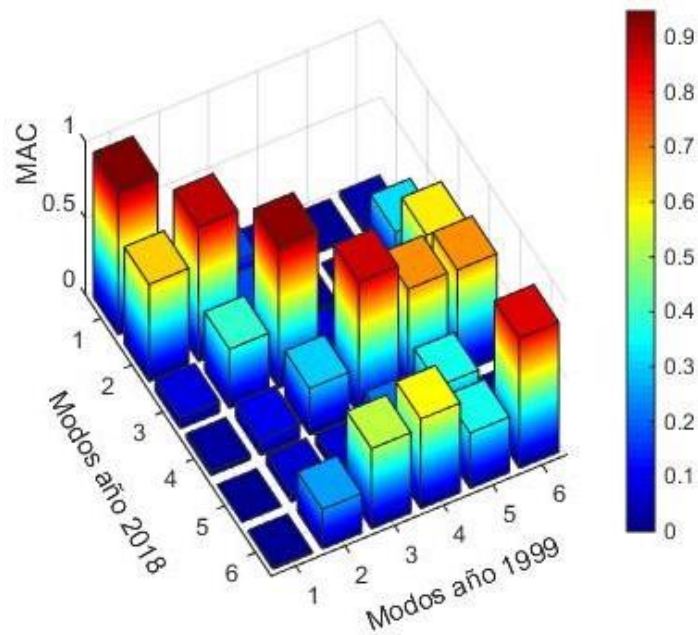


Ilustración 3-28: Comparación MAC registro 1999 y 2018 planta viaducto El Salto Largo.

En primer lugar, se destaca que se compararon los resultados con la memoria de D. Romo (1999) quien obtuvo los modos fundamentales de la estructura procesando los registros con análisis en frecuencias. De esta comparación se desprenden resultados similares en el registro del año 1999, lo cual valida el método SSI.

De los resultados se puede apreciar que los tres primeros modos se asocian a movimiento transversal del tablero; en este contexto el modo 1 es el modo que debiera asociarse al de mayor masa transversal del tablero. Por otra parte, los modos 4 y 6 tienen una componente longitudinal y transversal. En cambio, el modo 5 es fundamentalmente longitudinal. Cabe mencionar que tanto el modo 4 como el 5 deben asociarse a una importante participación en sentido longitudinal.

Al comparar los resultados obtenidos en el año 1999 versus 2002 se observa que las frecuencias asociadas a las formas modales desde la 1 a la 6 coinciden respectivamente, sin embargo, en los gráficos MAC se observa que los modos 5 y 6 no coinciden de la misma manera, fundamentalmente en lo relacionado a su movimiento longitudinal. Entre los años previos al 27F se observa una disminución del movimiento de los sensores del estribo norte asociado a los modos 3 a 6 y en el año 2018 una completa ausencia de este. Se plantea la hipótesis que el estribo norte debe estar parcialmente obstruido.

Otras variaciones leves pueden ser explicadas por efectos ambientales como cambios de temperatura, humedad, u otros factores, las cuales pueden producir cambios en las frecuencias de la estructura, estando la variación de frecuencias observadas entre diversos años dentro la variabilidad que se observa debidos exclusivamente a cambios ambientales.

En relación a los resultados previos al terremoto del 2010 y los posteriores (2018), se observa que las frecuencias asociadas a las formas modales coinciden, indicando que la estructura del tablero y sus apoyos elásticos no han tenido cambios significativos (al menos en lo referido a su comportamiento lineal). También se ve que en la medición del año 2018 en todas las formas modales el sensor ubicado en la cepa 2 tiene mayor movimiento transversal y en la forma modal 6 se observa una disminución en el movimiento longitudinal con respecto a las mediciones previas, los sensores ubicados en el estribo norte no se mueven en la medición del 2018.

Cabe destacar que en la medición del 2018 se cambió la posición de dirección transversal a vertical del sensor que se encuentra sobre la cepa 6 por lo que no aparece en las formas modales de la planta.

En combinación a los resultados obtenidos para las mediciones realizadas en las cepas, se puede concluir que existen varios modos de frecuencias entre 2.5 a 4.5 Hz relacionados a las respuestas locales de las cepas que se observan en el tablero (las cuales no han sido presentadas).

3.3.3. Instrumentación externa registro año 2018.

3.3.3.1. Diagrama de estabilidad registro planta tablero instrumentación externa 2018

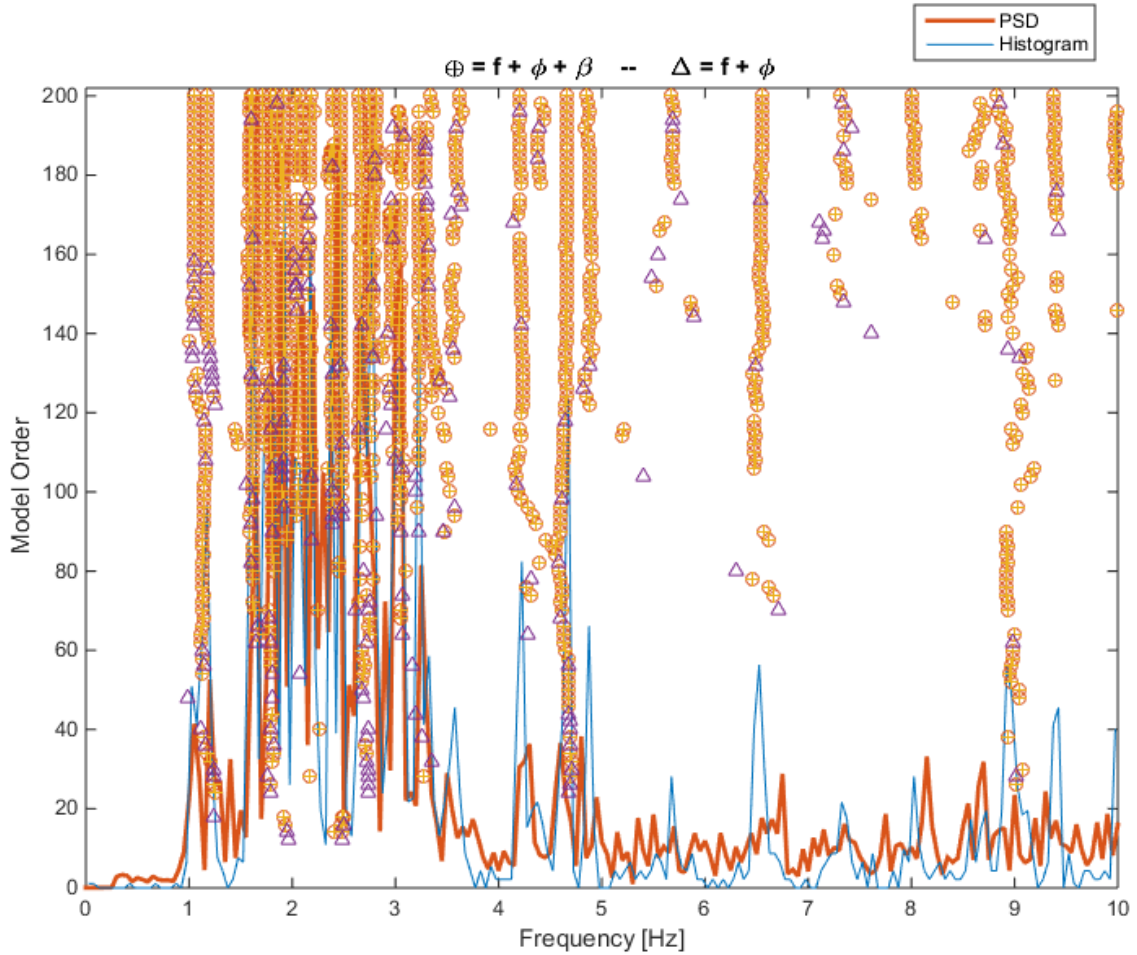


Ilustración 3-29: Diagrama de estabilidad planta tablero El Salto Largo instrumentación externa 2018.

Tabla 3-13:Frecuencias y amortiguamientos planta tablero El Salto Largo
instrumentación externa 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.050	0.19	3.77	0.12	17
1.137	0.93	7.53	0.16	20
1.172	0.29	4.12	0.11	25
1.614	0.20	1.85	0.05	22
1.718	0.66	1.83	0.05	14
1.799	0.40	1.83	0.06	22
1.918	0.30	1.41	0.04	21
2.049	1.15	1.82	0.06	13
2.169	0.72	1.87	0.06	12
2.382	0.37	1.93	0.05	20
2.476	0.59	1.33	0.04	21
2.788	1.52	2.30	0.07	18
2.962	1.38	4.68	0.15	11
3.043	1.01	1.94	0.05	14
3.229	0.35	1.88	0.04	19
3.545	1.89	5.90	0.20	7
4.227	1.11	1.60	0.05	9
4.649	1.79	1.33	0.03	22
4.883	1.01	3.93	0.13	12
5.686	0.73	7.41	0.16	7
6.537	2.39	3.08	0.07	27
7.350	2.70	8.31	0.22	9
8.946	4.58	5.99	0.14	12
9.394	0.91	0.78	0.03	7
9.977	0.85	0.80	0.02	7
10.287	1.11	0.57	0.02	12

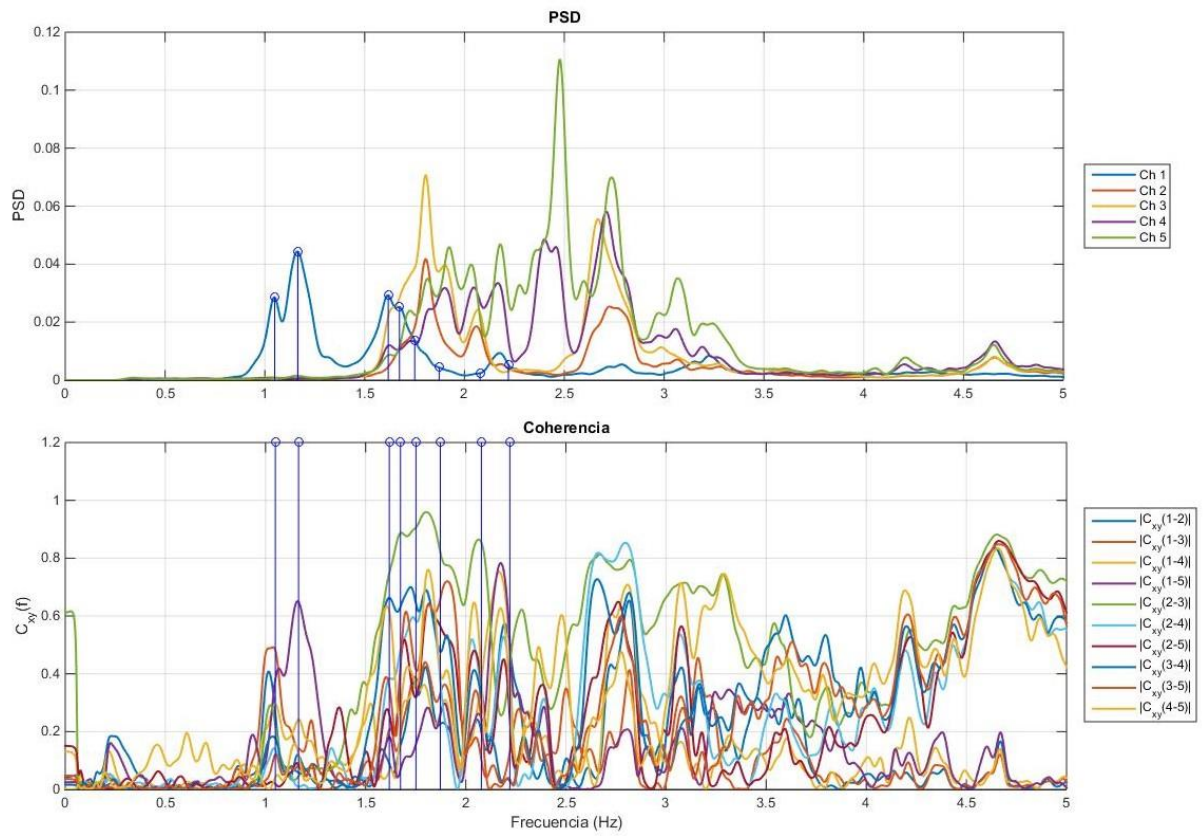
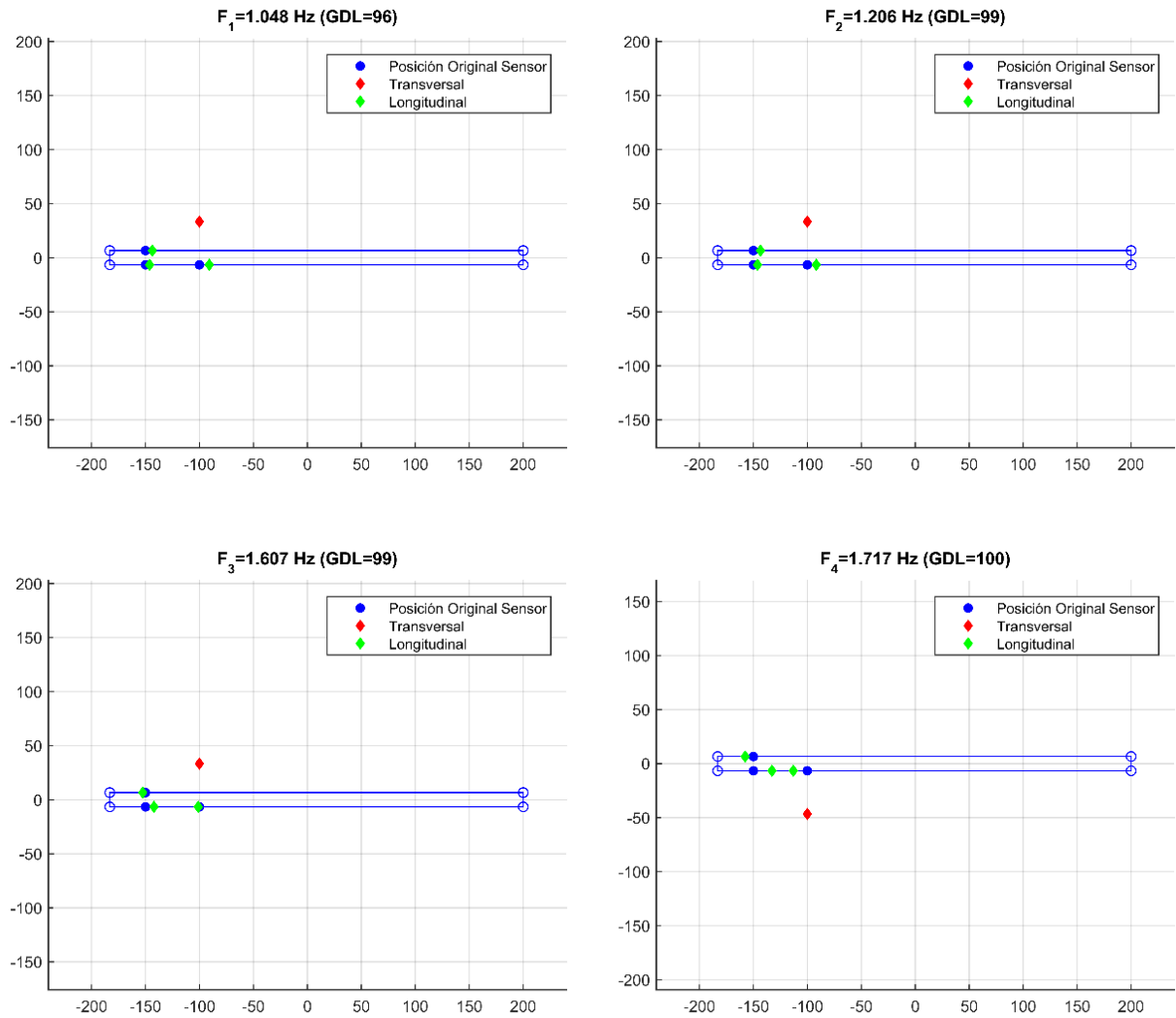


Ilustración 3-30: Espectros de Potencia y Coherencia El Salto Largo instrumentación externa 2018.

Tabla 3-14: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	01	T
Ch2	03	L
Ch3	08	L
Ch4	10	L
Ch5	11	L

3.3.3.2. Formas modales planta tablero instrumentación externa 2018



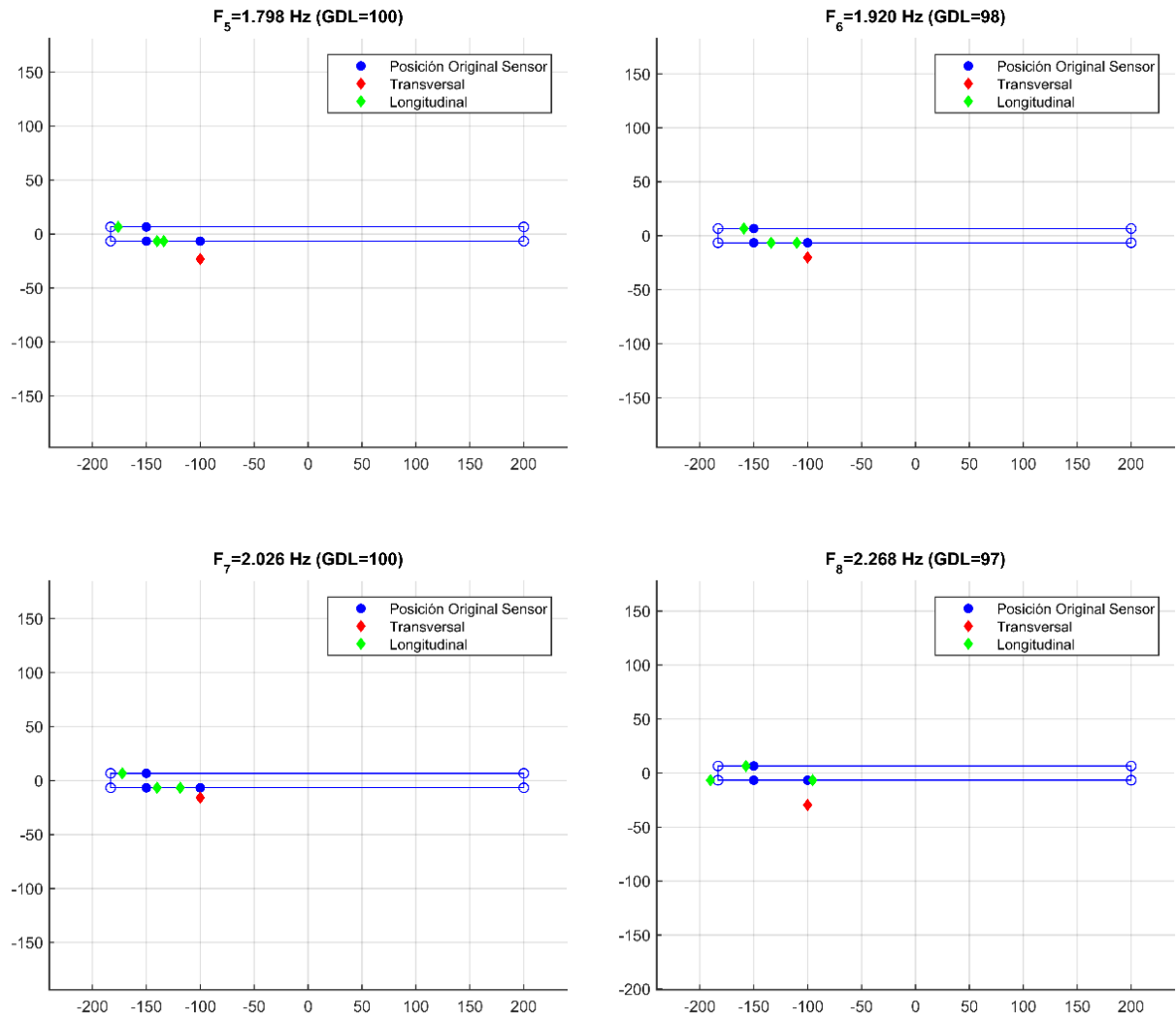


Ilustración 3-31: Formas Modales planta tablero El Salto Largo instrumentación externa 2018.

3.3.3.3. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las frecuencias naturales asociadas a los modos identificadas para cada registro.

Tabla 3-15:Frecuencias naturales El Salto Largo instrumentación permanente y externa 2018

Modo	Frecuencias 2018 [Hz]	Frecuencias 2018 Inst-Ext [Hz]
1	1.036(FM1)	1.048(FM1)
2	1.182(FM2)	1.206(FM2)
3	1.633(FM3)	1.607(FM3)
4		1.717(FM4)
5	1.819(FM4)	1.798(FM5)
6		1.920(FM6)
7	2.075(FM5)	2.026(FM7)
8	2.190(FM6)	2.268(FM8)

A pesar de que ambas mediciones se hicieron el 2018 con pocas semanas de diferencias las frecuencias varían levemente debido a cambios naturales que se producen en la estructura debido a factores ambientales y asociadas también a la precisión del sistema de medición y de los métodos de estimación de parámetros dinámicos.

Sin embargo, a pesar de que hubo variación en las posiciones de los sensores de la medición externa en relación a los sensores que se disponen en forma permanente se puede asociar las formas modales 1, 2, 3, 4, 5 y 6 de la instrumentación permanente con las formas modales 1, 2, 3, 5, 7 y 8 de la externa, validando el sistema de instrumentación externa.

Con respecto a la medición realizada con instrumentación externa es importante mencionar que para ella se disponía de un camión inspector que permitió el acceso a las cepas del viaducto para obtener nueva información, como por ejemplo el comportamiento de las cepas 01, 02 y 03. En este contexto, se observó que las cepas al tener diversas dimensiones y estar apoyadas en suelos distintos muestran una frecuencia distinta variando en el sentido longitudinal de 2.4 a 3.3 Hz. De igual forma, las frecuencias de las cepas en sentido transversal estarían descritas por frecuencias entre 2.2 a 4.1 Hz. Cabe mencionar que el

movimiento del tablero y las cepas definen que las frecuencias de los estribos serían cercanas a los 4.3 a 4.5 Hz.

Es dado lo anterior que varios los sensores restantes se dispusieron de manera distinta a la instrumentación permanente en el tablero lo que explica las diferencias entre los registros del 2018.

Sin embargo, se destaca que a pesar de que se dispuso un solo sensor transversal en el sistema de instrumentación externa, se lograron identificar las frecuencias fundamentales en dirección transversal en comparación a las obtenidas con la instrumentación permanente, lo cual validó este sistema de instrumentación para las otras estructuras que no tienen instrumentos instalados de manera fija.

Finalmente se desprende de esta medición la importancia de hacer un registro de calibración con los sensores ubicados en la misma posición, para poder validar el correcto funcionamiento de estos y del sistema de adquisición de datos.

Capítulo 4: Puente Cardenal Raúl Silva Henríquez

4.1. Caracterización de la estructura

4.1.1. Antecedentes generales

El puente Cardenal Raúl Silva Henríquez se construyó el año 2002 y se encuentra ubicado sobre el río Maule frente a Constitución. Une las rutas Putú y Chanco, conexión rutas M24K-M50, en la provincia de Talca, región del Maule ($35^{\circ}20'28.0''S$ $72^{\circ}23'35.0''W$).



Ilustración 4-1: Ubicación puente Cardenal Raúl Silva Henríquez (Google Maps, 2019).



Ilustración 4-2: Fotografía puente Cardenal Raúl Silva Henríquez (Google Maps, 2019).



Ilustración 4-3: Fotografía tomada desde el estribo noreste del puente CRSH 2018.

Este puente como muchas otras estructuras fue una de las afectadas durante el terremoto del Maule del 2010. En la sección 4.1.3 se detallan los daños sufridos por el puente debido al terremoto del 27F, el cual tuvo que ser reparado posteriormente. Cabe mencionar que a la fecha no se tiene certeza de cuales fueron los reforzamientos realizados. Sin embargo, se observó en terreno que se dispusieron cuatro llaves de corte de hormigón armado para trabar lateralmente al tablero en cada cepa entre cada viga. Además, se dispuso de un sistema de arrostramiento transversal en los apoyos del tablero sobre cada cepa para transmitir las cargas laterales y evitar pandeos locales. Adicionalmente, se colocó una plancha para atiesar transversalmente a las vigas del tablero que se apoyan sobre los estribos y se reforzaron localmente las planchas de las vigas que se apoyaban sobre el tablero. No se tiene claridad de sí el sistema de apoyo de las vigas sobre los estribos en sentido longitudinal fueron modificadas.

4.1.2. Descripción de la estructura (Benavides, 2004)

Este puente es una estructura formada por 22 tramos de 41.46 m cada uno, lo que da una longitud total de 912 m. Está dividido en 2 tableros continuos de 456 m con juntas de dilatación “JENE” de 5 cm en los estribos y “CETEC T-330” de 20 cm en la cepa central, donde se unen ambos tableros.

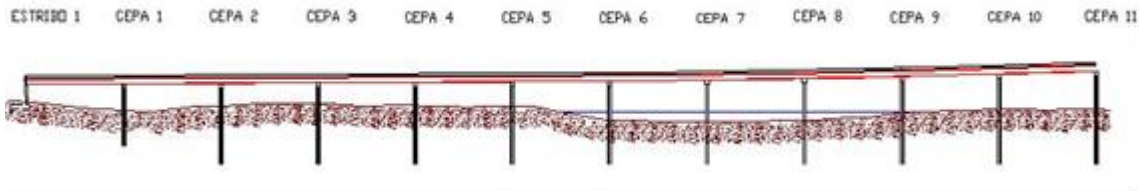


Ilustración 4-4: Vista longitudinal tramo norte puente CRSH (Benavides, 2004).

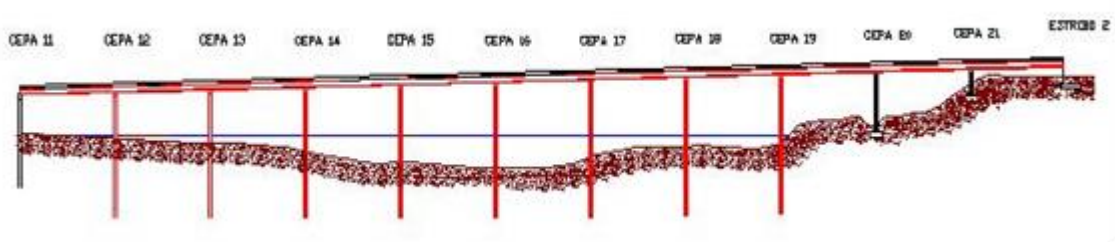


Ilustración 4-5: Vista longitudinal tramo sur puente CRSH (Benavides, 2004).

4.1.2.1. Superestructura

El tablero se compone de una losa de hormigón armado de 25 cm de espesor y 14 m de ancho, con 2 calzadas de 3.5 m de ancho, 2 bermas de 1.5 m y 2 pasillos peatonales de 2 m. El pavimento es de concreto bituminoso de 5 cm de espesor. La losa está unida a 3 vigas de acero de sección IN mediante conectores de corte. Las vigas tienen una longitud de 456 m, el alma es de 2m de altura y alas de ancho variable, entre 25 y 57 cm.

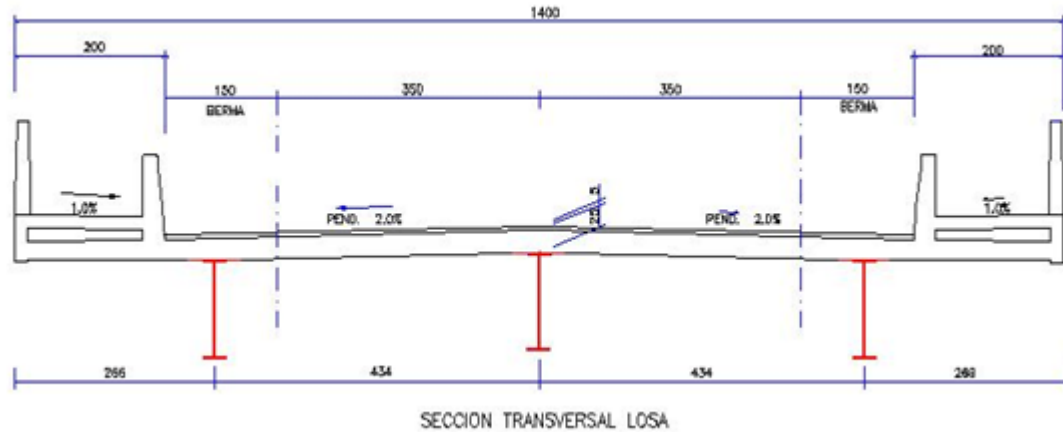


Ilustración 4-6: Sección transversal puente CRSH, dimensiones en centímetros (Benavides, 2004).

4.1.2.2. Infraestructura y Fundaciones

La infraestructura se compone de 21 cepas en total, las cuales son de 4 tipos: desde la 1 a la 5 constan de 2 pilas-pilotes de hormigón pre-excavados, de entre 22 a 29 metros de largo; las cepas de la 6 a la 11 tienen 3 pilas-pilotes de hormigón pre-excavado, de entre 30 a 33 metros de largo; las cepas de la 12 a la 19 son 3 pilas-pilotes de acero hincados, de 45 a 52 metros de largo y finalmente las cepas 20 y 21 que tienen 3 pilas de hormigón, de 24 y 13 metros de largo respectivamente, fundadas sobre un dado de 10x7 metros cuadrados de base y 2 metros de altura.

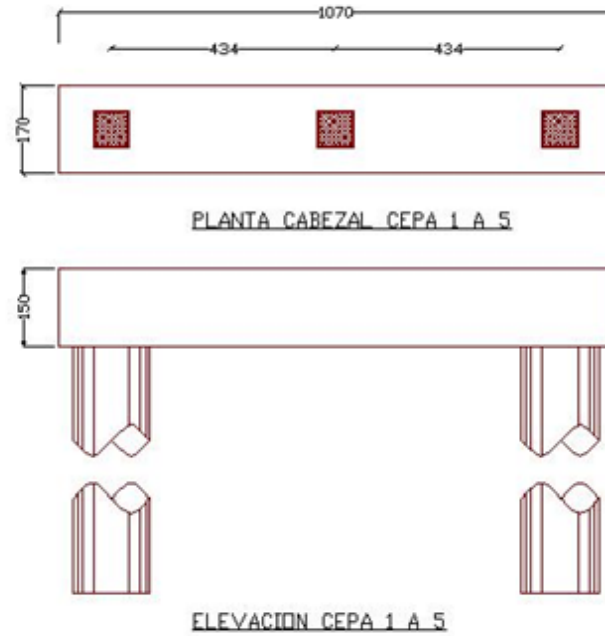


Ilustración 4-7: Planta y elevación cepas de la 1 a la 5 puente CRSH, dimensiones en centímetros(Benavides, 2004).

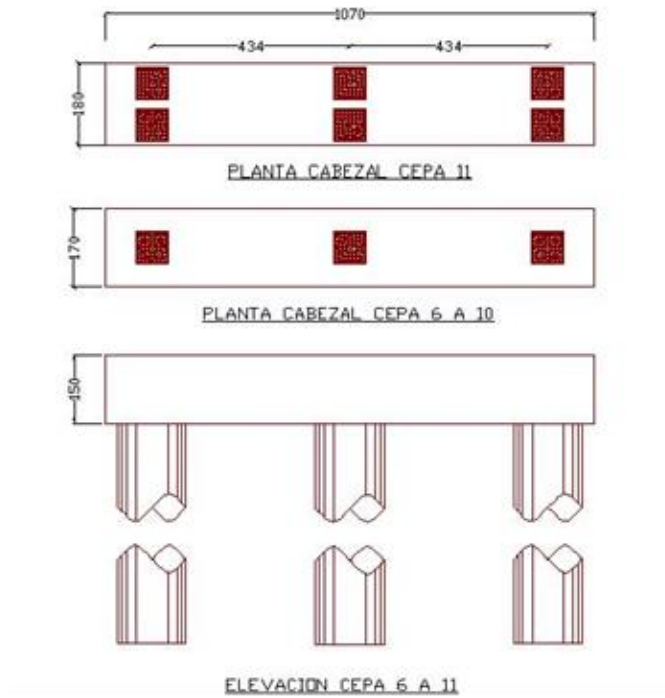


Ilustración 4-8: Planta y elevación cepas de la 6 a la 11 puente CRSH, dimensiones en centímetros (Benavides, 2004).

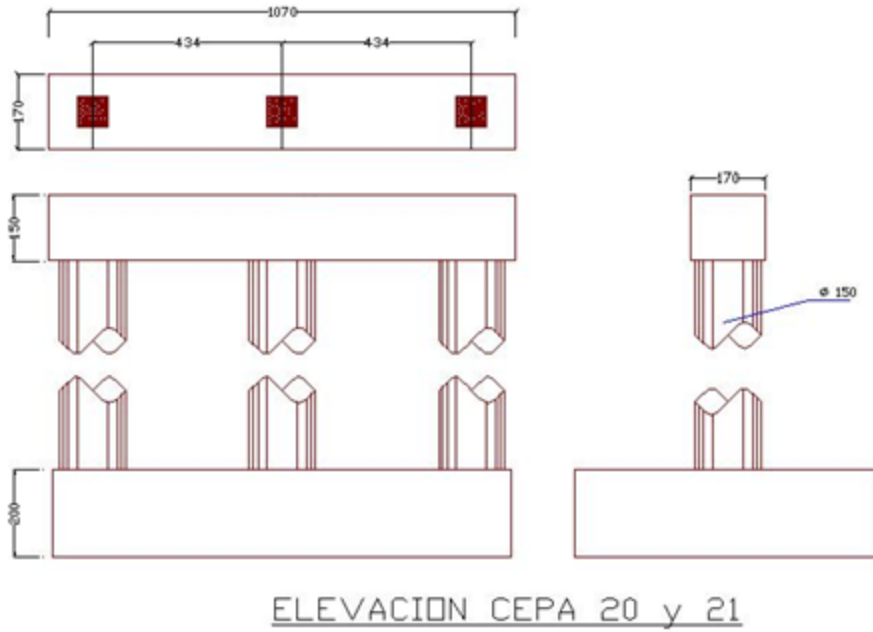


Ilustración 4-10: Planta y elevación cepas 20 y 21 puente CRSH, dimensiones en centímetros (Benavides, 2004).

Previo al terremoto del 27F, en todas las cepas, en el ala inferior de las vigas, existía una pieza metálica que tiene su base en el cabezal y que restringe su movimiento transversal de las vigas si este sobrepasa los 2 cm.

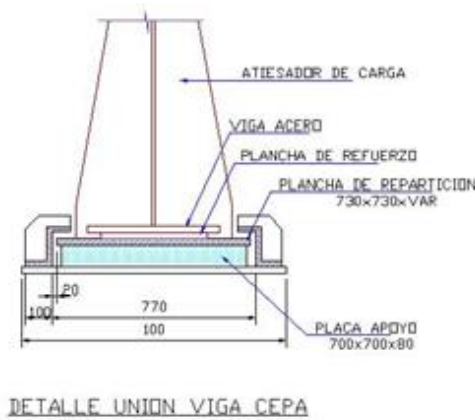


Ilustración 4-11: Detalle apoyo vigas sobre cepas puente CRSH, dimensiones en centímetros (previo a 2010).

En los estribos, las vigas se apoyan sobre placas de acero y se traban longitudinalmente al estribo mediante placas de apoyo de neopreno.

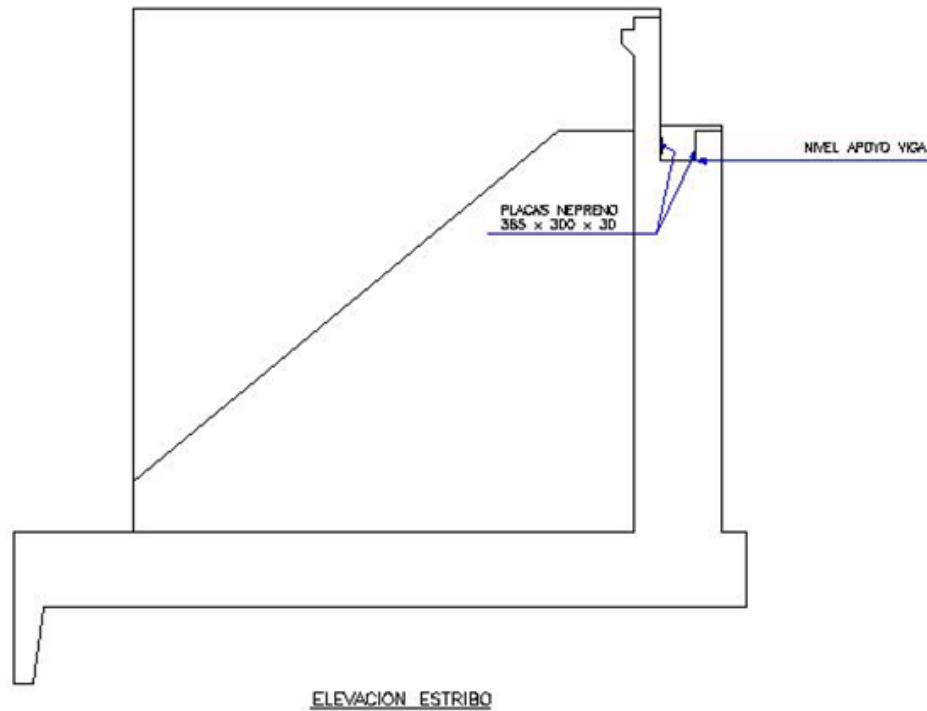


Ilustración 4-12: Elevación estribo norte puente CRSH.

El suelo de fundación del puente tiene una capacidad de soporte pobre, razón por la cual fue necesario el uso de pilotes profundos. En el tramo Norte, el suelo de fundaciones de mala calidad y el nivel máximo de socavación llega a una profundidad de 4 m. En el tramo Sur, el suelo también es de mala calidad y el nivel máximo de socavación sobrepasa los 15 metros de profundidad. En la cepa 20 y 21 aparece un estrato de suelo cementado que permite fundar las pilas sobre zapatas.

4.1.2.3. Sistema de aislación

Las vigas se apoyan sobre placas de neopreno de base de 70x70 cm² y 8 cm de alto, distribuidos en dos capas de neopreno de 2.5 mm como recubrimiento superior e inferior, cuatro capas de neopreno de 15 mm intercaladas entre cinco capas de acero de 3 mm.

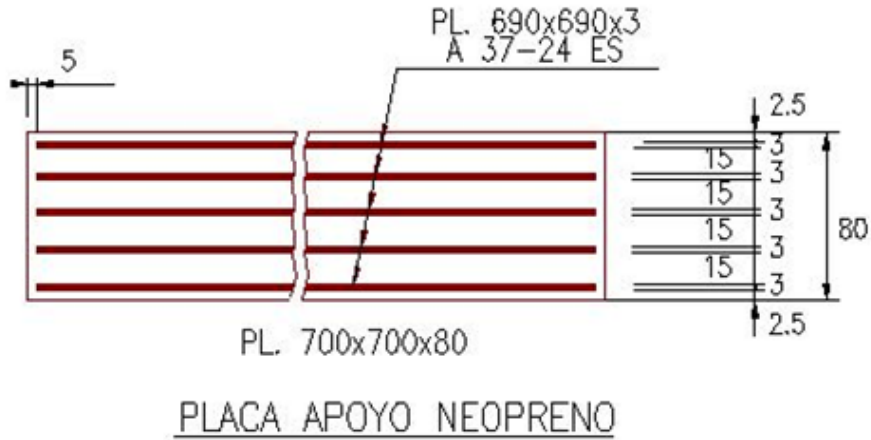


Ilustración 4-13: Detalle placas de apoyo de neopreno puente CRSH, dimensiones en centímetros.

4.1.3. Daños sufridos durante el terremoto del Maule

Muchas estructuras fueron afectadas por el terremoto del Maule del 2010 entre ellas el puente CRSH. En este contexto, Yen et al. (2011) describieron los daños sufridos por puentes debido al terremoto del 27F. A continuación, se presenta una traducción del segmento del documento que se refiere al puente Cardenal Raúl Silva Henríquez.

Durante el terremoto, la parte noreste del puente se movió desde oeste a este en dirección transversal. Todos los soportes laterales de acero se deformaron, lo cual queda evidenciado en el hecho que las vigas se desplazaran de las placas de neopreno sobre las cuales estaban apoyadas. En las cepas intermedias y en los estribos los diafragmas transversales se pandearon, tal como se muestra en la Ilustración 4-14. En el estribo noreste, el alma y las alas inferiores de las tres vigas se fracturaron y además hubo pandeo del alma de las vigas y de los atiesadores laterales, como se puede ver en la Ilustración 4-15. La viga exterior además experimentó flexión alrededor del eje débil del alma y ala inferior, así como también pandeo en la dirección longitudinal. Este tipo de daño es evidencia de grandes cargas longitudinales que se transfieren desde la superestructura al apoyo de del estribo, así como que estas cargas cambiaron de signo varias veces durante el evento. La soldadura entre las vigas y las placas de apoyo no falló.

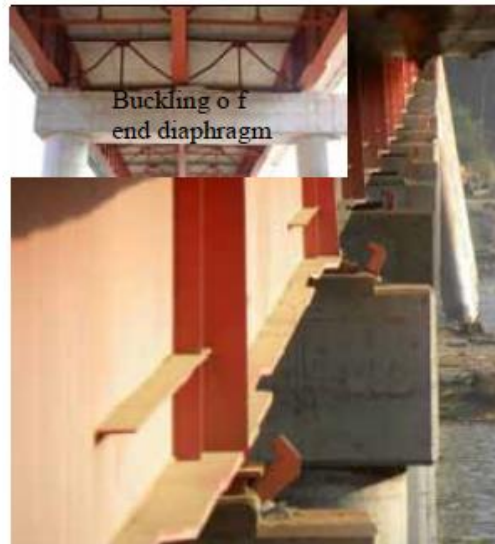


Ilustración 4-14: Fotografía del pandeo del diafragma transversal y desplazamiento de las vigas del puente CRSH.



Ilustración 4-15: Fotografía del daño de la viga en el estribo noreste del puente CRSH.

Para mantener el tráfico en el puente, se instaló un marco en el estribo noreste, como se observa en la Ilustración 4-16. Dado el daño severo que sufrieron el alma y alas de las vigas, se utilizó un refuerzo de viga para transmitir las cargas de las alas al estribo sin pasar por el alma de las vigas.



Ilustración 4-16: Fotografía de la reparación temporal en el estribo noreste del puente CRSH.

Otros daños ocurrieron debido al tsunami que siguió al terremoto, se generaron por olas que pasaron por debajo de la superestructura del puente, estas erosionaron el suelo del río que rodeaba las pilas-pilote, y escombros arrastrados por las olas produjeron una perforación en una de las pilas-pilote de las cepas.



Ilustración 4-17: Fotografía de la erosión del suelo alrededor de las cepas del puente CRSH.



Ilustración 4-18: Fotografía cepa del puente CRSH impactada con escombros del Río Maule.

El daño en el estribo suroeste fue menos severo que el del estribo noreste y se limitó al pandeo de los atiesadores laterales. Las posibles razones de esta diferencia es que la soldadura de filete que conectaba el ala de las vigas y los atiesadores laterales a las placas de apoyo fallaron durante el terremoto y las grandes cargas longitudinales de la superestructura no se transfirieron al estribo.



Ilustración 4-19: Fotografía de la soldadura de filete en la conexión de la viga al estribo del puente CRSH.

4.2. Registros de microvibraciones

En esta sección se presentan antecedentes de los instrumentos utilizados, la ubicación de los sensores y las descripciones del trabajo en terreno para la obtención de los registros de microvibraciones procesados posteriormente para la obtención de las propiedades dinámicas de las estructuras en estudio.

4.2.1. Instrumentación externa registros año 2004.

Esta medición se realizó el viernes 23 de julio del año 2003, y fue ejecutada nuevamente con instrumentos instalados de forma temporal en la estructura, en total se llevaron a cabo doce registros. De estos registros se utilizan seis para compararlos con las mediciones realizadas el 2018.

4.2.1.1. Instrumentos utilizados

Los instrumentos utilizados son los mismos señalados para la medición del año 2004 del viaducto Marga-Marga. Su descripción y propiedades se encuentran en la sección 5.2.1.1.

Cabe destacar que se analizan solamente los datos registrados con los sismómetros Ranger SS1 dado que según señala C. Benavides (2004) los datos obtenidos con los acelerómetros FBA 11 no entregaron buenos resultados.

4.2.1.2. Ubicación de sensores

Las disposiciones de los sensores dispuestas por C. Benavides se presentan a continuación.

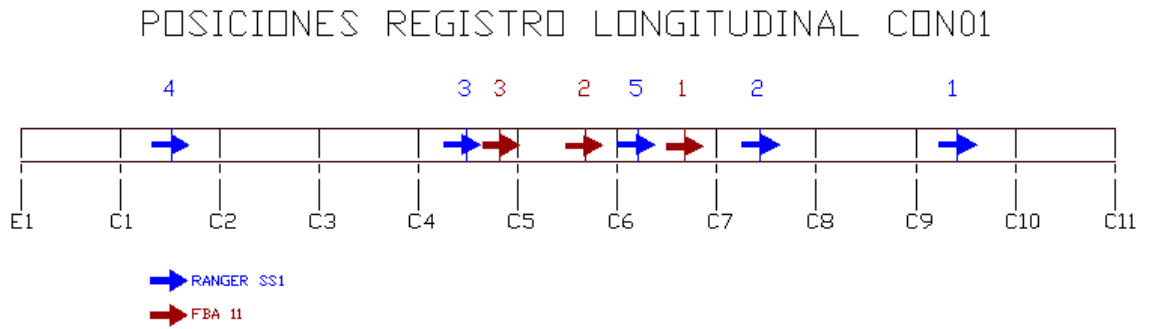


Ilustración 4-20: Posiciones sensores registro Con01 puente CRSH (Benavides, 2004).

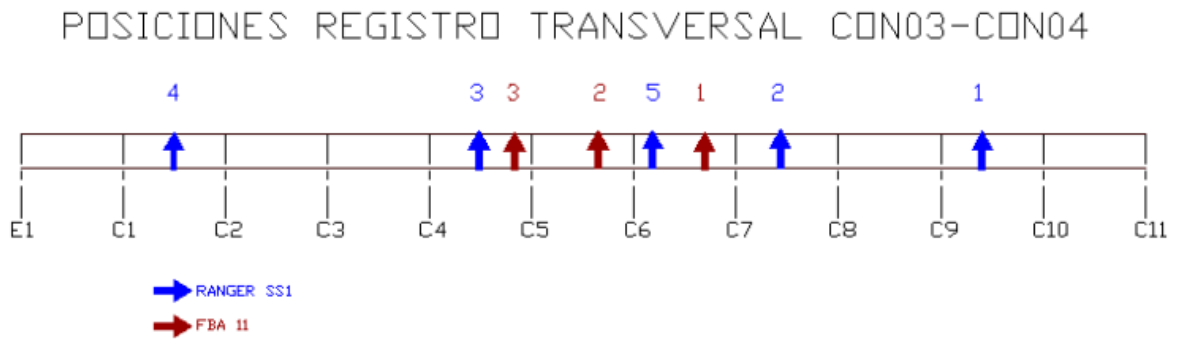


Ilustración 4-21: Posiciones sensores registro Con03-Con04 puente CRSH (Benavides, 2004).

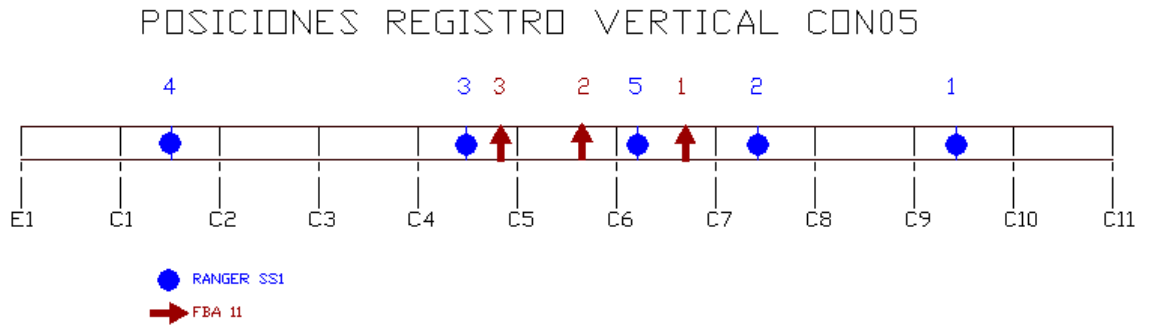


Ilustración 4-22: Posiciones sensores registro Con05 puente CRSH (Benavides, 2004).

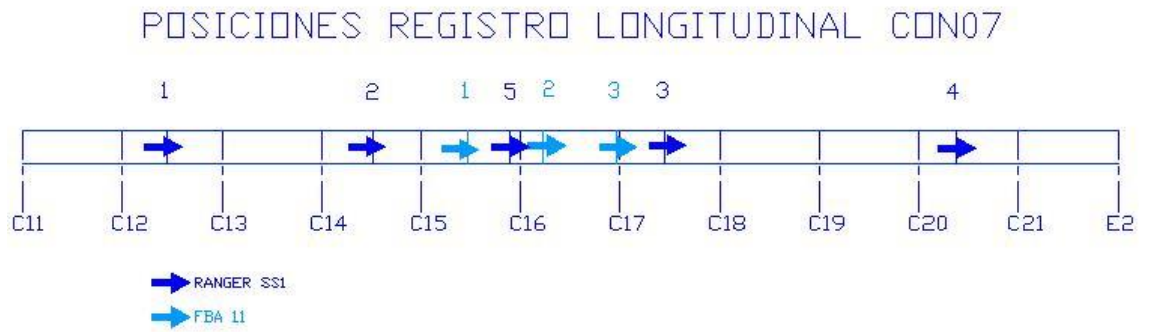


Ilustración 4-23: Posiciones sensores registro Con07 puente CRSH (Benavides, 2004).

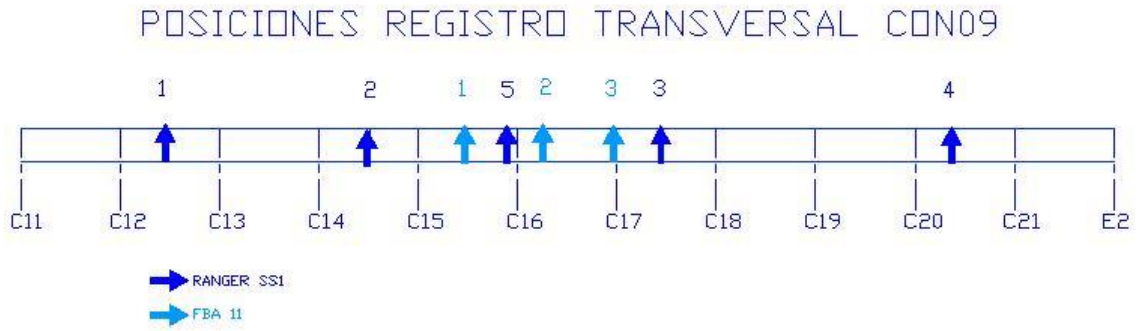


Ilustración 4-24: Posiciones sensores registro Con09 puente CRSH (Benavides, 2004).

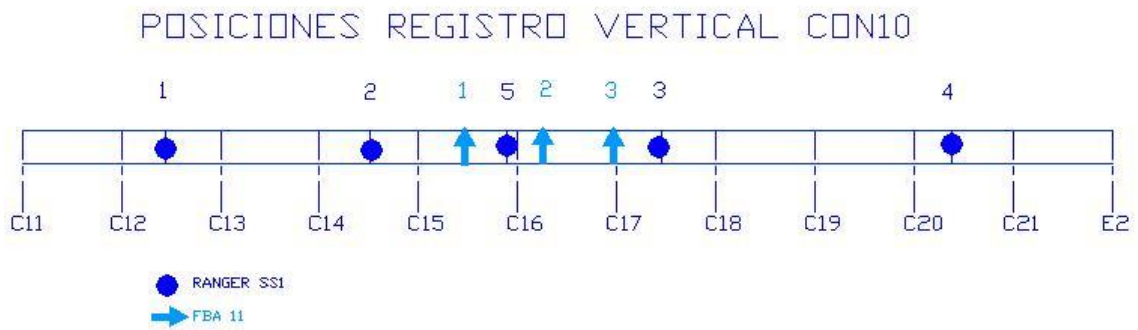


Ilustración 4-25: Posiciones sensores registro Con10 puente CRSH (Benavides, 2004).

4.2.1.3. Descripción registro de datos en terreno

Esta medición se realizó en julio del 2003. Los registros se efectuaron por separado en el tramo norte y sur del tablero, para cada uno de estos tramos se hizo una medición longitudinal, transversal y vertical.

La duración y frecuencia de muestreo de los registros se muestran a continuación.

Tabla 4-1: Duración y frecuencia de muestreo registros puente CRSH

Registro	Duración toma de datos [min]	Frecuencia de Muestreo [Hz]
Con00 (Calibración)	10	200
Con01 (Longitudinal-Tramo Norte)	10	200
Con04 (Transversal-Tramo Norte)	10	200
Con05 (Vertical en tramos medios-Tramo Norte)	10	200
Con07 (Longitudinal- Tramo Sur)	10	200
Con09 (Transversal-Tramo Sur)	20	200
Con10 (Vertical en tramos medios - Tramo Sur)	20	200

4.2.2. Instrumentación externa registros año 2018.

Esta medición se efectuó el sábado 08 de diciembre del año 2018, fue realizada con instrumentos instalados de forma temporal en la estructura, en total se llevaron a cabo seis registros de microvibraciones.

4.2.2.1. Instrumentos utilizados

Los instrumentos utilizados corresponden a los mismos ocupados para la medición con instrumentación externa del viaducto El Salto el año 2018. Con la diferencia que en este caso no se contaba con un camión inspector, por lo que como solución se llevó una batería externa y un conversor de voltaje para energizar el sistema.



Ilustración 4-26: Sensores instalados a lo largo de la berma del puente CRSH.

4.2.2.2. Ubicación de sensores

La disposición de los sensores para esta medición se muestra a continuación.

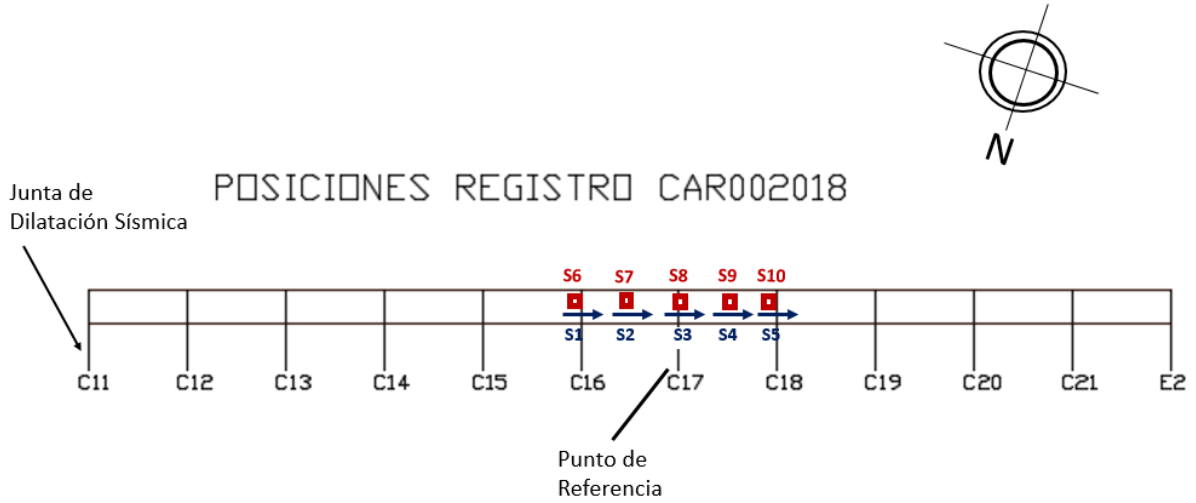


Ilustración 4-27: Posiciones sensores registro Car00 puente CRSH 2018, Tramo Sur Oeste.

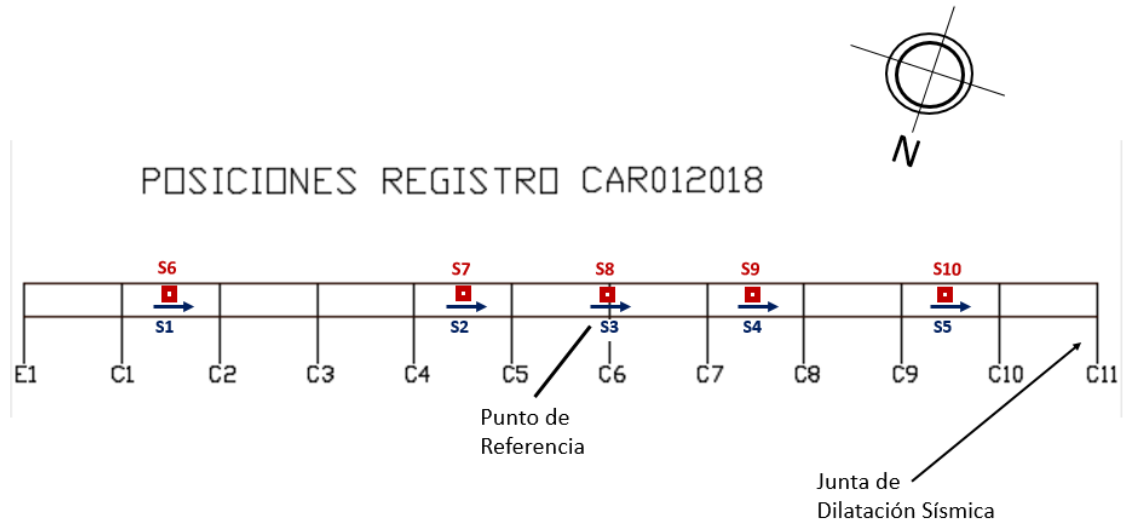


Ilustración 4-28: Posiciones sensores registro Car01 puente CRSH 2018, Tramo Nor-Este.

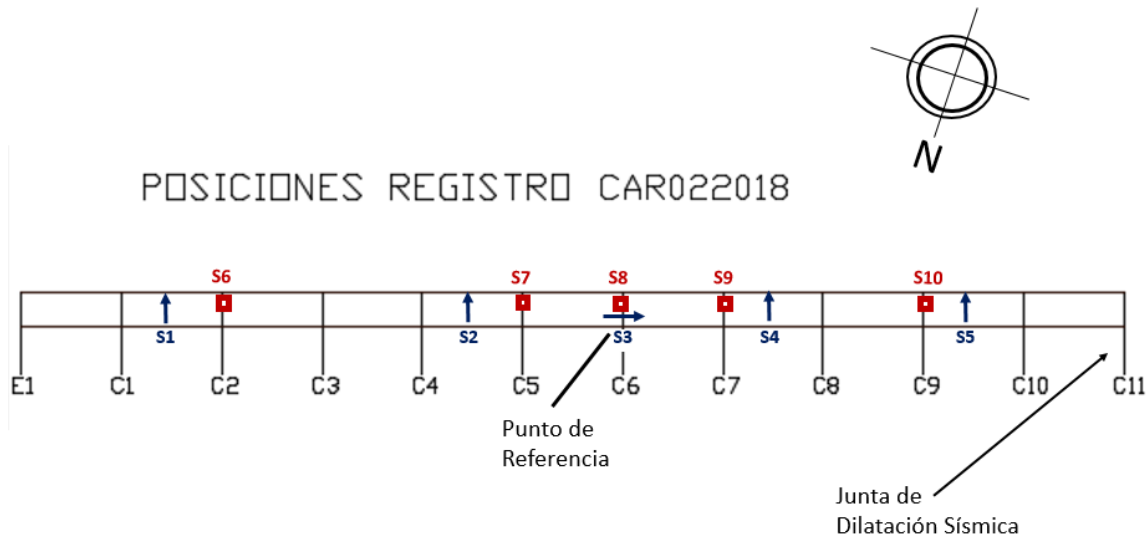


Ilustración 4-29: Posiciones sensores registro Car02 puente CRSH 2018, Tramo Nor-Este.

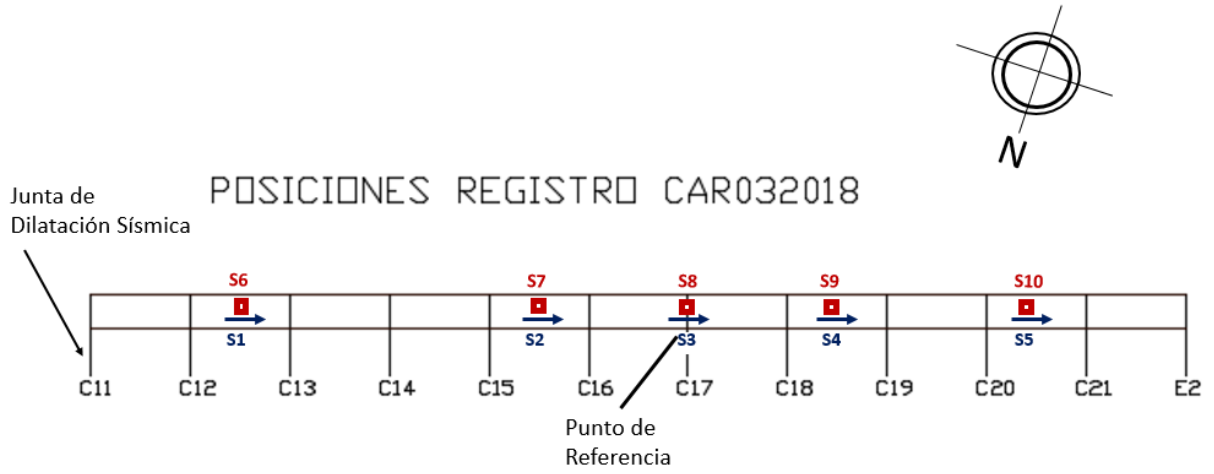


Ilustración 4-30: Posiciones sensores registro Car03 puente CRSH 2018, Tramo Sur-Oeste.

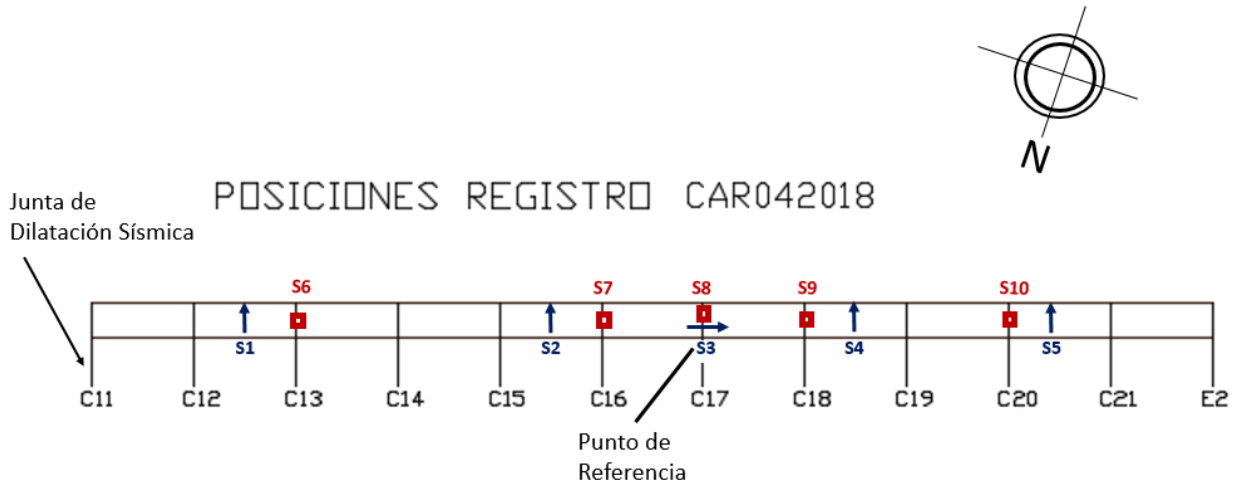


Ilustración 4-31: Posiciones sensores registro Car04 puente CRSH 2018, Tramo Sur-Oeste.

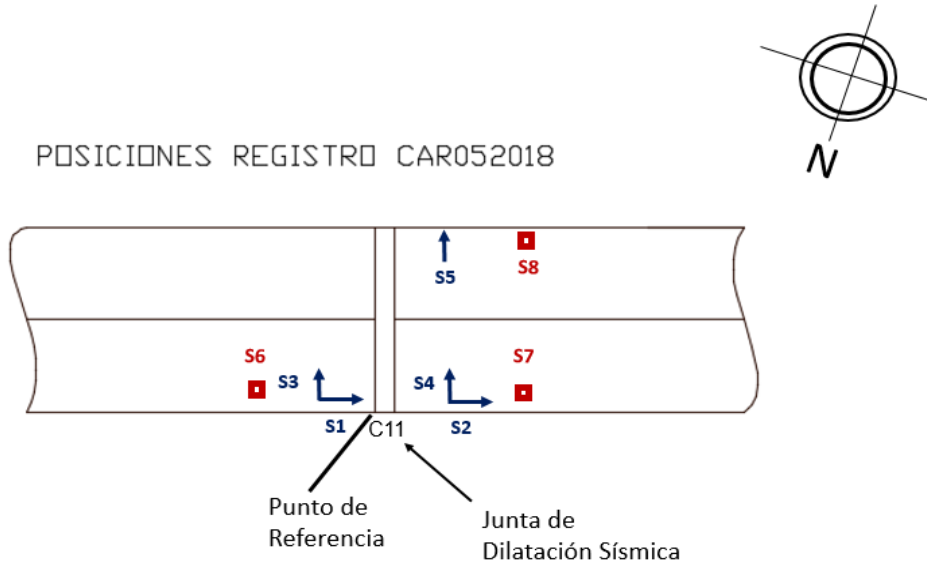


Ilustración 4-32: Posiciones sensores registro Car05 puente CRSH 2018.

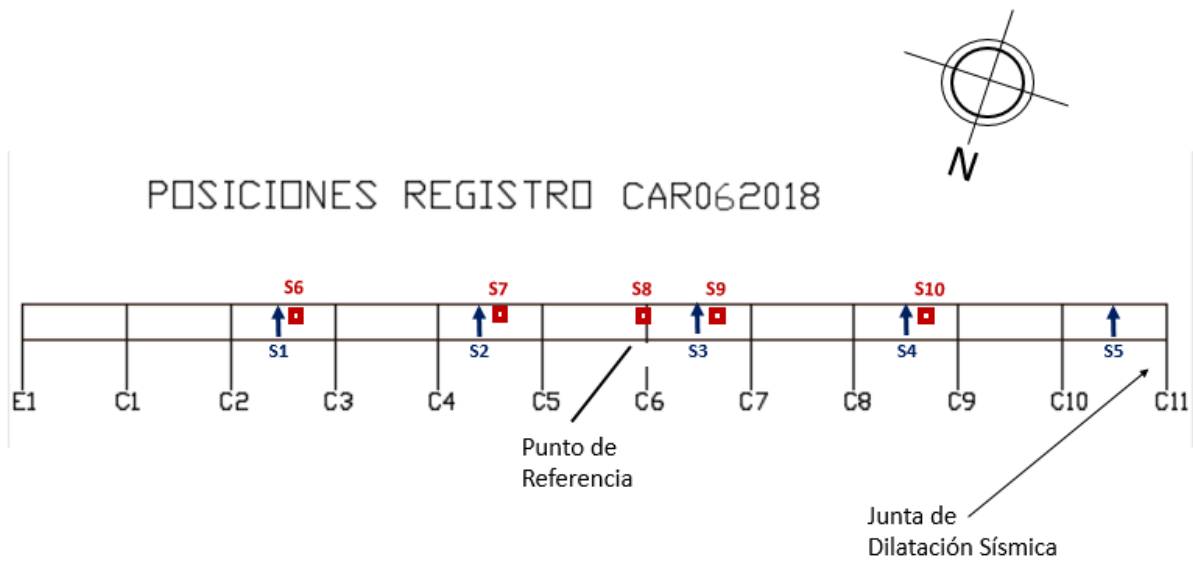


Ilustración 4-33: Posiciones sensores registro Car06 puente CRSH 2018, Tramo Nor-Este.

4.2.2.3. Descripción registro de datos en terreno

Estas mediciones se llevaron a cabo en diciembre del 2018 entre las 10:00 y las 17:00 horas, lo cual corresponde a un periodo de alta densidad vehicular. Para esta medición no fue necesario cerrar una pista, dado que los registros se hicieron en la berma del puente, interfiriendo lo menos posible con el tráfico normal. Lo anterior tuvo como implicancia que hubo tiempo para realizar todas las mediciones planeadas y agregar una sexta medición.

La duración y frecuencia de muestreo de los registros se muestran a continuación.

Tabla 4-2: Duración y frecuencia de muestreo registros puente CRSH 2018

Registro	Duración toma de datos [min]	Frecuencia de Muestreo [Hz]
Car00 (Calibración)	03	200
Car01 (Longitudinal y vertical en tramos intermedios-Tramo Norte)	40	200
Car02 (Transversal y vertical en cepas-Tramo Norte)	40	200
Car03 (Longitudinal y vertical en tramos intermedios-Tramo Sur)	25	200
Car04(Transversal y vertical en cepas-Tramo Sur)	25	200
Car05 (Junta Sísmica)	20	200
Car06(Transversal y vertical tramos intermedios-Tramo Norte)	20	200

La configuración de estos instrumentos para la medición realizada se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4-3: Configuración instrumentos registro viaducto CRSH 2018

Rango de Voltaje	$\pm 2.5V$
Rango Aceleraciones	0.5g

4.2.2.4. Resultados registro de calibración

De la calibración de los sensores para las mediciones se desprende que todos, menos el sensor 2, registran peaks similares con una alta coherencia. Dado lo anterior se decide omitir los datos obtenidos a partir de este sensor. Además, el sensor 1 de los calibrados

para medir horizontalmente muestra un ángulo de desfase de 180° , por lo que se entiende que este sensor tenía la polaridad cambiada y para las formas modales hubo que cambiar el sentido del sensor.

4.3. Resultados

4.3.1. Tramo norte longitudinal

4.3.1.1. Diagrama de estabilidad registro longitudinal (Con01/Ranger SS1/ Canales 1-5) tramo norte 2004

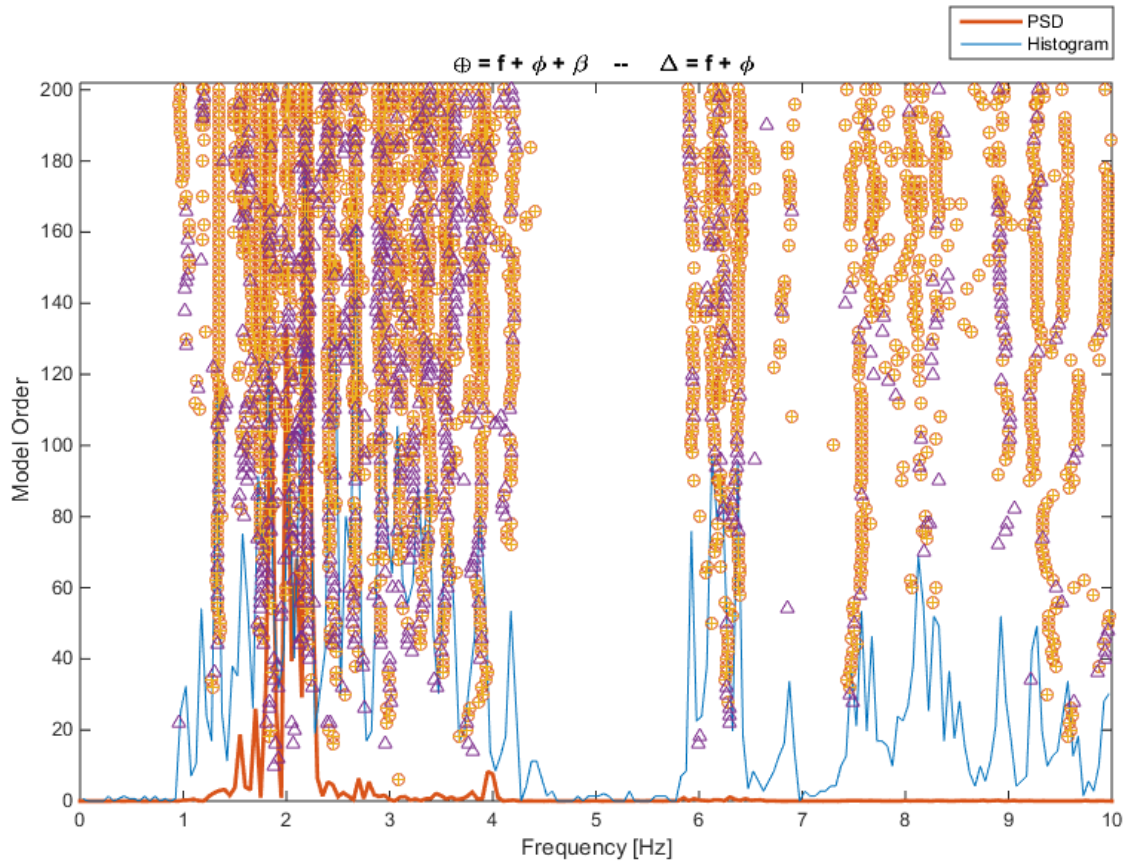


Ilustración 4-34: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo norte CRSH 2004.

Tabla 4-4: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo norte CRSH 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.341	0.31	1.53	0.05	31
1.557	0.88	1.97	0.06	6
1.640	0.82	3.43	0.11	8
1.747	0.28	0.77	0.02	23
1.835	1.19	1.04	0.03	12
2.022	1.11	0.86	0.02	8
2.199	0.91	0.44	0.01	18
2.410	0.80	0.65	0.02	17
2.670	0.42	1.24	0.03	16
2.925	2.41	0.63	0.02	14
3.176	4.08	1.55	0.05	7
3.403	2.75	1.02	0.03	11
3.552	0.50	0.73	0.02	11
3.913	1.95	1.02	0.03	13
4.195	1.71	2.21	0.07	6
6.384	0.80	0.76	0.02	16
7.590	6.01	1.98	0.05	24
7.869	9.27	2.46	0.06	7
8.184	9.89	0.78	0.02	13
9.294	8.76	1.70	0.05	12
10.067	5.24	1.44	0.04	22

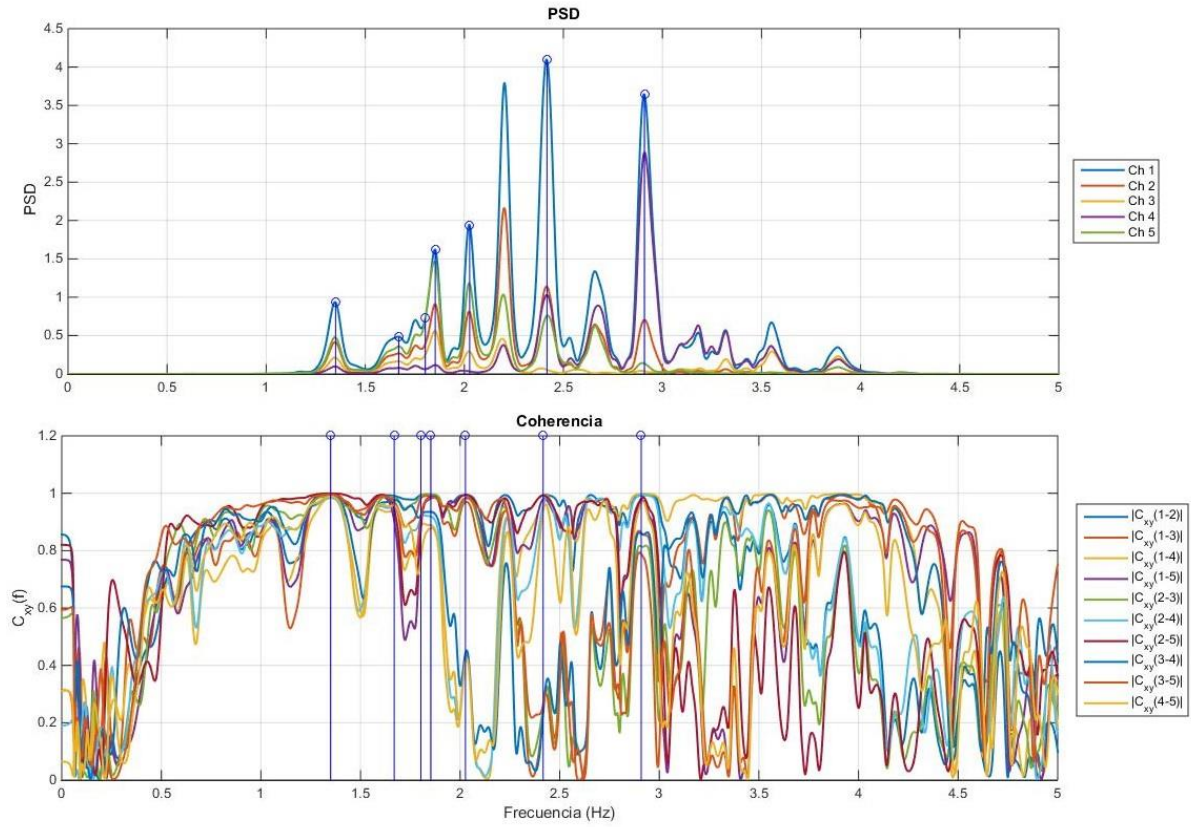


Ilustración 4-35: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal tramo norte CRSH 2004.

