



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

**MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES EN EDIFICIOS UTILIZANDO
CÁMARAS DE VIDEO ECONÓMICAS SIN INTERVENCIÓN EN LA ESTRUCTURA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MIGUEL OCTAVIO AROS CALLEJAS

PROFESOR GUÍA:

RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE COMISIÓN:

LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

CLAUDIO PÉREZ FLORES

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia.
POR: Miguel Octavio Aros Callejas
FECHA: 16/01/2017
PROFESOR GUÍA: Rubén Boroschek Krauskopf

MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES EN EDIFICIOS UTILIZANDO CÁMARAS DE VIDEO ECONÓMICAS SIN INTERVENCIÓN EN LA ESTRUCTURA

El presente trabajo desarrolla la implementación de un sistema basado en cámaras de video para la medición de vibraciones estructurales. Dada las limitaciones de montaje y costo de instrumentos como los acelerómetros, normalmente ocupado en Chile, se propone un sistema de monitoreo a través de cámaras comerciales sin la necesidad de intervenir la estructura, es decir, sin recurrir al uso de objetivos o marcadores.

Se desarrolla una rutina *Matlab* para el manejo de imágenes, capaz de realizar tareas específicas de detección y rastreo de puntos de control (esquinas), orientado al monitoreo del desplazamiento y giro relativo de cuerpos. Se recurre a cámaras de video con costes accesibles de mercado y formatos de grabación de alta calidad como las cámaras deportivas GoPro. De forma complementaria se exponen los procesos de edición mínimos para el estudio espacial en videos.

El sistema propuesto se somete a dos ensayos. El primero se lleva a cabo en laboratorio bajo condiciones controladas y sobre un modelo estructural de cuatro pisos. Paralelamente la estructura se instrumenta con sensores ultrasónicos y acelerómetros para la validación de los resultados del desplazamiento horizontal y los modos naturales presentes en respuesta del modelo. El segundo ensayo se realiza sobre la pasarela vial del centro comercial Costanera Center sin instrumentación alternativa.

Los resultados en laboratorio muestran una evidente similitud entre los desplazamientos horizontales registrados por la GoPro y los ultrasónicos. El contenido espectral también se asemeja entre ambos instrumentos y los acelerómetros. Sin embargo, se evidencia la importancia del usuario en el proceso interactivo de medir largos de escala para transformar pixeles a coordenadas métricas. Por otro lado, los ensayos en terreno exponen las limitaciones del sistema en la detección de esquinas para condiciones no ideales y el déficit en el posterior rastreo durante el video. Este hecho se explica, principalmente, por cambios locales de luz producidos por el reflejo del tránsito vehicular.

*Dedicado a mis padres y abuelos,
personas que dan todo por lo que aman.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mis padres Román y Pilar, quienes con esfuerzos sobrehumanos lograron enderezar al niño desordenado e inquieto que era. Ambos me han enseñado mucho y son cosas que jamás olvidaré, desde pintar o mantener mi orden personal (NO me afeitaré mamá) hasta ser una buena persona y esforzarme por sobre todo. Por otro lado a mi hermana, que pese a ser muy distinta a mí, siempre ha sido un referente tanto académico como laboral con quien mido mis capacidades. A todos los quiero mucho.

En segundo lugar a los profesores Rubén Boroschek, Leonardo Massone y Claudio Pérez, con quienes he aprendido mucho, participando en mi trabajo y mostrándome como un ingeniero debe desenvolverse hoy en día. También al profesor Pedro Soto, a Omar y al Mario quienes con su buena disposición y conocimientos me permitieron desarrollar este trabajo. Espero ser un aporte para esta universidad y país como ustedes los son.

Partiendo con notas mediocres, largas noches de “estudio” (Youtube) con David, clases particulares chantas junto al Checho y jornadas musicales maratónicas de última hora con Jercko y Justin. De a poco armamos un grupo muy unido con Maus, Klaus, Ruperto, Oscar, Mono, Martin, Nachito, José, Manzana, Pichi y los demás. De ahí salieron partidos épicos en Don Oscar, noches épicas y *Rupifondas* que solo necesitaban de un bidón cortado, menta y pipeño para llegar a ser una tremenda tradición. No olvidar a Papaya con quien compartimos una juventud forjada en la mejor región de Chile, la Cuarta. Tampoco al Eitel y todas las películas de baja o alta valoración que fuimos a ver al cine.

Pasando los años entramos a civil, quedando solos Javier, Orrego y Yo en un nuevo curso en donde nos dimos cuenta que no habíamos hecho muchas relaciones sociales en los últimos años. Pese a ser traicionado por ambos en los grupos de topografía, pude conocer a Fabbio, Jaque y Tuto. Desde ahí todo fue para mejor, logrando pertenecer a un gran grupo de personas con personalidades distintas y con quienes a pasar de agarramos a mocha, constantemente, por nuestro grupo de *Cibilis*, físicamente nos juntamos para reírnos, compartir y tomar malas decisiones. Entre ellos: Caleb, Enzo, Fabo, Isaías, Iván, Jones, Salomon, Mengual y Zolezzi.

Al final terminé aprendiendo mucho con Saez, Ótu, Cartes, Herni, Ary, Feña, Pepetomi y Tomas, personaje con quien comparto mi humor. Y grandes mujeres: Pame, Emilia, Caro, Cami, Feña, Coni, Sol y la Nata. Esta última parte de nuestro subgrupo *Instru*, junto a los *Cibilis*: Ramiro y Sanchez. Con ustedes este último año fue más fácil, pese a que el negro hizo presencia por *wtsp*, espero nunca dejar de compartir y chaquetear con ustedes. Si bien, este texto parece una despedida o historia, no lo es, pero ya escribí mucho para hacerlo parecer agradecimientos.

Tabla de Contenido

1.	CAPÍTULO I: Introducción y Antecedentes Generales.....	1
1.1	Objetivo.....	2
1.2	Metodología	2
1.3	Alcances	3
1.4	Resultados esperados	4
2.	CAPÍTULO II: Marco Teórico	5
2.1	Dinámica de estructuras	5
2.1.1	Monitoreo del comportamiento dinámico.....	5
2.2	Algoritmo de Adquisición Visual: Principios Básicos	7
2.3	Visión Artificial: Procesamiento de imágenes	8
2.3.1	Detector de Puntos Esquinas: Algoritmo de Harris-Stephens	9
2.3.2	<i>Tracker</i> de Puntos: Algoritmo Kanade-Lucas-Tomasi (KLT)	11
2.4	Análisis de Cuerpo Rígido.....	13
2.4.1	Interacción y relaciones Puntos Esquinas-Punto de Referencia	13
2.4.2	Solución problema Puntos Esquina-Punto de Referencia: Mínimos Cuadrados No Lineales.....	15
2.5	Conversión pixeles a unidades métricas: Factor de Escala	17
2.6	Alteraciones y pérdida de información en registros visuales.....	18
2.6.1	Perturbaciones externas sobre la cámara.....	18
2.6.2	Falta de homogeneidad en pixeles: Distorsión óptica	19
2.6.3	Pérdidas de calidad: Compresión de archivos	21
2.7	Análisis de Espectral: Transformada Rápida de Fourier	23
3.	CAPÍTULO III: Algoritmo de Adquisición Visual	24
3.1	Diagrama de Flujo.....	25
3.2	Función: <i>Tracker20</i>	26
3.2.1	Entrada de variables	26
3.2.2	Variables de salida	28
3.3	Intervención del Usuario	30
4.	CAPÍTULO IV: Definición de Cámara	35
4.1	Cámara Seleccionada: GoPro Hero3+ Black	35
4.2	Edición de Vídeos: GoPro Studio	36

4.2.1 Corrección de distorsión óptica	36
4.2.2 Descompresión de videos: códec GoPro Cineform.....	38
5. CAPÍTULO V: Ensayo en Laboratorio	39
5.1 Descripción de Modelo Estructural.....	39
5.2 Montaje en Laboratorio	41
5.2.1 Acelerómetros y Ultrasónicos.....	41
5.2.2 Cámara de video	43
5.3 Metodología del ensayo	44
5.4 RESULTADOS.....	46
5.4.1 Respuesta e identificación de modos de vibrar a 3 metros	47
5.4.2 Respuesta e identificación de modos de vibrar a 6 metros	85
5.4.3 Respuesta e identificación de modos de vibrar a 8 metros	91
5.5 Análisis de Resultados.....	97
5.5.1 Desempeño sistema de adquisición visual.....	97
5.5.2 Desempeño usuario	97
5.5.3 Desempeño modelo estructural	99
5.5.4 Comparación de desplazamientos: GoPro y Ultrasónicos	100
5.5.5 Comparación de análisis espectral: GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros	101
5.5.6 Análisis de perturbaciones externas sobre la cámara.....	102
6. CAPÍTULO VI: Ensayo en Terreno	104
6.1 Descripción Estructura en Estudio	104
6.2 Montaje en Terreno.....	105
6.3 RESULTADOS.....	107
6.4 Análisis de Resultados.....	109
6.4.1 Desempeño sistema de adquisición visual.....	109
6.4.2 Movimiento registrado en cuerpo 3	110
6.4.3 Variables externas en el registro a considerar	110
7. CAPÍTULO VII: Conclusiones.....	112
7.1 Líneas de desarrollo.....	114
8. BIBLIOGRAFÍA	116
ANEXOS	117
A. Desplazamiento vertical y giro relativo (laboratorio)	117

B. Aceleración medida sobre modelo y GoPro..... 142

Índice de Tablas

Tabla 1. Topología para puntos característicos en una imagen. Et al Harris (1988).	10
Tabla 2. Distorsiones presentes en cámaras según la distancia focal.	20
Tabla 3. Comparación de tamaño en la memoria para una misma imagen (Figura 15), comprimida y sin comprimir.....	21
Tabla 4. Resultados y variables almacenadas en archivo de salida.	29
Tabla 5. Características de grabación GoPro Hero+3 Black.....	36
Tabla 6. Dimensiones del modelo estructural utilizadas como líneas de escala. ...	40
Tabla 7. Identificación de modos de vibrar, ensayo #1.	48
Tabla 8. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #1.	48
Tabla 9. Identificación de modos de vibrar, ensayo #2.	50
Tabla 10. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #2.	50
Tabla 11. Identificación de modos de vibrar, ensayo #3.	52
Tabla 12. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #3.	52
Tabla 13. Identificación de modos de vibrar, ensayo #4.	54
Tabla 14. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #4.	54
Tabla 15. Identificación de modos de vibrar, ensayo #5.	56
Tabla 16. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #5.	56
Tabla 17. Identificación de modos de vibrar, ensayo #6.	58
Tabla 18. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #6.	58
Tabla 19. Identificación de modos de vibrar, ensayo #7.	60
Tabla 20. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #7.	60
Tabla 21. Identificación de modos de vibrar, ensayo #8.	62
Tabla 22. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #8.	62
Tabla 23. Identificación de modos de vibrar, ensayo #9.	64
Tabla 24. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #9.	64
Tabla 25. Identificación de modos de vibrar, ensayo #10.	66
Tabla 26. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #10.	66
Tabla 27. Identificación de modos de vibrar, ensayo #15.	68
Tabla 28. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #11.	68
Tabla 29. Identificación de modos de vibrar, ensayo #12.	70
Tabla 30. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #12.	70
Tabla 31. Identificación de modos de vibrar, ensayo #13.	72
Tabla 32. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #13.	72
Tabla 33. Identificación de modos de vibrar, ensayo #14.	74
Tabla 34. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #14.	74
Tabla 35. Identificación de modos de vibrar, ensayo #21.	76
Tabla 36. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #21.	76
Tabla 37. Identificación de modos de vibrar, ensayo #22.	78
Tabla 38. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #22.	78
Tabla 39. Identificación de modos de vibrar, ensayo #23.	80

Tabla 40. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #23.....	80
Tabla 41. Identificación de modos de vibrar, ensayo #24.	82
Tabla 42. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #24.....	82
Tabla 43. Identificación de modos de vibrar, ensayo #25.	84
Tabla 44. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #25.....	84
Tabla 45. Identificación de modos de vibrar, ensayo #15.	86
Tabla 46. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #15.....	86
Tabla 47. Identificación de modos de vibrar, ensayo #16.	88
Tabla 48. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #16.....	88
Tabla 49. Identificación de modos de vibrar, ensayo #17.	90
Tabla 50. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #17.....	90
Tabla 51. Identificación de modos de vibrar, ensayo #18.	92
Tabla 52. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #18.....	92
Tabla 53. Identificación de modos de vibrar, ensayo #19.	94
Tabla 54. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #19.....	94
Tabla 55. Identificación de modos de vibrar, ensayo #20.	96
Tabla 56. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #20.....	96
Tabla 57. Factor de Escala medio y desviación estándar para las tres configuraciones.	98
Tabla 58. Valores medidos de armónicos y múltiplos del modo fundamental.	99

Índice de Figuras

Figura 1. Desplazamiento por piso de modelo estructural de seis niveles. H.Yoon et al (2016).	6
Figura 2. Análisis de frecuencias naturales para ala de viga I. Khuc et al. (2015). .	6
Figura 3. Descripción general de algoritmo de análisis.	7
Figura 4. Ramificación de disciplinas de la IA.	8
Figura 5. Representación gráfica búsqueda y evaluación de borde "Algoritmo de Harris"	9
Figura 6. Movimiento plano general de sólido rígido.	13
Figura 7. Condiciones iniciales entre puntos esquina y referencia de un cuerpo rígido.	14
Figura 8. Movimiento entre cuadros consecutivos.	14
Figura 9. Derivación de resultados por Mínimos Cuadrados No Lineales.	16
Figura 10. Sistema de coordenadas en imágenes.	17
Figura 11. Influencia del movimiento de la cámara sobre cuadros registrados.	18
Figura 12. Distancia focal en cámaras.	19
Figura 13. Distancia focal vs ángulo de vision en el registro de imágenes.	19
Figura 14. Distorsiones asociadas a la distancia focal en cámaras. Distorsión nula, cojín y ojo de pez o barril.	20
Figura 15. Efectos del acercamiento de la cámara sobre el Factor de Escala.	20
Figura 16. Comparación imagen almacenada sin comprimir (arriba) vs imagen comprimida (abajo).	22
Figura 17. Algoritmo de adquisición de movimiento sin intervención directa ni uso de objetivos.	25
Figura 18. Ventana inicial interactiva disparada por rutina Tracker.	30
Figura 19. Ventana inicial interactiva, acercamiento al cuerpo utilizando "Zoom On".	31
Figura 20. Etapa 1: Selección de puntos utilizando "cursor mira".	31
Figura 21. Etapa 2: Selección de Punto de Referencia utilizando "cursor mira". ..	32
Figura 22. Descripción de región de interés en una imagen.	32
Figura 23. Etapa 3: Definición de regiones de interés barriendo zonas con cursor.	33
Figura 24. Visualización desplegada posterior a la intervención del usuario: Detección de esquinas dentro de zonas de interés.	33
Figura 25. Cámara deportiva GoPro Hero3+ Black.	35
Figura 26. Herramienta para remoción de distorsión en GoPro Studio.	37
Figura 27. Exportación de archivos en formato Cineform a través de GoPro Studio.	38
Figura 28. Modelo experimental de estructura con cuatro pisos, cuerpos estudiados y dimensiones conocidas para cálculo de Factor Escala.	40
Figura 29. Sistema para el registro de datos de ultrasónicos y acelerómetros.	41
Figura 30. Fuente de poder y distribución de ultrasónicos, acelerómetros.	42
Figura 31. Instrumentación de cámara en tres ejes de movimiento.	43

Figura 32. Trípode posicionado a 3 metros del modelo.	44
Figura 33. Esquema de tipos de excitaciones en modelo estructural.....	45
Figura 34. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #1.	47
Figura 35. Desplazamientos horizontales en ensayo #1, GoPro y Ultrasónicos. ...	47
Figura 36. Análisis espectral ensayo #1, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	48
Figura 37. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #2.	49
Figura 38. Desplazamientos horizontales en ensayo #2, GoPro y Ultrasónicos ...	49
Figura 39. Análisis espectral ensayo #2, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	50
Figura 40. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #3.	51
Figura 41. Desplazamientos horizontales en ensayo #3, GoPro y Ultrasónicos ...	51
Figura 42. Análisis espectral ensayo #3, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	52
Figura 43. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #4.	53
Figura 44. Desplazamientos horizontales en ensayo #4, GoPro y Ultrasónicos. ...	53
Figura 45. Análisis espectral ensayo #4, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	54
Figura 46. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #5.	55
Figura 47. Desplazamientos horizontales en ensayo #5, GoPro y Ultrasónicos. ...	55
Figura 48. Análisis espectral ensayo #5, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	56
Figura 49. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #6.	57
Figura 50. Desplazamientos horizontales en ensayo #6, GoPro y Ultrasónicos. ...	57
Figura 51. Análisis espectral ensayo #6, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	58
Figura 52. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #7.	59
Figura 53. Desplazamientos horizontales en ensayo #7, GoPro y Ultrasónicos ...	59
Figura 54. Análisis espectral ensayo #7, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	60
Figura 55. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #8.	61
Figura 56. Desplazamientos horizontales en ensayo #8, GoPro y Ultrasónicos. ...	61
Figura 57. Análisis espectral ensayo #8, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	62
Figura 58. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #9.	63
Figura 59. Desplazamientos horizontales en ensayo #9, GoPro y Ultrasónicos. ...	63
Figura 60. Análisis espectral ensayo #9, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	64
Figura 61. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #10.	65
Figura 62. Desplazamientos horizontales en ensayo #10, GoPro y Ultrasónicos. ...	65
Figura 63. Análisis espectral ensayo #10, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	66
Figura 64. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #11.	67
Figura 65. Desplazamientos horizontales en ensayo #11, GoPro y Ultrasónicos. ...	67
Figura 66. Análisis espectral ensayo #11, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	68
Figura 67. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #12.	69
Figura 68. Desplazamientos horizontales en Ensayo #12, GoPro y Ultrasónicos. ...	69
Figura 69. Análisis espectral ensayo #12, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	70
Figura 70. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #13.	71
Figura 71. Desplazamientos horizontales en ensayo #13, GoPro y Ultrasónicos. ...	71
Figura 72. Análisis espectral ensayo #13, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	72
Figura 73. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #14.	73
Figura 74. Desplazamientos horizontales en ensayo #14, GoPro y Ultrasónicos. ...	73
Figura 75. Análisis espectral ensayo #14, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros. ...	74

Figura 76. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #21.	75
Figura 77. Desplazamientos horizontales en ensayo #21, GoPro y Ultrasónicos.	75
Figura 78. Análisis espectral ensayo #21, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	76
Figura 79. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #22.	77
Figura 80. Desplazamientos horizontales en ensayo #22, GoPro y Ultrasónicos.	77
Figura 81. Análisis espectral ensayo #22, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	78
Figura 82. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #23.	79
Figura 83. Desplazamientos horizontales en ensayo #23, GoPro y Ultrasónicos.	79
Figura 84. Análisis espectral ensayo #23, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	80
Figura 85. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #24.	81
Figura 86. Desplazamientos horizontales en ensayo #24, GoPro y Ultrasónicos.	81
Figura 87. Análisis espectral ensayo #24, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	82
Figura 88. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #25.	83
Figura 89. Desplazamientos horizontales en ensayo #25, GoPro y Ultrasónicos.	83
Figura 90. Análisis espectral ensayo #25, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	84
Figura 91. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #15.	85
Figura 92. Desplazamientos horizontales en ensayo #15, GoPro y Ultrasónicos.	85
Figura 93. Análisis espectral ensayo #15, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	86
Figura 94. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #16.	87
Figura 95. Desplazamientos horizontales en ensayo #16, GoPro y Ultrasónicos.	87
Figura 96. Análisis espectral ensayo #16, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	88
Figura 97. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #17.	89
Figura 98. Desplazamientos horizontales en ensayo #17, GoPro y Ultrasónicos.	89
Figura 99. Análisis espectral ensayo #17, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	90
Figura 100. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #18.	91
Figura 101. Desplazamientos horizontales en ensayo #18, GoPro y Ultrasónicos.	91
Figura 102. Análisis espectral ensayo #18, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	92
Figura 103. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #19.	93
Figura 104. Desplazamientos horizontales en ensayo #19, GoPro y Ultrasónicos.	93
Figura 105. Análisis espectral ensayo #19, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	94
Figura 106. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #20.	95
Figura 107. Desplazamientos horizontales en ensayo #20, GoPro y Ultrasónicos.	95
Figura 108. Análisis espectral ensayo #20, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.	96
Figura 109. Distribución de Factores Escala para distancias de 3,6 y 8 metros al modelo.	98
Figura 110. Identificación de modos de vibrar y armónicos.	100
Figura 111. Máxima diferencia, absoluta, de peaks para registros en ultrasónicos y sistema visual para un total de 25 ensayos.	101

Figura 112. Aceleraciones sobre GoPro y modelo estructural durante ensayo #3.	102
Figura 113. Aceleración GoPro en dirección de análisis (horizontal) durante ensayo #3.	102
Figura 114. Ubicación pasarela Luis Thayer Ojeda-Costanera Center. Google Earth.	104
Figura 115. Pasarela Luis Thayer Ojeda-Costanera Center, cuerpos estudiados y dimensiones conocidas para cálculo de Factor Escala.	105
Figura 116. Diagrama referencial de concurrencia a Mall Costanera Center proporcionado por Google.....	106
Figura 117. Posición de registro referencial. Google Earth.	106
Figura 118. Movimiento horizontal cuerpo 3.....	107
Figura 119. Movimiento vertical cuerpo 3.....	108
Figura 120. Giro relativo cuerpo 3.	108
Figura 121. Visualización de detección de esquinas para cuerpo #3.	109
Figura 122. Histograma de intensidades, normalizado, para el cuadro inicial del registro sobre Pasarela Luis Thayer Ojeda-Costanera Center.....	110
Figura 124. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #1.....	117
Figura 125. Giro relativo modelo experimental, ensayo #1.	117
Figura 126. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #2.....	118
Figura 127. Giro relativo modelo experimental, ensayo #2.	118
Figura 128. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #3.....	119
Figura 129. Giro relativo modelo experimental, ensayo #3.	119
Figura 130. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #4.....	120
Figura 131. Giro relativo modelo experimental, ensayo #4.	120
Figura 132. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #5.....	121
Figura 133. Giro relativo modelo experimental, ensayo #5.	121
Figura 134. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #6.....	122
Figura 135. Giro relativo modelo experimental, ensayo #6.	122
Figura 136. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #7.....	123
Figura 137. Giro relativo modelo experimental, ensayo #7.	123
Figura 138. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #8.....	124
Figura 139. Giro relativo modelo experimental, ensayo #8.	124
Figura 140. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #9.....	125
Figura 141. Giro relativo modelo experimental, ensayo #9.	125
Figura 142. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #10.....	126
Figura 143. Giro relativo modelo experimental, ensayo #10.	126
Figura 144. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #11.....	127
Figura 145. Giro relativo modelo experimental, ensayo #11.	127
Figura 146. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #12.....	128
Figura 147. Giro relativo modelo experimental, ensayo #12.	128
Figura 148. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #13.....	129
Figura 149. Giro relativo modelo experimental, ensayo #13.	129
Figura 150. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #14.....	130

Figura 151. Giro relativo modelo experimental, ensayo #14.	130
Figura 152. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #15.....	131
Figura 153. Giro relativo modelo experimental, ensayo #15.	131
Figura 154. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #16.....	132
Figura 155. Giro relativo modelo experimental, ensayo #16.	132
Figura 156. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #17.....	133
Figura 157. Giro relativo modelo experimental, ensayo #17.	133
Figura 158. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #18.....	134
Figura 159. Giro relativo modelo experimental, ensayo #18.	134
Figura 160. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #19.....	135
Figura 161. Giro relativo modelo experimental, ensayo #19.	135
Figura 162. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #20.....	136
Figura 163. Giro relativo modelo experimental, ensayo #20.	136
Figura 164. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #21.....	137
Figura 165. Giro relativo modelo experimental, ensayo #21.	137
Figura 166. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #22.....	138
Figura 167. Giro relativo modelo experimental, ensayo #22.	138
Figura 168. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #23.....	139
Figura 169. Giro relativo modelo experimental, ensayo #23.	139
Figura 170. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #24.....	140
Figura 171. Giro relativo modelo experimental, ensayo #24.	140
Figura 172. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #25.....	141
Figura 173. Giro relativo modelo experimental, ensayo #25.	141
Figura 174. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #1.	142
Figura 175. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #2.	142
Figura 176. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #3.	143
Figura 177. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #4.	143
Figura 178. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #5.	144
Figura 179. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #6.	144
Figura 180. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #7.	145
Figura 181. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #8.	145
Figura 182. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #9.	146
Figura 183. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #10.	146

Figura 184. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #11.	147
Figura 185. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #12.	147
Figura 186. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #13.	148
Figura 187. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #14.	148
Figura 188. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #15.	149
Figura 189. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #16.	149
Figura 190. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #17.	150
Figura 191. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #18.	150
Figura 192. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #19.	151
Figura 193. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #20.	151
Figura 194. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #21.	152
Figura 195. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #22.	152
Figura 196. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #23.	153
Figura 197. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #24.	153
Figura 198. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #25.	154

CAPÍTULO I: Introducción y Antecedentes Generales

Durante las últimas décadas, Chile, país ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, ha sido afectado por una gran cantidad de sismos. Las obras civiles del país han sido sometidas a constantes ciclos de carga y descarga generando diversos niveles de respuesta en los elementos que las componen, sobrepasando las máximas deformaciones elásticas y entrando a rangos no lineales de respuesta. Dicho esto, continuamente se producen modificaciones en las propiedades dinámicas de las estructuras, ya sea por la alta actividad sísmica como también por solicitaciones ambientales o antropogénicas, que pese a ser de menor magnitud, pueden presentar un contenido de frecuencias dañino para ciertas obras u edificaciones.

La instrumentación estructural es una de las ramas de la Ingeniería Civil que, entre otras cosas, tiene como objetivo monitorear y controlar estructuras con fines de estudio, prevención y evaluación de daños. Dicho lo anterior, resulta fundamental el desarrollo de nuevas herramientas acorde a los avances tecnológicos en la actualidad. En Chile, los acelerómetros son los dispositivos más utilizados en esta área, presentando ciertas ventajas sobre otros métodos de monitoreo, como un alto grado de precisión o el amplio rango de frecuencias que es capaz de registrar. Sin embargo, mantienen las principales falencias de los sensores convencionales: altos precios e intervención invasiva de estructuras.

En resumen, la instrumentación es una práctica fundamental para la ingeniería sísmica en Chile, ya que permite obtener información valiosa sobre el comportamiento de estructuras ante diversos tipos de cargas dinámicas. En este trabajo de memoria se busca desarrollar y proponer un método basado en cámaras de video compactas, de bajo costo, que permita superar las desventajas de la instrumentación convencional. La motivación principal de este proyecto es incentivar el desarrollo de nuevas tecnologías de monitoreo estructural, acorde a los avances tecnológicos de los últimos años, permitiendo a las personas acceder a cámaras de alta calidad con capacidades de registro suficientes para reconocer pequeños movimientos, como los generados por la excitación ambiental.

Actualmente se han propuesto distintas metodologías para la medición de vibraciones con cámaras de video, tal y como se expone en el documento de David Mas et al. (2012), en donde se detectan vibraciones mediante el *object tracking* de figuras “simples” como elipses que actúan de *target* u objetivos. También en el trabajo de Chong et al. (2014), se propone un sistema basado en objetivos distribuidos sobre la superficie de un modelo a escala en laboratorio y, posteriormente, sobre un puente de 57 metros de luz, logrando buenos resultados

pero conservando las limitaciones de este sistema prematuro de monitoreo, como lo es la intervención estructural. Un método de medición que no necesita recurrir a *targets* corresponde al expuesto por Bartilson et al. (2015), en donde se utiliza el algoritmo MQD (*Minimum Quadric Differences*) para reconocer vibraciones ambientales de una estructura vial de semáforos. Este método permite analizar patrones de movimientos, sin embargo, su complejidad implica un mayor tiempo para el procesamiento de información.

En el desarrollo de este documento se incursiona en un método que siga la línea de monitoreo tipo *target-less computer vision*, la cual no depende de objetivos sobre la superficie de la estructura estudiada.

1.1 Objetivo

Proponer, desarrollar y validar experimentalmente un sistema de monitoreo en base a cámaras de video de alta calidad, con costos accesibles de mercado. Debe ser capaz de cuantificar el movimiento plano de un modelo estructural sin contacto ni intervención directa. Además de evaluar y detallar plenamente su desempeño sobre estructuras reales en terreno.

1.2 Metodología

1. Revisar antecedentes y literatura especializada en el manejo de videos, orientada al registro de vibraciones estructurales. Investigar métodos de procesamiento e identificación de características en imágenes.
2. Implementar un algoritmo Matlab para el procesamiento de imágenes y registro espacial de objetos o puntos característicos.
3. Evaluar cámaras de video compactas y de alta calidad que cumplan los requisitos mínimos para el muestreo de datos.
4. Diseñar un modelo de laboratorio que asimile las características estructurales básicas de un comportamiento dinámico activo.
5. Organizar e implementar el montaje experimental en el laboratorio MECESUP.

6. Registrar la respuesta del modelo, excitado manualmente, mediante el método visual propuesto y métodos profesionales alternativos. Paralelamente, medir las perturbaciones ambientales sobre la cámara de video.
7. Evaluar y corregir distorsión óptica.
8. Validar resultados con los métodos alternativos de registro implementados. Evaluar perturbaciones externas sobre la cámara.
9. Organizar e implementar el montaje para el estudio en una estructura real. Describir e identificar condiciones favorables o desfavorables durante el periodo de registro e interpretar resultados.
10. Concluir.

1.3 Alcances

Capítulo I: Introducción y Antecedentes Generales

Introducción, motivación, objetivos y metodología para el desarrollo del trabajo.

Capítulo II: Marco Teórico.

Bases y teoría bajo la cual se estructura el algoritmo, planteamiento del problema a resolver, identificación de alteraciones en registros visuales y procesamiento de resultados.

Capítulo III: Algoritmo de Adquisición Visual

Descripción del flujo de información, variables involucradas y manejo de la rutina por parte de usuarios.

Capítulo IV: Definición de Cámara

Descripción de la cámara seleccionada, información general y costos de mercado. Manipulación de registros visuales (post edición).

Capítulo V: Ensayo en Laboratorio

Descripción del modelo estructural e instrumentación alternativa de medición exacta. Metodología de excitación estructural, resultados y registro de perturbación ambiental. Se compararán los resultados de desplazamiento y contenido espectral del método propuesto y los métodos alternativos en laboratorio.

Capítulo VI: Ensayo en Terreno

Descripción general de la estructura real y metodología de estudio. Dadas las condiciones no controladas de iluminación y ruido en el ensayo a la estructura real, se busca realizar un análisis crítico de las falencias y/o virtudes del método.

Capítulo VII: Conclusiones

Conclusiones generales y recomendaciones a futuro.

1.4 Resultados esperados

El resultado esperado, de este trabajo de memoria, consiste en un sistema capaz de medir el movimiento espacial de un modelo estructural en laboratorio, respaldado por instrumentos de monitoreo y viable en el registro de estructuras reales. El sistema debe estar compuesto por una rutina *Matlab* para el procesamiento de imágenes y una cámara de video seleccionada por su accesibilidad en el mercado. Además, se espera motivar el desarrollo de la tecnología óptica en la instrumentación y monitoreo estructural.

CAPÍTULO II: Marco Teórico

2.1 Dinámica de estructuras

Las estructuras están constantemente solicitadas por cargas cuyas magnitudes varían en el tiempo de forma rápida y periódica, denominadas cargas dinámicas. Para la instrumentación estructural, el efecto de las cargas sobre las obras civiles es el principal fenómeno de estudio, su conocimiento y cuantificación permiten desarrollar mejores normas de diseño, sistemas aisladores o herramientas para asegurar el funcionamiento y longevidad de la estructura.

El comportamiento de las estructuras se puede aproximar a un sistema elástico de masas acopladas, es decir, su respuesta ante cargas externas estará descrita por la combinación de modos de vibrar y un amortiguamiento intrínseco, que dependen de sus características geométricas, materiales (rigidez) y la inercia al movimiento (masa).

2.1.1 Monitoreo del comportamiento dinámico

La instrumentación de estructuras es un área esencial para la Ingeniería Civil, ya que corresponde a la primera fuente de información bajo la cual se desarrolla conocimiento sobre el comportamiento de sistemas solicitados, tanto por cargas estáticas como dinámicas. En Chile, la instrumentación es un ejercicio muy poco recurrente, principalmente por sus objetivos netamente científicos o de prevención como en embalses, sin embargo, métodos de monitoreo continuo como la Salud Estructural están siendo actualmente incorporados para optimizar y asegurar el rendimiento de estructuras en todo el mundo.

Como es sabido, la acción de cargas dinámicas se traduce en un comportamiento oscilatorio entorno a una posición de equilibrio. Dicha respuesta puede registrarse en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración, según las necesidades del estudio. Los métodos visuales de registro, actualmente desarrollados, permiten obtener fácilmente el movimiento de cuerpos, registrando y luego transformando el desplazamiento de formas o puntos característicos a unidades métricas. En el trabajo de H. YOON et al. (2016) se logró registrar exitosamente la respuesta de un modelo estructural de seis pisos, excitado por una mesa sísmica (ruido blanco), haciendo uso de algoritmos para el procesamiento de imágenes, una GoPro Hero Black3+ y un Smartphone LG G3.

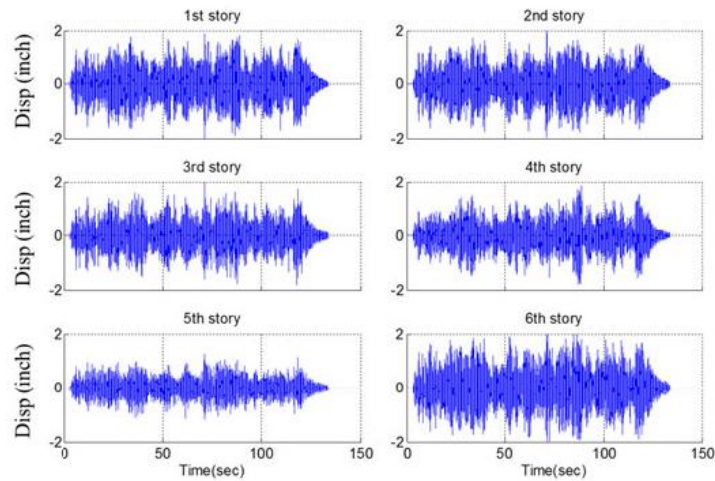


Figura 1. Desplazamiento por piso de modelo estructural de seis niveles. H.Yoon et al (2016).

El análisis espectral de registros basados en métodos visuales ha logrado captar modos superiores de vibrar. Dicha referencia corresponde al trabajo de Khuc et al. (2015), en donde se exponen los resultados del monitoreo del ala inferior de una viga de acero. Ésta, forma parte del esqueleto de soporte de un estadio de fútbol americano y fue monitoreada durante un evento deportivo con alta asistencia (específicamente en las ocasiones en que la hinchada disponía a celebrar una jugada).

El conocimiento del contenido espectral de un registro resulta realmente útil en la Ingeniería Civil, por ejemplo, para discriminar si el periodo de cargas dinámicas es suficientemente similar o menor a la natural como para generar altas amplitudes de oscilación y con ello, probables rangos plásticos de deformación.

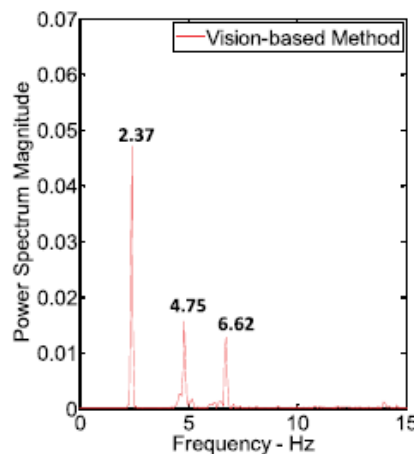


Figura 2. Análisis de frecuencias naturales para ala de viga I. Khuc et al. (2015).

2.2 Algoritmo de Adquisición Visual: Principios Básicos

Como medida introductoria, se explica en forma general los alcances y procesos mínimos que debe contemplar la rutina para obtener la respuesta de cuerpos en movimiento.

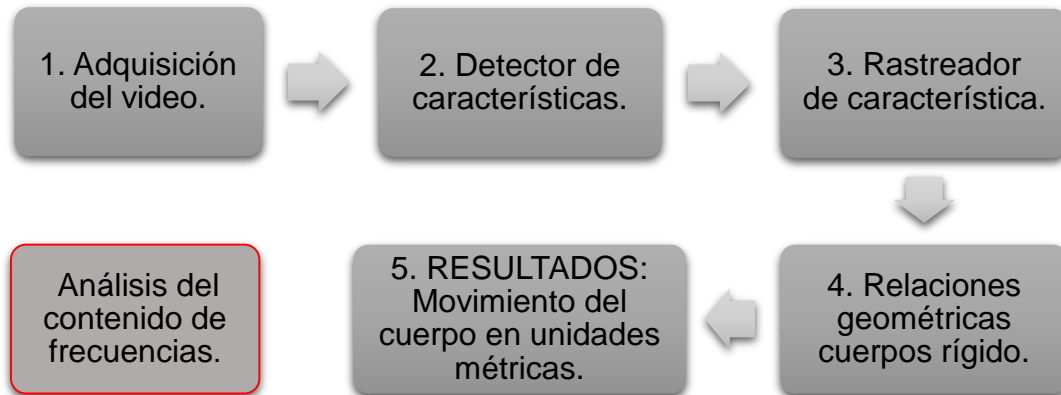


Figura 3. Descripción general de algoritmo de análisis.

La integración de video al lenguaje de programación (1) define los datos parámetros principales del registro, como la duración o las propiedades básicas del video (resolución y tasa de muestro o *frame rate*). La grabación de videos generalmente presenta ruidos debidos a vibraciones externas en los instrumentos de montaje o singularidades en la dimensión de los pixeles (distorsión óptica) que deben ser mitigados para un correcto estudio espacial. Además para el procesamiento de imágenes es necesario el uso de la totalidad de la información, por lo que se debe usar software para la descompresión de videos. Dichas particularidades serán descritas en la sección 2.6.

Los bloques (2) y (3) presentan los alcances que se buscan lograr con el procesamiento de imágenes. En primer lugar se debe identificar una característica robusta en información, para este trabajo de memoria, se utilizarán las esquinas (*corner points*) que son descritas como puntos discretos, fiables y significativos para una geometría, según Harris et al. (1998). Dicho esto se debe incursionar en métodos que aseguren su identificación (2) y posterior rastreo (3) cuadro a cuadro. Estos objetivos se asocian a los de la sub-área de las ciencias computacionales denominada Vision Artificial (sección 2.3).

Dada la variedad de configuraciones con las que se puede abordar un cuerpo usando la captura de puntos característicos, el siguiente paso (4) debe plantear las ecuaciones en 2D necesarias para procesar la información y obtener un único

resultado, representativo, del movimiento. La finalidad es proponer un método con una base física, geométrica y robusta en el procesamiento de la información disponible. En resumen, la sección 2.4 busca responder cómo y bajo qué relaciones se obtienen los resultados finales. Notar que analizar espacialmente puntos en imágenes implica el traspaso de coordenadas en pixeles a unidades métricas (sección 2.5).

El análisis vibratorio permitirá la identificación del contenido espectral de la señal registrada (movimiento del cuerpo), es decir, la determinación de los modos naturales de vibrar haciendo uso de algoritmos especializados. Este proceso se excluye de la rutina desarrollada debido a la variedad de modelos para el análisis espectral y la libre elección del usuario según las condiciones de la señal muestreada.

2.3 Visión Artificial: Procesamiento de imágenes

La Visión Artificial o *Computer Vision* corresponde a uno de los campos de la “Inteligencia Artificial”, área multidisciplinaria que hace uso de las ciencias de la computación, matemática y lógica para desarrollar sistemas cuyos procesos se asemejen al razonamiento humano ante problemas cotidianos.

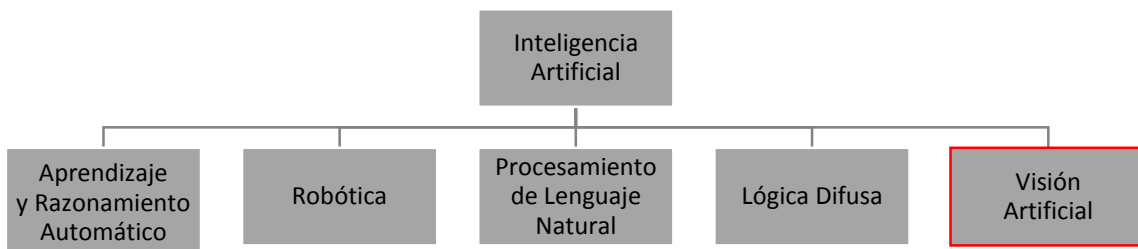


Figura 4. Ramificación de disciplinas de la IA.

El objetivo de la Visión Artificial es modelar matemáticamente registros digitales que involucren imágenes para permitir el procesamiento, análisis y comprensión de una computadora.

La velocidad con la que hoy en día se desarrollan las cámaras fotográficas o de video, ha permitido a las personas tener acceso registros de alta calidad, de tal forma que la Visión Artificial se ha incorporado durante los últimos años la cotidianidad. Un claro ejemplo es el reconocimiento facial en celulares o la

traducción de textos vía cámara, incorporado en Google Traductor (para dispositivos móviles). Cada aplicación utiliza algoritmos que han sido perfeccionados desde la década de los 80, cuando la evolución de las ciencias de la computación impulso el desarrollo de la Visión Artificial.

A continuación, se explican los fundamentos de los dos algoritmos involucrados en el procesamiento de imágenes. El primero cumple el deber de detectar y guardar las propiedades de color de las esquinas de interés. Por su parte, el segundo algoritmo involucrado tiene el deber de buscar, por congruencia, dicha esquina entre cuadros consecutivos.

2.3.1 Detector de Puntos Esquinas: Algoritmo de Harris-Stephens

Las esquinas, como parte de un borde, presentan características conservadoras en el umbral de detección (respecto a un borde), es decir, su topología no es propensa a cambios por pequeñas alteraciones en la imagen registrada (et al. Enebral (2009)). Básicamente, una esquina se caracteriza por ser una región de la imagen con cambios drásticos de intensidad en las direcciones horizontal y vertical.

El método de Harris utiliza la suma de diferencias al cuadrado (SSD), ecuación (1), como medida evaluativa de los cambios de intensidad presentes en una ventana local de la imagen Ω , es decir, en cambios pequeños ($\Delta x, \Delta y$) de la zona iterativa de análisis.

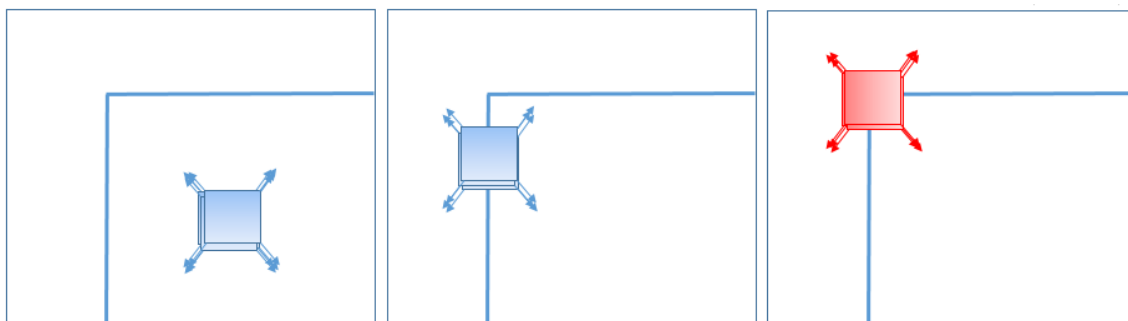


Figura 5. Representación gráfica búsqueda y evaluación de borde "Algoritmo de Harris"

$$E_{\Delta x, \Delta y} = \sum_{x, y \in \Omega} w_{x, y} [I_{x+\Delta x, y+\Delta y} - I_{x, y}]^2 = \sum_{x, y \in \Omega} w_{x, y} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y \right)^2 = (\Delta x \ \Delta y) M (\Delta x \ \Delta y)^T \quad (1)$$

Donde w corresponde a una máscara o filtro de tipo Gaussiano para evitar que la respuesta sea ruidosa, lo cual ocurre porque la ventana local es binaria y rectangular (et al. Harris (1988)). La matriz M , denominada “matriz de autocorrelación”, contiene las derivadas parciales de intensidad en las direcciones horizontal y vertical.

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 & \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right) \\ \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Los valores propios (α y β) de la matriz M indicarán la topología de la zona. En el caso de valores pequeños, la zona será caracterizada como *Uniforme*; si un valor es grande y el otro pequeño corresponderá a un *Borde* y en el caso de dos valores grandes se considerara como *Esquina*.

Con el motivo de reducir la carga computacional se utiliza la función de respuesta, ecuación (3), para determinar la topología de la zona, en vez de encontrar los valores propios de la matriz de autocorrelación. Esta tendrá valores positivos para *Esquinas*, negativos para *Bordes* y valores pequeños para regiones *Uniformes*.

$$M_c = Det(M) - k(Tr(M))^2 \quad (3)$$

Tabla 1. Topología para puntos característicos en una imagen. Et al Harris (1988).

Criterio	Topología
$M_c < 0$	Borde
$ M_c \sim 0$	Región Uniforme
$0 \ll M_c$	Esquina

2.3.2 *Tracker* de Puntos: Algoritmo Kanade-Lucas-Tomasi (KLT)

El algoritmo Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) corresponde a un método de seguimiento de características en un flujo o secuencia de imágenes. Se especializa búsqueda de regiones con texturas robustas en información, como lo son las esquinas (*corner points*) identificadas por el algoritmo de Harris. Este método dirige la búsqueda de puntos homólogos, entre dos imágenes " I_n " e " I_{n+1} ", con el gradiente espacial de intensidad " \bar{g} " y la condición de mínimos locales de la suma de las diferencias al cuadrado. El monitoreo de características se logra en un número reducido de iteraciones, garantía que entrega el hecho de que las imágenes son registradas en un periodo corto de tiempo, de manera tal, que el desplazamiento es lo suficientemente pequeño respecto a la fluctuación de información entre cuadros. En definitiva el algoritmo de Kanade-Lucas-Tomasi está diseñado para el estudio de videos.

KLT asume las siguientes suposiciones para funcionar de forma correcta:

- Entre I_n e I_{n+1} , es posible aproximar la transformación en un entorno Ω por desplazamientos rígidos de pocos pixeles y rotación nula.
- Entre I_n e I_{n+1} , se tiene similares condiciones de iluminación y adquisición. Dicho esto, se utiliza la suma de las diferencias al cuadrado como medida de distancia.

Como se dijo anteriormente, el monitoreo de características se realiza en periodos cortos de tiempo, luego el desplazamiento relativo \bar{d} es pequeño entre imágenes consecutivas:

$$\bar{x}' \approx \bar{x} + \bar{d} \quad (4)$$

$$I_n(\bar{x}) \approx I_{n+1}(\bar{x} + \bar{d}) \quad (5)$$

Para ésta aproximación, se busca minimizar el error cuadrático medio ε en la vecindad Ω del punto en consideración:

$$\varepsilon = \sum_{\bar{x} \in \Omega} \left(I_n(\bar{x}) - I_{n+1}(\bar{x} + \bar{d}) \right)^2 w(\bar{x}) \quad (6)$$

Siendo $w(\bar{x})$ una función de peso o ponderación y \bar{d} un valor muy pequeño, la aproximación de Taylor de primer orden se describe como:

$$I_{n+1}(\bar{x} + \bar{d}) \approx I_{n+1}(\bar{x}) + \bar{g}(\bar{x})\bar{d} \quad (7)$$

$$0 = \sum_{\bar{x} \in \Omega} (I_n(\bar{x}) - I_{n+1}(\bar{x}) - \bar{g}(\bar{x})\bar{d})^2 g(\bar{x})w(\bar{x}) \quad (8)$$

Dada la expresión de la ecuación (9) y reordenando, sin la dependencia explícita de la variable \bar{x} , se obtienen las ecuaciones (10) y (11), en su forma matricial:

$$(\bar{g}(\bar{x})\bar{d})\bar{g}(\bar{x}) = (\bar{g}(\bar{x})\bar{g}^T(\bar{x}))\bar{d} \quad (9)$$

$$\sum_{\Omega} (\bar{g}\bar{g}'w)\bar{d} = \sum_{\Omega} (I_n - I_{n+1})\bar{g}w \quad (10)$$

$$G\bar{d} = \bar{e} \quad (11)$$

Siendo G una matriz de 2x2, el problema de puntos homólogos se reduce a una matriz con incógnita $\bar{d} = (d_1, d_2)$, que representa el desplazamiento entre cuadros que resuelve el problema. Inicialmente se calcula \bar{e} como la diferencia entre I_n e I_{n+1} en la vecindad Ω con desplazamiento nulo, luego con el algoritmo de análisis numérico Newton-Raphson se mejora la aproximación de forma iterativa:

$$\begin{cases} \bar{d}_0 = 0 \\ \bar{d}_{k+1} = \left[\sum (\bar{g}(\bar{x} + \bar{d}_k)\bar{g}^T(\bar{x} + \bar{d}_k)w(\bar{x})) \right]^{-1} \left[\sum ([I_n(\bar{x}) - I_{n+1}(\bar{x} + \bar{d}_k)]\bar{g}(\bar{x} + \bar{d}_k)w(\bar{x})) \right] \end{cases} \quad (12)$$

La condición de convergencia de la ecuación que domina el algoritmo KLT (12), se da cuando el residuo $|\bar{e}|$ no pertenece a un mínimo local en la vecindad, sino que representa un mínimo global en Ω . Finalmente se resuelve para \bar{d} .

2.4 Análisis de Cuerpo Rígido

Las estructuras están compuestas, generalmente, por elementos en donde la acción de fuerzas externas genera deformaciones despreciables en comparación al desplazamiento espacial del cuerpo, luego se puede decir (conceptualmente) que “La distancia entre dos puntos cualesquiera permanece constante” (Condición Cinemática de Rigidez). En definitiva, se habla de cuerpos rígidos cuando el movimiento de partículas está definido, solamente, por la traslación y/o rotación del cuerpo.

Para efectos de este trabajo, se estudiará el movimiento plano en cuerpos que cumplan esta definición, ya sea en modelos experimentales o en estructuras reales.

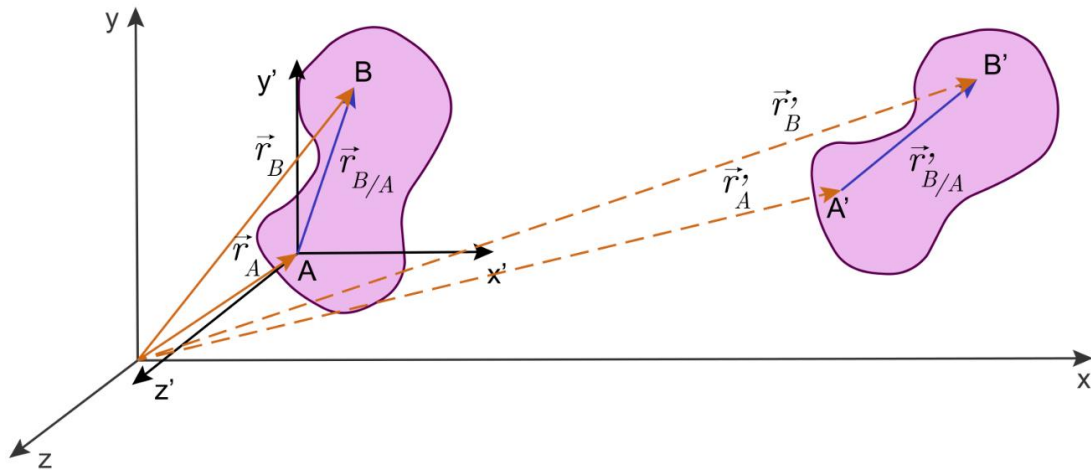


Figura 6. Movimiento plano general de sólido rígido.

2.4.1 Interacción y relaciones Puntos Esquinas-Punto de Referencia

El concepto de Punto de Referencia "Pr", como un punto interno del sólido rígido, nace de la necesidad de expresar el movimiento del cuerpo en un solo resultado representativo, conociendo previamente, la posición de los Puntos Esquina. Dado que Pr pertenece al sólido rígido se pueden definir relaciones geométricas que resuelvan el movimiento del cuerpo, siempre y cuando esté definido próximo al centro de masa. Planteando suficientes ecuaciones es posible mitigar errores mediante ajustes matemáticos (Mínimos Cuadrados No Lineales), respaldados por una base teórica (Cinemática de Sólido Rígido) consistente con los alcances de esta memoria.

