

**IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA  
ESTRUCTURA A ESCALA USANDO PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

**PRESENTADO POR  
MARÍA PAULA BASTILLA BORRERO  
ID: 000258576**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

**IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA  
ESTRUCTURA A ESCALA USANDO PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

**MARÍA PAULA BASTILLA BORRERO**

**ID: 000258576**

**DIRECTOR ACADÉMICO**

**GUSTAVO ANDRÉS OSPINA IDARRAGA, PhD**

**Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2018**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma Presidente del Jurado

---

Firma Jurado N°1

---

Firma Jurado N°2

Bucaramanga, Septiembre de 2018

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO .....	viii
PALABRAS CLAVE: .....	viii
V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO .....	viii
GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE .....	ix
KEYWORDS:.....	ix
V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK .....	ix
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3. JUSTIFICACIÓN .....	4
4. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	5
4.1 DINÁMICA ESTRUCTURAL .....	5
4.2 IMAGEN DIGITAL.....	7
4.3 PROBABILIDAD .....	14
4.4 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DISCRETA .....	15
4.5 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD CONTINUA.....	16
5. ESTADO DEL ARTE .....	18
5.1 FOTOGRAMETRÍA Y CORRELACIÓN DE IMÁGENES .....	18
5.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES.....	18

5.3	VISIÓN SIN CONTACTO.....	20
6.	METODOLOGÍA .....	23
7.	VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL .....	25
7.1	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA EXPERIMENTAL.....	25
7.2	PROPIEDADES DINÁMICAS NUMÉRICAS .....	26
7.3	PROPIEDADES DINÁMICAS EXPERIMENTALES .....	28
8.	IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES .....	31
8.1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE IDENTIFICACIÓN.....	31
8.2	DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO .....	31
8.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	37
9.	CONCLUSIONES .....	41
10.	TRABAJO FUTURO .....	44
11.	BIBLIOGRAFÍA .....	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema masa-resorte sometido a carga externa $F$ .....	6
Figura 2. Formación de la imagen digital (Digitalfotored, 2005a). .....	8
Figura 3. Píxel (Digitalfotored, 2005b) .....	9
Figura 4. Formación RGB de una imagen .....	10
Figura 5. Técnica de identificación de punto mediante triangulación (Baqersad et al., 2017). .....	14
Figura 6. Curva en forma de campana de una distribución normal. ....	17
Figura 8. Estructura experimental .....	25
Figura 9. Modos de vibración .....	27
Figura 10. Equipo de adquisición del laboratorio de estructuras UPB .....	28
Figura 11. Registro de vibración libre .....	29
Figura 12. Modos de vibración. ....	30
Figura 13. Detección de esquinas en la imagen RGB .....	32
Figura 14. Tonos RGB con distribución de probabilidad (a) Uniforme (b) Normal .....	33
Figura 15. Reducción de puntos según probabilidad (330 puntos descartados) .....	34
Figura 16. Triángulos entre puntos disponibles.....	35
Figura 17. Definición de centroide de marcas de referencia .....	36
Figura 18. Respuesta $u(t)$ obtenida .....	37
Figura 19. Segmento de señal $u(t)$ utilizado .....	38
Figura 20. Modos identificados con NExT-Era (En rojo: modos numéricos) ...	38
Figura 21. Modos identificados con NExT-Era (En azul: modos experimentales) .....	39
Figura 22. Comparación de modos de vibración numéricos y experimentales. ....	41
Figura 23. Comparación de modos de vibración numérica y procesamiento de imágenes.....	42
Figura 24. Comparación de modos de vibración a partir de sistema convencional y procesamiento de imágenes. ....	43

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. ....	5
Ecuación 2. ....	7
Ecuación 3. ....	7
Ecuación 4. ....	15
Ecuación 5. ....	16
Ecuación 6. ....	16
Ecuación 7. ....	17
Ecuación 8. ....	27

**RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA ESTRUCTURA A ESCALA USANDO PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

**AUTOR(ES):** María Paula Bastilla Borrero

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Gustavo Andrés Ospina Idarraga

**RESUMEN**

En el presente trabajo de grado propone una metodología para identificar la respuesta estructural en desplazamientos de un sistema experimental que se somete a vibraciones, utilizando la cámara de video de un teléfono inteligente o Smartphone. La estructura experimental asemeja una edificación de cuatro niveles y con desplazamiento en el plano XZ. La estructura consiste en entresijos rígidos en madera mdf conectados por láminas delgadas de acero que representan las columnas del sistema estructural. La metodología se basa en la captura digital del movimiento utilizando la cámara de video del Smartphone. El video capturado es procesado implementando estrategias para procesamiento de imágenes para determinar cuadro a cuadro la posición de marcas de referencia sobre la estructura experimental. Para comparar la efectividad de la metodología propuesta, se realiza la identificación de las propiedades dinámicas con un sistema tradicional. Los resultados comparan las frecuencias y modos de vibración obtenidas con ambas metodologías. También se realiza la comparación con un modelo numérico elaborado en Matlab.

**PALABRAS CLAVE:**

Procesamiento de imágenes, respuesta dinámica, modos de vibración.

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**



**GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** IDENTIFICATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF A SCALED STRUCTURE USING IMAGE PROCESSING

**AUTHOR(S):** María Paula Bastilla Borrero

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Gustavo Andrés Ospina Idarraga

**ABSTRACT**

This undergraduate final work proposes a methodology for the identification of displacements structural response of an experimental structure subject of vibrations, using a Smartphone. The experimental structure resembles a four-story building with displacements in the XZ plane. The structure consists of rigid wood floors connected with thin steel laminas that work as columns. The methodology is based on the capture of digital movement by means of the smartphone's camera. The captured video is processed using Image Processing techniques to define a frame-by-frame position of pre-established reference marks located over the structure. In order to compare the effectiveness of the proposed methodology, identification of dynamic parameters of the experimental structure is performed with a conventional acquisition system. The reported results compare frequencies and vibration modes of both methodologies. Comparison with results from a numerical model set up in Matlab is also performed.

**KEYWORDS:**

Image processing, dynamic response, modal vibration modes.

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## 1. INTRODUCCIÓN

Las vibraciones son la respuesta que en desplazamientos que experimenta un sistema estructural cuando éste es perturbado por un efecto externo y que varía en el tiempo. Este tipo de respuesta estructural es observable cuando los efectos externos son de tipo carga dinámica como sismos, viento, olas, corrientes de agua, explosiones o cargas móviles como vehículos o personas. También es posible observar vibraciones si el efecto externo cambia el estado de deformación de la estructura en un corto periodo de tiempo, como puede ser el resultado de un cambio térmico (por ejemplo, una estructura que ha experimentado temperaturas bajo cero y sube de temperatura a lo largo del día). Una vez aplicada la fuerza el cuerpo se mantiene en vibración mientras dure la misma, y cuando esta desaparece tiende a generarse un amortiguamiento hasta retornar a su posición de equilibrio inicial, lo que lo convierte en un sistema oscilatorio.

Los conceptos clásicos de la dinámica estructural establecen que las características que gobiernan la respuesta estructural por vibraciones son dependientes de la rigidez del elemento y de su masa. Estas dos propiedades físicas definen la frecuencia fundamental de vibración del sistema estructural, la cual define el número de veces que el sistema estructural oscila durante un segundo. La amplitud de las oscilaciones depende de la amplitud del efecto externo que genera las vibraciones (i.e., cargas, desplazamientos, etc). Las relaciones esfuerzo-deformación de los materiales que componen al elemento estructural definen si las amplitudes de la respuesta estructural son seguras o si por el contrario llevan a la falla estructural.

Desde hace varios años, el desarrollo de sistemas digitales y electrónicos ha facilitado el estudio de la respuesta dinámica de las estructuras. El uso de

sistemas de adquisición digital (tarjetas digitalizadoras, acelerómetros, deformímetros, etc) permiten monitorear la estructura durante periodos de interés, y el procesamiento de la información obtenida permite establecer si el nivel de vibraciones monitoreado es seguro o si se requiere algún tipo de reforzamiento estructural. Sin embargo, estos sistemas de monitoreo de vibraciones la mayoría de las veces requieren cableado y fuentes de electricidad, además de que se requiere una alta densidad de sensores que permitan hacer confiables a los resultados. Este hecho convierte los sistemas de adquisición tradicionales en sistemas costosos y de difícil implementación. Actualmente, muchos centros de investigación trabajan en sistemas más económicos y portables en pos de masificar los sistemas de monitoreo estructural. Esta misma motivación es la base para proponer el trabajo de investigación reportado en este documento. La propuesta considera implementar un sistema de bajo costo y alta practicidad, realizando el proceso de identificación de la respuesta estructural sin necesidad de contacto, haciendo uso de la cámara video de un Smartphone.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una herramienta numérica para la identificación de propiedades dinámicas a partir del procesamiento de imágenes capturadas por video cámara de Smartphone

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar algoritmos numéricos para el procesamiento de fotogramas de video y la captura de movimiento de estructura experimental
- Implementar los algoritmos desarrollados capturando video con Smartphone en estructura experimental del laboratorio de Dinámica Estructural de la Facultad de Ingeniería Civil
- Calcular las propiedades modales de la estructura experimental a partir de los desplazamientos calculados por la herramienta numérica
- Realizar la identificación de propiedades modales del sistema experimental utilizando el equipo de monitoreo de vibraciones del laboratorio de Dinámica Estructural de la Facultad de Ingeniería Civil
- Realizar comparación de resultados

### 3. JUSTIFICACIÓN

La identificación de las propiedades dinámicas de una estructura se ha llevado a cabo de manera tradicional utilizando acelerómetros sísmicos y sistemas de adquisición de señales, con el objetivo de hacer posible la digitalización de las señales generadas y su procesamiento en equipos de cómputo. Aunque es una metodología de amplio uso, presenta algunos inconvenientes: los equipos son costosos, requieren condiciones ambientales óptimas para su operación, puede resultar difícil instalar sensores en lugares inaccesibles de la estructura, y muchas otras dificultades que limitan las posibilidades de capturar digitalmente el movimiento de las estructuras (Bergen et al., 2013).

Las dificultades que presentan los sistemas de adquisición de vibraciones están en vía de ser superadas por el auge de los teléfonos inteligentes, o Smartphones. Su uso masificado está llevando al desarrollo de tecnologías portables de bajo costo, y podría decirse que en la actualidad éstos poseen una capacidad de procesamiento muy alta, casi a la par de la capacidad de un computador de escritorio («Computadora vs. Smartphone», s. f.) Una de las posibilidades que se puede explotar de esta tecnología es la captura del movimiento de una estructura utilizando su cámara de video. Un procesamiento eficiente de las imágenes capturadas por estos dispositivos representa tener a la mano un laboratorio portable y económico para análisis de vibraciones estructurales («Feature Extraction and Image Processing for Computer Vision - 3rd Edition», 2013).

