

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE
DESPLAZAMIENTO BIDIMENSIONAL PARA MONITOREO DE SALUD
ESTRUCTURAL EN LABORATORIO MEDIANTE VISIÓN POR
COMPUTADORA**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

ISUHUAYLAS AGUIRRE SERGIO MANUEL

ID: 0009-0008-1038-0701

ASESOR:

DR. MIGUEL AUGUSTO DIAZ FIGUEROA

ID: 0000-0002-9421-4194

LIMA - PERÚ

2025

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Isuhuaylas Aguirre, Sergio Manuel

sergio.isuhuaylas.a@uni.pe

965431142

Dedicatoria

*A mi madre y a mi padre, por su amor infinito y su incansable dedicación;
a mi hermano, por su sabiduría y apoyo constante;
a toda mi familia, por su respaldo y ánimo incondicional;
a mi enamorada, por su apoyo y aliento constante;
y a los investigadores del CISMID, por guiarme en el camino de la investigación y
expandir mis horizontes académicos.*

Agradecimientos

Mientras escribo estas líneas, me invade una profunda gratitud hacia todas las personas que han sido pilares fundamentales en este viaje académico. Cada uno de los cuales han dejado una huella imborrable en mi educación y en este logro que hoy celebro.

En primer lugar, a mis queridos padres, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido la luz que me ha guiado en los momentos más difíciles. Su paciencia y comprensión no sólo han sido un regalo en mi vida, sino también una fuente de inspiración y fortaleza. A mi hermano, gracias por ser mi cómplice, mi amigo y por el constante consejo vertido en mi vida. A mi tío Luis, por haber sido como un segundo padre para mí y por haberme apoyado en todo momento.

A mi enamorada, por ser mi compañera en cada paso, por su paciencia y por recordarme siempre que los sueños se cumplen con esfuerzo y dedicación

A mi asesor, Miguel Díaz, le estoy profundamente agradecido. Su experta orientación, su incansable dedicación no sólo han enriquecido mi trabajo, sino que también han modelado en mí un espíritu científico y una pasión por el aprendizaje.

A los investigadores del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID FIC UNI), mi sincero agradecimiento por su invaluable apoyo y por la amistad que hemos forjado. Su dedicación y compromiso con la excelencia ha sido una fuente de inspiración y un modelo para seguir en mi carrera profesional.

Cada uno de vosotros ha desempeñado un papel crucial en este capítulo de mi vida. Con profunda gratitud y afecto, os dedico a todos este logro

Resumen

Se han llevado a cabo investigaciones exhaustivas para explorar la aplicación de la visión por computadora y el procesamiento de imágenes en la cuantificación precisa de desplazamientos y deformaciones estructurales para el Monitoreo de la Salud Estructural. El trabajo colaborativo en este campo ha conducido al desarrollo y aplicación de sistemas de medición de desplazamientos basados en estas técnicas innovadoras.

Este trabajo ha impulsado el desarrollo de sistemas innovadores para la medición precisa de desplazamientos. Esta tesis presenta un sistema basado en cámaras de video para la detección bidimensional y multipunto, un enfoque poco explorado con aplicaciones prometedoras. La eficacia del sistema se validó mediante mediciones en una mesa vibradora de laboratorio, comparándose con métodos convencionales como el sensor láser de desplazamiento y la doble integración de datos de aceleración. Se utilizaron métricas como el error cuadrático medio normalizado y la respuesta máxima, confirmando la precisión del enfoque basado en visión por computadora. Este sistema permite mediciones bidimensionales y multipunto sin necesidad de sensores individuales en cada punto. Su aplicación en ensayos dinámicos de laboratorio ha permitido identificar irregularidades torsionales, evaluar modelos con pisos blandos y analizar estructuras multinivel con muros de ductilidad limitada. En todos los casos, la medición directa de desplazamientos facilita una mejor comprensión del comportamiento inelástico de las estructuras mediante curvas de histéresis.

Palabras clave: visión por computadora, monitoreo estructural, medición de desplazamientos, sensores de aceleración, ensayos dinámicos.

Abstract

Extensive research has been conducted to explore the application of computer vision and image processing to accurately quantify structural displacements and deformations for Structural Health Monitoring. Collaborative work in this field has led to the development and application of displacement measurement systems based on these innovative techniques.

This work has driven the development of innovative systems for accurate displacement measurement. This thesis presents a video camera-based system for two-dimensional, multi-point sensing, an underexplored approach with promising applications. The effectiveness of the system was validated through measurements on a laboratory shaker table, compared to conventional methods such as a laser displacement sensor and double integration of acceleration data. Metrics such as normalized mean square error and maximum response were used, confirming the accuracy of the computer vision-based approach. This system enables two-dimensional, multi-point measurements without the need for individual sensors at each point. Its application in laboratory dynamic testing has allowed the identification of torsional irregularities, the evaluation of soft-story models, and the analysis of multi-level structures with limited ductility walls. In all cases, direct displacement measurement facilitates a better understanding of the inelastic behavior of structures through hysteresis loops.

Keywords: computer vision, structural monitoring, displacement measurement, acceleration sensors, dynamic testing.

Tabla de Contenido

	Página
Resumen	v
Abstract	vi
Prólogo	xxii
Capítulo I: Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Descripción del problema de investigación	4
1.3. Objetivos del estudio	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos Específicos	6
1.4. Hipótesis	6
1.4.1. Hipótesis general.....	6
1.4.2. Hipótesis específicas.....	6
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	8
2.1. Monitoreo de la salud estructural.....	8
2.2. Señales	8
2.3. Convolución y correlación	9
2.4. Transformada de Fourier.....	10
2.4.1. Transformada discreta de Fourier	10
2.4.2. Transformada rápida de Fourier	10
2.4.3. Límite de Nyquist.....	11
2.4.4. Aplicaciones de las transformadas de Fourier.	11
2.5. Remuestreo de señales.....	14
2.5.1. Decimación	14
2.5.2. Interpolación.....	15
2.6. Procesamiento de señales	15
2.6.1. Corrección por línea base	15

2.6.2.	Filtrado de frecuencias	17
2.6.3.	Doble integración para el cálculo de desplazamientos.	17
2.7.	Procesamiento digital de imágenes	18
2.7.1.	Imagen digital	19
2.7.2.	Píxeles	19
2.7.3.	Imágenes a color	20
2.7.4.	Aplicaciones del procesamiento de imágenes	22
2.8.	Cámara digital	22
2.8.1.	Sensores de cámara	22
2.8.2.	Acercamiento (<i>zoom</i>)	22
2.8.3.	Fotogramas por segundo (<i>fps</i>)	23
2.9.	Visión por computador.....	23
2.10.	Dinámica estructural.....	24
2.10.1.	Irregularidad torsional.....	24
2.10.2.	Irregularidad de rigidez (Piso blando).....	25
2.10.3.	Frecuencia de resonancia	25
2.10.4.	Muros de ductilidad limitada	26
2.10.5.	Análisis dinámico incremental	27
2.10.6.	Curvas de histéresis y curvas de capacidad.....	27
Capítulo III: Desarrollo del algoritmo		29
3.1.	Visión por computadora para el seguimiento de puntos	29
3.2.	Algoritmo para rastrear objetos a partir de colores	30
3.2.1.	Descripción detallada del programa desarrollado con base al primer método	31
3.2.2.	Implementación y puesta a prueba.....	33
3.2.3.	Ventajas	33
3.2.5.	Conclusión	35
3.3.	Algoritmo <i>scale-invariant feature transform</i> (SIFT)	35

3.3.1.	Descripción detallada del programa desarrollado con base al primer método	36
3.3.2.	Implementación y puesta a prueba	36
3.3.3.	Ventajas	37
3.3.4.	Desventajas	37
3.3.5.	Conclusión	38
3.4.	Algoritmo basado en <i>template matching</i>	38
3.4.1.	Descripción de un procedimiento general para la obtención de desplazamientos mediante TM.	40
3.4.2.	Implementación y puesta a prueba	41
3.4.3.	Ventajas	41
3.4.4.	Desventajas	41
3.4.5.	Conclusión	42
3.5.	Elección del algoritmo base	42
Capítulo IV: Análisis de la observación de la respuesta estructural		43
4.1.	Descripción del algoritmo propuesto	43
4.1.1.	Captura de video	43
4.1.2.	Lectura del primer fotograma y selección de los marcadores, ROIs y el factor de escala.	43
4.1.3.	Paralelización del algoritmo mediante distribución de fotogramas entre núcleos	44
4.1.4.	Cálculo de la posición de un marcador dentro de un ROI	45
4.1.5.	Repetición del proceso para cada fotograma	52
4.1.6.	Conversión de unidades	53
4.1.7.	Generación del archivo de salida	54
4.2.	Equipamiento que conforma el sistema de medición propuesto.	56
4.2.1.	Cámara de video	56
4.2.2.	Marcador	57
4.2.3.	Computadora	58

4.2.4.	Otros instrumentos	58
4.3.	Validación del sistema de medición propuesto basado en visión por computador.....	58
4.3.1.	Descripción del proceso de validación.....	58
4.3.2.	Procedimiento para medir la similitud entre dos registros.....	60
4.3.3.	Mediciones efectuadas.....	62
4.3.4.	Comparaciones	64
4.4.	Consideraciones sobre el alcance y limitaciones del sistema de medición propuesto	81
Capítulo V: Implementación en el monitoreo de la salud estructural		83
5.1.	Evaluación de la respuesta estructural de un modelo que presenta irregularidad torsional.	83
5.1.1.	Descripción del ensayo	83
5.1.2.	Comparación entre las medidas obtenidas por el sensor láser de desplazamiento y el sistema de medición propuesto.	86
5.1.3.	Verificación de la Irregularidad torsional.....	90
5.1.4.	Comportamiento histerético del espécimen obtenido con el sistema de medición propuesto	95
5.2.	Evaluación de la respuesta estructural de un modelo compuesto por muros de ductilidad limitada a escala 1:10.....	97
5.2.1.	Descripción del ensayo	97
5.2.2.	Comparación entre las medidas obtenidas por el láser y el sistema de medición propuesto	99
5.2.3.	Comportamiento histerético del espécimen obtenido con el sistema de medición propuesto	103
5.3.	Evaluación de la respuesta estructural de un modelo que presenta irregularidad en altura de piso blando	104
5.3.1.	Descripción del ensayo	104
5.3.2.	Comparación entre las medidas obtenidas por el sensor láser de desplazamiento y el sistema de medición propuesto	107

5.3.3. Comportamiento histerético del espécimen obtenido con el sistema de medición propuesto	111
Conclusiones	116
Recomendaciones	118
Referencias bibliográficas.....	120
Anexos	125

Lista de tablas

Tabla 1:Elementos del sistema de medición propuesto	56
Tabla 2:Descripción de las formas de ondas enviadas a la mesa vibradora.	59
Tabla 3:Desplazamientos medidos con el sensor láser de desplazamiento.....	63
Tabla 4:Desplazamientos obtenidos con la doble integración de las aceleraciones obtenidas de los acelerómetros.	63
Tabla 5:Desplazamientos medidos con la cámara mediante visión por computador.....	64
Tabla 6:Cámara (marcador izquierdo) vs sensor láser de desplazamiento.	66
Tabla 7:Cámara (marcador derecho) vs sensor láser de desplazamiento.....	66
Tabla 8:Doble integración (marcador izquierdo) vs sensor láser de desplazamiento	67
Tabla 9:Doble integración (marcador derecho) vs sensor láser de desplazamiento	67
Tabla 10:NRMSE para la cámara vs sensor láser de desplazamiento (izquierda y derecha) y para la doble integración vs sensor láser de desplazamiento (izquierda y derecha).....	68
Tabla 11:Comparación del registro obtenido con la cámara rotada y el mismo registro corregida por el ángulo de rotación contra el sensor láser de desplazamiento	78
Tabla 12:Descripción de los registros del sismo Pisco 2007 enviados a la mesa vibradora para el E5.	85
Tabla 13:Descripción de los registros del sismo Pisco 2007 enviados a la mesa vibradora para el E8.	86
Tabla 14:Registros representativos de cada estado de los modelos ensayados.	86
Tabla 15:Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento para el E5.	89
Tabla 16:Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento para el E8.	90
Tabla 17:Resumen de los Git del especimen E5	94
Tabla 18:Resumen de los Git del especimen E8 dirección “x”	94
Tabla 19:Resumen de los Git del especimen E8 dirección “y”	94

Tabla 20:Descripción de los registros enviados a la mesa vibradora. Sismo de Lima 03 de octubre de 1974, estación del Parque de la Reserva	97
Tabla 21:Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento.	99
Tabla 22:Descripción de los registros de Pisco 2007 (estación Universidad Nacional de Ica) enviados a la mesa vibradora para el E1.....	106
Tabla 23:Descripción de los registros enviados a la mesa vibradora para el E2	106
Tabla 24:Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento para E1.....	110
Tabla 25:Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento para E2.....	111

Lista de figuras

Figura 1:Representación de una señal en tiempo discreto $x[n]$	8
Figura 2:Señal muestreada a una frecuencia menor o igual que la de Nyquist ..	12
Figura 3:Señal muestreada a una frecuencia mayor que la de Nyquist.....	12
Figura 4:Señal muestreada a una frecuencia de diez veces la de Nyquist.....	13
Figura 5:Espectro de Fourier de un acelerograma en el sismo de Lima 1974....	13
Figura 6:Error de línea base en el acelerograma del terremoto Hector Mine de California 1999 (M. 7.1 Mw).....	16
Figura 7:Aceleración que varía linealmente entre cada punto.....	18
Figura 8:Imagen representada como superficie, como imagen y como matriz. ..	20
Figura 9:Imagen RGB junto con sus componentes R, G y B.....	21
Figura 10:Paradigma de visión por computador.....	23
Figura 11:Irregularidad torsional en planta.....	24
Figura 12:Formación de rótulas y colapso de edificios con piso blando.	25
Figura 13:Configuración típica del refuerzo en muros de ductilidad limitada.	26
Figura 14:Curvas de histéresis para un elemento estructural de acero en comportamiento inelástico.	27
Figura 15:Regla con un extremo en movimiento oscilatorio.	30
Figura 16:Elección de los ROI (verde) y elección de SF (Azul).	32
Figura 17:Máscara generada por el programa.	32
Figura 18:Programa ejecutándose. Contorno azul dibujado por el programa....	32
Figura 19:Tiempo-historia con rastreo por colores.	33
Figura 20:Diagrama de flujo para rastrear objetos a partir de colores.	34
Figura 21:Ubicación del marcador dentro del primer fotograma con SIFT	37
Figura 22:Imagen pequeña deslizándose sobre imagen grande generando una matriz de correlación R.	39
Figura 23:Ejemplo de uso del TM para localizar una imagen dentro de otra.	39
Figura 24:Diagrama de flujo para el TM.	40

Figura 25:Tiempo-historia con rastreo por TM	41
Figura 26:Elementos importantes para el programa	44
Figura 27:Diagrama de flujo de la correlación de fase entre dos imágenes	48
Figura 28:Diagrama de la interpolación parabólica.	50
Figura 29:Forma de onda registrada con subpíxeles y sin subpíxeles.	51
Figura 30:Diagrama de flujo para el cálculo de la posición de un marcador dentro de un ROI.	52
Figura 31:Modelo de archivo de salida del software.	54
Figura 32:Diagrama de flujo del algoritmo.....	55
Figura 33:Mesa vibradora de seis grados de libertad dentro del Laboratorio de	
Figura 34:Estructuras en el CISMID FIC-UNI.....	59
Figura 35:Disposición de equipos en el laboratorio.....	60
Figura 36:Registros desfasados en el tiempo	61
Figura 37:Diagrama de flujo para comparación de registros.	62
Figura 38:Acelerogramas para los registros 2 y 13 del ensayo de validación del sistema propuesto.	65
Figura 39:Registro del terremoto El Centro.....	69
Figura 40:Registro del terremoto Lima 1966	70
Figura 41:Onda sinusoidal de 1 mm de amplitud y 1 Hz de frecuencia	73
Figura 42:Onda sinusoidal de 5 mm de amplitud y 0.5 Hz de frecuencia	74
Figura 43:Vista detallada del registro Lima 1966 en intervalos de 5.5 segundos.	75
Figura 44:Fotograma del video capturado con la cámara rotada	77
Figura 45:Demostración de la utilidad del algoritmo para la medición de desplazamiento en dos direcciones.	77
Figura 46:Desplazamientos de la cámara debido a la vibración ambiental, en las tres direcciones de movimiento y para cada uno de los tres sismos del ensayo	
Figura 47:Esquema de los especímenes para el ensayo de laboratorio	84
Figura 48:Disposición de instrumentos en el laboratorio	84

Figura 49:Tiempo-historia de aceleraciones con mayores PGA.....	85
Figura 50:Comparaciones para los desplazamientos del centro de masa del E5.	87
Figura 51:Comparaciones para los desplazamientos del centro de masa del E8.	88
Figura 52:Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel para el E5	89
Figura 53:Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel para el E8.....	89
Figura 54:Comparación del desplazamiento de la esquina de mayor movimiento con el centro de masas para el E5 en dirección “x”.....	91
Figura 55:Comparación del desplazamiento de la esquina N1 de mayor movimiento con el centro de masas para el E9.....	92
Figura 56:Comparación del desplazamiento de la esquina de mayor movimiento con el centro de masas para el E9.....	93
Figura 57:Comportamiento histerético del centro de masas para el E5 en dirección “x”.....	95
Figura 58:Comportamiento histerético del centro de masas para el E5 en dirección “x y dirección “y”.	96
Figura 59:Especimen de siete niveles de MDL	98
Figura 60:Vistas del espécimen de siete niveles de MDL.	98
Figura 61:Registros de mayor PGA en el ensayo.	99
Figura 62:Comparación de las respuestas de desplazamiento del último nivel ante los seis registros del experimento.....	100
Figura 63:Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel ante los seis registros del experimento.	102
Figura 64:Comportamiento histerético del espécimen MDL en dirección X en los 6 registros enviados a la mesa vibradora.....	103
Figura 65:Distribución de canales del adquisidor dinámico para la adquisición de data de los especímenes en la mesa vibradora.	104
Figura 66:E1 (arriba) y E2 (abajo) capturados por la cámara de video.	105

Figura 67:Registro de mayor PGA en el ensayo de a) E1 y b) E2.....	106
Figura 68:Comparación de las respuestas de desplazamiento del último nivel de E1 medidas con el láser y con el sistema de medición propuesto.....	107
Figura 69:Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel de E1 medidos con el láser y con el sistema de medición propuesto.	108
Figura 70:Comparación de las respuestas de desplazamiento del último nivel de E2 medidas con el láser y con el sistema de medición propuesto.....	109
Figura 71:Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel de E2 medidos con el láser y con el sistema de medición propuesto.	110
Figura 72:Comportamiento histerético del espécimen E1 en dirección X en los 4 registros enviados a la mesa vibradora.....	111
Figura 73:Comportamiento histerético del espécimen E2 en dirección en los registros enviados a la mesa vibradora.....	112
Figura 74:Comparación visual del comportamiento histerético del E1 y el E2..	113

Lista de símbolos y siglas

Símbolos:

$f(t)$: Función continua en el dominio del tiempo
$f(x, y)$: Función con dos variables independientes
$x[t]$: Función o señal discreta
$\mathcal{F}[\]$: Transformada de Fourier
$\mathcal{F}^{-1}[\]$: Transformada inversa de Fourier
$F(\omega)$: Función en el dominio de las frecuencias
$x * h$: Operación de convolución entre dos funciones
$x \otimes h$: Operación de correlación entre dos funciones
F_{x_1}	: Frecuencia de muestreo para la señal $x_1[t]$
F	: Frecuencia predominante en un espectro de frecuencias.
D	: Factor de decimación
$v[t]$: Señal filtrada por un filtro paso-bajo
$w(m)$: Señal interpolada
I	: Factor de interpolación
G	: Amplitud en el espectro de Fourier para determinada frecuencia
$y(t)$: Desplazamiento en tiempo t
\dot{y}_t	: Velocidad en tiempo t
\ddot{y}_t	: Aceleración en tiempo t
Δt	: Intervalo de tiempo
t_n	: Tiempo en el instante "n"
x-	: Eje x
y-	: Eje y
M	: Número de filas de una imagen
N	: Número de columnas de una imagen
L	: Nivel de intensidad máxima de píxel
max ()	: Máximo valor de una función, señal, matriz o un conjunto de valores
min ()	: Mínimo valor de una función, señal, matriz o un conjunto de valores
Y	: Valor de intensidad de píxel en escala de grises
R	: Valor de intensidad de píxel en rojo

G	: Valor de intensidad de píxel en verde
B	: Valor de intensidad de píxel en azul
$R(x, y)$: Matriz de correlación
$T(x, y)$: Imagen pequeña por ubicar dentro de una imagen más grande (plantilla)
$I(x, y)$: Imagen expresada de forma matricial.
$\sum_{x', y'}$: Sumatoria sobre dos variables x' y y'
$f_{(t-t_0)}$: Función desplazada un tiempo t_0
e	: Constante de Euler
$R(\omega)$: Espectro Cruzado Normalizado
$r(x, y)$: Función de correlación de fase
$G^*(\omega)$: Conjugada compleja de $G_{(\omega)}$
$r(x, y)$: Función de correlación de fase
p_δ	: Posición del valor máximo para la función de correlación de fase
$\arg \max_{(x, y)}$: Operador posición del máximo valor
$ F_1(u, v) $: Módulo de una función compleja de dos variables
\hat{x}, \hat{y}	: Desplazamiento en subpíxeles entre dos imágenes
$a_{1,2,\dots,6}$: Constantes para la interpolación parabólica.
x_f, y_f	: Coordenadas de la posición final de un marcador dentro de un ROI
P_1	: Coordenadas de posición de un píxel dentro de una imagen.
$d(P_1, P_2)$: Distancia Euclidiana entre dos píxeles
x_{max}	: Máximo desplazamiento de una señal medido por el sistema de medición propuesto
x_{min}	: Mínimo desplazamiento de una señal medido por el sistema de medición propuesto
x_i	: Medida de desplazamiento obtenida por el sistema de medición propuesto en el tiempo i
x'_i	: Medida de desplazamiento obtenida por el láser en el tiempo i
n	: Cantidad total de muestras en dos señales a ser comparadas
θ	: Ángulo de rotación de la cámara con respecto a la horizontal
$[x \ y]$: Coordenadas de un píxel medidas en el sistema de coordenadas original de una imagen

- $[u \ v]$: Coordenadas de un píxel medidas en un sistema de coordenadas rotado de una imagen.
- G_{it} : Grado de irregularidad torsional
- $\Delta_{max,nodo}$: Desplazamiento máximo de un nodo
- Δ_{CM} : Desplazamiento del centro de masas
- $\llbracket x \rrbracket$: Función máximo entero
- Gf : Número de fotogramas asignado a cada núcleo
- Gf_r : Número de fotogramas residuales
- N_{TF} : Cantidad total de fotogramas del video
- N_{ND} : Número de núcleos disponibles para procesamiento en paralelo
- $R(x, y)$: Imagen en un determinado fotograma
- $R_{sub}(u, v)$: Sub-imagen que contiene un ROI

Siglas:

SHM	: Monitoreo de la Salud Estructural (<i>Structural Health Monitoring</i>)
DMS	: Estación de monitoreo dinámico (<i>Dynamic Monitoring Station</i>)
CISMID	: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
NRMSE	: Error Cuadrático Medio Normalizado (<i>Normalized Root Mean Square Error</i>)
GPS	: Sistema de Posicionamiento Global (<i>Global Positioning System</i>)
HD	: Alta definición (<i>High Definition</i>)
RGB	: Rojo, verde y azul (<i>Red, green, blue</i>)
HSV	: Tono, saturación, valor (<i>Hue, Saturation, Value</i>)
DFT	: Transformada discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
FFT	: Transformada rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
IFT	: Transformada inversa de Fourier (<i>Inverse Fourier Transform</i>)
CCD	: Sensor de dispositivo de carga acoplada (<i>Charge Coupled Device</i>)
CMOS	: Semiconductor de óxido de metal complementario (<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>)
fps	: Fotogramas por segundo (<i>frames per second</i>)
NT	: Norma técnica
IDA	: Análisis dinámico incremental (<i>Incremental Dynamic Analysis</i>)
TM	: Emparejamiento de Plantillas (<i>Template Matching</i>)
SF	: Factor de escala (<i>Scale Factor</i>)
SIFT	: Transformación de características invariantes de escala (<i>Scale-Invariant Feature Transform</i>)
RAM	: Memoria de acceso aleatorio (<i>Random Access Memory</i>)
ROI	: Región de interés (<i>Region Of Interest</i>)
MDL	: Muro de Ductilidad Limitada
SQDIFF	: Diferencia de cuadrados (<i>Squared difference</i>)
CCORR	: Correlación cruzada (<i>Cross correlation</i>)
NCCORR	: Correlación cruzada normalizada (<i>Normalized cross correlation</i>)
GPU	: Unidad de procesamiento gráfica (<i>Graphic Units Processes</i>)
E	: Especimen
CM	: Centro de masa
N	: Nodo o esquina

Prólogo

A medida que avanzan los años y se va desarrollando cada vez más la infraestructura de las diversas ciudades, estas enfrentan retos considerables de seguridad y durabilidad, necesitando así de innovaciones tecnológicas constantes para su mantenimiento y monitoreo de su estado en tiempo real con fines preventivos. Es por ese motivo que el monitoreo de la salud estructural (SHM) se desarrolla como una disciplina crucial para la prevención y análisis en tiempo real del desempeño de edificaciones, puentes y estructuras en general.

La presente investigación, titulada "Desarrollo de un Sistema de Medición de Desplazamiento Bidimensional para Monitoreo de Salud Estructural en Laboratorio Mediante Visión por Computadora", propone soluciones innovadoras y tecnológicas dentro del campo del SHM para la detección y análisis de la respuesta estructural, aunque dentro del ámbito de los ensayos por laboratorio.

Los ensayos de laboratorio juegan un papel fundamental en las investigaciones de SHM, y en toda la ingeniería sísmica en general, puesto que permiten simular condiciones reales de carga, como por ejemplo los sismos, para analizar las respuestas de los especímenes en un entorno bajo control. Estos ensayos justifican su importancia al permitir la validación de teorías, sistemas de monitoreo y modelos de predicción antes de su implementación en campo.

Esta investigación presenta como principal objetivo desarrollar un sistema de medición de la respuesta de desplazamientos en dos direcciones mediante el uso de la visión por computadora sin necesidad de establecer contacto directo con los especímenes de laboratorio, el cual se fundamenta en la identificación y adaptación de técnicas de procesamiento de imágenes, desarrollo algoritmos y programas en códigos de programación de alto nivel y la validación experimental en ensayos dinámicos de mesa vibradora.

La importancia y necesidad de esta investigación radica en que el desarrollo de un sistema de medición que prescindiera del contacto físico directo entre el sensor y la estructura permite salvar las dificultades de instalación que se tienen con los sensores tradicionales que además requieren de fuentes de energía y dispositivos adicionales para la adquisición de datos. Esto no solo vuelve al sistema propuesto práctico, sino que también económico; lo cual se vuelve mucho más apreciable cuando se tiene que monitorear una gran cantidad de puntos que pertenecen a la estructura en algunos ensayos.

Dentro del estado del arte se pueden encontrar numerosas investigaciones que han demostrado el potencial de la visión por computadora dentro del SHM. Los resultados de dichas investigaciones indican una gran similitud entre las respuestas de desplazamiento obtenidas por cámaras de video y visión por computador y las respuestas obtenidas por los sistemas de medición tradicionales, demostrando así una gran fiabilidad y precisión en estas innovaciones tecnológicas. Por ello, en la presente investigación se propone continuar el desarrollo de estos sistemas de medición y proponer nuevas aplicaciones en el laboratorio de estructuras del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID, así como también enfocarse en aprovechar la detección de desplazamientos en ambas direcciones de movimiento, ya que gran parte de la literatura solo se enfoca en desarrollar programas destinados a monitorear en una sola dirección y sus aplicaciones están limitadas a ensayos unidireccionales.

El Capítulo III, desarrolla algoritmos preliminares basados en técnicas conocidas de visión por computadora. Luego de evaluar y comparar los métodos de rastreo por colores, el *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) y el *Template Matching* (TM) se selecciona el TM fundamentándose en su equilibrio óptimo entre precisión y eficiencia computacional.

El Capítulo IV desarrolla extensamente el algoritmo basado en TM, que es complementarlo con técnicas adicionales como la correlación de fase y la interpolación cuadrática para mejorar la robustez del sistema frente a variaciones de iluminación y asegurar mediciones precisas a nivel de subpíxel. Además, se presenta la validación experimental del sistema, comparando sus mediciones con las obtenidas por métodos tradicionales como el sensor láser de desplazamiento y los acelerómetros para de esta manera fundamentar su precisión mediante el uso de la estadística. Los resultados demuestran la alta precisión y eficiencia del sistema basado en visión por computadora, destacando su capacidad para medir desplazamientos en múltiples puntos y en dos dimensiones simultáneamente.

El Capítulo V presenta aplicaciones inéditas y novedosas para el SHM dentro del laboratorio, aprovechando la bidimensionalidad de las mediciones y la facultad de poder monitorear varios puntos a la vez. Entre las aplicaciones se encuentran el monitoreo de especímenes con irregularidad torsional desde una vista en planta, monitoreo de espécimen con sistema estructural de muros de

ductilidad limitada y finalmente el monitoreo de espécimen con irregularidad en altura de piso blando.

Las hipótesis planteadas en esta tesis sostienen que es posible desarrollar un sistema de medición de desplazamientos bidimensionales sin contacto directo, y que el procesamiento de imágenes puede proporcionar una herramienta robusta y precisa para esta tarea. Los resultados obtenidos respaldan estas hipótesis de forma contundente al obtenerse mediciones muy precisas, casi indistinguibles con las de un sensor láser de desplazamiento, equipo que además resulta mucho más costoso y difícil de instalar.

Esta investigación no solo contribuye al avance del SHM mediante la implementación de tecnologías de visión por computadora, sino que también sienta las bases para futuras exploraciones y aplicaciones en el campo de la ingeniería civil. El sistema de medición propuesto, con su enfoque en ensayos de laboratorio, no solo facilita el desarrollo y validación de nuevas técnicas y teorías en SHM, sino que también proporciona un método eficiente y preciso para el monitoreo continuo de la salud estructural, contribuyendo significativamente al desarrollo y la seguridad de las infraestructuras civiles.

Asesor.

Capítulo I: Introducción

1.1. Generalidades

El monitoreo de la salud estructural SHM está evolucionando en paralelo con los avances tecnológicos, proporcionando nuevas tecnologías para el desarrollo de sensores, una de las cuales es la visión por computadora. Implementar un sistema de medición o monitoreo basado en esta tecnología evita el contacto físico entre el sensor y la estructura o modelo de laboratorio, abordando desafíos como la difícil colocación de sensores tradicionales y su necesidad de fuentes de energía y dispositivos adicionales para la adquisición de datos; esto no solo hace que su instalación sea laboriosa, sino también costosa (Feng y Feng, 2016).

Dentro del estado del arte, podemos mencionar las siguientes publicaciones:

Feng y Feng (2016) llevaron a cabo una investigación en la Universidad de Columbia, New York, que buscaba implementar un sistema de medición de desplazamientos de múltiples puntos en una sola dirección en un modelo de estructura a escala. Este modelo representaba una estructura aporricada de 3 niveles, que se encontraba sobre una mesa vibradora experimental. Propusieron un sistema de medición de desplazamientos de bajo costo y con algoritmos efectivos que no requirieran de altos tiempos de análisis computacional. Las técnicas empleadas por parte de los investigadores incluían el emparejamiento de plantillas, los subpíxeles, coincidencias de código de orientación, entre otros; mientras que su sistema de medición se basaba en una cámara de hasta ciento cincuenta fotogramas por segundo y marcadores de alto contraste. Los autores también presentaron comparaciones entre los resultados obtenidos por distintas técnicas, además de comparar resultados obtenidos tras realizar el análisis con marcadores artificiales y objetivos naturales; así mismo, procesaron las imágenes en el dominio de la frecuencia mediante transformadas de Fourier. Los autores concluyen que el sistema de visión por computador es un método robusto que podría servir como una fuerte alternativa para el monitoreo de la salud estructural. Los resultados obtenidos fueron comparados principalmente contra un sensor láser de desplazamiento. Los desplazamientos obtenidos fueron muy similares y mediante el método estadístico del error cuadrático medio normalizado NRMSE se obtuvieron errores menores a 0.5%. Este valor iba variando a medida que se

cambiaba de marcadores, obteniéndose un valor mayor de 0.72% para los objetivos naturales.

Khuc y Catbas (2016) realizaron una investigación en Florida, Estados Unidos, donde su objetivo principal fue desarrollar un sistema de medición completamente sin contacto, es decir, medir desplazamientos con una cámara, pero sin instalar marcadores a ser rastreados en una estructura. Esto se logra mediante el uso de pixeles clave como marcadores virtuales. Este sistema fue aplicado al caso de estudio de una estructura real de un estadio durante un partido de fútbol. Para esto emplearon una cámara Canon Vixia A60 capaz de grabar a 60 fotogramas por segundo, y un sensor láser de desplazamiento para poder medir la distancia de la cámara a la locación del movimiento. En su metodología, se destaca el uso de una calibración de la cámara mediante sus parámetros brindados por el fabricante, ya que ya no se cuenta con un marcador físico con el cual hacer una calibración convencional. Los resultados obtenidos por la cámara fueron corroborados con los datos obtenidos mediante herramientas clásicas como son los transformadores diferenciales de variación lineal y acelerómetros. Para obtener resultados cuantitativos se realizó comparaciones mediante el uso de coeficientes de correlación y coeficientes de determinación; en ambos casos, mientras más cercano sea el resultado a uno, más fiable es la medición realizada. Para las cuatro pruebas realizadas durante esta investigación el coeficiente de correlación ρ varió desde 0,9689 a 0,9887 y el coeficiente de determinación varió desde 0,9368 a 0,9775, todos los valores muy cercanos a uno.

Brownjohn et al. (2017) realizó una investigación en Inglaterra, donde el objetivo principal fue determinar los desplazamientos que se desarrollaban en los puentes Humer y Tamar mediante el uso de un sistema comercial de rastreo de marcadores llamado *Dynamic Monitoring Station* (DMS) junto con una cámara profesional capaz de grabar a resolución 4K para poder demostrar su potencial y limitaciones, para luego comparar los resultados contra un sistema software libre que funcionaba en conjunto con una popular cámara de uso común y relativo bajo costo. Los desplazamientos fueron evaluados a mitad de la luz del puente, donde se instaló un gran marcador visual a ser rastreado, así como también un componente de la estructura como objetivo natural; así mismo, la cámara fue ubicada en la fundación de la torre norte del puente. Para poder transformar las medidas digitales en pixeles a milímetros, se usó el método de homografía plana para calibrar la cámara. Los resultados de desplazamiento en función del tiempo

fueron comparados con un Sistema de Posicionamiento Global GPS, donde se descubrieron resultados muy similares al comparar ambas gráficas. Finalmente, desarrolla un similar procedimiento, pero con un software desarrollado por él mismo en MATLAB y una cámara GoPro, donde los resultados fueron satisfactorios concluyendo que es una buena alternativa de bajo costo mientras se cumplan ciertas condiciones de iluminación en el ambiente y de estabilidad en la cámara.

Se llevó a cabo un estudio por parte de Kromanis et al. (2019), en Estados Unidos, donde su principal objetivo fue descubrir la viabilidad de realizar mediciones de desplazamientos mediante el uso de cámaras de celulares convencionales para poder usarlo como sistema de medición de bajo costo dentro de laboratorios. Para esto, utilizó como casos de estudio ensayos estáticos, dinámicos y cuasi estáticos. Empleó celulares convencionales tales como Samsung modelos A3, S8 Y Lenovo A806, entre otros. Además, para poder corroborar los resultados utilizó una cámara profesional Sony, acelerómetros y transformadores diferenciales de variación lineal. Para evaluar la precisión de los desplazamientos, optó por comparar los resultados mediante la media cuadrática. En los ensayos estáticos comparó deflexiones desarrolladas dentro de una viga empotrada de madera cargada en un extremo. Los ensayos dinámicos consistían en la aplicación de una carga en un extremo de la viga y su posterior liberación de manera súbita, para luego medir su vibración libre y la frecuencia del movimiento, que, según los acelerómetros, la frecuencia fue de 30.64Hz, mientras que con el uso de smartphones las frecuencias variaban entre 30.59Hz y 30.63 Hz dependiendo del modelo y del software utilizado. Con estos resultados concluye que es viable su uso dentro de laboratorios.

Yoon et al. (2016) planteó una investigación cuyo objetivo fue implementar un sistema de medición de desplazamientos usando cámaras, pero sin la necesidad de implementar marcadores, además las cámaras debían de ser de bajo costo y comerciales, de tal manera que sea de fácil uso. Esta investigación se llevó a cabo en Illinois, Estados Unidos. El equipo empleado para esta investigación consistía en el uso de cámaras GoPro, capaces de brindar una resolución *Full HD* a 120 fotogramas por segundo (fps) y iPhone6, que brindan una grabación de 240fps en calidad HD. La metodología empleada para procesar imágenes consiste en rastrear las características intrínsecas de nuestro objeto en estudio mediante la estimación de flujo óptico. Además, se introduce la detección

de movimiento a nivel de subpíxeles para aumentar la precisión. El modelo ensayado correspondía a una estructura seis de pisos a escala, donde se instalaron acelerómetros con fines de corroborar los resultados. Se buscó comparar los resultados de las frecuencias naturales para cada uno de los seis modos de vibración, así como también comparar las formas estimadas de cada modo de vibración. El porcentaje de error entre las frecuencias naturales obtenidas por la cámara GoPro y los acelerómetros varió entre 0.004% y 0.205%, concluyendo de esta manera la robustez del método para el cálculo de las frecuencias naturales.

Basado en las investigaciones mencionadas, se observa que se ha estudiado la forma de implementar un sistema de medición de desplazamiento sin contacto mediante cámaras y procesamiento de imágenes, dando resultados satisfactorios. Sin embargo, estos estudios están destinados solamente a medir desplazamientos en una dirección. Así mismo, hay aún un terreno amplio de aplicaciones por explorar en el laboratorio, sobre todo aprovechando las dos direcciones de movimiento. Por ello, en la presente investigación se propone continuar el desarrollo de estos sistemas de medición y proponer nuevas aplicaciones en el laboratorio de estructuras del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID.

1.2. Descripción del problema de investigación

Para prevenir e identificar fallas en una estructura o en sus elementos estructurales de manera continua, se desarrolla una importante herramienta de diagnóstico conocida como SHM, para llevarla a cabo es necesario conocer el desplazamiento de múltiples puntos de esta a través del tiempo para poder hacer una evaluación correcta. Para conocer el desplazamiento se cuenta actualmente con una serie de instrumentos, sin embargo, se presentan ciertas limitaciones para medir directamente este y a largas distancias (Almeida Santos et al., 2015).

Actualmente, al momento de realizar un análisis sobre una estructura se utilizan sensores que necesitan estar en contacto con la estructura para poder obtener información de su aceleración. La instalación de estos sensores requiere un acceso físico a la estructura y a un punto estacionario, para luego establecer un cableado hacia dispositivos externos para la obtención de datos, que a su vez necesitan fuentes de alimentación de poder para su funcionamiento. Todo ello hace que el proceso de instalación sea del alto costo y requiera mucho tiempo de llevar a cabo, además de ser incómodo (Feng y Feng, 2018).

A pesar de que es posible obtener los registros de historia de aceleración en una estructura a partir del uso de un sensor de contacto, es necesario para fines de monitoreo de la salud estructural tener el registro de historia de desplazamientos, para esto es común usar el método de la doble integración. Sin embargo, la obtención de estos valores se produce mediante el uso de métodos numéricos que conllevan cierto error consigo mismos debido a su naturaleza aproximada y al hecho de asumir valores para las condiciones iniciales de movimiento; esto genera errores en nuestros desplazamientos finales obtenidos (Kohut et al., 2013).

En ensayos de laboratorio también se presentan problemas con los métodos de sensores que implican contacto. Cuando el espécimen es de dimensiones demasiado pequeñas en comparación con el tamaño del acelerómetro, la presencia de masa adicional en nuestro modelo puede afectar los resultados cuando realizamos un ensayo dinámico para describir los modos de vibración de nuestro espécimen (Chen et al., 2015). Un caso más específico aún, por ejemplo, es el modelado de estructuras de altamar para aguas profundas y ultra profundas usadas en la industria petrolera, que conducen hacia modelos extremadamente reducidos donde la inclusión de acelerómetros afectaría el comportamiento estructural debido a su masa. Para entender esto, si consideran construir un modelo reducido de un tubo de subida de 10" de diámetro y 1000 metros de longitud a una escala de 1/100, resultaría en un modelo de 0.1" de diámetro y 10 metros de longitud, donde claramente la inclusión de un acelerómetro afectaría a los resultados de un estudio (Jurjo et al., 2010).

Existen también dispositivos que permiten obtener desplazamientos de una estructura sin necesidad de establecer un contacto directo con ella, como es el caso del sensor láser de desplazamiento vibrómetro y del GPS. El GPS, es fácil de instalar, pero la precisión en su medida usualmente va entre los 5mm y 10mm, además su frecuencia de muestreo es limitada (menor a 20 Hz). Por otro lado, el sensor láser de desplazamiento es un instrumento de medición más preciso con una precisión entre 0.1mm hasta 0.2mm, pero los equipos suelen ser costosos y su rango de alcance suele ser menor que los 30m (Zhuang et al., 2022).

Como puede observarse, es necesario el desarrollo de un sistema de medición de desplazamientos directo, práctico, preciso, de bajo costo, que permita monitorear varios puntos en simultáneo bidireccionalmente y que no necesite tener contacto directo con el modelo. Por ello, la presente investigación plantea el

uso de cámaras de video y el posterior procesamiento de imágenes para la medición de desplazamientos de determinados puntos en una estructura o elemento estructural.

1.3. Objetivos del estudio

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de medición de desplazamientos bidimensionales sin contacto para el monitoreo de salud estructural en especímenes de laboratorio empleando la visión por computadora.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar la metodología más adecuada para ser implementada en la observación de la respuesta estructural en ensayos de laboratorio mediante el uso de la visión por computadora
- Desarrollar un algoritmo basado en la metodología seleccionada para obtener la respuesta de desplazamientos en el dominio del tiempo a través de técnicas de procesamiento de imágenes.
- Desarrollar un programa experimental mediante movimientos unidireccionales mediante puntos de control en una mesa vibradora para validar y retroalimentar el algoritmo a desarrollar para comparar los desplazamientos obtenidos mediante el procesamiento digital de imágenes contra los desplazamientos obtenidos por métodos de medición con contacto como sensor láser de desplazamiento y acelerómetro.
- Implementar en la metodología del monitoreo de la salud estructural el algoritmo desarrollado para la detección del nivel de daño en modelos estructurales de laboratorio y otras propiedades dinámicas.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Es posible el desarrollo de un sistema de medición capaz de determinar directamente los desplazamientos bidimensionales en una estructura sin la necesidad de establecer un contacto directo entre nuestro principal dispositivo de medición con la estructura.

1.4.2. Hipótesis específicas

- El procesamiento de imágenes es una herramienta que permite desarrollar algoritmos para estimar desplazamientos bidimensionales a través del tiempo de determinados puntos en nuestra estructura

- Las propiedades de video como la resolución y la cantidad de fotogramas por segundo influyen directamente en la precisión de los desplazamientos obtenidos, mientras más elevados sean estos valores se obtiene una mejor descripción de la señal.
- La irregularidad torsional puede ser analizada mediante el sistema de medición propuesto, al tener este la capacidad de medir desplazamientos en dos direcciones.
- El sistema de medición propuesto goza de una precisión robusta y sirve como alternativa para los sistemas de medición tradicionales que implicaban un contacto directo con la estructura a ser medida.

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1. Monitoreo de la salud estructural

El SHM implica la adquisición y análisis de datos de sensores instalados en estructuras, con el objetivo de evaluar su estado y detectar daños en tiempo real. Para ello, el SHM requiere de un sistema para la adquisición, almacenamiento y transmisión de datos, además de una red de sensores permanentemente instalados en la estructura. También son necesarios algoritmos diseñados para analizar los datos adquiridos y compararlos con los parámetros iniciales de la estructura (Güemes et al., 2020).

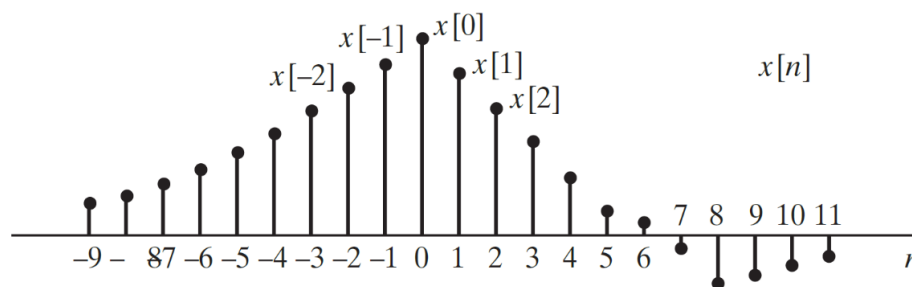
Considerando el caso de un sismo severo, el SHM puede obtener información vital sobre la respuesta de una estructura durante el evento. Además, a través de un análisis automático de esos datos, permite observar la integridad de la estructura y detectar anomalías. Esto facilita la toma de decisiones acerca de la estructura, contribuyendo a evitar pérdidas económicas y humanas (Flah et al., 2020).

El SHM puede revelar información importante sobre el estado de la estructura evidenciando pérdidas de rigidez, resistencia y cambios en los parámetros modales como frecuencias y formas de modo (Flah et al., 2020).

2.2. Señales

Figura 1

Representación de una señal en tiempo discreto $x[n]$.



Nota: Tomado de: Oppenheim y Schafer (2011)

Se entiende por señal a cualquier elemento que transmite información sobre el comportamiento o el estado de un sistema físico. Matemáticamente, estas señales se representan como funciones de una o dos variables independientes.

Por convención, en la representación matemática de una señal, la variable independiente suele ser el tiempo. Si esta variable independiente es continua, la señal se denomina analógica. En contraste, una señal con una variable independiente discreta se conoce como señal en tiempo discreto (ver Figura 1), y está definida únicamente para instantes específicos de tiempo. Además, si tanto la variable dependiente como la independiente son discretas, la señal se clasifica como digital (Oppenheim y Scheffer, 2011). Una imagen de computadora es un ejemplo de una señal digital.

2.3. Convolución y correlación

La integral de convolución entre dos funciones $x(t)$ y $h(t)$ consiste en invertir la segunda de ellas con respecto al eje de las ordenadas y posteriormente multiplicarla con la función $x(t)$. La integral indica el área bajo esta función producto obtenida y, finalmente todos los puntos pertenecientes a la función resultado $y(t)$ se obtienen al realizar la misma operación mientras se traslada la función $h(t)$ a lo largo del eje de las abscisas (Brigham, 1988).

La convolución de dos funciones viene dada por la siguiente integral:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau) d\tau = (x * h)(t) \quad (2.1)$$

Esta fórmula expresada para dos funciones discretas adopta la siguiente forma:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cdot h[n - k] \quad (2.2)$$

Donde, N es la cantidad de elementos de la función $x[k]$.

Una integral similar con diversas aplicaciones en la teoría y la práctica es la integral de correlación, definida mediante la siguiente expresión:

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t + \tau) d\tau = (x \otimes h)(t) \quad (2.3)$$

Cuya forma discreta es:

$$z[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cdot h[n + k] \quad (2.4)$$

Donde, nuevamente N es la cantidad de elementos de la función $x[k]$.

Ambas integrales son muy similares, siendo la diferencia que la correlación no invierte la segunda función con respecto al eje y- (Brigham, 1988). Las formas discretas de ambas operaciones consideran que las funciones están definidas

para todos los valores necesarios del dominio, completando con cero los valores faltantes para llevar a cabo la operación.

2.4. Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier de una función $f(t)$ es la función $F(\omega)$, obtenida de la siguiente integral denotada por:

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.5)$$

Mientras que la operación inversa, empleada para obtener $f(t)$ cuando $F(\omega)$ es dato se representa mediante el símbolo \mathcal{F}^{-1} y se denota mediante la siguiente integral:

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} dt \quad (2.6)$$

Ambas expresiones (2.5) y (2.6) se conocen como par de Transformadas de Fourier (Espinoza, 2008).

En una interpretación sencilla, la Transformada de Fourier permite descomponer una señal en la suma de funciones sinusoidales de diversas frecuencias, cada una con su propia amplitud. De esta manera, es posible distinguir las diversas frecuencias que componen una señal particular. Por lo tanto, la representación de una señal o función en el dominio de la frecuencia se conoce como transformada de Fourier (Brigham, 1988).

2.4.1. Transformada discreta de Fourier

La Transformada Discreta de Fourier (DFT) es una versión de la Transformada de Fourier aplicable a señales funciones discretas, como es el caso de las señales muestreadas. Tiene un rol importante en la física y en el procesamiento de señales, ya que es una herramienta matemática que permite describir la relación entre la representación de una señal discreta en los dominios del tiempo y la frecuencia (Nussbaumer, 1982).

La DFT es ampliamente utilizada hoy en día debido a la aparición de eficientes algoritmos que permiten reducir la cantidad de operaciones necesarias para llevarla a cabo, reduciendo así el coste computacional (Nussbaumer, 1982).

2.4.2. Transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo eficiente para calcular la DFT y su inversa, desarrollado en el año 1965 por Cooley y Tukey. La FFT reduce significativamente el esfuerzo computacional necesario para calcular la DFT, reduciendo el número de operaciones aritméticas necesarias de N^2 a $N \log N$.

$\log N$, siendo N el número de muestras de la señal. Esto lo logra del hecho que el cálculo de coeficientes de la DFT puede ser llevado a cabo iterativamente (Cochran et al., 1967).

Debido a la eficiencia del algoritmo, la FFT es ampliamente utilizada para análisis de espectros, procesamiento digital de imágenes, análisis convolucionales, entre otros (Cochran et al., 1967).

2.4.3. Límite de Nyquist

Cuando se muestrea una señal analógica y se obtiene que la frecuencia más alta en el espectro de Fourier es B , la frecuencia que se usa para discretizar la señal debe ser mayor que el doble de B . La frecuencia de muestreo de Nyquist, también conocida como límite de Nyquist, es la frecuencia de muestreo de dos veces B (Proakis y Manolakis, 1966).

Este requisito es indispensable para garantizar que la señal discretizada pueda ser correctamente recuperada evitando distorsiones por solapamiento (conocida también como "aliasing") que se produce cuando se muestrean frecuencias más altas que la mitad de la frecuencia de muestreo y que puede producir que las señales se conviertan irreconocibles una vez muestreadas (Oppenheim y Schafer, 2011) Este principio es fundamental en el diseño de sistemas de procesamiento de señales digitales para asegurar una representación adecuada de la señal de forma discreta

Por citar un ejemplo, si la frecuencia de nuestra señal es 10 Hz, entonces, como mínimo, la señal debe ser muestreada con una frecuencia de muestreo mayor a 20 Hz para obtener una correcta reconstrucción, caso contrario la señal será irrecuperable y en su lugar nos dará una "señal alias" de distinta frecuencia (ver Figura 2). En la Figura 3 se observa la misma señal, pero muestreada a 21 Hz, que es mayor que su frecuencia de Nyquist de 20 Hz, permitiendo así recuperar información de la frecuencia de la señal al momento de reconstruirla, sin embargo, para obtener una mejor descripción de la forma y detalles de la señal, muchas veces es necesario muestrear la señal a una frecuencia mucho mayor que el límite de Nyquist para obtener una correcta descripción de la forma de la señal (Figura 4).

2.4.4. Aplicaciones de las transformadas de Fourier.

Las Transformadas de Fourier tienen múltiples aplicaciones en una gran variedad de áreas, tales como procesamiento de señales, procesamiento digital de imágenes, análisis mecánicos, análisis geofísicos, entre otros (Brigham ,1988).

En el procesamiento de señales, es importante debido a que nos permite analizar las frecuencias que componen una señal, permitiendo reconocer la frecuencia predominante de una señal, que, en el caso de la Ingeniería Civil, puede representar la respuesta de una estructura o del suelo ante una carga dinámica (ver Figura 5).

Figura 2

Señal muestreada a una frecuencia menor o igual que la de Nyquist

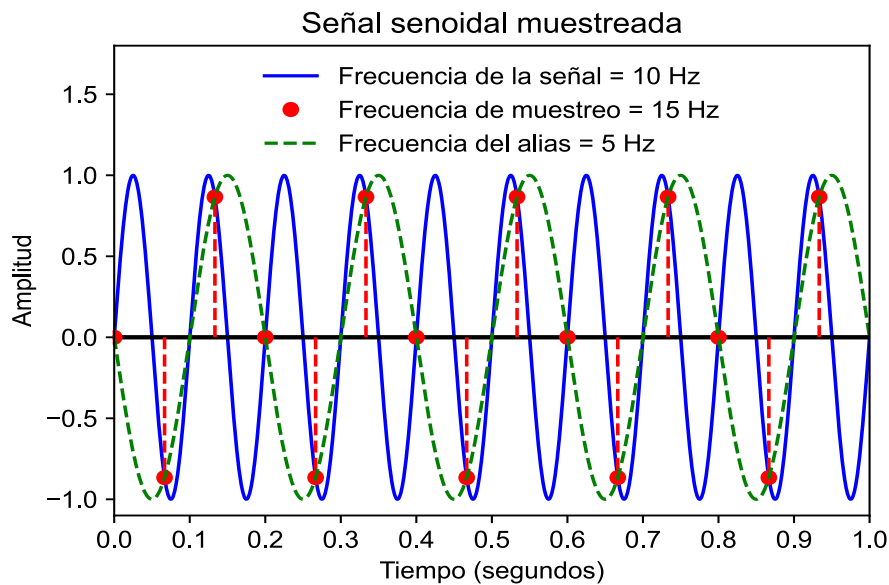


Figura 3

Señal muestreada a una frecuencia mayor que la de Nyquist.

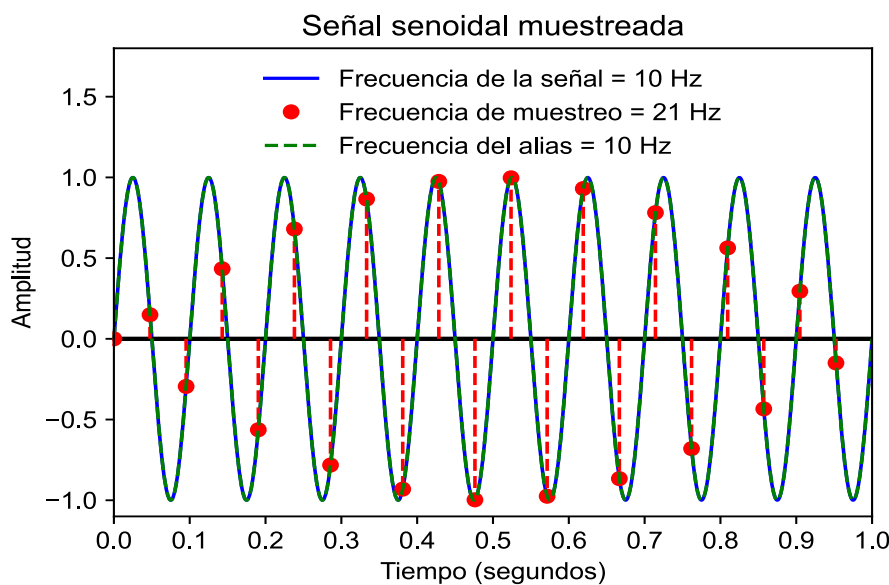


Figura 4

Señal muestreada a una frecuencia de diez veces la de Nyquist.

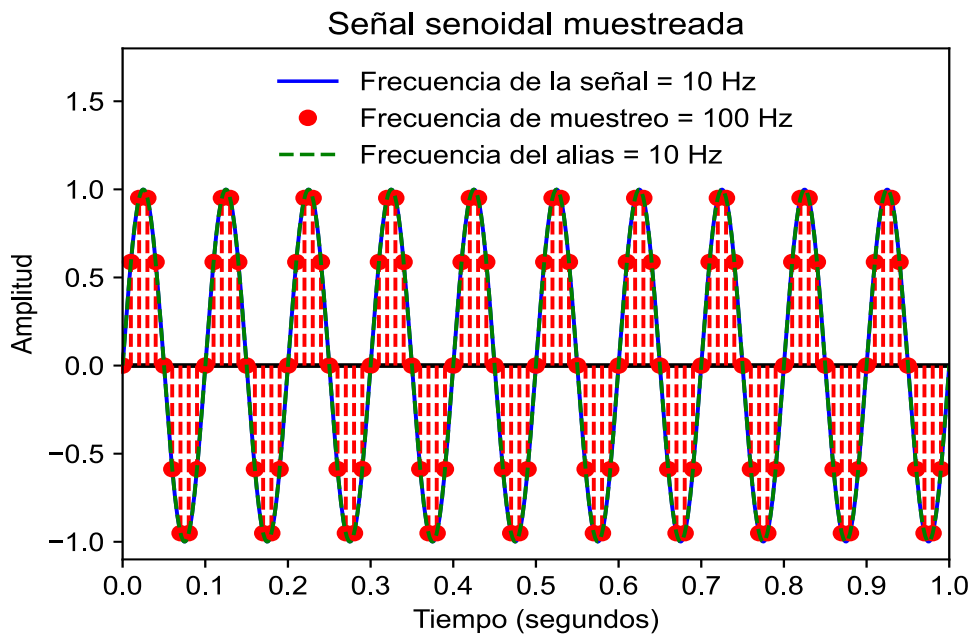
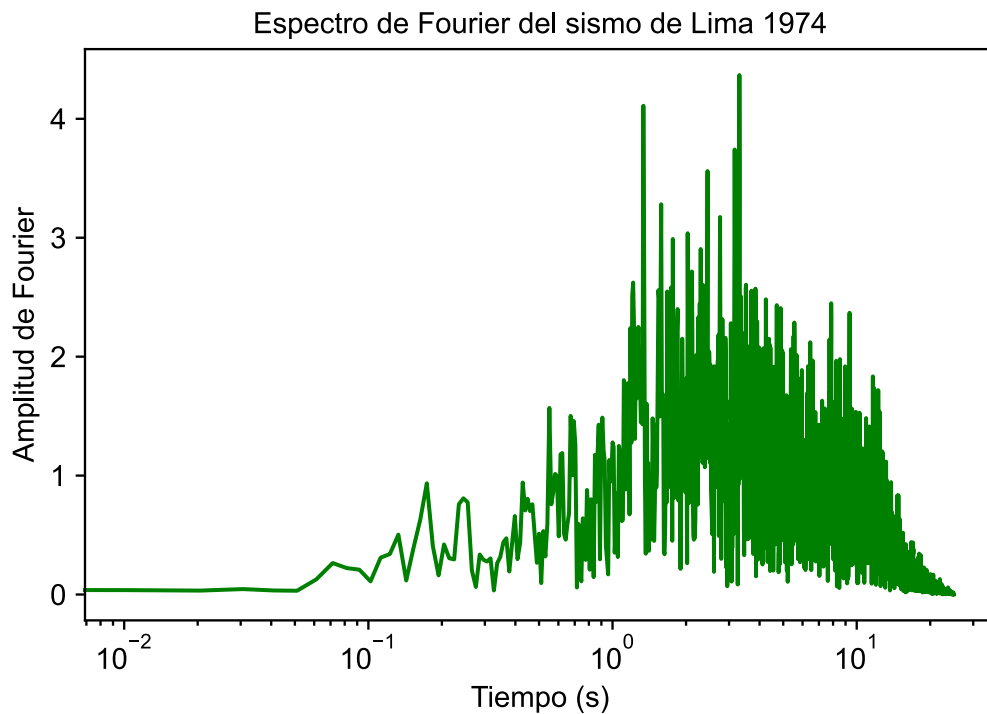


Figura 5

Espectro de Fourier de un acelerograma en el sismo de Lima 1974.



Nota: Estación Parque de la Reserva.

2.5. Remuestreo de señales

El proceso de convertir una señal muestreada a una cierta frecuencia de muestreo hacia una diferente frecuencia de muestreo ya sea mayor (interpolación) o menor (decimación), se le conoce como remuestreo de señal. Este proceso tiene muchas aplicaciones prácticas en el procesamiento de señales digitales, como es el caso del área de las telecomunicaciones (Proakis y Manolakis, 1966). También es de mucha utilidad al momento de querer comparar señales.

El remuestreo de señales puede ser llevado a cabo a través de dos métodos generales. El primero de ellos es pasar la señal digital a través de un convertidor digital-analógico, filtrar la señal y volver a muestrearla con la frecuencia deseada. Este método presenta la desventaja de incluir una distorsión en la señal debido al convertidor digital-analógico y los posteriores efectos de cuantización de los convertidores analógico-digital. El segundo método consiste en llevar a cabo el remuestreo completamente dentro del dominio digital. Este método evita las desventajas anteriormente mencionadas para el primer método (Proakis y Manolakis, 1966).

2.5.1. Decimación

Es un proceso de reducción de la frecuencia de muestreo de una señal digital. Sea D , el número entero por el cual se va a decimar la señal $x[t]$, la frecuencia de muestreo se reduce por ese factor. La decimación involucra dos pasos principales.

El primer paso es filtrar la señal por un filtro de paso-bajo. La señal original, muestreada a una frecuencia de muestreo F_{x1} , tiene un contenido de frecuencias donde la frecuencia más alta dentro de su espectro es F , que cumple con la condición (debido a Nyquist) de $|F| < \frac{F_{x1}}{2}$. Si la frecuencia de muestreo es reducida simplemente por el factor D , la señal reducida será un alias de la señal deseada, puesto que la nueva frecuencia de muestreo $\frac{F_{x1}}{D}$ tolera una máxima frecuencia en la señal de $\frac{F_{x1}}{2D}$, por lo que la señal original debe de estar limitada a un ancho de banda donde $|F| < \frac{F_{x1}}{2D}$, para de esa forma evitar el aliasing en la decimación. El resultado de filtrar la señal $x[t]$ por el filtro de paso-bajo es la señal $v[t]$

Luego de filtrar la señal por un filtro paso-bajo, la señal se submuestra. La señal resultante del paso anterior $v[t]$ es modificada de tal manera que solo se toma cada valor avanzando de D en D , dando como resultado la señal remuestreada $y[t]$, como se muestra en la ecuación 2.9.

$$y(m) = v(mD) \quad (2.7)$$

2.5.2. Interpolación

De acuerdo con Crochiere et al. (1983), es el proceso de aumento de la frecuencia de muestreo de una señal digital. Aumentar la frecuencia de muestreo por un factor I , siendo I entero, implica interpolar $I-1$ nuevas muestras entre dos datos consecutivos de la señal. El proceso de expansión de la frecuencia puede ser definido mediante la siguiente ecuación:

$$w(m) = \begin{cases} x\left(\left[\frac{m}{I}\right]\right), & m = 0, \pm I, \pm 2I, \dots \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.8)$$

El proceso de aumentar la cantidad de muestras genera en el espectro de frecuencias copias o imágenes de la banda de frecuencias original en múltiplos de las frecuencias de muestreo original. Por ese motivo es importante filtrar la señal $w(m)$ mediante un filtro de paso bajo que aproxime a la característica ideal. Este filtro puede ser definido de la siguiente forma:

$$\mathcal{F}[w(m)] = \begin{cases} G, & |\omega'| \leq \frac{\pi}{I} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.9)$$

Siendo G la amplitud de la frecuencia.

Los valores con los que serán reemplazado los ceros insertados pueden ser obtenidos mediante el método de interpolación que sea más conveniente.

Tanto la interpolación como la decimación pueden ser llevadas a cabo cuando los factores de remuestreo son números racionales. Para ellos, los dos procesos anteriormente descritos deben ser llevados a cabo uno tras de otro, primero incrementando la frecuencia de muestreo por I , para después disminuirlo por D .

2.6. Procesamiento de señales

Es la disciplina encargada de estudiar el comportamiento de las señales discretas en general. Es también la encargada de procesar las señales analógicas para que puedan ser estas tratadas como discretas, en otras palabras, discretizan las señales continuas para poder aplicar sobre ellas las herramientas de procesamiento desarrolladas. Estas técnicas de procesamiento tienen el objetivo de preparar la señal para que información de interés pueda ser extraída de ellas. (Diniz et al., 2010).