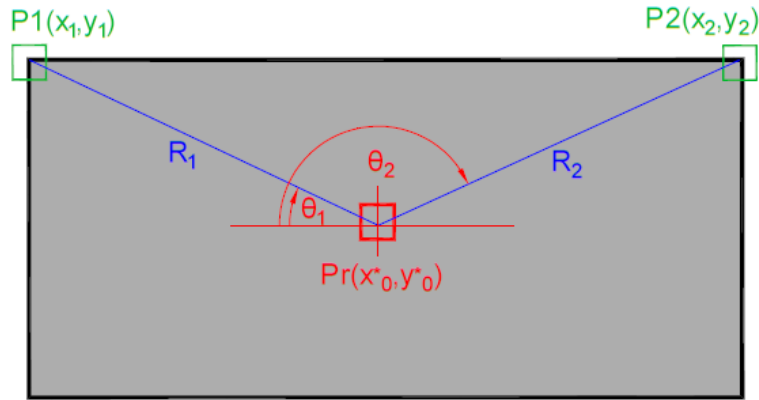


Figura 7. Condiciones iniciales entre puntos esquina y referencia de un cuerpo rígido.

La información sobre la posición de Pr en el primer cuadro (x_0^*, y_0^*) define las distancias $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, que separan los n Puntos Esquinas del Punto de Referencia, y el desfase de los mismos respecto a la horizontal. La Figura 7 muestra gráficamente la relación entre las variables geométricas de un cuerpo en el caso particular de dos esquinas rastreadas. Notar que Pr actúa como el centro de un plano cartesiano (misma convención de signos) y los ángulos θ_i tienen sentido positivo desde izquierda a derecha con origen en la horizontal.

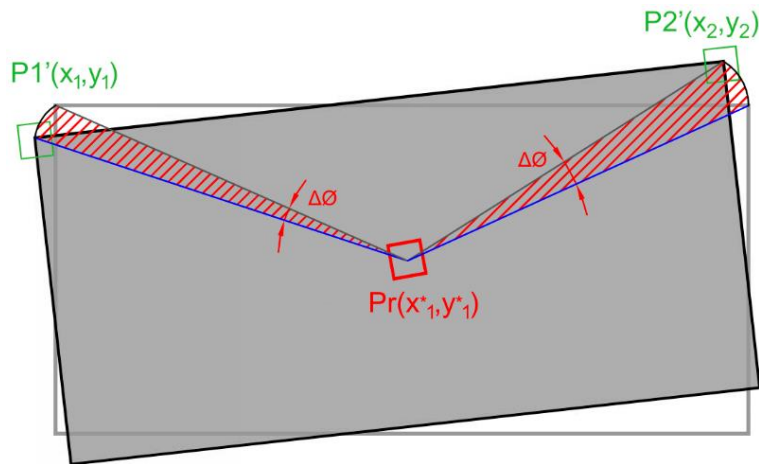


Figura 8. Movimiento entre cuadros consecutivos.

Las condiciones de sólido rígido, relaciones geométricas y las características de las vibraciones permiten plantear cuatro expresiones, sistema (13), para el movimiento entre dos cuadros consecutivos. Notar que las variables $\{x^*, y^*\}$ se interpretan como a la posición espacial del cuerpo y $\{\Delta\theta\}$ como el giro relativo respecto a la posición inicial.

$$\begin{cases} x^* = x_1 + R_1 \cos(\theta_1 + \Delta\theta) \\ y^* = y_1 + R_1 \sin(\theta_1 + \Delta\theta) \\ x^* = x_2 + R_2 \cos(\theta_2 + \Delta\theta) \\ y^* = y_2 + R_2 \sin(\theta_2 + \Delta\theta) \end{cases} \quad (13)$$

2.4.2 Solución problema Puntos Esquina-Punto de Referencia: Mínimos Cuadrados No Lineales

Como se explicó en la sección anterior, se pueden imponer ciertas relaciones geométricas en los cuadros del registro de un cuerpo en movimiento. Dichas relaciones generan dos ecuaciones de posición por cada esquina. Luego, se puede plantear un sistema de $2n$ ecuaciones (con n igual al número de esquinas) en cada cuadro del video, a excepción del primero, pues de este se establecen las condiciones iniciales.

$$\begin{cases} f_1 = x_1 \pm R_1 \cdot \cos(\vartheta_1 + \Delta\theta_j) - x_j^* \\ f_2 = y_1 \pm R_1 \cdot \sin(\vartheta_1 + \Delta\theta_j) - y_j^* \\ f_3 = x_2 \pm R_2 \cdot \cos(\vartheta_2 + \Delta\theta_j) - x_j^* \\ f_4 = y_2 \pm R_2 \cdot \sin(\vartheta_2 + \Delta\theta_j) - y_j^* \\ \dots \\ \dots \\ f_{2n-1} = x_n \pm R_n \cdot \cos(\vartheta_n + \Delta\theta_j) - x_j^* \\ f_{2n} = y_n \pm R_n \cdot \sin(\vartheta_n + \Delta\theta_j) - y_j^* \end{cases} \quad (14)$$

Notar que para resolver el sistema (14) se debe conocer la posición de al menos dos de sus esquinas (el sistema consta de tres incógnitas). Debido a la presencia de componentes no lineales en el sistema de ecuaciones, es necesario utilizar métodos de ajuste como Mínimos Cuadrados No Lineales.

$$\min_x \|f(\underline{x})\|_2^2 = \min_x (f_1(\underline{x})^2 + f_2(\underline{x})^2 + \dots + f_n(\underline{x})^2) \quad (15)$$

Se busca resolver el problema (15) para $\underline{x} = \{x_j^*, y_j^*, \Delta\theta_j\}$. El ajuste de los valores será independiente cuadro a cuadro para evitar que la mala calidad de un ajuste afecte el de cuadros vecinos. Como resultado final se obtienen los vectores $\{x, y, \Delta\theta\}$ de movimiento del cuerpo en todo el video.

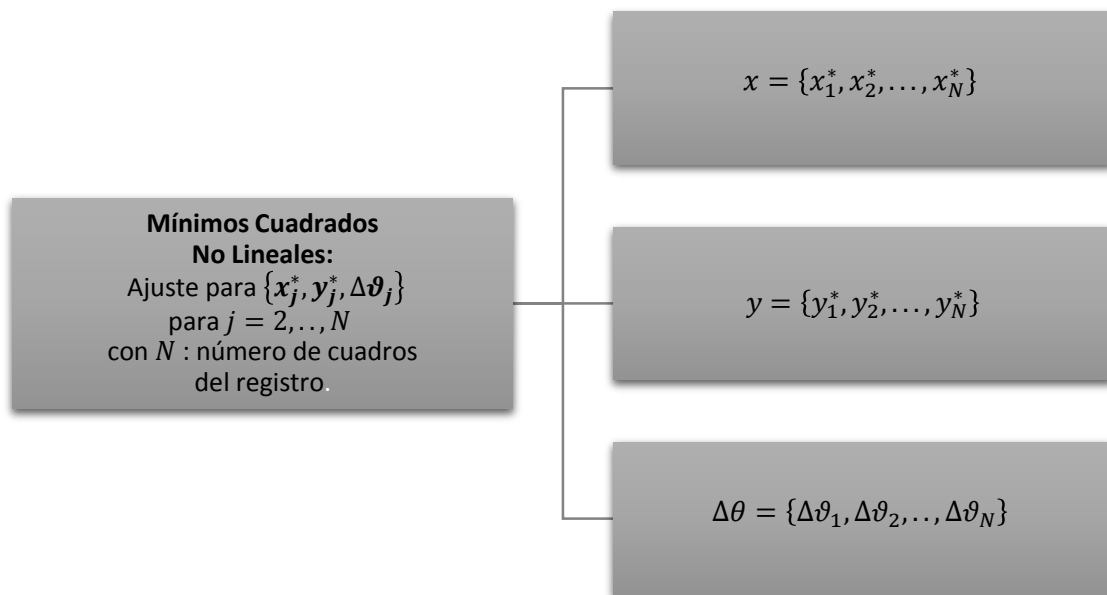


Figura 9. Derivación de resultados por Mínimos Cuadrados No Lineales.

Con el conocimiento de la tasa de cuadros por segundo (*frame rate*), se pueden llevar los resultados al espacio del tiempo.

2.5 Conversión píxeles a unidades métricas: Factor de Escala

El procesamiento de imágenes se basa en estudio de las unidades elementales denominadas píxeles. Es por esto que la posición de un punto está definida por el número de píxeles, en el sentido horizontal y vertical, que conforman el sistema interno de coordenadas espaciales de la imagen. En consecuencia, el resultado del rastreo espacial de puntos se presenta en unidades de píxeles. Notar en la Figura 10 que el origen del sistema de coordenadas se encuentra en la esquina superior de la imagen, esto se resuelve con operaciones básicas de traslación de coordenadas.

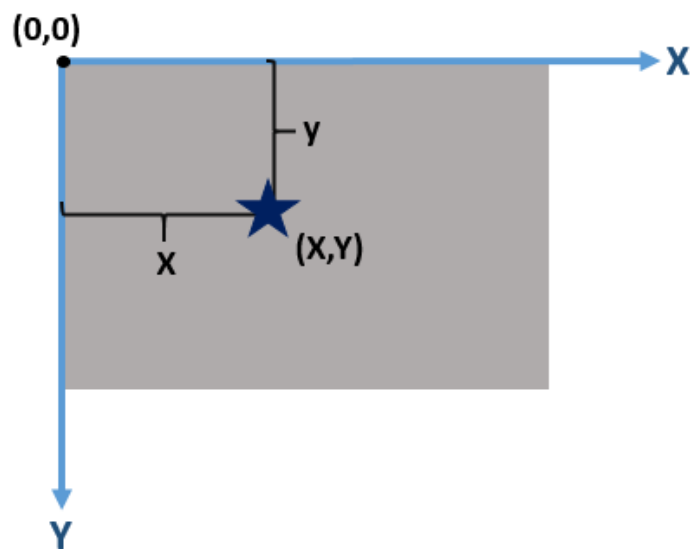


Figura 10. Sistema de coordenadas en imágenes.

Para resolver el problema de unidades se utiliza el Factor de Escala, ecuación (16), definido como la razón entre la magnitud, en píxeles, de un elemento lineal contenido en la imagen y su magnitud real conocida.

$$\text{Factor de Escala} = \frac{\text{Largo Real}}{\text{Largo en Imagen}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{píxeles}} \right] \quad (16)$$

2.6 Alteraciones y pérdida de información en registros visuales

2.6.1 Perturbaciones externas sobre la cámara

Dado que el objetivo de este trabajo es el registro de movimiento, es necesario estudiar las perturbaciones a cual se expone la cámara durante el ensayo en laboratorio. En primer lugar, se debe cuantificar las vibraciones que afectan el registro mediante sensores de alta sensibilidad como los acelerómetros. Luego, el uso dual de sensores en la cámara y en el cuerpo permite comparar la magnitud de ambos registros para determinar si las perturbaciones externas son lo suficientemente grandes como para alterar la señal muestreada.

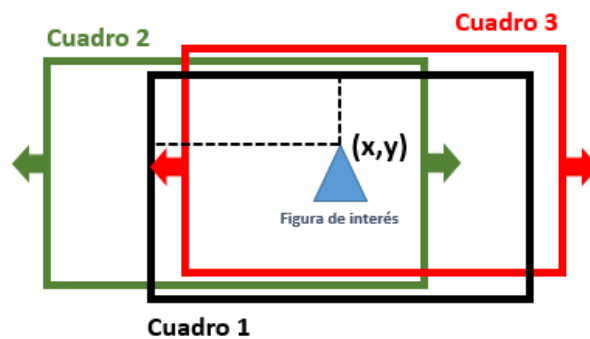


Figura 11. Influencia del movimiento de la cámara sobre cuadros registrados.

La Figura 11 muestra que, para efectos de este trabajo, vibraciones suficientemente grandes producirían un cambio relativo de la posición (x,y) sin necesidad de que el cuerpo se esté desplazando. Luego, los resultados no mostrarían la realidad del movimiento, pues la vibración de la cámara estará contenida en la del cuerpo.

2.6.2 Falta de homogeneidad en píxeles: Distorsión óptica

Se define como distancia o longitud focal de un dispositivo óptico a la distancia entre el lente (elemento óptico encargada de desviar los rayos de luz) y el foco (punto donde convergen los rayos de luz). La longitud focal tiene asociado un ángulo de visión como se muestra en la Figura 13.

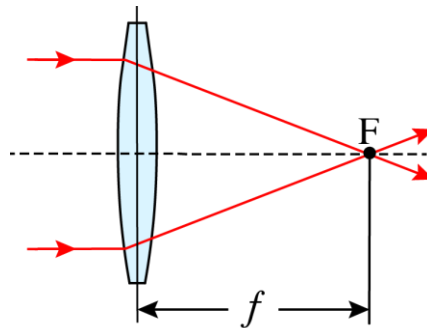


Figura 12. Distancia focal en cámaras.

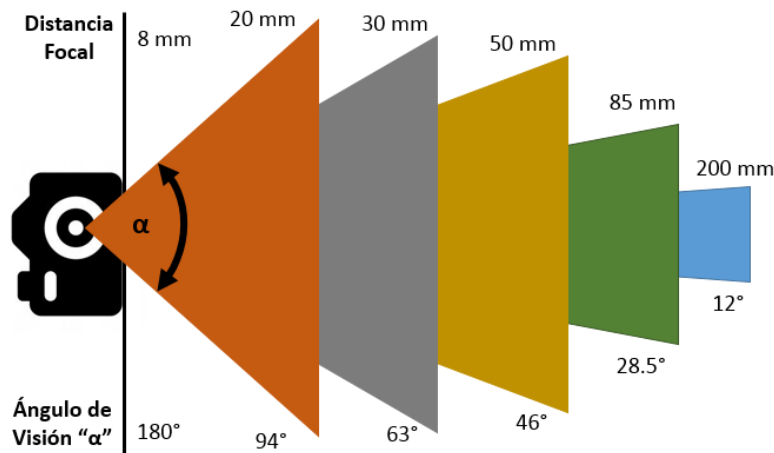


Figura 13. Distancia focal vs ángulo de vision en el registro de imágenes.

Para ángulos de visión grandes o distancias focales pequeñas se logra una distorsión óptica denominada ojo de pez o distorsión de barril (típicamente usada en cámaras deportivas), produciendo una heterogeneidad de las dimensiones entre píxeles de la parte superior, inferior y centro de la imagen. Para eliminar distorsiones como esta, se requiere utilizar editores del proveedor de la cámara con modelos propios de corrección o tener conocimiento pleno de la configuración óptica para recurrir a algoritmos alternativos ajustados a la cámara.

Tabla 2. Distorsiones presentes en cámaras según la distancia focal.

Objetivos	Distorsión asociada	Distancia focal [mm]	Ángulo de visión [°]
Angulares	Ojo de pez	8-25	180-60
Estándar	Normal	25-60	60-25
Teleobjetivos	Cojín	60-160	25-10

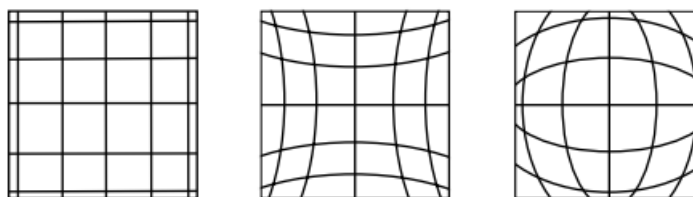


Figura 14. Distorsiones asociadas a la distancia focal en cámaras. Distorsión nula, cojín y ojo de pez o barril.

Como consecuencia de no remover la distorsión, el desplazamiento de puntos será erróneo, ya que el traspaso a dimensiones métricas se realizará mediante un Factor de Escala no representativo de la realidad.

Existe otro fenómeno relacionado a la heterogeneidad de píxeles que, al contrario de la distorsión óptica, se produce entre los píxeles de distintos cuadros y no sobre los del mismo. Éste corresponde al alejamiento o acercamiento del plano de grabación. El cálculo del Factor Escala, usualmente, se realiza sobre un cuadro aislado del registro, luego la magnitud en píxeles de una misma dimensión diferirá entre imágenes donde ocurra alejamiento o acercamiento del sensor. Finalmente el Factor Escala calculado, inicialmente, será inconsistente para cuadros afectados.

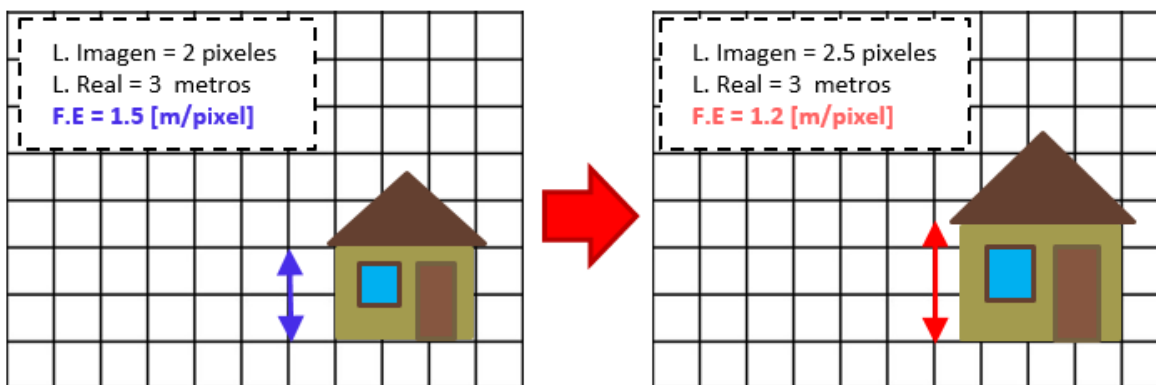


Figura 15. Efectos del acercamiento de la cámara sobre el Factor de Escala.

2.6.3 Pérdidas de calidad: Compresión de archivos

Hoy en día, debido a la alta calidad con la que se graban videos y la capacidad limitada de almacenamiento, se necesita recurrir a procesos de compresión de archivos para asegurar un almacenamiento rápido y acorde a las capacidades de los dispositivos, ya sean celulares, cámaras deportivas o profesionales.

La reducción de datos opera bajo la propuesta de que muchos datos, antes de la compresión, no son necesarios para percibir una buena calidad del registro. La compresión se lleva a cabo en macro-bloques de pixeles vecinos, estos son comparados cuadro a cuadro de forma que el códec de compresión solo almacenará las diferencias entre ellos, reduciendo considerablemente la información almacenada pero asegurando un registro visualmente aceptable.

Intuitivamente, la compresión de videos traerá archivos bajos en calidad (en la mayoría de los casos) y de acuerdo a cuanta información se “reduzca” para compensar el almacenamiento, la calidad se verá cada vez más afectada. Un claro ejemplo de compresión es la configuración de *Word*, donde por default las imágenes se comprimen para generar archivos de menor tamaño pero con una evidente pérdida de calidad.

Tabla 3. Comparación de tamaño en la memoria para una misma imagen (Figura 15), comprimida y sin comprimir.

Compresión	Tamaño []
No	43,8 KB
Si	2,26 MB

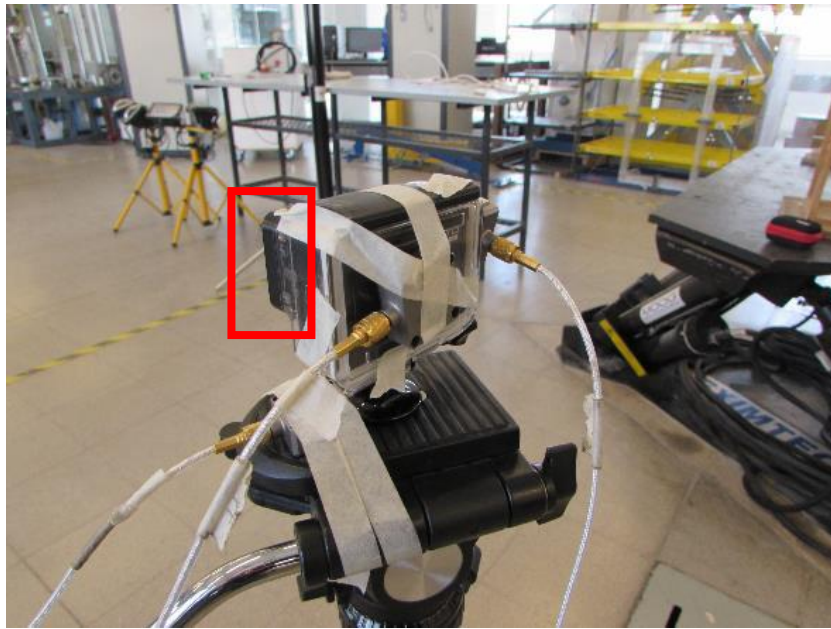
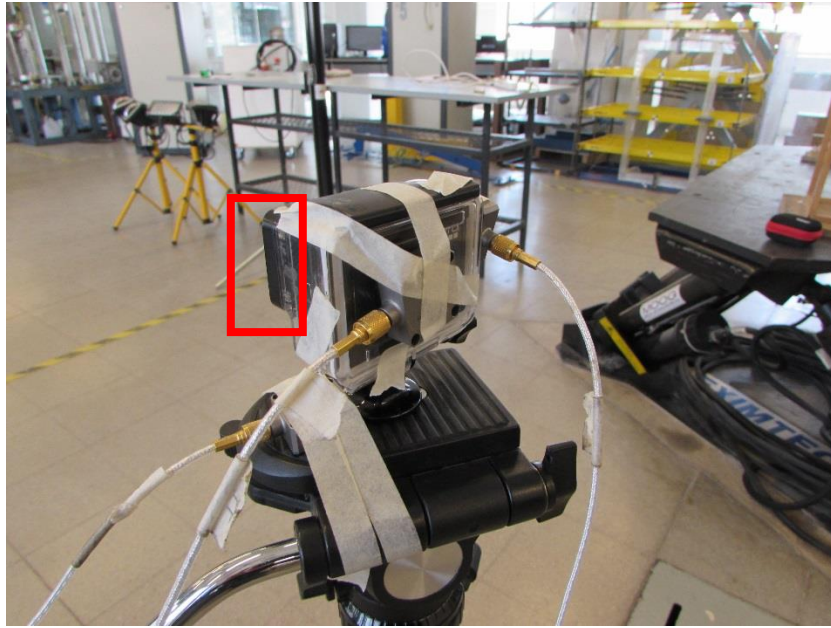


Figura 16. Comparación imagen almacenada sin comprimir (arriba) vs imagen comprimida (abajo).

2.7 Análisis de Espectral: Transformada Rápida de Fourier

Toda obra civil tiene características propias y que la diferencia de las demás, ya sea en la distribución de sus elementos, materiales de construcción o en sus dimensiones. Luego, su comportamiento dinámico, modos de vibrar y frecuencias o periodos naturales, no será el mismo en proyectos de igual naturaleza. Este hecho es el que hace que distintas estructuras reaccionen diferente ante una misma sollicitación dinámica.

Hasta ahora, se tienen todas las herramientas necesarias para obtener el comportamiento vibratorio de un cuerpo haciendo uso de métodos visuales. Analizar dicha respuesta en el espacio de las frecuencias permitirá identificar los modos de vibrar inmersos en el sistema, comparar sus frecuencias con las de la forzante dinámica y obtener conocimiento sobre su potencial de daño.

El análisis de frecuencias se llevara a cabo con el método de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), cuya aplicación sobre una señal x , de largo N , está dada por la Ecuación (17). Este método es una versión más rápida de la Transformada de Fourier Discreta (DFT), cuyo nombre nace del hecho de que es aplicada a señales discretas (digitales).

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (17)$$

$$\text{con } \omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$$

Mientras que el cálculo de la FFT toma aproximadamente $N \cdot \log_2(N)$ operaciones, la DFT realiza aproximadamente N^2 .

CAPÍTULO III: Algoritmo de Adquisición Visual

Ya desarrollada la teoría de la rutina para el análisis visual de cuerpos en movimiento, se entra en el detalle de cada sección que la compone. Se utilizó el software matemático Matlab en su versión 2015a, bajo el lenguaje M de programación.

Los algoritmos de mayor participación son los correspondientes al análisis de imágenes, la función para la detección de esquinas (Harris-Stephens) “*detectHarrisFeatures*” y el rastreador de puntos (KLT) integrado al objeto “*vision.PointTracker*”. Ambos son parte del *Computer Vision System Toolbox* que proporciona a los usuarios herramientas para el diseño y simulación de sistemas de visión artificial o procesamiento de videos en general.

El objetivo principal de este capítulo es dar a entender a nivel usuario el completo flujo de información de la rutina. Además se ejemplifica esquemáticamente cómo funciona el programa, se especifica variables de entrada y requisitos mínimos de operación.

3.1 Diagrama de Flujo

La Figura 17 representa gráficamente el proceso final del algoritmo planteado en la sección 2.2, complementado de acuerdo a las condiciones y necesidades autoimpuestas en el desarrollo de este trabajo.

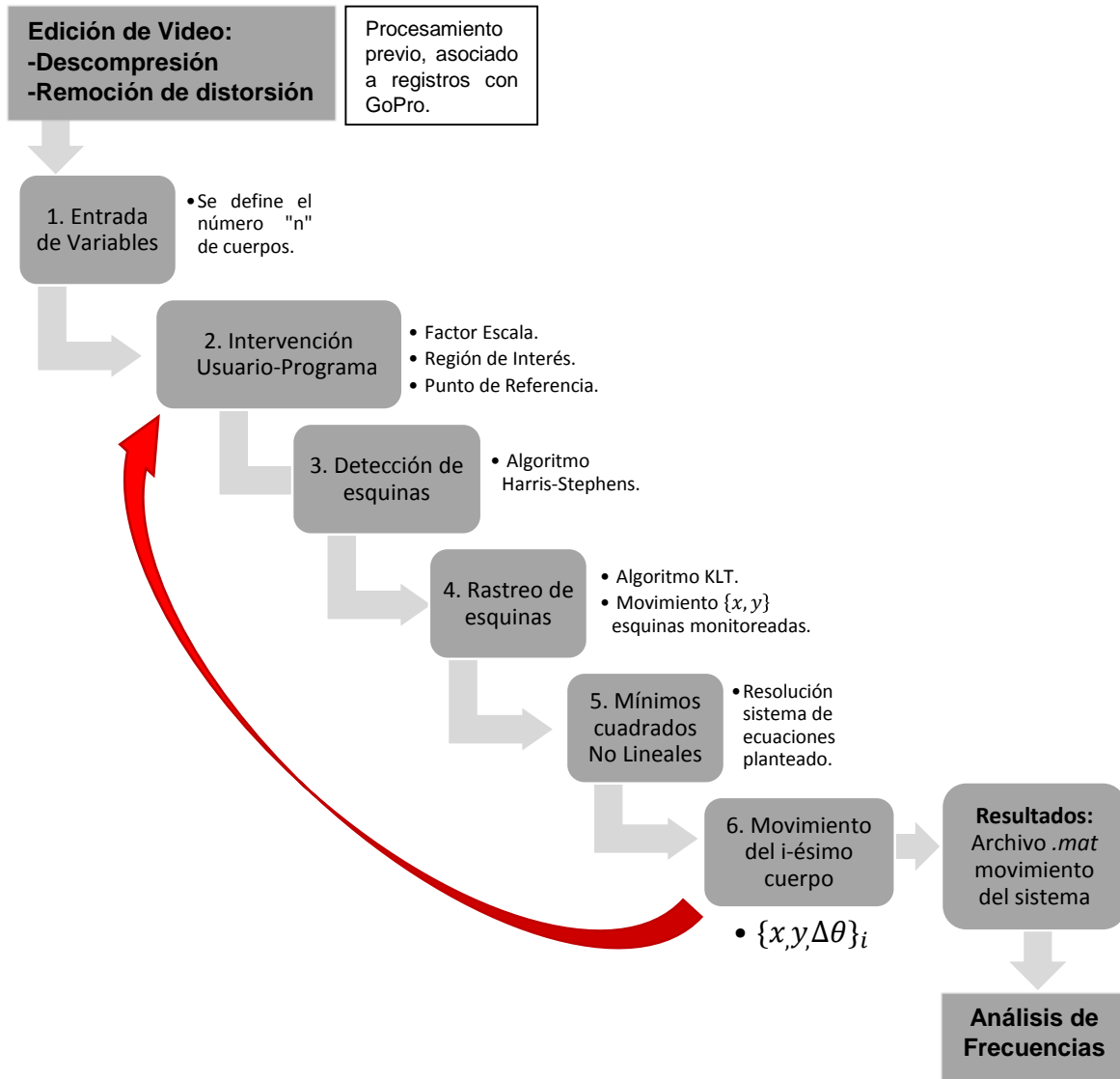


Figura 17. Algoritmo de adquisición de movimiento sin intervención directa ni uso de objetivos.

3.2 Función: Tracker20

El algoritmo es programado en Matlab como una función con variables de entrada y salida detalladas en los puntos 3.2.1 y 3.2.2. La función trabaja bajo el nombre de *Tracker* y la sintaxis es la siguiente:

```
[MovCRef, MovEsq, FrRate, minX, minY]=tracker(FileIn, nEsquinas, LargoReal, FileOut, igraf, ayuda, videoAcc, TolF, TolXX, MaxItera)
```

3.2.1 Entrada de variables

Para facilitar el ingreso de variables se pone a disposición del usuario un *Script* denominado *Planilla*, que tal como supone su nombre, permite manipular en forma ordenada los valores de ingreso. A continuación se describe cada una de las variables de entrada:

- **FileIn:** Corresponde al nombre del archivo que contiene el registro por estudiar. El ingreso debe contener el formato del video, por ejemplo: 'Video5.avi'.
- **nEsquinas:** Vector que contiene el número de esquinas dispuestas a monitorear en cada cuerpo, define el número y etiqueta de cuerpos. Ejemplo: [3 4 3 2], es decir, el cuerpo 1 y 3 tendrán tres esquinas de interés, el cuerpo 2 cuatro y el cuerpo 4 tan solo dos. Como se explicó en la sección 2.4.2, es necesario monitorear al menos dos esquinas del cuerpo.
- **LargoReal:** Variable tipo *cell* que contiene vectores de largo arbitrario con las dimensiones lineales conocidas para cada cuerpo. Ejemplo: {[60 55], [60 60 40], [80], [80 60 50]}, luego, el cuerpo 1 tiene dos dimensiones visualmente medibles de magnitud 60 y 55 (en unidades métricas), el cuerpo 2 tiene tres dimensiones y así sucesivamente.
- **FileOut:** Nombre de la carpeta archivada una vez corrida la rutina, en la carpeta de trabajo o *Current Folder* (que contendrá toda la información de las mediciones que se ejecuten con el programa).

- `Igraf`: Toma valores 1 o 0. El valor 1 permite disparar todos los diagramas de movimiento de los cuerpos estudiados, valor cero restringe la visualización.
- `Ayuda`: Toma valores 1 o 0. El valor 1 permite disparar un documento de texto con instrucciones básicas del funcionamiento de la rutina, valor cero restringe la información.
- `videoAcc`: Toma valores 1 o 0. El valor 1 permite la reproducción del monitoreo de Puntos Esquinas detectados, valor cero la restringe. La finalidad es disminuir la carga computacional si el usuario estima conveniente.
- `TolF`: Valor asociado a la optimización no lineal de las ecuaciones planteadas en la sección 2.4. Determina la tolerancia sobre la condición $f(x)$ para el término de iteración.
- `TolXX`: Valor asociado a la optimización no lineal de las ecuaciones planteadas en la sección 2.4. Determina la tolerancia sobre el paso x de evaluación para la condición $f(x)$.
- `MaxItera`: Valor asociado a la optimización no lineal de las ecuaciones planteadas en la sección 2.4. Determina el número máximo de iteraciones para lograr resolver $f(x)$ bajo la condición de término.

3.2.2 Variables de salida

Existen dos formas de manipular los resultados. La primera de ellas es en el *Workspace*, una vez corrida la rutina para todos los cuerpos del sistema, y la segunda es por medio de un archivo guardado bajo el nombre de la variable `FileOut`, ubicado en la capeta actual de trabajo. La idea es tener disponible la información en la interfaz para analizar e inspeccionar, preliminarmente, los resultados y además, respaldada como archivo para manipulaciones futuras del usuario.

La información disponible en el *Workspace* corresponde a las variables de salida de la función:

- `MovCRef`: Variable tipo *cell* que contiene el vector de tiempo, movimiento horizontal, vertical y giro del Punto de Referencia para cada cuerpo.
- `MovEsq`: Variable tipo *cell* de tamaño $3 \times \text{NúmeroCuerpos}$ que contiene el vector de tiempo, la matriz de movimiento horizontal, vertical de los puntos esquinas monitoreados en cada cuerpo.
- `FrRate`: Cuadros por segundo registrados por el video, equivalente a la frecuencia de muestreo.
- `minX`: Mínimo desplazamiento entre cuadros en sentido horizontal.
- `minY`: Mínimo desplazamiento entre cuadros en sentido vertical.

Por otro lado, los resultados guardados en carpeta están almacenados en un archivo tipo *struct* llamado "Cuerpos". Este último contiene la siguiente información.

Tabla 4. Resultados y variables almacenadas en archivo de salida.

Nombre	Tipo de información
t	Vector de tiempo. Relaciona un tiempo i -ésimo con el cuadro i -ésimo capturado por la cámara.
xCRef	Posición horizontal del Punto de Referencia en cada cuadro en dimensiones métricas.
yCRef	Posición vertical del Punto de Referencia en cada cuadro en dimensiones métricas.
thetaCRef	Giro del Punto de Referencia en cada cuadro en radianes.
xoyoCRef	Posición inicial (x, y) del Punto de Referencia seleccionado.
xEsq	Posición horizontal del Punto de Referencia en cada cuadro (en dimensiones métricas).
yEsq	Posición vertical del Punto de Referencia en cada cuadro (en dimensiones métricas).
yoxoEsq	Posición inicial (x, y) de los Puntos Esquinas detectados.
infoVideo	Información general del video.
minXY	Mínimo desplazamiento entre cuadros en sentido horizontal y vertical (en dimensiones métricas).

3.3 Intervención del Usuario

Luego de ingresar las variables y ejecutar la rutina, se inician los procesos en donde el usuario toma un papel fundamental para la obtención precisa de resultados. En esta etapa el programa registra, internamente, la magnitud (en pixeles) de las dimensiones lineales conocidas o líneas de escala, la posición inicial del Punto de Referencia y la definición, estratégica, de las regiones para la búsqueda de Puntos Esquinas.

Esta etapa inicia con el disparo del primer cuadro del video como se muestra en la Figura 18. De forma paralela, si el usuario opta por la opción de recibir ayuda (variable de entrada), se desplegará el archivo de texto con la orientación necesaria.

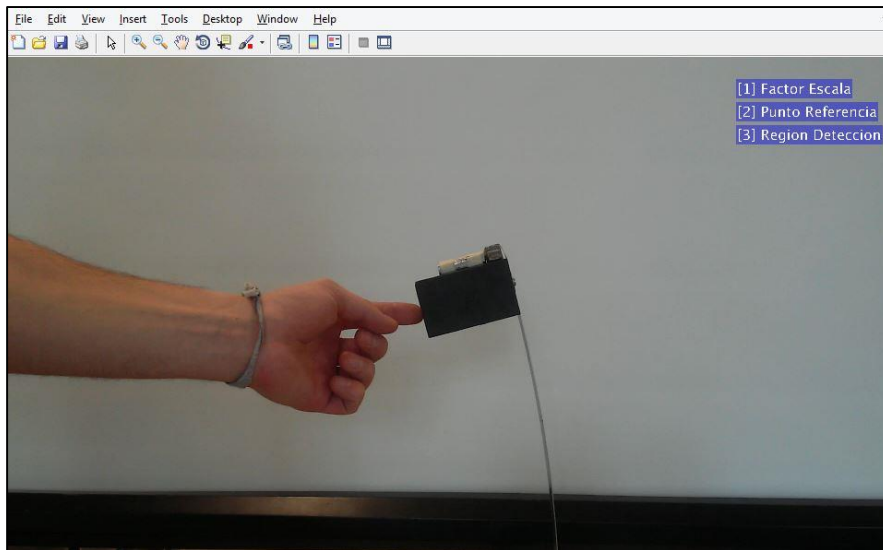


Figura 18. Ventana inicial interactiva disparada por rutina Tracker.

Por default, se permite al usuario realizar un zoom digital en la imagen con la herramienta “Zoom On” del visor de imágenes.

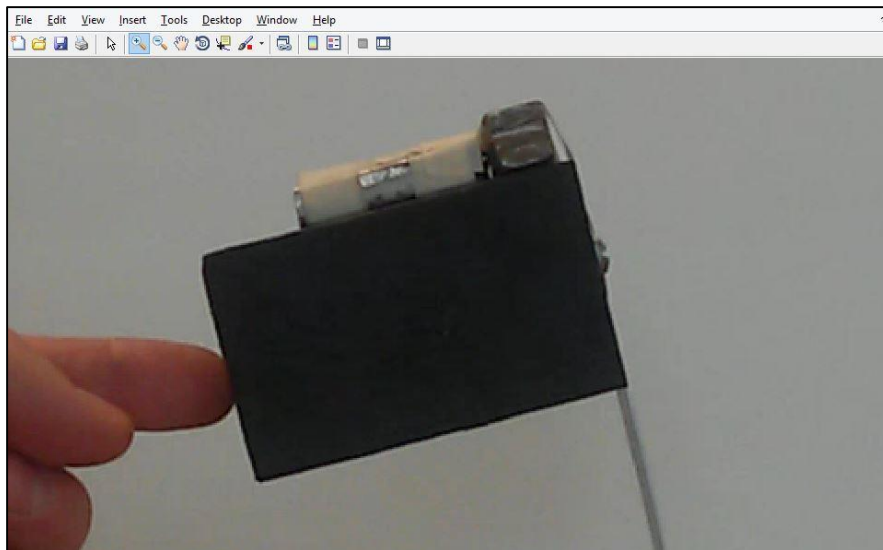


Figura 19. Ventana inicial interactiva, acercamiento al cuerpo utilizando “Zoom On”.

A continuación, se inicia el proceso de medición de dimensiones lineales para el cálculo del Factor Escala. Para poder acceder al “cursor mira”, que facilita la selección de puntos, es necesario hacer un “Click” aleatorio sobre la imagen ampliada. Luego, se deben seleccionar, consecutivamente, los dos puntos que forman cada una de las dimensiones ingresadas.

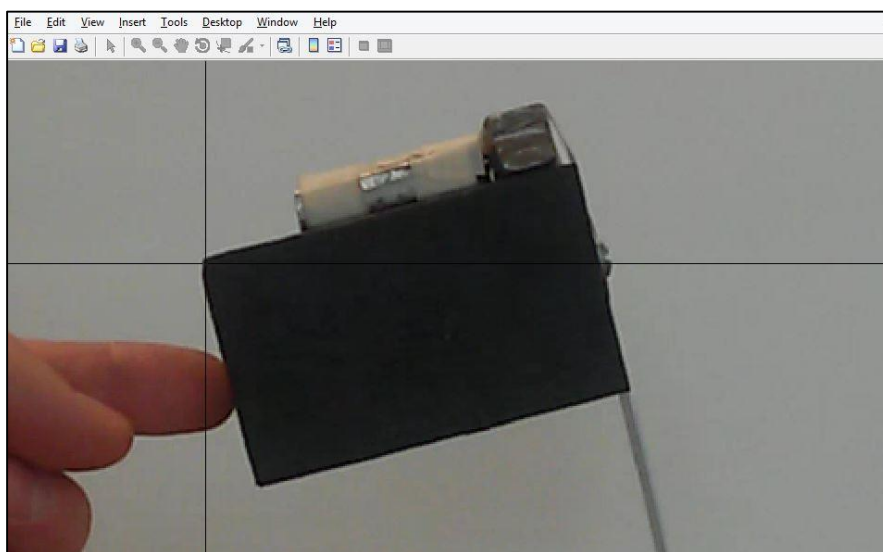


Figura 20. Etapa 1: Selección de puntos utilizando "cursor mira".

Después de definir las líneas de escala, inmediatamente se debe seleccionar el Punto de Referencia según el usuario estime conveniente. Se recomienda elegir puntos que se aproximen al centro de masa del cuerpo.

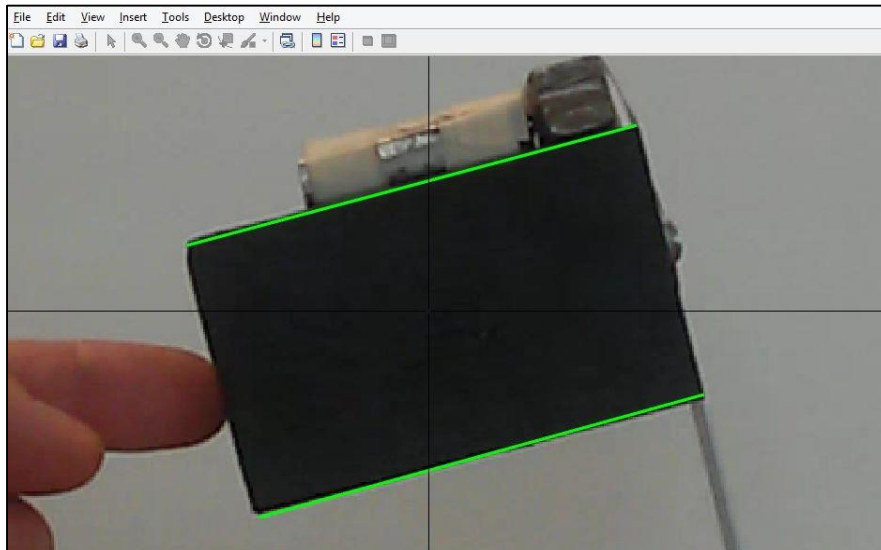


Figura 21. Etapa 2: Selección de Punto de Referencia utilizando "cursor mira".

Finalmente, con el objetivo de reducir la carga computacional se introduce el uso de Regiones de Interés. Básicamente, definen una subimagen sobre la cual los algoritmos de visión artificial actuarán de manera óptima, pues, son ubicados de manera estratégica para disminuir el número de iteraciones en la toma de decisiones.

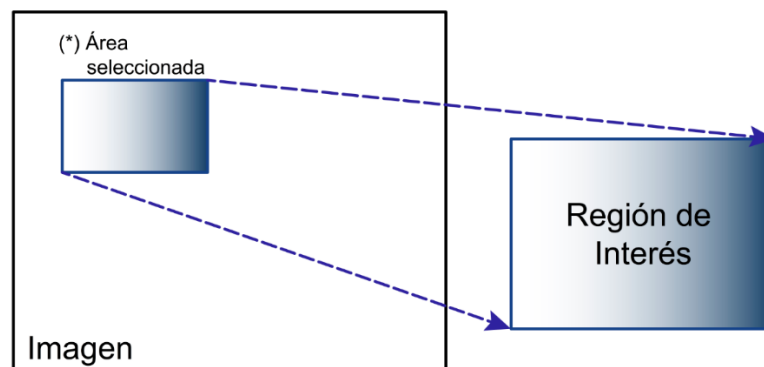


Figura 22. Descripción de región de interés en una imagen.

Para definir las, el usuario debe encerrar con el cursor las zonas donde desee detectar una esquina, desechando así, áreas con información no relevante.

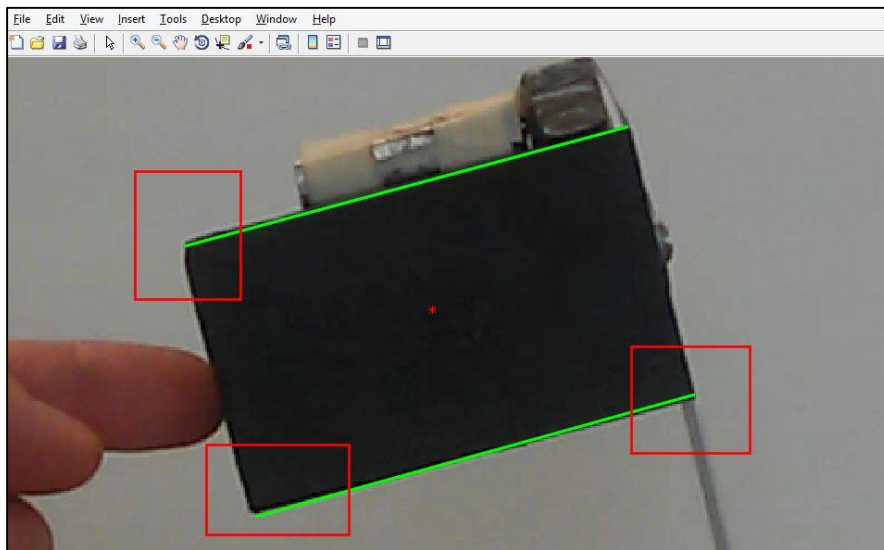


Figura 23. Etapa 3: Definición de regiones de interés barriendo zonas con cursor.

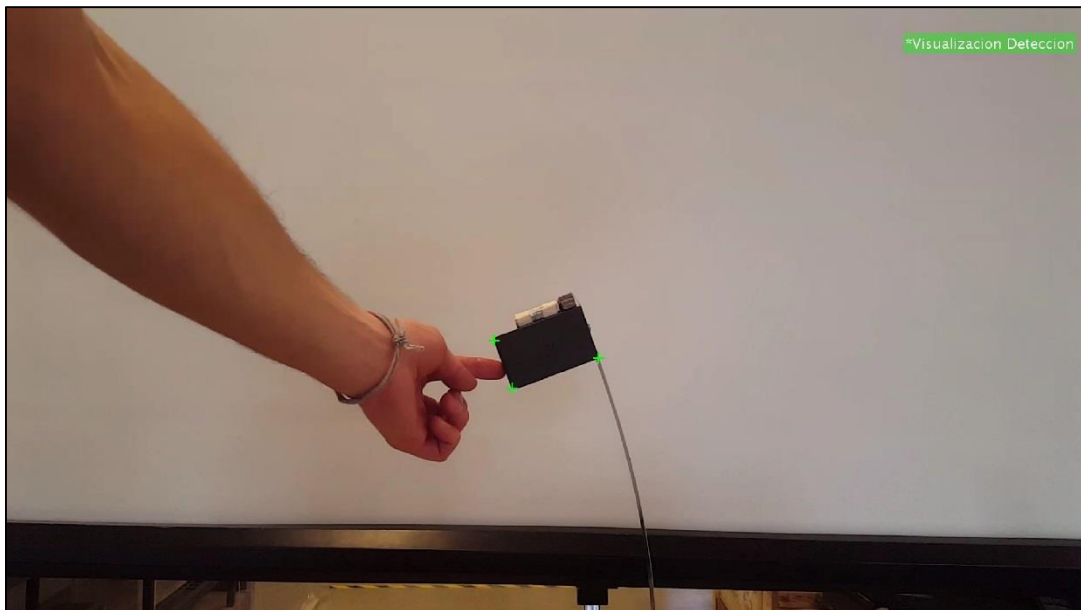


Figura 24. Visualización desplegada posterior a la intervención del usuario: Detección de esquinas dentro de zonas de interés.

Luego de estas tres etapas, se despliega una imagen con el resultado de la detección de esquinas, Figura 24. Posteriormente se reproduce el video (siempre que el usuario elija la opción de visualización) e internamente se rastrea y guarda la información de los puntos esquinas

El usuario debe repetir el proceso explicados un número de veces equivalente a la cantidad de cuerpos definidos inicialmente. En el ejemplo descrito se tiene solo un cuerpo, luego automáticamente no se reinicia el proceso y se obtienen los resultados.

CAPÍTULO IV: Definición de Cámara

La definición de la cámara de video es parte fundamental y complementaria para la rutina desarrollada anteriormente. En el presente capítulo, se especificará la cámara de video seleccionada que será parte del sistema de instrumentación, sus características y costos de mercado.

4.1 Cámara Seleccionada: GoPro Hero3+ Black

Una de las características de este trabajo de memoria, consiste en utilizar cámaras de mercado cuyo nivel adquisitivo esté al alcance de usuarios promedio. Por lo mismo se ha decidido utilizar cámaras deportivas que, durante el último tiempo, se han hecho populares entre las personas por la alta calidad de grabación, fácil transporte y la disponibilidad gratuita de software para la post edición de fotografías o videos. Dicho esto, se selecciona la cámara GoPro Hero+3 Black con un precio sugerido por la página oficial* de 399 US\$ y cuyas características se resumen en la Tabla 5.



Figura 25. Cámara deportiva GoPro Hero3+ Black.

* <https://es.gopro.com/support/articles/hero3plus-camera-comparison>

Tabla 5. Características de grabación GoPro Hero+3 Black

Calidad de grabación	Fps (cuadros por segundo)	Campo de visión
4K (16:9)	15, 12, 5	Ultra Gran Angular
4K (17:9)	12	Ultra Gran Angular
2.7K (16:9)	30, 25	Ultra Gran Angular Medio
2.7K (17:9)	24	Ultra Gran Angular Medio
1440p (4:3)	48, 30, 25, 24	Ultra Gran Angular
1080p (16:9)	60, 50, 48,30 25, 24	Ultra Gran Angular Medio Estrecho
1080p SuperView (16:9)	28,30, 25, 24	Ultra Gran Angular
960p (4:3)	100, 60, 50 ,48	Ultra Gran Angular
720p (16:9)	120, 100, 60 ,50	Ultra Gran Angular Medio Estrecho
720p SuperView (16:9)	100, 60 50, 48	Ultra Gran Angular
WVGA (16:9)	240	Ultra Gran Angular

4.2 Edición de Videos: GoPro Studio

Este software facilita el manejo y creación de videos de calidad profesional. Su disponibilidad es gratuita en la página oficial y está especialmente diseñado para las características ópticas intrínsecas de cada versión de GoPro.

4.2.1 Corrección de distorsión óptica

Debido a su uso como cámaras deportivas, las GoPro poseen la característica de tener objetivos gran angular en su óptica interna. Como se explicó en la sección 2.6.2, la distorsión óptica conlleva a una falta de homogeneidad en las imágenes, en este caso el tipo de alteración corresponde al denominado ojo de pez o barril.

En el caso de que el usuario quiera remover la distorsión de un video, GoPro Studio facilita una herramienta de corrección (Figura 26) diseñada para la configuración de grabación de las cámaras. Ésta entrega un registro cuyo movimiento plano en el cuadro carecerá de distorsión óptica.

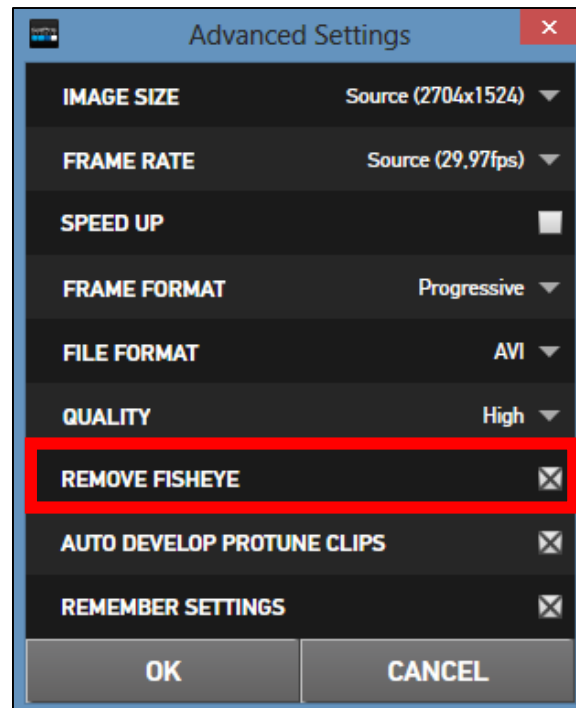


Figura 26. Herramienta para remoción de distorsión en GoPro Studio.

4.2.2 Descompresión de videos: códec GoPro Cineform

El primer paso en cualquier flujo de trabajo de GoPro Studio es convertir los archivos de origen al formato GoPro Cineform, como proceso previo a la edición de los mismos. Este formato o códec funciona como un intermedio digital (DI), es decir, una copia optimizada exacta de la información del archivo de video original.

