

# Estimación del Desplazamiento de Estructuras Civiles Basado en el Procesamiento de Imágenes

## Structural Displacement Estimation based on Image Processing

Cristian J. Hernandez-Maqueda<sup>1</sup>, José M. Machorro López<sup>2</sup>, Martín Valtierra-Rodriguez<sup>1</sup>, Aurelio Dominguez-Gonzalez<sup>1</sup>, Juan P. Amezquita-Sanchez<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> ENAP-RG, CA Sistemas Dinámicos, Facultad de Ingeniería, Departamento de Electromecánica. Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río, 76807, San Juan del Río, Querétaro, México.

<sup>2</sup> Investigador CONAHCYT - Instituto Mexicano del Transporte, km 12 Carretera Estatal No. 431 "El Colorado-Galindo" San Fandila, 76703, Pedro Escobedo, Querétaro, México.

\* Autor de correspondencia: jamezquita@uaq.mx

### Resumen

En la actualidad, los avances en el campo del procesamiento de señales, así como en las tecnologías de sistemas para su adquisición, han permitido que el monitoreo de la salud estructural sea un área de investigación relevante dentro del campo de la ingeniería. El uso de sistemas de medición por contacto ha brindado resultados favorables para la evaluación y diagnóstico de la integridad de estructuras civiles; sin embargo, la existencia de múltiples inconvenientes debido a las dimensiones, geometría y ubicación en las que se encuentran las estructuras genera una complejidad para llevar a cabo el monitoreo. El desarrollo y la presencia de nuevas tecnologías, como el uso de sistemas de visión, se han considerado como un método novedoso debido a una de sus principales ventajas: no requiere un contacto directo con las estructuras, lo que permite reducir las limitaciones en la implementación de sistemas de monitoreo. También se ha producido un cambio en el enfoque de interés, relacionado con la implementación de algoritmos para el procesamiento de imágenes. Por ello, en este artículo se presenta una metodología basada en el procesamiento de imágenes con el fin de estimar el desplazamiento dentro de un modelo estructural mediante un sistema de video basado en cámaras de teléfono celular, lo que proporciona un enfoque en el uso de algoritmos de procesamiento de imágenes para la identificación y seguimiento de puntos característicos dentro del modelo. Los resultados son validados mediante un sistema de contacto directo, demostrando la funcionalidad del sistema de video, así como la metodología propuesta.

**Palabras clave:** monitoreo estructural, sistema de video, procesamiento de imágenes, desplazamiento, vibraciones.

### 1. Introducción

El monitoreo estructural se destaca como un área de estudio presente en diversas disciplinas de la ingeniería, destacando principalmente en la aeronáutica, mecánica y la ingeniería civil (Chen et al., 2016). La evaluación integral de un sistema estructural, así como de sus elementos individuales, proporciona información importante sobre su comportamiento, lo que a su vez permite anticipar posibles debilidades o daños que podrían comprometer su integridad y seguridad (Hernandez-Maqueda et al., 2022). En particular, las principales causas de fallas estructurales suelen atribuirse a: (1) desastres naturales, (2) un diseño deficiente, (3) fatiga estructural, (4) el uso de materiales de baja calidad, así como (5) la falta de mantenimiento y reparación (Datta, 2016). Por estos motivos, en los últimos años ha surgido el área conocida como monitoreo de la salud estructural, la cual se enfoca en evaluar la condición de las infraestructuras civiles y consiste de tres subsistemas principales, tal como se muestra en la Figura 1. Estos subsistemas comprenden: (a) un subsistema de sensores, (b) un subsistema de transmisión de datos y (c) un subsistema de evaluación, el cual se basa en el procesamiento de la información monitoreada por los sensores (Yi et al., 2017). Por lo tanto, para poder obtener una evaluación correcta de la condición estructural, es de suma importancia los datos medidos a través del subsistema de sensores utilizados en la infraestructura civil, así como su procesamiento (Gul, 2019).

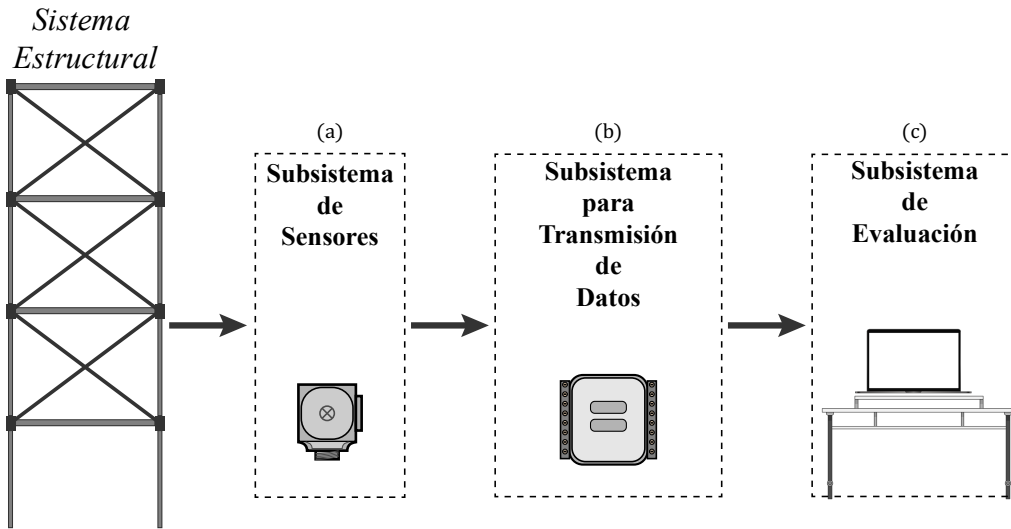


Figura 1. Esquema general de un sistema para Monitoreo de Salud Estructural (a) Sensores de medición (b) Tarjetas para adquisición de datos y (c) Computadora para procesamiento y evaluación.  
Fuente: Elaboración propia