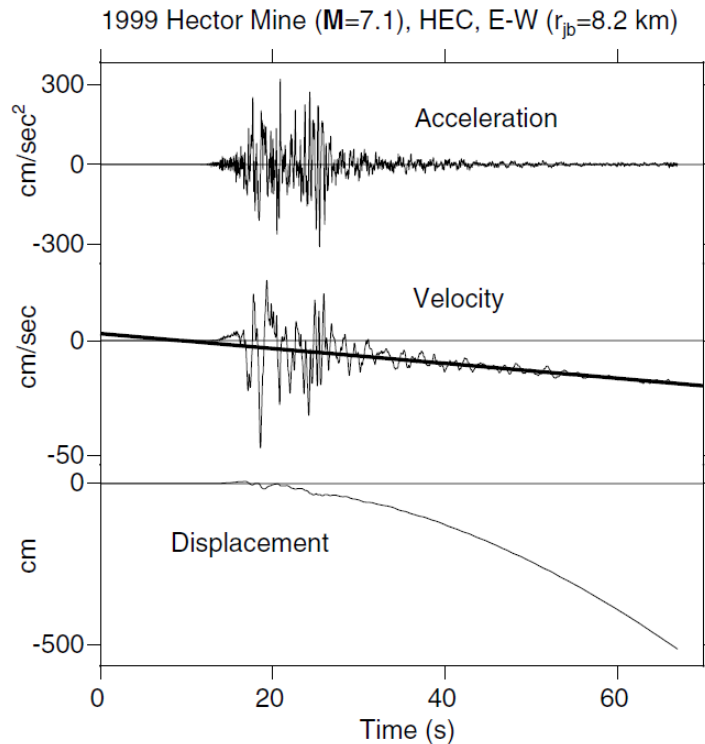
2.6.1. Corrección por línea base

Los instrumentos de medición que registran señales muy a menudo se ven afectados por desfases de su línea base, que vendrían a ser desplazamientos o

distorsiones desde su nivel de referencia de movimiento o línea cero (Boore et al., 2002).

Figura 6

Error de línea base en el acelerograma del terremoto Hector Mine de California 1999 (M. 7.1 Mw)



Nota: Tomado de: Boore et al. (2002)

En el caso de los acelerogramas, los errores por línea base son muchas veces poco perceptibles, pero cuando se pretende calcular la velocidad y el desplazamiento a partir de integraciones numéricas sobre el registro de aceleración, estos errores se vuelven muy importantes puesto que se van acumulando en cada suma (Figura 6). Estos desfases de línea base pueden tener su origen en distintas causas, como por ejemplo que el instrumento no esté perfectamente nivelado en su emplazamiento, o porque sea el mismo sistema de registro sea el responsable de provocar un desplazamiento de la información obtenida con respecto a la línea cero (Carreño et al., 1999).

Existen diversos métodos para corregir un registro por línea base. Entre ellos, y el utilizado posteriormente en esta investigación es la corrección de línea base por ventanas de Parzen, que es una herramienta de suavizado que puede ser utilizada en el procesamiento de registros sísmicos (Karagoz et al., 2017)

2.6.2. Filtrado de frecuencias

En la presente investigación, el método utilizado para filtrar la frecuencia es hacer un recorte de las frecuencias que nos interesan en el espectro de Fourier, haciendo cero las amplitudes de las frecuencias que no son de interés y aplicando la IFT.

2.6.3. Doble integración para el cálculo de desplazamientos.

Es más sencillo medir las aceleraciones que los desplazamientos. Sin embargo, es necesario para ciertos fines obtener la respuesta de desplazamientos de una estructura. Los desplazamientos pueden ser obtenidos a través de dos integraciones sucesivas de los valores de aceleración, esto se lleva a cabo mediante la aplicación de métodos numéricos. Estos métodos numéricos conllevan un error en su cálculo, debido a la naturaleza aproximada de los mismos, y debido a que, generalmente, consideran las condiciones iniciales de movimiento como cero (Pan et al., 2016).

Antes de obtener los desplazamientos por doble integración es necesario filtrar la señal a un intervalo de frecuencias adecuado y eliminar cualquier distorsión de la línea base, como se refiere en secciones anteriores, para evitar lo más posible los errores numéricos.

El proceso de doble integración puede ser llevado a cabo a través de los métodos propuestos por Shibata (2010) como el método de aceleraciones lineales y el método de aceleración promedio.

El método de aceleraciones lineales considera que la aceleración \ddot{y}_n varía de forma lineal durante un pequeño intervalo de tiempo Δt (ver Figura 7). Siendo $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ la aceleración queda definida mediante la siguiente expresión:

$$\ddot{y}(t) = \ddot{y}_n + \frac{\ddot{y}_{n+1} - \ddot{y}_n}{\Delta t} \cdot (t - t_n) \quad (2.10)$$

Al integrar la expresión 2.9, se obtiene la velocidad:

$$\dot{y}(t) = \dot{y}_n + \int_{t_n}^t \ddot{y}(t) dt \quad (2.11)$$

Que al ser desarrollada resulta:

$$\dot{y}(t) = \dot{y}_n + \ddot{y}_n(t - t_n) + \frac{1}{2} \frac{\ddot{y}_{n+1} - \ddot{y}_n}{\Delta t} \cdot (t - t_n)^2 \quad (2.12)$$

Al integrar la expresión 2.10, se obtiene ahora el desplazamiento:

$$y(t) = y_n + \int_{t_n}^t \dot{y}(t) dt \quad (2.13)$$

Que al desarrollarse la integral se expresa como:

$$y(t) = y_n + \dot{y}_n(t - t_n) + \frac{1}{2}\ddot{y}_n(t - t_n)^2 + \frac{1}{6}\frac{\ddot{y}_{n+1} - \ddot{y}_n}{\Delta t} \cdot (t - t_n)^3 \quad (2.14)$$

El método de aceleración promedio considera que durante el intervalo de tiempo Δt la aceleración es constante e igual al promedio de las aceleraciones en los instantes de tiempo t_n y t_{n+1} (ver Figura 2.7b).

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{2}(\ddot{y}_n + \ddot{y}_{n+1}) = \text{constante} \quad (2.15)$$

Integrando sucesivamente como en el caso de la aceleración lineal, las siguientes expresiones son obtenidas para la velocidad y el desplazamiento:

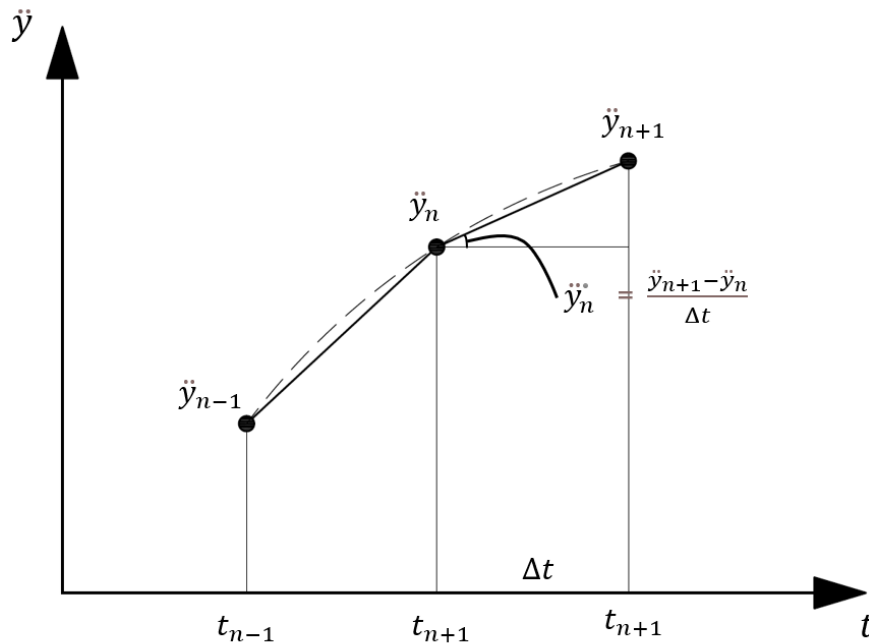
$$\dot{y}(t) = \frac{1}{2}(\ddot{y}_n + \ddot{y}_{n+1})t + \dot{y}_n \quad (2.16)$$

$$y(t) = \frac{1}{4}(\ddot{y}_n + \ddot{y}_{n+1})t^2 + \dot{y}_n t + y_n \quad (2.17)$$

Al iniciar la doble integración se considera que las condiciones iniciales de movimiento son $\dot{y}_0 = 0$ y $y_0 = 0$.

Figura 7

Aceleración que varía linealmente entre cada punto.



Nota: tomado de Shibata (2010)

2.7. Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes es el proceso de operar sobre imágenes aplicando un número de algoritmos computacionales, con el objetivo de

obtener otras imágenes o extraer un conjunto de características representativas, propiedades u otros detalles de la imagen original (Zhou et al., 2010).

2.7.1. Imagen digital

Una imagen digital puede ser definida como una función de dos variables $f(x,y)$ siendo x - y y - las coordenadas de un cierto punto, y el valor de $f(x,y)$ es la intensidad de nivel de gris en ese mismo punto. Además de esto debe cumplirse que tanto x -, y - y los valores de intensidad de la función deben de ser cantidades discretas y a su vez finitas (Gonzales y Woods, 2017).

Las imágenes son obtenidas a través de sensores. Estos sensores generan datos de tipo continuo a través de ondas en forma de voltaje. Entonces para crear una imagen digital a partir de estas señales continuas, se debe recurrir a una transformación de un medio continuo hacia un medio discreto. Esto se logra muestreando la función continua en coordenadas y cuantificando las amplitudes. A partir de estos valores la calidad de una imagen digital puede ser ponderada: mientras mayor sea la cantidad de muestras tomadas y mientras mayor sea la cantidad de niveles de intensidad usados para la cuantificación, mayor será la calidad de la imagen (Gonzales y Woods, 2017).

2.7.2. Píxeles

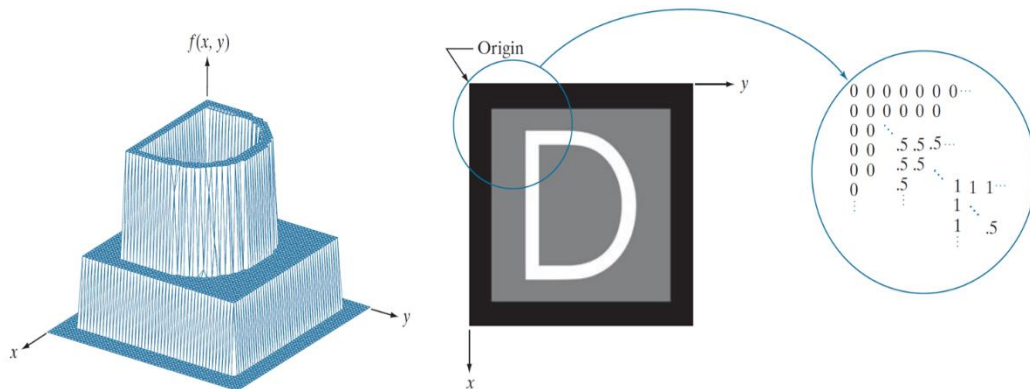
De acuerdo con lo anterior, una imagen digital es representada mediante una cantidad finita de muestras discretas donde a cada muestra le corresponde un valor de intensidad también discreto y finito. Digitalmente, una imagen puede ser representada por medio de una matriz de M filas y N columnas donde a cada elemento de esta matriz le corresponde un valor numérico real y cada uno de estos elementos que tienen una posición única dentro del arreglo se les conoce como píxeles (Gonzales y Woods, 2017).

Por convención, se define el origen de la imagen digital en la esquina superior izquierda, y se comienza a contar los píxeles desde el 0 hasta el $M-1$ y $N-1$ en las filas y en las columnas, respectivamente (Figura 8). No existe limitación para los valores de M y N más allá de que estos necesariamente deben de ser enteros y positivos. Sin embargo, debido a consideraciones de almacenamiento digital y debido al hardware de cuantificación, se necesita que el número de niveles de intensidad, denotado por L , sea una potencia entera de dos, donde nuevamente los valores posibles comienzan a contarse desde 0 hasta $L-1$, donde los valores deben de ser enteros. Debido a ciertas consideraciones, convencionalmente se utilizan 256 niveles de intensidad, contadas desde 0 hasta

255, siendo 0 el color negro y 255 el color blanco. Esto se conoce como imagen de 8 bits, puesto que se discretiza la intensidad con una potencia de 2^8 (Gonzales y Woods, 2017).

Figura 8

Imagen representada como superficie, como imagen y como matriz.



Nota: Tomado de Gonzales y Woods (2017).

2.7.3. Imágenes a color

Las imágenes a color son formadas en el espacio multiespectral RGB (rojo, verde y azul, por sus siglas en inglés), por lo que cada píxel en estas imágenes puede ser representado como un vector de 3 elementos, donde cada componente representa la intensidad de rojo, verde y azul respectivamente. Una imagen de tamaño $M \times N$ puede ser representada entonces como la composición de tres imágenes en rojo, verde y azul, del mismo tamaño. Por lo tanto, una imagen a color es considerada una imagen multiespectral (Gonzales y Woods, 2017)

Al igual que en el caso de las imágenes en blanco y negro, los niveles de intensidad de píxel van desde 0 a 255 en sus tres canales. El color de un píxel se forma a partir de la combinación de los valores de la intensidad de sus tres canales, como se puede observar en la Figura 9.

Es conveniente para muchas aplicaciones del procesamiento digital de imágenes trabajar con las imágenes a una escala de grises, esto debido a que una imagen a blanco y negro simplifica notoriamente la cantidad de información con la que trabajar, pero mantiene la información más importante, tales como bordes, regiones, manchas, uniones, etc. (Solomon y Breckon, 2010)

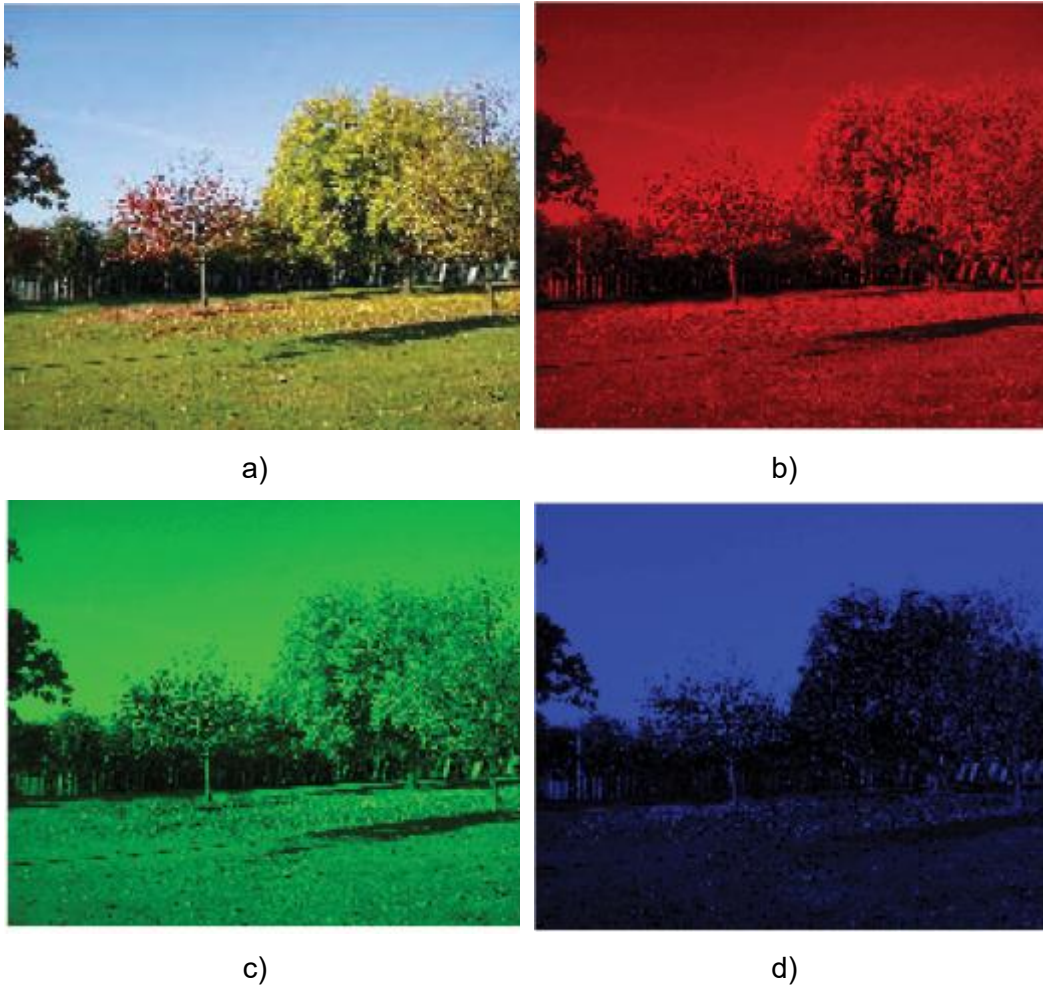
Una imagen a color RGB puede transformarse a una imagen en escala de grises usando la siguiente fórmula:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (2.18)$$

Siendo Y, el valor de intensidad de píxel en escala de grises, mientras que R, G y B los valores de intensidad en rojo, verde y azul, respectivamente. Los coeficientes son establecidos en proporción de la respuesta del ojo humano ante cada color. Esta ponderación es la convencional (Solomon y Breckon, 2010).

Figura 9

Imagen RGB junto con sus componentes R, G y B.



Nota: a) Imagen RGB, b) Componente R, c) Componente G, d) Componente B.
Tomado de: Zhou et al. (2010).

También es posible utilizar otra escala de colores para representarlos, conocida como HSV (*Hue, saturation, value*). La escala HSV describe colores en términos de sus características distintivas que son el tono, saturación y valor, que son características más fáciles de percibir por el humano al variar alguno de sus valores, a diferencia del RGB, lo que convierte a esta escala más adecuada para tareas de edición de imágenes y elección de colores. Además, en la visión por

computadora, HSV puede ser más efectivo para la segmentación de colores y el seguimiento de objetos, debido a su menor sensibilidad a las variaciones de iluminación (Shamoi et al., 2022). En el HSV, el tono se representa como el ángulo en un círculo cromático yendo desde 0° a 360°, mientras que la saturación y el valor se miden usualmente de 0 a 100%.

2.7.4. Aplicaciones del procesamiento de imágenes

El procesamiento digital de imágenes, como herramienta para extraer información, tiene diversas aplicaciones, entre ellas la detección de bordes y detección de contornos, que se basa en la detección zonas con cambios significativos en la intensidad de píxeles continuos; la detección de objetos, que a menudo utiliza las redes neuronales; ubicación y reconocimiento de píxeles clave, que son píxeles significativos para posteriores análisis como esquinas o puntos de interés específicos; filtrado de imágenes, que incluye técnicas para mejorar la calidad de la imagen, entre otras aplicaciones.

2.8. Cámara digital

El proceso de adquisición de imágenes se logra a través de las cámaras, que son dispositivos diseñados con un sensor que captura la luz y las transforma en señales eléctricas. Estas señales, luego son digitalizadas en secuencias de números para que puedan ser procesados por un computador o por el procesador interno de la cámara (Jähne, 2005).

2.8.1. Sensores de cámara

Hay muchos tipos de sensores. En general, esto están conformados por un gran número de elementos fotosensibles y semiconductores, donde cada elemento recolecta energía eléctrica, que es generada por la absorción de fotones durante la fase de acumulación. Entre los más comunes y comerciales de este tipo se encuentran el CCD (dispositivo de carga acoplada) y el CMOS (semiconductor de óxido de metal complementario (Jähne, 2005).

2.8.2. Acercamiento (zoom)

Existen dos tipos de *zoom* utilizados en las cámaras: el *zoom* óptico y el *zoom* digital. Entre ellos, el *zoom* óptico es el que permite acercarse o alejarse de una imagen sin perder la calidad, puesto que se obtiene a partir de un cambio en la distancia focal de la cámara. Mientras tanto, el *zoom* digital es una tecnología que interpola los píxeles para acercarse a un objetivo deseado, ocasionando así una degradación de la calidad de imagen en la mayoría de los casos. Actualmente, casi todas las cámaras comerciales cuentan con ambos tipos de *zoom*, usando el

zoom digital cuando el usuario alcanza los límites del *zoom* óptico, sin embargo, esta característica puede ser desactivada en casi todos los modelos (Langford et al., 2010).

2.8.3. Fotogramas por segundo (fps)

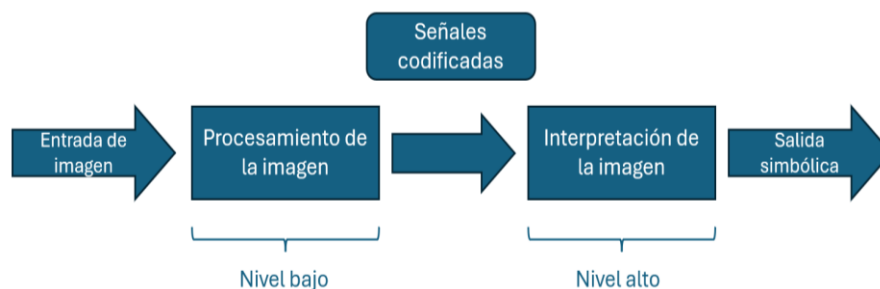
Los fotogramas por segundo, o fps es la cantidad de imágenes consecutivas que se capturan o se muestran en un segundo de video. Un mayor número de fps permite capturar el movimiento más suavemente y llega a ser esencial para situaciones donde se debe capturar a detalle el movimiento rápido. Comúnmente, los estándares son 24 fps para cine, 30 fps para televisión y hasta 60 fps a más para videos de alta velocidad (Brown, 2012). Existen también cámaras de fácil adquisición en el mercado que permiten grabar a 120 fps, 240fps y 480 fps, que son generalmente usados para capturar videos en cámara lenta de movimientos rápidos como en los deportes.

2.9. Visión por computador

La visión por computador, en principio, analiza las imágenes con el objetivo de lograr interpretaciones similares a las hechas por el ser humano. Un modelo de sistema de visión por computador puede ser simplificado como se muestra en la Figura 10 donde se distinguen dos principales etapas. La primera etapa es el procesamiento digital de imágenes, mientras que la segunda es la interpretación de las imágenes procesadas, que describe el contenido de datos de la imagen. Generalmente, este proceso viene acompañado de una retroalimentación desde la etapa de interpretación hacia la etapa de procesamiento, o desde el nivel más alto hacia el más bajo (Levine, 1985).

Figura 10

Paradigma de visión por computador



Nota: Adaptado de Levine (1985)

La visión por computador presenta muchas aplicaciones, entre ellas se encuentran el procesamiento de imágenes en biomedicina, la teledetección, la automatización industrial, reconocimiento facial, reconocimiento de caracteres

manuscritos, entre otros (Levine, 1985). En la ingeniería civil suele ser usada, además del uso dado en esta presente investigación, en la detección de grietas en estructuras de concreto, en pavimentos, en estructuras de acero; también en detección de oxido en estructuras de acero, estimación del tráfico humano y vehicular sobre carreteras, y continuamente se desarrollan nuevas aplicaciones (Dong y Catbas, 2020).

2.10. Dinámica estructural

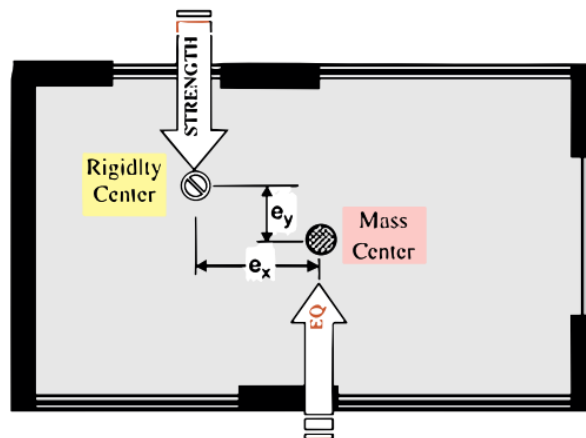
2.10.1. Irregularidad torsional

Esta irregularidad suele ocurrir cuando la rigidez de una estructura no está uniformemente distribuida, generándose una respuesta asimétrica de la estructura antes una carga lateral.

De acuerdo con la norma técnica peruana NTE E.030 (2018), la irregularidad torsional está presente cuando el máximo desplazamiento relativo de entrepiso en un extremo del edificio es mayor que 1.3 veces el desplazamiento relativo del centro de masas del entrepiso para una misma condición de carga. Además, considera que para los cálculos debe de ser considerada una excentricidad accidental (ver Figura 11). La norma también considera una irregularidad torsional extrema, cuando el máximo desplazamiento relativo de entrepiso excede un valor de 1.5 veces el desplazamiento relativo del centro de masas. La norma indica que la irregularidad torsional puede ser calculada solo en aquellos casos donde la deriva máxima del centro de masas (CM) es mayor que el 50% de la deriva máxima permitida para dicha estructura.

Figura 11

Irregularidad torsional en planta



Nota: Tomado de Gokdemir et al (2013)

El cociente entre el máximo desplazamiento relativo de una esquina en un entrepiso sobre el desplazamiento del CM puede ser definido como el grado de irregularidad G_{it} torsional expresado en la Ecuación 2.19 (Ortiz,2019).

$$G_{it} = \frac{\Delta_{max,nodo}}{\Delta_{CM}} \quad (2.19)$$

Donde $\Delta_{max,nodo}$ es el máximo desplazamiento de un nudo del diafragma y Δ_{CM} es el desplazamiento del CM

2.10.2. Irregularidad de rigidez (Piso blando)

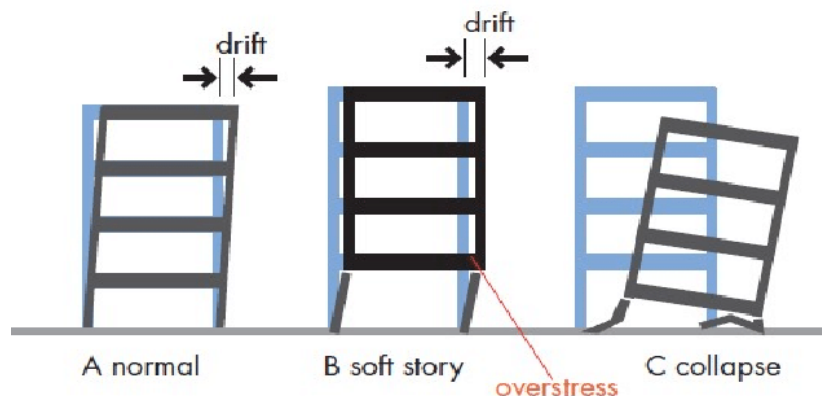
Este tipo de irregularidad en altura indica que un nivel de entrepiso es significativamente menos rígido que otros, generando así una concentración de deformaciones y esfuerzos en el piso blando durante la aplicación de una fuerza lateral, aumentando así el riesgo de colapso (Figura 12).

De acuerdo con la NTE E.030-2018 existe irregularidad de rigidez cuando, en cualquiera de las direcciones de análisis, en un entrepiso la rigidez lateral es menor que 70% de la rigidez lateral del entrepiso inmediato superior, o es menor que 80% de la rigidez lateral promedio de los tres niveles superiores adyacentes.

La norma también considera una irregularidad extrema de rigidez cuando, en cualquiera de las direcciones de análisis, en un entrepiso la rigidez lateral es menor que 60% de la rigidez lateral del entrepiso inmediato superior, o es menor que 70% de la rigidez lateral promedio de los tres niveles superiores adyacentes.

Figura 12

Formación de rótulas y colapso de edificios con piso blando.



Nota: Tomado de Jayarajan (2019)

2.10.3. Frecuencia de resonancia

En un movimiento armónico no amortiguado, cuando la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural del sistema, se produce un movimiento en el cual, el factor de amplificación dinámica tiende al infinito. Esto

se traduciría a un comportamiento del sistema en el cual la amplitud de movimiento aumenta de manera indefinida. La frecuencia de excitación a la cual ocurre este fenómeno se conoce como frecuencia de resonancia, y para el caso de un sistema no amortiguado, coincide con la frecuencia natural del sistema (Chopra, 2014).

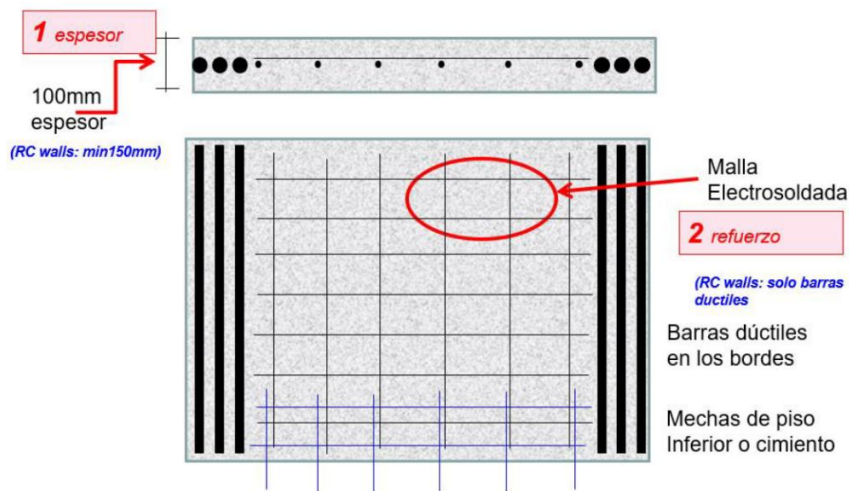
Para la ingeniería estructural, es importante que la frecuencia natural del sistema difiera de la frecuencia predominante del suelo, ya que el fenómeno de resonancia produciría una amplificación indeseable de las respuestas de la estructura.

2.10.4. Muros de ductilidad limitada

Los muros de ductilidad limitada son muros de concreto armado de poco espesor (aprox. 10 cm) donde el refuerzo longitudinal se dispone generalmente en una sola capa (ver Figura 13). Estos muros, prescinden de elementos confinados en sus extremos; además, el refuerzo vertical y horizontal en el alma del muro puede estar por acero de grado 60 o malla electrosoldada (Díaz, 2021).

Figura 13

Configuración típica del refuerzo en muros de ductilidad limitada.



Nota: Tomado de Zavala et al. (2013)

Un sistema estructural conformado por muros de ductilidad limitada goza de adecuada rigidez y resistencia, debido a la alta densidad de muros, pero posee menor ductilidad que un sistema de muros de concreto armado convencional, por lo que esto se traduce en una baja capacidad de deformación en el rango inelástico, lo cual es importante debido a que como no es técnicamente eficiente garantizar que las estructuras no sufran daños ante cualquier sismo, se necesita diseñar bajo un mecanismo adecuado de falla, como es la falla dúctil (Zavala et al, 2013).

La NTE E.030-2018 establece que los edificios que posean este sistema estructural deben tener un máximo de 8 pisos, así mismo, asigna un coeficiente básico de reducción de valor 4.

2.10.5. Análisis dinámico incremental

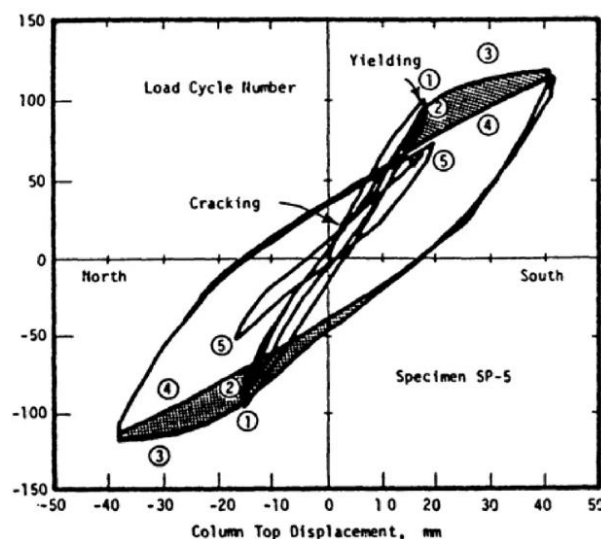
El análisis dinámico incremental (IDA) es un método de análisis que tiene el objetivo de estimar más a fondo el rendimiento estructural bajo cargas sísmicas. Consiste en someter una estructura o modelo estructural a registros sísmicos en el suelo, escalados a distintos niveles de intensidad, produciendo así curvas de respuesta de la estructura para cada nivel de intensidad (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

2.10.6. Curvas de histéresis y curvas de capacidad

Las curvas de histéresis representan la relación entre la fuerza y la deformación de un material o componente estructural bajo condiciones de carga cíclica donde ocurren cargas y descargas (ver Figura 14). Los ciclos de histéresis para una estructura que está comportándose dentro del rango inelástico, revelan información importante sobre la capacidad de disipación de energía del sistema, puesto que el área que encierra un ciclo de histéresis es la energía disipada durante un ciclo de deformación. Las curvas de histéresis también revelan información acerca de la rigidez, la resistencia y los cambios de estas a lo largo de los consecutivos ciclos de carga y descarga (Chopra, 2014).

Figura 14

Curvas de histéresis para un elemento estructural de acero en comportamiento inelástico.



Nota: Tomado de Otani (1981)

Las curvas de capacidad representan la capacidad máxima de una estructura para resistir cargas laterales. Estas curvas son utilizadas para evaluar la resistencia y ductilidad de la estructura y son fundamentales para el diseño basado en desempeño. Permiten determinar cómo y cuándo una estructura podría fallar bajo cargas sísmicas, proporcionando una base para optimizar el diseño y mejorar la seguridad sísmica.

Capítulo III: Desarrollo del algoritmo

3.1. Visión por computadora para el seguimiento de puntos

En el estado del arte de la visión por computadora se puede encontrar una considerable cantidad de algoritmos y metodologías ya establecidas que sirven como herramienta para brindar solución a problemáticas específicas. Cada algoritmo, sin embargo, presenta pros y contras para el uso de ellos en esta investigación, es por eso que los algoritmos deben ser estudiados, adaptados y modificados para resolver los objetivos específicos, así como también deben de ser introducidos dentro de códigos de programación, que permitan desarrollar un software que pueda ser utilizado por los usuarios de forma sencilla e intuitiva, como parte de un sistema de medición cuya función será medir desplazamientos a un nivel de precisión adecuado tal que permita el monitoreo de la salud estructural de especímenes de laboratorio.

El algoritmo escogido debe cumplir con ciertos requisitos para poder ser aplicado satisfactoriamente a los fines de esta investigación: Sus resultados deben de ser sencillos de interpretar; deben de ser computacionalmente eficientes, puesto que debido a que el sistema propuesto va, en muchas aplicaciones, a analizar más de 120 imágenes por segundo de video; debe ser lo más rápido posible y debe ser desarrollado en lenguajes de programación libre para ser económicamente viable.

Dentro de las técnicas de visión por computadora empleadas para el rastreo de marcadores y cálculo de desplazamientos se encuentran opciones tales como el rastreo de marcadores a través de los colores, el *Template Matching* (TM) y el *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), entre otros.

El presente capítulo se encargará de determinar la técnica más adecuada, precisa y eficiente para el objetivo de esta tesis, para lo cual se llevó a cabo un experimento casero de simple implementación que consistió en registrar en video el movimiento oscilatorio del extremo de una regla la cual tenía adosada un marcador y estaba empotrada en su otro extremo (Figura 15),

El video fue capturado con la cámara de un celular a 60 fps y una resolución *full HD* (1080x1920 píxeles).

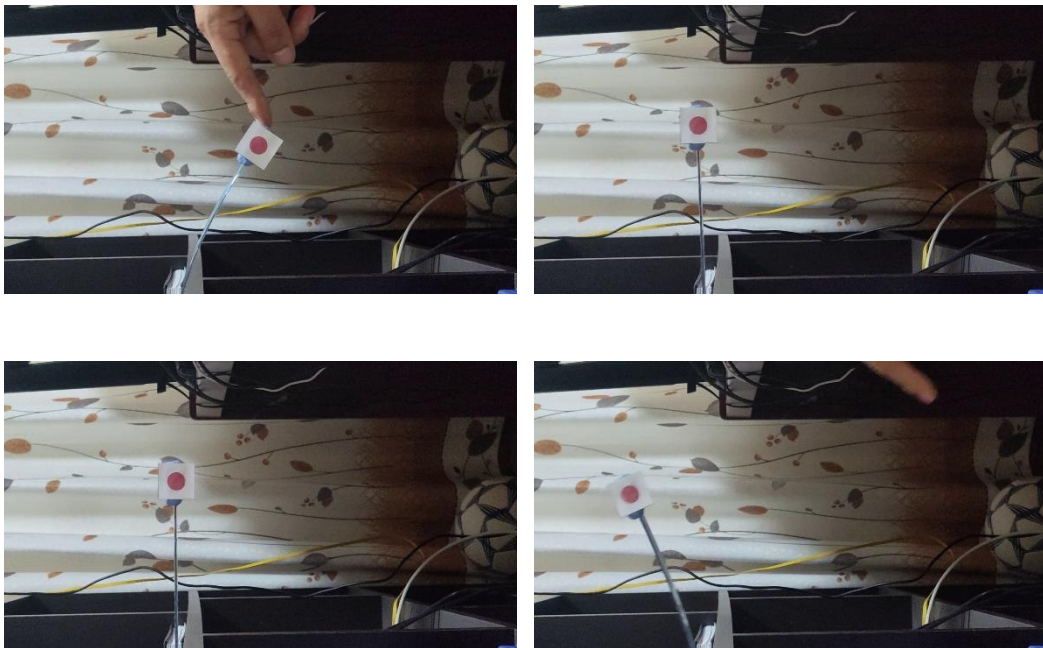
Del video se buscó obtener la historia en el tiempo de los desplazamientos del marcador, la cual debía representar un movimiento oscilatorio amortiguado; así mismo, se esperaba que los desplazamientos obtenidos guarden concordancia

con la realidad; finalmente, se midieron los tiempos de procesamiento de programas desarrollados bajo cada una de las técnicas, para identificar la más eficiente.

Cabe mencionar que todos estos programas fueron ejecutados en la misma computadora, la cual cuenta con un procesador Intel Core i9-12900K con una velocidad base de 3.2 GHz y una memoria RAM de 32 GB, esto con el fin de poder comparar adecuadamente los tiempos de procesamiento.

Figura 15

Regla con un extremo en movimiento oscilatorio.



3.2. Algoritmo para rastrear objetos a partir de colores

Uno de los métodos más sencillos para rastrear marcadores a lo largo de los fotogramas de un video consiste en identificar, en cada fotograma, todos los píxeles que se ubiquen dentro de un intervalo de color predefinido por el usuario. A modo de ejemplo, si se observa un círculo rojo moviéndose sobre un fondo blanco, el procedimiento para determinar su posición en cada fotograma se basa en detectar todos los píxeles rojos de la imagen. Puesto que el fondo blanco no contiene otros elementos rojos, se asume que dichos píxeles corresponden únicamente al círculo. Una vez identificados, se calcula la posición de cada píxel y se determina el centro geométrico del conjunto, obteniendo así la ubicación del círculo en cada fotograma. Dichas posiciones se almacenan en vectores, a partir de los cuales se obtienen los desplazamientos en píxeles. Finalmente, con el fin

de expresar estos desplazamientos en milímetros, se aplica un factor de escala (SF) determinado al comparar la distancia real entre dos puntos medidos físicamente con la distancia equivalente en píxeles entre esos mismos puntos dentro de la imagen.

3.2.1. Descripción detallada del programa desarrollado con base al primer método

La implementación de este método comienza pintando los marcadores de un color que contraste con el fondo (por ejemplo, marcadores rojos sobre un fondo blanco). A continuación, se describen los pasos principales:

- 1) Extracción de fotogramas: Se leen y procesan secuencialmente todos los fotogramas que componen el video.
- 2) Definición de Regiones de Interés (ROI): Al llegar al primer fotograma, el programa se detiene para que el usuario pueda delimitar las regiones de la imagen en las que se sabe que permanecerá cada marcador, así como la línea de SF que conecta dos puntos cuya distancia real es conocida como se muestra en la Figura 16.
- 3) Conversión a escala HSV: La imagen, originalmente en escala RGB, se convierte a una escala de color HSV para facilitar la segmentación basada en tonalidades y saturación.
- 4) Selección de rangos de color: El usuario indica los rangos de color (en HSV) en los que se sitúa el marcador a rastrear.
- 5) Creación de máscaras: El programa recorre los píxeles de cada ROI y verifica si se encuentran dentro del rango de color especificado. Luego, genera una máscara en la que los píxeles que cumplen el criterio son blancos y el resto negros (ver Figura 17). Este proceso se repite para cada ROI.
- 6) Detección de contornos y cálculo de centros geométricos: En la máscara resultante, se buscan los contornos formados por los cambios de intensidad (de blanco a negro). A continuación, se calcula el centro geométrico de cada contorno, lo cual proporciona la posición de los marcadores en el primer fotograma.
- 7) Filtrado de contornos por área: Dado que es posible hallar píxeles con el color de interés que no pertenecen al marcador (por ejemplo, reflejos o ruido), el algoritmo elimina los contornos que no superen un umbral de área mínimo. De esta manera, se dibujan únicamente los contornos correspondientes a los

marcadores (ilustrados en la Figura 18 con color verde) y se muestra en pantalla la posición de sus centros geométricos.

- 8) Procesamiento de todos los fotogramas: El mismo procedimiento se aplica sucesivamente a cada fotograma del video, de modo que las posiciones de los marcadores se van registrando en una matriz.
- 9) Conversión de desplazamientos a unidades reales: Finalmente, se calculan los desplazamientos a partir de los datos almacenados en la matriz y, como estos se encuentran en píxeles, se convierten a milímetros multiplicándolos por el factor de escala obtenido en el paso inicial.

Figura 16

Elección de los ROI (verde) y elección de SF (Azul).

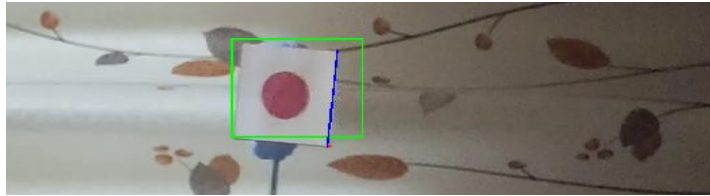


Figura 17

Máscara generada por el programa.

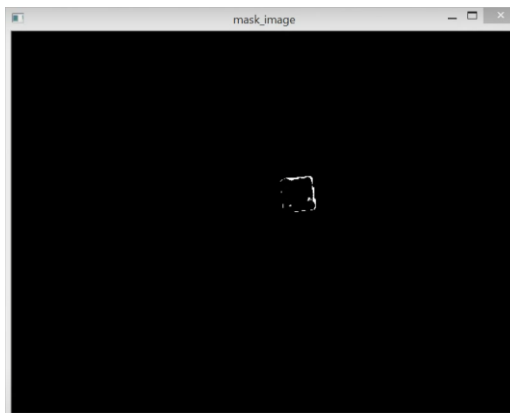
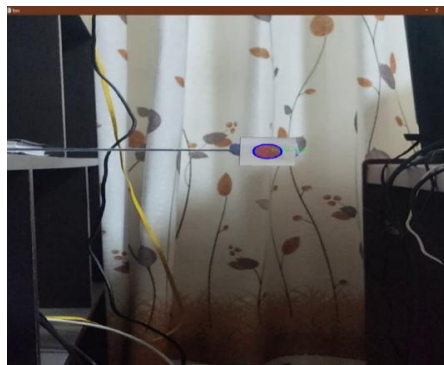


Figura 18

Programa ejecutándose. Contorno azul dibujado por el programa.



3.2.2. Implementación y puesta a prueba

Luego de implementar el procedimiento anterior en Python, el programa es puesto a prueba en el experimento casero anteriormente descrito.

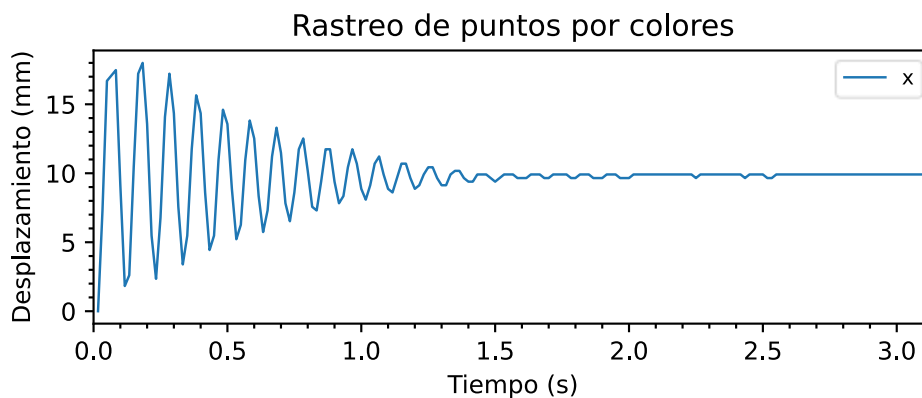
El movimiento oscilatorio registrado es graficado en la Figura 19. Nótese que el punto de máximo desplazamiento está en la segunda cresta, lo cual es incompatible con el concepto de oscilación amortiguada puesto que la amplitud debe ir disminuyendo con el paso del tiempo.

El tiempo de procesamiento por fotograma es de aproximadamente 0.017 segundos en promedio para el caso de un solo marcador. Este tiempo puede incrementarse considerablemente si el tamaño del marcador aumenta, si la cantidad de marcadores aumenta y si el marcador presenta una mayor amplitud de desplazamiento.

El diagrama de flujo de este método puede ser revisado en la Figura 20

Figura 19

Tiempo-historia con rastreo por colores.



3.2.3. Ventajas

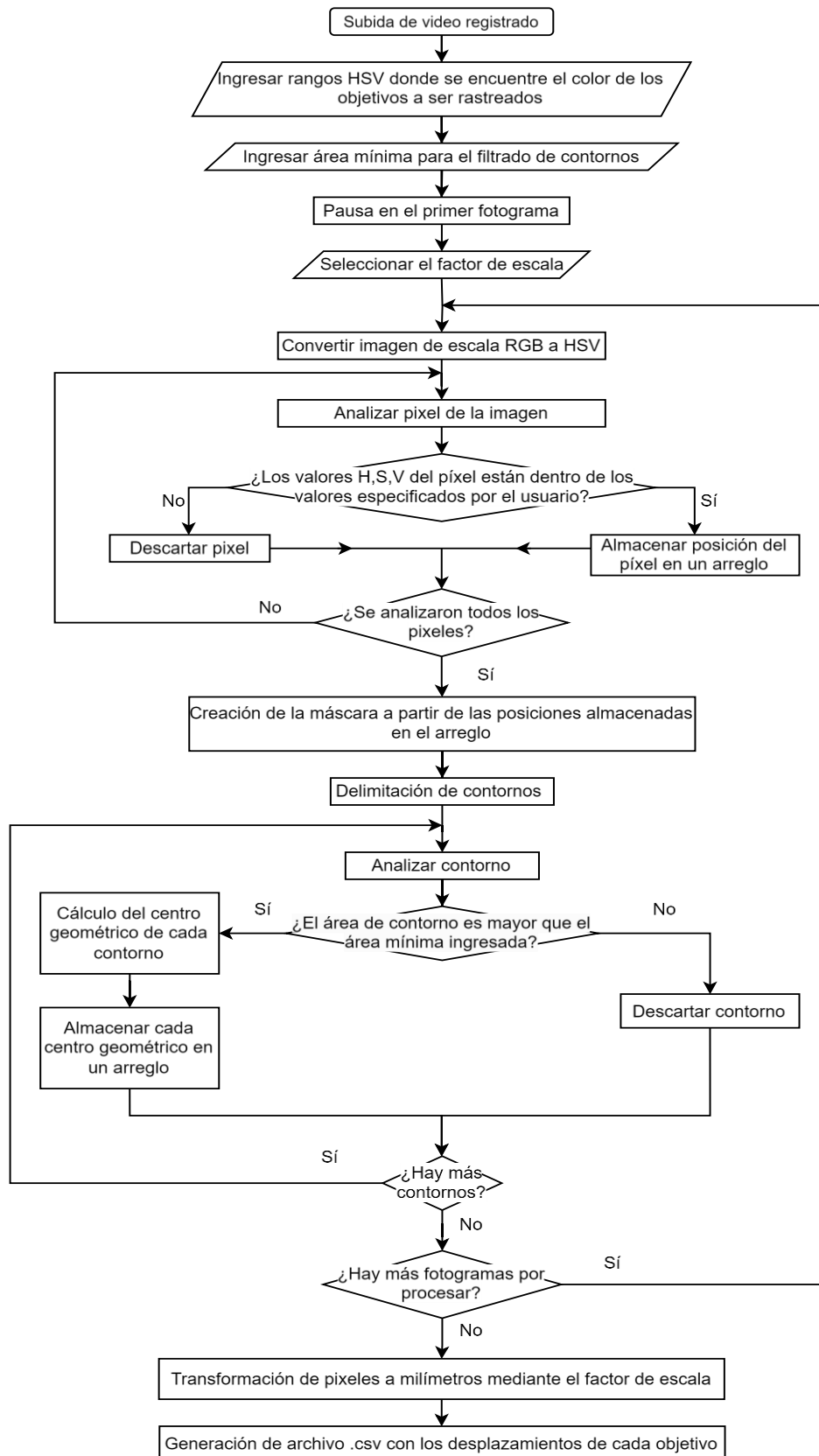
- Algoritmo sencillo de entender e interpretar.
- Tiempo de procesamiento regular, comparado con los demás métodos presentados posteriormente.
- No se ve afectado por la rotación del marcador, puesto que analiza el centro de gravedad del marcador a lo largo del video.

3.2.4. Desventajas

- Metodología muy difícil de implementar en la práctica dado que necesita de un fondo distinto al color del marcador; caso contrario los colores del fondo que estén dentro del rango HSV seleccionado pueden incluirse en la máscara, modificando así el centro de gravedad real.

Figura 20

Diagrama de flujo para rastrear objetos a partir de colores.



- Dificultad para establecer el intervalo HSV: El color uniforme en el marcador no existe, debido a sombras, porciones brillantes a la luz, etc. Es complicado encontrar un rango HSV que abarque todos los pixeles que componen el marcador y además excluyan por completo los pixeles fuera del marcador. Lo que conlleva a la siguiente desventaja
- Poca precisión: esto debido al punto anterior, el centro de gravedad no es estable en cada marcador y en cada fotograma, debido a la dificultad de establecer el intervalo HSV correcto.

3.2.5. Conclusión

El método es eficiente y suficiente para realizar un rastreo simple de marcadores, pero no para medir los desplazamientos con la precisión deseada en el laboratorio debido a todas sus desventajas.

3.3. Algoritmo scale-invariant feature transform (SIFT)

La Transformación de Características Invariantes a la Escala (SIFT, por sus siglas en inglés) es un método diseñado para extraer rasgos distintivos de las imágenes. Dichos rasgos son invariantes ante traslaciones, rotaciones, escalamientos e, incluso, cambios de iluminación (Lowe, 2004). Al identificar estas características, resulta posible emparejar imágenes y reconocer objetos dentro de ellas.

Este proceso se lleva a cabo siguiendo cuatro pasos fundamentales, descritos por Lowe (2004):

- 1) Construcción del espacio de escala: Se genera una serie de imágenes suavizadas progresivamente con filtros Gaussianos y se reducen a la mitad de su resolución, formando lo que se conoce como una pirámide de imágenes. Dentro de cada octava, se calculan las diferencias de Gaussianas para detectar bordes y puntos clave.
- 2) Localización de puntos clave: Los puntos clave se definen como máximos o mínimos locales en las imágenes de diferencia de Gaussianas. Cada píxel se compara con sus vecinos directos en la misma escala y con los correspondientes en las escalas superior e inferior.
- 3) Asignación de orientación: A cada punto clave se le asigna una o más orientaciones en función de la dirección de los gradientes de la región cercana. Esto brinda invariancia frente a rotaciones.

4) Descripción del punto clave: Alrededor de cada punto clave se determina un histograma de gradientes orientados. Estos valores conforman un descriptor que, por lo general, consta de 128 elementos.

Para comparar dos imágenes, ambos conjuntos de descriptores se calculan y, posteriormente, se buscan coincidencias entre ellos. En la práctica, la implementación en Python puede realizarse fácilmente con la biblioteca OpenCV (s.f.), que proporciona funciones optimizadas para este propósito. En la presente tesis, se hace uso de esas herramientas, sobre todo de la función `cv.SIFT_create()` de OpenCV.

3.3.1. Descripción detallada del programa desarrollado con base al primer método

En un primer momento, se aplica el algoritmo SIFT a un único fotograma, partiendo de dos archivos de entrada: el fotograma completo y una imagen recortada que contiene el marcador. El procedimiento es el siguiente:

- 1) Cargar las imágenes e inicializar el detector SIFT: Se leen ambas imágenes desde los archivos y se configura el detector SIFT en OpenCV.
- 2) Encontrar puntos clave y descriptores: Mediante las funciones de OpenCV, se detectan los puntos clave y se calculan sus descriptores tanto en la imagen completa como en la recortada.
- 3) Emparejar descriptores: Se realiza un emparejamiento entre los descriptores de ambas imágenes, generalmente empleando una métrica de distancia Euclidiana para determinar las coincidencias más cercanas.
- 4) Filtrar coincidencias: Por último, se aplican filtros de distancia para descartar coincidencias que no alcancen cierto criterio de similitud. Una vez completado este paso, se obtiene el conjunto de puntos que coinciden en ambas imágenes.

3.3.2. Implementación y puesta a prueba

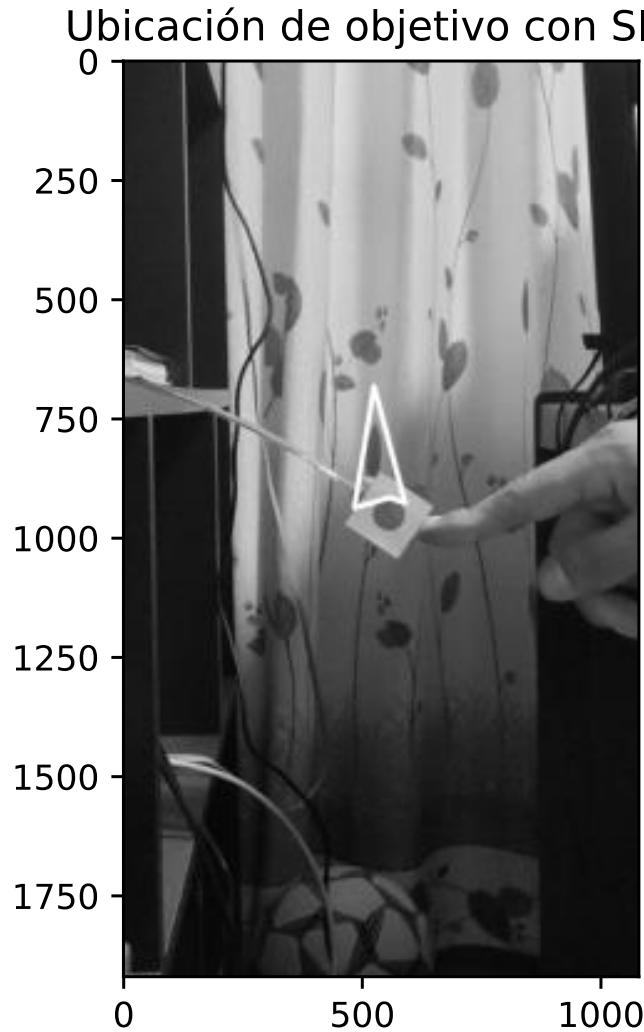
Para validar el método, se implementó el código en el video de la regla oscilante. Se buscó el marcador en el primer fotograma, como se aprecia en la Figura 21, donde se muestran los descriptores emparejados por líneas blancas. Sin embargo, se observó que el algoritmo tuvo dificultades para ubicar con precisión el marcador en la imagen original.

En la práctica, fue complicado determinar un punto exacto dentro del fotograma, pues algunos descriptores se posicionaron fuera del marcador, delimitando regiones que no correspondían a este. Además, el tiempo de

procesamiento por imagen alcanzó un promedio de 0.60 segundos, aproximadamente diez veces más lento que el algoritmo basado en detección de colores

Figura 21

Ubicación del marcador dentro del primer fotograma con SIFT



3.3.3. Ventajas

- Existen funciones optimizadas en OpenCV que facilitan la implementación de los pasos principales.
- No se ve afectado por la rotación del marcador, ni por una variación en el tamaño de este de darse el caso, puesto que las características son invariantes en escala.

3.3.4. Desventajas

- Muy poco preciso para los fines de la investigación. No obtiene la posición de un píxel, sino de un grupo de píxeles.

- Tiempo de procesamiento muy elevado, lo cual es perjudicial al momento de trabajar con videos de varios fotogramas.

3.3.5. Conclusión

El método no es adecuado para hacer el seguimiento de marcadores en un video para nuestros marcadores por su elevado costo computacional y la poca precisión con la que ubica una imagen dentro de otra.

3.4. Algoritmo basado en *template matching*

El *Template Matching* (TM, por sus siglas en inglés) es una técnica ampliamente utilizada en procesamiento de imágenes cuyo objetivo principal es determinar la ubicación exacta de una imagen dentro de otra más extensa. Para ello, TM desplaza sistemáticamente la imagen más pequeña, denominada plantilla o "*template*" $T(x, y)$, sobre toda la superficie de la imagen mayor $I(x, y)$, que presumiblemente contiene dicha plantilla. En cada posición del desplazamiento, se calcula una métrica específica que permite medir el grado de similitud entre la plantilla y la región correspondiente de la imagen subyacente (Xiao et al., 2020). Las métricas comúnmente utilizadas son diferencias de cuadrados (SQDIFF), correlación cruzada (CCORR), entre otras (Xiao et al 2020). La métrica CCORR, como su nombre lo indica, está basada en la correlación discreta, La versión normalizada del CCORR es la correlación cruzada normalizada (NCCORR) así mismo, presenta mucho menos falsos emparejamientos.

Usando el NCCORR el máximo valor de la función de correlación permite encontrar la posición en la cual el emparejamiento tiene mayor probabilidad.

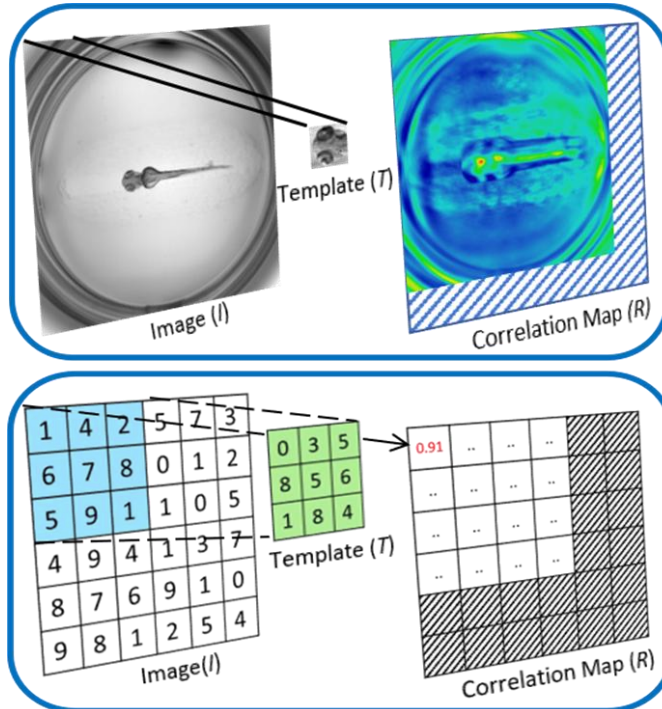
La ecuación de correlación aplicada a dos imágenes para llevar a cabo el TM es la siguiente:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') \cdot I(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')^2}} \quad (3.1)$$

Donde $T(x, y)$ es la imagen más pequeña que se desliza sobre la imagen más grande $I(x, y)$ (ver Figura 22). El resultado de aplicar esta ecuación es la matriz de correlación $R(x, y)$ donde la posición del máximo valor contenido en esta matriz, será la posición de la imagen dentro de la otra (ver Figura 23). Finalmente, un diagrama de flujo para el TM es presentado en la Figura 24.

Figura 22

Imagen pequeña deslizándose sobre imagen grande generando una matriz de correlación R .



Nota: Tomado de Multi-Template-Matching (s.f.)

Figura 23

Ejemplo de uso del TM para localizar una imagen dentro de otra.

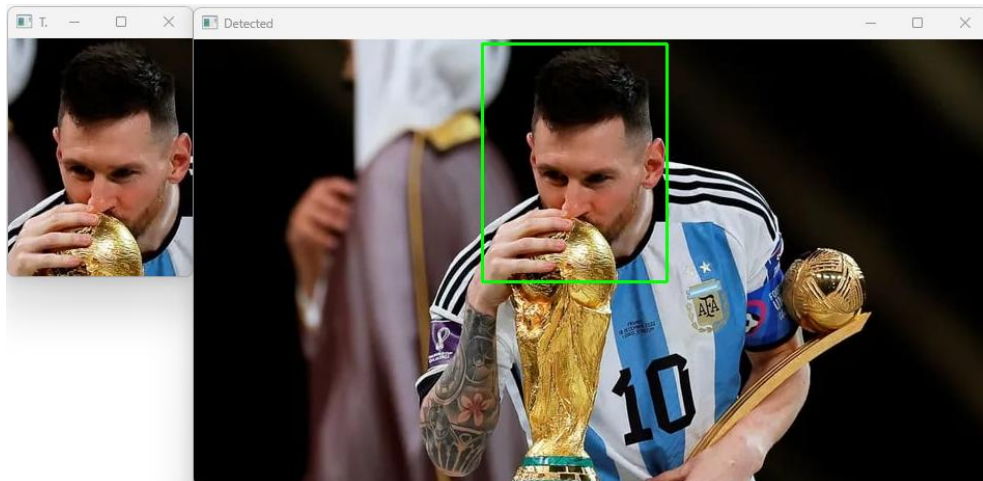
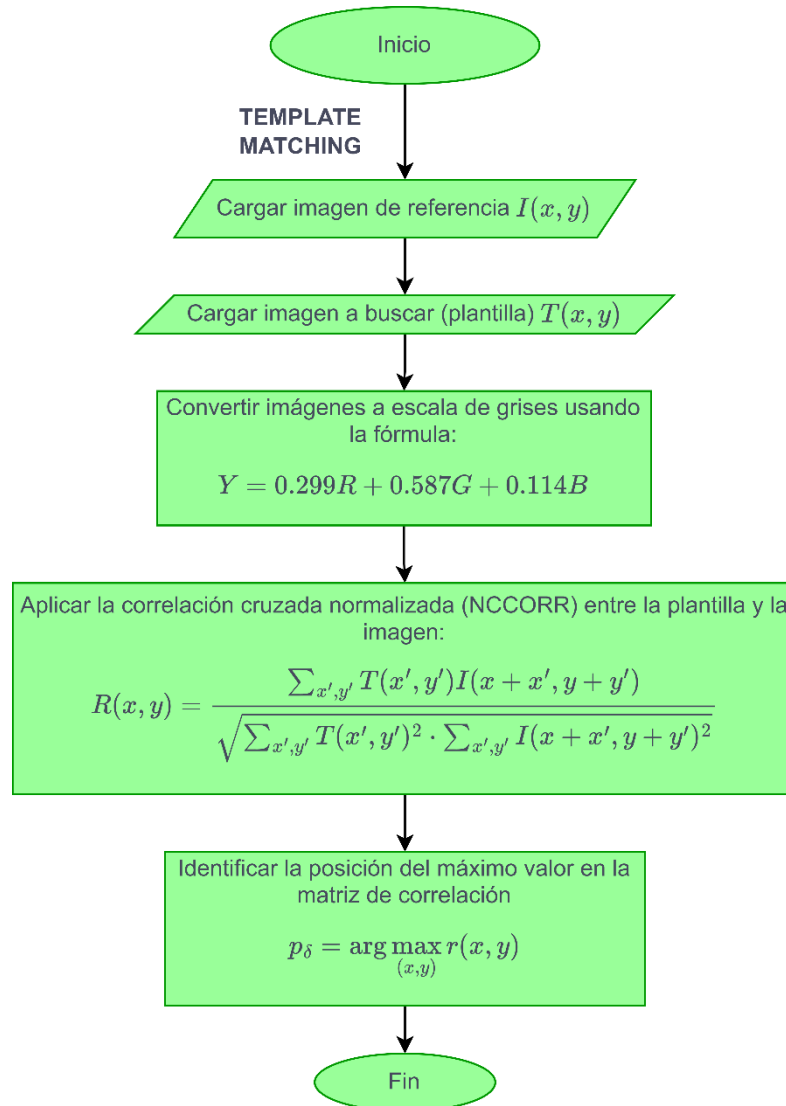


Figura 24

Diagrama de flujo para el TM.



3.4.1. Descripción de un procedimiento general para la obtención de desplazamientos mediante TM.

El programa implementado puede resumirse en los siguientes puntos:

- 1) Captura el video y lee secuencialmente los fotogramas.
- 2) En el primer fotograma, la lectura de video se pausa y le pide al usuario seleccionar los marcadores a rastrear, sus respectivos ROIs y la línea de SF.
- 3) En los fotogramas siguientes, el programa realiza la búsqueda de cada marcador dentro de su respectivo ROI. De esta forma se pueden rastrear varios puntos a la vez y reducir también el área de búsqueda para que de esta forma sea más rápido el procesamiento.