## 4. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 4.1 DINÁMICA ESTRUCTURAL

#### 4.1.1 Grados de libertad

Un grado de libertad corresponde a cualquier movimiento posible de los nodos de los elementos en una dirección no restringida. Obviamente, cualquier estructura posee un número infinito de grados de libertad, debido a su continuidad, pero el proceso de discretización en elementos supone un número finito, aunque elevado, de ellos. (Hurtado, 2000)

Los grados de libertad corresponden al número mínimo de coordenadas necesarias para definir la posición en el espacio y en el tiempo de todas las partículas de masa del sistema. (García, 1998)

#### 4.1.2 Rigidez

Todo cuerpo elástico que sea sometido a fuerzas externas, ya sean estáticas o dinámicas, sufre una deformación. La rigidez se define como la relación entre estas fuerzas externas y las deformaciones que ellas inducen en el cuerpo.

La rigidez es por lo tanto, la relación entre las fuerzas y los desplazamientos y usualmente se denomina por medio de la letra  $k$ . También puede definirse como la fuerza que debe aplicarse al sistema para obtener una deformación unitaria en la misma dirección y sentido de la carga. (García, 1998)

Matemáticamente se expresa por medio de la siguiente relación:

$$k = \frac{P}{u}$$

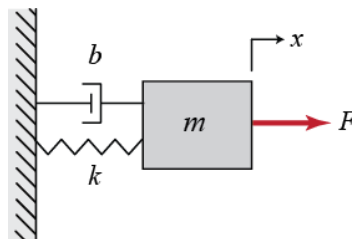
**Ecuación 1.**

#### 4.1.3 Amortiguamiento

En general en todo cuerpo en movimiento, el amortiguamiento tiende a disminuir con el tiempo. La razón de esta disminución está asociada con una pérdida de la energía presente en el sistema. Esta pérdida de energía producida por fuerzas de amortiguamiento de fricción que obran sobre el sistema. La energía ya sea cinética o potencial, se transforma en otra forma de energía tales como calor o ruido. Estos mecanismos de transformación de energía son complejos y no están totalmente entendidos. (García, 1998)

#### 4.1.4 Respuesta Dinámica

La respuesta dinámica de un sistema estructural sometido a una carga arbitraria se puede describir a través de la ecuación de movimiento, ecuación que relaciona las fuerzas actuantes en el sistema estructural y su respuesta interna (Chopra, 1995):



**Figura 1.** Sistema masa-resorte sometido a carga externa  $F$

En la figura 1 se aprecia una descripción analítica de un sistema estructural que posee una rigidez  $k$ , amortiguamiento  $b$ , y masa  $m$ . Las fuerzas internas desarrolladas están determinadas por la deformación del resorte ( $x$ ), la disipación de la velocidad en el amortiguador ( $\dot{x}$ ) y la aceleración inercial experimentada por su masa ( $\ddot{x}$ ). De acuerdo a las Leyes de Newton, la sumatoria de fuerzas debe ser igual a cero:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx - F = 0$$

**Ecuación 2.**

La ecuación anterior se denomina Ecuación de Movimiento (Chopra, 2012; García, 1998). Una solución típica de la anterior ecuación diferencial se da para el caso  $F=0$ , para el cual son las condiciones iniciales las que determinan la respuesta estructural. Este caso se denomina vibración libre amortiguada:

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} [u_0 \cos(\omega_a t) + \frac{u_0 + \xi\omega_n u_0}{\omega_a} \text{Sen}(\omega_a t)]$$

**Ecuación 3.**

En la expresión anterior,  $u(t)$  representa la deformación (desplazamiento,  $x$ ) del sistema estructural en el tiempo,  $\xi$  representa el porcentaje de amortiguamiento del sistema y  $\omega_n$  representa la frecuencia natural de vibración del mismo. Esta investigación busca determinar  $u(t)$  a través del procesamiento de imágenes, y a partir de allí determinar los parámetros  $\xi, \omega_n$ . (Chopra, 2012)

## **4.2 IMAGEN DIGITAL**

### **4.2.1 Formación de la Imagen Digital**

La imagen digital está formada por una serie de matrices numéricas de ceros y unos que se almacenan en una memoria informática y que definen las



características de una fotografía. Una vez esta imagen es interpretada (leída), los ordenadores la transforman en una imagen visible a través de la pantalla e imprimible también, a través de cualquier dispositivo de salida. La gran ventaja del archivo digital es que puede duplicarse y copiarse tantas veces como se quiera. Las imágenes digitales pueden ser icónicas (de diferentes grados de figuración y realismo) o icónicas (abstractas, esquemáticas), tridimensionales y planas, fijas o móviles. (Jensen & Lulla, 1987)

La trayectoria que sigue la cámara para formar la imagen digital es la siguiente forma: La luz que detecta el objetivo de la cámara llega hasta el sensor de imagen, denominado CCD formado por multitudes de receptores fotosensibles denominados "fotodiodos". La luz incidente genera una pequeña señal eléctrica a cada receptor, que posteriormente, esta señal se transformará en datos digitales por el conversor ADC, como una serie de cadenas de números ceros y unos, denominados dígitos binarios. Estos números binarios (0,1), se representan como pequeños cuadraditos, en forma de mosaico individual denominados píxeles. (Jensen & Lulla, 1987)



**Figura 2.** Formación de la imagen digital (Digitalfotored, 2005a).

#### 4.2.2 Píxeles

Si comparamos con la fotografía tradicional y analógica de toda la vida, observamos que una película fotográfica está formada por pequeños granitos formados por haluros de plata sensibles a la luz, éstos al encontrarse muy juntos forman la imagen que vemos. Cada uno de estos granitos es la unidad más pequeña que hay en una fotografía tradicional.

Pero en el caso de la fotografía digital, este granito pequeñito es substituido por el píxel. La imagen que obtenemos ya sea a través de una pantalla, o un escáner o una cámara digital, es un enorme mosaico lleno de millones de píxeles. Cada píxel "cuadrado" contiene la información del color de esa pequeña porción. El píxel solo puede ser de color rojo, verde o azul o la mezcla de los tres. Un píxel, solo tiene un color no puede tener dos colores. Al visualizar todos los píxeles juntos, uno al lado de otro, dan la impresión de continuidad respecto a la tonalidad del color, formando así la imagen. (Jensen & Lulla, 1987)

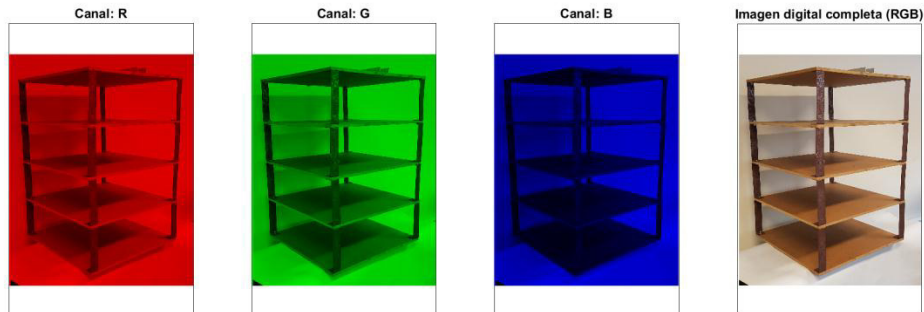


**Figura 3.** Píxel (Digitalfotored, 2005b)

### 4.2.3 Modelo de color RGB

Este espacio de color es el formado por los colores primarios luz, Rojo, Verde y Azul. De hecho, RGB son las siglas en inglés de los colores Red, Green y Blue. Este sistema es el más adecuado para representar imágenes que serán mostradas en monitores y que, finalmente, serán impresas en impresoras de papel fotográfico.

Las imágenes RGB utilizan tres colores para reproducir en pantalla hasta 16,7 millones de colores. RGB es el modo por defecto para las imágenes de Photoshop y, por lo general, el modo en el que vienen nuestras cámaras de fotos aunque ambos perfiles pueden cambiarse. El modo RGB asigna un valor de intensidad a cada píxel que oscila entre 0 (negro) y 255 (blanco) para cada uno de los componentes RGB de una imagen en color. (Jensen & Lulla, 1987)



**Figura 4.** Formación RGB de una imagen

### 4.2.4 Resolución de una imagen:

La resolución de la imagen, es la cantidad de píxeles. La resolución se utiliza también para clasificar casi todos los dispositivos relacionados con las imagen digital ya sean pantallas de ordenador o televisión, impresoras, escáneres, cámaras, etc.

La resolución expresa el número de píxeles que forman una imagen de mapa de bits. La calidad de una imagen, también depende de la resolución que tenga el dispositivo que la capta. El número de píxeles que contenga una imagen dependen de cuántos píxeles utilice el sensor CCD de la cámara para captar la imagen.

La resolución de una imagen digital se expresa multiplicando su anchura por la altura en pantalla. Por ejemplo la imagen de 1200 x 1200 píxeles = 1.440.000 píxeles, expresado en Mp megapixel es igual a 1,4 Mp. (Jensen & Lulla, 1987)

#### **4.2.5 Formatos en los archivos digitales:**

Los formatos de archivos digitales almacenan la información codificando cada píxel de toda la imagen de forma individual, esto ocasiona que el archivo ocupe demasiado espacio en MB en el ordenador pero, a cambio, no pierda ninguna clase de información.

Existen diferentes clases de archivos digitales, unos sufren pérdida de calidad y otros no. Algunos dispositivos digitales utilizan un formato que mantiene el archivo de la imagen en su estado virgen, en el cual no realizan ninguna clase de compresión y el archivo se mantiene en su máxima calidad, igual que en el momento que se captó la imagen. Podemos citar el formato RAW y el TIFF. Otros formatos sin pérdida de calidad son BMP, EPS, PSD y PDF.

En la imagen y archivos digitales, existen formatos de archivo que desechan información innecesaria al almacenarlas sufriendo una pérdida de calidad, pero con la ventaja de que obtienen archivos informáticos con menor peso y espacio en las computadoras, haciéndolas más manejables. Algunos de estos formatos son JPEG, GIF, PNG.(Jensen & Lulla, 1987)

#### **4.2.6 Procesamiento de imágenes:**

En las imágenes digitales, los objetos pueden identificarse usando sus contornos o bordes. Normalmente, un borde en una imagen monocromática se ubica como un cambio brusco en el nivel de gris. Este cambio normalmente ocurre en un número de píxeles vecinos.

Una cámara de video digital puede formar una secuencia de imágenes para registrar el movimiento de un objeto. Debido a la disponibilidad comercial de cámaras de video digitales de alta velocidad (como las cámaras de video profesionales de hasta 40,000 cuadros / s en la actualidad), se puede capturar fácilmente la oscilación mecánica típica. Entonces, las series temporales del objeto vibrante se pueden obtener usando técnicas de procesamiento de imágenes (Poudel, Fu, & Ye, 2005).

#### **4.2.7 Fotogrametría**

La fotogrametría es una técnica de medición que se utiliza para extraer la geometría, el desplazamiento y la deformación de una estructura mediante fotografías o imágenes digitales. La fotogrametría bidimensional (2D) utiliza una única cámara fija y está limitada a las medidas de deformación en plano de las superficies de los objetos.