En particular, las variables físicas presentes en el monitoreo de estructuras civiles se dividen en tres tipos: cinemáticas, mecánicas y ambientales. Las variables cinemáticas como desplazamiento, velocidad y aceleración se emplean comúnmente para evaluar la condición general/ global de las estructuras civiles. Por otro lado, las variables mecánicas se centran en la medición de las propiedades de los materiales, como la fatiga, deformación y las fuerzas aplicadas, y se emplean en la evaluación de integridad y rendimiento de los elementos críticos en estructuras. Por último, las variables ambientales, como temperatura y viento, se utilizan para compensar las desviaciones que puedan presentarse dentro de algunas propiedades de los materiales debido a condiciones variantes (Moreno-Gomez et al., 2018). De manera similar, las tecnologías, sistemas y dispositivos presentes en los subsistemas de medición incluyen una variedad de sensores, como los capacitivos, piezoeléctricos, galgas extensiométricas y electro celdas. Además, se utilizan dispositivos como: servomecanismos, giroscopios, anemómetros, detectores de temperatura por resistencia (RTD), sistemas de identificación por ondas de radiofrecuencia (RFID), sistemas micro electromecánicos (MEMS), vibrómetros laser de efecto Doppler (LDV), transformadores diferenciales variables lineales (LVDT), y sistemas de posicionamiento global (GPS). Todos estos dispositivos se basan en principios físicos eléctricos y mecánicos para la obtención de señales relacionadas con la dinámica estructural. Es importante mencionar que la presencia de fallos en los sensores de medición, pueden manifestarse como desviaciones en los resultados, dando lugar a falsas alarmas, así como detecciones erróneas en los sistemas de monitoreo de las estructuras civiles (Yi et al., 2017). Adicionalmente, el uso de este tipo de sensores (de contacto), así como su implementación en estructuras civiles reales se ve limitada por los requisitos de una instalación dentro de puntos previamente especificados, un mantenimiento engorroso, fácil acceso para su instalación, así como los altos costos relacionados con las redes de sensores y sistemas de adquisición de datos (Feng & Feng, 2018). Por estas razones, la investigación de nuevas metodologías para la evaluación de la condición de estructuras civiles basados en nuevas alternativas de sensores es un campo relativamente nuevo y de gran interés (Dunia et al., 1996; Friswell & Inman, 1999).

En los últimos años, se han presentado diversos trabajos por la comunidad investigadora con el fin de monitorear la condición de las estructuras civiles basados en sistemas de visión o imágenes (Azimbeik et al., 2023; Lu et al., 2021; Zhou et al., 2021). Esta alternativa se caracteriza por ser un método de medición no invasivo, ya que evita el contacto directo convencional entre las estructuras civiles y los sensores para el monitoreo de su respuesta dinámica; en particular, la estimación de sus desplazamientos a través del seguimiento del movimiento de objetivos u objetos a partir de imágenes de video (Kwan, 2016). La implementación de estos métodos ofrece notables ventajas, como la reducción de costos relacionados con la instrumentación de dispositivos dentro de las estructuras, la facilidad de configuración y funcionamiento de los sistemas de visión, así como la disminución en el número de mediciones por video para la extracción de los desplazamientos en múltiples puntos de la estructura (Feng & Feng, 2018). Sin embargo, el uso de dispositivos de visión, como cámaras fotográficas, cámaras de video, digitalizadores, sensores de rango y rayos X, requiere de una inversión monetaria significativa debido a su nivel tecnológico, siendo equipos altamente especializados los cuales involucran resoluciones de imágenes de hasta 8K y frecuencias de

adquisición de hasta 5000 cuadros por segundo (Chen et al., 2015). Adicional a esto, el trabajo de análisis en múltiples puntos dentro de una estructura ha sido escaso debido a la calibración del sistema de visión y la cuantificación del desplazamiento causado por los ángulos de inclinación (Ye et al., 2016).

De acuerdo a lo antes descrito, la contribución de este trabajo consiste en la investigación e implementación de un sistema de visión basado en cámaras de teléfonos móviles de gama media/baja para la estimación del desplazamiento dentro de múltiples puntos de una estructura civil. Con el fin de realizar esta tarea, se emplea diversas técnicas de procesamiento de imágenes, tales como técnicas de segmentación (Algoritmo Harris-Stephens) y seguimiento (Algoritmo Kanade-Lucas-Tomasi) dentro del video con el fin de estimar el desplazamiento de la estructura bajo análisis. La efectividad de esta propuesta se evalúa utilizando la respuesta dinámica de un modelo de edificio de tres pisos construido en acero, el cual es sometido a vibraciones forzadas impuestas por un martillo de impacto. Para concluir, los resultados obtenidos son comparados con los extraídos a través de un sistema de monitoreo basado por acelerómetros de alto costo.