Tabla 4-5: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	L
Ch2	2	L
Ch3	3	L
Ch4	4	L
Ch5	5	L

4.3.1.2. Diagrama de estabilidad registro longitudinal (Car01/Canales 1-3-4-5) tramo norte 2018

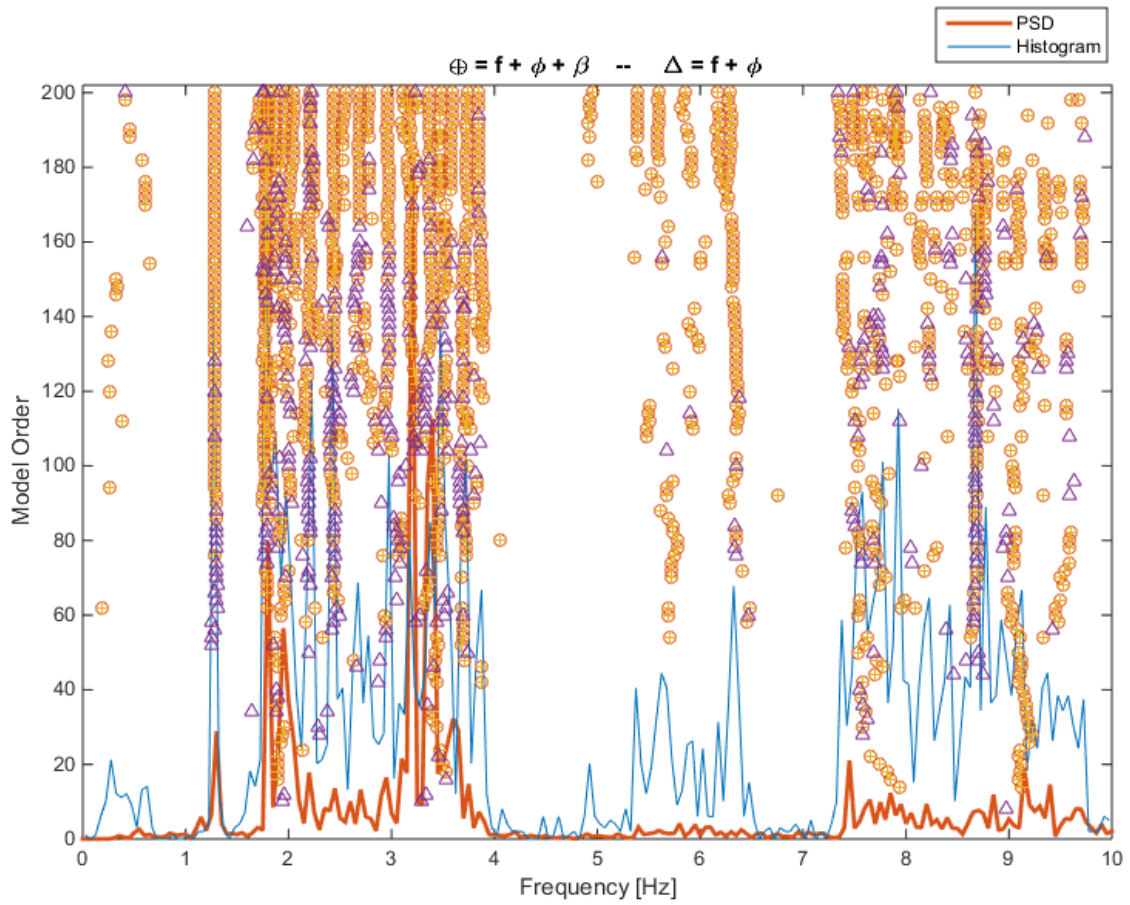


Ilustración 4-36: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo norte CRSH 2018.

Tabla 4-6: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo norte CRSH 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.278	0.13	1.47	0.04	30
1.806	1.59	5.49	0.18	10
1.867	0.70	1.08	0.03	6
1.936	1.64	7.22	0.22	7
2.042	0.89	2.09	0.06	7
2.204	2.37	1.40	0.03	6
2.444	0.72	0.68	0.02	15
2.536	1.71	3.61	0.11	8
2.673	2.51	0.45	0.01	7
2.967	0.62	1.11	0.03	9
3.255	3.71	3.28	0.09	7
3.538	4.85	1.27	0.04	13
3.724	1.99	2.44	0.09	10
3.865	0.87	2.11	0.07	8
5.684	4.53	3.40	0.09	7
6.252	6.25	1.47	0.05	11
7.727	7.36	4.23	0.16	7
8.217	6.71	0.55	0.01	6
9.119	5.53	5.19	0.15	15
9.449	5.58	4.04	0.11	10
10.383	2.57	0.44	0.02	15

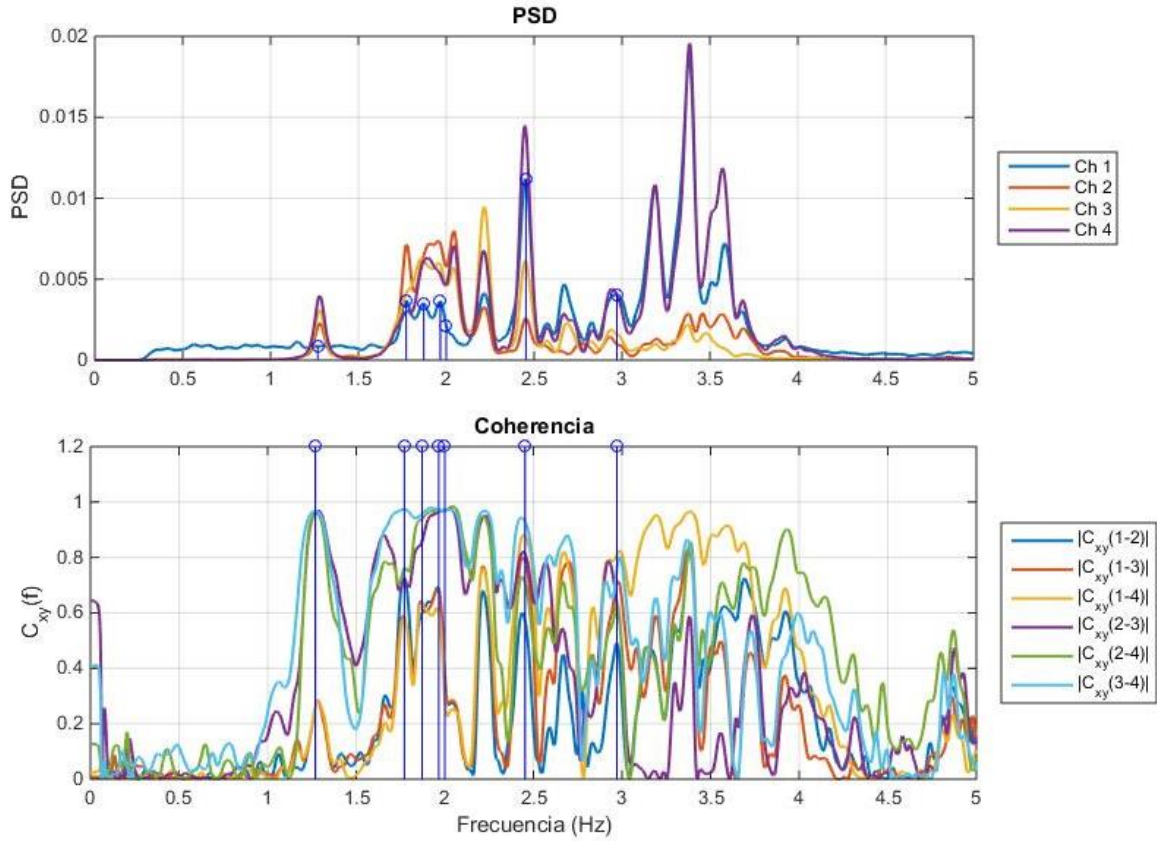
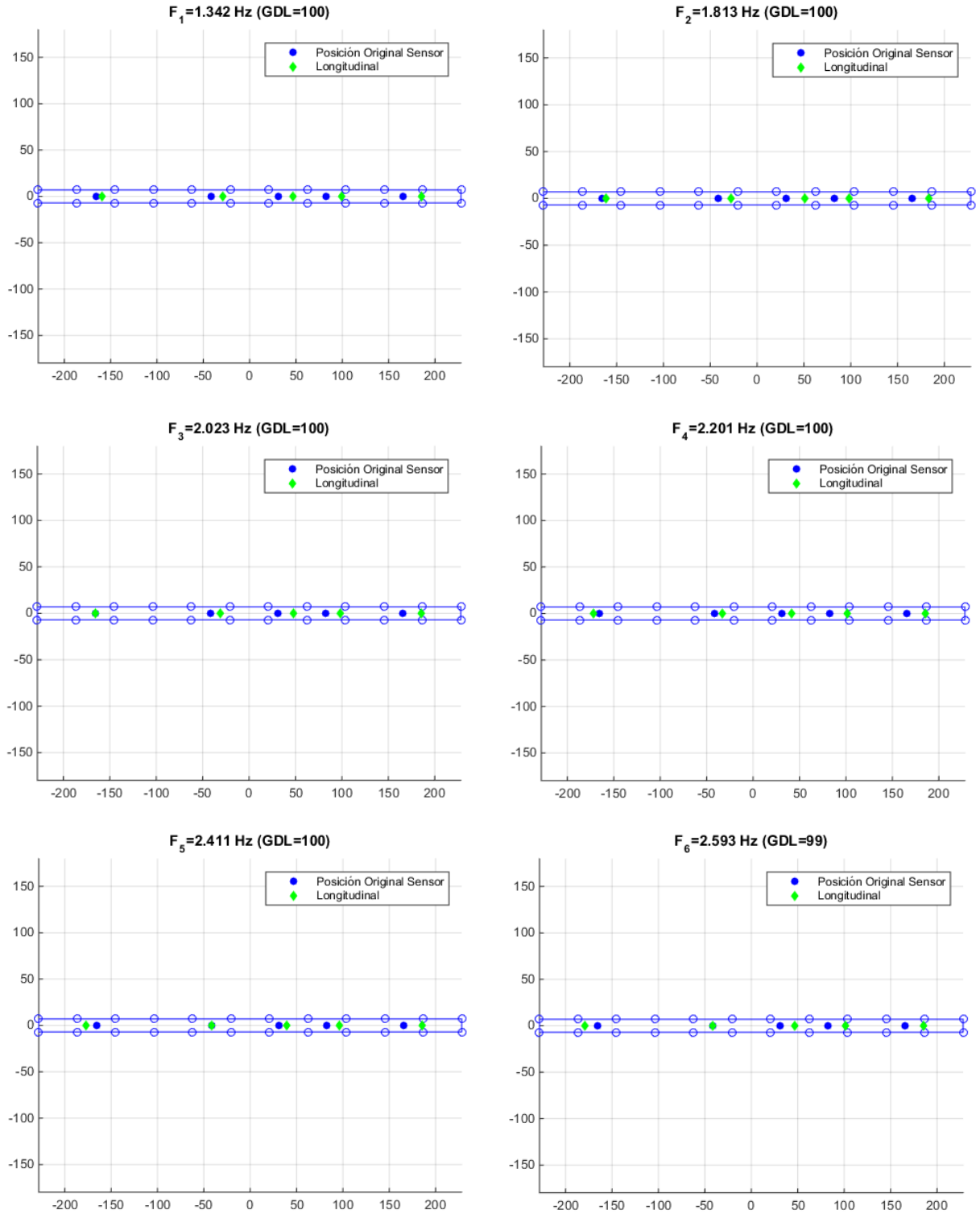


Ilustración 4-37: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal tramo norte CRSH 2018.

Tabla 4-7: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	L
Ch2	3	L
Ch3	4	L
Ch4	5	L

4.3.1.3. Formas modales longitudinales tramo norte 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)



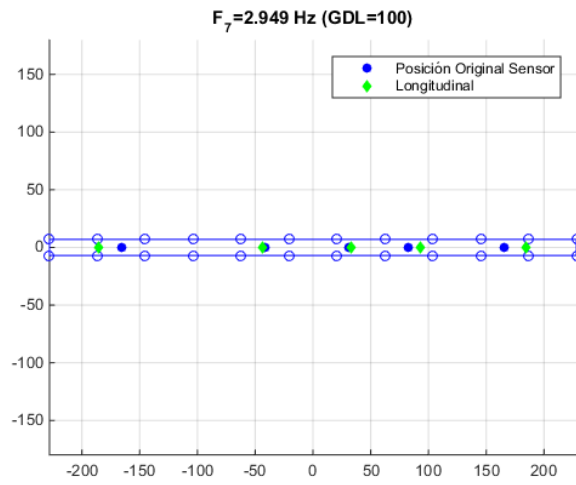
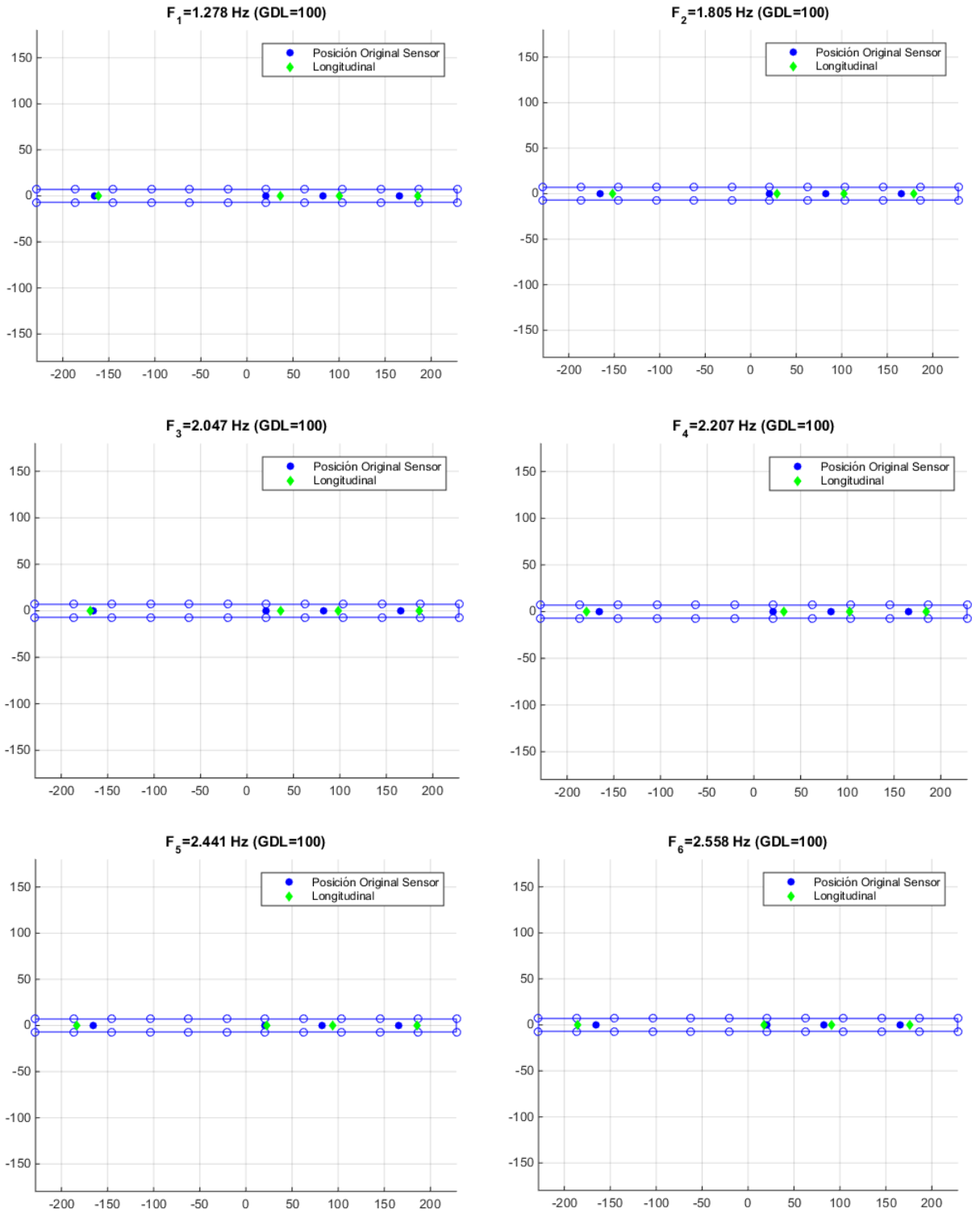


Ilustración 4-38: Formas Modales longitudinales tramo norte CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).

4.3.1.4. Formas modales longitudinales tramo norte 2018



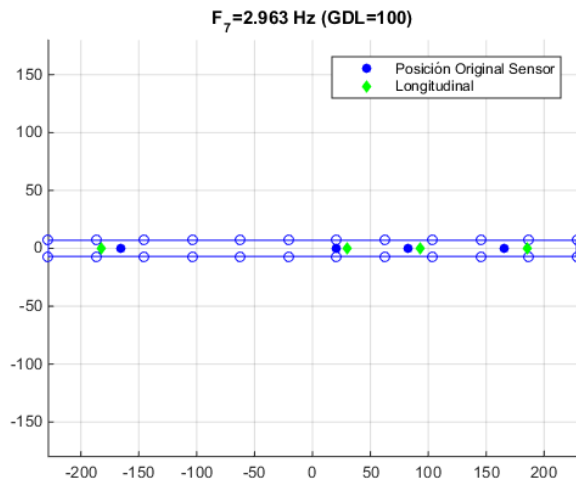


Ilustración 4-39: Formas Modales longitudinales tramo norte CRSH 2018.

4.3.1.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 4-8: Frecuencias modales tramo norte longitudinal puente CRSH

Modo	Frecuencias 2004 CB [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	1.370(FM1)	1.342(FM1)	1.278(FM1)
2	1.590(FM2)	-	-
3	1.832(FM3)	1.813(FM2)	1.805(FM2)
4	2.030(FM4)	2.023(FM3)	2.047(FM3)
5	2.220(FM5)	2.201(FM4)	2.207(FM4)
6	2.440(FM6)	2.411(FM5)	2.441(FM5)
7	2.660(FM7)	2.593(FM6)	2.558(FM6)
8	2.891(FM8)	2.949(FM7)	2.963(FM7)

En primer lugar, se puede inferir que la primera forma modal se asocia al comportamiento del tablero vibrando sobre los elastómeros (en conjunto con todas las cepas). En este contexto, se observa que la frecuencia asociada a este modo longitudinal se redujo entre el año 2004 y 2018 de 1.34 a 1.28 Hz, si bien no se observa una reducción significativa, se concluye que el aumento de masa asociado a la inclusión de travesaños pudo haber generado una leve reducción de la frecuencia longitudinal.

Por otra parte, se observa que para el año 2018 se pueden ver varios modos de frecuencias entre 1.7 a 3.9 Hz que corresponderían a modos locales altamente influenciados por la respuesta local de las cepas (en sentido longitudinal). Para el año 2004 se observaron varios modos asociados al comportamiento local de las cepas entre 1.8 Hz a 3.9Hz. En este sentido para visualizar mejor la comparación del comportamiento de las cepas hubiese sido conveniente medir la respuesta al coronamiento de las cepas (en vez de analizar su efecto en mediciones sobre el tablero). En términos generales, las cepas largas o flexibles se asocian a una frecuencia más baja; en cambio las cepas más cortas o rígidas se relacionan a frecuencias más altas. Cabe mencionar que dado el rango en cual se posicionan las frecuencias asociadas a modos relacionadas a la respuesta local de las cepas no se observa una diferencia significativa entre los años 2004 y 2018.

Se observa del PSD del registro Car01 de 2018 que el canal CH1 posee una fuente importante de energía en baja frecuencia (al igual que en los canales transversales en las mediciones Car02 y Car06), lo cual podría ser atribuido a una fuente de ruido generada por algún objeto vibrando en la estructura. Cabe mencionar que el CH1 se ubicaría entre

las cepas C1 y C2 (este resultado contrasta con lo observado en Car02 y Car06 donde la fuente de ruido se observa cercano a la cepa 9).

Es importante señalar que los datos de microvibraciones en el año 2004 corresponden a registros de velocidad obtenidos con sismómetros RANGER de Kinematics. En cambio, para el año 2018 se emplearon datos de aceleraciones con acelerómetros EPISENSOR de Kinematics. En términos generales se puede apreciar que no existen diferencias significativas en términos de los resultados dado la diferencia de los sensores empleados.

Con respecto a la comparación de las frecuencias y formas modales obtenidas por C. Benavides con análisis en frecuencias en el año 2004 con las obtenidas a partir de la reprocesamiento de los mismos datos a través del método SSI se observa que la FM2 obtenida por C.Benavides no se identifica de forma tan clara, por lo que se infiere que no es un modo fundamental de la estructura. No obstante, el resto de las formas modales identificadas coinciden respectivamente.

4.3.2. Tramo norte transversal

4.3.2.1. Diagrama de estabilidad registro transversal (Con04/Ranger SS1/ Canales 1-5) tramo norte 2004

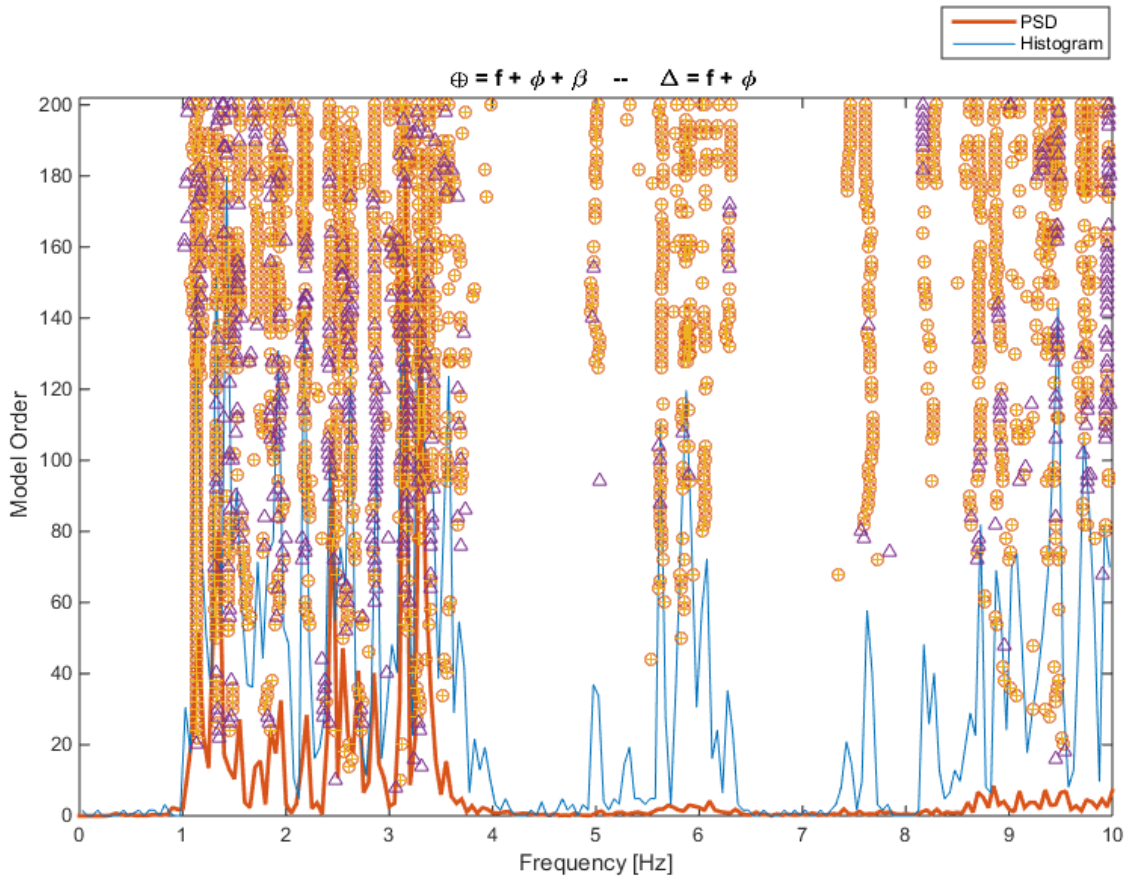


Ilustración 4-40: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo norte CRSH 2004.

Tabla 4-9: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo norte CRSH 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.135	0.37	2.23	0.07	34
1.321	0.84	3.73	0.10	18
1.451	1.12	2.84	0.08	13
1.599	1.73	7.71	0.23	10
1.721	0.54	1.29	0.04	7
1.847	0.69	0.96	0.02	6
1.943	0.82	2.37	0.07	7
2.173	0.59	1.37	0.04	10
2.427	0.39	0.52	0.02	9
2.517	2.51	2.25	0.07	12
2.856	0.43	0.51	0.02	11
3.287	1.06	1.29	0.04	14
3.679	2.64	3.75	0.13	7
4.996	1.10	1.35	0.04	8
5.639	1.03	0.91	0.03	13
5.986	6.96	1.25	0.05	9
6.300	0.93	0.32	0.01	8
7.619	1.37	1.73	0.06	17
8.251	4.37	0.92	0.03	10
8.721	7.75	0.55	0.02	17
9.762	6.93	0.41	0.01	11
10.661	12.63	0.38	0.01	19

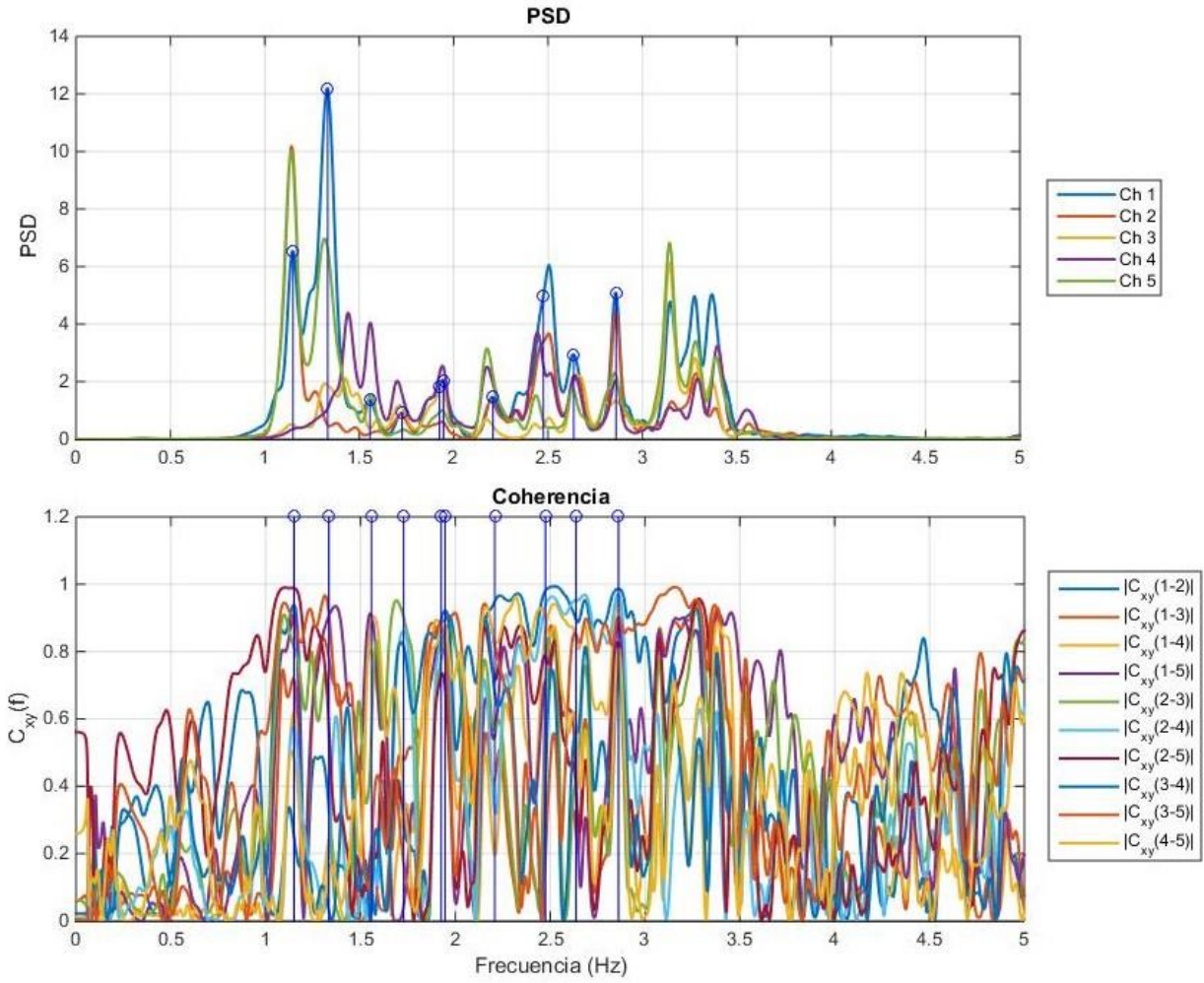


Ilustración 4-41: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal tramo norte CRSH 2004.

Tabla 4-10: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	T
Ch2	2	T
Ch3	3	T
Ch4	4	T
Ch5	5	T

4.3.2.2. Diagrama de estabilidad registro transversal (Car02 y Car06/
Canales 1-5) tramo norte 2018

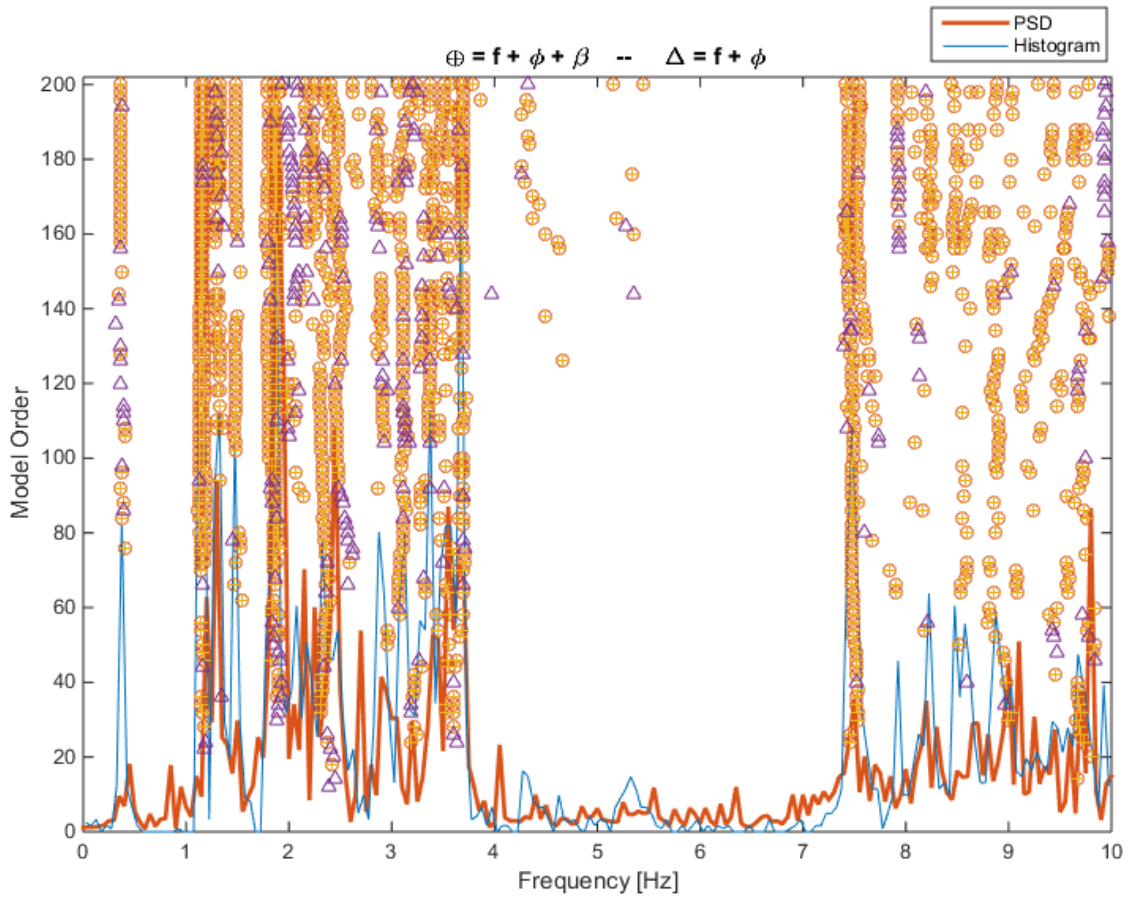


Ilustración 4-42: Diagrama de estabilidad tablero transversal (car02) tramo norte CRSH 2018.

Tabla 4-11: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal (car02) tramo norte
CRSH 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.360	0.25	18.46	0.49	17
1.139	0.09	1.72	0.04	26
1.285	0.40	1.83	0.06	8
1.479	0.77	4.18	0.13	7
1.798	1.05	4.30	0.13	13
1.867	1.36	2.25	0.07	18
2.299	2.72	4.69	0.15	17
2.480	2.62	1.64	0.04	7
2.891	2.54	1.52	0.04	7
3.097	2.86	3.13	0.09	8
3.218	2.42	9.80	0.19	6
3.381	1.32	0.98	0.03	16
3.491	2.91	2.80	0.10	11
3.675	1.05	1.11	0.03	12
7.480	0.87	2.40	0.07	26
7.927	0.78	0.24	0.01	6
8.217	4.05	0.44	0.01	6
8.589	6.80	2.13	0.06	6
8.888	1.79	2.39	0.08	12
9.697	4.67	6.19	0.18	11
10.180	0.95	1.33	0.05	11

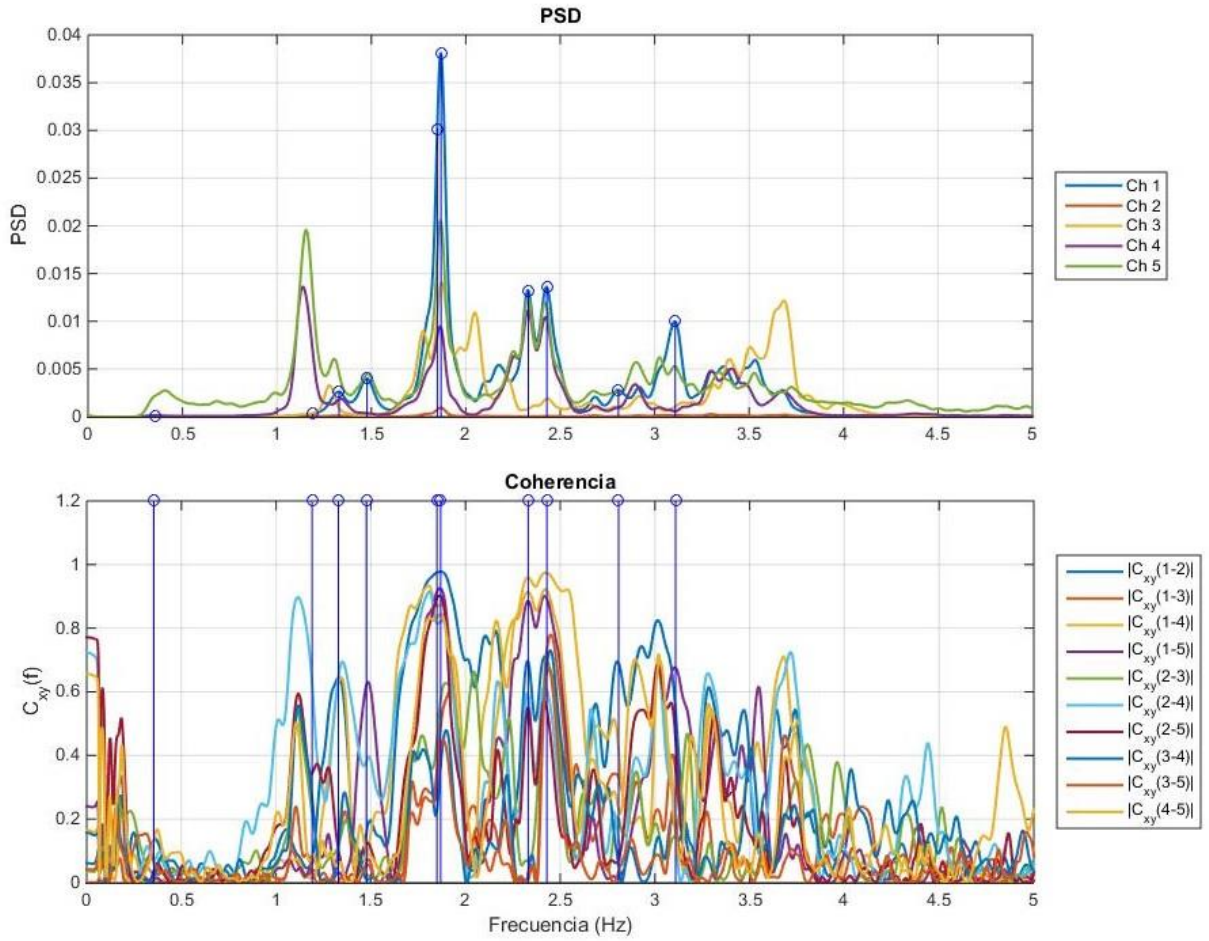


Ilustración 4-43: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Car02) tramo norte CRSH 2018.

Tabla 4-12: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	T
Ch2	2	T
Ch3	3	L
Ch4	4	T
Ch5	5	T

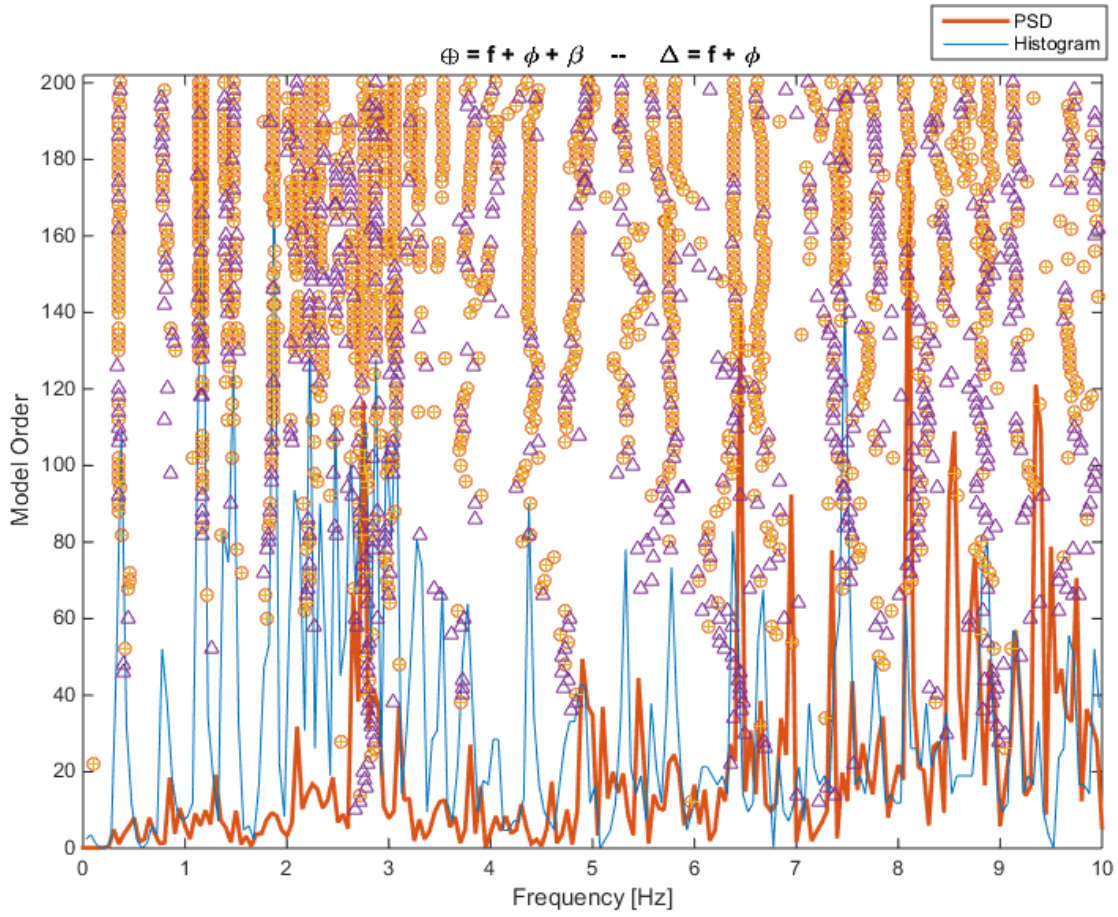


Ilustración 4-44: Diagrama de estabilidad tablero transversal (Car06) tramo norte CRSH 2018.

Tabla 4-13: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal (Car06) tramo norte
CRSH 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.352	0.27	23.57	0.68	26
1.170	0.15	1.91	0.05	22
1.393	1.23	8.30	0.25	11
1.482	1.03	3.77	0.11	14
1.870	0.47	2.25	0.06	22
2.238	1.45	0.98	0.03	7
2.331	1.29	6.04	0.14	10
2.745	2.22	2.72	0.08	17
3.052	1.66	1.38	0.05	16
3.294	0.62	2.03	0.05	12
3.527	0.65	1.00	0.03	6
4.399	3.05	1.19	0.04	11
5.759	2.00	1.24	0.04	8
6.392	1.08	1.05	0.03	7
6.652	3.13	1.70	0.04	20
7.492	2.71	2.73	0.08	10
7.692	7.54	2.03	0.04	6
8.205	10.51	1.09	0.04	7
8.868	3.08	0.83	0.02	7
9.681	2.61	0.32	0.01	6
10.240	0.92	0.25	0.01	7

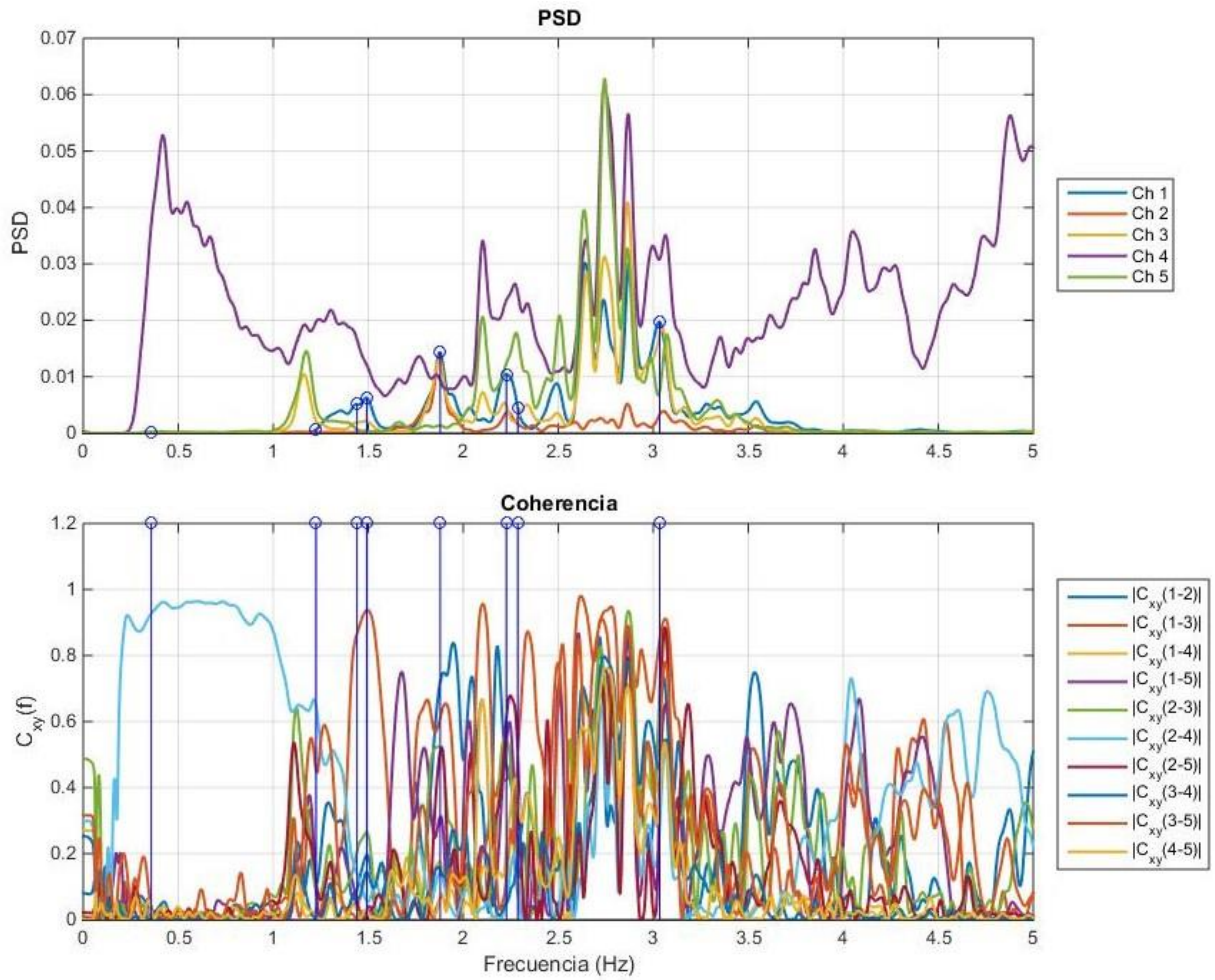
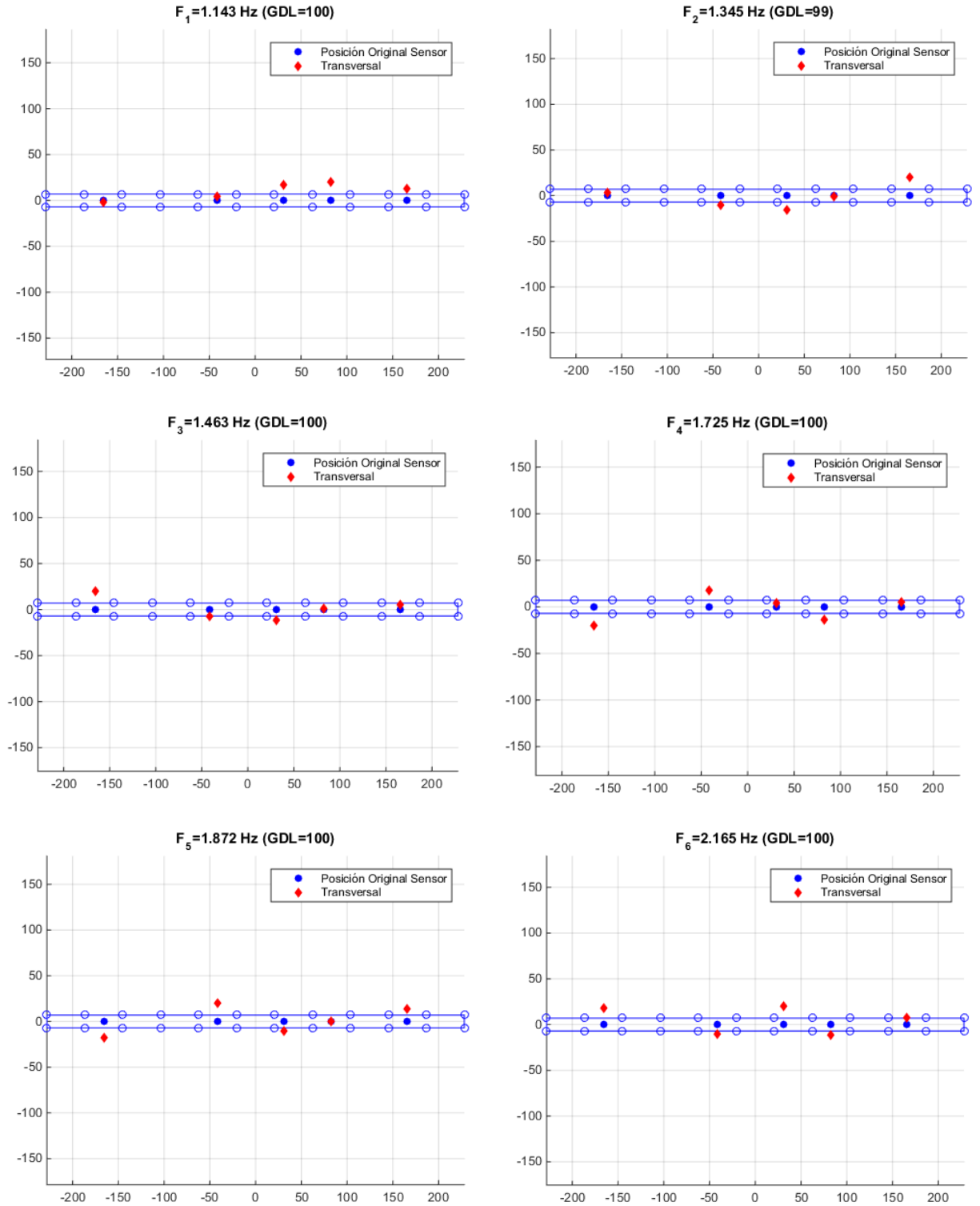


Ilustración 4-45: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Car06) tramo norte CRSH 2018.

Tabla 4-14: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	T
Ch2	2	T
Ch3	3	T
Ch4	4	T
Ch5	5	T

4.3.2.3. Formas modales transversales tramo norte 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)



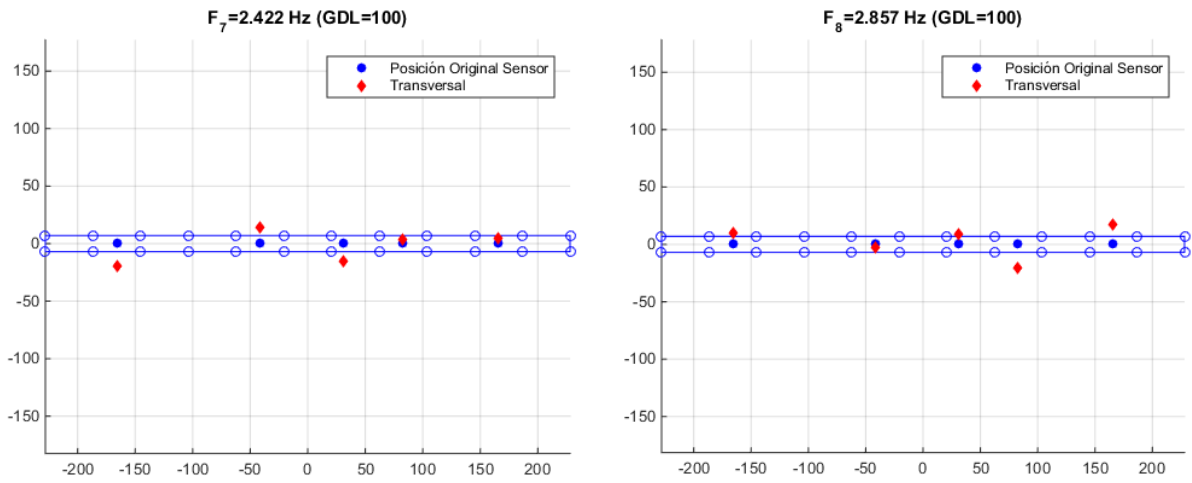
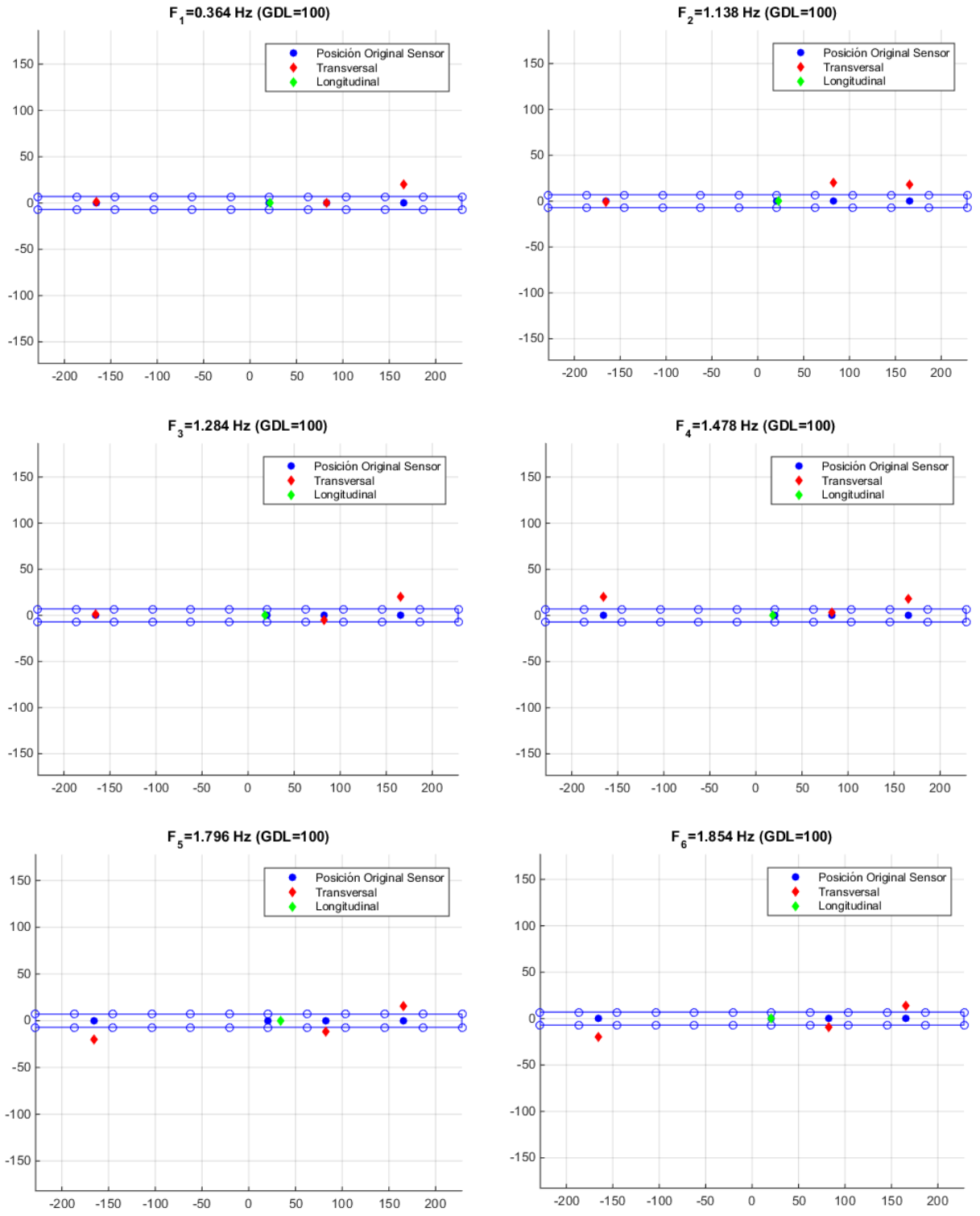


Ilustración 4-46: Formas Modales transversales tramo norte CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).

4.3.2.4. Formas modales transversales tramo norte 2018 (Registro Car02)



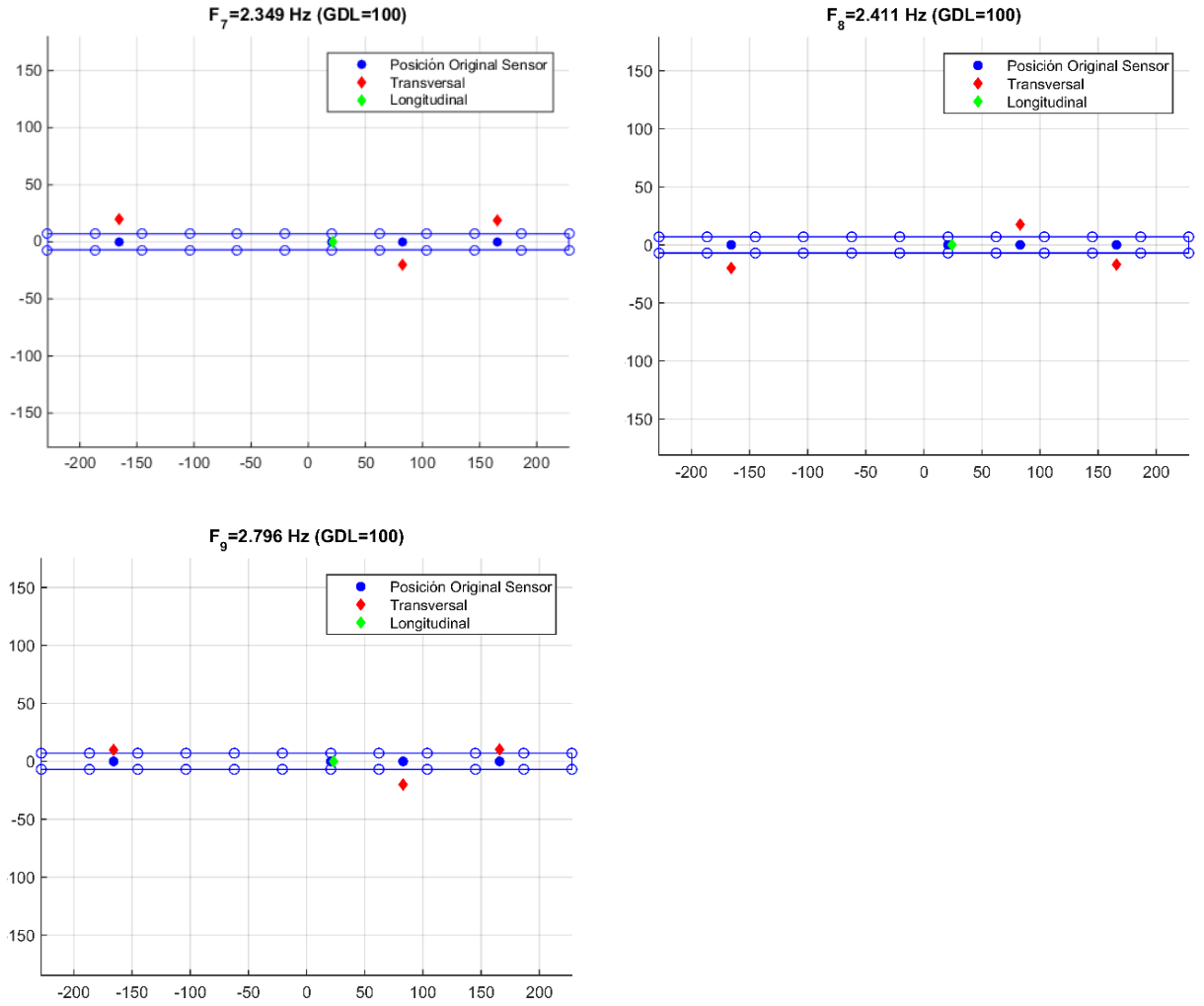
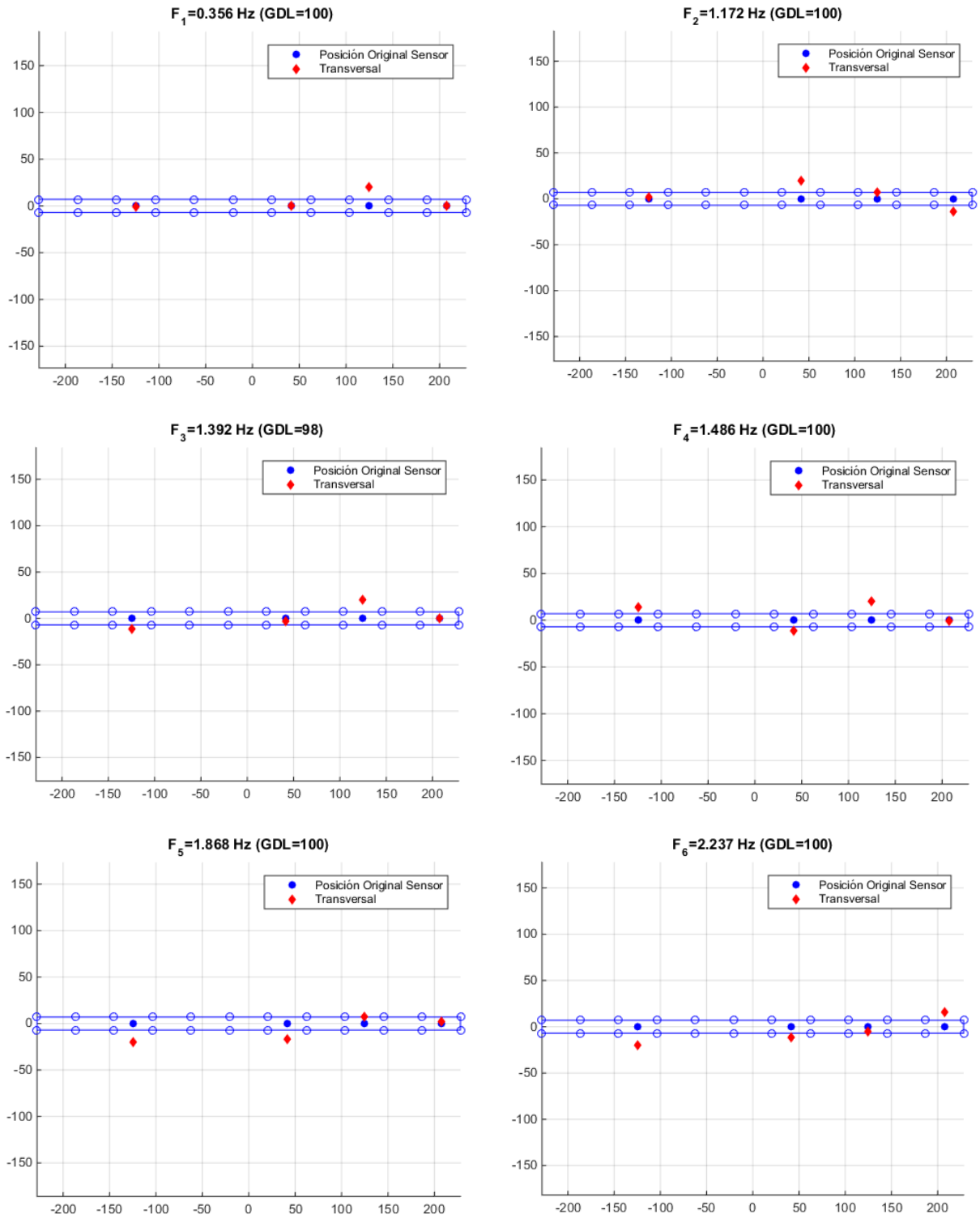


Ilustración 4-47: Formas Modales transversales (Car02) tramo norte CRSH 2018.

4.3.2.5. Formas modales transversales tramo norte 2018 (Registro Car06)



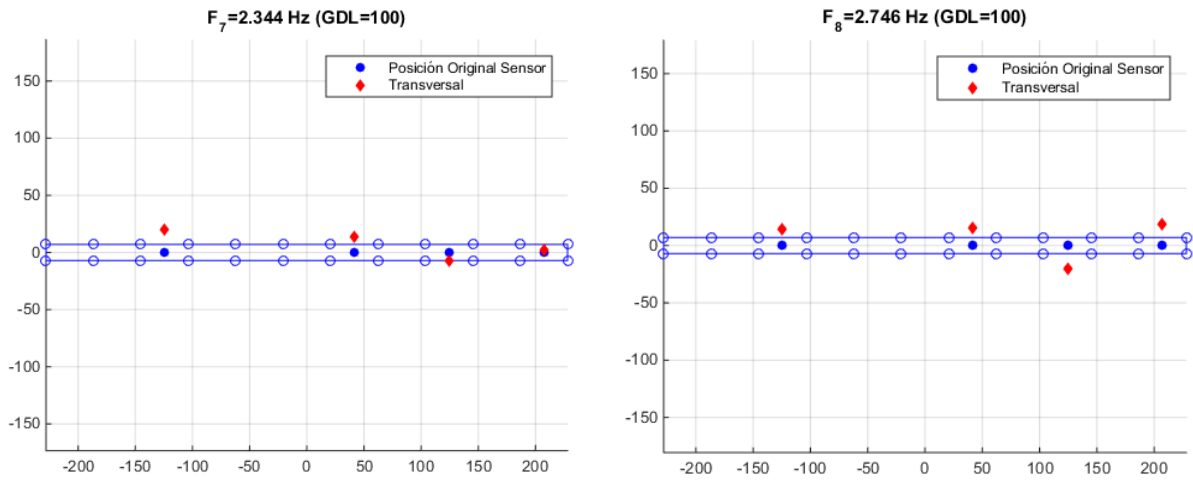


Ilustración 4-48: Formas Modales transversales (Car06) tramo norte CRSH 2018.

4.3.2.6. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 4-15: Frecuencias modales tramo norte transversal puente CRSH

Modo	Frecuencias Modales 2004 CB [Hz]	Frecuencias Modales 2004 [Hz]	Frecuencias Modales 2018 (car02) [Hz]	Frecuencias Modales 2018 (car06) [Hz]
1			0.364(FM1)	0.356(FM1)
2	1.170(FM1)	1.143(FM1)	1.138(FM2)	1.172(FM2)
3	1.370(FM2)	1.345(FM2)	1.284(FM3)	1.392(FM3)
4		1.462(FM3)	1.478(FM4)	1.486(FM4)
5		1.725(FM4)	1.796(FM5)	
6	1.930(FM3)	1.872(FM5)	1.854(FM6)	1.868(FM5)
7	2.170(FM4)	2.165(FM6)		2.237(FM6)
8	2.320(FM5)		2.349(FM7)	2.334(FM7)
9	2.440(FM6)	2.422(FM7)	2.411(FM8)	
10		2.857(FM8)	2.796(FM9)	2.746(FM8)

En ambas mediciones efectuadas en el año 2018 se observa que uno de los canales (CH5 para Car02 y CH4 para Car06, ambos cercanos a la Cepa C9) presentan una importante distorsión en especial en baja frecuencia. En este contexto, se plantea la hipótesis que podría existir algún objeto vibrando que genera una fuente de ruido en baja frecuencia que está posicionado cercano a estos sensores durante las mediciones o alternativamente podría existir una amplificación debido a un presunto daño local en la cercanía a la Cepa 9 (se requiere una inspección y/o identificación más local en esta zona, para realizar mayores conclusiones). **Por tanto, se recomienda realizar una inspección exhaustiva entre la cepa 8 a 10 y/o realizar nuevas mediciones en esta zona que permitan descartar el efecto de un mal funcionamiento. Por otra parte, se plantea como una hipótesis más viable que la FM1 determinada en ambas mediciones del 2018 se asocia a una fuente de ruido externa a la estructura, sin tener resultados concluyentes con las mediciones efectuadas.**

Por otro lado, el primer modo transversal corresponde a la frecuencia de 1.14-1.17 Hz que se observa tanto en los años 2004 y el 2018 (en ambas mediciones), el cual tendría una importante participación de la respuesta transversal de la zona “Este” del tablero. Se observa que la forma asociada al primer modo transversal es similar en todas las mediciones y no envuelven en forma significativa la respuesta de la zona oeste del tablero, lo que podría atribuirse al hecho que las cepas en el lado oeste son más cortas rigidizando e independizando el movimiento de la zona oeste al menos para este modo.

En este contexto, se observa que existen dos modos de frecuencias cercanas 1.27-1.30 Hz y 1.32-1.39 Hz que se observan en las mediciones (2004 y 2018) que se relacionan a la respuesta del tablero tanto de su zona oeste como de su zona este.

En función de los resultados se puede concluir que al menos en términos de microvibraciones no existiría un cambio significativo de la estructura entre el año 2004 y 2018, teniendo en cuenta que la respuesta observada ante-microvibraciones no se relacionan al hecho que fuesen cambiados los topes sísmicos al no existir interacción en microvibraciones.

Cabe mencionar que tanto en las mediciones de 2004 y 2018 se observan varios modos de frecuencias que van desde los 1.8 Hz a 3.6 Hz los cuales se asociarían a la respuesta local de las cepas (transversal), observándose que en todos estos se presenta una contribución en casi la totalidad de la extensión del tablero.

También se puede ver que la forma asociada al primer modo transversal es similar en todas las mediciones; destacándose que esta forma no es tan tradicional porque aparentemente no envuelve en forma significativa la respuesta del sector oeste.

Además, se menciona que por medio del método SSI las formas 1, 2, 5, 6 y 7 coinciden con las formas 1, 2, 3, 4 y 6 de los resultados obtenidos por C. Benavides.

4.3.3. Tramo norte vertical

4.3.3.1. Diagrama de estabilidad registro vertical (Con05/Canales 1-5) tramo norte 2004

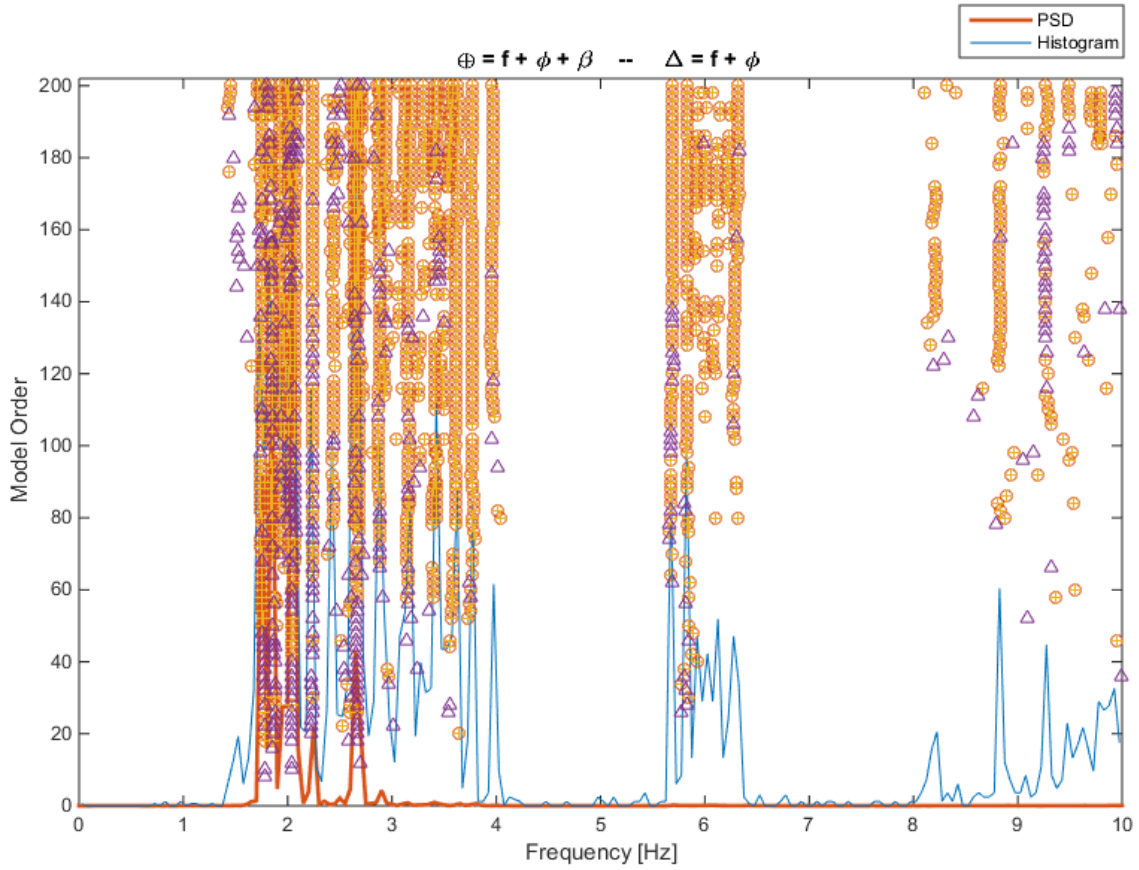


Ilustración 4-49: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo norte CRSH 2004.

Tabla 4-16: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo norte CRSH 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.748	0.81	0.73	0.02	22
1.850	0.56	1.01	0.03	14
1.926	0.29	0.68	0.02	26
1.970	1.29	3.05	0.09	11
2.064	1.96	0.42	0.01	30
2.236	0.07	0.37	0.01	21
2.440	0.41	0.62	0.02	12
2.656	2.16	0.60	0.02	49
2.878	0.43	0.59	0.02	16
3.150	1.61	0.88	0.03	19
3.299	0.66	0.97	0.03	7
3.617	0.99	1.09	0.03	37
3.765	0.31	1.00	0.03	20
3.962	0.56	1.07	0.03	18
5.690	0.30	0.35	0.01	28
5.841	2.69	1.31	0.03	40
8.214	3.59	2.46	0.07	13
8.828	0.59	0.96	0.03	15
10.713	11.47	2.04	0.05	13

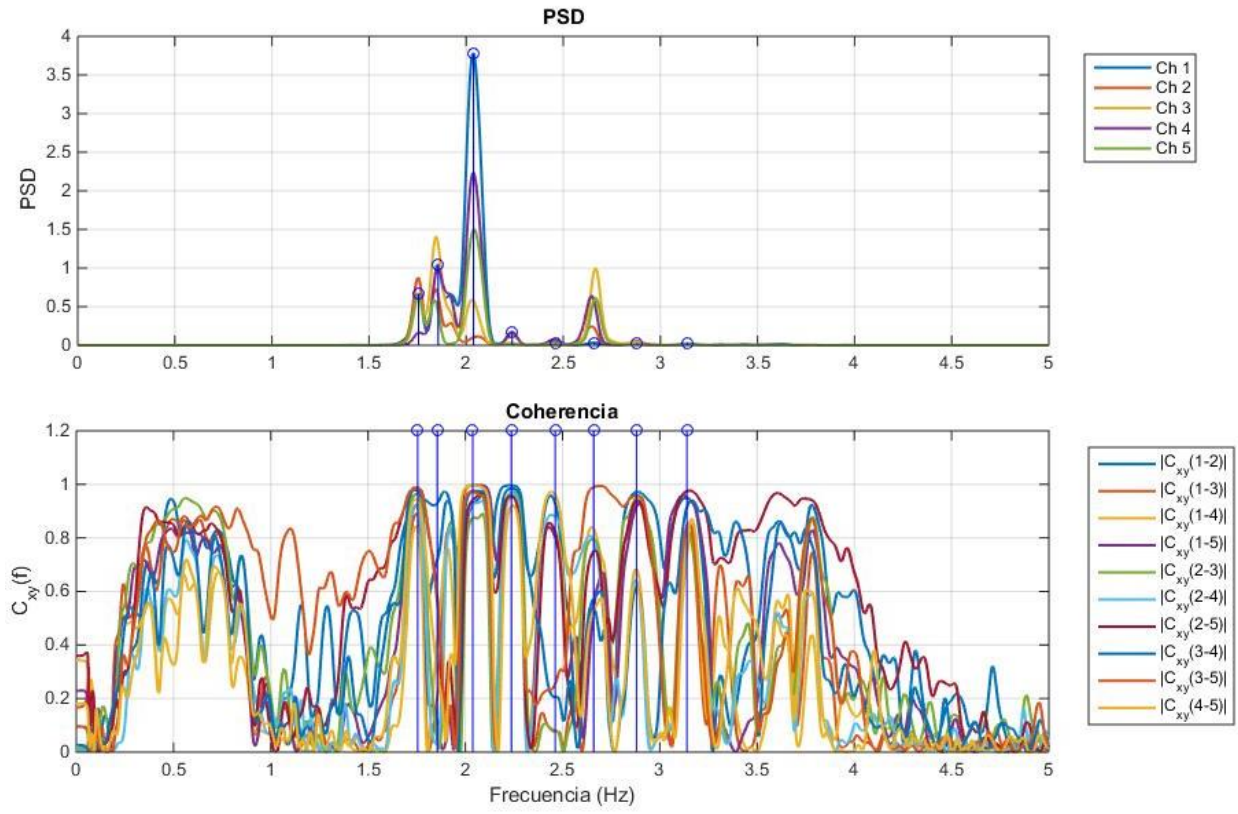


Ilustración 4-50: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Con05) tramo norte CRSH 2004.

Tabla 4-17: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	V
Ch2	2	V
Ch3	3	V
Ch4	4	V
Ch5	5	V

4.3.3.2. Diagrama de estabilidad registro vertical (Car01/Canales 6-10) tramo norte 2018

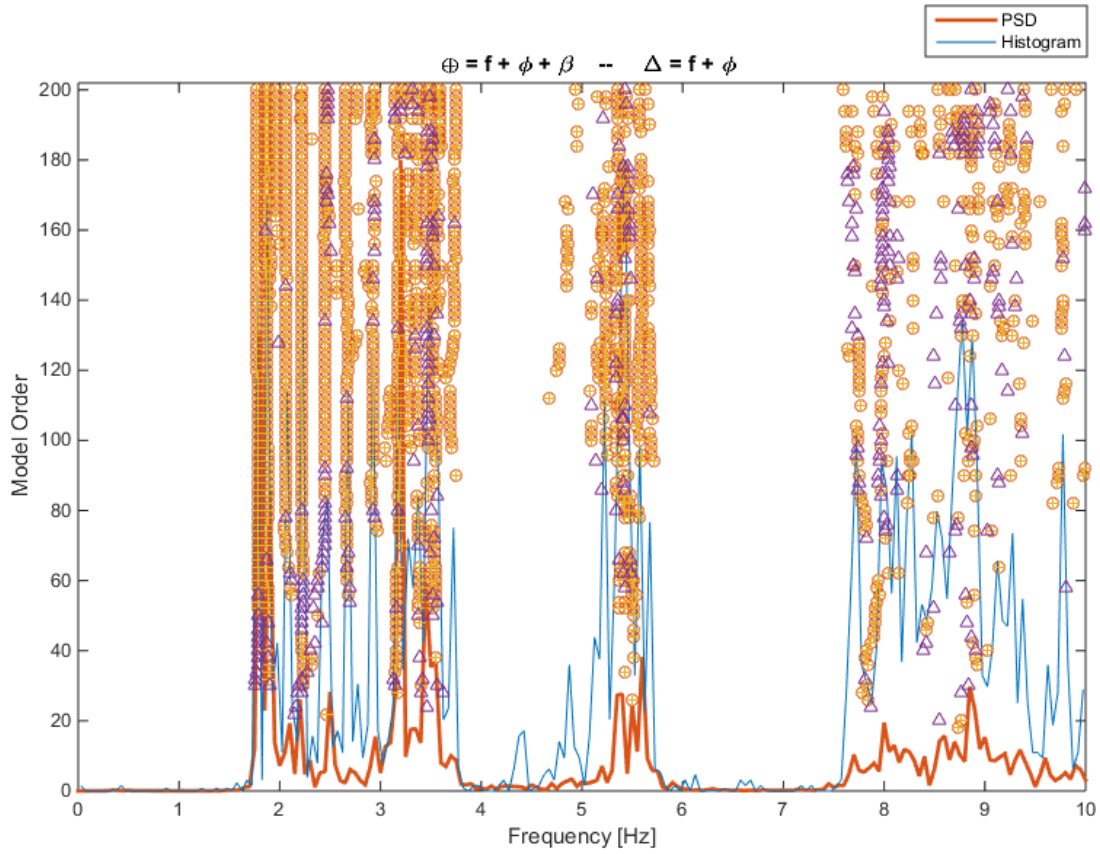


Ilustración 4-51: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo norte CRSH 2018.