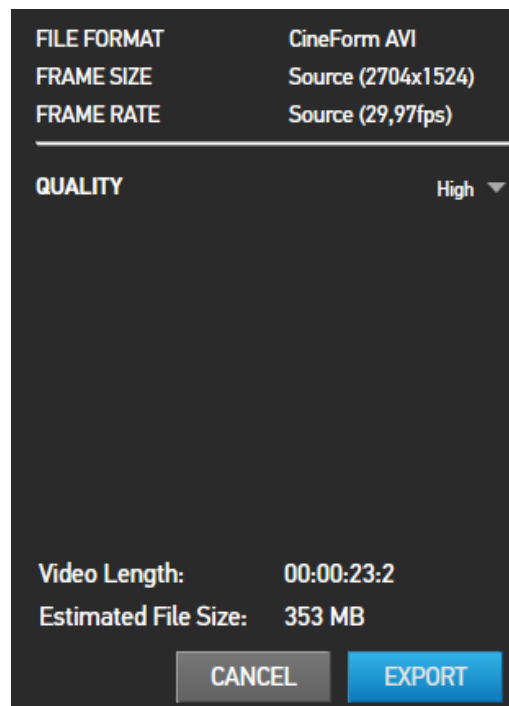


Figura 27. Exportación de archivos en formato Cineform a través de GoPro Studio.

Finalmente, luego del proceso de edición, el archivo puede ser exportado en formato *Cineform*, consiguiendo una calidad de imagen superior, la totalidad de la información cuadro a cuadro en el video y una reproducción rápida en cualquier ordenador.

CAPÍTULO V: Ensayo en Laboratorio

Para validar los resultados entregados por el sistema visual propuesto, es necesario montar un ensayo experimental con condiciones controladas, variación de parámetros (distancia de medición) y métodos convencionales de instrumentación (acelerómetros y ultrasónicos) para, posteriormente, comparar la respuesta del modelo estructural ensayado.

El experimento se lleva a cabo en el laboratorio MECESUP, ubicado en las inmediaciones de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de Universidad de Chile.

5.1 Descripción de Modelo Estructural

Se diseñó un modelo estructural representativo de un edificio de cuatro pisos. Cada piso está hecho de madera de pino y las columnas de zunchos de acero. Las columnas se encuentran empotradas a una base de madera anclada a una “mesa” de hormigón masivo parte del laboratorio. Tiene una altura de 101 [cm] y un ancho, aproximado, de 20 [cm] (detalles Tabla 6).

El modelo fue estructurado con una rigidez tal que se puedan inducir, al excitarla, modos superiores de respuesta sin exceder las limitaciones espaciales del montaje o alterar negativamente el funcionamiento de la instrumentación. Los cuerpos monitoreados y las dimensiones utilizadas para el cálculo del Factor Escala se especifican en la Figura 28. Como Punto de Referencia se procurará seleccionar un pixel lo más cercano al centro del cuerpo.

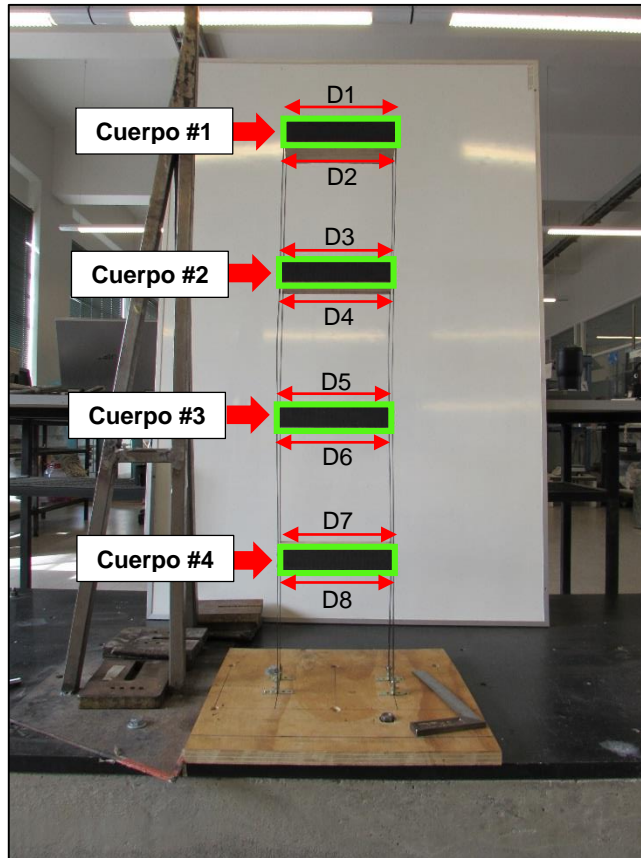


Figura 28. Modelo experimental de estructura con cuatro pisos, cuerpos estudiados y dimensiones conocidas para cálculo de Factor Escala.

Tabla 6. Dimensiones del modelo estructural utilizadas como líneas de escala.

Dimensión	[mm]
D1	199,3
D2	199,3
D3	198,5
D4	198,5
D5	199
D6	199
D7	200
D8	200

5.2 Montaje en Laboratorio

5.2.1 Acelerómetros y Ultrasónicos

Se usaron sensores de desplazamiento y aceleración para obtener la respuesta del modelo. Ambos serán utilizados como registros de comparación para el movimiento lateral de la estructura (ultrasónicos) y el contenido de frecuencias (acelerómetros y ultrasónicos). Los datos fueron registrados por un procesador, con un respectivo sistema de adquisición de datos y fuente de energía.

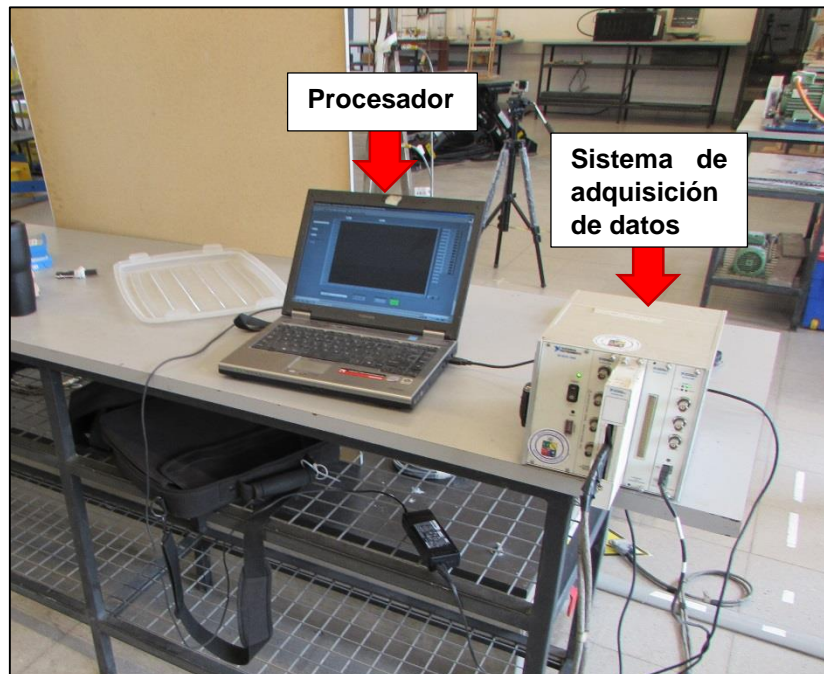


Figura 29. Sistema para el registro de datos de ultrasónicos y acelerómetros.

Los sensores de ultrasonidos o ultrasónicos emiten ondas sonoras que rebotan con cuerpos cuya distancia se desea medir. Al ser reflejadas, el sensor esta capaz de registrar el eco producido, convertirlo en señales eléctricas y para luego transformarlas en unidades métricas según ecuaciones lineales de calibración (específicas para cada sensor). Se utilizaron cuatro ultrasónicos marca BANNER, con precisión de 1 [mm], un rango de medición aproximadamente de 3 a 30 [cm] y operación de -20° a 60° Celsius.

Estos fueron adheridos a un pedestal, empotrado a la mesa de hormigón, y distribuidos por niveles a una distancia cercana a los 17.5 [cm] para asegurar no sobrepasar el rango de medición.

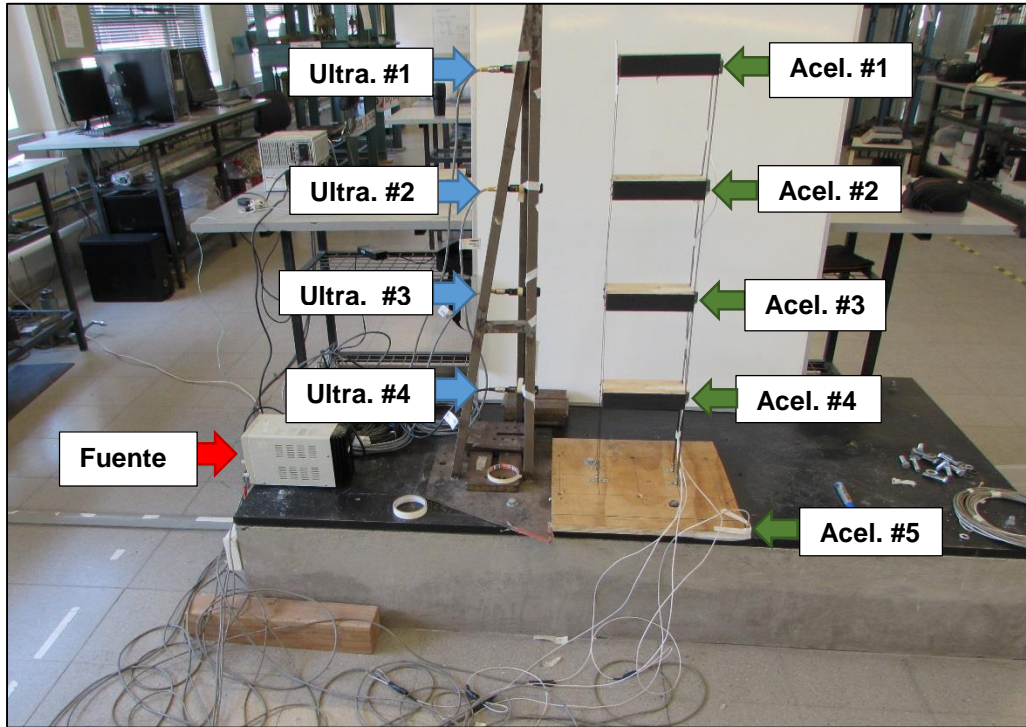


Figura 30. Fuente de poder y distribución de ultrasónicos, acelerómetros.

Por otro lado se utilizaron 8 acelerómetros uniaxiales, distribuidos en el modelo, base y la cámara según la Figura 30 y Figura 31. Corresponden a acelerómetros de capacitancia variable compuestos por placas internas fijas y móviles, a medida que fuerzas de aceleración actúan sobre el sensor los cambios de capacitancia se registran y la aceleración puede ser determinada en base a relaciones matemáticas. Los acelerómetros fueron fabricados por KISTLER, se caracterizan por un bajo nivel de ruido en eventos de baja frecuencia, estabilidad de temperatura y un rango de -2 a 2 [g] de detección.

5.2.2 Cámara de video

Como medida básica para la estabilidad de la cámara se utilizó un trípode provisto de burbujas niveladoras que aseguran la horizontalidad de la GoPro. Sin embargo, resulta conveniente estudiar las vibraciones bajo las cuales puede verse afectada la grabación, tal como expuso en la sección 2.6.1. Para aquello se adherieron acelerómetros en los tres ejes de movimientos de la cámara (asegurando la consistencia de la medición horizontal respecto a los acelerómetros en el modelo).

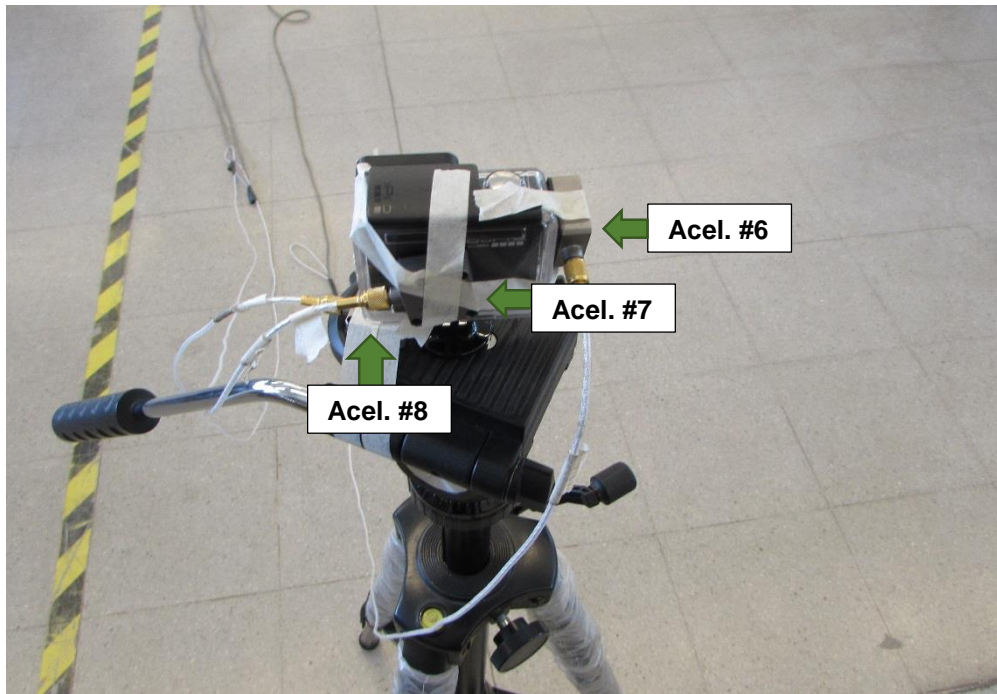


Figura 31. Instrumentación de cámara en tres ejes de movimiento.

5.3 Metodología del ensayo

Los ensayos fueron realizados a tres distancias: 3, 6 y 8 metros. Dimensiones previamente medidas y marcadas para luego plomarse con el eje central del trípode. El objetivo principal de variar las distancias es evaluar cuanto se puede perturbar la respuesta forzando la capacidad óptica de la cámara seleccionada. Mientras que a tres metros de distancia solo se busca verificar el funcionamiento del método.



Figura 32. Trípode posicionado a 3 metros del modelo.

La forma de excitar la estructura consiste en desplazamientos o golpes que se realizan manualmente, tal como se esquematiza en la Figura 32. Desplazamiento en el cuerpo superior (A), golpes en el tren inferior (B) y golpes distribuidos en los tres cuerpos inferiores (C). El objetivo es inducir movimientos uniformes (A), relativamente fáciles de registrar, con amplia participación del primer modo de vibrar y excitaciones en donde se busca que el contenido de frecuencia abarque modos superiores (B y C).

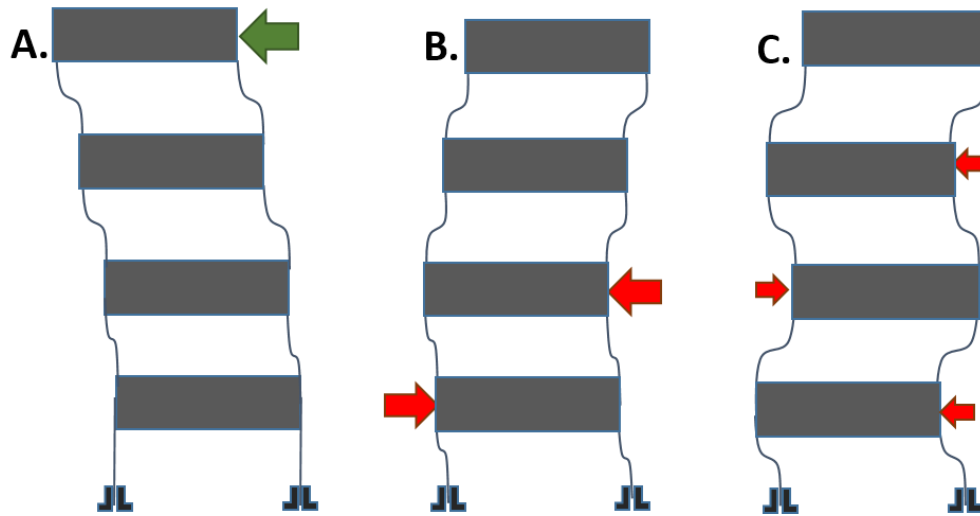


Figura 33. Esquema de tipos de excitaciones en modelo estructural.

El tipo de excitación en casa ensayo se especifica en la sección de Resultados, específicamente en análisis de frecuencias. Notar que A, B y C se ordenan según intensidad de la excitación.

5.4 RESULTADOS

Los resultados expuestos corresponden al análisis del desplazamiento horizontal y contenido de frecuencias de un total de 25 ensayos. Los resultados correspondientes al desplazamiento vertical y giro relativo $\{y, \Delta\theta\}$ se adjuntan en la sección Anexos. El archivo *Planilla* utilizado para ingresar las variables de la rutina *Tracker* es el siguiente:

```
FileIn='V1.avi'; %Nombre del Video
nEsquinas=[3 3 3 3]; %Número de esquinas monitoreadas por cuerpo (Define
numero de cuerpos)
LargoReal={[199.3 199.3],[198.5 198.5],[199 199],[200 200]}; %Dimensiones
lineales conocidas del cuerpo
FileOut='ResVid1'; %Nombre de archivo para resultados
igraf=1; % Graficar:1 - No Graficar:0
ayuda=0; % Activar anotaciones de ayuda:1 - Desactivar anotaciones de
ayuda:0
videoAcc=1; % Activar video de monitoreo:1 - Desactivar video de
monitoreo:0
TolF=1e-5; %Tolerancia de termino sobre el valor de la función.
TolXX=1e-5; %Tolerancia de termino sobre "x".
MaxItera=5000; %Numero máximo de iteraciones permitidas.
```

Para las distintas distancias, la única diferencia en el archivo *Planilla* (aparte del nombre del video) es la variable `nEsquinas`, siendo tres esquinas para cada cuerpo en distancias de 3 y 6 metros, mientras que a 8 metros se utilizaron solo dos. Las esquinas seleccionadas y factores escala para cada cuerpo se especifican en cada ensayo.

La identificación de modos normales en el análisis espectral se realiza por inspección. Pese a no ser el método más apropiado, es una aproximación buena para los alcances de este trabajo de memoria. La notación “N.I” corresponde a “No Identificable”, por carencia de amplitud y “Dist.” a “distorsionada”, es decir, existe la suficiente amplitud pero su lectura esta perturbada por frecuencias adicionales, cuyo origen se explica en el Análisis de Resultados. De modo complementario se identificaran las frecuencias adicionales en aquellos análisis donde existan con claridad.

5.4.1 Respuesta e identificación de modos de vibrar a 3 metros

Ensayo #1

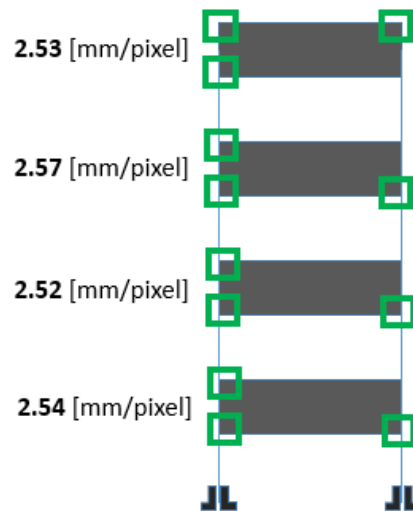


Figura 34. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #1.

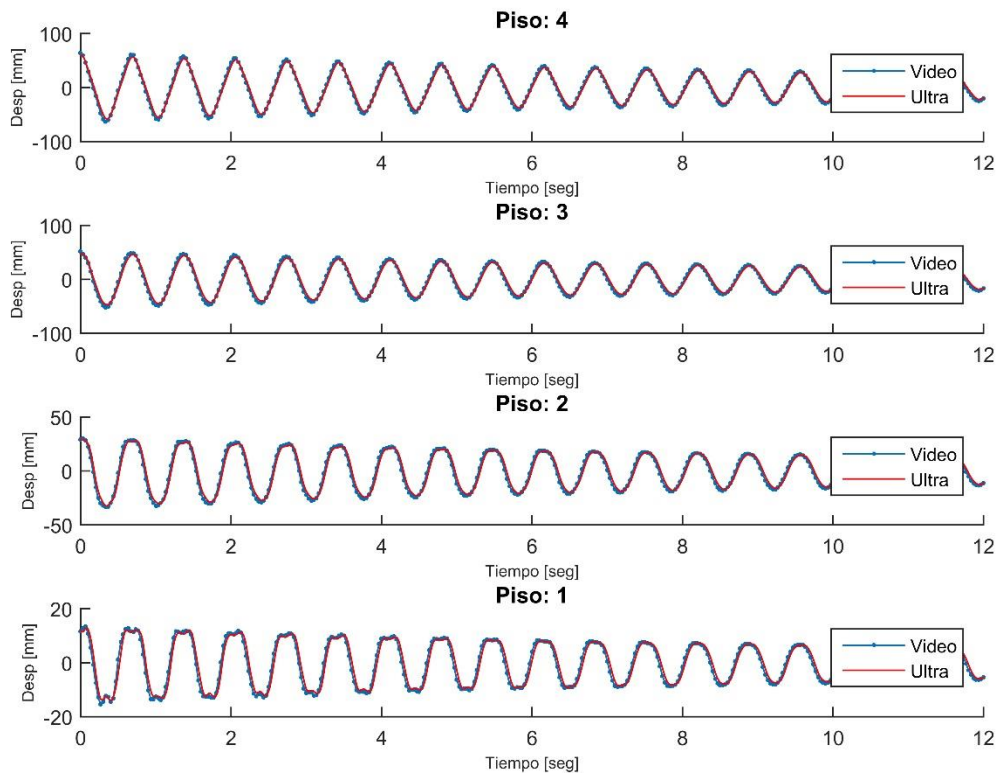


Figura 35. Desplazamientos horizontales en ensayo #1, GoPro y Ultrasónicos.

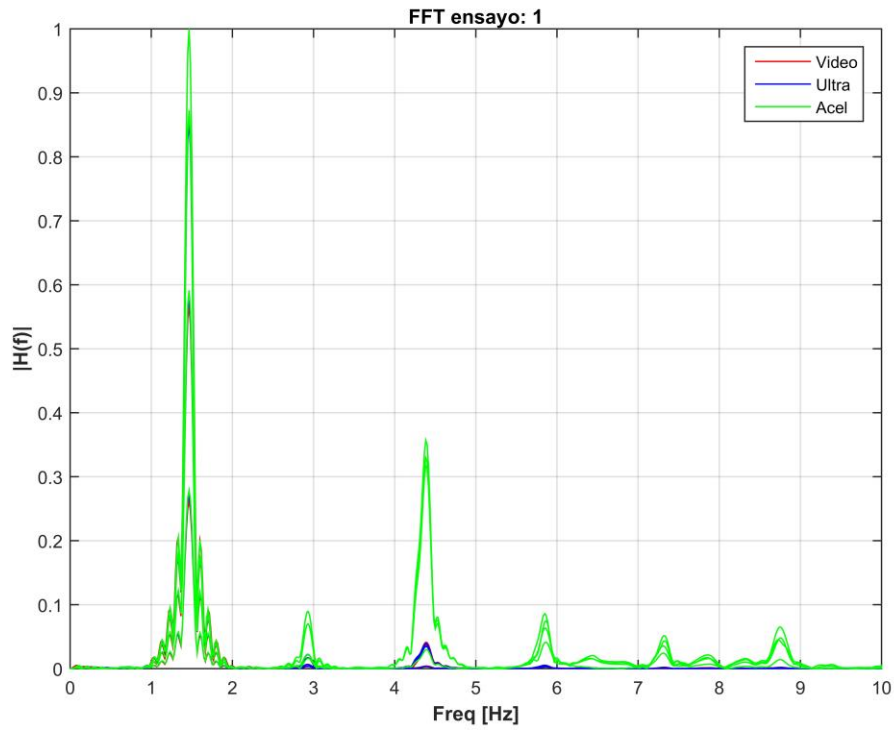


Figura 36. Análisis espectral ensayo #1, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 7. Identificación de modos de vibrar, ensayo #1.

Ensayo #1				
Excitación tipo A				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 8. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #1.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]
7.31 [Hz]
8.73 [Hz]

Ensayo #2

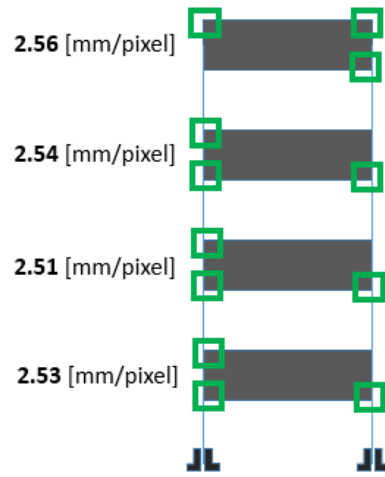


Figura 37. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #2.

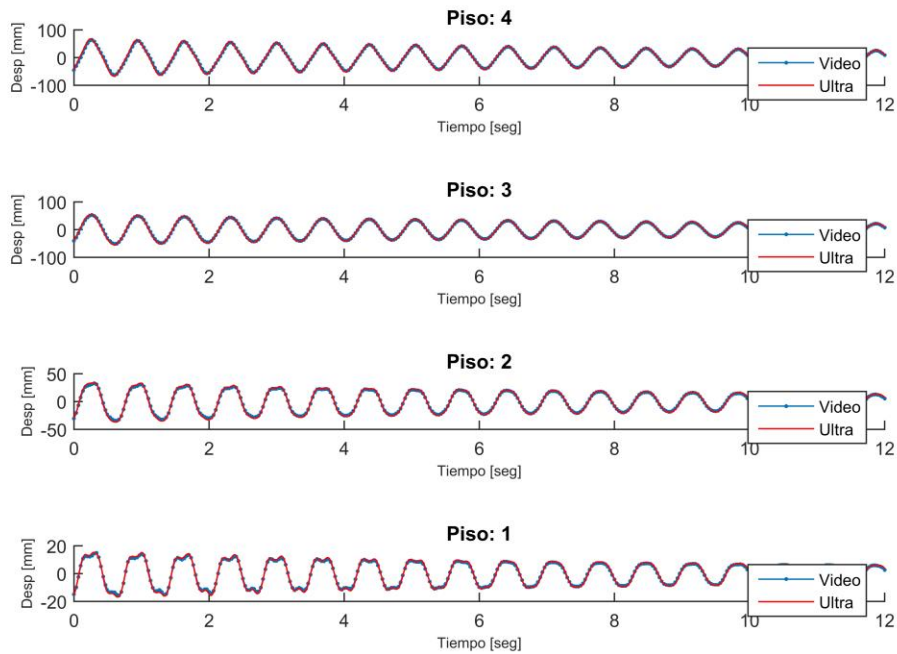


Figura 38. Desplazamientos horizontales en ensayo #2, GoPro y Ultrasónicos

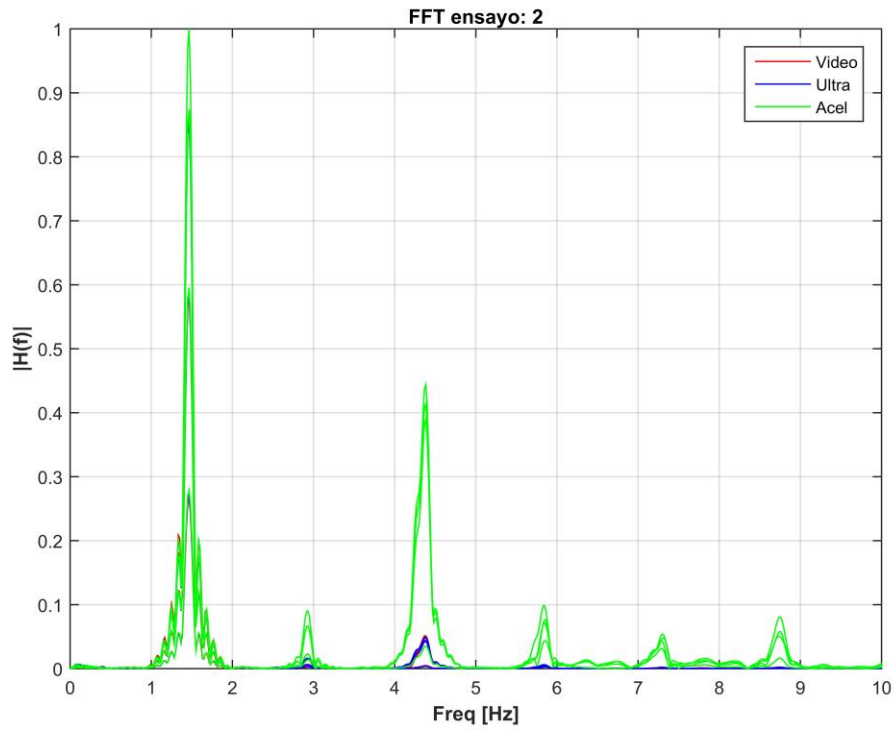


Figura 39. Análisis espectral ensayo #2, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 9. Identificación de modos de vibrar, ensayo #2.

Ensayo #2				
Excitación tipo A				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 10. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #2.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]
7.31 [Hz]
8.73 [Hz]

Ensayo #3

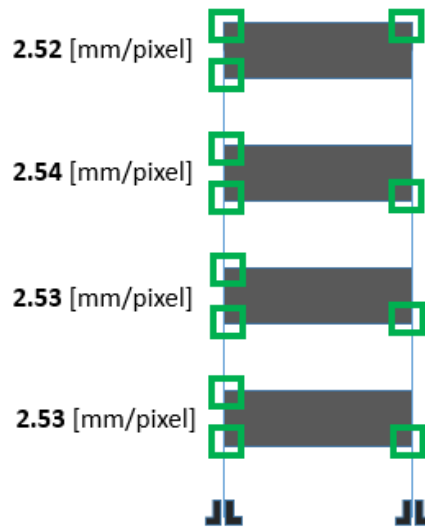


Figura 40. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #3.

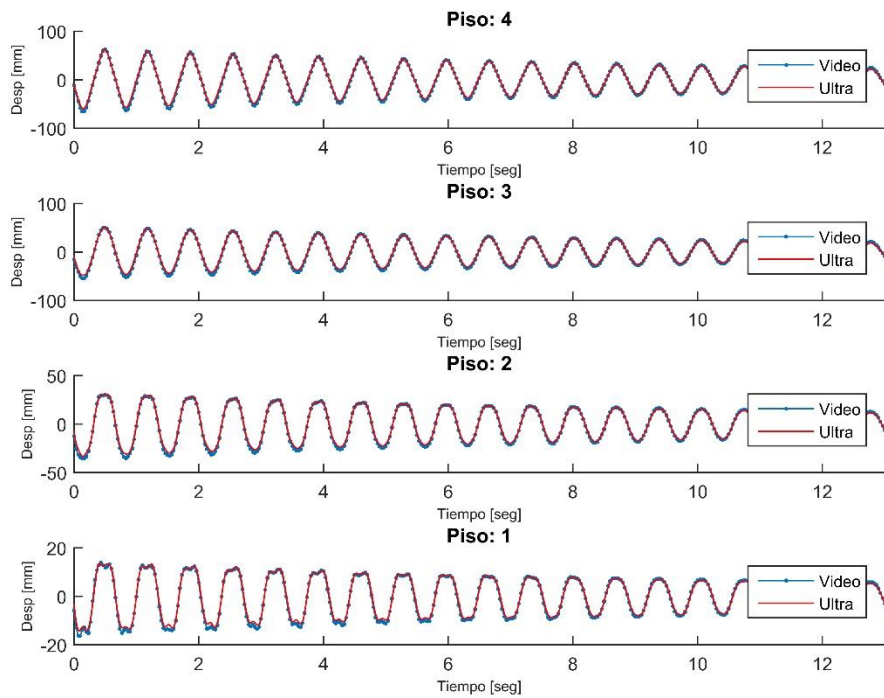


Figura 41. Desplazamientos horizontales en ensayo #3, GoPro y Ultrasónicos

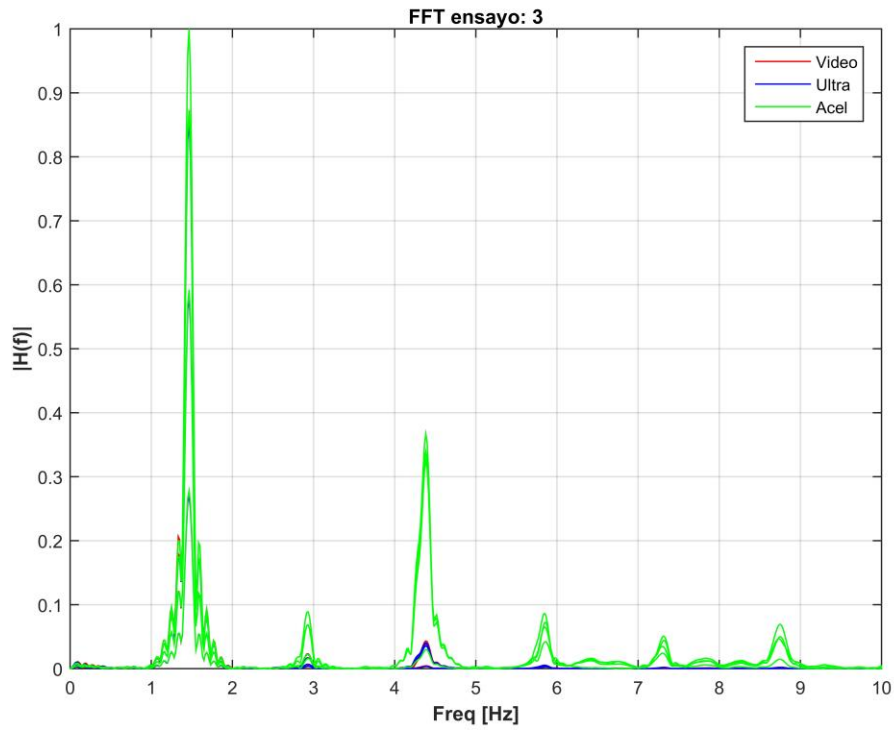


Figura 42. Análisis espectral ensayo #3, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 11. Identificación de modos de vibrar, ensayo #3.

Ensayo #3				
Excitación tipo A				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 12. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #3.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]
7.31 [Hz]
8.73 [Hz]

Ensayo #4

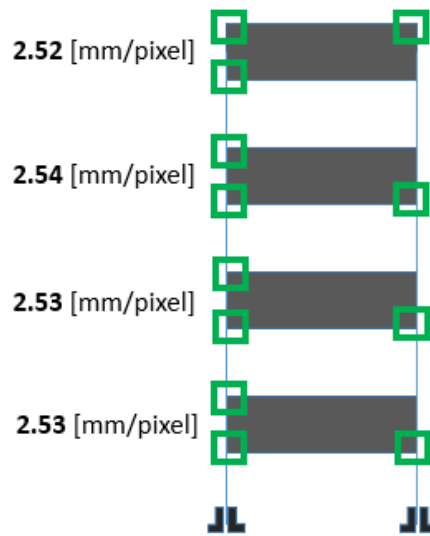


Figura 43. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #4.

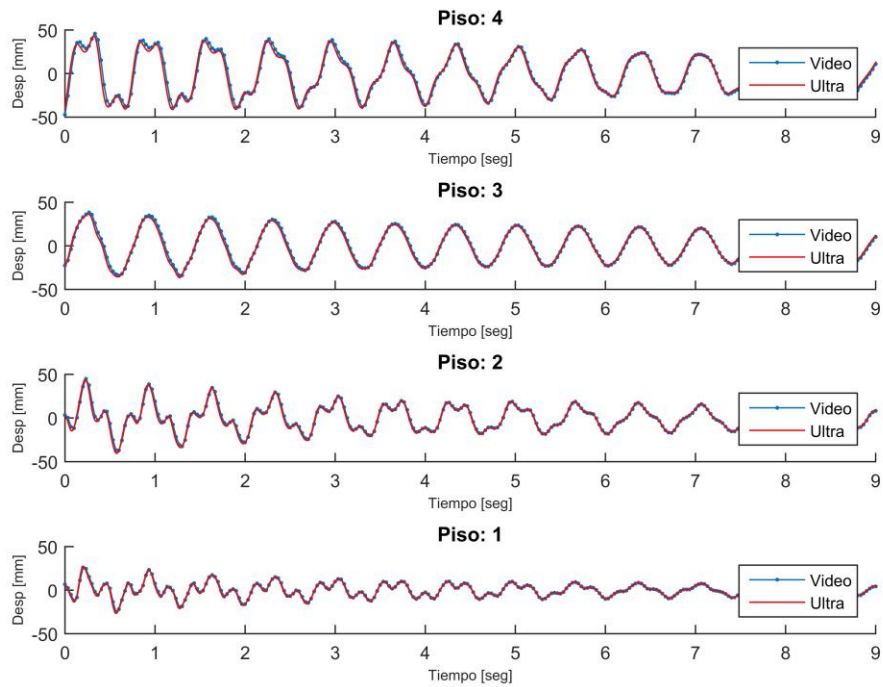


Figura 44. Desplazamientos horizontales en ensayo #4, GoPro y Ultrasónicos.

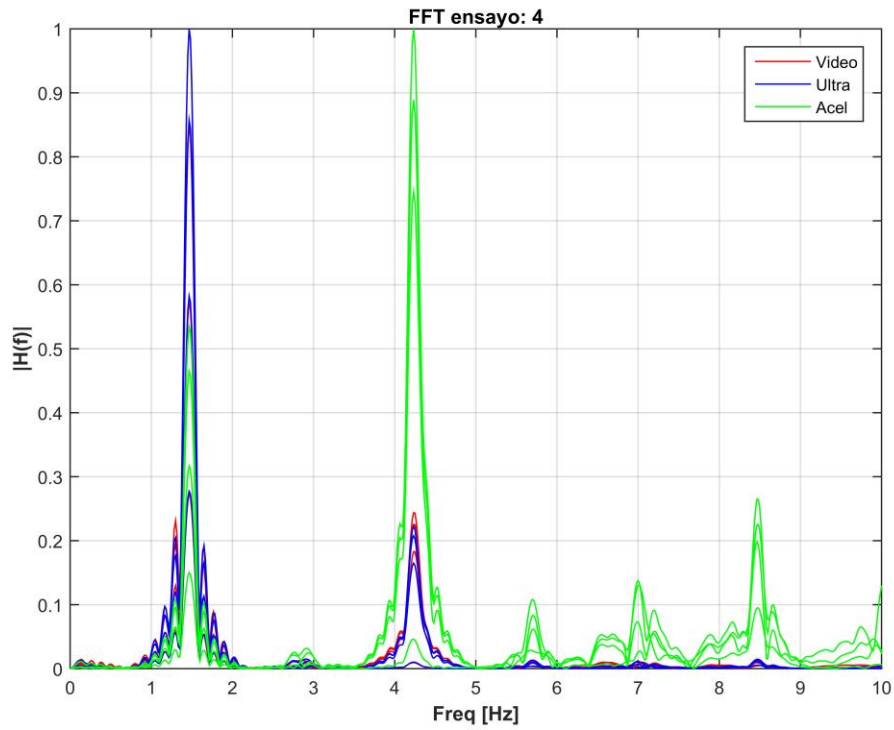


Figura 45. Análisis espectral ensayo #4, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 13. Identificación de modos de vibrar, ensayo #4.

Ensayo #4				
Excitación tipo B				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 14. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #4.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]
7.31 [Hz]
8.73 [Hz]

Ensayo #5

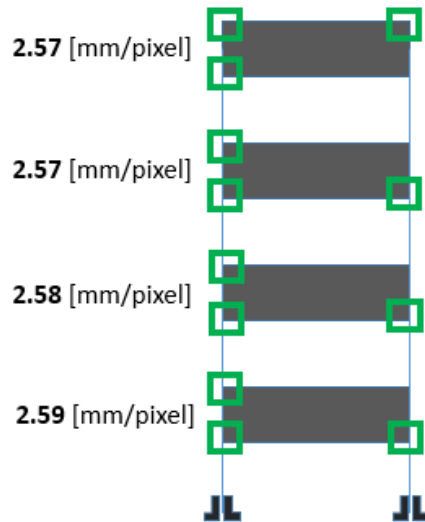


Figura 46. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #5.

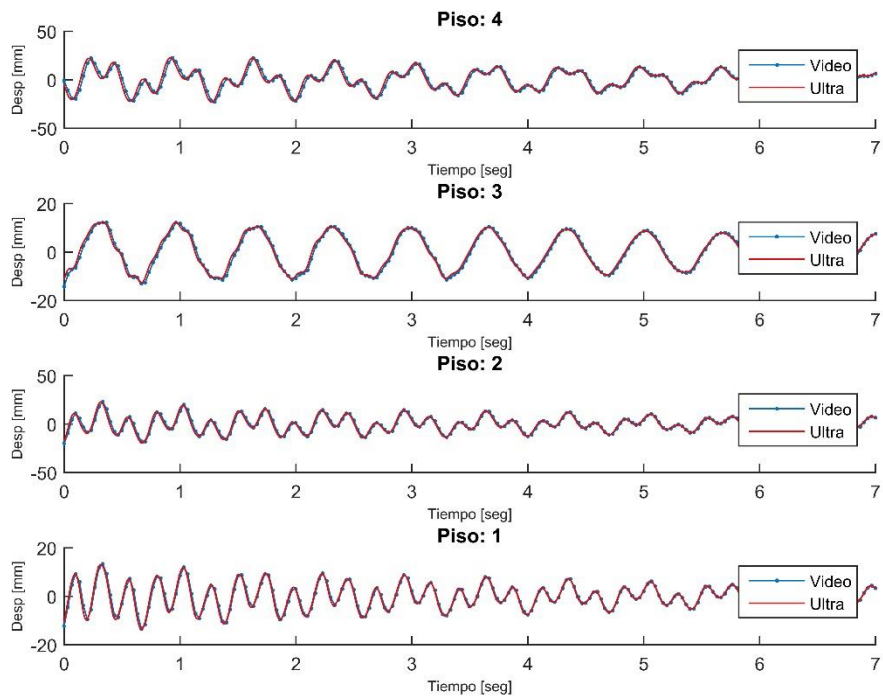


Figura 47. Desplazamientos horizontales en ensayo #5, GoPro y Ultrasónicos.

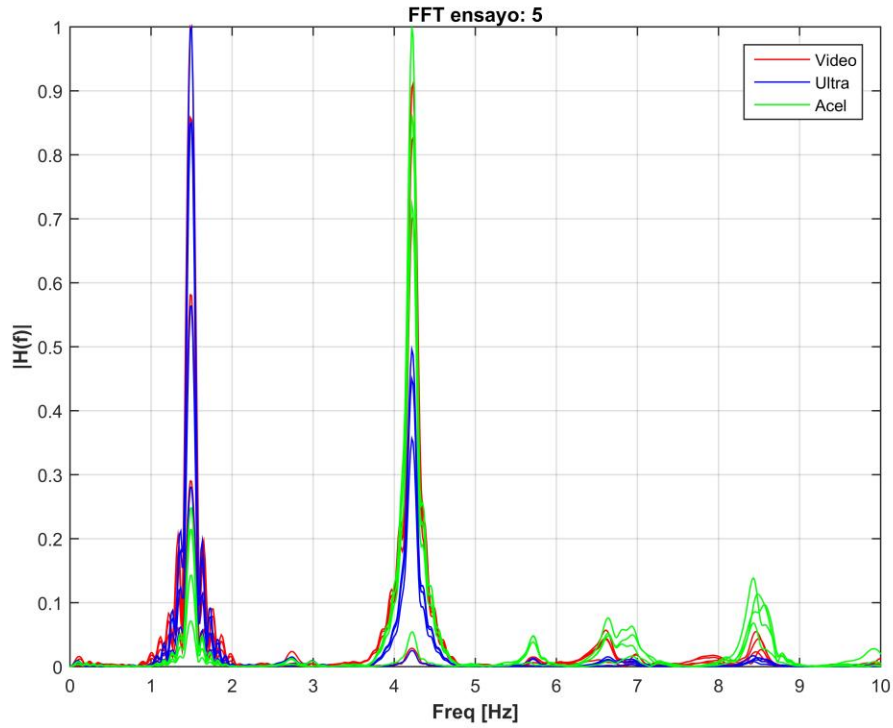


Figura 48. Análisis espectral ensayo #5, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 15. Identificación de modos de vibrar, ensayo #5.

Ensayo #5				
Excitación tipo B				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]

Tabla 16. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #5.

Frecuencias adicionales
Valor
5.85 [Hz]

Ensayo #6

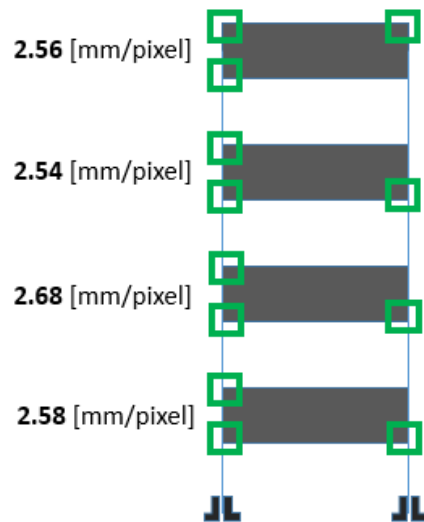


Figura 49. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #6.

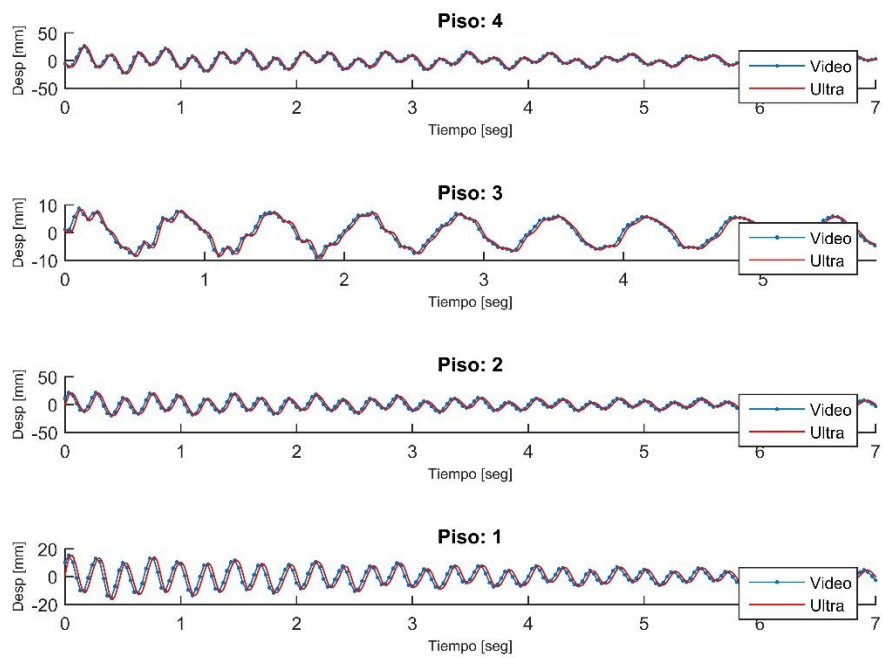


Figura 50. Desplazamientos horizontales en ensayo #6, GoPro y Ultrasónicos.

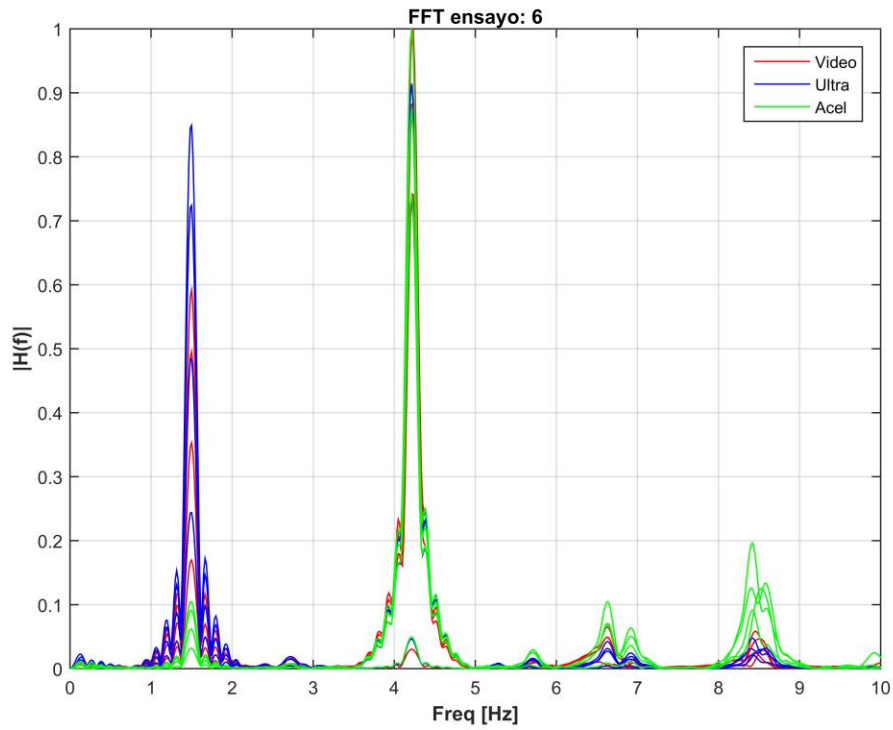


Figura 51. Análisis espectral ensayo #6, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 17. Identificación de modos de vibrar, ensayo #6.

Ensayo #6				
Excitación tipo B				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.63 [Hz]	8.43 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.63 [Hz]	8.43 [Hz]

Tabla 18. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #6.

Frecuencias adicionales
Valor
5.85 [Hz]

Ensayo #7

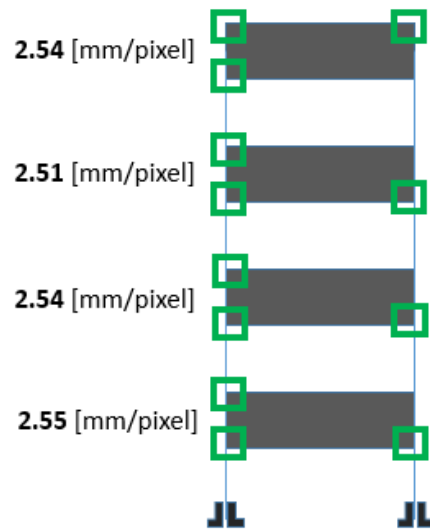


Figura 52. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #7.

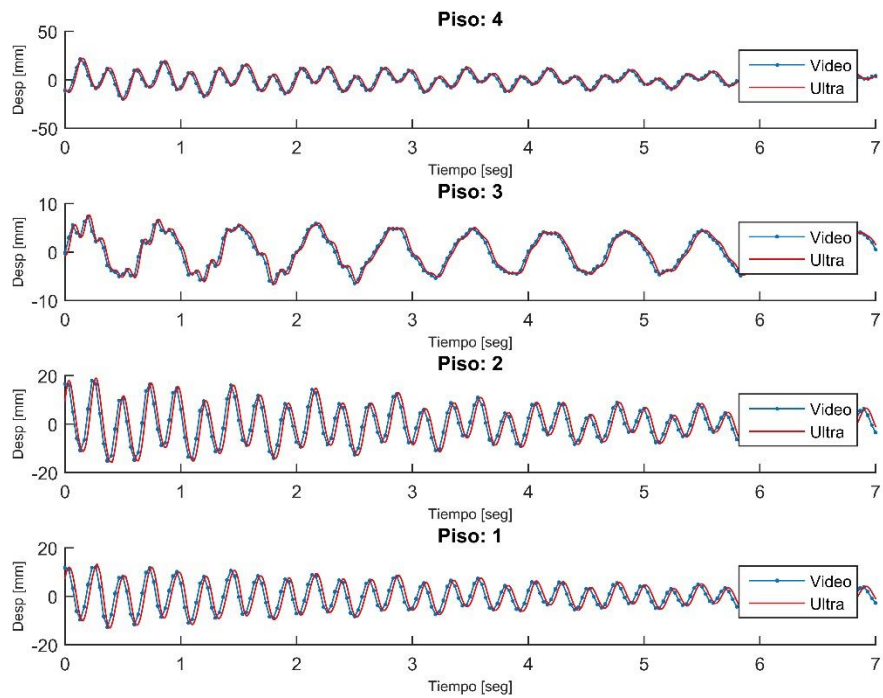


Figura 53. Desplazamientos horizontales en ensayo #7, GoPro y Ultrasónicos

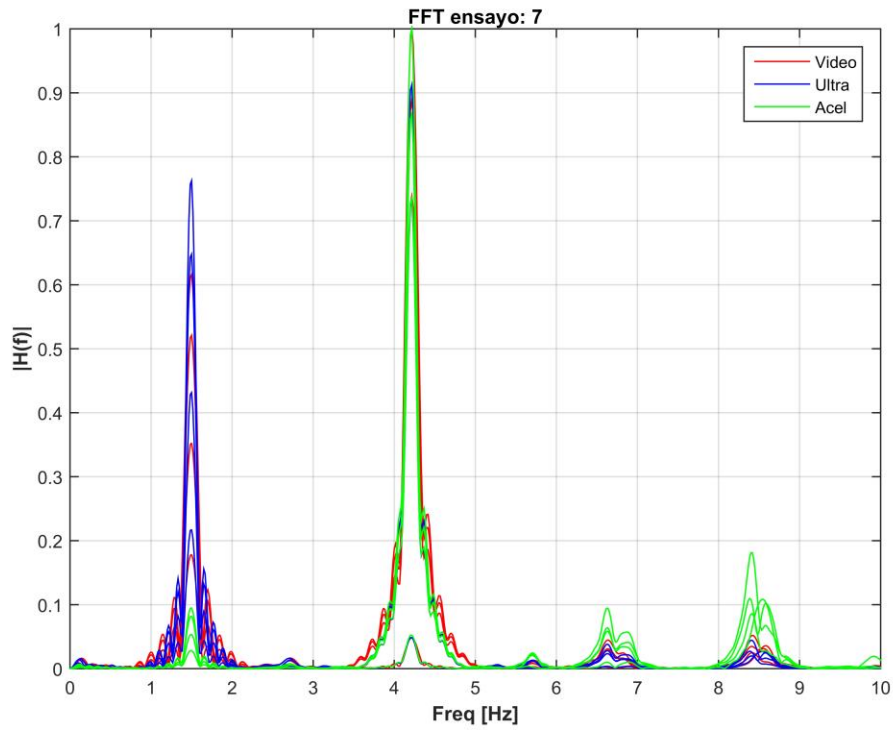


Figura 54. Análisis espectral ensayo #7, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 19. Identificación de modos de vibrar, ensayo #7.