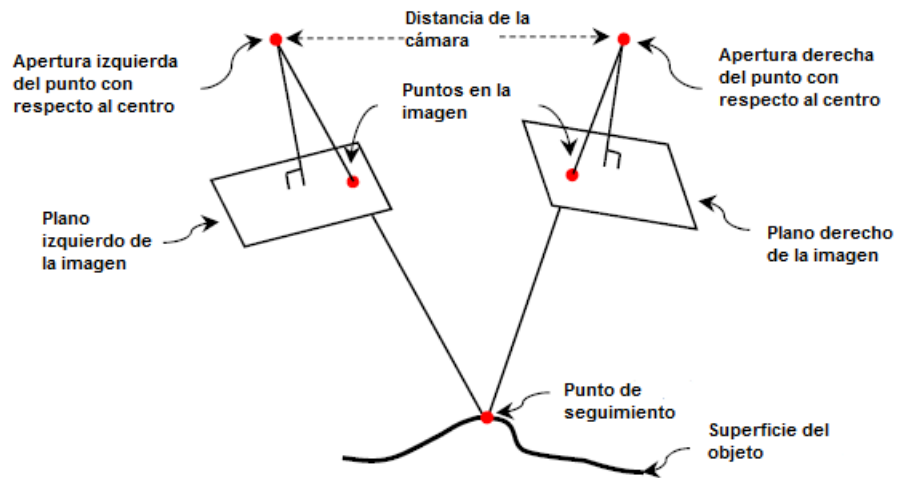
En una prueba modal experimental típica, la característica dinámica de una estructura se extrae excitándola y midiendo la respuesta de esta al movimiento. Tradicionalmente, las mediciones de las formas y las medidas de los cambios se realizan utilizando sensores adjuntos, tales como acelerómetros. Se requiere un número significativo de estos sensores puntuales, incrustados o conectados a la estructura para caracterizar completamente la dinámica de la misma, aumentando así el costo del sistema

de medición. Como alternativa de esto se ha desarrollado la técnica de fotogrametría que es un sistema de medición basado en imágenes y utiliza desplazamientos de los puntos o superficies en una estructura para monitorear su dinámica. La fotogrametría proporciona capacidades de medición de campo completo sin contacto y puede ser una alternativa a los enfoques de medición puntuales convencionales.

La técnica de fotogrametría cuenta con tres enfoques: seguimiento de puntos, correlación de imágenes y enfoques sin objetivo.

La técnica de seguimiento de puntos utiliza cámaras fotogramétricas para identificar las coordenadas de los puntos discretos montados en las estructuras de prueba. La correlación de imágenes digitales es una técnica de medición óptica que funciona en base a variaciones de escala de grises de patrones continuos. El área de la estructura de prueba debe prepararse antes de la medición. La preparación de la superficie generalmente se realiza aplicando un patrón de moteado de alto contraste en la estructura.

En los enfoques sin objetivo, no hay un objetivo o patrón óptico para encontrar la deformación de la estructura. Los investigadores han utilizado las características internas o los bordes de una estructura para identificar el objeto o las áreas del objeto que necesita ser rastreado, como se ilustra en la Figura 5. (Baqersad, Poozesh, Niezrecki, & Avitabile, 2017).



**Figura 5.** Técnica de identificación de punto mediante triangulación (Baqersad et al., 2017).

### 4.3 PROBABILIDAD

La probabilidad es una medida numérica de la posibilidad que ocurra un evento. Por tanto, las probabilidades son una medida del grado de incertidumbre asociado con cada uno de los eventos previamente enunciados. Si cuenta con las probabilidades, tiene la capacidad de determinar la posibilidad de ocurrencia que tiene cada experimento y espacio muestral.

En el contexto de la probabilidad, un experimento es definido como un proceso que genera resultados definidos. Y en cada una de las repeticiones del experimento, habrá uno y sólo uno de los posibles resultados experimentales. Al especificar todos los resultados experimentales posibles, está definiendo el espacio muestral de un experimento, el cual es el conjunto de todos los resultados experimentales.

## 4.4 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DISCRETA

### 4.4.1 Variables Aleatorias

Las variables aleatorias se usan para describir resultados experimentales que emplean valores numéricos. En efecto, una variable aleatoria asocia un valor numérico a cada uno de los resultados experimentales. Las variables aleatorias se pueden clasificar en discretas o continuas, dependiendo del tipo de valores que asuma.

Las variables aleatorias discretas son aquellas que asumen un número finito de valores, es decir, se puede contar el conjunto de posibles resultados. Las variables aleatorias continuas en cambio pueden tomar un número infinito de valores en un intervalo dado, experimentos basados en escalas de medición de tiempo, temperatura, peso y distancia pueden ser descritos por este tipo de variables.

### 4.4.2 Distribución Binomial

En una distribución de probabilidad binomial se usan variables aleatorias discretas puesto que los experimentos binomiales solo tiene dos posibles resultados: *éxito* o *fracaso*. Partiendo del hecho que  $x$  es el número de *éxitos*, entonces  $x$  tomará un número finito de valores. Un experimento binomial consiste en una serie de  $n$  ensayos idénticos.

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!}$$

**Ecuación 4.**

Donde

$$n! = n(n-1)(n-2) \dots (2)(1)$$

$$0! = 1$$



Hay otros resultados experimentales en los que se obtienen dos éxitos y un fracaso. En cualquier experimento binomial todas las series de resultados de ensayos en las que hay  $x$  éxitos en  $n$  ensayos tienen la misma probabilidad de ocurrencia. A continuación se presenta la probabilidad de cada una de las series de ensayos en las que hay  $x$  éxitos en  $n$  ensayos.

$$p^x (1 - p)^{(n-x)} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Entonces combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene la función de probabilidad binomial:

$$f(x) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{(n-x)} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde

$f(x)$  = probabilidad de  $x$  éxitos en  $n$  ensayos

$n$  = número de ensayos

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x! (n - x)!}$$

$p$  = probabilidad de un éxito en cualquiera de los ensayos

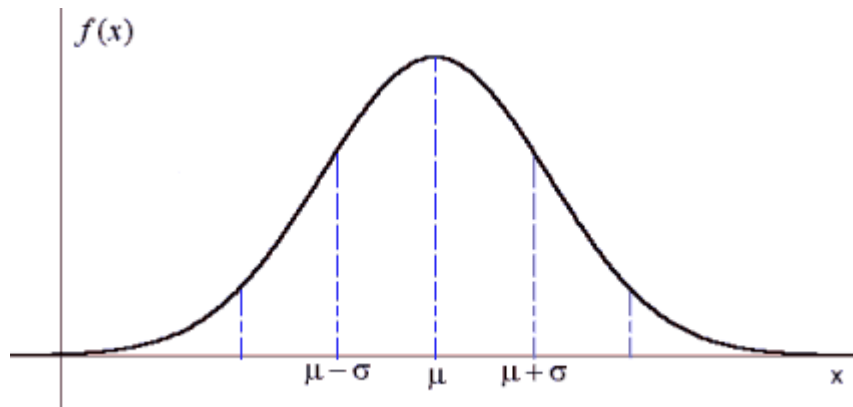
$1 - p$  = probabilidad de un fracaso en cualquiera de los ensayos

## 4.5 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD CONTINUA

### 4.5.1 Distribución Normal

En la distribución normal se describen variables aleatorias continuas. Este tipo de distribución permite modelar fenómenos naturales, psicológicos y sociales. La curva de una distribución normal se le denomina campana de Gauss, esta

como lo describe su nombre es una curva en forma de campana simétrica. El pico de la curva, se ubica justo en el punto medio de la campana y este punto representa la media. La descripción de la curva se encuentra a continuación en la Figura 6.



**Figura 6.** Curva en forma de campana de una distribución normal.  
(Ang & Tang, 2007)

### **Función de Densidad de Probabilidad Normal**

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

**Ecuación 7.**

Dónde:

$\mu = \text{media}$

$\sigma = \text{desviación estándar}$

$\pi = 3.14159$

$e = 2.71828$

(Anderson, Sweeney, & Williams, 2008)

## **5. ESTADO DEL ARTE**

### **5.1 FOTOGRAMETRÍA Y CORRELACIÓN DE IMÁGENES**

La fotogrametría es una técnica de medición que se utiliza para extraer la geometría, el desplazamiento y la deformación de una estructura mediante fotografías o imágenes digitales. La técnica de seguimiento de puntos utiliza cámaras fotogramétricas para identificar las coordenadas de los puntos discretos montados en las estructuras de prueba. La correlación de imágenes digitales es una técnica de medición óptica que funciona en base a variaciones de escala de grises de patrones continuos (Baquersad et al., 2017).

La correlación de imágenes es una práctica y efectiva técnica óptica para la medición de la deformación de la superficie. El principio básico de la correlación de imágenes es hacer coincidir el mismo punto físico en dos imágenes. , el concepto de criterio de correlación se usó en el método basado en gradientes espaciales cruciales para desplazamientos subpíxel y mediciones de gradientes de desplazamiento. Como se puede encontrar en trabajos previos, la suposición fundamental del método es la intensidad del nivel de gris de una figura física que no cambia en la imagen deformada.(Pan, Asundi, Xie, & Gao, 2009).

### **5.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES**

La técnica de procesamiento de imágenes es usada para la detección de grietas en elementos estructurales usando dos cámaras digitales con el fin de analizar los píxeles agrietados. El algoritmo desarrollado para la localización de grietas maneja lenguaje de programación MATLAB y este permite

determinar las coordenadas de las grietas y enviar los datos resultantes a través de un procedimiento numérico de determinación del espaciado de grietas.(Rimkus, Podvieszko, & Gribniak, 2015). Este tipo de algoritmos también se han aplicado para la detección de grietas en puentes y ha sido respaldado por encuestas de escaneo láser. La exploración láser se usa para calcular la rectificación de la imagen, requerida para aplicar el procedimiento de procesamiento de imágenes.(Valença, Puente, Júlio, González-Jorge, & Arias-Sánchez, 2017).

Para realizar el procesamiento de imágenes digitales es importante tener en cuenta la detección de color en cada imagen que puede estar representada por un espacio de color RGB con 8 bits, ya que cada componente del espacio de color está discretizado en un rango de valores de 0 a 255. Es necesario elegir una relación adecuada entre componentes para la detección de objetos o defectos. El procedimiento automático es usado para el análisis de cada pixel el cual permite reconocer componentes estructurales y defectos. La detección de la estructura es marcada con pixeles verdes, y la detección de defectos con pixeles rojos. (Potenza, Castelli, Gattulli, & Ottaviano, 2017)

Para el procesamiento de imágenes digitales es también usada la respuesta de desplazamiento multipunto que consiste en usar el movimiento de la estructura y no la unidad de pixel. La razón es porque al usar la unidad de pixel para evaluar la deformación de la estructura, puede tener una gran cantidad de unidades de estos con el mismo nivel de gris que da como resultado errores analíticos. Para realizar este tipo de mediciones se usan dos videocámaras digitales con velocidad de captura de 60 cuadros por segundo en 720x480 píxeles, y la resolución de la unidad el píxel mide 7.692 mm. (Jurjo, Magluta, Roitman, & Gonçalves, 2010; Kim & Kim, 2011)

Varias investigaciones han estudiado la estimación del movimiento de una secuencia de imágenes. Existen diferentes enfoques adoptados por investigadores para resolver el problema. El tema común en todos los métodos es que la característica usada son puntos en la superficie del objeto, esos puntos podrían ser esquina, intersecciones entre líneas, etc. Se asume que  $N$  puntos pueden ser detectados en cada cuadro de la escena y además se conoce la correspondencia entre puntos. (Sabata & Aggarwal, 1991).