Tabla 4-18: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo norte CRSH 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.773	0.79	1.01	0.03	19
1.876	0.61	1.39	0.04	20
2.058	0.30	1.96	0.06	32
2.223	0.10	0.78	0.02	43
2.448	0.26	0.79	0.02	23
2.658	0.75	1.30	0.04	17
2.918	1.04	1.83	0.06	9
3.344	4.24	1.61	0.04	17
3.500	4.21	0.41	0.01	14
3.735	1.79	1.43	0.04	17
4.653	0.55	3.31	0.09	6
5.406	2.20	1.01	0.03	15
7.913	1.79	2.51	0.08	7
8.947	10.72	0.42	0.01	6
10.192	5.92	0.85	0.03	9
10.849	2.12	1.18	0.04	10

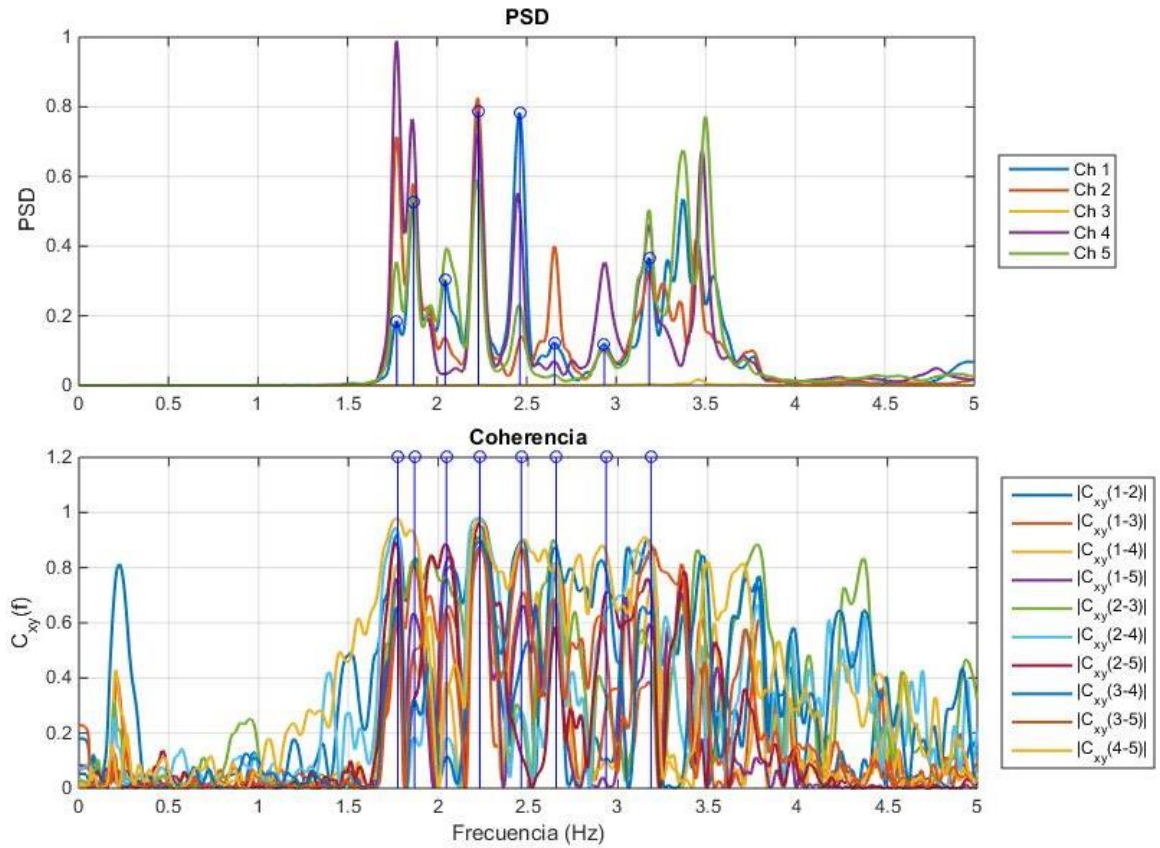
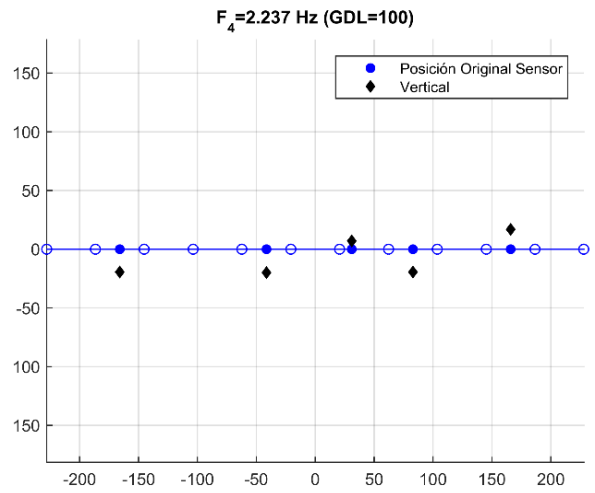
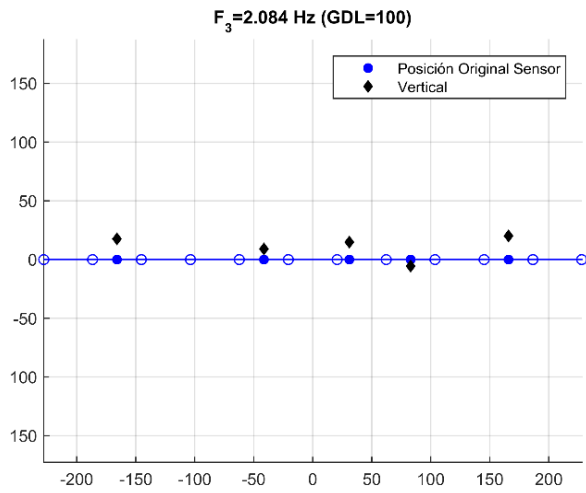
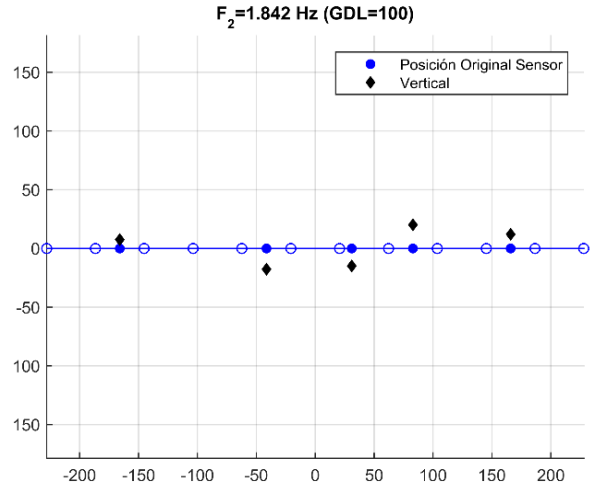
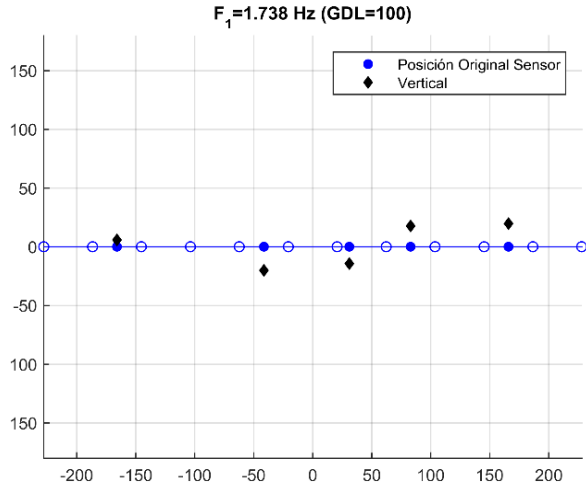


Ilustración 4-52: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Car01) tramo norte CRSH 2018.

Tabla 4-19: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	6	V
Ch2	7	V
Ch3	8	V
Ch4	9	V
Ch5	10	V

4.3.3.3. Formas modales verticales tramo norte 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)



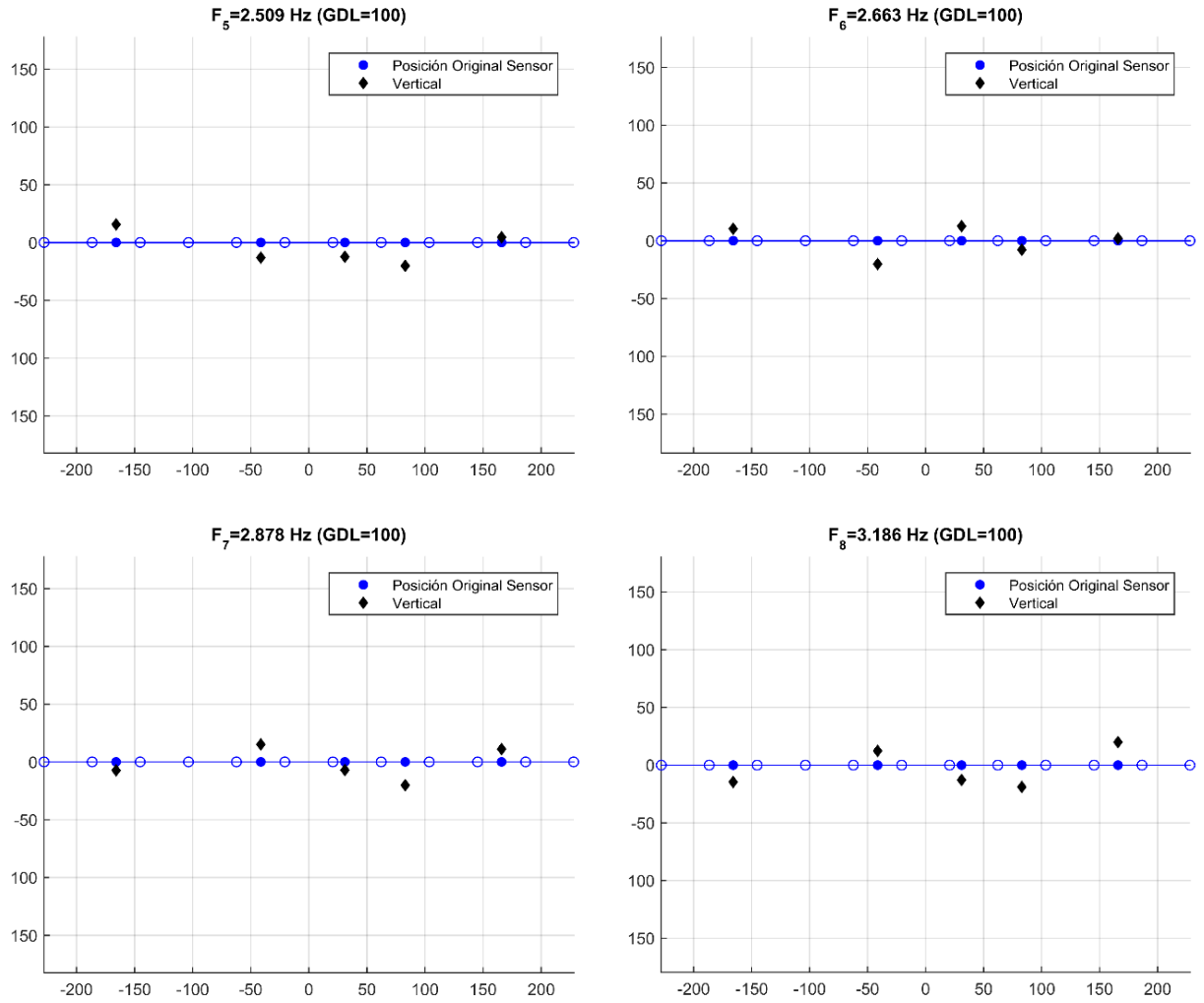
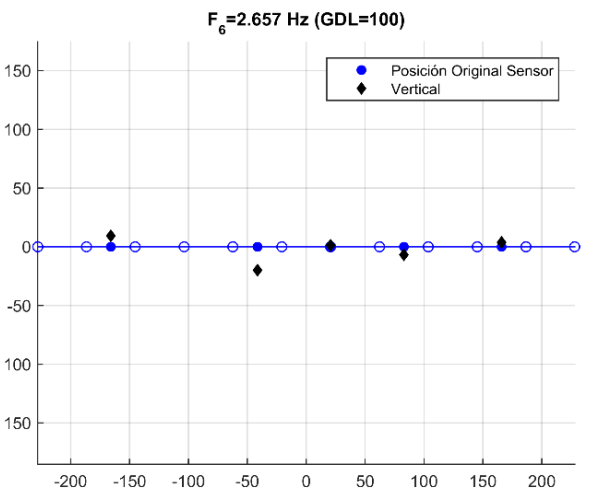
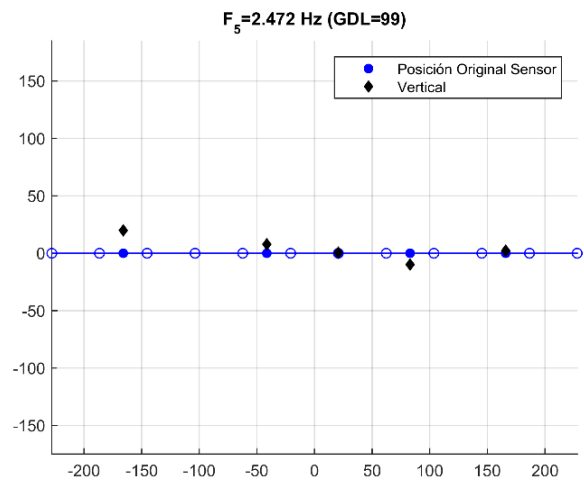
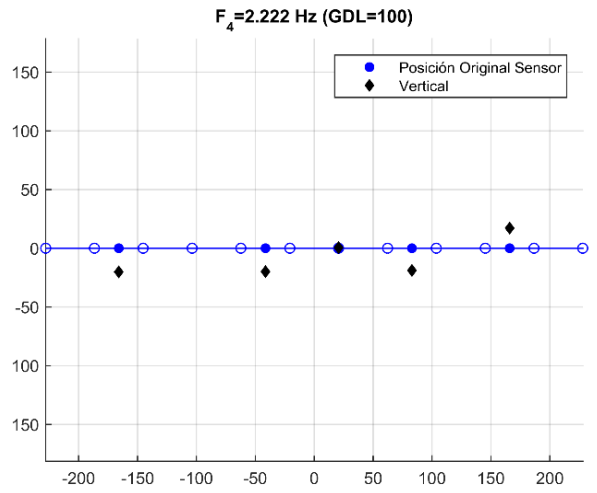
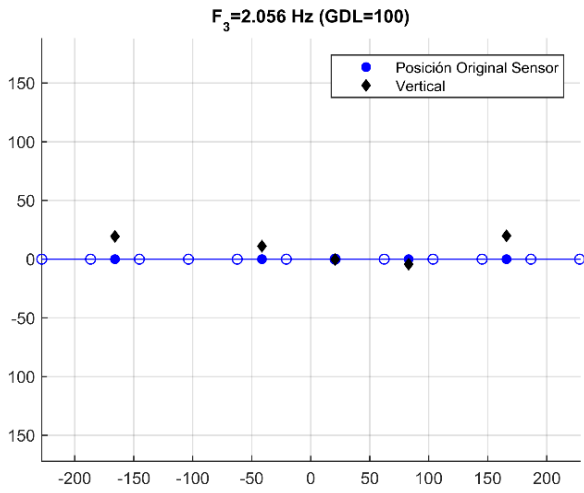
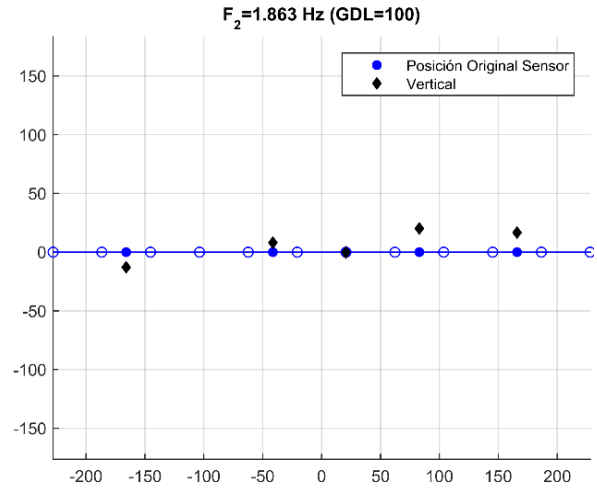
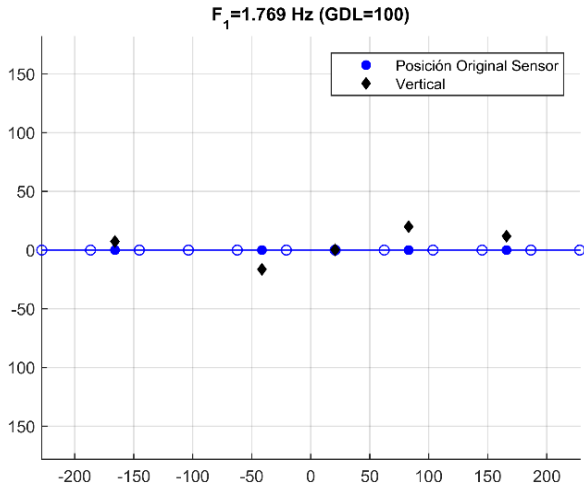


Ilustración 4-53: Formas Modales verticales tramo norte CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).

4.3.3.4. Formas modales verticales tramo norte 2018



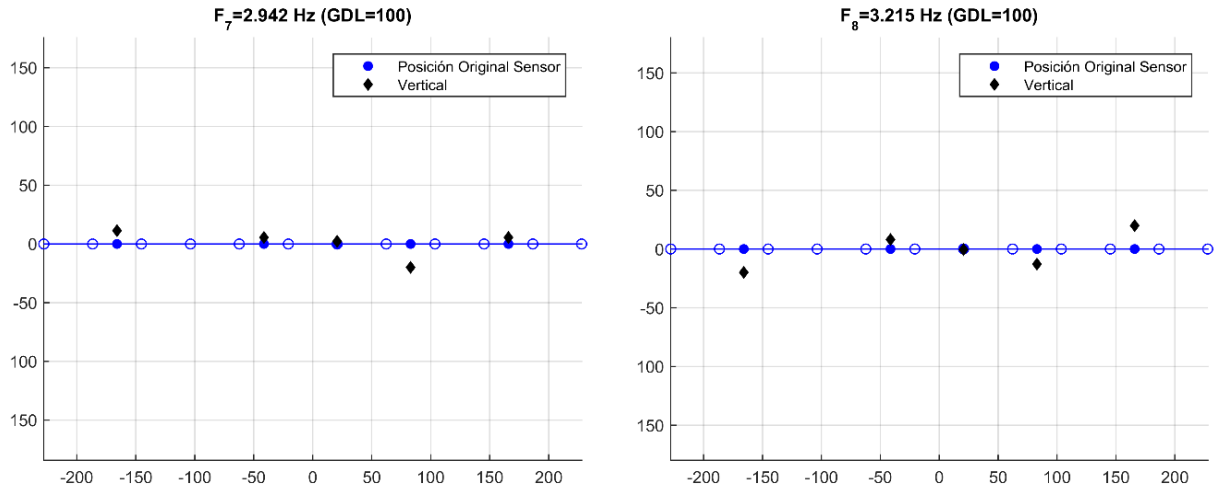


Ilustración 4-54: Formas Modales verticales tramo norte CRSH 2018.

4.3.3.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 4-20: Frecuencias modales tramo norte vertical puente CRSH

Modo	Frecuencias 2004 AD [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	1.760(FM1)	1.738(FM1)	1.769(FM1)
2		1.842(FM2)	1.863(FM2)
3	2.030(FM2)	2.084(FM3)	2.056(FM3)
4	2.220(FM3)	2.237(FM4)	2.222(FM4)
5		2.509(FM5)	2.472(FM5)
6	2.660(FM4)	2.663(FM6)	2.657(FM6)
7		2.878(FM7)	2.942(FM7)
8		3.186(FM8)	3.215(FM8)

Se observa que casi la totalidad de los modos identificados comprometen la respuesta global del tablero, esto se traduce en la alta coherencia observada para todos los canales que permiten concluir que el hecho que el puente sea materializado por vigas continuas genera una respuesta de la totalidad del tablero.

El primer modo vertical corresponde a un modo de 1.74 Hz en el año 2004 y a 1.77 Hz el año 2018 este modo correspondería a un modo que envuelve la respuesta de la totalidad de los vanos entendiéndose que el modo es de una característica sinusoidal con ceros en las cepas.

El segundo modo corresponde a una frecuencia de 1.84 y 1.87 Hz y se cree que este estaría relacionado con torsión longitudinal (warping).

A partir de la comparación de los resultados obtenidos para el año 2004 y el año 2018 relacionado a los primeros dos modos verticales se puede inferir que no ha existido un cambio significativo de la estructura en relación al comportamiento vertical del sistema.

En relación a los modos que se observan entre 2 a 3.6 Hz se asociarían a modos que relacionan en algún grado la respuesta local longitudinal de las cepas. Algunos de estos

corresponderían al tipo sinusoidal y otros corresponderían a warping. Cabe mencionar que para poder dilucidar cuales modos corresponderían a sinusoidales o warping habría sido necesario medir a ambos lados del tablero (cuestión que no se realizó por dificultad de cruzar los cables por debajo del tablero). Adicionalmente, se observa que sería interesante poder medir la respuesta de las cepas (longitudinal) y el movimiento vertical del tablero para poder dilucidar como se relacionan los movimientos de las cepas con los movimientos verticales del tablero.

En relación a lo obtenido por C. Benavides versus el reprocesamiento de datos, se observa que con SSI fue posible identificar un número mucho mayor de frecuencias y formas modales. Las formas modales 1, 2, 3 y 4 encontradas en la memoria de C. Benavides coinciden con las formas modales 1, 3, 4 y 6 identificadas con SSI.

4.3.4. Tramo sur longitudinal

4.3.4.1. Diagrama de estabilidad registro longitudinal (Con07/Canales 1-5) tramo sur 2004

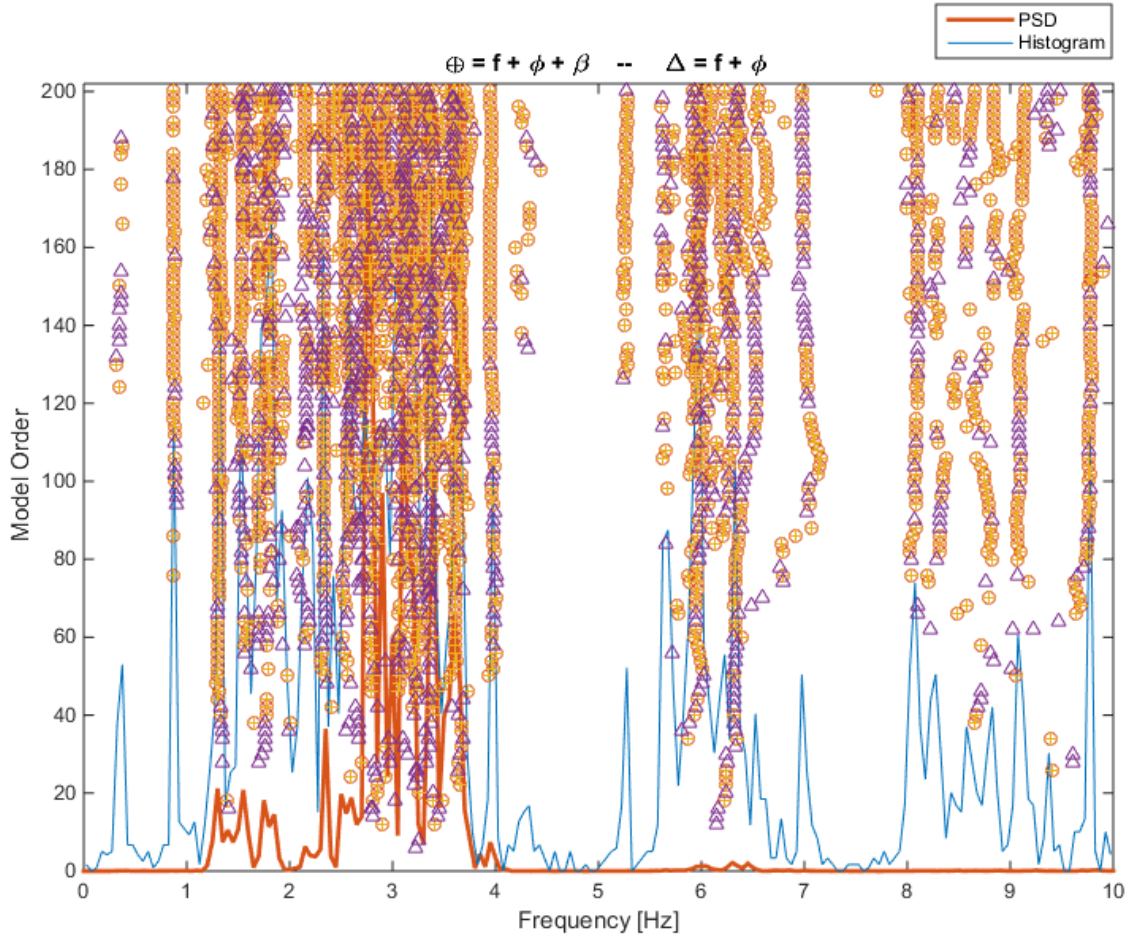


Ilustración 4-55: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo sur CRSH 2004.

Tabla 4-21: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo sur CRSH 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.878	0.62	1.09	0.04	7
1.316	0.69	1.96	0.05	20
1.538	1.39	2.14	0.06	10
1.705	1.09	1.00	0.03	14
1.812	2.06	1.54	0.04	12
2.332	0.78	1.03	0.03	13
2.429	0.96	0.64	0.02	7
2.560	2.14	1.66	0.05	11
2.735	2.62	0.95	0.03	8
2.820	3.00	2.19	0.07	8
2.932	2.97	1.05	0.03	10
3.161	3.23	3.68	0.11	15
3.366	3.56	0.61	0.02	13
3.634	2.95	1.72	0.05	18
3.954	0.53	0.88	0.03	23
5.264	1.36	0.78	0.02	6
6.272	6.80	1.50	0.04	20
6.985	0.78	0.11	0.00	6
8.098	0.48	0.29	0.01	9
8.789	5.39	2.99	0.07	16
9.086	7.98	0.73	0.02	10
9.779	0.79	0.47	0.01	15
10.122	0.72	0.78	0.02	29

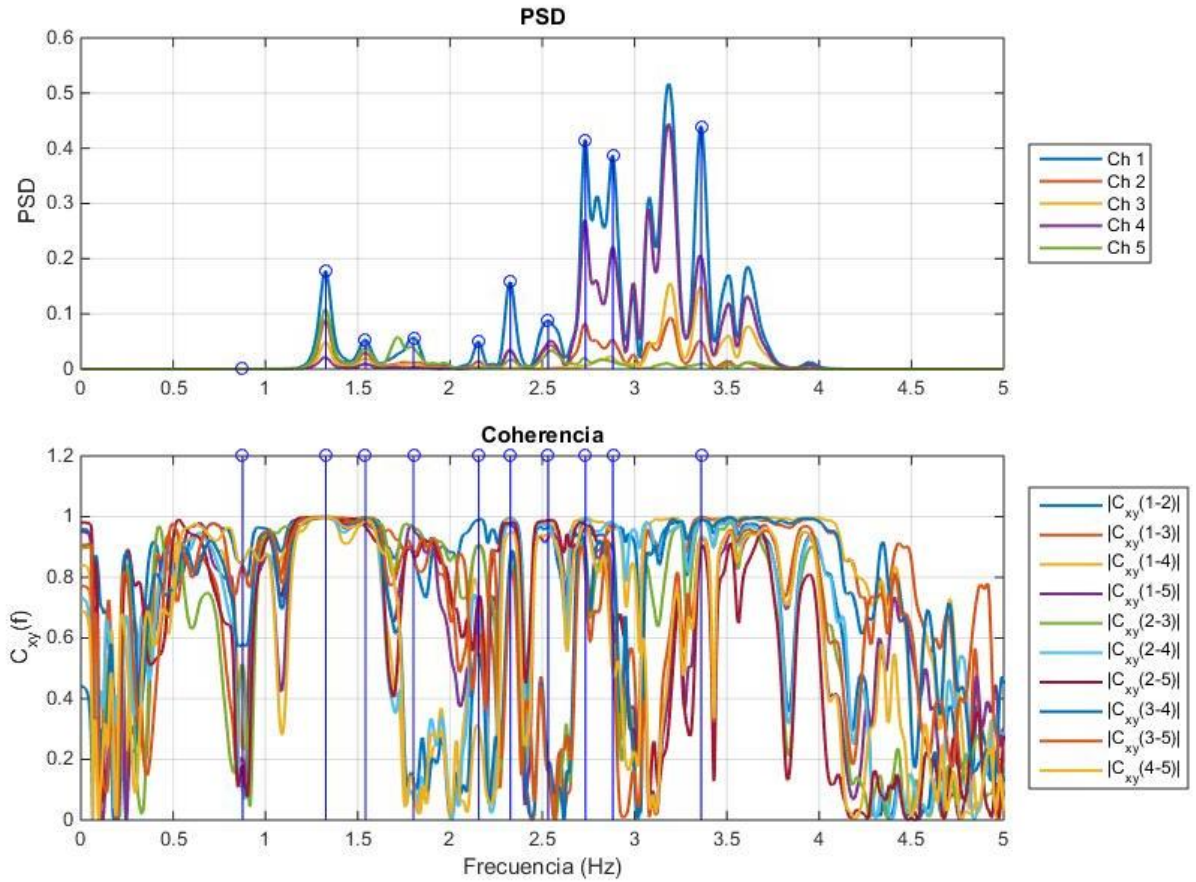


Ilustración 4-56: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Con07) tramo sur CRSH 2004.

Tabla 4-22: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	L
Ch2	2	L
Ch3	3	L
Ch4	4	L
Ch5	5	L

4.3.4.2. Diagrama de estabilidad registro longitudinal (Car03/Canales 1-5) tramo sur 2018

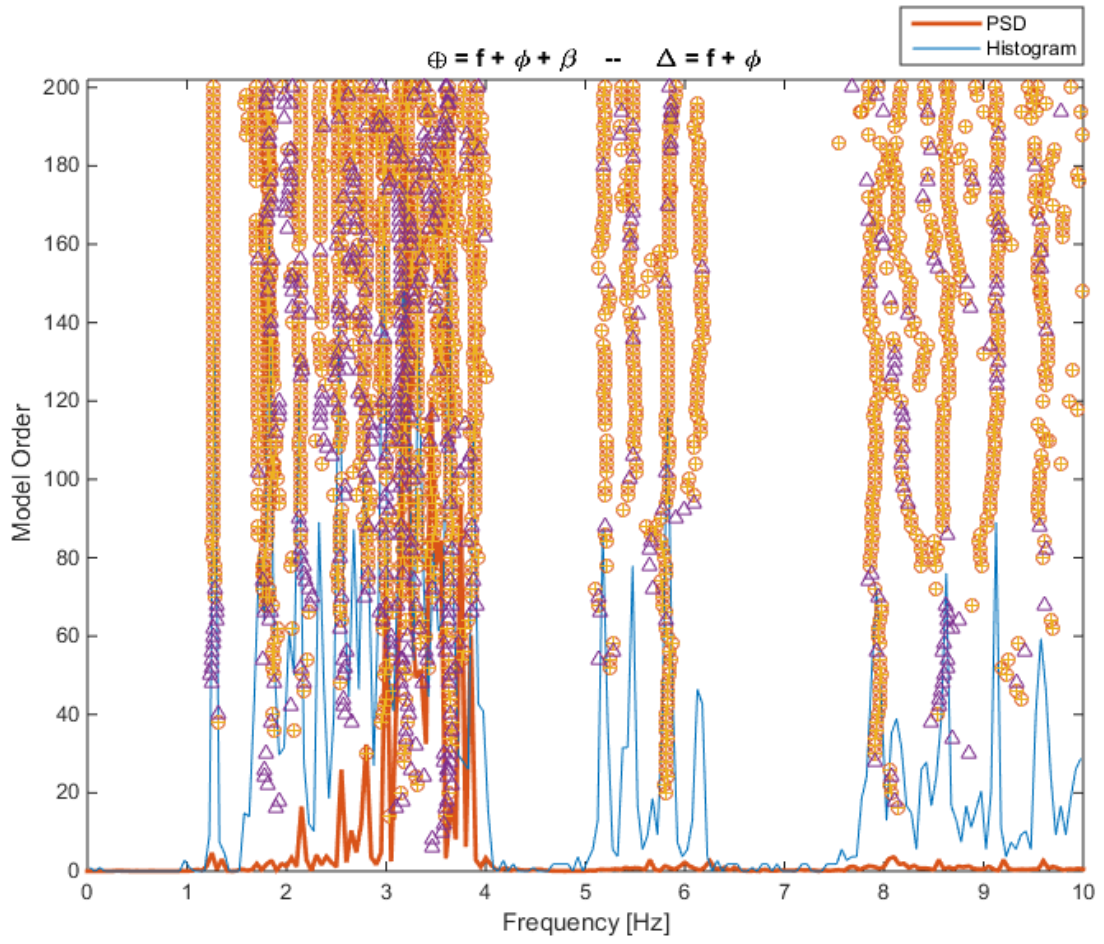


Ilustración 4-57: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo sur CRSH 2018.

Tabla 4-23: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo sur CRSH 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.261	0.14	1.71	0.04	48
1.711	0.72	2.05	0.06	18
1.841	2.07	6.95	0.22	14
2.138	0.34	1,20	0.04	13
2.336	0.57	1.60	0.04	9
2.531	1.16	4.92	0.16	6
2.704	3.68	3.66	0.10	6
2.778	1.34	1.58	0.05	7
2.976	1.70	1.03	0.04	12
3.315	1.41	2.59	0.08	17
3.633	1.56	1.81	0.05	29
3.749	3.60	6.36	0.08	6
3.890	1.09	2.02	0.07	25
5.204	1.92	2.87	0.09	12
5.477	1.94	1.35	0.04	17
5.829	2.29	2.51	0.07	30
6.137	2.51	2.39	0.07	14
7.932	3.74	3.65	0.11	22
8.350	8.68	1.53	0.05	8
8.835	5.06	1.66	0.04	16
9.085	5.93	1.20	0.03	6
9.593	3.74	0.97	0.03	17
10.886	9.99	6.20	0.18	17

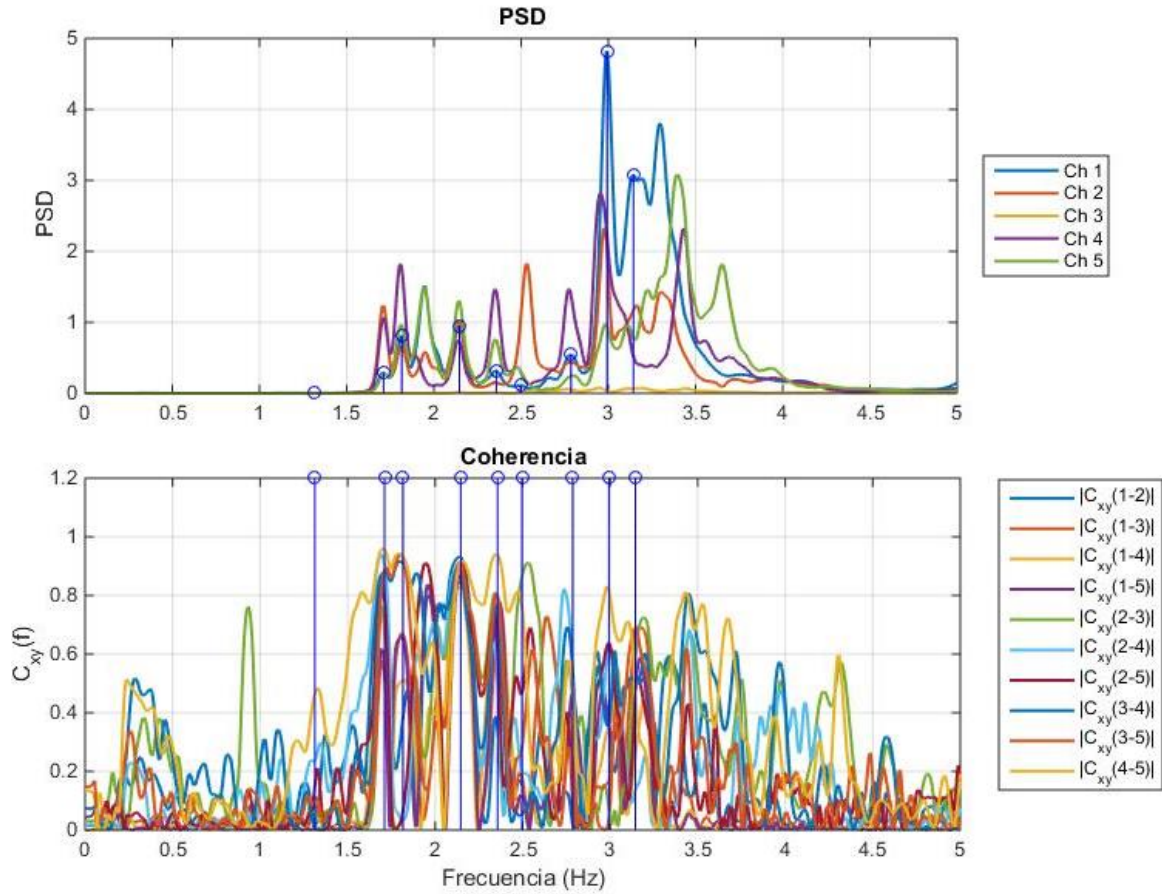
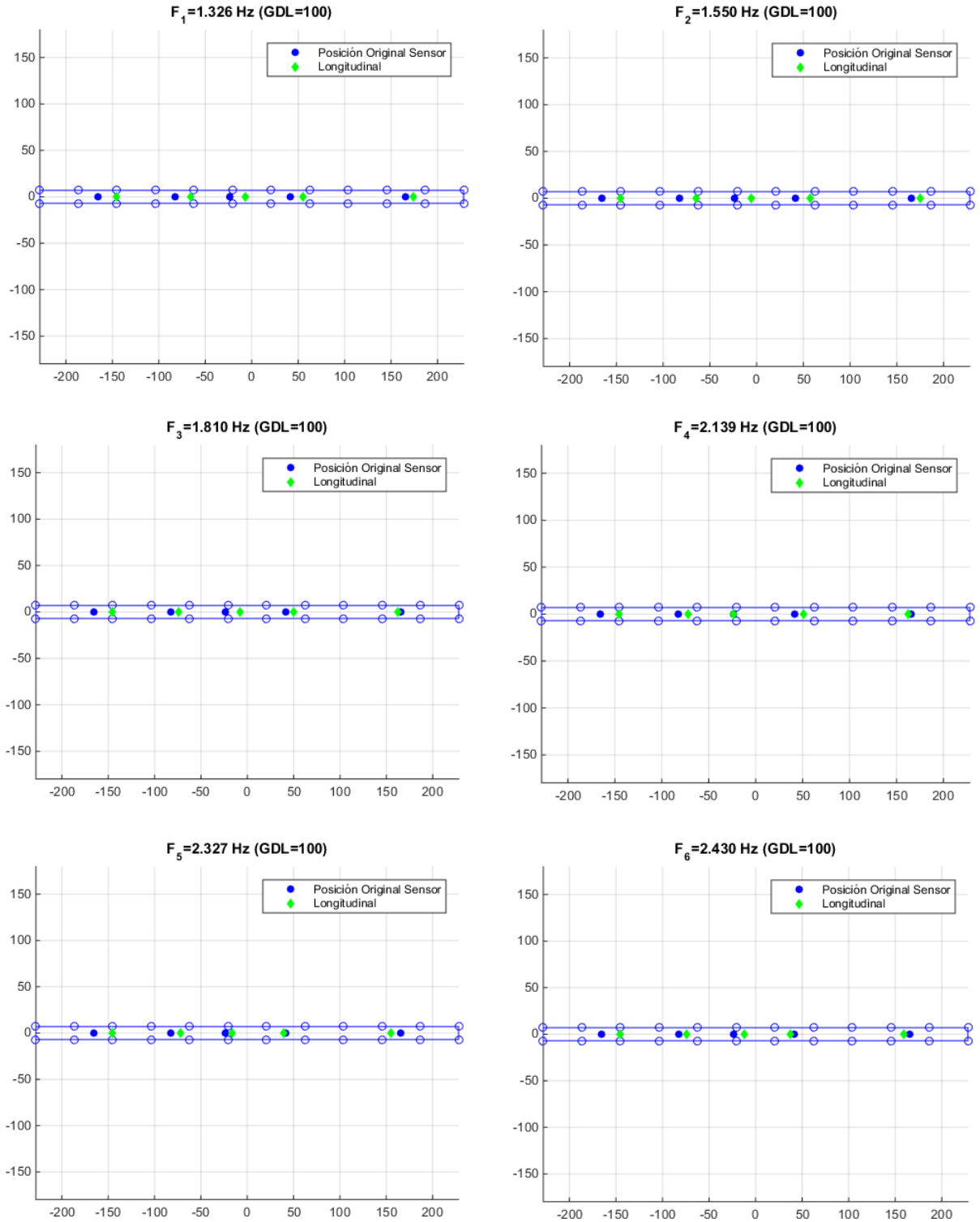


Ilustración 4-58: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Car03) tramo sur CRSH 2018.

Tabla 4-24: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	L
Ch2	2	L
Ch3	3	L
Ch4	4	L
Ch5	5	L

4.3.4.3. Formas modales longitudinales tramo sur 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)



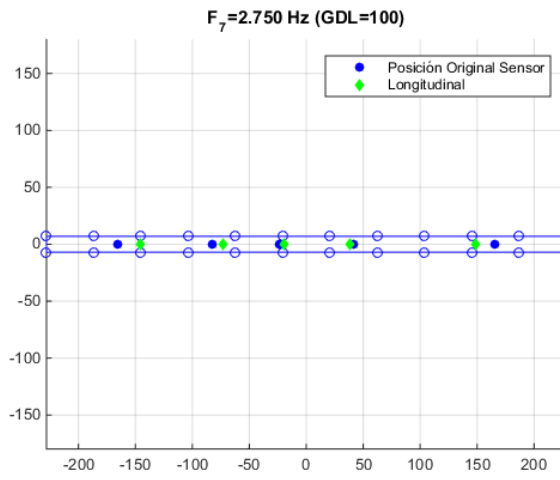
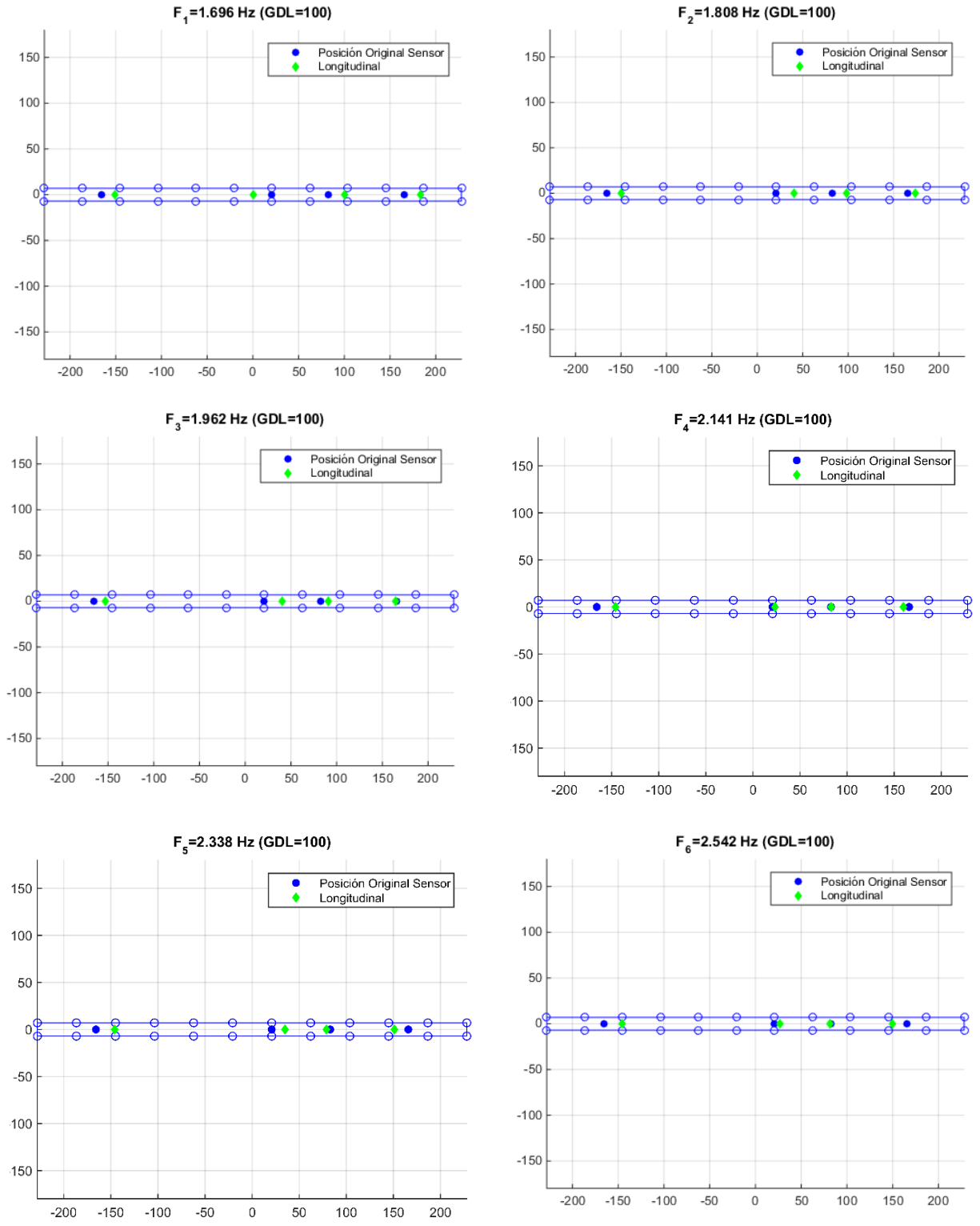


Ilustración 4-59: Formas Modales longitudinales tramo sur CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).

4.3.4.4. Formas modales longitudinales tramo sur 2018



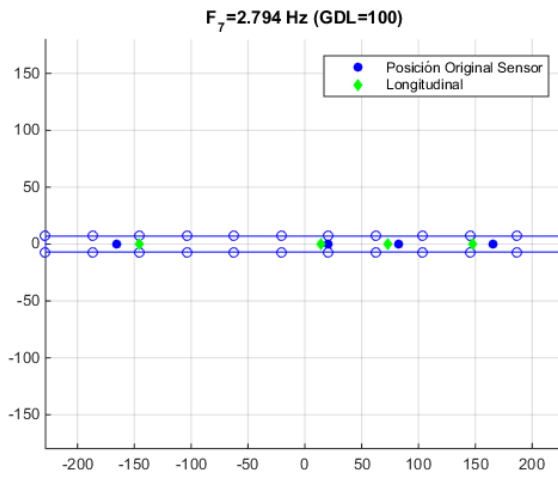


Ilustración 4-60: Formas Modales longitudinales tramo sur CRSH 2018.

4.3.4.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 4-25: Frecuencias modales tramo sur longitudinal puente CRSH

Modo	Frecuencias 2004 CB [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	1.320(FM1)	1.326(FM1)	
2	1.540(FM2)	1.550(FM2)	1.696(FM1)
3		1.810(FM3)	1.808(FM2)
4	1.930(FM3)		1.960(FM3)
5		2.139(FM4)	2.141(FM4)
6		2.327(FM5)	2.338(FM5)
7		2.430(FM6)	2.542(FM6)
8		2.750(FM7)	2.794(FM7)

En el tramo sur del puente CRSH se observa un cambio significativo de los modos principales que se refieren a la respuesta longitudinal del tablero en términos de sus frecuencias naturales y formas modales. En este contexto, se observa que en el año 2004 el movimiento del tablero se relacionaba a cuatro modos de frecuencias 1.33, 1.55 y 1.81 Hz; en cambio, en el año 2018 se observa que los modos relacionados a la respuesta longitudinal del tablero son tres con frecuencias significativamente mayores e iguales a 1.70, 1.81 y 1.96 Hz. En este sentido es posible concluir que existe una rigidización del comportamiento longitudinal del tablero. Además, se observa que en la medición Car03 del 2018, el CH3 prácticamente no presenta movimiento (para estos modos y un bajo movimiento para modos de frecuencias superiores). Esto indicaría que cercano a la Cepa 17 (en la mitad del tramo sur) existiría algún fenómeno que traba el movimiento longitudinal (al menos para microvibraciones). Se desconoce si esto corresponde al efecto de reforzamiento que tuvo la estructura o algún otro efecto desconocido. Es interesante observar que en la medición Car 04 del 2018 (relacionada al movimiento transversal) se mantuvo la posición del CH3 observándose un mismo nivel de energía (lo cual comprueba el hecho de que el movimiento es bajo).

Es interesante notar que el método SSI identifica modos de baja frecuencia que muestran muy poca energía en el espectro de potencia, por lo cual son descartados. Es decir, se observa para el 2004 un modo de una frecuencia de 0.88 Hz y para el 2018 uno de 1.26

Hz. Se puede ver que estos modos corresponden a modos transversales como se mostrará en la sección siguiente. En este contexto, se puede concluir que los sensores no estaban perfectamente orientados en sentido longitudinal y por ello se observa el efecto transversal.

Por otro lado, tanto en las mediciones de 2004 y 2018 se ven modos de frecuencias que varían entre los 2.1 Hz a 3.7 Hz que se asociarían a las respuestas locales de las cepas en el sentido longitudinal, entendiéndose que estas frecuencias son variables debido a la existencia de cepas de diversas alturas y estructuración. Cabe mencionar que los valores de frecuencias naturales para el año 2004 y 2018 están en el mismo rango lo que permite concluir que las cepas no tuvieron un cambio significativo de frecuencias en el sentido longitudinal.

En este tramo solo se identifican dos de las formas modales en el reprocesamiento de datos del año 2004, las cuales corresponden a las formas 1 y 2 encontradas por C. Benavides que calzan con las formas 1 y 2 encontradas con SSI. La forma modal asociada a la frecuencia de 1.93 Hz, no se identifica en el reprocesamiento, pero sí el año 2018.

4.3.5. Tramo sur transversal

4.3.5.1. Diagrama de estabilidad registro transversal (Con09/Canales 1-5) tramo sur 2004

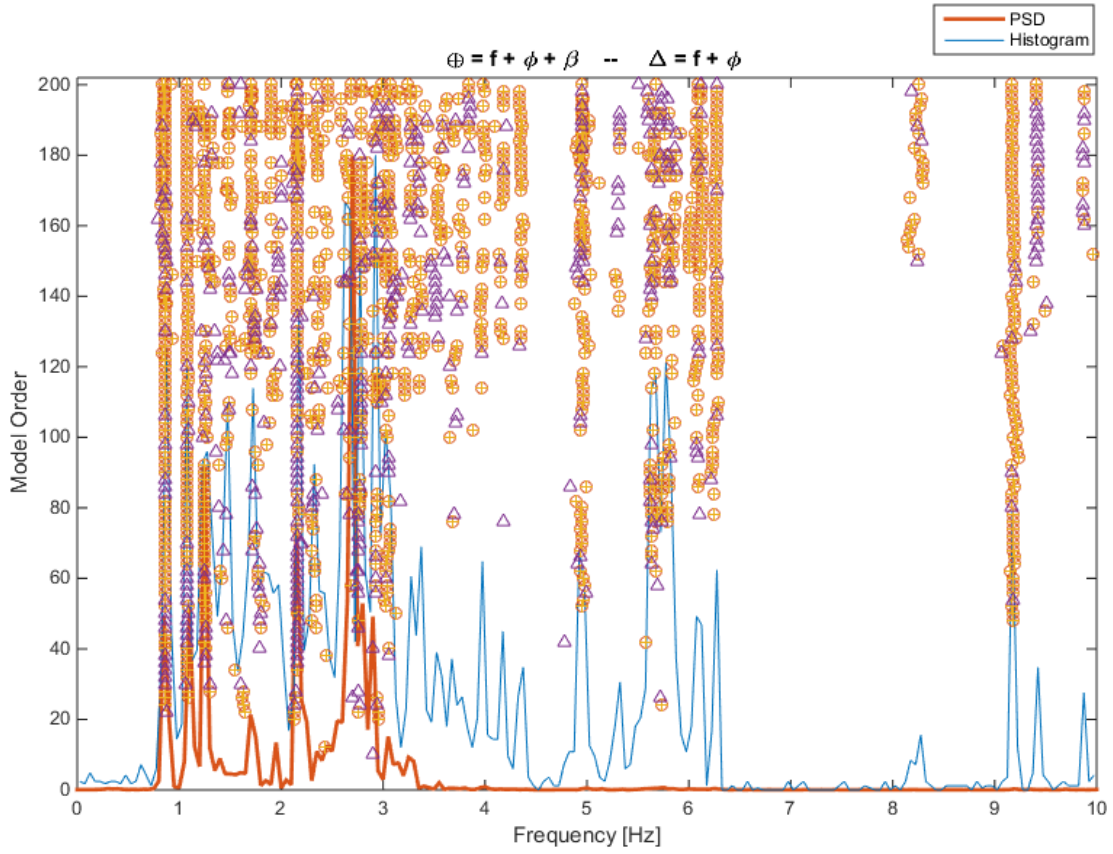


Ilustración 4-61: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo sur CRSH 2004.

Tabla 4-26: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo sur CRSH 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.863	0.20	0.55	0.01	24
1.080	0.42	1.23	0.04	21
1.255	0.66	2.95	0.09	15
1.706	0.46	2.13	0.05	8
1.911	1.42	1.66	0.05	8
2.160	0.24	0.51	0.02	18
2.342	1.55	2.94	0.08	6
2.781	0.22	0.60	0.02	12
2.944	1.34	1.53	0.04	7
3.056	3.19	2.80	0.09	8
3.984	1.80	1.55	0.04	10
4.353	1.04	1.41	0.04	10
4.956	1.65	3.62	0.10	17
5.656	4.31	1.35	0.04	15
6.069	5.83	0.76	0.02	12
6.273	0.44	0.85	0.03	16
8.240	4.95	4.26	0.12	13
9.179	1.37	1.35	0.03	31
10.115	0.95	0.58	0.02	6

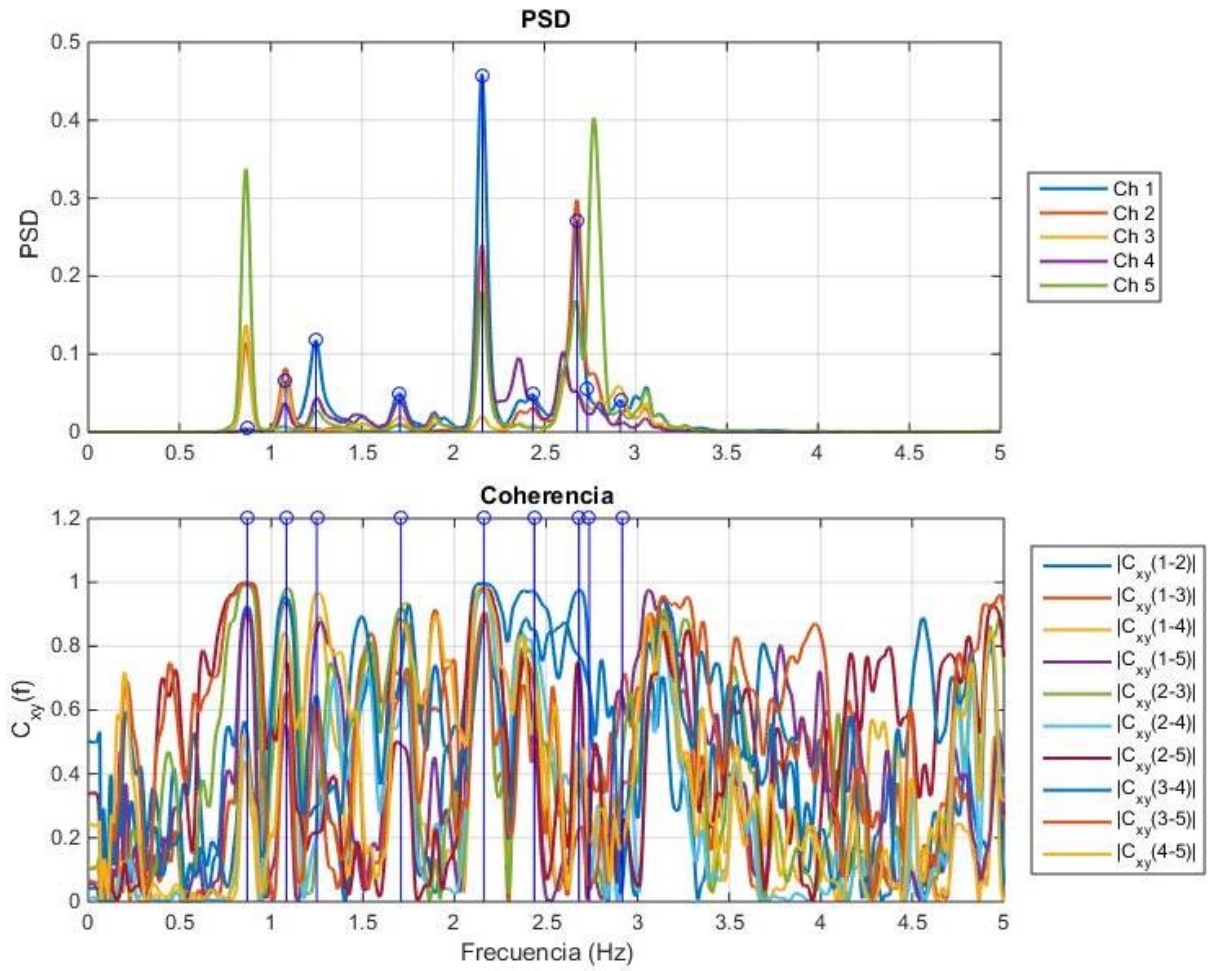


Ilustración 4-62: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Con09) tramo sur CRSH 2004.

Tabla 4-27: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	T
Ch2	2	T
Ch3	3	T
Ch4	4	T
Ch5	5	T

4.3.5.2. Diagrama de estabilidad registro transversal (Car04/Canales 1-5) tramo sur 2018

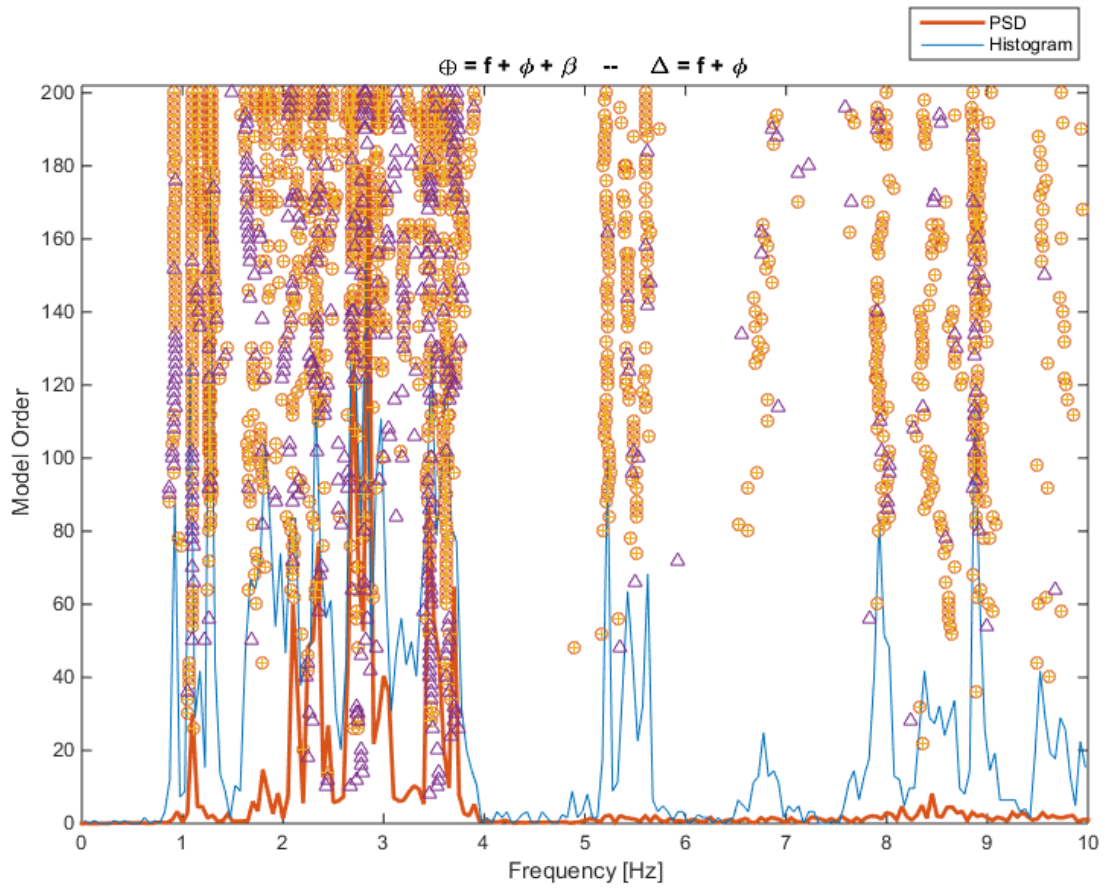


Ilustración 4-63: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo sur CRSH 2018.

Tabla 4-28: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo sur CRSH 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.923	0.70	1.41	0.05	11
1.098	0.20	1.37	0.04	33
1.265	0.13	1.66	0.05	21
2.685	0.14	0.96	0.02	14
2.950	1.78	1.16	0.03	8
3.465	3.04	1.66	0.04	13
3.617	2.54	2.98	0.09	21
5.220	1.32	3.28	0.11	9
5.460	3.02	2.78	0.07	9
5.615	0.96	2.48	0.07	9
6.763	6.94	6.73	0.16	10
7.928	3.14	4.93	0.16	9
8.590	3.33	5.69	0.18	9
8.902	4.95	0.57	0.02	10

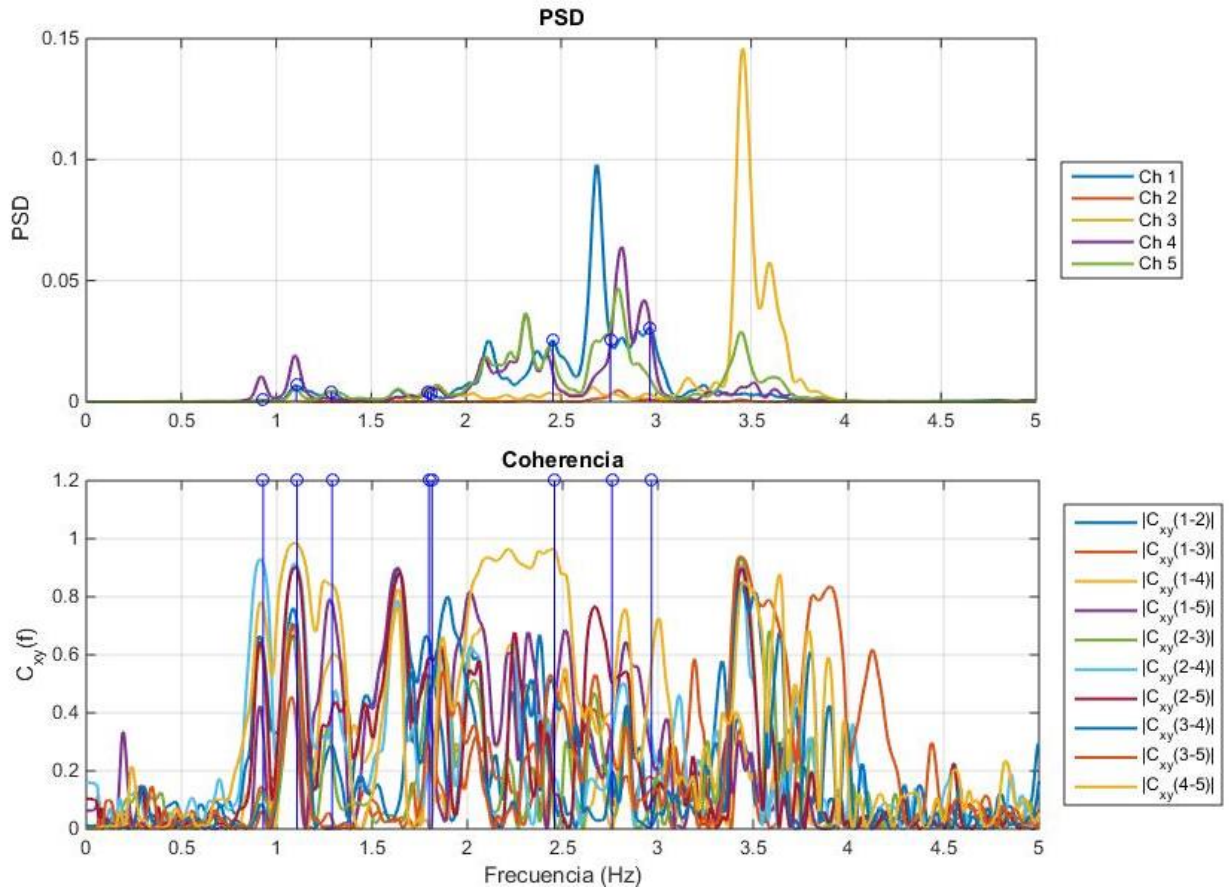
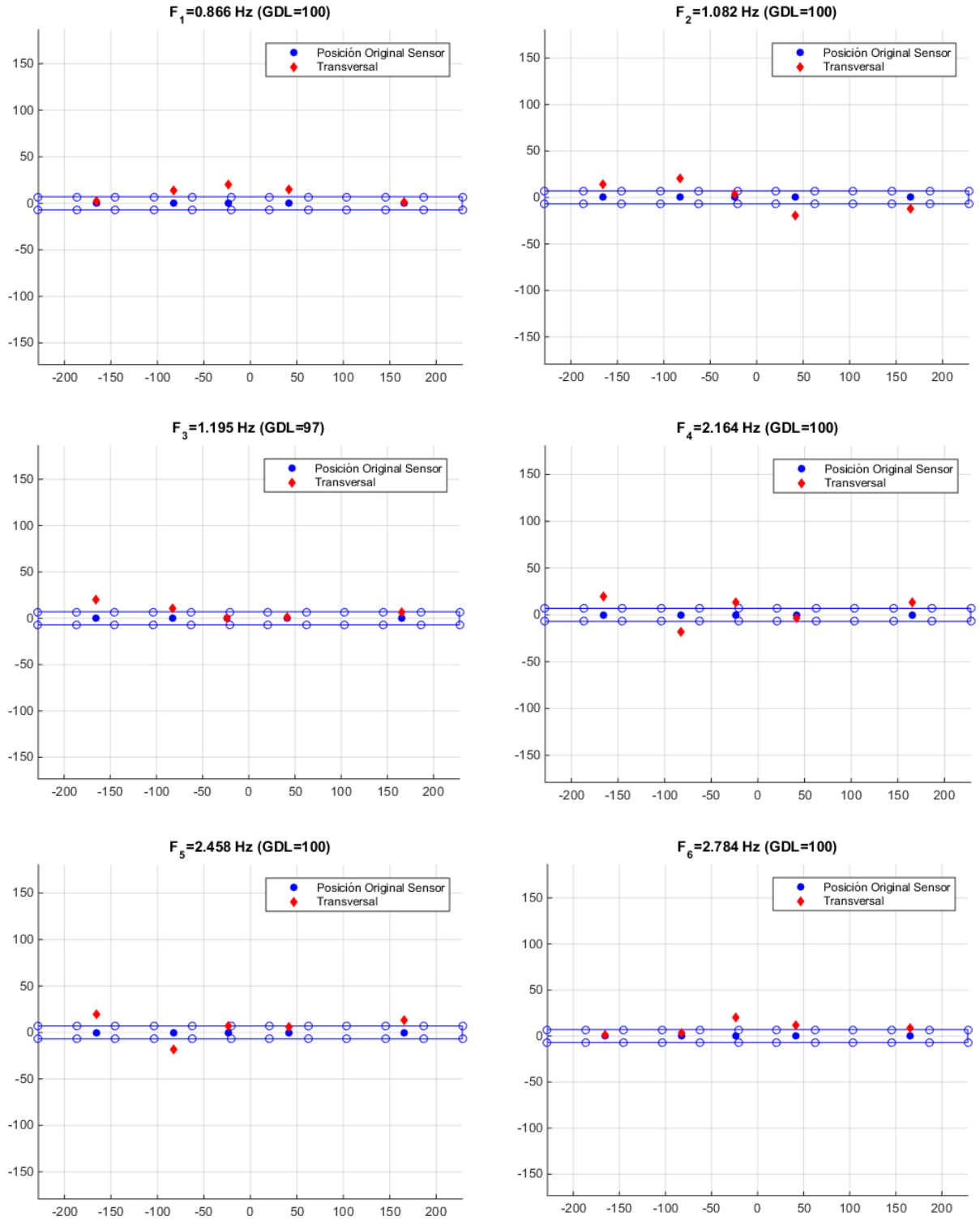


Ilustración 4-64: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (car04) tramo sur CRSH 2018.

Tabla 4-29: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	T
Ch2	2	T
Ch3	3	L
Ch4	4	T
Ch5	5	T

4.3.5.3. Formas modales transversales tramo sur 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)



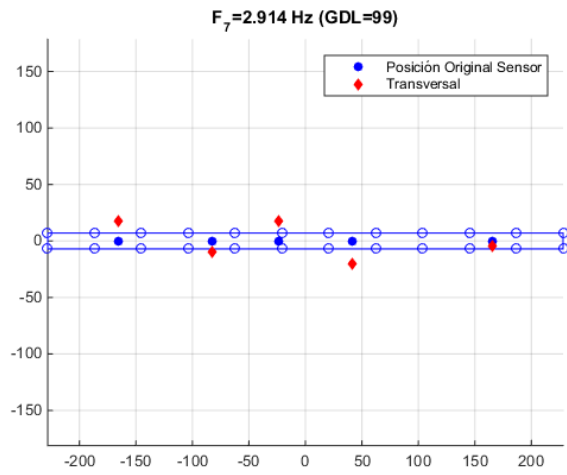
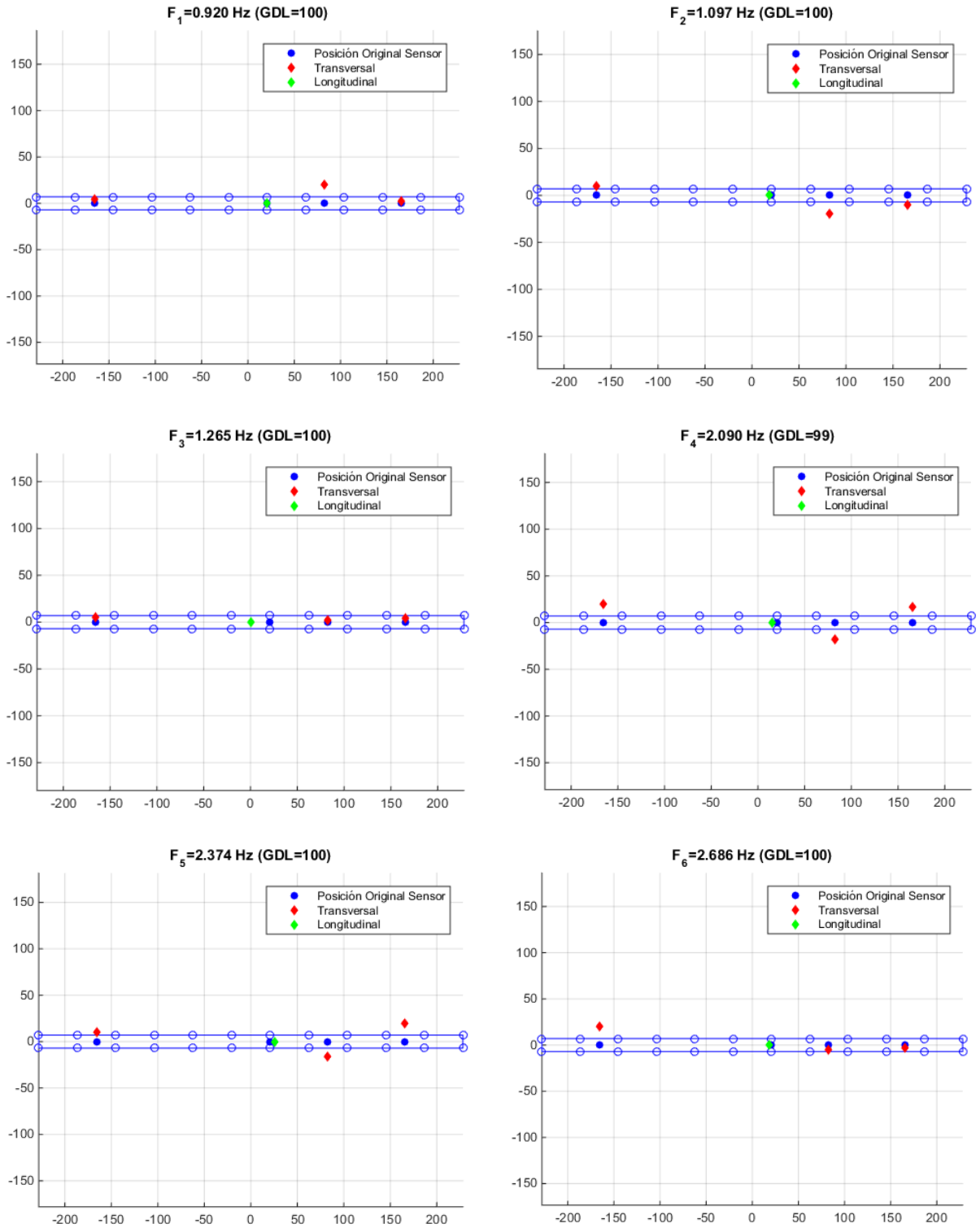


Ilustración 4-65: Formas Modales transversales tramo sur CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).

4.3.5.4. Formas modales transversales tramo sur 2018



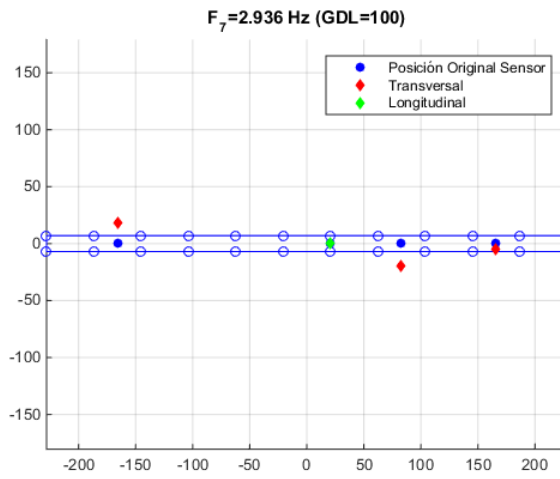


Ilustración 4-66: Formas Modales transversales tramo sur CRSH 2018.

4.3.5.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 4-30: Frecuencias modales tramo sur transversal puente CRSH

Modo	Frecuencias 2004 CB [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	0.850(FM1)	0.866(FM1)	0.920(FM1)
2	1.070(FM2)	1.082(FM2)	1.097(FM2)
3	1.250(FM3)	1.195(FM3)	1.265(FM3)
4	1.710(FM4)		
5	2.150(FM5)	2.164(FM4)	2.090(FM4)
6	2.370(FM6)	2.458(FM5)	2.374(FM5)
7	2.690(FM7)	2.784(FM6)	2.680(FM6)
8		2.914(FM7)	2.936(FM7)

Las formas modales desde la 1 a la 4 del año 2004 corresponden a las primeras 4 formas modales del año 2018; estas formas modales describen el movimiento global del tablero sin grandes cambios excepto por un aumento entre un 1% a 5% en las frecuencias asociadas a las mismas. Cabe mencionar que la primera forma modal (0.87 o 0.92 Hz) se relaciona no tendría cruces por cero; la segunda forma modal (1.08 o 1.10 Hz) tendría un cruce por cero; la tercera forma modal (1.20 o 1.27 Hz) tendría dos cruces por cero y la cuarta forma modal (2.16 o 2.09 Hz) tendría tres cruces por cero. En conclusión, se puede observar que los modos que describen la respuesta del tablero serían levemente más rígidos en el año 2018 que en el año 2004, esto se podría explicar por la presencia de los arrostramientos transversales que aumentarían levemente la rigidez transversal del tablero en el sentido transversal.

Adicionalmente se observa que en las mediciones de 2004 y 2018 se observan varios modos entre 2.15 a 3.3 Hz (12 modos) que se corresponderían a las respuestas locales de las cepas. Mostrando en ambos años frecuencias similares por lo que se podría concluir que no existen cambios significativos en las cepas en el sentido transversal. Cabe mencionar que un estudio más específico podría realizarse ya sea midiendo directamente cada cepa o posicionando los sensores sobre cada cepa.

Para el año 2018 se observa una notoria energía (en el CH5 y CH4) la cual no es observada notoriamente en el año 2004 y que se relacionarían a la frecuencia del estribo Este (E2).

Las formas modales 1, 2, 3, 5, 6 y 7 identificadas de los datos del año 2004 a través de SSI, corresponden a las formas modales 1, 2, 3, 4, 5 y 6 identificadas a través del análisis en frecuencias realizado por C. Benavides. La forma modal 4 es un modo de baja energía.

