



**COMUNICACIONES**

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



# Determinación de tensiones en tirantes de puentes a través video-imágenes

---

Germán Michel Guzmán Acevedo  
G. Esteban Vázquez Becerra  
Juan Antonio Quintana Rodríguez  
Jorge García Armenta  
Héctor Miguel Gasca Zamora  
Francisco Javier Carrión Viramontes  
Mario Alberto Montes Zea  
Luis Álvaro Martínez Trujano  
Jorge Alberto Hernández Figueroa  
José Manuel Machorro López  
Adriana Guadalupe Porres López  
Oscar Flores Centeno  
Miguel Anaya Díaz  
Mauricio Eliseo Cruz Acevedo  
José Ricardo Hernández Jiménez

Publicación Técnica No. 719  
**Querétaro, México**  
**2022**

ISSN 0188-7297



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por M. en C. Germán Michel Guzmán Acevedo, Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora, Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, Tec. Mario Alberto Montes Zea, M. en C. Luis Álvaro Martínez Trujano, Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, Dr. José Manuel Machorro López, M. en C. Adriana Guadalupe Porres López, M. en C. Oscar Flores Centeno, M. en C. Miguel Anaya Díaz, Ing. Mauricio Eliseo Cruz Acevedo, M. en C. José Ricardo Hernández Jiménez.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna El 03/22 "Determinación de tensiones en tirantes de puentes a través video-imágenes".

Se agradece el apoyo de Caminos y Puentes Federales (CAPUFE) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para hacer posible esta investigación, así como la colaboración de Dr. Francisco Javier Carrión Miramontes, Coordinador del Ingeniería Vehicular e integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte; Dr. G. Esteban Vázquez Becerra, investigador de la Universidad Autónoma de Sinaloa; Dr. Jorge García Armenta, investigador de la Universidad Heriot-Watt (campus Reino Unido).



# Tabla de Contenido

---

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Marco teórico.....	5
1.1 Imagen digital.....	5
1.2 Rango de intensidad.....	5
1.3 Resolución.....	6
1.4 Resolución estándar.....	7
1.5 FPS.....	7
1.6 Relación entre tamaño de píxel y distancia cámara-objeto.....	8
2. Metodología.....	9
2.1 Estimación de la tensión.....	9
2.2 Calibración de la cámara.....	10
2.3 Algoritmo.....	10
2.3.1 Recolección de vídeo.....	11
2.3.2 Transformación de RGB a escala de grises.....	11
2.3.3 Selección de la zona de interés.....	11
2.3.4 Detección de cambios.....	12
2.3.5 Aplicación de la FFT.....	12
2.4 Pruebas de laboratorio.....	13
2.5 Pruebas en campo.....	14

3. Resultados.....	17
3.1 Pruebas de laboratorio.....	17
3.2 Pruebas en puente Río Papaloapan.....	17
Conclusiones.....	21
Bibliografía .....	23

## Sinopsis

---

En el presente trabajo se desarrolló un algoritmo para estimar la tensión de los tirantes pertenecientes a un puente a través de vídeo-imágenes. En las pruebas experimentales de la investigación se utilizaron tres diferentes cámaras digitales, una de la marca Kodak modelo AZ401, otra de un celular iPhone 12 pro y una última, parte de un Dron Phantom 4 pro. Para validar los resultados y evaluar el funcionamiento del algoritmo se diseñó un arreglo experimental con una mesa vibratoria para generar desplazamientos verticales a ciertas frecuencias preestablecidas, en este caso se utilizaron las dos últimas cámaras mencionadas. Mientras que la cámara Kodak fue usada en pruebas sobre el puente Río Papaloapan, en las cuales se comparó la fuerza de tensión estimada con respecto a la proporcionada por un acelerómetro. La diferencia en la estimación de la tensión entre ambos instrumentos resultó en un porcentaje máximo de 6.4%, mínimo de 0.004%, y un promedio de 1.52%; por lo que, se puede concluir que la cámara de video se puede implementar para estimar la tensión en cables que pertenecen a un puente atirantado.



# Abstract

---

The main aim of this research was to define an algorithm that can determine the tension force of cables within a bridge using video. For capturing the information, three different instruments were implemented, Kodak AZ401, iPhone 12 pro, and Drone Phantom 4 pro. In the case of the latest sensors, they were utilized during a laboratory testing where a vibrating table generated vertical displacement according to pre-configured frequencies. On the other hand, the Kodak camera was used for a measurement campaign on the Rio Papaloapan Bridge. For this test, the tension force estimated by the accelerometer and the camera obtained a maximum difference of 6.4%, a minimum of 0.004%, and an average of 1.52%. Thus, it can be concluded that the camera can be implemented to estimate the tension force of cables within a cable-stayed bridge.