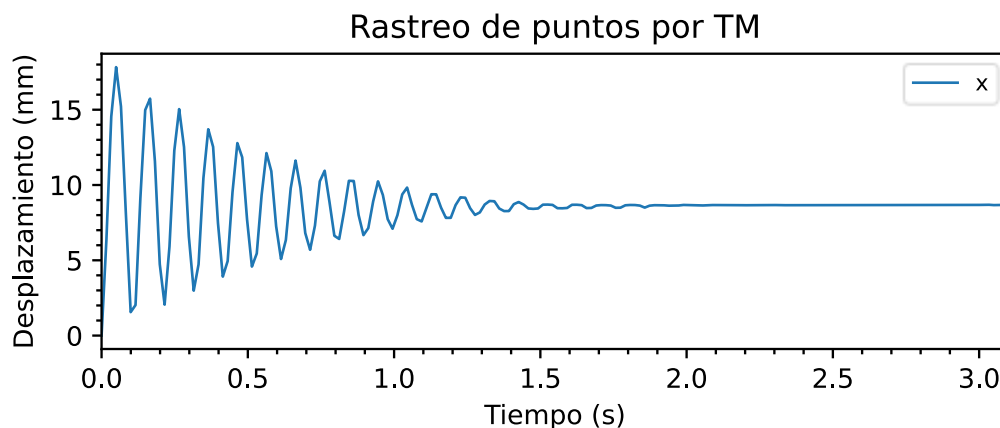
- 4) Las posiciones de cada marcador a lo largo del tiempo son almacenadas en matrices.
- 5) Finalmente, los desplazamientos calculados a partir de las posiciones son multiplicados por el SF, obteniendo así los desplazamientos en milímetros.

3.4.2. Implementación y puesta a prueba

El programa hecho en base al TM es puesto a prueba en el video de la regla oscilando. El tiempo historia registrado por la cámara puede ser visto en la Figura 25, donde se aprecia que el movimiento oscilatorio amortiguado disminuye constantemente su amplitud. El tiempo de procesamiento es de aproximadamente 0.003 segundos por fotograma, siendo computacionalmente el más eficiente de los métodos.

Figura 25

Tiempo-historia con rastreo por TM



3.4.3. Ventajas

- Computacionalmente más eficiente que el resto de los algoritmos presentados
- Precisión asumida como óptima puesto que describió muy bien el movimiento amortiguado del extremo de la regla, además de proponer desplazamientos de acorde con lo esperado.
- Fácil de implementar y resultados simples de interpretar
- Buen desempeño ante pequeñas variaciones de luz.

3.4.4. Desventajas

- Si el marcador gira, o el marcador se acerca o se aleja del video sufriendo así un escalamiento en su tamaño, el TM no podrá ubicar el marcador en los fotogramas.

- Fuertes cambios en la iluminación pueden afectar los resultados, aunque estas condiciones pueden ser controladas en el laboratorio.

3.4.5. Conclusión

El TM es el método de mayor precisión y el computacionalmente más eficiente de todas las técnicas presentadas, que demuestra su valía para los marcadores del presente estudio y es respaldado por una gran cantidad de fuentes bibliográficas

3.5. Elección del algoritmo base

La presente investigación desarrolla un código en Python que emplee el algoritmo del TM por las ventajas tanto en precisión como en coste computacional que este representa frente a los demás métodos presentados para los marcadores de la investigación. El código propuesto, sin embargo, no consiste simplemente en aplicar el TM, ya que este presenta una serie de desventajas tales como su sensibilidad de desplazamiento mínimo a medir, errores cuando hay cambios bruscos de iluminación, así como el hecho de que no detecte marcadores rotados y escalados. Por lo tanto, el código implementa técnicas adicionales de procesamiento de imágenes y visión por computador para poder superar dichas limitaciones, además de brindar la solución óptima para resolver los objetivos de esta investigación.

Además, la investigación propone todo el sistema de medición en conjunto, proponiendo también los requisitos de la cámara a ser utilizada, el uso de marcadores de rastreo que aumenten la precisión y a su vez permitan sortear ciertas dificultades del método, así como también una serie de consideraciones para tener en cuenta al momento de realizar las grabaciones para adquisición de datos.

Capítulo IV: Análisis de la observación de la respuesta estructural

La técnica de correlación de fase y técnicas de interpolación serán implementadas en conjunto con el TM para obtener con mayor precisión la posición de los marcadores en cada fotograma para fines de SHM.

4.1. Descripción del algoritmo propuesto

La secuencia de pasos del algoritmo es mostrada a continuación

4.1.1. Captura de video

El video es capturado a través de una cámara de video. El video capturado es procesado posteriormente del ensayo. El algoritmo inicia al subir el video dentro de una ubicación específica en el ordenador.

4.1.2. Lectura del primer fotograma y selección de los marcadores, ROIs y el factor de escala.

El software descompone secuencialmente los fotogramas que componen el video, para analizar cada uno de ellos. El algoritmo se detiene en el primer fotograma del video, donde solicita hacer tres selecciones: seleccionar los marcadores a ser rastreados, seleccionar los ROIs y seleccionar el SF.

El ROI es una porción de la imagen donde se concentra el procesamiento y análisis despreciando el resto de ella con la finalidad de reducir el tiempo de búsqueda (Li-jun et al., 2014). Dado que emplear el TM a lo largo de toda la imagen resultaría innecesario y computacionalmente costoso, el algoritmo hace uso de los ROI para optimizar la búsqueda, centrando así su búsqueda en una porción de la imagen, delimitada por el usuario, donde el marcador desarrollará su movimiento a lo largo del tiempo. Ya que el marcador no debe moverse más allá de los límites del ROI, es importante que para su selección el usuario tenga una noción aproximada de los límites de la trayectoria del marcador.

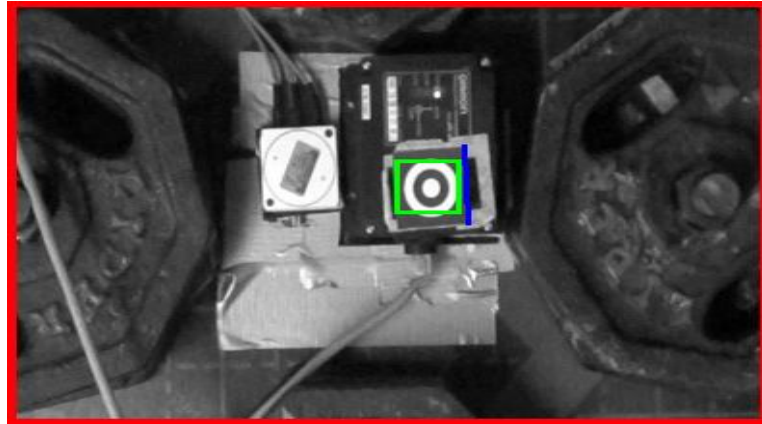
Cada uno de los marcadores a ser rastreados son encerrados dentro de rectángulos. De la misma forma, cada ROI es encerrado en un rectángulo. Debe haber tantos ROIs como marcadores haya. El SF es una línea que une dos puntos en el primer fotograma con una distancia conocida en el mundo real.

La selección de los marcadores, ROIs, y línea de escala en el primer fotograma se puede observar en la Figura 26.

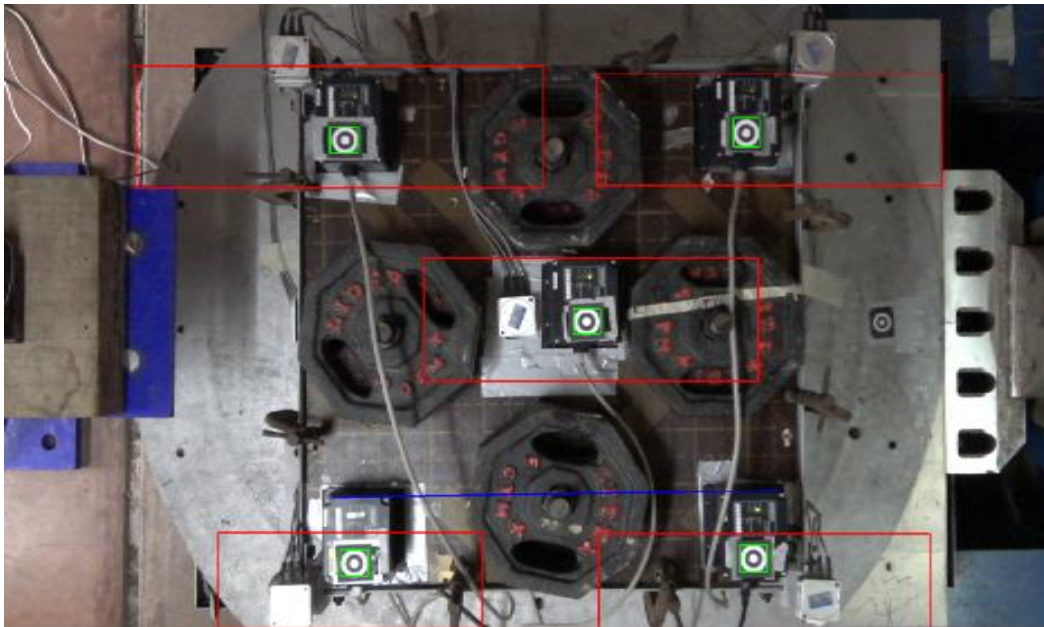
Posteriormente, el algoritmo continúa con el análisis de este y los demás fotogramas sin volver a solicitar esos datos.

Figura 26

Elementos importantes para el programa



a)



b)

Nota: a) Marcadores (verde), ROI (rojo) and SF (azul). b) ROI amplificado donde se aprecia mejor el marcador y el SF

4.1.3. Paralelización del algoritmo mediante distribución de fotogramas entre núcleos

Para acelerar el proceso de análisis mediante la paralelización del algoritmo, se distribuyen los fotogramas del video entre los diferentes núcleos del procesador disponibles. Este método aprovecha la capacidad de cómputo simultánea de los procesadores multinúcleo, permitiendo reducir significativamente el tiempo total de ejecución del algoritmo.

La distribución se realiza dividiendo equitativamente el conjunto total de fotografías entre el número de núcleos disponibles en el computador. Sea N_{TF}

la cantidad total de fotografías del video, y N_{ND} el número de núcleos disponibles para el procesamiento paralelo. El número de fotografías asignado a cada núcleo Gf , está dado por la siguiente expresión:

$$Gf = \left\lfloor \frac{N_{TF}}{N_{ND}} \right\rfloor \quad (4.1)$$

Debido a que N_{TF} no necesariamente es divisible exactamente por N_{ND} , generalmente existirá un grupo de fotografías residual Gf_r , que se procesa en el último núcleo disponible, calculado mediante la siguiente fórmula:

$$Gf_r = N_{TF} - (N_{ND}) \times Gf \quad (4.2)$$

Esta repartición garantiza una distribución óptima y eficiente de la carga de trabajo.

Dentro de cada uno de los grupos de fotografías se realizará el procesamiento que continúa en las secciones siguiente.

4.1.4. Cálculo de la posición de un marcador dentro de un ROI

4.1.4.1 Extracción de marcadores y ROIs

Una vez definidas las coordenadas de los rectángulos que delimitan cada uno de los marcadores, se aplican dichos valores sobre el primer fotograma para extraer exclusivamente la sección correspondiente a esa región. Este procedimiento consiste en tomar las posiciones de los vértices y utilizarlas como límites para recortar las partes de la imagen que se desean guardar como marcadores. Se crean entonces en la memoria tantas variables como marcadores haya, conteniendo cada una de estas la imagen de su marcador respectivo. Estos mismos pasos se siguen con las coordenadas de los rectángulos que definen los ROIs para extraerlos, pero ya no solo en el primer fotograma, sino en cada uno de ellos.

La imagen dentro del ROI varía en cada fotograma (a diferencia de las imágenes que almacenan los marcadores que son constantes durante todo el proceso), pero las coordenadas que delimitan el ROI se mantienen constantes. De esta manera, solo la porción de la imagen comprendida dentro de las coordenadas del ROI será procesada o estudiada en los pasos posteriores. Existe un ROI por cada marcador a ser rastreado y cada ROI, en todos los fotogramas, contiene en su interior al marcador en diferentes posiciones.

4.1.4.2 Uso del TM

Se utiliza en primer lugar el TM para calcular la posición de un marcador dentro de un ROI. Este proceso se repite en cada uno de los ROI con sus respectivos marcadores que encierra. Una vez obtenida la posición del marcador dentro del ROI, se procede a delimitar nuevamente las coordenadas del marcador dentro de dicho ROI, considerando esta nueva ubicación detectada siguiendo los siguientes pasos:

- I. La posición obtenida por el TM tiene las coordenadas (x_0, y_0) .
- II. Sean las dimensiones de la imagen marcador: $W \times H$
- III. Sea la imagen del ROI en un determinado fotograma definida como $R(x, y)$ y la sub-imagen del ROI que contiene al marcador será $R_{sub}(u, v)$. Los puntos (u, v) dentro de la sub-imagen se relacionan con los puntos (x, y) de la imagen original R mediante: $x = x_0 + u$ y $y = y_0 + v$, Donde $u \in [0, W - 1]$ y $v \in [0, H - 1]$.
- IV. La sub-imagen del ROI que contiene al marcador, por lo tanto, será $R_{sub}(u, v) = R(x_0 + u, y_0 + v)$

Posteriormente, se extrae la sección de la imagen correspondiente a la posición actualizada del marcador

4.1.4.3 Correlación de fase

La posición obtenida en el TM puede no siempre resultar precisa, porque la apariencia del objeto puede cambiar de forma drástica en la secuencia de fotogramas. Esto debido a una posible rotación del marcador, un cambio de sus dimensiones debido a un acercamiento o alejamiento de la cámara hacia el marcador, o por cambios de iluminación y efectos de cambio de contraste. (Gräßl et al., 2003).

Para obtener una posición más precisa menos susceptible a los cambios de iluminación y contraste, el algoritmo recurre a la correlación de fase.

La correlación de fase implica desarrollar una correlación en el dominio de la frecuencia de ambas imágenes que permite estimar el desplazamiento relativo entre dos imágenes.

Esta operación se basa en la propiedad de desplazamiento de Fourier, la cual señala que un desplazamiento en el dominio del tiempo (o espacio) se traduce en un cambio de fase de su Transformada de Fourier (Stone et al., 2001). Esta propiedad se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera para el caso de señales de una sola dimensión:

$$g(t) = f(t - t_0) \leftrightarrow G(\omega) = F(\omega) e^{-i\omega t_0} \quad (4.3)$$

Donde $g(t)$ es la versión desplazada de la señal $f(t)$ y sus respectivas Transformadas de Fourier son $G(\omega)$ y $F(\omega)$.

La razón para emplear la correlación de fase en la búsqueda de la posición se justifica en su comprobada menor sensibilidad a variaciones de iluminación y al ruido en comparación con el método de TM. Este hecho, documentado por Ye et al. (2018), se debe a que la correlación de fase opera directamente sobre el contenido de frecuencias de la señal, permitiendo una detección de desplazamientos más robusta ante las mencionadas perturbaciones visuales.

La correlación de fase es llevada a cabo siguiendo los siguientes pasos, de acuerdo con Alba et al. 2012:

- I. Para las funciones $f(t)$ y $g(t)$ cuyas respectivas Transformadas de Fourier son $G(\omega)$ y $F(\omega)$. El espectro cruzado normalizado $R(\omega)$ en el dominio de las frecuencias se define mediante la ecuación 4.2. Este resultado está normalizado para eliminar la influencia de la magnitud y centrarse únicamente en la fase

$$R(\omega) = \frac{F(\omega)G^*(\omega)}{|F(\omega)G^*(\omega)|} \quad (4.4)$$

Donde $G^*(\omega)$ es la conjugada compleja de $G(\omega)$.

- II. La función de correlación de fase $r(x, y)$ se define mediante la ecuación 4.3

$$r(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[R(\omega)] \quad (4.5)$$

- III. La posición del pico máximo p_δ en la función de correlación obtenida es el desplazamiento correspondiente entre las dos imágenes.

$$p_\delta = \arg \max_{(x,y)} r(x, y) \quad (4.6)$$

El procedimiento anterior puede resumirse y contextualizarse específicamente para el procesamiento de imágenes mediante la ecuación 4.5 tomando como referencias las expresiones de Wan et al. (2019)

$$p_\delta = \arg \max_{(x,y)} \left(\mathcal{F}^{-1} \left(\frac{F_1(u, v)F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v)F_2^*(u, v)|} \right) \right) \quad (4.7)$$

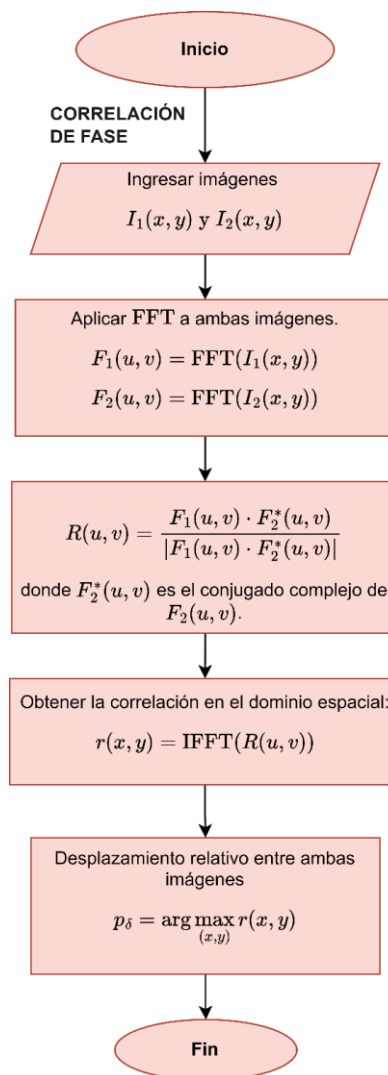
Siendo $F_1(u, v)$ y $F_2(u, v)$ las Transformadas de Fourier de la imagen 1 ($I_1(x, y)$) y la imagen 2 ($I_2(x, y)$), respectivamente, y nuevamente $F_2^*(u, v)$ representa la conjugada de dicha Transformada de Fourier. El diagrama de flujo que describe la correlación de fase puede ser visto en la Figura 27. Finalmente, la

correlación de fase se usa con la imagen del marcador original (recortada en el primer fotograma) y con la imagen del marcador en el fotograma a analizar (obtenida con el TM).

El procedimiento planteado utiliza en primera instancia la técnica de TM y recién posteriormente la correlación de fase debido a consideraciones prácticas que justifican este orden metodológico. En primer lugar, la técnica de correlación de fase requiere que ambas imágenes que serán comparadas posean dimensiones idénticas; sin embargo, el ROI y el marcador no cumplen con esta condición inicial. Por esta razón, se emplea primeramente la técnica de TM, la cual permite identificar con precisión la ubicación del marcador (plantilla) dentro de un área mayor (ROI) aunque tengan diferentes tamaños.

Figura 27

Diagrama de flujo de la correlación de fase entre dos imágenes



Adicionalmente, entre fotogramas consecutivos del video pueden ocurrir cambios sustanciales en el fondo, tales como presencia de objetos móviles, personas, o modificaciones en la escena (por ejemplo, fragmentos de especímenes que caen o se desplazan). Por lo tanto, la región del ROI de un fotograma específico no siempre constituye una versión simplemente desplazada del ROI del fotograma anterior, sino una nueva imagen muy distinta en muchos casos. Sin embargo, al enfocarse únicamente en la región del marcador (plantilla) que se desea rastrear, dicha condición se cumple con mayor fidelidad. Una vez determinada la ubicación precisa del marcador mediante TM, se puede extraer exclusivamente esta área y aplicar la técnica de correlación de fase. De esta manera, la correlación de fase proporciona una estimación más precisa y refinada del desplazamiento entre fotogramas consecutivos, corrigiendo posibles errores introducidos por las condiciones dinámicas de la escena.

4.1.4.4 Subpíxeles

Tanto el TM como la correlación de fase ubicarán la posición del marcador dentro del ROI en posiciones de valores enteros de píxel, por lo que los desplazamientos obtenidos siempre será una cantidad entera de píxeles. Muchas veces, como se verá más adelante en la validación del método, el desplazamiento a nivel de píxel no es lo suficientemente refinado para describir de manera precisa una señal, por lo que es necesario encontrar los valores de posición y desplazamiento para valores decimales de píxeles, lo que se conoce como subpíxeles.

Para calcular el desplazamiento a nivel de subpíxel es necesario realizar una interpolación de valores alrededor del máximo valor de la matriz de correlación calculada con la función correlación de fase $r(x)$. La interpolación puede ser llevada a cabo con distintos métodos, entre ellos la interpolación parabólica.

La interpolación parabólica fue la escogida para ser implementada en el algoritmo debido a la facilidad de uso, el poco costo computacional que implica, y los buenos resultados mostrados en la investigación hecha por Pallota et al. (2020). De acuerdo con el mismo autor, las expresiones escritas a continuación se utilizan para obtener estimaciones precisas del desplazamiento entre dos imágenes a nivel de subpíxel.

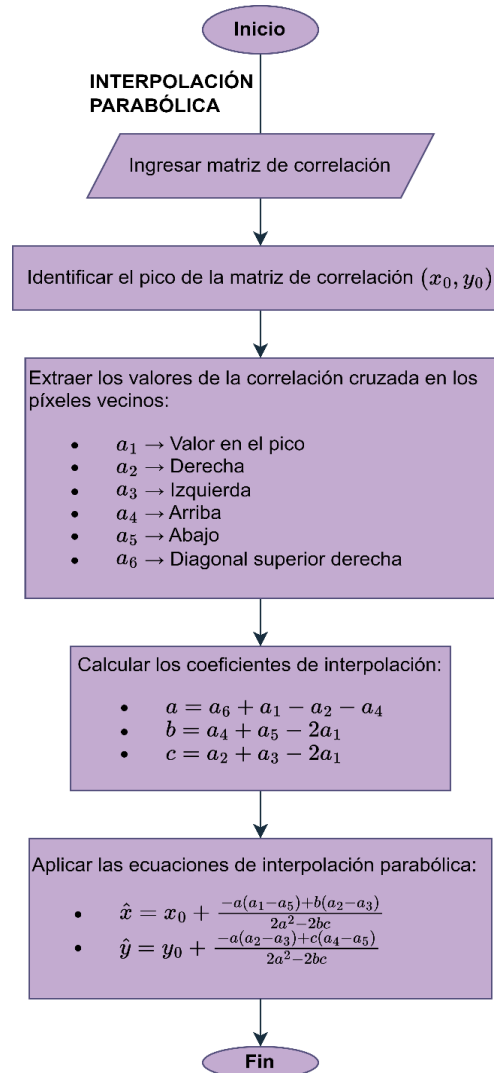
$$\hat{x} = x_0 + \frac{-a(a_4 - a_5) + b(a_2 - a_3)}{2a^2 - 2bc} \quad (4.8)$$

$$\hat{y} = y_0 + \frac{-a(a_2 - a_3) + c(a_4 - a_5)}{2a^2 - 2bc} \quad (4.9)$$

Donde \hat{x} y \hat{y} son las coordenadas refinadas en subpíxeles, ajustadas mediante interpolación parabólica, mientras que x_0 y y_0 son las coordenadas del máximo valor de la función de correlación, que serían el desplazamiento a nivel de píxel.

Figura 28

Diagrama de la interpolación parabólica.



Los valores necesarios para realizar la interpolación se calculan mediante las ecuaciones 4.8, 4.9 y 4.10.

$$a = a_6 + a_1 - a_2 - a_4 \quad (4.10)$$

$$b = a_4 + a_5 - 2a_1 \quad (4.11)$$

$$c = a_2 + a_3 - 2a_1 \quad (4.12)$$

Donde, los valores de a_1 a a_6 son los valores de los píxeles de la vecindad del píxel de posición (x_0, y_0) :

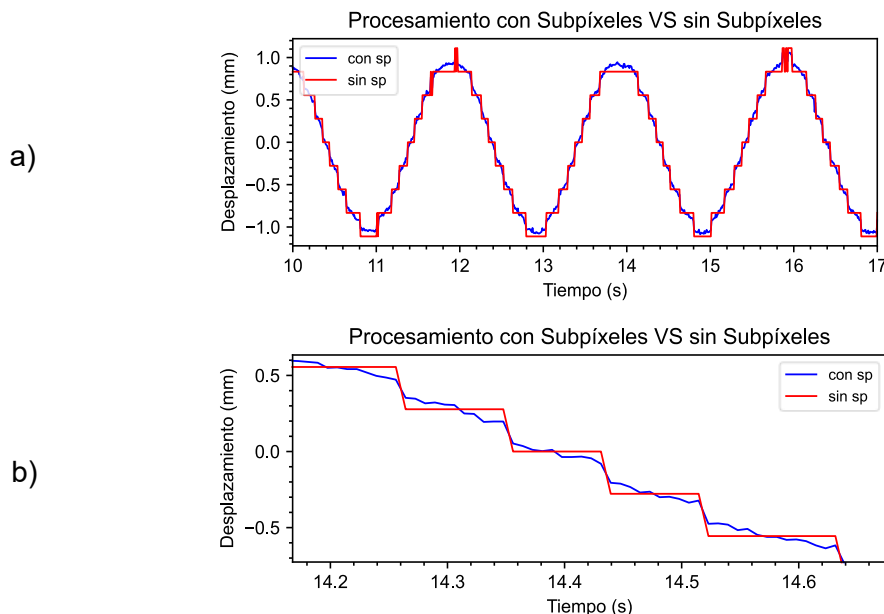
- a_1 es el valor de la correlación cruzada en el pico identificado.
- a_2 es el valor de la correlación cruzada para el punto situado a un paso de píxel a la derecha del pico.
- a_3 es el valor de la correlación cruzada para el punto situado a un paso de píxel a la izquierda del pico.
- a_4 es el valor de la correlación cruzada para el punto situado a un paso de píxel por encima del pico.
- a_5 es el valor de la correlación cruzada para el punto situado a un paso de píxel por debajo del pico.
- a_6 es el valor de correlación cruzada para un punto situado a un paso de píxel por encima y a la derecha del pico (diagonal superior derecha).

Luego de utilizar estas expresiones, es posible encontrar el desplazamiento relativo entre dos imágenes a nivel de subpíxel. Este procedimiento puede ser resumido en la Figura 28. Finalmente, la posición final del marcador dentro del ROI, se calcula sumando \hat{x} y \hat{y} a las coordenadas obtenidas con el TM (x_0, y_0) .

$$(x_f, y_f) = (x_0, y_0) + (\hat{x}, \hat{y}) \quad (4.13)$$

Figura 29

Forma de onda registrada con subpíxeles y sin subpíxeles.

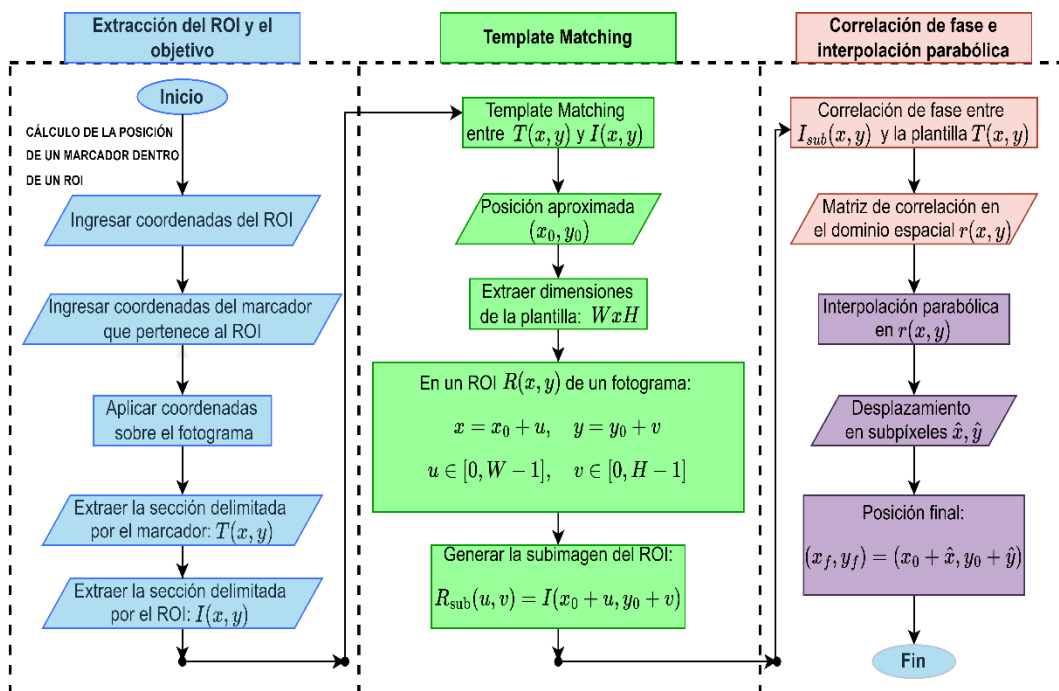


Nota: a) Comparación entre dos formas de onda (una registrada a nivel de subpíxel y otra a nivel de píxel), b) Acercamiento hacia una porción del gráfico.

Para mostrar de manera gráfica el impacto de los subpíxeles al momento de medir una señal, la Figura 29. es mostrada a continuación, obsérvese que la forma de onda de un seno de 0.5Hz de frecuencia y 1 mm de amplitud medida con subpíxeles (azul) representa mejor la onda senoidal de una forma más suavizada que la señal medida sin subpíxeles (rojo), que representa esta senoidal de una forma más escalonada.

Figura 30

Diagrama de flujo para el cálculo de la posición de un marcador dentro de un ROI.



Este proceso en conjunto de usar TM, correlación de fase y la interpolación parabólica, que se resume en la Figura 30, se repite en cada ROI con cada uno de sus marcadores.

4.1.5. Repetición del proceso para cada fotograma

El proceso anteriormente descrito, se repite para cada fotograma de cada grupo de fotogramas en los que fue dividido el video (N_{ND} grupos). En cada grupo los resultados para cada fotograma se van juntando en matrices. Finalmente, al terminarse de procesar todos los grupos, se unen estas matrices, creándose una matriz de desplazamientos donde se pueden observar los desplazamientos en ambas direcciones “x” y “y” para cada marcador en cada fotograma.

4.1.6. Conversión de unidades

Los desplazamientos calculados mediante el método están, inicialmente, en unidades de píxel, sin embargo, para fines de análisis ingenieriles es necesario expresar estas distancias en milímetros, para lo cual se usa un SF calculado mediante la siguiente expresión:

$$SF(mm/pixel) = \frac{\text{distancia real (mm)}}{\text{distancia virtual (píxel)}} \quad (4.14)$$

La distancia virtual se obtiene mediante las coordenadas de inicio y fin de la línea de SF seleccionada en el primer fotograma y viene a ser la distancia Euclidiana entre dichos puntos mediante la ecuación:

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4.15)$$

Donde $d(P_1, P_2)$ es la distancia virtual entre dos píxeles de coordenadas (x_1, y_1) y (x_2, y_2)

La distancia real entre los dos puntos seleccionados debe ser conocida por el usuario del programa.

Todos los desplazamientos calculados en la Sección 4.1.5 son entonces multiplicados por el SF para transformarlos en milímetros.

Debe de tenerse en cuenta que la precisión del SF dependerá en la precisión con la cual son escogidos los puntos inicial y final en la imagen digital. Adicionalmente, el SF debe ser medido en el mismo plano de movimiento del fenómeno que está siendo registrado. Debido a esto, es importante que el plano de movimiento del evento a registrar se mantenga siempre paralelo al plano de la cámara para evitar cambios en la profundidad que puedan modificar la SF. En consecuencia, es necesario también que el *zoom* de la cámara de video se mantenga con un valor constante para evitar cambios de profundidad que puedan alterar el SF a medida que transcurre el video (Feng y Feng, 2018).

En algunos casos, una calibración de la cámara puede ser requerida para corregir las diferentes distorsiones en las imágenes debidas a los diferentes tipos de lente. Sin embargo, debe ser recalcado que en los últimos años la mayoría de los celulares inteligentes y las cámaras de video en general incorporan ya eficientes algoritmos que instantáneamente remueven la distorsión de las lentes, tal como señala Kromanis et al. (2019), por lo que es posible utilizar la Ecuación 4.12 directamente.

4.1.7. Generación del archivo de salida

Finalmente, se genera un archivo de salida en formato .csv en los cuales se detallan al inicio como encabezado las propiedades del video, tales como nombre, resolución, fps, duración, entre otros, y se presentan los resultados a través de canales, donde a cada marcador rastreado le corresponden dos canales: primer canal para desplazamientos en dirección “x-”, segundo canal para la dirección “y-”. El modelo de archivo de salida puede ser visto en la Figura 31, donde la primera columna de datos indica el tiempo; y desde la segunda columna hacia adelante se describen la posición de cada marcador, primero en el eje “x-”, seguido de su posición en el eje “y-” para cada canal. Nótese que la imagen solo muestra las primeras filas del archivo. Finalmente, el diagrama de flujo del algoritmo puede observarse en la Figura 32.

Figura 31

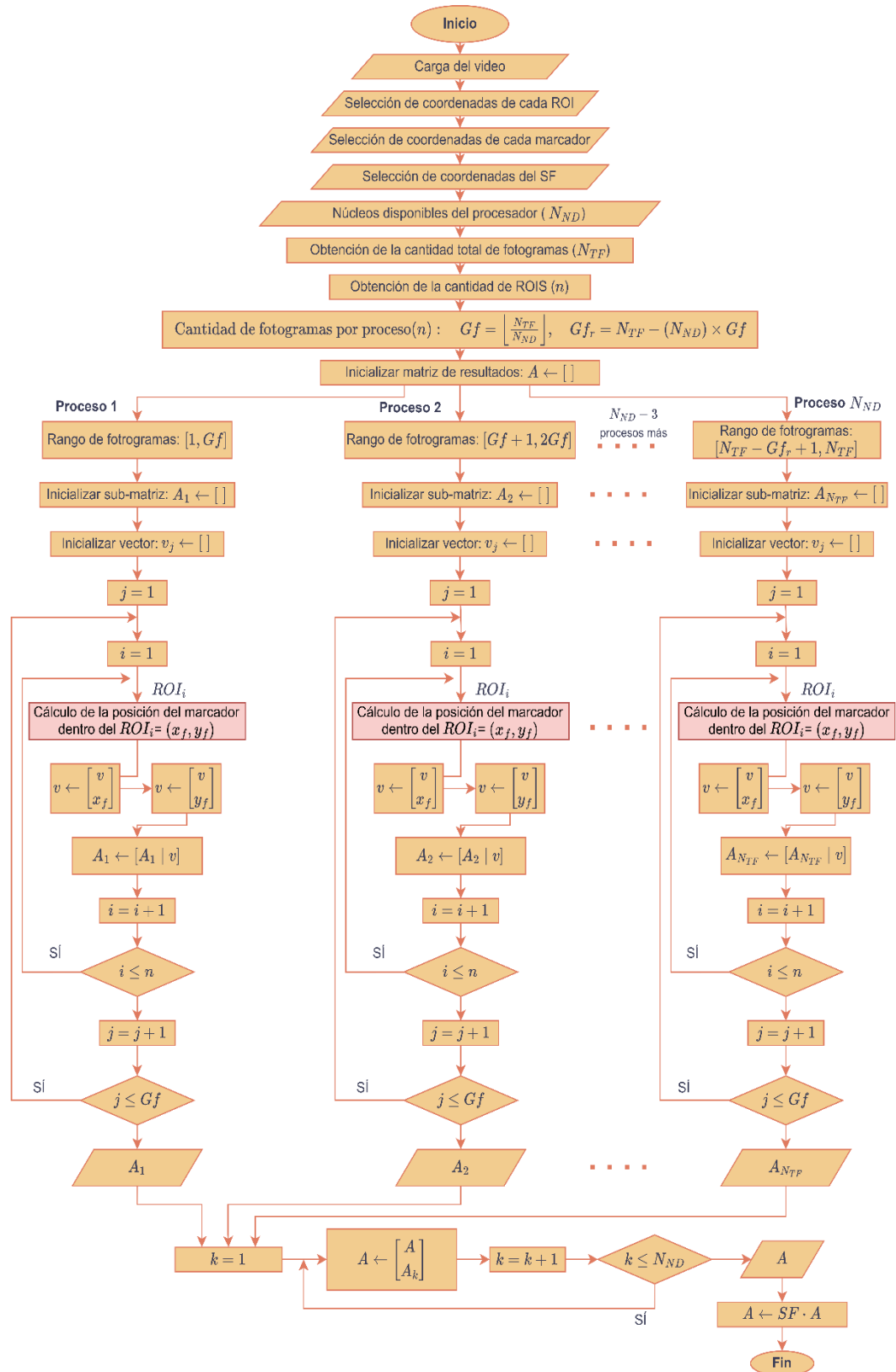
Modelo de archivo de salida del software.

```

2023-08-29_USIL_Espl1_results_video03.csv
1 Project name,2023-08-29_USIL_Espl
2 Video name,20230829-USIL_Espl_senal5
3 FPS,60
4 WIDTH,1920
5 HEIGHT,1080
6 TOTAL FRAMES,3780
7 REAL DISTANCE,30 mm
8 VIRTUAL DISTANCE,51.0 pix
9 SCALE FACTOR,0.5882352941176471 mm/pixel
10 ANGLE ROTATION,-0.0070 rad
11 VIDEO DURATION,01:03 min min
12 PROCESSING DURATION,8.319230079650879 seconds
13 TARGETS,3
14 TIME,CH1,CH2,CH3,CH4,CH5,CH6
15 0.00000000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000
16 0.01666667,0.0120,0.0293,0.0176,-0.0119,0.0063,0.0529
17 0.03333334,-0.0355,-0.0233,-0.0176,0.0001,-0.0291,0.0414
18 0.05000001,-0.0239,-0.0469,-0.0118,0.0001,-0.0236,-0.0057
19 0.06666668,0.0003,0.0471,-0.0296,-0.0292,-0.0769,-0.0642
20 0.08333335,-0.0056,0.0353,-0.0354,-0.0115,-0.0944,-0.0405
21 0.10000002,-0.0051,0.1177,0.0119,0.0234,-0.0762,0.0358
22 0.11666669,-0.0111,0.0942,0.0000,0.0000,-0.0530,-0.0055
23 0.13333336,-0.0115,0.0413,-0.0411,0.0062,-0.0239,-0.0469
24 0.15000003,0.0179,0.0411,-0.0234,0.0119,-0.0297,-0.0351
25 0.16666670,0.0298,0.0527,-0.0291,0.0414,-0.0294,0.0061
26 0.18333337,0.0475,0.0644,-0.0468,0.0415,-0.0118,-0.0058
27 0.20000004,-0.0054,0.0647,-0.0235,0.0060,-0.0123,-0.0764
28 0.21666671,-0.0350,0.0355,-0.0175,0.0237,-0.0121,-0.0529
29 0.23333338,-0.0762,0.0358,-0.0412,-0.0056,-0.0177,-0.0116
30 0.25000005,-0.0703,0.0417,-0.0176,0.0119,-0.0177,-0.0116
    
```

Figura 32

Diagrama de flujo del algoritmo.





4.2. Equipamiento que conforma el sistema de medición propuesto.

El sistema de medición propuesto está compuesto principalmente por el software, cuyo algoritmo ha sido descrito anteriormente, encargado de procesar las imágenes y de obtener la información requerida de desplazamientos, y de una cámara que se encarga de adquirir los datos mediante la grabación de los videos. Adicionalmente, se emplean materiales complementarios tales como marcadores artificiales, trípode, control remoto, cinta de doble contacto, computadora, entre otros. Los componentes se muestran en la Tabla 1, junto a una breve descripción.

Tabla 1

Elementos del sistema de medición propuesto

Componente	Características / Requerimientos	Imagen de referencia
Cámara filmadora de video CFDR-AX43A – Sony	Graba en 24, 30, 60 y 120 fps Zoom óptico x20 Resolución: 1920x1080 Full HD (120/60/30/24 fps). 3840x2160 4K (24 fps)	
Marcadores	Marcadores de alto contraste Patrón circular Dimensiones: 2, 3, o 4 cm de lado	
Computadora	Software instalado	-
Otros	Trípode y cinta adhesiva	-

4.2.1. Cámara de video

La cámara es el componente más crucial en la adquisición de imágenes, juega un papel fundamental en la calidad y precisión de las mediciones obtenidas por el sistema. Los aspectos más determinantes al seleccionar una cámara para los objetivos de esta tesis son su resolución, la cantidad de fps a la que es capaz de grabar, y su capacidad de *zoom* óptico. La resolución de la cámara define el número de píxeles distribuidos en las direcciones horizontal y vertical, lo que a su vez determina la nitidez y el detalle de las imágenes capturadas, de acuerdo con Jähn (2018). Por otro lado, una mayor cantidad de fotogramas por segundo permite capturar movimiento con mayor fluidez y precisión, mientras que un *zoom*

óptico eficaz facilita la obtención de imágenes claras de objetos distantes sin comprometer la calidad de la imagen

La resolución de la imagen es un factor que determinará la precisión de la medición. A mayor cantidad de píxeles, la imagen tendrá una mayor discretización y, por lo tanto, una mayor cantidad de información. Además, mientras más píxeles contenga la línea de SF, este será menor, por lo que el desplazamiento mínimo posible a detectar es también menor.

La cantidad de fps es la tasa a la que será muestreada el registro obtenido por este sistema de medición. La cantidad de fps necesarias para describir bien el registro dependerá del contenido de frecuencias de esta, de acuerdo con Nyquist. Por lo que es correcto declarar que mientras más alta sea la tasa de fps de la cámara con relación a la frecuencia de vibración del punto objetivo, será posible medir registros con más amplio espectro de frecuencia.

El *zoom* óptico permitirá al sistema de medición acercarse o alejarse de un marcador sin perder calidad en la imagen y sin necesidad de mover la cámara del lugar donde fue instalada para grabar.

En base a los requerimientos mencionados, la cámara FDR-AX43A de Sony es seleccionada para formar parte del sistema de medición. Dicha cámara permite una grabación de video de hasta 120 fps a una resolución Full HD, es decir 1920x1080p, permitiendo además un *zoom* óptico de 20x, y el costo oscila a la fecha entre novecientos y mil cien dólares (Sony, 2024).

4.2.2. Marcador

Los marcadores son aquellas imágenes que rastrear por el algoritmo. En el siguiente sistema los marcadores son impresos en papel, además cuentan con un patrón circular concéntrico de alto contraste. Estos pueden ser de dos, tres o cuatro centímetros de lado; el tamaño es escogido teniendo en cuenta la lejanía a la cual estará la cámara del marcador y el tamaño de este.

El software es capaz de rastrear marcadores naturales; estos son elementos presentes en la escena del video que no fueron colocados intencionalmente por los usuarios y que poseen una forma única y no repetitiva, como un tornillo, una esquina o una protuberancia. Sin embargo, de acuerdo con diversas investigaciones, tales como las realizadas por Xu y Brownjohn (2017), Zhuang et al. (2022) y Feng y Feng (2016), la precisión de los sistemas de medición basados en visión por computadora mejora significativamente cuando se utilizan marcadores artificiales de alto contraste en lugar de los naturales.

El patrón circular escogido es debido a que el TM no contempla una posible rotación del objeto rastreado. Al rastrear un marcador circular, al rotar este, la apariencia no cambia y el TM es posible de ser utilizado en estos casos.

4.2.3. Computadora

La computadora, no tiene unas especificaciones definidas, sin embargo, mientras más rápido sea el procesador de está y mayor número de núcleos e hilos disponibles tenga, el software procesará más rápido los videos. Los tiempos de procesamiento suelen ser menores que la duración del video mismo.

4.2.4. Otros instrumentos

Entre los instrumentos secundarios se encuentra el trípode donde se monta la cámara, el cual debe ser estable. Así mismo, para el caso de las mediciones en planta desde arriba, un brazo tipo rack es utilizado para el soporte, el cual también debe ser estable. Finalmente, la cinta de doble contacto tiene la función de adherir los marcadores a la zona a medir y es muy conveniente debido a su alta resistencia y facilidad de uso.

4.3. Validación del sistema de medición propuesto basado en visión por computador

4.3.1. Descripción del proceso de validación

Se llevaron a cabo mediciones de los movimientos de la mesa vibradora de seis grados de libertad del en el Laboratorio de Estructuras del CISMID FIC-UNI cuando fue sometida a movimientos armónicos y sísmicos. La Figura 33. muestra la mesa vibradora utilizada. La Tabla 2 describe las formas de onda enviadas a la mesa vibradora.

En total, trece formas de onda fueron enviadas a la mesa vibradora, y el movimiento fue registrado a través de la cámara (con dos marcadores adheridos a la mesa), un sensor láser de desplazamiento y dos acelerómetros. Dos marcadores fueron usados en lugar de uno para demostrar que el sistema propuesto puede describir el movimiento de múltiples puntos a la vez en un solo procesamiento. Adicionalmente, un acelerómetro fue utilizado para medir las aceleraciones de la cámara, que en todo momento del ensayo estuvo situada a dos metros de la mesa, esto con el fin de observar el movimiento presente en la cámara debido a viento, vibración del suelo y otras condiciones de ruido. Es importante mencionar que la mesa vibradora fue en todo momento restringida para moverse en solo una dirección, en dirección lo más paralela posible al plano de la cámara, para evitar los cambios de profundidad. En la Figura 34. se puede

observar toda la configuración de sensores e instrumentos para llevar a cabo el ensayo.

Tabla 2

Descripción de las formas de ondas enviadas a la mesa vibradora.

N°	Descripción de la forma de onda
1	Onda armónica de 1 mm de amplitud y 0.5 Hz de frecuencia
2	Onda armónica de 1mm de amplitud y 1 Hz de frecuencia
3	Onda armónica de 1mm de amplitud y 5 Hz de frecuencia
4	Onda armónica de 1mm de amplitud y 10 Hz de frecuencia
5	Onda armónica de 1mm de amplitud y 15 Hz de frecuencia
6	Onda armónica de 1mm de amplitud y 20 Hz de frecuencia
7	Onda armónica de 5mm de amplitud y 0.5 Hz de frecuencia
8	Onda armónica de 5mm de amplitud y 1 Hz de frecuencia
9	Onda armónica de 5mm de amplitud y 5 Hz de frecuencia
10	Onda armónica de 5mm de amplitud y 8 Hz de frecuencia
11	Terremoto "El centro" 1940 California, Estados Unidos
12	Sismo Lima 1966. Estación Parque de la Reserva Lima Perú
13	Sismo Lima 1974. Estación Parque de la Reserva Lima, Perú

Figura 33

Mesa vibradora de seis grados de libertad dentro del Laboratorio de Estructuras en el CISMID FIC-UNI.

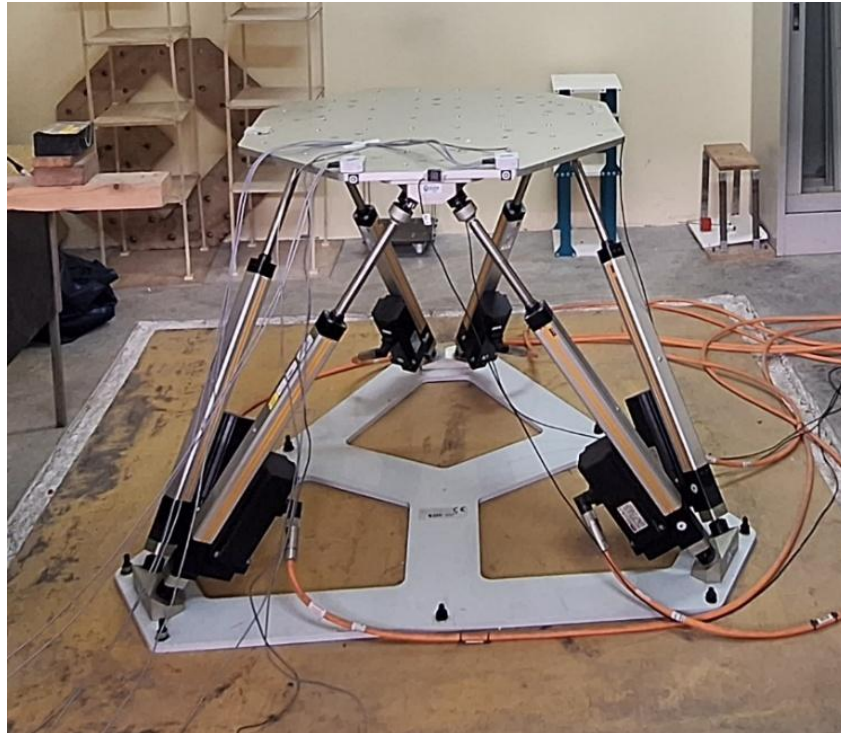
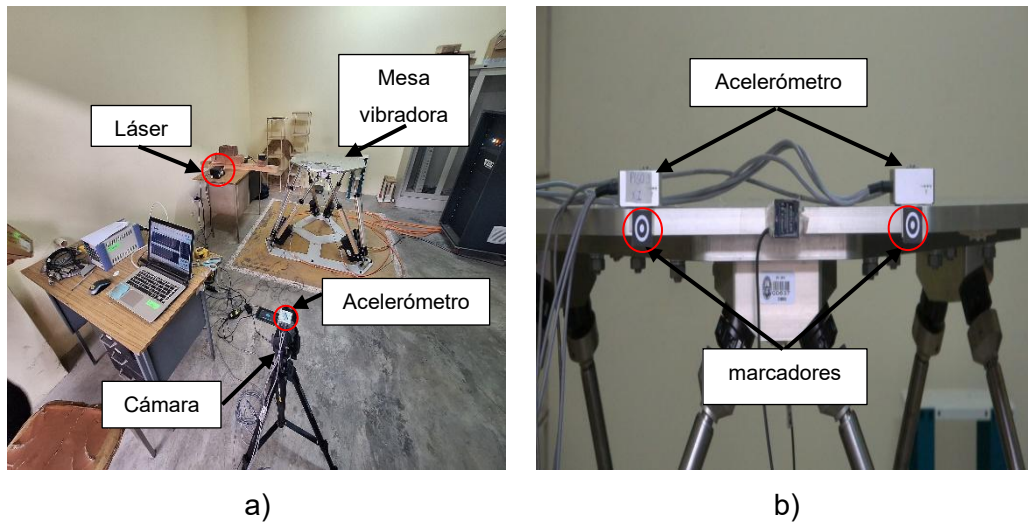


Figura 34

Disposición de equipos en el laboratorio



Nota: a) Configuración de equipos para el ensayo. b) Vista desde la cámara.

4.3.2. Procedimiento para medir la similitud entre dos registros

La métrica utilizada para comparar dos registros a partir de dos instrumentos de medición distintos es el error cuadrático medio normalizado o NRMSE por sus siglas en inglés, tal como lo usa Feng y Feng (2016). La fórmula es descrita en la Ecuación 4.16.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - x_i)^2}{n}}}{x_{max} - x_{min}} \times 100\% \quad (4.16)$$

Donde n es la cantidad total de datos medidos, x'_i es la medición esperada, que corresponde a la medida del sensor láser de desplazamiento, x_i , es la medida leída por el sistema de medición a validar, x_{max} y x_{min} hacen referencia al máximo y al mínimo valor de las mediciones hechas por el sistema de medición a validar. La normalización, como puede observarse, es llevada a cabo con respecto al rango de valores registrados por el sistema de medición.

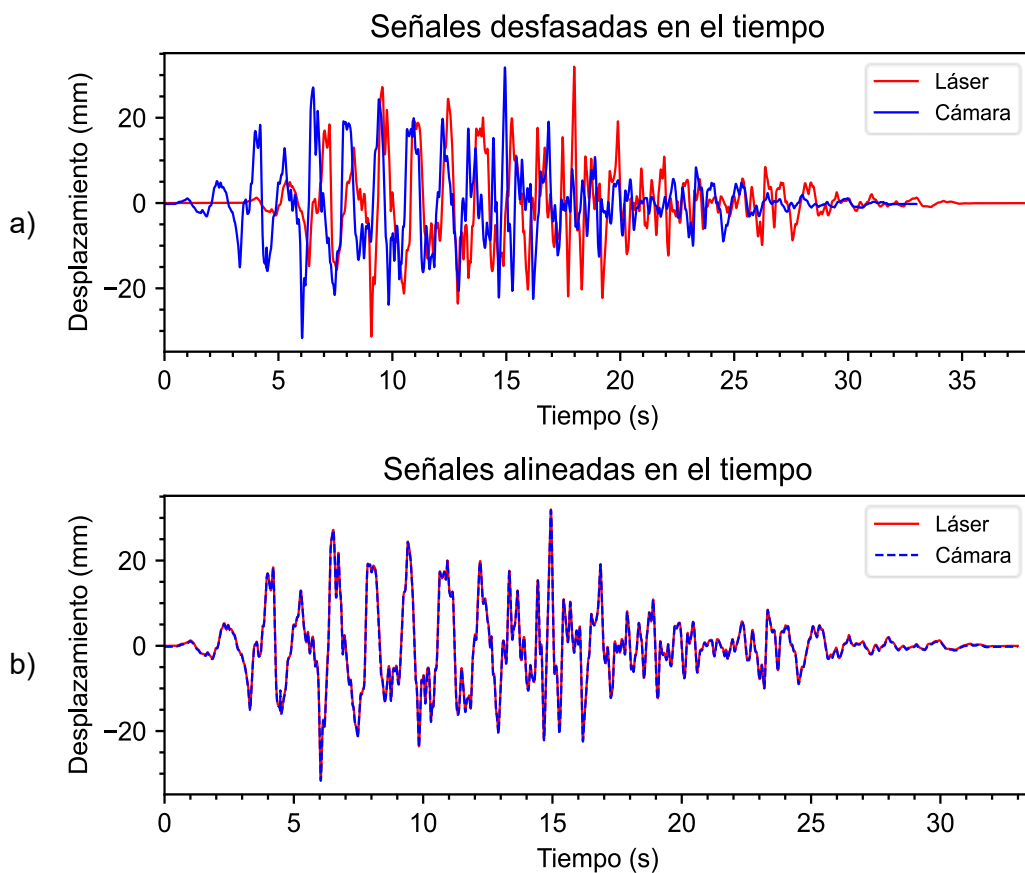
Para llevar a cabo la comparación mediante NRMSE, es necesario que ambos registros tengan la misma cantidad de datos y estén alineadas en el tiempo. Para ello primero es necesario igualar la frecuencia de muestreo (F_{m1}) del adquisidor dinámico (un dispositivo que recopila la información tanto del sensor láser de desplazamiento como la de los acelerómetros) con la F_{m2} de la cámara. El adquisidor dinámico en este ensayo operaba con una frecuencia de muestreo de 200 Hz, mientras que la cámara hacía lo propio a 120 Hz. En este y todos los

casos, se opta por submuestrear el registro de mayor frecuencia hasta igualar a la de menor frecuencia, con el fin de preservar el registro obtenido mediante el sistema propuesto.

El proceso de alineamiento en el tiempo para ambos registros es llevado a cabo mediante una correlación discreta entre ambos utilizando la Ecuación 2.4. La aplicación de técnicas de correlación permite una comprensión más profunda y precisa del desfase temporal óptimo entre dos registros para alcanzar un alineamiento adecuado. Esto se ilustra en la Figura 35.

Figura 35

Registros desfasados en el tiempo



Nota: a) Registros desfasados en el tiempo. b) Registros luego de ser alineadas mediante el uso de la correlación.

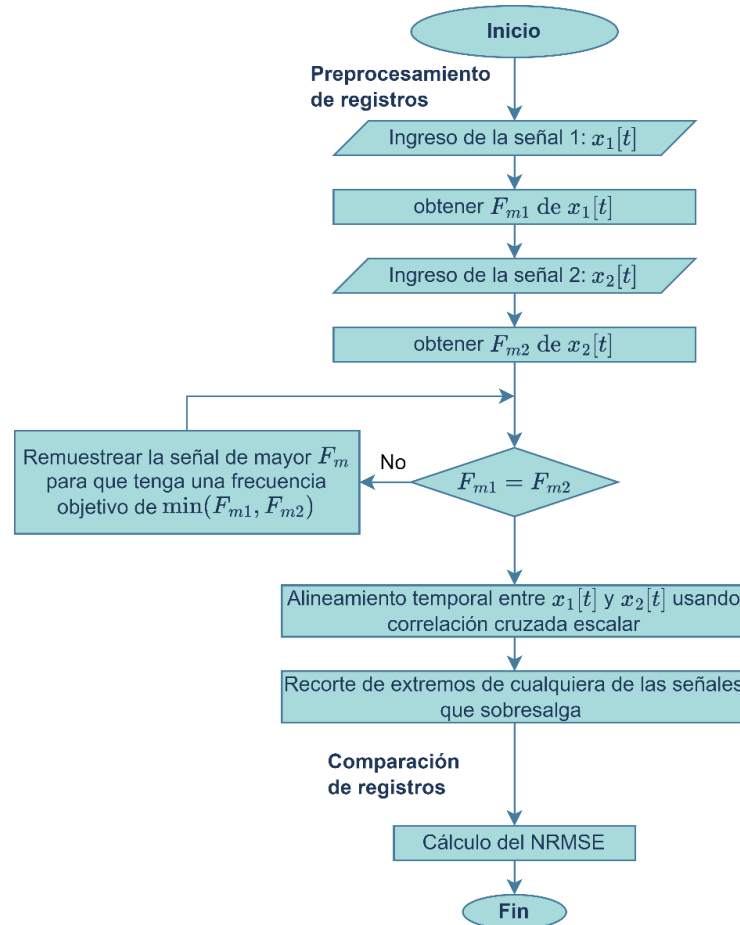
Una vez completado el alineamiento temporal, es necesario recortar los extremos de cualquiera de los registros que sobresalga, asegurando así que ambas tengan la misma cantidad de datos antes de proceder con la comparación. Este ajuste final garantiza la coherencia en la evaluación del error cuadrático medio normalizado y evita distorsiones en el análisis. El proceso de remuestrear,

alinearse, y recortar registros será llamado como preprocesamiento de registros y tendrá como objetivo su posterior comparación.

La Figura 36 presenta el diagrama de flujo para la comparación entre dos registros. Este mismo procedimiento es aplicado para las comparaciones de registros en Capítulo V.

Figura 36

Diagrama de flujo para comparación de registros.



4.3.3 Mediciones efectuadas

Los registros anteriormente descritos en la Tabla 4.2. son reproducidas por la mesa vibradora, y los desplazamientos efectuados por la mesa son medidos utilizando distintos sistemas de medición: el sensor láser de desplazamiento, acelerómetros (doble integración) y la cámara (visión por computador).

Los valores de desplazamiento obtenidos a través de la doble integración de los registros de aceleración son efectuados siguiendo los pasos descritos en la Sección 2.6.3. del marco teórico.

Los valores máximos, mínimos, frecuencias dominantes, registrados por cada sistema están descritos en las Tablas 3, 4 y 5 para el sensor láser de

desplazamiento, los acelerómetros y el sistema de medición propuesto respectivamente.

Tabla 3

Desplazamientos medidos con el sensor láser de desplazamiento.

Láser			
N°	Máx. (mm)	Mín. (mm)	Frec. (Hz)
1	0.999	-1.000	0.500
2	1.020	-1.020	1.000
3	1.028	-1.028	5.000
4	1.085	-1.085	10.001
5	1.408	-1.408	15.001
6	1.062	-1.065	20.002
7	5.108	-5.108	0.500
8	5.087	-5.087	1.000
9	5.202	-5.201	5.000
10	5.774	-5.759	8.001
11	4.282	-5.894	0.167
12	23.761	-27.576	0.864
13	31.920	-31.335	0.697

Tabla 4

Desplazamientos obtenidos con la doble integración de las aceleraciones obtenidas de los acelerómetros.

N°	Cámara (Izquierda)			Cámara (derecha)		
	Máx. (mm)	Mín. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (mm)	Mín. (mm)	Frec. (Hz)
1	0.996	-0.997	0.500	0.968	-0.966	0.500
2	1.022	-1.022	1.000	0.985	-0.985	1.000
3	1.046	-1.045	5.000	1.007	-1.008	5.000
4	1.101	-1.101	10.001	1.073	-1.073	10.001
5	1.387	-1.387	15.001	1.353	-1.353	15.001
6	1.079	-1.065	20.002	1.052	-1.036	20.002
7	5.096	-5.102	0.500	4.956	-4.960	0.500
8	5.090	-5.085	1.000	4.957	-4.953	1.000
9	5.224	-5.225	5.000	5.092	-5.093	5.000
10	5.789	-5.790	8.001	5.639	-5.637	8.001
11	4.277	-5.842	0.167	4.181	-5.721	0.167
12	23.718	-27.549	0.864	23.110	-26.831	0.864
13	31.763	-31.314	0.697	30.971	-30.518	0.697

Tabla 5*Desplazamientos medidos con la cámara mediante visión por computador.*

N°	Doble integración (Izquierda)			Doble Integración (derecha)		
	Máx. (mm)	Mín. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (mm)	Mín. (mm)	Frec. (Hz)
1	1.139	-1.182	0.500	1.109	-1.217	0.500
2	1.153	-1.184	1.000	1.187	-1.224	1.000
3	1.007	-1.007	5.000	0.992	-0.993	5.000
4	1.073	-1.073	10.001	1.058	-1.057	10.001
5	1.371	-1.371	15.001	1.379	-1.379	15.001
6	1.022	-1.022	20.002	1.017	-1.017	20.002
7	5.064	-5.290	0.500	5.144	-5.230	0.500
8	5.186	-5.383	1.000	5.066	-5.080	1.000
9	5.131	-5.131	5.000	5.089	-5.090	5.000
10	5.676	-5.662	8.001	5.686	-5.685	8.001
11	3.412	-3.838	0.370	3.442	-3.550	0.370
12	24.099	-26.520	0.864	24.476	-26.481	0.864
13	34.133	-29.471	0.697	34.702	-30.035	0.697

4.3.4. Comparaciones

El principal sistema de medición a usar como referencia para las comparaciones es el sensor láser de desplazamiento. Esto debido a que su precisión es confiable y es el principal instrumento de medición de desplazamientos en el laboratorio, además mide los desplazamientos de manera directa. El sensor láser de desplazamiento está por encima, en lo que a medición de desplazamientos concierne, a la doble integración de los registros de aceleración obtenidas por los acelerómetros. Obtener los desplazamientos mediante doble integración de un registro de aceleraciones implica realizar una serie de cálculos mediante métodos numéricos los cuales son todos aproximados, necesitan correcciones de línea base y filtrados de frecuencia más de una vez en el proceso. Es por ello por lo que todo desplazamiento calculado a partir de aceleraciones es aproximado y pierde una gran cantidad de información, pero muchas veces es inevitable de realizar debido a la dificultad en general para medir los desplazamientos directamente en dos direcciones y en múltiples puntos en simultáneo.

Inicialmente, la cámara es comparada con el sensor láser de desplazamiento. La gran desventaja del sensor láser de desplazamiento frente a la cámara es que solo es capaz de monitorear un punto determinado a la vez,

mientras que el monitoreo por visión por computador puede monitorear tantos como se necesiten. Debido a este motivo, la cámara registra desplazamientos de los marcadores izquierdo y derecho, mientras que el sensor láser de desplazamiento solo registra un desplazamiento en general para toda la mesa en dirección X-. Como se puede observar en la Tabla 5 La cámara de video registra desplazamientos distintos para cada marcador, donde por lo general el marcador izquierdo tiene una mayor amplitud de movimiento, lo cual es comprobado en la Figura 37 y en el resto de registros de aceleraciones representados gráficamente en el ANEXO 1 en el cual se evidencia que los acelerómetros también registran una mayor amplitud en las aceleraciones en un marcador con respecto a otro (generalmente en el lado izquierdo), por lo que se demuestra que ambos marcadores no se desplazan igual; esto debido probablemente a algún pequeño giro de la mesa, a su vez debido a que no logra restringir por completo los demás grados de libertad. En los gráficos del ANEXO 1 y en la Figura 37 las leyendas muestran la magnitud máxima de la aceleración para el lado izquierdo (“izq”) y para el derecho (“der”).

Figura 37

Acelerogramas para los registros 2 y 13 del ensayo de validación del sistema propuesto.

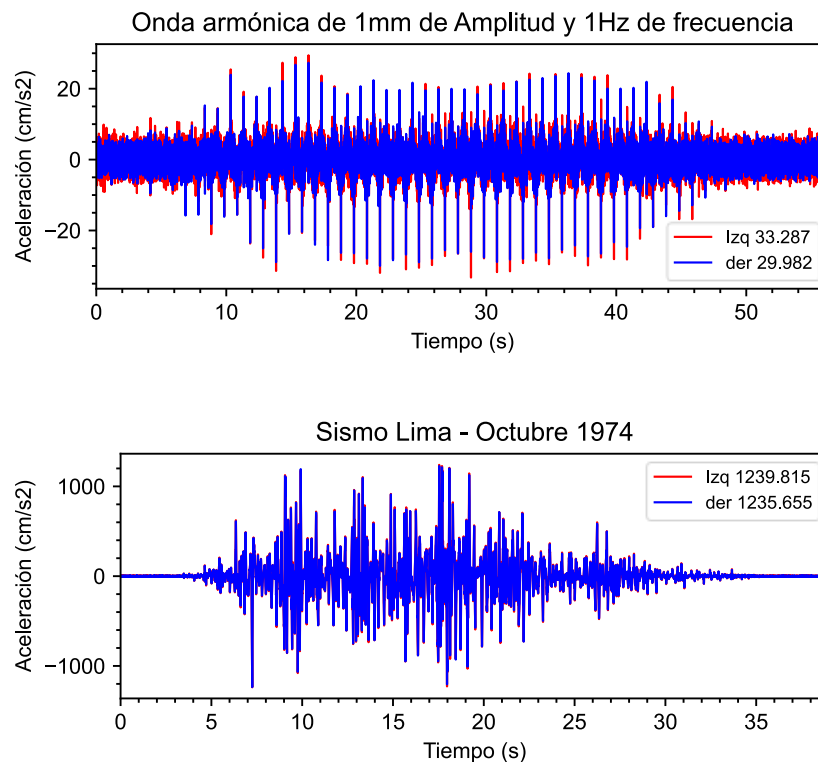


Tabla 6

Cámara (marcador izquierdo) vs sensor láser de desplazamiento.