Ensayo #7				
Excitación tipo B				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.63 [Hz]	8.41 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.63 [Hz]	8.41 [Hz]

Tabla 20. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #7.

Frecuencias adicionales
Valor
5.85 [Hz]

Ensayo #8

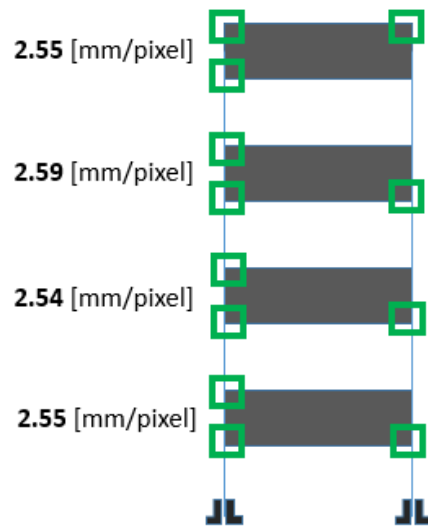


Figura 55. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #8.

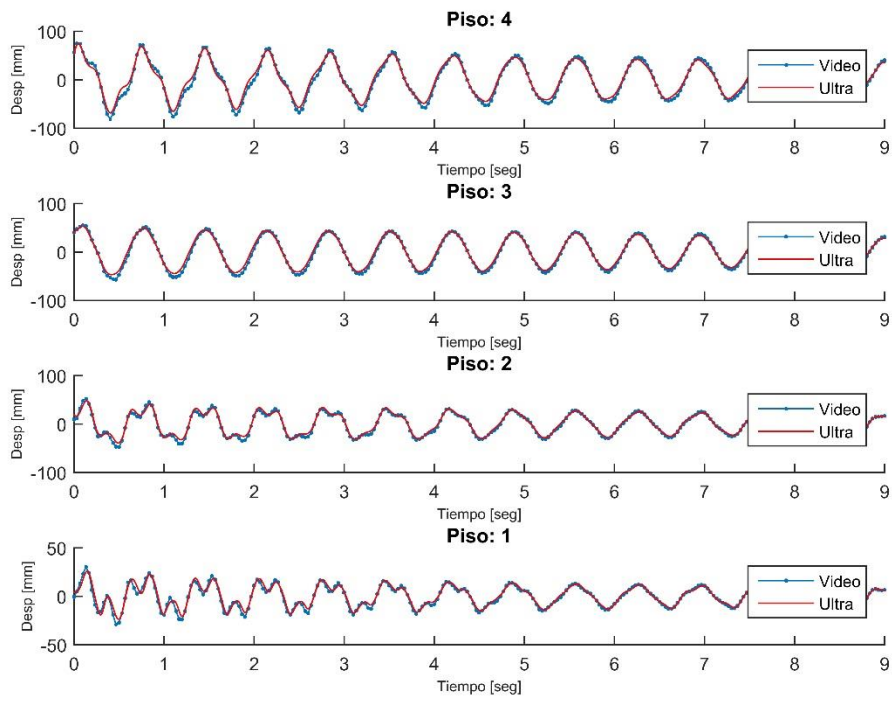


Figura 56. Desplazamientos horizontales en ensayo #8, GoPro y Ultrasonicos.

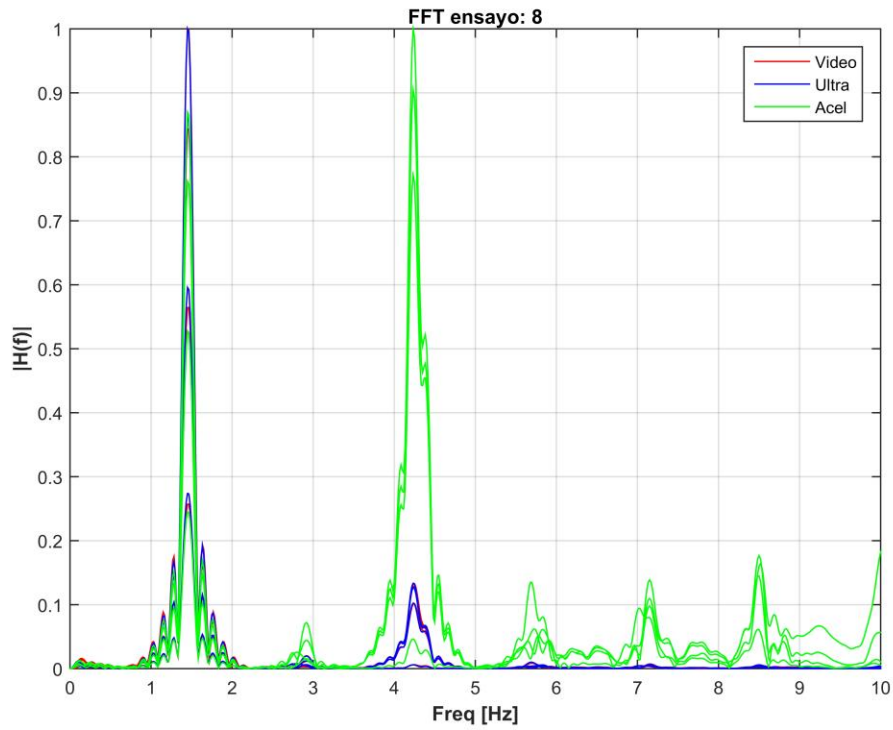


Figura 57. Análisis espectral ensayo #8, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 21. Identificación de modos de vibrar, ensayo #8.

Ensayo #8				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 22. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #8.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]
7.31 [Hz]
8.73 [Hz]

Ensayo #9

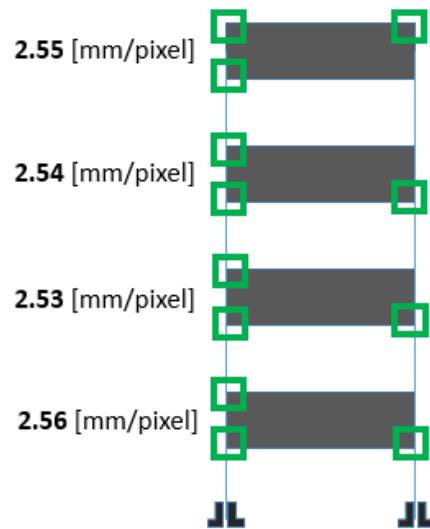


Figura 58. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #9.

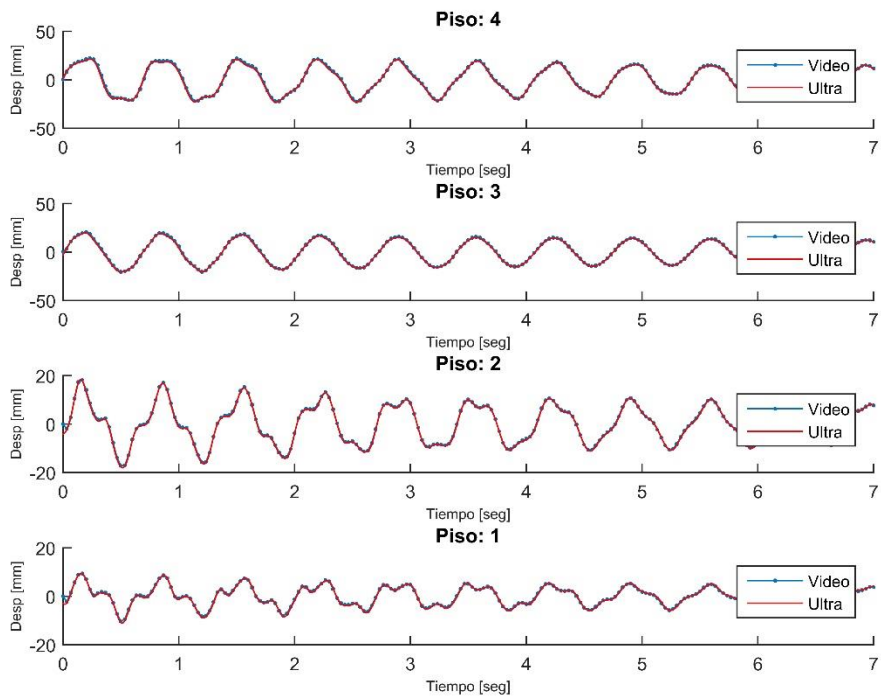


Figura 59. Desplazamientos horizontales en ensayo #9, GoPro y Ultrasonicos.

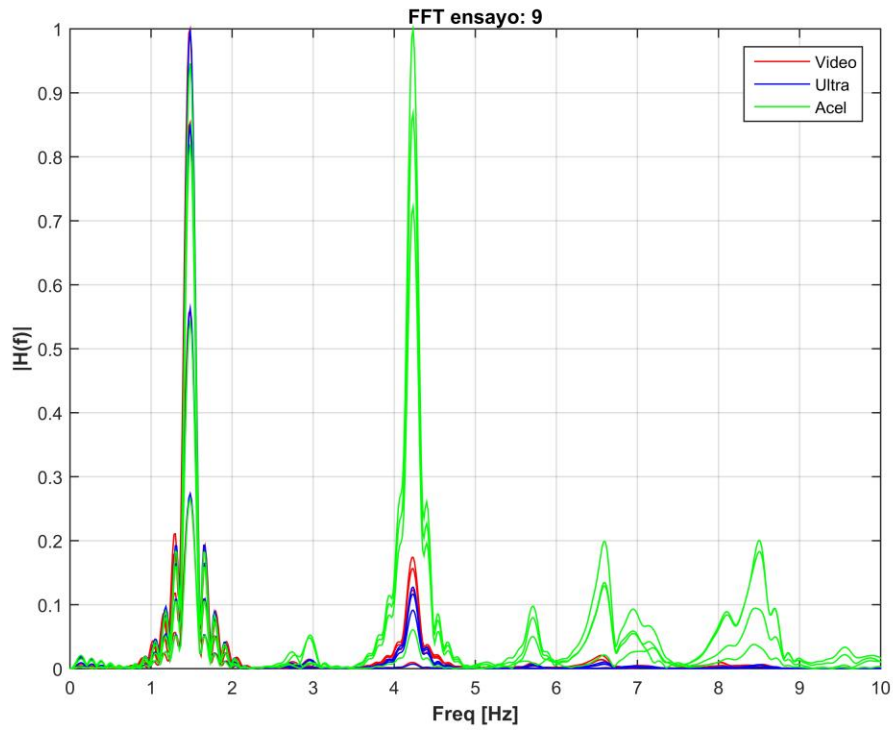


Figura 60. Análisis espectral ensayo #9, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 23. Identificación de modos de vibrar, ensayo #9.

Ensayo #9				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 24. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #9.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

Ensayo #10

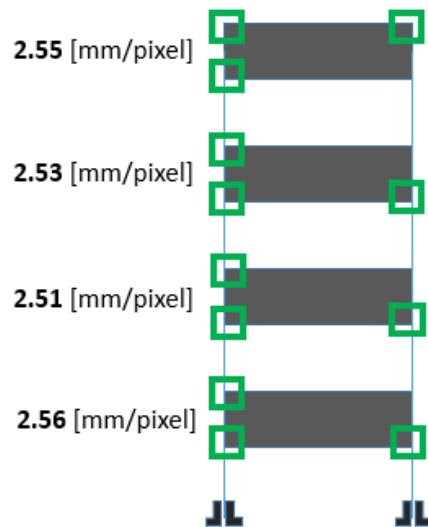


Figura 61. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #10.

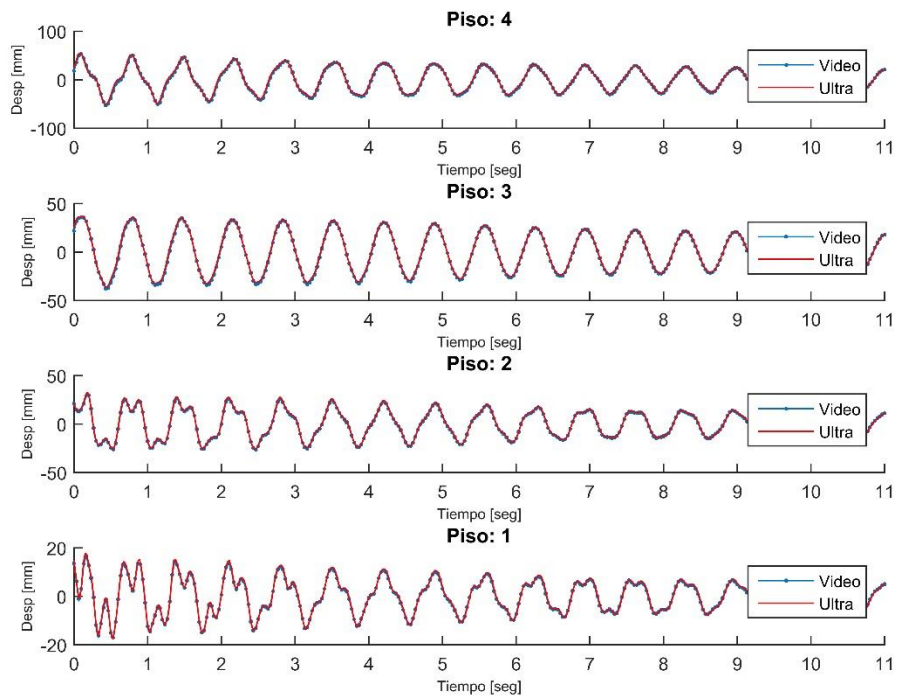


Figura 62. Desplazamientos horizontales en ensayo #10, GoPro y Ultrasonicos.

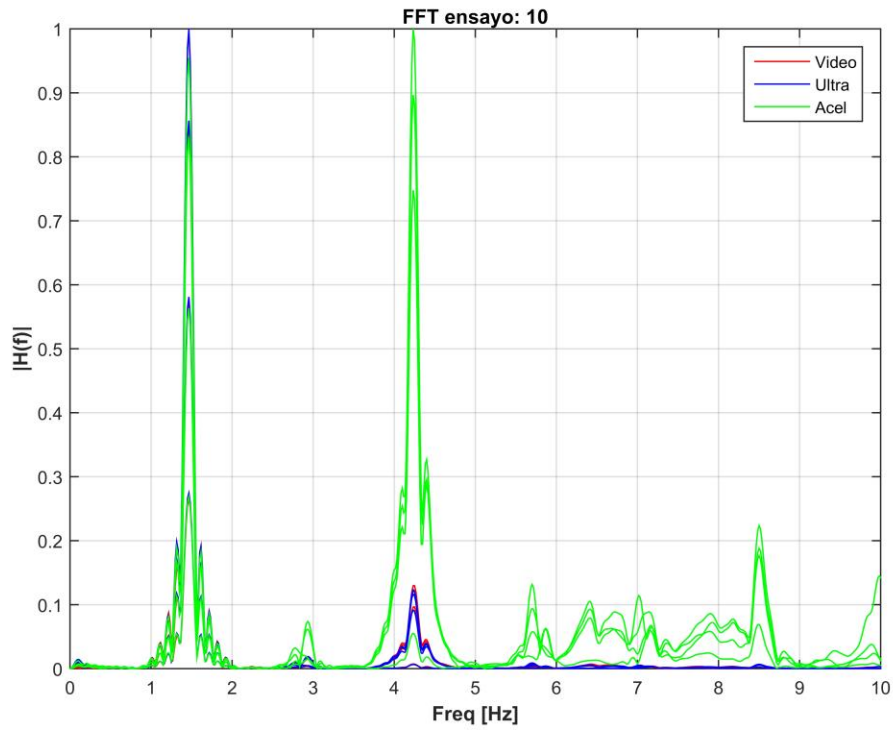


Figura 63. Análisis espectral ensayo #10, GoPro, Ultrasonicos y Acelerómetros.

Tabla 25. Identificación de modos de vibrar, ensayo #10.

Ensayo #10				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
Ultrasonico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	N.I

Tabla 26. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #10.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

Ensayo #11

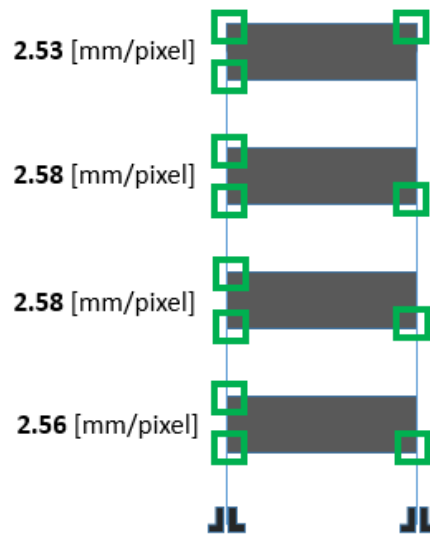


Figura 64. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #11.

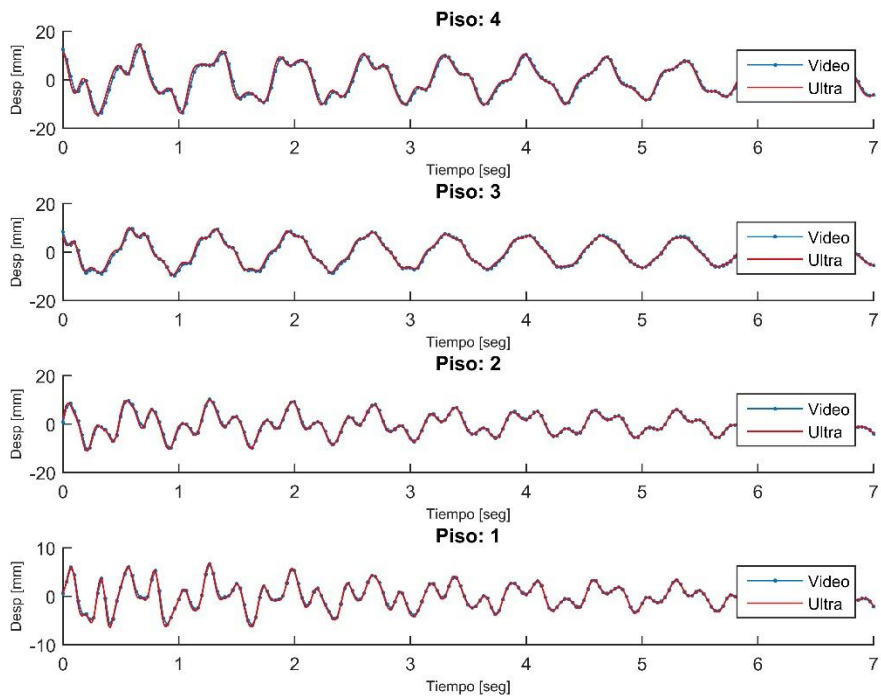


Figura 65. Desplazamientos horizontales en ensayo #11, GoPro y Ultrasonicos.

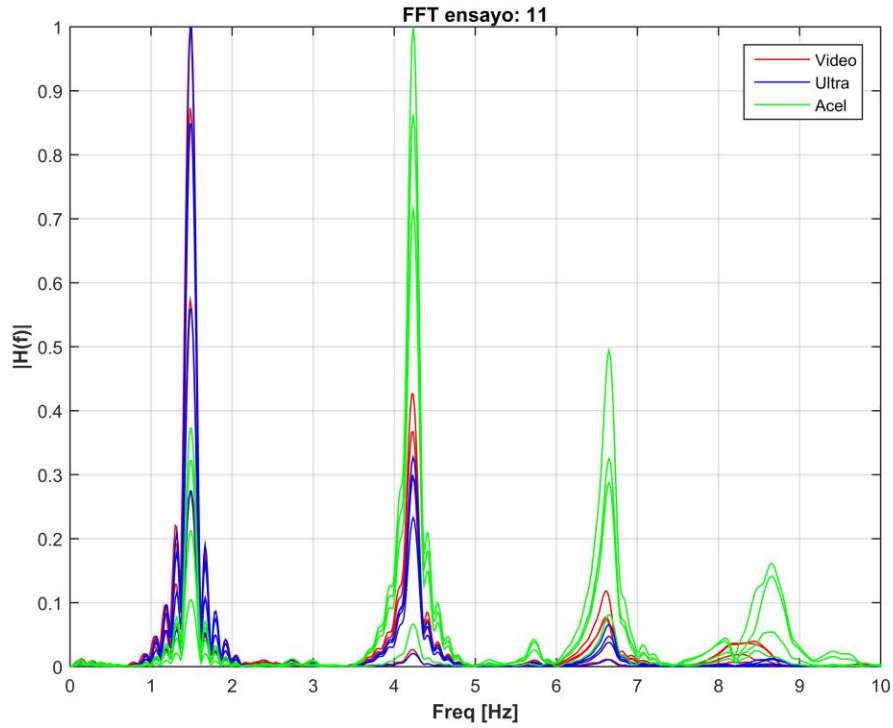


Figura 66. Análisis espectral ensayo #11, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 27. Identificación de modos de vibrar, ensayo #15.

Ensayo #11				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	Dist.
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.63 [Hz]	Dist.
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.63 [Hz]	Dist.

Tabla 28. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #11.

Frecuencias adicionales
Valor
5.85 [Hz]

Ensayo #12

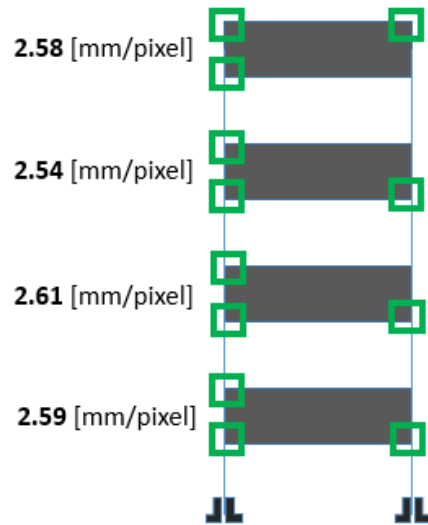


Figura 67. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #12.

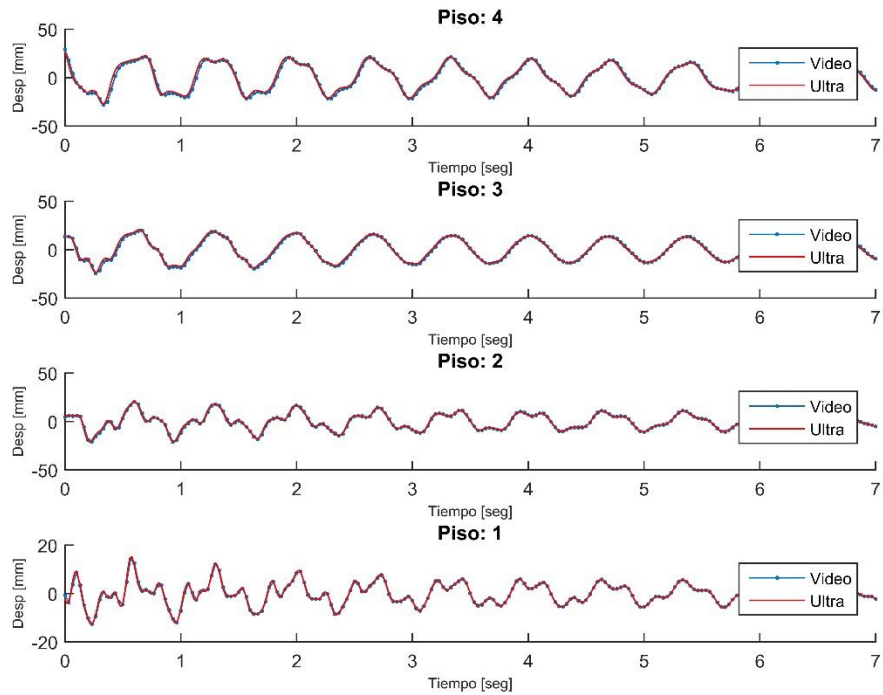


Figura 68. Desplazamientos horizontales en Ensayo #12, GoPro y Ultrasonicos.

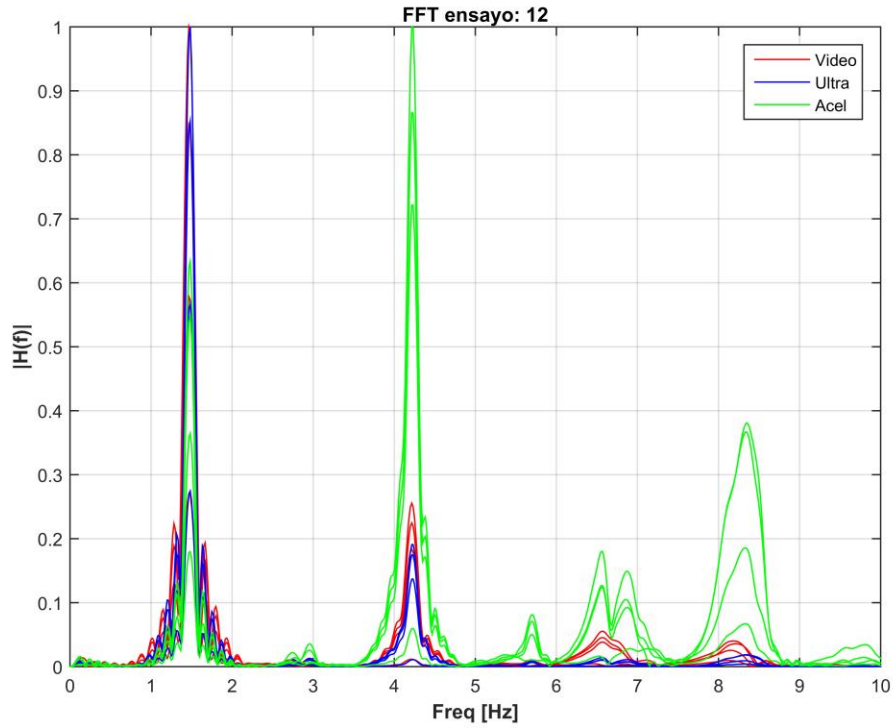


Figura 69. Análisis espectral ensayo #12, GoPro, Ultrasonicos y Acelerómetros.

Tabla 29. Identificación de modos de vibrar, ensayo #12.

Ensayo #12				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	Dist.
Ultrasonico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	Dist.
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	Dist.

Tabla 30. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #12.

Frecuencias adicionales
Valor
5.85 [Hz]

Ensayo #13

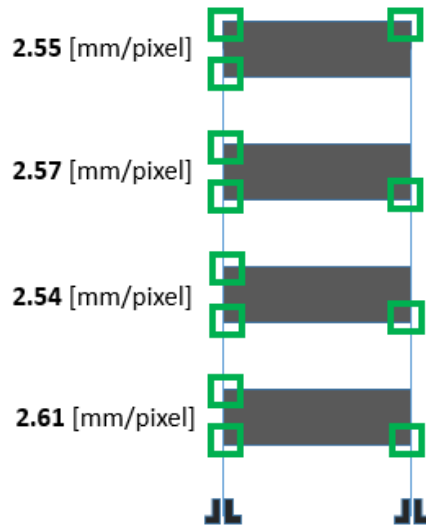


Figura 70. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #13.

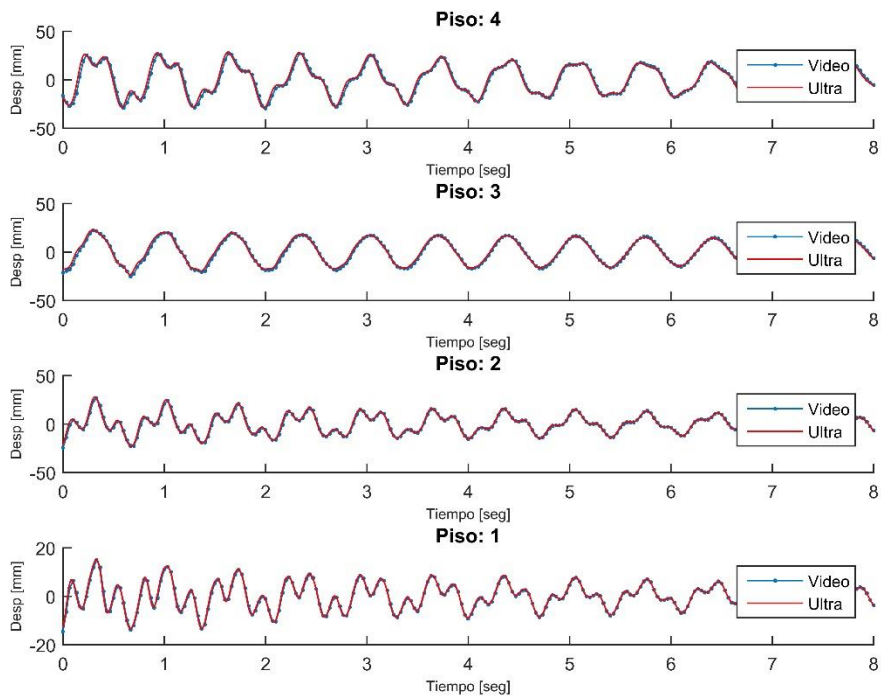


Figura 71. Desplazamientos horizontales en ensayo #13, GoPro y Ultrasonicos.

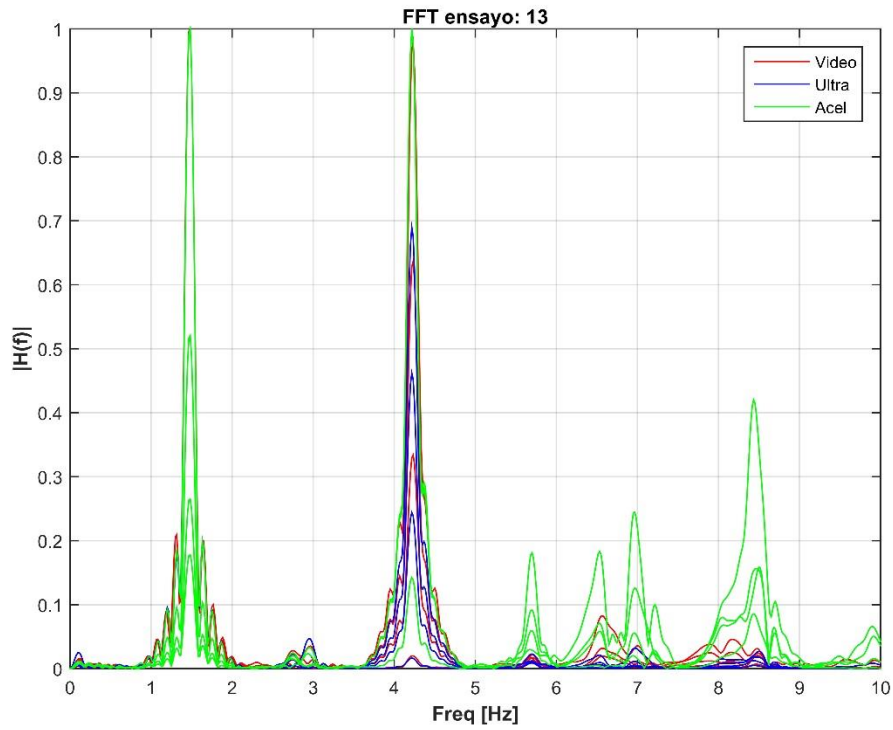


Figura 72. Análisis espectral ensayo #13, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 31. Identificación de modos de vibrar, ensayo #13.

Ensayo #13				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	N.I
GoPro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	N.I

Tabla 32. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #13.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

Ensayo #14

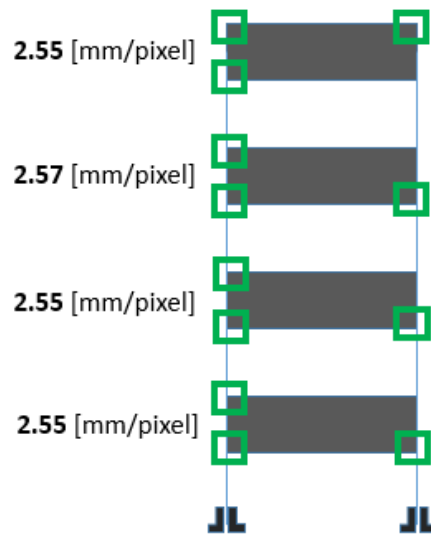


Figura 73. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #14.

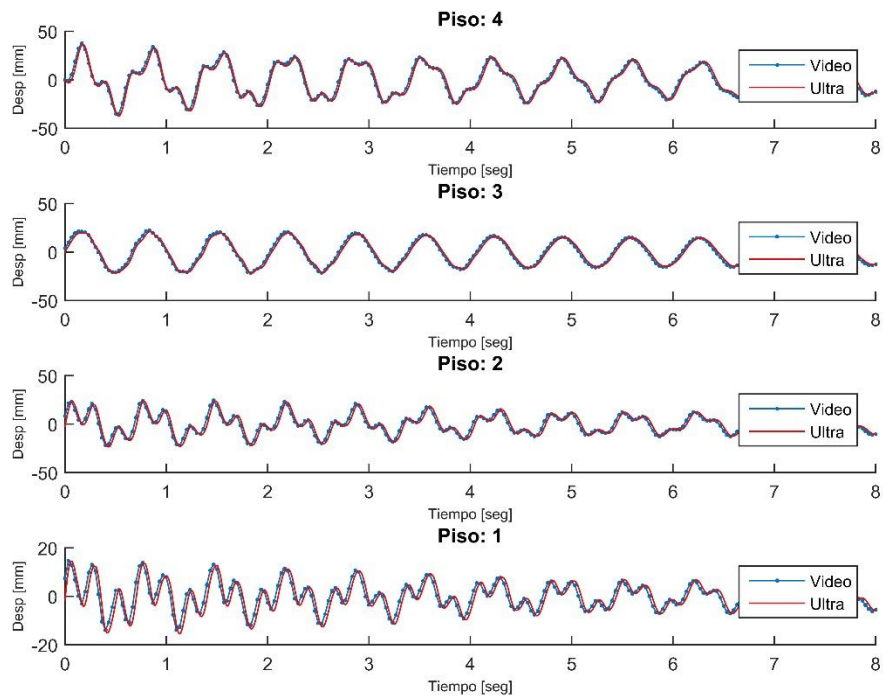


Figura 74. Desplazamientos horizontales en ensayo #14, GoPro y Ultrasonicos.

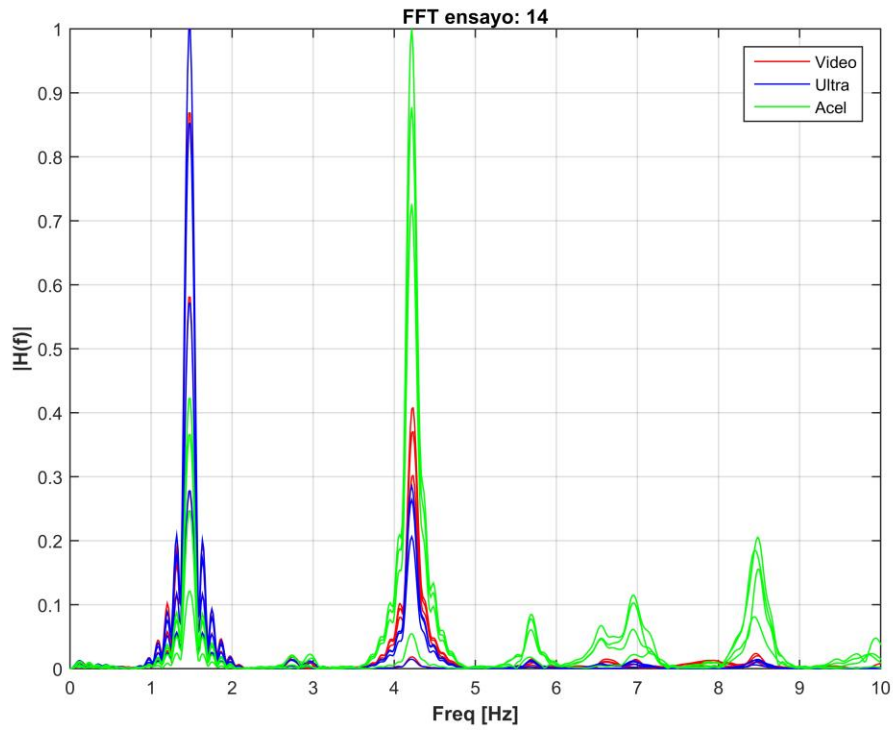


Figura 75. Análisis espectral ensayo #14, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 33. Identificación de modos de vibrar, ensayo #14.

Ensayo #14				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]

Tabla 34. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #14.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

Ensayo #21

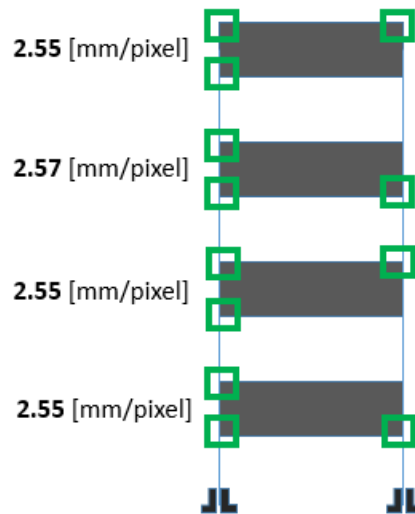


Figura 76. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #21.

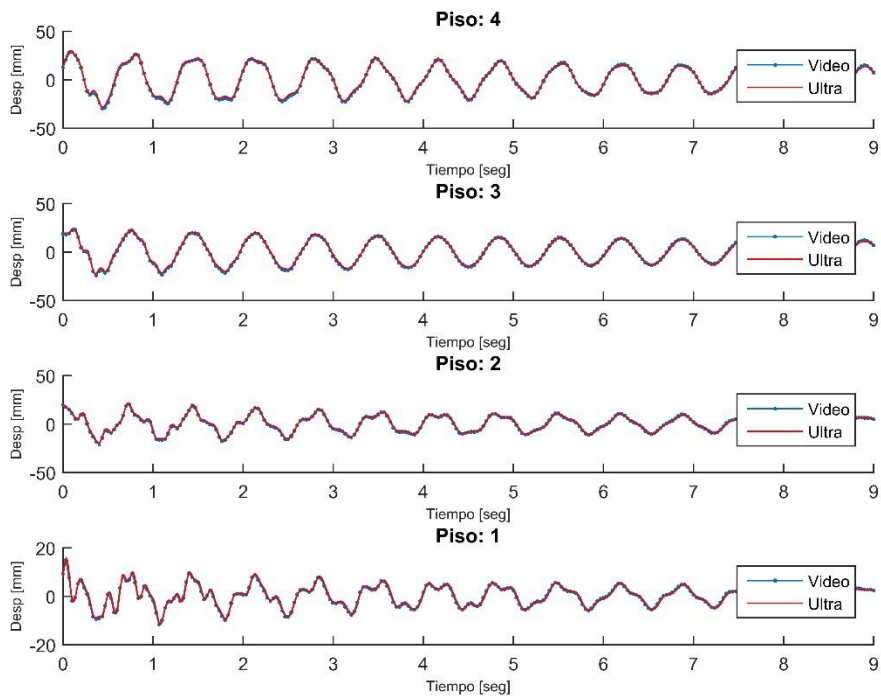


Figura 77. Desplazamientos horizontales en ensayo #21, GoPro y Ultrasonicos.

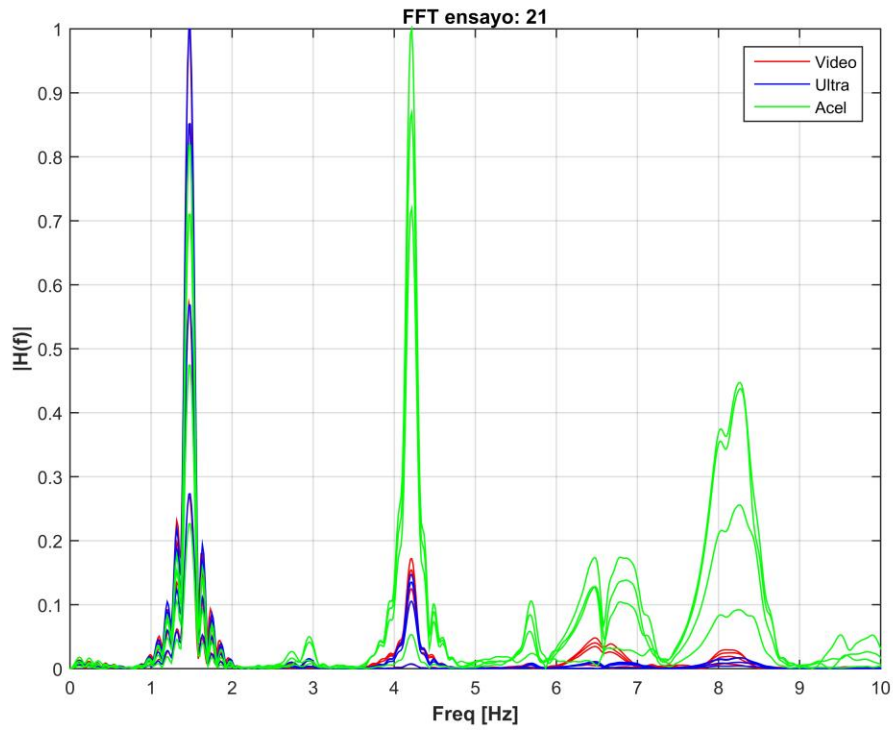


Figura 78. Análisis espectral ensayo #21, GoPro, Ultrasonicos y Acelerómetros.

Tabla 35. Identificación de modos de vibrar, ensayo #21.

Ensayo #21				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	Dist.
Ultrasonico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	Dist.
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	Dist.

Tabla 36. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #21.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

Ensayo #22

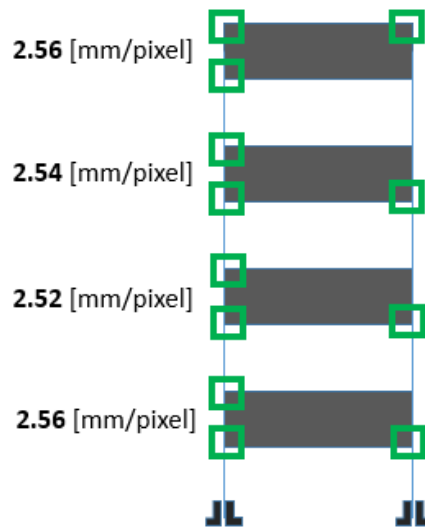


Figura 79. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #22.

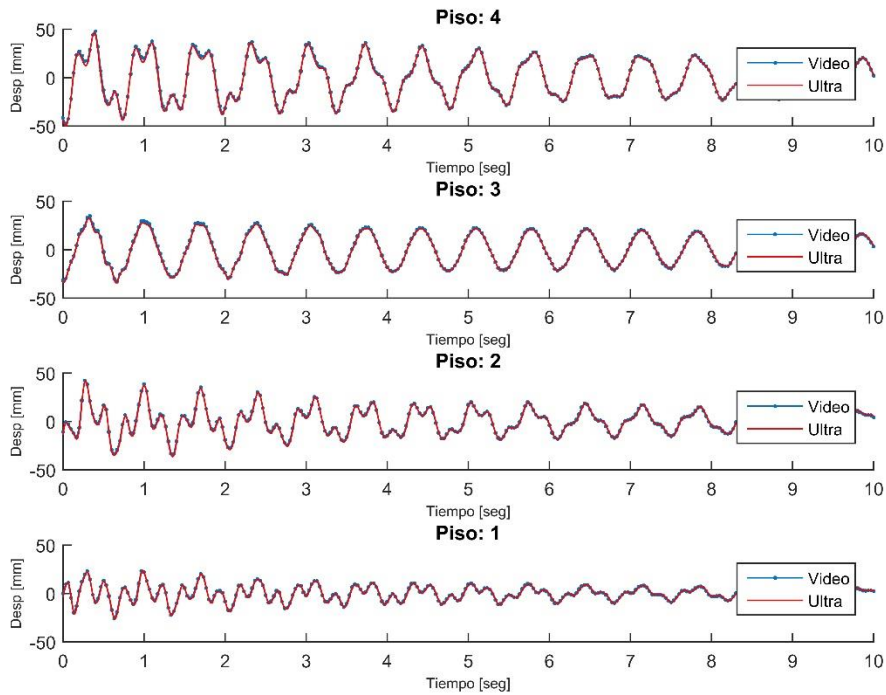


Figura 80. Desplazamientos horizontales en ensayo #22, GoPro y Ultrasónicos.

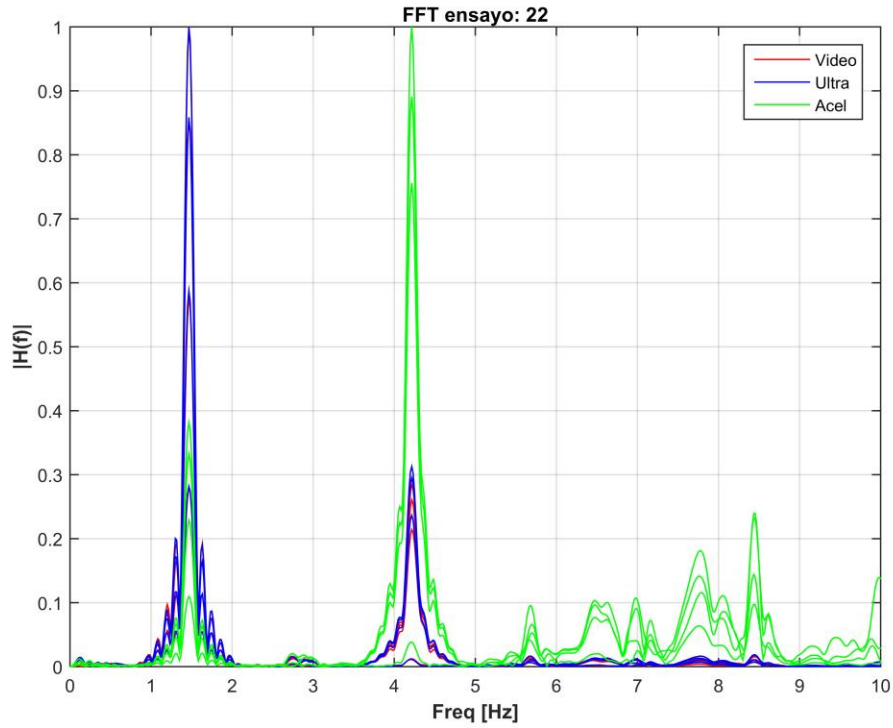


Figura 81. Análisis espectral ensayo #22, GoPro, Ultrasonicos y Acelerómetros.

Tabla 37. Identificación de modos de vibrar, ensayo #22.

Ensayo #22				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
Ultrasonico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]

Tabla 38. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #22.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

Ensayo #23

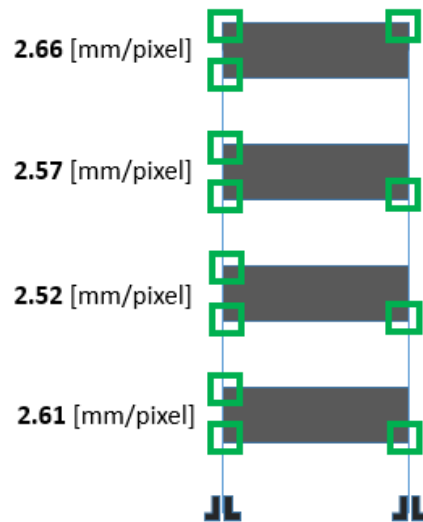


Figura 82. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #23.

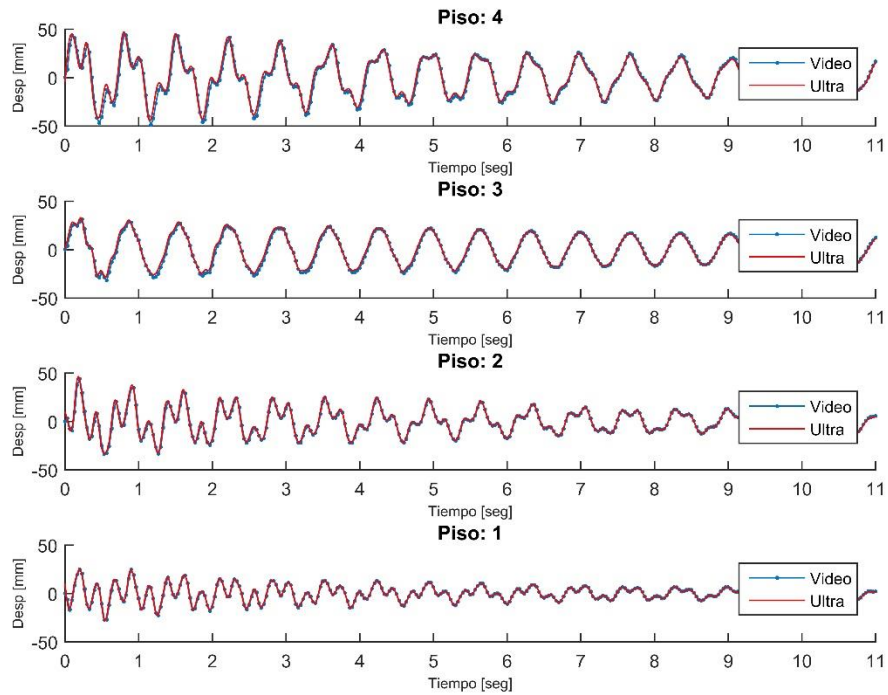


Figura 83. Desplazamientos horizontales en ensayo #23, GoPro y Ultrasonicos.

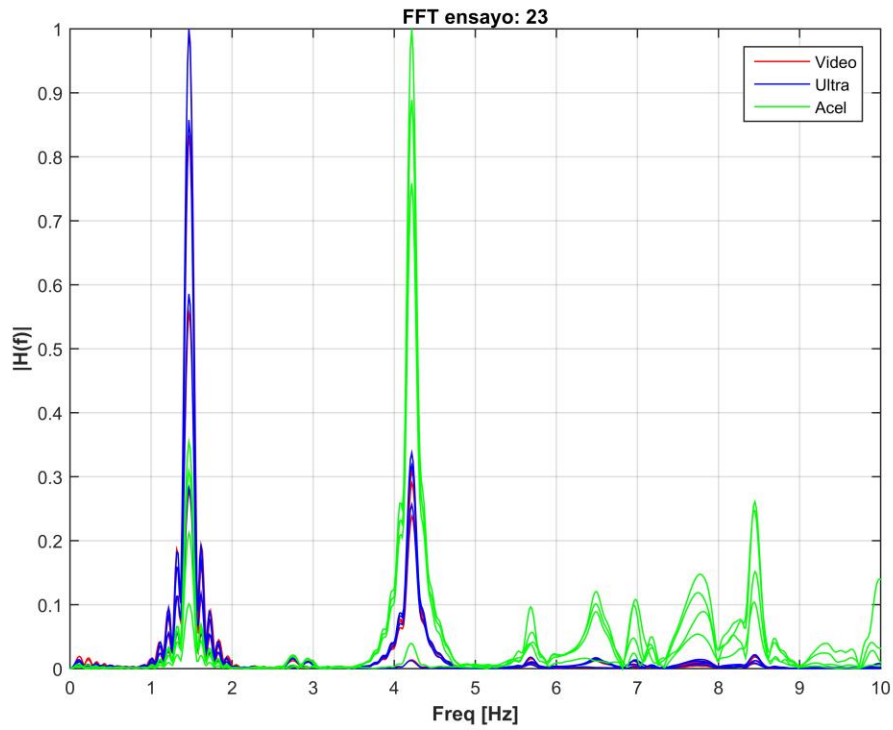


Figura 84. Análisis espectral ensayo #23, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 39. Identificación de modos de vibrar, ensayo #23.