## 2. Metodología Propuesta

Con el fin de obtener la respuesta dinámica vibratoria de una estructura civil, es necesario someterla a una excitación dinámica forzada, la cual puede ser generada principalmente por fenómenos naturales (como el viento o los terremotos) o artificiales (como martillos o agitadores) (Cacho-Pérez et al., 2017). En este contexto, la respuesta dinámica vibratoria de las estructuras civiles se caracteriza por tener amplitudes bajas y estar embebida en una gran cantidad de ruido (Perez-Ramirez et al., 2016). Por lo tanto, este trabajo de investigación se enfoca en el desarrollo de una metodología basada en el procesamiento de imágenes para estimar y cuantificar el desplazamiento de un modelo estructural cuando se les somete a perturbaciones de entrada artificiales.

La Figura 2 presenta una ilustración gráfica de la metodología propuesta para la estimación del desplazamiento del modelo estructural, la cual consiste de cuatro pasos fundamentales descritos a continuación:

**Paso 1:** Primeramente, con el fin de obtener la respuesta dinámica (desplazamiento) del modelo estructural de tres pisos analizado/evaluado, este es sometido a una perturbación utilizando un martillo de impacto de la marca KISTLER modelo 9728A20000. Este martillo, mediante un movimiento pendular, provoca el movimiento forzado de la estructura.

**Paso 2:** Una vez impuesta la excitación a la estructura, su respuesta dinámica es monitoreada y almacenada mediante un sistema de video basado en una cámara de celular marca iPhone modelo 11. De manera particular, la cámara empleada cuenta con una resolución de 1080×1920 (1080p) y una grabación de video a 60 cuadros por segundo (60 fps). Este sistema de monitoreo es montado en un trípode con el fin de poder corregir la altura y ángulo de grabación. Las imágenes/video capturado por la cámara es enviado a una computadora por medio de un protocolo USB para su posterior procesamiento.

**Paso 3:** Las imágenes/videos almacenados son tratadas mediante algoritmos de procesamiento de imágenes. En primer lugar, se lleva a cabo la segmentación de las áreas o regiones de interés (ROI). Luego, se procede a identificar las esquinas utilizando el algoritmo de Harris-Stephens. Finalmente, se emplea el algoritmo Kanade-Lucas-Tomasi de seguimiento para cada una de las imágenes que componen el video, con el propósito de determinar y almacenar las posiciones de los puntos de interés.

**Paso 4:** Finalmente, se realiza el escalamiento dentro del espacio real para cada uno de los vectores de posición y se grafican los resultados correspondientes con cada prueba realizada.



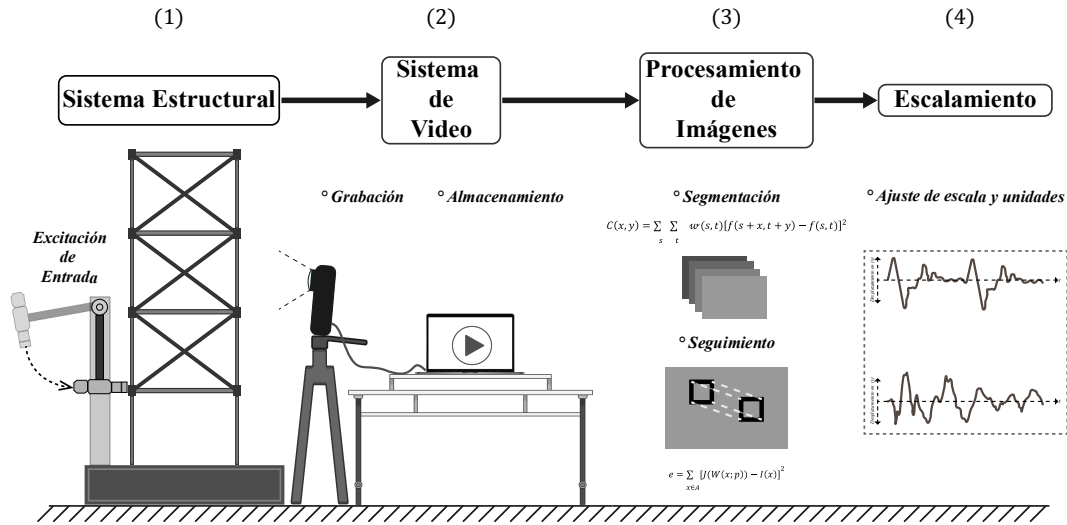


Figura 2. Diagrama de bloques de la metodología propuesta.  
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una breve descripción de la fundamentación matemática de los diversos algoritmos de procesamiento de imágenes empleados en este trabajo.

## 2.1 Algoritmo de Harris-Stephens (HS)

De manera instintiva, se concibe a una esquina como una abrupta modificación de dirección dentro de una curvatura. Las esquinas poseen una eficacia notoria debido a su singularidad, así como una relativa invariabilidad desde el punto de vista. Gracias a tales atributos, las esquinas se emplean de manera habitual para vincular rasgos visuales en aplicaciones como el seguimiento para la navegación autónoma, los algoritmos de visión artificial estereoscópica y las búsquedas en bancos de imágenes (Gonzalez & Woods, 2018).