Una forma de detectar objetos en movimiento es estudiar el flujo óptico el cual es un patrón del movimiento aparente de los objetos, superficies y bordes causado por el movimiento relativo entre un observador (un ojo o una cámara) y la escena. El flujo óptico de una imagen se calcula asumiendo que la intensidad de uno de los puntos es constante en el tiempo y que los puntos cercanos se mueven de forma similar. El método más fácil para realizar el seguimiento de imágenes mediante el uso del flujo óptico es el basado en encontrar características como: bordes, esquinas y otras estructuras bien localizadas en dos dimensiones y las persigue cuadro a cuadro. (Frédéric, s. f.)

### **5.3 VISIÓN SIN CONTACTO**

En los últimos años, la tecnología basada en la visión ha logrado avances significativos y se ha aplicado en la medición sin contacto del desplazamiento estructural de la infraestructura civil. Con la ayuda de dispositivos de adquisición de imágenes y la técnica de procesamiento de imágenes digitales, se ha desarrollado un número significativo de métodos y sistemas basados en la visión para el monitoreo del desplazamiento estructural. El método de medición de desplazamiento dinámico de visión artificial se basa en el algoritmo de coincidencia de patrones multipunto. Inicialmente se ubican puntos de referencia con el fin de crear un conjunto de patrones, la cámara captura una imagen que incluye los puntos, y los patrones correspondientes

con las coordenadas de píxeles iniciales los cuales se harán coincidir mediante el algoritmo multipunto en las diferentes imágenes capturadas por la cámara CCD digital y el análisis es comparado con la medición realizada por los acelerómetros.(Dong, Ye, & Jin, 2017). Las secuencias de imágenes grabadas por la cámara son procesadas por un software comercial, como Image Pro Plus 6.0 o Image Gear , como solo se quiere seguir el movimiento de los marcadores, se adopta una breve exposición para que el fondo sea lo más oscuro posible y, por lo tanto, para aumentar el contraste entre los marcadores y el fondo. Seguidamente, se selecciona el Área de interés (AOI) para enfocar el procesamiento de imágenes sucesivas en los marcadores y se define un umbral para segmentar los marcadores del fondo. Los movimientos de los marcadores, según se adquieren del procesamiento de imágenes, están en coordenadas de imagen, es decir, píxeles, y pueden ser convertidos en movimientos en coordenadas. Las coordenadas reales de los marcadores se reconstruyen mediante la programación de algoritmos en Matlab espaciales, es decir, cm o m.(Wu, Casciati, & Casciati, 2014).

Estudios recientes sobre sensores de desplazamiento basados en visión por diferentes grupos de investigación han demostrado experimentalmente que se puede lograr alta precisión para medición de desplazamiento estructural de punto único y multipunto ya sea mediante el seguimiento de paneles de destino prediseñados de alto contraste o características naturales en la superficie estructural. . El paquete de software del sensor de visión se desarrolla utilizando Visual Studio 2010 con el lenguaje C ++, que puede rastrear con precisión los desplazamientos estructurales en múltiples ubicaciones definidas por el usuario, cuadro por cuadro. Cualquier textura en la superficie estructural se puede registrar como un objetivo de seguimiento, siempre que el contraste del patrón esté disponible en comparación con el fondo circundante. El factor de escala (unidades: mm / pixel) se establece para

transformar los desplazamientos de coordenadas de píxeles en coordenadas físicas. (Dong et al., 2017; Shang & Shen, 2018)

En las imágenes digitales, los objetos pueden identificarse usando sus contornos o bordes. Normalmente, un borde en una imagen monocromática se ubica como un cambio brusco en el nivel de gris. Este cambio normalmente ocurre en un número de píxeles vecinos. Como primer paso se debe adquirir imágenes de un objeto de escala (con dimensiones conocidas) junto con el objeto cuyo movimiento se va a medir. Se extrae la información del borde (ubicación, pendiente y curvatura) en las imágenes obtenidas para el objeto de escala y se determine el factor de escala (en longitud por píxel). Después se adquiere imágenes de referencia del objeto interesado que no esté en movimiento y se procede a extraer la información de borde de ellas. (Poudel et al., 2005)

El MCS (Motion Capture System) consiste en marcas, varitas, cámaras, un servidor y una computadora. El número de marcas en la estructura depende de del número de datos que se quieran monitorear. El área de medida del MCS es determinada por la colocación de la cámara. Las cámaras deben ser colocadas para que cada marcador en la estructura pueda verse al menos en dos de ellas. (Park, Park, Kim, & Adeli, 2015)

## 6. METODOLOGÍA

El desarrollo de algoritmos numéricos con capacidad de captura de movimiento debe seguir una secuencia lógica similar a la planteada a continuación:

Captura de video de estructura de referencia: la captura debe poseer la resolución adecuada, y debe realizarse desde un punto fijo que permita considerar el movimiento de la estructura como absoluto.

Descomposición numérica del video capturado: tal como sucede en el video análogo, un archivo de video digital consiste en una serie de fotogramas que al ser reproducidos en secuencia dan la ilusión de movimiento. Estos fotogramas pueden ser manipulados individualmente con herramientas de procesamiento de imágenes.

Captura numérica del movimiento: una vez lograda la descomposición del video capturado en fotogramas, se deben establecer puntos fijos que puedan ser localizados cuadro a cuadro. La velocidad con la que han sido capturados los fotogramas (fps) permite establecer la función de posición en función del tiempo,  $u(t)$ , del sistema estructural.

Una vez obtenida la respuesta dinámica de la estructura de referencia  $u(t)$ , es posible aplicar algoritmos para la identificación de modos de vibración, como por ejemplo, ERA (Caicedo, 2011; Juang & Pappa, 1985, 1988) o el procesamiento de Fourier (Vetterli, Kovačević, & Goyal, 2014) El error obtenido con la metodología desarrollada puede calcularse utilizando un sistema de



adquisición tradicional sobre la estructura de referencia, usando sus resultados como valores de comparación.

La metodología numérica está apoyada en Matlab, herramienta de apoyo para el cálculo de operaciones complejas y de programación de algoritmos.

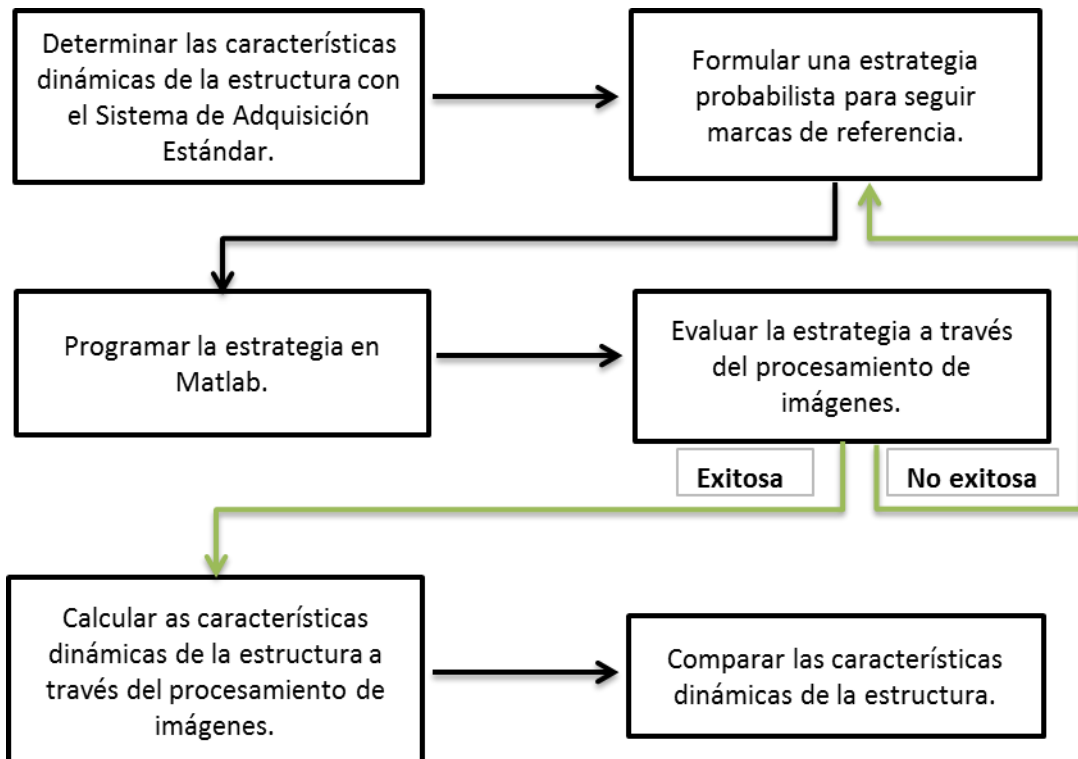


Gráfico 1.

## 7. VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL

### 7.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA EXPERIMENTAL

La estructura utilizada en el proyecto está compuesta por cuatro niveles, elaborados en madera mdf con un área en planta de 45x45 cm y un espesor de 9mm, sostenidas por cuatro láminas de acero con dimensiones: ancho: 3cm, altura: 15cm y espesor de 0.8mm cada una. La masa total de la estructura es de 10887 gramos, correspondiéndole a cada placa una masa de 1173 gramos.