Ensayo #23				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]

Tabla 40. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #23.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

Ensayo #24

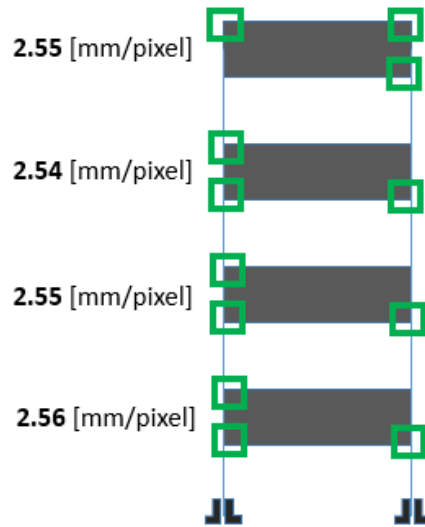


Figura 85. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #24.

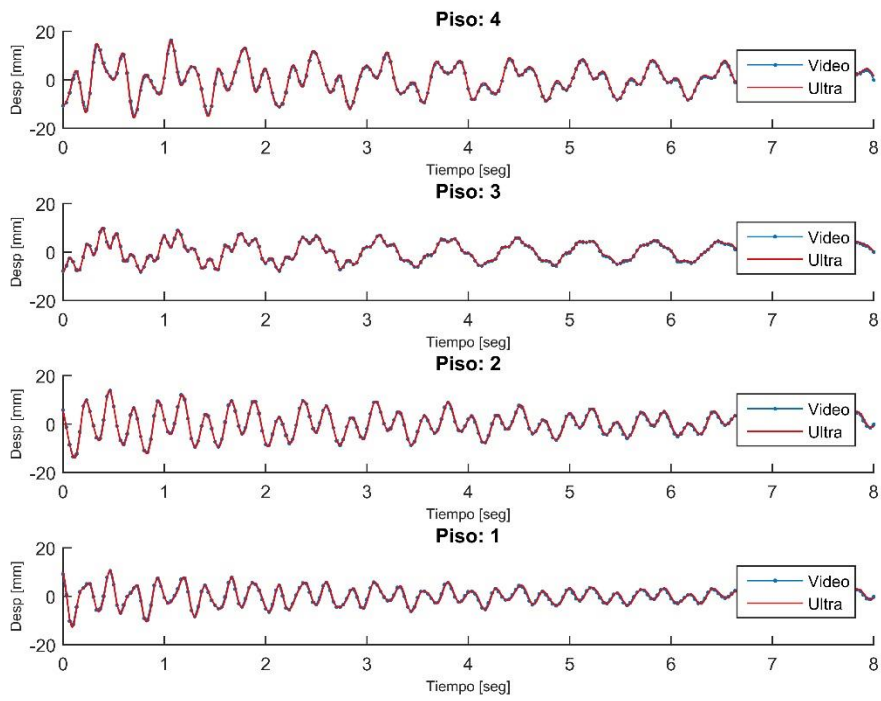


Figura 86. Desplazamientos horizontales en ensayo #24, GoPro y Ultrasonicos.

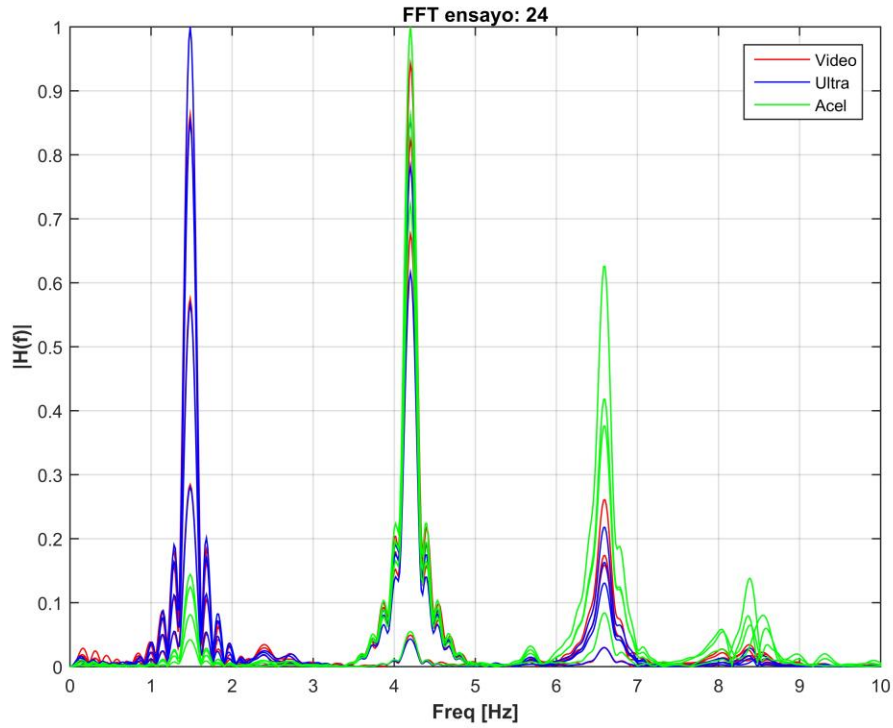


Figura 87. Análisis espectral ensayo #24, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 41. Identificación de modos de vibrar, ensayo #24.

Ensayo #24				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	Dist.
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	Dist.

Tabla 42. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #24.

Frecuencias adicionales
Valor
5.85 [Hz]

Ensayo #25

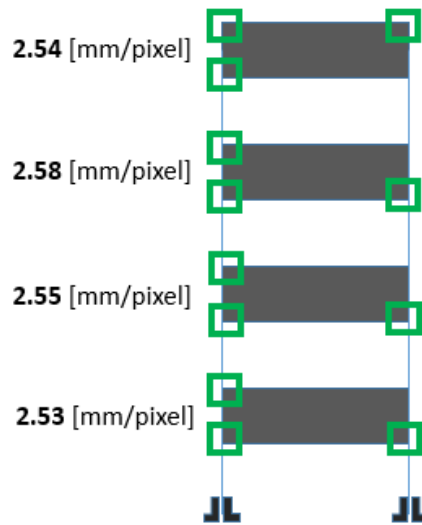


Figura 88. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #25.

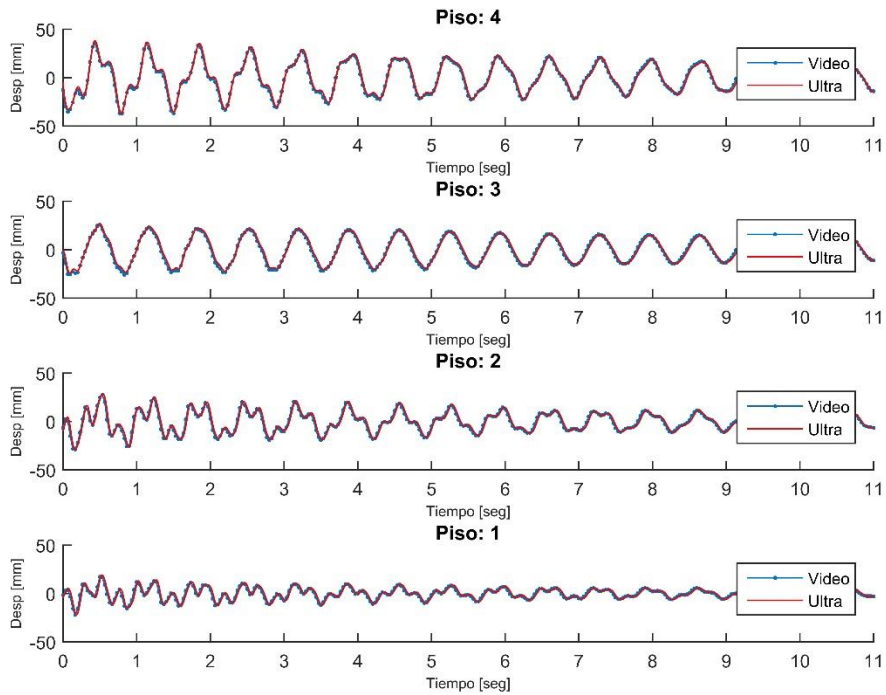


Figura 89. Desplazamientos horizontales en ensayo #25, GoPro y Ultrasonicos.

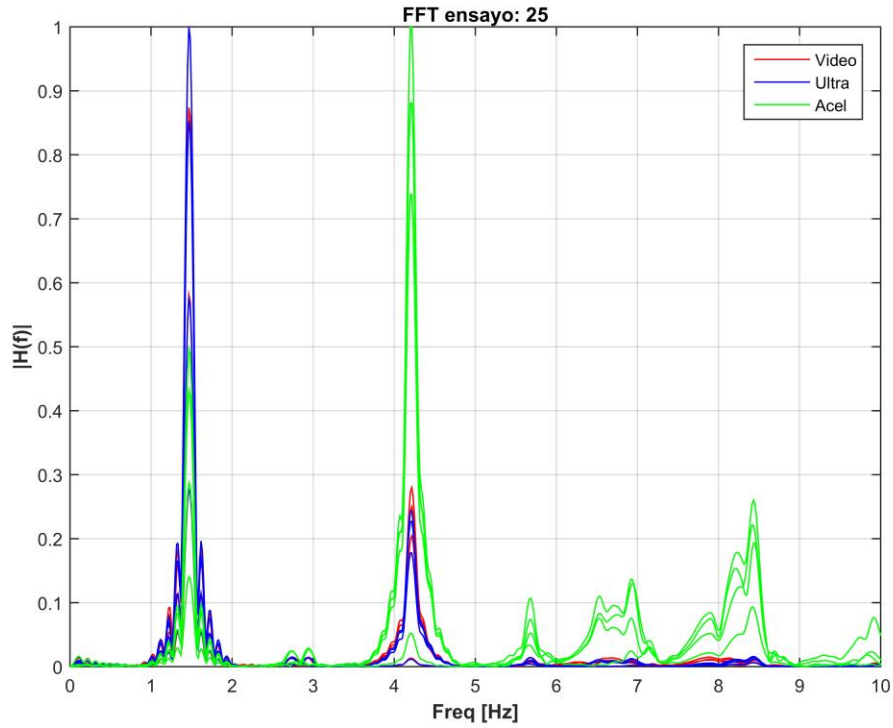


Figura 90. Análisis espectral ensayo #25, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 43. Identificación de modos de vibrar, ensayo #25.

Ensayo #25				
Excitación tipo C				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]

Tabla 44. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #25.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

5.4.2 Respuesta e identificación de modos de vibrar a 6 metros

Ensayo #15

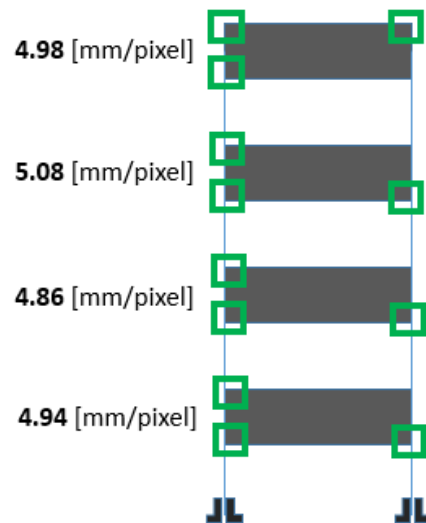


Figura 91. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #15.

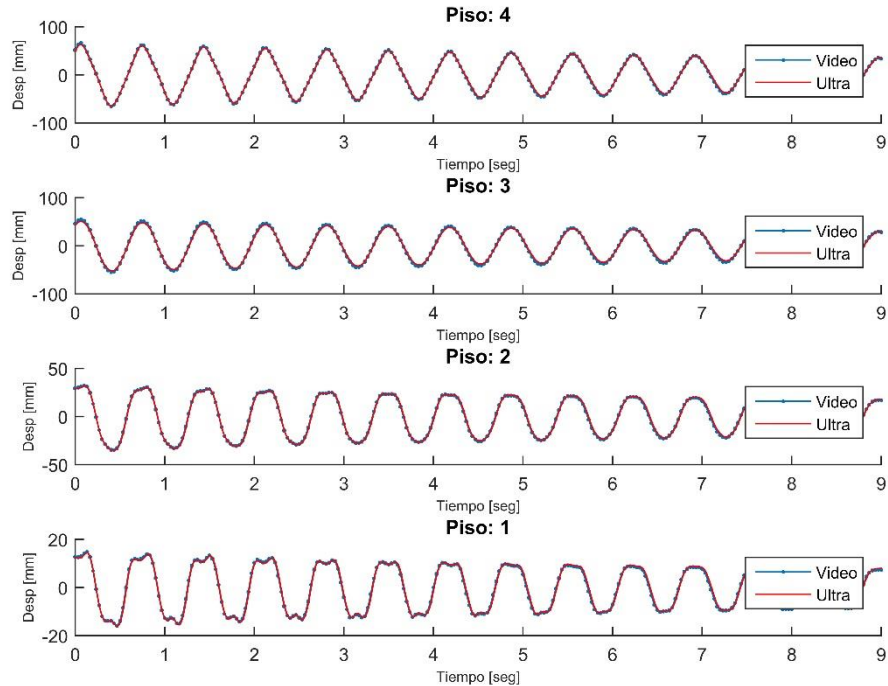


Figura 92. Desplazamientos horizontales en ensayo #15, GoPro y Ultrasonicos.

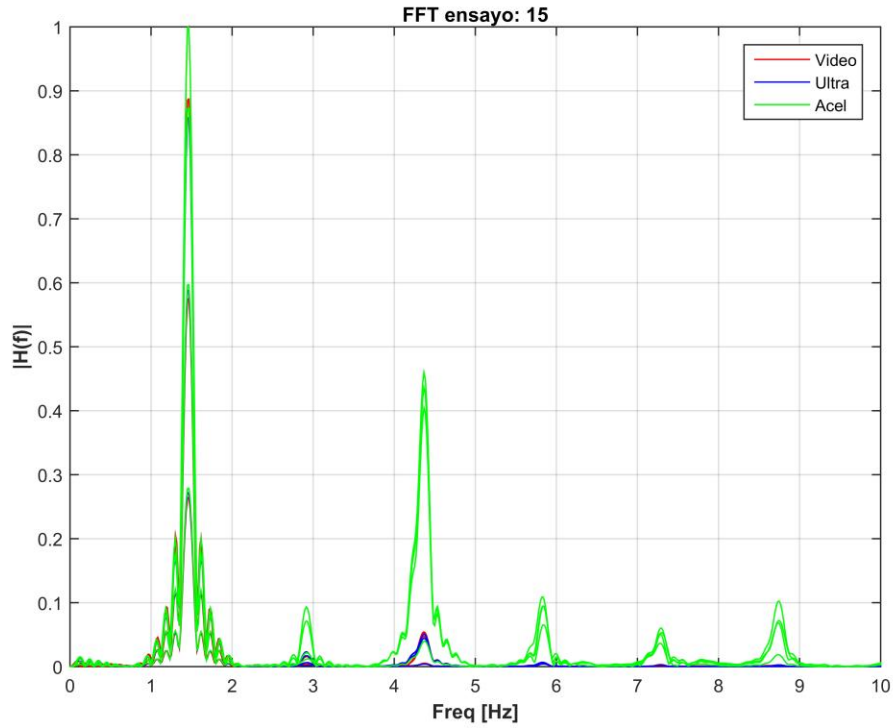


Figura 93. Análisis espectral ensayo #15, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 45. Identificación de modos de vibrar, ensayo #15.

Ensayo #15				
Excitación tipo A				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 46. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #15.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]
7.31 [Hz]
8.73 [Hz]

Ensayo #16

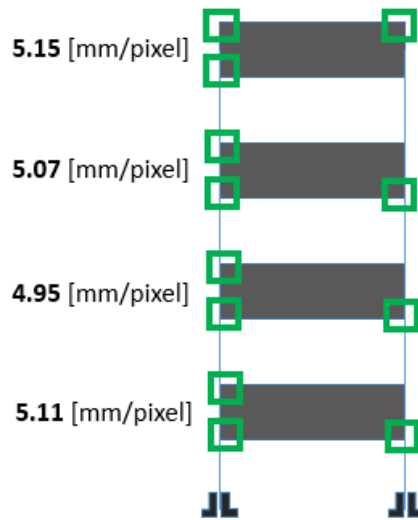


Figura 94. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #16.

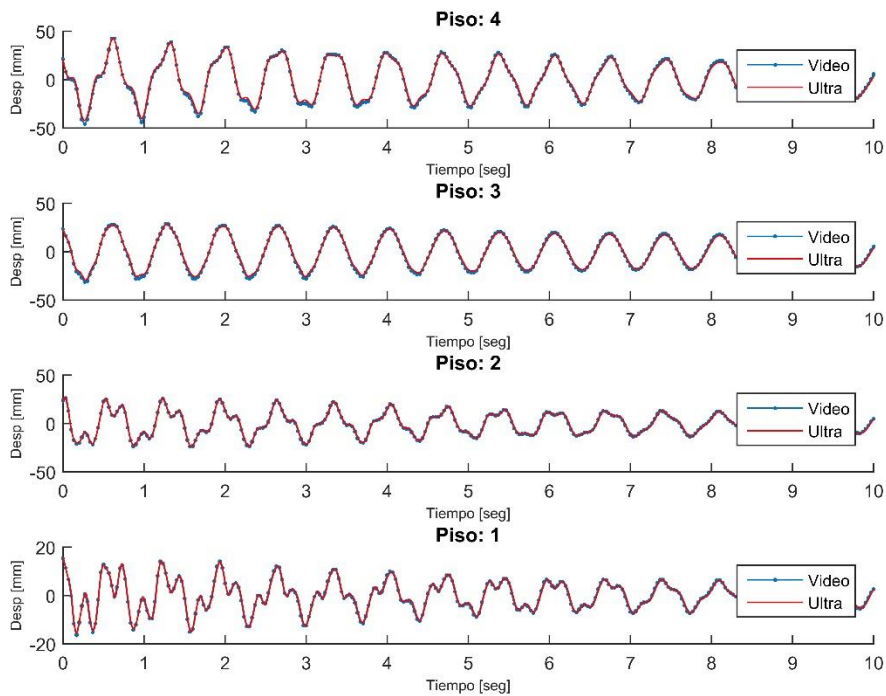


Figura 95. Desplazamientos horizontales en ensayo #16, GoPro y Ultrasonicos.

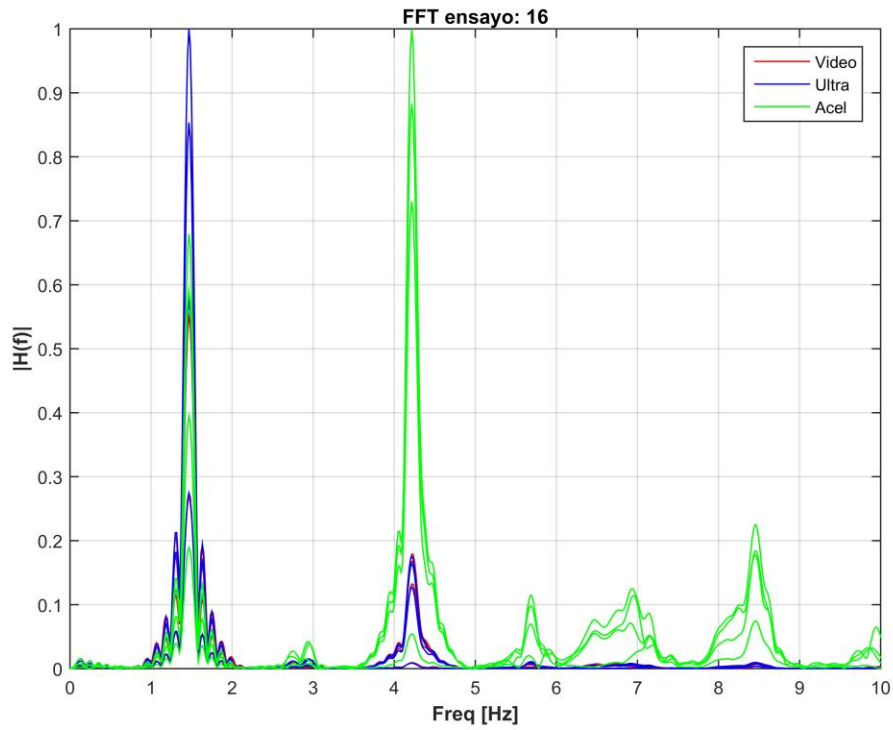


Figura 96. Análisis espectral ensayo #16, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 47. Identificación de modos de vibrar, ensayo #16.

Ensayo #16				
Excitación tipo B				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 48. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #16.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

Ensayo #17

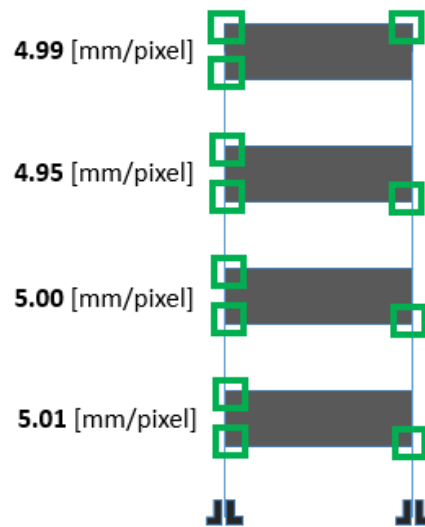


Figura 97. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #17.

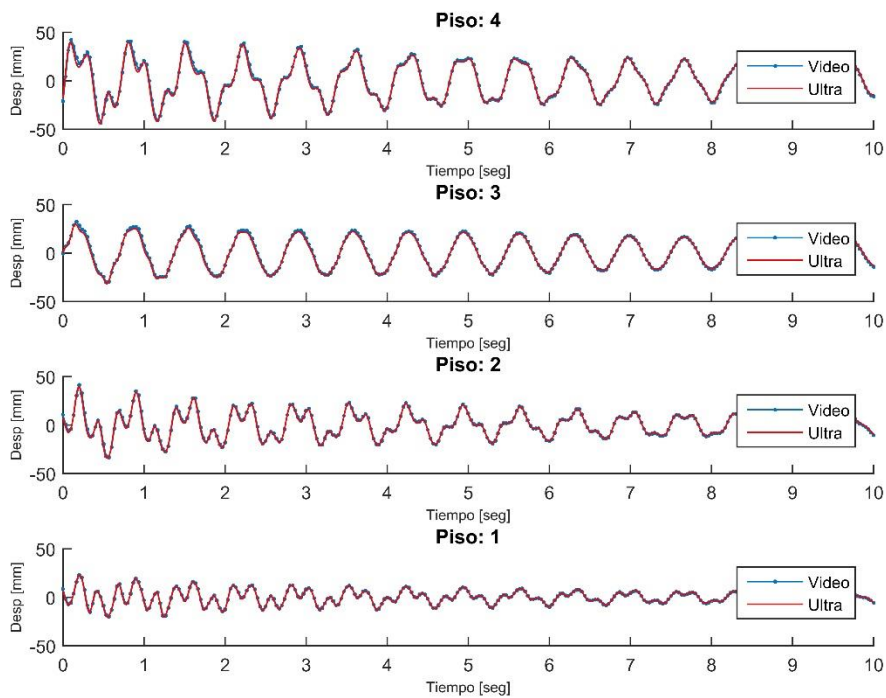


Figura 98. Desplazamientos horizontales en ensayo #17, GoPro y Ultrasónicos.

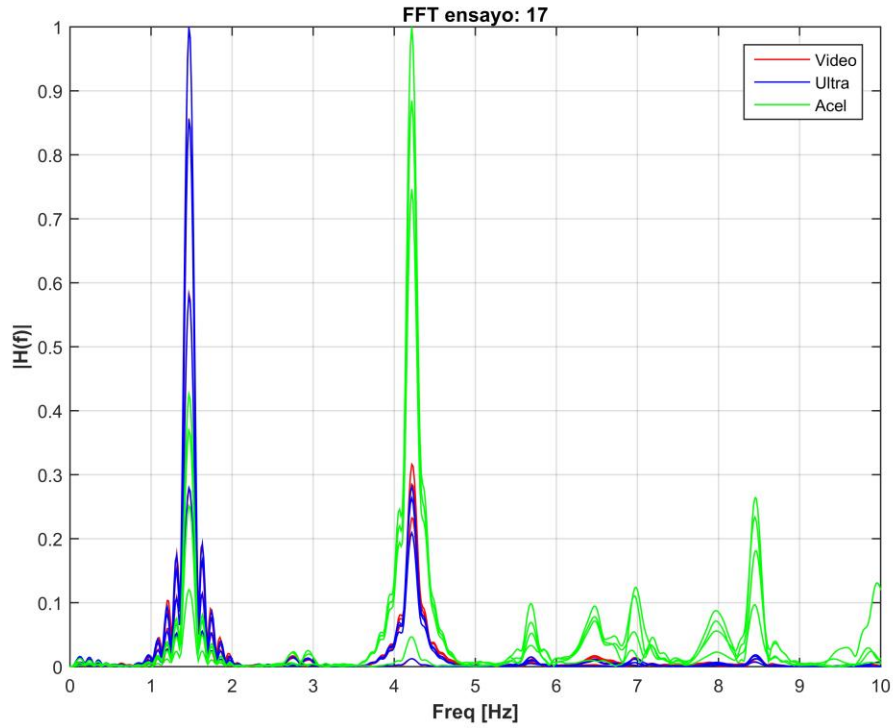


Figura 99. Análisis espectral ensayo #17, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 49. Identificación de modos de vibrar, ensayo #17.

Ensayo #17				
Excitación tipo B				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	Dist.	8.43 [Hz]

Tabla 50. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #17.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]

5.4.3 Respuesta e identificación de modos de vibrar a 8 metros

Ensayo #18

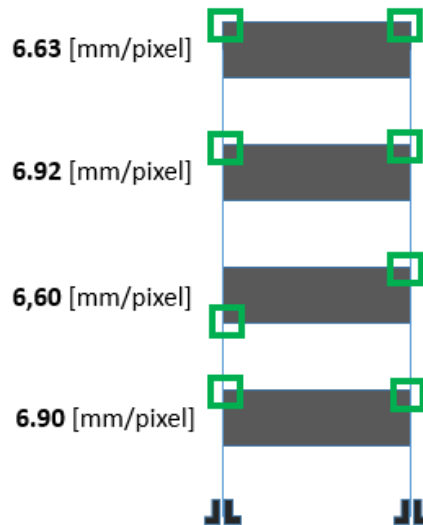


Figura 100. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #18.

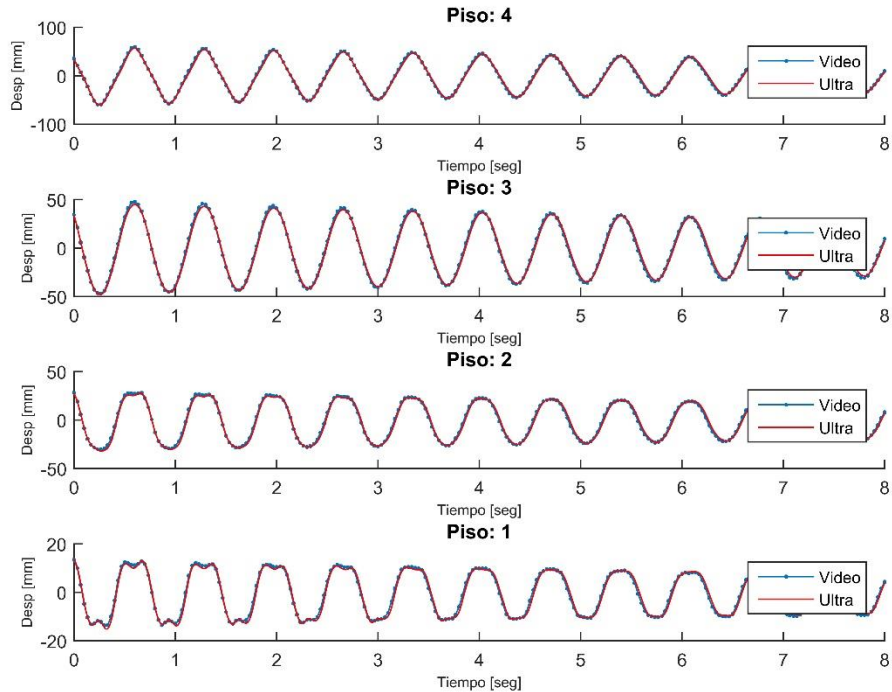


Figura 101. Desplazamientos horizontales en ensayo #18, GoPro y Ultrasónicos.

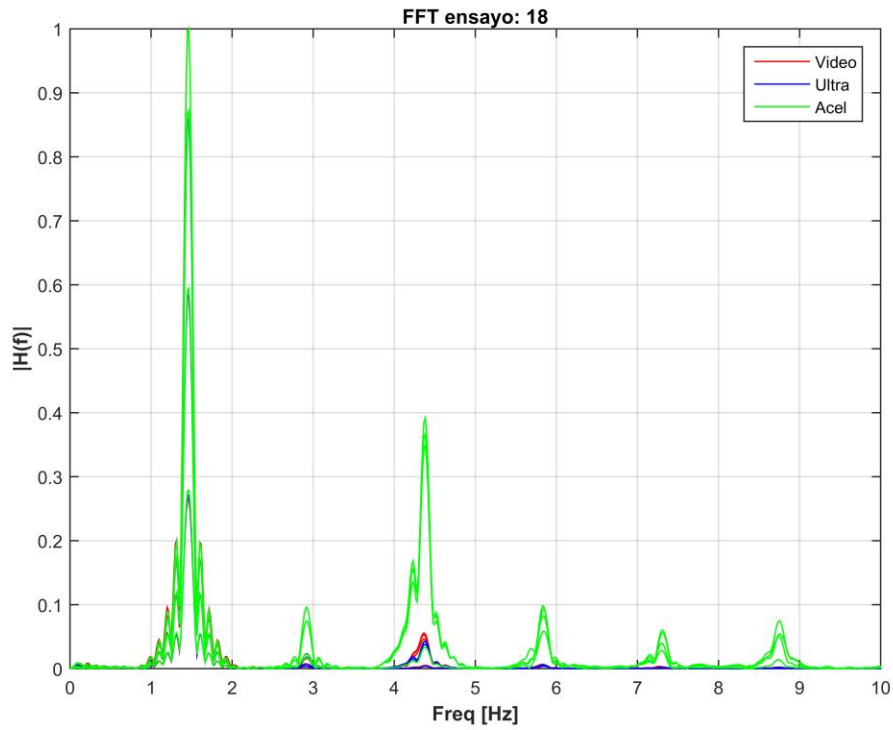


Figura 102. Análisis espectral ensayo #18, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 51. Identificación de modos de vibrar, ensayo #18.

Ensayo #18				
Excitación tipo A				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 52. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #18.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]
7.31 [Hz]
8.73 [Hz]

Ensayo #19

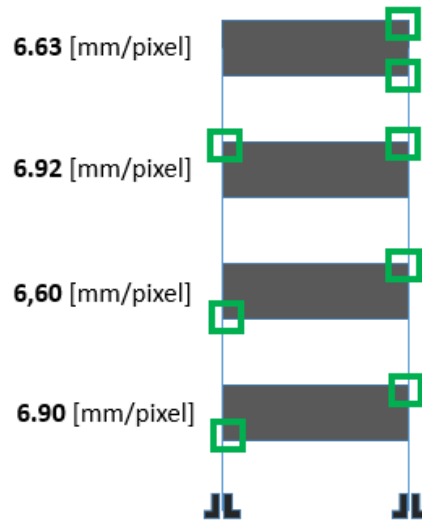


Figura 103. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #19.

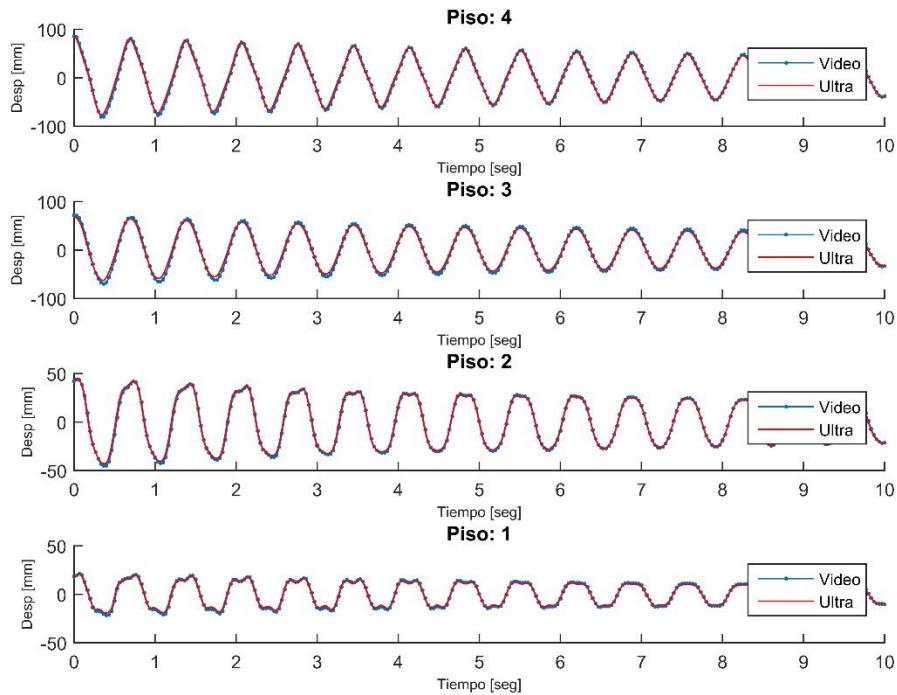


Figura 104. Desplazamientos horizontales en ensayo #19, GoPro y Ultrasónicos.

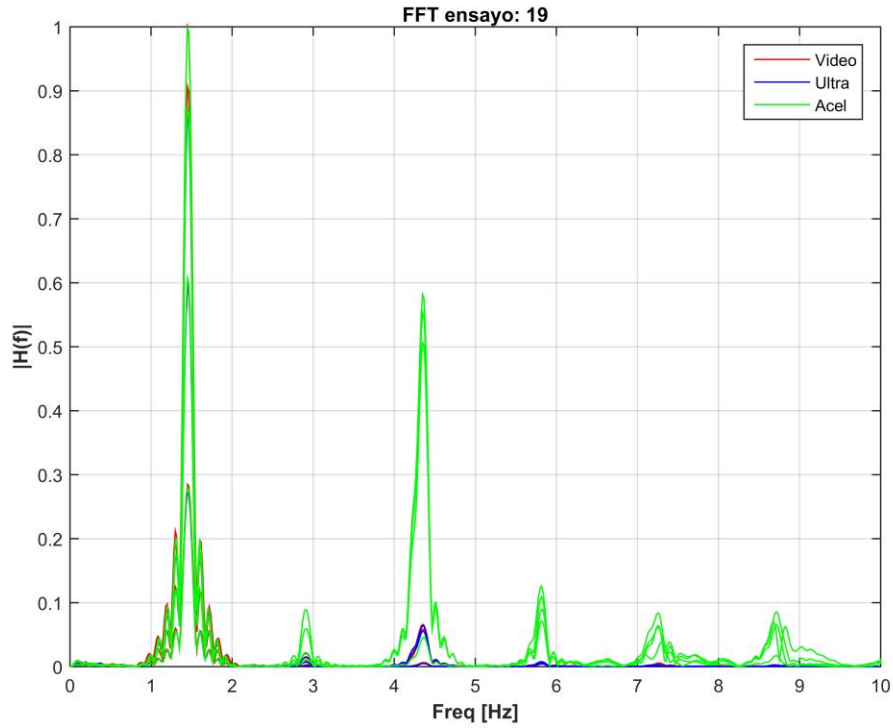


Figura 105. Análisis espectral ensayo #19, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 53. Identificación de modos de vibrar, ensayo #19.

Ensayo #19				
Excitación tipo A				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.38 [Hz]	N.I	N.I

Tabla 54. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #19.

Frecuencias adicionales
Valor
2.93 [Hz]
5.85 [Hz]
7.31 [Hz]
8.73 [Hz]

Ensayo #20

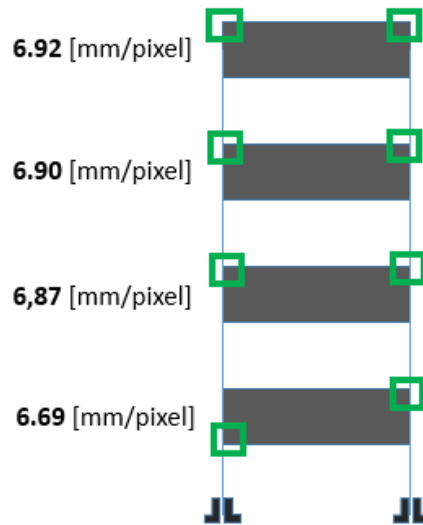


Figura 106. Factores Escala y Esquinas elegidas por cuerpo, ensayo #20.

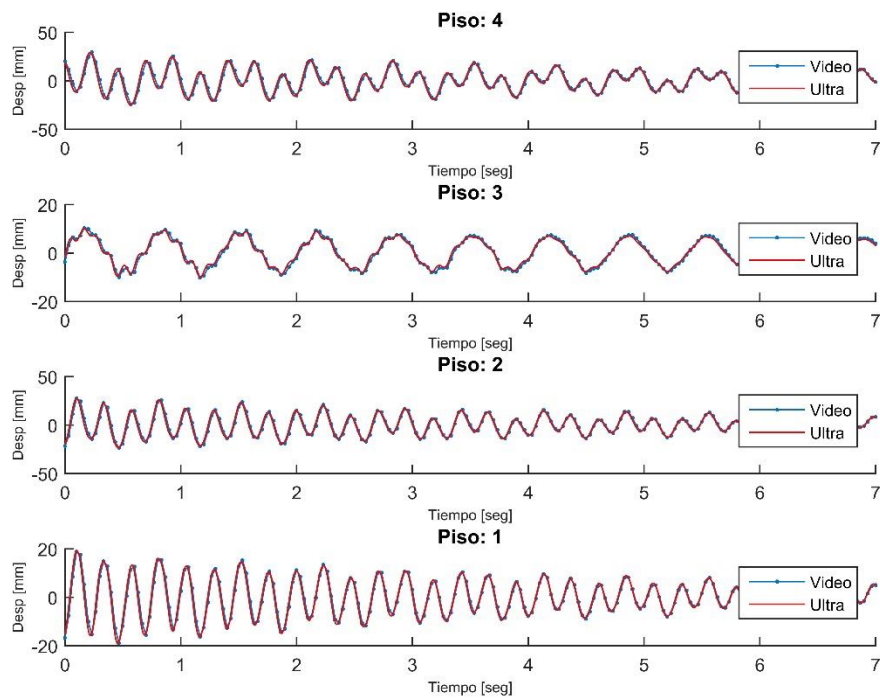


Figura 107. Desplazamientos horizontales en ensayo #20, GoPro y Ultrasónicos.

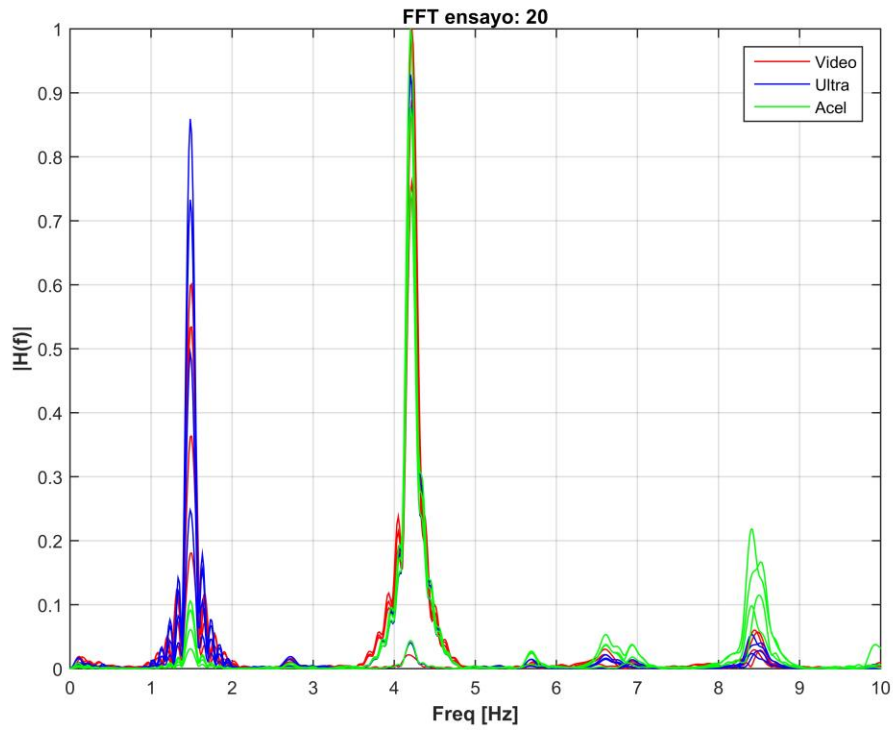


Figura 108. Análisis espectral ensayo #20, GoPro, Ultrasónicos y Acelerómetros.

Tabla 55. Identificación de modos de vibrar, ensayo #20.

Ensayo #20				
Excitación tipo B				
Sensor	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Acelerómetro	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	8.41 [Hz]
Ultrasónico	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	8.43 [Hz]
GoPro Hero3+ Black	1.46 [Hz]	4.22 [Hz]	6.61 [Hz]	8.43 [Hz]

Tabla 56. Identificación de frecuencias adicionales, ensayo #20.

Frecuencias adicionales
Valor
5.85 [Hz]

5.5 Análisis de Resultados

5.5.1 Desempeño sistema de adquisición visual

Ya definido el sistema de adquisición visual como la cámara de video junto a la rutina de procesamiento de imágenes, se pueden hacer el siguiente análisis sobre el ensayo experimental.

En primer lugar, utilizar cámaras de alta demanda en el mercado implica un fácil acceso a editores propios como GoPro Studio, que permitió remover exitosamente la distorsión gran angular intrínseca y descomprimir los registros para utilizar toda la información disponible. Sin embargo, no es un tema menor el tiempo de edición de videos que ronda los 10 minutos por archivo.

Por su parte, las principales labores de la rutina fueron logradas con éxito. Estas corresponden a la detección de esquinas (Harris) dentro de la región de interés y el posterior rastreo (KLT), por congruencia, de dichos puntos entre cuadros consecutivos de los videos. Ningún registro tuvo que ser removido por déficit de los algoritmos de procesamiento de imágenes.

El tiempo de procesamiento típico para los registros de 10 a 12 segundos, utilizando archivo de alta calidad y analizando cuatro cuerpos, ronda los cuatro minutos. Sin embargo, existirán variaciones de acuerdo al formato de grabación (calidad y tiempo), numero de cuerpos estudiados, esquinas monitoreadas y desempeño del usuario.

5.5.2 Desempeño usuario

Las labores de selección del Punto de Referencia y delimitación de Regiones de Interés no presentan degradación de resultados y no requirieron más que conocimiento previo y estratégico del usuario para su definición. Por su parte, el dibujo de líneas para calcular el Factor de Escala tiene influencia directa en los resultados de movimiento horizontal y vertical, ya que los resultados son ponderados por esta constante. No así el giro relativo, que depende netamente del seguimiento de puntos. Para ilustrar el efecto de la distancias sobre el Factor Escala se presenta un gráfico de dispersión, Figura 109, con una muestra de doce datos (número de Factores Escala obtenidos en ensayos a seis y ocho metros).

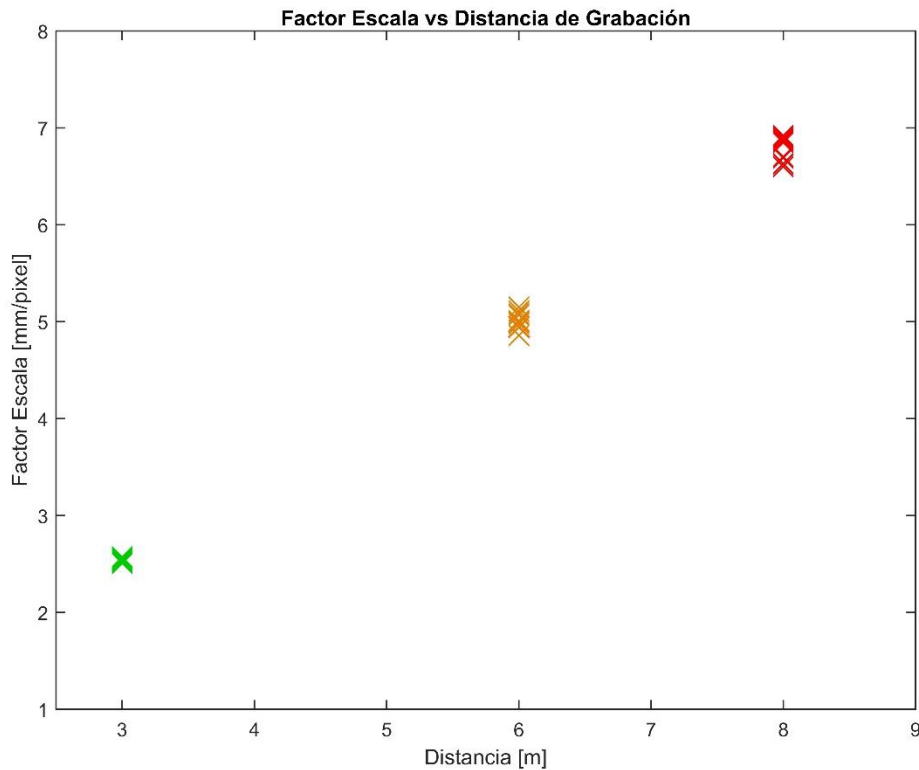


Figura 109. Distribución de Factores Escala para distancias de 3,6 y 8 metros al modelo.

Tabla 57. Factor de Escala medio y desviación estándar para las tres configuraciones.

Distancia [m]	3	6	8
\bar{x} [mm/pixel]	2.54	5.01	6.81
σ [mm/pixel]	0.02	0.08	0.12

Es importante señalar que el rastreo espacial de punto, ejecutado por el algoritmo KLT, no se realiza en unidades enteras de píxeles sino en escalas menores de sub-píxel. Dicha precisión logra con interpolación bilineal que asocia valores de intensidad a las zonas intermedias de los píxeles. En resumen los valores de Factor Escala, asociados a cada análisis, no se asocia a la medida mínima que el sistema es capaz de registrar, pero sí a la precisión de confianza de sistema.

De acuerdo a la Tabla 57, a medida que los registros se hacen a mayor distancia, mayor es la dispersión de valores del Factor Escala. Esto ocurre a causa del zoom digital utilizado, cuyos efectos se amplifican a medida que el cuerpo está más alejado, reduciendo la resolución y dificultando el dibujo de las líneas de escala sobre la imagen. Recurrir al zoom óptico como un medio para el acercamiento, sin perjudicar la calidad de la imagen, no es posible debido a que no es una herramienta incorporada en el modelo de GoPro utilizado.

5.5.3 Desempeño modelo estructural

La estructura de cuatro pisos diseñada y descrita en la sección 5.1, cumplió con las condiciones de rigidez necesarias para excitar modos superiores manualmente, como se observa en el ensayo #24 (Figura 87) o el ensayo #6 (Figura 51). La no visualización de dichos modos en otros ensayos se atribuye a la falta de experiencia en la excitación manual de la estructura.

También existe una clara variación del segundo modo de vibrar entre ensayos con excitaciones del tipo A con los tipos B o C, descritas en 5.3. Este hecho motivó una inspección y posterior identificación de una trabazón en una de las columnas inferiores al producirse grandes desplazamientos, como en excitaciones del tipo A. Este fenómeno rigidiza dicha columnas produciendo el aumento de la frecuencia de vibrar del segundo modo (único modo superior observable en excitación tipo A) de 4.22 a 4.38 [Hz].

Resulta importante destacar la presencia de frecuencias adicionales en contenido espectral observado en los ensayos, una clara visualización ocurre en el ensayo #3, Figura 42. Esto se debe a un comportamiento no lineal del sistema, al cual se asocia fenómenos como la presencia de armónicos. La característica principal es la aparición de frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema vibratorio, lo cual, precisamente ocurre en ensayos como el #3 y se expone en la Tabla 29.

Tabla 58. Valores medidos de armónicos y múltiplos del modo fundamental.

Armónico Medido	Valor	Múltiplos F. Fundamental	Valor
1	-	(Modo 1)	1,46 [Hz]
2	2,93 [Hz]	(Modo 1) x 2	2,93 [Hz]
3	N.I	(Modo 1) x 3	4,40 [Hz]
4	5,85 [Hz]	(Modo 1) x 4	5,87 [Hz]
5	7,33 [Hz]	(Modo 1) x 5	7,34 [Hz]
6	8,75 [Hz]	(Modo 1) x 6	8,76 [Hz]

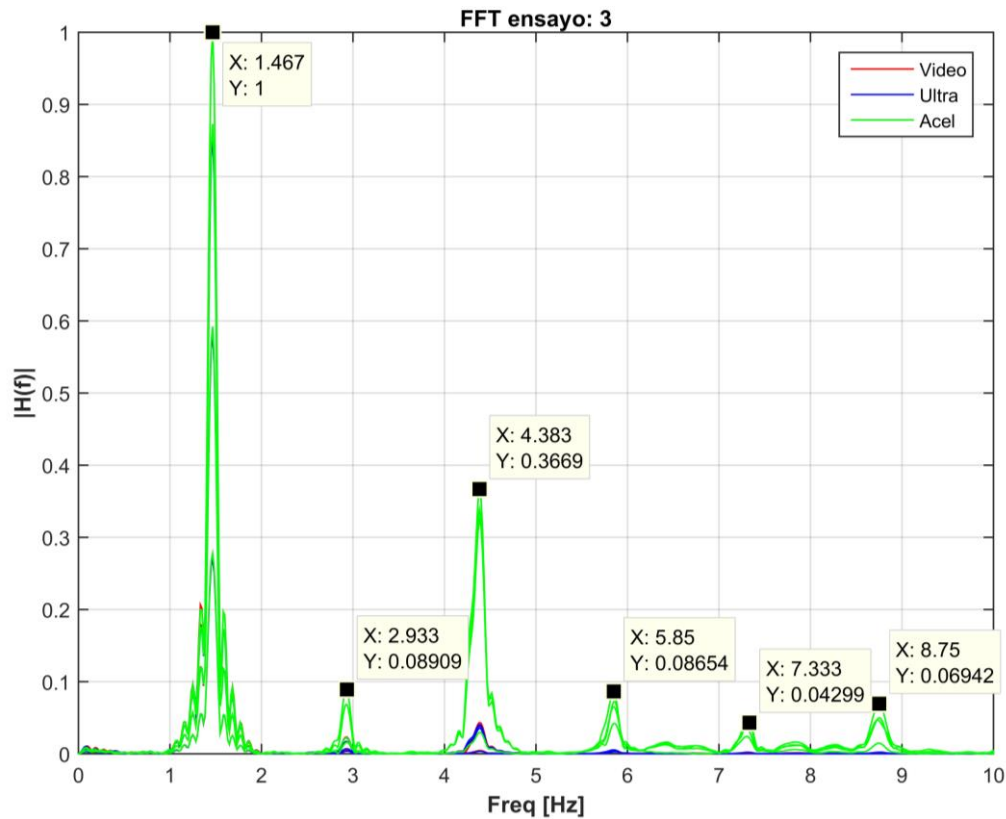


Figura 110. Identificación de modos de vibrar y armónicos.

5.5.4 Comparación de desplazamientos: GoPro y Ultrasónicos

De manera complementaria se instrumentó el modelo con sensores de desplazamiento de uso profesional, como lo son los ultrasónicos. Para las tres distancias de medición se obtuvieron curvas similares entre los resultados del método visual y los sensores alternativos, logrando registrar amplitudes menores a 1 [cm] en el piso tres a una distancia de 3 metros (ensayo #6), Figura 50, al igual que en el piso uno a 8 metros de distancia (ensayo #18), Figura 101.

Las pequeñas, y a veces notorias, diferencias entre los resultados se asocia a la falta de precisión en la definición del largo de escala dibujado por el usuario, implicando Factores Escala que difieren de la realidad. Dado que ambos registros presentan tasas de muestreo diferentes y el acoplamiento no es perfecto, se utilizó la comparación de peaks para medir la diferencia, aproximada, de ambos sistemas.

Los resultados se presentan en la Figura 111 y corresponden a la máxima diferencia de la respuesta registrada para cada uno de los 25 ensayos.