El planteamiento del algoritmo para detección de esquinas, se basa en pasar una ventana sobre una imagen, la cual es diseñada para calcular los cambios de intensidad. Para esto se consideran 3 casos principales, siendo (1) donde la zona de cambios de intensidad resulta nulos o pequeños en todas las direcciones, lo que ocurre cuando la ventana está situada en una región constante. (2) una zona de cambios en una dirección, lo que sucede cuando la ventana abarca un límite entre dos regiones. Y (3) el cambio en todas las direcciones, lo que se considera cuando la ventana contiene una esquina. Por lo que el detector de esquinas HS es una fórmula matemática que busca diferenciar entre estas tres condiciones.

Inicialmente, es indicada una imagen principal como  $f$ , así como  $f(s, t)$  es considerado como un fragmento de la imagen definido por los valores  $(s, t)$ . Y teniendo un segmento del mismo tamaño, pero desplazado por  $(x, y)$ , siendo  $f(s + x, t + y)$ . Se realiza la suma ponderada de las diferencias al cuadrado entre los segmentos dada por la Ecuación (1) para introducir las coordenadas de la locación  $C$  en  $(x, y)$ .

$$C(x, y) = \sum_s \sum_t w(s, t) [f(s + x, t + y) - f(s, t)]^2 \quad (1)$$

donde  $w(s, t)$  es la función de ponderación. El segmento desplazado es aproximado mediante expansiones de Taylor, como se describe por la Ecuación (2) de la siguiente manera:

$$f(s + x, t + y) \approx f(s, t) + xf_x(s, t) + yf_y(s, t) \quad (2)$$

siendo  $f_x(s, t) = \partial f / \partial x$  y  $f_y(s, t) = \partial f / \partial y$ , ambas evaluadas en los valores  $(s, t)$ . En este sentido, la Ecuación (1) puede ser reescrita de la siguiente manera.

$$C(x, y) = \sum_s \sum_t w(s, t) [x f_x(s, t) + y f_y(s, t)]^2 \quad (3)$$

La Ecuación (3) se puede reescribir de forma matricial de la siguiente manera:

$$C(x, y) = [x \quad y] \mathbf{M} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde,

$$\mathbf{M} = \sum_s \sum_t w(s, t) \mathbf{A} \quad (5)$$

y,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_x^2 & f_x f_y \\ f_x f_y & f_y^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

La matriz  $\mathbf{M}$  también conocida como “*Matriz de Harris*” se evalúa para  $(s, t)$ . Si  $w(s, t)$  es isotrópico (sin variaciones en la dirección), entonces  $\mathbf{M}$  es simétrica. Y de forma general, la función de ponderación  $w(s, t)$  utilizada en el algoritmo HS tiene dos formas:

1. Es 1 dentro del segmento y 0 en el exterior (siendo un filtro pasa bajas como núcleo), y se utiliza cuando la velocidad de cálculo es primordial y el nivel de ruido es bajo.
2. Una función exponencial, mostrado en la Ecuación (7), es utilizada cuando el suavizado de los datos es importante.

$$w(s, t) = e^{-(s^2+t^2)/2\sigma^2} \quad (7)$$

Para diferenciar entre bordes y esquinas son utilizados los vectores propios (eigenvectores) de las matrices simétricas, lo cuales apuntan en la dirección de máxima dispersión de datos, y los valores propios (eigenvalores) son proporcionales a la cantidad de dispersión de los datos en la dirección de los eigenvectores. Por lo que se concluye lo siguiente:

1. Dos eigenvalores pequeños indican una intensidad cuasi constante.
2. Un eigenvalor pequeño y uno grande implican la presencia de un límite vertical u horizontal, por lo que se considera como un borde.
3. Dos eigenvalores grandes representarían un límite vertical y uno horizontal, por lo que implicaría la presencia de una esquina.

Debido a esto, los eigenvalores de la matriz formados a partir del segmento de la imagen pueden ser utilizados para diferenciar entre escenarios. Sin embargo, en lugar de utilizar los eigenvalores (alta carga computacional), el algoritmo HS se basa en la traza de la matriz cuadrada, ya que es igual a la suma de los eigenvalores, y su determinante coincide con el producto de los mismos. Por lo que se tiene:

$$R = \lambda_x \lambda_y - k(\lambda_x + \lambda_y)^2 = \det(\mathbf{M}) - k \text{traza}^2(\mathbf{M}) \quad (8)$$

El valor  $R$  resulta en un valor grande, lo que indica la presencia de una esquina. La constante  $k$  se determina de forma empírica, y su rango de valores dependerá de la aplicación al usarlo como un “factor de sensibilidad”.



## 2.2 Algoritmo de Kanade-Lucas-Tomasi (KLT)

El seguimiento de características se caracteriza por desempeñar un papel crucial dentro de la detección y localización de rasgos en una secuencia de imágenes. El algoritmo KLT es un procedimiento de seguimiento robusto, y es bastante conocido por su eficiencia computacional (Tanathong & Lee, 2014).