4.3.6. Tramo sur vertical

4.3.6.1. Diagrama de estabilidad registro vertical (Con10/Canales 1-5) tramo sur 2004

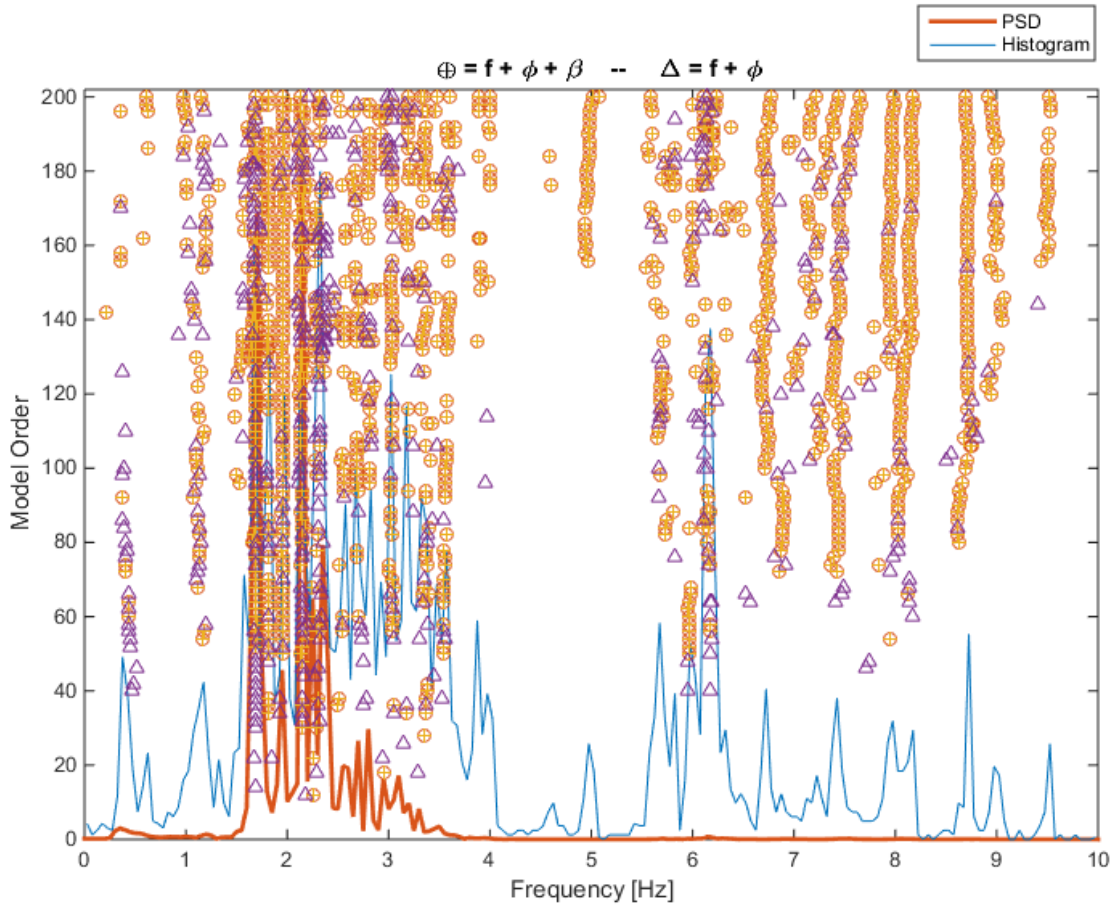


Ilustración 4-67: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo sur CRSH 2004.

Tabla 4-31: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo sur CRSH 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.686	0.19	0.63	0.02	11
1.811	0.33	1.07	0.03	16
1.955	0.41	0.84	0.03	22
2.148	1.16	0.92	0.03	13
2.676	1.69	1.57	0.05	9
2.808	0.41	1.02	0.03	6
3.037	0.61	0.88	0.03	7
3.355	2.73	1.52	0.04	6
3.552	2.47	1.88	0.07	13
4.959	2.05	1.71	0.06	7
5.968	0.82	2.93	0.07	10
6.754	5.72	1.67	0.04	13
7.430	5.92	2.00	0.06	22
8.034	7.73	1.36	0.04	15
8.706	2.24	0.75	0.03	18
9.018	3.85	1.24	0.05	6
9.502	1.67	0.96	0.02	6

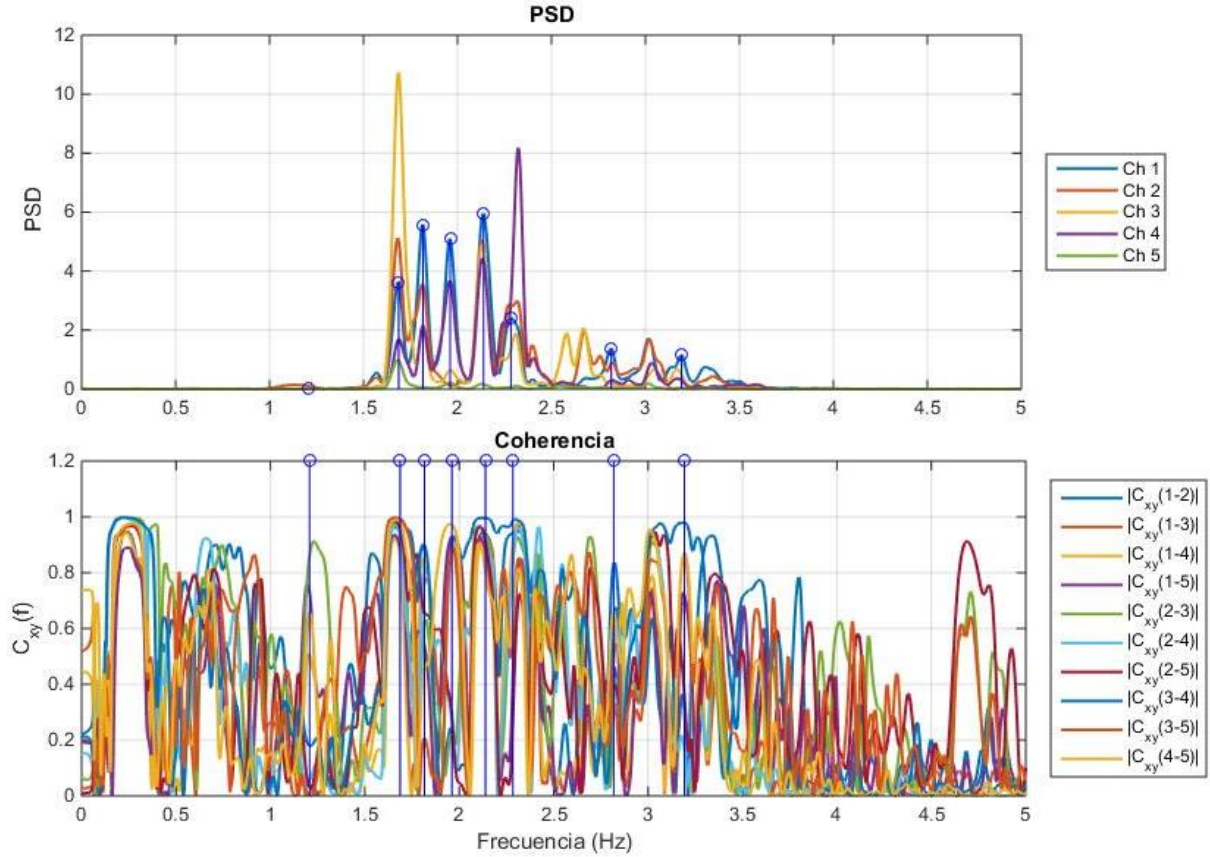


Ilustración 4-68: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Con10) tramo sur CRSH 2004.

Tabla 4-32: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	V
Ch2	2	V
Ch3	3	V
Ch4	4	V
Ch5	5	V

4.3.6.2. Diagrama de estabilidad registro vertical (Car03/Canales 6-10) tramo sur 2018

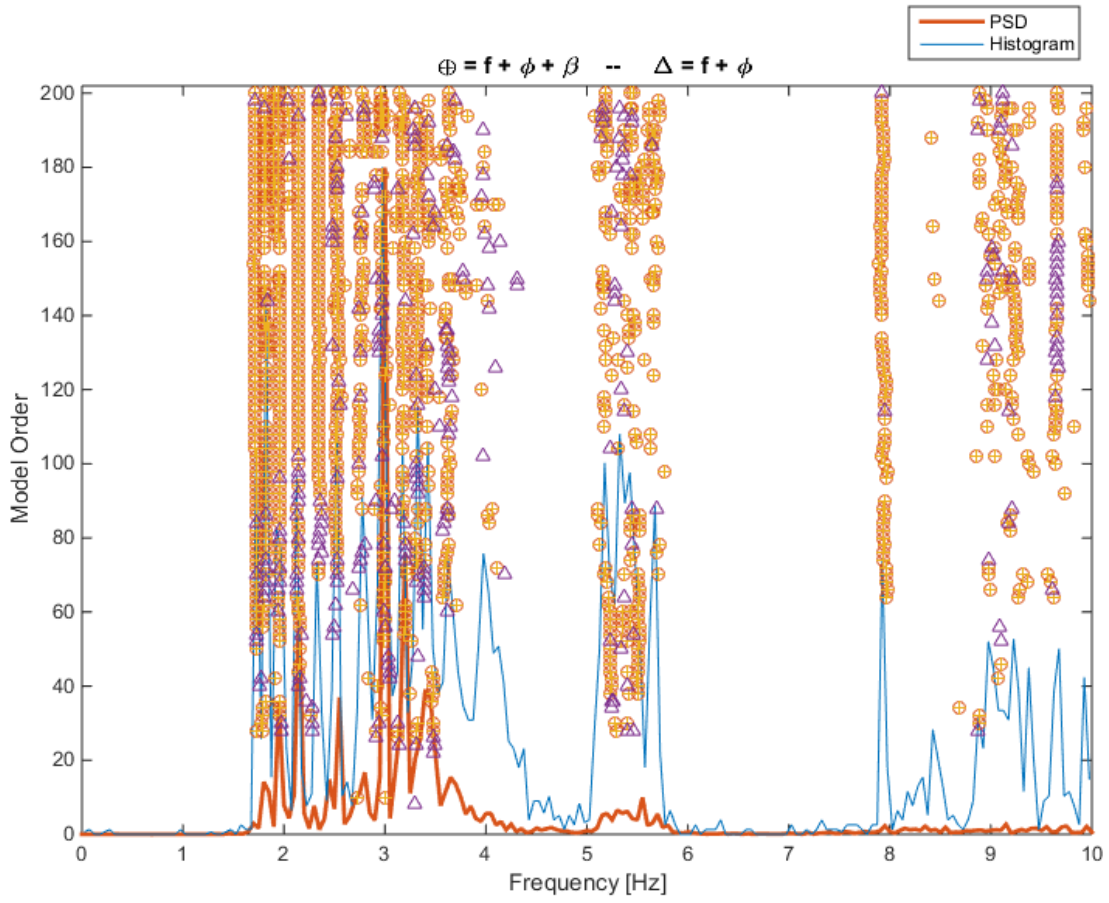


Ilustración 4-69: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo sur CRSH 2018.

Tabla 4-33: Frecuencias y amortiguamientos tablero y tramo sur CRSH 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.725	0.79	1.86	0.06	16
1.817	0.87	1.72	0.05	17
1.948	1.04	1.28	0.04	33
2.141	0.15	1.03	0.02	44
2.344	0.22	1.34	0.04	20
2.522	1.17	1.04	0.03	18
2.775	2.33	0.97	0.02	7
3.005	2.19	1.92	0.07	6
3.180	0.59	1.64	0.05	20
3.333	2.63	1.37	0.04	20
3.649	3.47	2.69	0.08	7
5.181	4.27	1.95	0.06	17
7.922	1.32	1.71	0.05	14
9.209	4.93	1.29	0.04	13
9.653	0.46	0.40	0.01	7

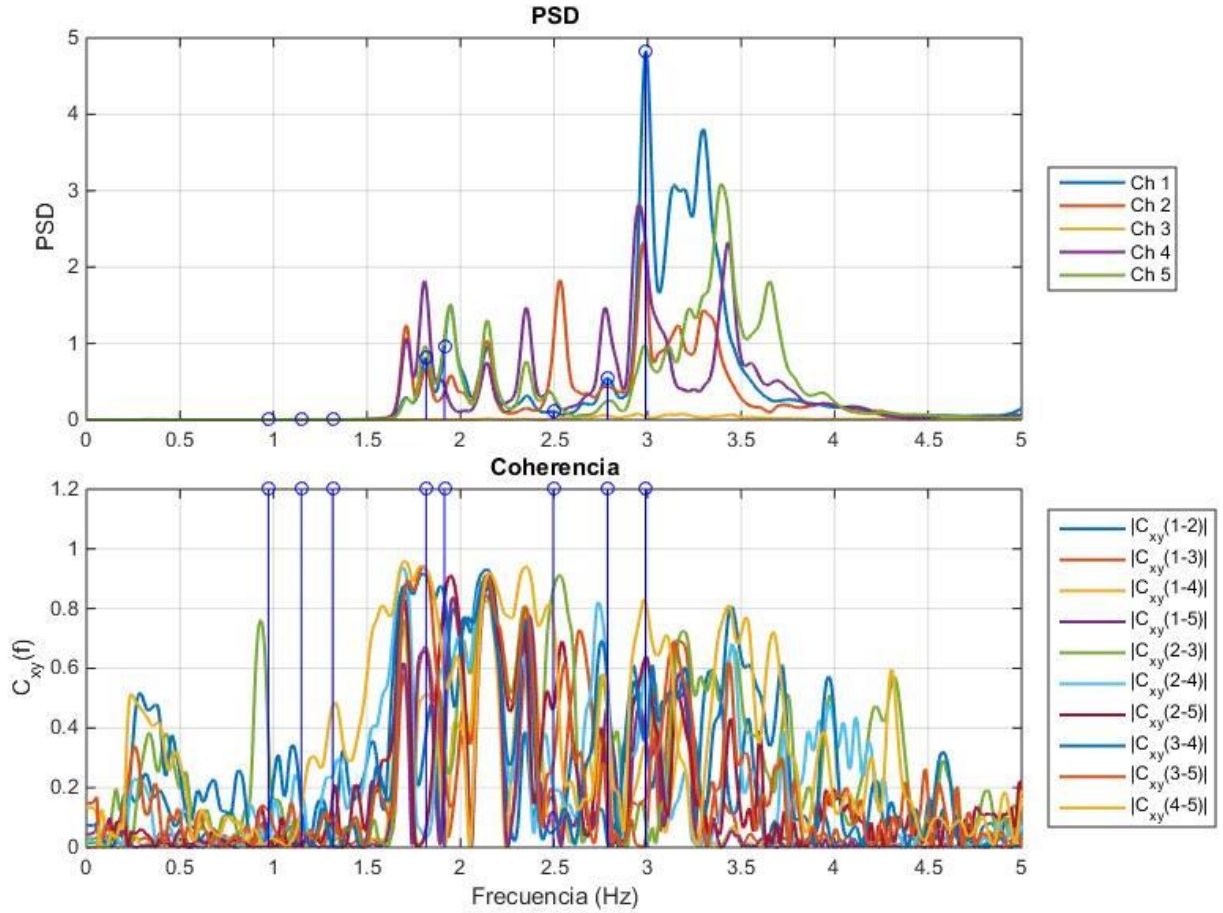
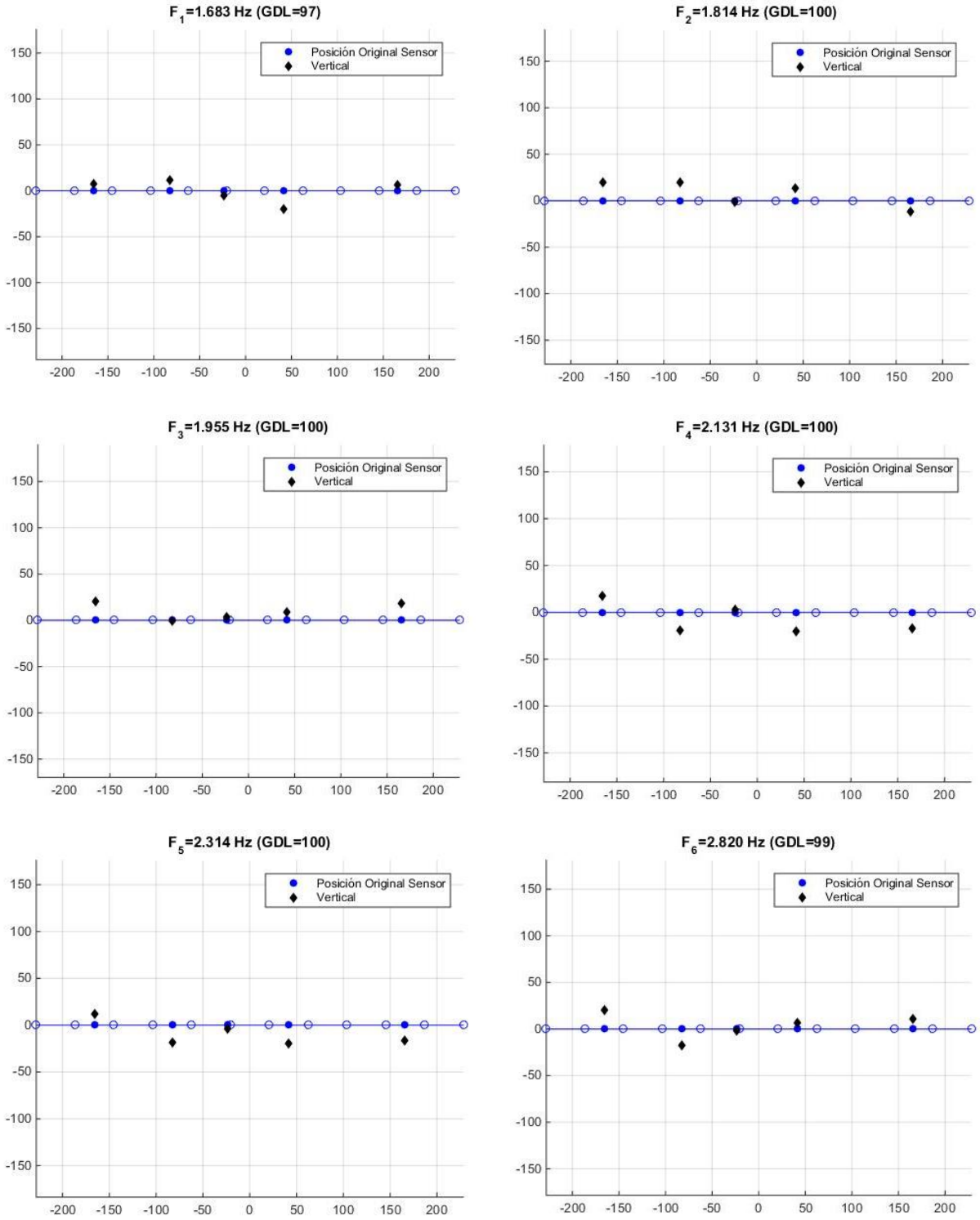


Ilustración 4-70: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Car 03) tramo sur CRSH 2018.

Tabla 4-34: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	6	V
Ch2	7	V
Ch3	8	V
Ch4	9	V
Ch5	10	V

4.3.6.3. Formas modales verticales tramo sur 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)



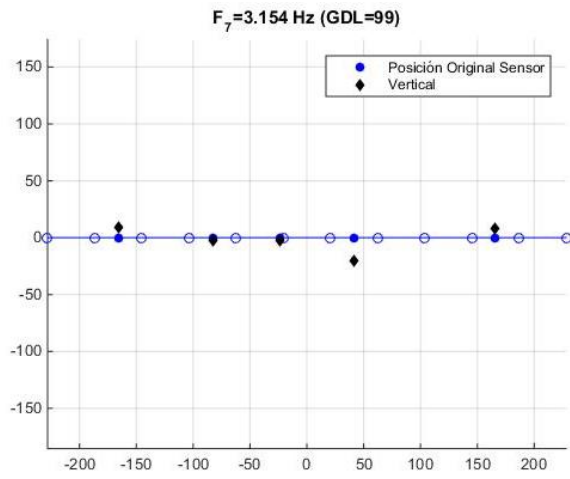
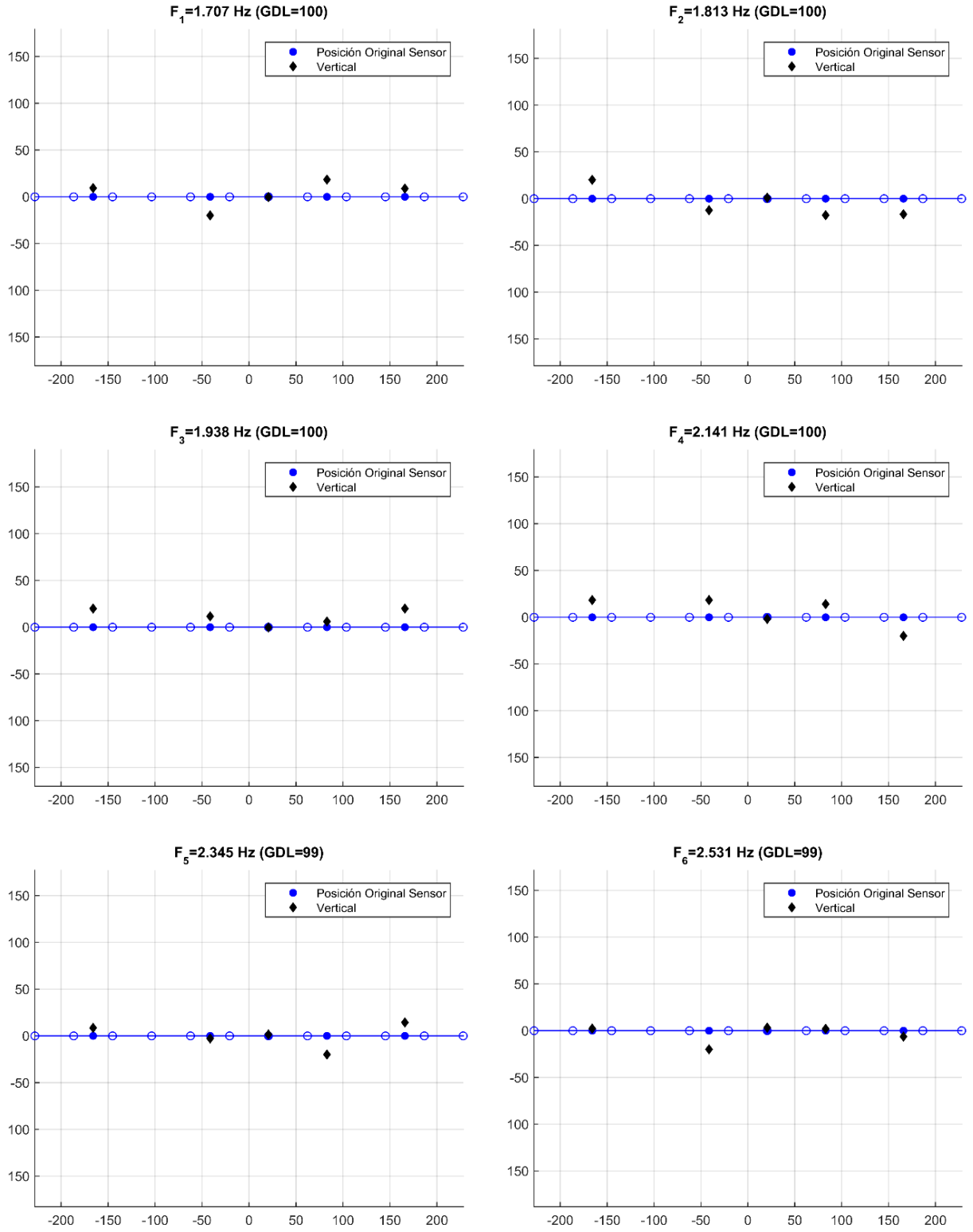


Ilustración 4-71: Formas Modales verticales tramo sur CRSH 2004 (reprocesamiento de datos).

4.3.7.1. Formas modales verticales tramo sur 2018



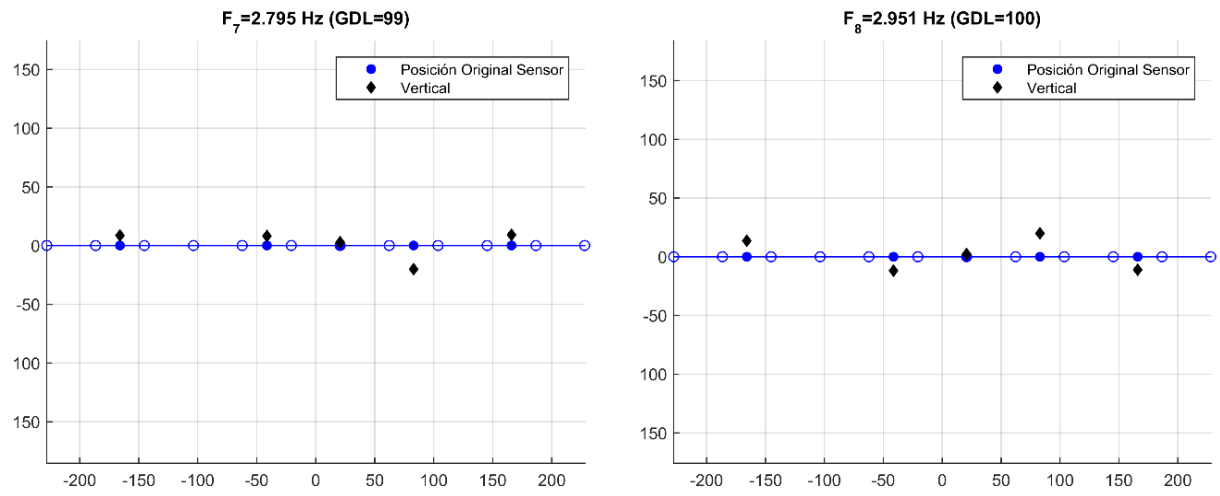


Ilustración 4-72: Formas Modales verticales tramo sur CRSH 2018

4.3.7.2. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 4-35: Frecuencias modales tramo sur vertical puente CRSH

Modo	Frecuencias 2004 AD [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	1.710(FM1)	1.683(FM1)	1.707(FM1)
2	1.810(FM2)	1.814(FM2)	1.813(FM2)
3	1.930(FM3)	1.955(FM3)	1.938(FM3)
4	2.150(FM4)	2.131(FM4)	2.141(FM4)
5		2.314(FM5)	2.345(FM5)
6			2.531(FM6)
7		2.820(FM6)	2.795(FM7)
8		3.154(FM7)	2.951(FM8)

Al igual que en el tramo norte se observa una alta coherencia entre canales, lo cual implica un comportamiento global de la estructura. Lo anterior concuerda con la estructuración del tablero compuesto por vigas continuas.

El primer modo vertical corresponde a un modo de 1.68 Hz en el año 2004 y a 1.71 Hz el año 2018. El segundo modo corresponde a una frecuencia de 1.81 Hz para ambos años.

A partir de la comparación de los resultados obtenidos para el año 2004 y el año 2018 relacionado a los primeros dos modos verticales se puede inferir que no ha existido un cambio significativo de la estructura en relación al comportamiento vertical del sistema. En relación a los modos que se observan entre 2 a 3.6 Hz se asociarían a modos que relacionan en algún grado la respuesta local longitudinal de las cepas. Muy similares a las del tramo norte.

En particular en este tramo falta información para poder comparar las formas modales dado que la posición de los sensores difiere en ambos registros. Los sensores ubicados en las cepas tienen mucho menor movimiento que los ubicados en tramos intermedios. En relación a lo obtenido por C. Benavides versus el reprocesamiento de datos, se observa que con SSI fue posible identificar las mismas primeras cuatro formas modales.

Capítulo 5: Viaducto Marga-Marga

5.1. Caracterización de la estructura

5.1.1. Antecedentes generales

El Viaducto Marga-Marga, también conocido como Marga-Marga II, es parte de la ruta 60, Santiago-Viña del Mar. Se encuentra entre el kilómetro 101 y 102 de la autopista troncal sur en la curva el estero, entre el puente Las Cucharas y la Villa Olímpica de Quilpué ($33^{\circ}03'53.6''S$ $71^{\circ}28'49.7''W$).

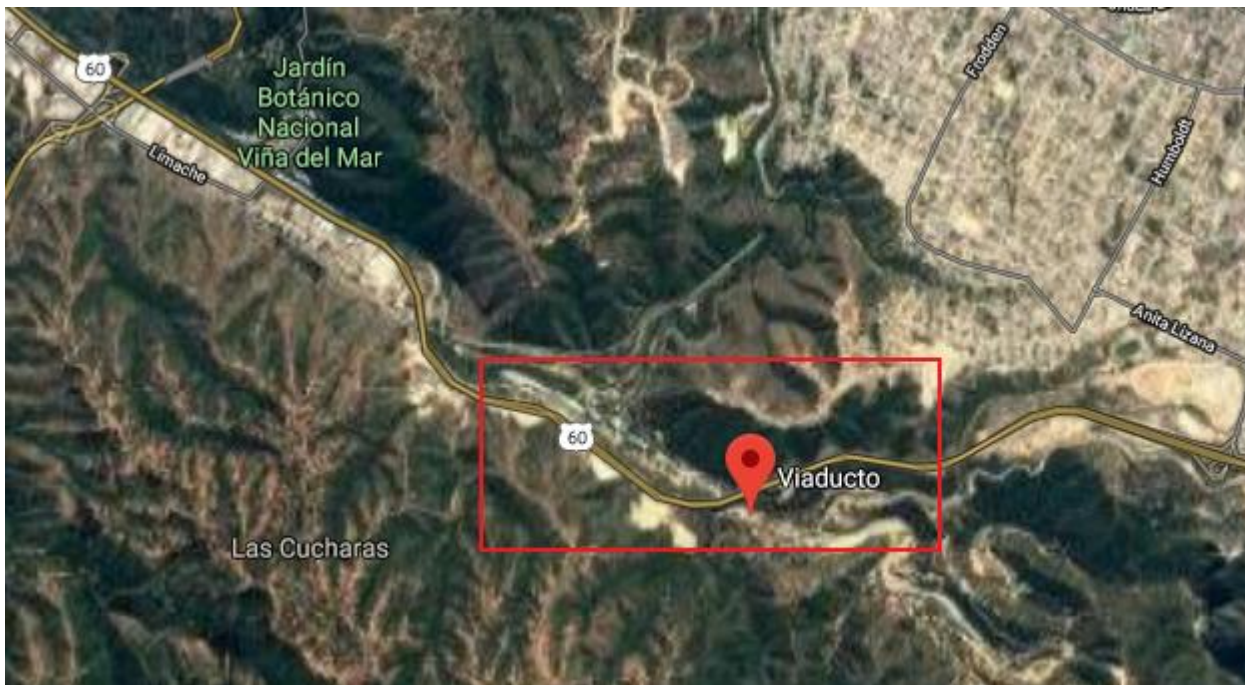


Ilustración 5-1: Ubicación viaducto Marga-Marga (Google Maps, 2019).



Ilustración 5-2: Fotografía viaducto El Salto Largo (Google Maps, 2019).

Este viaducto tiene una longitud aproximada de 447.1 metros y un trazado en curva, la superestructura de este se encuentra apoyada sobre la infraestructura a través de apoyos de neopreno en sus cepas y estribos.

5.1.2. Descripción de la estructura (Díaz, 2004)

El viaducto está conformado por 9 vanos, el primero de ellos de 49 m de longitud, del segundo al octavo de 50 m y el noveno de 48.1 m, lo que entrega un total de 447.1 m. Su ancho es de 23.1 m considerando ambas calzadas, berma a ambos lados y una división central. De acuerdo al trazado, la estructura se desarrolla en curva, considerando un peralte de entrada de 2.5% a dos aguas para terminar en la salida con un peralte de 6.5% a un agua. La pendiente longitudinal es del 4%.

De acuerdo a los estudios geotécnicos del lugar, el puente se dividió en dos tramos continuos. El tramo norte comprende los primeros 5 vanos con continuidad de losa. Este tramo se encuentra longitudinalmente conectado al estribo norte, el que queda emplazado en suelo tipo maicillo, que tiene buena capacidad de soporte, permitiendo sólo desplazamientos transversales sobre los apoyos de neopreno que se disponen. Sobre la cepa 5 existe una gran junta modular que marca la separación de ambos tramos.

El tramo sur está conformado por los vanos comprendidos entre el 6 y 9 también con continuidad de losa, abarcando desde la cepa 5 a la 8. Este tramo tiene libertad de movimiento tanto longitudinal como transversalmente sobre los apoyos de neopreno. El estribo sur está emplazado sobre un terraplén compactado, lo cual permitió acortar el viaducto en un vano, considerando una longitud máxima de 50 m entre ejes de cepas.

5.1.2.1. Superestructura

Se emplea un tablero de hormigón armado, construido monolíticamente sobre 6 vigas pretensadas de 2.5 m de altura para cada uno de los vanos; espaciadas entre 4.18 a 4.34 m. Las vigas descansan sobre apoyos de neopreno zunchados de forma rectangular anclados a las vigas y a la mesa de apoyo. La sobre losa de hormigón armado dispone de armaduras en las juntas de pasillos y rugosidad suficiente para la extensión de 5 cm de pavimento asfáltico, previa impermeabilización de todo el tablero.

Con el objetivo de dar la posibilidad de grandes deformaciones horizontales a los apoyos, no se usó “barras antisísmicas”. En su lugar, se anclaron las placas elástomericas tanto a la mesa de apoyo como a las vigas.

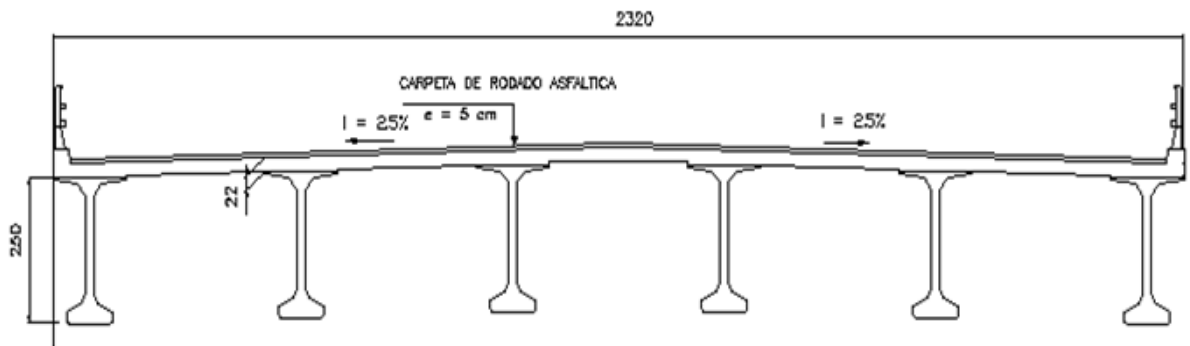


Ilustración 5-3: Sección transversal del tablero viaducto Marga-Marga, dimensiones en centímetros

(Díaz, 2004).

5.1.2.2. Infraestructura

La infraestructura se encuentra formada por 2 estribos y 8 cepas. El estribo norte, tiene muros conectados al travesaño que amarra las vigas, transmitiendo así las cargas longitudinales directamente al estribo. Por el contrario, el estribo sur está formado por una mesa de apoyo y un muro espaldar que permite alojar las juntas modulares que absorben las deformaciones de diseño y permiten el desplazamiento relativo entre el tablero y el estribo.

Las cepas tienen grandes dinteles con forma T de 2.5 m de altura, en los cuales se insertan las placas de apoyo. El ancho y largo de los dinteles es variable según su ubicación. La sección de la pila es de tipo rectangular hueca con dos módulos iguales de dimensiones 11x3x0.3 m, y la altura es variable entre 23.2 y 54 m.

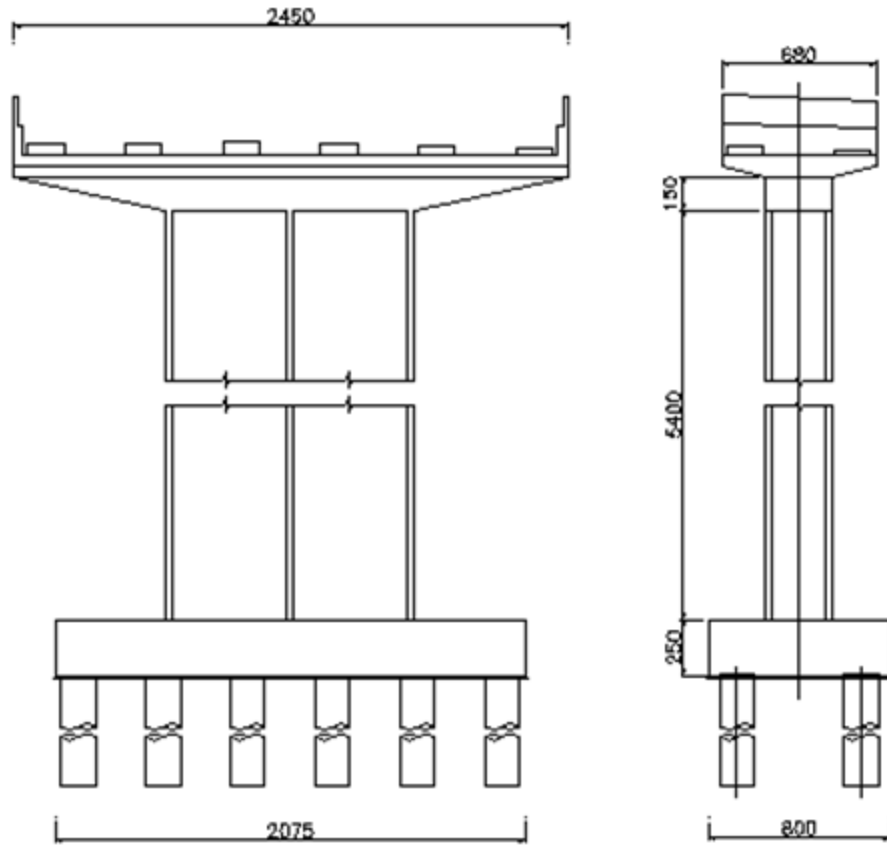


Ilustración 5-4: Vista transversal y lateral de cepa tipo viaducto Marga-Marga, dimensiones en centímetros (Díaz, 2004).

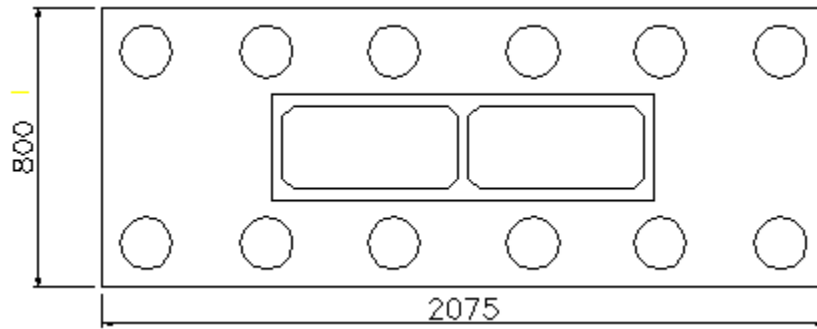


Ilustración 5-5: Corte transversal de cepa tipo viaducto Marga-Marga, dimensiones en centímetros (Díaz, 2004).

5.1.2.3. Fundaciones

El viaducto tiene tanto fundaciones directas como piloteadas en profundidad, según la ubicación de los apoyos de las cepas.

Para el estribo norte se usan 3 líneas de 5 pilotes de 1.5 m de diámetro y 9 m de longitud, inmersos en un estrato de maicillo compacto, que permite absorber la gran carga sísmica longitudinal.

El estribo sur tiene una línea de 6 pilotes de 1.5 m de diámetro que atraviesan el terraplén compactado, los cuales se empotran al menos 1 m en la roca meteorizada.

Para las cepas 1 y 8 se consideran zapatas directas de dimensiones 12x25x3 m para la primera y 13x22x2.5 m para la segunda. Finalmente, para las cepas comprendidas entre la 2 y la 7 se emplean grupos de pilotes, conformados por 2 líneas de 6 pilotes de 1,5 m de diámetro cada una, con longitudes que varían entre 15 y 25 m.

5.1.2.4. Sistema de apoyo

El sistema de apoyo que presenta el viaducto consta básicamente de tres elementos; en primer lugar, apoyos de neopreno zunchado de forma rectangular anclados tanto a las vigas como a las cepas y dos tipos de junta de dilatación sísmica, la MAURER D-100 ubicada en el estribo norte (en el cual está restringido el desplazamiento longitudinal), y la MAURER DS-240 ubicada tanto en la parte central del viaducto (cepa número 5) y entre el tablero y el estribo sur.

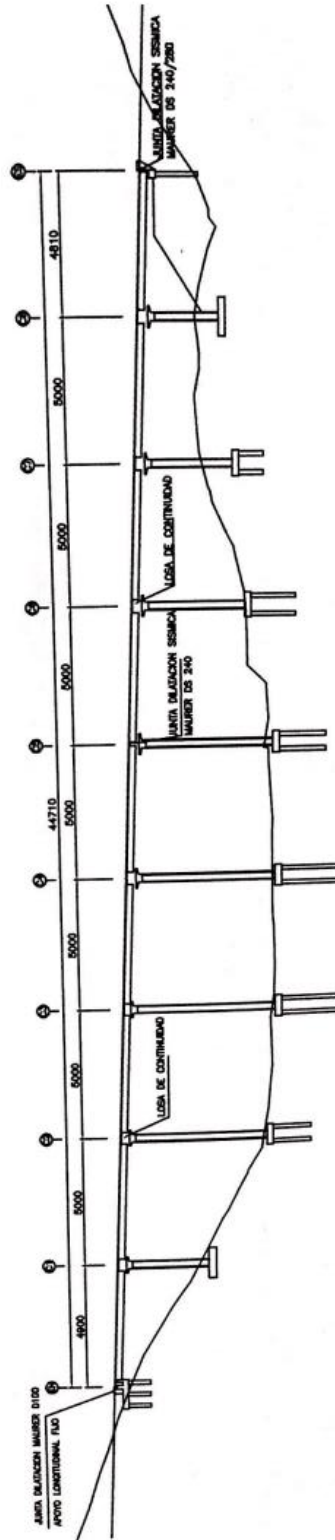


Ilustración 5-6: Corte longitudinal viaducto Marga-Marga (Díaz, 2004).

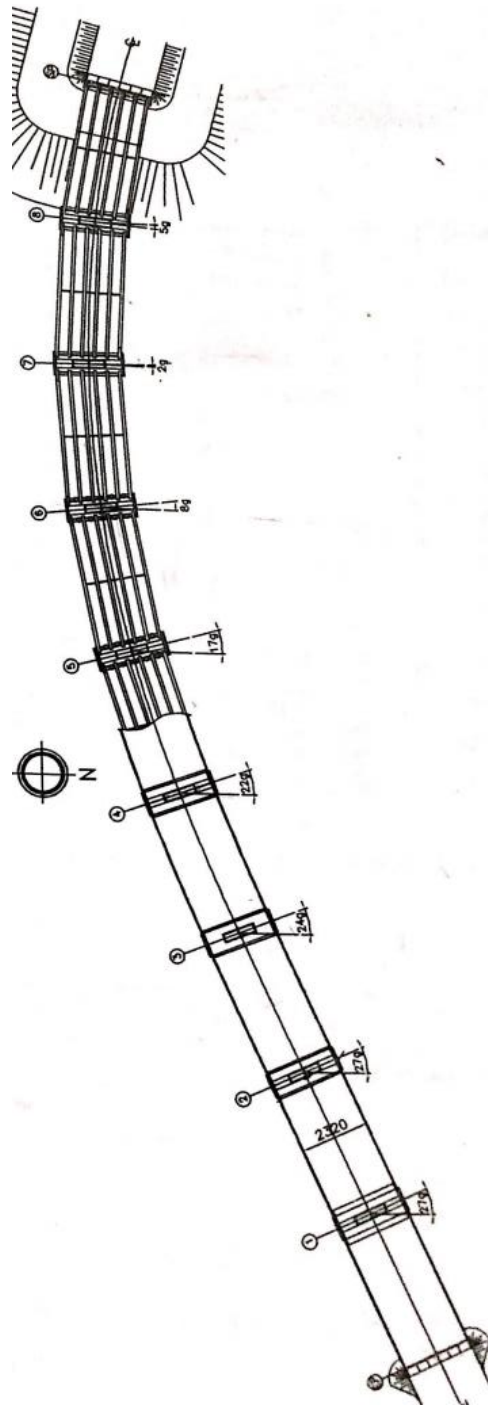


Ilustración 5-7: Vista en planta viaducto Marga-Marga (Díaz, 2004).

5.2. Registros de microvibraciones

En esta sección se presentan antecedentes de los instrumentos utilizados, la ubicación de los sensores y las descripciones del trabajo en terreno para la obtención de los registros de microvibraciones procesados posteriormente para la obtención de las propiedades dinámicas de las estructuras en estudio.

5.2.1. Instrumentación externa registros año 2004.

Esta medición se realizó el jueves 29 de mayo del año 2003, fue realizada con instrumentos instalados de forma temporal en la estructura, en total se llevaron a cabo nueve registros. De estos registros se utilizan seis para compararlos con las mediciones realizadas en el año 2018.

5.2.1.1. Instrumentos utilizados

Según lo indicado en la memoria de Díaz (2004) los instrumentos utilizados fueron cinco sismómetros Ranger SS-1, cuatro pertenecientes al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y uno del Departamento de Geofísica, un digitalizador de señales DAQBOOK multicanal de conversión analógica digital de 16 bit y un computador portátil. Las propiedades de los sismómetros utilizados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5-1: Propiedades sismómetros registro viaducto Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004)

Sensor	Nº de serie	Origen	Constante Generadora G	Frecuencia f	Amortiguamiento b
			[Volt/mts/seg]	[Hz]	
1	1984	Ing. Civil	173,84	0,982	0,699
2	1986	Ing. Civil	139,37	1,032	0,704
3	1985	Ing. Civil	130,96	1,003	0,710
4	1987	Ing. Civil	155,28	0,986	0,700
5	2020	Geofísica	327,37	1,006	0,709

5.2.1.2. Ubicación de sensores

Las disposiciones de los sensores dispuestas por Díaz (2004) se presentan a continuación.

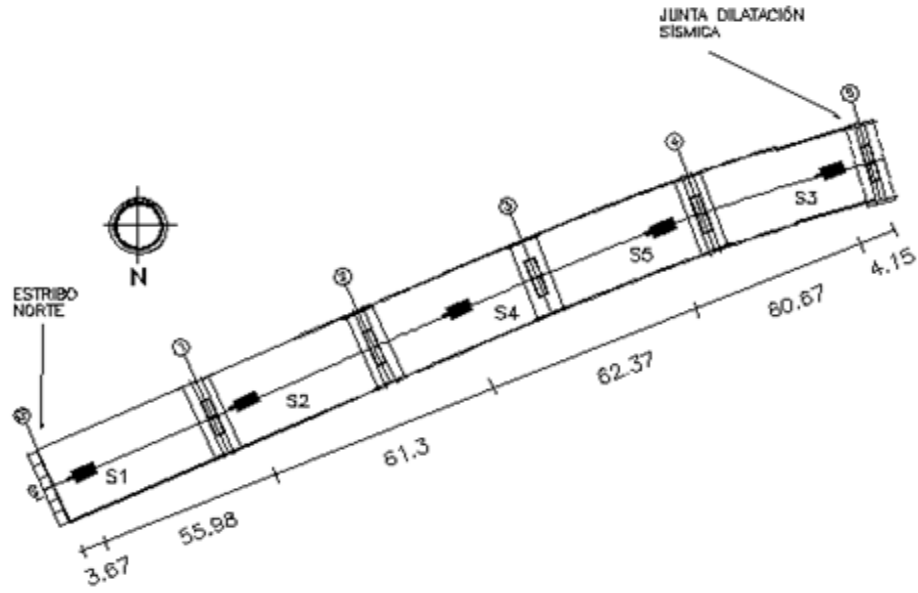


Ilustración 5-8: Posiciones sensores registro Mar01 viaducto Marga-Marga, Tramo Norte (Díaz, 2004)

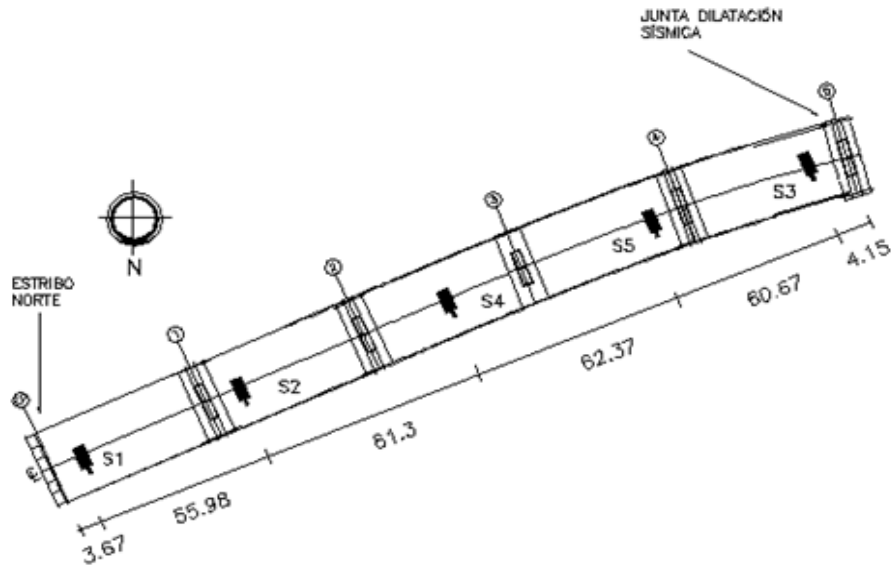


Ilustración 5-9: Posiciones sensores registro Mar03 viaducto Marga-Marga, Tramo Norte (Díaz, 2004)

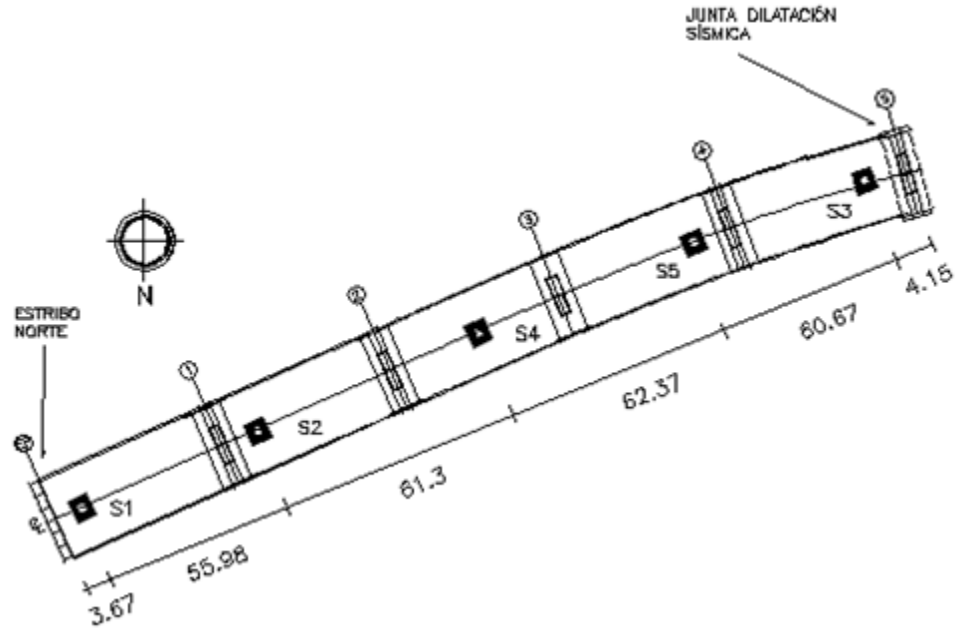


Ilustración 5-10: Posiciones sensores registro Mar04 viaducto Marga-Marga, Tramo Norte (Díaz, 2004)

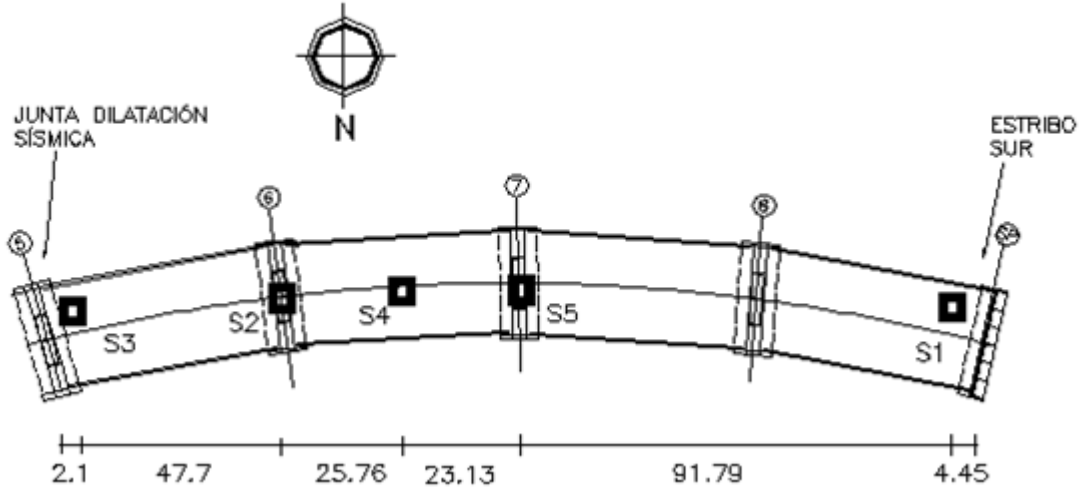


Ilustración 5-11: Posiciones sensores registro Mar06 viaducto Marga-Marga, Tramo Sur (Díaz, 2004).

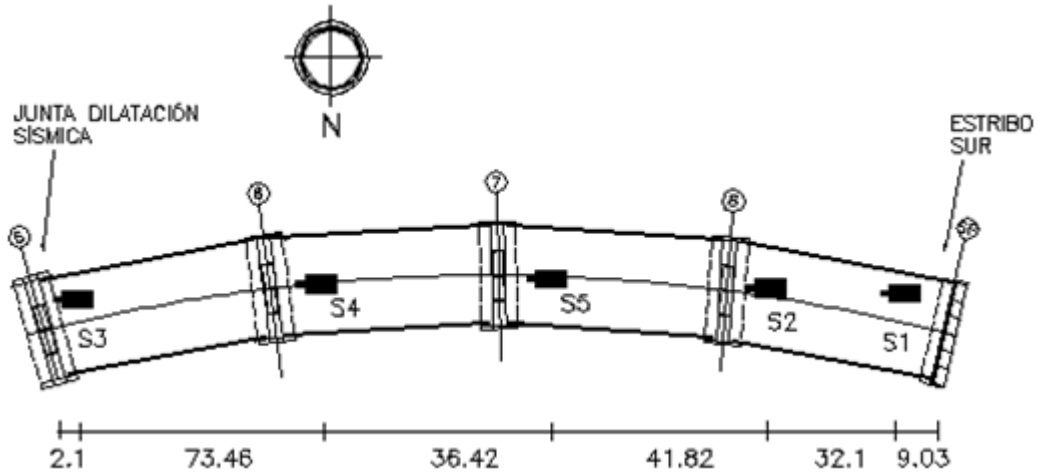


Ilustración 5-12: Posiciones sensores registro Mar07 viaducto Marga-Marga, Tramo Sur (Díaz, 2004).

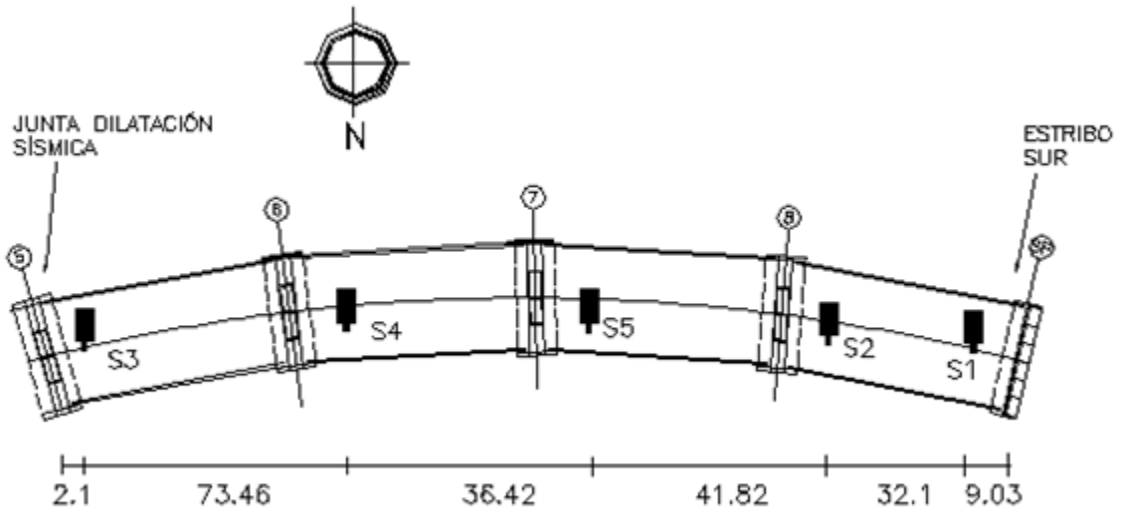


Ilustración 5-13: Posiciones sensores registro Mar09 viaducto Marga-Marga (Díaz, 2004).

5.2.1.3. Descripción registro de datos en terreno

Esta medición se realizó en mayo del 2003, cuando el viaducto aún no estaba abierto para el paso de vehículos, lo que implica que los registros obtenidos fueron causa de efectos ambientales teniéndose mediciones ideales sin tráfico vehicular. Los registros se realizaron por separado en el tramo norte y sur del viaducto, para cada uno de estos tramos se hizo

una medición longitudinal, transversal y vertical. La duración y frecuencia de muestreo de los registros se muestran a continuación.

Tabla 5-2: Duración y frecuencia de muestreo registros viaducto Marga-Marga 2004

Registro	Duración toma de datos [min]	Frecuencia de Muestreo [Hz]
Mar00 (Calibración)	5	200
Mar01 (Longitudinal-Tramo Norte)	20	200
Mar03 (Transversal-Tramo Norte)	20	200
Mar 04 (Vertical en tramos medios-Tramo Norte)	10	200
Mar06 (Vertical en cepas- Tramo Sur)	10	200
Mar07 (Longitudinal-Tramo Sur)	20	200
Mar09 (Transversal- Tramo Sur)	20	200

5.2.2. Instrumentación externa registros año 2018.

Esta medición se realizó el lunes 19 de noviembre del año 2018, se ejecutó con instrumentos instalados de forma temporal en la estructura, en total se llevaron a cabo tres de los cuatro registros programados. Lo anterior dado que por razones de seguridad se debía cortar una pista del viaducto para poder medir, acortando el tiempo disponible.

5.2.2.1. Instrumentos utilizados

Los instrumentos utilizados corresponden a los mismos ocupados para la medición con instrumentación externa del viaducto El Salto el año 2018. Con la diferencia que en este caso no se contaba con un camión inspector, por lo que como solución se llevó una batería externa y un conversor de voltaje para energizar el sistema.



Ilustración 5-14: Registro de calibración sensores instalados viaducto Marga-Marga.

5.2.2.2. Ubicación de sensores

La disposición de los sensores para esta medición se muestra a continuación, cabe mencionar que se intentó replicar la ubicación de sensores realizada el año 2003.

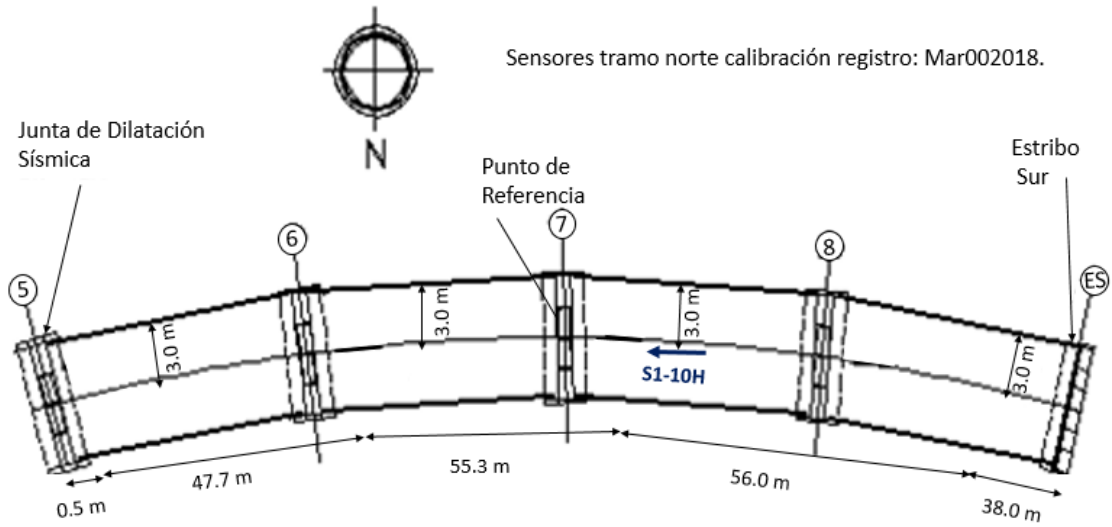


Ilustración 5-15: Posiciones sensores registro Marga 0 viaducto Marga-Marga 2018.

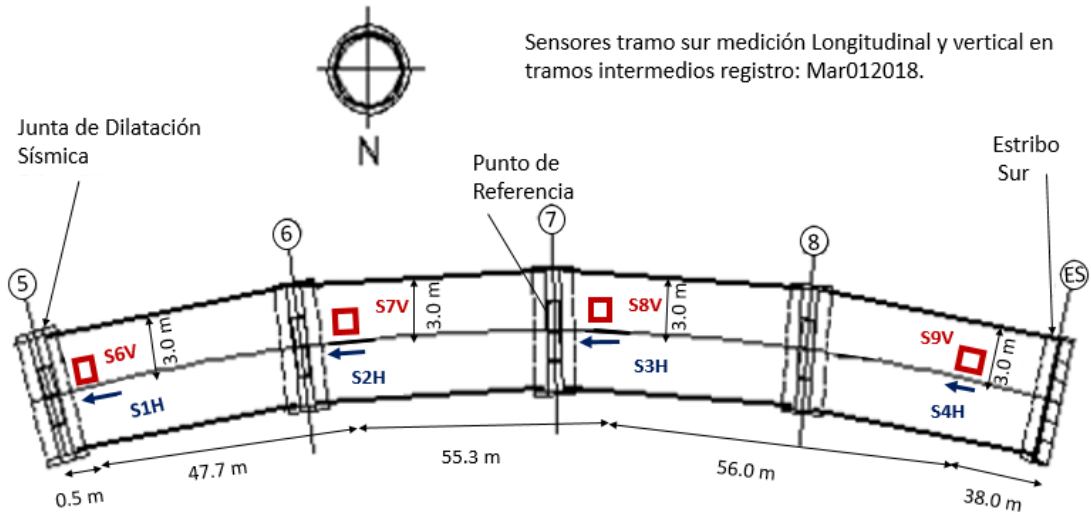


Ilustración 5-16: Posiciones sensores registro Marga 1 viaducto Marga-Marga 2018, Tramo Sur.

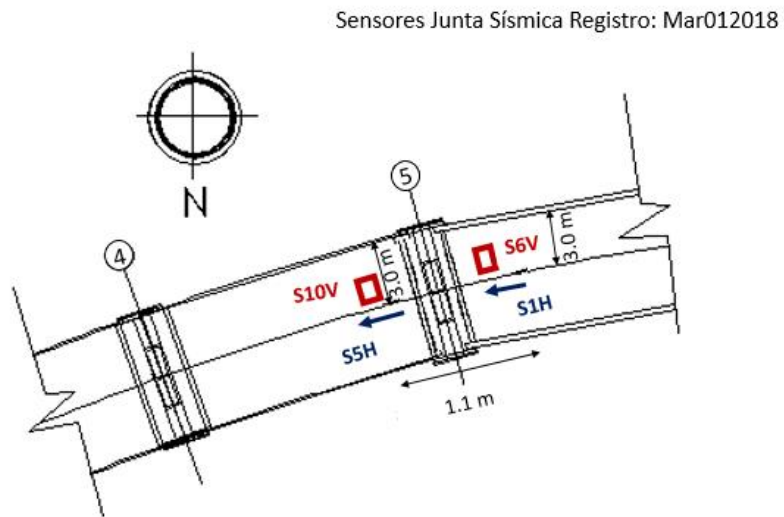


Ilustración 5-17: : Posiciones sensores registro Marga 1 viaducto Marga-Marga 2018.

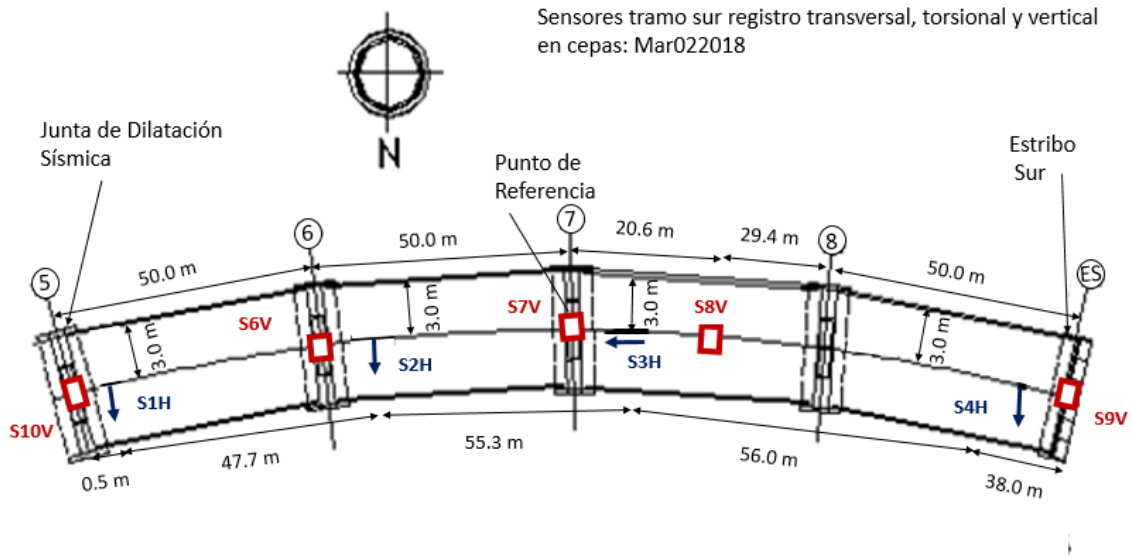


Ilustración 5-18: Posiciones sensores registro Marga 2 viaducto Marga-Marga 2018, Tramo Sur.

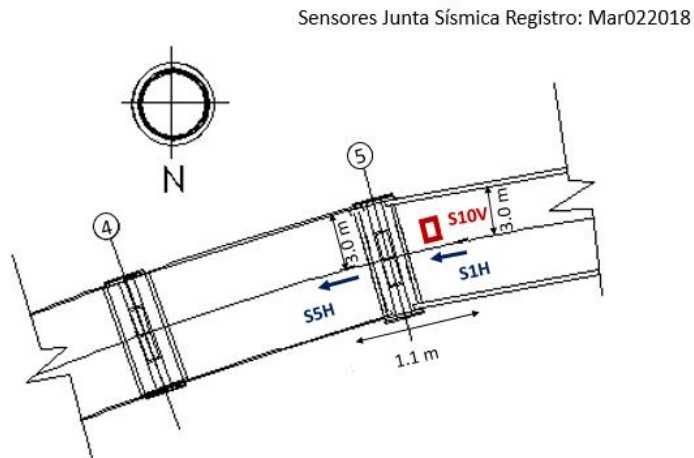


Ilustración 5-19: Posiciones sensores registro Marga 2 viaducto Marga-Marga 2018.

Sensores tramo norte medición longitudinal y vertical tramos intermedios registro: Mar032018.

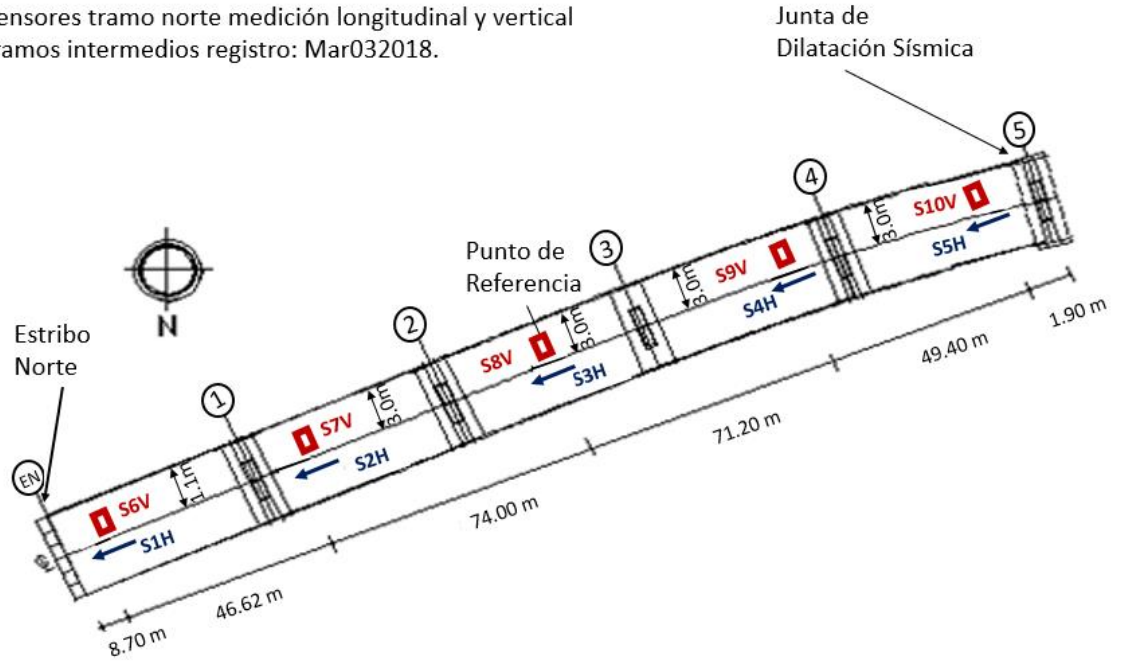


Ilustración 5-20: Posiciones sensores registro Marga 3 viaducto Marga-Marga 2018, Tramo Norte.

5.2.2.3. Descripción registro de datos en terreno

Estas mediciones se llevaron a cabo en noviembre del 2018 entre las 11:00 y las 16:00 horas, lo cual corresponde a un periodo de relativamente alto tráfico vehicular.

La duración y frecuencia de muestreo de los registros se muestran a continuación.

Tabla 5-3: Duración y frecuencia de muestreo de los registros viaducto Marga-Marga 2018

Registro	Duración toma de datos [min]	Frecuencia de Muestreo [Hz]
Marga 0 (Calibración)	10	200
Marga 1 (Longitudinal y vertical en tramos intermedios-Tramo Sur)	30	200
Marga 2 (Transversal y vertical en cepas-Tramo Sur)	30	200
Marga 3 (Longitudinal y vertical en tramos intermedios-Tramo Norte)	30	200

La configuración de estos instrumentos para la medición realizada se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5-4: Configuración instrumentos registro viaducto Marga-Marga 2018

Rango de Voltaje	$\pm 2.5V$
Rango Aceleraciones	$\pm 0.5g$

5.2.2.4. Resultados registro de calibración

De la calibración de los sensores para las mediciones se desprende que todos registran peaks similares con una alta coherencia, sin embargo, el sensor 1 de los calibrados para medir horizontalmente y el 6 de los verticales muestran un ángulo de desfase de 180° , por lo que se concluyó que estos sensores tenían la polaridad cambiada y para las formas modales hubo que cambiar el sentido del sensor. Esto ocurrió debido a que cuando se soldaron los cables a los conectores se invirtió accidentalmente el orden de los cables cambiando su polaridad. Cabe mencionar que este detalle técnico no es relevante en los cálculos posteriores.

5.3. Resultados

5.3.1. Tramo norte longitudinal

5.3.1.1. Diagrama de estabilidad registro longitudinal (Mar01/Canales 1-5) tramo norte 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

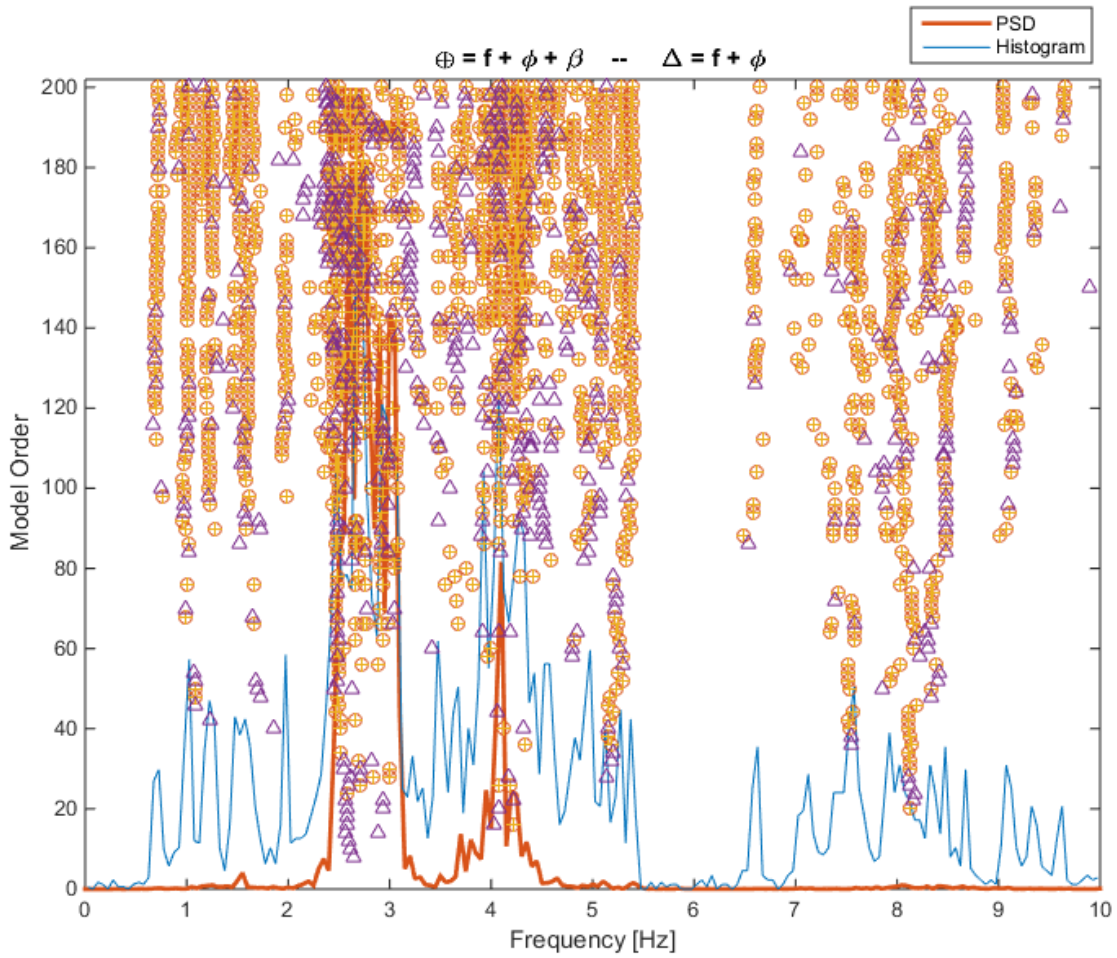


Ilustración 5-21: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo norte Marga-Marga 2004.

Tabla 5-5: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo norte Marga-Marga 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.048	0.35	2.22	0.07	32
1.175	0.82	5.24	0.16	29
1.602	3.70	3.18	0.11	21
2.090	0.21	0.73	0.02	19
2.142	1.33	1.30	0.04	16
2.402	1.98	1.82	0.04	11
2.701	1.83	0.85	0.02	7
2.997	0.60	0.75	0.03	7
3.691	1.70	1.74	0.05	9
4.012	5.77	0.59	0.01	9
4.235	2.99	5.33	0.19	8
4.459	2.44	1.14	0.03	8
4.706	4.36	0.40	0.01	10
5.120	3.53	0.62	0.02	8
5.481	5.71	0.95	0.03	9
5.718	5.35	1.32	0.04	7
6.464	6.84	0.70	0.02	12
7.224	4.28	0.99	0.03	10
7.442	1.02	1.39	0.03	12
7.684	4.28	3.24	0.09	27

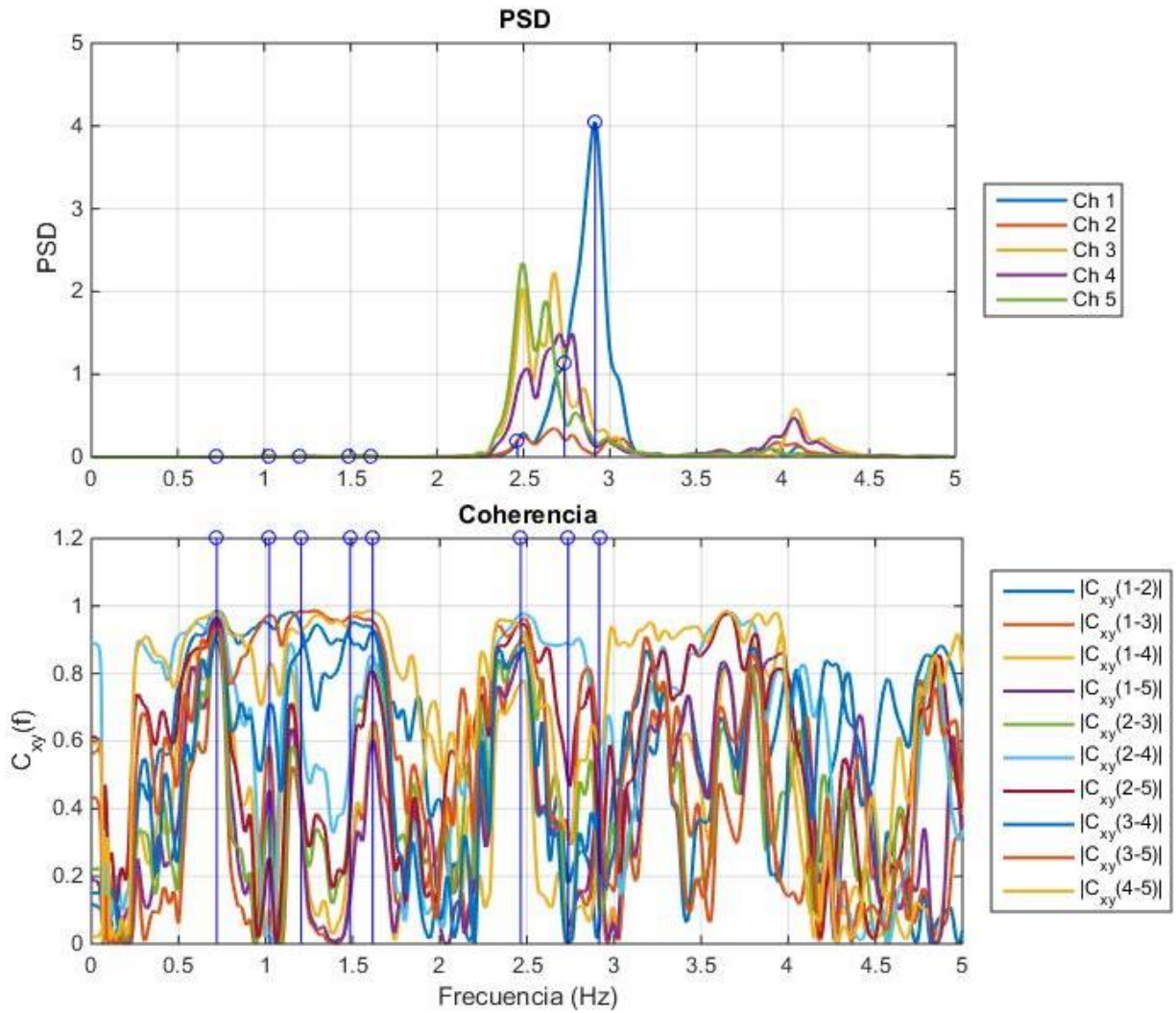


Ilustración 5-22: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Mar 01) tramo norte Marga-Marga 2004.