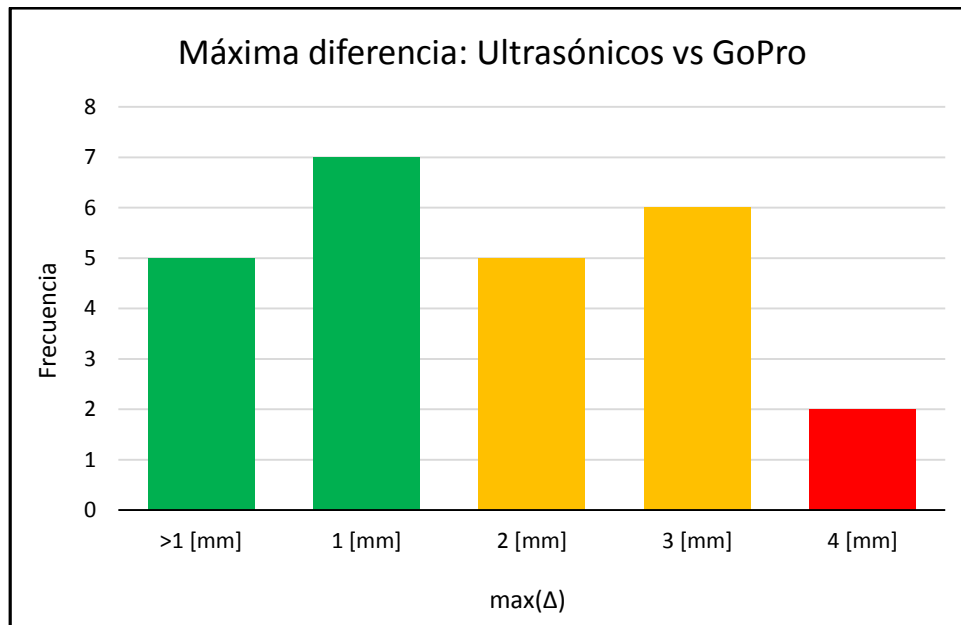


Figura 111. Máxima diferencia, absoluta, de peaks para registros en ultrasonicos y sistema visual para un total de 25 ensayos.

5.5.5 Comparación de análisis espectral: GoPro, Ultrasonicos y Acelerómetros

El contenido de frecuencias se analizó a partir de la respuesta obtenida por instrumentos para la medición de desplazamiento (ultrasonicos y la GoPro) y aceleraciones (acelerómetros).

En todas las tablas expuestas en la sección de resultados se observan satisfactorios aciertos entre los tres sensores para el primer y segundo modo de vibrar. Respecto a los modos superiores, la contaminación por armónicos complicó la identificación por inspección de las frecuencias vibratorias, como ocurrió en el ensayo #21, Figura 78, en donde existe la amplitud suficiente pero la distorsión degradó la claridad de los peaks. Pese a esto, ensayos como el #6, Figura 51, o #24, Figura 87, se mostraron limpios de distorsión y excitados de tal forma que permitió la visualización de modos superiores. Estos últimos, tercer y cuarto modo, presentaron menos precisión por parte de la GoPro asociado a la falta de resolución por tasa de muestreo (30 [Hz] vs 200 [Hz] de sensores alternativos).

5.5.6 Análisis de perturbaciones externas sobre la cámara

Las perturbaciones de vibraciones externas sobre la GoPro fueron evaluadas por acelerómetros en los tres ejes de la cámara durante los ensayos, registrando magnitudes mínimas de aceleración. Para efectos de los resultados expuestos en 2.4, de movimiento horizontal, se presenta en la Figura 112 (ensayo #3) la evidente diferencia de las aceleraciones sobre el modelo y la cámara utilizada en los ensayos.

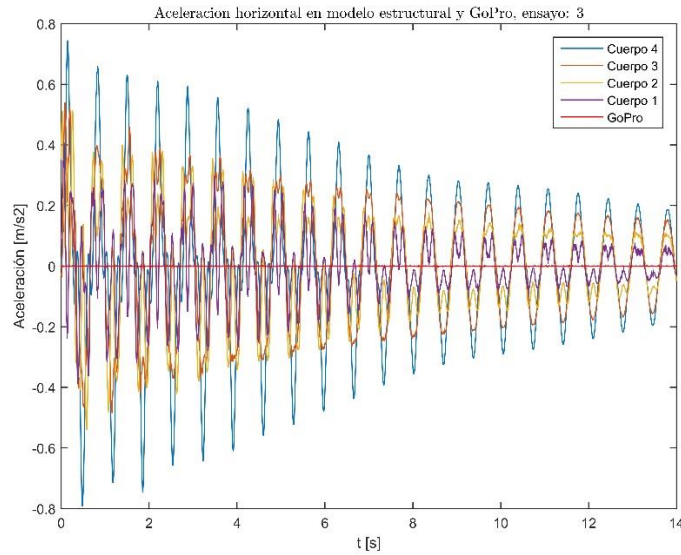


Figura 112. Aceleraciones sobre GoPro y modelo estructural durante ensayo #3.

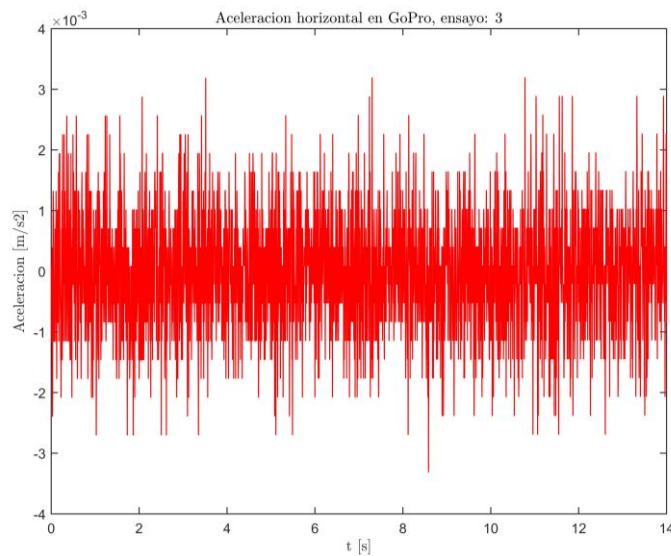


Figura 113. Aceleración GoPro en dirección de análisis (horizontal) durante ensayo #3.

Notar que las lecturas no muestran la señal asociada a un cuerpo solicitado por vibraciones externas, lo que es esperable bajo las condiciones de laboratorio en que se llevaron a cabo los registros. Luego la señal captada corresponde a la lectura del ruido asociado al conversor del sistema de adquisición. Todas las señales registradas responden a patrones similares de forme y magnitud, cercana a los 3 [mm/s²].

Las demás figuras comparativas se adjuntan en la sección de Anexos y, al igual que en la figura anterior, no logran tener la suficiente magnitud estar contenido los resultados de movimiento. En resumen, la alteración de valores finales se vio afectada por faltas en el cálculo del Factor Escala y no por ruido sobre la cámara GoPro.

CAPÍTULO VI: Ensayo en Terreno

Una vez validado el método visual con ensayos en laboratorio, utilizando instrumentos de uso profesional, se plantea un ejercicio en terreno sobre una estructura real. La elección se realizó junto con al profesor guía, de acuerdo a los intereses y desafíos impuestos.

El objetivo del ensayo es poner a prueba las limitaciones del método visual en condiciones no controladas de luz, ruido y geometría. Específicamente la detección de bordes no ideales, como las del modelo ensayado, y el posterior rastreo espacial de puntos cuyas propiedades pueden variar durante el registro. En resumen, este ejercicio permitirá estudiar el comportamiento en terreno del método y generar información para desarrollo futuro de temas similares.

6.1 Descripción Estructura en Estudio

Ésta corresponde a la pasarela que conecta la calle Luis Thayer Ojeda con el Mall Costanera Center en Providencia, construida como parte de las 22 obras de mitigación de descongestión vehicular y peatonal exigidas para el proyecto. Fue inaugurada el año 2012 y fue diseñada para soportar doce mil personas por hora. Los pilares están hechos de hormigón y la losa se sustenta sobre una viga postensada, tiene una extensión de 75 metros, 6 metros de ancho y una altura de 4.5 metros.



Figura 114. Ubicación pasarela Luis Thayer Ojeda-Costanera Center. Google Earth.

La estructura es analizada por el programa como un sistema de 20 cuerpos acomplados, enumerados desde izquierda a derecha y distribuidos a lo largo del vano entre los pilares principales. La dimension “L” necesaria para calcular el Factor de Escala, tiene un valor de 1500 [cm] y se especifica en la Figura 115, fue medida en terreno y se asume una magnitud similar para cada sección. Al igual que en el ensayo experimental, como Punto de Referencia se utiliza un punto en las cercanías del centro del cuerpo.

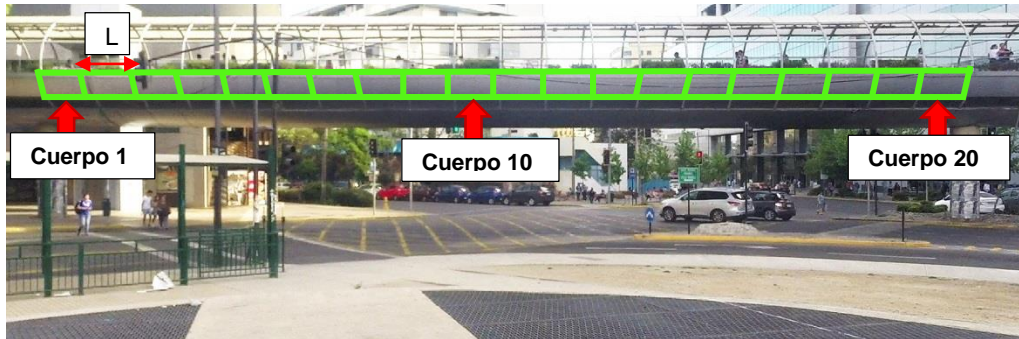


Figura 115. Pasarela Luis Thayer Ojeda-Costanera Center, cuerpos estudiados y dimensiones conocidas para cálculo de Factor Escala.

6.2 Montaje en Terreno

Al igual que en laboratorio, se utilizó un trípode provisto de burbujas niveladoras que aseguran la perpendicularidad de la cámara respecto al plano. Sin embargo, no se ocuparon acelerómetros por motivos de transporte y seguridad de los equipos a disposición de los alumnos y docencia de la universidad.

Se decidió tomar mediciones el día 9 de octubre, alrededor de las 17:00 horas, asegurando un alto flujo según datos de la plataforma Google, Figura 116, y condiciones de luz media en comparación a la mañana o en la puesta de sol. En Santiago predominó el tiempo parcialmente nublado, temperatura de 25° [C] y humedad aproximada de 20 por ciento.



Figura 116. Diagrama referencial de concurrencia a Mall Costanera Center proporcionado por Google.

El muestreo se realizó a una distancia aproximada de 34 metros hacia la perpendicular de la pasarela, tomando en cuenta que el vano entre las columnas principales quede dentro del cuadro de grabación.



Figura 117. Posición de registro referencial. Google Earth.

6.3 RESULTADOS

Considerando las condiciones no controladas del ensayo se realizó un peritaje previo sobre los veinte cuerpos identificados y las esquinas factibles a rastrear. Por razones especificadas en el análisis de resultados, solo el cuerpo 3 no presenta pérdida, distinguible visualmente, del rastreo de sus esquinas.

Los resultados expuestos corresponden al movimiento $\{x, y, \Delta\theta\}$ del tercer cuerpo, considerando solo dos esquinas de monitoreo y un periodo de registro aproximadamente de cinco minutos. La planilla utilizada es la siguiente:

```
FileIn='Puentel.avi'; %Nombre del Video
nEsquinas=[2]; %Número de esquinas monitoreadas por cuerpo (Define numero
de cuerpos)
LargoReal={[15000]}; %Dimensiones lineales conocidas del cuerpo
FileOut='Resultados1'; %Nombre de archivo para resultados
igraf=1; % Graficar:1 - No Graficar:0
ayuda=0; % Activar anotaciones de ayuda:1 - Desactivar anotaciones de
ayuda:0
videoAcc=1; % Activar video de monitoreo:1 - Desactivar video de
monitoreo:0
TolF=1e-5; %Tolerancia de termino sobre el valor de la función.
TolXX=1e-5; %Tolerancia de termino sobre "x".
MaxItera=5000; %Numero máximo de iteraciones permitidas.
```

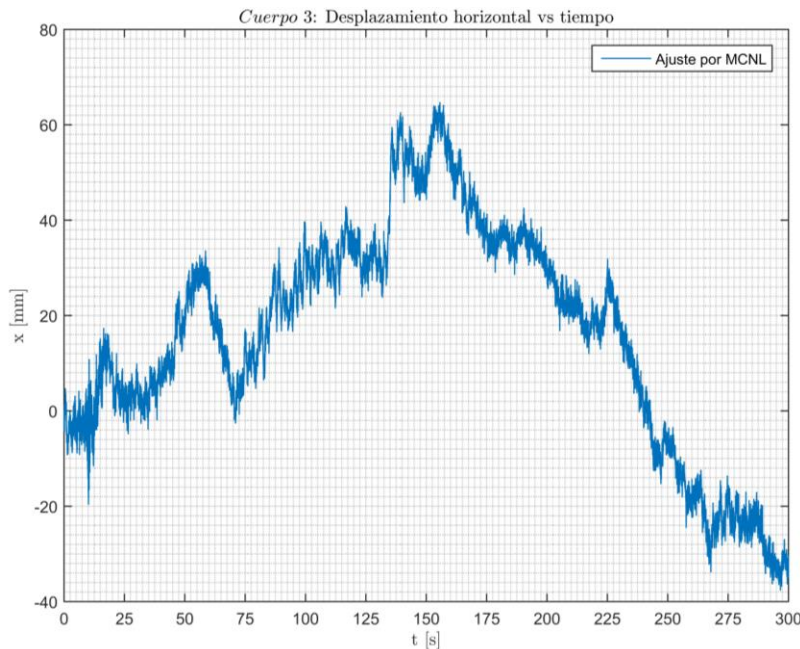


Figura 118. Movimiento horizontal cuerpo 3.

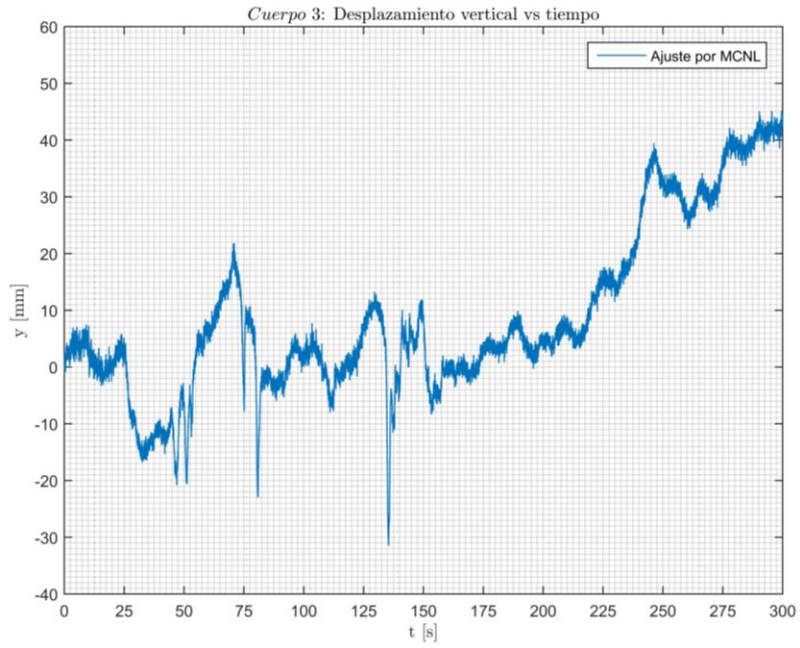


Figura 119. Movimiento vertical cuerpo 3.

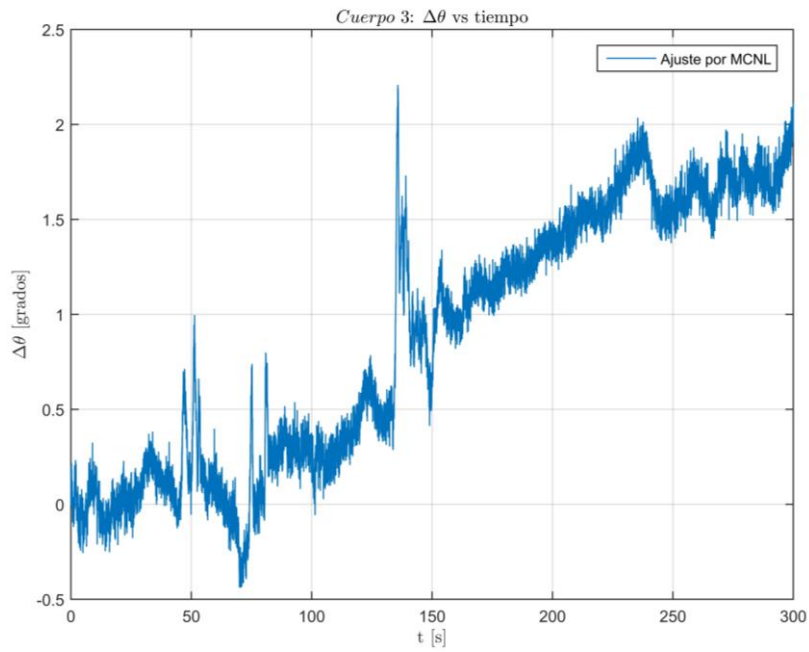


Figura 120. Giro relativo cuerpo 3.

6.4 Análisis de Resultados

6.4.1 Desempeño sistema de adquisición visual

Respecto a la rutina definida, nuevamente se puede analizar su desempeño en dos tareas. La primera es la detección de los puntos de interés, correspondiente a esquinas del cuerpo, que se realizó sobre los veinte cuerpos establecidos. Para todos hubo plena detección, logrando capturar las propiedades intrínsecas de los puntos dispuestos rastrear en los siguientes cuadros del video.



Figura 121. Visualización de detección de esquinas para cuerpo #3.

El monitoreo inicialmente se observó efectivo, aun cuando no se presentó movimiento neto de la estructura. Sin embargo, durante la visualización se pudo observar como los puntos esquinas se desprendían de su posición, a excepción de las esquinas del cuerpo número tres. Recordando que el algoritmo de rastreo KLT funciona buscando entornos similares entre cuadros, se puede decir que la abundancia y consistencia de la información entre cuadros es vital para el correcto acierto de puntos.

6.4.2 Movimiento registrado en cuerpo 3

Los diagramas de posición horizontal, vertical y giro relativo en el tiempo, presentados en el punto 6.3, entregan evidente información errónea sobre el comportamiento de la pasarela. Estos resultados son atribuibles a los pequeños desplazamientos que no lograron ser cubiertos por la resolución de la cámara. Además de las variables y factores externos, explicados en 6.4.3, a considerar durante el monitoreo bajo condiciones no ideales.

6.4.3 Variables externas en el registro a considerar

En primer lugar, al estudiar puntos esquinas en zonas con tonalidades oscuras, es necesario evitar la intervención de intensidades altas (como la del cielo, Figura 122). La idea es que las 256 tonalidades de grises que un sistema de 8 bits puede almacenar (GoPro) estén totalmente inmersas en el cuerpo estudiado, mejorando así la definición de los tonos más oscuros, evitando el ruido en la zona de interés y aumentando el contraste en el plano estudiado. Este fenómeno, denominado sobreexposición, es similar al que ocurre cuando una persona se saca una foto a contraluz, resultando un rostro “oscurecido” y sin mucha definición de los rasgos faciales.

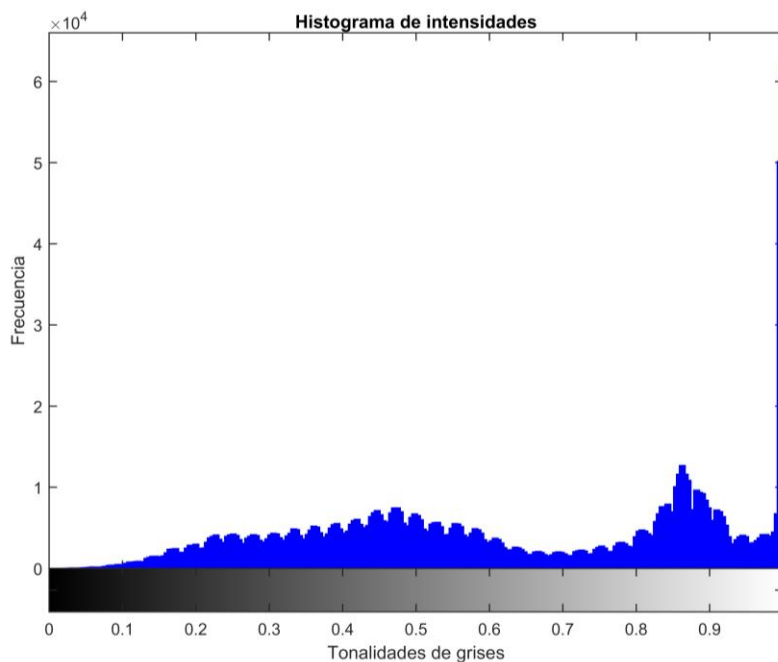


Figura 122. Histograma de intensidades, normalizado, para el cuadro inicial del registro sobre Pasarela Luis Thayer Ojeda-Costanera Center.

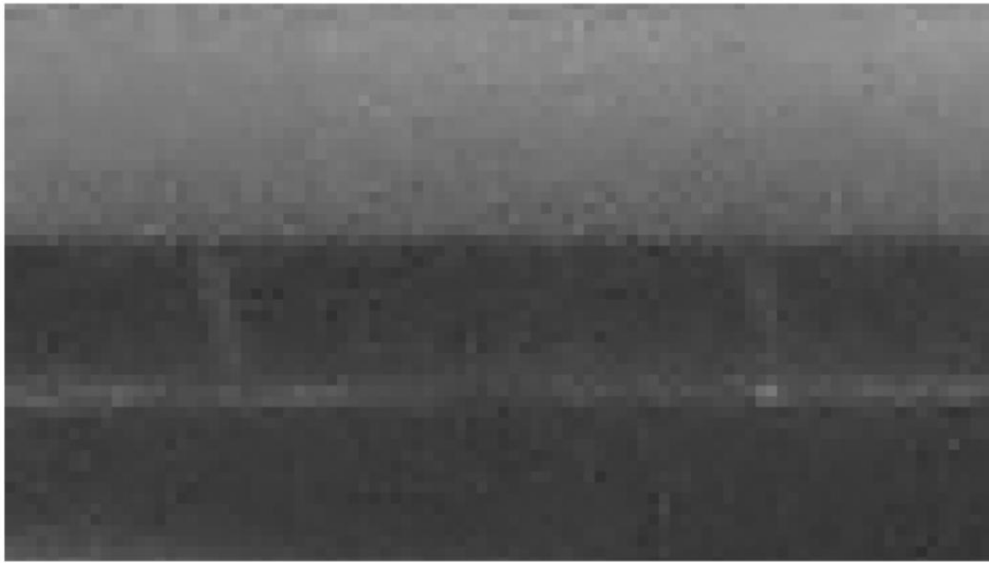


Figura 123. Zona de estudio, baja en resolución y definición de tonalidades.

La variable más dañina para el algoritmo KLT, que no fue previamente considerada, corresponde al constante reflejo que buses o autos de gran tamaño provocaban sobre la pasarela. Dado que el rastreador busca similitud en los entornos de puntos entre cuadros, la iluminación sobre la superficie generó incongruencia de información que derivó en la confusión y posterior pérdida del monitoreo de esquinas.

Finalmente, las vibraciones externas con origen en el alto tránsito vehicular y peatonal en el horario de medición (domingo en la tarde). Pese a que estas alteraciones fueron pequeñas en el ejercicio de laboratorio, en terreno las perturbaciones se vuelven perceptibles aún en personas.

CAPÍTULO VII: Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones de la investigación, desarrollo y resultados de este trabajo de título:

- El método visual propuesto permitió medir el movimiento del modelo estructural de forma efectiva en laboratorio, llegando a tener una precisión similar a la de ultrasónicos profesionales. Respecto a este último, existe la clara ventaja al no requerir el uso de equipos complementarios como el sistema de adquisición de datos, fuente de poder y denso nivel de cableado.
- El tiempo de instalación instrumental contempla montar el trípode y asegurar el paralelismo respecto a los cuerpos de interés. Experimentalmente representó una ventaja sobre el tiempo de montaje de los acelerómetros y ultrasónicos, que aparte de la instalación de equipos complementarios, el cableado es un trabajo riguroso y delicado para asegurar la correcta toma de datos. Sin embargo el sistema propuesto requiere la post edición de videos, proceso con un costo temporal no menor (cortar, remover distorsión, descomprimir).
- Se requiere la correcta definición de las líneas de escala, ya que tiene total influencia en la magnitud de los resultados (Factor Escala). Esto otorga una gran responsabilidad al usuario para la validez de los mismos, sin embargo, no se necesita más que cualidades básicas para la identificación de formas.
- Para distancias hasta 8 metros se pueden registrar desplazamientos menores a 1 [cm], reconociendo plenamente hasta los 7 milímetros para esta última. Resulta interesante este hecho, más aun considerando que se utilizó una cámara deportiva de mercado “antigua” en su línea (actualmente está disponible la GoPro Hero 5 con formatos de grabación de 4K a 30 fps).
- El contenido de frecuencias para el primer y segundo modo también logró coincidir con los registrados por los ultrasónicos y los acelerómetros. Sin embargo, para modos superiores no se logró la claridad de su precisión por la presencia de frecuencias contaminantes. De todos modos presentó amplitudes similares a las del ultrasónico, lo que es natural en sensores de desplazamientos, no así en sensores de aceleración.

- En condiciones controladas, como en laboratorio, las perturbaciones externas no se tornan dañinas para los registros. Sin embargo, dependiendo de la naturaleza de los ensayos se debe considerar registrar la influencia de ellos, por ejemplo en ensayos con impactos involucrados.
- La post edición de videos (descompresión y eliminación de la distorsión) resultó un proceso mucho más importante de lo esperado. El primer proceso permite trabajar con toda la información disponible en el video, facilitando el trabajo y evitando la confusión de rutinas de rastreo por congruencia como Kanade-Lucas-Tomasi. El tema de la distorsión es intrínseco de las cámaras de video, específicamente de la distribución de la óptica interna. Dicho esto, se deben utilizar modelos de corrección que trabajen con las propiedades de la cámara, o recurrir a metodologías alternativas como la herramienta de Matlab: *Single Camera Calibration App*.
- Perturbaciones lumínicas en terreno, como la luz reflejada por los autos, son factores a considerar cuando se ocupan algoritmos de rastreo basado en la similitud de entornos, pues generan cambios locales de intensidad de luz que desfavorece el acierto de puntos.
- Respecto a las variables de salida que cuantifican la magnitud del desplazamiento mínimo entre cuadros, se puede decir, basado en las perturbaciones captadas sobre la cámara y al ruido con origen en el granulado de la imagen, que dicho valor no es concluyente sobre la medida de precisión de la cámara. Más bien, dicho desplazamiento mínimo es capturado gracias a la interpolación bilineal incluida en el rastreo espacio de puntos. Finalmente, el Factor Escala que domina las unidades de los píxeles, corresponde al valor de confianza bajo el cual se medirán vibraciones.
- Hoy en día existe el conocimiento y las herramientas suficientes para desarrollar métodos visuales destinados a cumplir las mismas tareas que sensores profesionales en la instrumentación estructural. La demanda del mercado de cámaras digitales y las ciencias computacionales, como la Visión Artificial, son los principales impulsores. Ésta última, aun es joven y se encuentra en los primeros pasos para entrar de lleno a la ingeniería civil (bibliografía presenta fechas de publicación cercanas al año 2016).

7.1 Recomendaciones

Continuando con la línea de investigación de este trabajo, se recomienda:

- Utilizar el sistema de adquisición en ensayos de laboratorio controlados, como medida alternativa de registro de datos. De este modo se podrá recopilar información suficiente para concretar su uso, identificar otros factores externos a considerar durante el muestreo de datos y estudiar geoméricamente elementos o sistemas factibles para monitorear.
- Dada la finalidad deportiva del uso de cámaras GoPro, no se contempla el zoom óptico como parte del sistema interno. Este hecho obliga a hacer uso del zoom digital como medida provisoria para tener una mejor vision de los cuerpos a monitorear. Siendo el zoom óptico una herramienta de acercamiento sin pérdida de resolución, a diferencia del digital, se recomienda utilizar cámaras o lentes que aseguren dicha función. Esto beneficia la detección y monitoreo de puntos, ya que existiría más información en un mismo cuadro, además de lograr grandes acercamientos a zonas estratégicas.
- Incorporar algoritmos de procesamiento de imágenes desarrollados durante los últimos años, como “*Eulerian Video Magnification*”. Este permite exponer visualmente pequeños movimientos de un registro, tal como lo hacen los acondicionadores de señal. En consecuencia, desplazamientos tan pequeños como los de un edificio, podrían ser identificados por el sistema de adquisición y luego compensados según la amplificación aplicada, para traducirlo en magnitudes reales de movimiento.
- Buscar un enfoque estructural adecuado del sistema de adquisición establecido, tal como elementos o sistemas viales (semáforos, estructuras de iluminación, etc.) que comúnmente presentan altas vibraciones y desgaste por la solicitud diaria. Definiendo un foco se pueden establecer estrategias de medición, como la posición instrumental, mitigación de ruido sobre la cámara y automatización para la adquisición de la información.
- Evaluar las características del entorno de los puntos de control, es decir, la necesidad de altos contraste o no. Esto se presenta en la diferencia entre las esquinas del ejercicio en laboratorio y en terreno. Por un lugar, las esquinas del modelo presentaban un entorno rico en información de grises, variando desde tonalidades muy oscuras a muy claras, mientras que en terreno la

información era escasa, se presentaban pocos matices tanto por la configuración de la esquina como por la sobrexposición del cielo, que empobreció las zonas oscuras de información. Definir la necesidad de contrastes puede plantear una estrategia de grabación sobre el cuerpo de estudio, para que su información lumínica sea la más relevante del cuadro, u incluir procesos extra de edición como la ecualización de imágenes para el realce de contrastes.

- Integrar la adquisición de imágenes en vivo al sistema. De este modo se podría desarrollar a futuro un sistema visual de monitoreo continuo e, idealmente, desde cámaras de registro permanente, como las de seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Mas, D., Espinosa, J., Roig, A. B., Ferrer, B., Perez, J., & Illueca, C. (2012). Measurement of wide frequency range structural microvibrations with a pocket digital camera and sub-pixel techniques. *Applied optics*, 51(14), 2664-2671.
2. Chong, A. K., Al-Baghdadi, J. A. A., & Alshadli, D. (2014, January). High definition video cameras for measuring movement of vibrating bridge structure. In *International Conference on Vibration and Vibro-acoustics (ICVV2014)* (pp. 1-10). University of Southern Queensland.
3. Bartilson, D. T., Wieghaus, K. T., & Hurlebaus, S. (2015). Target-less computer vision for traffic signal structure vibration studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60, 571-582.
4. Chen, J. G., Wadhwa, N., Cha, Y. J., Durand, F., Freeman, W. T., & Buyukozturk, O. (2014). Structural modal identification through high speed camera video: Motion magnification. In *Topics in Modal Analysis I, Volume 7* (pp. 191-197). Springer International Publishing.
5. Yoon, H., Elanwar, H., Choi, H., Golparvar-Fard, M., & Spencer, B. F. (2016). Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras. *Structural Control and Health Monitoring*.
6. Enebral Gonzalez, J. (2009). Detección y asociación automática de puntos característicos para diferentes aplicaciones.
7. Harris, C., & Stephens, M. (1988, August). A combined corner and edge detector. In *Alvey vision conference* (Vol. 15, p. 50).
8. Lucas, B. D., & Kanade, T. (1981, August). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *IJCAI* (Vol. 81, pp. 674-679).
9. Tomasi, C., & Kanade, T. (1991). *Detection and tracking of point features*. Pittsburgh: School of Computer Science, Carnegie Mellon Univ.
10. Shi, J., & Tomasi, C. (1994, June). Good features to track. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. Proceedings CVPR'94., 1994 IEEE Computer Society Conference on* (pp. 593-600). IEEE.

ANEXOS

A. Desplazamiento vertical y giro relativo (laboratorio)

Ensayo #1

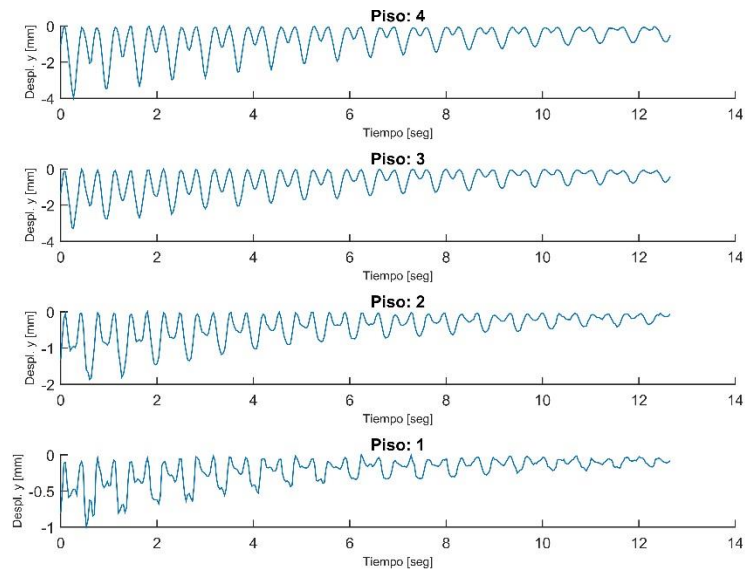


Figura 124. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #1.

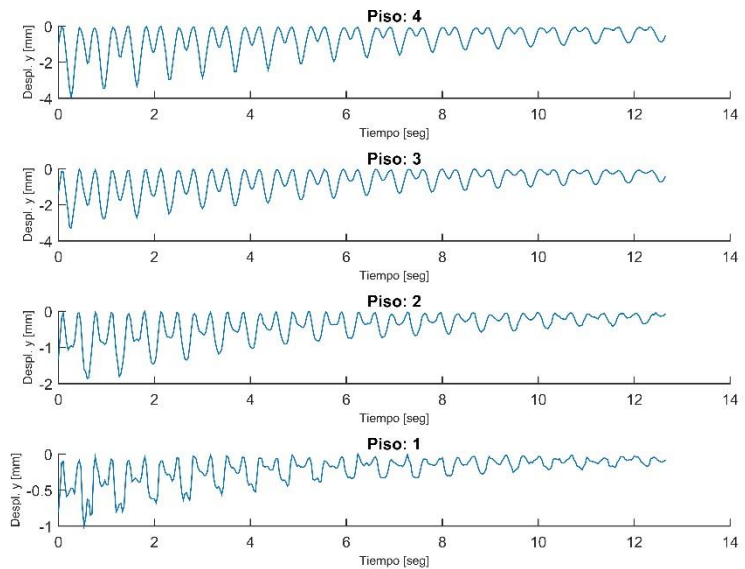


Figura 125. Giro relativo modelo experimental, ensayo #1.

Ensayo #2

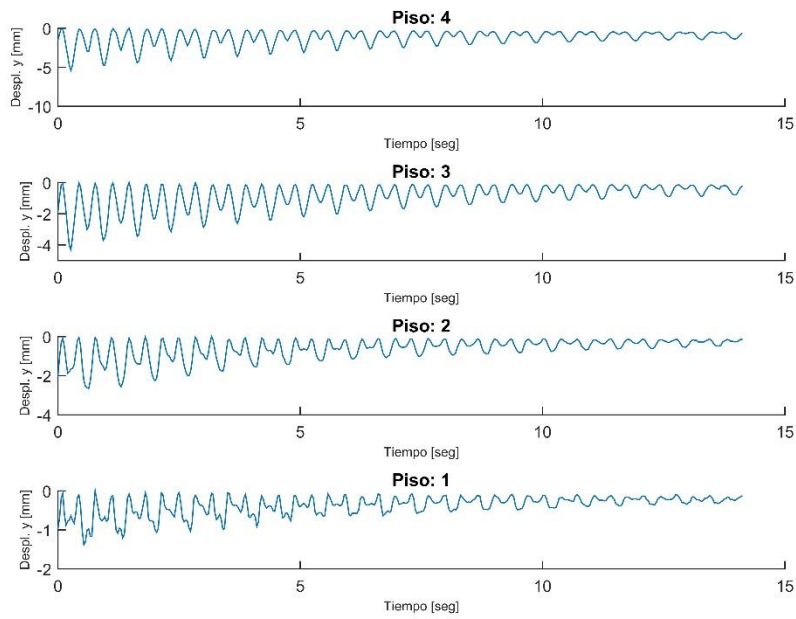


Figura 126. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #2.

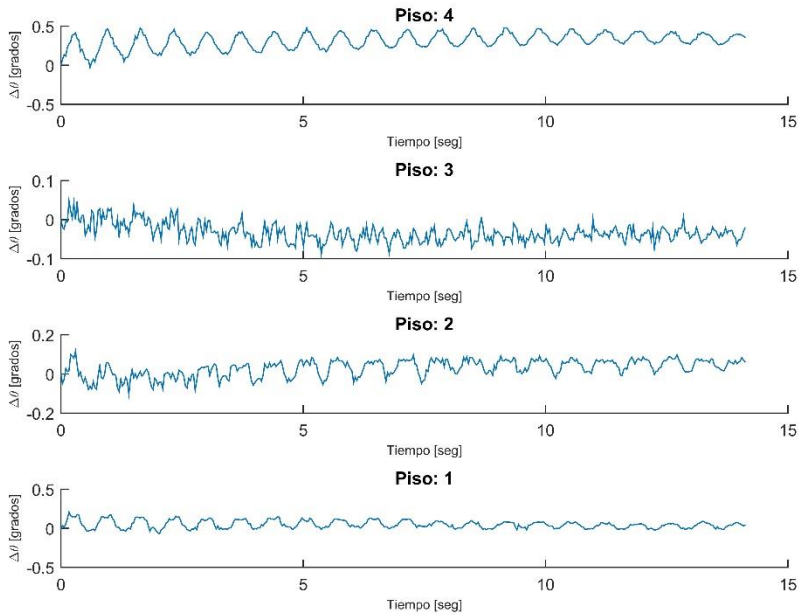


Figura 127. Giro relativo modelo experimental, ensayo #2.

Ensayo #3

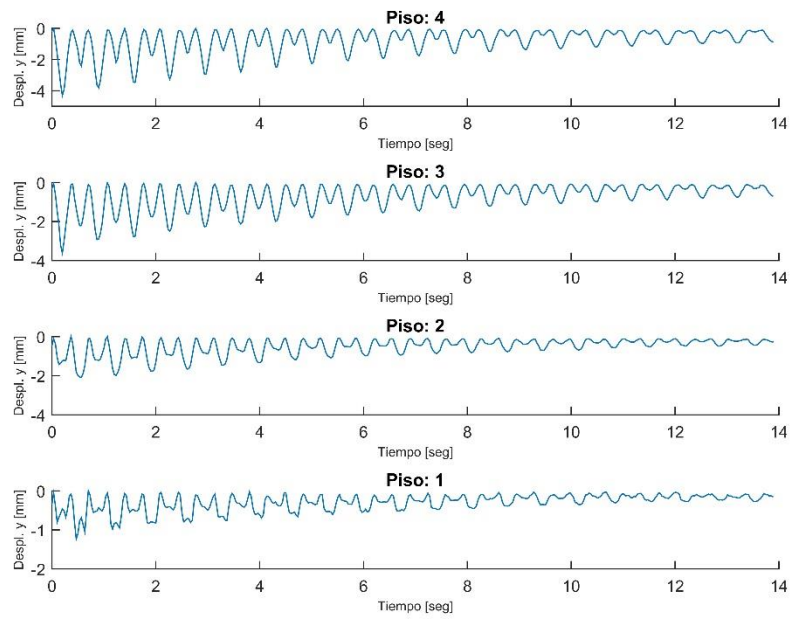


Figura 128. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #3.

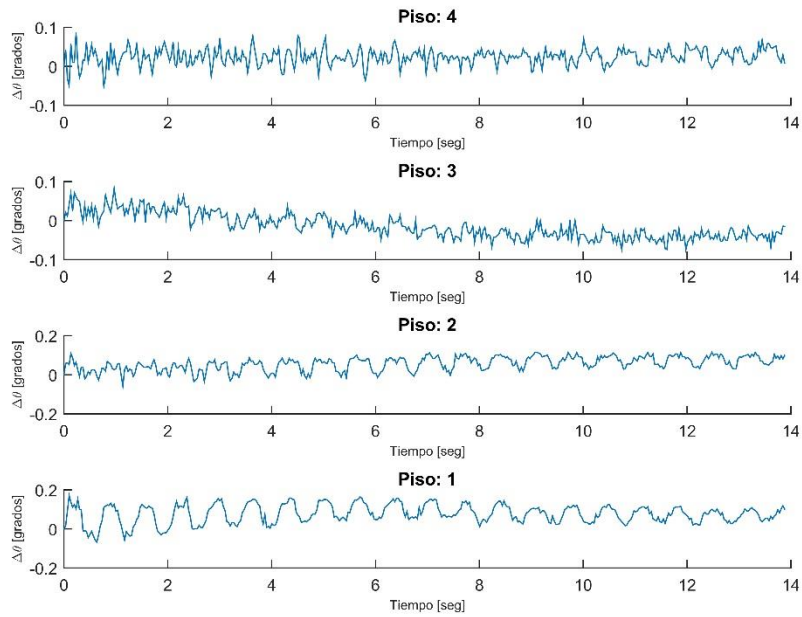


Figura 129. Giro relativo modelo experimental, ensayo #3.

Ensayo #4

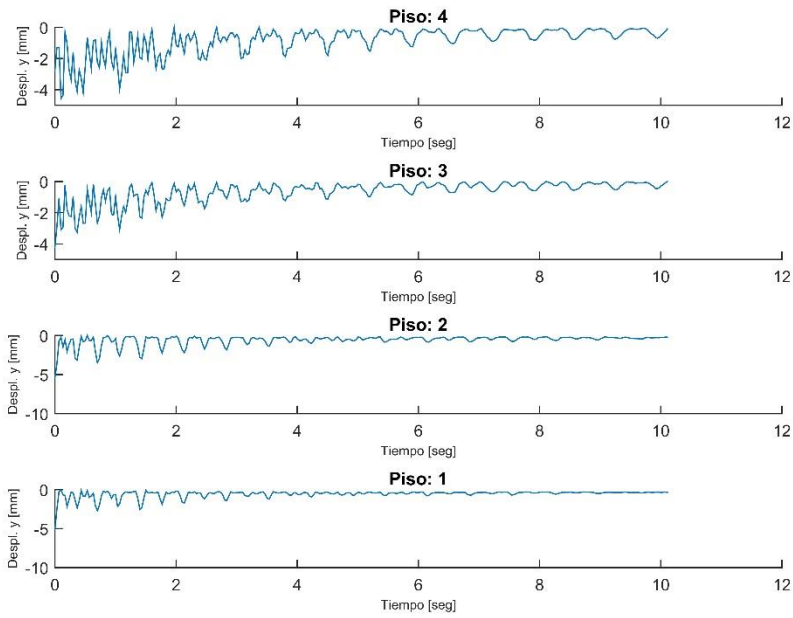


Figura 130. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #4.

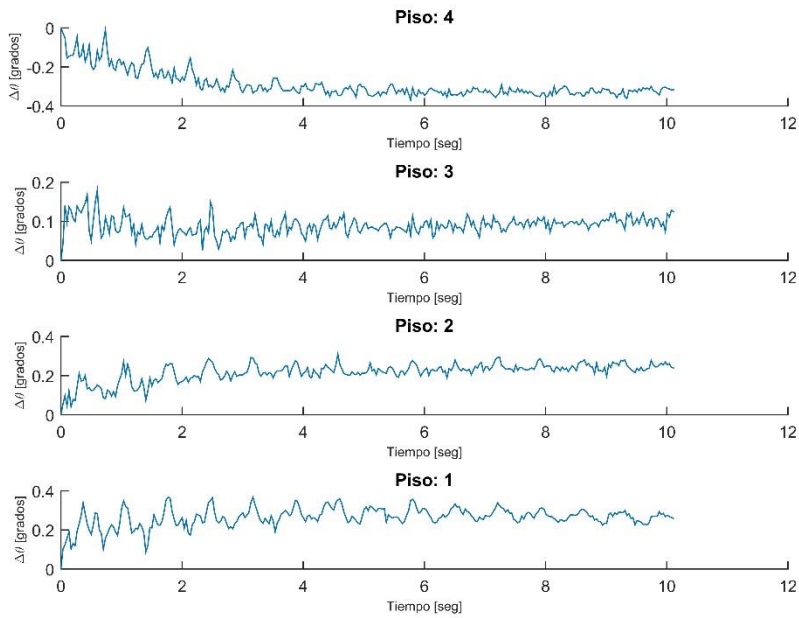


Figura 131. Giro relativo modelo experimental, ensayo #4.

Ensayo #5

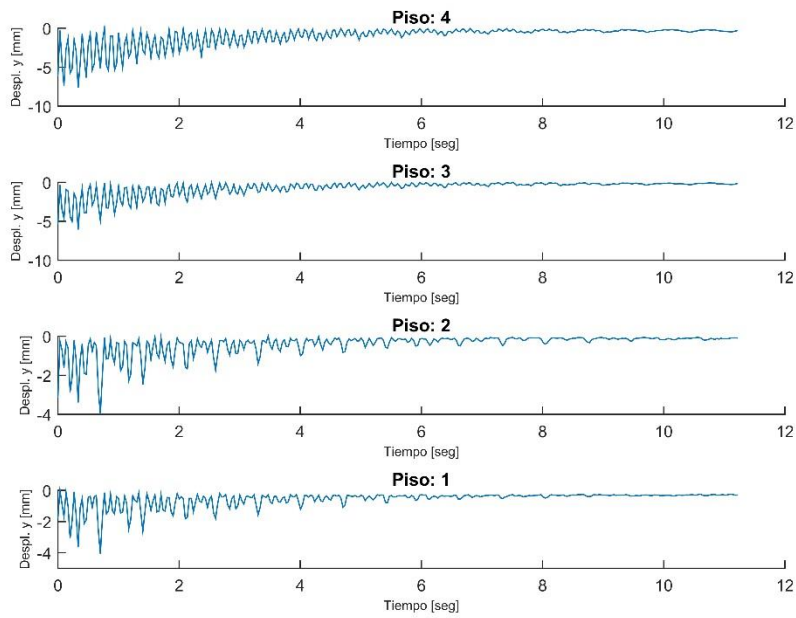


Figura 132. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #5.

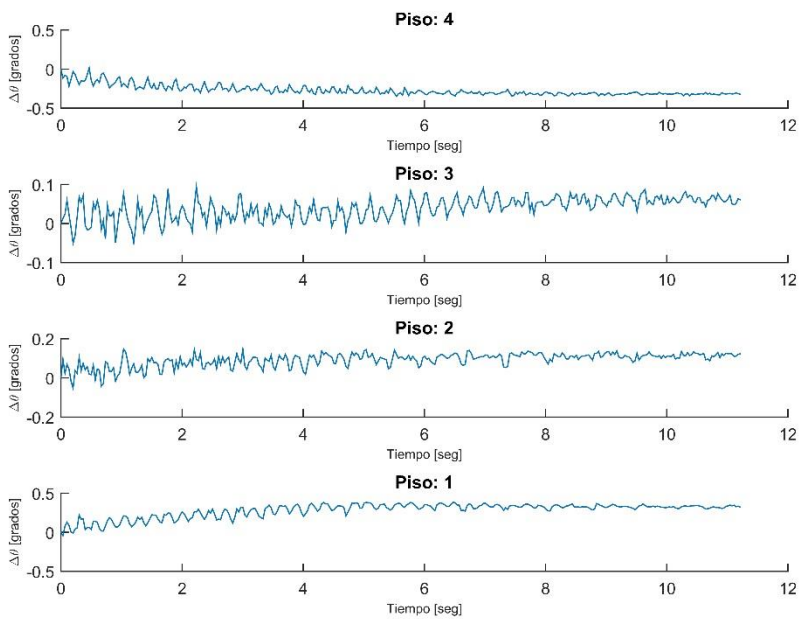


Figura 133. Giro relativo modelo experimental, ensayo #5.

Ensayo #6

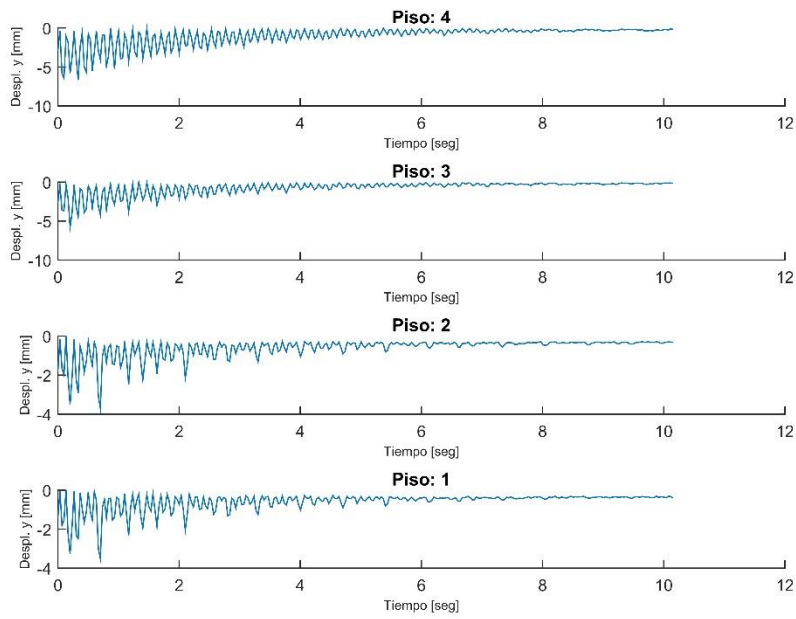


Figura 134. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #6.

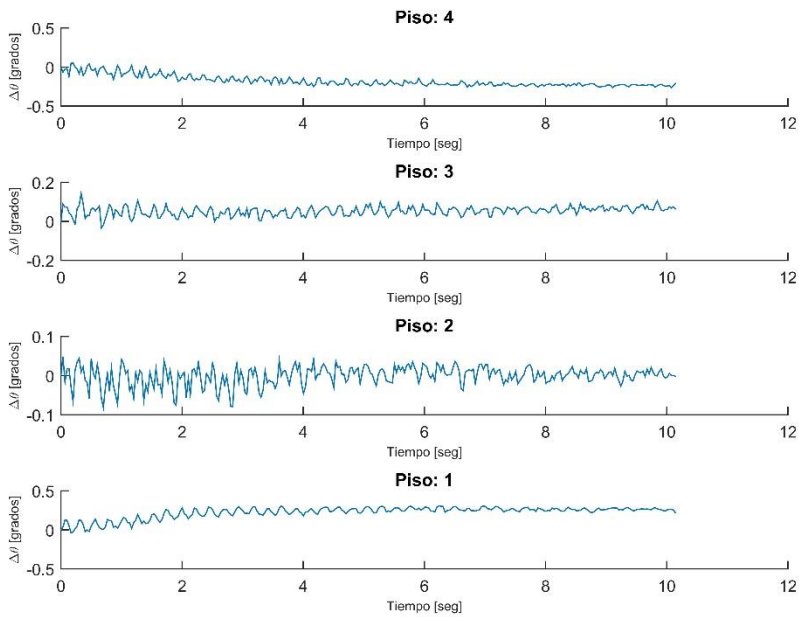


Figura 135. Giro relativo modelo experimental, ensayo #6.

Ensayo #7

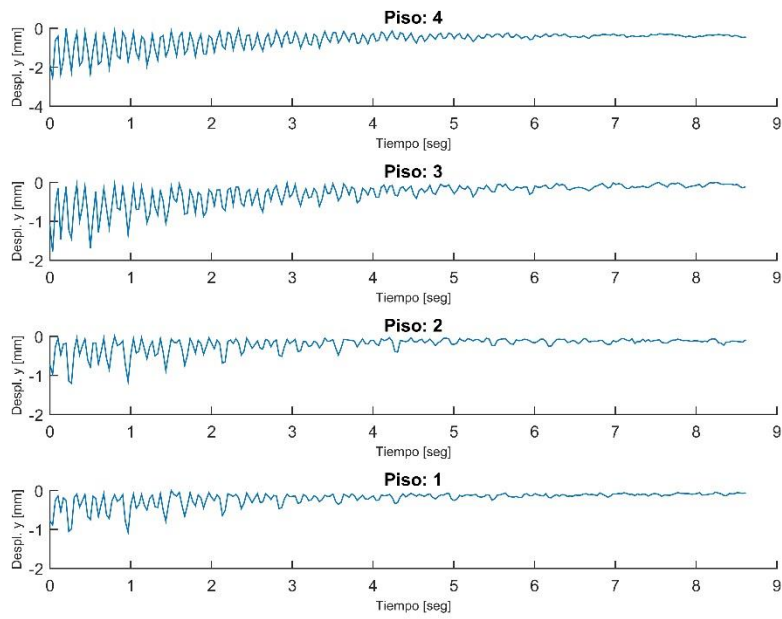


Figura 136. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #7.