El objetivo del seguimiento mediante KLT es minimizar la suma de error cuadrático  $e$  entre una primera imagen  $I(x)$  y la imagen posterior  $J(x)$  (Lucas & Kanade, 1981). Este error mencionado es la diferencia en las intensidades entre estas dos imágenes, calculado dentro de una pequeña región  $A$  centrada en la posición  $x = (x, y)^T$ , como es presentado en la Ecuación (9).

$$e = \sum_{x \in A} [J(W(x; p)) - I(x)]^2 \quad (9)$$

donde,  $W(x; p)$  es una función de deformación correspondiente al modelo de seguimiento, y  $p$  es un conjunto de parámetros de deformación. Por lo que la función  $W(x; p)$  se encarga de mapear cada vector  $x$  de la imagen  $I$  a una nueva posición dentro de la imagen  $J$ . Dando valores iniciales a  $p$  y solucionando los mínimos cuadrados modificando mediante iteraciones con el método de Newton-Raphson, mostrado en la Ecuación (10).

$$W(x; p) = \begin{pmatrix} x + d_x \\ y + d_y \end{pmatrix} \quad (10)$$

Para un modelo de traslación, el problema consiste en encontrar el vector de desplazamiento  $p = (d_x, d_y)^T$  entre un par de imágenes. Por lo que el método es aplicado de forma secuencial a una cantidad finita de imágenes que componen a un video.

## 3. Puesta experimental

La Figura 3 muestra dos perspectivas distintas de la puesta experimental realizada con el fin de validar la metodología propuesta. Dentro de esta se ubica: el modelo estructural, el cual representa un edificio de tres pisos de acero expuesto a excitación dinámica producidas por un martillo de impacto. Por otro lado, el sistema de video está compuesto por el teléfono celular iPhone modelo 11 el cual es soportado por un trípode. Finalmente, se tiene una unidad de almacenamiento y procesamiento con el fin de recibir el video capturado por el sistema de video.



Figura 3. Puesta experimental dentro del laboratorio desde a) vista frontal y b) vista lateral.  
Fuente: Elaboración propia

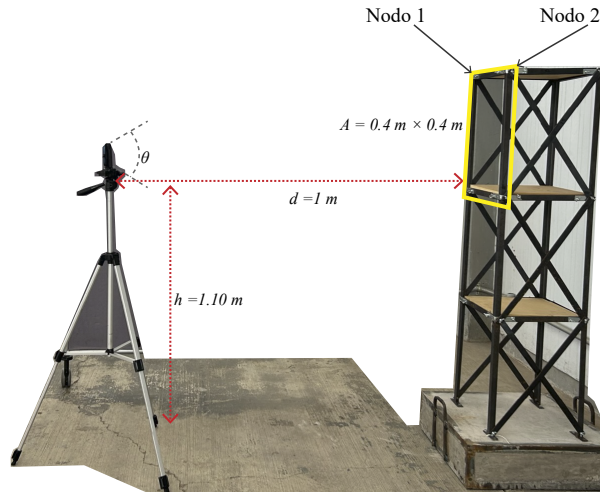


Figura 4. Variables representativas para el encuadre de la imagen.  
Fuente: Elaboración propia

De manera particular, para la colocación del sistema de video, como se observa en la Figura 4, es capturada un área principal  $A$ , la cual encuadra puntos fundamentales dentro del modelo estructural para su análisis. En este sentido, es requerido considerar las variables:  $d$ , la cual representa la distancia entre el modelo y el sistema de video (distancia focal);  $h$  siendo la altura entre la superficie de referencia (suelo firme); y  $\theta$  que considera el ángulo de apertura y centro óptico. Tomando como observación que el área de encuadre debe ser paralela a la inclinación de la cara respecto a horizontal de la superficie. Con el propósito de evaluar la repetibilidad de la estimación del desplazamiento de la estructura, se realizaron 10 capturas de video en promedio de 5 segundos, cada una con una frecuencia de muestreo a 60 fps. Adicionalmente, son analizados dos regiones dentro de la estructura, los cuales corresponden con las esquinas superiores dentro del modelo, esto con la finalidad de obtener el máximo desplazamiento.

## 4. Resultados

Siguiendo la metodología propuesta, la estructura se somete a excitaciones forzadas con el objetivo de estimar su desplazamiento. Una vez que la estructura ha sido excitada, su respuesta dinámica se monitorea y adquiere mediante la cámara propuesta. En primer lugar, se procede a identificar la esquina superior de la estructura mediante los algoritmos descritos. La Figura 5 muestra un ejemplo de la identificación de dicha esquina. Una vez que se han identificado las esquinas de la estructura, se procede a calcular el desplazamiento de ese punto identificado con respecto a la siguiente imagen dentro del video, el cual corresponde al desplazamiento de la estructura. Con fines ilustrativos, las Figuras 6, 7 y 8 muestran gráficamente los resultados obtenidos en términos de desplazamiento mediante la aplicación de los algoritmos de identificación y seguimiento para las pruebas 1, 5 y 10, siendo la primera, en medio y última de las 10 pruebas realizadas. En estas figuras, se pueden observar dos curvas de desplazamiento identificadas como "Nodo 1" y "Nodo 2", las cuales corresponden a los desplazamientos generados en las esquinas superiores del modelo estructural, respectivamente. Es importante mencionar que se aprecian similitudes en los desplazamientos entre ambas curvas, lo cual se debe a la proximidad existente entre ambas esquinas dentro de la estructura.