# Introducción

---

Comúnmente en México, la determinación de tensiones en tirantes que son parte de los elementos estructurales de un puente es obtenida mediante el uso de gatos hidráulicos (metodología directa) (Feng, 2015), sin embargo, tiene la desventaja de ser un proceso lento, costoso, y requiere cerrar el tráfico vehicular; es por esta razón que, el grupo de Monitoreo Estructural del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) aplica una metodología indirecta, basada en adquirir las frecuencias naturales de los tirantes a través de acelerómetros (figura I.1.). No obstante, a pesar de que el tiempo y costo son reducidos notoriamente, el contacto directo con los tirantes aún es necesario.



Fuente: Propia (2022).

**Figura I.1. Determinación de tensión en tirantes del puente Río Papaloapan con acelerómetro.**

El monitoreo estructural es una herramienta de suma importancia para la conservación de puentes y prevención de accidentes en México, por lo que se tiene que estar a la vanguardia en cuanto a metodologías y tecnologías que incursionan en el mercado; en la última década, ha surgido una nueva generación de sensores con características que presentan ventajas debido a su bajo costo y la facilidad con que pueden ser empleadas. Uno de estos sensores son las cámaras, ya sea que se pueden implementar montadas en un vehículo aéreo no tripulado o fijas en cualquier otro elemento estable. Las cámaras tienen la capacidad de recolectar video-imágenes a ciertos cuadros por segundo (fps, por sus siglas en inglés), lo que permite

realizar mediciones de desplazamientos dinámicos; una imagen digital se define como una matriz de píxeles donde cada elemento puede tener dimensiones al nivel del sub-milímetro, lo cual proporciona una alta precisión para medir desplazamientos; su costo es bajo comparado con los sensores denominados clásicos en el monitoreo estructural, por ejemplo, acelerómetros, inclinómetros, LVDT (Transformador diferencial de variación lineal). Aunado a esto, la implementación de cámaras tiene también el beneficio de no tener contacto directo con el objeto de estudio y en el caso de instalarlas en un dron, los elementos estructurales ubicados en un lugar de difícil acceso pueden ser estudiados con mayor detalle y mejor resolución. Por tal motivo, el objetivo principal del presente trabajo es generar un algoritmo que sirva como herramienta para estimar el valor de la tensión de los tirantes de un puente mediante video-imágenes, así como su validación en pruebas controladas y sobre un puente que pertenece a la infraestructura carretera del país.

El caso de estudio es el Puente atirantado Río Papaloapan, localizado en Veracruz, México. Esta estructura se construyó en 1994 con un claro principal de 203 m, longitud total de 407 m y un total de 112 cables divididos en 8 semi-arpas, es decir, cada semi-arpa contiene 14 cables, donde las posiciones primera y catorceava son el cable más corto y largo, respectivamente.



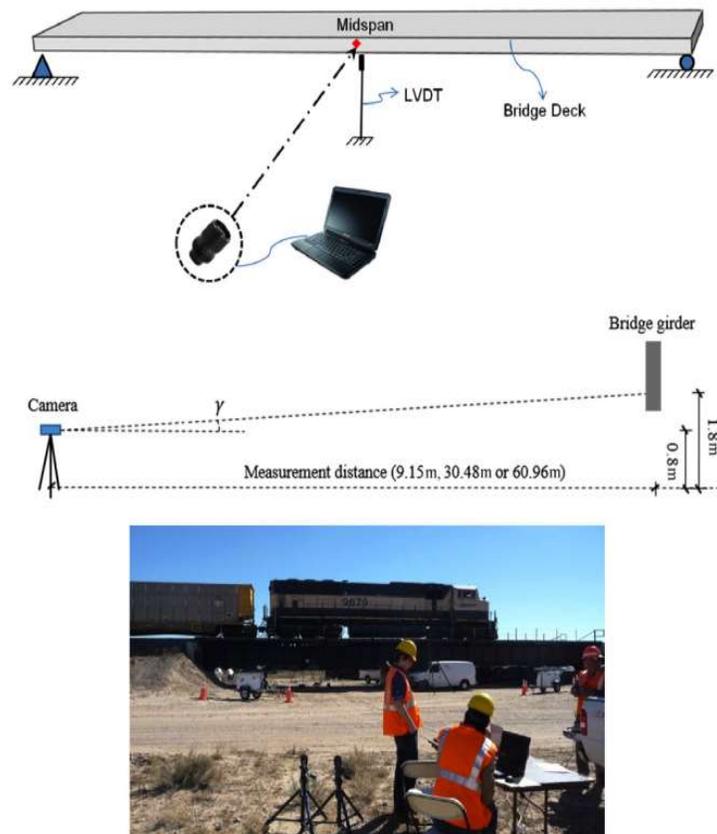
Fuente: Propia (2022).