**Figura 7.** Estructura experimental

## 7.2 PROPIEDADES DINÁMICAS NUMÉRICAS

La estructura de referencia es modelada utilizando Matlab. Las propiedades de masa y rigidez de la estructura descrita anteriormente permiten ensamblar las respectivas matrices, como se tiene a continuación:

**Tabla 1.** Masa y rigidez utilizadas para el modelo numérico

Masa Niveles 1-2-3	Masa Placa+Masa Columnas	1388 g
Masa Nivel 4	Masa Placa+(Masa Columnas)/2	1280 g
Rigidez de cada nivel	$12 \cdot E \cdot I / L^3 \cdot (4 \text{ Columnas})$	3.43 N/mm

$$K = \begin{bmatrix} 6.86 & -3.43 & 0 & 0 \\ -3.43 & 6.86 & -3.43 & 0 \\ 0 & -3.43 & 6.86 & -3.43 \\ 0 & 0 & -3.43 & 3.43 \end{bmatrix} \text{ N/mm}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1387.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1387.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1387.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1387.7 \end{bmatrix} \text{ g}$$

Al calcular los valores y vectores propios del modelo numérico, se encuentran los modos y frecuencias de vibración:

$$\omega_n = \begin{bmatrix} 17.562 \\ 50.393 \\ 76.769 \\ 93.66 \end{bmatrix} \text{ rad/s}$$

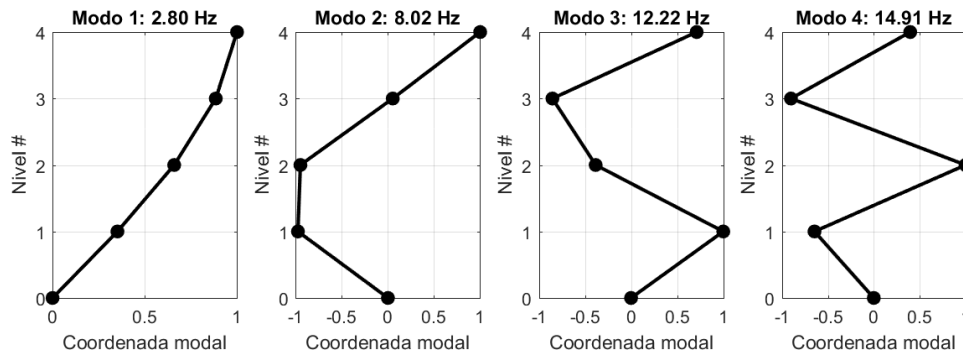
$$fn = \frac{wn}{2 * \pi}$$

**Ecuación 8.**

$$fn = \begin{bmatrix} 2.7951 \\ 8.0204 \\ 12.218 \\ 14.906 \end{bmatrix} \text{ Hz}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.35 & -0.98 & 1.00 & -0.65 \\ 0.66 & -0.95 & -0.38 & 1.00 \\ 0.88 & 0.05 & -0.85 & -0.90 \\ 1.00 & 1.00 & 0.71 & 0.40 \end{bmatrix}$$

La última de las matrices anteriores representa la matriz de modos de vibración o matriz modal, la cual representa las proporciones de movimiento que experimenta el sistema para cada grado de libertad en cada modo de vibración, y por tanto es adimensional. La representación gráfica de los modos de vibración numéricos se muestra a continuación:



**Figura 8.** Modos de vibración

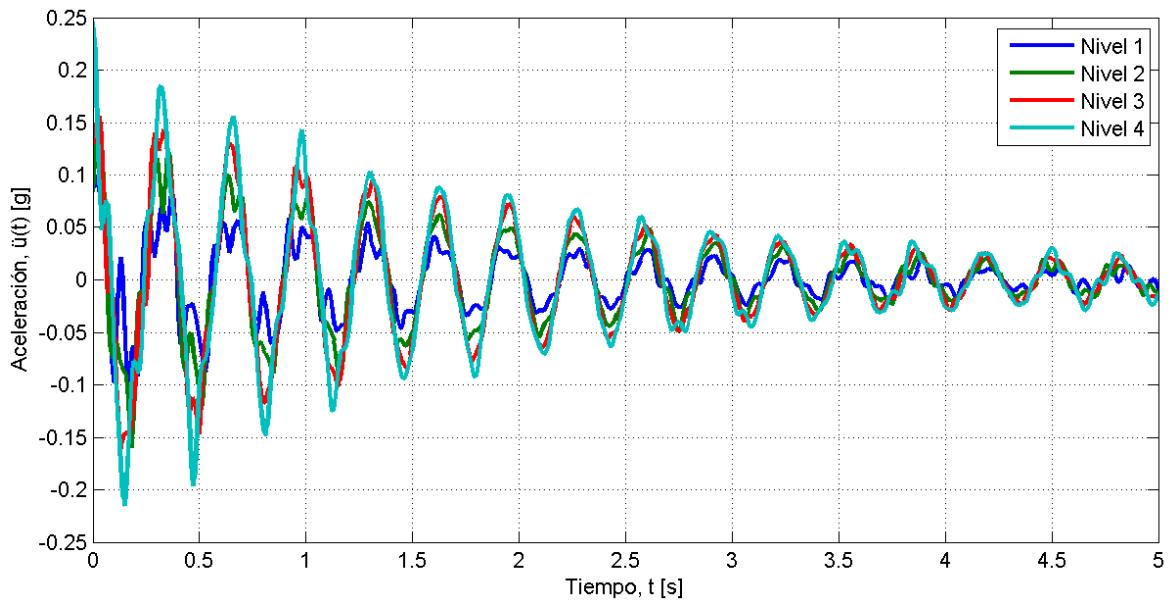
### 7.3 PROPIEDADES DINÁMICAS EXPERIMENTALES

Las propiedades dinámicas de la estructura experimental fueron determinadas utilizando el equipo de vibraciones del laboratorio de estructuras de la Universidad Pontificia Bolivariana. Se utilizaron 4 acelerómetros de la marca PCB (referencia 333B50) y 1 tarjeta de adquisición de la marca National Instruments (ref. NI 9234), los cuales se muestran en la figura 10:



**Figura 9.** Equipo de adquisición del laboratorio de estructuras UPB

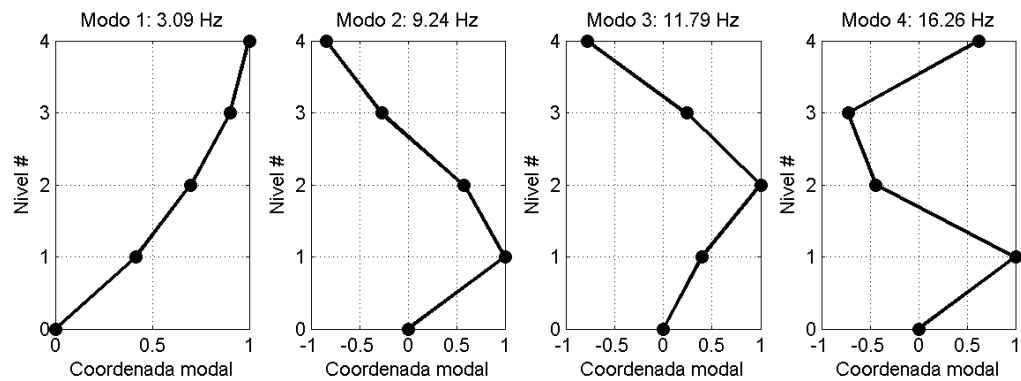
La estructura de prueba fue sometida a pruebas de vibración libre (Figura 7), cuyos registros de aceleración fueron capturados utilizando el software Signal Express de National Instruments. Los registros de aceleraciones, en unidades de gravedad (g), se procesaron utilizando la técnica NExT ERA (Referencia de Caicedo) para identificar modos y frecuencias de vibración (Figura 8):



**Figura 10.** Registro de vibración libre

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.41 & 0.66 & 0.41 & 1.00 \\ 0.69 & 1.00 & 0.69 & 0.74 \\ 0.89 & 0.08 & 0.90 & -0.18 \\ 1.00 & -0.95 & 1.00 & -0.90 \end{bmatrix}$$

$$f_n = \begin{bmatrix} 3.0854 \\ 9.2397 \\ 11.7924 \\ 16.2609 \end{bmatrix} \text{ Hz}$$



**Figura 11.** Modos de vibración.

Los modos y frecuencias de vibración mostrados en la Figura 11, calculados a través del sistema convencional para adquisición de vibraciones, serán utilizados para comparar los resultados obtenidos utilizando la metodología de procesamiento de imágenes.

Una conclusión previa que se puede elaborar en esta etapa de análisis es que el modelo numérico muestra modos que no son identificados experimentalmente. Puede decirse que el modelo numérico representa confiablemente los modos experimentales 1, 2 y 4 (1,2 y 3 numéricos, respectivamente), con un error de 9,41%, 13,20% y 24,86%. El modo no representado (3) sugieren que es posible que el uso de 4 grados de libertad para representar numéricamente la estructura pueda ser insuficiente.

## 8. IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

### 8.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE IDENTIFICACIÓN

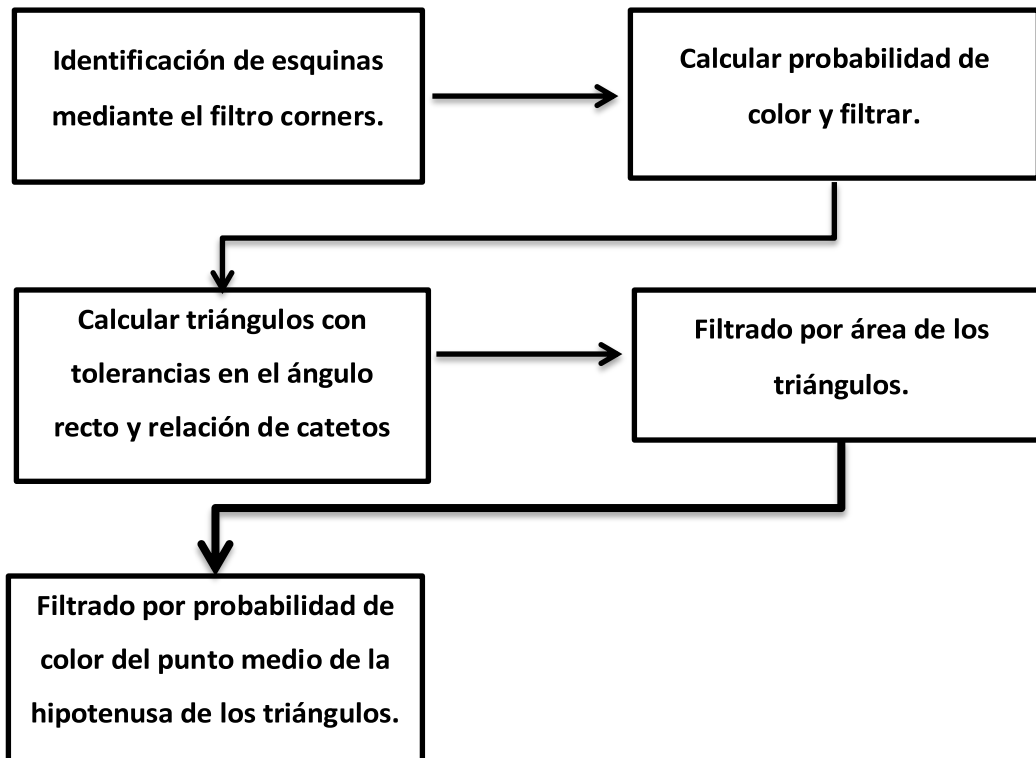
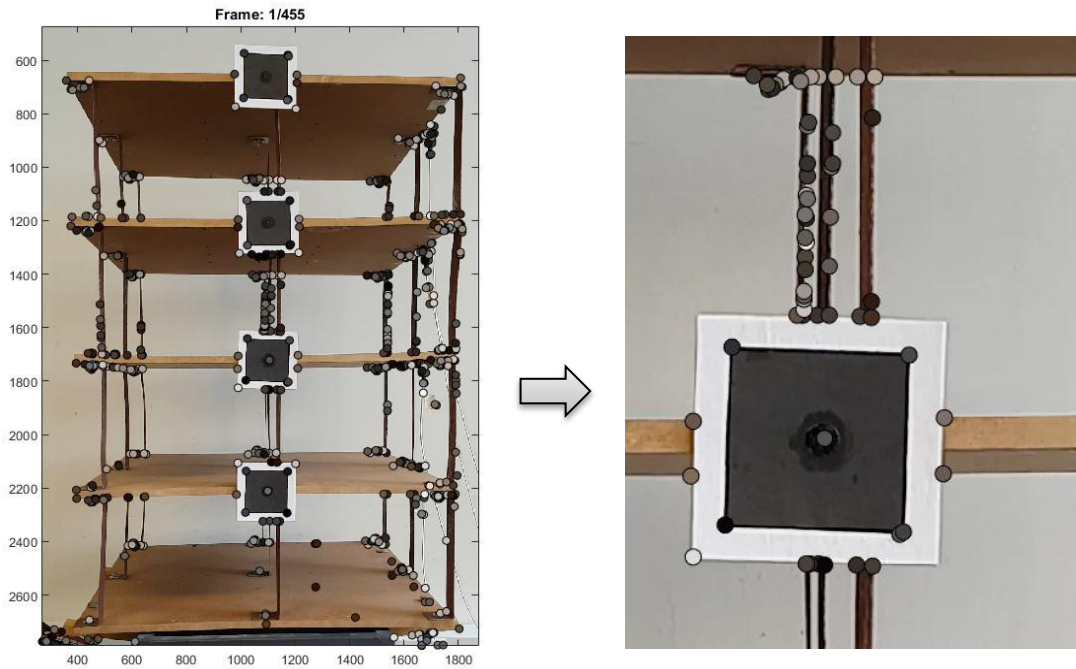