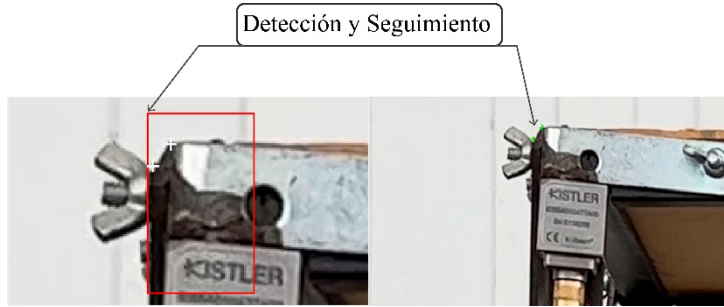


Figura 5. Detección de esquinas de la estructura.  
Fuente: Elaboración propia

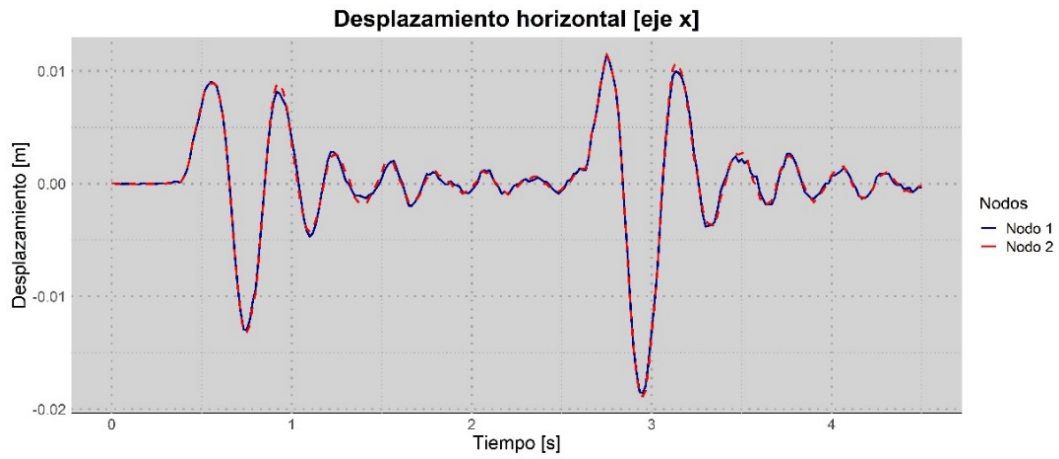


Figura 6. Curvas de desplazamiento de la estructura en la prueba 1 mediante el sistema de video.  
Fuente: Elaboración propia

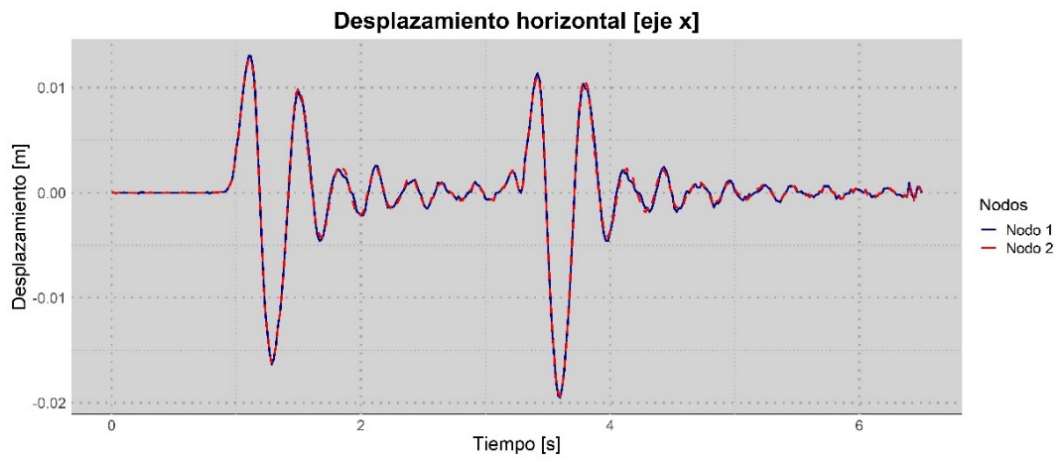


Figura 7. Curvas de desplazamiento de la estructura en la prueba 5 mediante el sistema de video.  
Fuente: Elaboración propia





Figura 8. Curvas de desplazamiento de la estructura en la prueba 10 mediante el sistema de video.  
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos, se instaló un acelerómetro de marca Kistler, modelo 8395A010, junto con una tarjeta de adquisición de datos de marca National Instruments, modelo USB6002 (ver Figura 9). Esto se realizó con el fin de monitorear y registrar la respuesta dinámica de la estructura en términos de aceleración. Es esencial destacar que, para obtener el desplazamiento de la estructura a través del sensor de aceleración, la señal obtenida se integra dos veces utilizando el método trapezoidal.