**Figura I.2 Puente Río Papaloapan.**

A lo largo de los años, el Puente Río Papaloapan ha sufrido problemas asociados con el material de fundición debido al mal tratamiento térmico en algunos de los anclajes superiores de los cables, por lo que se han realizado frecuentes campañas de monitoreo.

Por otro parte, para entrar un poco más en contexto del tema, a continuación, se resumen tres antecedentes relevantes en el uso de video imágenes en la determinación de desplazamientos dinámicos:

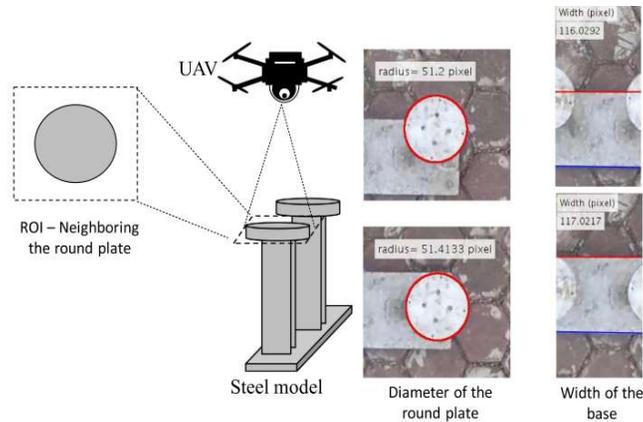
1) Se propuso un sistema para realizar mediciones de desplazamiento sin contacto con el elemento de interés y sin una marca guía. La metodología presentada fue evaluada en dos puentes ferroviarios (ver figura I.3), donde la información obtenida con la cámara se comparó con un instrumento convencional que necesita instalación directa en la estructura, obteniendo resultados satisfactorios (Feng, 2015).



Fuente: Feng (2015).

### Figura I.3 Pruebas de campo de la investigación

2) Se estableció una metodología para determinar desplazamientos utilizando una cámara montada en un vehículo aéreo no tripulado. Su principal aporte fue reducir los efectos producidos por la inestabilidad de la cámara (Khuc, 2020).



Fuente: Khuc (2020).

**Figura I.4 Pruebas de campo de la investigación**

3) Se definió una metodología para determinar desplazamientos en un puente peatonal utilizando una cámara montada en un dron y marcas Aruco instaladas en la estructura. Al final del experimento, la comparación entre los modos de vibrar calculados por la cámara y por acelerómetros, proporcionan resultados similares (Hoskere, 2019).



Fuente: Hoskere (2019).

**Figura I.5 Pruebas de campo de la investigación**

En general, la implementación de cámaras de vídeo en el monitoreo estructural ha generado información valiosa con una alta precisión, produciendo que sea una alternativa nueva, que a medida que se mejora la resolución y frecuencia de adquisición, las ventajas sobre otros instrumentos de medición sobresalen.

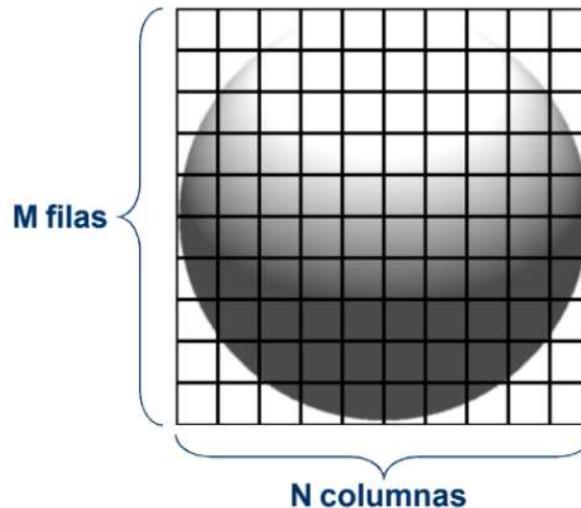
# 1. Marco teórico

---

A continuación, se definen algunos conceptos teóricos básicos con la finalidad de que el lector se familiarice con el tema.

## 1.1 Imagen digital

Una imagen digital es una matriz finita de dimensión  $M \times N$ , donde cada elemento denominado píxel está posicionado en una coordenada bidimensional  $(x, y)$  y cuenta con un valor de intensidad (figura 1.1).



Fuente: Esnarriaga S. (2018).