Cámara (izquierda) VS láser				
N°	Max. (%)	Min. (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	0.300	0.300	0.000	0.398
2	0.196	0.196	0.000	0.498
3	1.751	1.654	0.000	0.184
4	1.475	1.475	0.000	0.364
5	1.491	1.491	0.000	0.721
6	1.601	0.000	0.000	1.471
7	0.235	0.117	0.000	0.361
8	0.059	0.039	0.000	0.478
9	0.423	0.461	0.000	0.214
10	0.260	0.538	0.000	0.530
11	0.117	0.882	0.000	0.316
12	0.181	0.098	0.000	0.237
13	0.492	0.067	0.000	0.093

Tabla 7

Cámara (marcador derecho) vs sensor láser de desplazamiento

Cámara (derecha) VS láser				
N°	Max. (%)	Min. (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	3.103	3.400	0.000	0.907
2	3.431	3.431	0.000	0.963
3	2.043	1.946	0.000	0.204
4	1.106	1.106	0.000	0.360
5	3.906	3.906	0.000	0.723
6	0.942	2.723	0.000	1.481
7	2.976	2.897	0.000	0.885
8	2.556	2.634	0.000	0.899
9	2.115	2.077	0.000	0.224
10	2.338	2.118	0.000	0.521
11	2.359	2.935	0.000	0.448
12	2.740	2.702	0.000	0.335
13	2.973	2.607	0.000	0.345

La similitud entre las mediciones obtenidas por el sistema propuesto y el láser es evidente a partir de los resultados mostrados en las Tablas 6 y 7 tanto en el tiempo historia, como en las frecuencias predominantes. Adicionalmente, las

Tablas 8 y 9 son presentadas, donde se compara la doble integración y el sistema propuesto, ambos contra el sensor láser de desplazamiento, para cada marcador por separado.

Tabla 8

Doble integración (marcador izquierdo) vs sensor láser de desplazamiento

Doble integración (izquierda) VS láser				
N°	Max. (%)	Min. (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	14.014	18.200	0.000	6.398
2	13.039	16.078	0.000	6.008
3	2.043	2.043	0.000	1.812
4	1.106	1.106	0.000	3.273
5	2.628	2.628	0.000	4.983
6	3.766	4.038	0.000	6.227
7	0.861	3.563	0.000	2.158
8	1.946	5.819	0.000	2.367
9	1.365	1.346	0.000	1.695
10	1.697	1.684	0.000	2.486
11	20.318	34.883	121.557	7.449
12	1.422	3.829	0.000	0.788
13	6.933	5.949	0.000	1.338

Tabla 9

Doble integración (marcador derecho) vs sensor láser de desplazamiento

Doble integración (derecha) VS láser				
N°	Max. (%)	Min. (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	11.011	21.700	0.000	7.165
2	16.373	20.000	0.000	6.287
3	3.502	3.405	0.000	1.916
4	2.488	2.581	0.000	3.083
5	2.060	2.060	0.000	4.642
6	4.237	4.507	0.000	5.638
7	0.705	2.388	0.000	2.202
8	0.413	0.138	0.000	2.197
9	2.172	2.134	0.000	1.552
10	1.524	1.285	0.000	2.245
11	19.617	39.769	121.557	7.285
12	3.009	3.971	0.000	0.873
13	8.716	4.149	0.000	2.070

Las abreviaturas Max., Min. Y Frec. en las tablas, hacen referencia a los valores máximos, mínimos y la frecuencia predominante en el registro, respectivamente. Las respuestas máximas se diferencian máximo en un 1.601% y los NRMSE son menores a 0.5% en todos los casos, salvo en las formas de onda de 10Hz y 20Hz de frecuencia, que son donde se presenta una menor similitud. Para el caso de los marcadores de la derecha, estos errores aumentan debido a que siguen siendo comparados contra el único desplazamiento que es capaz de medir el sensor láser de desplazamiento, que debido a que cada marcador se mueve y acelera distinto tal como se expresa párrafos atrás y se demuestra en el ANEXO 1, no se tiene una medida real del sensor láser de desplazamiento en dicho lado derecho. La similitud se hace evidente también de forma gráfica tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de las frecuencias, tal como puede ser observado en las Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42, donde se escogieron los tres registros y dos ondas.

Tabla 10

NRMSE para la cámara vs sensor láser de desplazamiento (izquierda y derecha) y para la doble integración vs sensor láser de desplazamiento (izquierda y derecha)

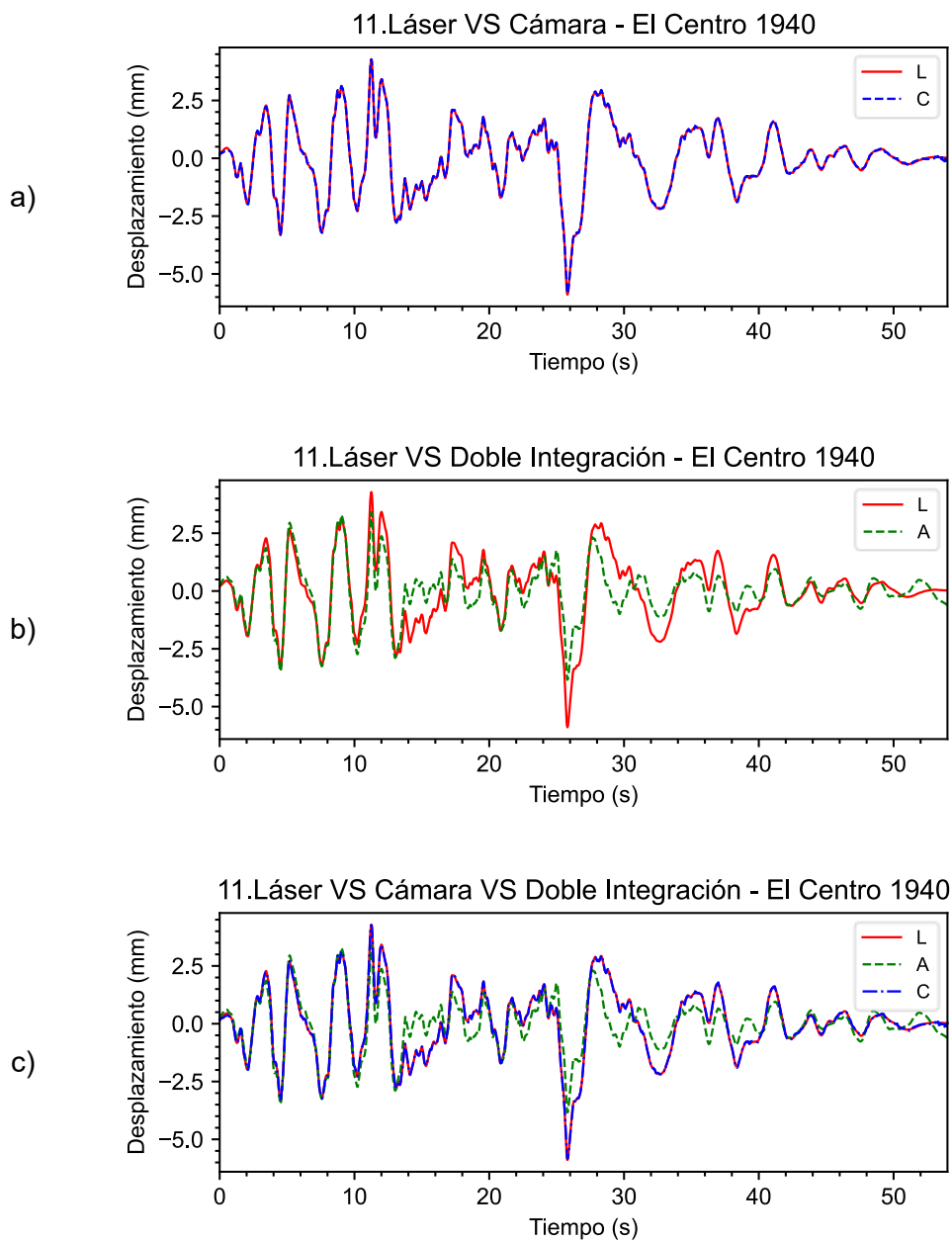
N°	NRMSE			
	Cámara (izq)	Cámara (der)	Doble Integración (izq)	Doble Integración (der)
1	0.398	0.907	6.398	7.165
2	0.498	0.963	6.008	6.287
3	0.184	0.204	1.812	1.916
4	0.364	0.360	3.273	3.083
5	0.721	0.723	4.983	4.642
6	1.471	1.481	6.227	5.638
7	0.361	0.885	2.158	2.202
8	0.478	0.899	2.367	2.197
9	0.214	0.224	1.695	1.552
10	0.530	0.521	2.486	2.245
11	0.316	0.448	7.449	7.285
12	0.237	0.335	0.788	0.873
13	0.093	0.345	1.338	2.070

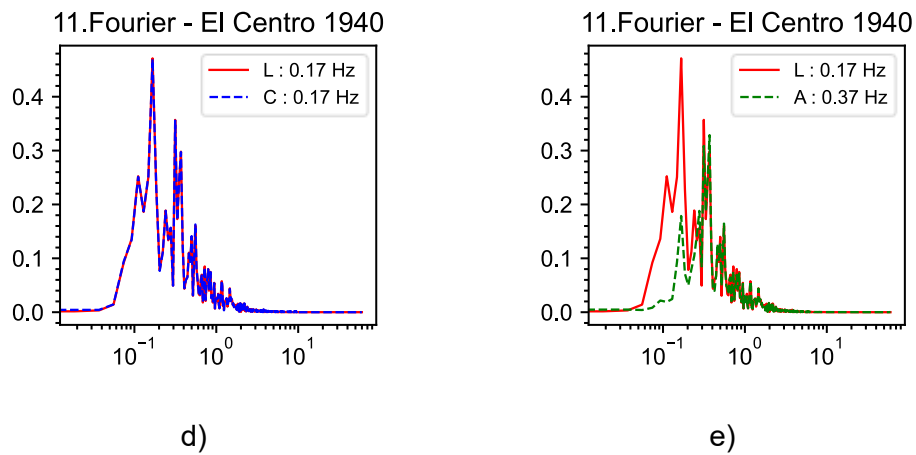
El resto de los registros graficados pueden verse en el ANEXO 2. Por otro lado, los resultados indican que la similitud entre las mediciones de la cámara (al

igual que el sensor láser de desplazamiento) y la doble integración es menor, aunque aún aceptable en la mayoría de los casos. Esto último es completamente esperable, debido a que la doble integración es un método aproximado y presenta desventajas que ya han sido explicadas. Una comparación entre los NRMSE obtenidos entre el sistema vasado en visión por computadora versus el sensor láser de desplazamiento y la doble integración vs el sensor láser de desplazamiento, es mostrada de una forma más concisa en la Tabla 10

Figura 38

Registro del terremoto El Centro

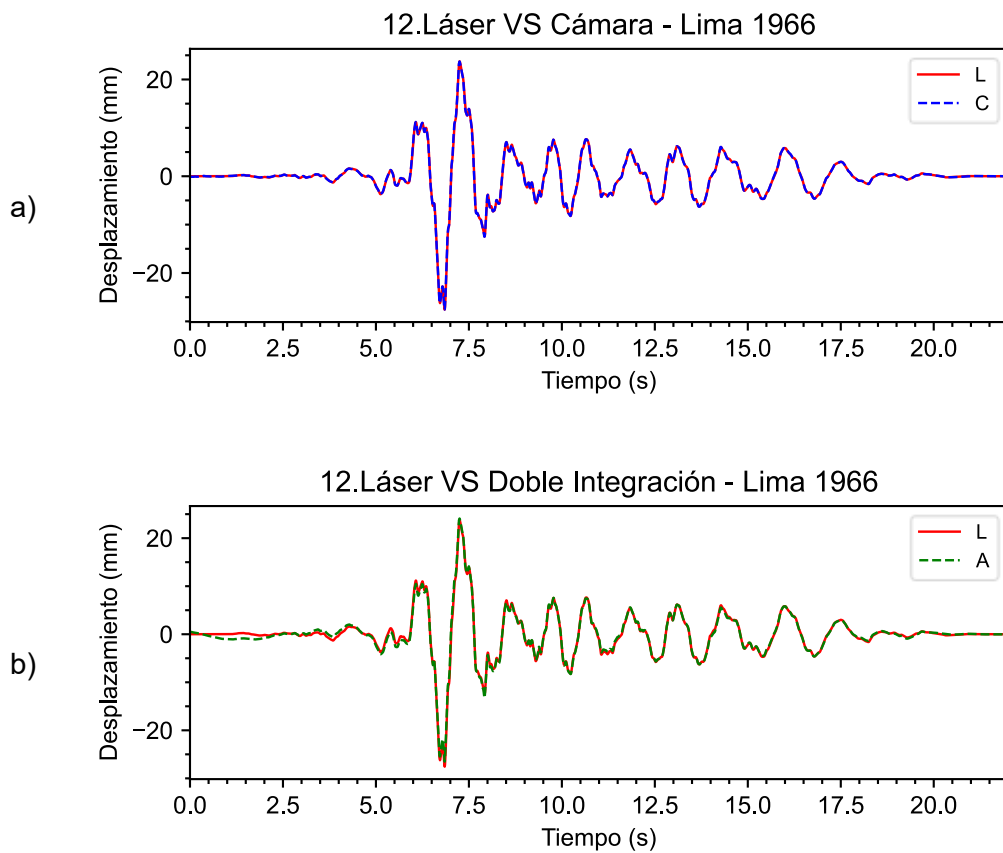


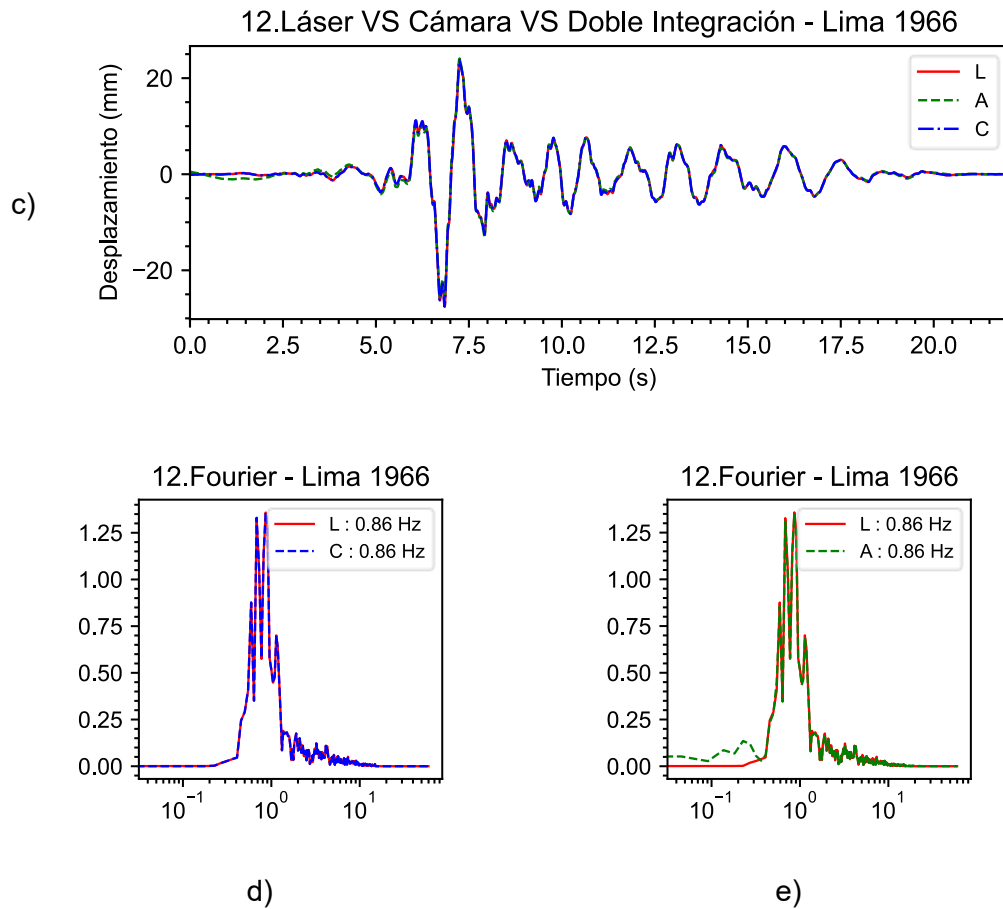


Nota: a) Tiempo historia láser (L) vs cámara (C). b) Tiempo historia láser vs doble integración (A), c) Tiempo historia comparando los tres sistemas de medición a la vez. d) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la cámara. e) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la doble integración.

Figura 39

Registro del terremoto Lima 1966

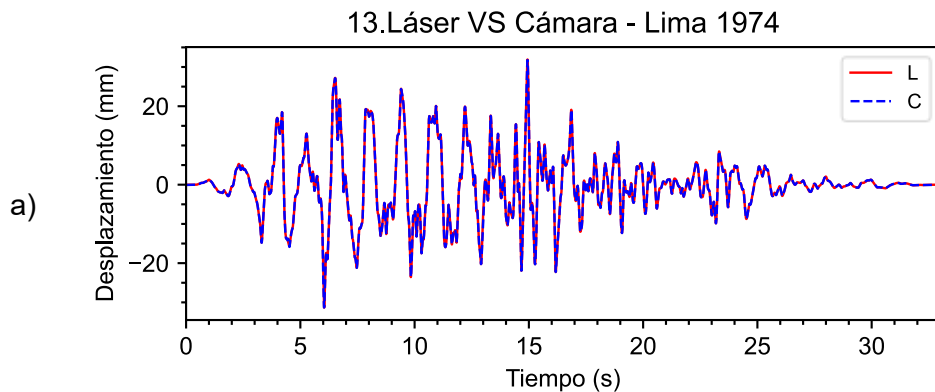


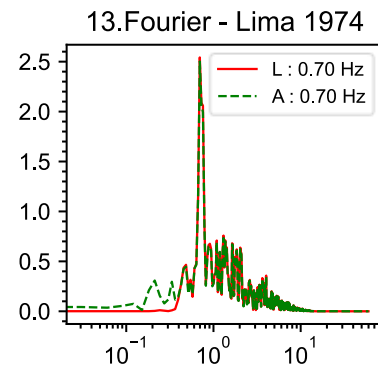
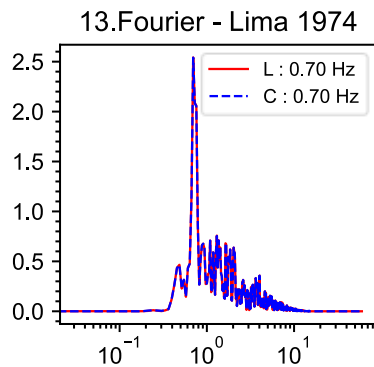
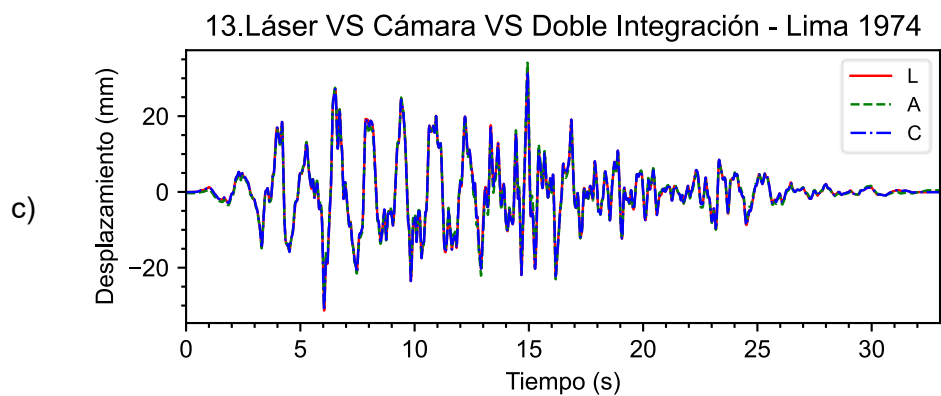
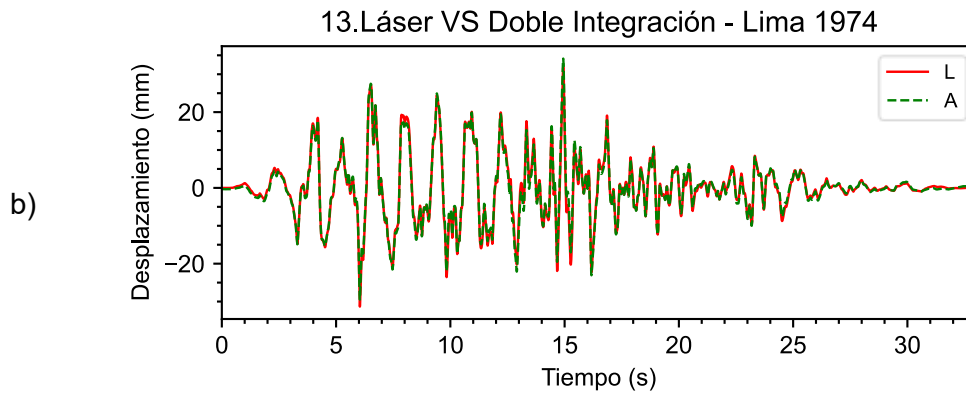


a) Tiempo historia láser (L) vs cámara (C). b) Tiempo historia láser vs doble integración (A), c) Tiempo historia comparando los tres sistemas de medición a la vez. d) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la cámara. e) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la doble integración.

Figura 40

Registro del terremoto Lima 1974

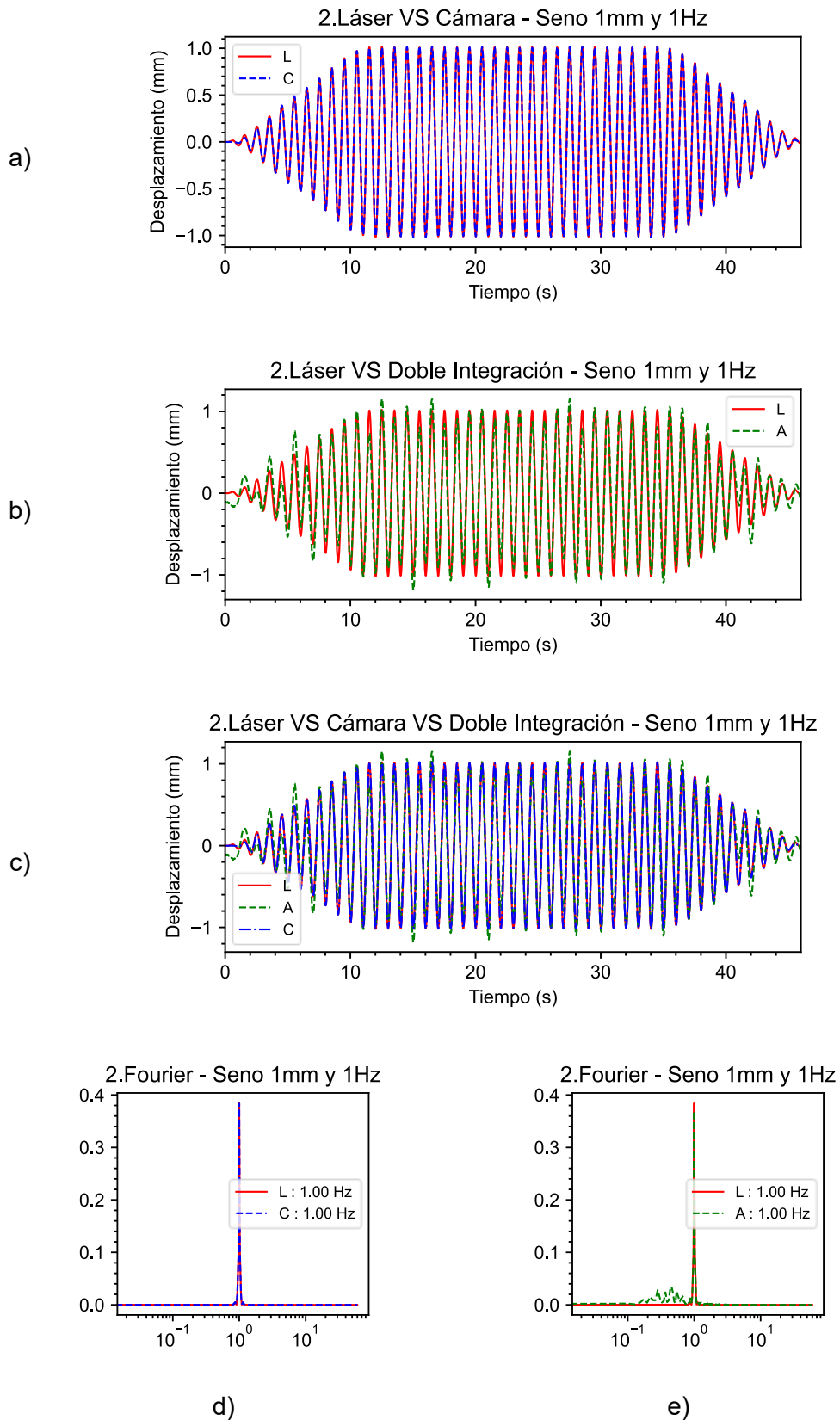




a) Tiempo historia láser (L) vs cámara (C). b) Tiempo historia láser vs doble integración (A), c) Tiempo historia comparando los tres sistemas de medición a la vez. d) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la cámara. e) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la doble integración.

Figura 41

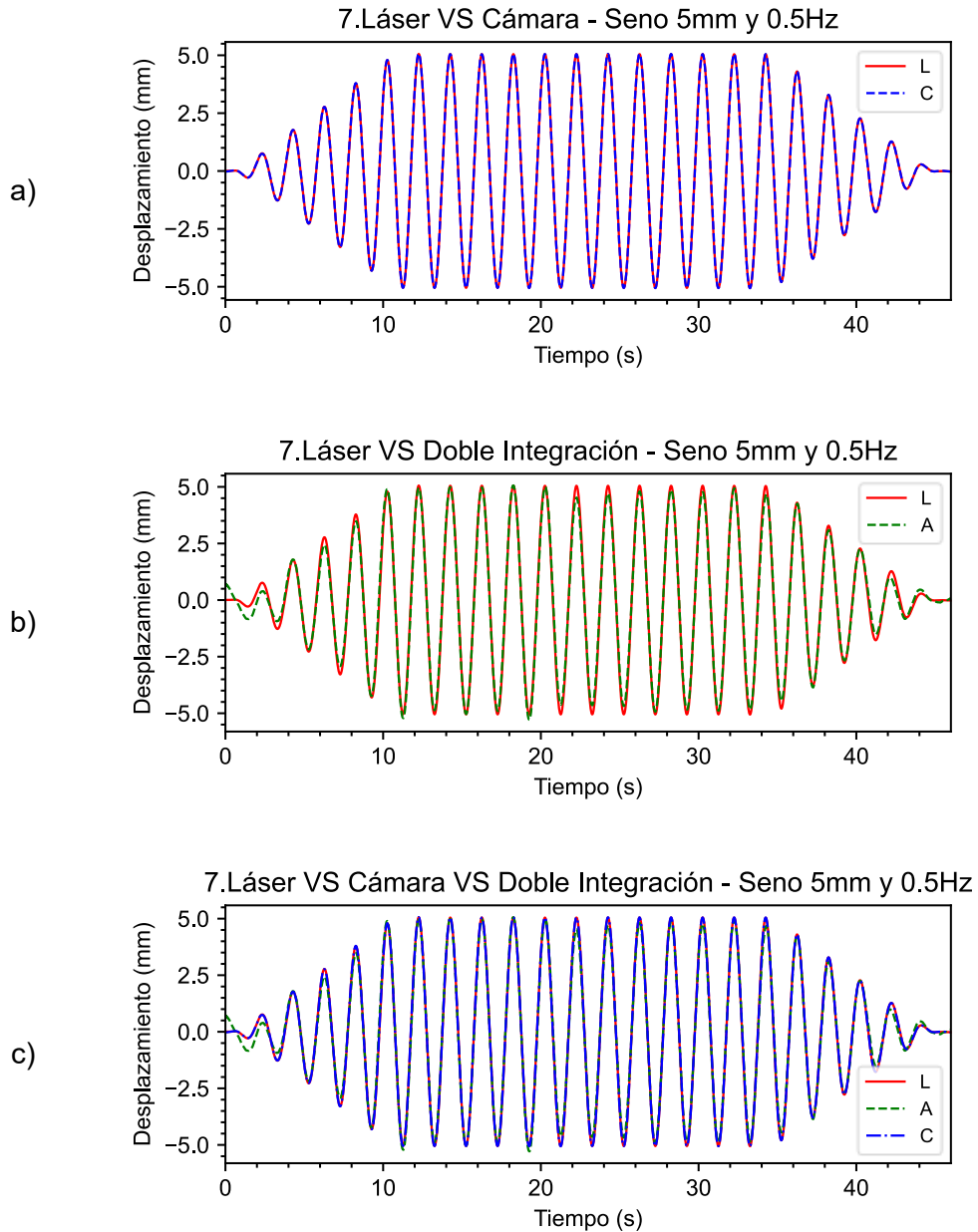
Onda sinusoidal de 1 mm de amplitud y 1 Hz de frecuencia

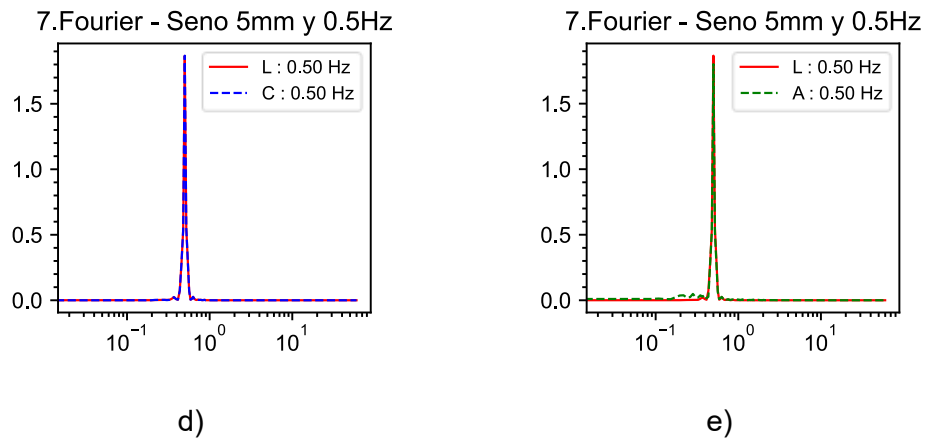


a) Tiempo historia láser (L) vs cámara (C). b) Tiempo historia láser vs doble integración (A), c) Tiempo historia comparando los tres sistemas de medición a la vez. d) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la cámara. e) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la doble integración.

Figura 42

Onda sinusoidal de 5 mm de amplitud y 0.5 Hz de frecuencia



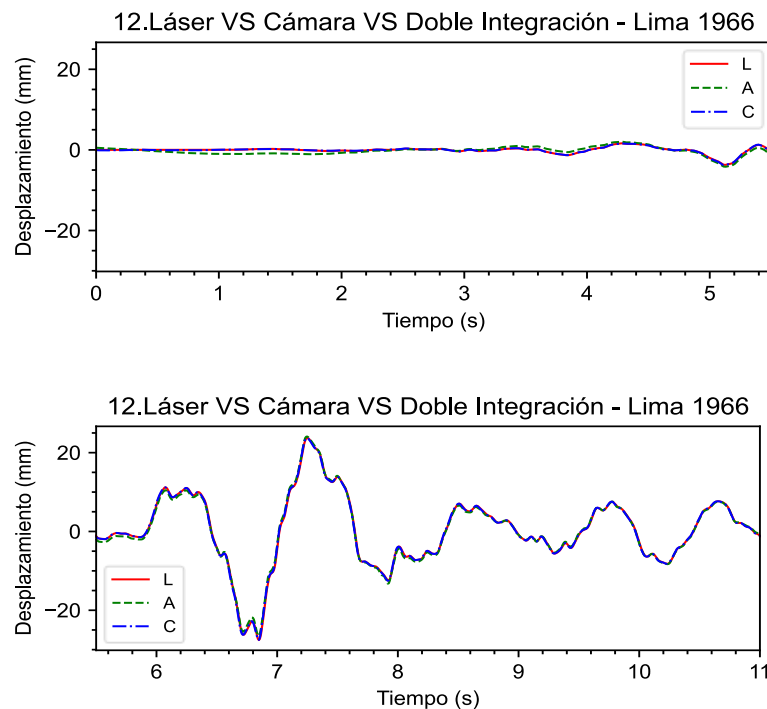


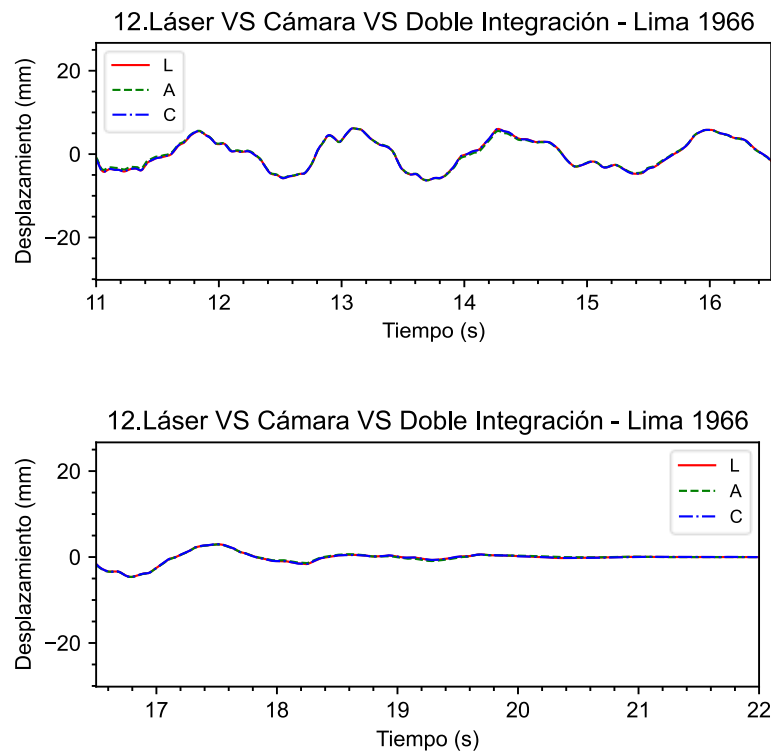
a) Tiempo historia láser (L) vs cámara (C). b) Tiempo historia láser vs doble integración (A), c) Tiempo historia comparando los tres sistemas de medición a la vez. d) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la cámara. e) Comparación en el dominio de las frecuencias entre lo medido por el láser y la doble integración.

La Figura 43 muestra el registro del sismo Lima 1966 particionada en 4 intervalos de tiempo para poder apreciar una vista más detallada de las diferencias entre los sistemas de medición

Figura 43

Vista detallada del registro Lima 1966 en intervalos de 5.5 segundos.





El sistema propuesto tiene que ser capaz de medir los desplazamientos en ambas direcciones del plano de movimiento x-, y-. Una forma sencilla de comprobar si el sistema cumple correctamente con esta función es rotando la cámara con respecto a su posición horizontal. Para ello, se escogió el registro del terremoto de Lima 1974. Al rotar la cámara, se genera un video donde los marcadores se desplazan de manera bidireccional. El sensor láser de desplazamiento registra los desplazamientos en el eje -x, mientras que la cámara registra los desplazamientos en los ejes u- y v- (Figura 44). Al realizar una rotación simple de coordenadas, del sistema u-, v- al sistema x-, y-, el desplazamiento debería de ser el mismo entre la cámara y el sensor láser de desplazamiento. Además, el desplazamiento en la dirección Y- debería ser nulo o casi nulo luego de la rotación de coordenadas. El ángulo de rotación “ θ ” es obtenido a partir del primer fotograma del video, donde se escogen dos puntos pertenecientes al plano de la mesa, para luego obtener el ángulo de rotación mediante la Ecuación 4.17.

$$\theta = \arctan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (4.17)$$

Siendo (x_1, y_1) y (x_2, y_2) las coordenadas de los dos puntos seleccionados en la imagen.

Una vez obtenido el ángulo de rotación, se utiliza para hacer una rotación de coordenadas mediante la Ecuación 4.18.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Donde $[x \ y]$ son las coordenadas medidas en el sistema de coordenadas original de imagen y $[u \ v]$ son las coordenadas en el nuevo sistema de coordenadas que ha corregido la rotación de la cámara por un ángulo θ .

Figura 44

Fotograma del video capturado con la cámara rotada

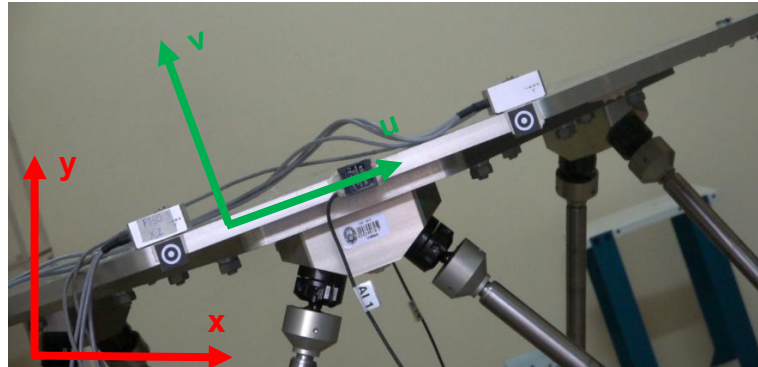
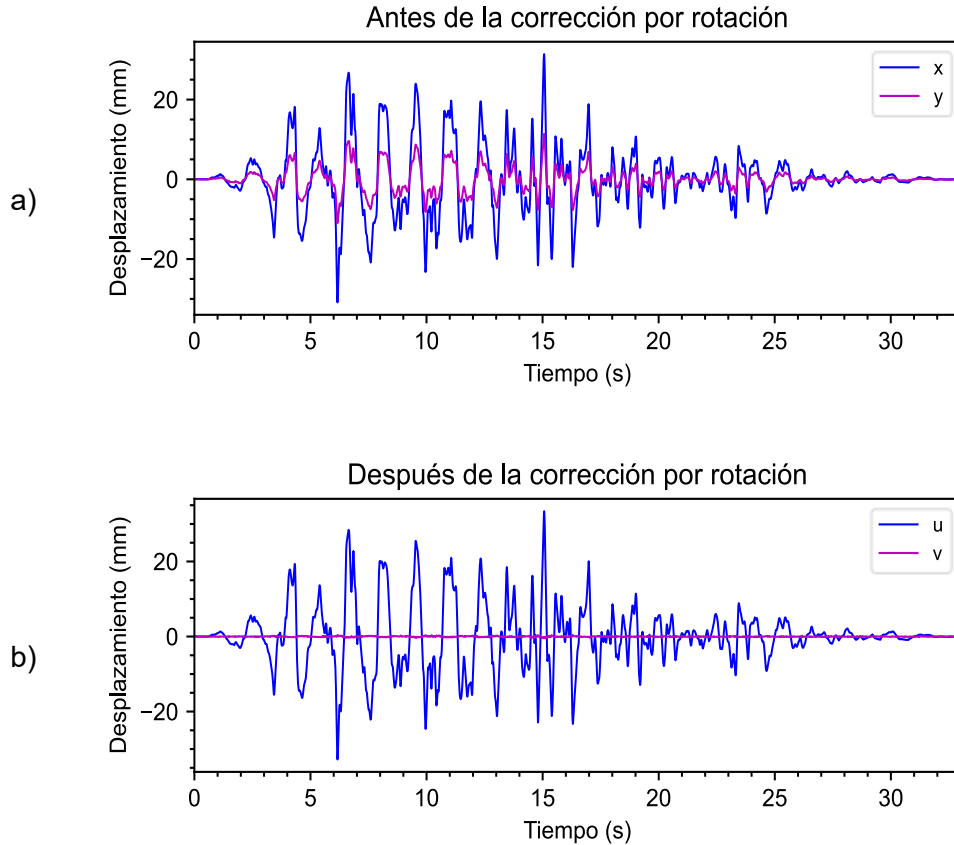
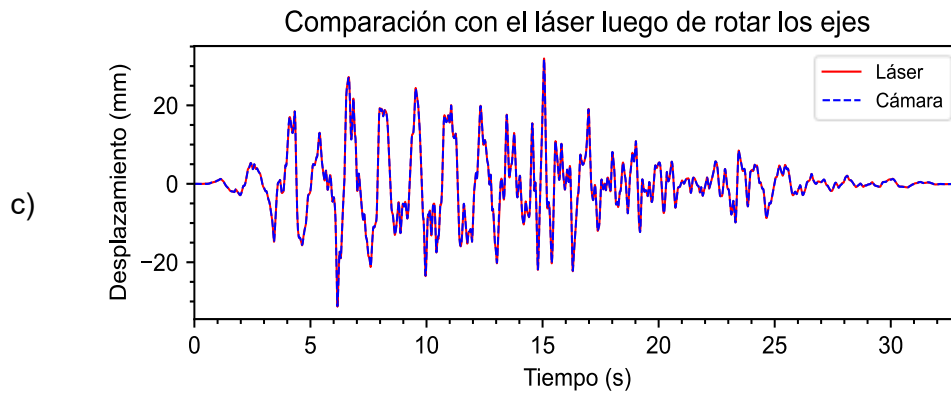


Figura 45

Demostración de la utilidad del algoritmo para la medición de desplazamiento en dos direcciones.





Nota: a) Movimiento en dos direcciones en los ejes x- y y-. b) Movimiento resultante luego de la rotación de coordenadas, donde se aproxima a un movimiento unidireccional. c) Comparación a lo largo del tiempo del láser contra los desplazamientos de la cámara corregidos por rotación.

La Figura 45 Muestra el registro antes (b) y después de la rotación (c). Además, la Tabla 11 muestra la comparación de las respuestas máximas, así como el NRMSE de los tiempo-historia de los registros para los casos de antes y después de la rotación, donde Lima74-r es el registro de Lima 1974 registrada con la cámara rotada y Lima74-rc es el mismo registro, pero con la rotación de cámara corregida. Como se puede observar, antes de la rotación hay una diferencia apreciable de los desplazamientos calculados con los desplazamientos del láser. Luego de la rotación de coordenadas, el registro de la cámara se asemeja mucho más a la del sensor láser de desplazamiento, además de casi desaparecer el movimiento en el eje transversal y-, tal como se puede apreciar en la Figura 45 b.

Tabla 11

Comparación del registro obtenido con la cámara rotada y el mismo registro corregida por el ángulo de rotación contra el sensor láser de desplazamiento

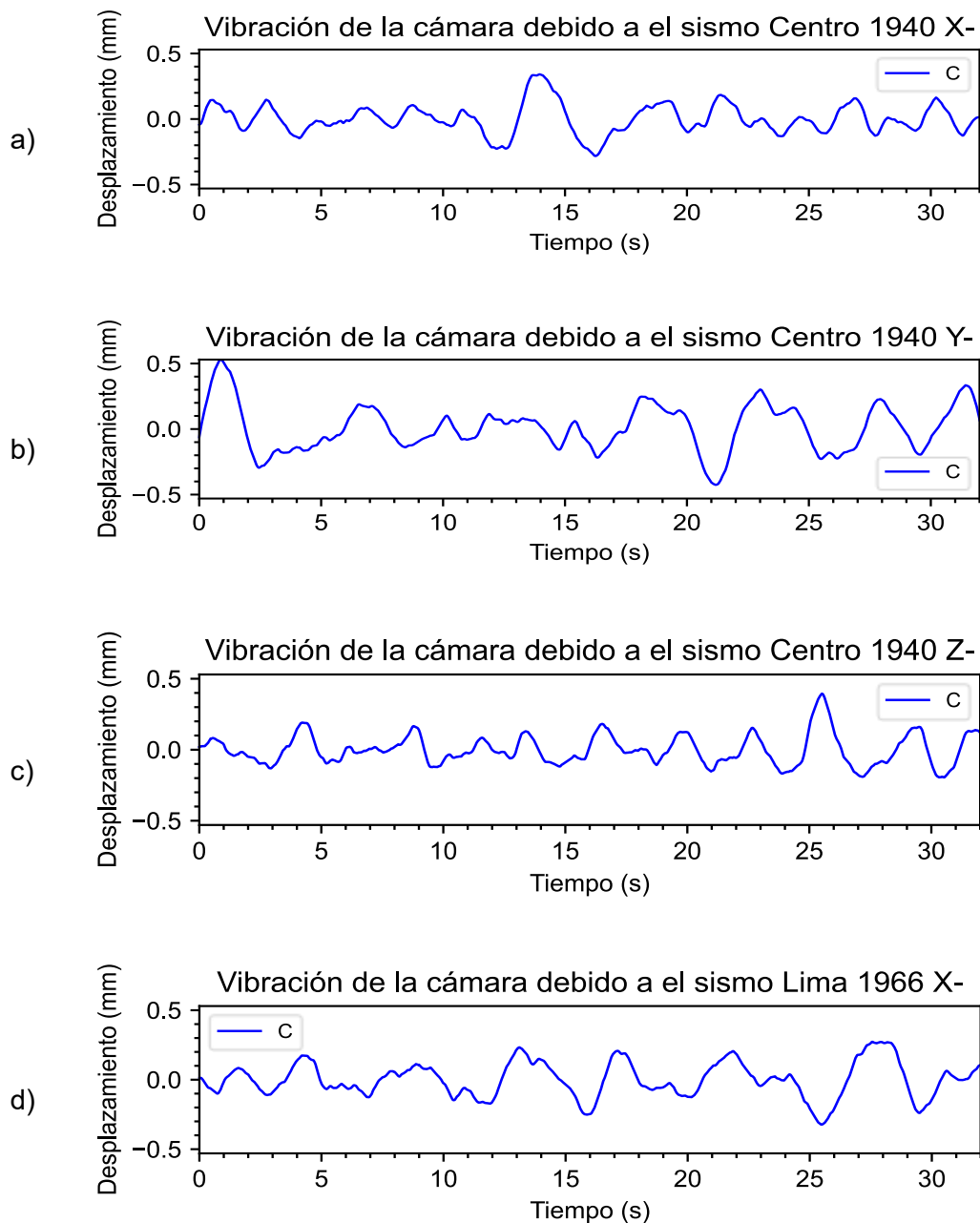
Registro	Láser		Cámara		ERROR		NRMSE
	Max (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Min (mm)	Max (%)	Min (%)	
Lima74-r	31.956	-31.330	29.794	-29.371	6.766	6.253	0.805
Lima74-rc			31.702	-31.163	0.795	0.533	0.096

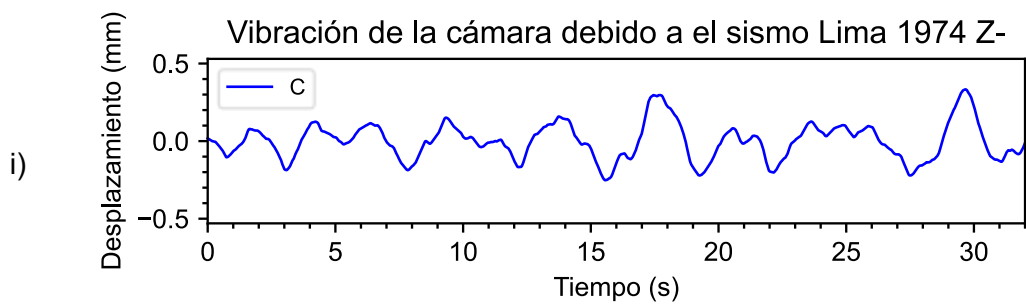
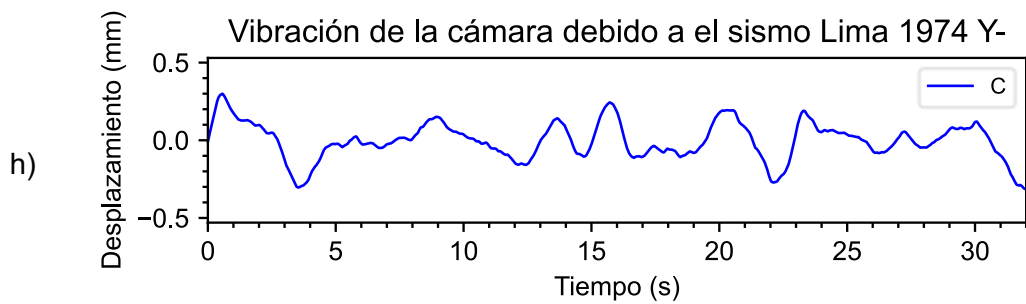
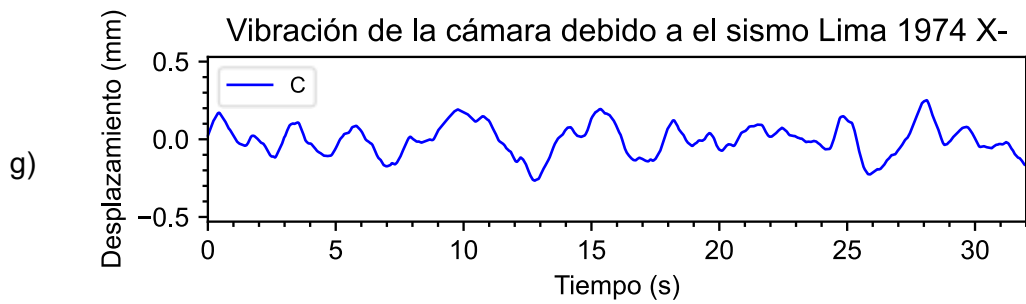
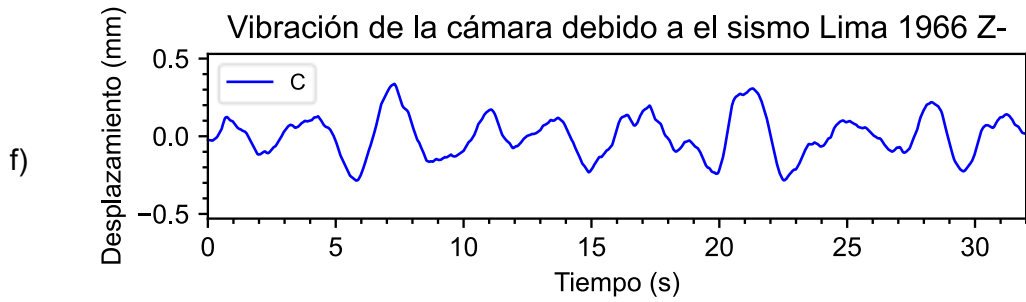
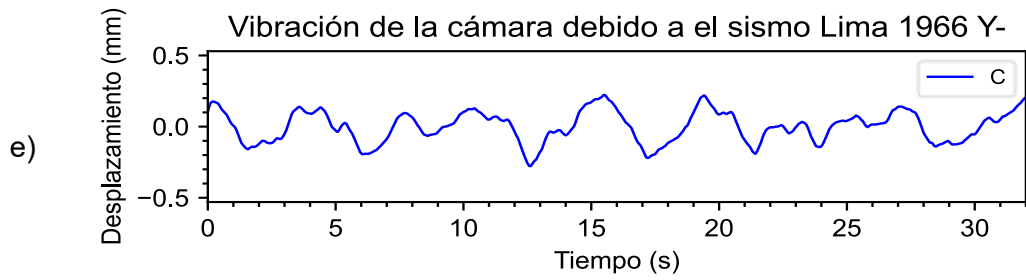
Finalmente, los registros de aceleración obtenidos por la cámara fueron convertidos a desplazamientos mediante doble integración para los casos de los sismos. En la Figura 46 puede evidenciarse como en ninguna dirección es

apreciable la vibración de la cámara para los fines de esta validación, y en general para fines de cualquier ensayo dinámico de laboratorio, ya que las mesas vibratorias cuentan con un sistema de aislamiento que hace que las vibraciones transmitidas sean despreciables. Las vibraciones causadas en la cámara no superan el medio milímetro.

Figura 46

Desplazamientos de la cámara debido a la vibración ambiental, en las tres direcciones de movimiento y para cada uno de los tres sismos del ensayo





Los resultados mostrados en este capítulo demuestran las ventajas de las cámaras sobre los métodos convencionales de medición. Una ventaja destacada del sistema propuesto frente al método tradicional de doble integración de aceleraciones radica en una precisión de las mediciones. Esto se debe a que los desplazamientos son medidos directamente en lugar de ser calculados, lo cual garantiza un menor error en los resultados. Además, las mediciones de desplazamiento realizadas con la cámara muestran una similitud casi perfecta con aquellas obtenidas por medio del sensor láser de desplazamiento a lo largo de todos los ensayos.

Un beneficio adicional de la cámara en comparación con el sensor láser de desplazamiento es su capacidad para medir desplazamientos en múltiples puntos simultáneamente a través del análisis de vídeo, y hacerlo en dos dimensiones. En contraste, el sensor láser de desplazamiento se limita a medir desplazamientos en un único punto y únicamente en la dirección en que está orientado.

Sin embargo, es importante mencionar que una limitación de la cámara comparada con el acelerómetro y el sensor láser de desplazamiento es su capacidad de muestreo. Mientras que el acelerómetro y el sensor láser de desplazamiento pueden registrar datos a altas frecuencias de muestreo (200, 250, 500, 1000 Hz), la cámara alcanza un máximo de 120 muestras por segundo. Este aspecto podría influir en la selección del método de medición más adecuado, dependiendo de las necesidades específicas del estudio.

4.4. Consideraciones sobre el alcance y limitaciones del sistema de medición propuesto

El sistema de medición propuesto en esta tesis no busca reemplazar los métodos tradicionales utilizados en el laboratorio, como los acelerómetros o el sistema láser. Por el contrario, su objetivo principal es complementar y robustecer las mediciones mediante la incorporación de nuevas herramientas que, al trabajar en conjunto, permitan obtener datos más completos y precisos. Cada sistema de medición posee ventajas particulares que, al integrarse adecuadamente, pueden potenciarse mutuamente, mejorando así la calidad de los resultados experimentales y ampliando las capacidades del laboratorio.

Para garantizar un uso correcto del sistema de medición basado en cámaras digitales, es importante considerar ciertas recomendaciones técnicas y operativas que optimicen la precisión y la confiabilidad de los registros obtenidos.

En primer lugar, dado que la cámara utilizada registra imágenes a una frecuencia de 120 Hz, teóricamente podría capturar señales hasta aproximadamente 60 Hz según el criterio de Nyquist. Sin embargo, es necesario aclarar que, al aproximarse a este límite, la cantidad de puntos registrados por cada ciclo es insuficiente para reconstruir adecuadamente la señal, comprometiendo su precisión y representatividad. Por lo tanto, es recomendable establecer un criterio más conservador, sugiriendo registrar como mínimo 10 datos por ciclo para asegurar una reconstrucción adecuada. Esto implica que, en la práctica, la cámara debería utilizarse para registrar señales con frecuencias de hasta aproximadamente 12 Hz si se desea mantener una buena precisión en la representación de los datos.

En segundo lugar, es esencial evaluar la capacidad del sistema para detectar desplazamientos mínimos, dado que esta característica depende significativamente del nivel de acercamiento (*zoom*) utilizado. A mayor proximidad del marcador, el factor de escala (milímetros por píxel) se reduce, aumentando así la sensibilidad del sistema y permitiendo la detección de desplazamientos más pequeños. Sin embargo, esta sensibilidad está condicionada también por la estabilidad y aislamiento de la cámara. Experimentos previos han demostrado que al ubicar la cámara a una distancia aproximada de 1.20 m de una mesa vibratoria, el ruido introducido por movimientos involuntarios de la cámara puede alcanzar hasta casi llegar al medio mm en algunos picos, según mediciones realizadas mediante acelerómetros instalados directamente sobre la cámara. Por lo tanto, para maximizar la precisión, es indispensable asegurar un aislamiento efectivo del sistema de grabación respecto a las fuentes de vibración externa.

En consecuencia, la sensibilidad práctica del sistema puede variar considerablemente, desde fracciones de milímetro en condiciones óptimas de proximidad y aislamiento, hasta aproximadamente 1 mm cuando se requieren tomas amplias para cubrir múltiples marcadores simultáneamente, como ocurrió durante los ensayos realizados en muros de ductilidad limitada. Es importante destacar que la interpolación subpíxel es una herramienta valiosa que incrementa la sensibilidad efectiva del sistema, permitiendo la detección de desplazamientos aún más pequeños bajo condiciones adecuadas.

Capítulo V: Implementación en el monitoreo de la salud estructural

El sistema de medición es aplicado en la presente tesis para medir la respuesta estructural de especímenes dentro del Laboratorio de Estructuras del CISMID FIC-UNI, y de esa forma hacer un SHM de los especímenes durante los ensayos dinámicos, obteniéndose su respuesta de desplazamientos y curvas de capacidad a lo largo de análisis dinámicos incrementales (IDA).

El sistema de medición basado en visión por computador es actualmente usado en cada ensayo dinámico del CISMID y en ensayos donde en general se necesite estudiar la respuesta de desplazamientos. Entre las muchas aplicaciones que ya se le ha venido dando, la presente tesis recopila tres experimentos a escalas que se detallarán a continuación.

5.1. Evaluación de la respuesta estructural de un modelo que presenta irregularidad torsional.

5.1.1. Descripción del ensayo

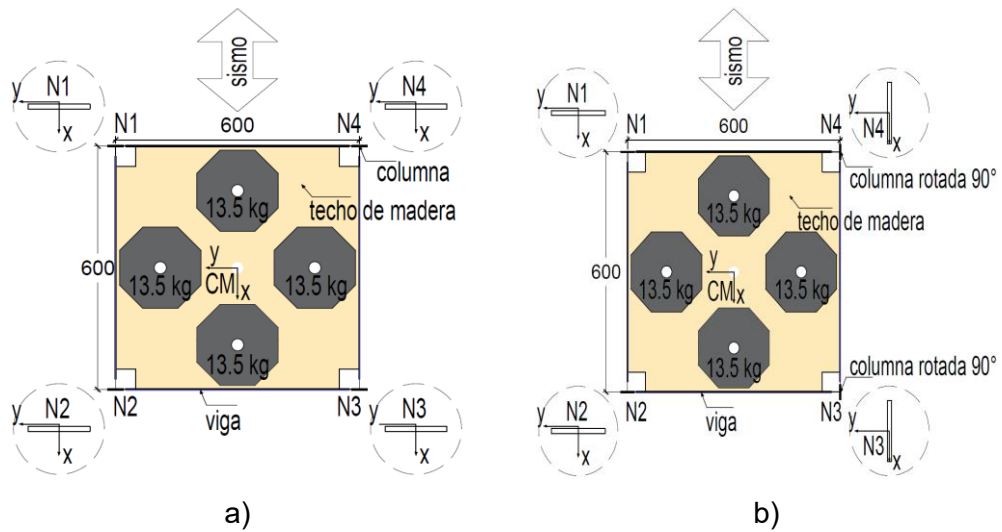
La investigación titulada “Metodología para la detección de daño en edificaciones con irregularidad torsional mediante el monitoreo de la salud estructural” de Guizado (2025) llevada a cabo en el Laboratorio de Estructuras del CISMID, requirió de ensayos de laboratorio que monitoreen modelos estructurales que presentaban irregularidad torsional. El sistema de medición desarrollado en la presente tesis se convirtió en una gran alternativa puesto que permitía medir los desplazamientos de varios puntos a la vez y en ambas direcciones de movimiento.

Para la presente tesis se muestra el caso de solo dos especímenes pertenecientes al marco experimental de la investigación mencionada: el espécimen cinco y el espécimen ocho. El espécimen cinco (E5) es un espécimen de control, que no presenta irregularidad torsional, mientras que el espécimen ocho (E8) es un espécimen que sí presenta dicha irregularidad. A ambos especímenes se les aplicó una prueba de vibración libre, donde la frecuencia natural para el E5 fue de 1.60 Hz, mientras que para el E8 fue de 5.00 Hz.

Los especímenes fueron sometidos al sismo de Pisco 2007 (registrado en la estación de la Universidad Nacional de Ica) en un IDA en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras del CISMID. Constan de un solo nivel y está hecho de piezas de acero. La irregularidad torsional del E8, fue inducida mediante la rotación de ciertas columnas, que cambió así la rigidez de estas ante la dirección del sismo.

Figura 47

Esquema de los especímenes para el ensayo de laboratorio

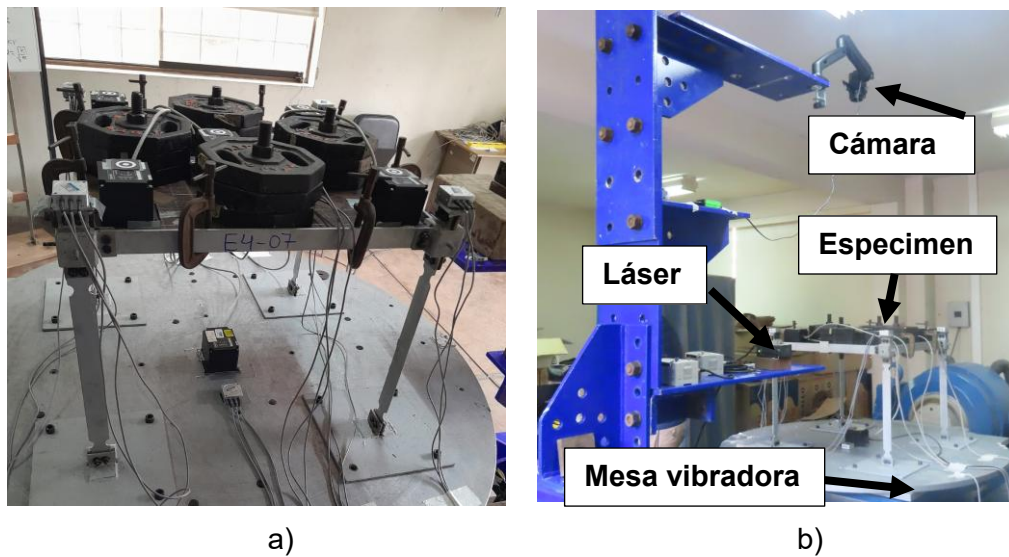


Nota: a) Esquema del E5. b) Esquema del E8 con las columnas N3 y N4 rotadas.

Adaptado de Guizado (2025)

Figura 48

Disposición de instrumentos en el laboratorio



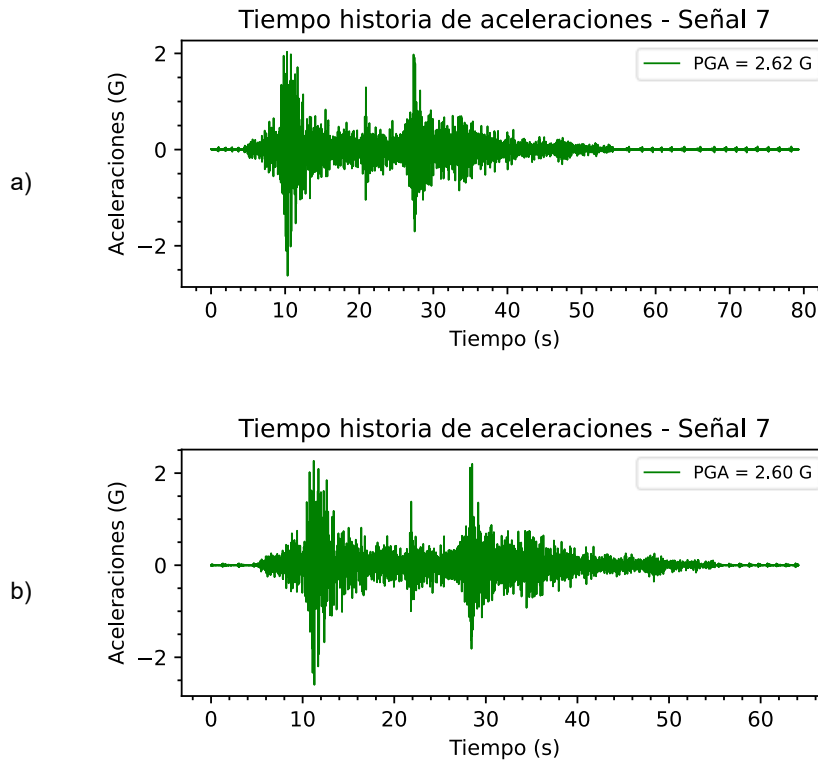
Nota: a) Modelo estructural de acero. b) Configuración en el laboratorio.

El esquema de los especímenes puede ser observado en la Figura 47; la Figura 48 muestra la configuración del experimento en el laboratorio, donde se observa que la cámara fue instalada para poder realizar una grabación en planta; la Figura 49 muestra los registros de mayor PGA enviadas a cada espécimen durante el ensayo. Todos los registros pueden ser observados en el

ANEXO 3. Las Tablas 12 y 13 resumen los registros usados en el presente ensayo

Figura 49

Tiempo-historia de aceleraciones con mayores PGA



Nota: a) Registro de mayor PGA para E5. b) Registro de mayor PGA para E8

Tabla 12

Descripción de los registros del sismo Pisco 2007 enviados a la mesa vibradora para el E5.

N°	Frecuencia predominante (Hz)	PGA (G)
1	9.18	0.28
2	11.14	0.52
3	9.18	0.82
4	9.18	0.98
5	9.05	2.25
6	9.18	2.22
7	9.18	2.62

Tabla 13

Descripción de los registros del sismo Pisco 2007 enviados a la mesa vibradora para el E8.