Gráfico 2

### 8.2 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Inicialmente, la técnica requiere del uso de la función *corner*, la cual es una función interna del toolbox para procesamiento de imágenes de Matlab. Esta función analiza la imagen RGB determinando las coordenadas de los puntos que definen esquinas en la imagen:

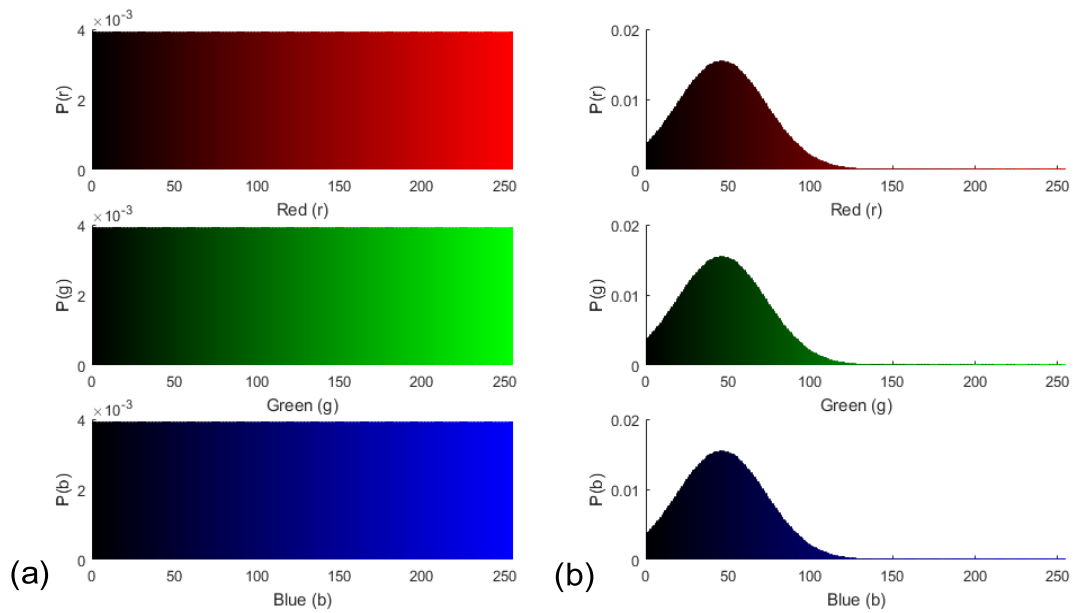




**Figura 12.** Detección de esquinas en la imagen RGB

En la Figura 12 se marcan 741 puntos que la función *corner* ha identificado como esquinas en la imagen RGB. A continuación, se define una distribución de probabilidad para el color negro (se busca encontrar los puntos de referencia para el movimiento de la estructura, definidos por los cuadros negros de la figura anterior).

Un análisis previo de la imagen define que el color negro que se desea encontrar está definido entre los rangos [2 94] para cada canal RGB, en una escala de 8 bits ( $2^8=256$  tonos). Así pues, se establece una función de distribución de probabilidad normal con promedio 46 desviación estándar de 27 para cada canal RGB como se muestra en la siguiente figura:



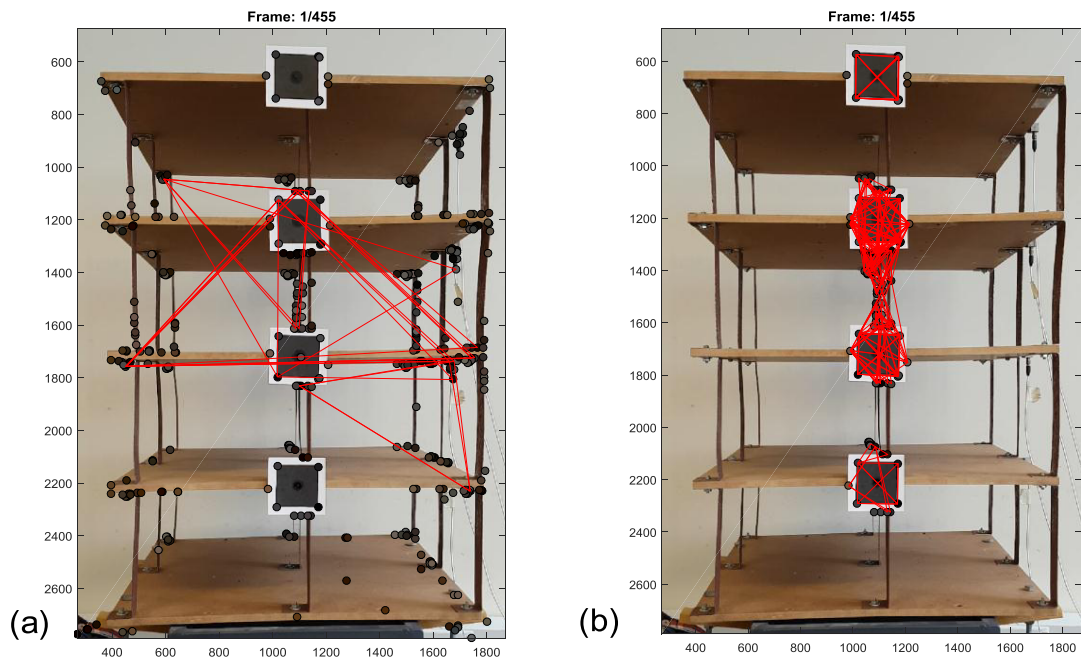
**Figura 13.** Tonos RGB con distribución de probabilidad (a) Uniforme (b) Normal

En la Figura 13 se muestra la distribución de probabilidad elegida (caso b) con la cual se filtra el primer set de puntos:



**Figura 14.** Reducción de puntos según probabilidad (330 puntos descartados)

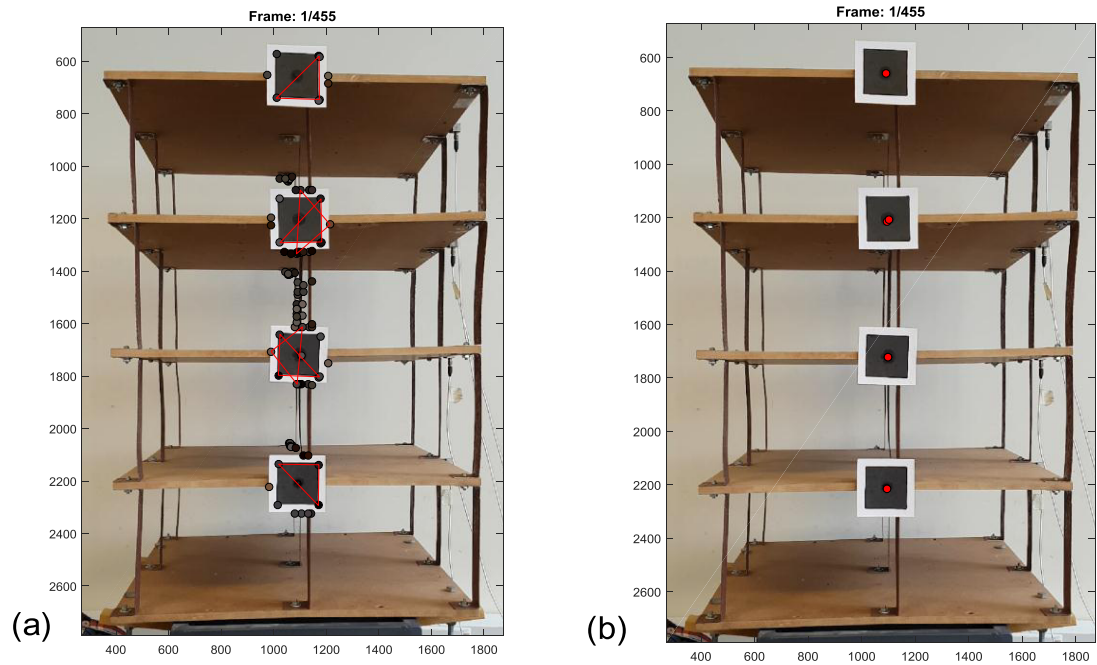
El paso 3 consiste en calcular triángulos a partir de los puntos que superan el filtro basado en probabilidad. Las marcas de referencia son cuadrados de igual longitud, por lo que se pueden buscar entre los puntos disponibles como triángulos. Se aplica nuevamente el criterio de probabilidad descartando los puntos cuya diagonal no supera la probabilidad del color buscado:



**Figura 15.** Triángulos entre puntos disponibles

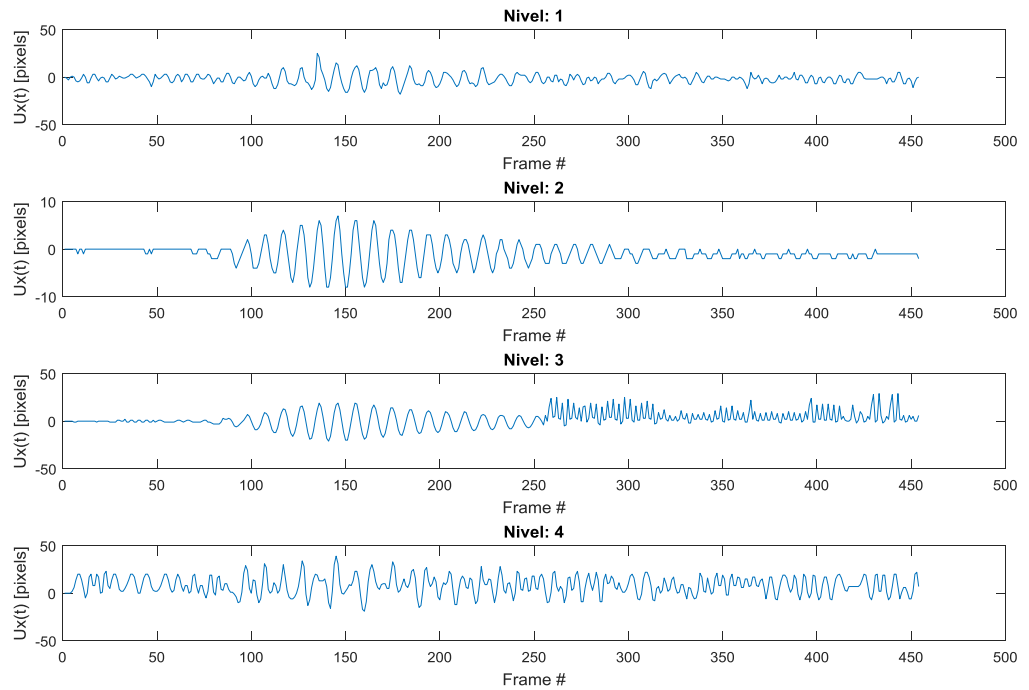
(a) 9 triángulos iniciales (b) triángulos disponibles luego de filtrado

Finalmente, los triángulos que pertenecen a las marcas de referencia deben poseer características similares (área, longitud de catetos), por lo que el uso de histogramas permite definir los triángulos finales y los puntos medios de sus hipotenusas:



**Figura 16.** Definición de centroide de marcas de referencia  
 (a) Triángulos finales (b) Puntos medios de hipotenusa de triángulos

La metodología se repite cuadro a cuadro para la longitud total del video capturado (455 cuadros, 15.6 segundos), con lo cual se obtiene una representación de la respuesta del sistema estructural monitoreado:

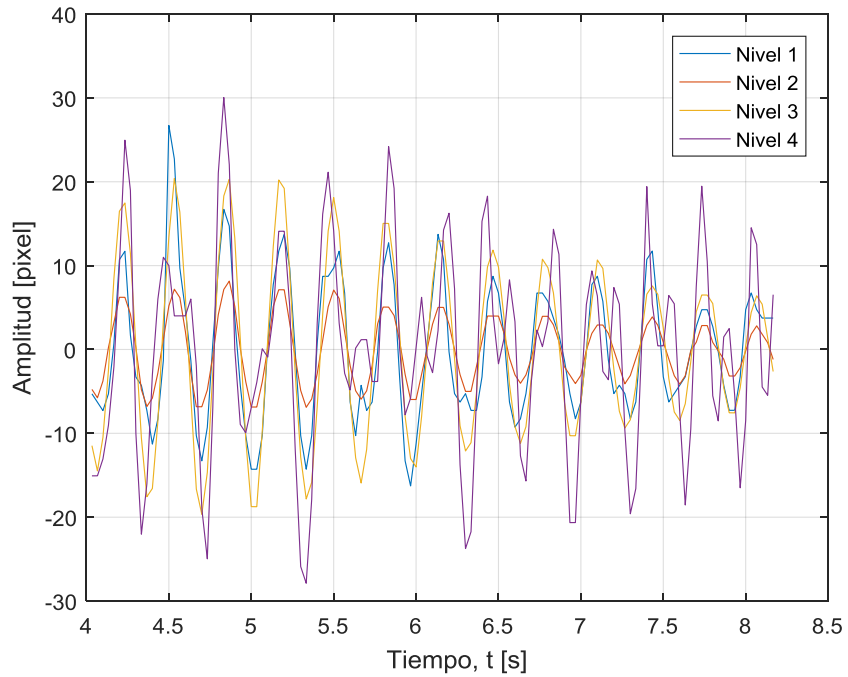


**Figura 17.** Respuesta  $u(t)$  obtenida

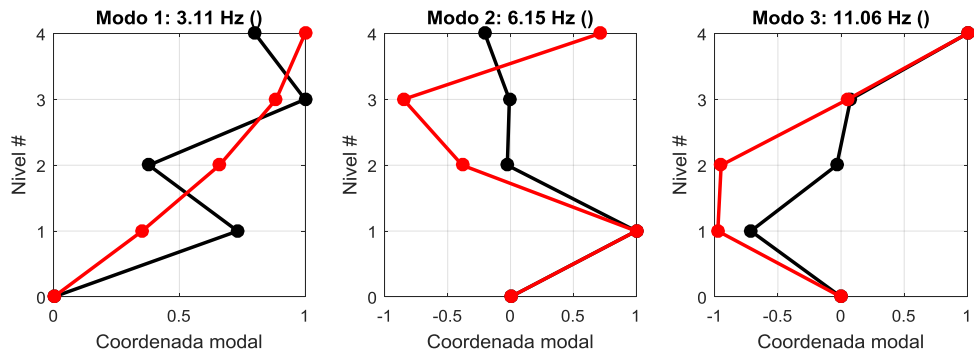
La Figura 17 muestra la respuesta  $u(t)$  para el total de fotogramas del video analizado. Se puede observar que, en términos generales, se hace un seguimiento aceptable de la posición del sistema a medida que éste vibra. Ante la ausencia de sensores de mayor precisión, el resultado obtenido puede considerarse aceptable y con potencial de mejorarse.

### 8.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

El registro de vibraciones obtenido (Figura 17) es procesado utilizando la metodología NExT-ERA, para calcular modos y frecuencias de vibración. El registro mostrado en la Figura 17 es recortado a una porción central donde visualmente el algoritmo de procesamiento de imágenes muestra mejor desempeño, y sobre estos datos se aplica la metodología de identificación de modos.



**Figura 18.** Segmento de señal  $u(t)$  utilizado



**Figura 19.** Modos identificados con NExT-Era (En rojo: modos numéricos)

La Figura 19 muestra los modos y las frecuencias de vibración obtenidas con la respuesta dinámica  $u(t)$  obtenida a partir del procesamiento de imágenes y comparada con los modos numéricos. Los valores de error en frecuencias y en modos son los siguientes:

Error en frecuencias:

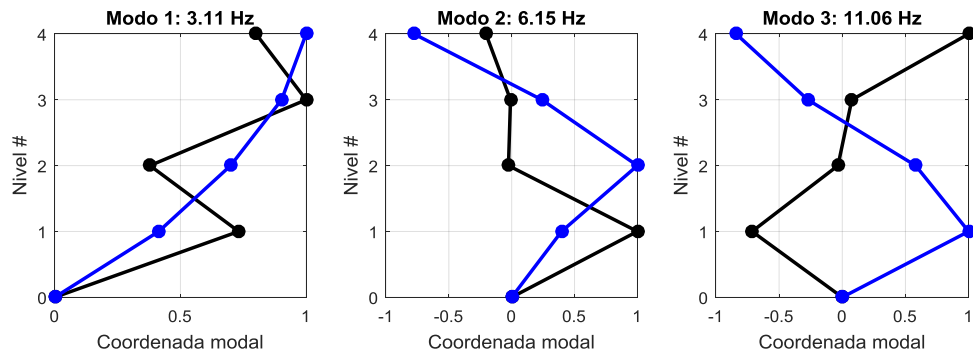
$$err = \begin{bmatrix} 11.42\% \\ -49.67\% \\ 37.85\% \end{bmatrix}$$

Error en modos de vibración (valores MAC (Allemang, 2003))

$$mac = [0.89 \quad 0.69 \quad 0.31]$$

Observando los valores MAC y los errores en frecuencias, puede decirse que la metodología aún tiene un alto porcentaje de error, el cual podría considerarse apenas aceptable para el primer modo de vibración (error de 11.41% y valor MAC de 0.885).

En cuanto a la comparación con la metodología tradicional, los resultados son los siguientes:



**Figura 20.** Modos identificados con NExT-Era (En azul: modos experimentales)



Nuevamente, puede apreciarse que la metodología aún tiene discrepancias respecto a lo esperado. Sin embargo, este trabajo aún puede mejorarse. Los errores entre las metodologías experimentales son:

Error en frecuencias:

$$err = \begin{bmatrix} 0.94\% \\ -33.44\% \\ -6.25\% \end{bmatrix}$$

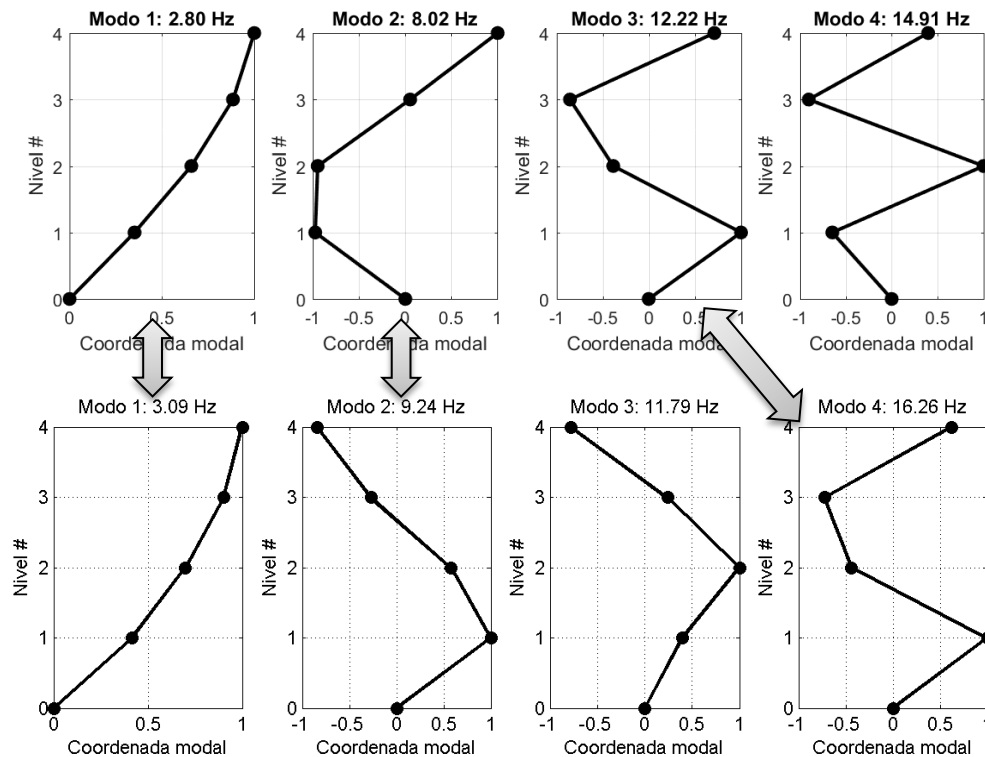
Error en modos de vibración (valores MAC (Allemang, 2003)):

$$mac = [0.90 \quad 0.62 \quad 0.42]$$

Nuevamente se observa que sólo el primer modo de vibración puede considerarse óptimamente identificado. Posee un error de 0.9% respecto al valor obtenido con el sistema de adquisición convencional y valor MAC de 0.898 para este modo, lo que indica una alta correlación entre ambos modos de vibración (entre mayor cercanía a 1 mayor correlación de los modos).