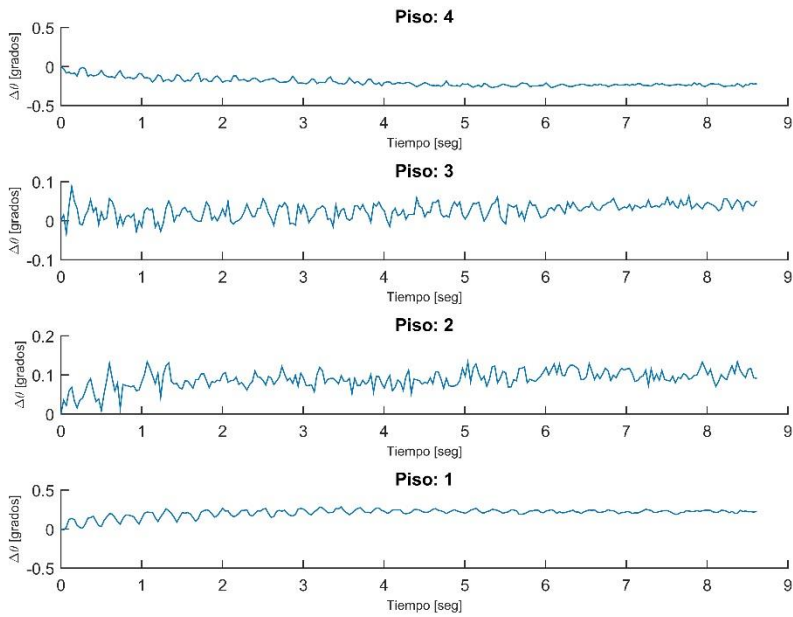


Figura 137. Giro relativo modelo experimental, ensayo #7.

Ensayo #8

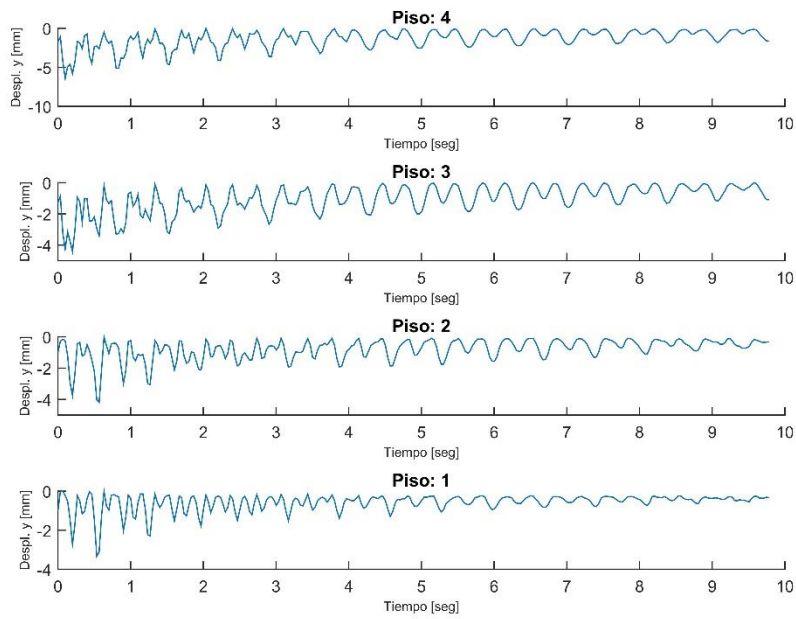


Figura 138. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #8.

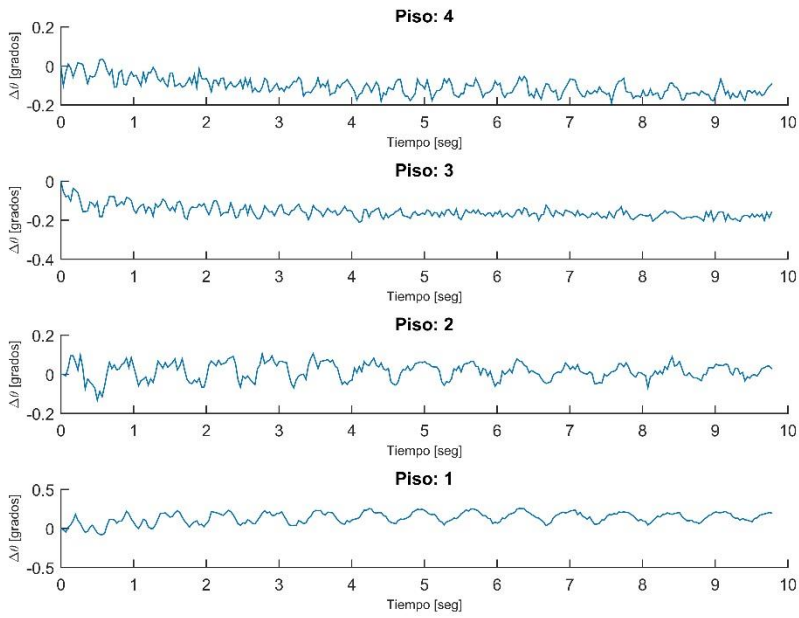


Figura 139. Giro relativo modelo experimental, ensayo #8.

Ensayo #9

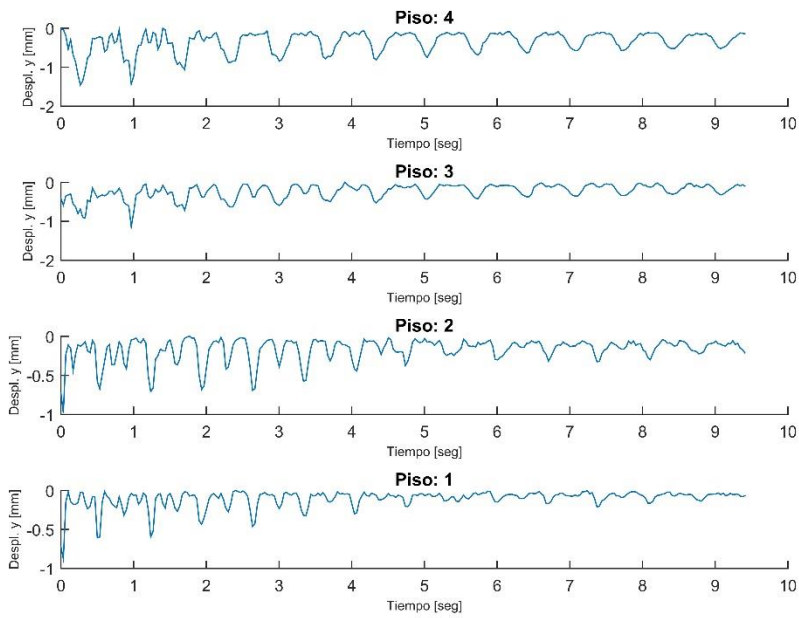


Figura 140. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #9.

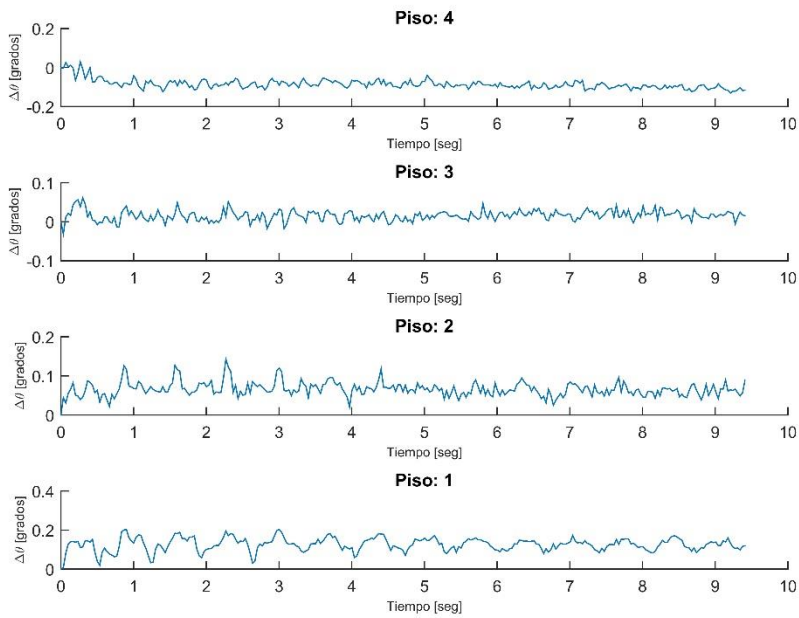


Figura 141. Giro relativo modelo experimental, ensayo #9.

Ensayo #10

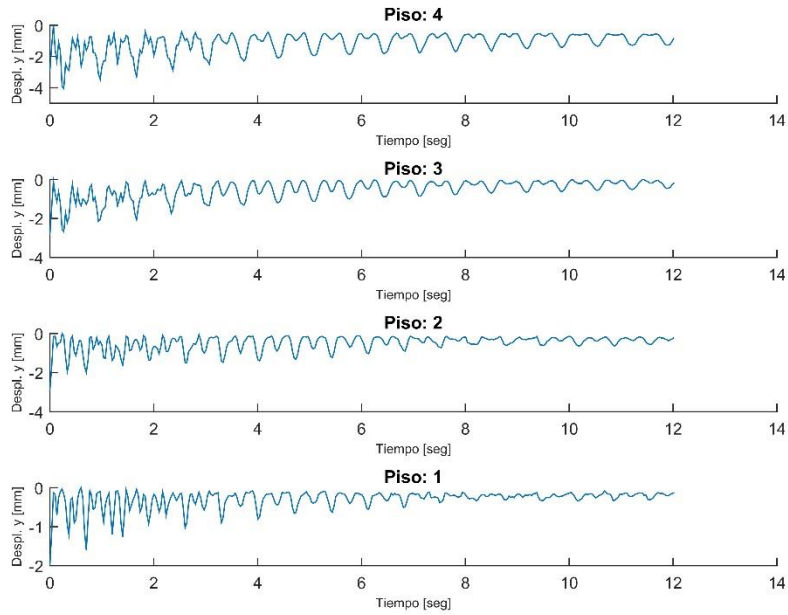


Figura 142. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #10.

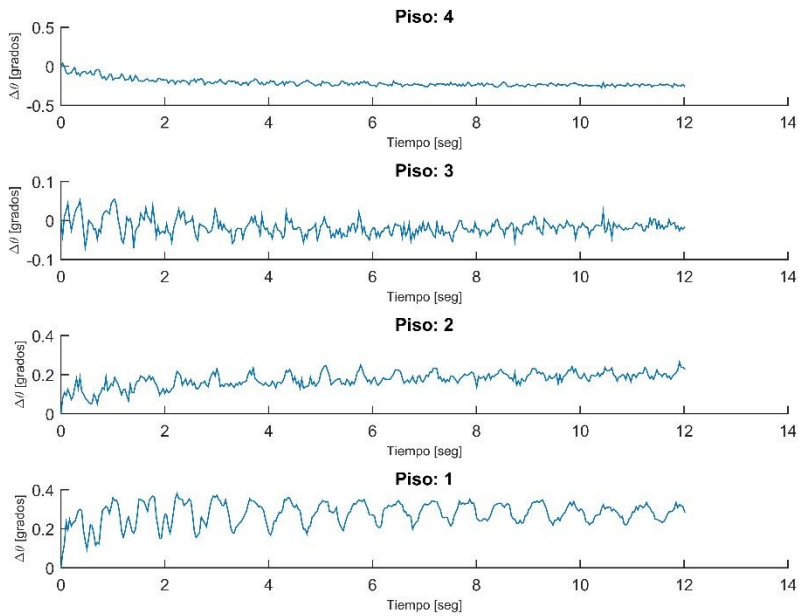


Figura 143. Giro relativo modelo experimental, ensayo #10.

Ensayo #11

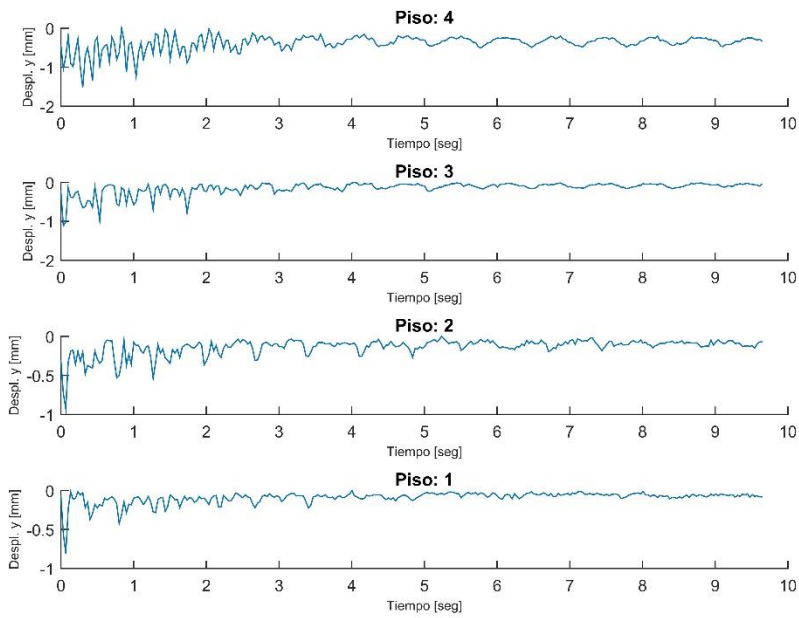


Figura 144. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #11.

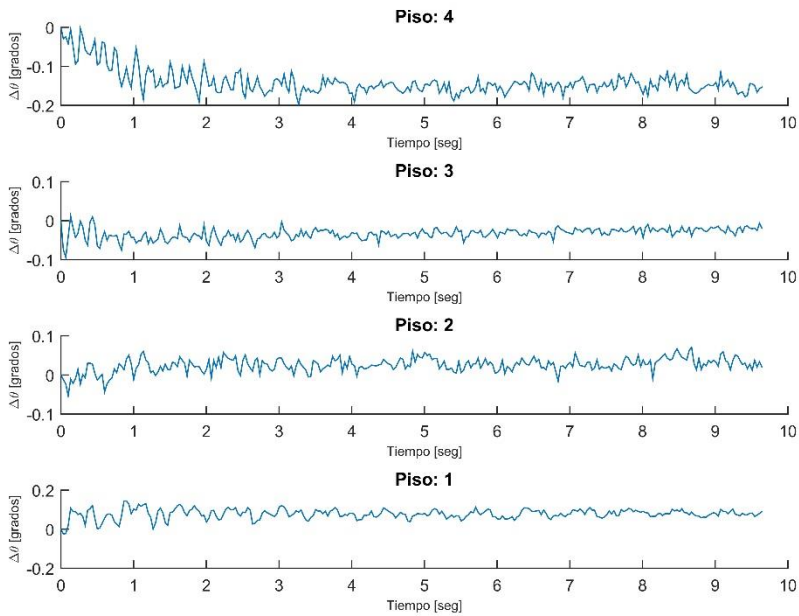


Figura 145. Giro relativo modelo experimental, ensayo #11.

Ensayo #12

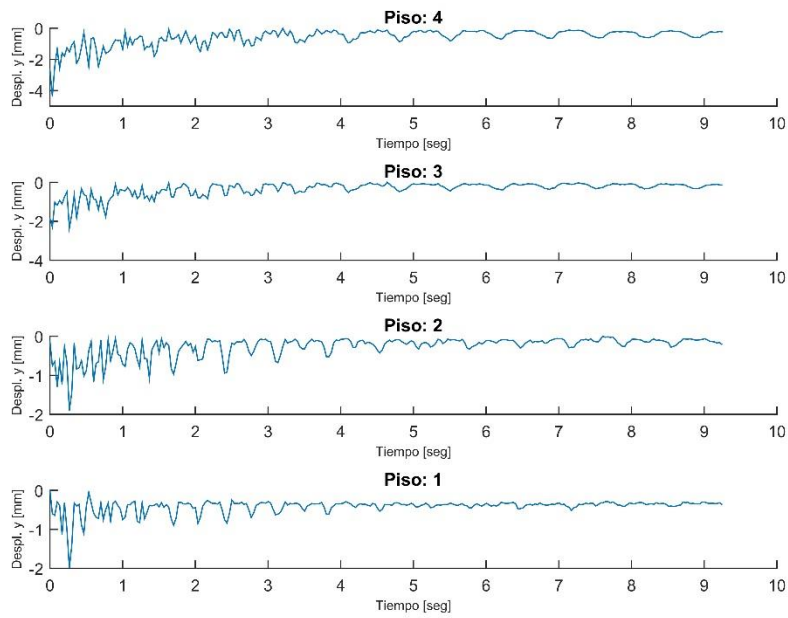


Figura 146. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #12.

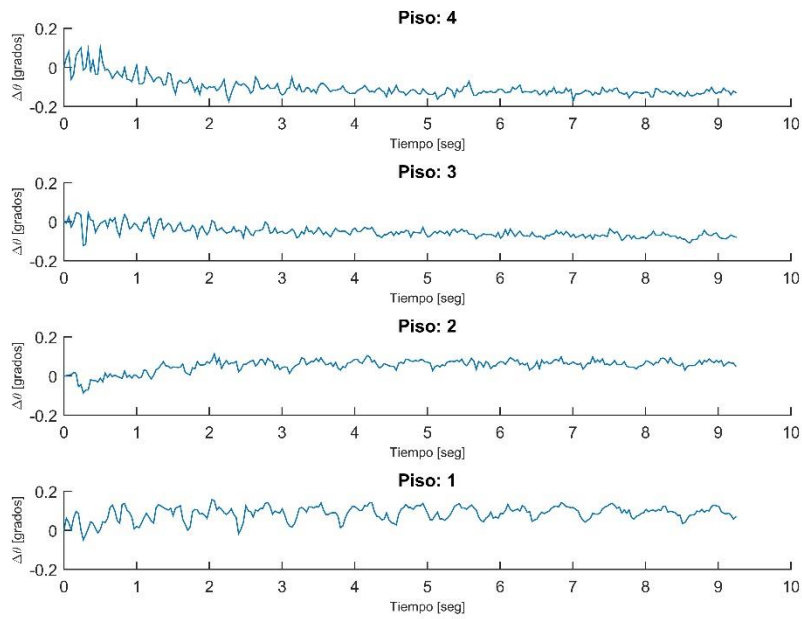


Figura 147. Giro relativo modelo experimental, ensayo #12.

Ensayo #13

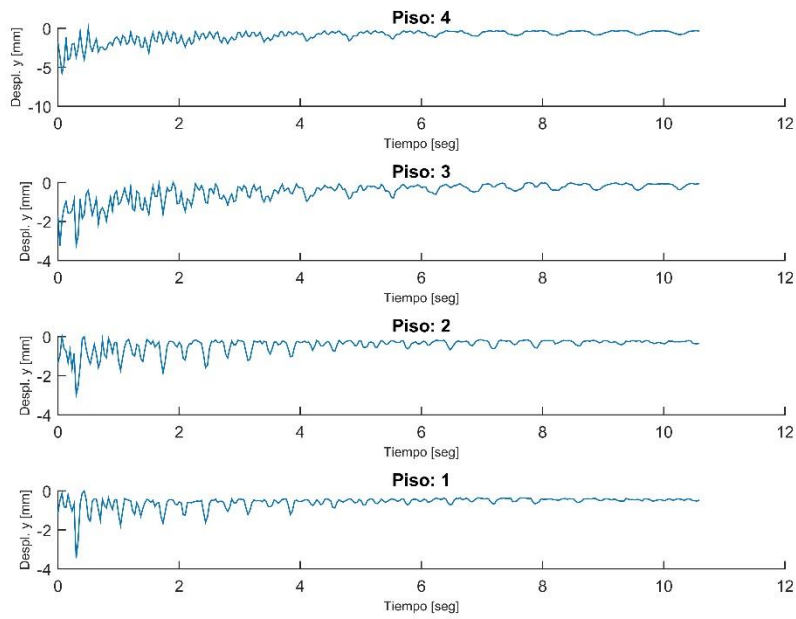


Figura 148. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #13.

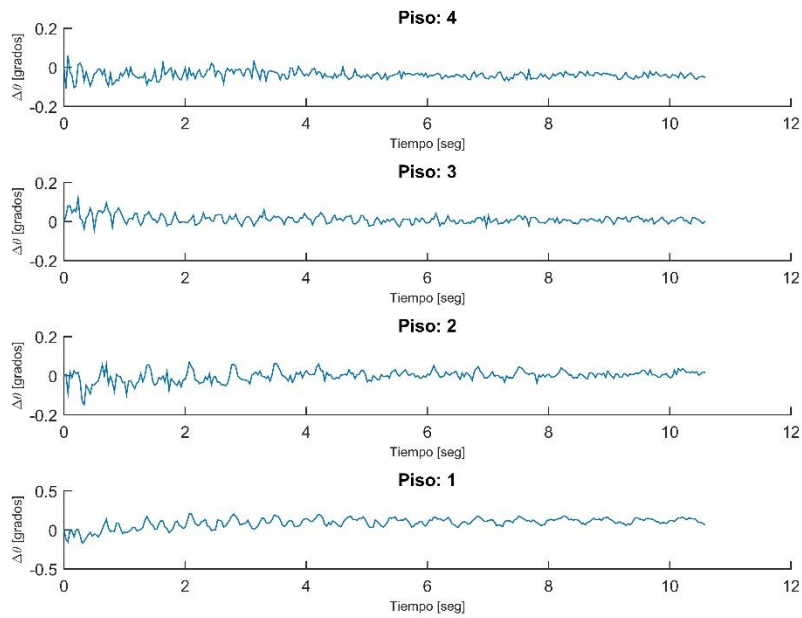


Figura 149. Giro relativo modelo experimental, ensayo #13.

Ensayo #14

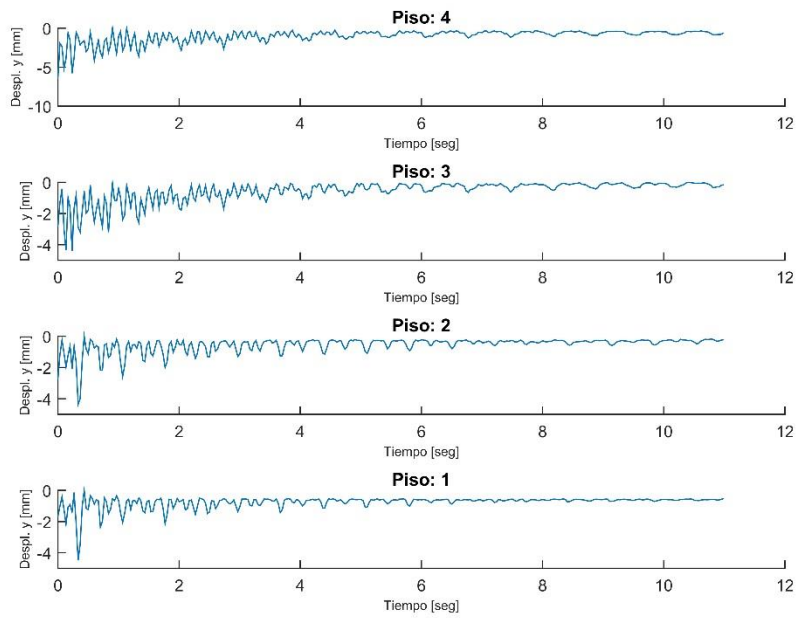


Figura 150. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #14.

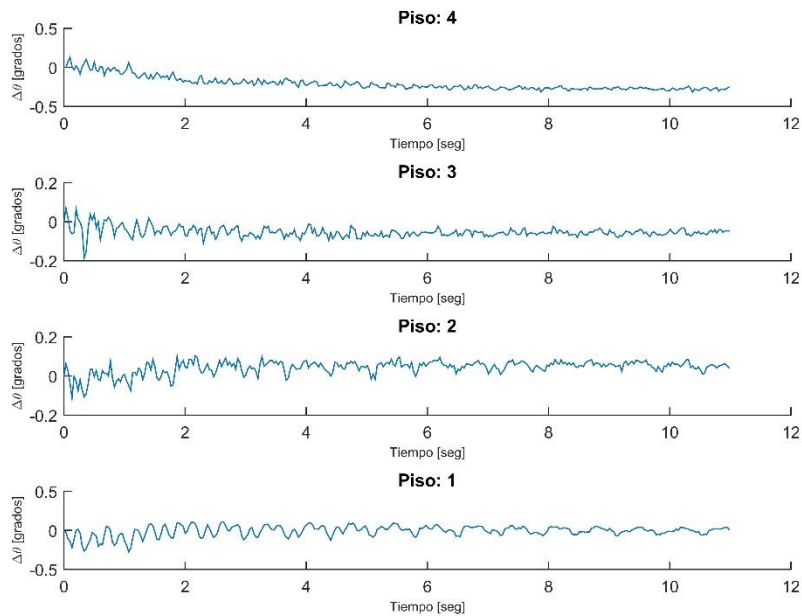


Figura 151. Giro relativo modelo experimental, ensayo #14.

Ensayo #15

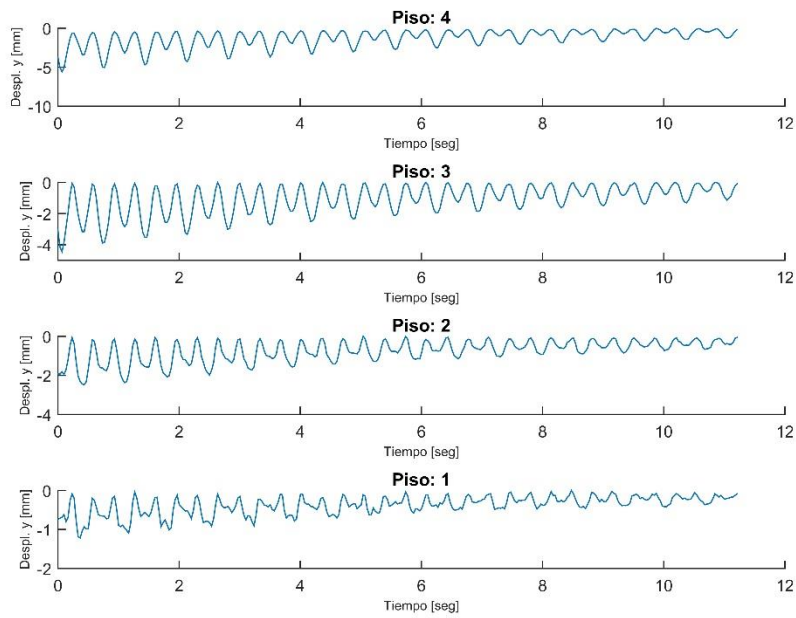


Figura 152. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #15.

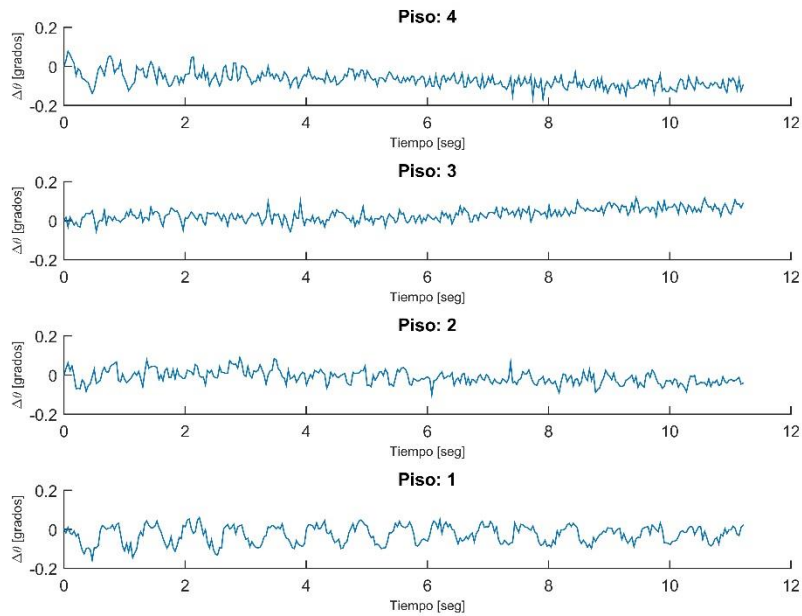


Figura 153. Giro relativo modelo experimental, ensayo #15.

Ensayo #16

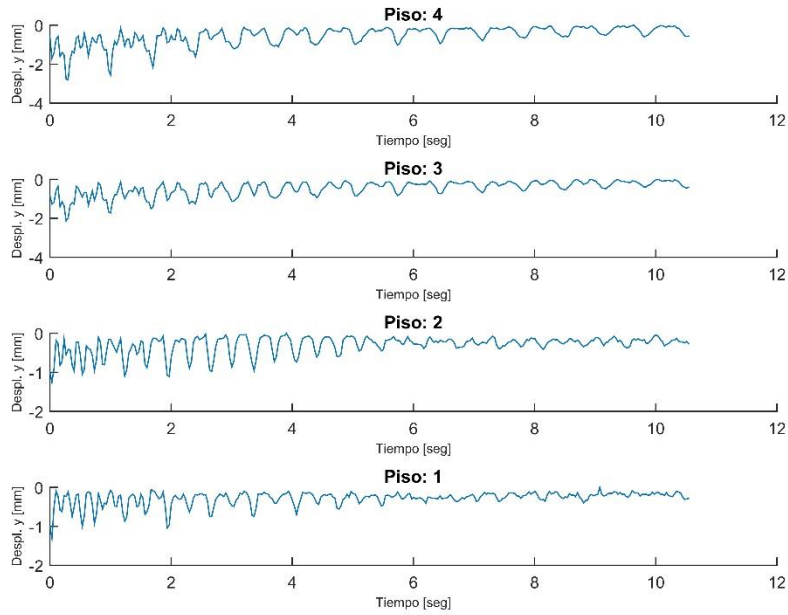


Figura 154. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #16.

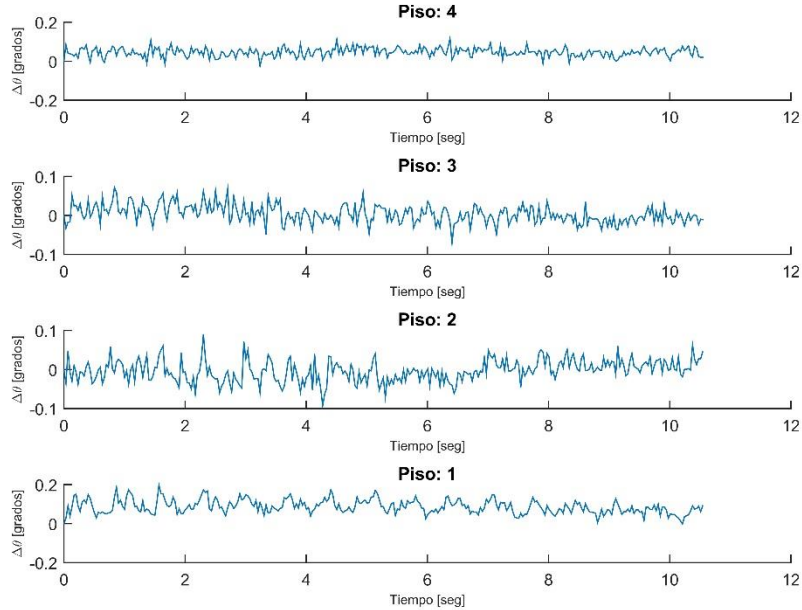


Figura 155. Giro relativo modelo experimental, ensayo #16.

Ensayo #17

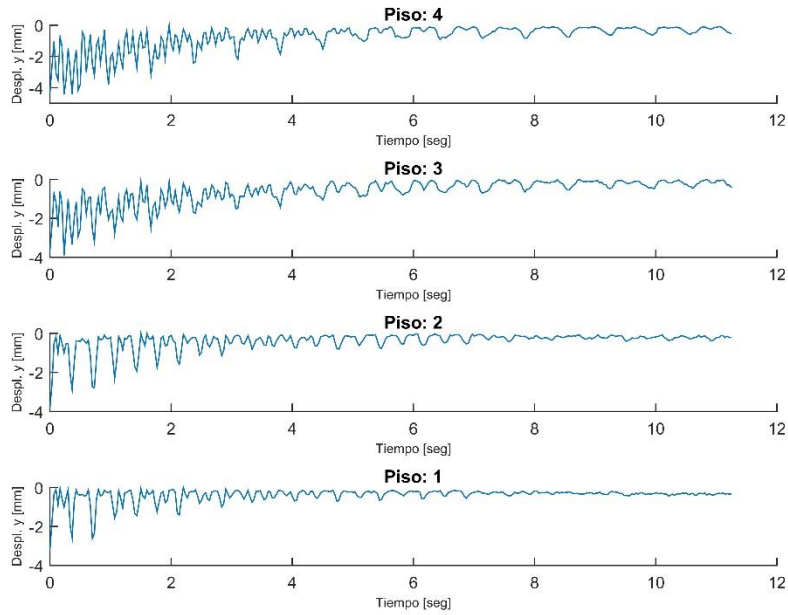


Figura 156. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #17.

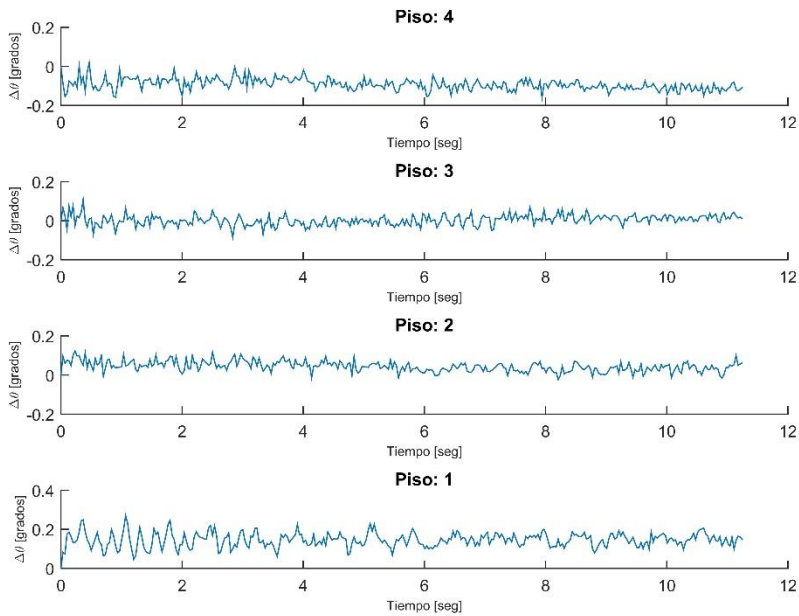


Figura 157. Giro relativo modelo experimental, ensayo #17.

Ensayo #18

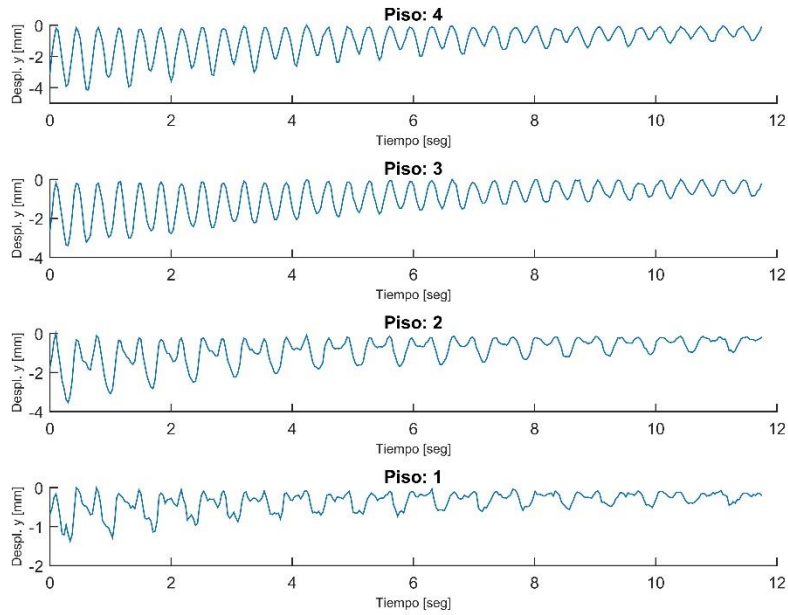


Figura 158. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #18.

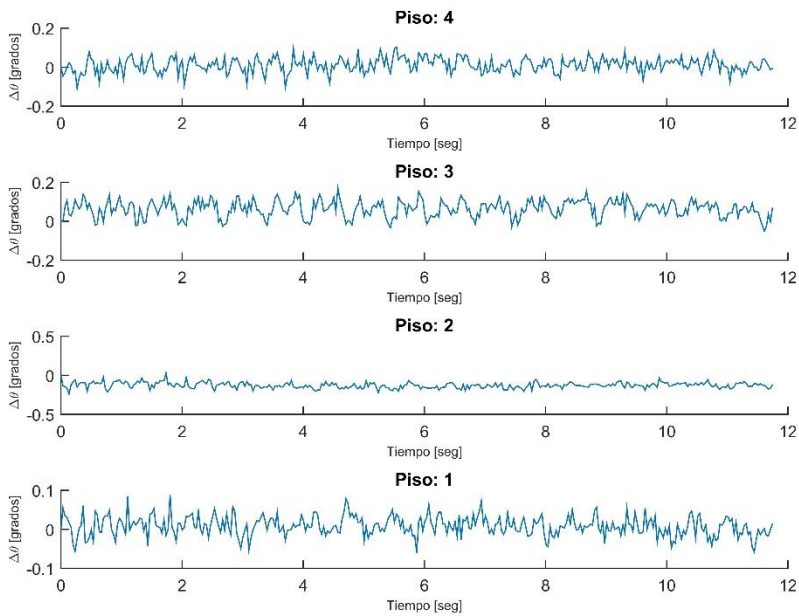


Figura 159. Giro relativo modelo experimental, ensayo #18.

Ensayo #19

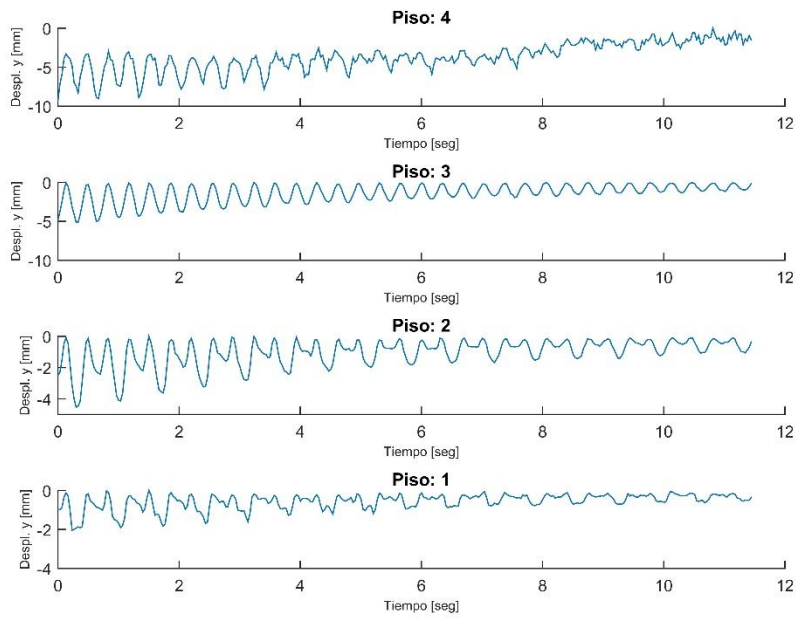


Figura 160. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #19.

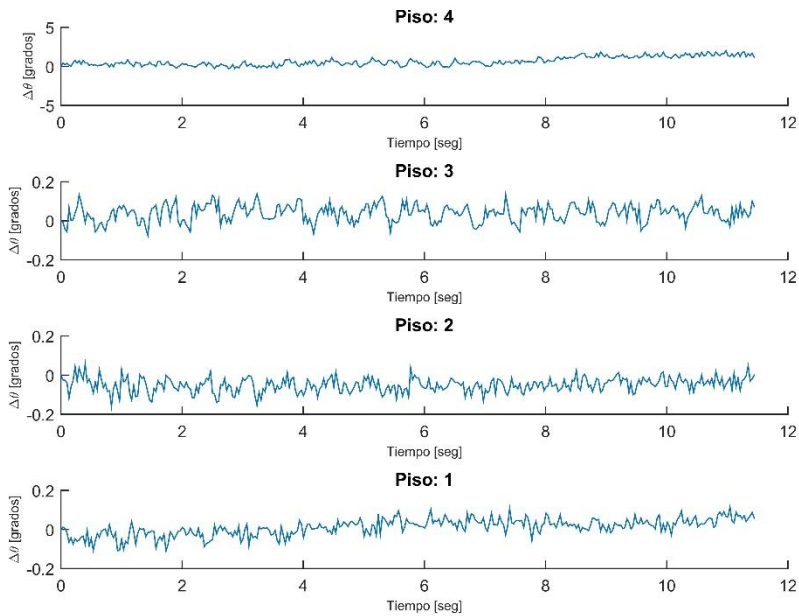


Figura 161. Giro relativo modelo experimental, ensayo #19.

Ensayo #20

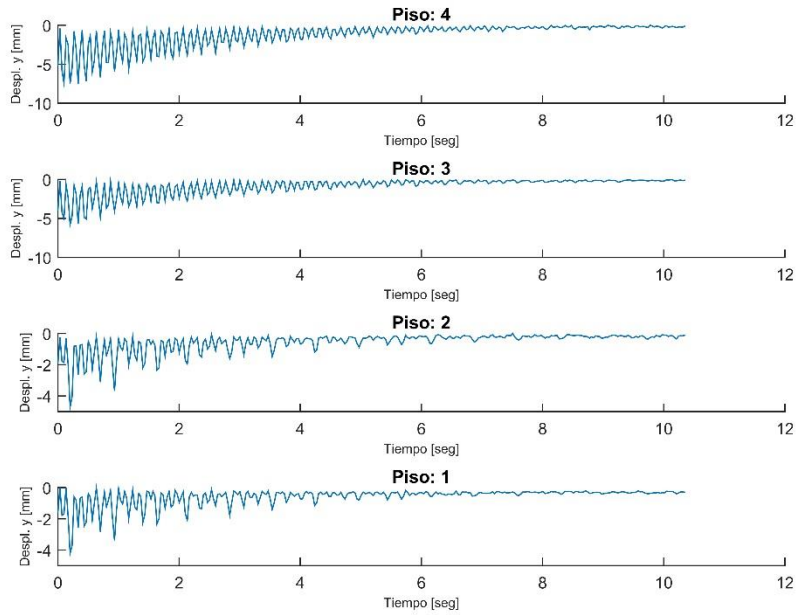


Figura 162. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #20.

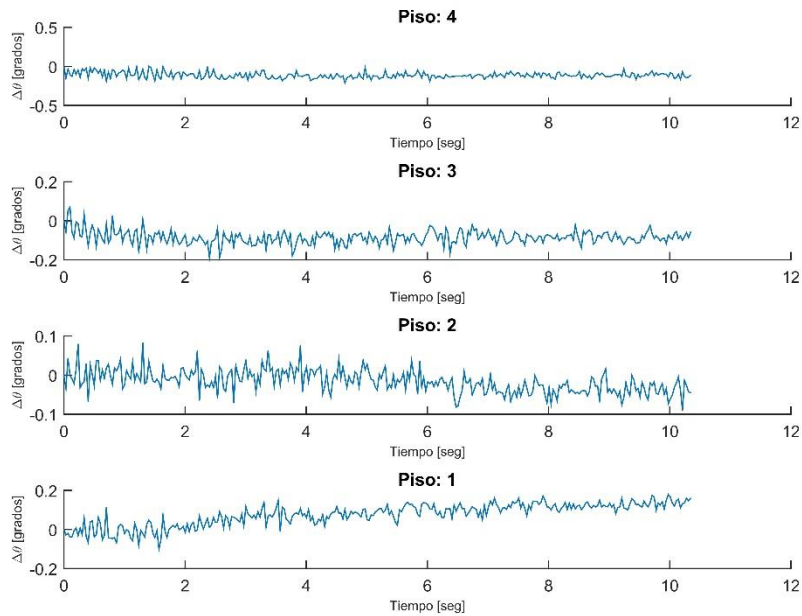


Figura 163. Giro relativo modelo experimental, ensayo #20.

Ensayo #21

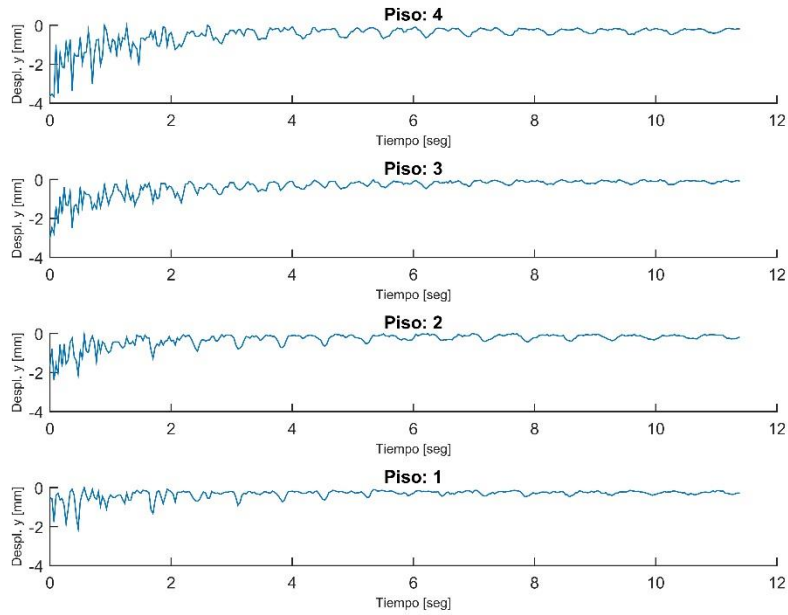


Figura 164. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #21.

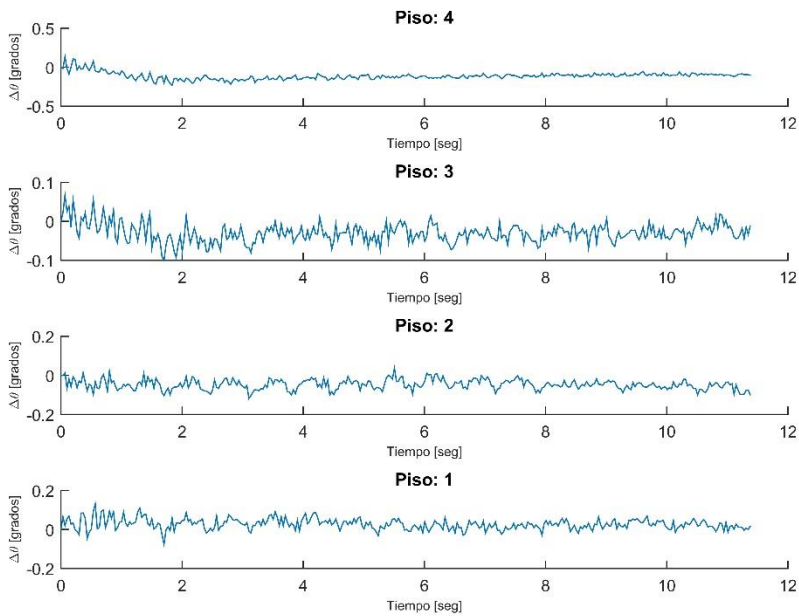


Figura 165. Giro relativo modelo experimental, ensayo #21.

Ensayo #22

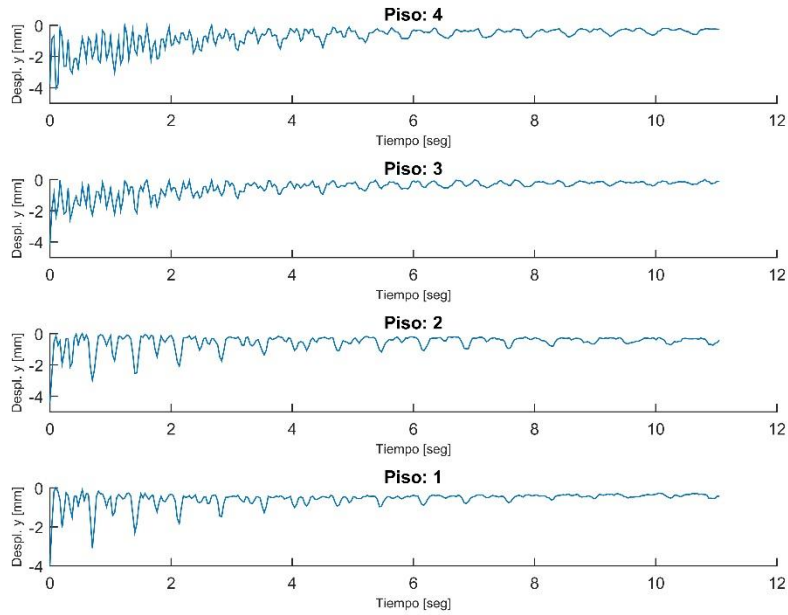


Figura 166. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #22.

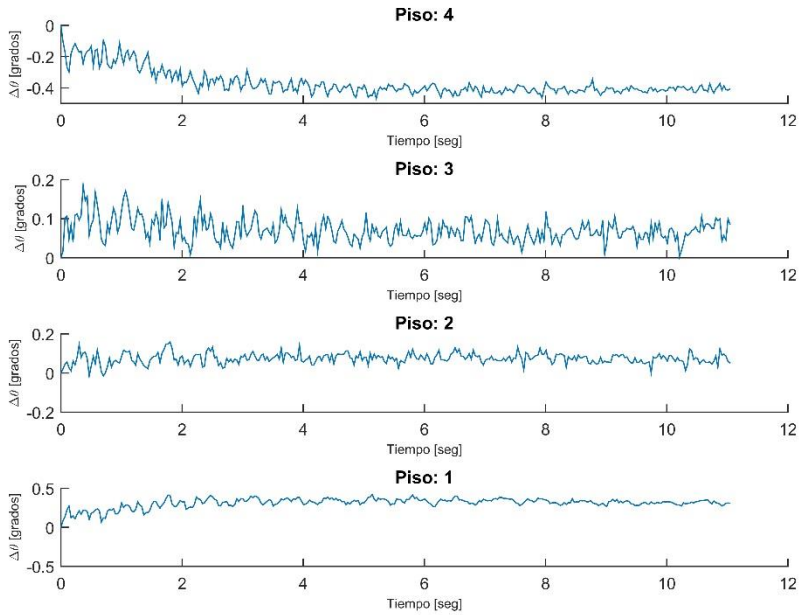


Figura 167. Giro relativo modelo experimental, ensayo #22.

Ensayo #23

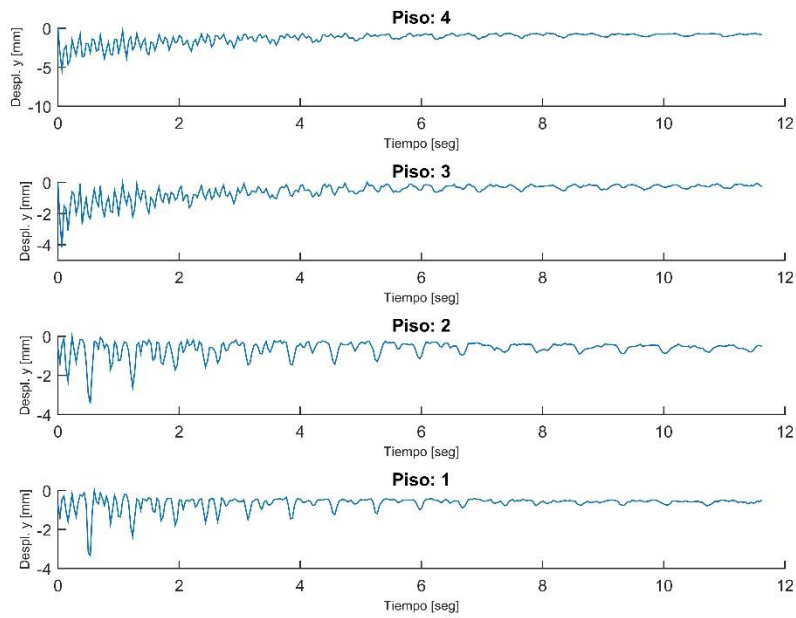


Figura 168. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #23.