Tabla 5-6: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	L
Ch2	2	L
Ch3	3	L
Ch4	4	L
Ch5	5	L

5.3.1.2. Diagrama de estabilidad registro longitudinal (Marga3/Canales 1,2,3,5) tramo norte 2018

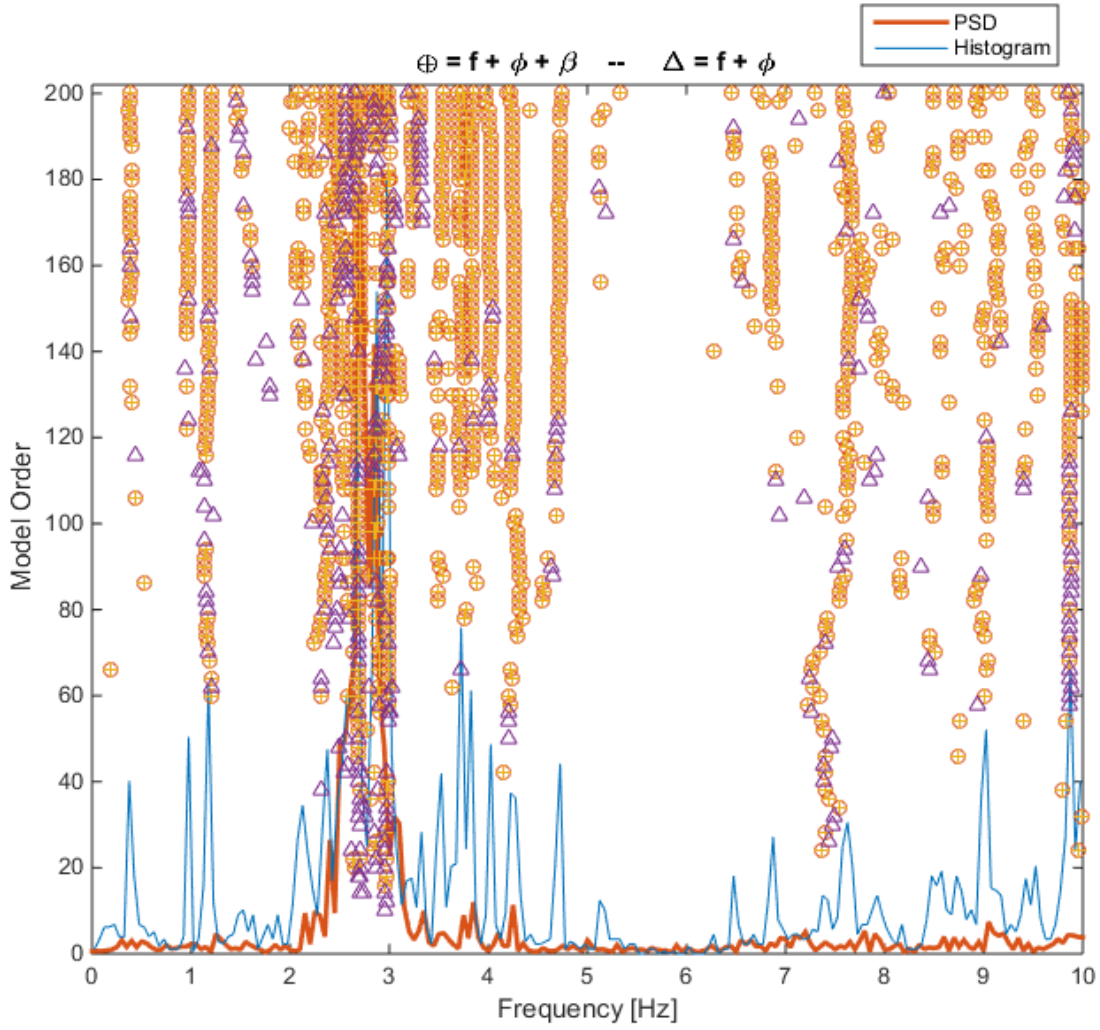


Ilustración 5-23: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo norte Marga-Marga 2018.

Tabla 5-7: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo norte Marga-Marga 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.392	0.44	38.15	0.87	13
0.966	0.21	4.06	0.09	13
1.190	0.84	5.64	0.15	30
2.385	1.95	5.22	0.17	25
2.693	1.21	0.67	0.02	22
2.988	0.93	1.34	0.04	19
3.837	1.13	0.97	0.03	19
4.022	0.89	1.05	0.03	10
4.248	6.27	1.24	0.04	21
4.715	3.32	2.15	0.07	23
7.382	7.49	8.52	0.27	10

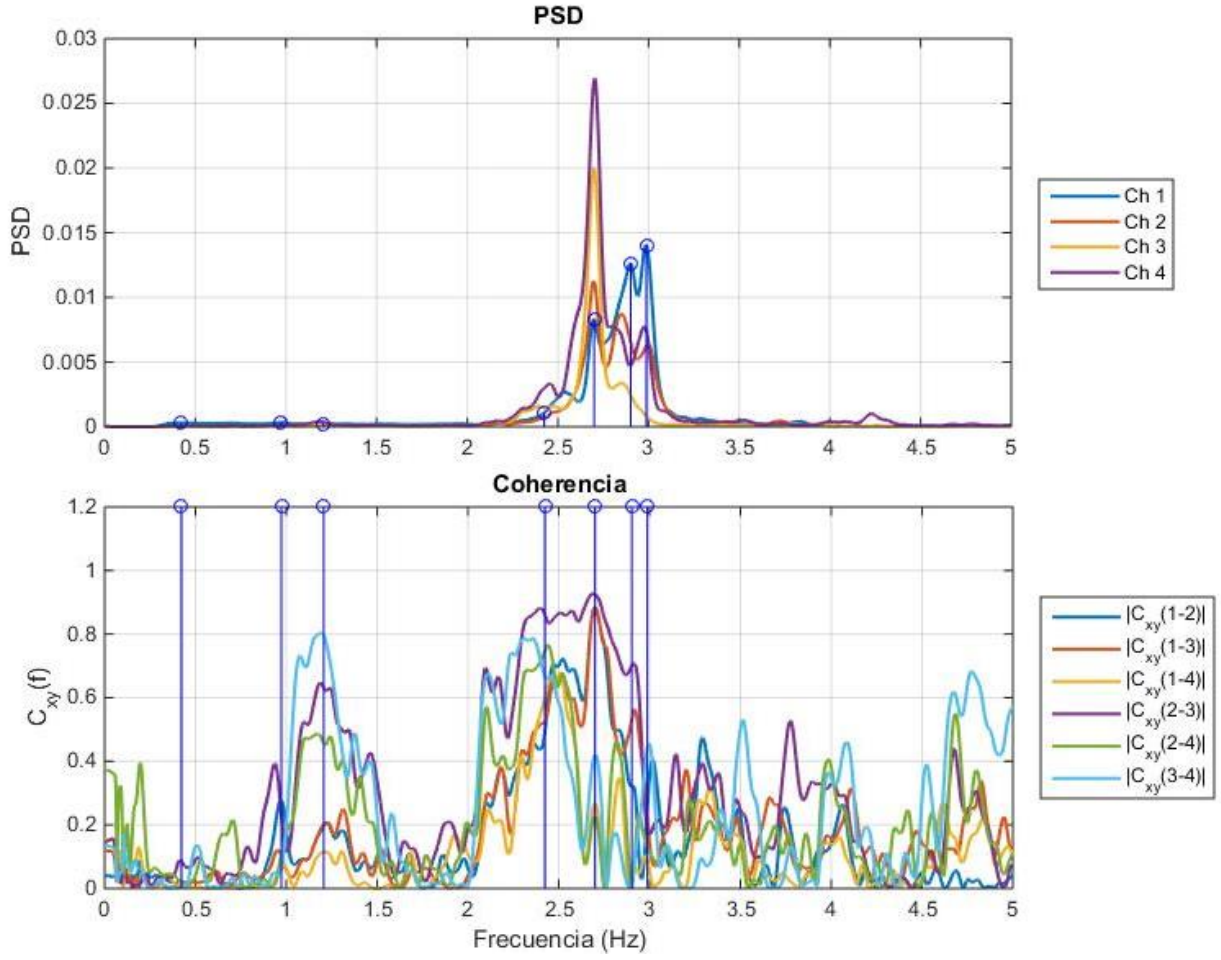


Ilustración 5-24: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Marga 3) tramo norte Marga-Marga 2018.

Tabla 5-8: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	L
Ch2	2	L
Ch3	3	L
Ch4	5	L

5.3.1.3. Formas modales longitudinales tramo norte 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

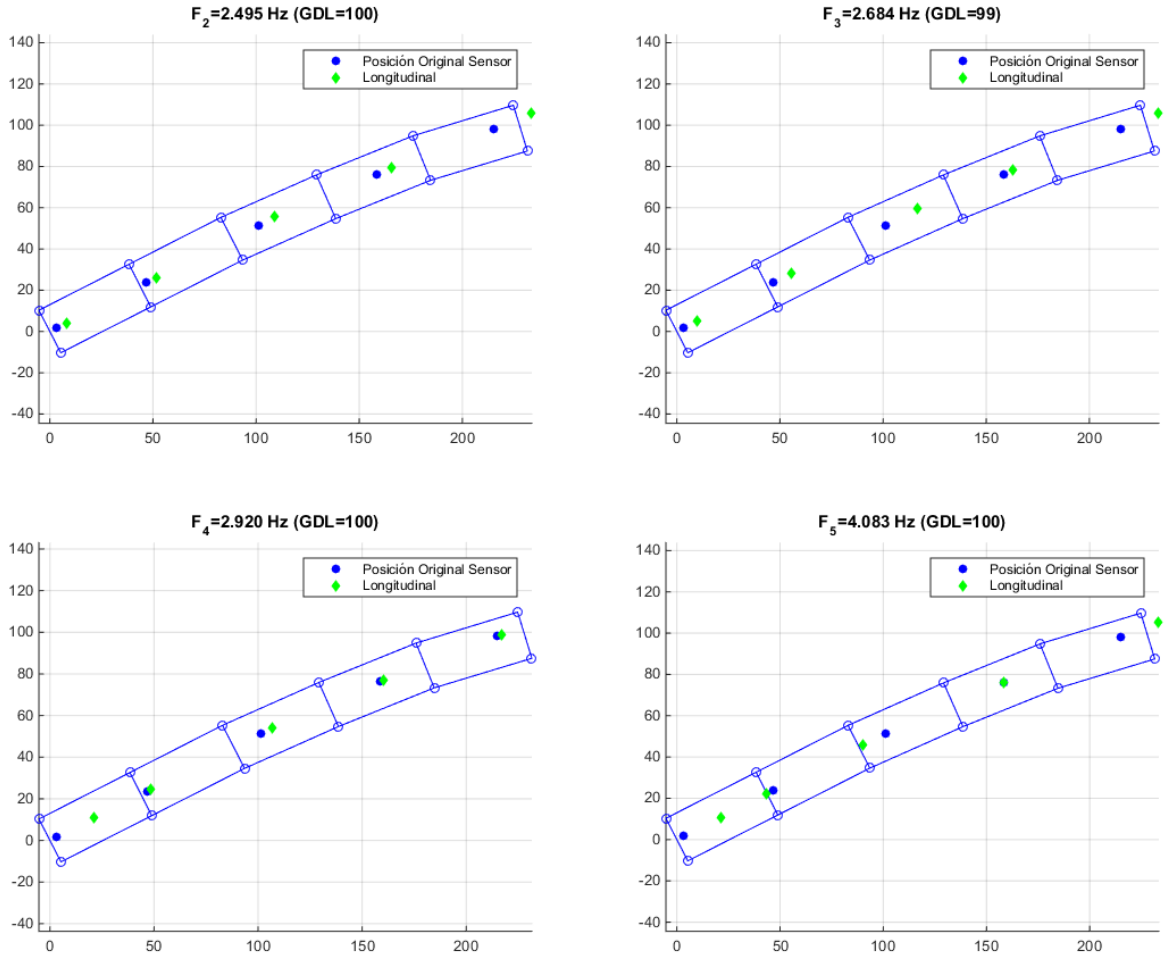


Ilustración 5-25: Formas Modales longitudinales tramo norte Marga-Marga 2004.

5.3.1.4. Formas modales longitudinales tramo norte 2018

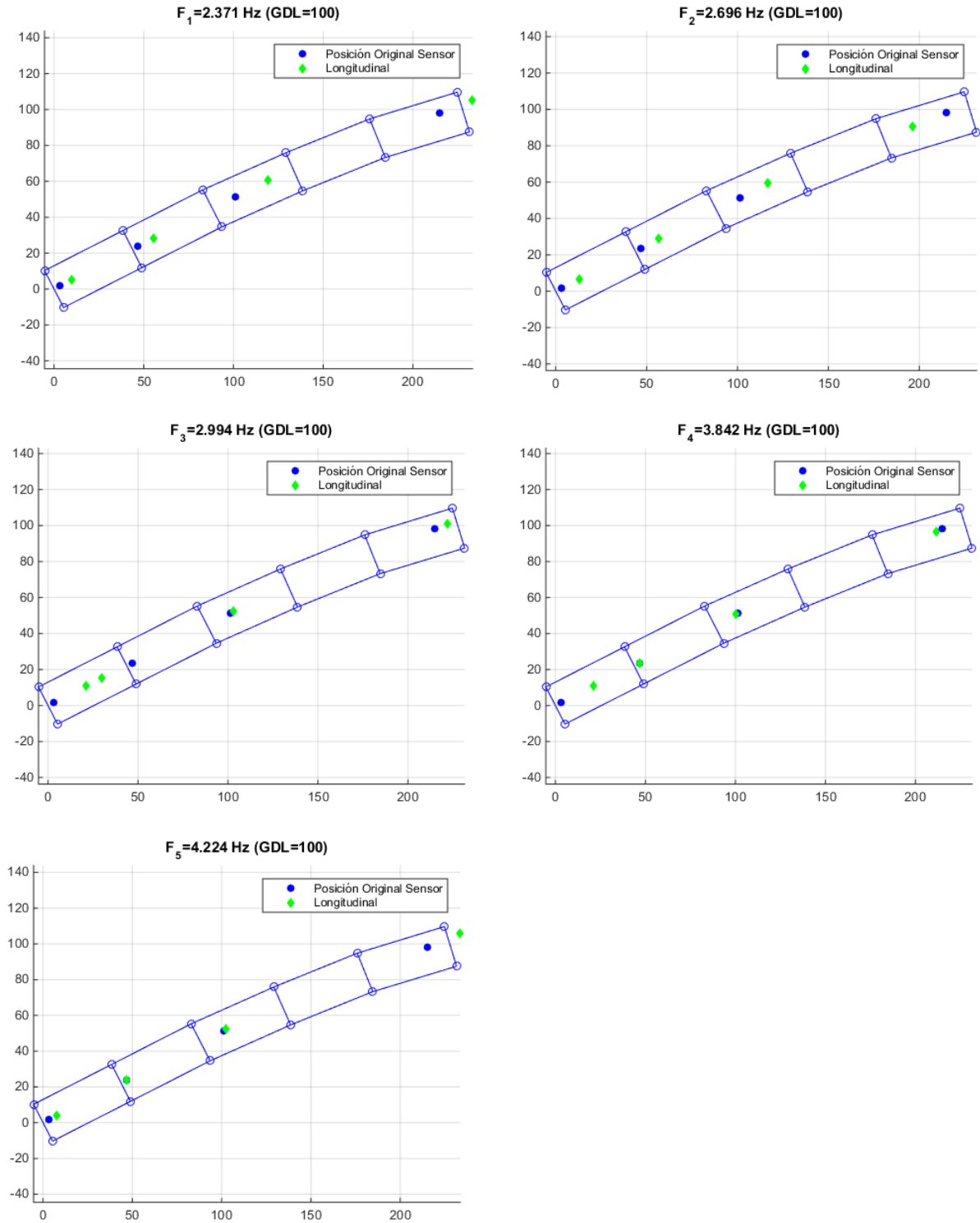


Ilustración 5-26: Formas Modales longitudinales tramo norte Marga-Marga 2018.

5.3.1.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 5-9: Frecuencias modales tramo norte longitudinal viaducto Marga-Marga

Modo	Frecuencias 2004 AD [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	1.196(FM1)		
2	1.514(FM2)		
3	1.587(FM3)		
4	2.441(FM4)	2.495(FM2)	2.371(FM1)
5	2.783(FM5)	2.684(FM3)	2.696(FM2)
7		2.920(FM4)	2.994(FM3)
8			3.842(FM4)
9		4.083(FM5)	4.224(FM5)

En primer lugar, se destaca que el sensor 4 de la medición del 2018 tuvo que ser retirado del análisis ya que arrojaba resultados inconsistentes.

En general en este tramo no es tan evidente como en otros casos distinguir entre los modos asociados al movimiento del tablero y los modos de las cepas dado que estos coinciden. Además, se destaca que estos resultados son difíciles de comparar, ya que la posición de los sensores no es 100% longitudinal, por lo que hay componente transversal asociada a todas las formas modales, lo que conlleva a que posiblemente la posición de los sensores en ambos años hayan sido distintas, implicando diferencias mayores entre las formas modales.

En este contexto, el modo fundamental en el año 2004 tenía una frecuencia de 2.50 Hz y en el año 2018 es de 2.37 Hz. Esto muestra un cambio, pero aún dentro de un rango de variación normal debido a cambios ambientales. Adicionalmente se observan modos de frecuencias de 2.7 a 4.2 Hz que se corresponderían a modos locales de cepas.

Con respecto a la comparación de las frecuencias y formas modales obtenidas por A. Díaz con análisis en frecuencias en el año 2004 versus las obtenidas a partir de la reprocesamiento de los mismos datos a través del método SSI, se observa que las formas modales 1, 2 y 3 no se consideran como modos fundamentales debido a la poca energía

asociada. Las formas 4 y 5 coinciden con las formas modales 2 y 3 obtenidas en el reprocesamiento de los datos.

5.3.2. Tramo norte transversal

5.3.2.1. Diagrama de estabilidad registro transversal (Mar 03/Canales 1-5) tramo norte 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

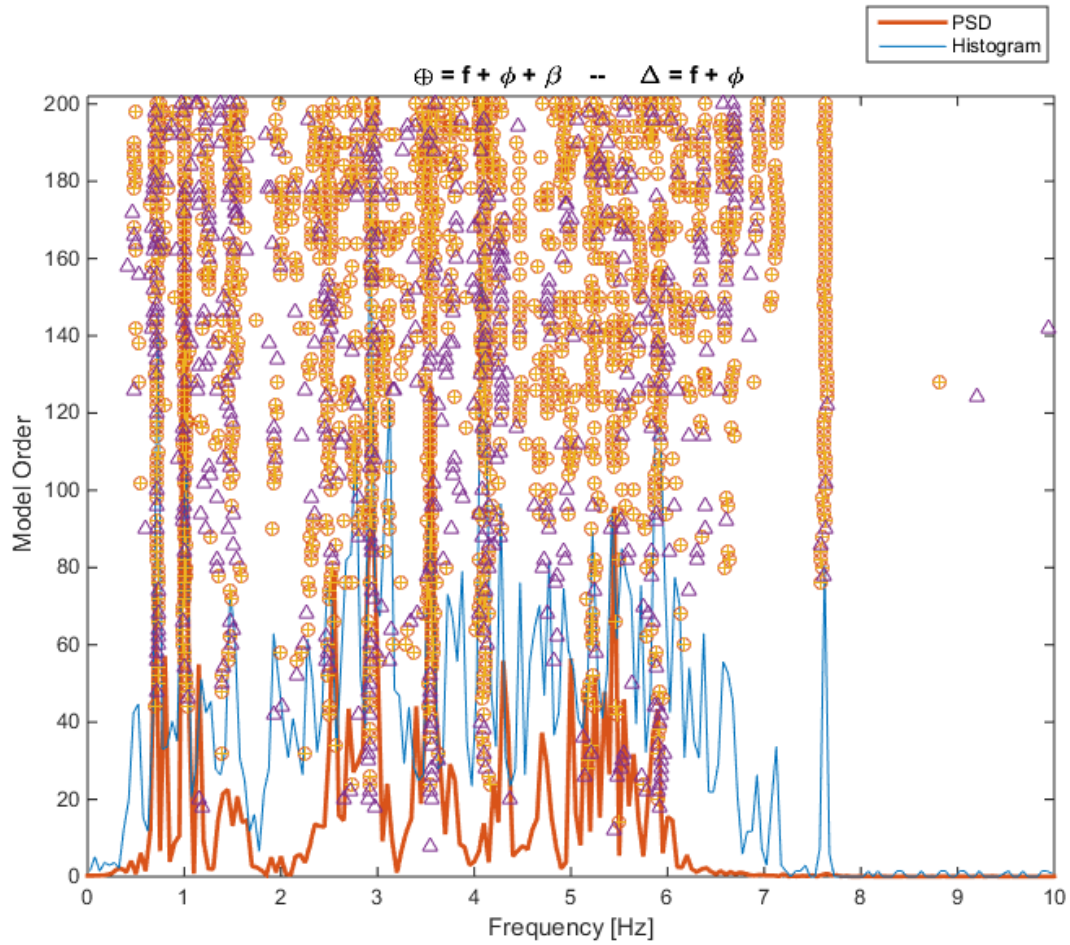


Ilustración 5-27: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo norte Marga-Marga 2004.

Tabla 5-10: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo norte Marga-Marga 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.487	0.37	12.87	0.41	6
0.724	0.53	3.32	0.07	14
1.009	1.13	3.37	0.08	8
1.239	1.51	11.40	0.32	10
1.489	1.55	6.04	0.17	8
2.505	1.40	1.12	0.03	9
2.933	0.51	1.10	0.03	16
3.123	1.35	2.00	0.06	7
3.557	2.59	1.58	0.05	18
4.102	4.51	1.11	0.03	14
4.468	1.21	0.86	0.02	8
4.758	5.07	0.99	0.03	11
5.444	2.18	1.23	0.04	17
5.711	3.94	0.53	0.02	6
5.900	4.11	0.87	0.02	10
6.328	6.89	0.72	0.02	7
6.613	4.33	0.51	0.02	8
7.119	1.67	0.73	0.01	7
7.629	1.18	1.17	0.03	22
10.794	4.84	6.64	0.23	6

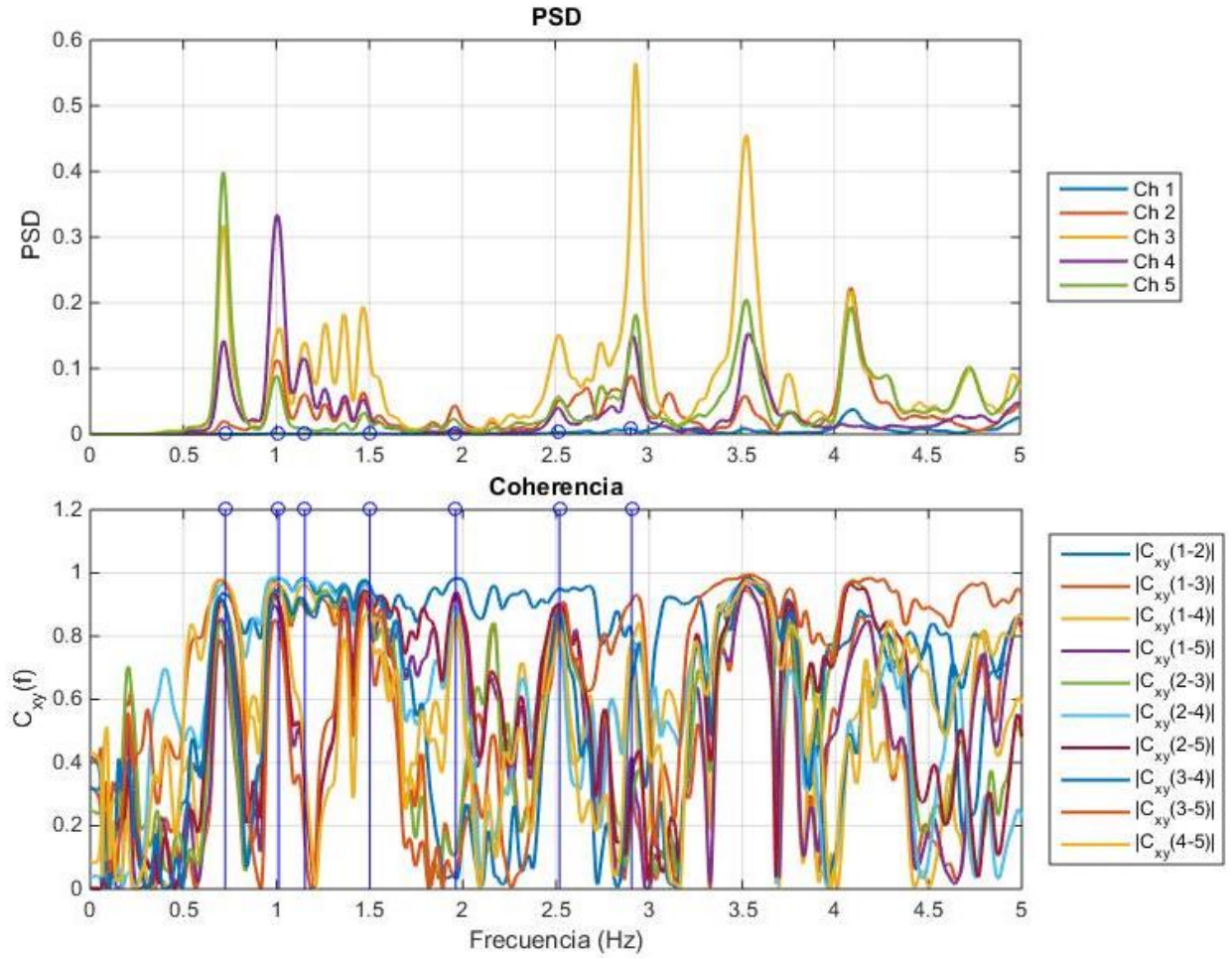


Ilustración 5-28: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Mar 03) tramo norte Marga-Marga 2004.

Tabla 5-11: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	T
Ch2	2	T
Ch3	3	T
Ch4	4	T
Ch5	5	T

5.3.2.2. Formas modales transversales tramo norte 2004 (Resultado reprocesamiento de datos)

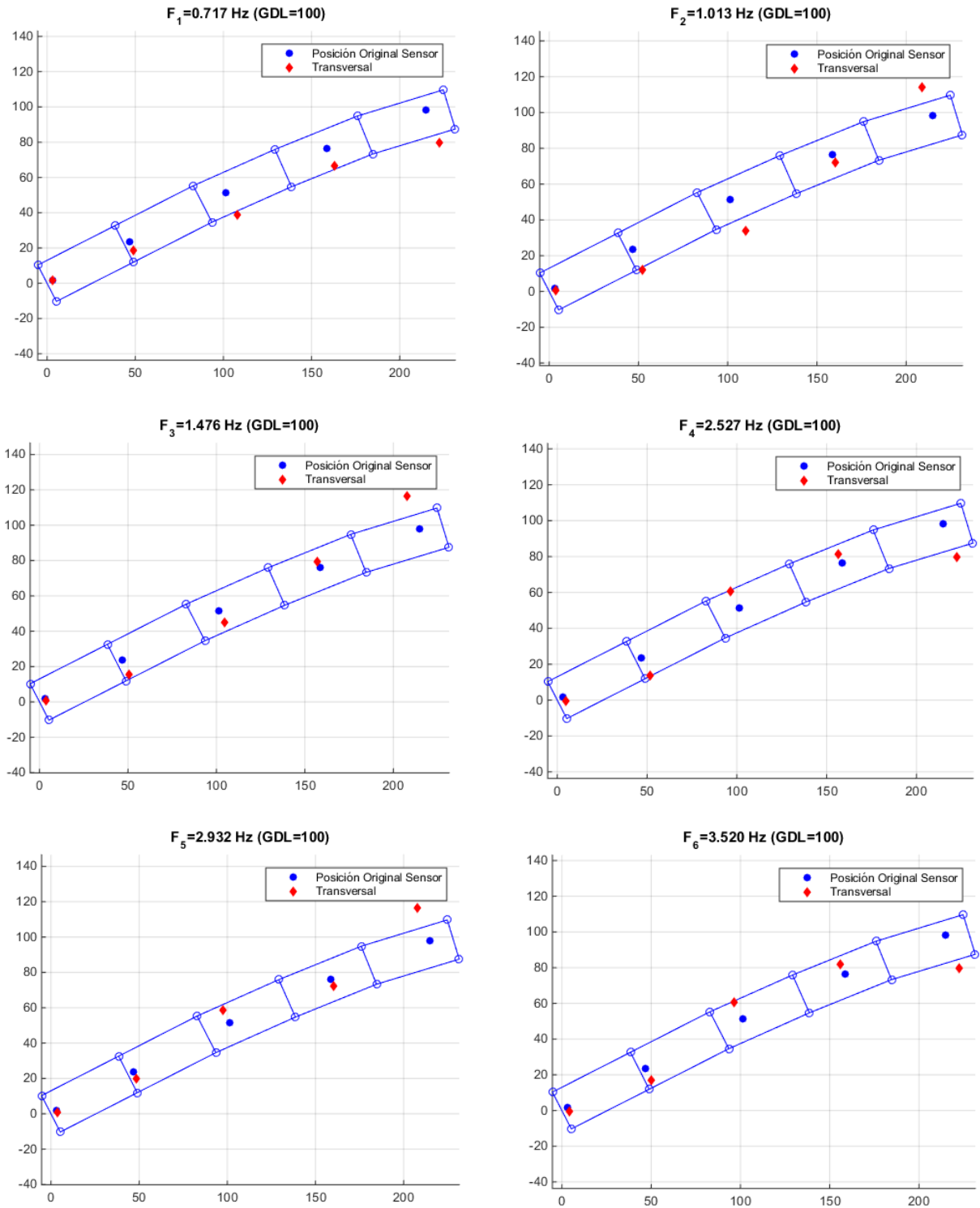


Ilustración 5-29: Formas Modales transversales tramo norte Marga-Marga 2004.

5.3.2.3. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 5-12: Frecuencias modales tramo norte transversal viaducto Marga-Marga

Modo	Frecuencias 2004 AD [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	0.708(FM1)	0.717(FM1)	-
2	1.025(FM2)	1.013(FM2)	-
3	1.538(FM3)	1.476(FM3)	-
4	2.540(FM4)	2.527(FM4)	-
5		2.932(FM5)	-
6		3.520(FM6)	-

En este tramo en particular no se puede hacer la comparación de variación el tiempo de las propiedades dinámicas de la estructura dado que la medición del año 2018 no pudo ser realizada por temas de tiempo.

Sin embargo, se reprocesaron los datos del 2004 con el método SSI. Se observa que las formas modales de la 1 a la 4 coinciden respectivamente.

5.3.3. Tramo norte vertical

5.3.3.1. Diagrama de estabilidad registro vertical (Mar 04/Canales 1-5) tramo norte 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

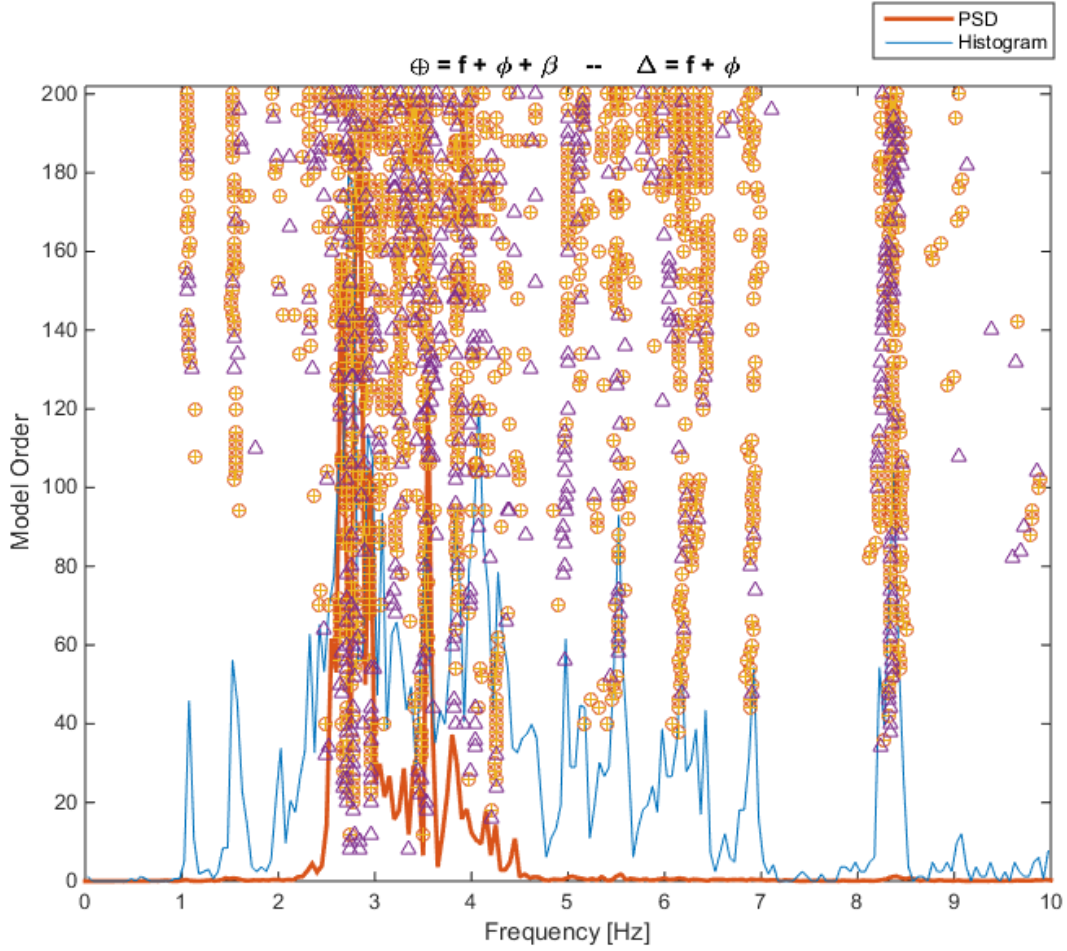


Ilustración 5-30: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo norte Marga-Marga 2004.

Tabla 5-13: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo norte Marga-Marga
2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.063	0.68	5.62	0.16	7
1.533	0.88	5.11	0.14	13
2.711	1.13	0.75	0.02	22
2.951	1.93	0.86	0.03	13
3.065	1.26	0.81	0.02	7
3.225	4.92	1.97	0.05	8
3.500	2.62	3.92	0.11	14
3.845	1.40	1.00	0.04	14
3.974	1.72	0.62	0.02	7
4.249	1.89	2.71	0.08	13
4.995	0.15	0.63	0.02	7
5.581	4.26	1.19	0.04	7
5.874	8.91	0.52	0.01	7
6.418	4.05	0.85	0.03	23
6.914	2.26	2.75	0.08	15
8.354	1.08	0.75	0.03	22
10.294	10.95	1.58	0.04	8

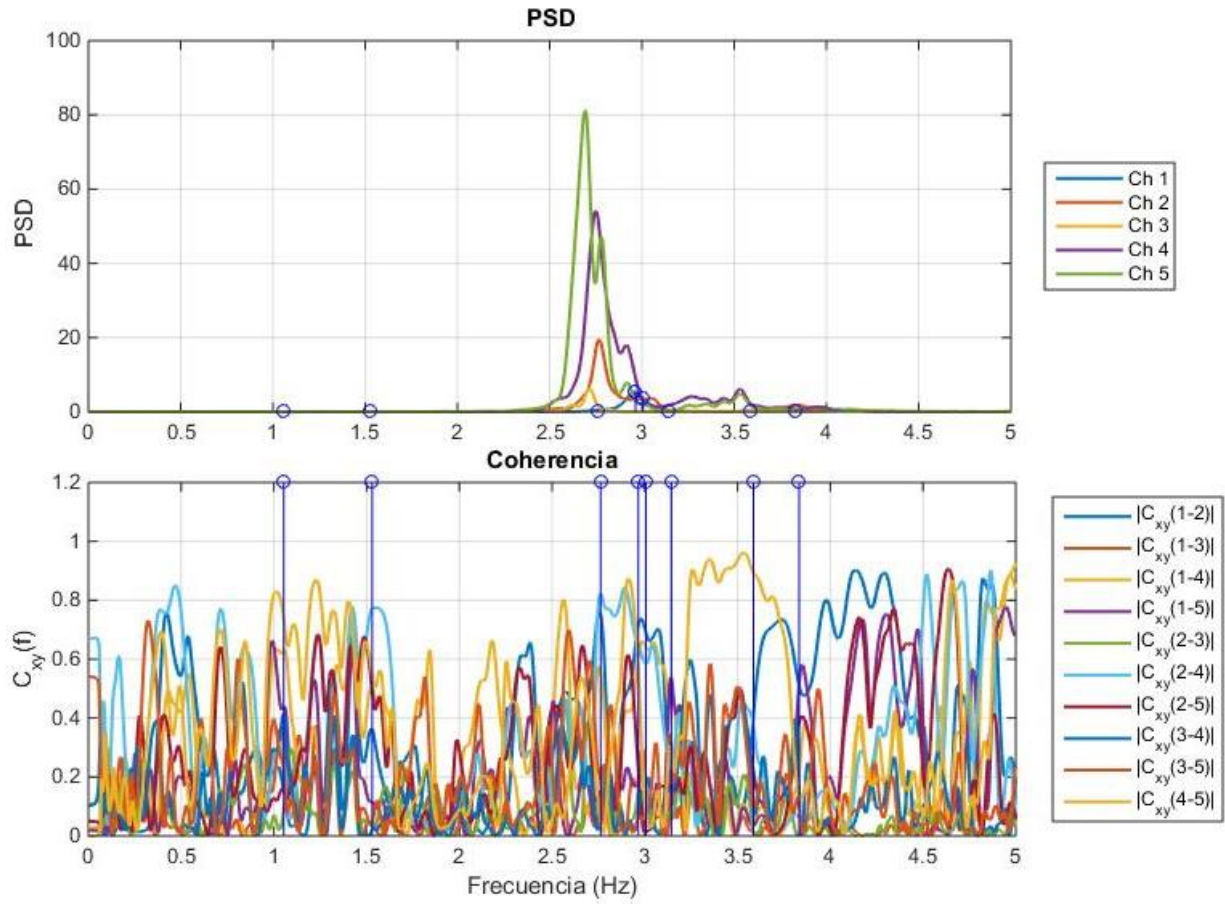


Ilustración 5-31: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Mar 04) tramo norte Marga-Marga 2004.

Tabla 5-14: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	V
Ch2	2	V
Ch3	3	V
Ch4	4	V
Ch5	5	V

5.3.3.2. Diagrama de estabilidad registro vertical (Marga 3/Canales 6-10) tramo norte 2018

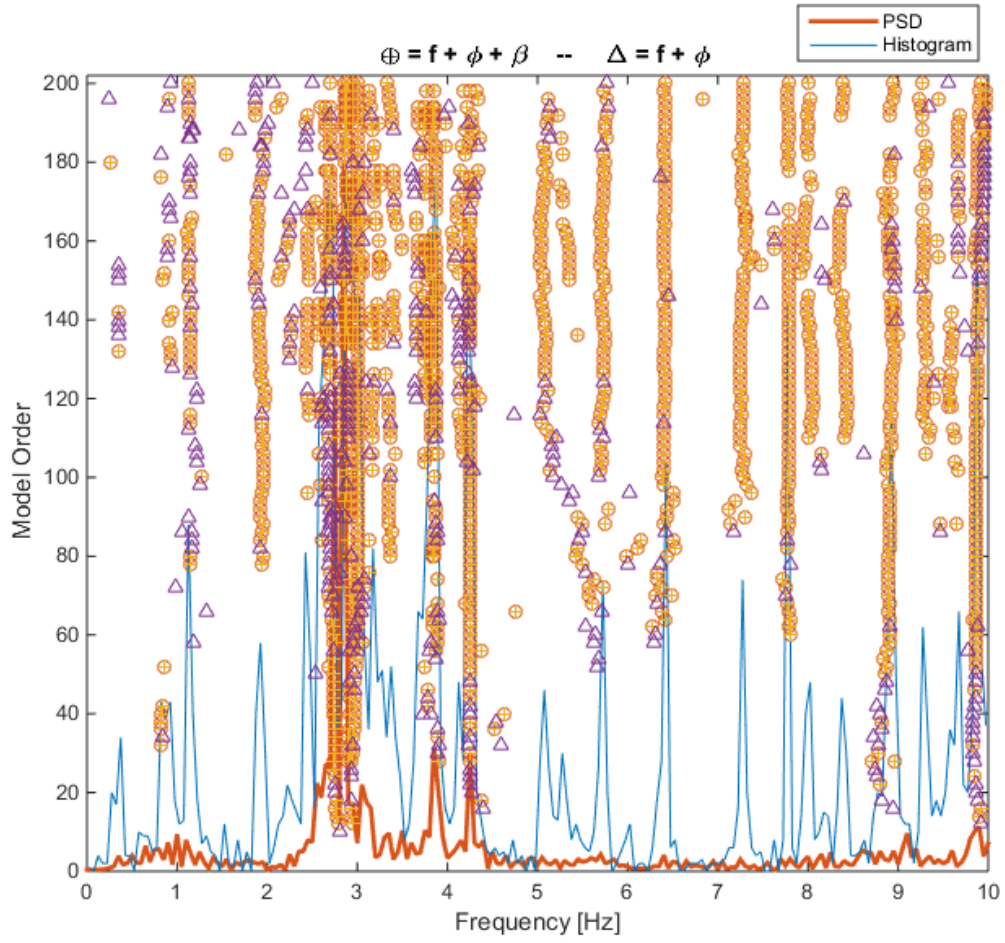


Ilustración 5-32: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo norte Marga-Marga 2018.

Tabla 5-15: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo norte Marga-Marga
2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.826	0.86	40.35	1.08	6
0.923	1.24	50.85	0.68	10
1.139	0.48	7.28	0.26	13
1.924	1.59	6.71	0.19	13
2.949	0.62	2.20	0.06	29
3.220	3.02	1.97	0.08	7
3.403	1.27	4.70	0.13	11
3.818	3.01	2.15	0.07	23
4.114	3.57	6.55	0.18	6
4.250	0.25	1.37	0.03	40
5.062	3.26	4.02	0.11	18
5.327	3.12	2.26	0.06	8
5.735	1.72	3.74	0.13	23
6.410	2.18	2.44	0.07	28
7.282	2.98	1.49	0.05	15
7.789	0.62	2.05	0.07	35
8.037	1.44	1.36	0.04	8
8.383	5.27	1.88	0.05	12
8.908	1.80	1.88	0.06	31
9.286	1.66	1.39	0.04	15
9.868	0.61	0.53	0.01	30

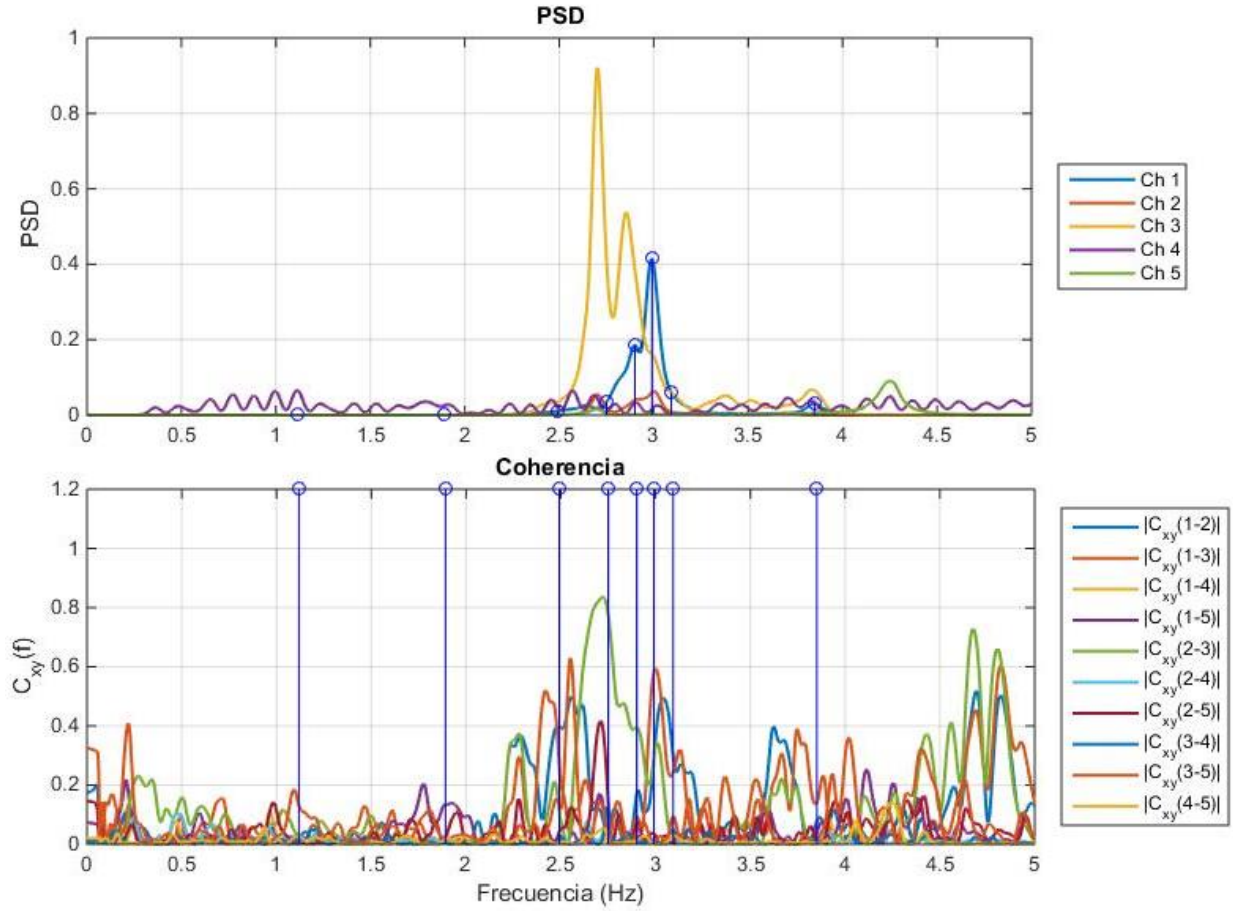


Ilustración 5-33: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Marga 3) tramo norte Marga-Marga 2018.

Tabla 5-16: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	6	V
Ch2	7	V
Ch3	8	V
Ch4	9	V
Ch5	10	V

5.3.3.3. Formas modales verticales tramo norte 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

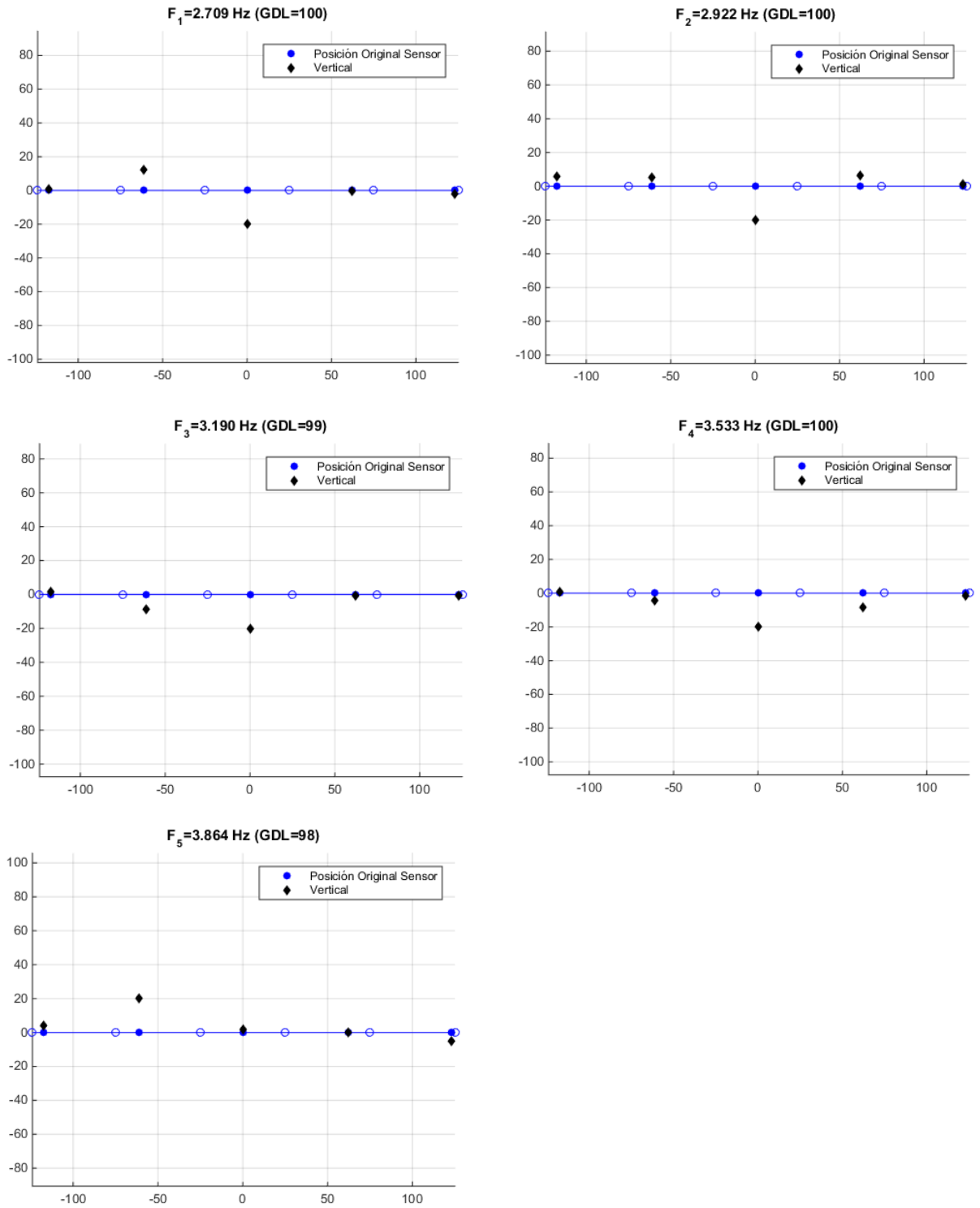


Ilustración 5-34: Formas Modales verticales tramo norte Marga-Marga 2004.

5.3.3.4. Formas modales verticales tramo norte 2018

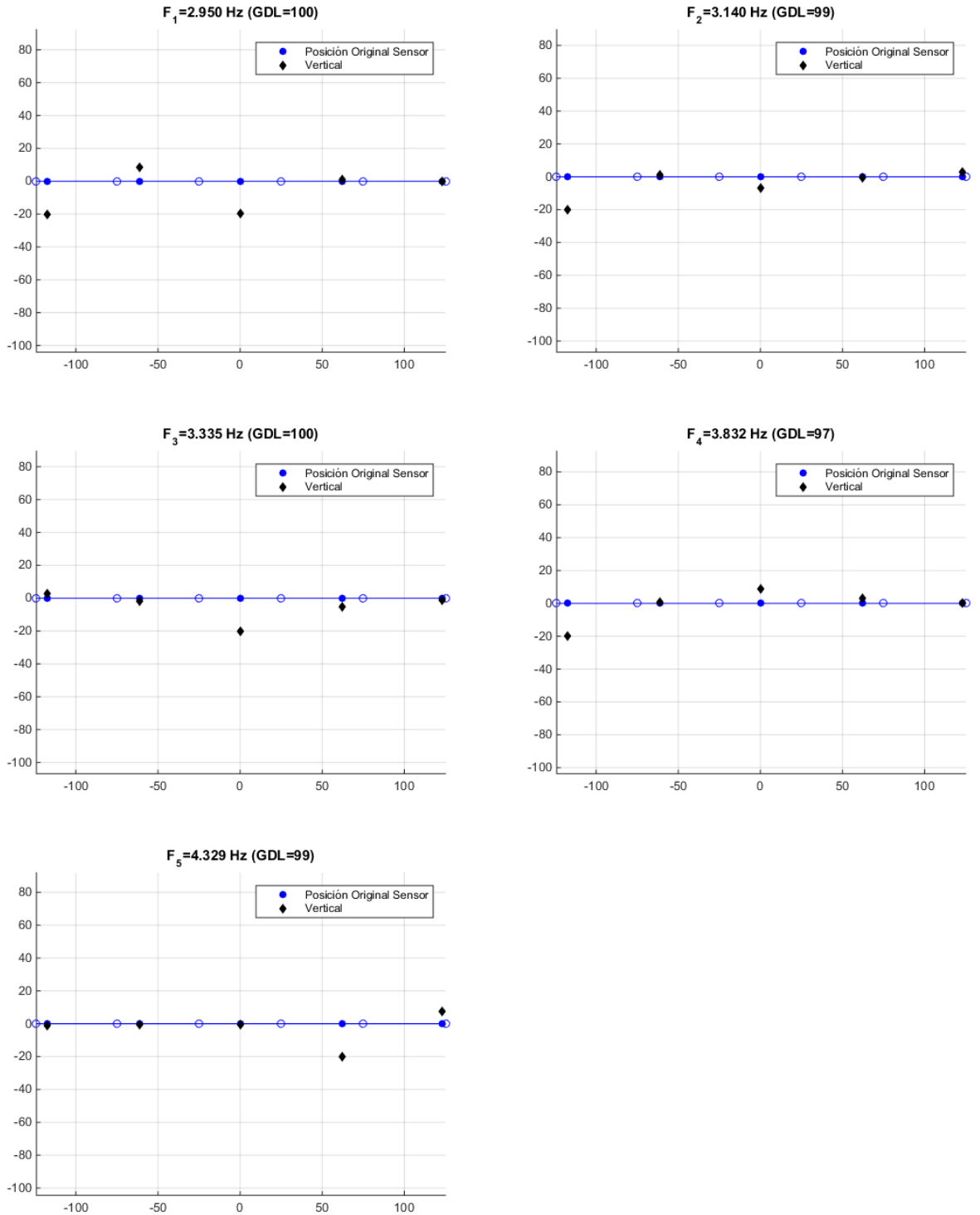


Ilustración 5-35: Formas Modales verticales tramo norte Marga-Marga 2018.

5.3.3.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 5-17: Frecuencias modales tramo norte vertical viaducto Marga-Marga

Modo	Frecuencias 2004 AD [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1	2.612(FM1) / 2.783(FM2)	2.709(FM1)	
2		2.922(FM2)	2.950(FM1)
3		3.190(FM3)	3.140(FM2)
4		3.533(FM4)	3.335(FM3)
5		3.864(FM5)	3.823(FM4)
7			4.329(FM5)

Se observó que los sensores ubicados cercanos a las cepas no aportan mucha información relacionada a los modos verticales. De este punto de vista, se recomendaría que en mediciones futuras no se utilicen sensores verticales sobre las cepas (al menos que los elastómeros sean sumamente flexibles en vertical y se quiera estudiar este efecto).

Por otra parte, dada la baja coherencia que se observa entre sensores que se disponen en vanos distintos es que se concluye que los modos verticales de puentes que tienen sus vigas dilatadas en cada vano (i.e., cada vano se materializada con vigas independientes) tienen un comportamiento que se asocia a la respuesta local del vano. Finalmente se concluye que existirían dos modos verticales en cada vano (uno asociado al movimiento vertical puro y otro a warping) que tendrían frecuencias entre 2.7 a 3.0 Hz.

En relación a lo obtenido por A. Díaz versus el reprocesamiento de datos, se observa que con SSI fue posible identificar un número mucho mayor de frecuencias y formas modales. Las formas modales 1 y 2 encontradas en la memoria de A. Díaz coinciden con el primer modo identificado con SSI.

5.3.4. Tramo sur longitudinal

5.3.4.1. Diagrama de estabilidad registro longitudinal (Mar 07/Canales 1-5) tramo sur 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

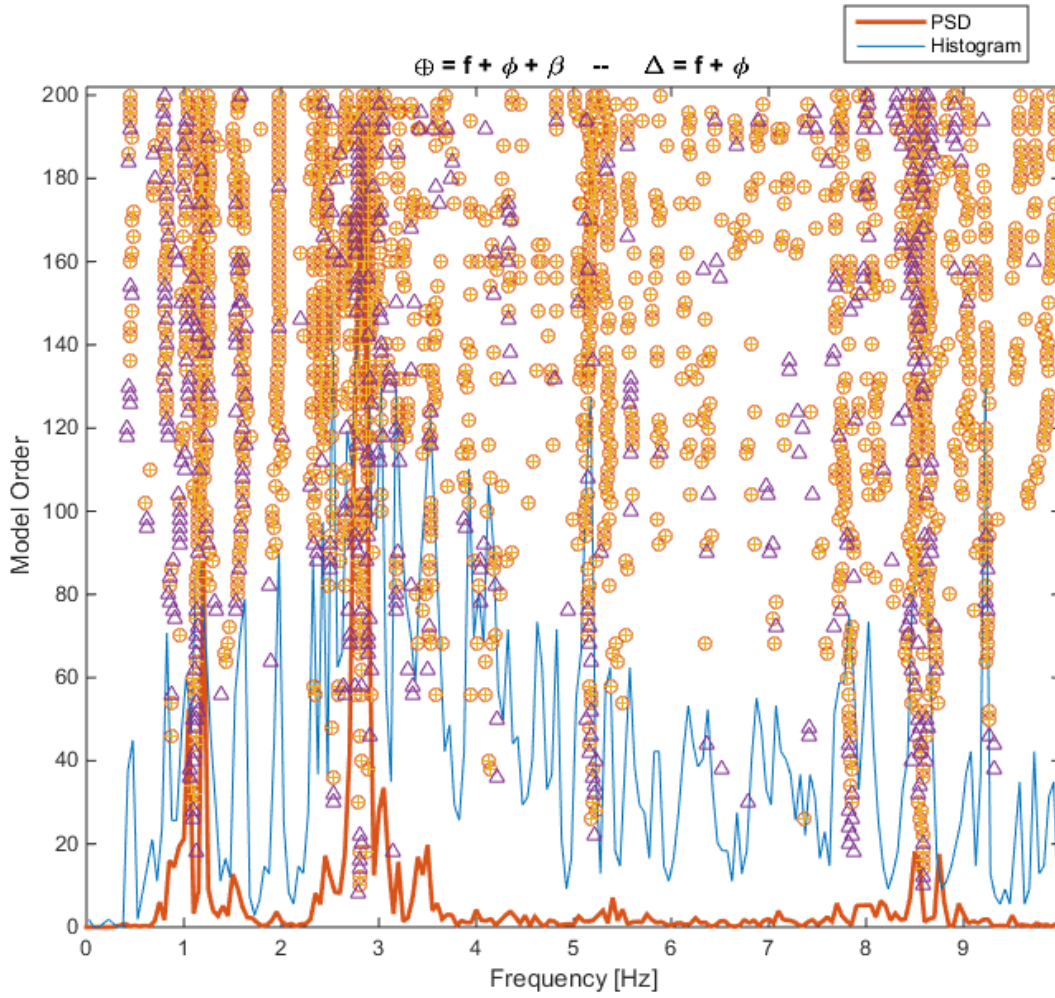


Ilustración 5-36: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo sur Marga-Marga 2004.

Tabla 5-18: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo sur Marga-Marga 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.814	1.12	10.55	0.32	8
1.135	1.61	6.69	0.22	9
1.249	0.62	3.24	0.10	8
1.621	1.25	5.22	0.15	8
1.974	0.33	1.08	0.04	10
2.330	1.73	2.18	0.08	14
2.528	0.96	1.18	0.04	8
2.891	1.33	0.80	0.03	19
3.209	3.30	0.89	0.03	8
3.552	3.07	2.30	0.08	9
5.128	4.18	1.75	0.05	18
5.583	2.59	0.82	0.02	7
6.438	6.88	5.61	0.18	6
7.866	3.25	3.56	0.08	19
8.547	7.23	1.37	0.04	25
9.223	4.38	1.32	0.05	20
9.830	4.14	2.78	0.08	17
10.351	4.16	1.75	0.04	31

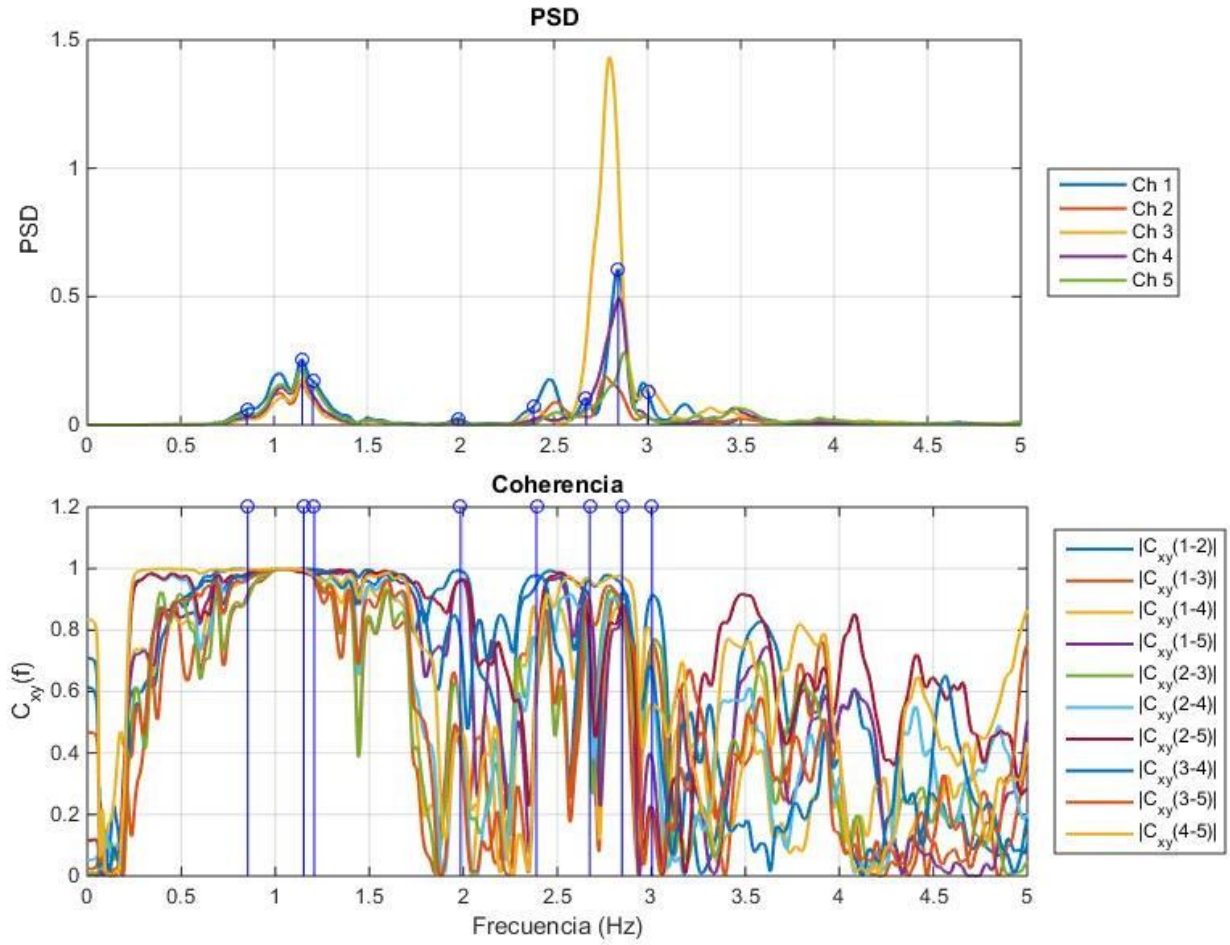


Ilustración 5-37: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Mar 07) tramo sur Marga-Marga 2004.

Tabla 5-19: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	L
Ch2	2	L
Ch3	3	L
Ch4	4	L
Ch5	5	L

5.3.4.2. Diagrama de estabilidad registro longitudinal (Marga 1/Canales 1-4) tramo sur 2018

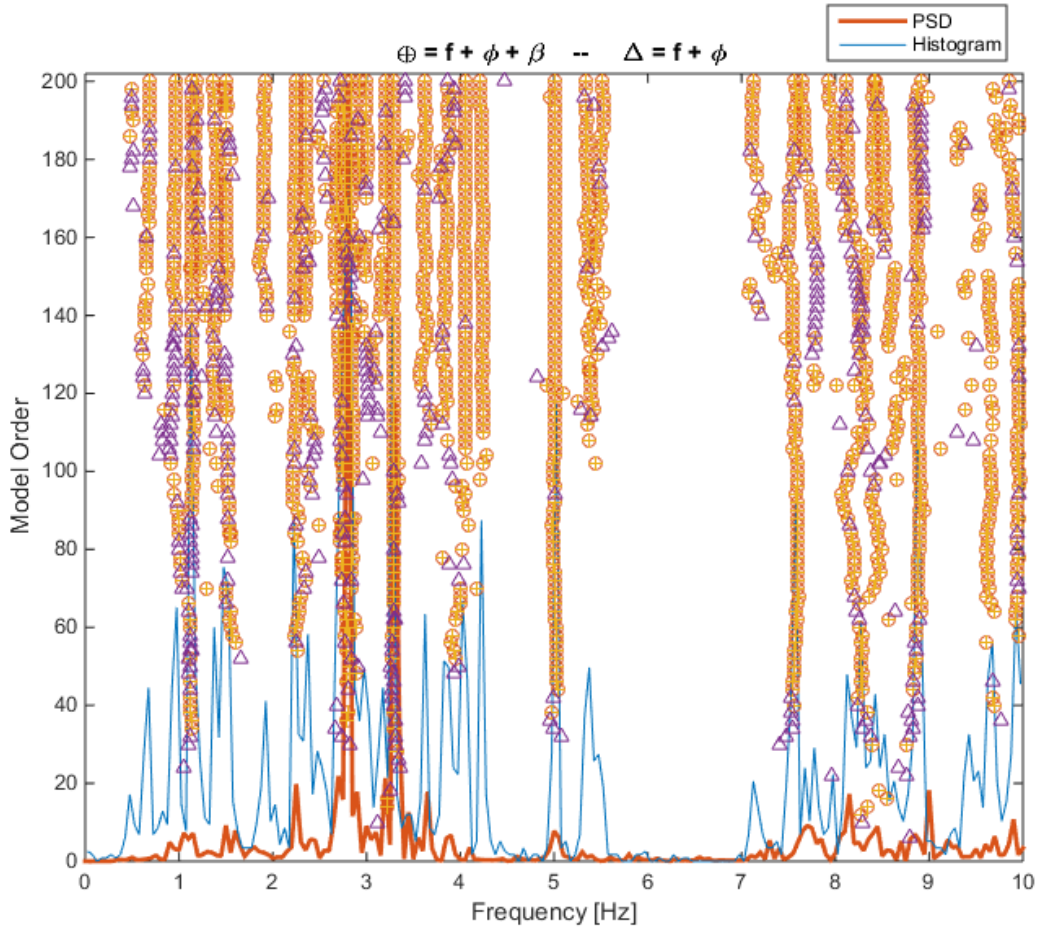


Ilustración 5-38: Diagrama de estabilidad tablero longitudinal tramo sur Marga-Marga 2018.

Tabla 5-20: Frecuencias y amortiguamientos tablero longitudinal tramo sur Marga-Marga 2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.685	0.23	3.71	0.10	8
0.957	0.38	2.96	0.09	18
1.117	0.72	9.87	0.31	9
1.144	1.13	5.07	0.14	18
1.379	1.12	4.21	0.15	8
1.500	1.14	5.18	0.13	20
2.242	1.37	2.59	0.08	19
2.359	1.16	2.97	1.00	19
2.846	0.33	1.36	0.03	27
3.284	0.25	1.13	0.03	42
3.630	2.47	1.29	0.04	8
3.847	3.04	2.80	10.00	11
4.050	0.40	1.30	3.00	22
4.230	0.93	1.32	0.04	19
5.013	0.38	1.44	0.03	42
5.392	6.30	2.41	0.07	12
5.508	1.75	1.88	0.06	8
7.577	2.35	2.28	0.07	26
8.288	5.95	2.34	0.07	19
8.880	1.71	1.52	0.04	43
9.638	4.17	2.95	0.09	16
9.895	10.79	1.07	0.02	15
10.264	5.56	1.72	0.06	9
10.904	2.03	1.41	0.04	25

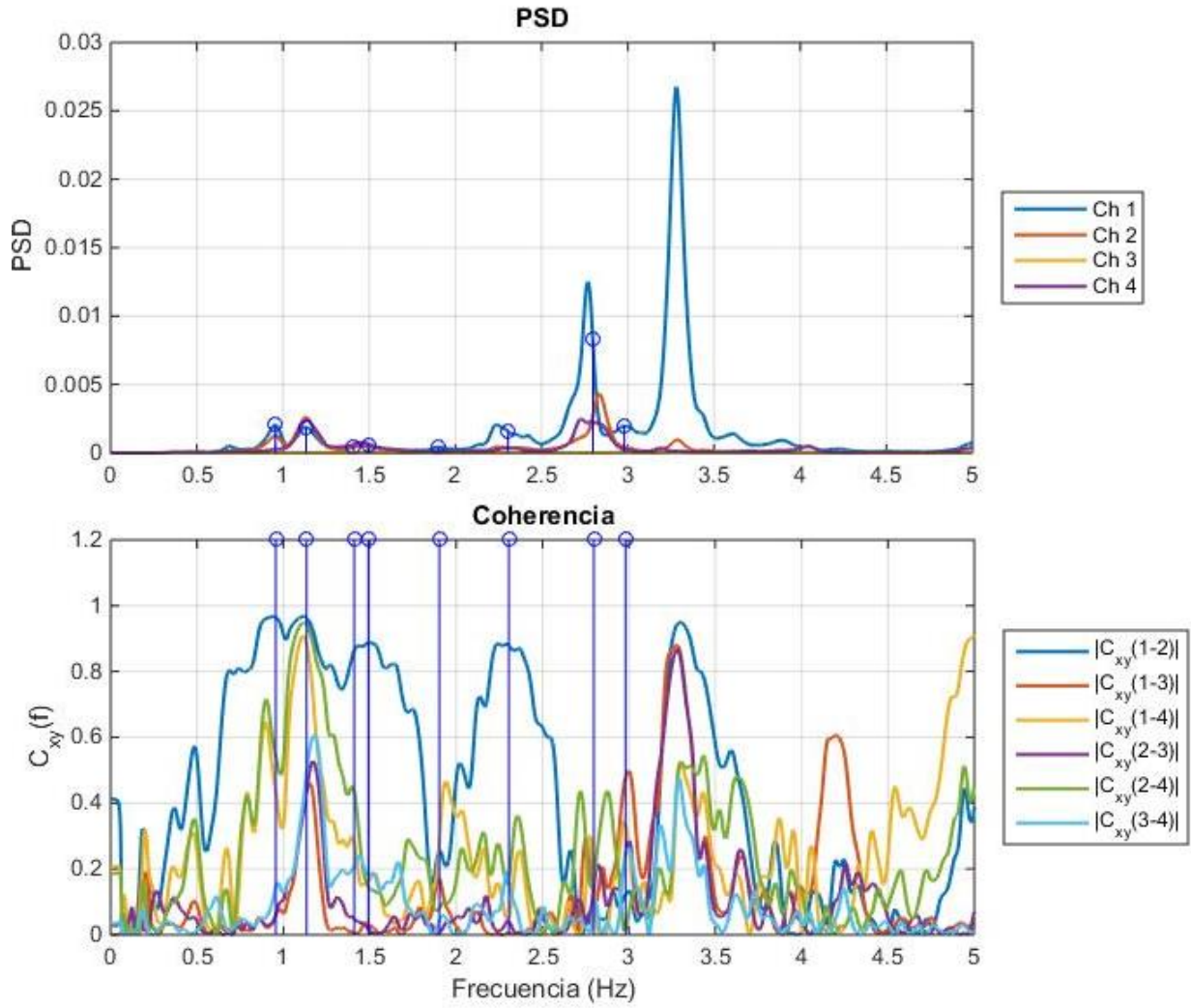


Ilustración 5-39: Espectros de Potencia y Coherencia tablero longitudinal (Marga 1) tramo sur Marga-Marga 2018.

Tabla 5-21: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	L
Ch2	2	L
Ch3	3	L
Ch4	4	L

5.3.4.3. Formas modales longitudinales tramo sur 2004 (Resultado reprocesamiento de datos)

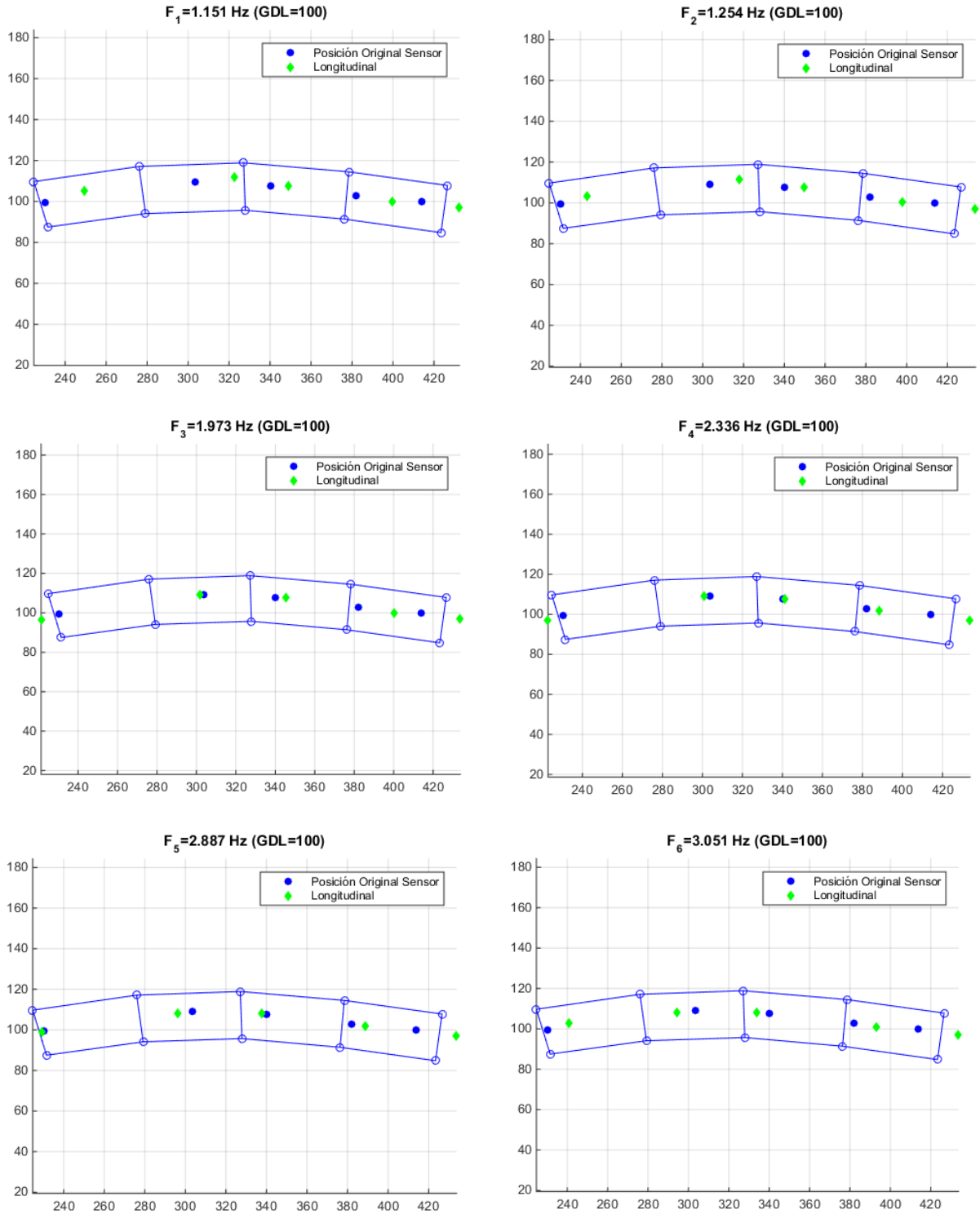
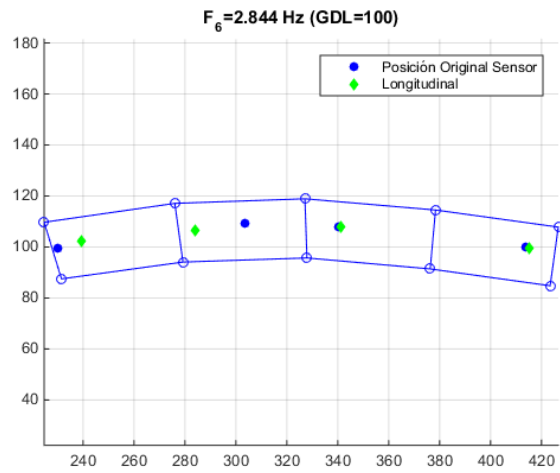
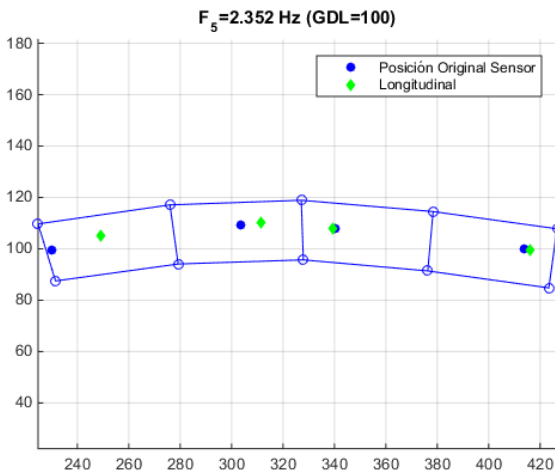
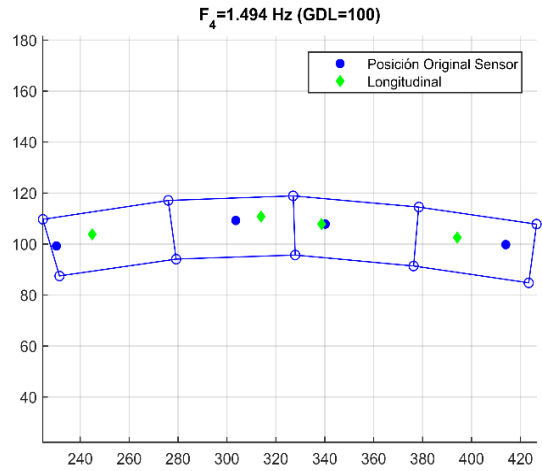
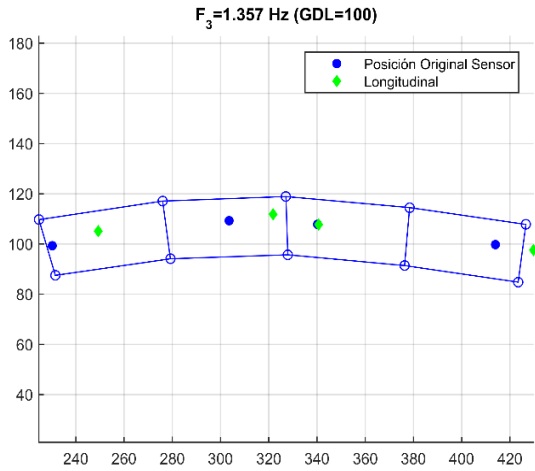
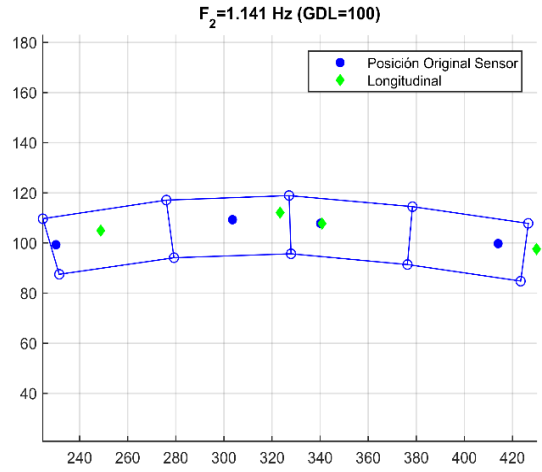
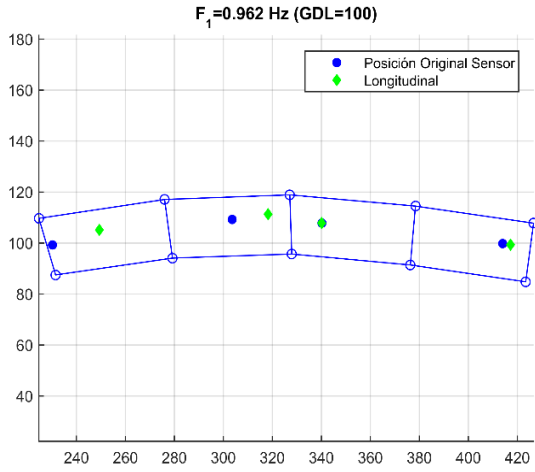


Ilustración 5-40: Formas Modales longitudinales tramo sur Marga-Marga 2004.