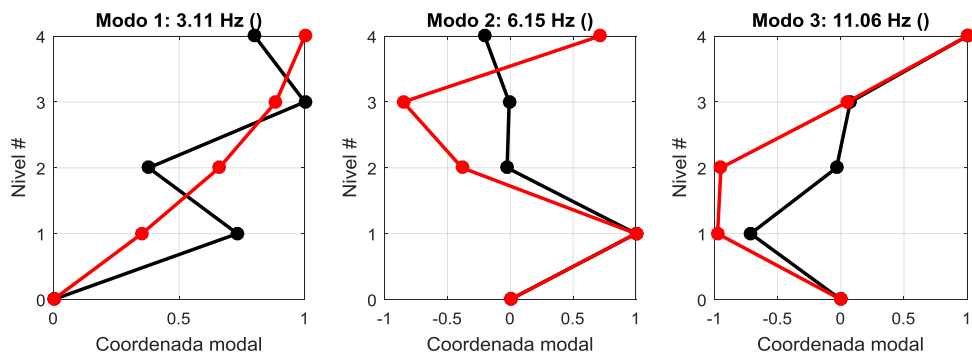
## 9. CONCLUSIONES

La Figura 21 muestra la identificación de los modos de vibración en el modelo numérico (fila superior) y los modos identificados con el sistema convencional (fila inferior). Esta identificación permite ver que uno de los modos numéricos no fue posible encontrarse experimentalmente. De la misma manera uno de los modos experimentales no está siendo representado por el modelo numérico. Este comportamiento indica que el modelo numérico utilizando cuatro grados de libertad es insuficiente para representar completamente la estructura real. Los errores obtenidos en frecuencias fueron de 9.41%, 13,20% y 24,86% y los valores mac correspondientes de 0.998, 0.938 y 0.992. Los errores en frecuencias y en modos de vibración pueden considerarse típicos indicando la necesidad de calibrar el modelo numérico



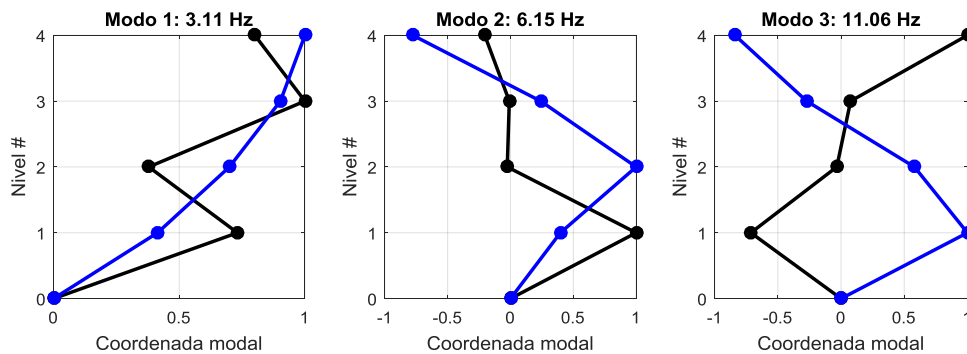
**Figura 21.** Comparación de modos de vibración numéricos y experimentales.

La Figura 22 compara los modos de vibración numéricos con los obtenidos a través del procesamiento de imágenes. Los errores en frecuencias obtenidos fueron de 11,42%, 49,67% y 37,85% respectivamente. Los valores mac correspondiente fueron de 0,885, 0,693 y 0,307. Puede afirmarse que la metodología genera un error típico similar al obtenido con el sistema convencional para el primer modo de vibración únicamente. La fuente del error se puede explicar por dos factores; a) la metodología no logra capturar perfectamente la posición de la estructura en todos los cuadros procesados y b) la cámara de video del Smartphone captura video a una tasa relativamente baja (30 cuadros por segundo), lo que aumenta el margen de error para capturar modos de vibración con frecuencias superiores al primer modo de vibración (frecuencias superiores requieren más cuadros por segundo para una caracterización aceptable). También se puede mencionar que 30 cuadros por segundo pueden resultar insuficientes cuando es necesario capturar el primer modo de vibración. Un valor mac de 0.885 puede resultar muy bajo si se desea aplicar la metodología en análisis de situaciones que involucren el modo de vibración.



**Figura 22.** Comparación de modos de vibración numérica y procesamiento de imágenes.

La Figura 23 muestra la comparación de los modos de vibración a partir del sistema convencional con los obtenidos a través del procesamiento de imágenes. En la comparación de las dos metodologías experimentales se confirma la conclusión formulada en el párrafo anterior. Solo el primer modo de vibración posee un error aceptable. Los correspondientes errores en frecuencia son de: 0.94%, -33.44% y -6.24%, mientras que los valores  $m_{ac}$  son de: 0.90, 0.61, 0.42. Se puede observar un error aceptable en la primera frecuencia de vibración, mientras que en los demás modos el error se puede considerar muy alto. Nuevamente, esto se explica por las diferencias en las frecuencias de adquisición. El sistema convencional tiene capacidad para adquirir 1650 muestras por segundo mientras que la técnica de procesamiento de imágenes capturo datos a una tasa de 30 puntos por segundo. Una reflexión sobre esta conclusión permite establecer que la metodología de procesamiento de imágenes requiere el uso de cámaras que capturen a una tasa más alta y también se requiere depurar los algoritmos para procesar imágenes. Sin embargo la estrategia de procesamiento de imágenes puede ser útil para realizar juicios iniciales sobre las propiedades dinámicas de un sistema estructural.



**Figura 23.** Comparación de modos de vibración a partir de sistema convencional y procesamiento de imágenes.

## 10. TRABAJO FUTURO

Los algoritmos de procesamiento de imágenes pueden minimizar el error obtenido en la identificación de los primeros modos de vibración de un sistema estructural si incorporan mejores estrategias para la identificación de la posición de los puntos de referencia. Se puede implementar por ejemplo una estrategia que defina probabilísticamente la posición cuadro a cuadro. También se puede implementar captura de video con una tasa de captura mayor a 30 cuadros por segundo. Una tercera opción de continuación del trabajo puede basarse en la implementación de puntos laser en lugar de marcas de referencia que aumenten el número de puntos capturados por segundo y la precisión de la misma. Actualmente también se vienen desarrollando estrategias de captura de video estereoscópico, es decir capturas simultánea con dos cámaras que tienen un ligero ángulo de inclinación entre sí, lo cual favorece la captura de profundidad. Estas estrategias podrían ofrecer continuidad a este trabajo.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Allemang, R. J. (2003). The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse. *SOUND AND VIBRATION*, 8.
- Anderson, D., Sweeney, D., & Williams, T. (2008). *Estadística para Administración y Economía* (10a ed.). Cengage Learning Editores, S.A.
- Ang, A. H.-S., & Tang, W. H. (2007). *Probability concepts in engineering: emphasis on applications in civil & environmental engineering* (Vol. 1). Wiley New York.
- Baqersad, J., Poozesh, P., Niezrecki, C., & Avitabile, P. (2017). Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 86, 17-34.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.02.011>
- Caicedo, J. M. (2011). PRACTICAL GUIDELINES FOR THE NATURAL EXCITATION TECHNIQUE (NExT) AND THE EIGENSYSTEM REALIZATION ALGORITHM (ERA) FOR MODAL IDENTIFICATION USING AMBIENT VIBRATION. *Experimental Techniques*, 35(4), 52-58.  
<https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2010.00643.x>
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering* (4th ed). Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- Digitalfotored. (2005a). Formación de la imagen digital. Recuperado 17 de agosto de 2018, de <http://www.digitalfotored.com/imagendigital/fomarcionimagen.htm>

- Digitalfotored. (2005b). Píxel. Recuperado 17 de agosto de 2018, de <http://www.digitalfotored.com/imagendigital/pixelesimagen.htm>
- Dong, C. Z., Ye, X. W., & Jin, T. (2017). Identification of structural dynamic characteristics based on machine vision technology. *Measurement*. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.043>
- Frédéric, B. (s. f.). New image processing tools for structural dynamic monitoring, 6.
- García, L. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Bogotá, Colombia.
- Jensen, J. R., & Lulla, K. (1987). Introductory digital image processing: a remote sensing perspective.
- Juang, J.-N., & Pappa, R. S. (1985). An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 8(5), 620-627. <https://doi.org/10.2514/3.20031>
- Juang, J.-N., & Pappa, R. S. (1988). A comparative overview of modal testing and system identification for control of structures.
- 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(5), 1369-1382. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.12.006>

- Kim, S.-W., & Kim, N.-S. (2011). Multi-point Displacement Response Measurement of Civil Infrastructures Using Digital Image Processing. *Procedia Engineering*, 14, 195-203. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.023>
- Pan, B., Asundi, A., Xie, H., & Gao, J. (2009). Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(7), 865-874. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.10.014>
- Park, S. W., Park, H. S., Kim, J. H., & Adeli, H. (2015). 3D displacement measurement model for health monitoring of structures using a motion capture system. *Measurement*, 59, 352-362. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.063>
- Potenza, F., Castelli, G., Gattulli, V., & Ottaviano, E. (2017). Integrated Process of Images and Acceleration Measurements for Damage Detection. *Procedia Engineering*, 199, 1894-1899. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.126>
- Poudel, U. P., Fu, G., & Ye, J. (2005). Structural damage detection using digital video imaging technique and wavelet transformation. *Journal of Sound and Vibration*, 286(4), 869-895. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.10.043>
- Rimkus, A., Podvieszko, A., & Gribniak, V. (2015). Processing Digital Images for Crack Localization in Reinforced Concrete Members. *Procedia Engineering*, 122, 239-243. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.031>



- Sabata, B., & Aggarwal, J. K. (1991). Estimation of motion from a pair of range images: A review. *CVGIP: Image Understanding*, 54(3), 309-324.  
[https://doi.org/10.1016/1049-9660\(91\)90032-K](https://doi.org/10.1016/1049-9660(91)90032-K)
- Shang, Z., & Shen, Z. (2018). Multi-point vibration measurement and mode magnification of civil structures using video-based motion processing. *Automation in Construction*, 93, 231-240.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.025>
- Valença, J., Puente, I., Júlio, E., González-Jorge, H., & Arias-Sánchez, P. (2017). Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey. *Construction and Building Materials*, 146, 668-678.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.096>
- Vetterli, M., Kovačević, J., & Goyal, V. K. (2014). *Foundations of signal processing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wu, L.-J., 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>