N°	Frecuencia predominante (Hz)	PGA (G)
1	9.18	0.42
2	9.18	0.69
3	9.19	0.93
4	9.18	1.51
5	9.05	2.03
6	9.05	2.38
7	9.06	2.6

5.1.2. Comparación entre las medidas obtenidas por el sensor láser de desplazamiento y el sistema de medición propuesto.

El sensor láser de desplazamiento solo es capaz de medir los desplazamientos de un único punto. Dado a que para la fecha del ensayo solo se contaba con un láser, este apuntó hacia el centro de masa del espécimen.

Tabla 14

Registros representativos de cada estado de los modelos ensayados.

E5		E8	
N°	Respuesta	N°	Respuesta
3	Elástico	2	Elástico
6	Inelástico	6	Inelástico
7	Colapso	7	Colapso

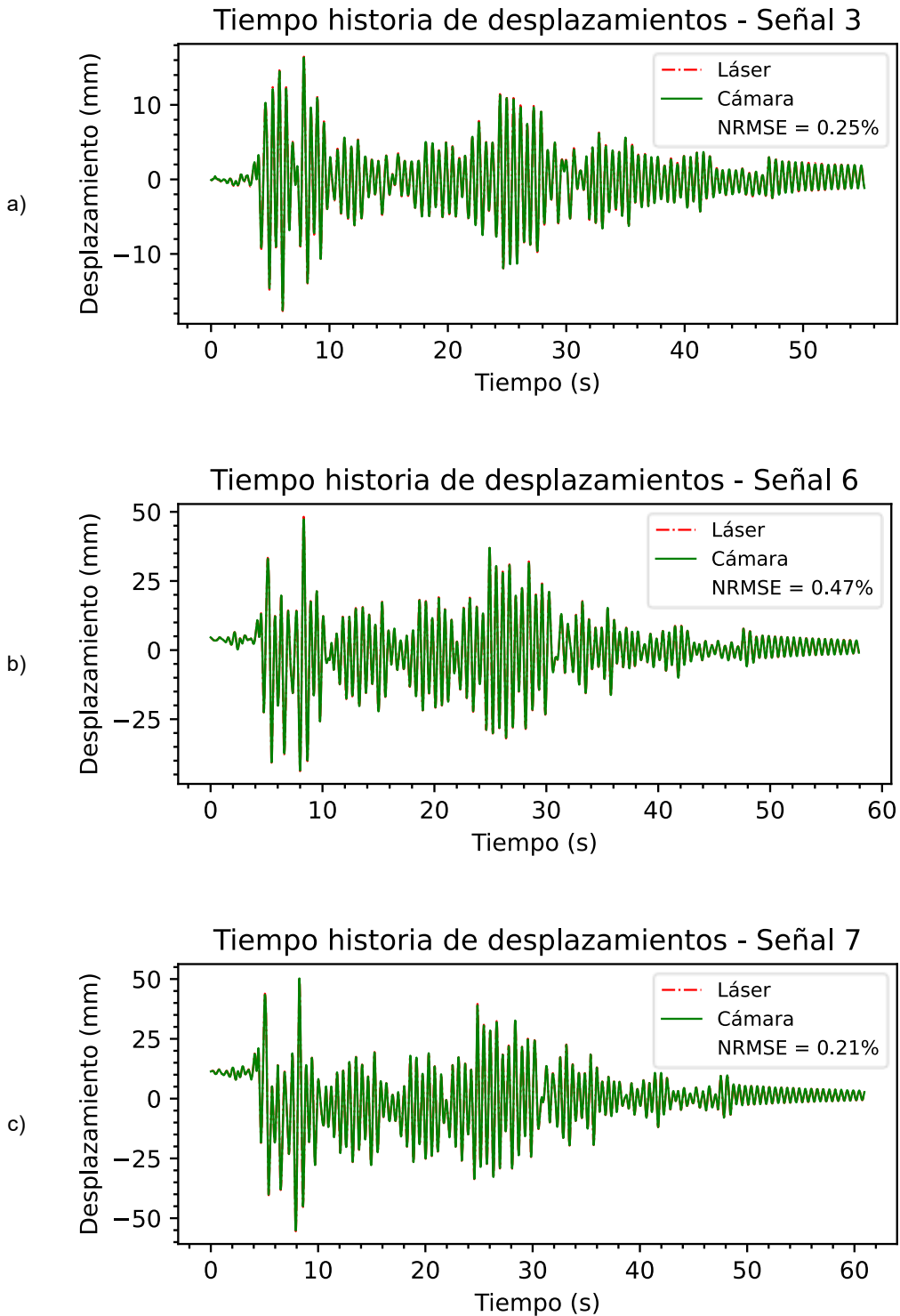
Todas las comparaciones realizadas para todos los registros para ambos modelos, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de las frecuencias, pueden ser encontradas en el ANEXO 4. En este capítulo se toman como muestra solo tres registros que generan una respuesta elástica, otra respuesta inelástica y otra final para el colapso. Dichos registros pueden ser observadas en la Tabla 14.

Para el E5, las comparaciones pueden observarse en la Figura 50. Las comparaciones del E8 pueden verse en la Figura 51. Adicionalmente, las comparaciones entre los espectros de Fourier para el E5 pueden verse en la

Figura 52, mientras que para el E8 pueden verse en la Figura 53. Finalmente, se resumen los NRMSE, valores máximos y mínimos en las Tablas 15 y 16.

Figura 50

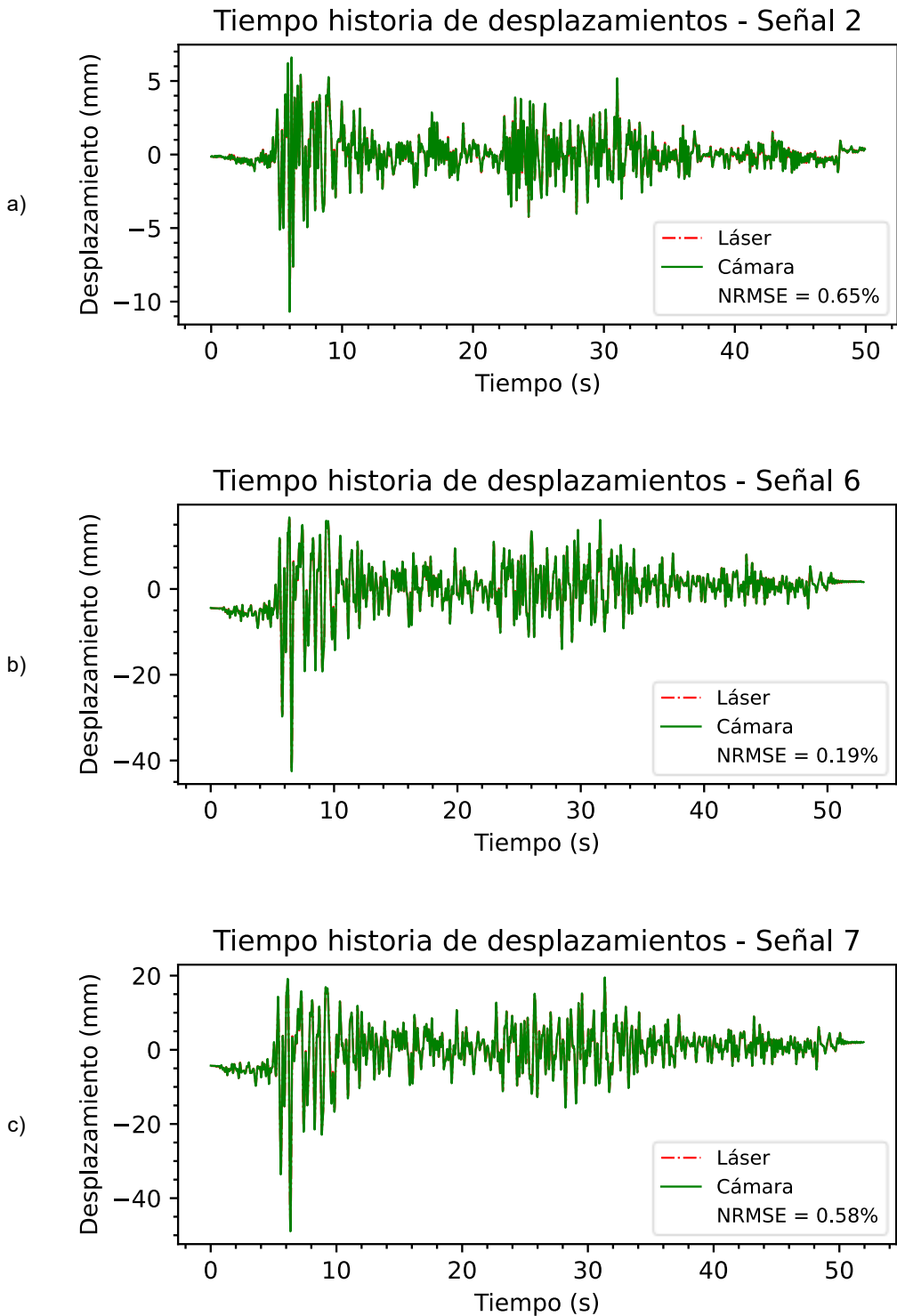
Comparaciones para los desplazamientos del centro de masa del E5.



Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso.

Figura 51

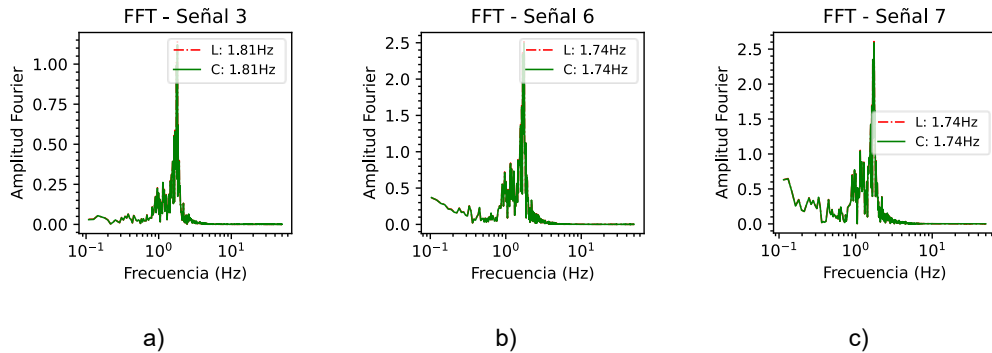
Comparaciones para los desplazamientos del centro de masa del E8.



Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso.

Figura 52

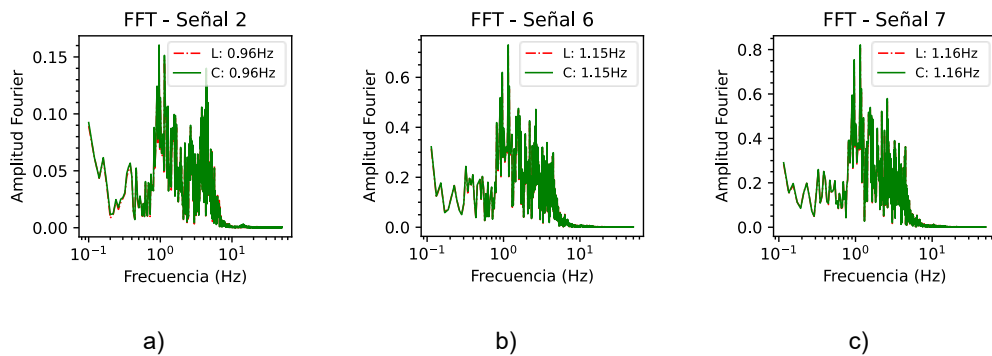
Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel para el E5



Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso.

Figura 53

Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel para el E8.



Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso.

Tabla 15

Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento para el E5.

N°	Láser		Cámara		Comparación		
	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	5.15	1.82	5.07	1.82	1.55	0	0.741
2	11.24	1.81	11.2	1.81	0.36	0	0.335
3	17.67	1.81	17.56	1.81	0.62	0	0.246
4	21.73	1.77	21.57	1.77	0.74	0	0.247
5	47.51	1.74	46.7	1.74	1.70	0	0.287
6	48.24	1.74	47.34	1.74	1.87	0	0.467
7	55.46	1.74	55.06	1.74	0.72	0	0.208

Tabla 16

Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento para el E8.

N°	Láser		Cámara		Comparación		
	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	7.23	1.16	7.3	1.16	0.97	0	0.455
2	10.55	0.96	10.69	0.96	1.33	0	0.648
3	14.81	1.15	15.08	1.15	1.82	0	0.761
4	23.43	1.15	23.79	1.15	1.54	0	0.407
5	35.73	1.15	36.09	1.15	1.01	0	0.351
6	42.16	1.15	42.53	1.15	0.88	0	0.191
7	48.35	1.16	48.96	1.16	1.26	0	0.578

5.1.3. Verificación de la Irregularidad torsional

Se verificó mediante el grado de irregularidad torsional *Git*.

El cálculo del grado de irregularidad torsional se vuelve innecesario cuando la deriva de entrepiso calculada en el centro de masas no supera el 50% de la deriva máxima permitida según la norma E030. En el presente ensayo la altura del espécimen fue 450 mm y al ser de acero le corresponde una deriva máxima permitida de 0.010, solo se evaluará el *Git* al obtenerse una deriva mayor a 0.005 en el CM.

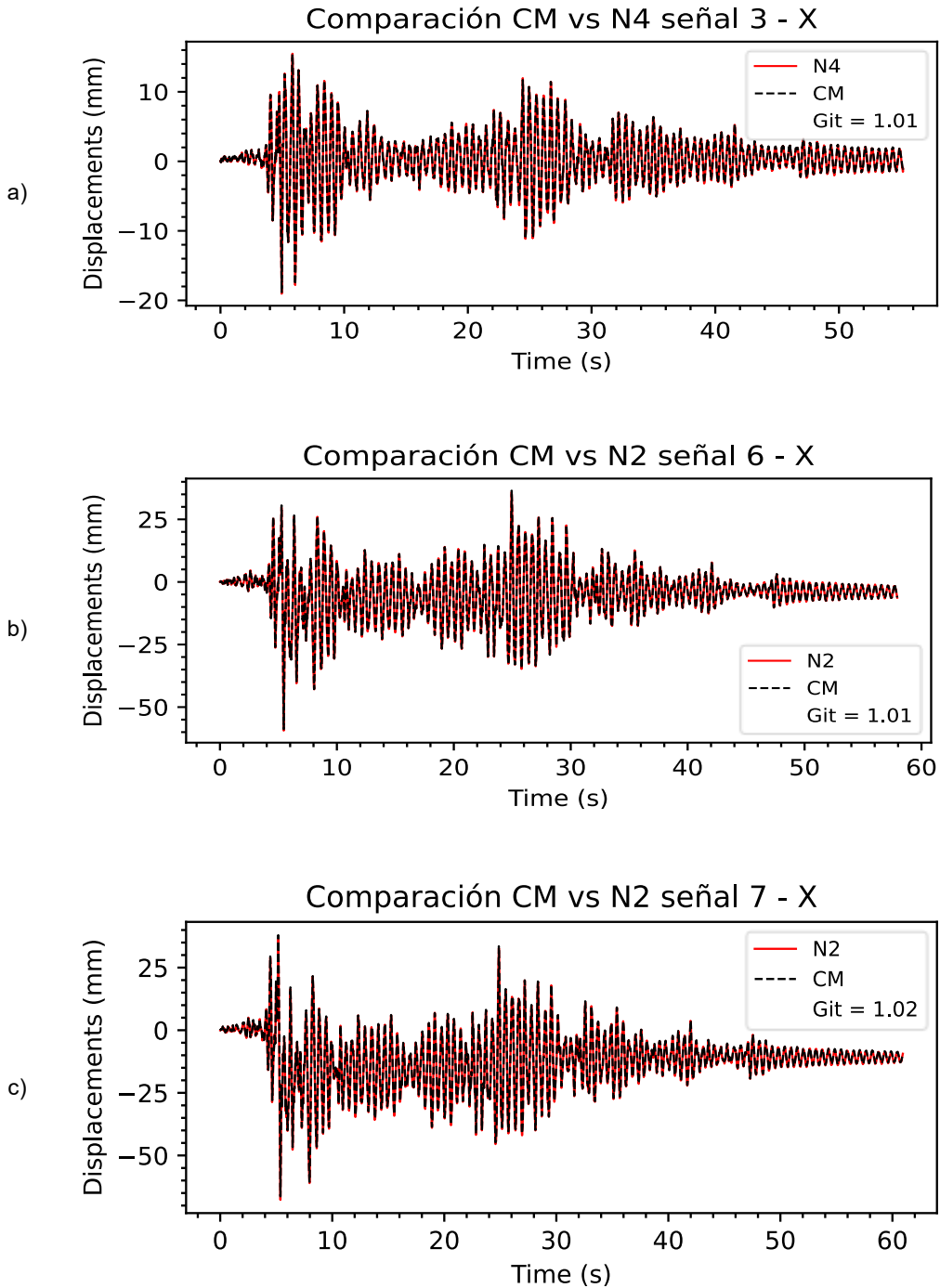
Se esperaba que el E5 no presentara irregularidad torsional debido a su configuración simétrica de elementos resistentes y que el E8 debía presentar irregularidad torsional. Estas hipótesis fueron satisfactoriamente corroboradas.

Los desplazamientos relativos de las esquinas de los especímenes y del centro de masas fueron comparados en el instante donde el desplazamiento relativo del centro de masas fue máximo.

La Figura 54 muestra las comparaciones entre la esquina de mayor desplazamiento relativo y el centro de masas, así como el grado de irregularidad torsional para el espécimen E5 en los registros escogidos para representar la respuesta elástica, inelástica y el colapso en la dirección x-. Debido a que las derivas del CM son despreciables (menores a 0.005) en la dirección y- no es necesario evaluar el grado de irregularidad en dicha dirección. Las gráficas de los registros faltantes pueden observarse en el ANEXO 5.

Figura 54

Comparación del desplazamiento de la esquina de mayor movimiento con el centro de masas para el E5 en dirección "x".

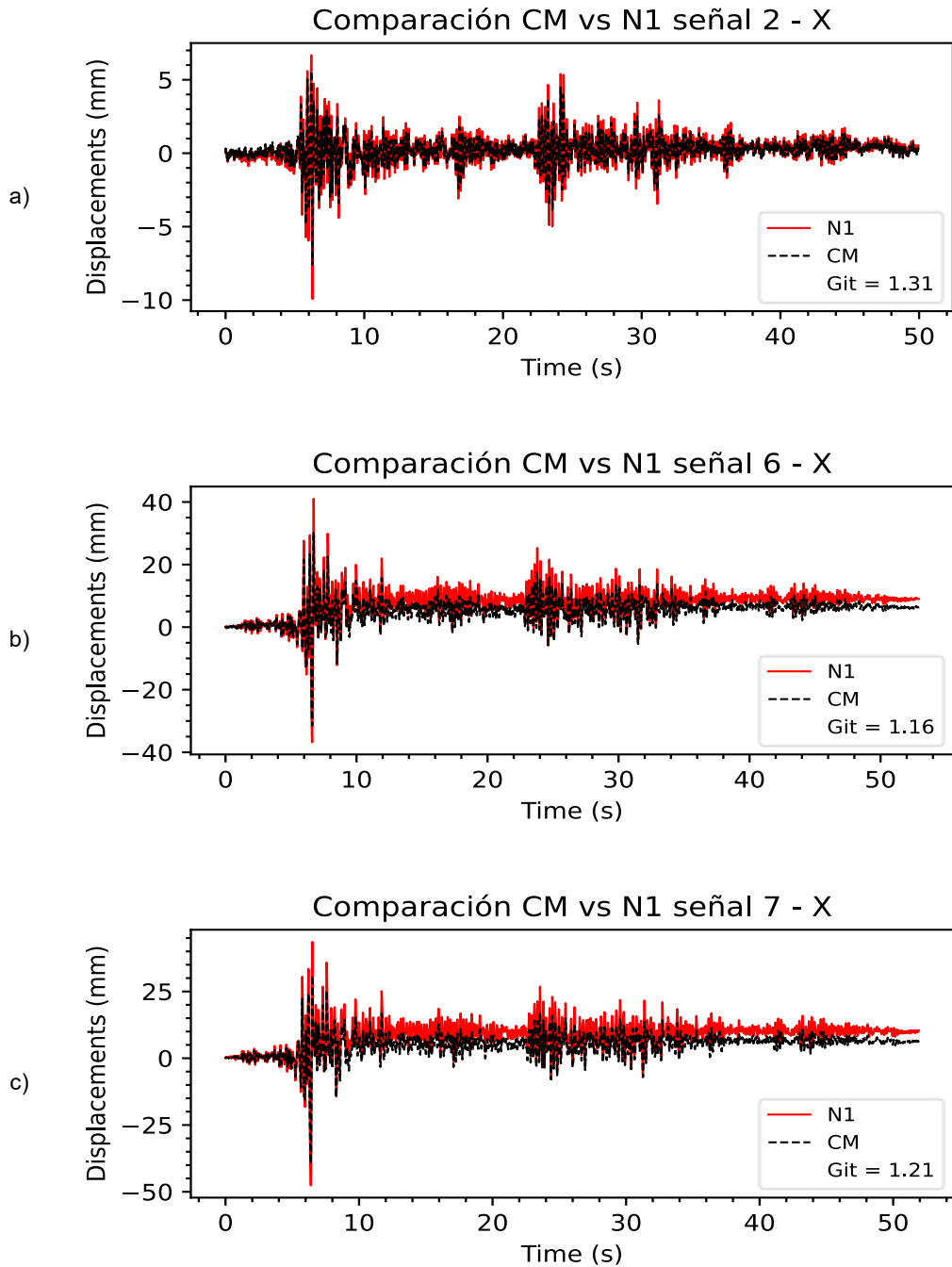


Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso.

La Figura 55 muestra lo mismo que la Figura 54 pero para el espécimen E8. Además, se añade la Figura 56 que hace lo mismo, pero en la dirección y-, donde para algunos registros, la deriva del CM sí sobrepasaba a 0.005

Figura 55

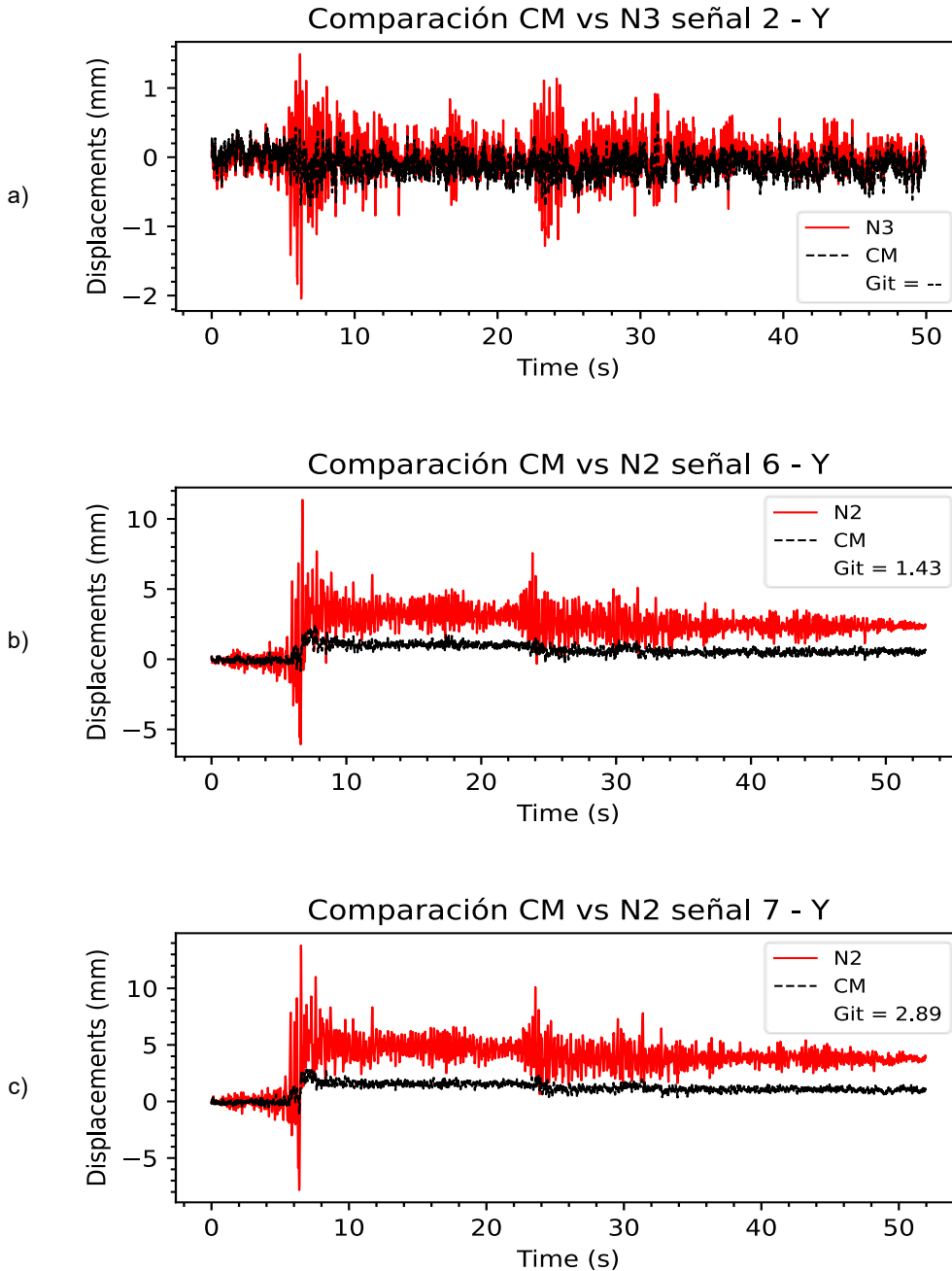
Comparación del desplazamiento de la esquina N1 de mayor movimiento con el centro de masas para el E9



Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso.

Figura 56

Comparación del desplazamiento de la esquina de mayor movimiento con el centro de masas para el E9



Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso.

Finalmente, se presenta la Tabla 17 que resume los Git obtenidos para el E5; la Tabla 18 donde se resumen los Git del E8 en dirección "x" y la Tabla 19 donde se resumen los Git del E8 en dirección "y"

Tabla 17

Resumen de los Git del espécimen E5

N°	Tm (s)	N	CM_des (mm)	N_des (mm)	CM_der	Git
1	3.88	N4	5.55	5.69	0.0123	1.03
2	4.18	N1	11.82	11.97	0.0263	1.01
3	4.95	N4	18.82	19.04	0.0418	1.01
4	5.63	N4	24.47	24.62	0.0544	1.01
5	5.69	N3	57.21	57.57	0.1271	1.01
6	5.45	N2	58.83	59.41	0.1307	1.01
7	5.37	N2	66.35	67.73	0.1475	1.02

Nota: Tm : Tiempo en el que sucede el desplazamiento máximo del centro de masas
 N : Nudo (esquina) con mayor movimiento cuando el desplazamiento del centro de masas alcanza su máximo valor
 CM_des : Desplazamiento máximo del centro de masas
 N_des : Desplazamiento del nudo de mayor movimiento
 CM_der : Deriva del centro de masas en su máximo desplazamiento.

Tabla 18

Resumen de los Git del espécimen E8 dirección "x"

N°	Tm (s)	N	CM_des (mm)	N_des (mm)	CM_der	Git
1	2.15	N2	4.86	6.31	0.0108	1.3
2	6.26	N1	7.60	9.93	0.0169	1.31
3	6.14	N1	12.61	14.95	0.0280	1.19
4	7.48	N1	21.67	27.13	0.0482	1.25
5	6.21	N1	28.47	37.27	0.0633	1.31
6	6.62	N1	31.44	36.61	0.0699	1.16
7	6.39	N1	39.48	47.63	0.0877	1.21

Tabla 19

Resumen de los Git del espécimen E8 dirección "y"

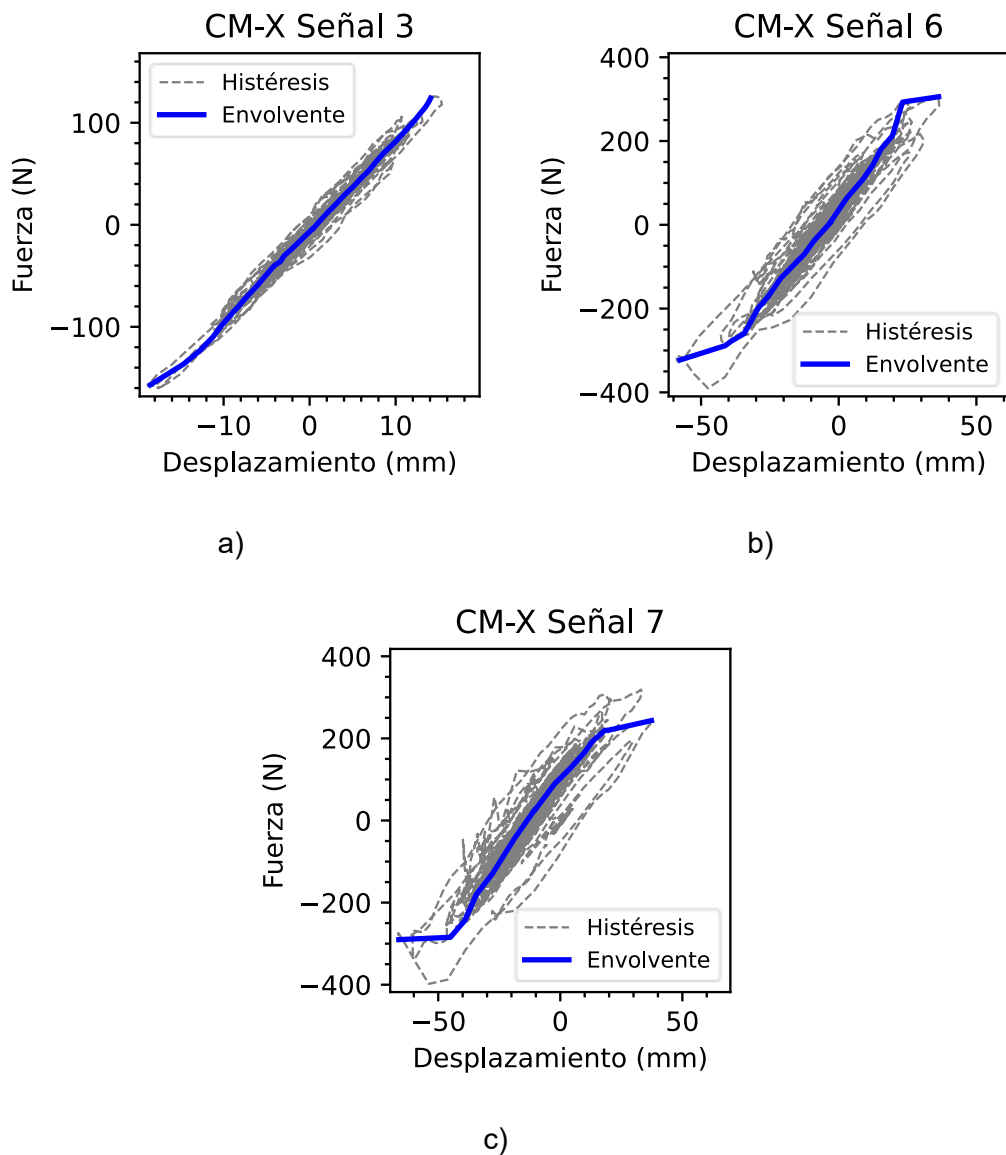
N°	Tm (s)	N	CM_des (mm)	N_des (mm)	CM_der	Git
1	2.22	N2	0.65	1.39	0.0014	ND
2	23.34	N3	0.71	1.13	0.0016	ND
3	5.84	N2	0.81	2.13	0.0018	ND
4	24.63	N2	1.37	2.18	0.0030	ND
5	7.28	N2	1.53	5.25	0.0034	ND
6	7.66	N2	2.52	3.61	0.0056	1.43
7	6.91	N2	2.84	8.19	0.0063	2.89

5.1.4. Comportamiento histerético del espécimen obtenido con el sistema de medición propuesto

El sistema de medición propuesto demuestra su ventaja de poder medir directamente el desplazamiento sin recurrir a la doble integración de la aceleración al mantener intacta la información del desplazamiento residual. Así mismo, también permite obtener el comportamiento histerético en ambas direcciones del movimiento.

Figura 57

Comportamiento histerético del centro de masas para el E5 en dirección "x".

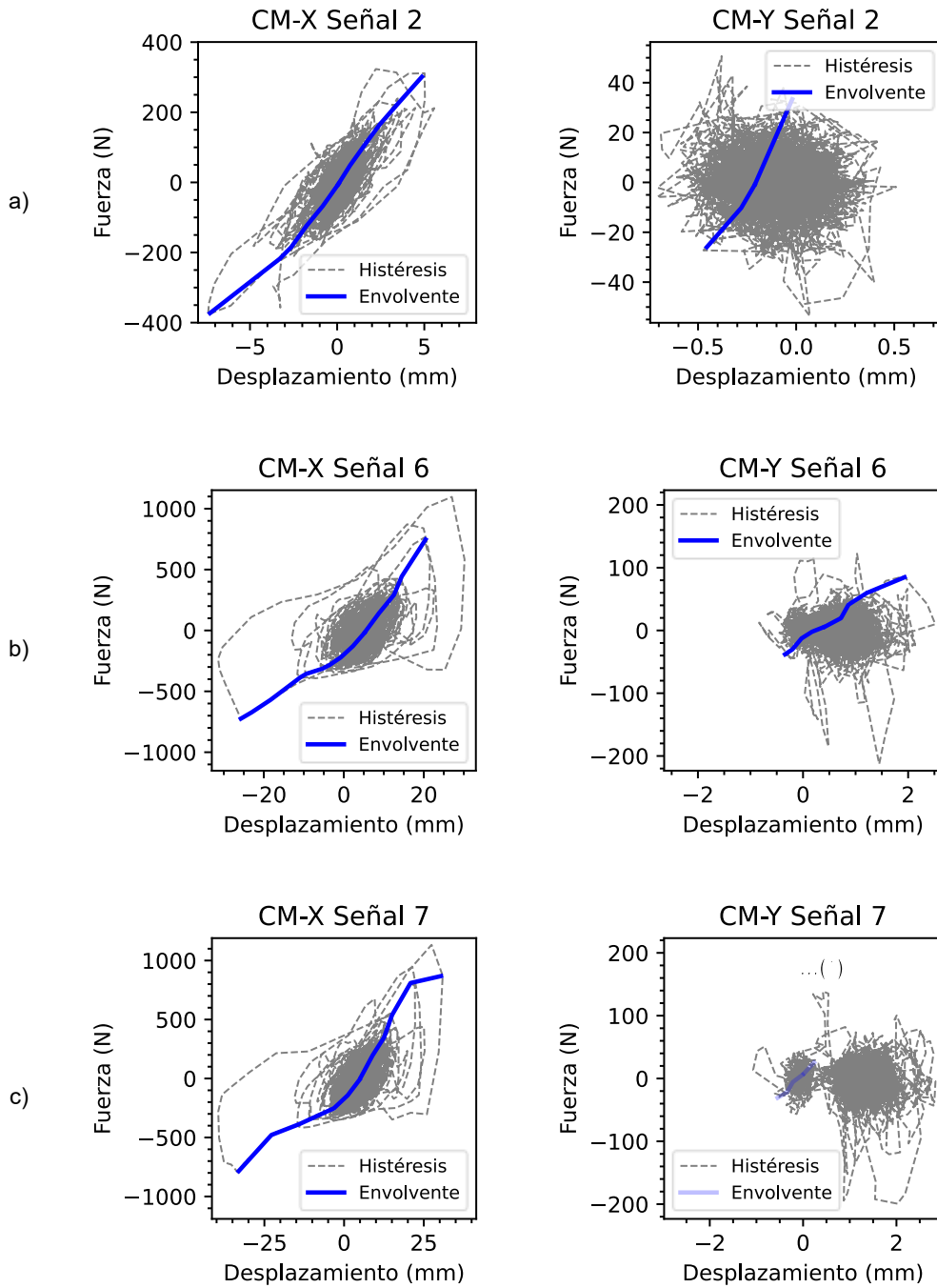


Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso.

La Figura 57 muestra el comportamiento histerético del E5 en dirección X mientras que la Figura 58 muestra el comportamiento histerético del E8 en ambas direcciones.

Figura 58

Comportamiento histerético del centro de masas para el E5 en dirección “x y dirección “y”.



Nota: a) respuesta elástica, b) repuesta inelástica, c) colapso. (*) Debido al desplazamiento residual, el espécimen comenzó a vibrar desde una nueva posición de equilibrio, generando así un desplazamiento de la envolvente. El comportamiento en la dirección Y del E5 es despreciable. El comportamiento histerético de ambos especímenes para cada uno de los registros puede ser visto en el ANEXO 6.

5.2. Evaluación de la respuesta estructural de un modelo compuesto por muros de ductilidad limitada a escala 1:10

5.2.1. Descripción del ensayo

La investigación “*Seismic behaviour of a scales 7-story building model with low-ductility reinforced concrete walls*” de Zavala (2024) llevada a cabo en el CISMID, requirió de ensayos de laboratorio que monitoreen un espécimen de sistema estructural basado en muros de ductilidad limitada de escala 1:10.

El experimento consistió en un IDA a diversos especímenes de MDL, donde cada uno tuvo variaciones en el proceso constructivo.

El sistema de medición propuesto fue utilizado debido a su ventaja de poder monitorear múltiples puntos a la vez con una sola cámara, solucionando el no disponer con muchos láseres por su elevado precio. El espécimen contaba con siete pisos, con tres puntos de interés por nivel (Figura 59 y Figura 60), resultando un total de veinticuatro puntos de interés por espécimen.

Tabla 20

Descripción de los registros enviados a la mesa vibradora. Sismo de Lima 03 de octubre de 1974, estación del Parque de la Reserva

N°	Frecuencia predominante (Hz)	PGA (G)
1	23.54	0.13
2	23.28	0.40
3	21.83	0.57
4	7.27	0.86
5	8.41	1.56
6	6.40	2.08

Esta tesis presenta la respuesta estructural medida por la cámara del último espécimen ensayado. Este espécimen contaba con una frecuencia natural

de 20.47 Hz medida antes del ensayo. Así mismo, realiza las comparaciones correspondientes con el sensor láser de desplazamiento y muestra la curva de capacidad del experimento. La Tabla 20 describe los registros enviados a la mesa vibradora para el ensayo, donde cada registro fue el mismo pero amplificado con respecto al anterior. La Figura 61 muestra el registro enviado a la mesa con mayor PGA. Los gráficos de la historia en el tiempo de aceleraciones en la base para cada registro se pueden observar en el ANEXO 7 junto con sus respectivos espectros de Fourier.

Figura 59

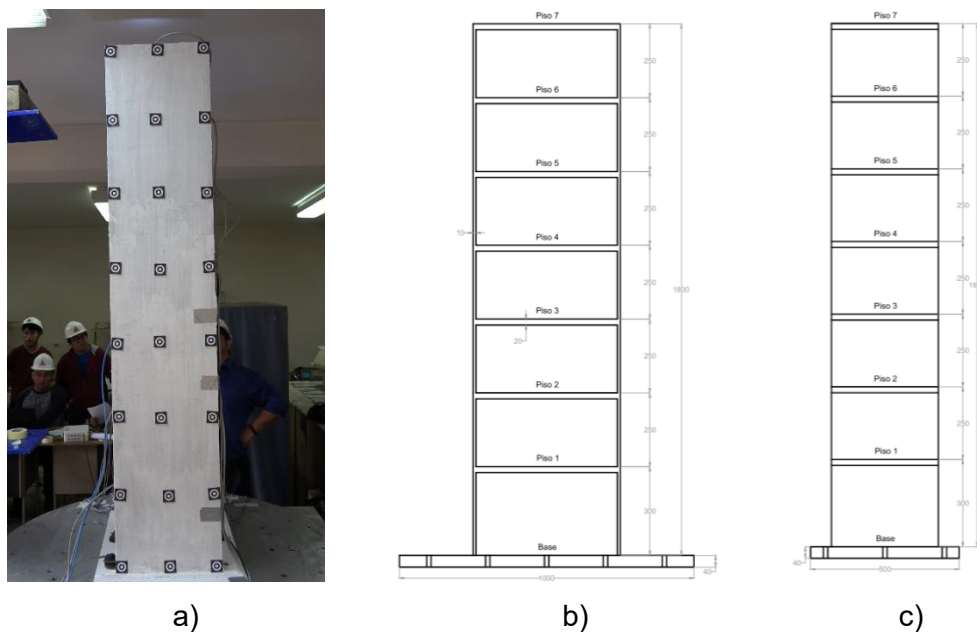
Especimen de siete niveles de MDL



Nota: Financiado por PP0068-PREVAED

Figura 60

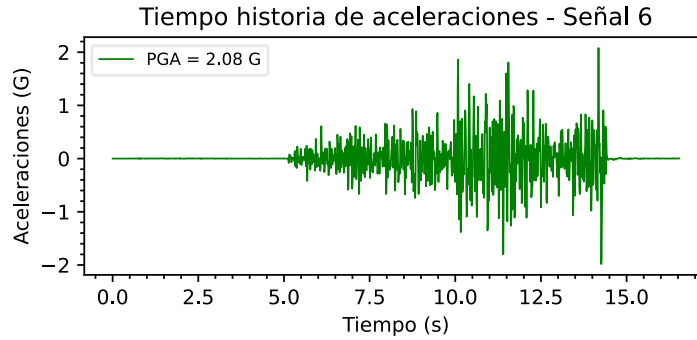
Vistas del espécimen de siete niveles de MDL.



Nota: a) Espécimen ensayado. b) Esquema y dimensiones del espécimen, vista frontal. c) Esquema y dimensiones del espécimen, vista frontal. Adaptado de: Zavala et al. (2024)

Figura 61

Registros de mayor PGA en el ensayo.



5.2.2. Comparación entre las medidas obtenidas por el láser y el sistema de medición propuesto

En el ensayo se registró con el sensor láser de desplazamiento los desplazamientos del último nivel.

Tabla 21

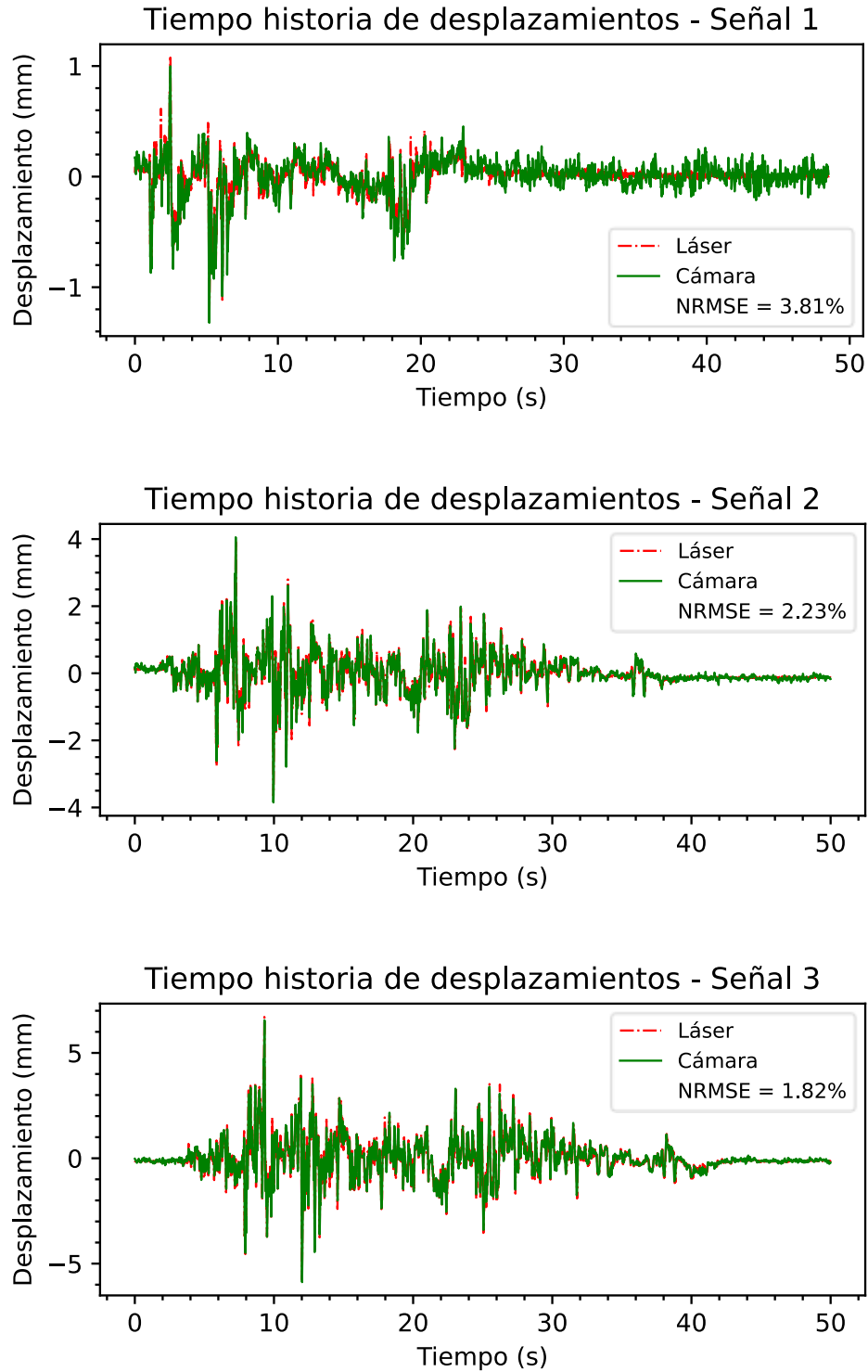
Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento.

N°	Láser		Cámara		Comparación		
	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	1.29	0.1	1.32	0.1	2.33	0	3.807
2	3.91	0.34	4.06	0.34	3.84	0	2.234
3	6.71	0.34	6.55	0.34	2.38	0	1.816
4	10.27	0.34	9.93	0.34	3.31	0	1.818
5	14.35	0.26	13.58	0.26	5.37	0	2.015
6	43.62	0.41	44.07	0.41	1.03	0	1.073

Las comparaciones gráficas entre los desplazamientos obtenidos por el sensor láser de desplazamiento y por la cámara se observan en la Figura 62, así mismo, la Figura 63 muestra la comparación gráfica de sus espectros de Fourier. La Tabla 21 muestra las comparaciones numéricas.

Figura 62

Comparación de las respuestas de desplazamiento del último nivel ante los seis registros del experimento.



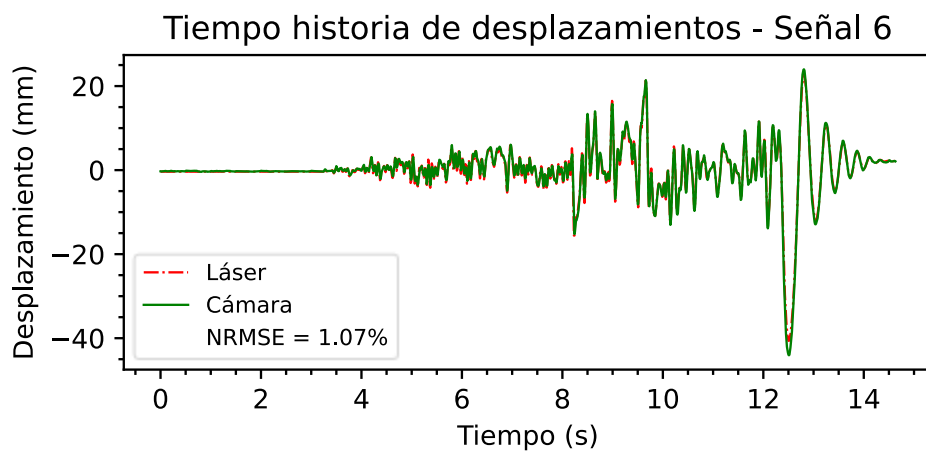
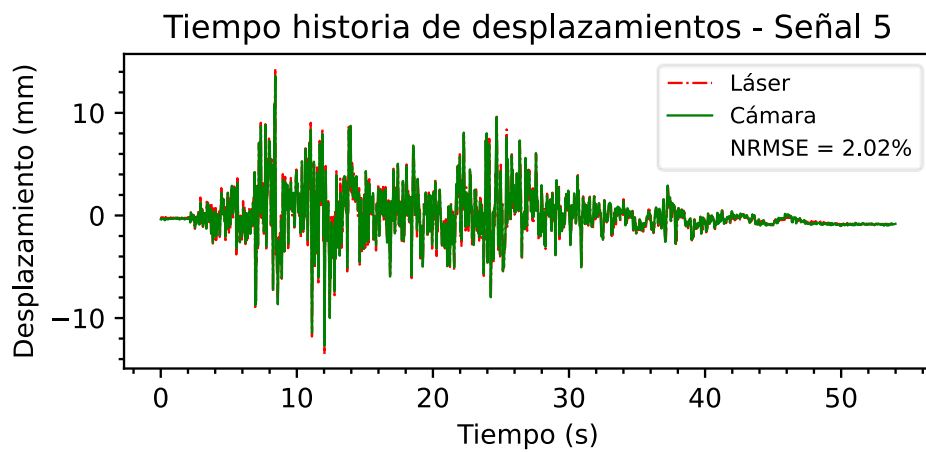
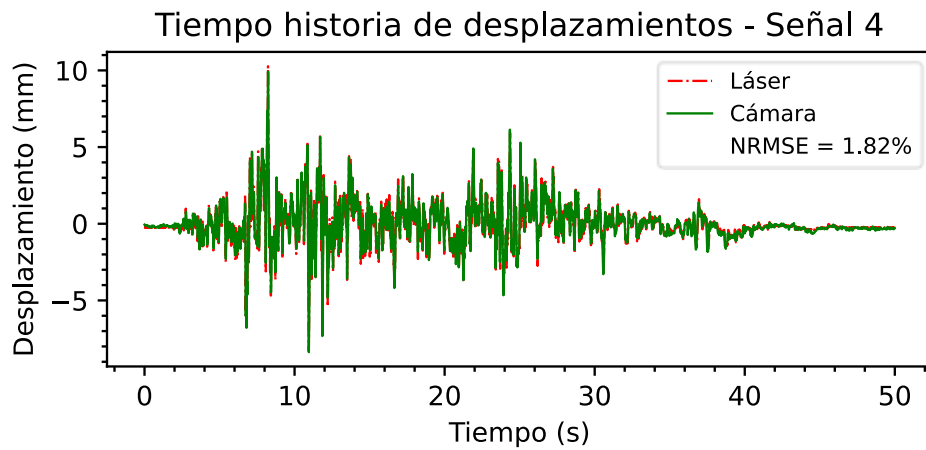
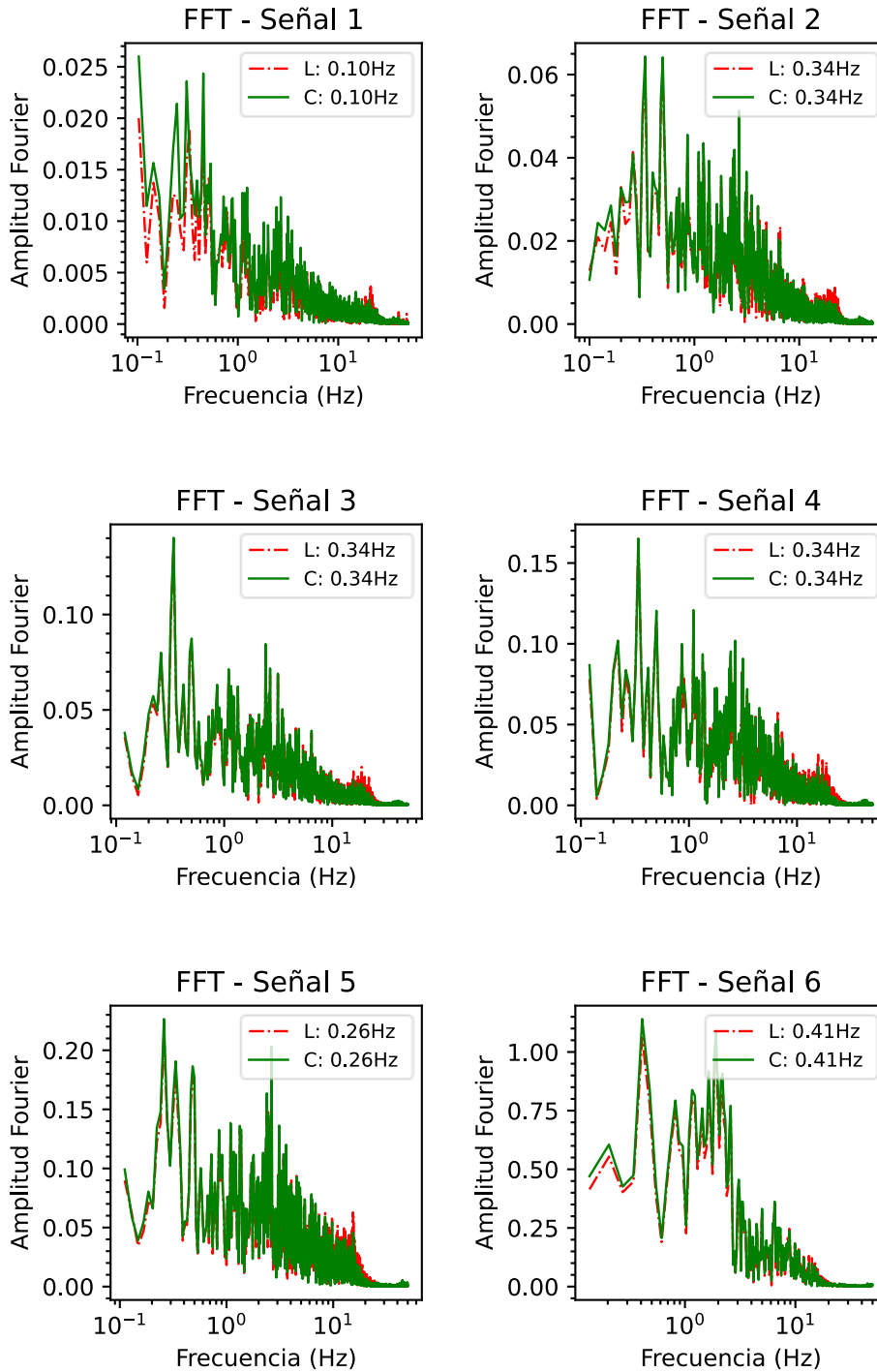


Figura 63

Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel ante los seis registros del experimento.

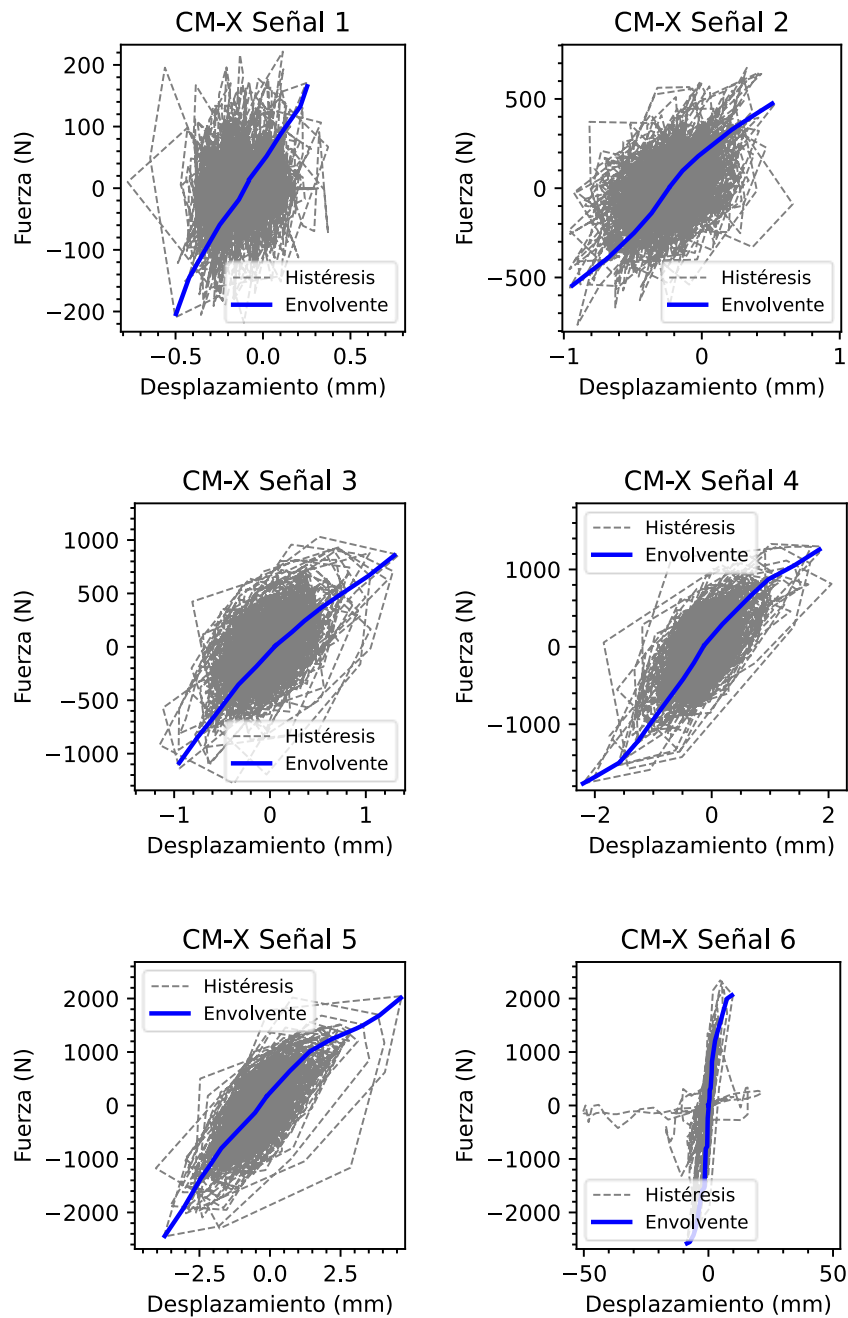


5.2.3. Comportamiento histerético del espécimen obtenido con el sistema de medición propuesto

En el presente apartado se presenta el comportamiento histerético global de todo el modelo en conjunto, tomando los desplazamientos relativos del último nivel con respecto a la base y la cortante total en los seis registros (Figura 64).

Figura 64

Comportamiento histerético del espécimen MDL en dirección X en los 6 registros enviados a la mesa vibradora.



5.3. Evaluación de la respuesta estructural de un modelo que presenta irregularidad en altura de piso blando

5.3.1. Descripción del ensayo

En el CISMID se pusieron a prueba en la mesa vibradora dos especímenes, E1 Y E2, de dos niveles cada uno, que simulaban estructuras de concreto armado: el espécimen E1, de estructura aporticada tanto en el primer como en el segundo nivel y el espécimen E2 de estructura aporticada en el primer nivel y el segundo nivel rigidizado con muros en la dirección de análisis.

El marcador del ensayo fue evaluar el comportamiento de estructuras con la irregularidad en altura de piso blando. El espécimen E2, al ser construido con un sistema mucho más rígido en el segundo nivel que en el primero, fue el que se esperaba que sufriera de esta irregularidad.

Se instaló un acelerómetro en la mesa vibradora y uno en cada nivel de cada espécimen.

Estos ensayos formaron parte de la tesis de grado de Cordova y Cosi (2024).

La Figura 65 muestra la configuración del ensayo para ambos especímenes desde una vista lateral, mientras que la Figura 66 muestra el fotograma inicial del video registrado por el sistema de medición propuesta.

Figura 65

Distribución de canales del adquisidor dinámico para la adquisición de data de los especímenes en la mesa vibradora.

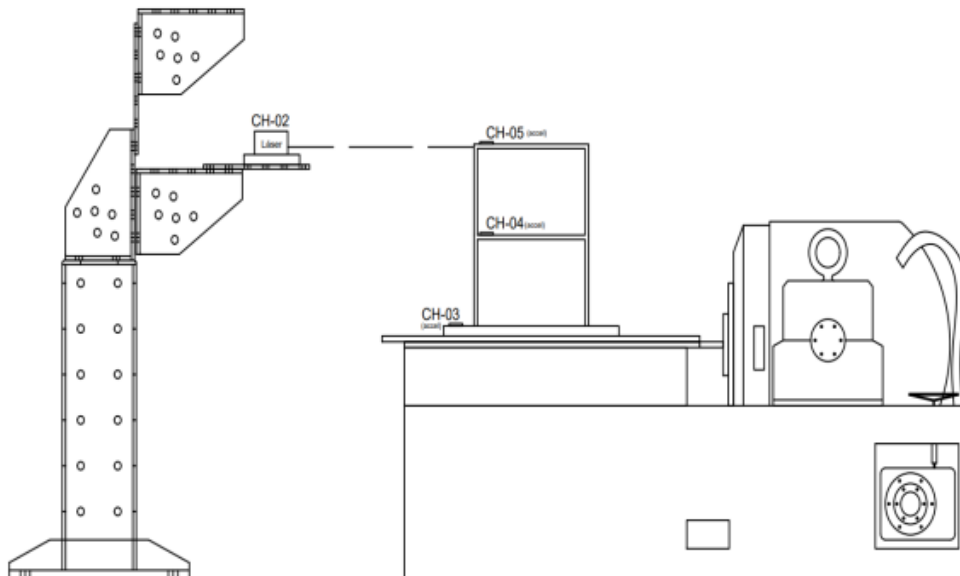


Figura 66

E1 (arriba) y E2 (abajo) capturados por la cámara de video.



El E1 fue sometido a cuatro sismos en su base, mientras que el E2 fue sometido a tres. La Tabla 22 y la Tabla 23 describen los registros enviados a la mesa vibradora para el ensayo para el E1 y el E2, respectivamente, donde cada registro tenía mayor PGA con respecto al registro anterior. Los gráficos de la historia en el tiempo de aceleraciones en la base para cada registro se pueden observar en el ANEXO 8 para el E1 Y E2 junto con sus respectivos espectros de Fourier. La Figura 67. muestra los registros de mayor PGA enviadas a la mesa para los E1 y E2. Cabe resaltar que la frecuencia natural para el E1 fue de 21.27 Hz y para el E2 fue de 26.32 Hz, calculados ambos antes de los ensayos.

Figura 67

Registro de mayor PGA en el ensayo de a) E1 y b) E2.

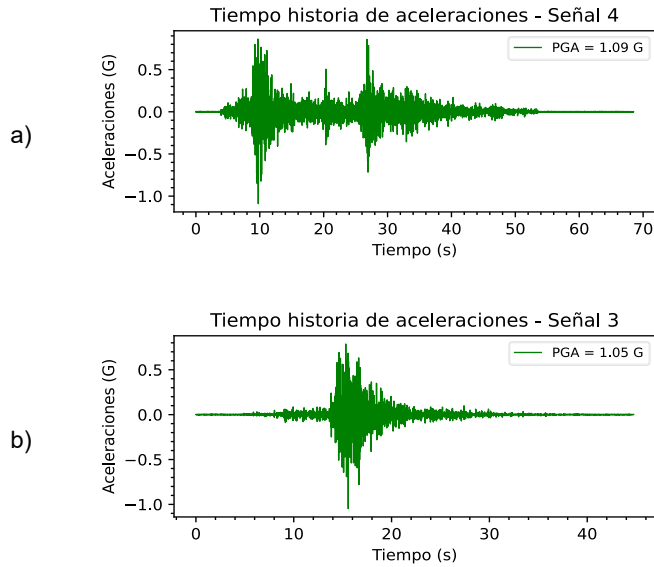


Tabla 22

Descripción de los registros de Pisco 2007 (estación Universidad Nacional de Ica) enviados a la mesa vibradora para el E1

N°	Frecuencia predominante (Hz)	PGA (G)
1	13.69	0.28
2	9.19	0.77
3	9.18	0.99
4	9.05	1.09

Tabla 23

Descripción de los registros enviados a la mesa vibradora para el E2

N°	Sismo	Frecuencia predominante (Hz)	PGA (G)
1	Lima 03 de octubre de 1974 (Estación Parque de la Reserva)	23.58	0.21
2	Lima 03 de octubre de 1974 (Estación Parque de la Reserva)	18.68	0.74
3	Lima 1976 (Estación Parque de la Reserva)	21.01	1.05

5.3.2. Comparación entre las medidas obtenidas por el sensor láser de desplazamiento y el sistema de medición propuesto

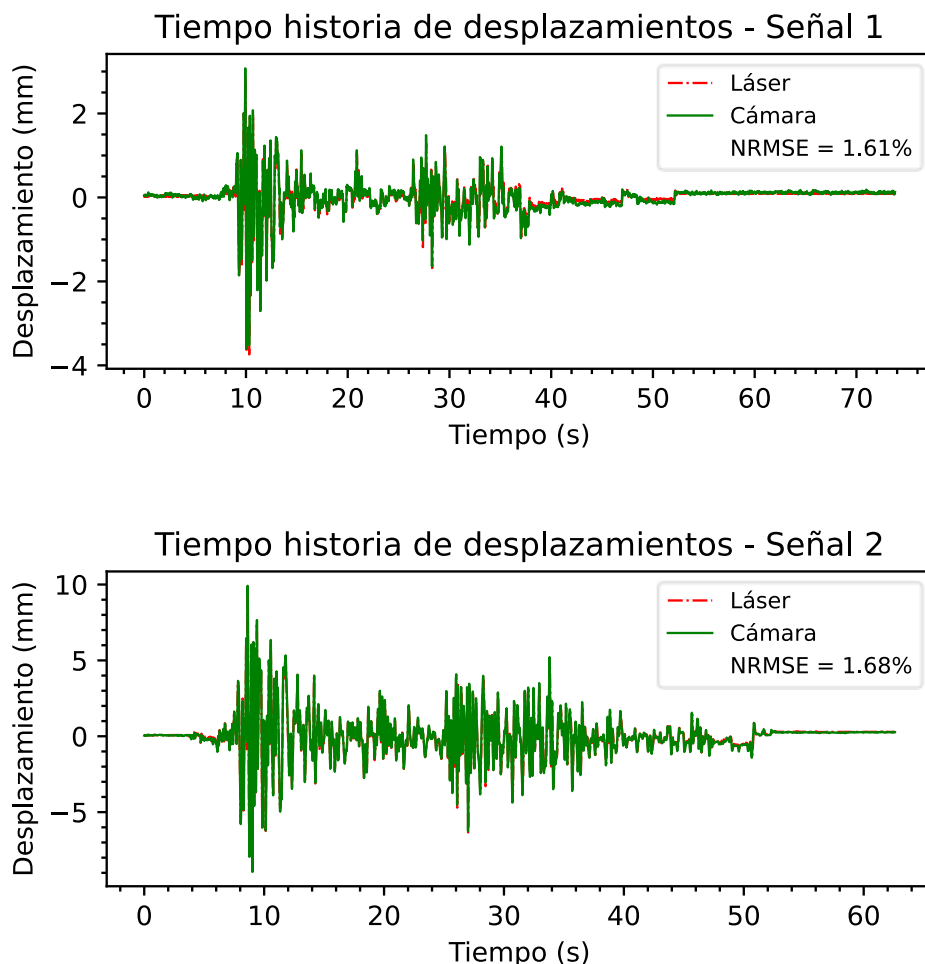
En el ensayo se registró con el láser los desplazamientos del último nivel.