5.3.4.4. Formas modales longitudinales tramo sur 2018



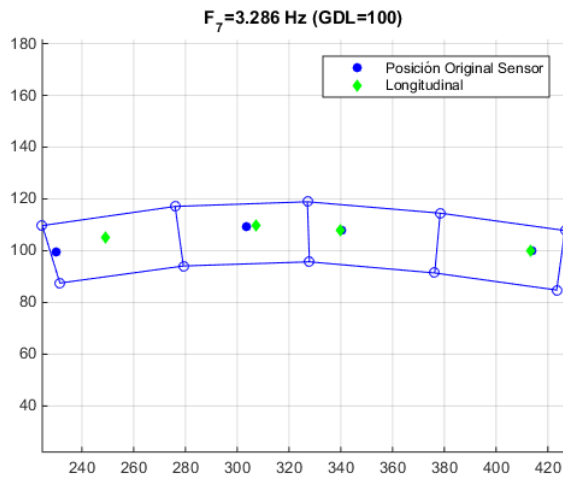


Ilustración 5-41: Formas Modales longitudinales tramo sur Marga-Marga 2018.

5.3.4.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 5-22: Frecuencias modales tramo sur longitudinal viaducto Marga-Marga

Modo	Frecuencias 2004 AD [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1			0.962(FM1)
2	1.148(FM1)	1.151(FM1)	1.141(FM2)
3		1.254(FM2)	1.357(FM3)
4			1.494(FM4)
5		1.973(FM3)	
6		2.336(FM4)	2.352(FM5)
7	2.808(FM2)	2.887(FM5)	2.844(FM6)
8		3.051(FM6)	
9			3.286(FM7)

Lamentablemente no se pudo tener certeza respecto a la orientación de la instrumentación dispuesta en el año 2003 y su réplica exacta en el año 2018. De esta forma en el año 2018 se orientaron los sensores en este tramo curvo en dirección Norte-Sur y Este-Oeste (ni longitudinal, ni transversal). Esto genera una gran dificultad en términos de la comparación de las propiedades dinámicas en especial en relación a las formas modales identificadas. Cabe mencionar que tanto en las mediciones longitudinales y transversales del 2018 se observan las mismas frecuencias indicando que no son ni puramente transversales ni puramente longitudinales, dada la curvatura del puente. Cabe mencionar que en las mediciones de 2003 también se observan una mezcla entre respuestas longitudinales y transversales. Teniendo en cuenta la complejidad del estudio de un puente curvo, se llega a la conclusión que su estudio más detallado requeriría la utilización de varios sensores simultáneos en longitudinal y transversal para materializar una visualización del comportamiento.

En términos generales se observan frecuencias del tablero que van desde los 0.7 a 1.6 Hz con valores similares en el año 2003 y 2018. Por otra parte, se observan modos de frecuencias entre 2.4 a 3.7 Hz que se corresponderían a modos asociados a las respuestas locales de cepas con valores similares para el año 2003 y 2018.

5.3.5. Tramo sur transversal

5.3.5.1. Diagrama de estabilidad registro transversal (Mar09/Canales 1-5) tramo sur 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

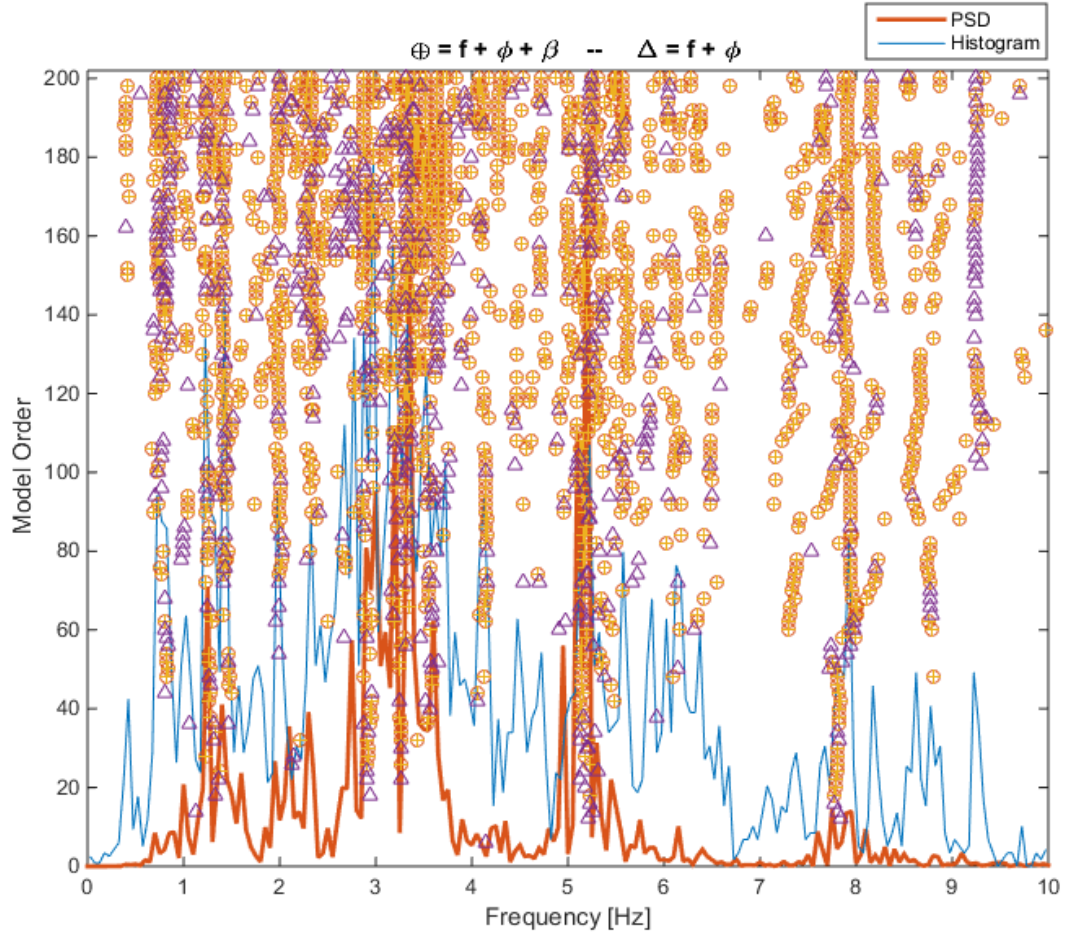


Ilustración 5-42: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo sur Marga-Marga 2004.

Tabla 5-23: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo sur Marga-Marga 2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
1.250	0.70	4.11	0.14	7
1.420	1.33	4.50	0.13	11
1.988	1.37	2.93	0.08	15
2.344	2.31	3.90	0.10	6
2.878	0.51	0.97	0.03	12
2.963	0.47	0.73	0.02	8
3.238	2.52	2.91	0.09	16
4.144	2.57	2.36	0.08	14
4.516	2.44	2.84	0.09	6
5.189	5.22	2.70	0.07	19
6.127	2.88	4.01	0.11	7
6.561	7.32	1.08	0.02	9
7.355	5.22	3.89	0.10	11
7.834	5.89	2.34	0.07	20
8.207	3.17	0.69	0.02	6
8.649	6.64	1.94	0.07	17

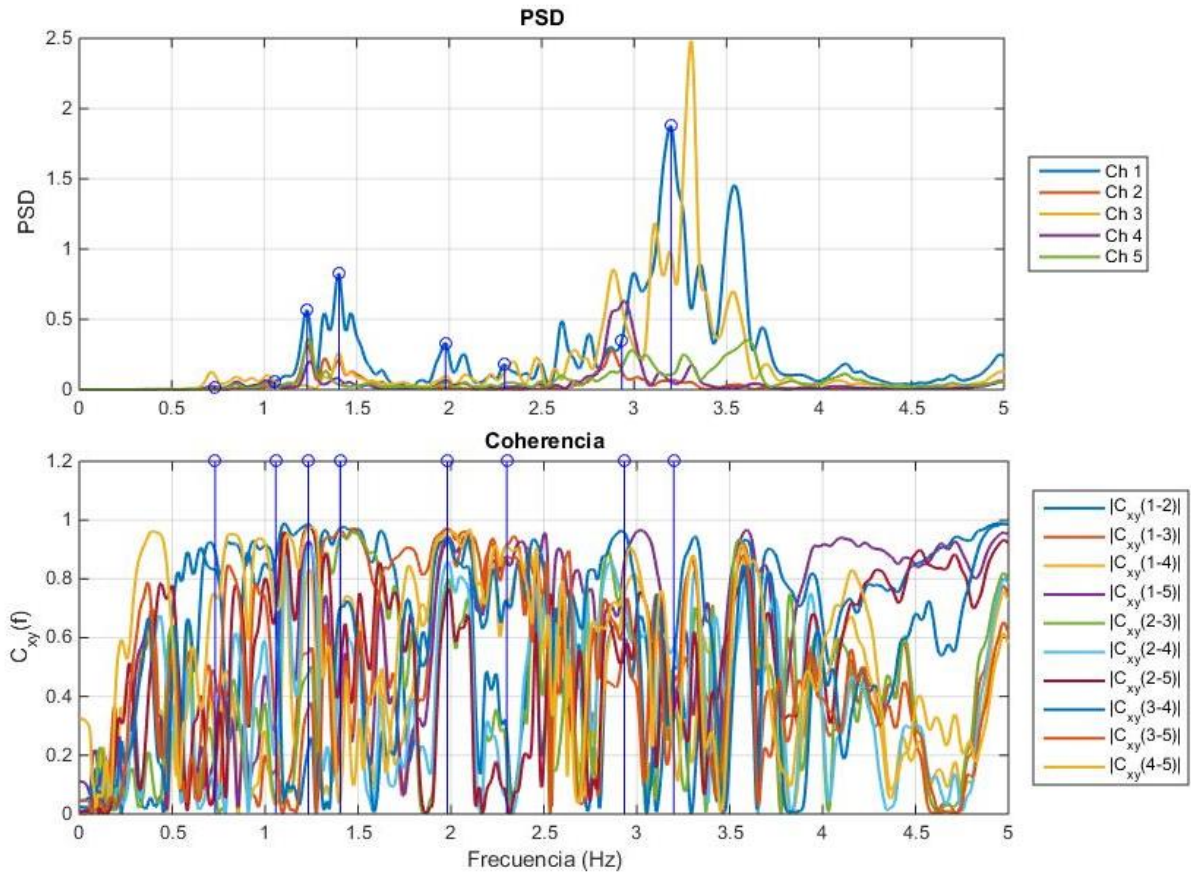


Ilustración 5-43: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Mar 09) tramo sur Marga-Marga 2004.

Tabla 5-24: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	T
Ch2	2	T
Ch3	3	T
Ch4	4	T
Ch5	5	T

5.3.5.2. Diagrama de estabilidad registro transversal (Marga2/Canales 1-5) tramo sur 2018

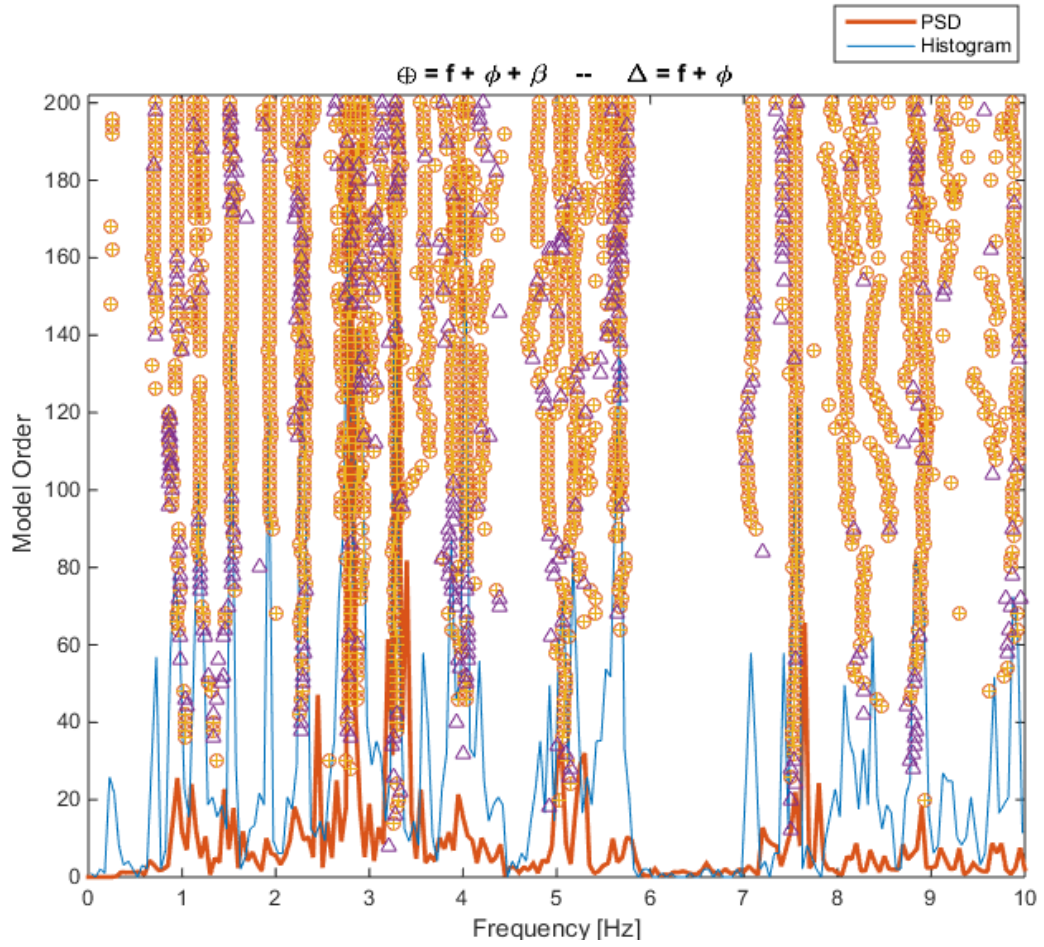


Ilustración 5-44: Diagrama de estabilidad tablero transversal tramo sur Marga-Marga 2018.

Tabla 5-25: Frecuencias y amortiguamientos tablero transversal tramo sur Marga-Marga
2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
0.707	0.64	1.06	0.03	7
0.947	0.20	5.03	0.15	15
1.130	0.51	4.42	0.12	8
t195	1.11	6.92	0.15	29
1.521	0.37	5.61	0.19	32
1.935	0.61	2.83	0.09	16
2.297	1.06	3.70	0.10	14
2.832	3.39	3.48	0.10	22
3.292	1.99	1.86	0.05	21
3.589	3.23	1.77	0.05	6
3.899	2.43	1.86	0.05	12
4.041	0.48	0.92	0.03	27
4.128	6.95	1.03	0.02	6
5.150	3.53	1.96	0.06	17
5.689	0.47	1.23	0.04	11
7.099	1.04	0.52	0.02	9
7.553	0.52	1.93	0.06	55
8.887	4.99	1.67	0.05	25
9.916	5.99	1.11	0.03	18
10.706	2.53	1.76	0.05	24

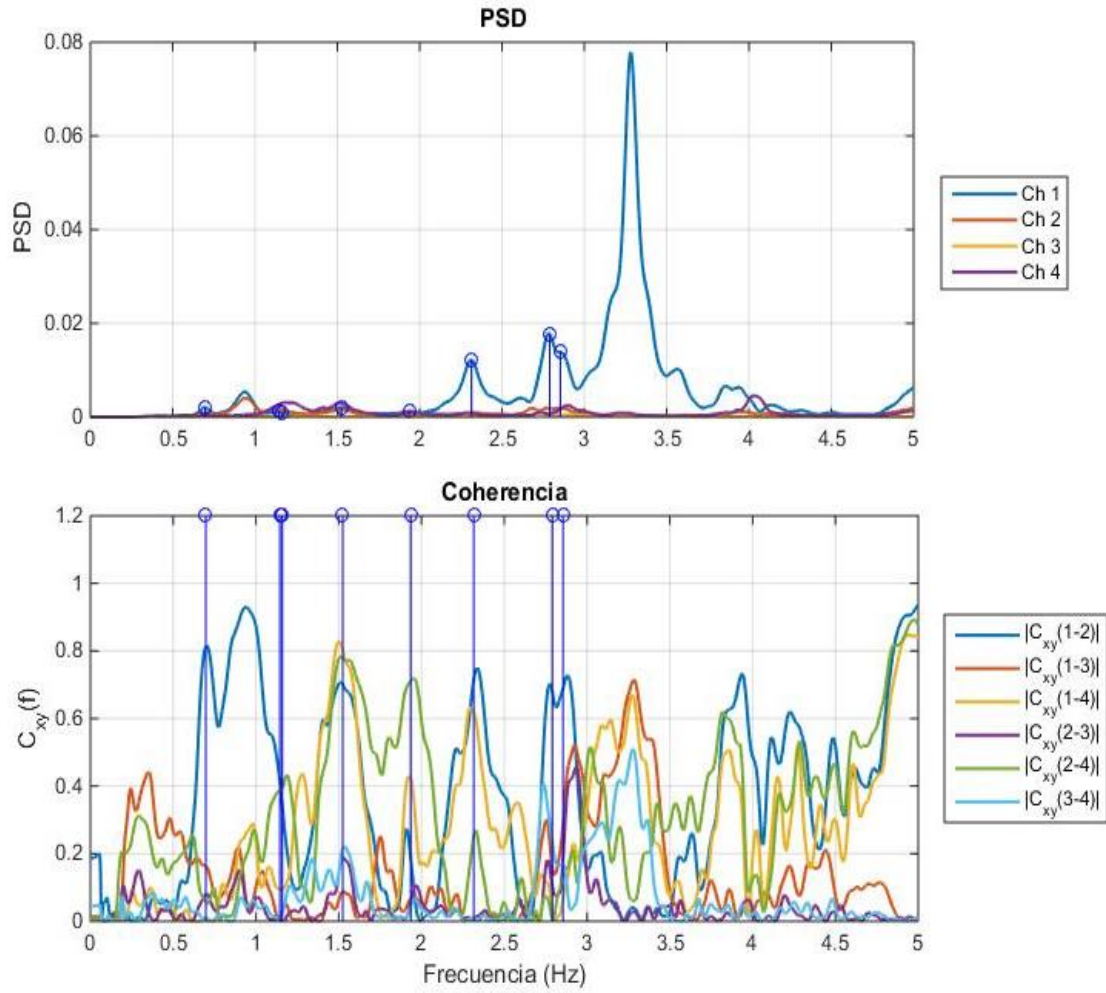
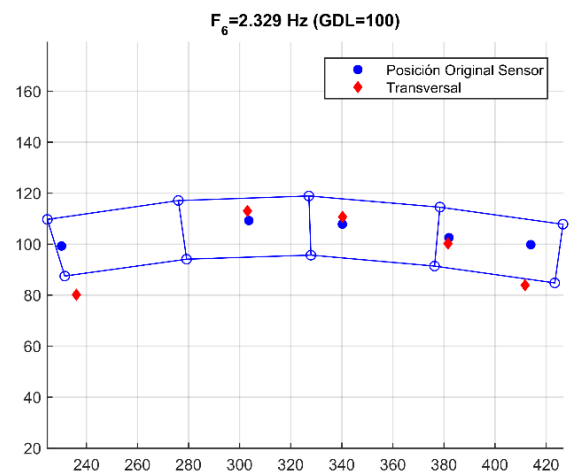
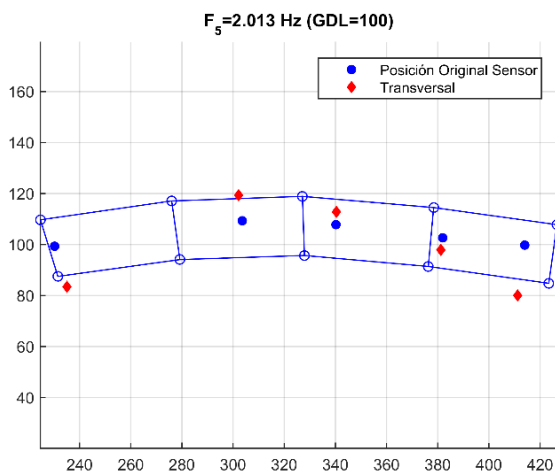
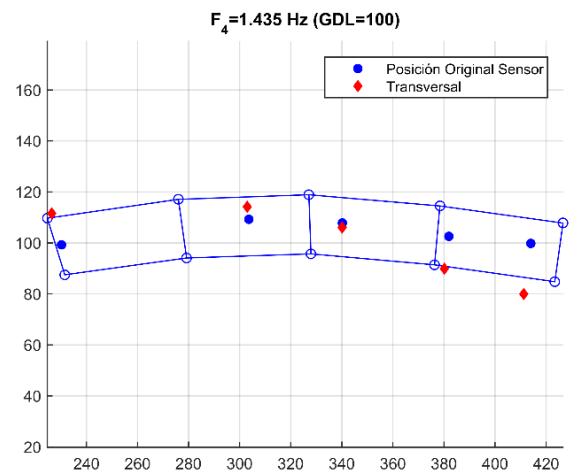
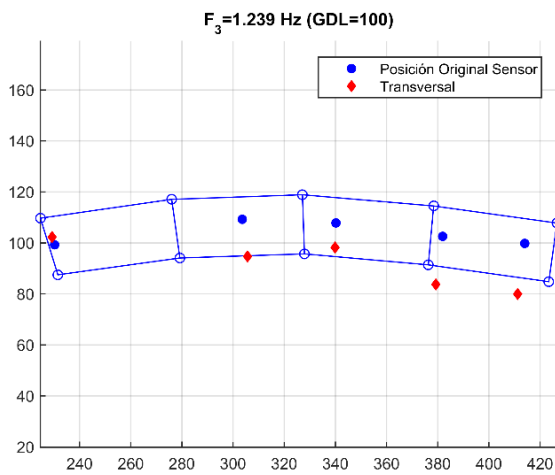
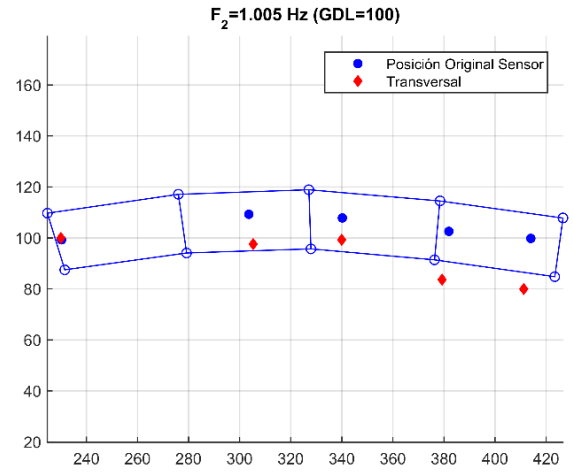
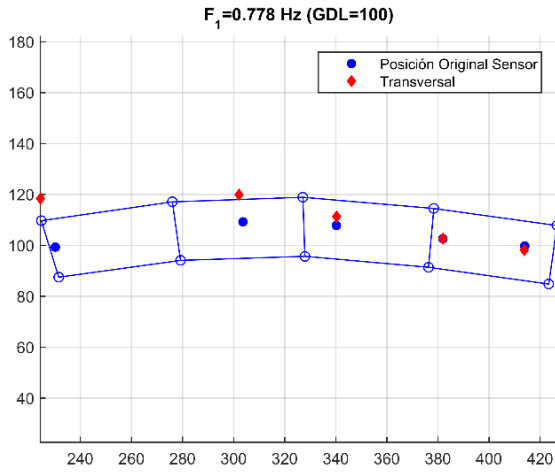


Ilustración 5-45: Espectros de Potencia y Coherencia tablero transversal (Marga 2) tramo sur Marga-Marga 2018.

Tabla 5-26: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	T
Ch2	2	T
Ch3	3	T
Ch4	4	T

5.3.5.3. Formas modales transversales tramo sur 2004 (Resultado reprocesamiento de datos)



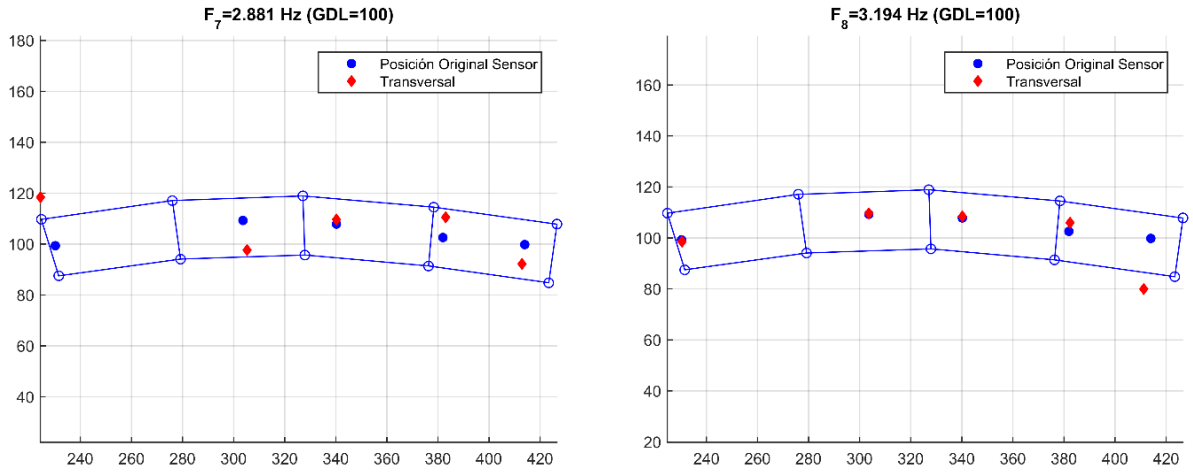
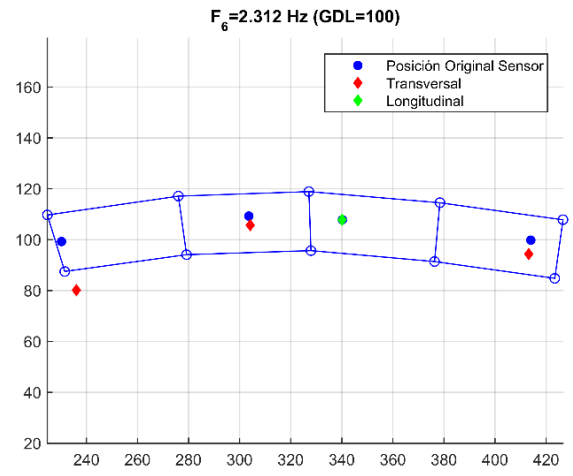
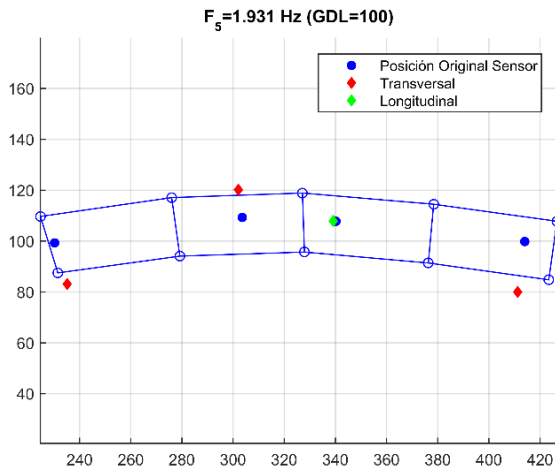
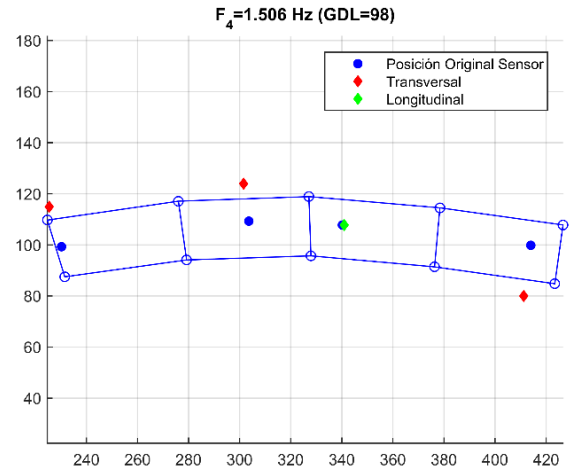
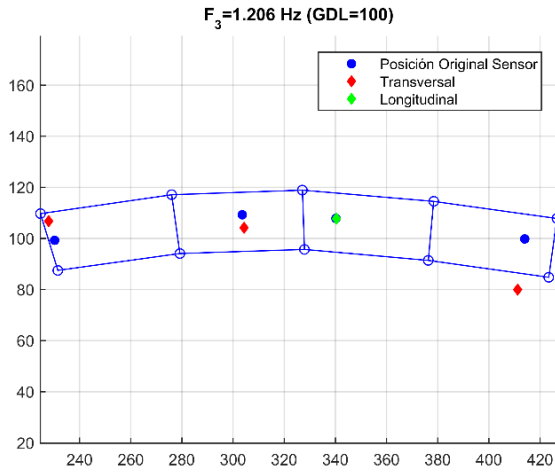
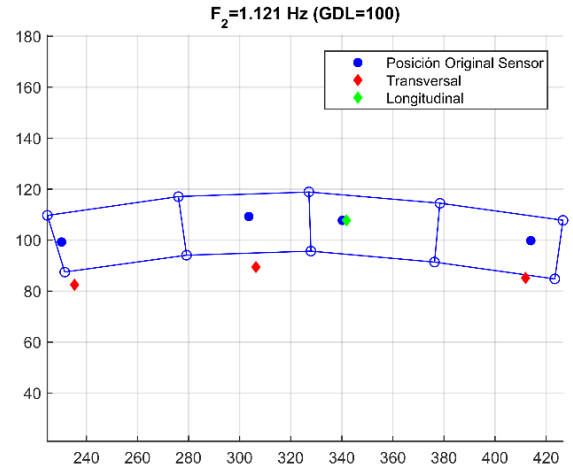
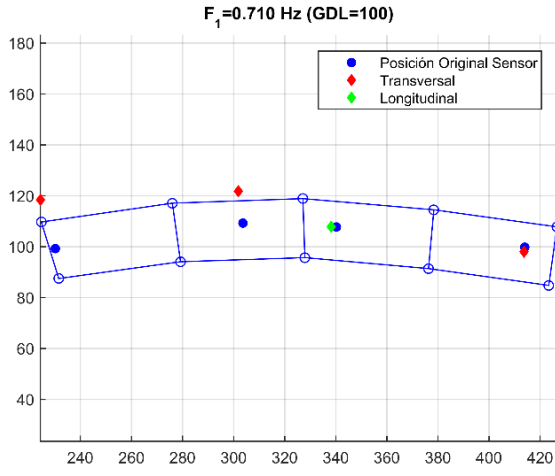


Ilustración 5-46: Formas Modales transversales tramo sur Marga-Marga 2004 (reprocesamiento de datos).

5.3.5.4. Formas modales transversales tramo sur 2018



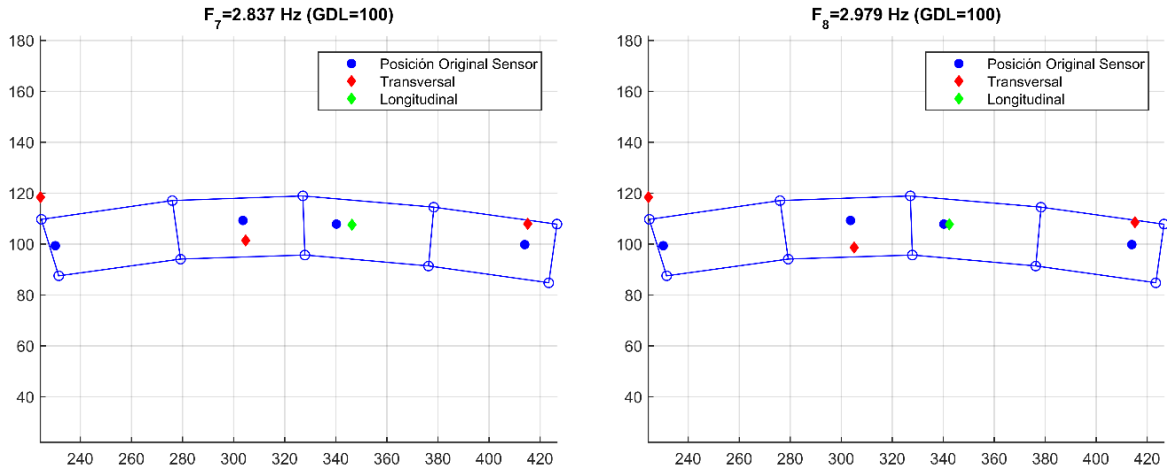


Ilustración 5-47: Formas Modales transversales tramo sur Marga-Marga 2018.

5.3.5.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 5-27: Frecuencias modales tramo sur transversal viaducto Marga-Marga

Modo	Frecuencias 2004 AD [Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1		0.778(FM1)	0.710(FM1)
2	1.000(FM1)	1.005(FM2)	1.121(FM2)
3	1.220(FM2)	1.239(FM3)	1.206(FM3)
4	1.514(FM3)	1.435(FM4)	1.506(FM4)
5	2.000(FM4)	2.013(FM5)	1.931(FM5)
6	2.319(FM5)	2.329(FM6)	2.312(FM6)
7		2.881(FM7)	2.837(FM7)
8			2.900(FM8)
9	3.296(FM6)	3.194(FM8)	
10	3.540(FM7)		

Lamentablemente no se pudo tener certeza respecto a la orientación de la instrumentación dispuesta en el año 2003 y su réplica exacta en el año 2018. De esta forma en el año 2018 se orientaron los sensores en este tramo curvo en dirección Norte-Sur y Este-Oeste (ni longitudinal, ni transversal). Esto genera una gran dificultad en términos de la comparación de las propiedades dinámicas en especial en relación a las formas modales identificadas. Cabe mencionar que tanto en las mediciones longitudinales y transversales del 2018 se observan las mismas frecuencias indicando que no son ni puramente transversales ni puramente longitudinales, dada la curvatura del puente. Cabe mencionar que en las mediciones de 2003 también se observan una mezcla entre respuestas longitudinales y transversales. Teniendo en cuenta la complejidad del estudio de un puente curvo, se llega a la conclusión que su estudio más detallado requeriría la utilización de varios sensores simultáneos en longitudinal y transversal para hacerse una visualización del comportamiento.

En términos generales se observan frecuencias del tablero que van desde los 0.7 a 1.6 Hz con valores similares en el año 2003 y 2018. Por otra parte, se observan modos de

frecuencias entre 2.4 a 3.7 Hz que se corresponderían a modos asociados a las respuestas locales de cepas con valores similares para el año 2003 y 2018.

Al comparar las formas modales obtenidas a través del análisis en frecuencias versus las obtenidas a partir de SSI del año 2004 se destaca que las formas modales desde la 1 a la 6 coinciden respectivamente con la 2, 3, 4, 5, 6 y 8. La FM1 y FM7 no fueron identificadas con el análisis en frecuencias.

5.3.6. Tramo sur vertical

5.3.6.1. Diagrama de estabilidad registro vertical (Mar06/Canales1-5) tramo sur 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

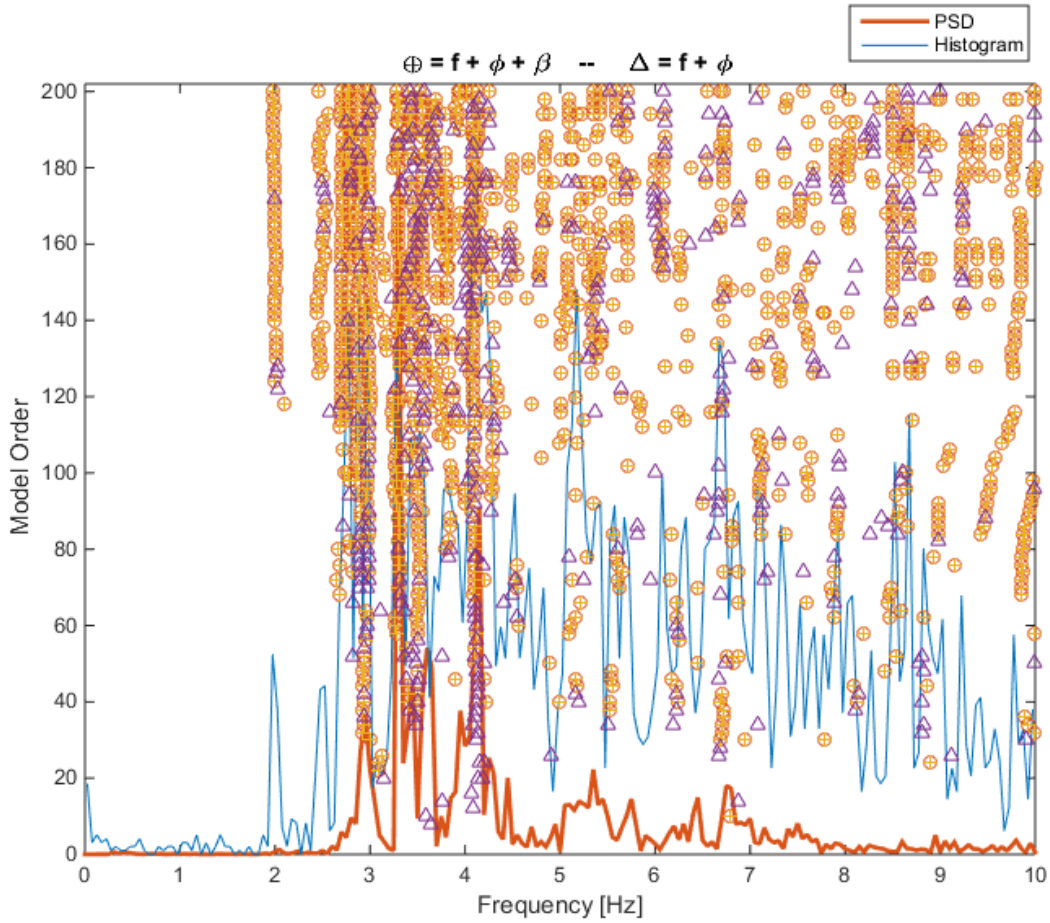


Ilustración 5-48: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo sur Marga-Marga 2004.

Tabla 5-28: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo sur Marga-Marga
2004

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
2.005	0.60	2.15	0.07	10
2.496	2.29	4.01	0.12	9
2.740	3.02	1.43	0.04	13
2.873	2.13	1.44	0.04	15
3.294	3.27	1.79	0.03	11
3.552	1.52	1.20	0.03	13
3.723	1.25	3.17	0.07	6
3.880	5.40	2.01	0.05	6
4.093	3.66	0.90	0.03	13
5.124	4.29	1.82	0.07	7
5.332	6.25	1.34	3.00	6
5.569	6.07	5.96	0.16	6
5.689	4.02	0.72	0.03	6
6.262	4.73	2.67	0.08	6
6.699	2.53	5.16	16.00	10
7.999	6.45	0.85	4.00	7
8.518	5.68	0.44	0.01	9
8.965	7.68	2.23	0.08	6
9.967	7.60	2.48	0.08	15
10.846	4.62	2.02	0.06	16

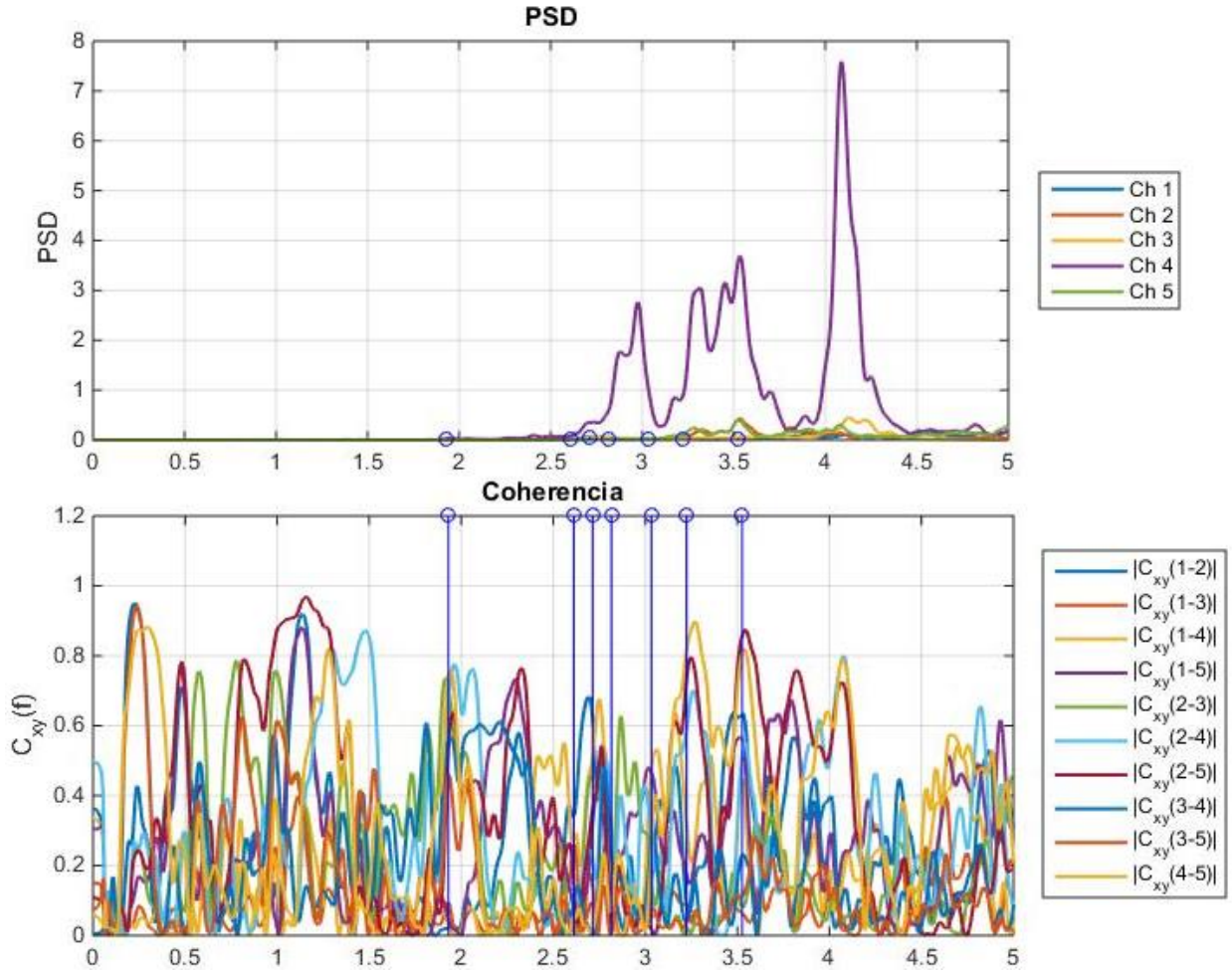


Ilustración 5-49: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Mar 06) tramo sur Marga-Marga 2004.

Tabla 5-29: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	1	V
Ch2	2	V
Ch3	3	V
Ch4	4	V
Ch5	5	V

5.3.6.2. Diagrama de estabilidad registro vertical (Marga2/Canales 6-10) tramo sur 2018

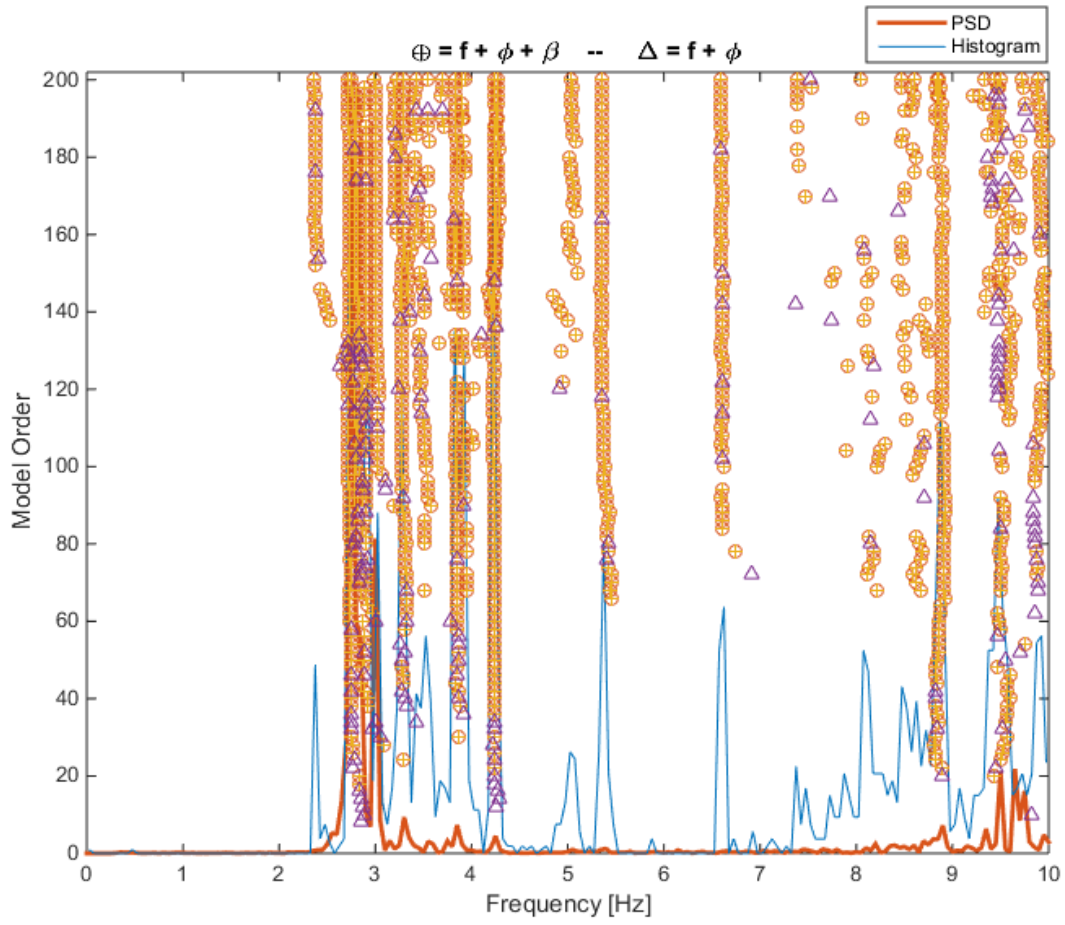


Ilustración 5-50: Diagrama de estabilidad tablero vertical tramo sur Marga-Marga 2018.

Tabla 5-30: Frecuencias y amortiguamientos tablero vertical tramo sur Marga-Marga
2018

f [Hz]	$\sigma\%$	$\beta\%$	$\sigma\%$	N
2.768	2.84	1.57	0.04	27
3.002	0.31	1.57	0.05	20
3.290	2.09	2.78	0.09	20
3.516	2.43	2.56	0.05	8
3.859	2.90	1.22	0.04	38
4.235	0.82	1.30	0.03	50
5.048	1.49	1.52	0.04	9
5.357	1.43	1.06	0.03	31
6.607	0.85	2.98	0.09	23
8.157	6.31	2.80	0.09	8
8.885	4.31	1.28	0.04	23
9.517	6.27	3.38	0.10	24
9.916	3.14	0.97	0.03	22

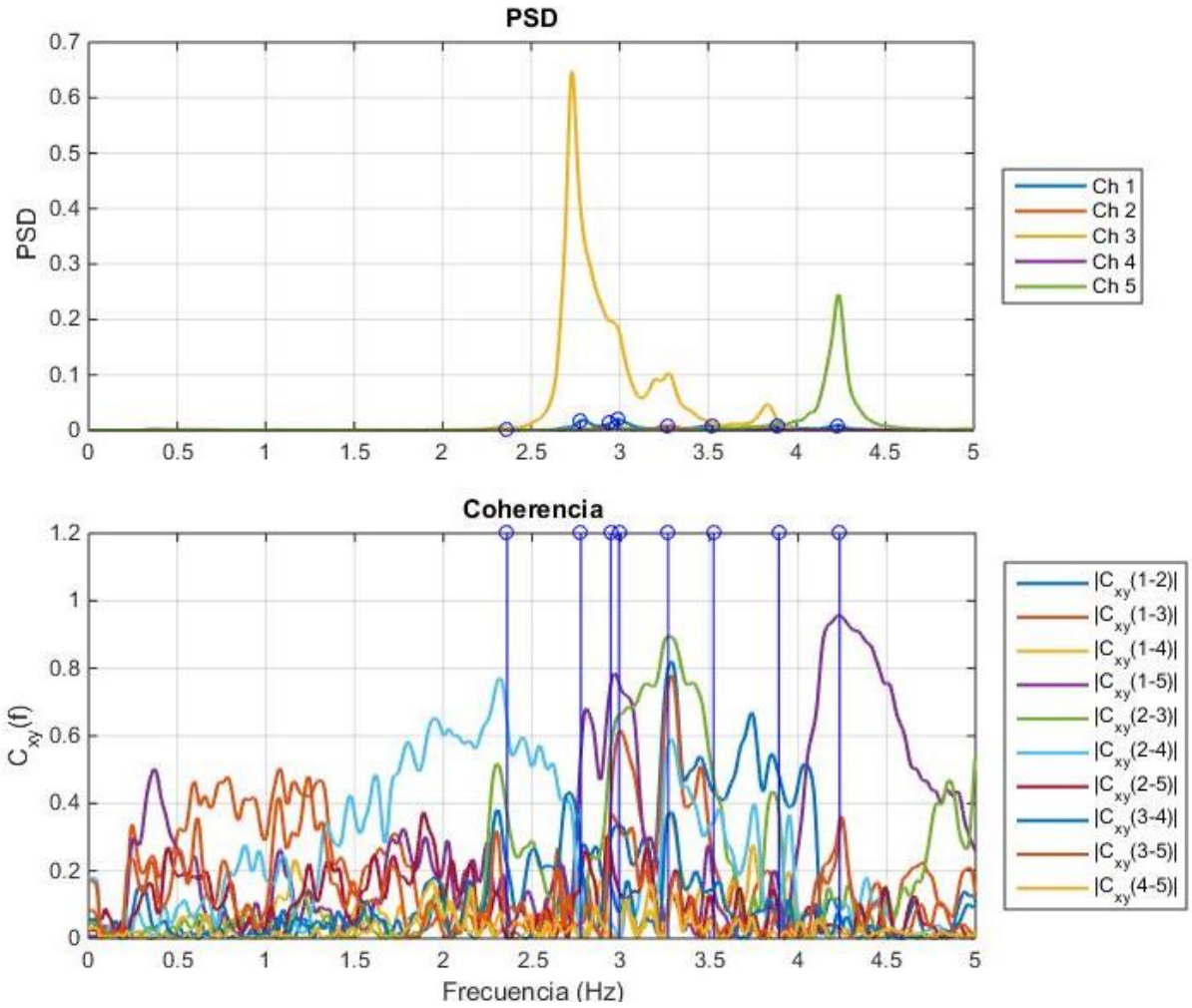


Ilustración 5-51: Espectros de Potencia y Coherencia tablero vertical (Marga 2) tramo sur Marga-Marga 2018.

Tabla 5-31: Dirección y canal asociado a cada sensor.

Canal	Sensor	Dirección
Ch1	6	V
Ch2	7	V
Ch3	8	V
Ch4	9	V
Ch5	10	V

5.3.6.3. Formas modales verticales tramo sur 2004 (Resultados reprocesamiento de datos)

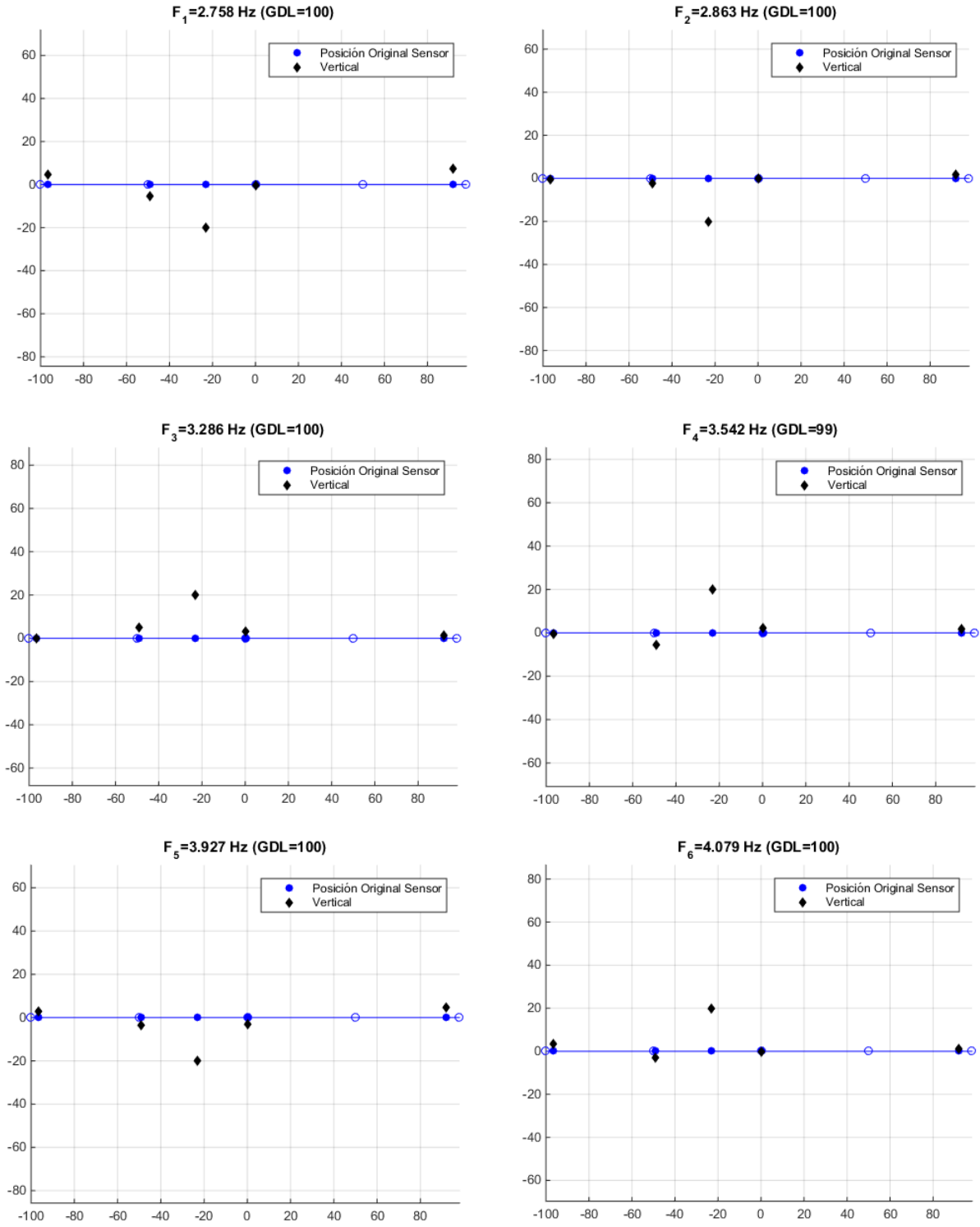


Ilustración 5-52: Formas Modales verticales tramo sur Marga-Marga 2004.

5.3.6.4. Formas modales verticales tramo sur 2018

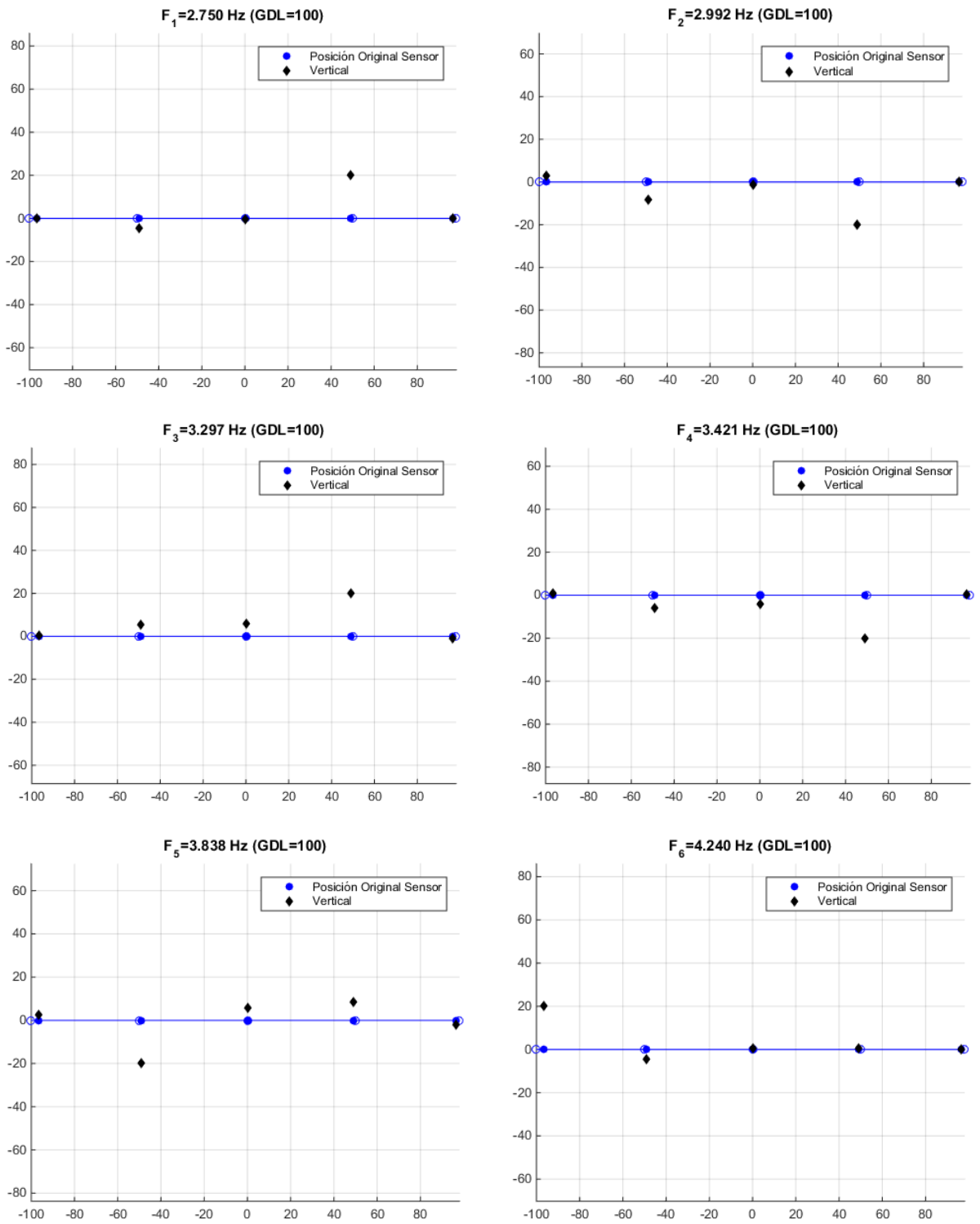


Ilustración 5-53: Formas Modales verticales tramo sur Marga-Marga 2018.

5.3.6.5. Comparación de resultados

En la tabla que se observa a continuación se muestran las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas para cada registro.

Tabla 5-32: Frecuencias naturales tramo sur vertical viaducto Marga-Marga

Modo	Frecuencias 2004 AD[Hz]	Frecuencias 2004 [Hz]	Frecuencias 2018 [Hz]
1		2.758(FM1)	2.750(FM1)
2	2.978(FM1)	2.863(FM2)	2.992(FM2)
3	3.320(FM2)	3.286(FM3)	3.297(FM3)
4	3.470(FM3)/ 3.516(FM4)	3.542(FM4)	3.421(FM4)
5		3.927(FM5)	3.838(FM5)
6		4.079(FM6)	4.240(FM6)

Para este caso se utiliza el registro vertical en el cual los sensores están ubicados sobre las cepas dado que el 2004 no se hizo un registro con los sensores ubicados en tramos intermedios. Esto dificulta la identificación de los modos verticales, dado que sobre las cepas hay mayor rigidez.

Es dado lo anterior que en el registro del 2004 el sensor ubicado entre las cepas 6 y 7 está en una posición que es mucho más flexible, lo cual implica que la energía que se genera en ese sensor impide que se pueda apreciar el movimiento de los otros sensores. De este punto de vista, se recomendaría que en mediciones futuras no se utilicen sensores verticales sobre las cepas (al menos que los elastómeros sean sumamente flexibles en vertical y se quiera estudiar este efecto).

Por otra parte, dada la baja coherencia que se observa entre sensores que se disponen en vanos distintos es que se concluye que los modos verticales de puentes que tienen sus vigas dilatadas en cada vano (i.e., cada vano se materializada con vigas independientes) tienen un comportamiento que se asocia a la respuesta local del vano. Finalmente se concluye que existirían dos modos verticales en cada vano (uno asociado al movimiento vertical puro y otro a warping) que tendrían frecuencias entre 2.7 a 3.9 Hz. Se observa además que existe en este tramo una alta componente en una frecuencia cercana a los 4.5 Hz.

Las frecuencias y formas modales del 2004 coinciden con las formas del año 2018. En general falta información para poder comparar las formas modales dado que la posición de los sensores difiere en ambos registros. Sin embargo, se logran identificar frecuencias relativamente similares.

En relación a lo obtenido por A. Díaz versus el reprocesamiento de datos, se observa que con SSI fue posible identificar un número mayor de frecuencias y formas modales. Las formas modales 1, 2, 3 y 4 encontradas en la memoria de A. Díaz coinciden con las formas modales 2, 3 y 4 identificadas con SSI.

Capítulo 6: Conclusiones

6.1. Generales

Según lo descrito por Doebling, et al (1996) en la literatura hay muchos trabajos que utilizan los cambios en las propiedades dinámicas para detectar daños en puentes u otras estructuras. En este contexto, gran parte de los autores indican que un daño significativo se expresaría en un cambio de la rigidez de la estructura y por tanto en un cambio en las frecuencias naturales (entendiéndose que una reducción de rigidez se traduciría en frecuencias más bajas). Por otra parte, la detección de donde ocurre el daño se puede analizar de mejor manera a partir del análisis de la variación de las formas modales. En general, no se ha encontrado que los cambios de las tasas de amortiguamiento sean útiles para la detección de daños en puentes ya que estos presentan una alta dispersión o variabilidad dependiendo de las solicitaciones a las cuales se vea expuesta la estructura durante las mediciones de microvibraciones.

Es dado lo anterior que, de forma genérica a las tres estructuras, a pesar de que se obtuvieron las tasas de amortiguamientos, se comparan principalmente frecuencias naturales y formas modales.

Cabe mencionar que las frecuencias naturales en estructuras pueden variar debido a cambios en condiciones ambientales como el efecto de la temperatura, humedad, efectos de lluvia, ocupación, tráfico, niveles de socavación, etc. Es así que por ejemplo que en el edificio de la cámara chilena de la construcción se han observado variaciones de hasta un 7% de sus frecuencias en el transcurso de un día (Lazcano, 2008), de igual forma se ha observado que puentes viales de grandes dimensiones pueden tener una variación de hasta un 10% debido a efectos de temperatura (Ko & Ni, 2005).

De los resultados obtenidos en esta investigación se observó para todos los puentes existe un modo longitudinal y varios modos transversales que se relacionan a la vibración del tablero sobre las cepas (involucrando menormente a las cepas). En este contexto, estos modos son altamente influenciados por la rigidez “elástica” del sistema de aislación. Es así que la variación de estos modos se explicaría fundamentalmente por cambios en las propiedades elásticas de los aisladores sísmicos y/o por la ocurrencia de trabazón generada por materiales que se depositarían en los estribos y/o en las cepas. Cabe mencionar que con mediciones de microvibraciones se observa la respuesta de los puentes sujetos principalmente a cargas de tráfico vehicular y viento. En este contexto, el hecho que se cambien las llaves de corte o que se refuerce transversalmente el tablero no produce cambios en las propiedades dinámicas (a pesar que puede existir un cambio significativo durante la respuesta sísmica). De igual forma se señala que las propiedades de los

elastómeros se relacionan a sus rigideces observadas debido a bajas tasas de deformaciones, las cuales podrían diferir considerablemente en el caso sísmico ya que es sabido que los elastómeros poseen un comportamiento histerético en el cual se puede ver una reducción significativa de su rigidez efectiva para sismo de altas demandas. Por tanto, las frecuencias encontradas para los tableros son solo pertinentes para bajas deformaciones; observándose que estas difieren considerablemente con las frecuencias empleadas en el diseño donde se considera una rigidez tangente para los aisladores asociadas a una tasa de deformación más alta (deformación de corte del orden de un 1%). Por ejemplo, la memoria de Díaz (2004) muestra que la rigidez de los aisladores del puente el Marga-Marga (II) puede variar de 21 a 11 kgf/cm^2 de baja a altas deformaciones de corte.

Por otra parte, dadas las grandes dimensiones de las cepas de los tres puentes estudiados se pudo observar la existencia de varios modos (que afectaban la vibración del tablero) que se asociarían a la respuesta local de cada una de las cepas. Cabe mencionar que la respuesta longitudinal de estos modos del tipo “cepa” se expresan también en movimientos verticales del tablero.

Luego de efectuadas las mediciones en los puentes se pudo observar que los modos longitudinales y transversales suelen ser independientes, aunque en algunos casos se observan modos con ambas componentes. En este contexto, se señala que todos los puentes analizados contaban con un tablero continuo de hormigón armado que unía cada vano de los puentes. Dado lo anterior, se puede observar que los modos transversales tienden a ser de un tipo más global (i.e., continuo a lo largo del tablero) por lo que se concluye que para efectuar una medición más precisa de los modos transversales se sugiere disponer de un arreglo de sensores (todos transversales) a lo largo del tablero en sentido transversal.

En relación a la respuesta longitudinal se observó en general la existencia de uno a tres modos (dependiendo de la distribución de rigidez de los elastómeros) que se asociaban a la respuesta relativa del tablero sobre las cepas y la existencia de varios modos locales asociados a la respuesta local de las cepas (y estribos) que controlaban la respuesta de microvibraciones en el sentido longitudinal. Entendiéndose que los modos relacionados a las respuestas de “cepas” se relacionaban principalmente a las características locales de cada cepa que varían dependiendo de su altura y estructuración. En este contexto, se sugiere que la mejor forma de analizar puentes de estas características sería utilizar un arreglo de sensores en el sentido longitudinal sobre el tablero en el cual se dispongan los sensores sobre cada cepa (o en lo posible en las cepas mismas utilizando un camión de inspección).

Es interesante notar que los modos del tipo “cepa” (tanto longitudinales y transversales) no mostraron un cambio significativo en sus frecuencias para los tres puentes (en todos sus tramos) esto indicaría que no han existido cambios o daños locales de las cepas de los

puentes analizados. Sin embargo, para tener un mejor análisis de la variación de los modos tipo “cepas” sería más efectivo realizar las mediciones sobre las cepas mismas.

Por otro lado, en relación a los modos verticales se observó que en los puentes El Salto y CRSH involucraban la respuesta de todo el tablero dado que los puentes estudiados presentaban vigas continuas. En cambio, para el puente Marga-Marga (II) se observó modos locales asociados a cada vano ya que estos mostraban un grado de independencia traducido en una baja coherencia en la respuesta entre vanos adyacentes. Cabe mencionar que los modos verticales se asocian a modos puramente verticales y modos de torsión a lo largo del eje del tablero (warping). Dado que las mediciones sólo se pudieron efectuar en una sola calzada de los puentes (debido a cuestiones logísticas) no fue posible identificar cuales modos corresponderían a modos exclusivamente verticales o del tipo warping.

En general, dado que en la cercanía de las cepas se observa una alta rigidez vertical asociada a las cepas es que los modos poseen un valor prácticamente nulo en las cepas. En este contexto, para poder medir en forma correcta los modos verticales se sugiere medir en las zonas centrales de los vanos y a ambos lados del tablero (de manera de identificar cuales modos corresponderían a warping). En el caso que las vigas sean continuas se sugiere que los arreglos de los sensores se dispongan a lo largo de todo el puente (o tramo), o alternativamente medir un vano como referencia e ir midiendo secuencialmente el resto de los vanos con un arreglo más denso de sensores verticales; en cambio, si las vigas son discontinuas en cada tramo se sugiere desplegar un arreglo de sensores verticales (a cada lado del tablero) en cada vano; Es decir, se sugiere una medición independiente de cada vano empleando la mayor cantidad de sensores para analizar el vano en estudio.

Es interesante destaca que no se observó una variación significativa de los modos verticales en los puentes en estudio implicando que no existen daños significativos en el sistema resistente vertical (i.e., vigas).

Cabe mencionar que realizar la medición en ambos lados del tablero se hace un proceso complejo desde un punto de vista logístico ya que se requeriría una de las siguientes alternativas: a) atravesar los cables de los sensores por debajo del tablero (lo cual es complejo para puentes altos), b) utilizar sensores inalámbricos que se puedan sincronizar (los cuales son en general limitados en número o de un alto costo), c) evitar el tráfico de vehículos mientras se realizan las mediciones (de manera de poder atravesar los cables libremente), d) emplear dos sistemas de mediciones en ambas calzadas que puedan ser sincronizados.

De los resultados obtenidos se deduce que en general la comparación de formas modales permite identificar cambios en la estructura a grandes rasgos, pero tanto la ubicación como la proporción del daño sólo se pueden predecir una vez se realice un modelo calibrado de

la estructura que se adecue a la física de la estructura y que se calibre a los resultados experimentales, lo anterior se hace más complejo aun cuando se trabaja en estructuras con aislación sísmica, dado que los modos longitudinales y transversales de la superestructura dependen fuertemente del sistema de aislación.

El paso de vehículos en general excita en forma significativa los modos asociados a respuesta locales de “cepas” (longitudinales), a pesar de que muchas de las mediciones se hicieron en horas de alto tráfico vehicular y no se excluyeron zonas en cuales los registros tenían un marcado efecto debido al paso de los vehículos, fue posible identificar las propiedades dinámicas de las estructuras, implicando que la metodología de monitoreo estructural pueda realizarse de manera simple sin afectar la operabilidad de la estructura.

6.1.1. Generales Viaducto El Salto

La elección de este viaducto para la comparación de sus propiedades dinámicas se debe a que es uno de los pocos en Chile que cuenta con instrumentación permanente. Lo anterior significó que se contaban con datos de microvibraciones de años previos (registros 1999 y 2002) y que se pudo hacer un registro el 2018 utilizando la misma ubicación de sensores. Además, fue posible ir a terreno a medir con el sistema de instrumentación externa con el cual se tomaron datos en las otras estructuras en estudio corroborando de esta forma su funcionamiento.

Este viaducto fue afectado por una relativamente alta demanda sísmica durante el terremoto del 27F, pero debido a que el puente cuenta con un sistema de aislación sísmica es que se redujeron estas demandas del tablero y se independizó la respuesta estructural de cada cepa. Es por esto que la estructura no sufrió daños significativos lo cual se tradujo claramente en la invariabilidad de sus propiedades dinámicas con el tiempo.

La única y principal variación de esta estructura es la trabazón en el sentido longitudinal en el estribo norte, las demás variaciones son propias de los materiales y cambios de temperaturas esperados. En este contexto, se recomienda revisar si existen materiales que se hayan dispuesto involuntariamente entre el travesaño del puente y el estribo que pudiesen estar trabando la respuesta longitudinal del puente en el estribo norte. En tal caso, se recomienda realizar una limpieza.

En general para el caso sísmico la respuesta que tiene más relevancia en el tablero corresponde a la respuesta longitudinal y transversal, por lo cual se recomienda, para la instrumentación permanente del viaducto, volver a disponer el sensor número 15 en su posición original, dado que esta disposición podría entregar información de mayor relevancia en términos de su respuesta sísmica, teniendo en cuenta que al disponerlo en

dirección vertical sobre una cepa no tiene una gran relevancia debido a que los modos verticales del tablero no son significativos sobre las cepas.

Las mediciones realizadas en este viaducto sirvieron como un ensayo, permitiendo la familiarización con los equipos, el ajuste de estos y la generación de un aprendizaje para las siguientes estructuras.

A modo general se destaca la importancia de hacer un registro de calibración para poder confirmar el buen funcionamiento de los equipos antes de medir, esto fue aplicado en las mediciones de las otras dos estructuras.

Se destaca también la importancia de haber realizado registros sobre los cabezales de las cepas, lo cual permitió identificar las frecuencias naturales de las cepas medidas, ayudando a entender de mejor manera los registros sobre los tableros llevados a cabo para los otros puentes, de forma que se pudo identificar cuáles eran los modos asociados al global de la estructura, el tablero y las cepas por separado.

6.1.2. Generales Puente Cardenal Raúl Silva Henríquez

La elección de esta estructura se debió a que era uno de los puentes que fue parte de la campaña de mediciones del 2004, presentó daño considerable durante el 2010 y fue posteriormente reparado. Es por esto que en este caso se esperaba observar una mayor variación en sus propiedades dinámicas.

A pesar de que se esperaba poder observar variaciones importantes en las propiedades dinámicas de este puente, no se evidenciaron cambios muy significativos de sus propiedades dinámicas (al menos para microvibraciones). Esto se explicaría dado que los mayores daños y reparaciones se relacionaban al reforzamiento de los topes sísmicos, a la recentralización del tablero, a la inclusión de llaves de cortes interiores, y al reforzamiento transversal con un diafragma o arrostramiento entre vigas en cada apoyo. Estos cambios no tienen relación a la respuesta de microvibraciones, sino que tendrían una influencia una vez que las vigas impacten potencialmente los topes sísmicos durante un evento sísmico importante.

Cabe mencionar que los modos longitudinales y transversales son descritos principalmente por la rigidez de los elastómeros en el cual se apoyan y secundariamente de la rigidez del tablero, los cuales no sufrieron cambios significativos con el tiempo. De igual forma las frecuencias relacionadas a los modos del tipo “cepa” no muestran una variación significativa permitiendo concluir que las cepas no han sido mayormente afectadas por el tiempo o por el 27 F (al menos que las reparaciones hayan restituido en forma efectiva sus condiciones originales).

A pesar que en general no se observaron grandes cambios en el puente en el tramo norte y en el sur transversal, se pudo ver un cambio en las frecuencias fundamentales longitudinales del tramo sur del puente CRSH. De hecho, es posible concluir que existe una rigidización del comportamiento longitudinal del tablero para microvibraciones.