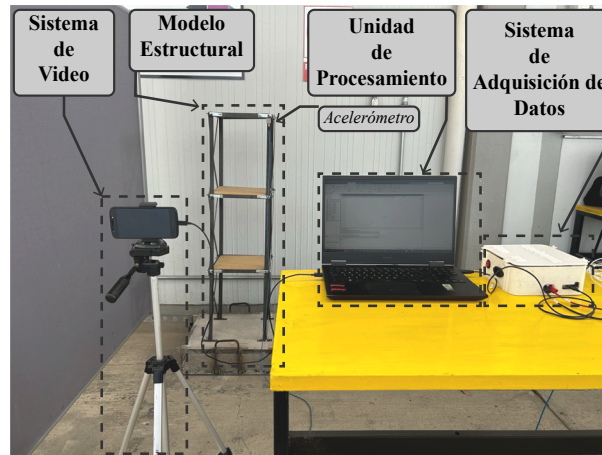


Figura 9. Propuesta para validar la metodología.  
Fuente: Elaboración propia

La Figura 10 ilustra gráficamente el desplazamiento obtenido mediante el sistema de visión y el obtenido a través del sensor de aceleración. Al observar esta imagen, es evidente una variación en la amplitud de las señales; sin embargo, se nota una notoria similitud en el tipo de respuesta y en la parte transitoria. La principal diferencia podría atribuirse a una ligera inclinación del sensor, lo que podría limitar la correcta identificación del desplazamiento de la estructura.

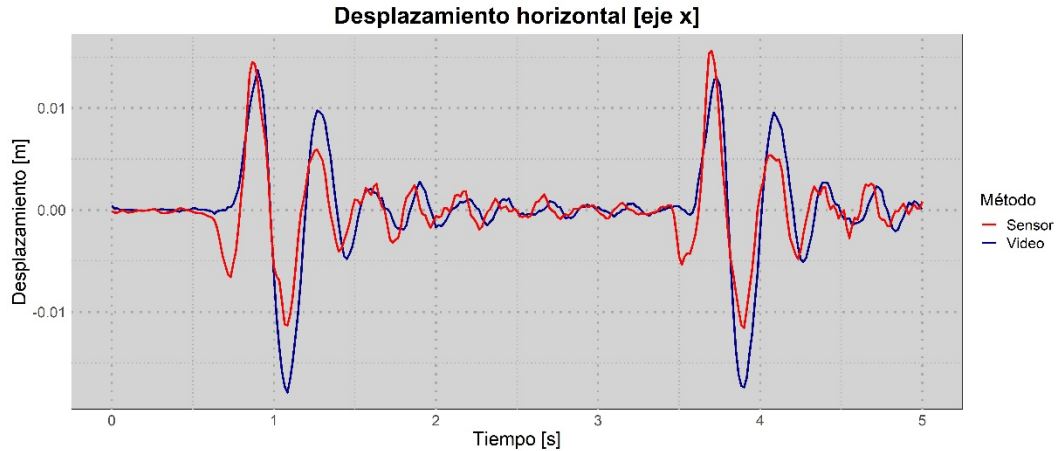


Figura 10. Comparación de curvas de desplazamiento mediante los dos métodos.  
Fuente: Elaboración propia

Con el fin de obtener un valor que indique la similitud entre las curvas de desplazamiento se utilizó el coeficiente de Pearson, también conocido como coeficiente de correlación, descrito en la Ecuación 11, donde  $\mu_A$  y  $\sigma_A$  son la media y la desviación estándar de los datos de video, respectivamente, y  $\mu_B$  y  $\sigma_B$  son la media y la desviación estándar de los datos del sensor.  $A_i$  y  $B_i$  son los valores de datos del video y sensor y  $N$  representa el número de datos.

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left( \frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (11)$$

La Tabla 1 muestra el promedio de los resultados obtenidos mediante la correlación de Pearson entre las señales capturadas por el sistema de video y el de aceleración (10 pruebas). De acuerdo con estos resultados, el desplazamiento registrado por el sensor de video es bastante similar al obtenido por el acelerómetro, ya que ambos presentan una similitud superior al 80% en ambos nodos.

Tabla 1. Índice de correlación entre las curvas obtenidas por video y sensor.

Número de Pruebas	Nodo 1	Nodo 2
10	0.8548	0.8001

Fuente: Elaboración propia.

## 5. Conclusiones

El uso de sistemas de medición por contacto ha proporcionado resultados favorables para la evaluación y diagnóstico de la integridad de estructuras civiles. Sin embargo, la existencia de múltiples inconvenientes debido a las dimensiones, geometría y ubicación de estas estructuras genera una complejidad en la realización del monitoreo. El desarrollo y la adopción de nuevas tecnologías, como el uso de sistemas de visión, se consideran un método novedoso debido a que no requieren contacto directo con las estructuras, lo que reduce las limitaciones en la implementación de sistemas de monitoreo. En este contexto, los resultados obtenidos en las pruebas realizadas y adquiridas por el sistema de video, junto con la implementación de los algoritmos de identificación (HS) y seguimiento (KLT), demuestran ser eficientes para cuantificar el desplazamiento de la estructura bajo análisis, donde el interés principal se centra en el movimiento, desplazamiento, a lo largo del eje horizontal, justificado por el hecho de que en este eje se produce el máximo desplazamiento. La reconstrucción de las curvas resultó adecuada y con un nivel bajo de ruido, debido a que

se calculó un promedio entre las esquinas encontradas en las imágenes segmentadas, resultado en una mejor interpolación entre los valores.