Las comparaciones gráficas entre los desplazamientos obtenidos por el sensor láser de desplazamiento y por la cámara se observan en la Figura 68, para el E1, así mismo, la Figura 70 lo hace para el E2. Además, las Figuras 69 y 71 muestran las comparaciones en el dominio de la frecuencia para el E1 y E2 respectivamente.

Las comparaciones numéricas son expuestas en las Tablas 24 y 25 para el E1 y el E2 respectivamente.

Figura 68

Comparación de las respuestas de desplazamiento del último nivel de E1 medidas con el láser y con el sistema de medición propuesto.



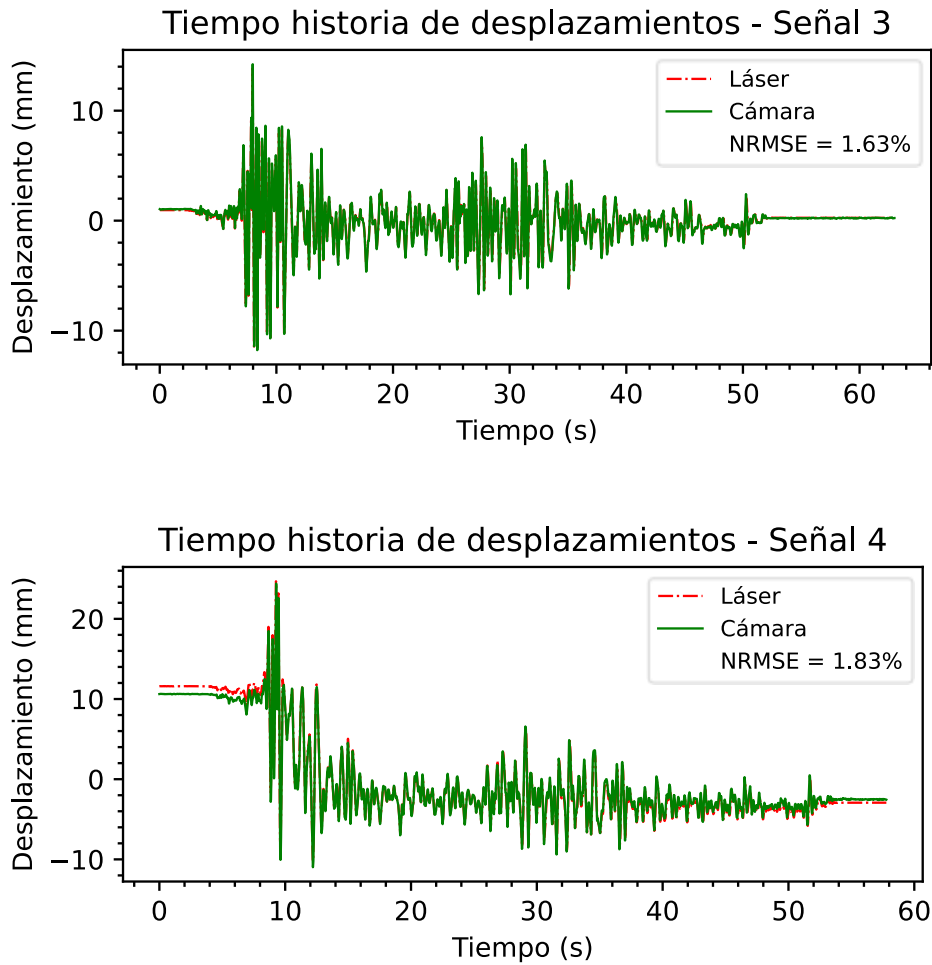
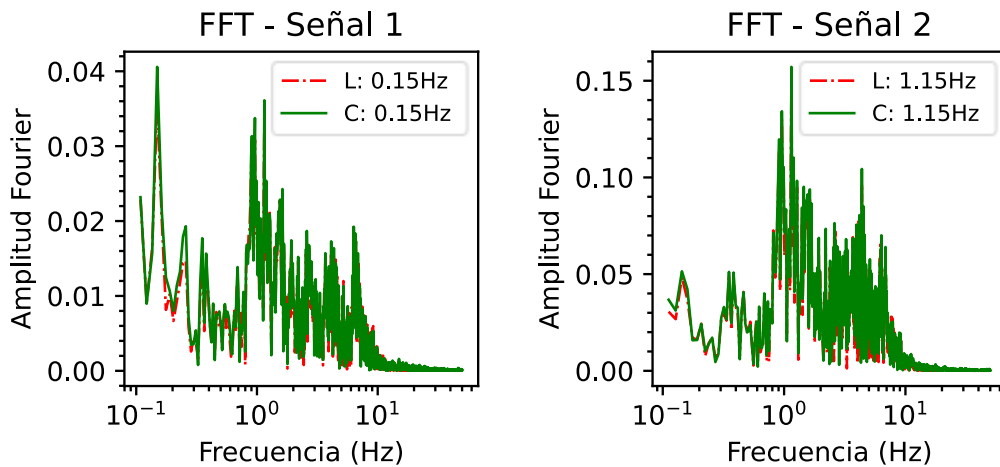


Figura 69

Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel de E1 medidos con el láser y con el sistema de medición propuesto.



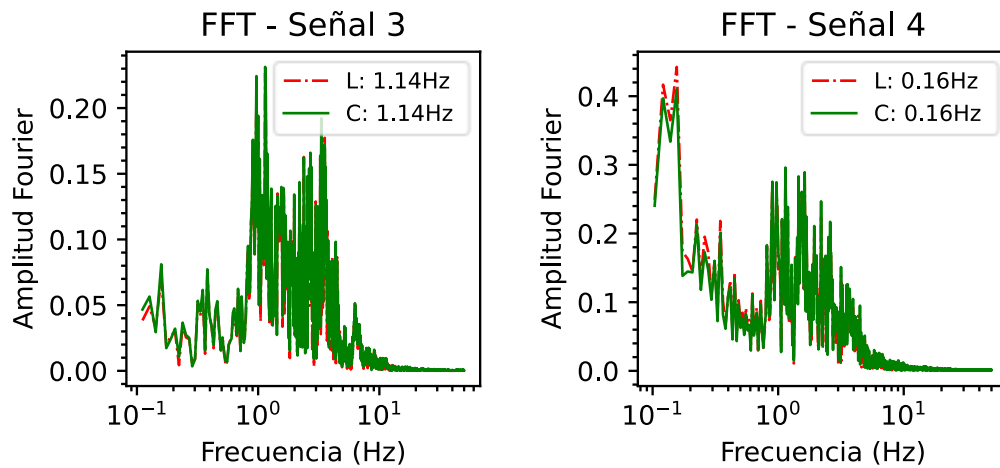
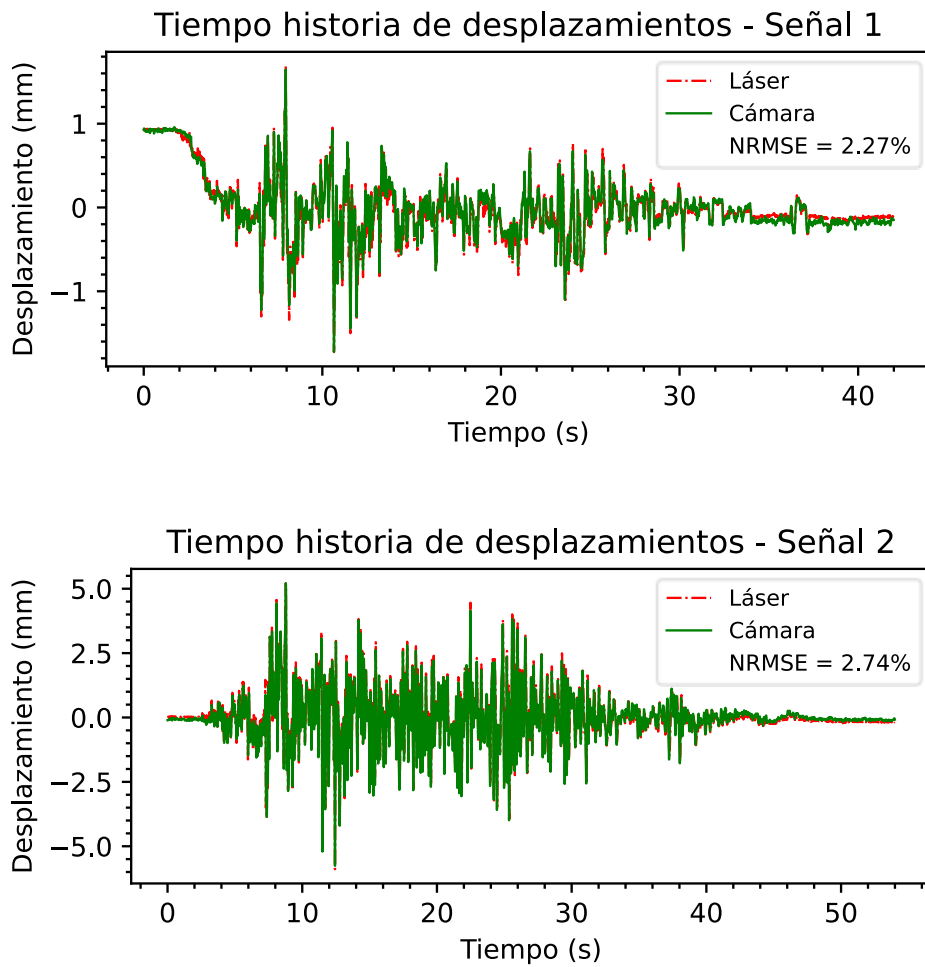


Figura 70

Comparación de las respuestas de desplazamiento del último nivel de E2 medidas con el láser y con el sistema de medición propuesto.



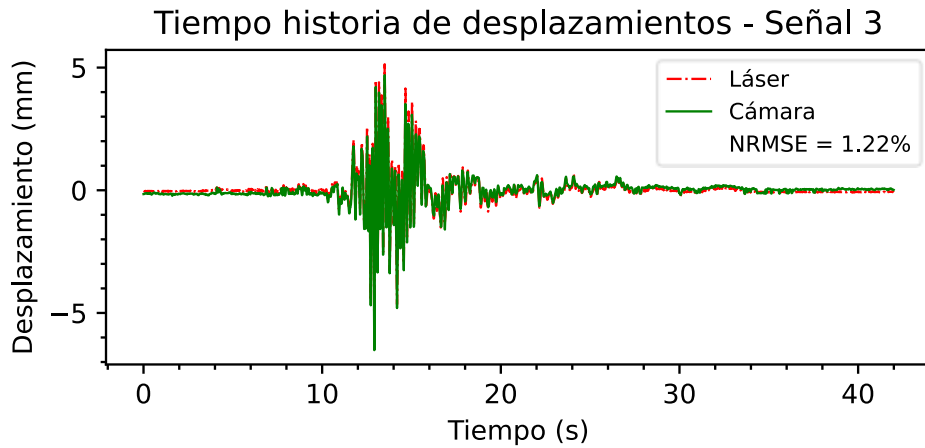


Figura 71

Comparación de los espectros de Fourier de los desplazamientos del último nivel de E2 medidos con el láser y con el sistema de medición propuesto.

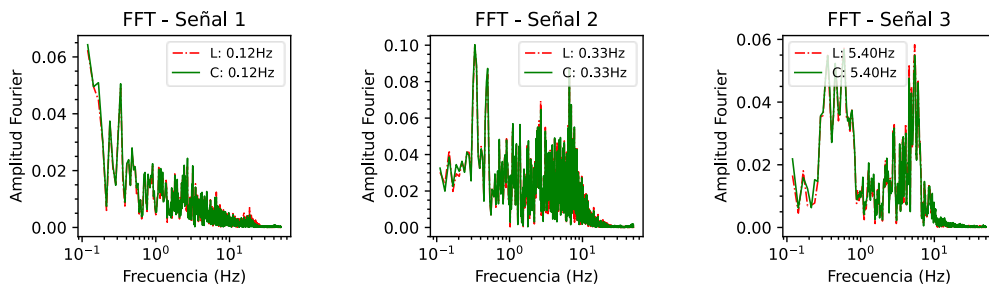


Tabla 24

Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento para E1

N°	Láser		Cámara		Comparación		
	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	3.74	0.15	3.6	0.15	3.74	0	1.615
2	9.88	1.15	9.92	1.15	0.40	0	1.676
3	13.86	1.14	14.22	1.14	2.60	0	1.63
4	24.69	0.16	24.4	0.16	1.17	0	1.835

Tabla 25

Comparación de las mediciones obtenidas por la cámara y el sensor láser de desplazamiento para E2

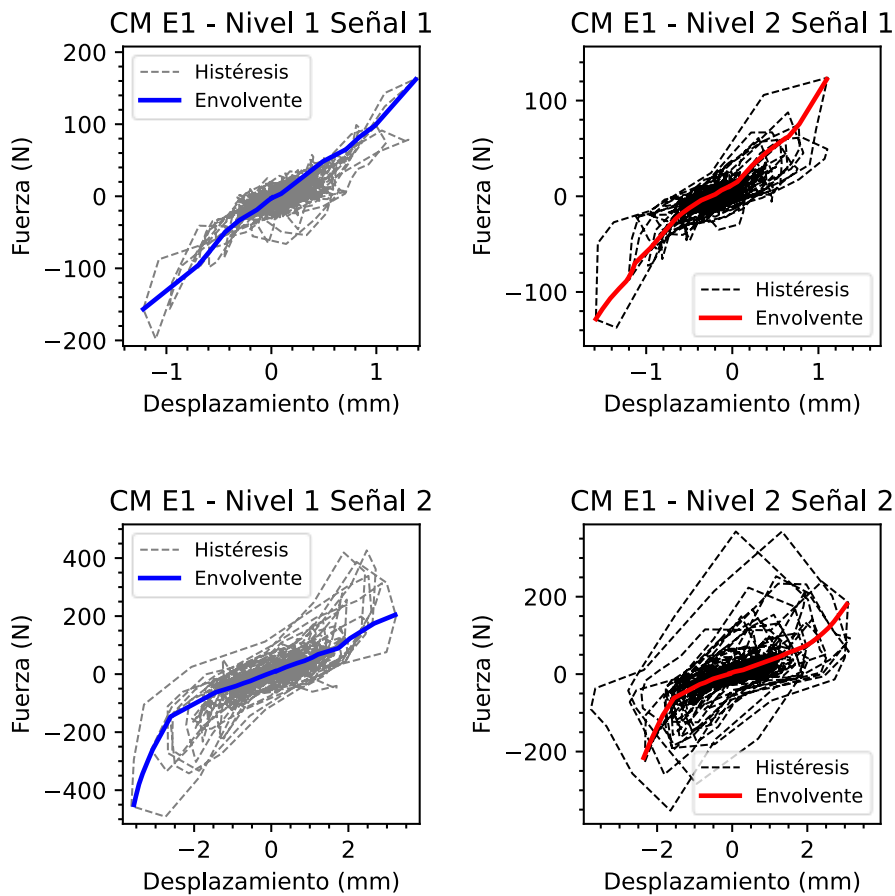
N°	Láser		Cámara		Comparación		
	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (mm)	Frec. (Hz)	Máx. (%)	Frec. (%)	NRMSE (%)
1	1.73	0.12	1.72	0.12	0.58	0	2.272
2	5.89	0.33	5.76	0.33	2.21	0	2.74
3	6.28	5.4	6.52	5.4	3.82	0	1.218

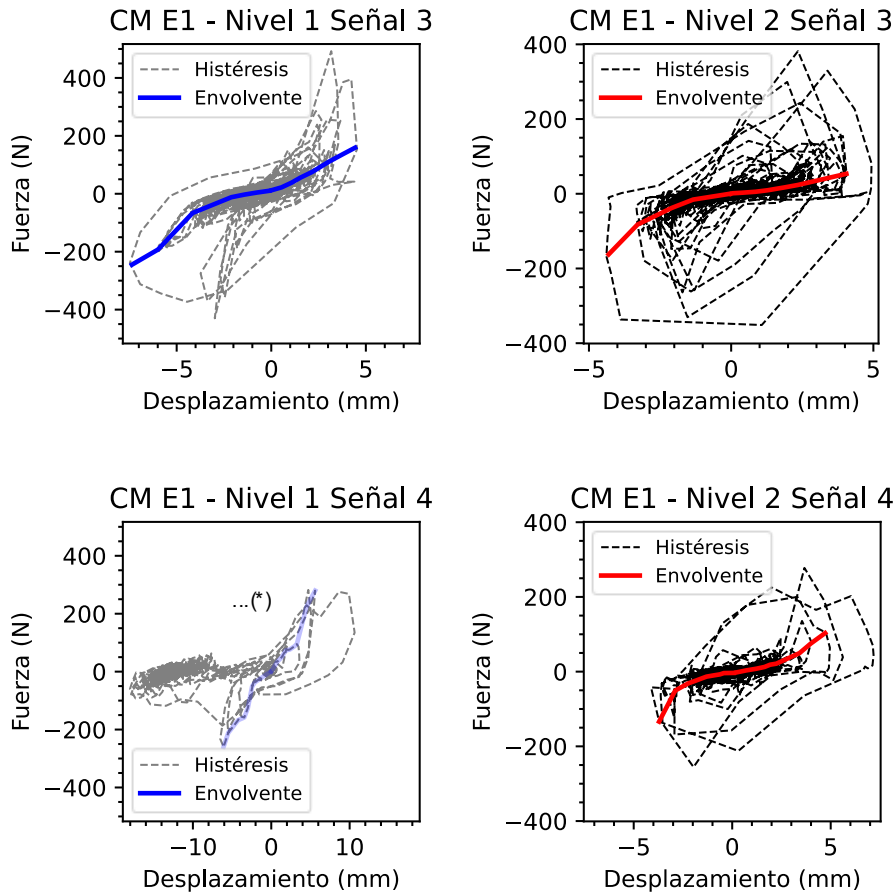
5.3.3. Comportamiento histerético del espécimen obtenido con el sistema de medición propuesto

Las Figuras 72 y 73 muestran el comportamiento histerético para el E1 y E2 respectivamente tanto para el primer como para el segundo nivel.

Figura 72

Comportamiento histerético del espécimen E1 en dirección X en los 4 registros enviados a la mesa vibradora.

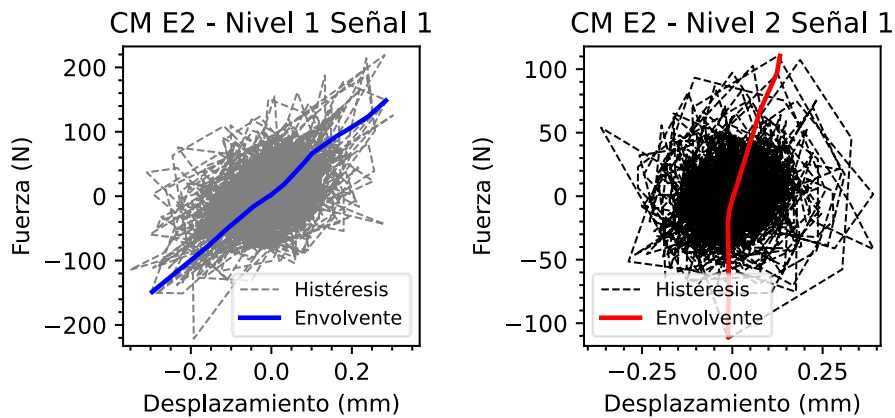




Nota: (*) Debido al desplazamiento residual, el espécimen comenzó a vibrar desde una nueva posición de equilibrio, generando así un desplazamiento de la envolvente.

Figura 73

Comportamiento histerético del espécimen E2 en dirección en los registros enviados a la mesa vibradora.



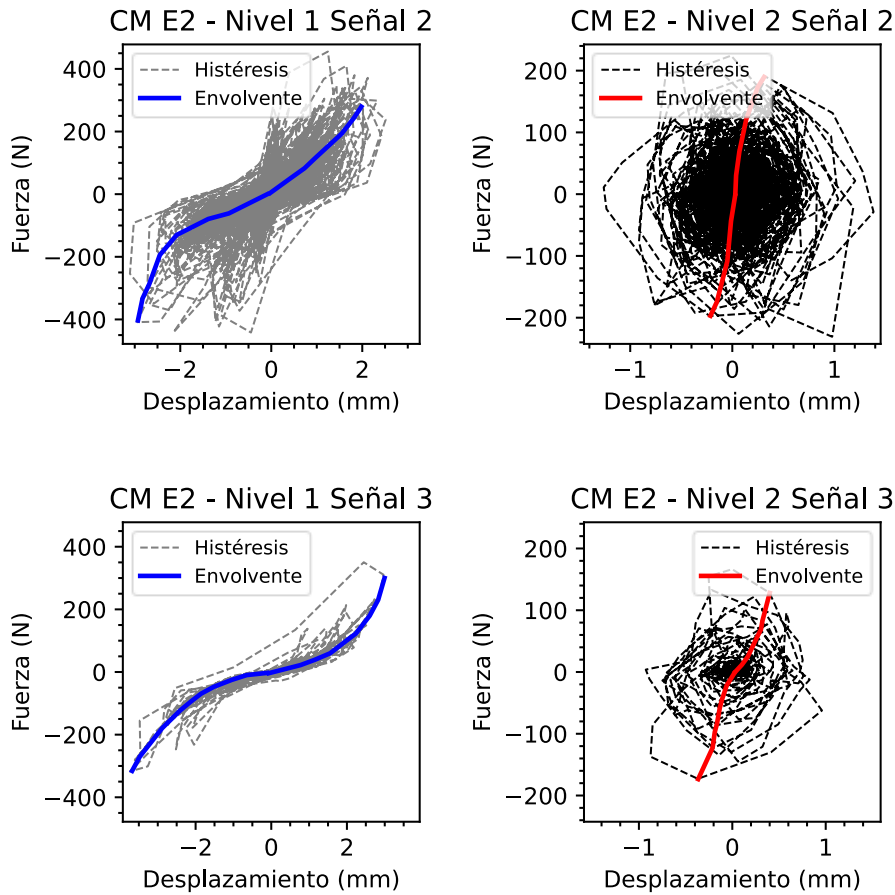
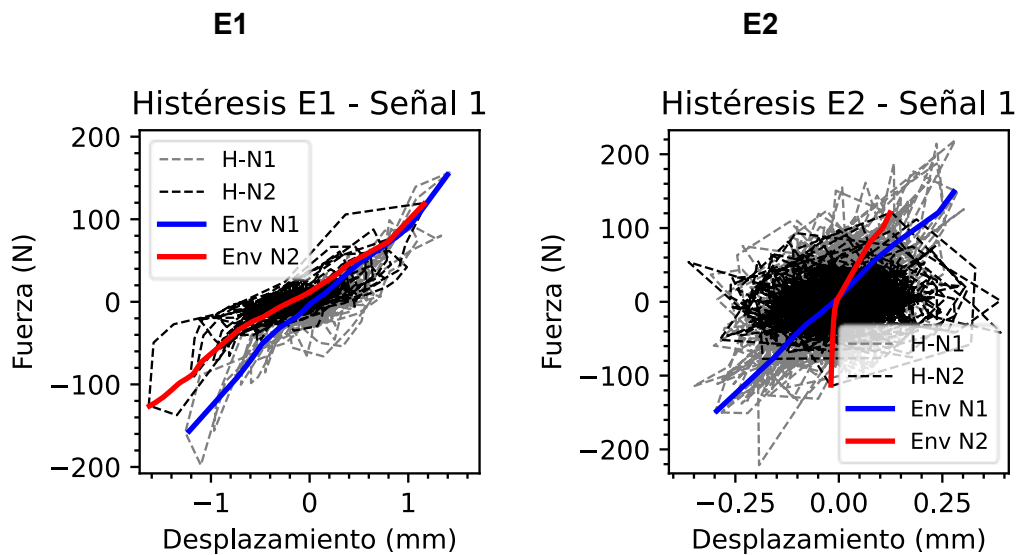
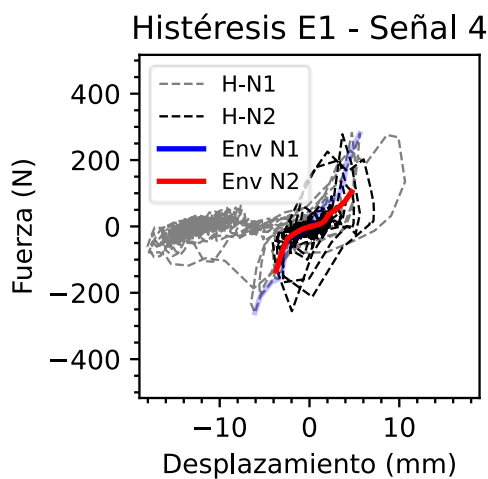
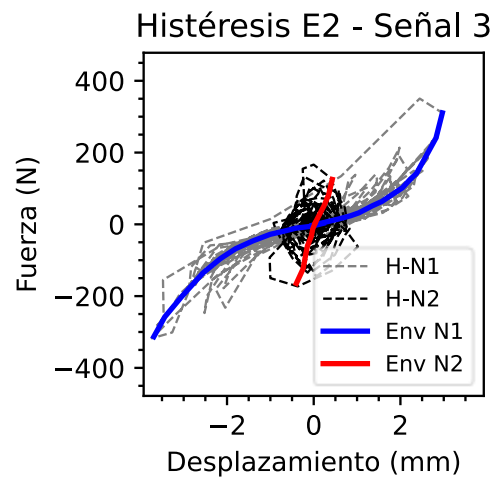
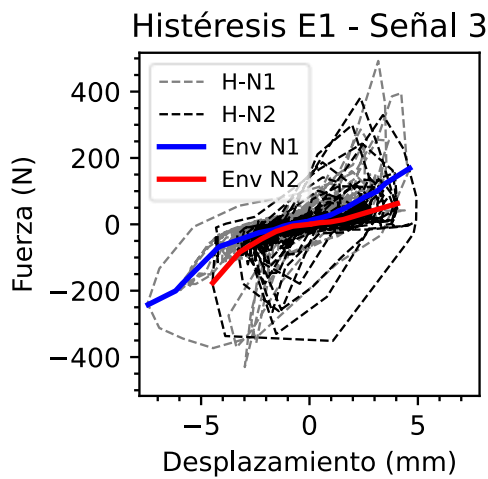
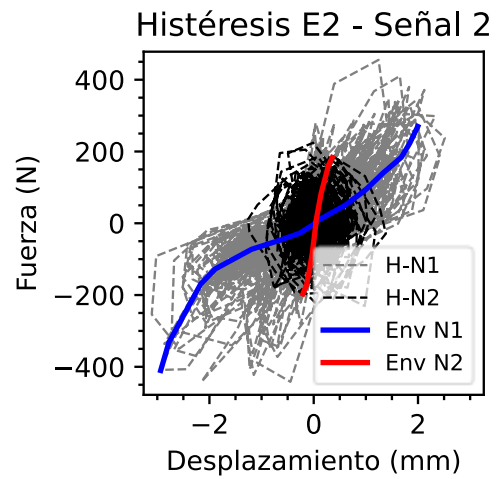
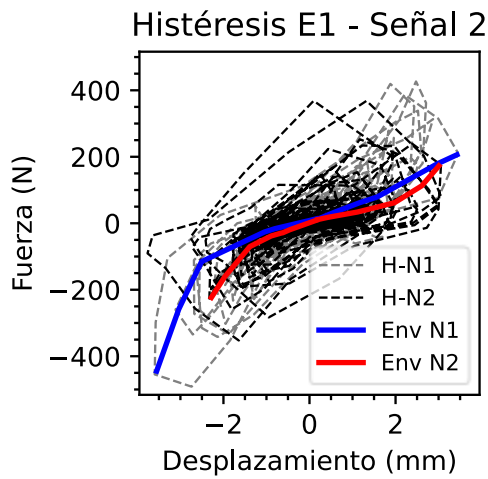


Figura 74

Comparación visual del comportamiento histerético del E1 y el E2.





Finalmente, las histéresis de ambos niveles son puestas dentro de un mismo gráfico (Figura 74) para cada espécimen y se ponen una al lado de otra para así comparar el comportamiento distinto que se demuestra para el E1 que no

presenta irregularidad de piso blando y el E2 que presenta irregularidad de piso blando.

Conclusiones

El sistema de medición cumple con el objetivo de medir desplazamientos de múltiples puntos de forma simultánea, en ambas dimensiones y sin la necesidad de establecer un contacto directo con el espécimen, lo que representa una significativa ventaja sobre los métodos tradicionales que suelen estar limitados a un solo punto de medición y una sola dirección.

En la comparación inicial de métodos de visión por computadora (rastreo por color, SIFT y *Template Matching*), se identificó al *Template Matching* (TM) como la opción más confiable y eficiente. Su bajo costo computacional y su capacidad para representar de forma clara la trayectoria del marcador resultaron determinantes frente a otros algoritmos que, pese a ser más robustos ante rotaciones o cambios de escala, presentaron limitaciones en precisión y velocidad.

Al combinar el TM con correlación de fase y técnicas de interpolación a nivel de subpíxel, se logró un aumento significativo en la exactitud de localización de los marcadores, manteniéndose un tiempo de procesamiento razonable. Esta integración permitió corregir de forma más fina la posición, incluso cuando existían ligeras variaciones de iluminación o cambios moderados en la apariencia de los marcadores.

Las validaciones realizadas con ondas armónicas y registros sísmicos confirmaron que el sistema propuesto ofrece un error medio normalizado (NRMSE) muy bajo—en la mayoría de los casos menor al 1%—al compararse con el sensor láser de desplazamiento. Además, se demostró que el método supera en exactitud a la doble integración de aceleraciones, evitando la acumulación de errores inherente a dicha técnica, presentando así menor NRMSE.

El uso de la cámara permite supervisar múltiples puntos a la vez, en dos direcciones, y describe con fidelidad la evolución temporal de la respuesta estructural. Aunque el sistema posibilita distinguir visualmente la formación de un desplazamiento residual tras eventos de alta inelasticidad, no se realizó un cálculo específico de ese valor residual.

Las pruebas mostraron que la frecuencia máxima de muestreo de la cámara (aproximadamente 120 fps) resulta suficiente para la mayoría de los ensayos estructurales de laboratorio. Sin embargo, ensayos con altas frecuencias

de vibración o transitorios muy rápidos podrían exigir cámaras de mayor velocidad o un enfoque híbrido con otros sensores.

Se concluye que, pese a que la cámara empleada opera a 120 Hz, su uso efectivo se restringe a señales con frecuencias predominantes menores a 12 Hz, a fin de garantizar una adecuada resolución temporal con un mínimo de 10 puntos por ciclo.

La sensibilidad del sistema para detectar desplazamientos mínimos depende significativamente del nivel de acercamiento (*zoom*) y del aislamiento respecto a vibraciones externas, variando desde décimas de milímetro en condiciones ideales hasta alrededor de 1 mm cuando la distancia aumenta considerablemente, como en el caso de los ensayos con múltiples marcadores.

El método demostró su versatilidad al aplicarse en diferentes escenarios: desde especímenes con irregularidad torsional hasta modelos con muros de ductilidad limitada y sistemas con piso blando. El seguimiento simultáneo de múltiples marcadores proporcionó mediciones detalladas de la respuesta, facilitando la detección de derivas y torsiones en planta con un buen nivel de precisión.

La obtención directa de desplazamientos—sin depender exclusivamente de la aceleración—favoreció la construcción de curvas de capacidad y la elaboración de ciclos histéresis. Esta ventaja fue particularmente útil en la evaluación de la pérdida de rigidez y la formación de daños, contribuyendo a un mejor entendimiento del proceso de degradación en modelos a escala diversa.

Finalmente, la aplicación práctica en modelos de uno o varios niveles, así como en estructuras a diferentes escalas, ratificó la flexibilidad del sistema de medición propuesto. Con una adecuada elección de marcadores, control de iluminación y estabilidad de la cámara, se logra un sistema no intrusivo, económicamente viable y con un margen de error mínimo en la medición de desplazamientos bidimensionales para el monitoreo de la salud estructural.

Recomendaciones

Se recomienda reducir las variaciones lumínicas y ubicar la cámara en soportes rígidos para evitar vibraciones accidentales. En futuros proyectos, la implementación de sistemas de iluminación dedicados y el uso de controles remotos contribuirían a mejorar aún más la confiabilidad de las mediciones.

Se sugiere utilizar marcadores de alto contraste y geometrías menos sensibles a la rotación o los cambios en iluminación (por ejemplo, círculos concéntricos). Como trabajo a futuro, sería útil ensayar con diferentes materiales o patrones que reduzcan la incidencia de sombras y brillos, especialmente en ensayos de mayor complejidad.

Se sugiere limitar el área de búsqueda a lo estrictamente necesario, elegir los marcadores de forma precisa y elegir con precisión la distancia real de referencia en el mismo plano de la estructura, evitando inclinaciones que produzcan errores. Futuras investigaciones pueden incorporar el uso de redes neuronales para evitar el paso inicial de seleccionar manualmente los marcadores, los ROIs y el factor de escala, haciendo más intuitivo el uso del programa.

Antes de iniciar cada ensayo, resulta conveniente verificar si la tasa de fotogramas de la cámara cubre el espectro de frecuencias de interés. Para investigaciones de alta frecuencia o eventos transitorios muy rápidos, se recomienda explorar el empleo de cámaras de mayor velocidad o complementarlas con sensores inerciales.

La cámara utilizada, con una frecuencia de muestreo de 120 Hz, permite teóricamente registrar señales hasta aproximadamente 59 Hz; sin embargo, para una reconstrucción precisa de la señal, es necesario contar con al menos 10 puntos por ciclo, limitando así la frecuencia máxima recomendable a aproximadamente 12 Hz.

La sensibilidad del sistema para detectar desplazamientos mínimos depende significativamente del nivel de acercamiento (*zoom*) y del aislamiento respecto a vibraciones externas, variando desde décimas de milímetro en condiciones ideales hasta alrededor de 1 mm cuando la distancia aumenta considerablemente, como en el caso de los ensayos con múltiples marcadores.

Para capturar irregularidades torsionales o en altura, se recomienda colocar marcadores en esquinas, centros de masa y niveles intermedios. Si se sospecha de movimientos tridimensionales, futuras investigaciones podrían incluir

la filmación desde ángulos adicionales o el acoplamiento de sensores para corregir dicho efecto.

Aunque las vibraciones ambientales se mostraron mínimas en laboratorio, no se descarta la posibilidad de evaluarlas detalladamente en ensayos de mayor escala. Por otro lado, estudiar métodos para cuantificar el desplazamiento residual de forma sistemática abriría una línea interesante de investigación, sobre todo para detectar daño permanente en estructuras que hayan entrado en rangos inelásticos.

Para facilitar la adopción del sistema desarrollado y su uso por los integrantes del CISMID es recomendable la redacción de una documentación clara y un manual de usuario, así como una interfaz gráfica que haga la experiencia más intuitiva e interactiva.

Aunque el sistema propuesto ha sido validado en condiciones controladas de laboratorio, su aplicación puede extenderse al monitoreo de estructuras reales, especialmente en aquellos casos donde los desplazamientos sean apreciables y las frecuencias estructurales estén dentro del rango capturable por la tasa de cuadros por segundo (FPS) de la cámara utilizada. Para ello, será necesario considerar y analizar condiciones adicionales, tales como la iluminación ambiental, la distancia entre la cámara y el marcador, así como la estabilidad del montaje de la cámara, con el fin de asegurar la calidad y fiabilidad de las mediciones en campo.

Referencias bibliográficas

- Alba, A., Aguilar-Ponce, R. M., Viguera-Gómez, J. F., & Arce-Santana, E. (2013). Phase correlation based image alignment with subpixel accuracy. En I. Batyrshin & M. González Mendoza (Eds.), *MICAI 2012: Advances in Artificial Intelligence* (LNAI 7629, pp. 171–182). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37807-2_15
- Almeida Santos, C., Oliveira Costa, C., & Batista, J. (2015). A vision-based system for measuring the displacements of large structures: Simultaneous adaptive calibration and full motion estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70–71, 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.10.033>
- Boore, D. M., Stephens, C. D., & Joyner, W. B. (2002). Comments on baseline correction of digital strong-motion data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), 1543–1560.
- Brigham, E. O. (1988). *The fast Fourier transformation and its applications*. Prentice-Hall.
- Brownjohn, J. M. W., Xu, Y., & Hester, D. (2017). Vision-based bridge deformation monitoring. *Frontiers in Built Environment*, 3, Article 23. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00023>
- Carreño, E., Bravo, B., Suárez, A., & Tordesillas, J. M. (1999). Registro y tratamiento de acelerogramas. *Física de la Tierra*, 11, 81–111.
- Chen, J. G., Wadhwa, N., Cha, Y.-J., Durand, F., Freeman, W. T., & Buyukozturk, O. (2015). Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. *Journal of Sound and Vibration*, 345, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.01.024>
- Chopra, A. K. (2016). *Dynamics of structures* (5th ed.). Prentice Hall.
- Cochran, W. T., Cooley, J. W., Favin, D. L., Helms, H. D., Kaenel, R. A., Lang, W. W., ... Welch, P. D. (1967). What is the fast Fourier transform? *Proceedings of the IEEE*, 55(10) 27-37.
- Córdova, R., & Cosi, W. (2024). *Análisis experimental de propuestas de reforzamiento de edificios con piso débil y blando en una vivienda aporticada* [Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola]. Repositorio de tesis USIL. <https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/eb72fc52-7b10-43ba-b7f7-b7a9534f5948>
- Crochiere, R. E., & Rabiner, L. R. (1983). *Multirate digital signal processing*. Prentice-Hall.
- Diniz, P. S. R., da Silva, E. A. B., & Netto, S. L. (2010). *Digital signal processing: System analysis and design* (2nd ed.). Federal University of Rio de Janeiro.

- Dong, C.-Z., & Catbas, F. N. (2020). A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels. *Structural Health Monitoring*, 20(2), 692–743. <https://doi.org/10.1177/1475921720935585>
- Espinoza, E. (2008). *Análisis matemático IV*. Editorial Eduardo Espinoza Ramos.
- Feng, D., & Feng, M. Q. (2016). Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 23, 876–890. <https://doi.org/10.1002/stc.1819>
- Feng, D., & Feng, M. Q. (2018). Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review. *Engineering Structures*, 156, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.018>
- Flah, M., Nunez, I., Ben Chaabene, W., & Nehdi, M. L. (2020). Machine learning algorithms in civil structural health monitoring: A systematic review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 2621-2643. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09471-9>
- Gokdemir, H., Ozbasaran, H., Dogan, M., Unluoglu, E., & Albayrak, U. (2013). Effects of torsional irregularity to structures during earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, 35, 713–717. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.06.028>
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2017). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson Education Limited.
- Graßl, C., Zinßer, T., & Niemann, H. (2003). Illumination insensitive template matching with hyperplanes. En B. Michaelis & G. Krell (Eds.), *Pattern Recognition* (LNCS 2781, pp. 225–232). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45243-0_36
- Guemes, A., Fernandez-Lopez, A., Pozo, A. R., & Sierra-Pérez, J. (2020). Structural health monitoring for advanced composite structures: A review. *Journal of Composite Science*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.3390/jcs4010013>
- Guizado, E. (2025). *Metodología para la detección de daño en edificaciones con irregularidad torsional mediante el monitoreo de la salud estructural* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Jähne, B. (2005). *Digital image processing* (6th ed.). Springer.
- Jayarajan, P. (2019). Seismic review of conceptual layouts in earthquake-prone areas: A challenge for practising architects. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 6(3), 73–78.
- Jurjo, D. L. B. R., Magluta, C., Roitman, N., & Gonçalves, P. B. (2010). Experimental methodology for the dynamic analysis of slender structures based on digital image processing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, 1369–1382. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.12.006>

- Khuc, T., & Catbas, F. N. (2016). Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision. *Structural Control and Health Monitoring*, 24, e1852. <https://doi.org/10.1002/stc.1852>
- Kohut, P., Holak, K., Uhl, T., Ortyl, Ł., Owerko, T., Kuras, P., & Kocierz, R. (2013). Monitoring of a civil structure's state based on non-contact measurements. *Structural Health Monitoring*, 12(5-6), 411–429. <https://doi.org/10.1177/1475921713487397>
- Kromanis, R., Xu, Y., Lydon, D., Martinez del Rincon, J., & Al-Habaibeh, A. (2019). Measuring structural deformations in the laboratory environment using smartphones. *Frontiers in Built Environment*, 5, Article 44. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2019.00044/full>
- Langford, M., Fox, A., & Smith, R. S. (2010). *Langford's basic photography* (9th ed.). Focal Press.
- Levine, M. D. (1985). *Vision in man and machine*. McGraw-Hill.
- Li-Jun, W., Casciati, F., & Casciati, S. (2014). Dynamic testing of a laboratory model via vision-based sensing. *Engineering Structures*, 60, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.12.002>
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91–110.
- Nussbaumer, H. J. (1982). The fast Fourier transform. En *Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms* (Springer Series in Information Sciences, Vol. 2, pp. 80–111). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-81897-4_4
- OpenCV. (s. f.). *Introduction to SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)*. OpenCV. https://docs.opencv.org/4.x/da/df5/tutorial_py_sift_intro.html
- Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2011). *Tratamiento de señales en tiempo discreto*. Pearson Educación S.A.
- Ortiz, K. (2019). *Evaluación del efecto de la simultaneidad de las componentes de sismo en estructuras con irregularidad torsional* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio de tesis UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/20548>
- Otani, S. (1981). Hysteresis models of reinforced concrete for earthquake-response analysis. *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B)*, 36(2), 407–441.
- Pan, C., Zhang, R., Luo, H., & Shen, H. (2016). Baseline correction of vibration acceleration signals with inconsistent initial velocity and displacement. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(10), 1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814016675534>

- Pallotta, L., Giunta, G., & Clemente, C. (2020). Subpixel SAR image registration through parabolic interpolation of the 2-D cross correlation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(6), 4132-4144. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2961245>
- Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (1996). *Digital signal processing: Principles, algorithms, and applications* (3rd ed.). Prentice-Hall.
- Shamoi, S., Pakizar, P., Sansyzbayev, D., & Abilev, N. (2022). Comparative overview of color models for content-based image retrieval. *Proceedings of the 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SIST54437.2022.9945709>
- Shibata, A. (2010). *Dynamic analysis of earthquake resistant structures*. Tohoku University Press.
- Solomon, C. J., & Breckon, T. P. (2011). *Fundamentals of digital image processing: A practical approach with examples in Matlab*. Wiley-Blackwell.
- Sony. (2023, 10 de octubre). *Especificaciones FDR-AX43*. Sony. <https://www.sony.com.pe/electronics/videocamaras-handycam/fdr-ax43/specifications#features>
- Stone, H. S., Orchard, M. T., Chang, E.-C., & Martucci, S. A. (2001). A fast direct Fourier-based algorithm for subpixel registration of images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(10), 2235–2243.
- Thomas, L. (s. f.). *Multi-Template Matching*. GitHub. <https://multi-template-matching.github.io/Multi-Template-Matching/doc/explanations>
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Wan, X., Wang, C., & Li, S. (2019). The extension of phase correlation to image perspective distortions based on particle swarm optimization. *Sensors*, 19(14), 3117. <https://doi.org/10.3390/s19143117>
- Xiao, P., Wu, Z. Y., Christenson, R., & Lobo-Aguilar, S. (2020). Development of video analytics with template matching methods for using camera as sensor and application to highway bridge structural health monitoring. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(3), 633–650. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00392-6>
- Ye, Z., Tong, X., Xu, Y., Gao, S., Liu, S., Xie, H., ... Liu, X. (2018). An improved subpixel phase correlation method with application in videogrammetric monitoring of shaking table tests. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 84(9), 579–592. <https://doi.org/10.14358/PERS.84.9.579>

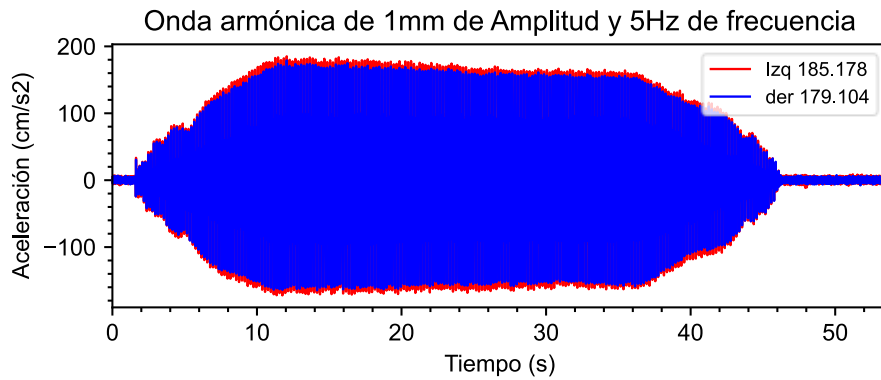
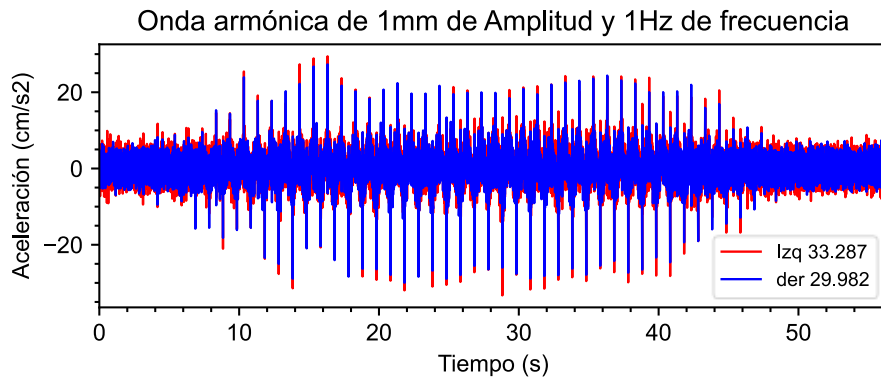
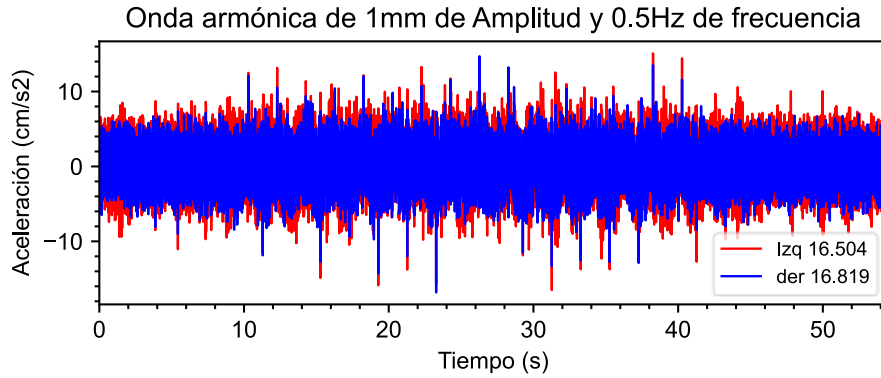
- Yoon, H., Elanwar, H., Choi, H., Golparvar-Fard, M., & Spencer, B. F., Jr. (2016). Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(10), 1403–1425. <https://doi.org/10.1002/stc.1850>
- Zavala, C., Díaz, M., Reyna, R., Cueva, J., Otero, D., Lopez, L., Isuhuaylas, S., & Noa, R. (2023). Seismic behaviour of a scaled 7-story building model with low-ductility reinforced concrete walls. En *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024)*.
- Zavala, C., Gibu, P., Lavado, L., Taira, J., Cárdenas, L., & Ceferenio, L. (2013). Cyclic behavior of low ductility walls considering perpendicular action. *Journal of Disaster Research*, 8(2), 407–441.

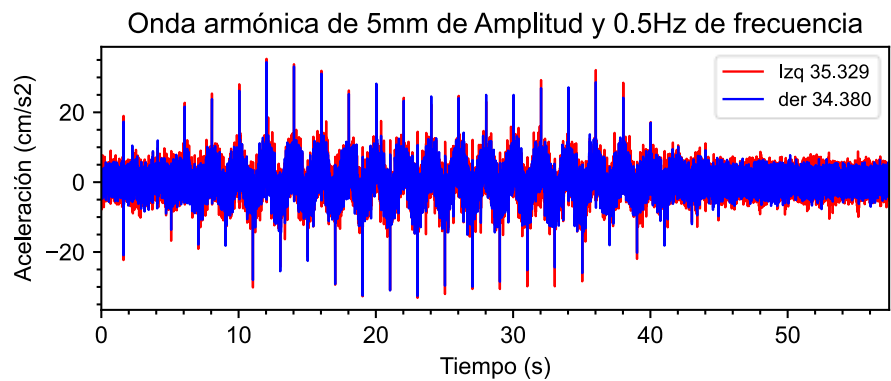
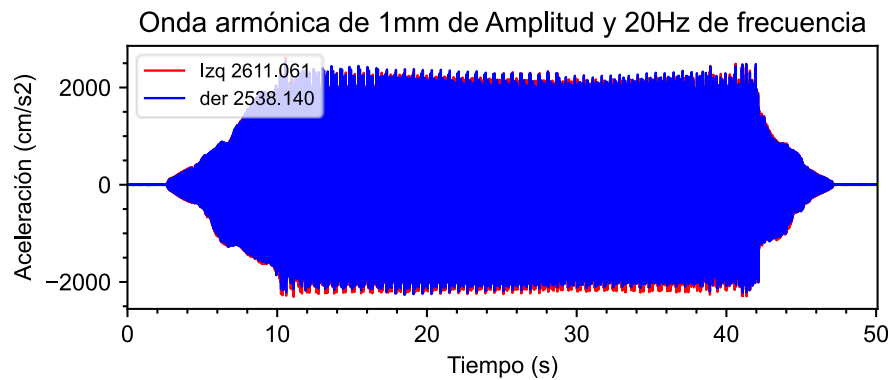
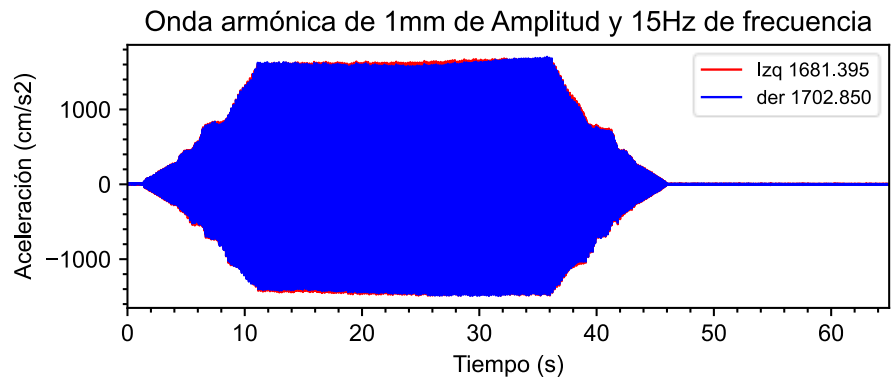
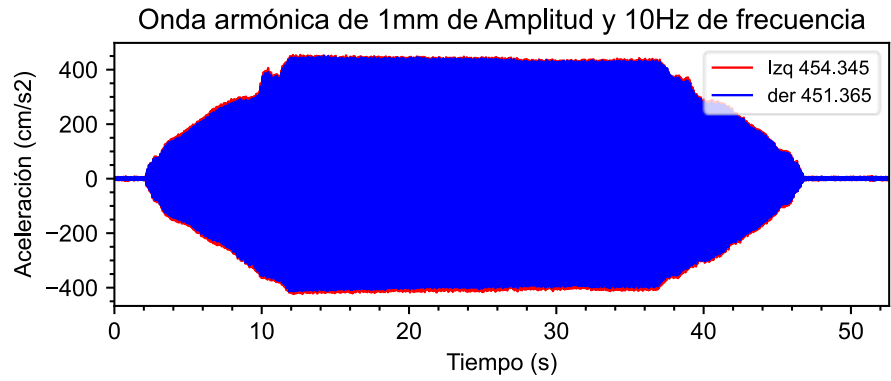
Anexos

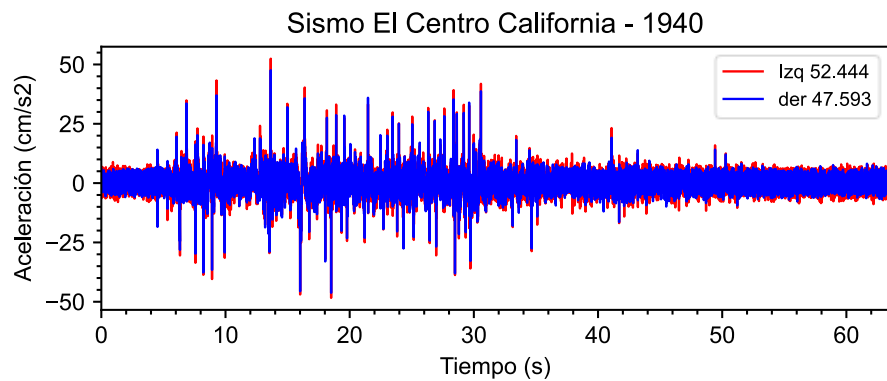
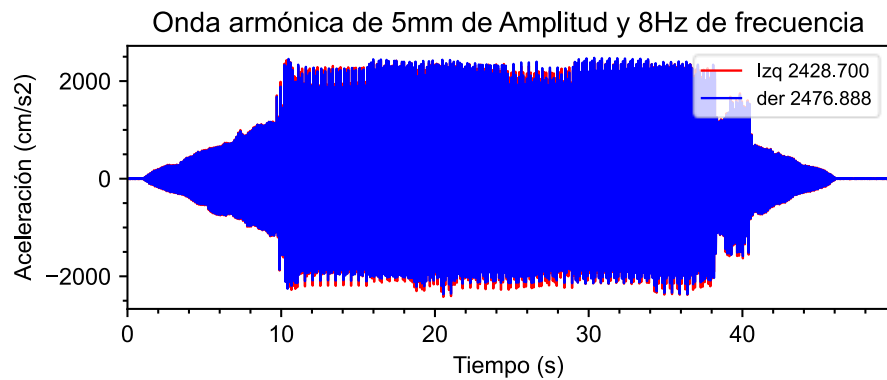
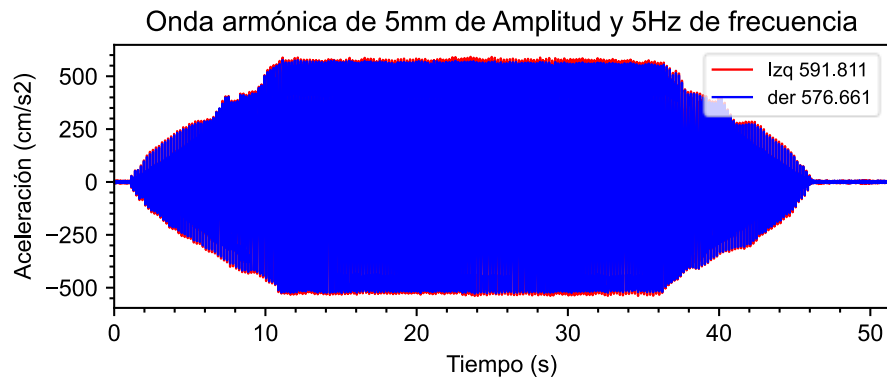
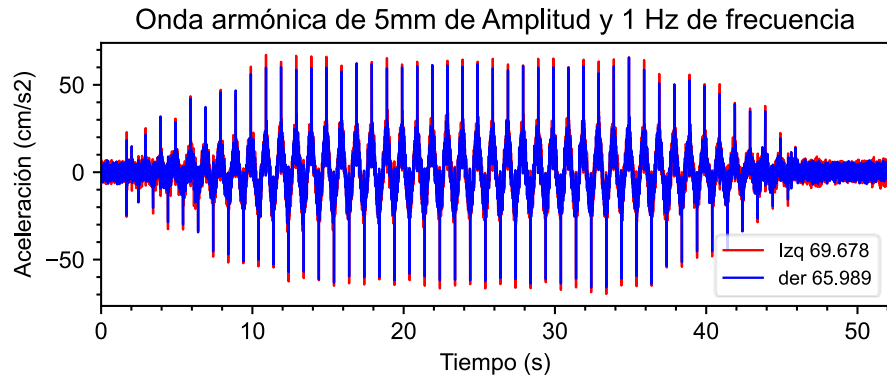
Anexo 1: Registros de aceleraciones en el ensayo de validación con la mesa vibradora de seis grados de libertad.....	1
Anexo 2: Comparaciones gráficas entre los distintos métodos de medición para todos los registros del ensayo de validación.....	5
Anexo 3: Registros enviados a la mesa vibradora en el ensayo a escala de un modelo que presenta irregularidad torsional.....	19
Anexo 4: Comparación entre las medidas obtenidas por el sensor láser de desplazamiento y el sistema de medición propuesto para cada registro en el ensayo a escala de un modelo con irregularidad torsional.....	23
Anexo 5: Comparación del desplazamiento de la esquina de mayor movimiento con el centro de masas para para cada registro en el ensayo a escala de un modelo con irregularidad torsional	27
Anexo 6: Comportamiento histerético del centro de masas para para cada registro en el ensayo a escala de un modelo con irregularidad torsional.....	33
Anexo 7: Registros enviados a la mesa vibradora en el ensayo a escala de una edificación con muros de ductilidad limitada.....	38
Anexo 8: Registros enviados a la mesa vibradora en el ensayo a escala de un modelo con irregularidad en altura de rigidez.....	40

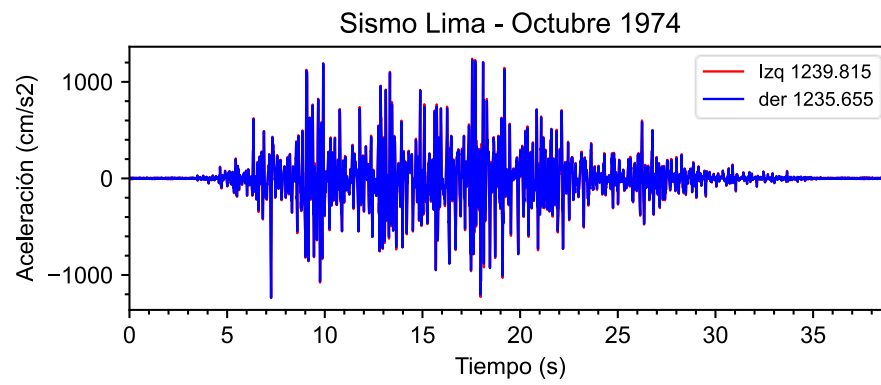
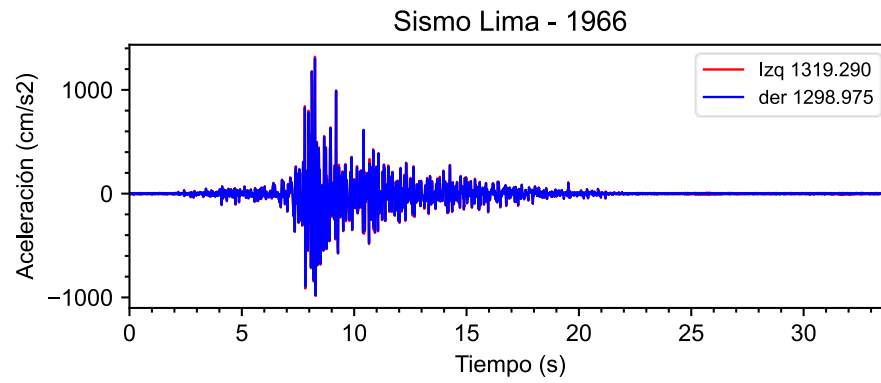
Anexo 1: Registros de aceleraciones en el ensayo de validación con la mesa vibradora de seis grados de libertad

Las leyendas en cada gráfico indican también el valor de máxima aceleración en cm/s^2 tanto para los marcadores de la izquierda (Izq.) como para los de la derecha (der.)