Además, se observa que en la medición Car03 del 2018, el CH3 prácticamente no presenta movimiento (para estos modos y un bajo movimiento para modos de frecuencias superiores). Esto indicaría que cercano a la Cepa 17 (en la mitad del tramo sur) existiría algún objeto que traba el movimiento longitudinal (al menos para microvibraciones). Se desconoce si esto corresponde al efecto de reforzamiento que tuvo la estructura o algún otro efecto desconocido. Es interesante observar que en la medición Car 04 del 2018 (relacionada al movimiento transversal) se mantuvo la posición del CH3 observándose un mismo nivel de energía (lo cual comprueba el hecho de que el movimiento es bajo).

Por otro lado en el tramo Norte en el sentido longitudinal y transversal presento energía significativa en baja frecuencia pero tan sólo en uno de los canales (en mediciones Car01, Car02 y Car06). Esto estaría indicando la existencia de algún objeto conectado a la estructura que pudiese estar generando vibraciones en la estructura cercana a las cepas 8 y 9.

Tal como se indica en el trabajo de título de C. Benavides (2004), para los registros transversales, en general se observan frecuencias mayores en el tramo norte que en el tramo sur, indicando un comportamiento más rígido en el tramo norte que tiene cepas de hormigón versus el tramo sur que tiene cepas de acero.

6.1.3. Generales Viaducto Marga-Marga

Esta estructura fue elegida para el presente estudio dado que fue parte de la campaña de mediciones del año 2004 y estaba ubicada cercana a Santiago lo cual facilitaba su nueva medición.

En particular este viaducto fue afectado por el terremoto del 27F con un movimiento relativamente alto, pero dado que este se encuentra con aislación sísmica no se observó daño significativo. Es por esto que lo esperado en este caso era encontrar variaciones mínimas en las propiedades dinámicas de la estructura.

En relación al tramo norte, se pudo observar poca variación de las propiedades dinámicas longitudinales y verticales entre el año 2018 y 2004. En este contexto, la estructura no ha padecido de cambios significativos que puedan atribuirse a daño.

En relación al tramo sur (tramo curvo) es difícil realizar las comparaciones entre las formas modales dada la incerteza de la ubicación de los sensores el año 2004. Adicionalmente al ser un puente curvo, se observó las mismas frecuencias para el sentido longitudinal y

transversal indicando una respuesta con participación en ambas direcciones. Cabe mencionar que se observan frecuencias similares tanto para el año 2004 y 2018 tanto longitudinales como transversales. En este contexto, un estudio más preciso de las formas modales de este puente curvo requeriría de la utilización de múltiples sensores que midan en ambas direcciones al mismo tiempo de manera de entender con mayor claridad la formas modales del puente. Este resultado es consecuente con las conclusiones realizadas por A. Díaz (2004) donde se prevé que las formas modales obtenidas con análisis de frecuencias resultan difíciles de determinar dada la geometría del viaducto.

Capítulo 7: Bibliografía

- Andersen, P., & Brincker, R. (1999). Comparison of System Identification Methods Using Ambient Bridge Test Data.
- Benavides, C. (2004). *Análisis de microvibraciones del puente Cardenal Raúl Silva Henríquez*. Universidad de Chile.
- Berrios, R. (2003). *Amplificación Local en el viaducto Marga-Marga*. Universidad de Chile.
- Castillo, A. E., & Boroschek, R. L. (2002). Código N ° a14-11 Uso Del Método De Frecuencia No Parametrica Y Ssi Para La Identificación De Propiedades, (November).
- Daza, V. (2003). *Interacción Sísmica Suelo-Estructura en el Puente Marga Marga*. Universidad de Chile.
- de Sominihac, H., & Dagá, J. (2017). Análisis de Resiliencia Estratégica de Puentes de la Ruta 5 entre Caldera y Pargua.
- Díaz, A. (2004). *Análisis de microvibraciones del viaducto Marga-Marga II*. Universidad de Chile.
- Doebbling, S., Farrar, C., Prime, M., & Shevitz, D. (1996). *Damage Identification and Health Monitoring of Structurals and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*.
- Google Maps. (n.d.). Retrieved February 14, 2019, from <http://maps.google.com/>
- Hernández, F. (2009). *Análisis de métodos de identificación de variación de propiedades dinámicas*. Tesis.Uchile.Cl. Universidad de Chile. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- KINEMATRICS. (2019). Structural Health Monitoring. Retrieved February 21, 2019, from <https://kinemetrics.com/application/structural-health-monitoring/>
- Ko, J. M., & Ni, Y. Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, 27(12 SPEC. ISS.), 1715–1725. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.02.021>
- Lazcano, P. (2008). *Variación de los parámetros modales del edificio de la cámara chilena de la construcción a partir de registros ambientales y sísmicos*.
- Moroni, O., Sarrazin, M., Benavides, C., & Díaz, A. (2004). Características dinámicas de puentes Chilenos con protección sísmica. *Revista Sul-Americana de Engenharia*

Estructural, 1(2), 31–54.

- Peeters, B. (2000). *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Red Nacional de Acelerografos. (2018). VIADUCTO MARGA-MARGA (El Salto). Retrieved February 13, 2019, from <http://www.terremotosuchile.cl/anexos/marga2.html>
- Romo, D. (1999). *Análisis de registros sísmicos y microambientales en el puente Marga Marga*. Universidad de Chile.
- Sarrazin, M., Moroni, O., Neira, C., & Venegas, B. (2013). Performance of bridges with seismic isolation bearings during the Maule earthquake, Chile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47, 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.06.019>
- Sarrazin, M., Moroni, O., & Roesset, J. M. (2005). Evaluation of dynamic response characteristics of seismically isolated bridges in Chile. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(4–5), 425–448. <https://doi.org/10.1002/eqe.443>
- Trigo, T. (2007). *Influencia de la Amplificación Local de las Ondas Sísmicas y la Interacción Suelo-Fundación en el Puente Marga Marga*. 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.
- Yen, W.-H., Chen, G., Buckle, I., Allen, T., Alzamora, D., Ger, J., & Arias, J. G. (2011). Post-earthquake reconnaissance report on transportation infrastructure: Impact of the february 27, 2010, offshore Maule earthquake in Chile, (FHWA-HRT-11-030), 1–214.

Capítulo 8: Anexos

8.1. Viaducto Marga-Marga

8.1.1. Instrumentación externa registros año 2004.

8.1.1.1. Formas modales longitudinales tramo norte 2004 (Resultados trabajo de título de Alan Díaz)

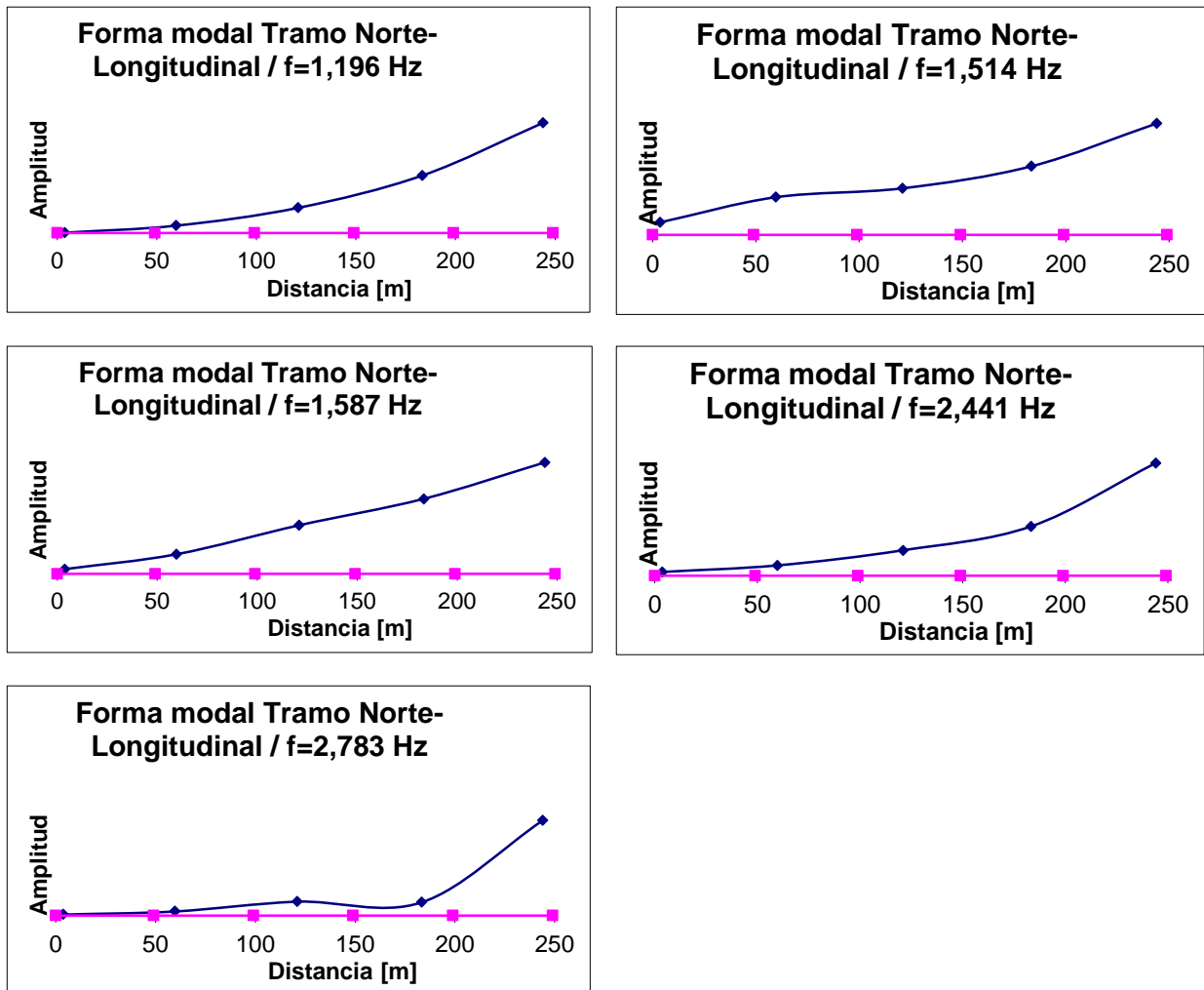


Ilustración 8-1: Formas Modales longitudinales tramo norte Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004).

8.1.1.1. Formas modales transversales tramo norte 2004 (Resultados trabajo de título de Alan Díaz)

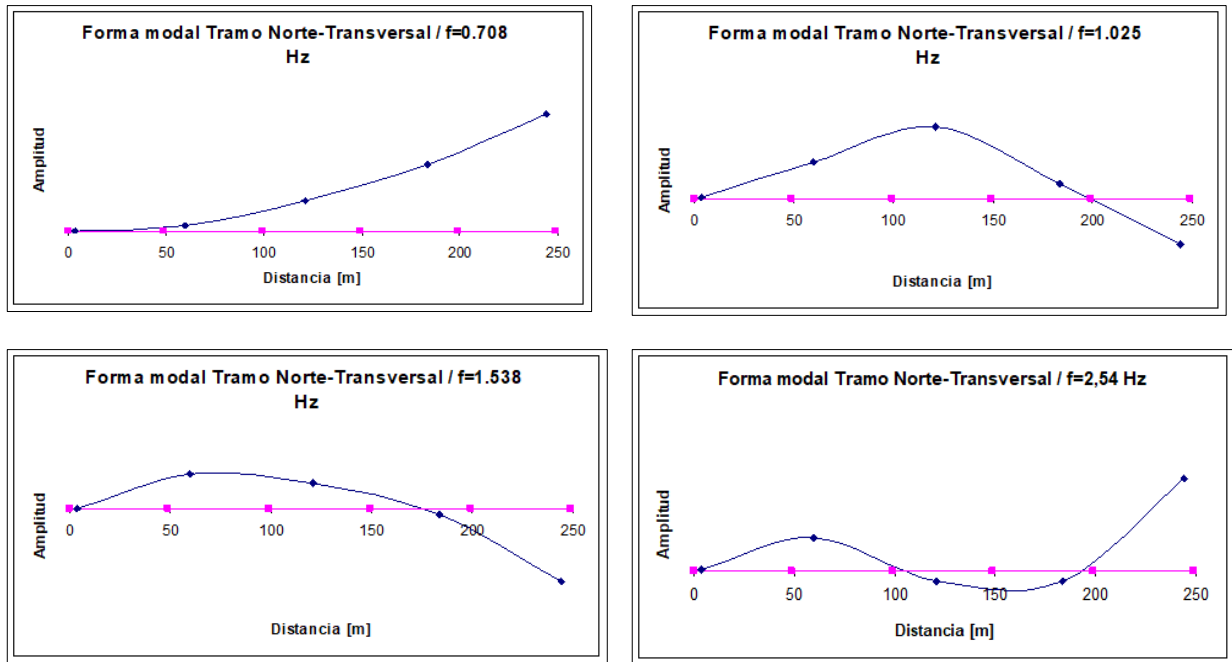


Ilustración 8-2: Formas modales transversales tramo norte 2004 (Díaz, 2004).

8.1.1.1. Formas modales verticales tramo norte 2004 (Resultados trabajo de título de Alan Díaz)

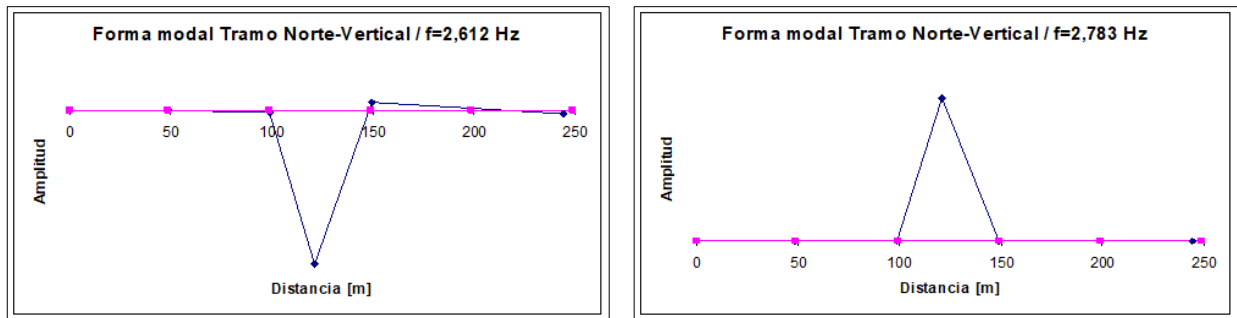


Ilustración 8-3: Formas modales verticales tramo norte Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004).

8.1.1.1. Formas modales longitudinales tramo sur 2004 (Resultados trabajo de título de Alan Díaz)

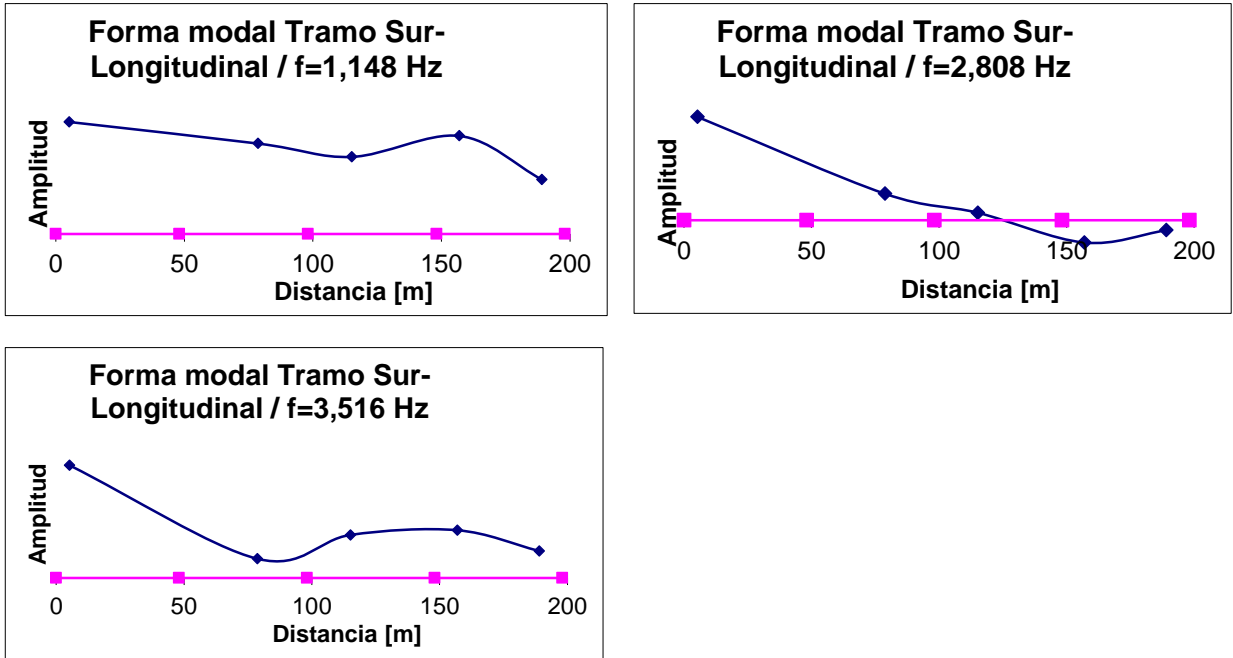


Ilustración 8-4: Formas modales longitudinales tramo sur Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004).

8.1.1.1. Formas modales transversales tramo sur 2004 (Resultados trabajo de título de Alan Díaz)

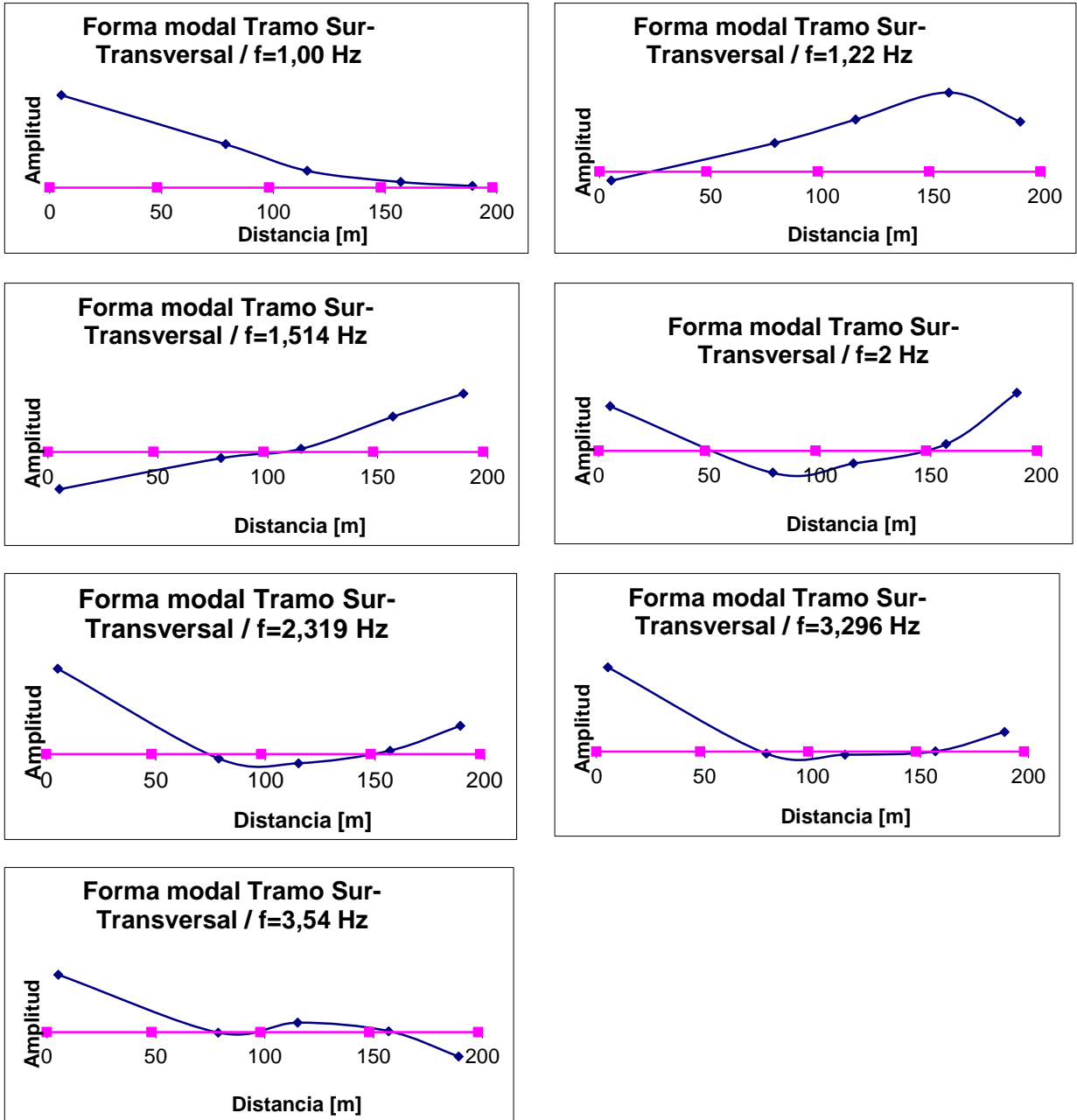


Ilustración 8-5: Formas modales transversales tramo sur Marga- Marga 2004 (Díaz, 2004).

8.1.1.2. Formas modales verticales tramo sur 2004 (Resultados trabajo de título de Alan Díaz)

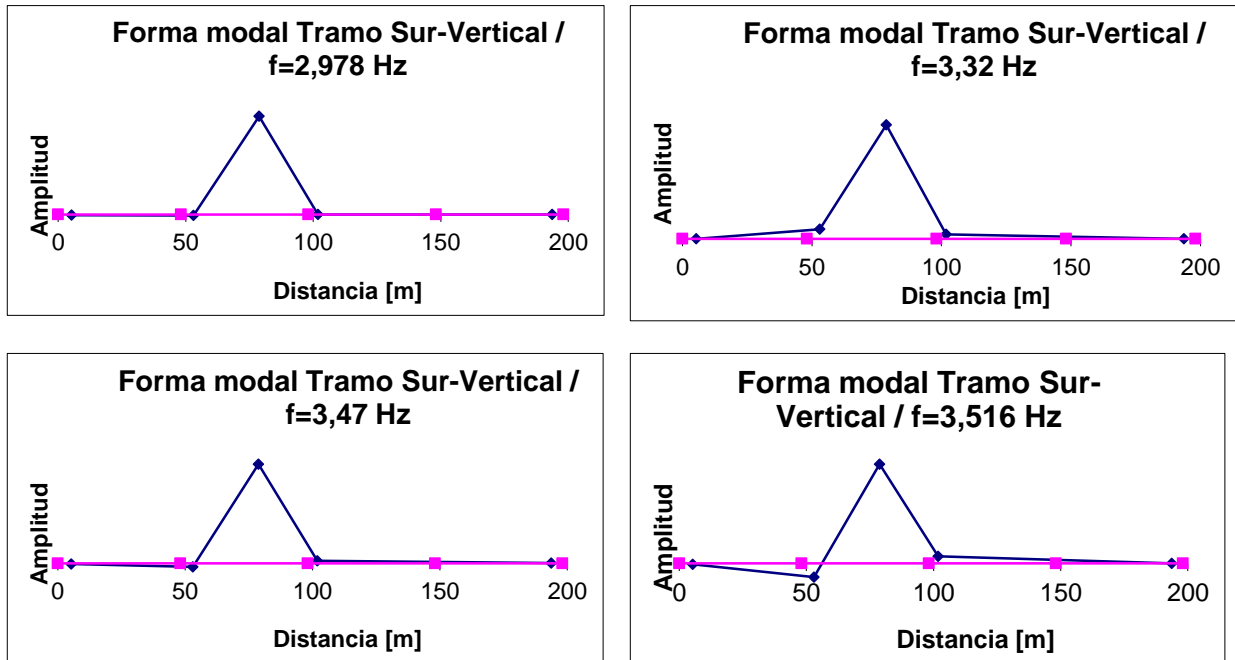


Ilustración 8-6: Formas modales verticales tramo sur Marga-Marga 2004 (Díaz, 2004).

8.1.2. Instrumentación externa registros año 2018.

8.1.2.1. Calibración instrumentos registro horizontal 2018

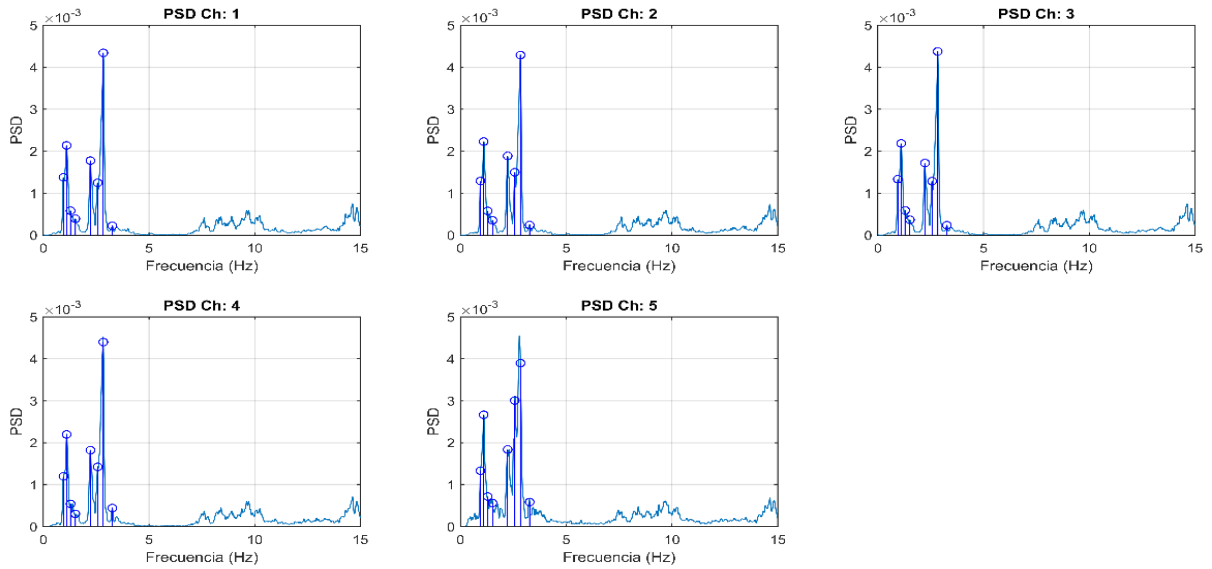


Ilustración 8-7: PSD calibración horizontal viaducto Marga-Marga 2018.

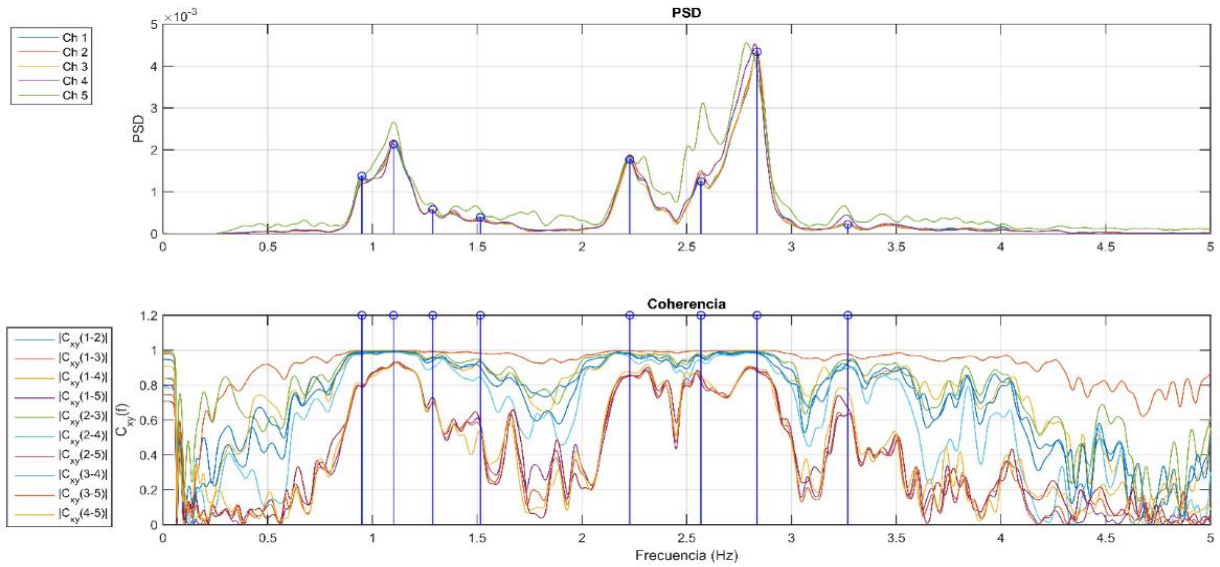


Ilustración 8-8: PSD y coherencia calibración horizontal viaducto Marga-Marga 2018.

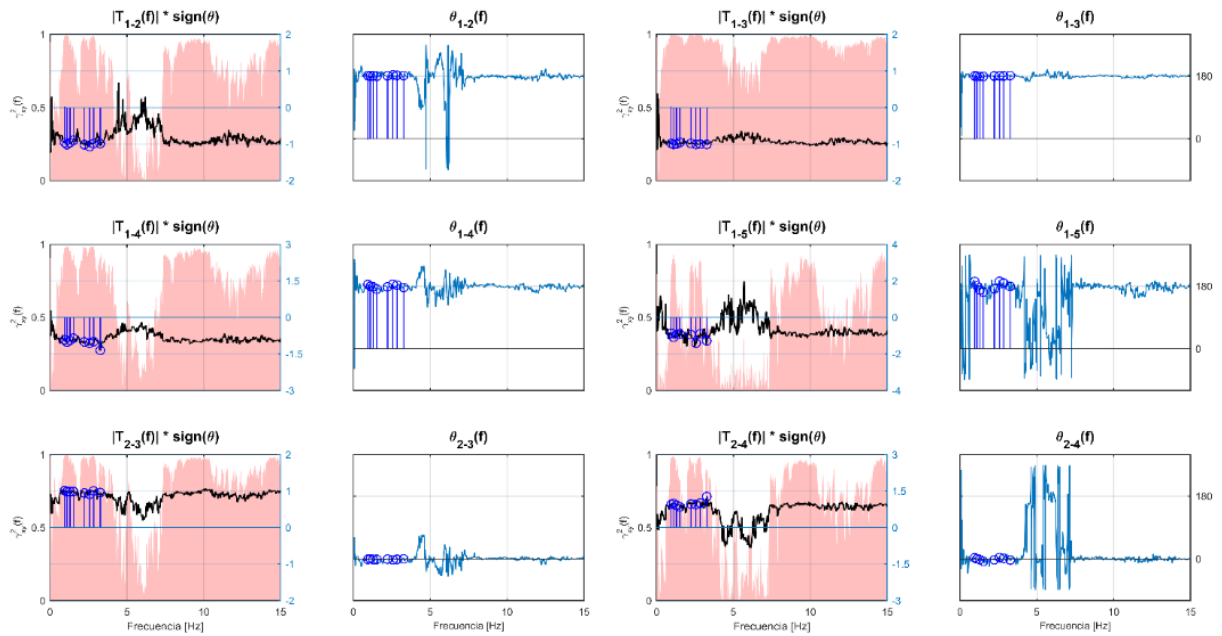


Ilustración 8-9: Función de transferencia y fase calibración horizontal viaducto Marga-Marga 2018.

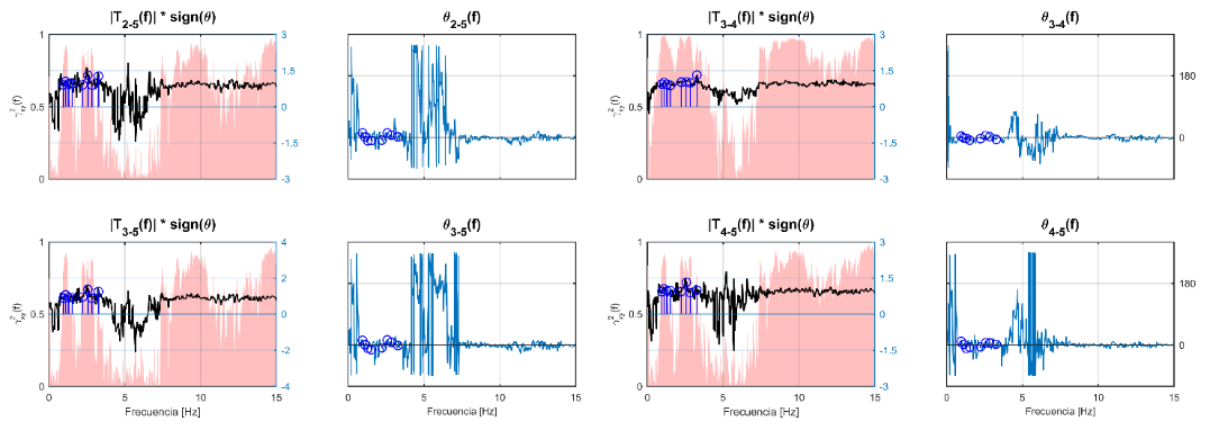


Ilustración 8-10: Función de transferencia y fase calibración horizontal viaducto Marga-Marga 2018.

Calibración instrumentos registro vertical 2018

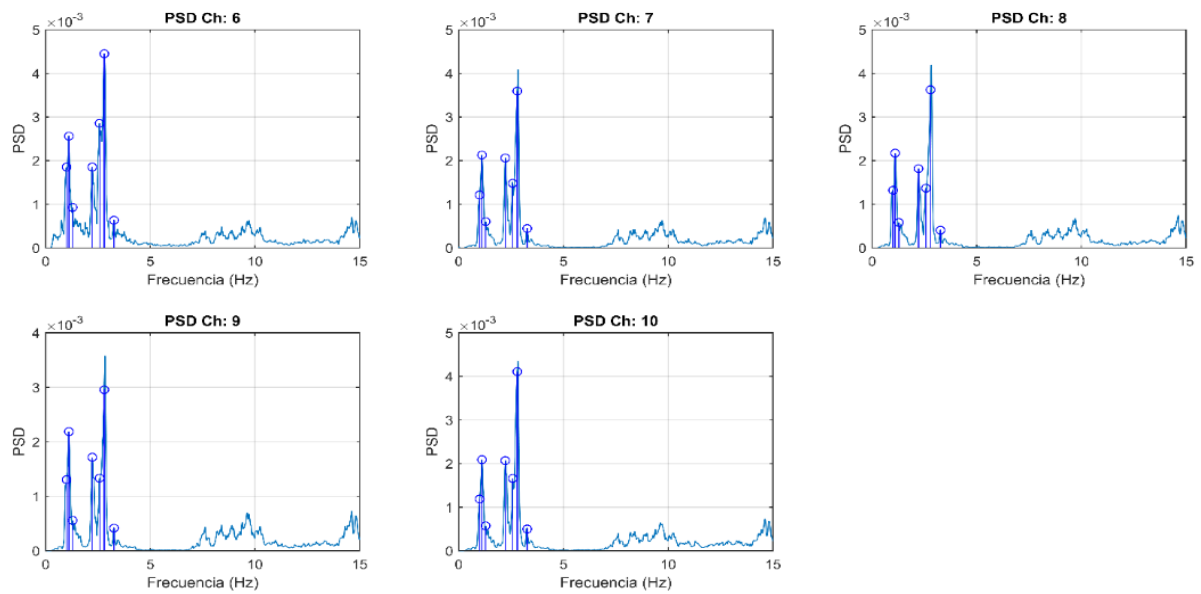


Ilustración 8-11: PSD calibración vertical viaducto Marga-Marga 2018.

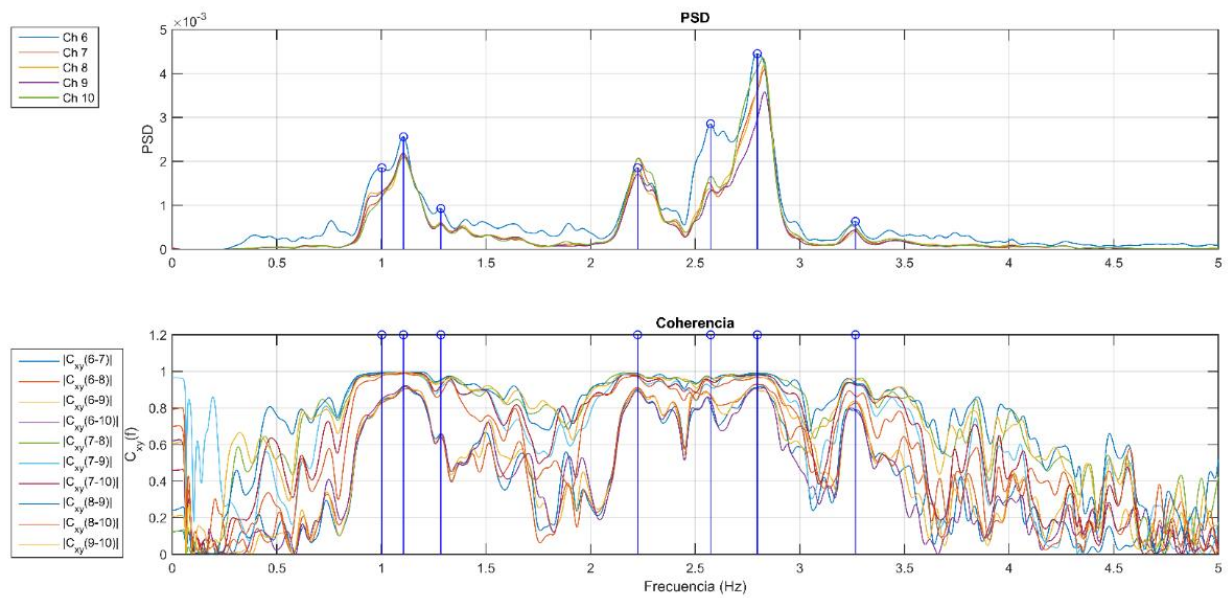


Ilustración 8-12: PSD y coherencia calibración vertical viaducto Marga-Marga 2018.

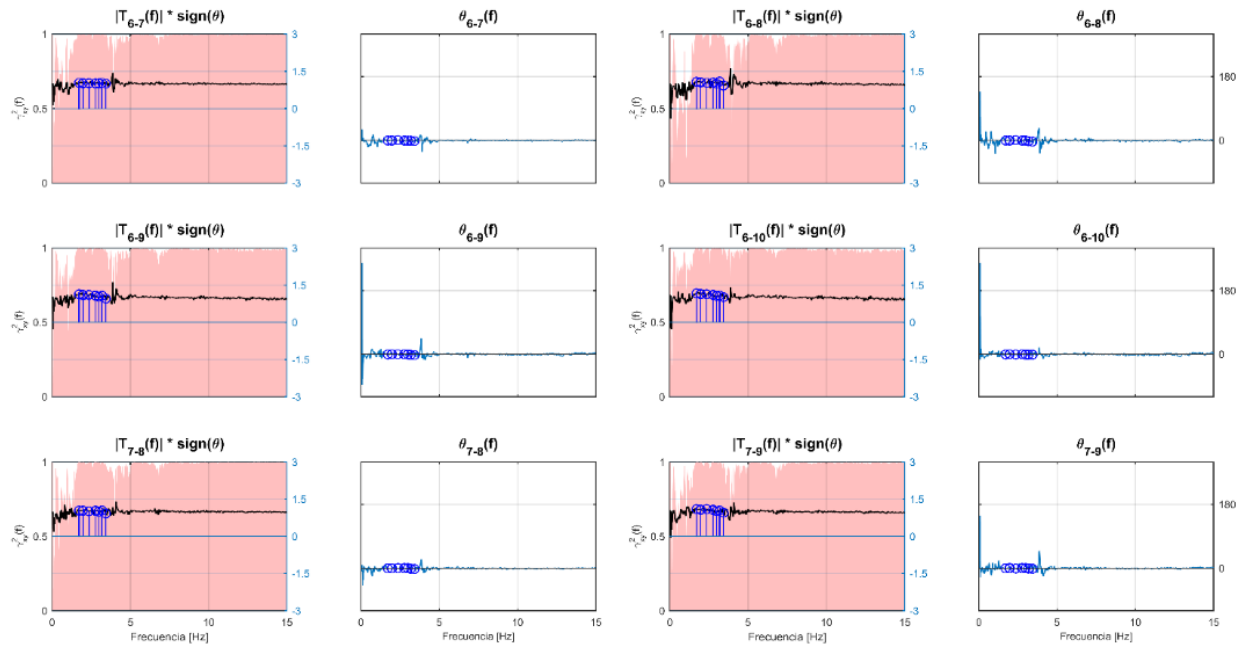


Ilustración 8-13: Función de transferencia y fase calibración vertical viaducto Marga-Marga 2018.

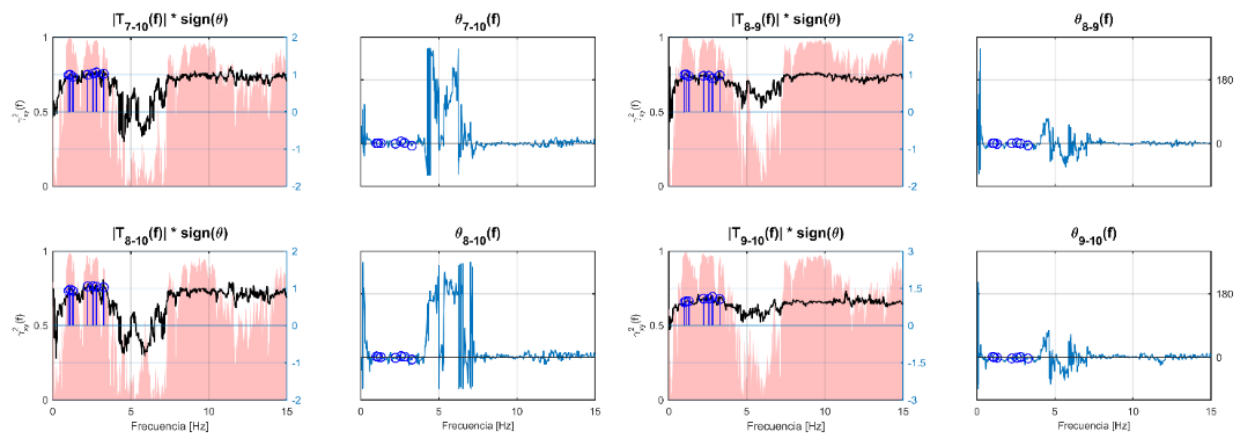


Ilustración 8-14: Función de transferencia y fase calibración vertical viaducto Marga-Marga 2018.

8.2. Puente Cardenal Raúl Silva Henríquez

8.2.1. Instrumentación externa registros año 2004.

8.2.1.1. Formas modales longitudinales tramo norte 2004 (Resultados trabajo de título de Carlos Benavides)

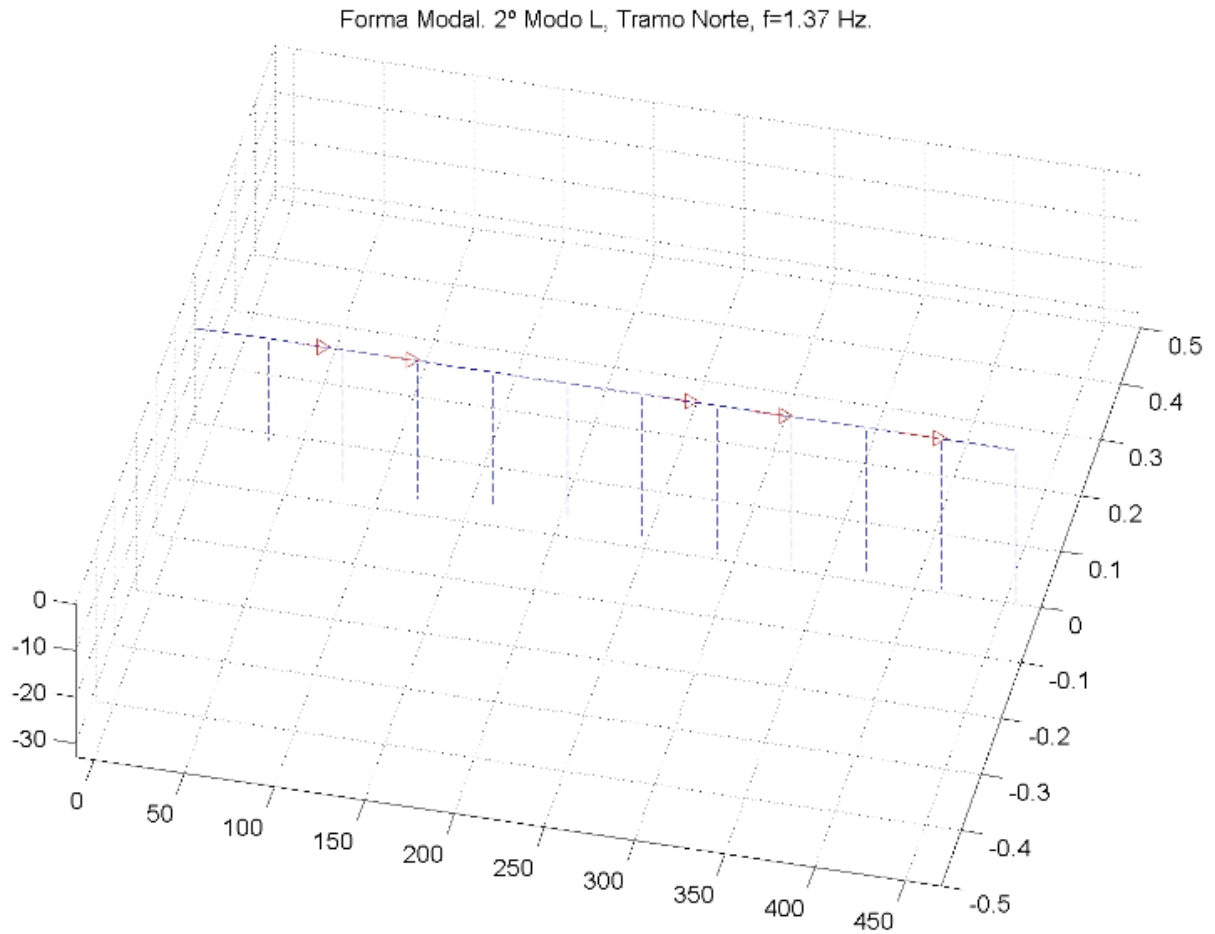


Ilustración 8-15: FM1 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

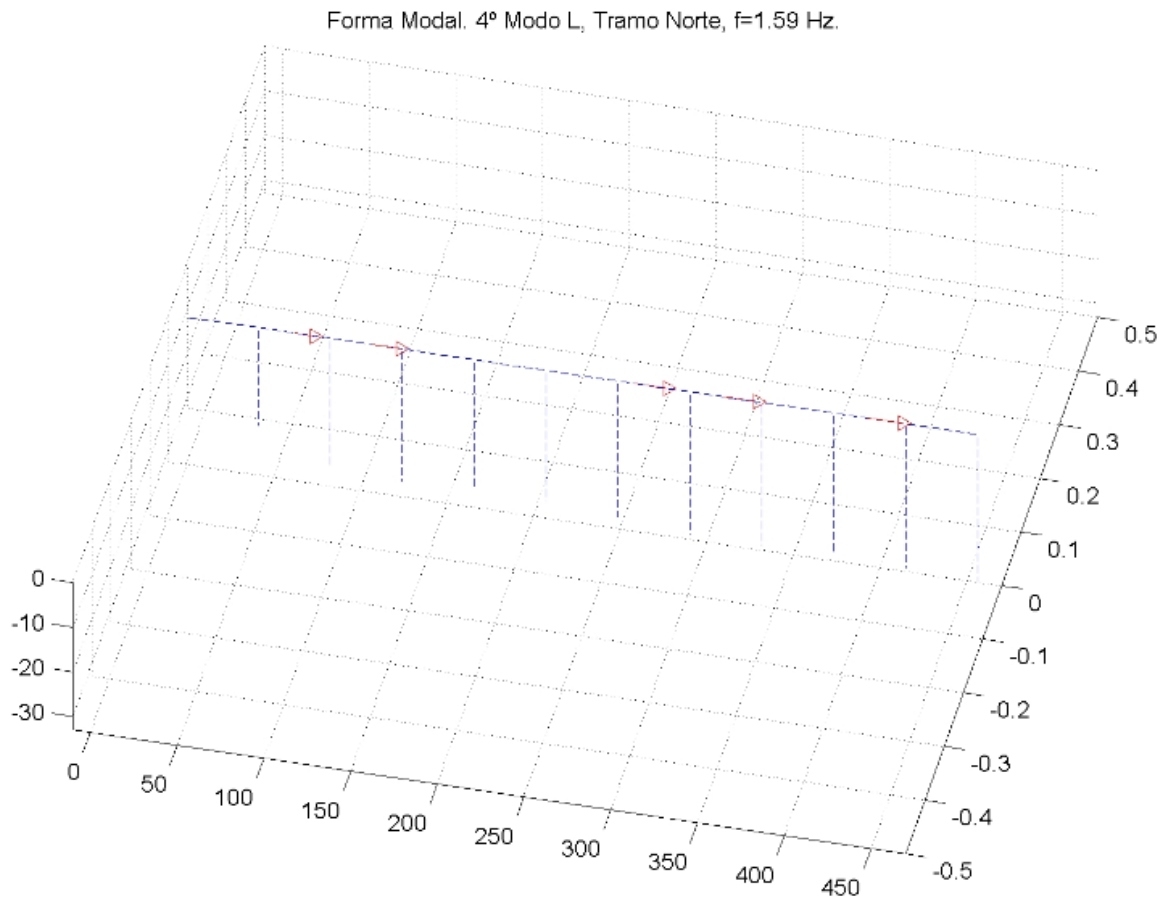


Ilustración 8-16: FM2 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

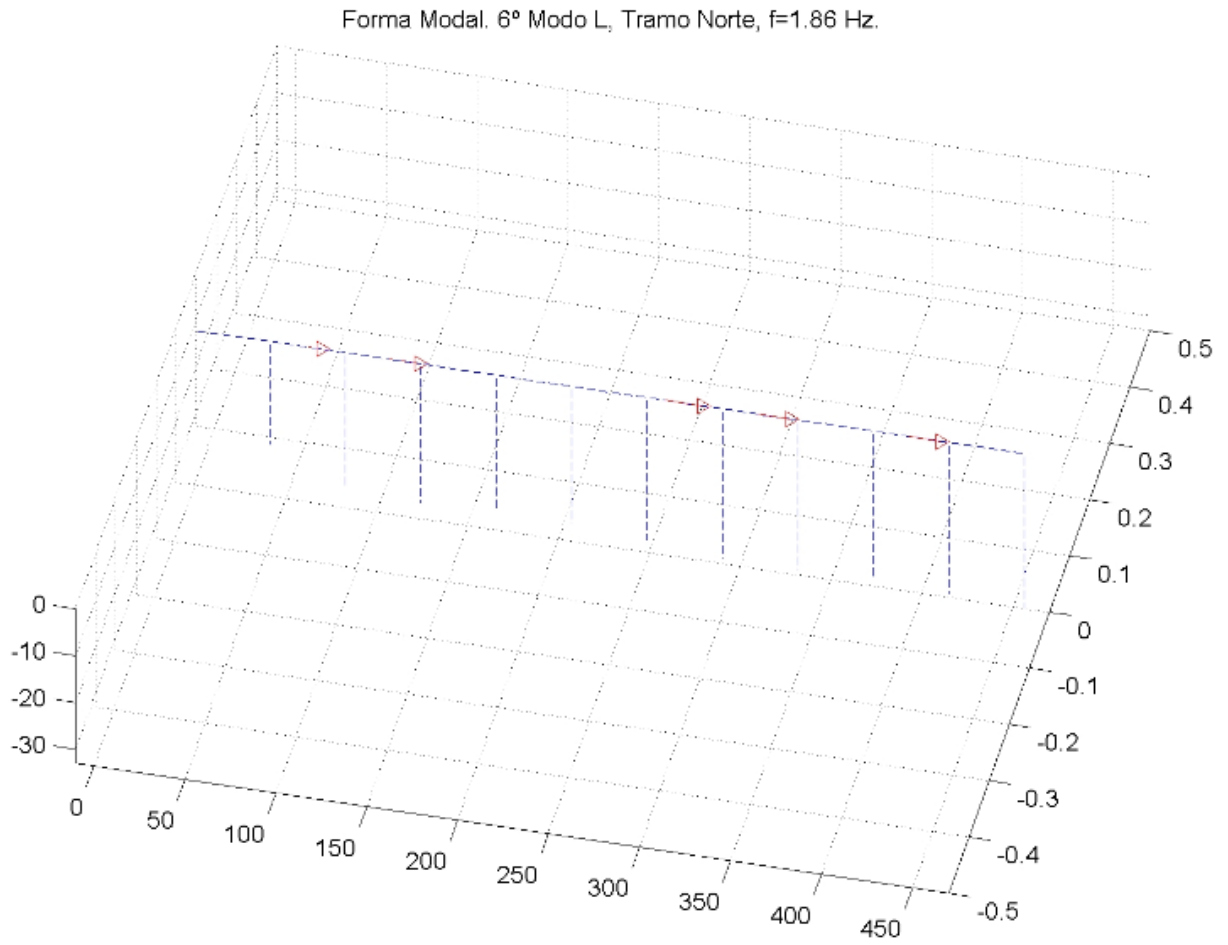


Ilustración 8-17: FM3 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

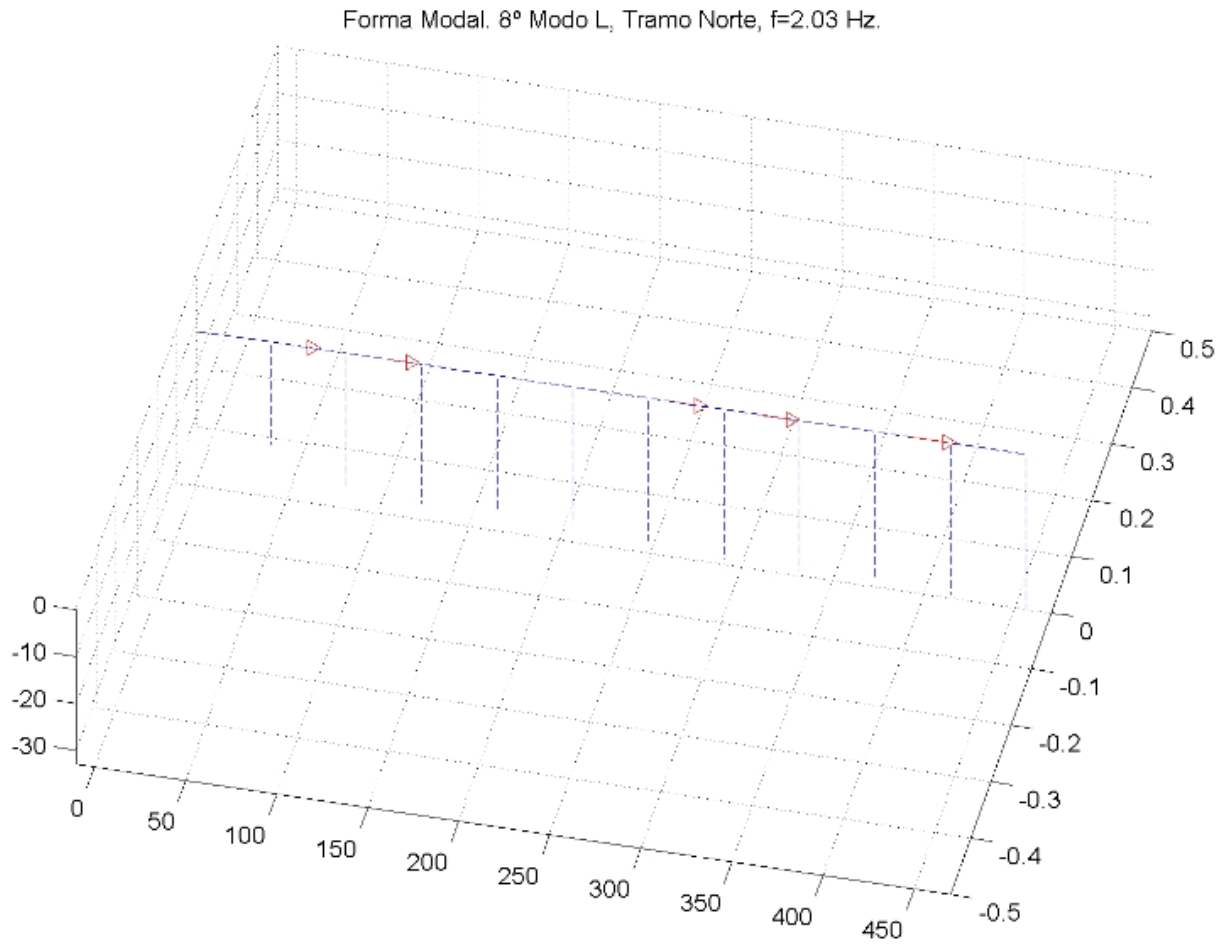


Ilustración 8-18: FM4 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

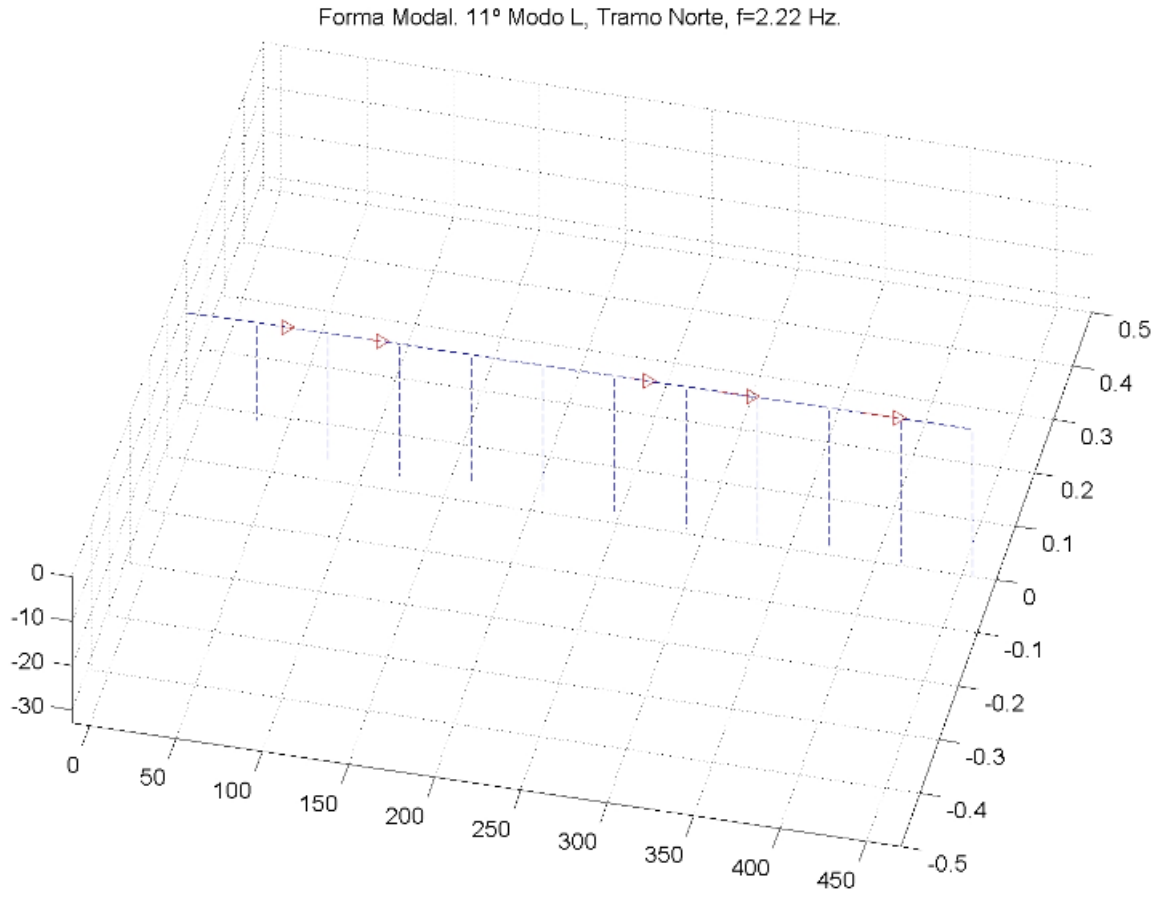


Ilustración 8-19: FM5 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

Forma Modal. 14º Modo L, Tramo Norte, $f=2.44$ Hz.

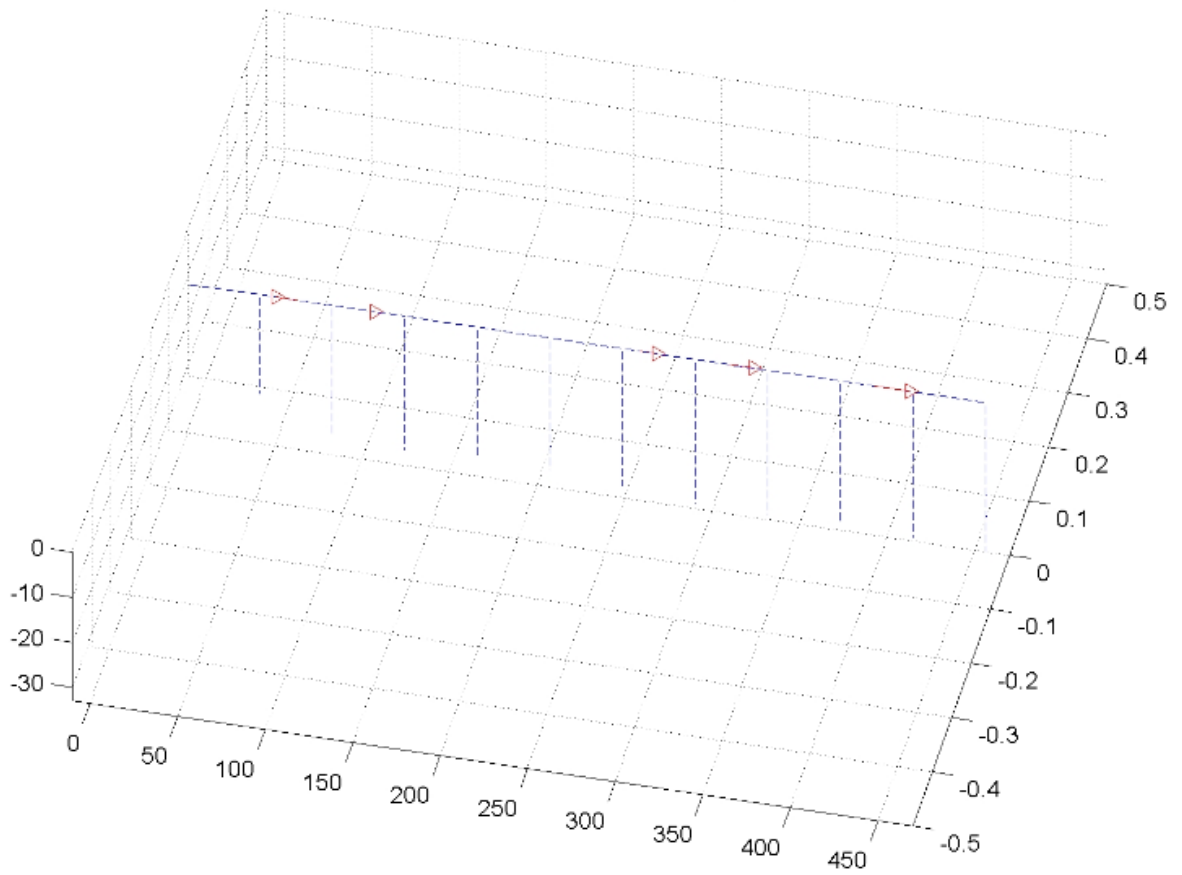


Ilustración 8-20: FM6 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

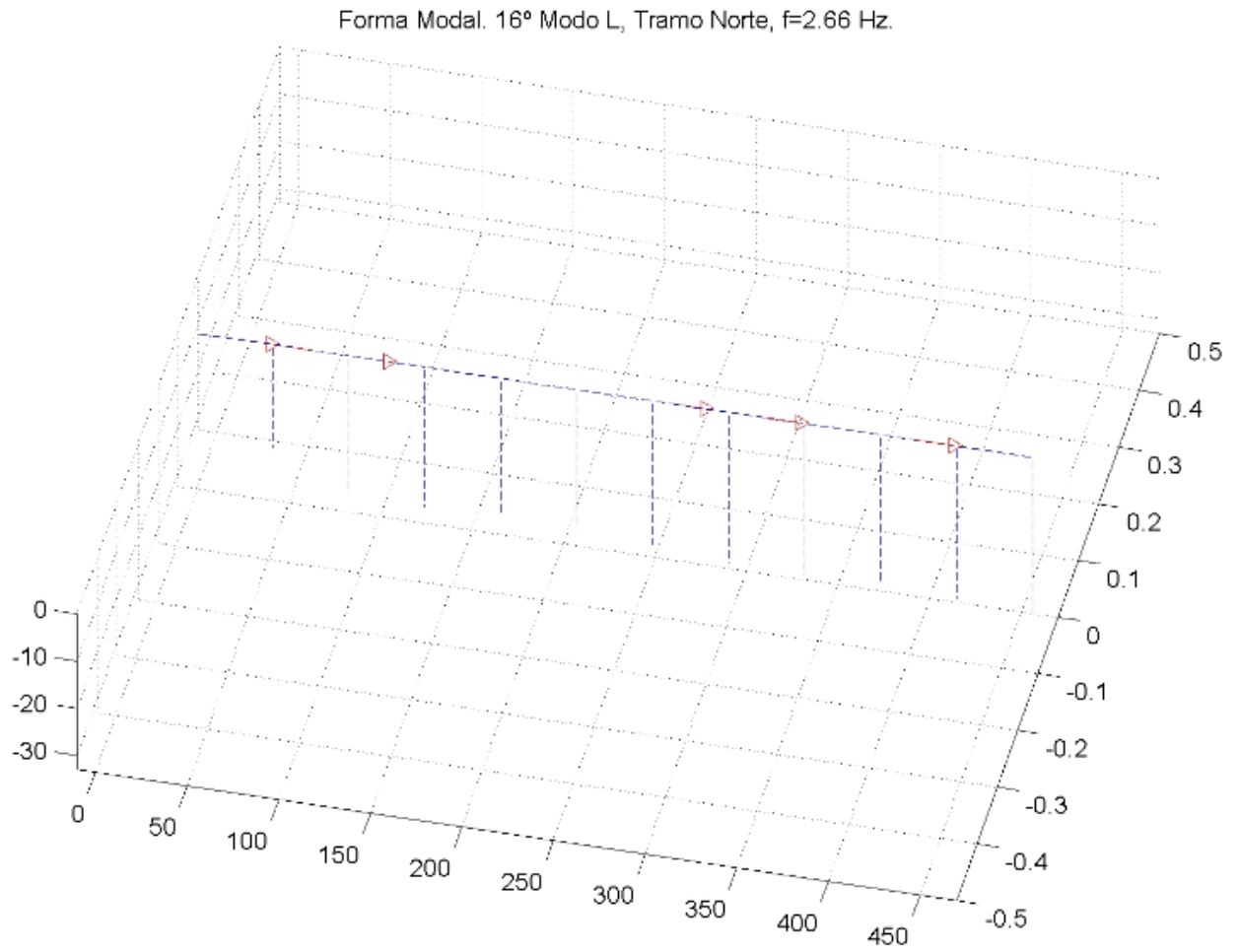


Ilustración 8-21: FM7 longitudinal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

8.2.1.1. Formas modales transversales tramo norte 2004 (Resultados trabajo de título de Carlos Benavides)

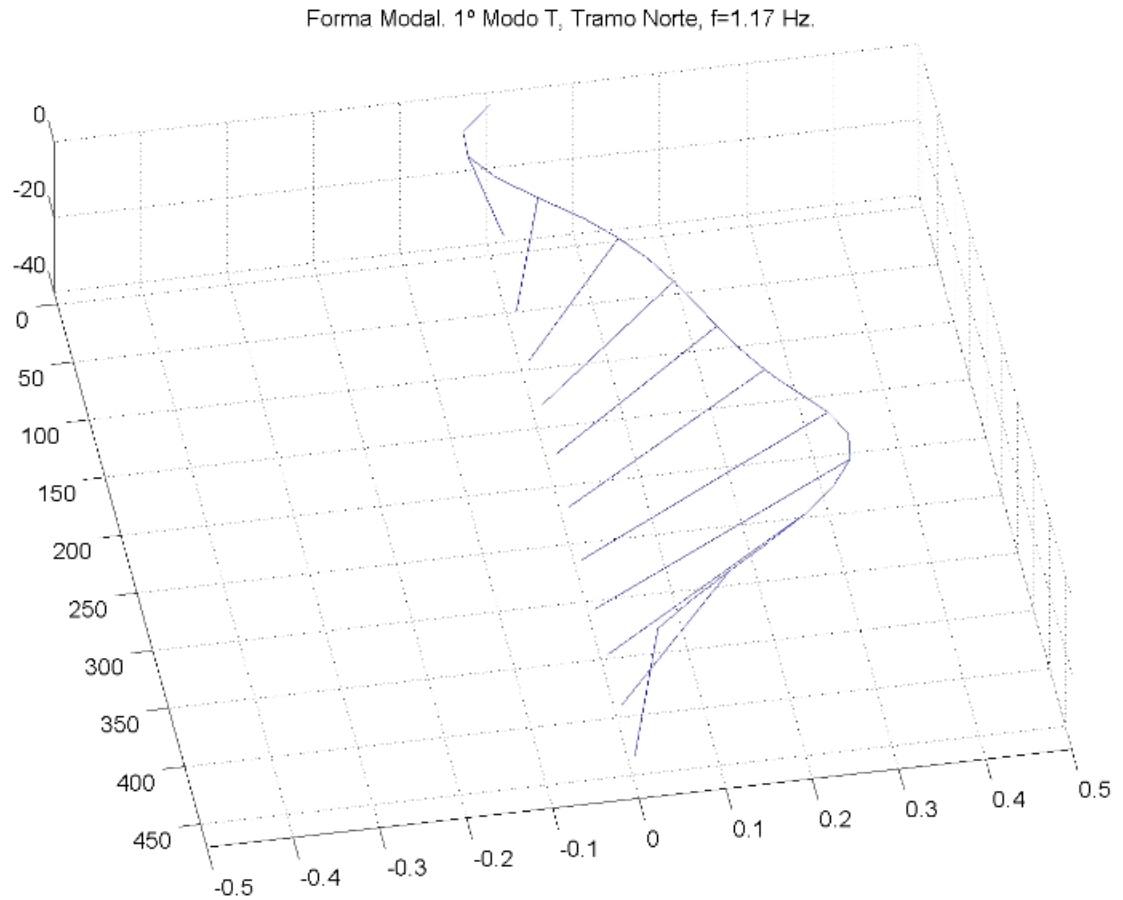


Ilustración 8-22: FM1 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

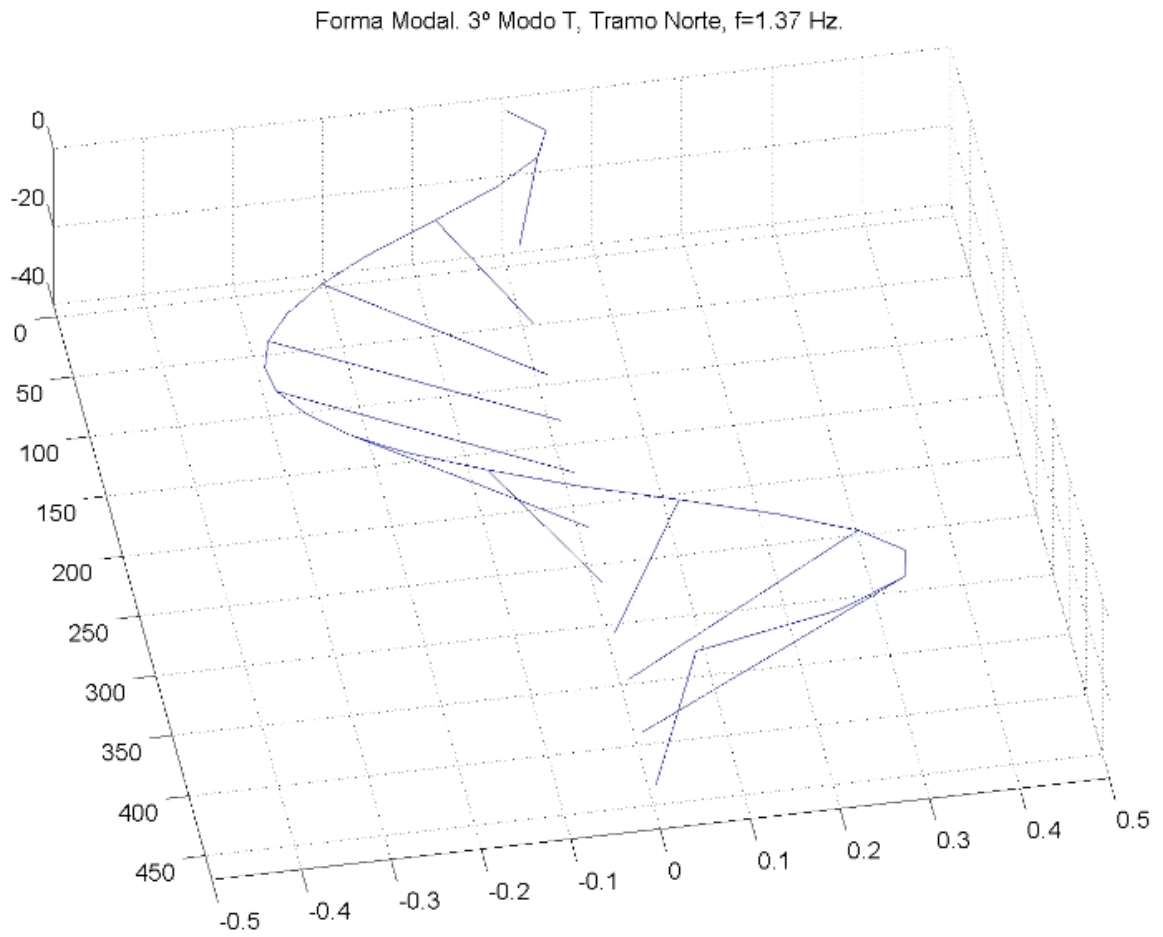


Ilustración 8-23: FM2 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

Forma Modal. 7º Modo T, Tramo Norte, $f=1.93$ Hz.

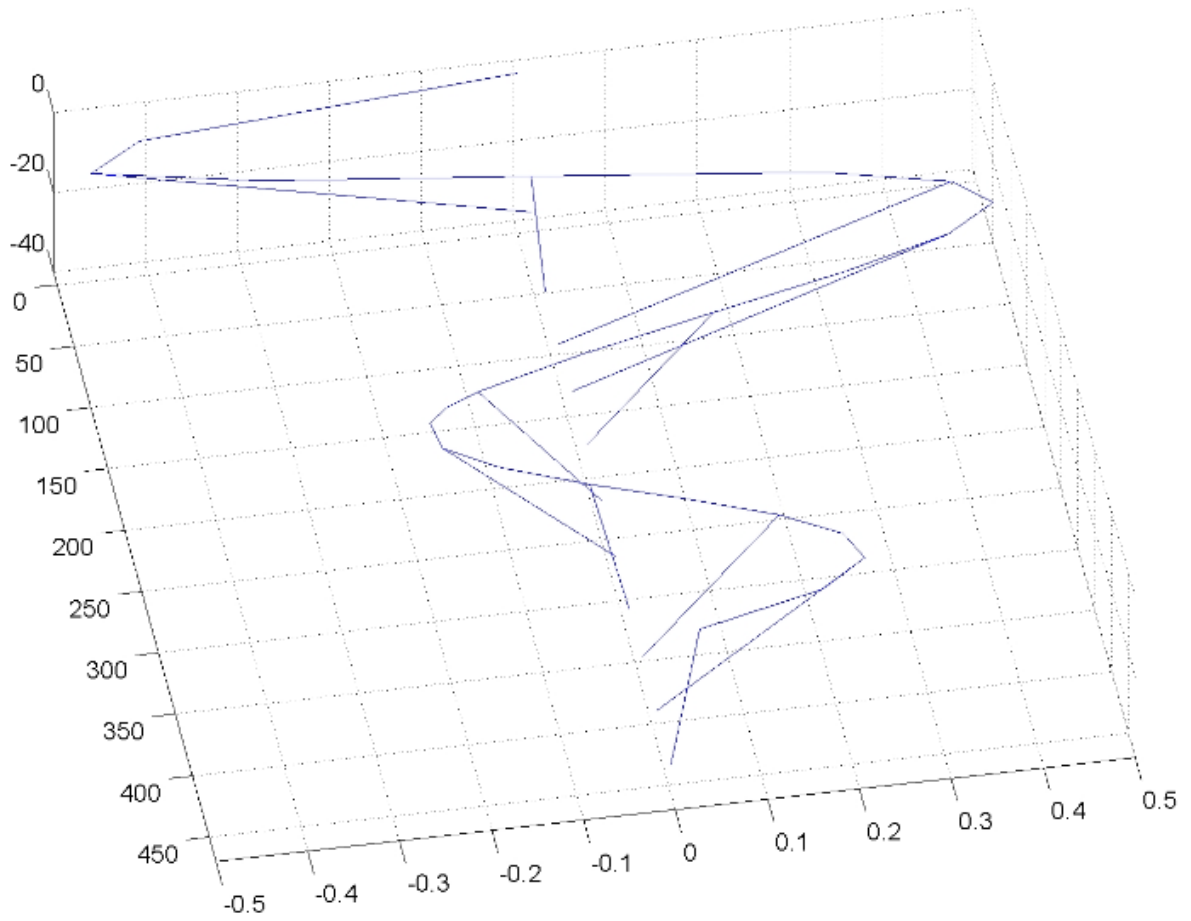


Ilustración 8-24: FM3 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

Forma Modal. 10º Modo T, Tramo Norte, $f=2.17$ Hz.