Las pruebas realizadas para comparar el sistema de visión con el sistema de contacto también demuestran resultados prometedores, ya que se observa una similitud significativa, mayor al 80%, entre las curvas de desplazamiento, lo cual es corroborado por el índice de correlación de Pearson. No obstante, la presencia de una variación en la amplitud de las señales sugiere la necesidad de realizar ajustes en el procesamiento de las señales para ajustar los valores.

En cuanto a trabajo futuro, el análisis a través de un sistema de video plantea áreas de oportunidad relacionadas con las condiciones ambientales de iluminación y el fondo en el laboratorio, así como un examen más detenido de las regiones de interés en la estructura

## Agradecimientos

Se reconoce y agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por financiar parcialmente esta investigación a través de la beca 838702 otorgada a Cristian J. Hernandez-Maqueda, y las becas 296574, 253652 y 161138 otorgadas a Martín Valtierra-Rodríguez, Juan P. Amezcua-Sánchez y José M. Machorro-López, respectivamente, a través del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII-CONAHCYT). Adicionalmente, se reconoce y agradece el apoyo otorgado por parte del CONAHCYT a través del Proyecto No. 34/2018 del Programa "Investigadoras e Investigadores por México" del CONAHCYT (Cátedras CONAHCYT).

## Referencias

- Azimbeik, K., Mahdavi, S. H., & Rofooei, F. R. (2023). *Improved Image-Based , Full-Field Structural Displacement Measurement using Template Matching and Camera Calibration Methods. Measurement*, 112650. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112650>
- Cacho-Pérez, M., Frechilla, N., & Lorenzana, A. (2017). *Estimación de parámetros modales de estructuras civiles a partir de la función de respuesta en frecuencia. Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 33(3-4), 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2016.02.001>
- 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>
- Datta, T. K. (2016). *Seismic Analysis of Structures. In Solid Mechanics and its Applications (Vol. 222)*. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7297-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7297-6_5)
- Dunia, R., Qin, S. J., Edgar, T. F., & McAvoy, T. J. (1996). *Identification of Faulty Sensors Using Principal Component Analysis. AIChE Journal*, 42(10), 2797-2812. <https://doi.org/10.1002/aic.690421011>
- 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(October 2017), 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.018>
- Friswell, M. I., & Inman, D. J. (1999). *Sensor Validation for Smart Structures. Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10(1), 122-136. <https://doi.org/10.1106/GVD2-EGPN-C5B1-DPNX>
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing (4th ed.)*. Pearson. <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/01c56e081202b62bd7d3b4f8545775fb.pdf>
- Gul, W. (2019). *State of the Art Health Monitoring Systems of Bridges. SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3443051>
- Hernandez-Maqueda, C. J., Amezcua-Sanchez, J. P., Valtierra-Rodríguez, M., Perez-Ramirez, C. A., Dominguez-Gonzalez, A., Toledano-Ayala, M., & Morales-Hernandez, L. A. (2022). *Incipient Damage Detection in a Truss-Type Bridge using vibration responses and MUSIC Technique. 2022 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2022*. <https://doi.org/10.1109/ROPEC55836.2022.10018737>



- Kwan Oh, B. (2016). *Dynamic displacements-based model updating with motion capture system*. *Structural Control and Health Monitoring*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/stc>
- Lu, Z. R., Lin, G., & Wang, L. (2021). *Output-only modal parameter identification of structures by vision modal analysis*. *Journal of Sound and Vibration*, 497, 115949. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.115949>
- Lucas, B. D., & Kanade, T. (1981). *An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision*. *Proc. Int. Joint Conf. Artif. Intell.*, 674–679. <https://doi.org/https://hal.science/hal-03697340>
- Moreno-Gomez, A., Perez-Ramirez, C. A., Dominguez-Gonzalez, A., Valtierra-Rodríguez, M., Chavez-Alegria, O., & Amezcuita-Sanchez, J. P. (2018). *Sensors Used in Structural Health Monitoring*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25(4), 901–918. <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9217-4>
- Perez-Ramirez, C. A., Amezcuita-Sanchez, J. P., Adeli, H., Valtierra-Rodríguez, M., Romero-Troncoso, R. J., Dominguez-Gonzalez, A., & Osornio-Rios, R. A. (2016). *Time-frequency techniques for modal parameters identification of civil structures from acquired dynamic signals*. *Journal of Vibroengineering*, 18(5), 3164–3185. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17220>
- Tanathong, S., & Lee, I. (2014). *Translation-based KLT tracker under severe camera rotation using GPS/INS data*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(1), 64–68. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2245858>
- Ye, X. W., Yi, T. H., Dong, C. Z., & Liu, T. (2016). *Vision-based structural displacement measurement: System performance evaluation and influence factor analysis*. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 88, 372–384. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.024>
- Yi, T. H., Huang, H. Bin, & Li, H. N. (2017). *Development of sensor validation methodologies for structural health monitoring: A comprehensive review*. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 109, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.064>
- Zhou, Z., Shao, S., Deng, G., Gao, Y., Wang, S., & Chu, X. (2021). *Vision-based modal parameter identification for bridges using a novel holographic visual sensor*. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 179(May), 109551. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109551>