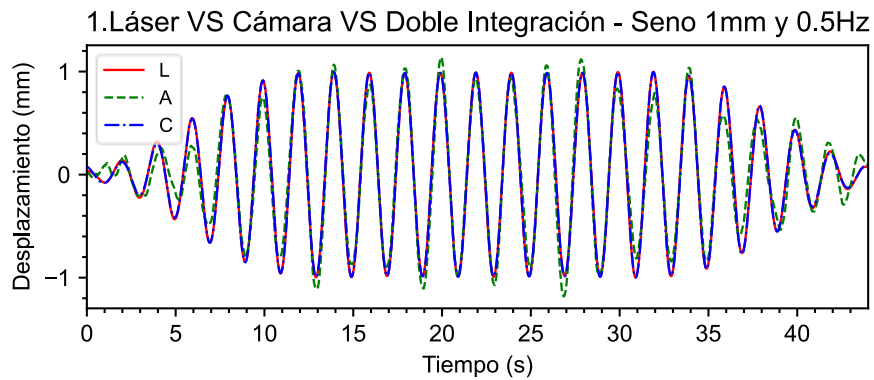
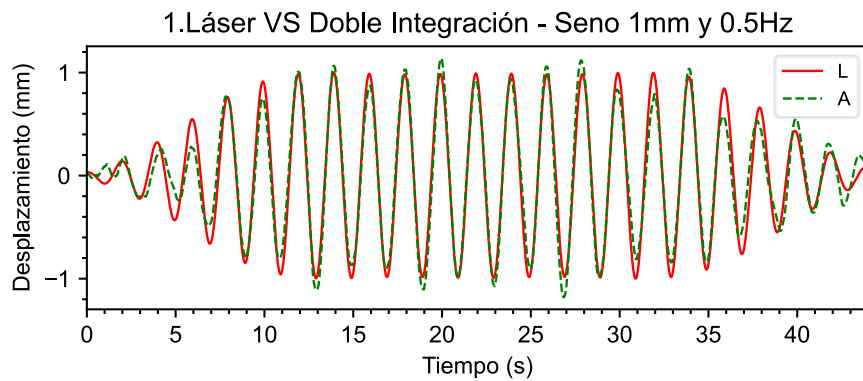
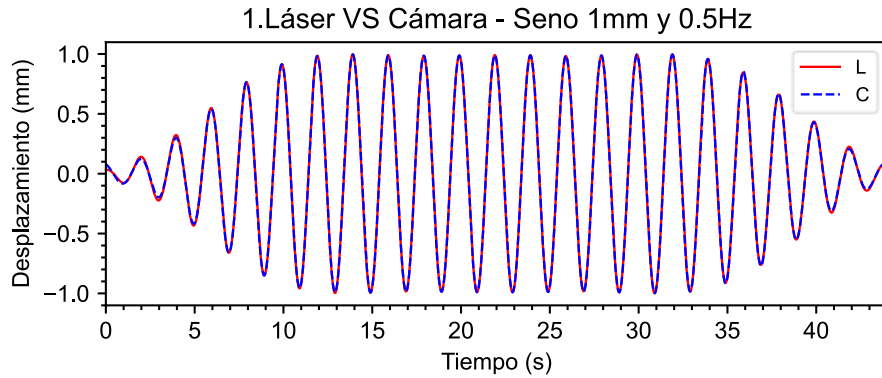


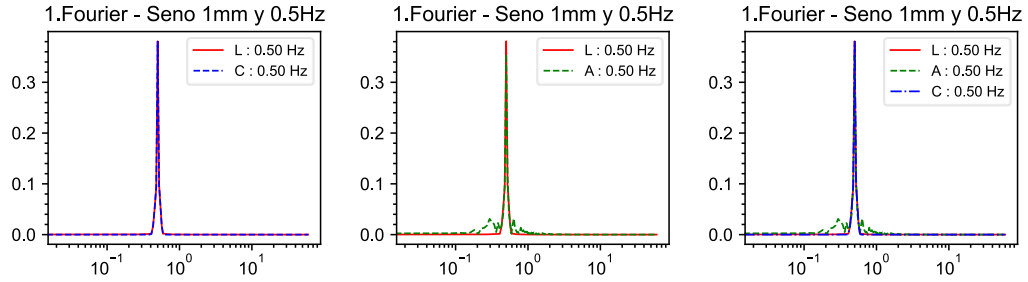




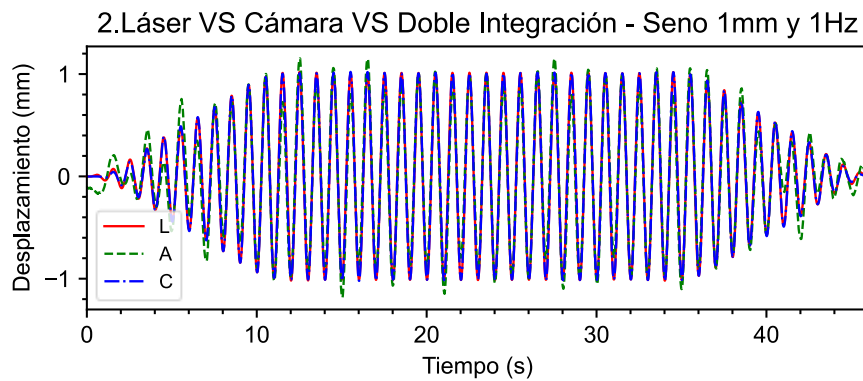
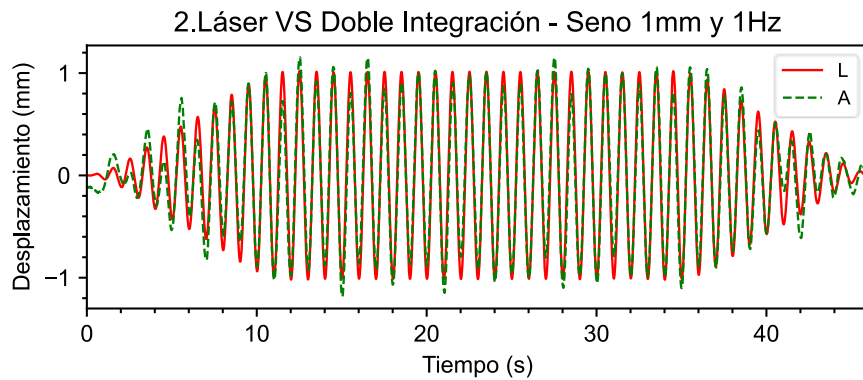
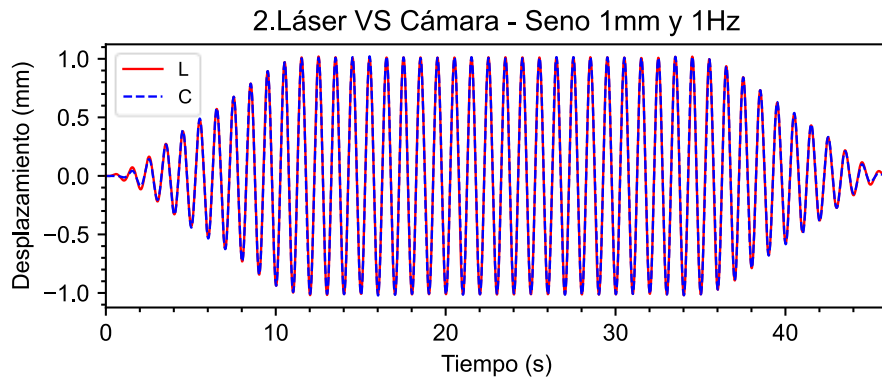
Anexo 2: Comparaciones gráficas entre los distintos métodos de medición para todos los registros del ensayo de validación

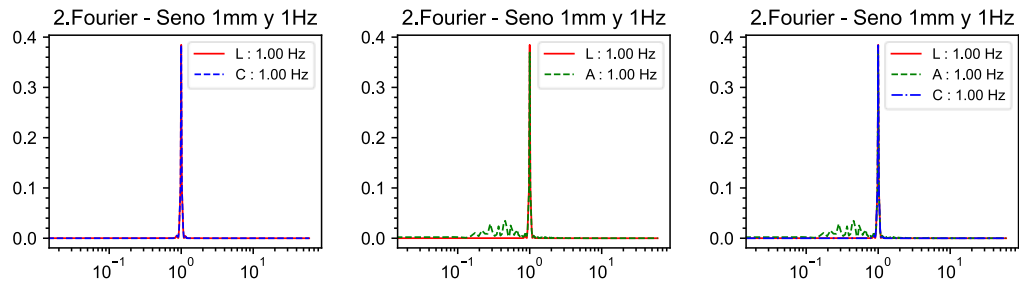
1. Onda armónica de 1 mm de amplitud y 0.5 Hz de frecuencia



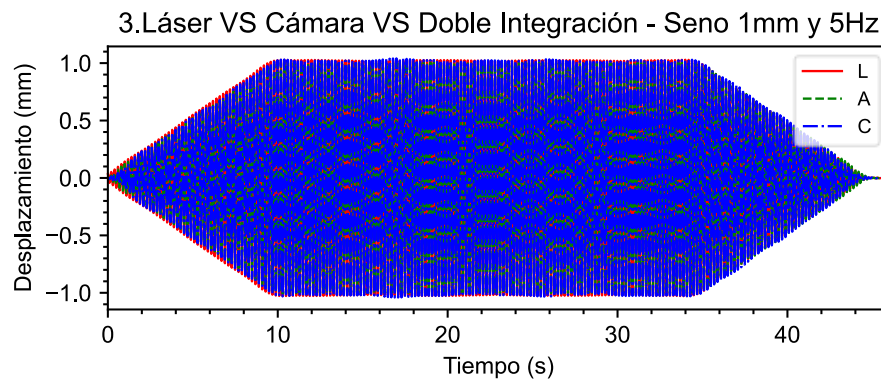
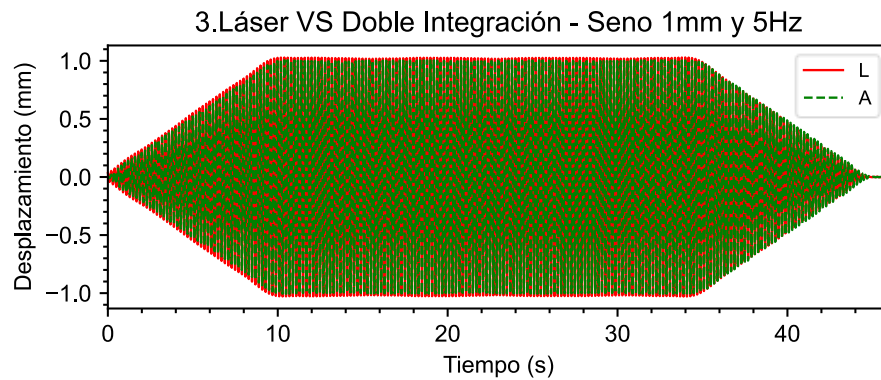
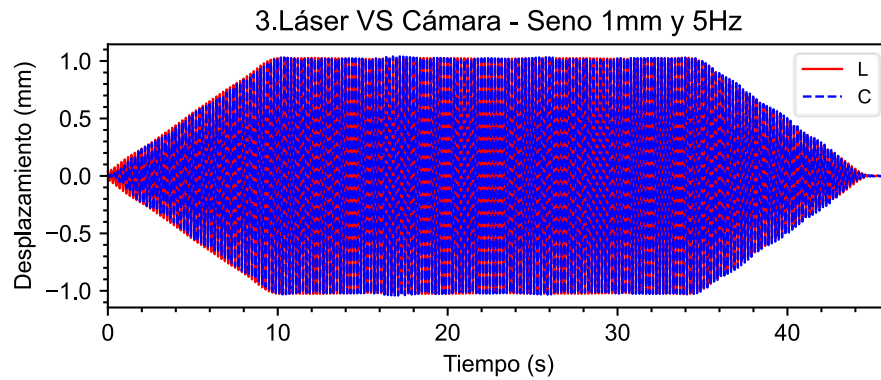


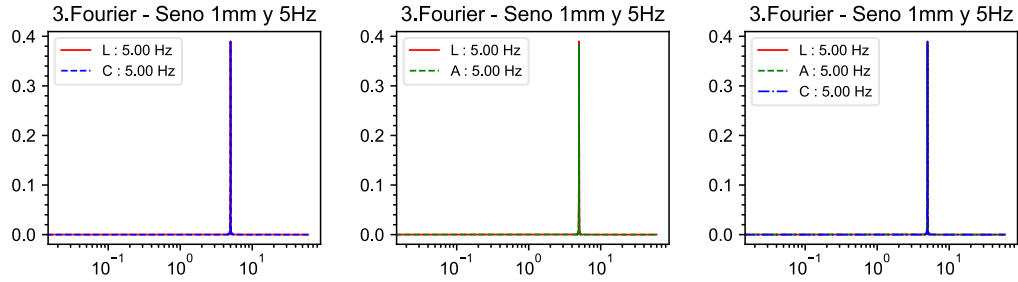
2. Onda armónica de 1mm de amplitud y 1 Hz de frecuencia





3. Onda armónica de 1mm de amplitud y 5 Hz de frecuencia

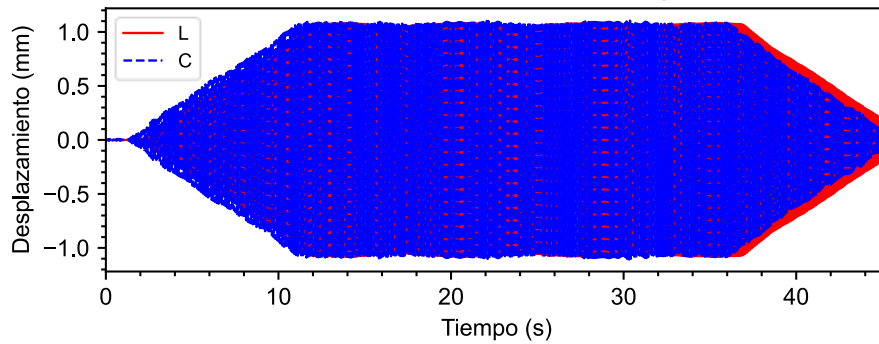




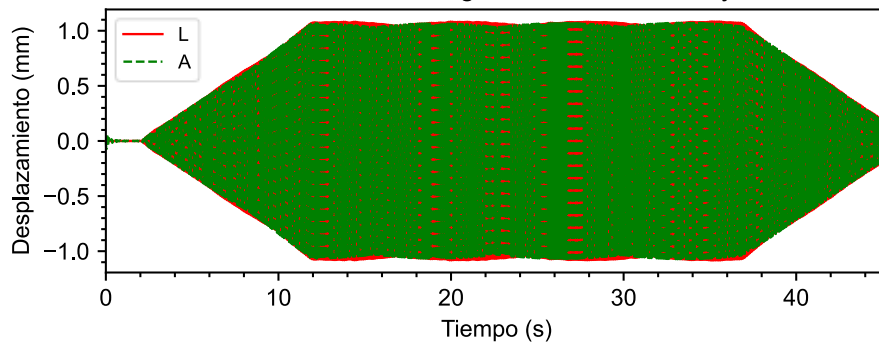
4. Onda armónica de 1mm de amplitud y 10 Hz de frecuencia

El registro obtenido por la cámara ha sido intencionalmente desfasado para que puedan apreciarse el resto de las señales.

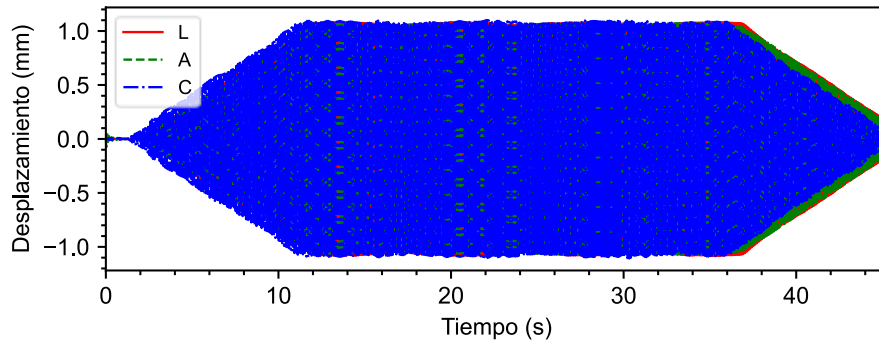
4.Láser VS Cámara - Seno 1mm y 10Hz

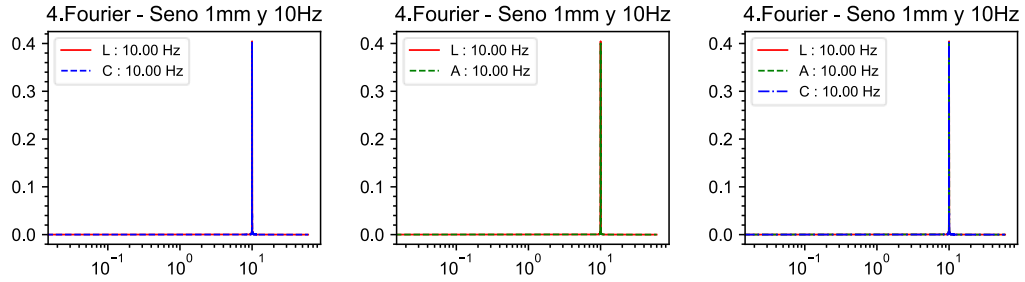


4.Láser VS Doble Integración - Seno 1mm y 10Hz



4.Láser VS Cámara VS Doble Integración - Seno 1mm y 10Hz

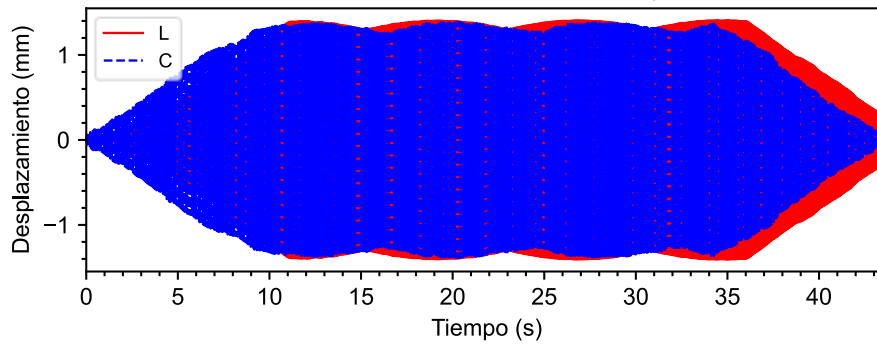




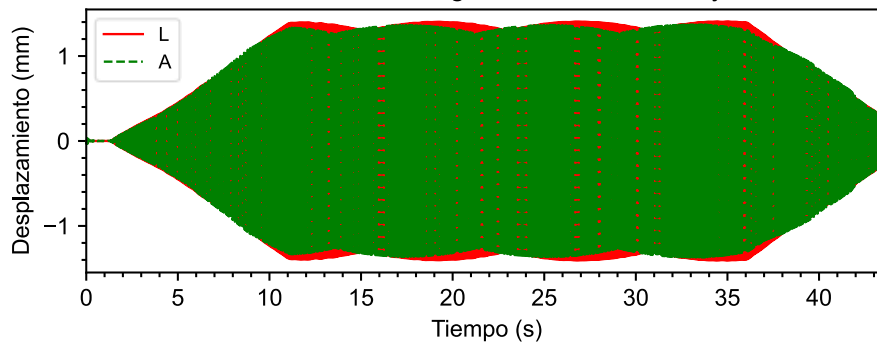
5. Onda armónica de 1mm de amplitud y 15 Hz de frecuencia

El registro obtenido por la cámara ha sido intencionalmente desfasado para que puedan apreciarse el resto de las señales.

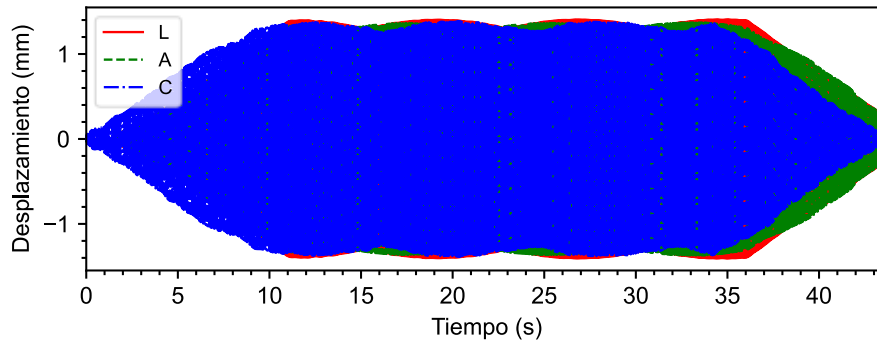
5.Láser VS Cámara - Seno 1mm y 15Hz

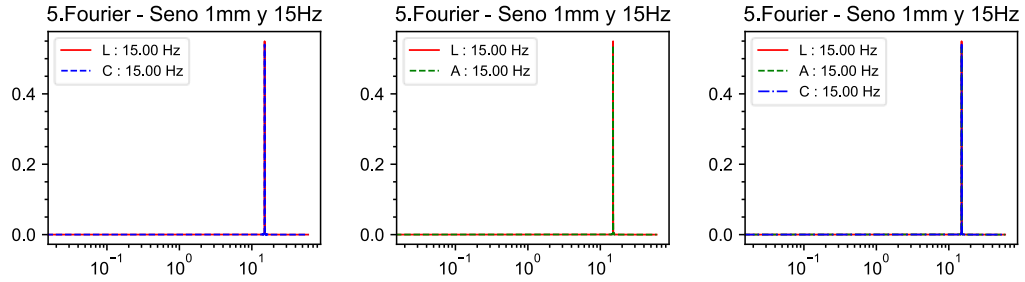


5.Láser VS Doble Integración - Seno 1mm y 15Hz



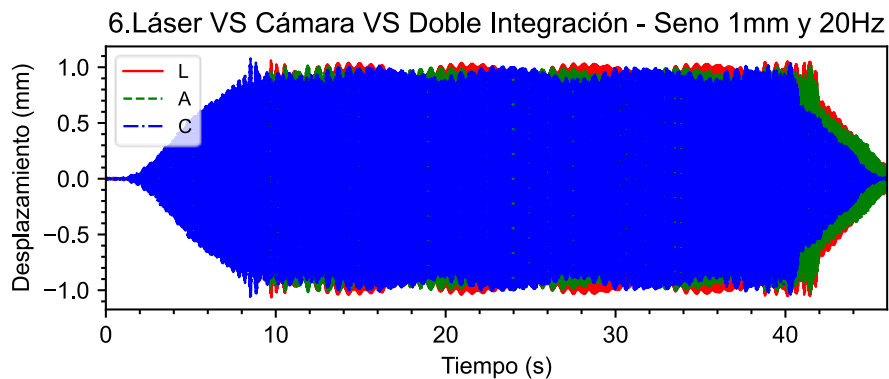
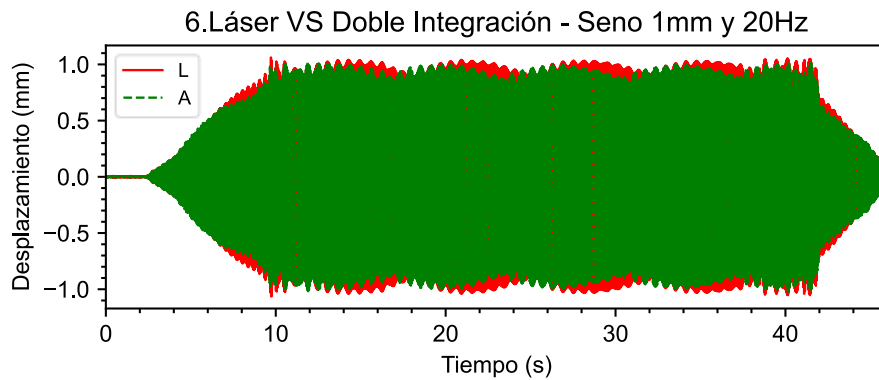
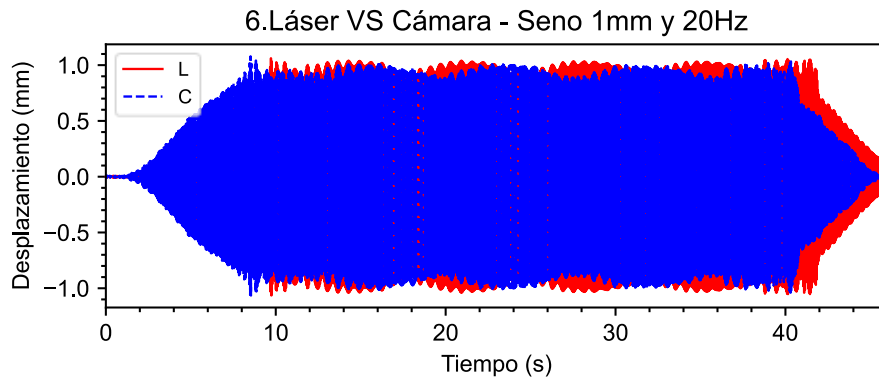
5.Láser VS Cámara VS Doble Integración - Seno 1mm y 15Hz

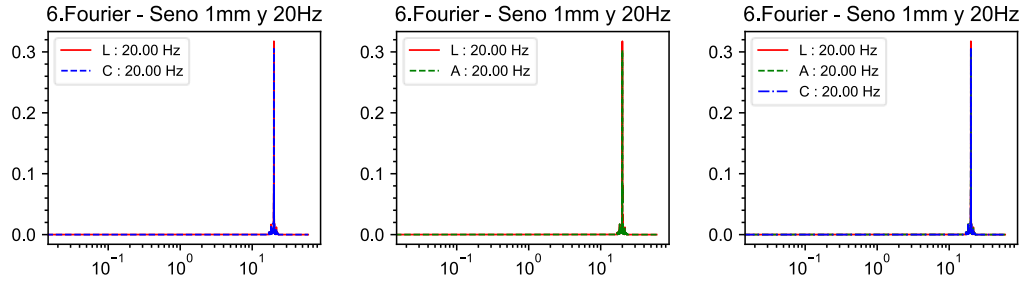




6. Onda armónica de 1mm de amplitud y 20 Hz de frecuencia

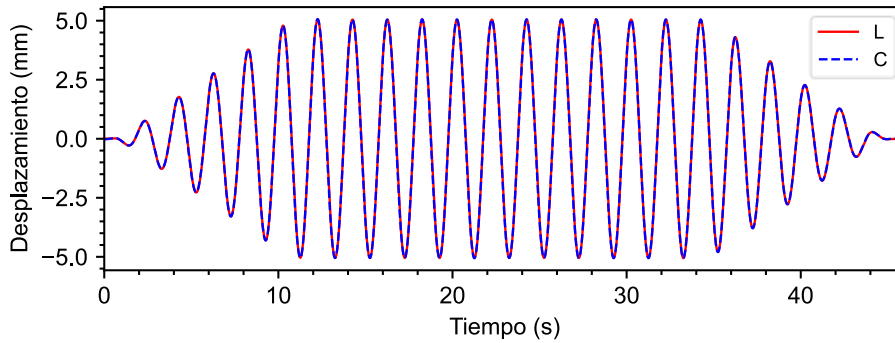
El registro obtenido por la cámara ha sido intencionalmente desfasado para que puedan apreciarse el resto de las señales.



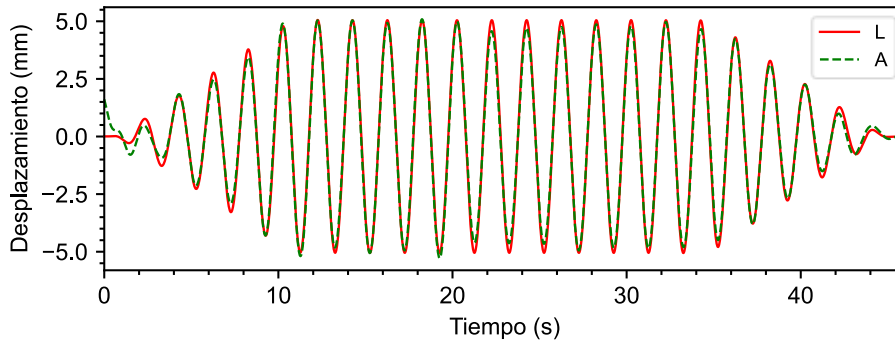


7. Onda armónica de 5mm de amplitud y 0.5 Hz de frecuencia

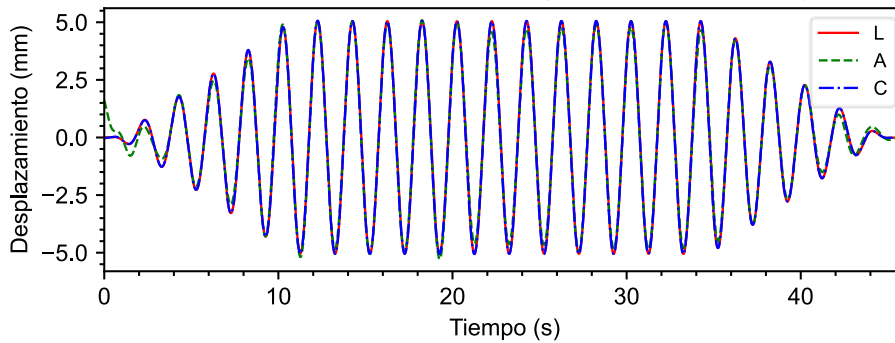
7.Láser VS Cámara - Seno 5mm y 0.5Hz

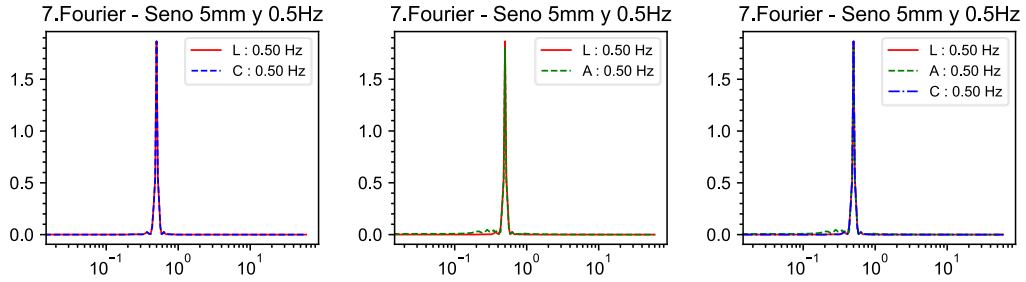


7.Láser VS Doble Integración - Seno 5mm y 0.5Hz



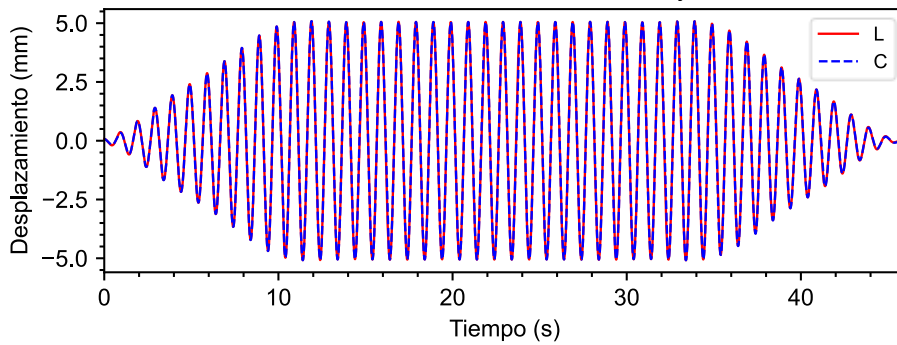
7.Láser VS Cámara VS Doble Integración - Seno 5mm y 0.5Hz



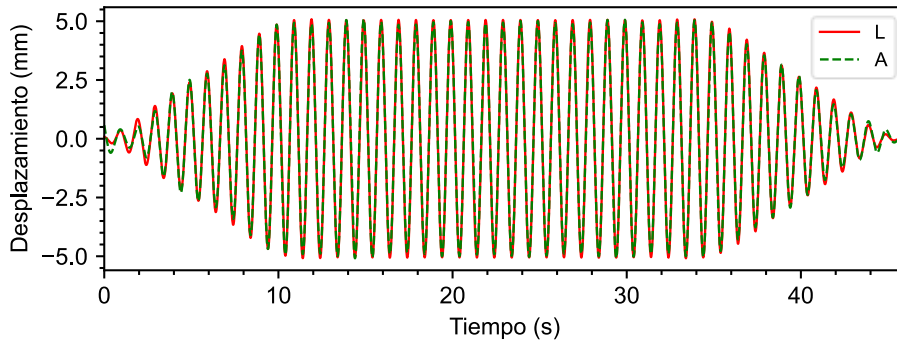


8. Onda armónica de 5mm de amplitud y 1 Hz de frecuencia

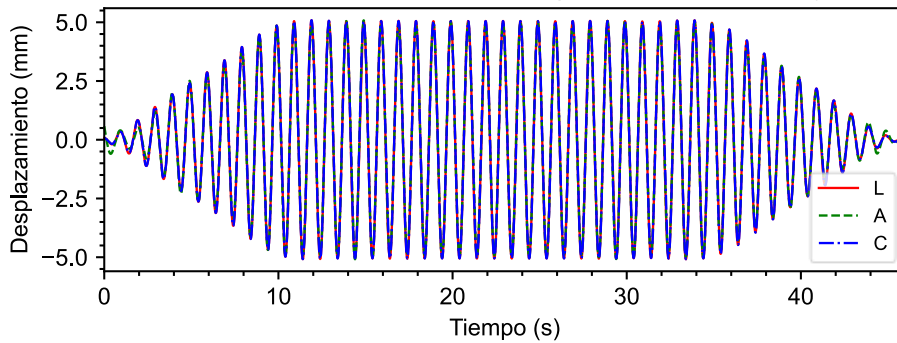
8.Láser VS Cámara - Seno 5mm y 1Hz

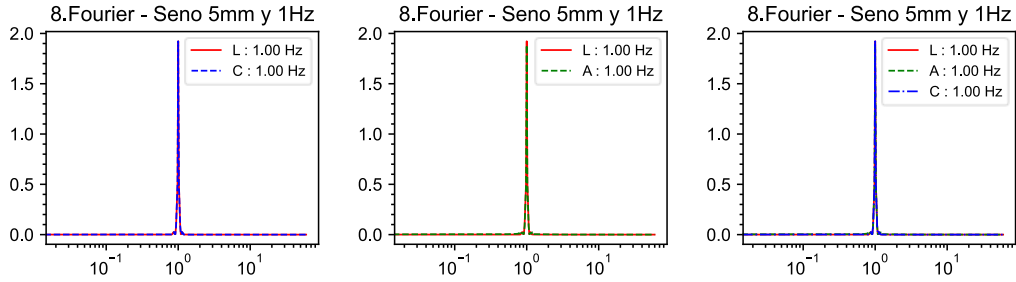


8.Láser VS Doble Integración - Seno 5mm y 1Hz



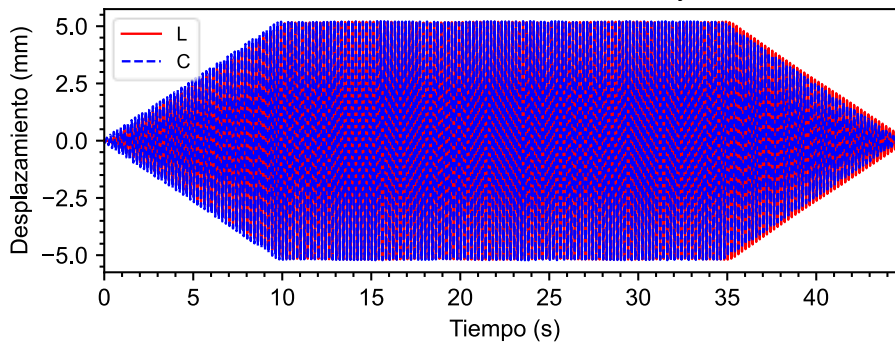
8.Láser VS Cámara VS Doble Integración - Seno 5mm y 1Hz



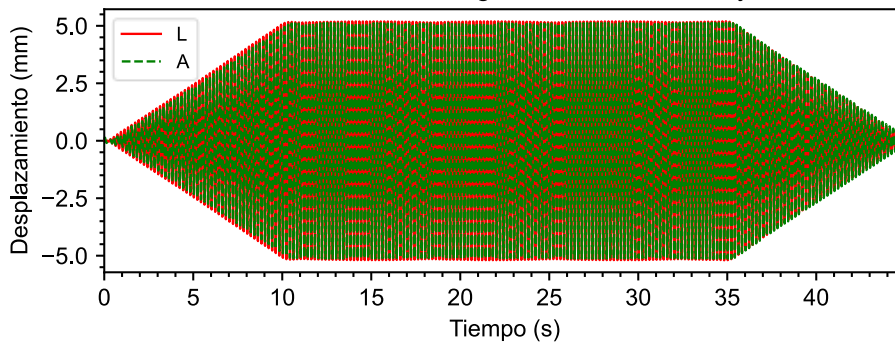


9. Onda armónica de 5mm de amplitud y 5 Hz de frecuencia

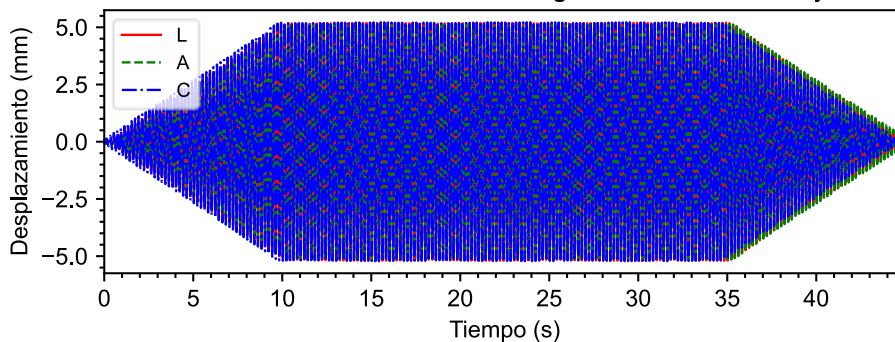
9.Láser VS Cámara - Seno 5mm y 5Hz

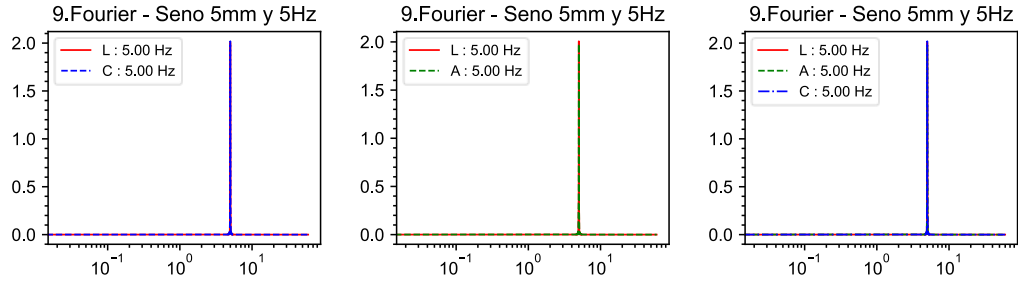


9.Láser VS Doble Integración - Seno 5mm y 5Hz



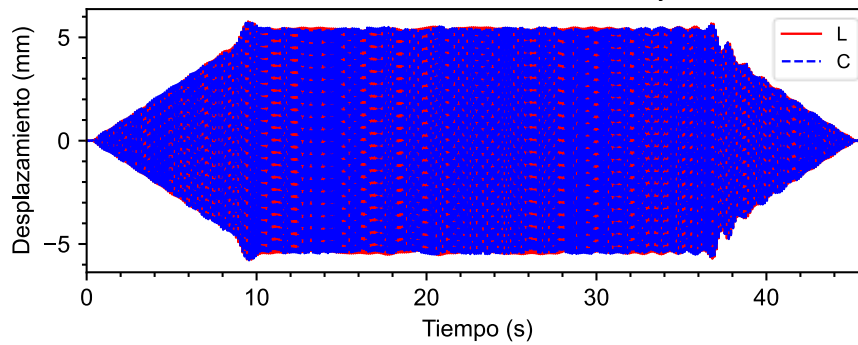
9.Láser VS Cámara VS Doble Integración - Seno 5mm y 5Hz



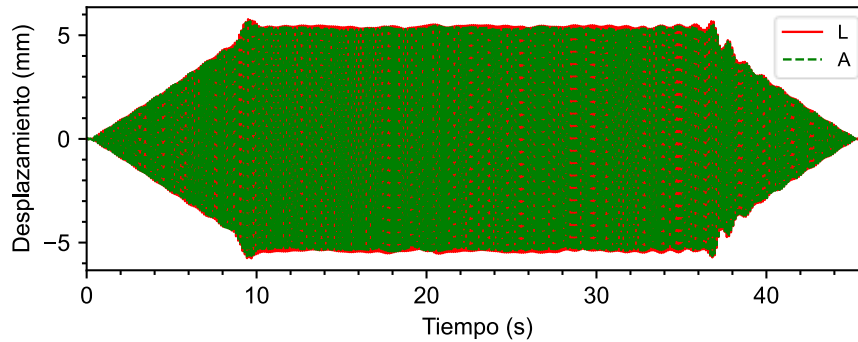


10. Onda armónica de 5mm de amplitud y 8 Hz de frecuencia

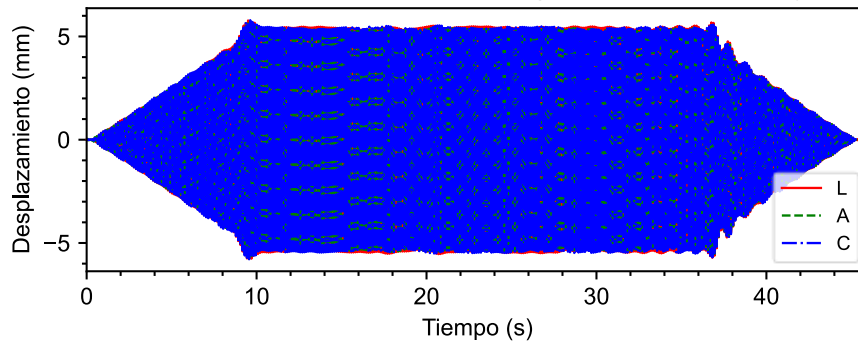
10.Láser VS Cámara - Seno 5mm y 8Hz

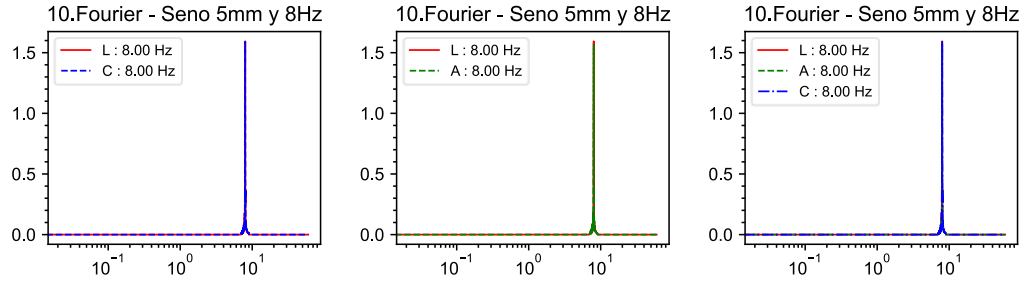


10.Láser VS Doble Integración - Seno 5mm y 8Hz

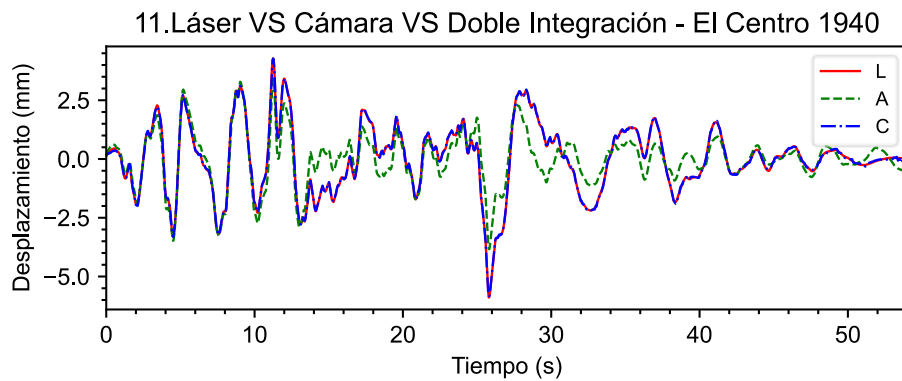
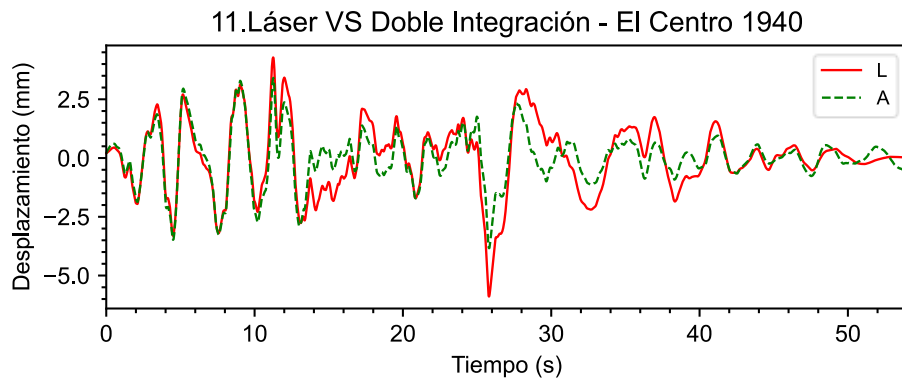
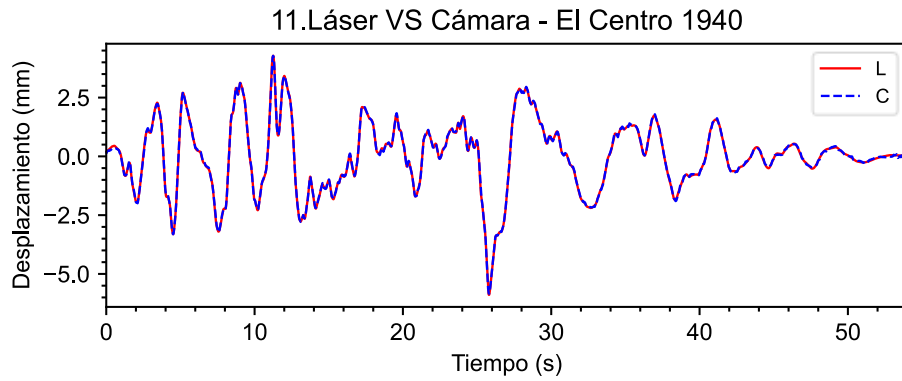


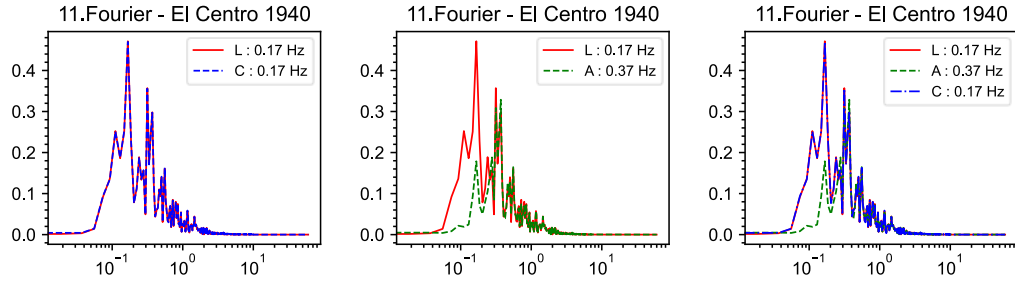
10.Láser VS Cámara VS Doble Integración - Seno 5mm y 8Hz





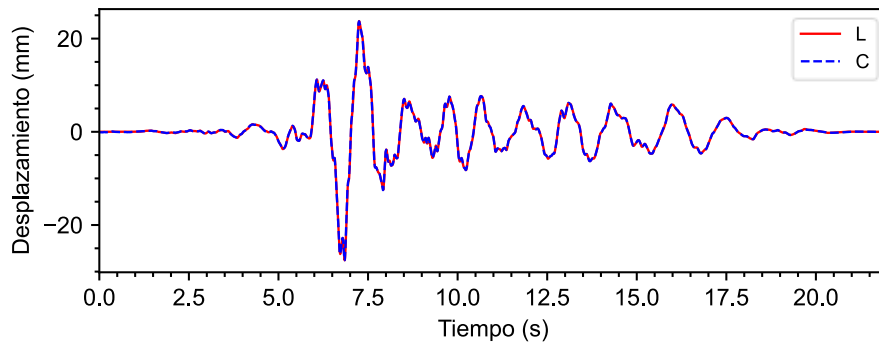
11. Terremoto "El centro" 1940 California, Estados Unidos



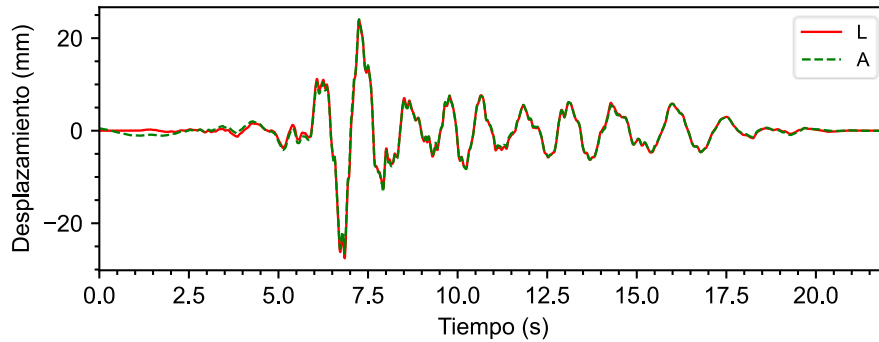


12. Terremoto Lima 1966. Lima, Perú

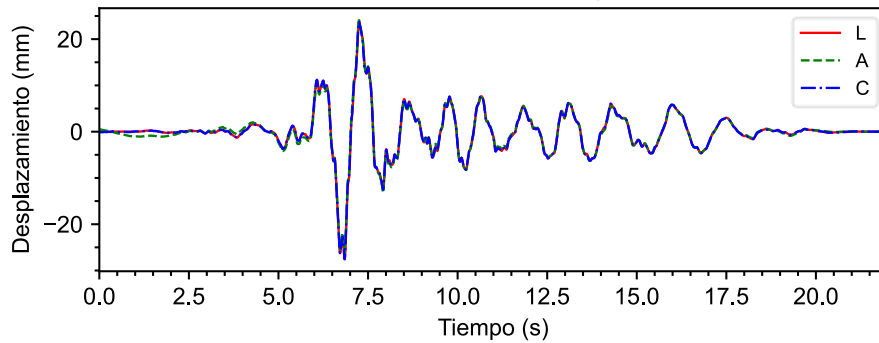
12.Láser VS Cámara - Lima 1966

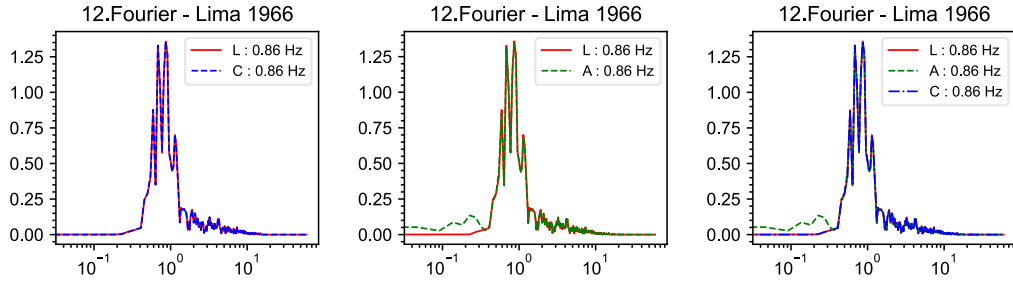


12.Láser VS Doble Integración - Lima 1966

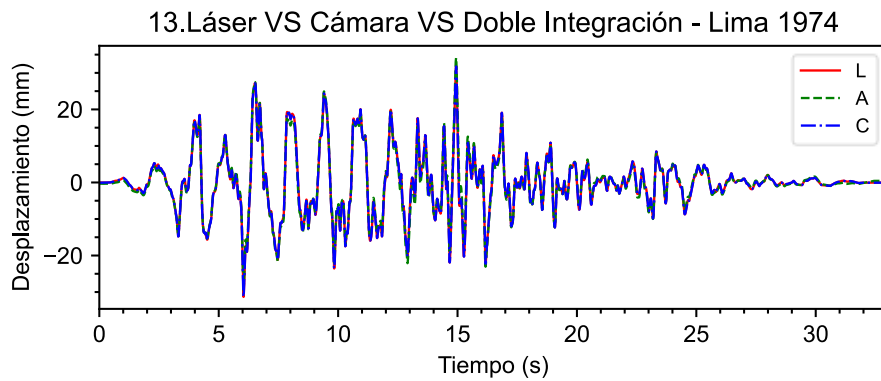
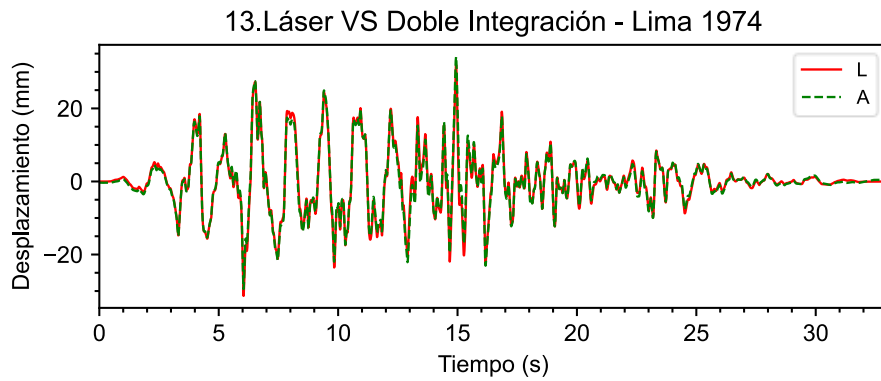


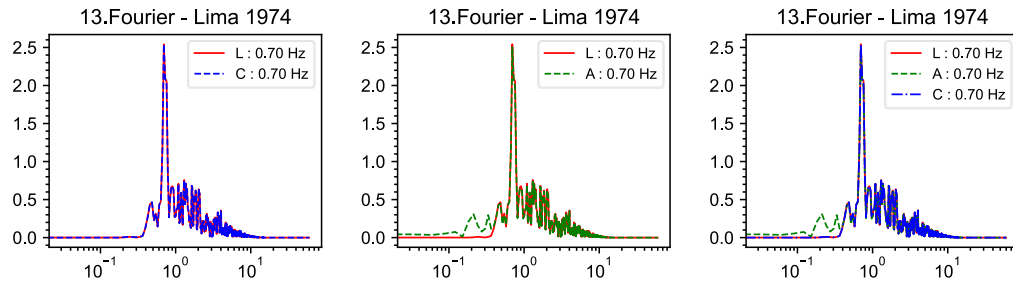
12.Láser VS Cámara VS Doble Integración - Lima 1966





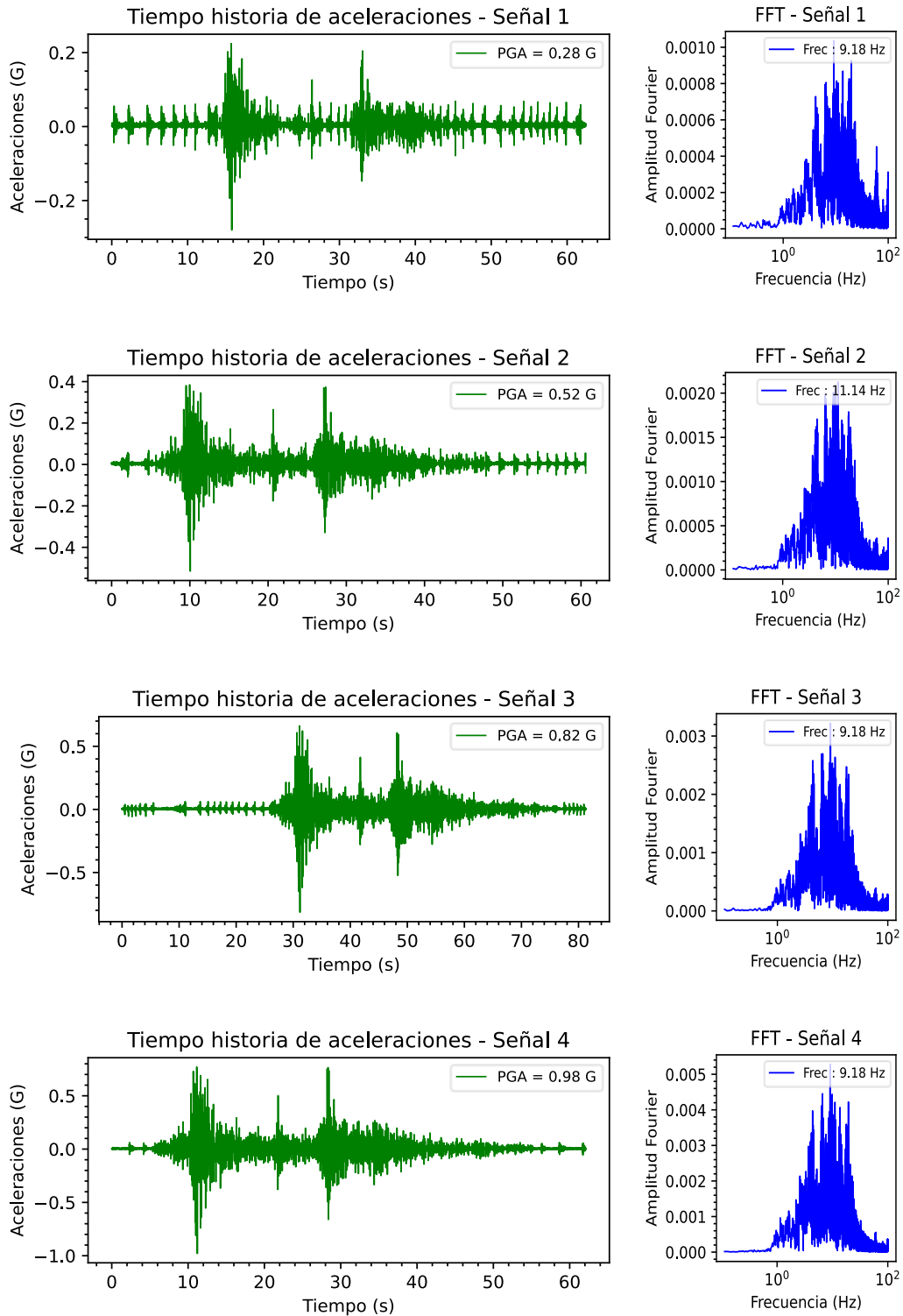
13. Terremoto Lima 1974. Lima, Perú

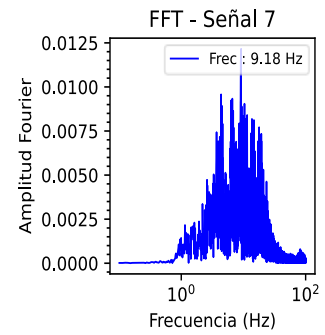
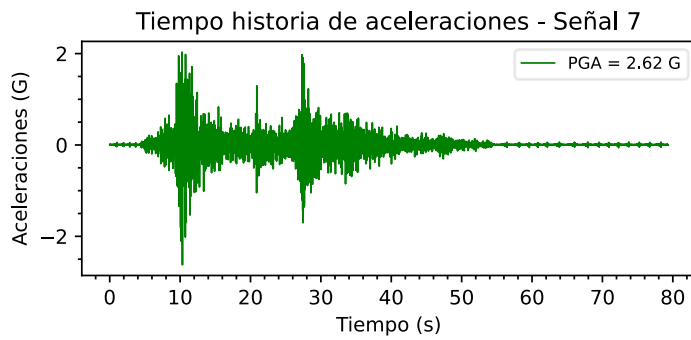
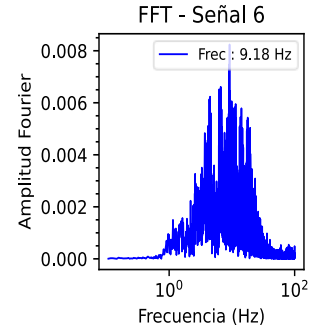
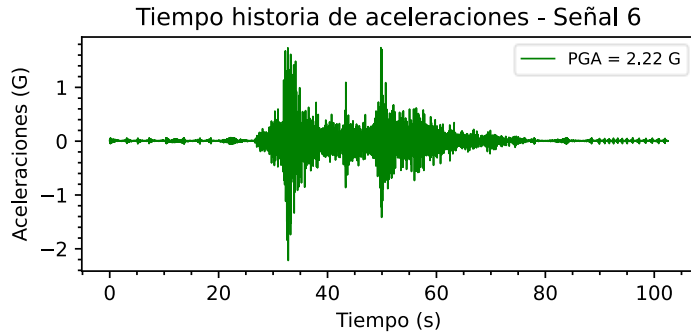
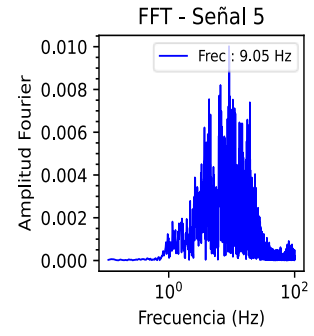
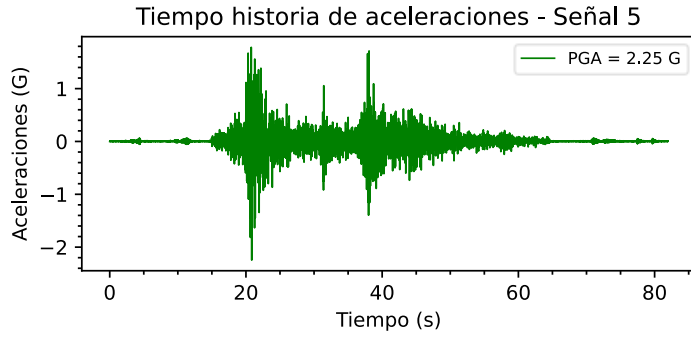




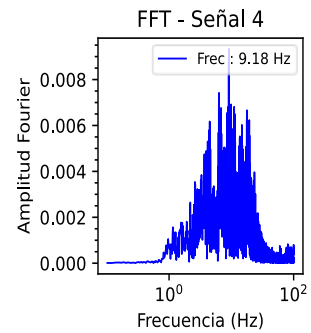
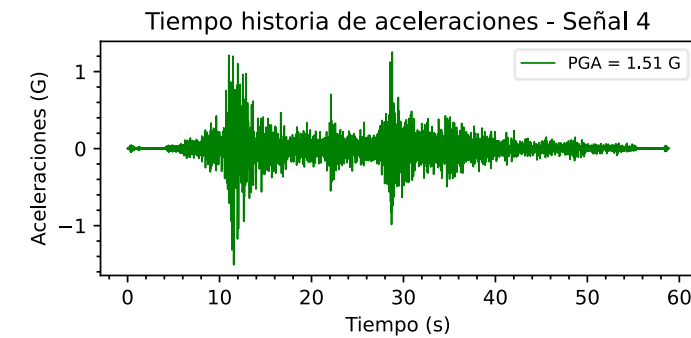
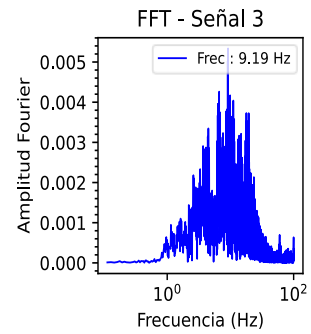
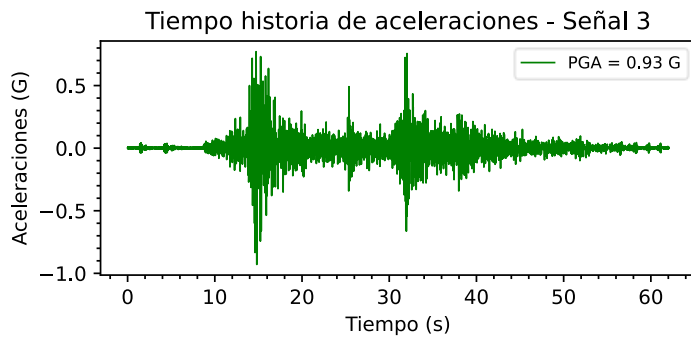
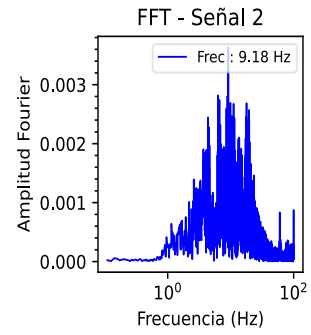
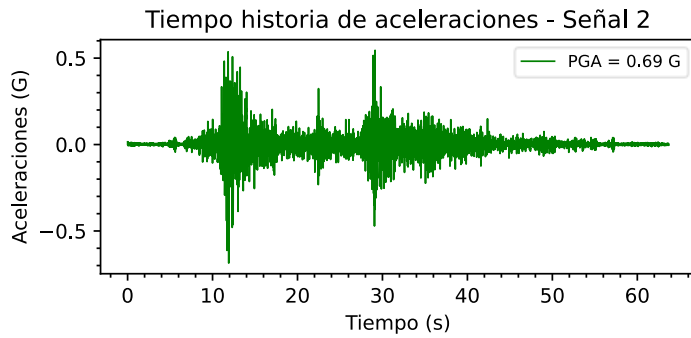
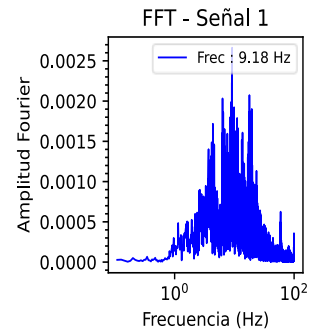
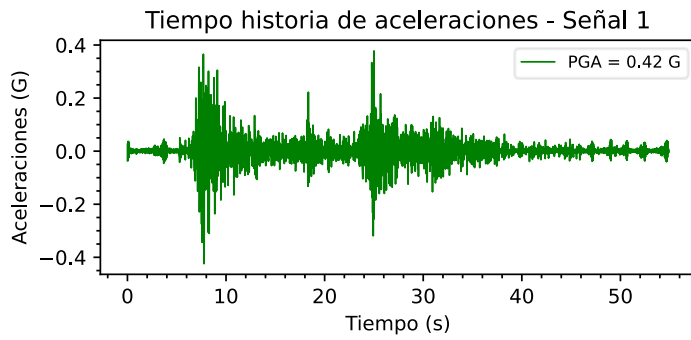
Anexo 3: Registros enviados a la mesa vibradora en el ensayo a escala de un modelo que presenta irregularidad torsional

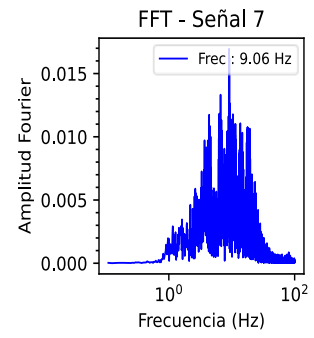
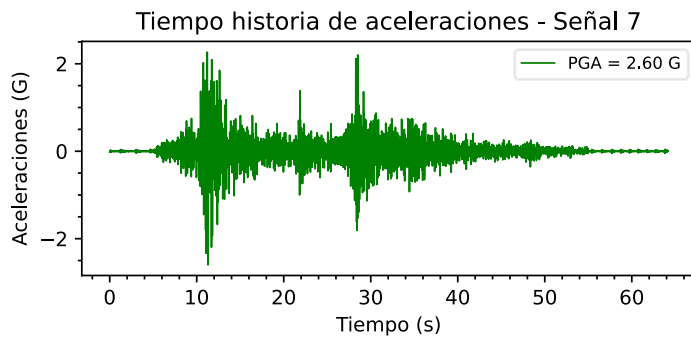
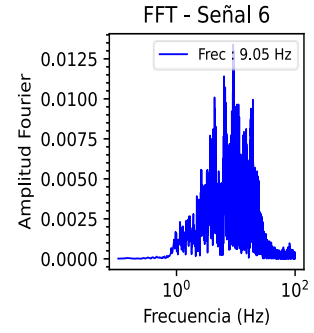
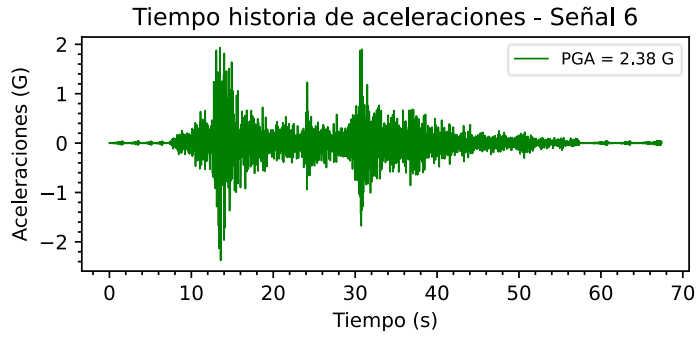
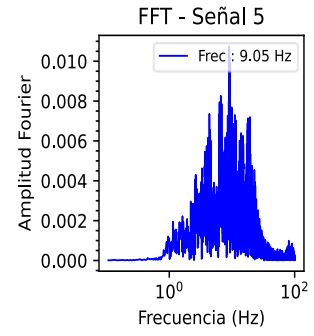
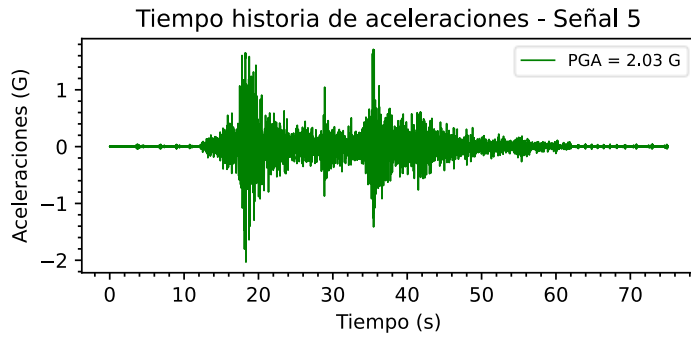
ESPECIMEN E5