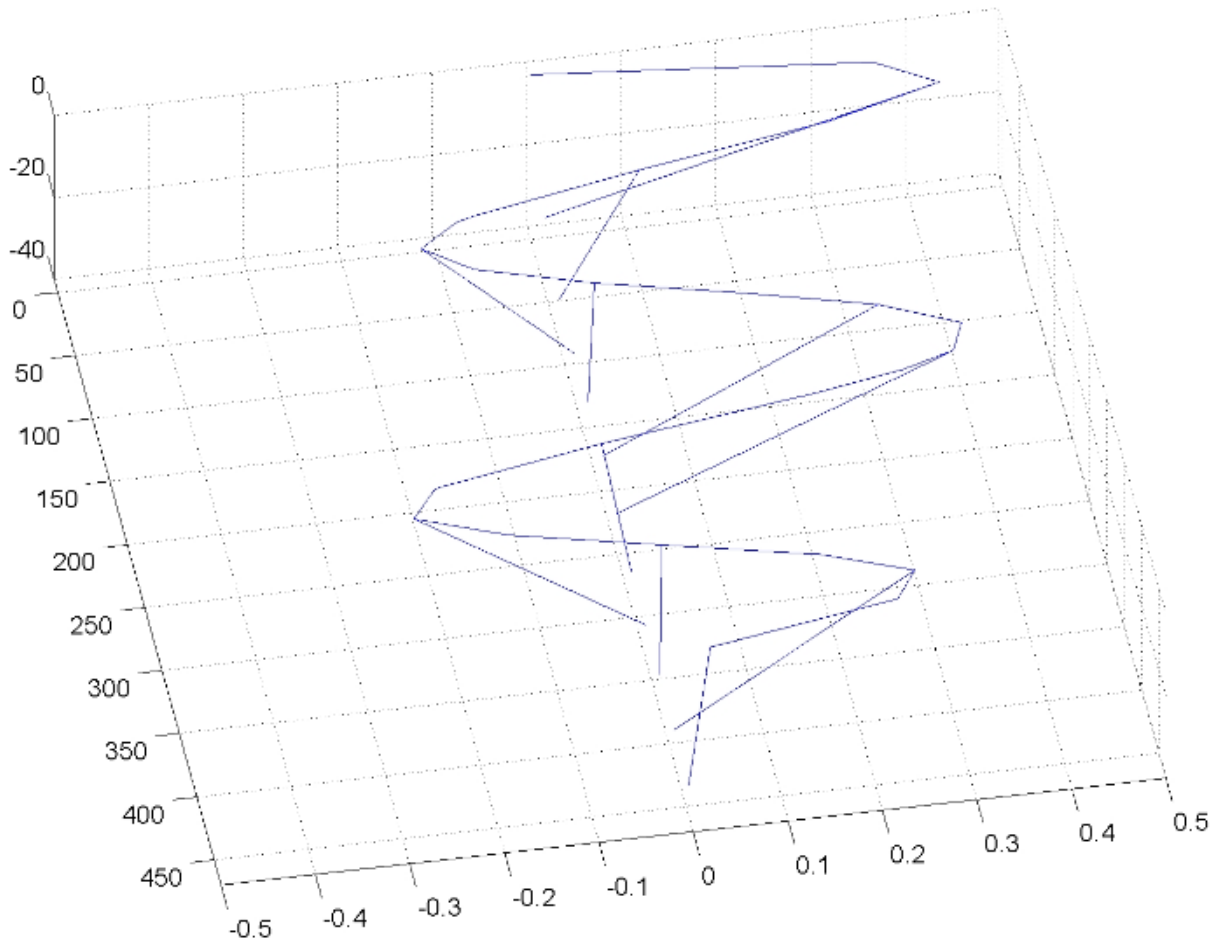


Ilustración 8-25: FM4 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

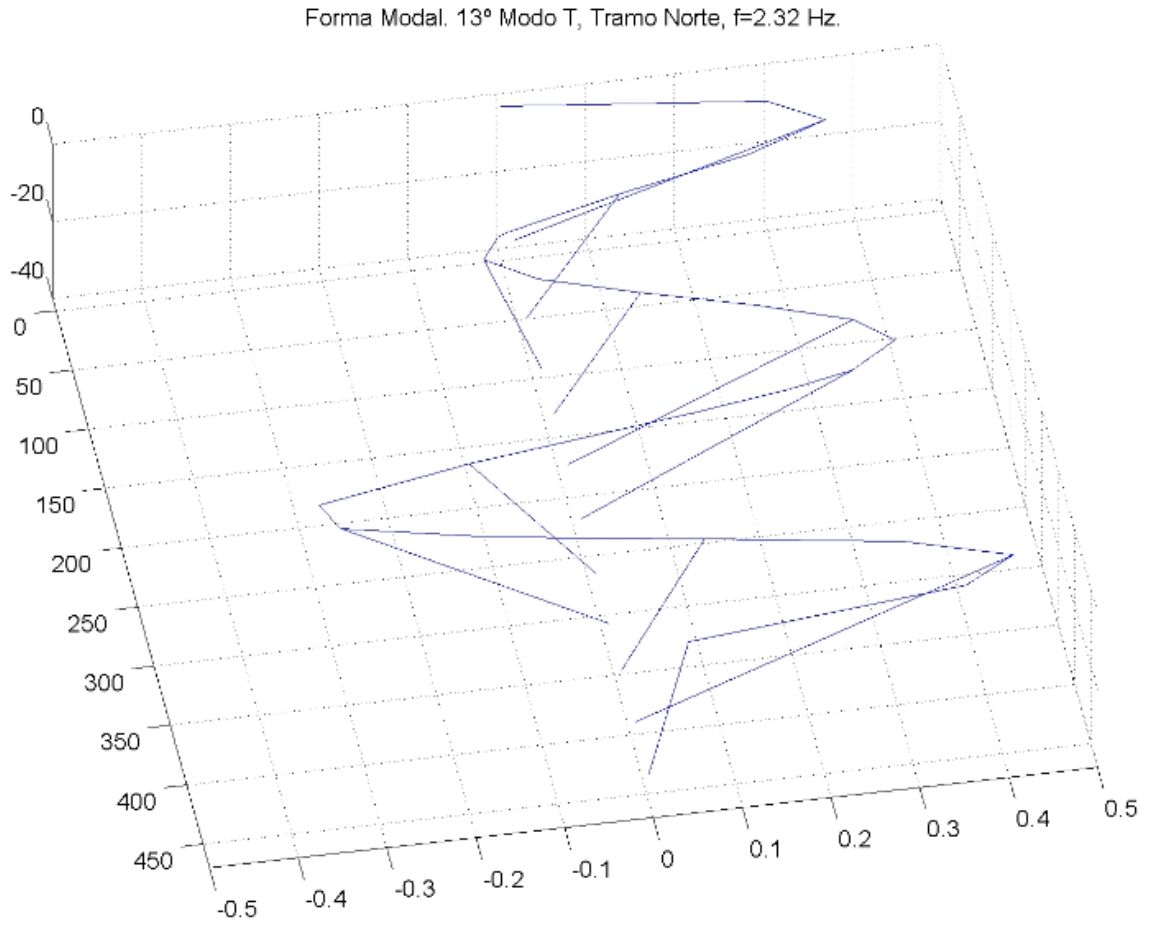


Ilustración 8-26: FM5 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

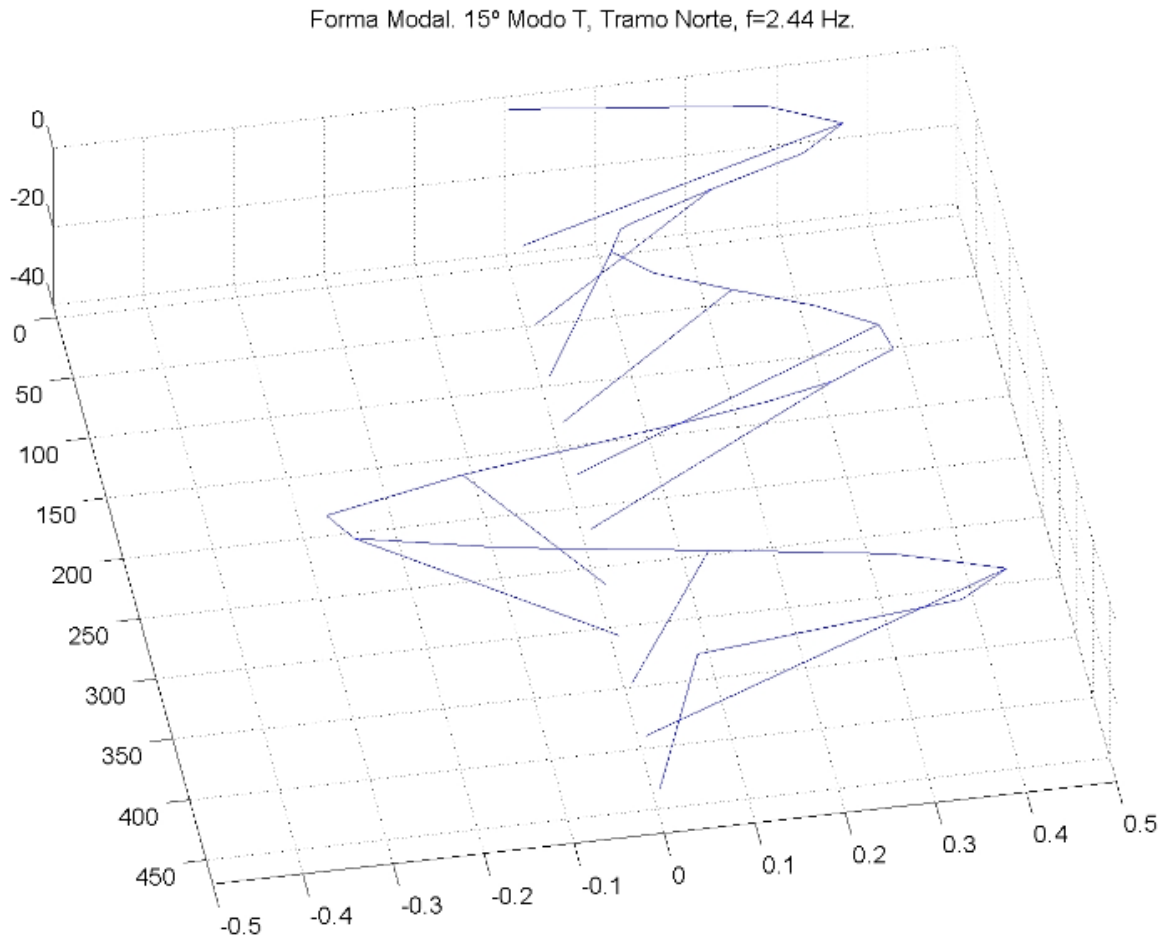


Ilustración 8-27: FM6 transversal tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

8.2.1.1. Formas modales verticales tramo norte 2004 (Resultados trabajo de título de Carlos Benavides)

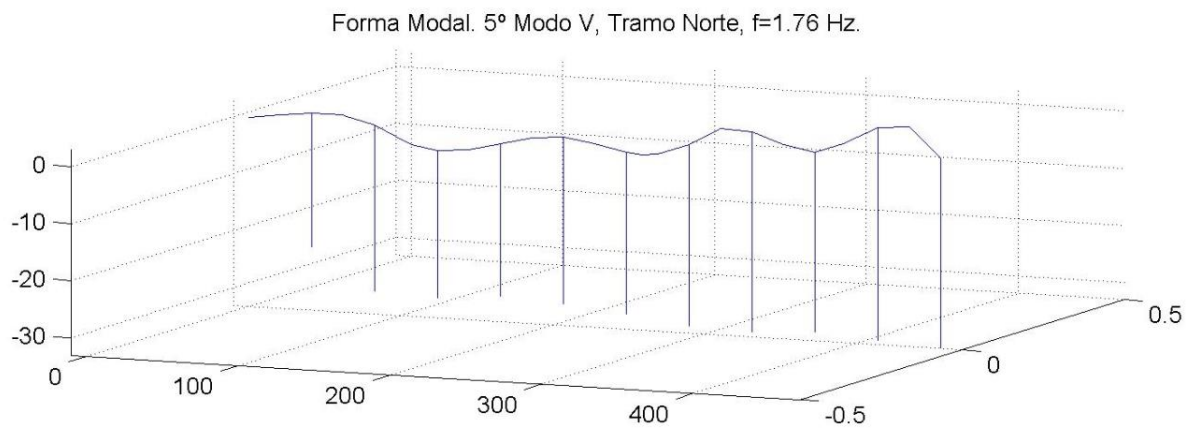


Ilustración 8-28: FM1 vertical tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

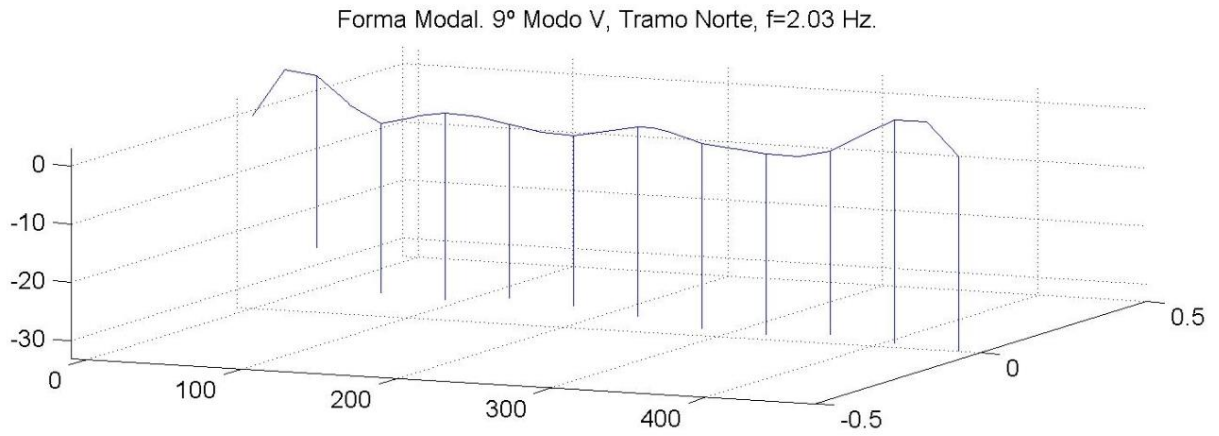


Ilustración 8-29: FM2 vertical tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

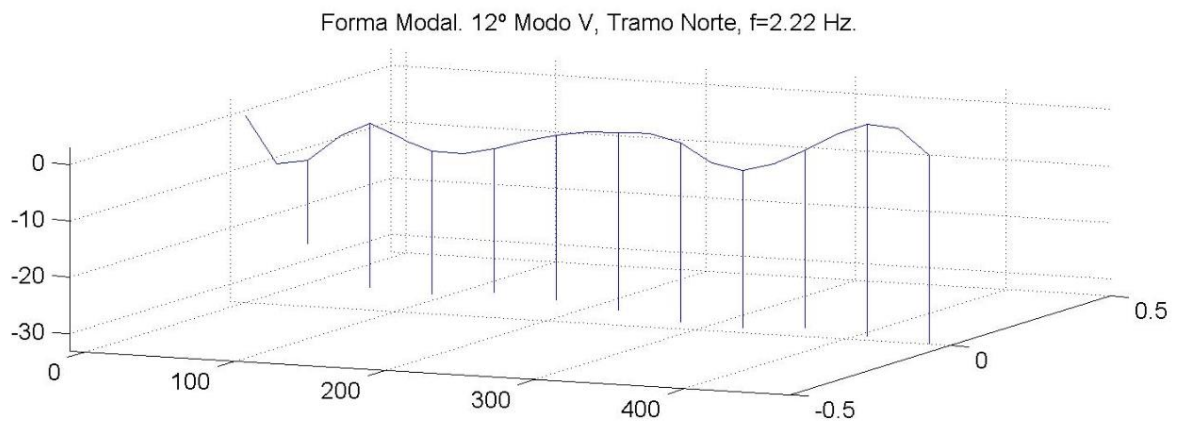


Ilustración 8-30: FM3 vertical tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

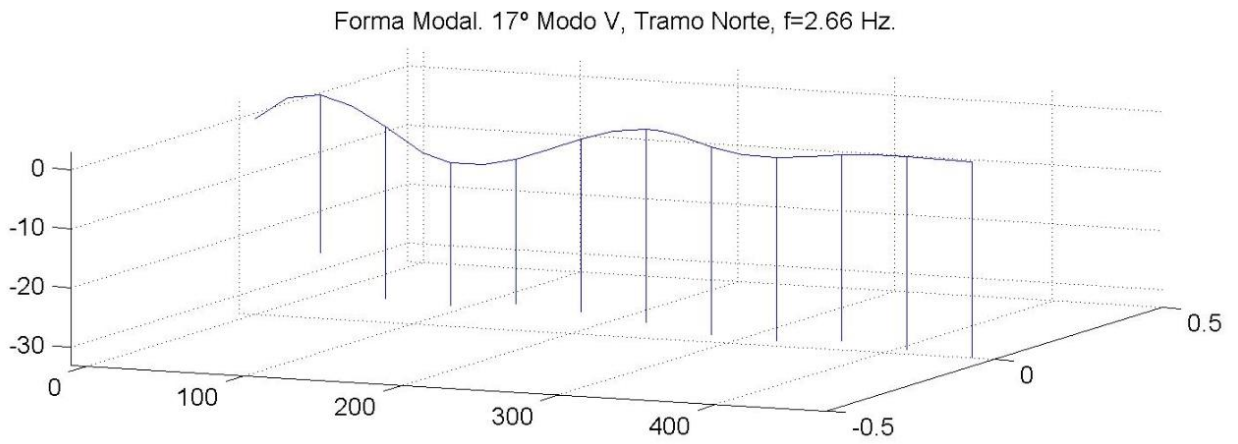


Ilustración 8-31: FM4 vertical tramo norte CRSH 2004 (Benavides, 2004).

8.2.1.2. Formas modales longitudinales tramo sur 2004 (Resultados trabajo título de Carlos Benavides)

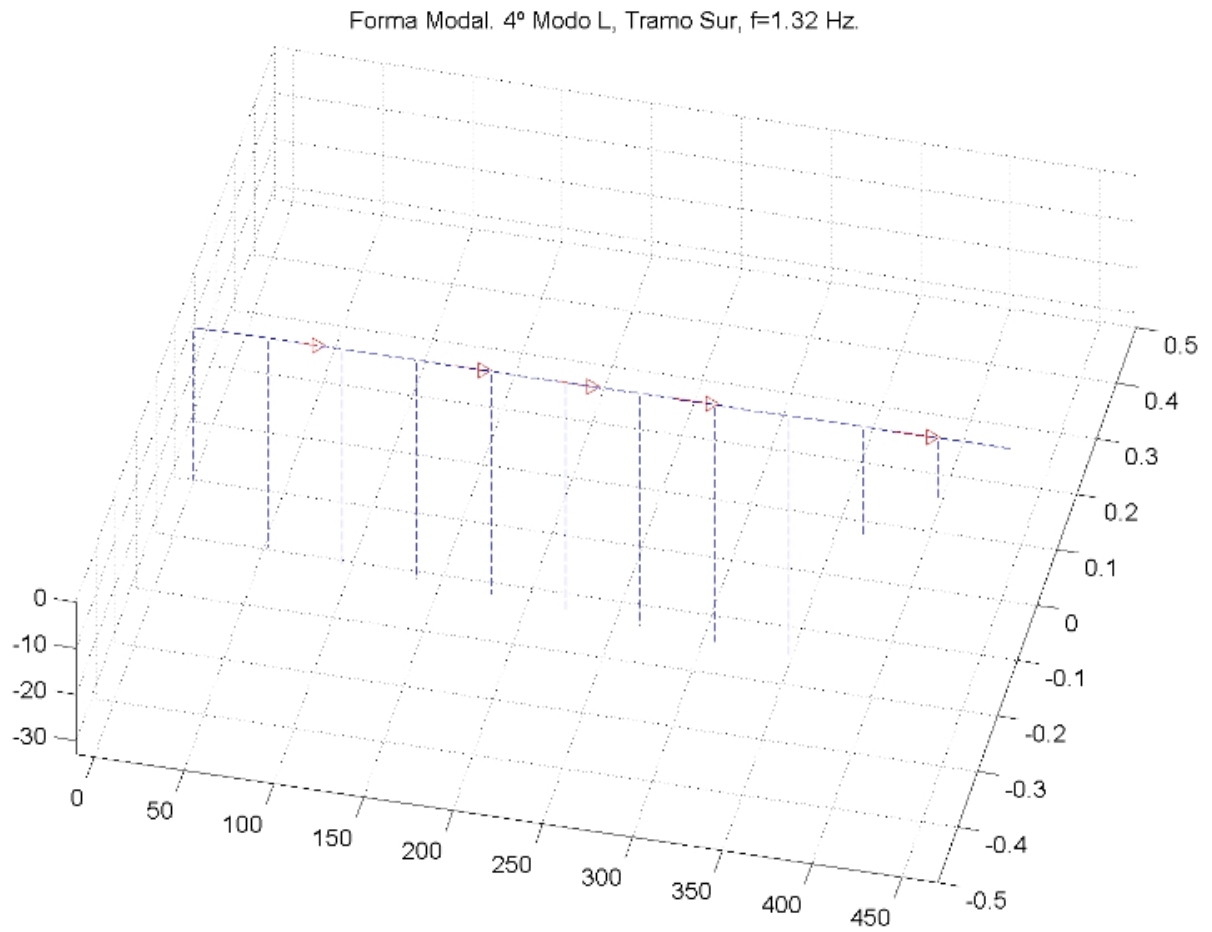


Ilustración 8-32: FM1 longitudinal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

Forma Modal. 5º Modo L, Tramo Sur, $f=1.54$ Hz.

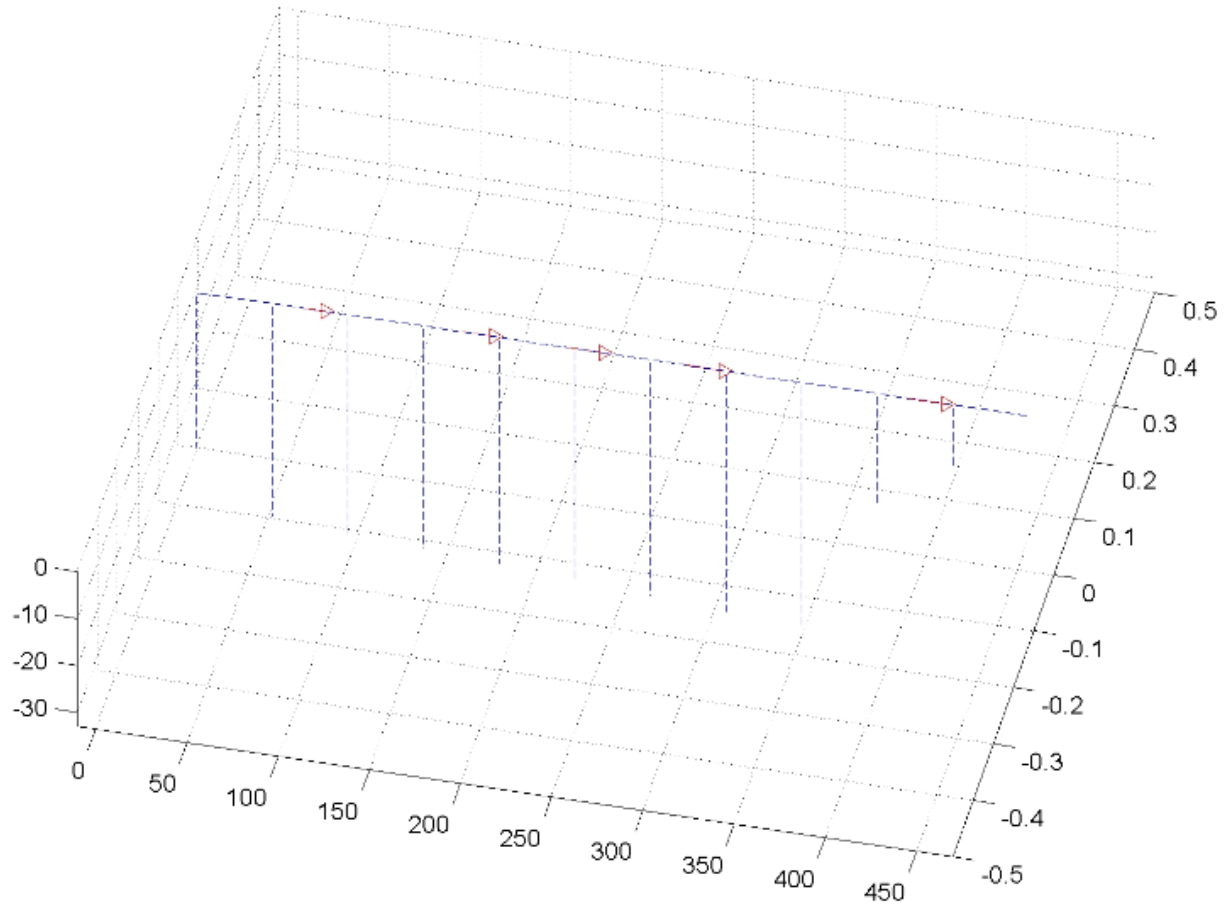


Ilustración 8-33: FM2 longitudinal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

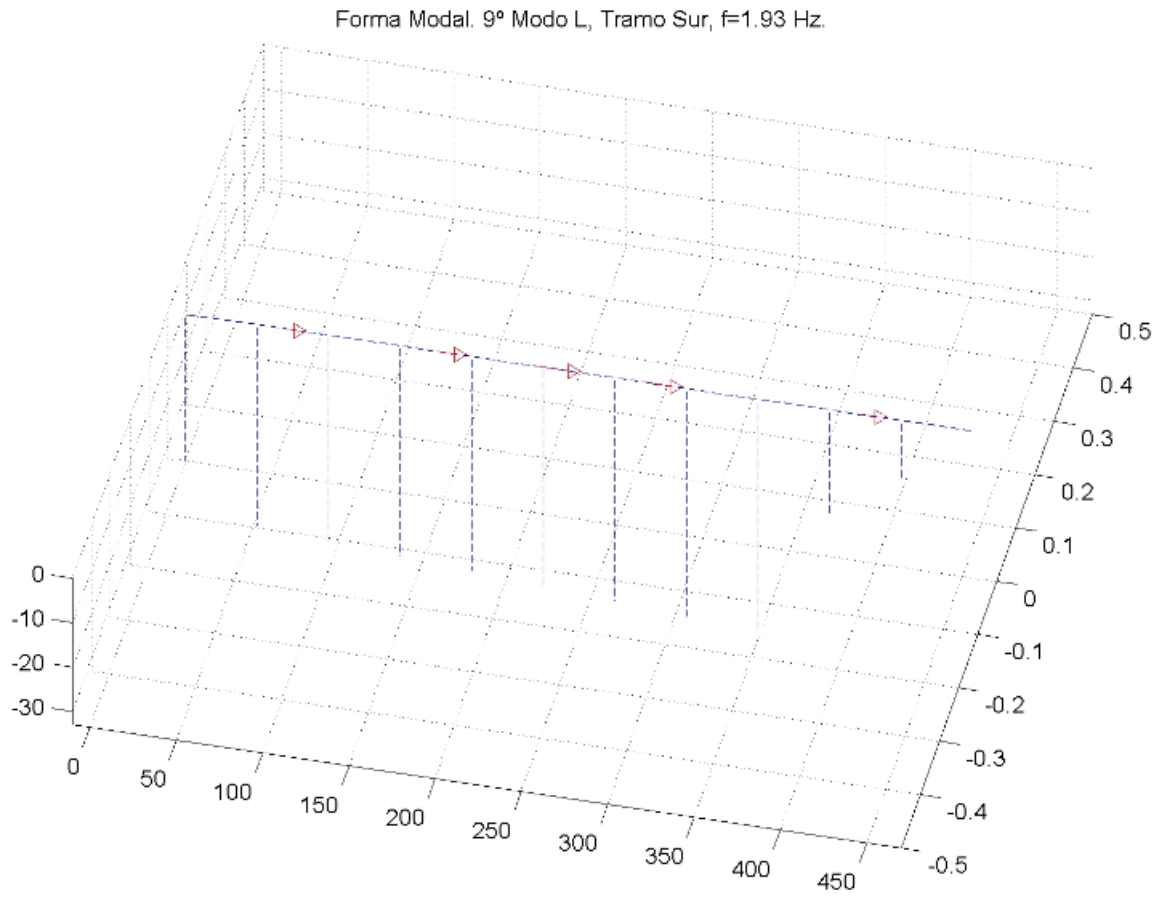


Ilustración 8-34: FM3 longitudinal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

8.2.1.3. Formas modales transversales tramo sur 2004 (Resultados trabajo de título de Carlos Benavides)

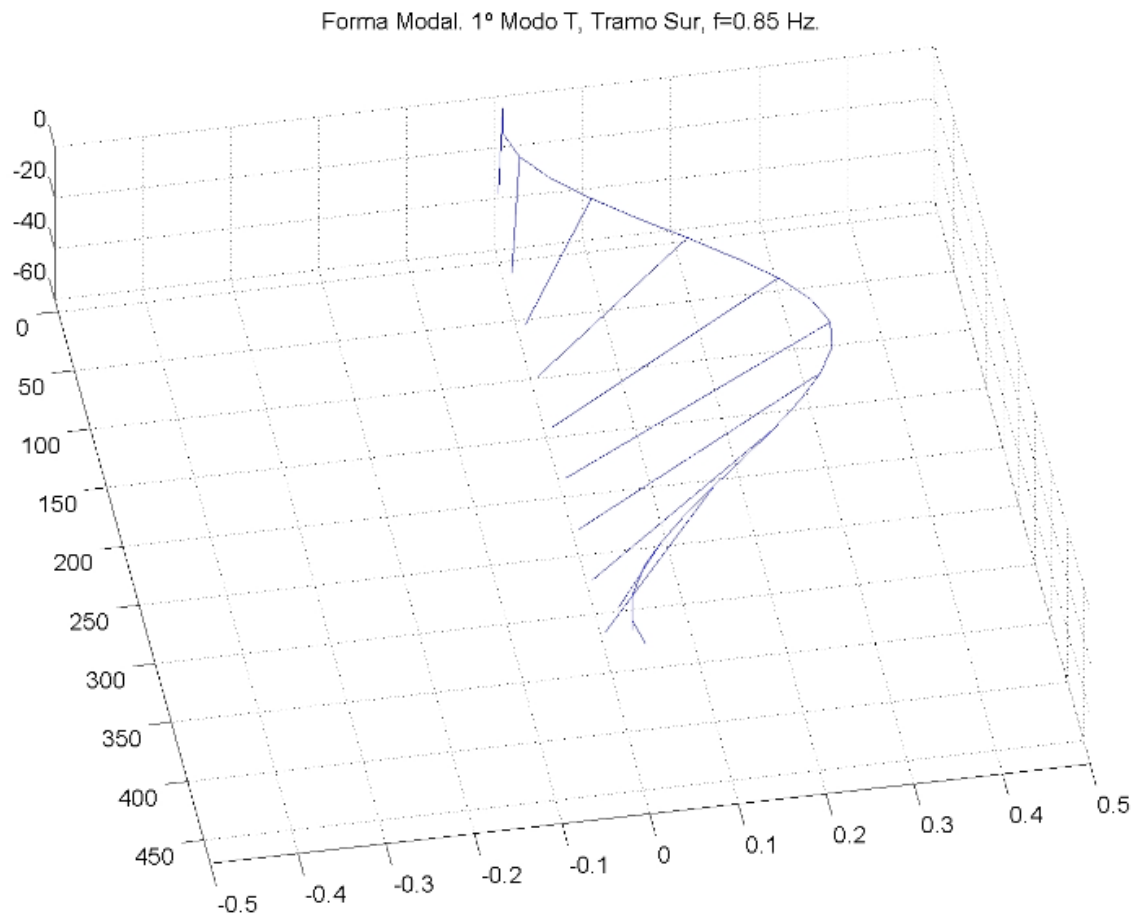


Ilustración 8-35: FM1 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

Forma Modal. 2º Modo T, Tramo Sur, $f=1.07$ Hz.

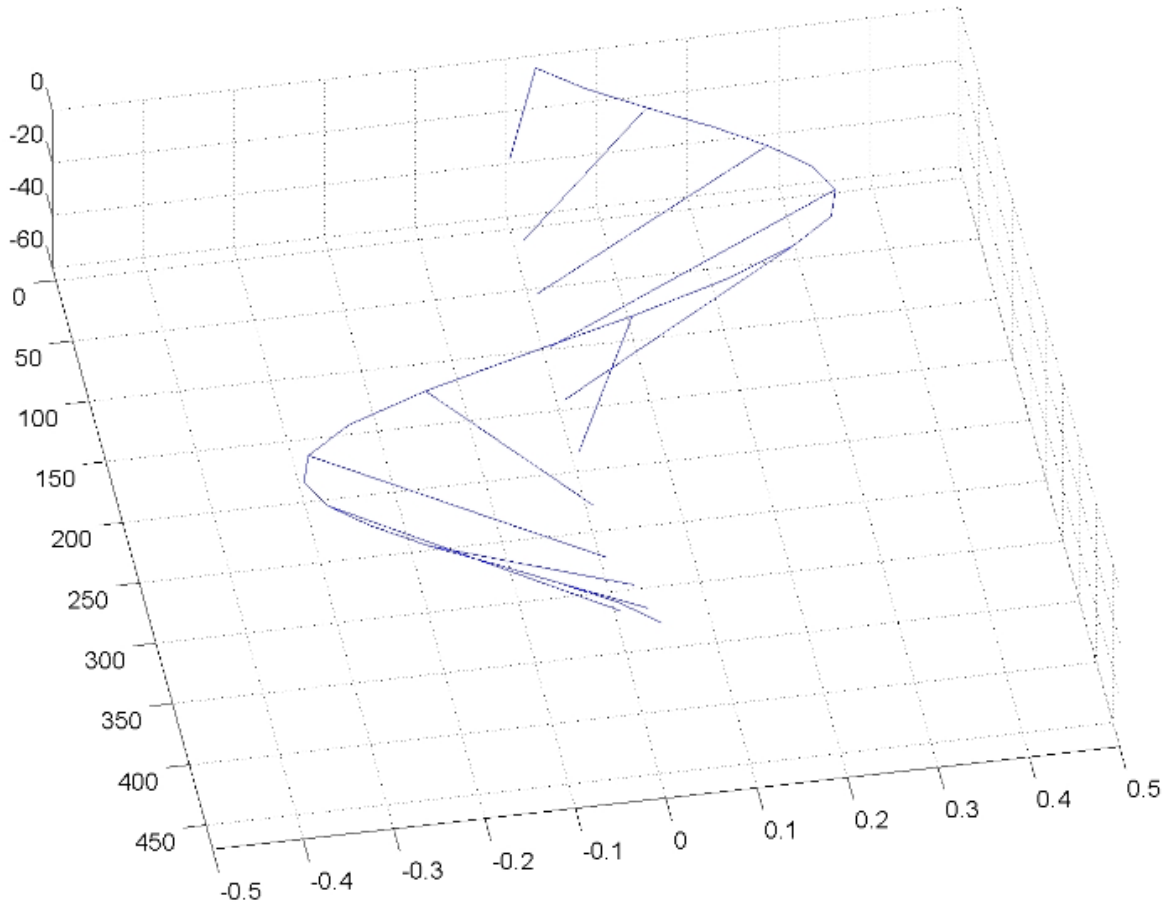


Ilustración 8-36: FM2 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

Forma Modal. 3º Modo T, Tramo Sur, $f=1.25$ Hz.

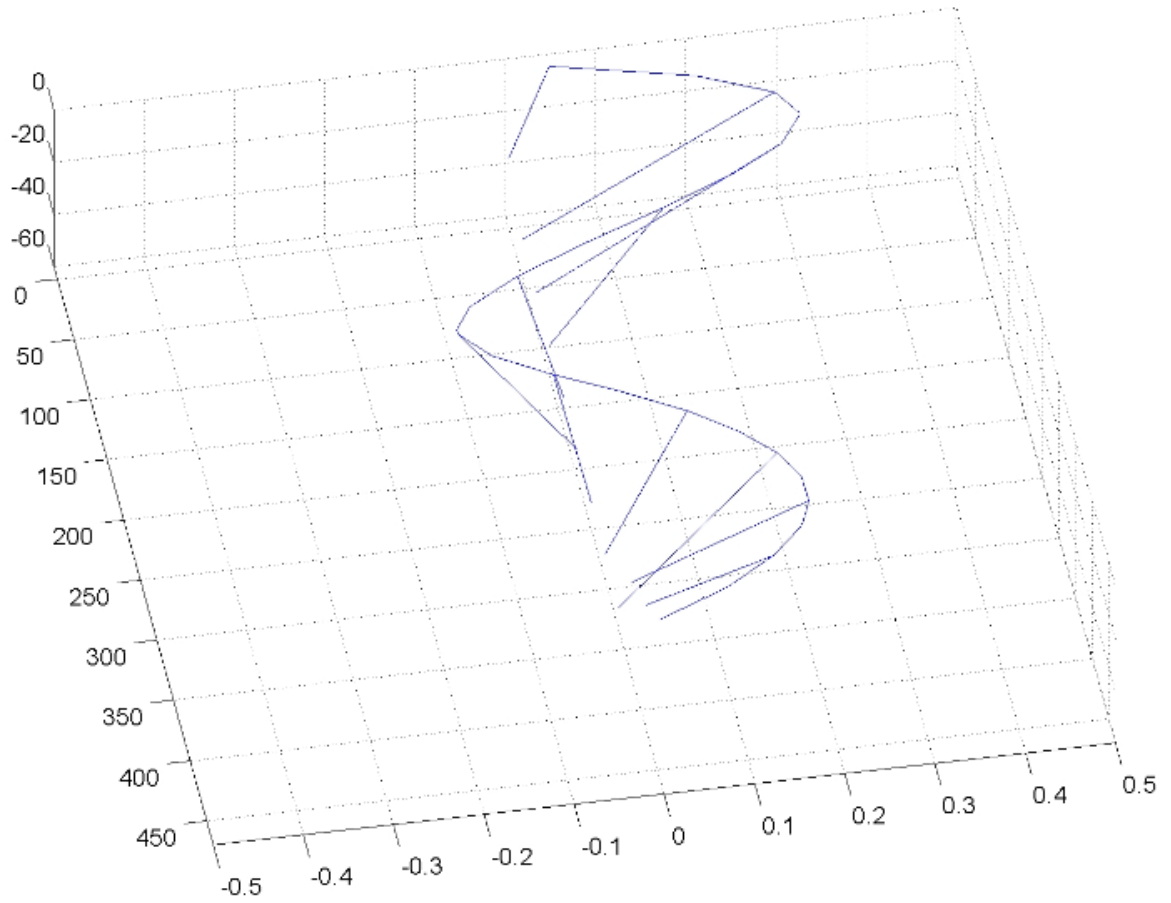


Ilustración 8-37: FM3 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

Forma Modal. 6° Modo T, Tramo Sur, $f=1.71$ Hz.

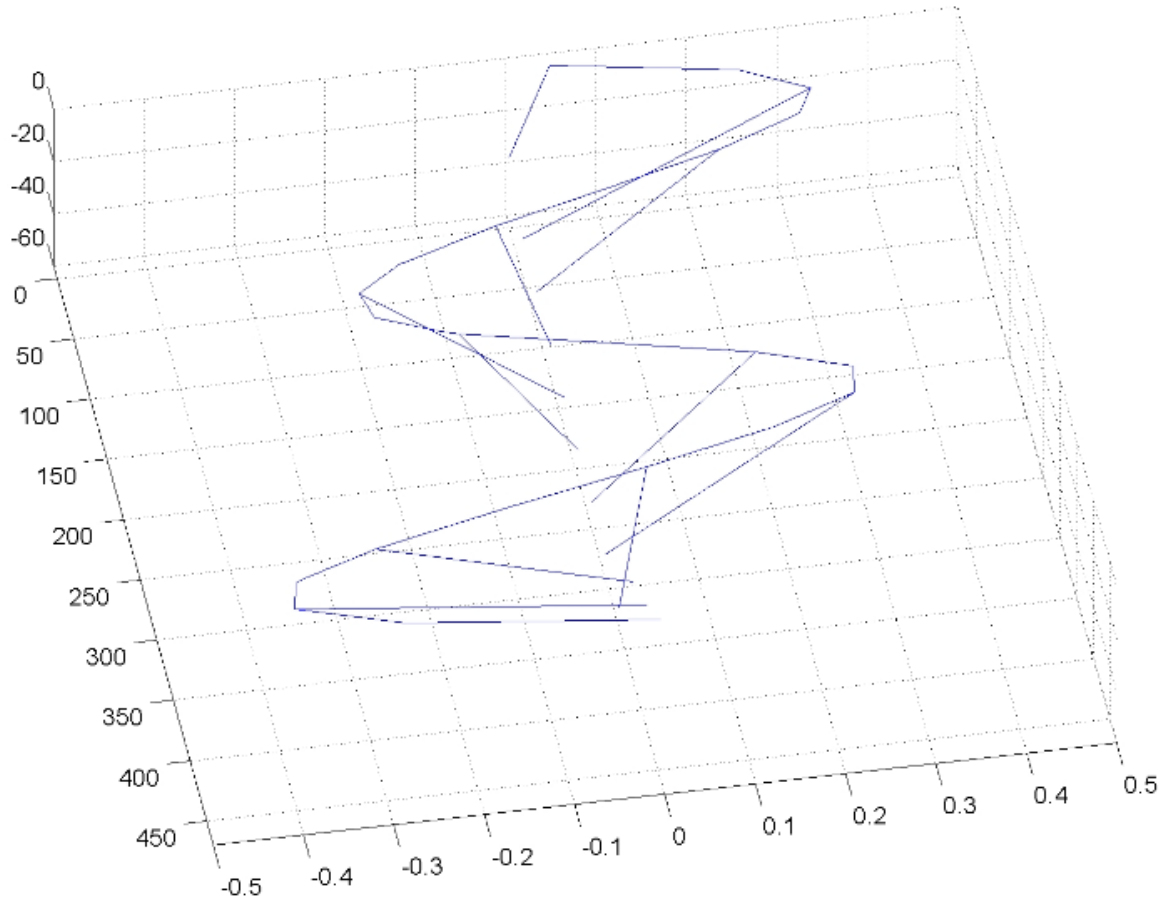


Ilustración 8-38: FM4 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

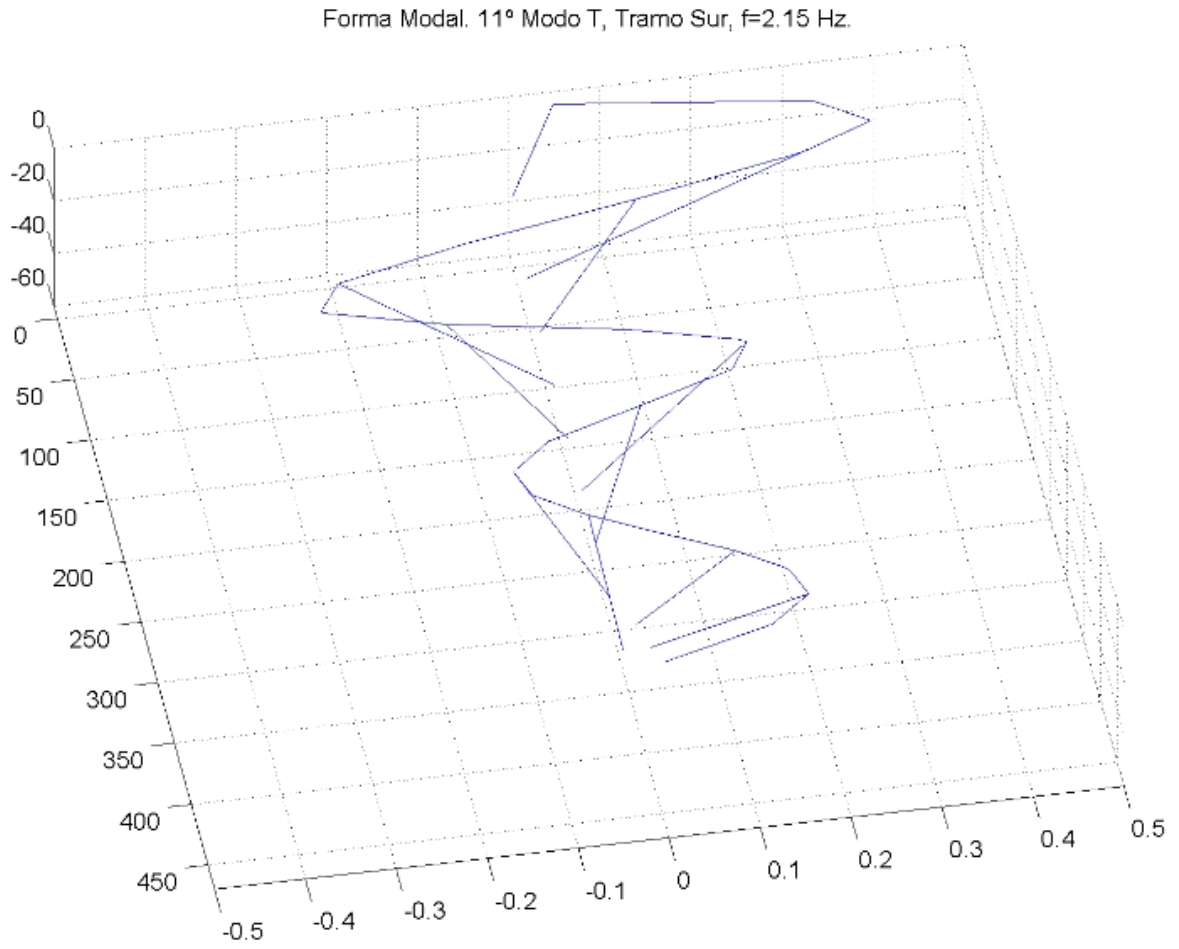


Ilustración 8-39: FM5 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

Forma Modal. 13º Modo T, Tramo Sur, $f=2.37$ Hz.

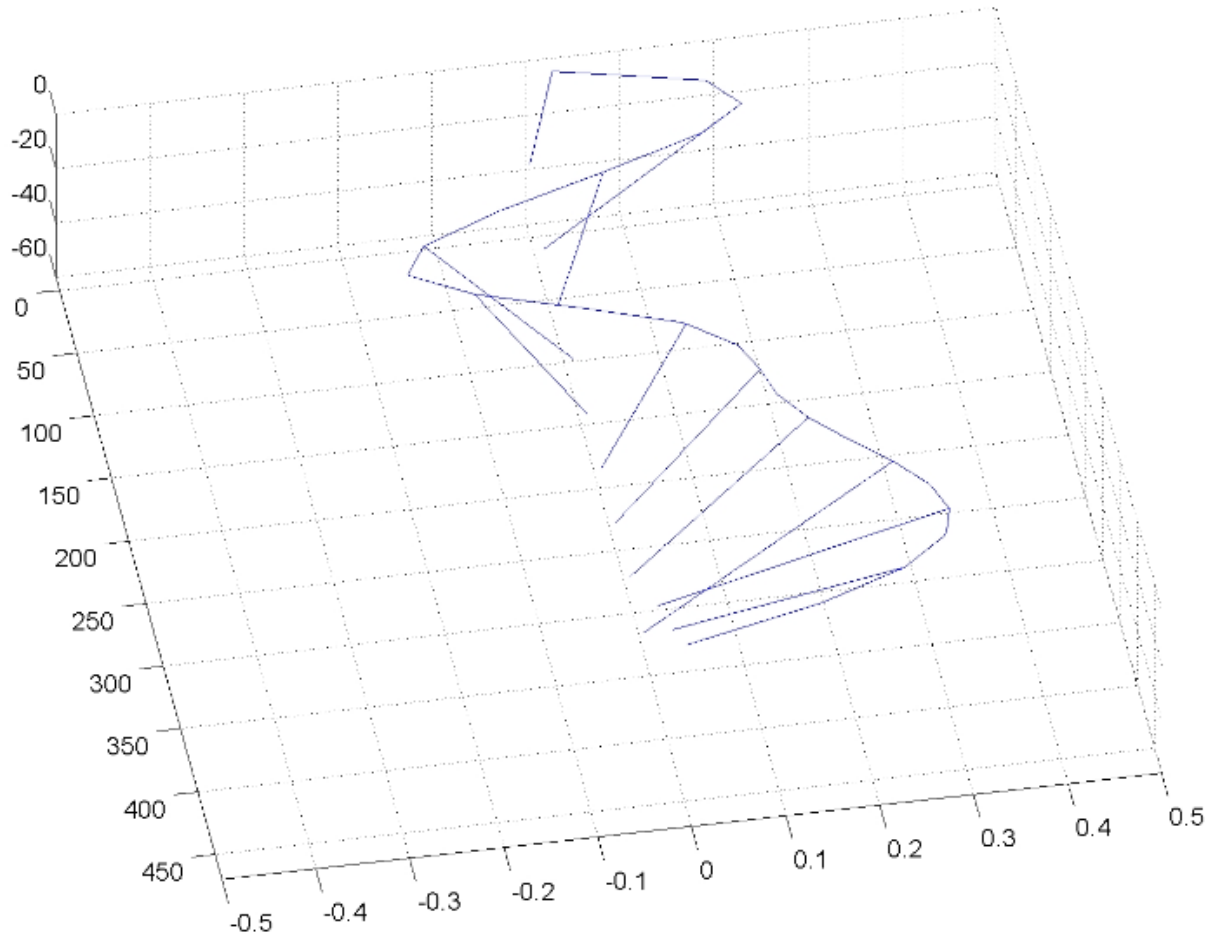


Ilustración 8-40: FM6 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

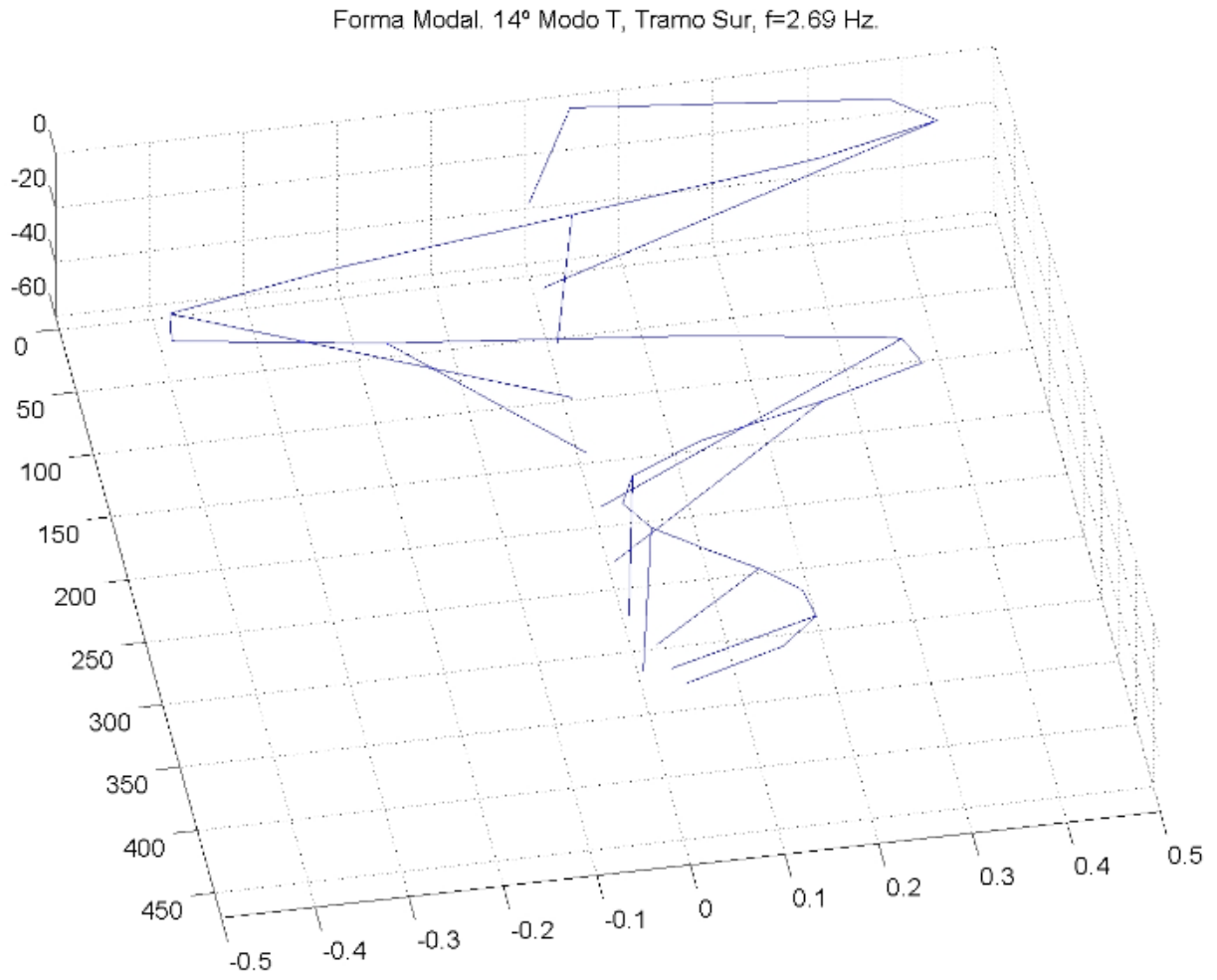


Ilustración 8-41: FM7 transversal tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

8.2.1.4. Formas modales verticales tramo sur 2004 (Resultados trabajo título de Carlos Benavides)

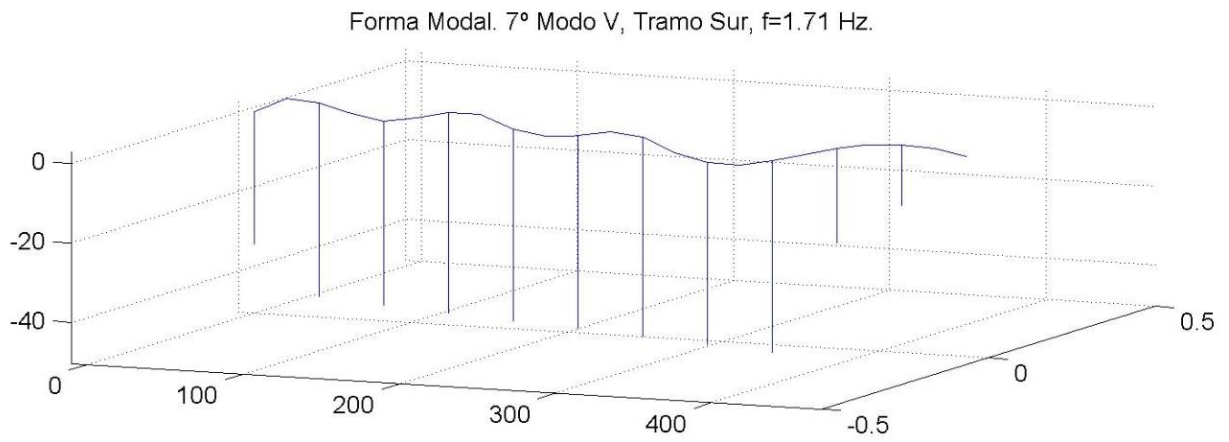


Ilustración 8-42: FM1 vertical tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

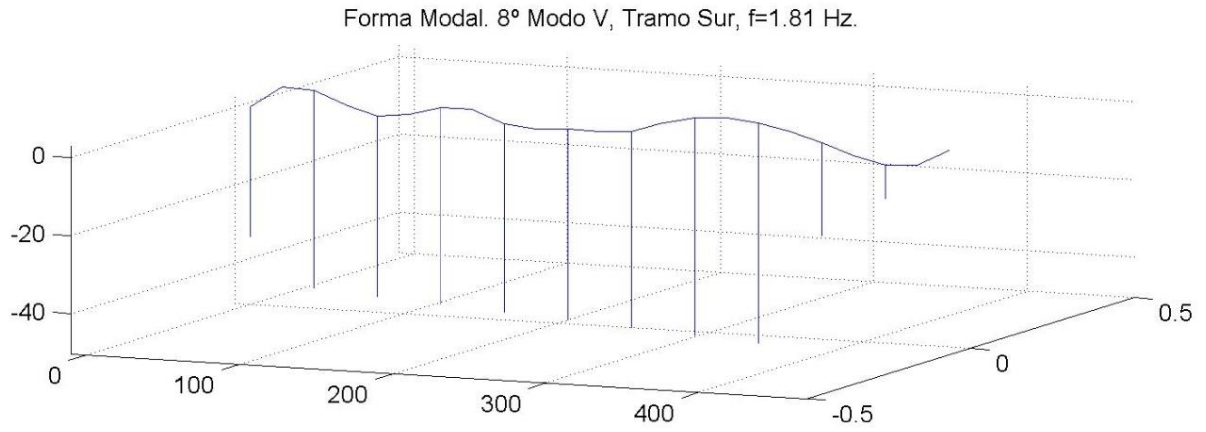


Ilustración 8-43: FM2 vertical tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

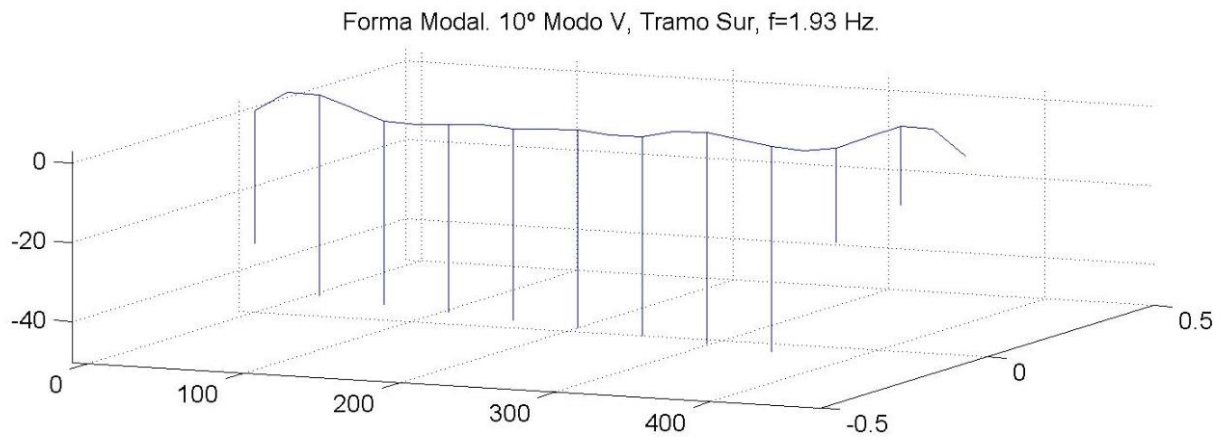


Ilustración 8-44: FM3 vertical tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

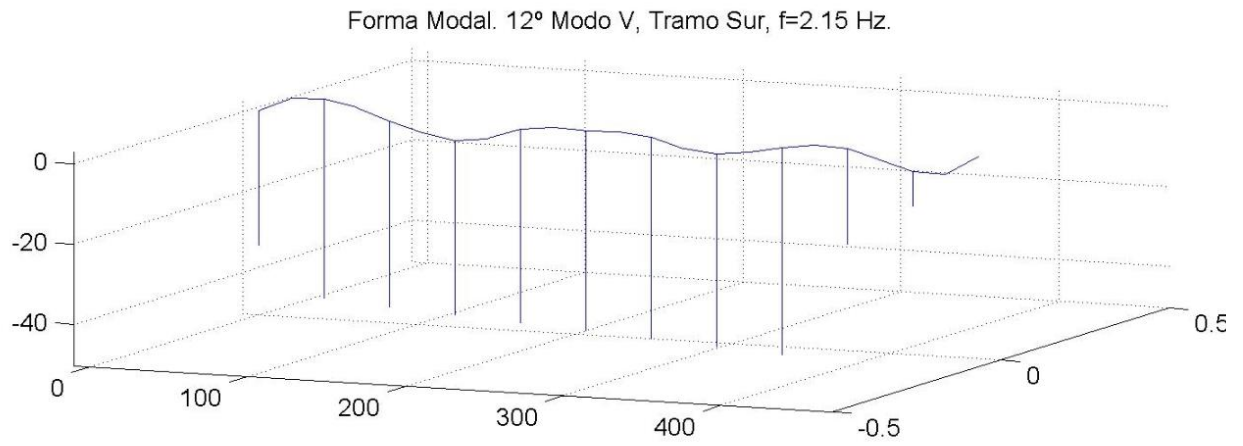


Ilustración 8-45: FM4 vertical tramo sur CRSH 2004 (Benavides, 2004).

8.2.2. Instrumentación externa registros año 2018.

8.2.2.1. Calibración instrumentos registro horizontal 2018

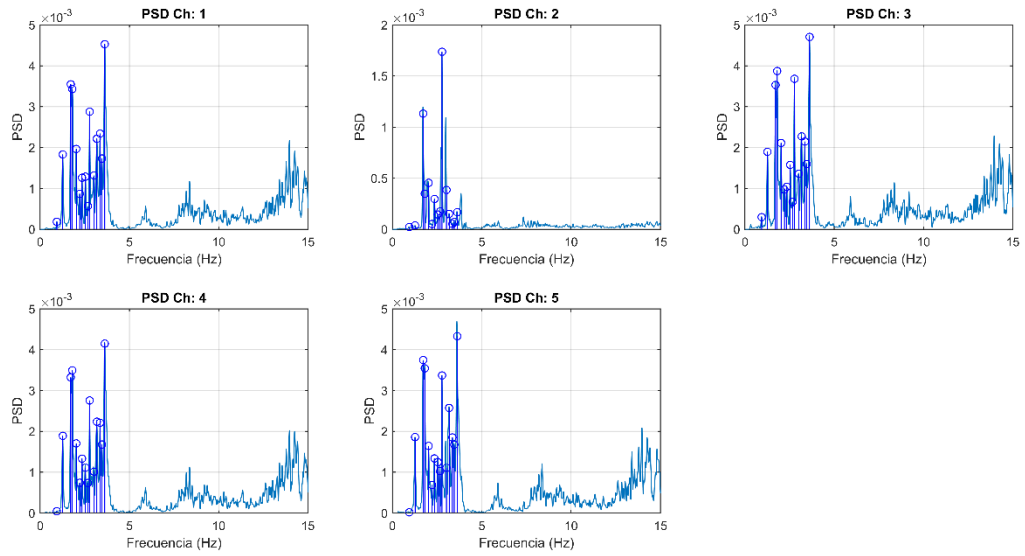


Ilustración 8-46: PSD calibración horizontal puente CRSH 2018.

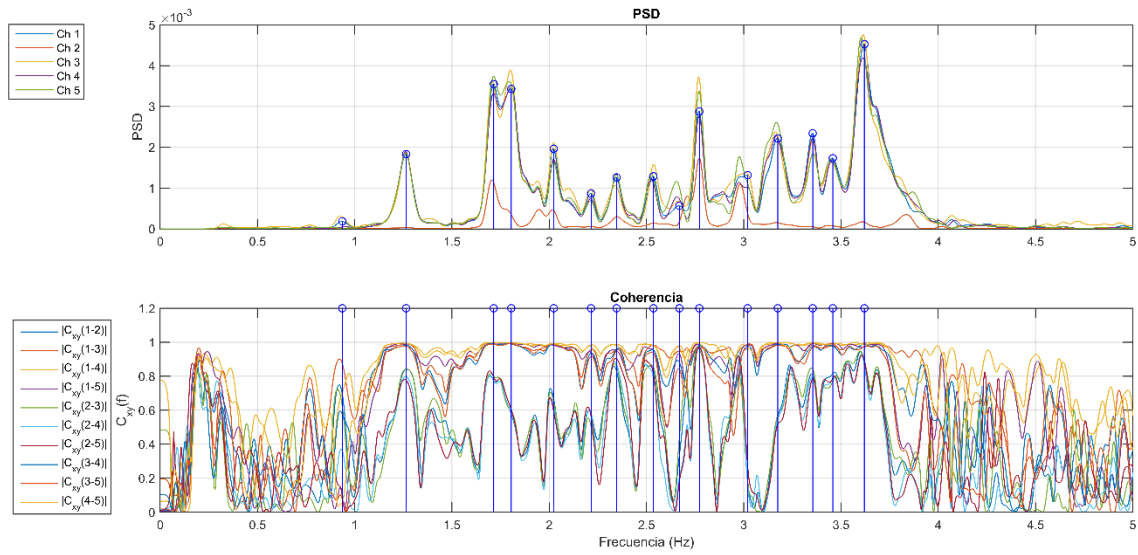


Ilustración 8-47: PSD y función coherencia calibración horizontal puente CRSH 2018.

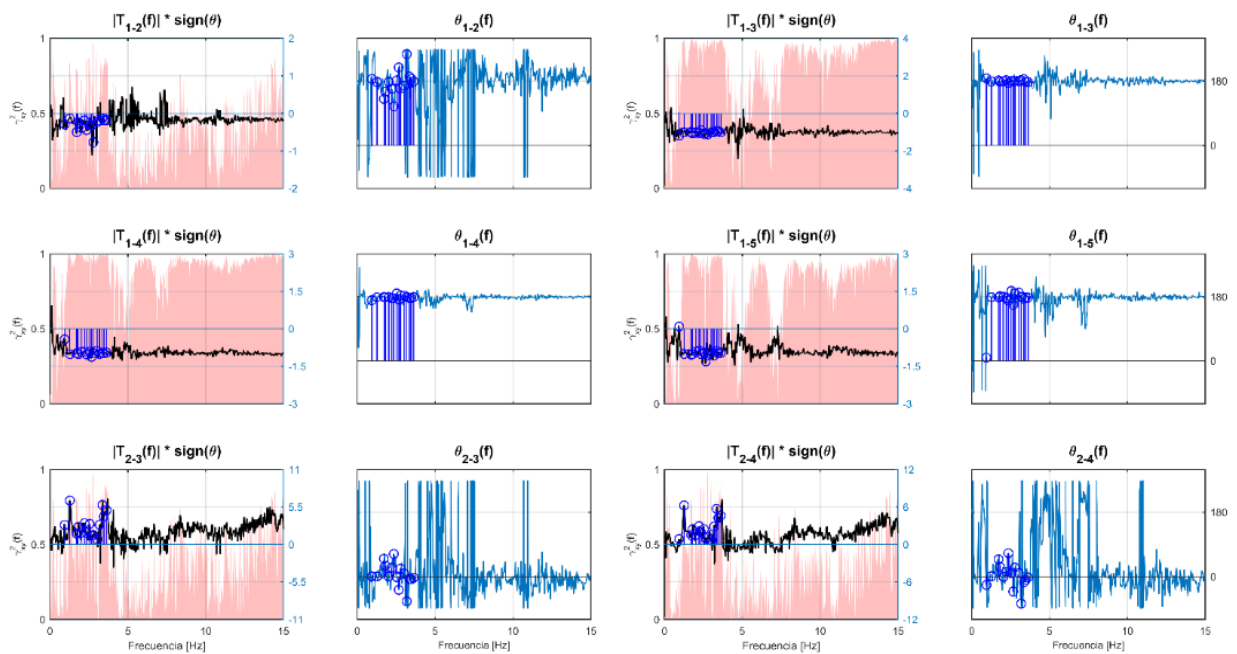


Ilustración 8-48: Función de transferencia y fase calibración horizontal puente CRSH 2018.

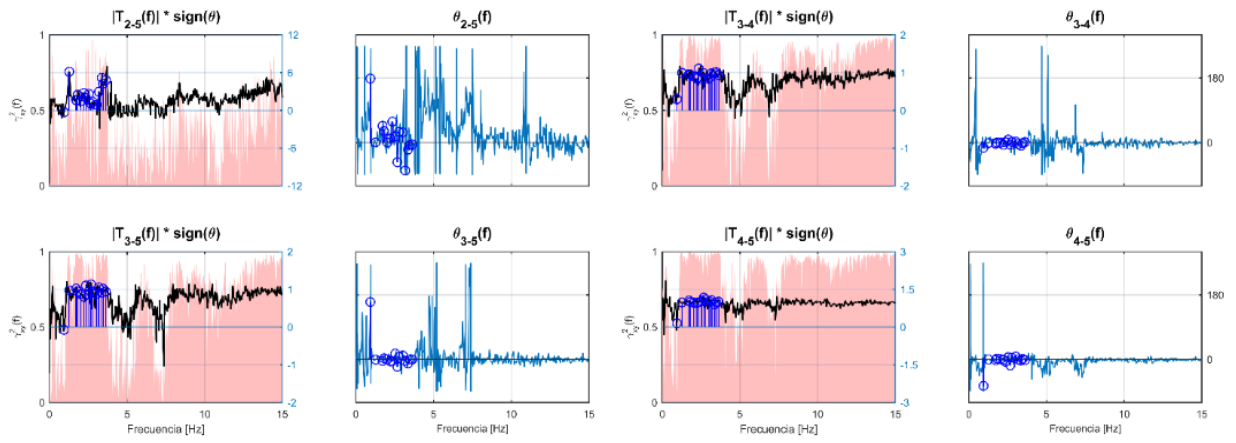


Ilustración 8-49: Función de transferencia y fase calibración horizontal puente CRSH 2018.

8.2.2.2. Calibración instrumentos registro vertical 2018

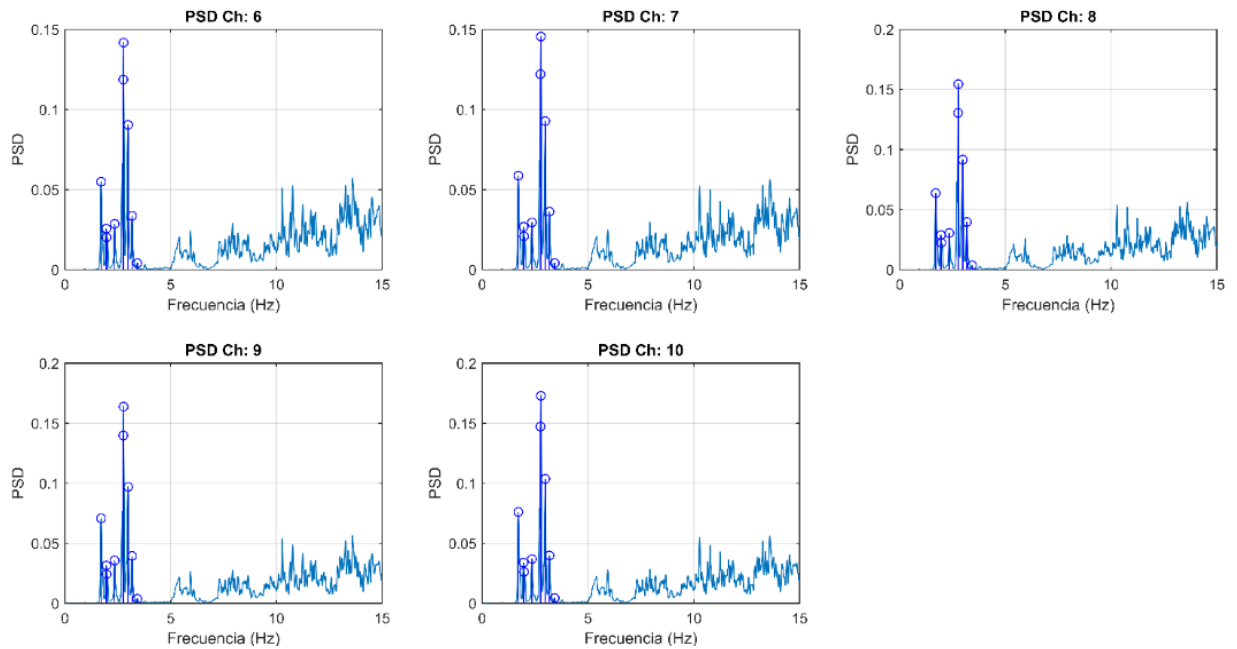


Ilustración 8-50: PSD calibración vertical puente CRSH 2018.

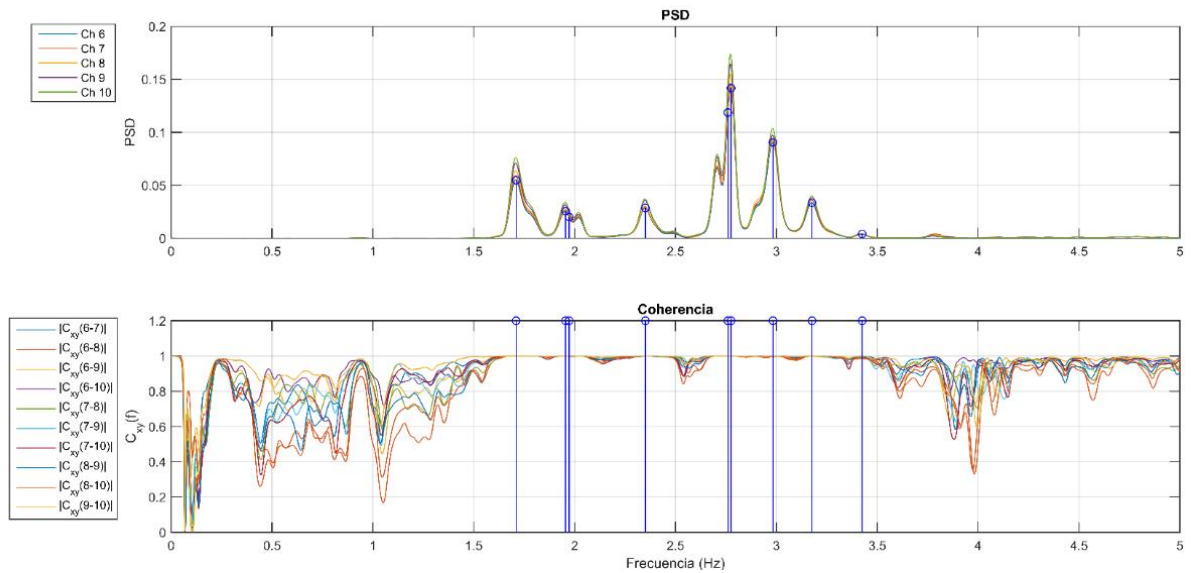


Ilustración 8-51: PSD y función de coherencia calibración vertical puente CRSH 2018.

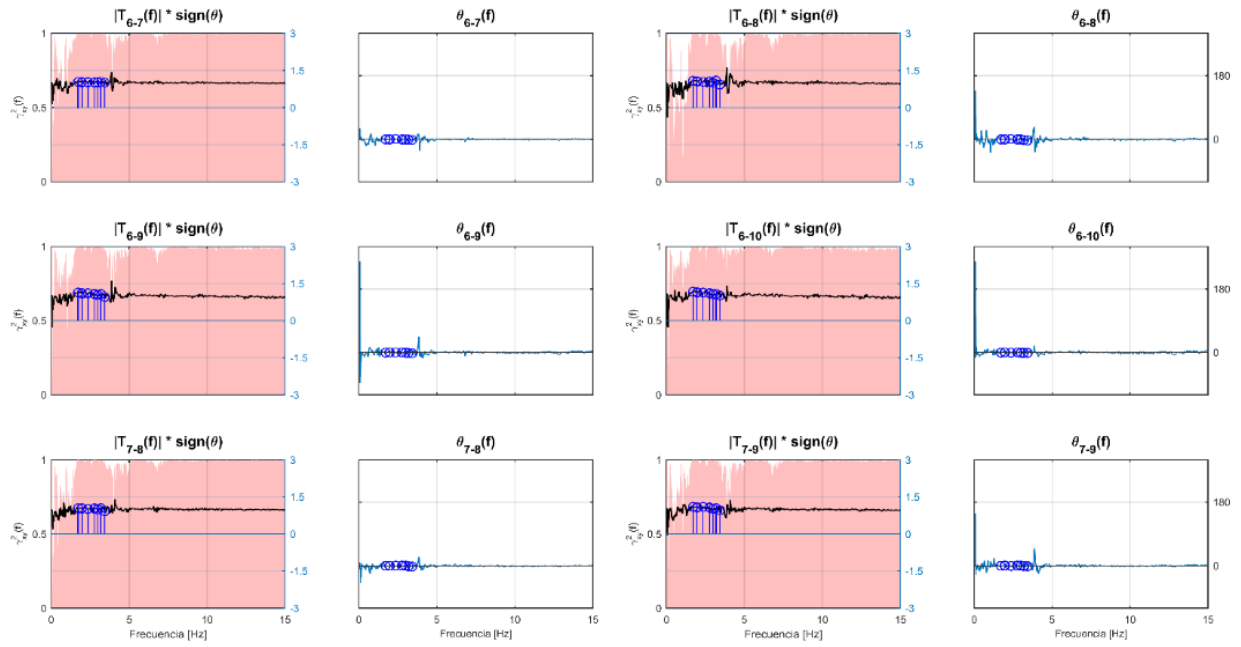


Ilustración 8-52: Función de transferencia y fase calibración vertical puente CRSH 2018.

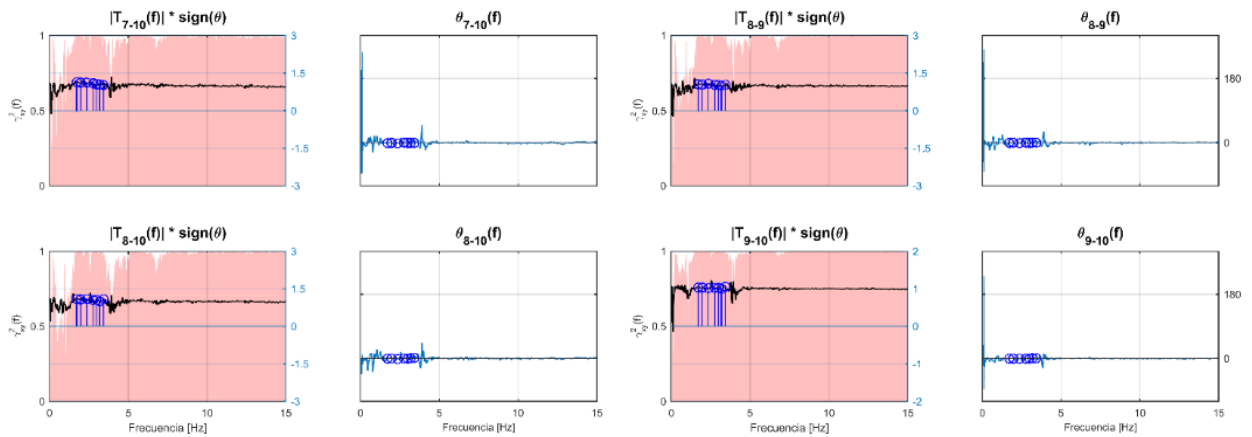


Ilustración 8-53: Función de transferencia y fase calibración vertical puente CRSH 2018.