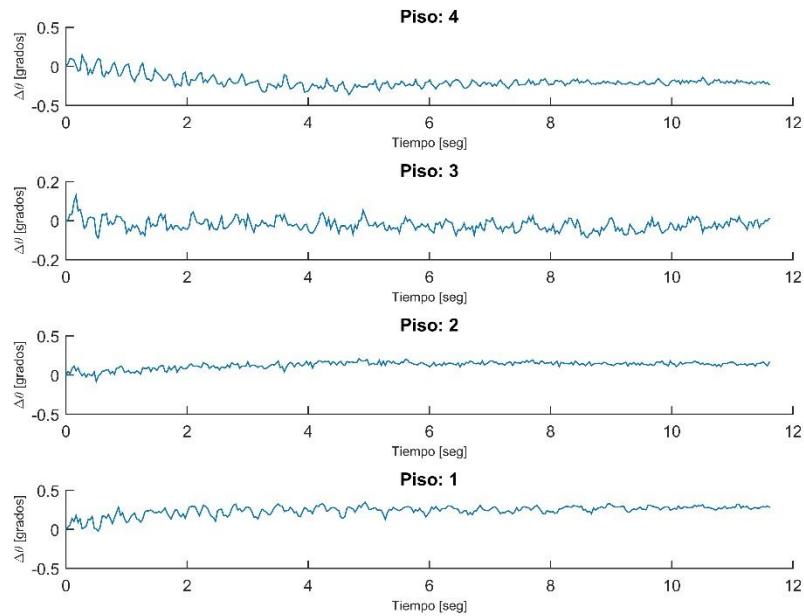


Figura 169. Giro relativo modelo experimental, ensayo #23.

Ensayo #24

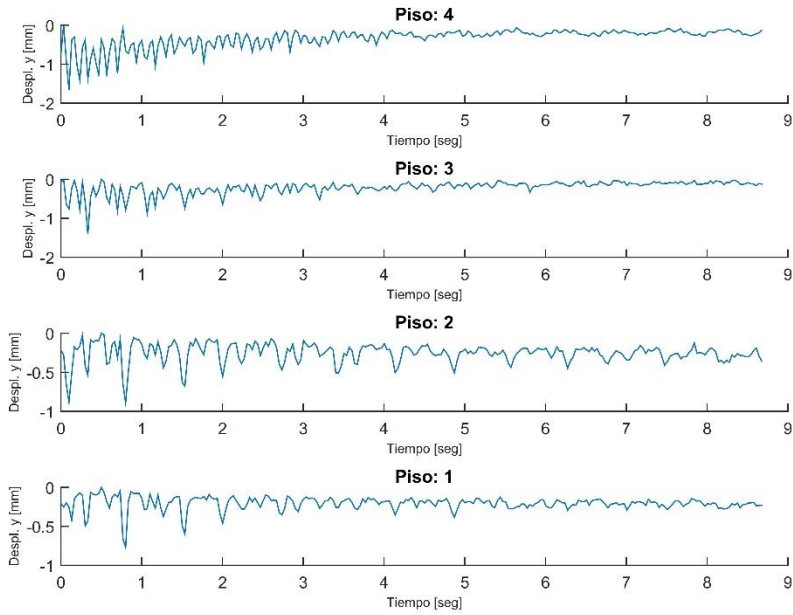


Figura 170. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #24.

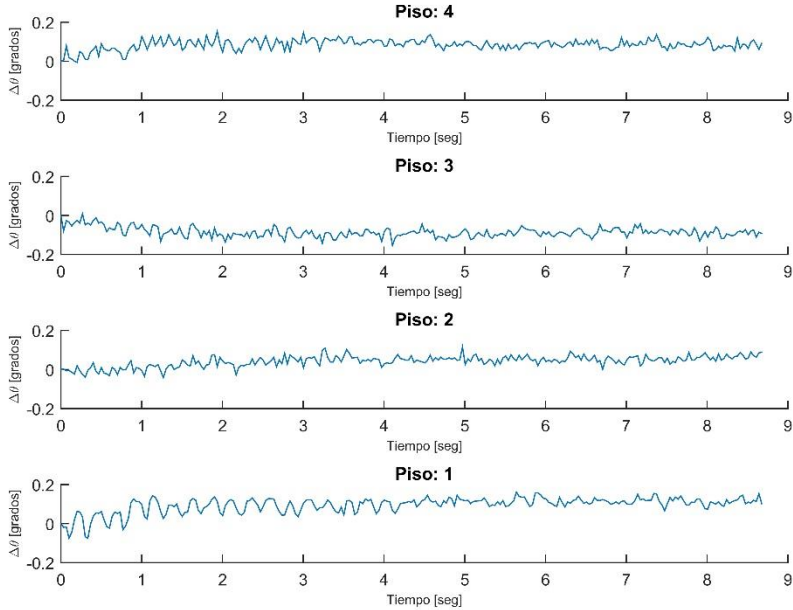


Figura 171. Giro relativo modelo experimental, ensayo #24.

Ensayo #25

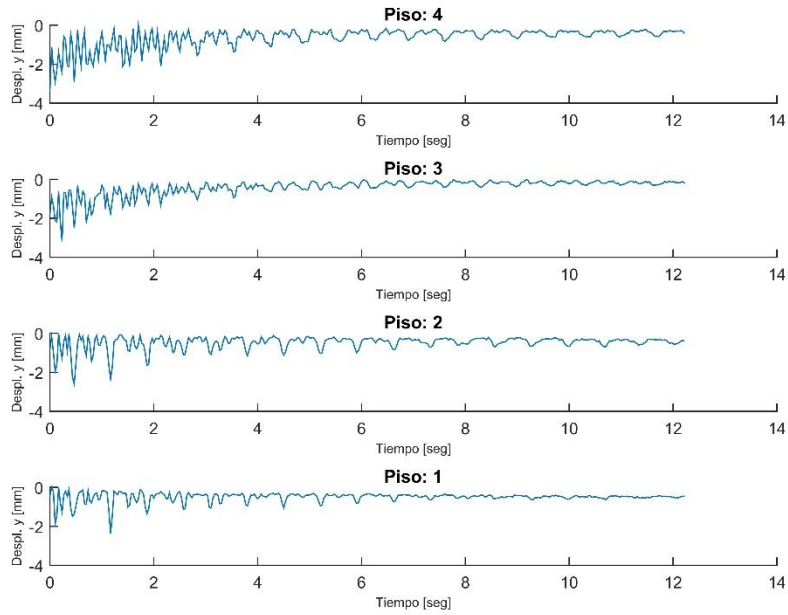


Figura 172. Desplazamiento vertical modelo experimental, ensayo #25.

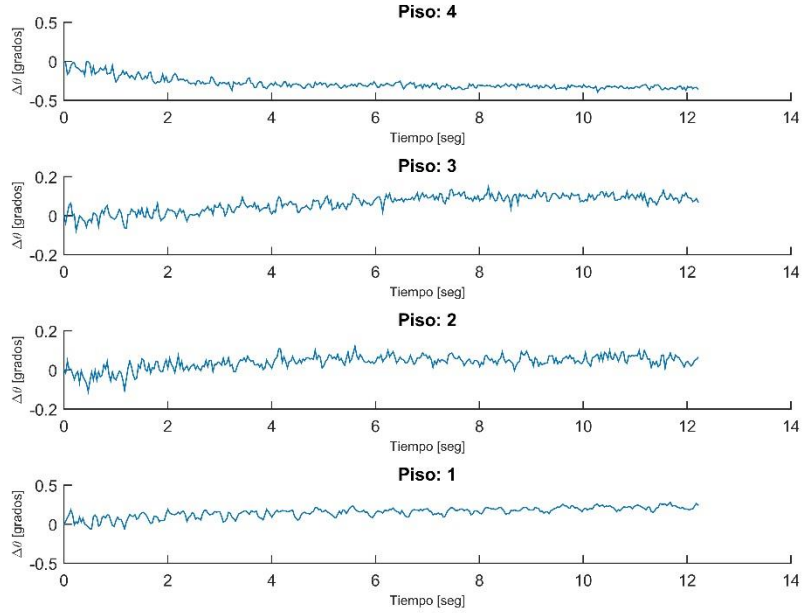


Figura 173. Giro relativo modelo experimental, ensayo #25.

B. Aceleración medida sobre modelo y GoPro

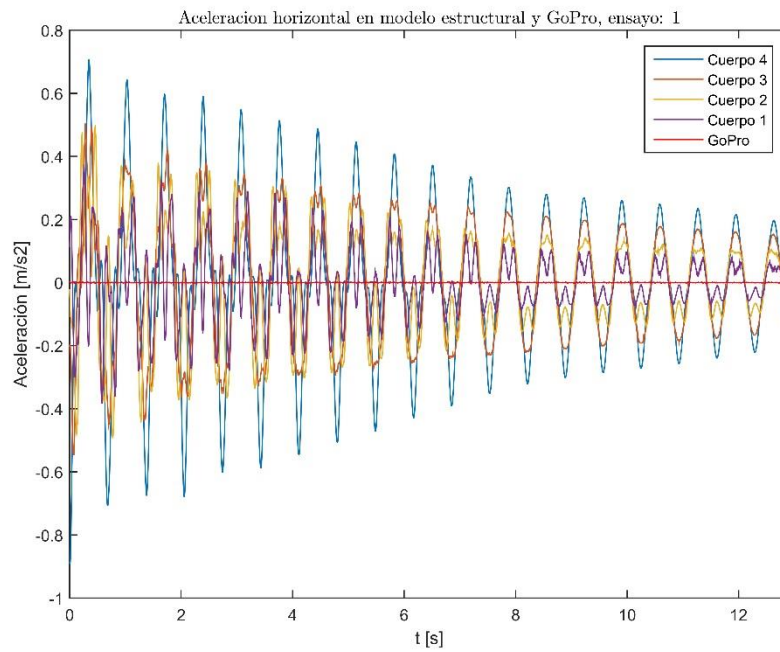


Figura 174. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #1.

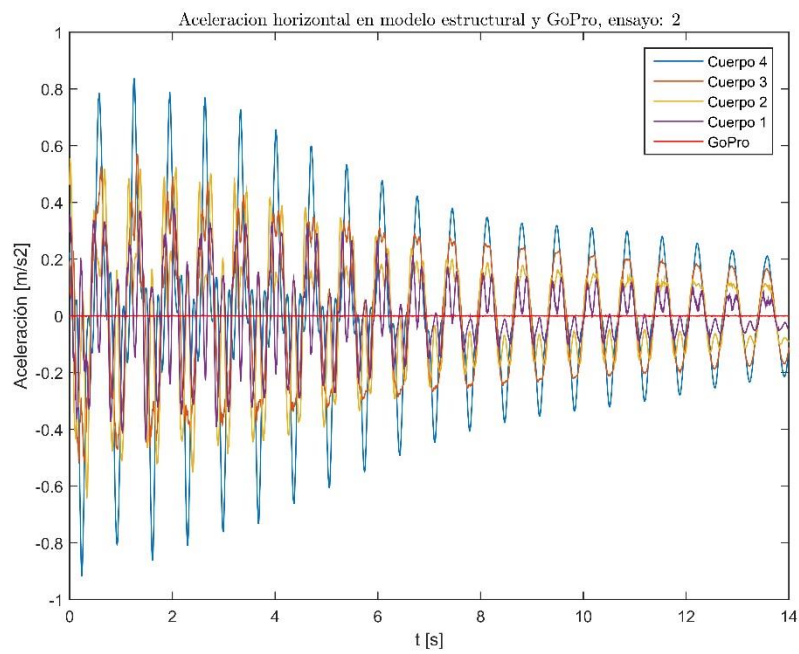


Figura 175. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #2.

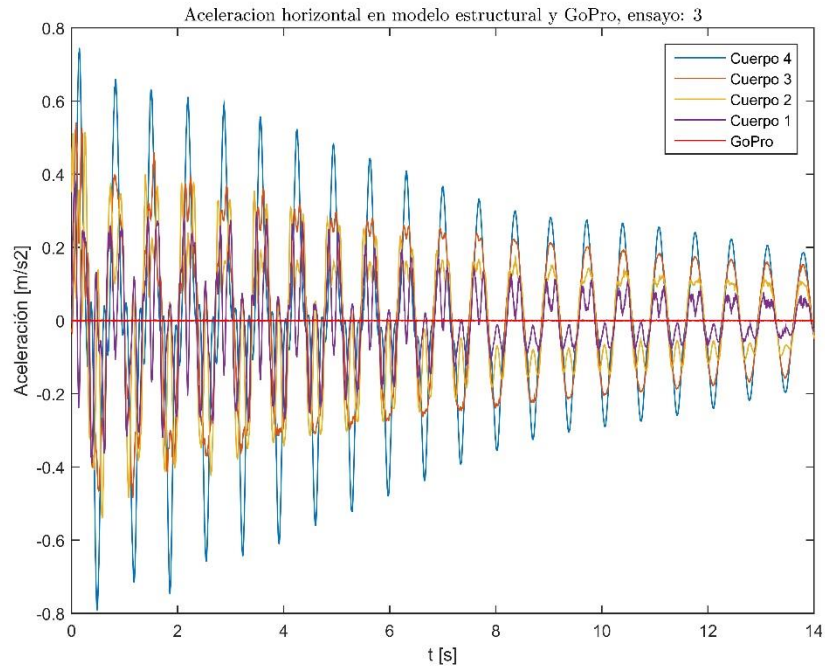


Figura 176. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #3.

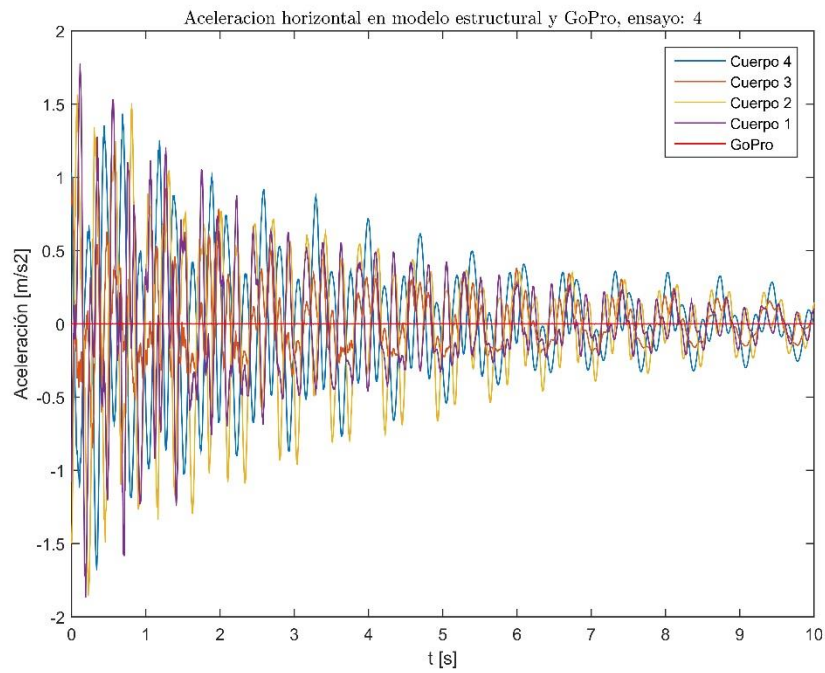


Figura 177. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #4.

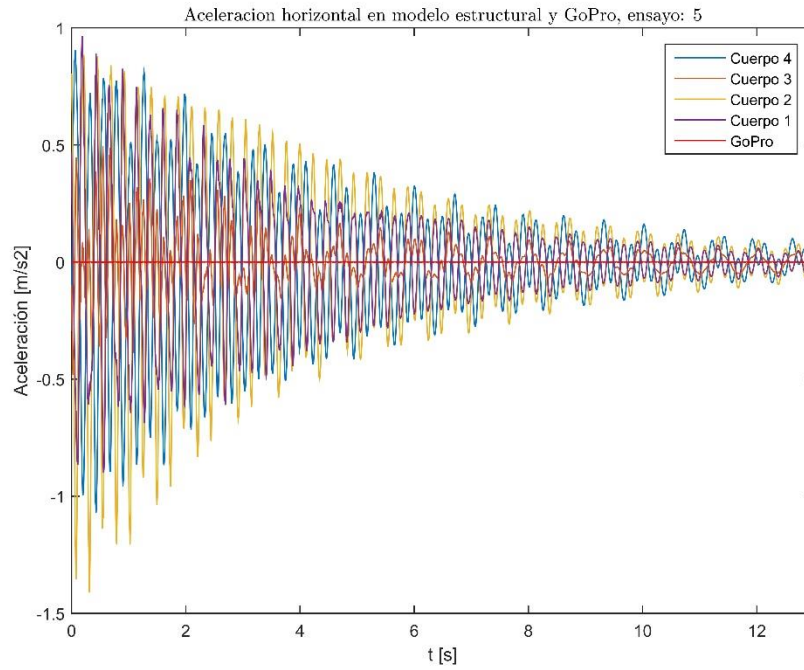


Figura 178. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #5.

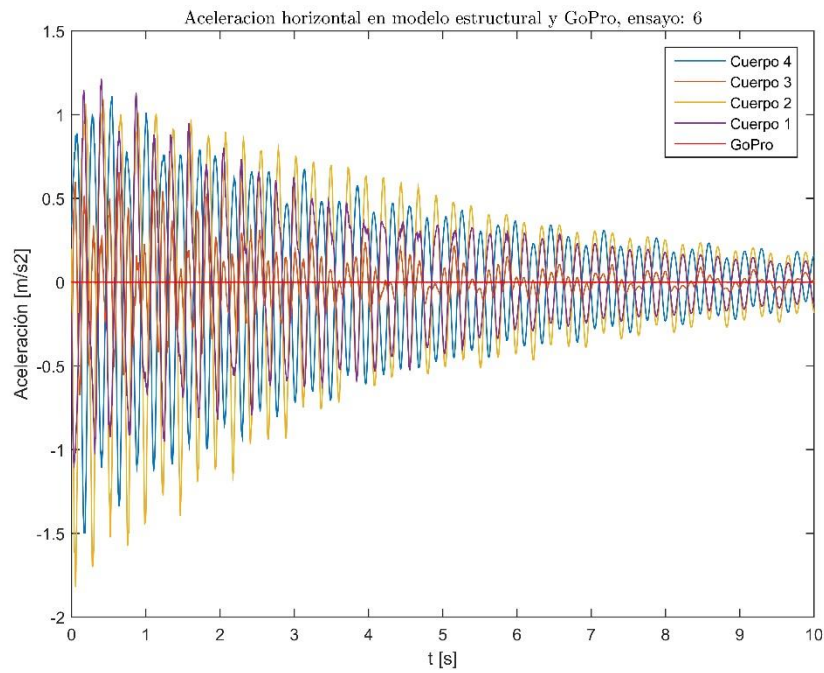


Figura 179. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #6.

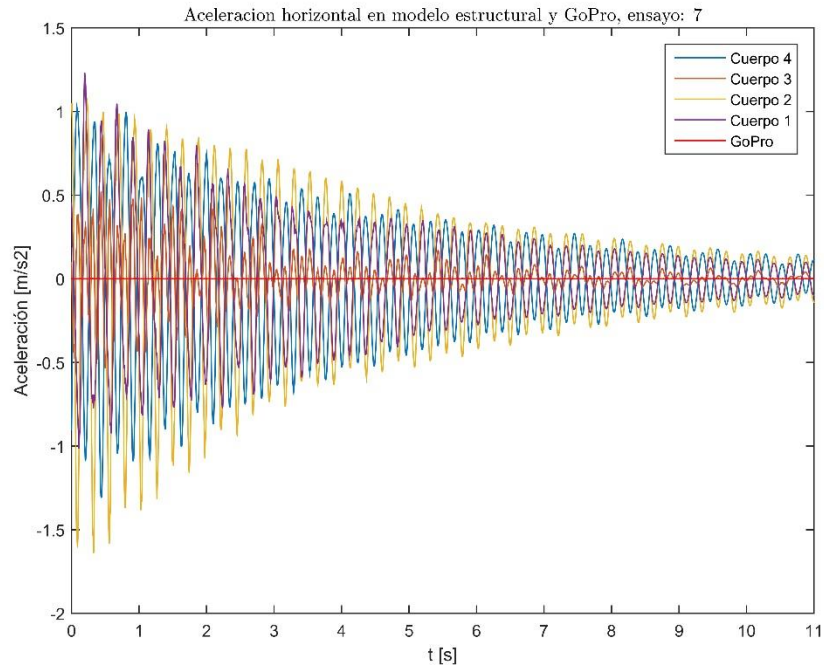


Figura 180. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #7.

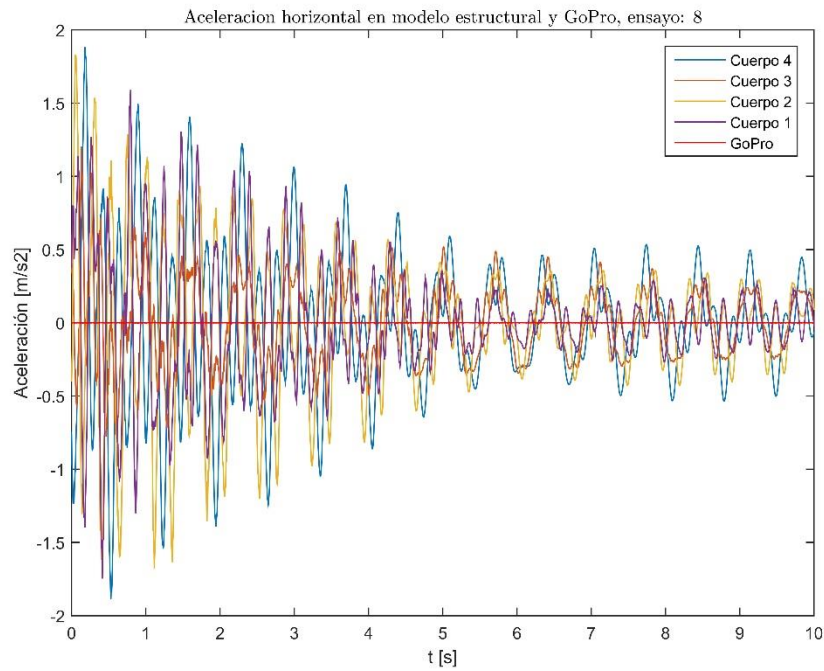


Figura 181. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #8.

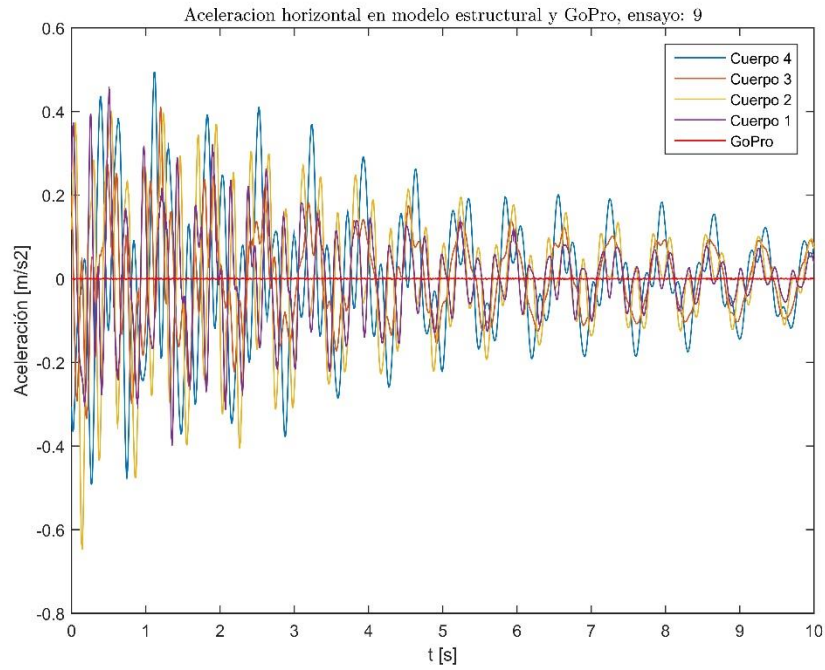


Figura 182. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #9.

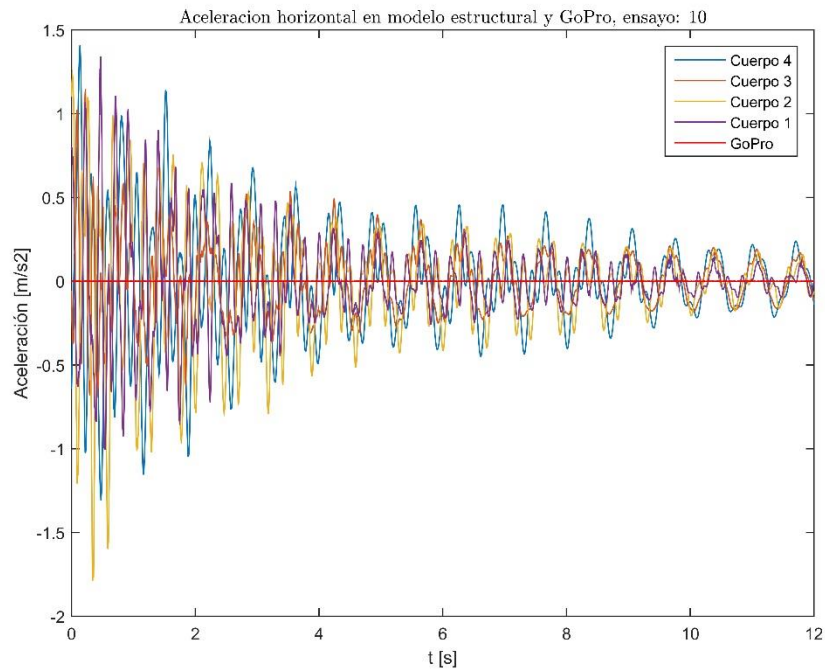


Figura 183. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #10.

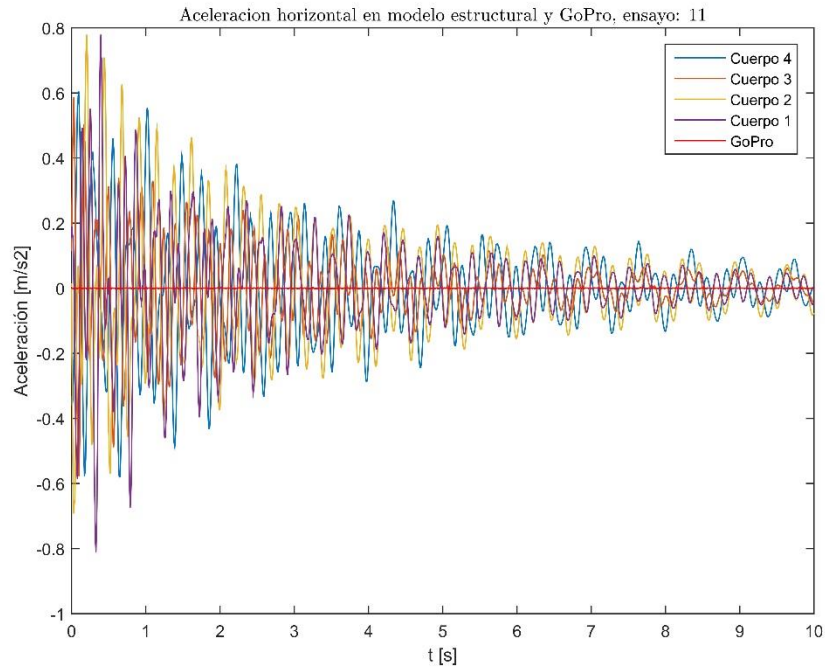


Figura 184. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #11.

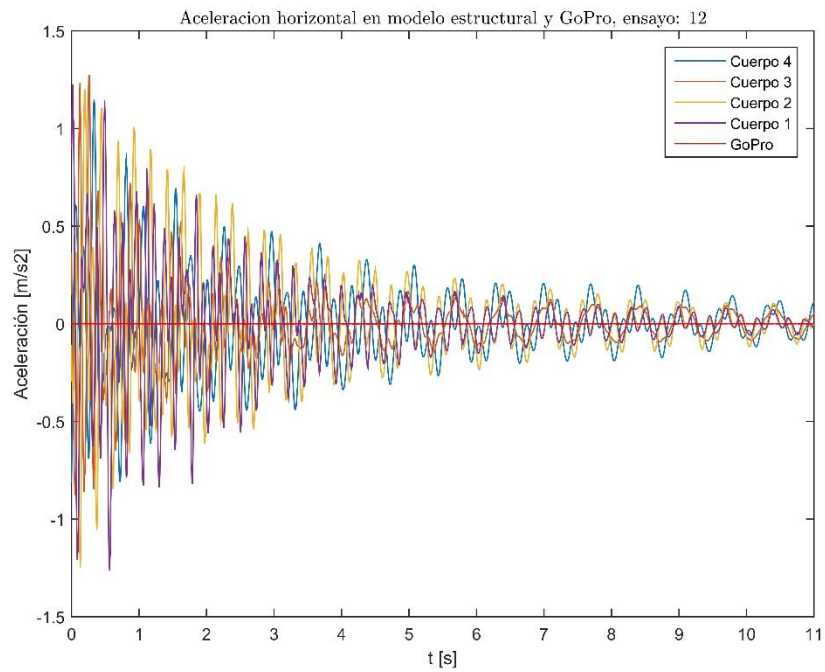


Figura 185. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #12.

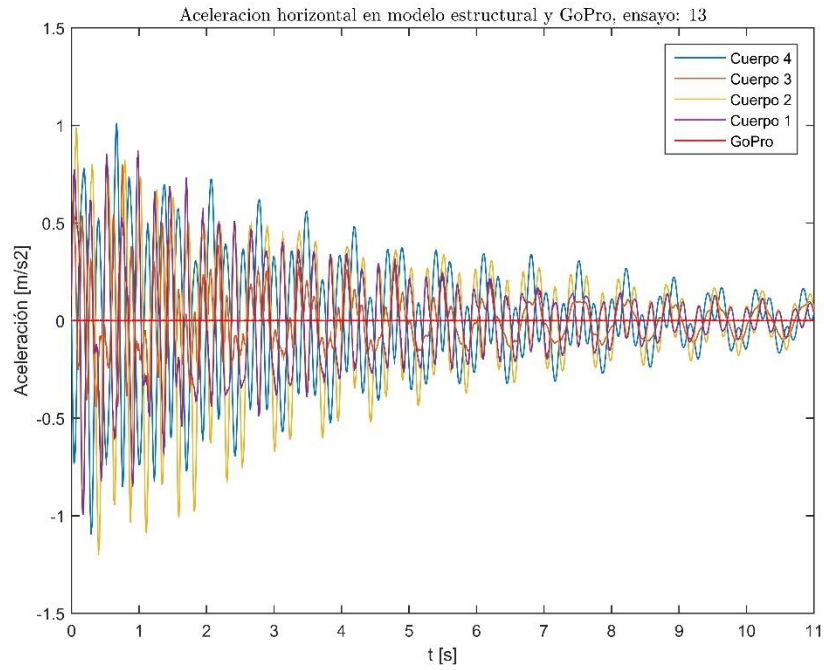


Figura 186. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #13.

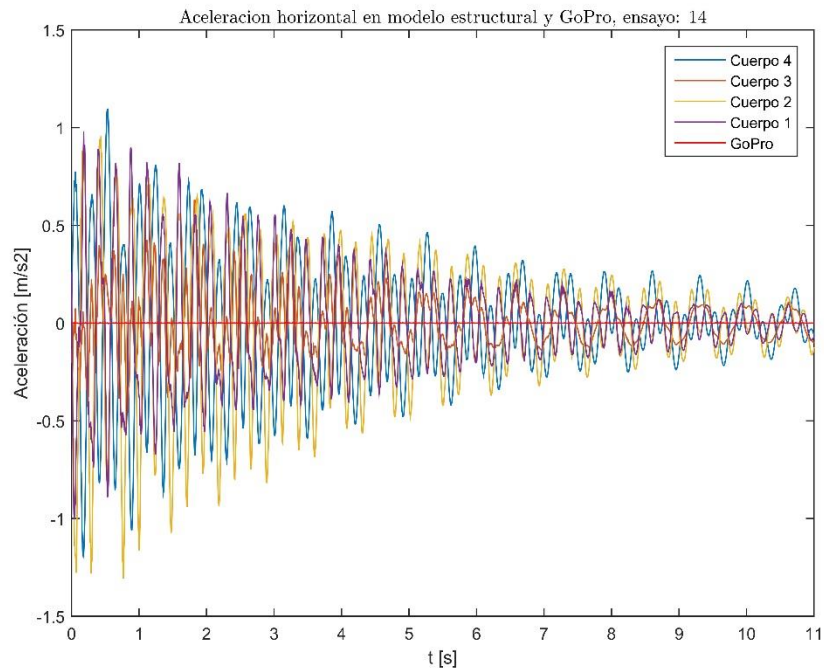


Figura 187. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #14.

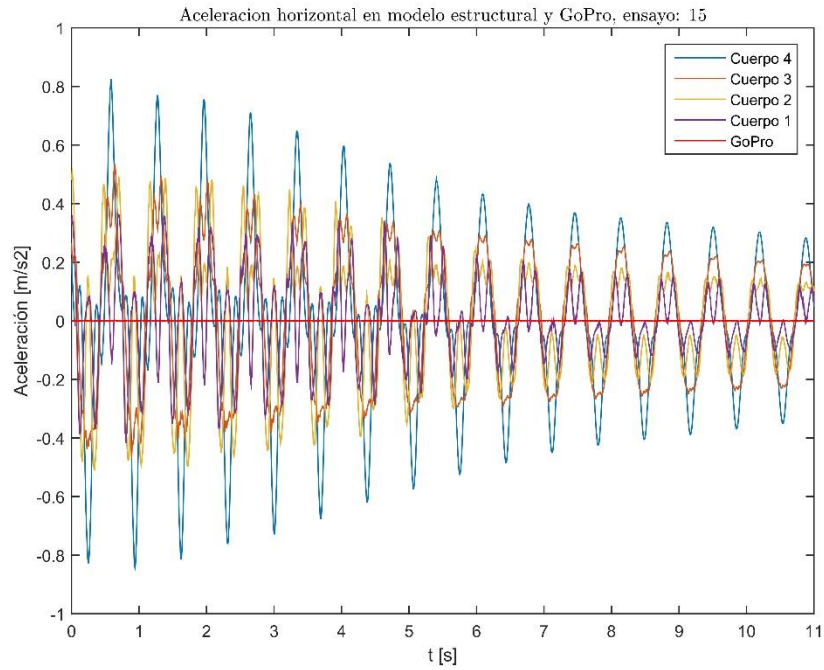


Figura 188. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #15.

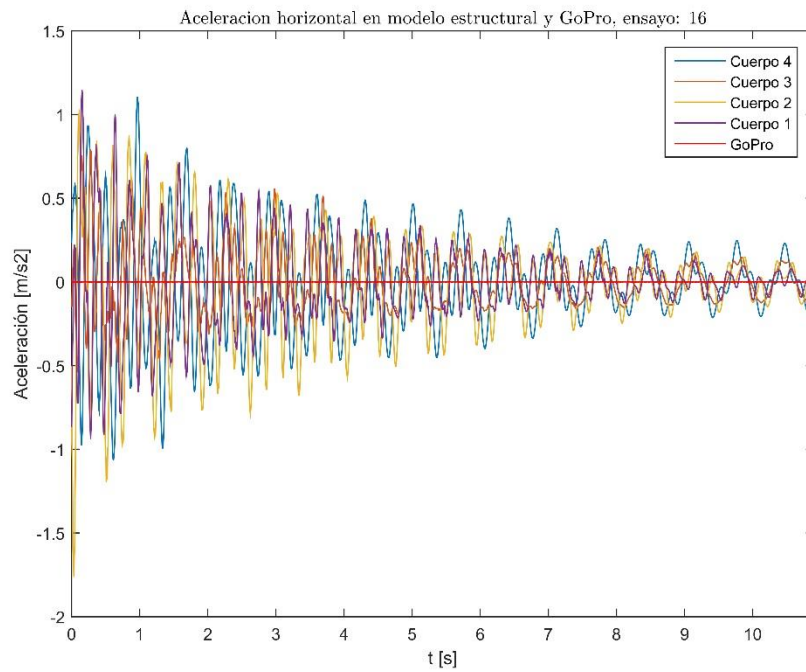


Figura 189. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #16.

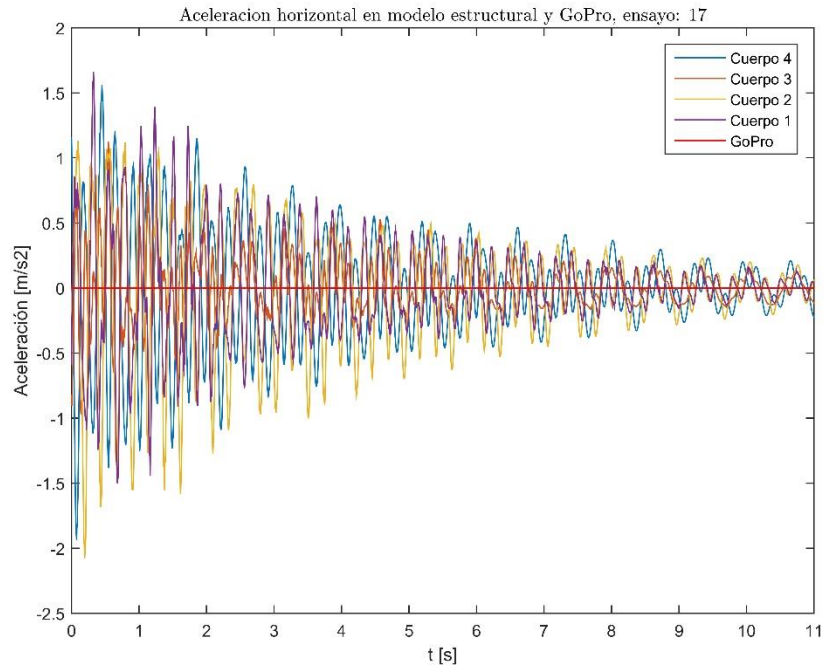


Figura 190. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #17.

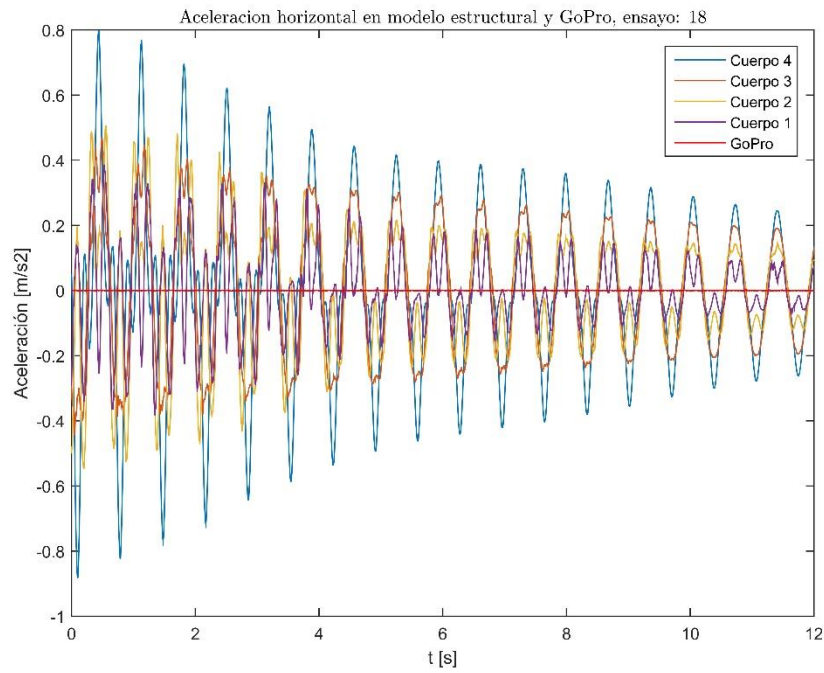


Figura 191. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #18.

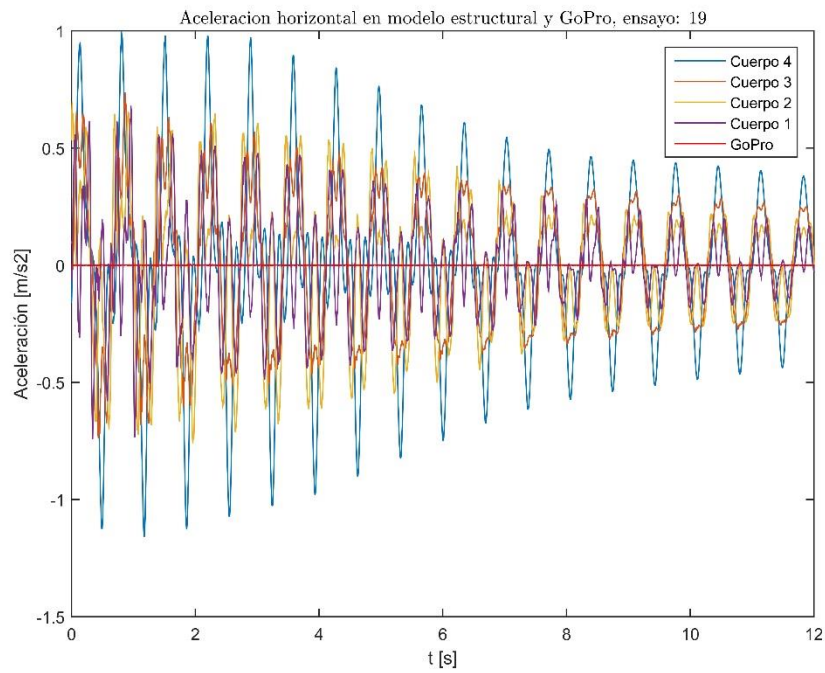


Figura 192. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #19.

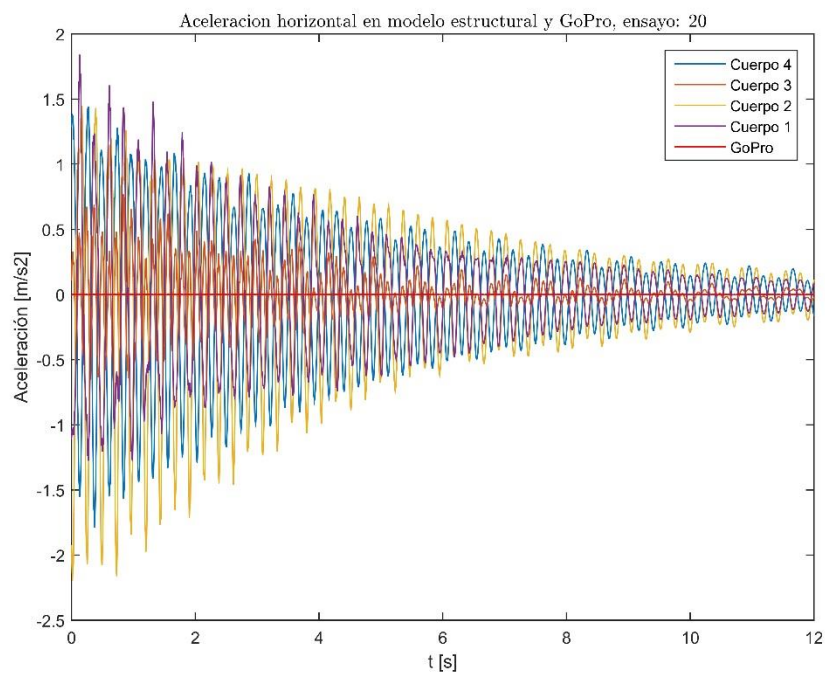


Figura 193. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #20.

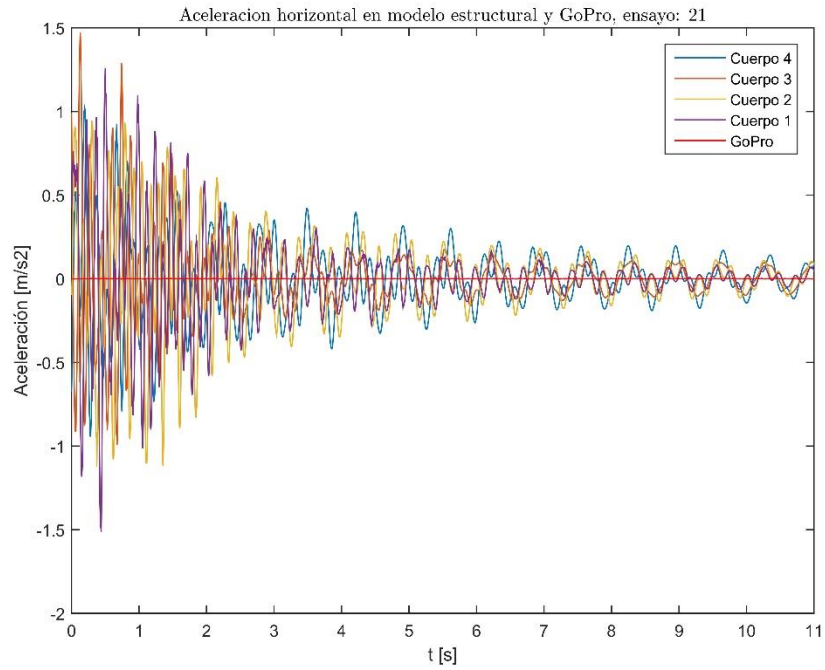


Figura 194. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #21.

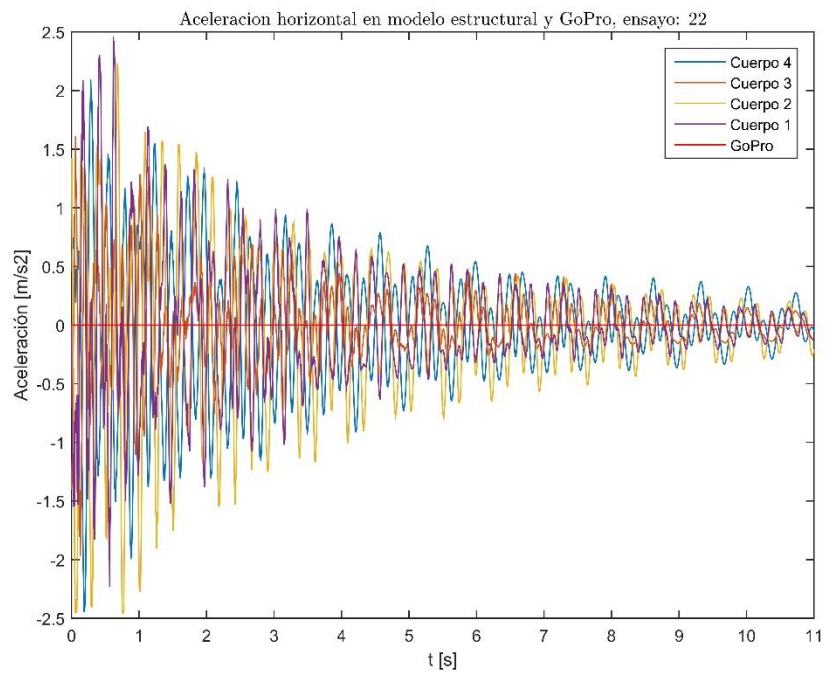


Figura 195. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #22.

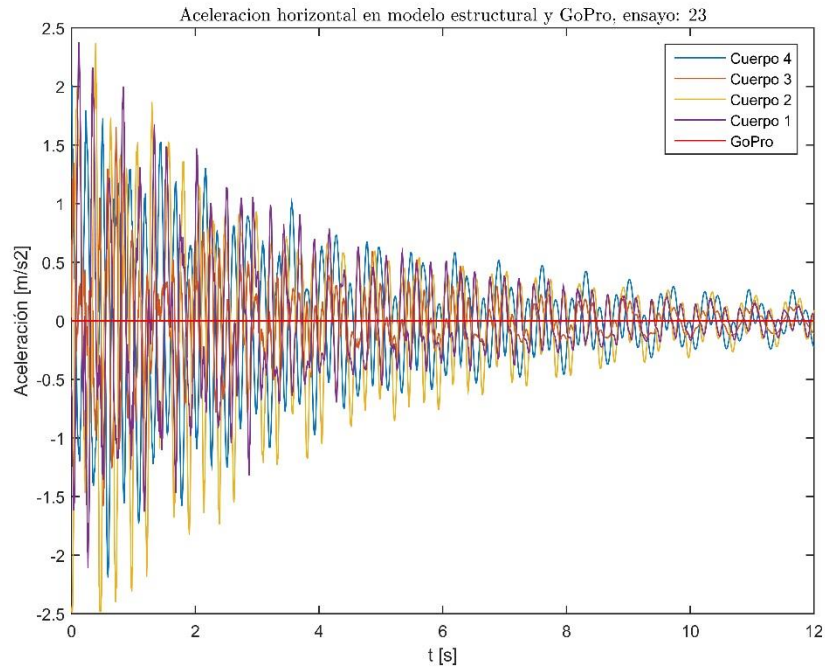


Figura 196. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #23.

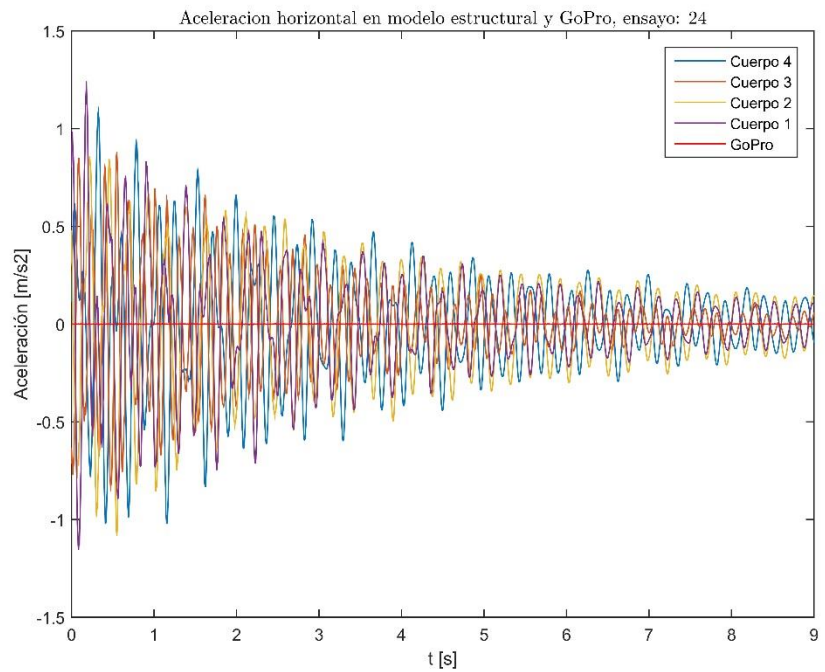


Figura 197. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #24.

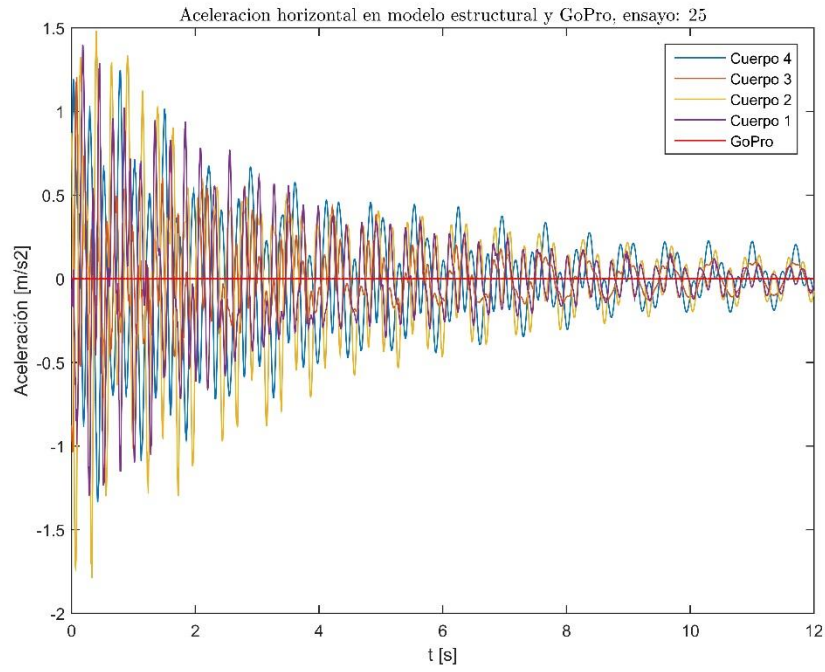


Figura 198. Comparación de vibraciones sobre modelo y cámara durante ensayo #25.