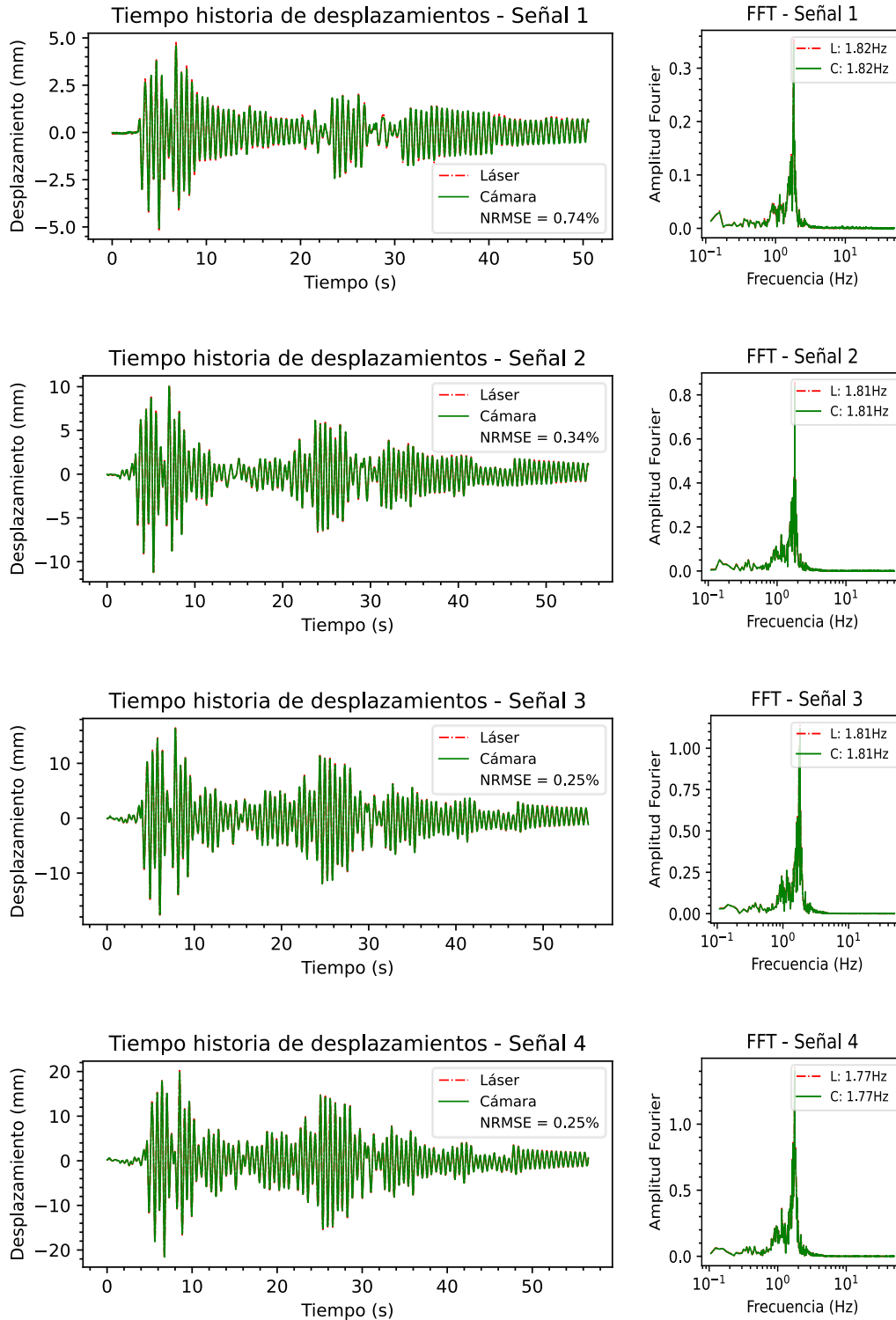
ESPECIMEN E8

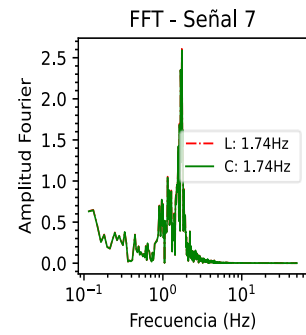
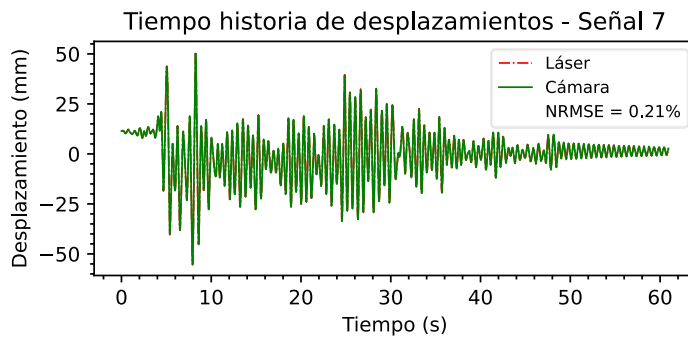
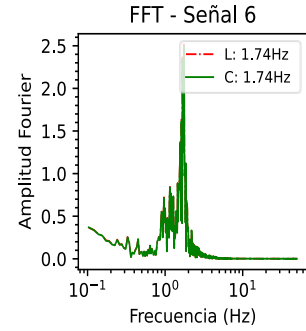
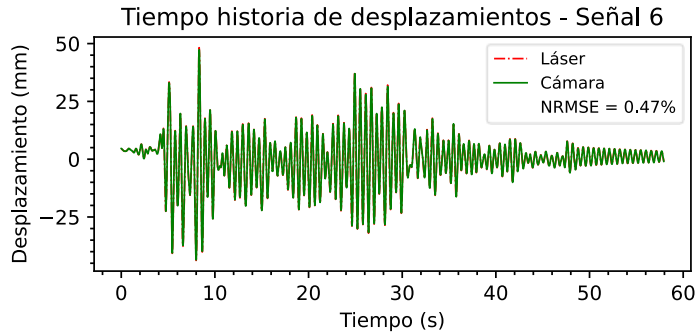
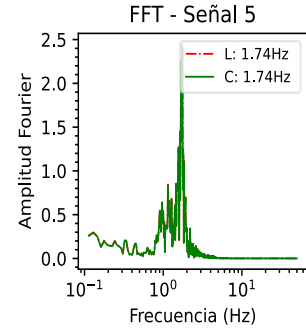
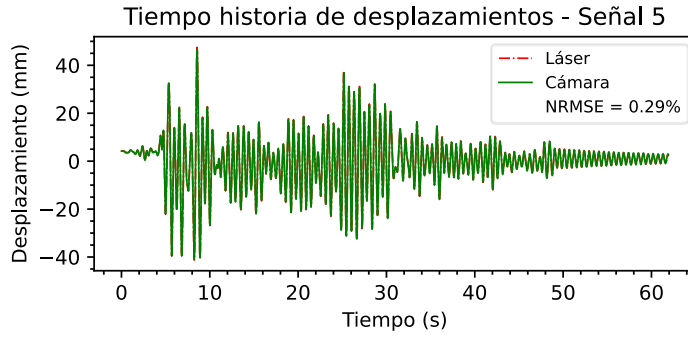




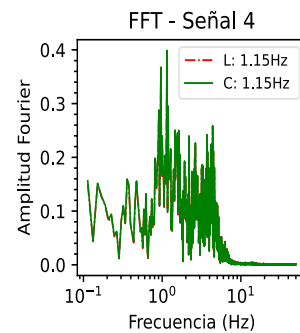
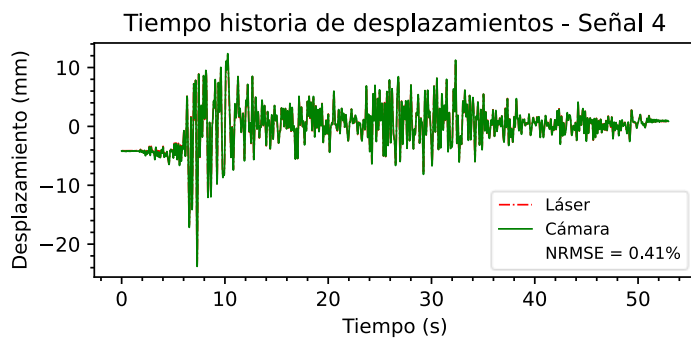
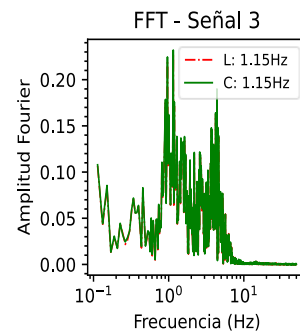
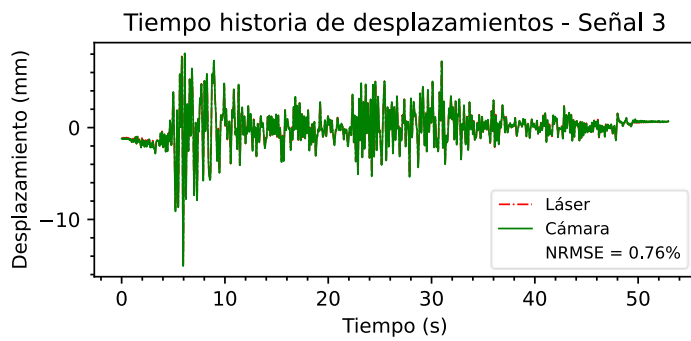
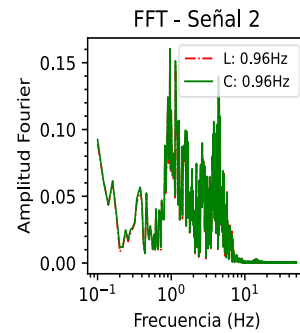
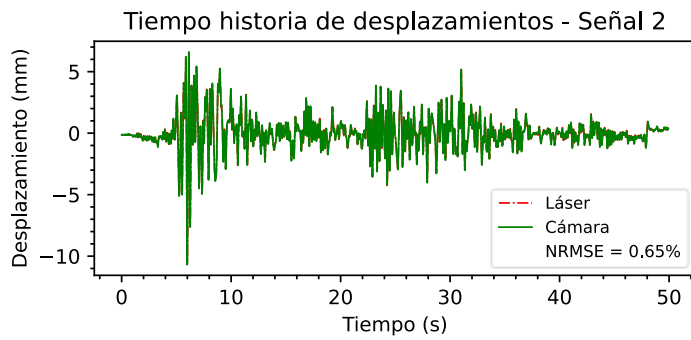
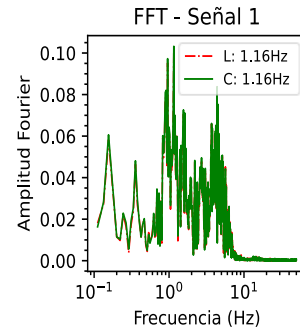
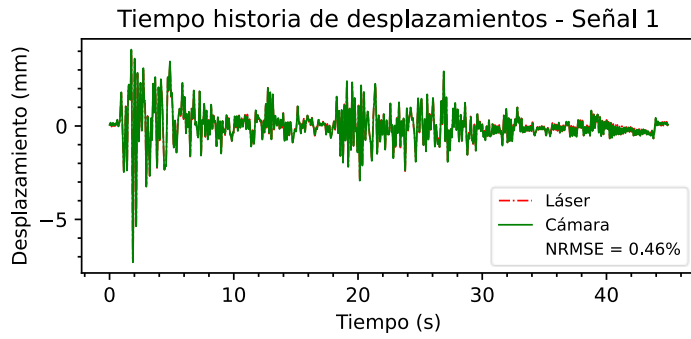
Anexo 4: Comparación entre las medidas obtenidas por el sensor láser de desplazamiento y el sistema de medición propuesto para cada registro en el ensayo a escala de un modelo con irregularidad torsional

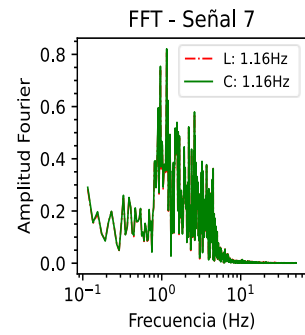
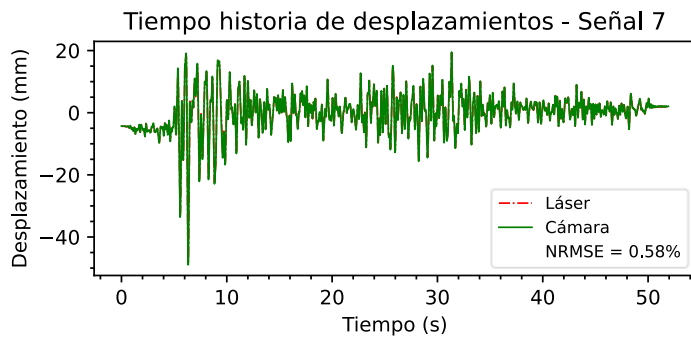
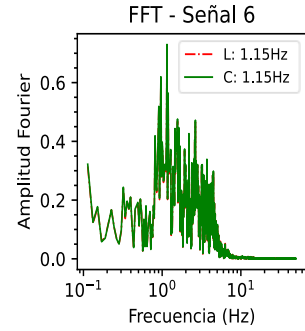
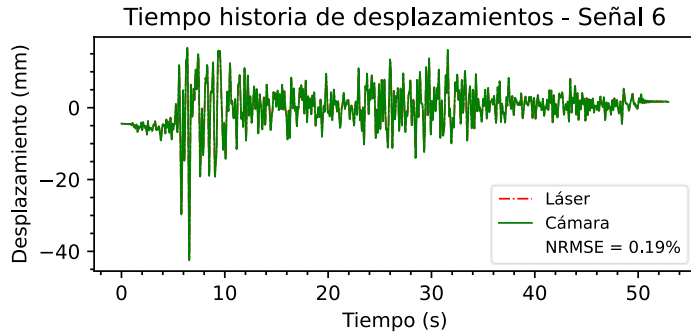
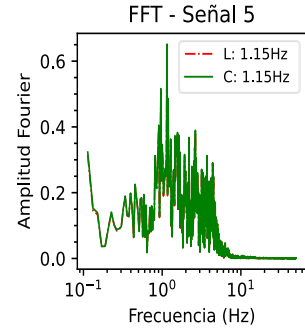
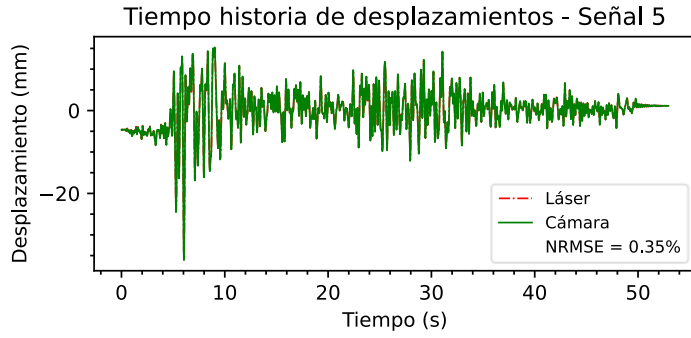
ESPECIMEN E5





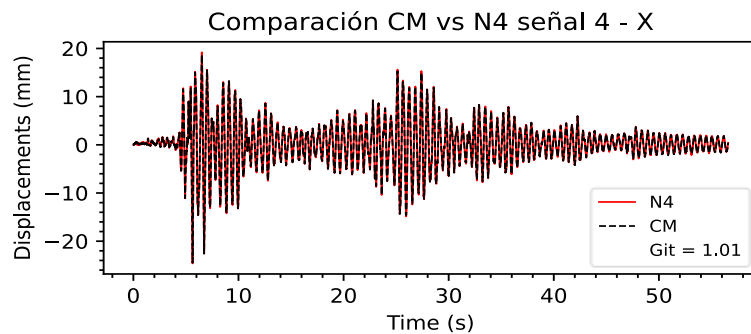
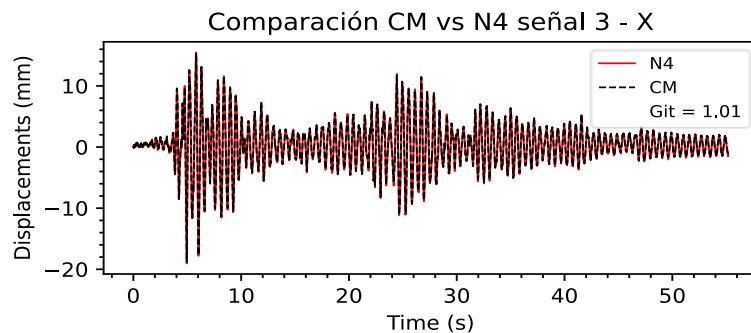
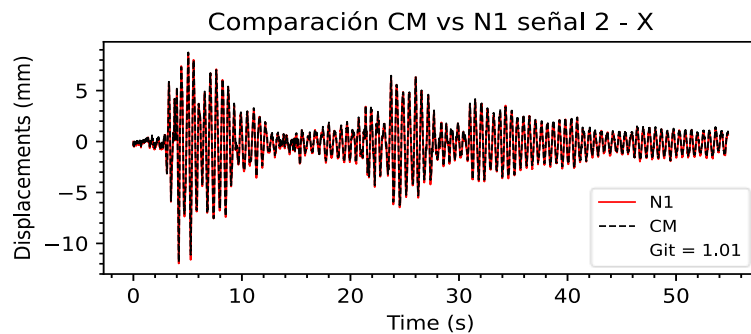
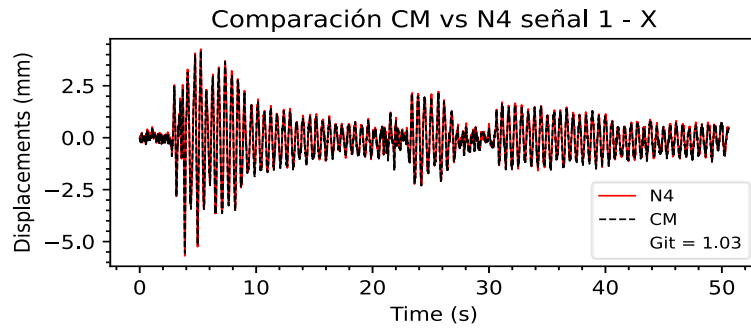
ESPECIMEN 8

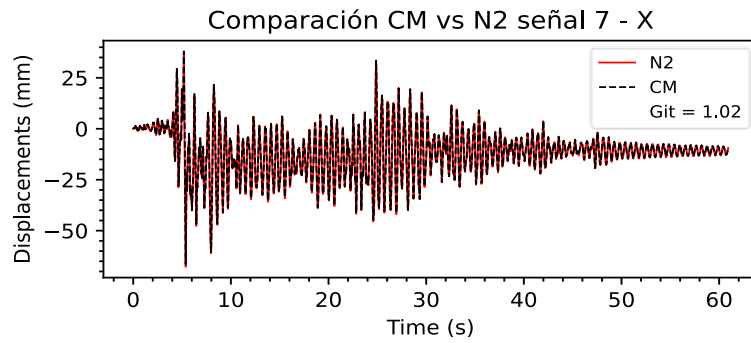
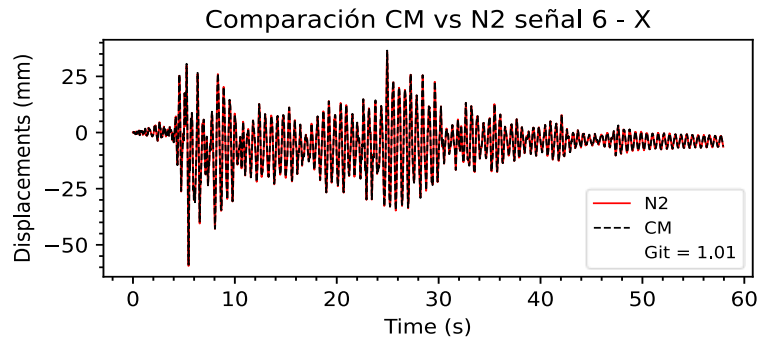
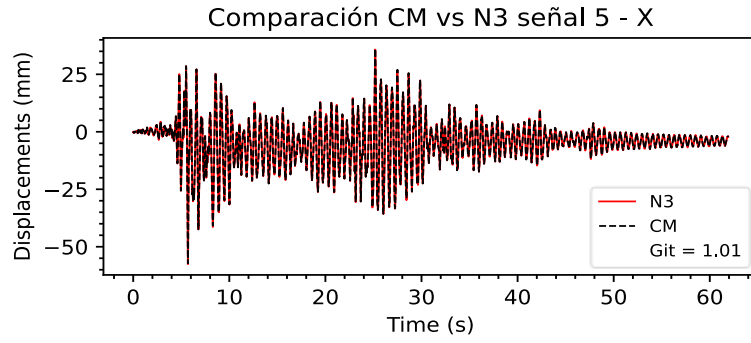




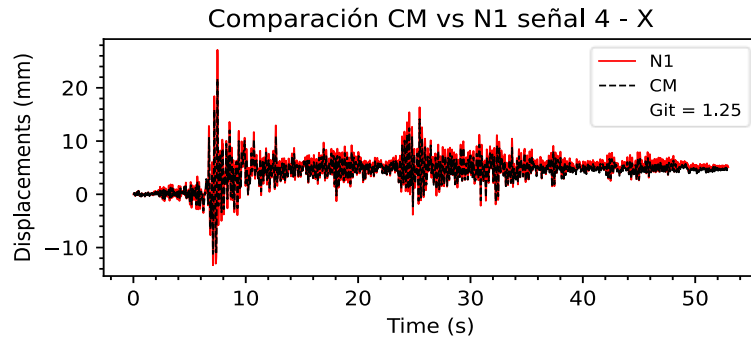
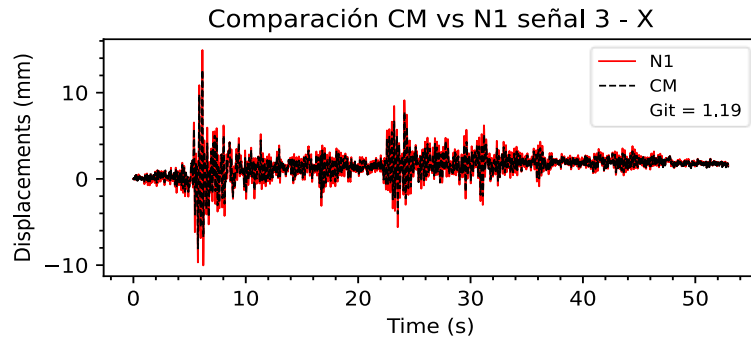
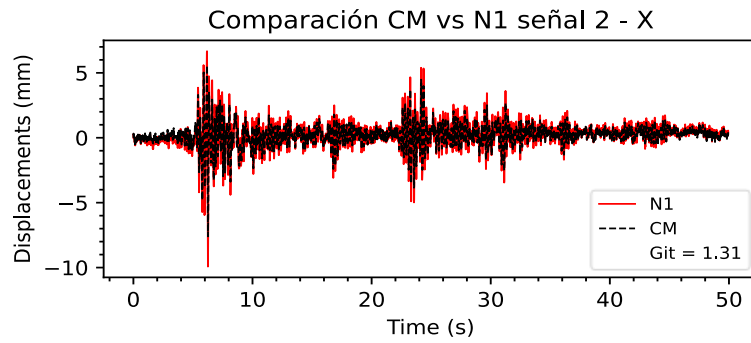
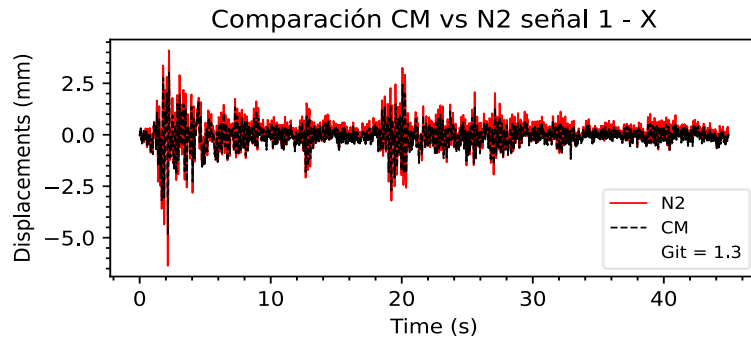
Anexo 5: Comparación del desplazamiento de la esquina de mayor movimiento con el centro de masas para para cada registro en el ensayo a escala de un modelo con irregularidad torsional

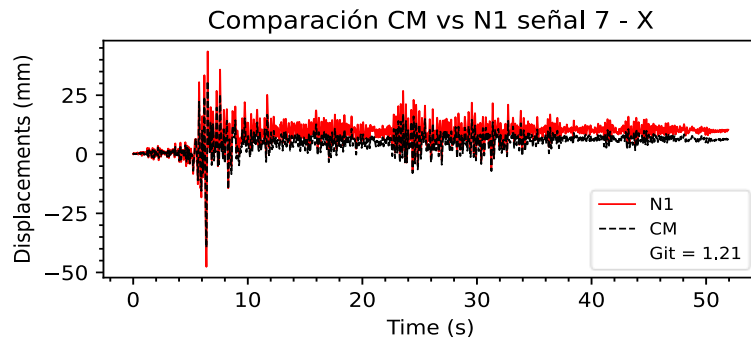
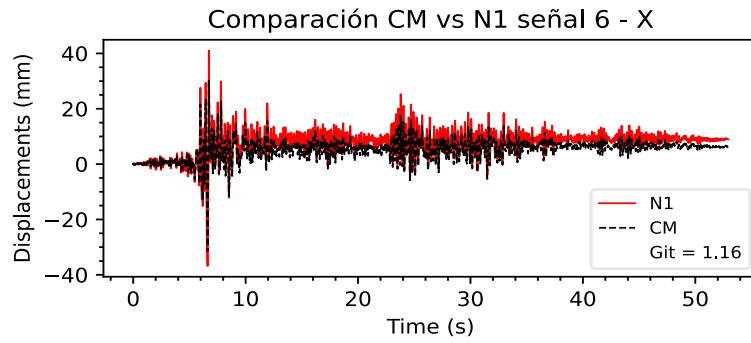
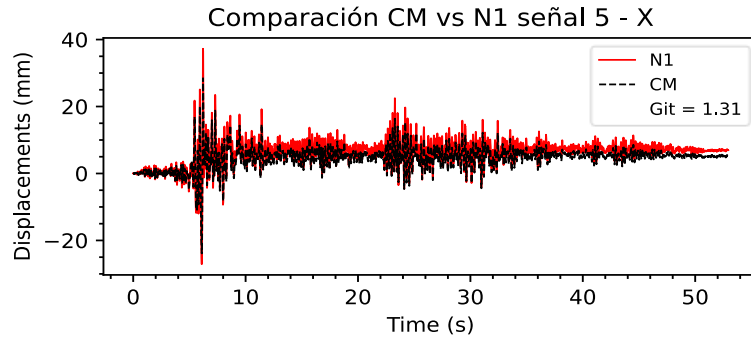
ESPECIMEN E5 DIRECCIÓN X



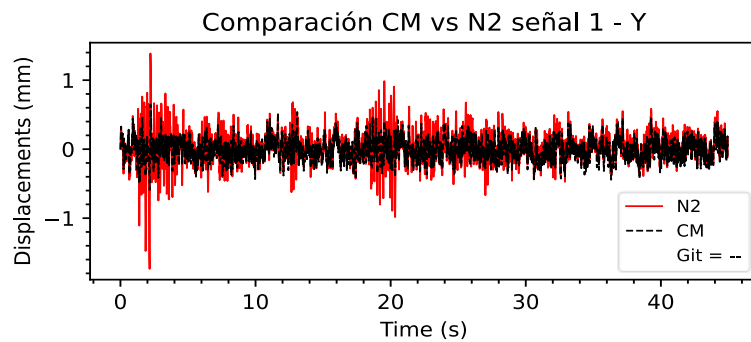


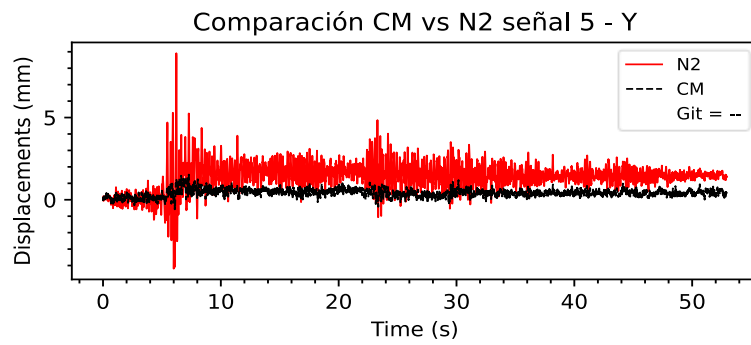
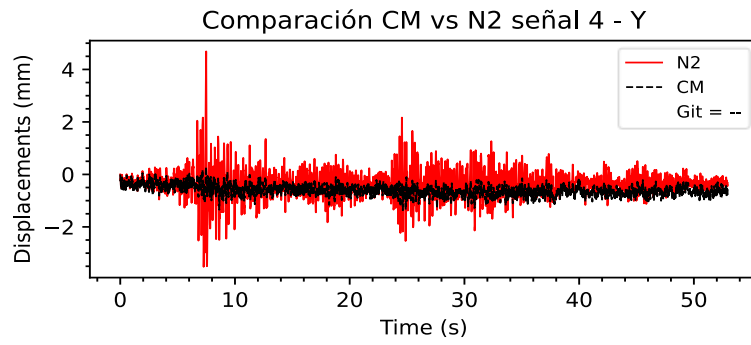
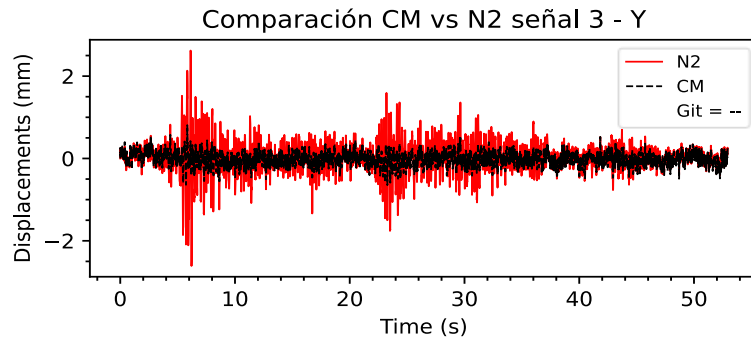
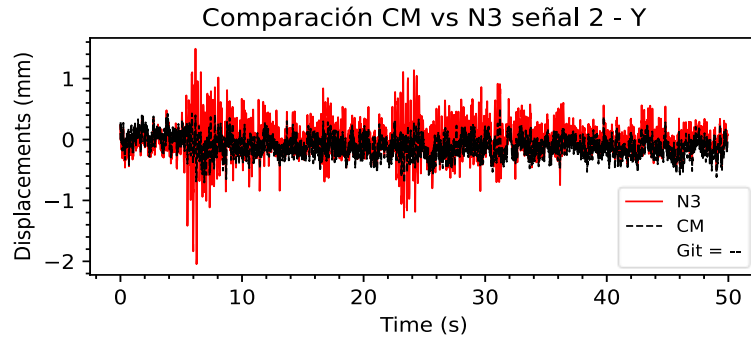
ESPECIMEN E8 DIRECCIÓN X

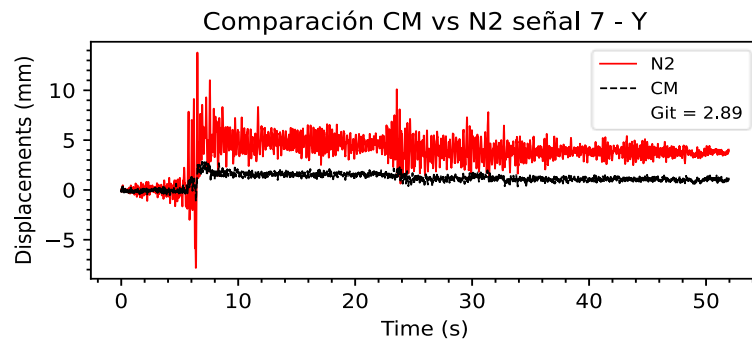
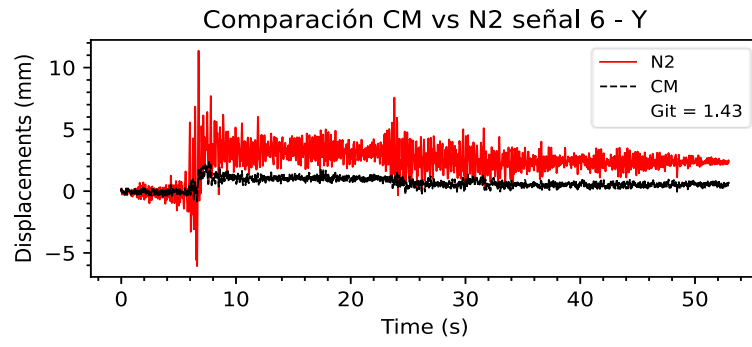




ESPECIMEN E8 DIRECCIÓN Y

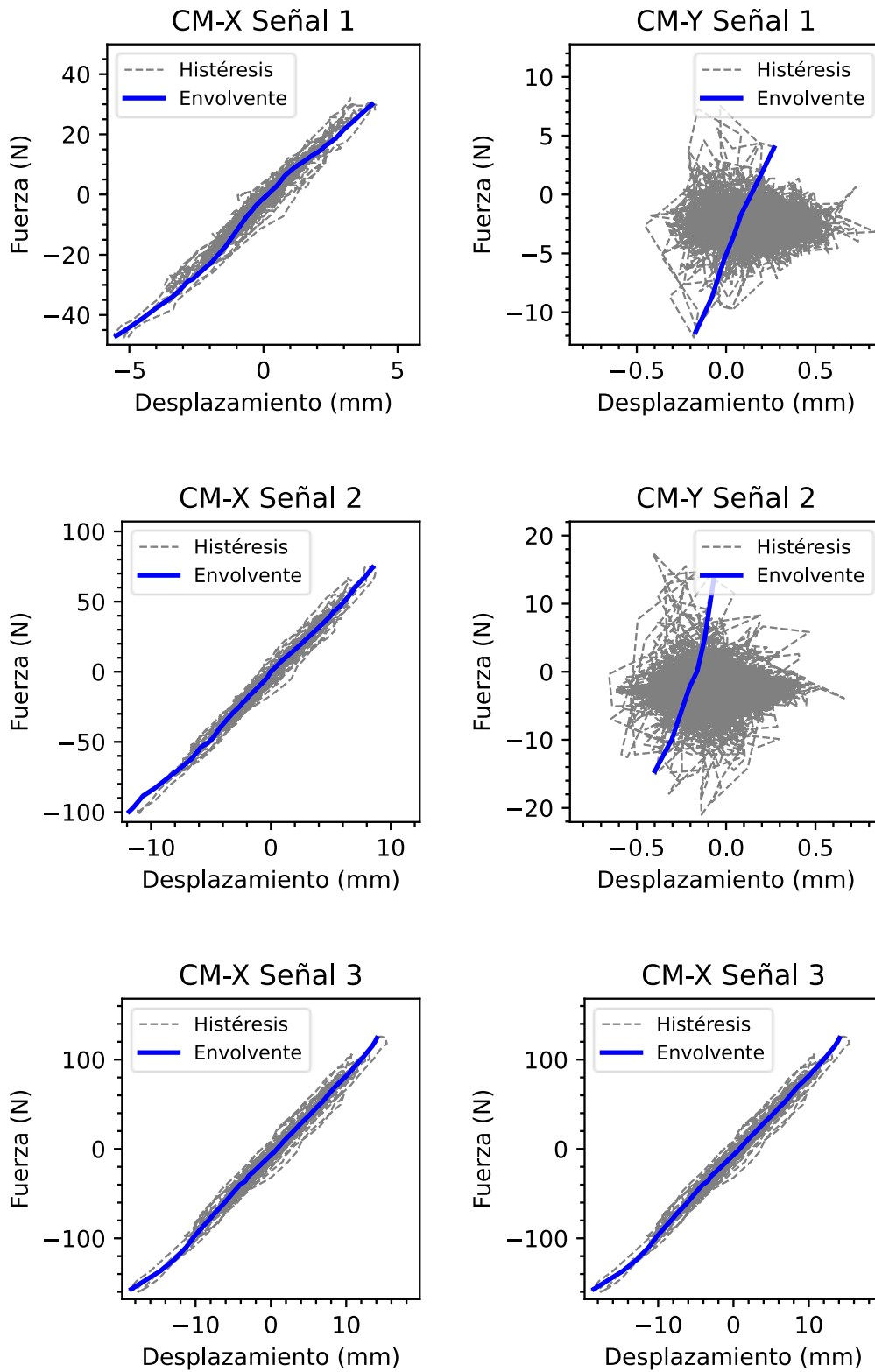


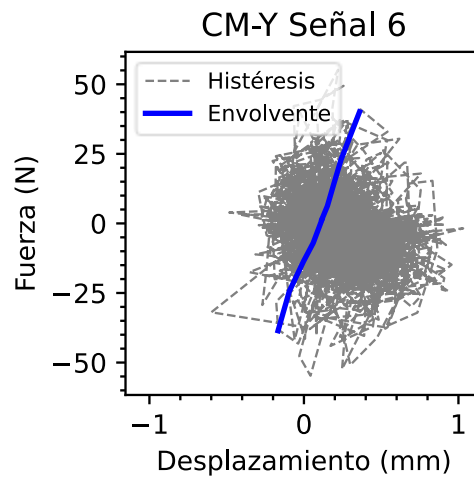
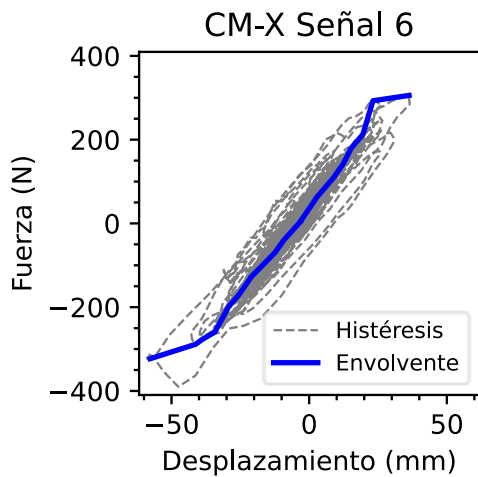
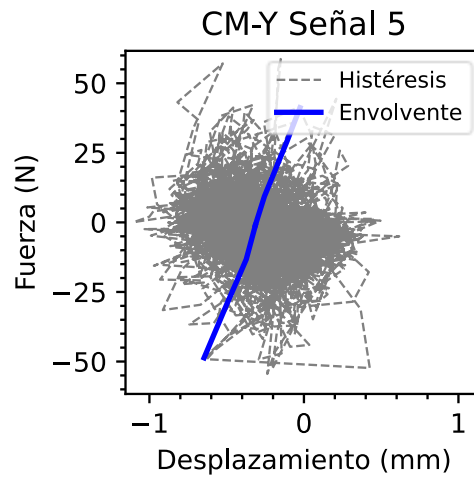
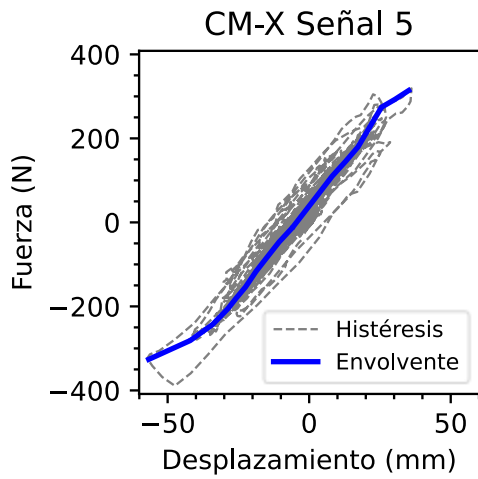
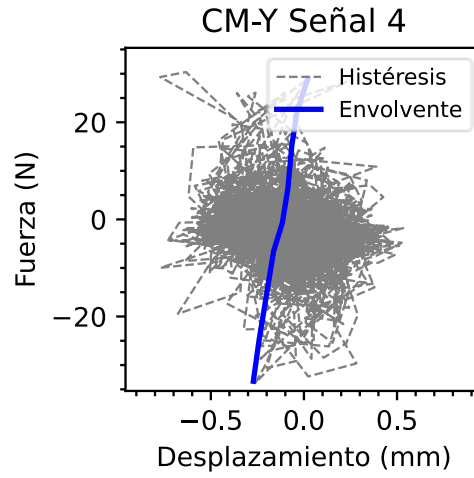
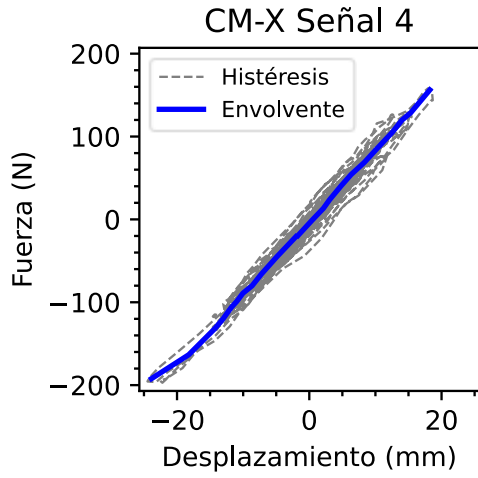


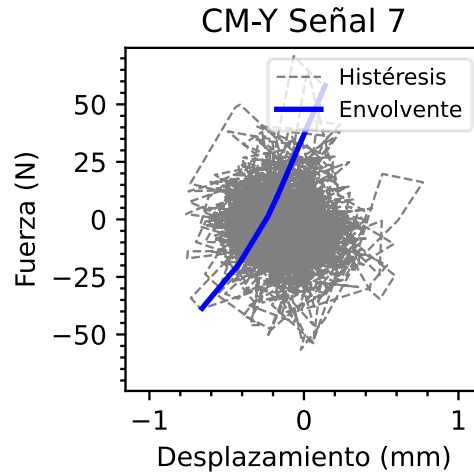
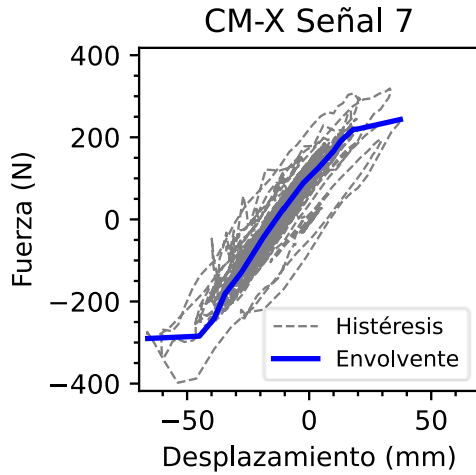


Anexo 6: Comportamiento histerético del centro de masas para para cada registro en el ensayo a escala de un modelo con irregularidad torsional

ESPECIMEN E5

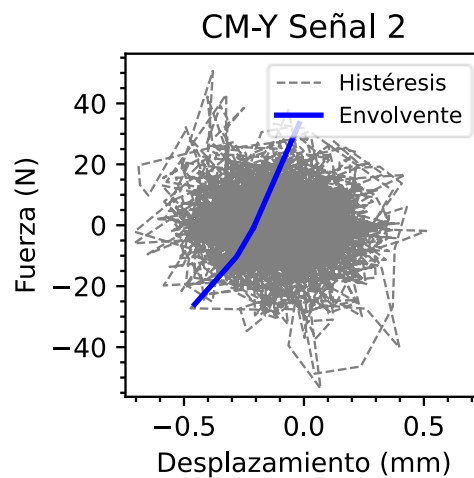
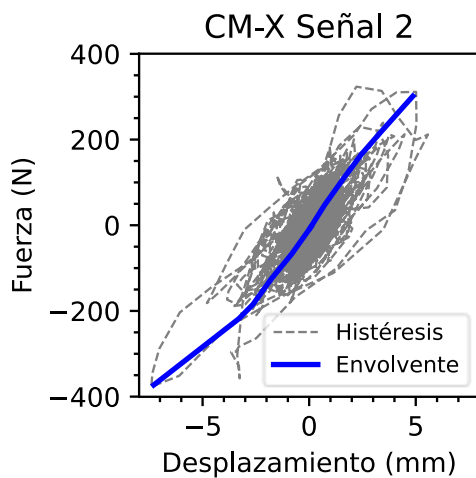
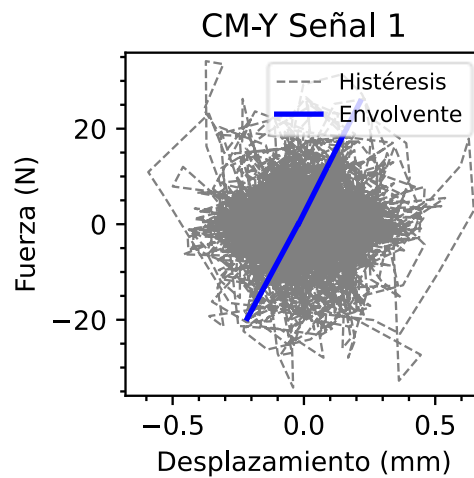
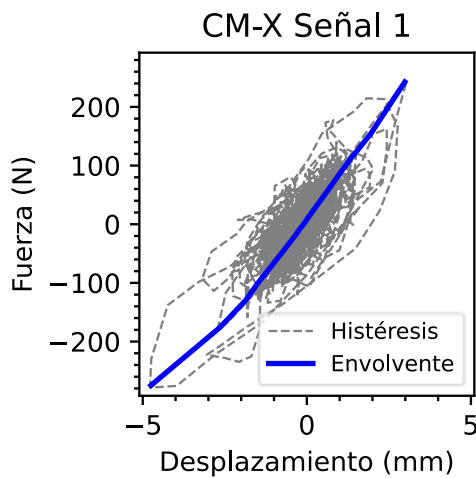


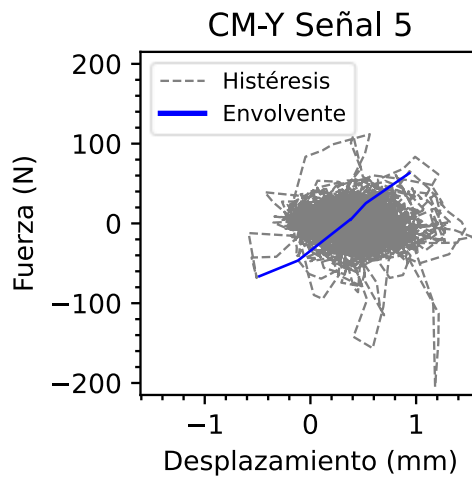
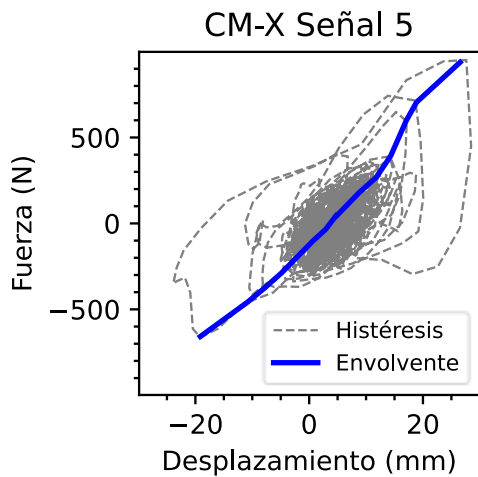
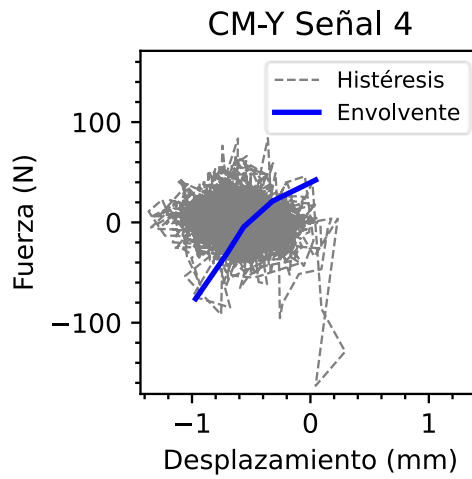
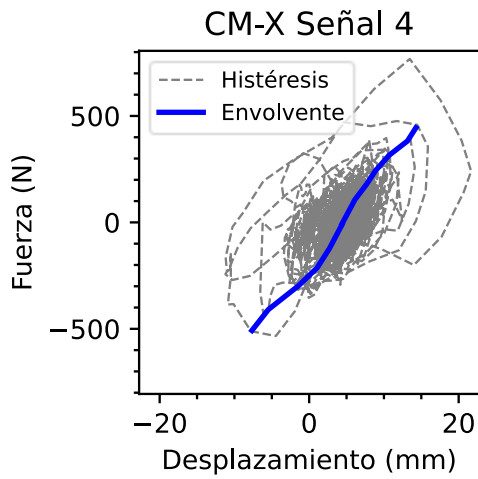
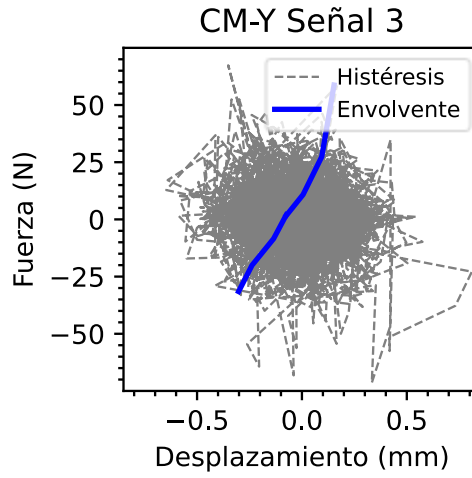
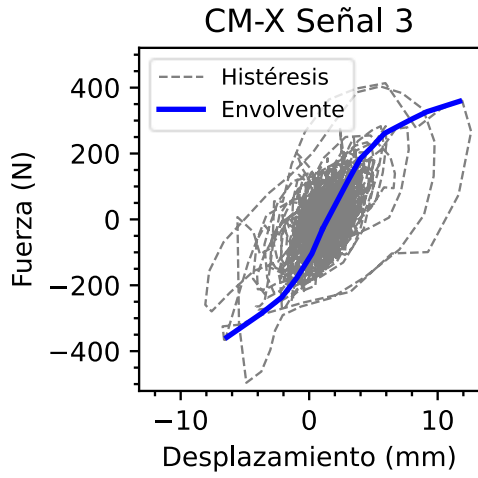


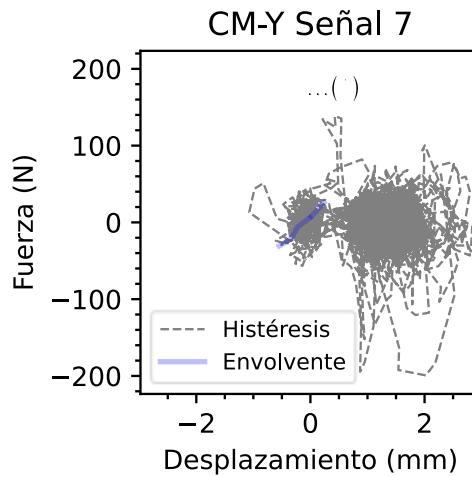
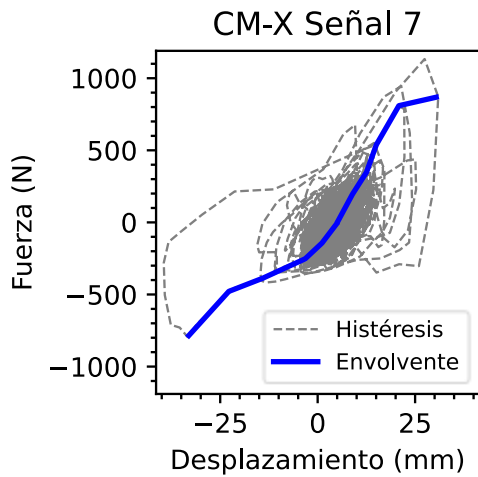
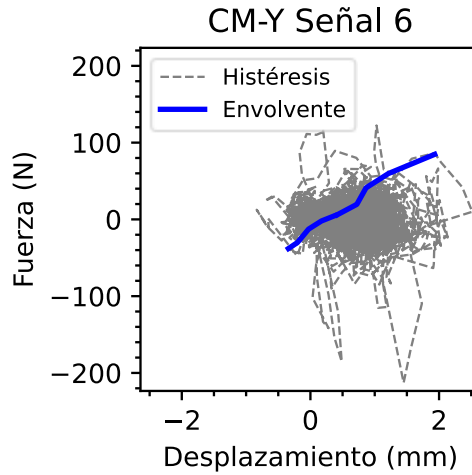
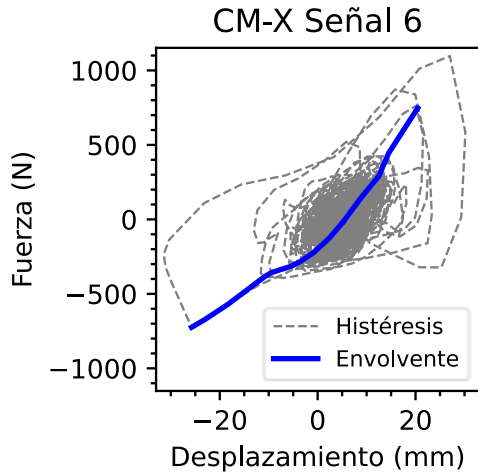


(*) Debido al desplazamiento residual, el espécimen comenzó a vibrar desde una nueva posición de equilibrio, generando así un desplazamiento de la envolvente.

ESPECIMEN E8

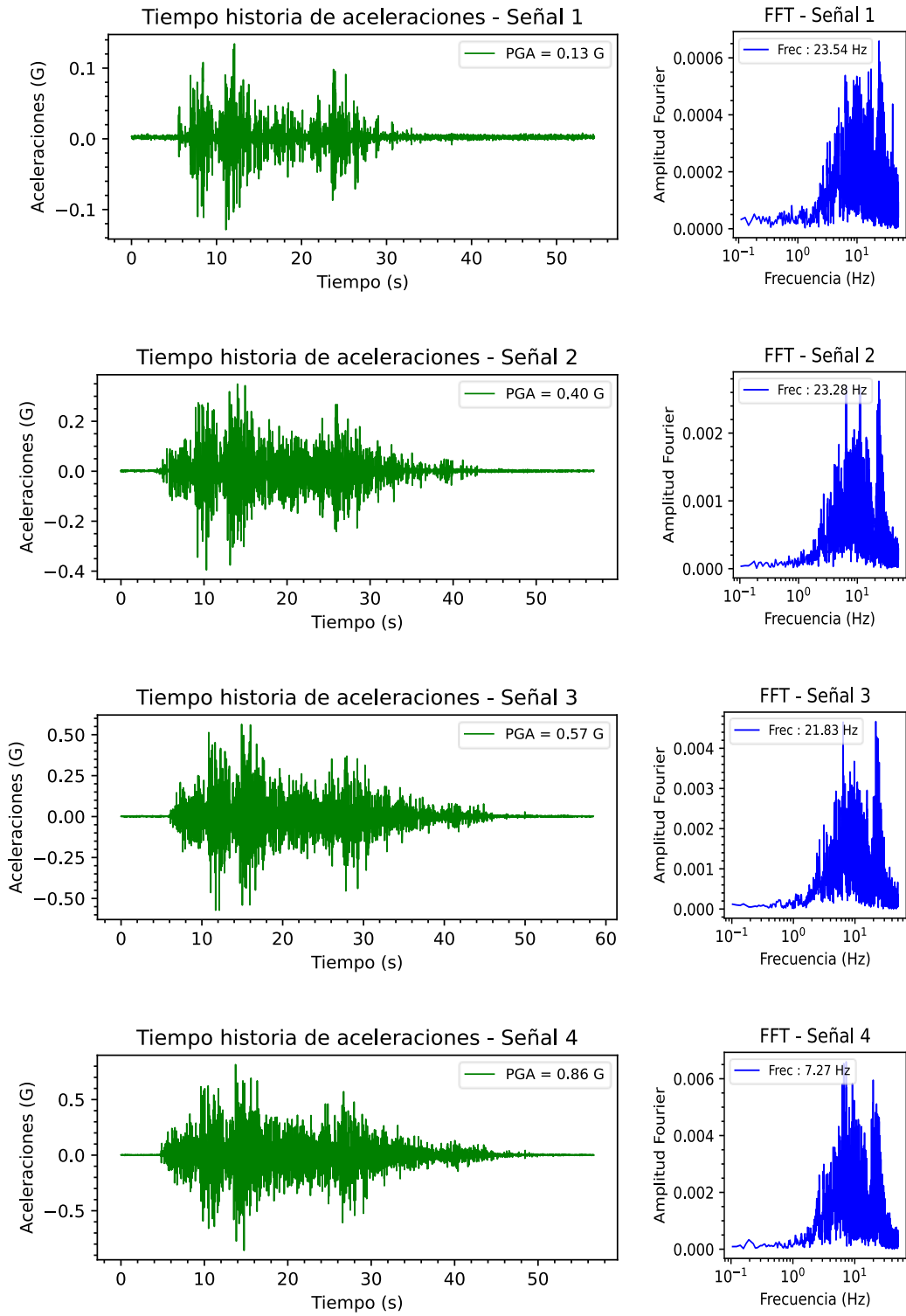


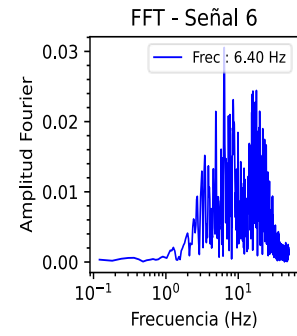
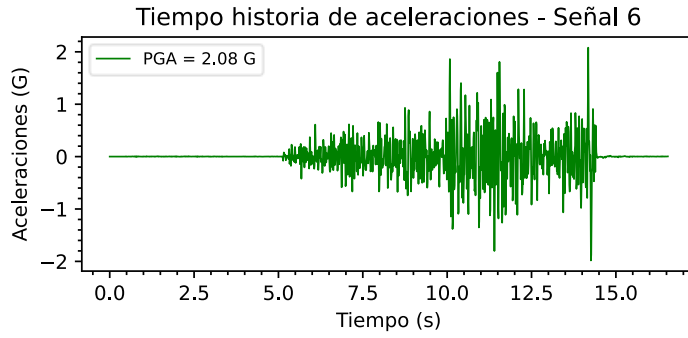
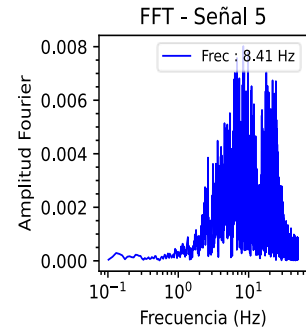
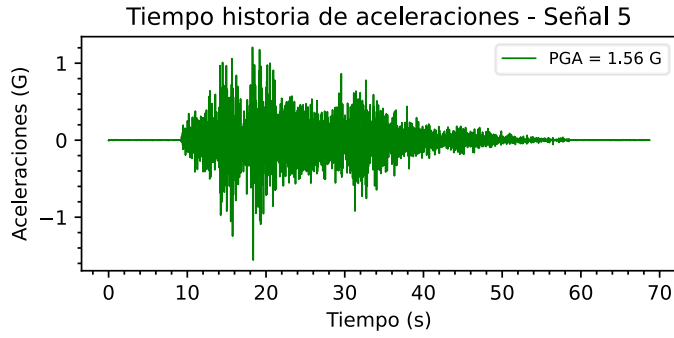




(*) Debido al desplazamiento residual, el espécimen comenzó a vibrar desde una nueva posición de equilibrio, generando así un desplazamiento de la envolvente.

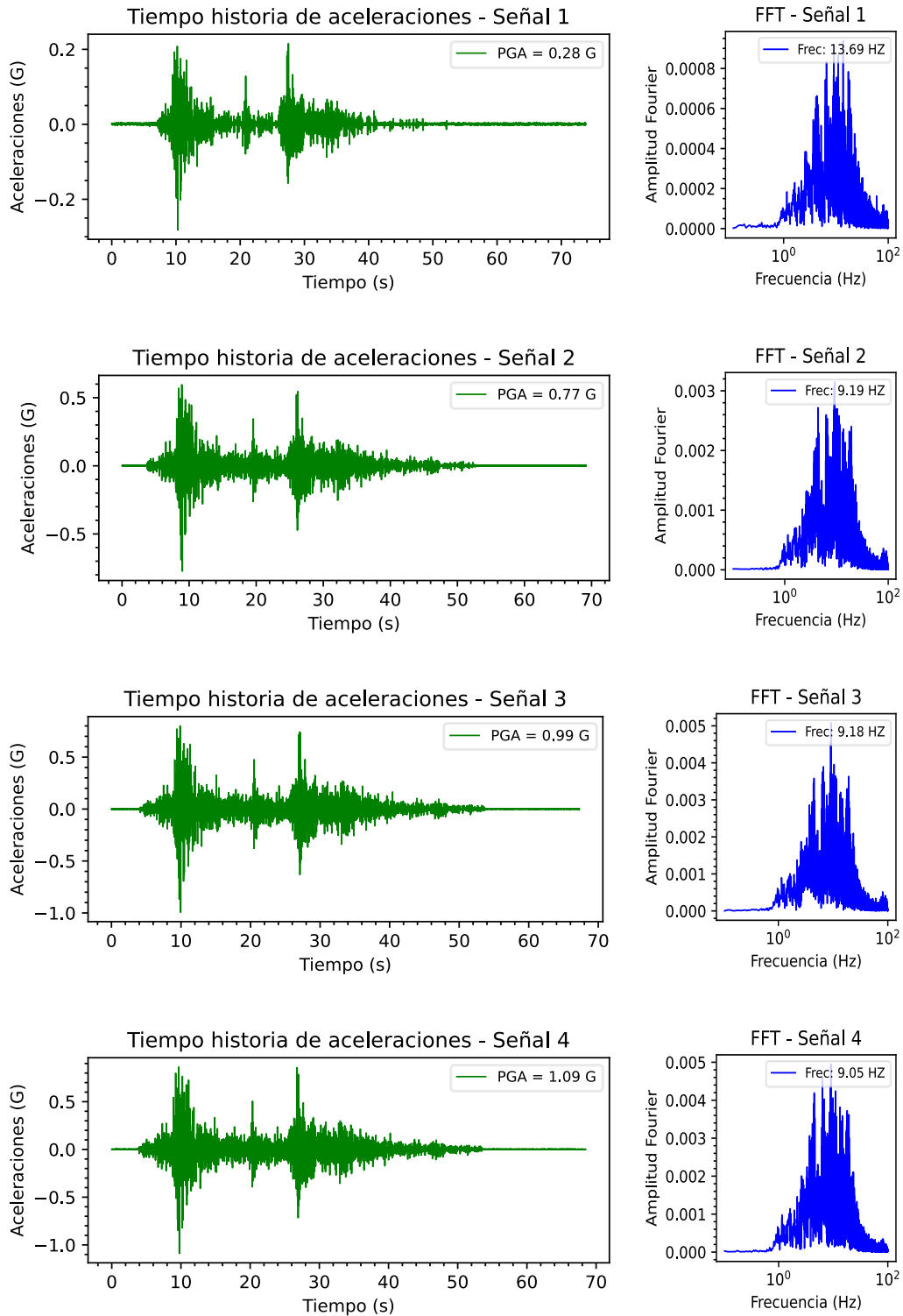
Anexo 7: Registros enviados a la mesa vibradora en el ensayo a escala de una edificación con muros de ductilidad limitada





Anexo 8: Registros enviados a la mesa vibradora en el ensayo a escala de un modelo con irregularidad en altura de rigidez.

ESPÉCIMEN E1



ESPÉCIMEN E2