**Figura 1.1 Ejemplo de imagen digital**

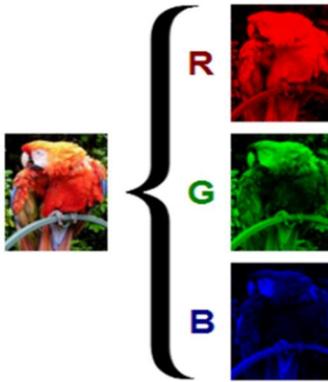
## 1.2 Rango de intensidad

El rango de intensidad en una imagen depende del número de bits implementados, por ejemplo, una imagen de 5 bits presenta 32 diferentes niveles de intensidad de acuerdo con el término  $2^n - 1$ , donde  $n$  es número de bits. En el caso de una imagen en escala de grises de 8 bits se tendrán 256 niveles de intensidad, siendo 0 el color negro y 255 el blanco (figura 1.2). Por otro lado, en el caso de una imagen de color de 8 bits, ésta tendrá 256 niveles de intensidad en azul, rojo y verde, es decir, que tiene tres diferentes canales y la imagen es el resultado de su combinación (figura 1.3).



Fuente: Takeuchi R. (2017).

**Figura 1.2** Relación niveles de intensidades y bits



Fuente: Andrés C. (2015).

**Figura 1.3** Ejemplo de composición de imagen RGB

### 1.3 Resolución

Otro parámetro importante en las imágenes digitales es la resolución, la cual se define mediante el número de píxeles que la conforman, por lo que, entre más píxeles mayor es la resolución (figura 1.4).



Fuente: Widiyanata (2022).

**Figura 1.4** Ejemplo de resolución de imágenes

## 1.4 Resolución estándar

Las principales resoluciones que manejan las cámaras de video son las siguientes (figura 1.5):

- HD:1280X720 pixeles.
- Full HD:1920X1080 pixeles.
- Ultra HD: 3840x2160 pixeles.
- 4K:4096x2160 pixeles.

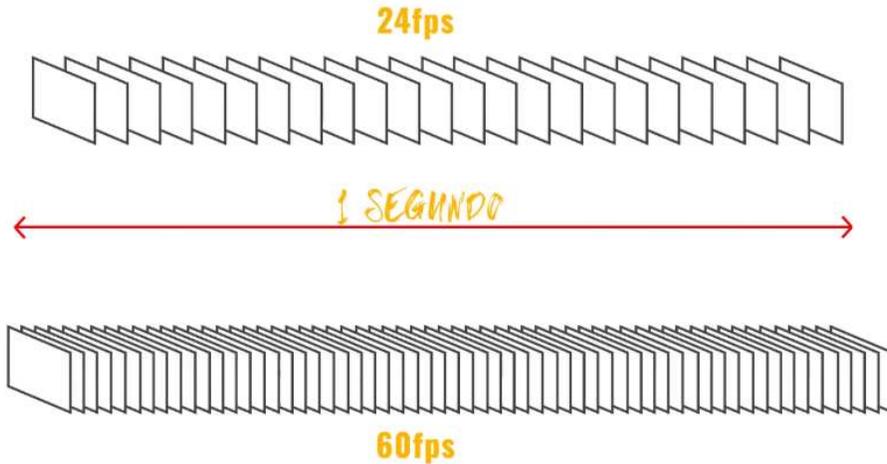


Fuente: Arrieta E. (2022).

**Figura 1.5 Resoluciones de vídeo**

## 1.5 FPS

El termino de cuadros por segundo o fps, define el número de imágenes que son capturadas durante un segundo de vídeo (figura 1.5). Los valores de fps para el monitoreo estructural pueden ser 30, 60 y 120, pero varían en dependencia de las características de la cámara que se utilice.



Fuente: Runbenguo A. (2022).

**Figura 1.5 Ejemplo del concepto fps en vídeos**

## 1.6 Relación entre tamaño de píxel y distancia cámara-objeto

La distancia cámara-cable afecta al mínimo desplazamiento detectable en la dirección vertical y horizontal de acuerdo con la siguiente ecuación,

$$CD = \frac{fl * RD}{fl -} \quad (1)$$

Siendo  $CD$  el desplazamiento capturado por la cámara,  $fl$  es la distancia focal de la cámara,  $D$  es la distancia cámara-cable, y  $RD$  es el desplazamiento del cable. El mínimo desplazamiento del cable tiene que generar un desplazamiento capturado mayor a dos veces el tamaño del píxel de la cámara.

Por ejemplo, para una de las cámaras empleadas perteneciente al iPhone 12 pro, con una distancia focal de 26 mm, F# de 1.6, tamaño de sensor de 56.6 mm x 42.3 mm, y 3840 x 2160 pixeles, tiene una pérdida de resolución de  $2.7 \times 10^{-5}$  m cada 0.20 m, aproximadamente.

## 2. Metodología

---

### 2.1 Estimación de la tensión

De acuerdo con (Fertis, 1995) y (Carrión, 2005), la ecuación 2 establece un modelo lineal en el cual un tirante vibra libremente, considerando una masa por unidad de longitud particular siendo afectada por una tensión dada.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{m}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

Donde  $T$  es la fuerza de tensión,  $m$  el valor de la masa por unidad de longitud,  $y$  es el desplazamiento en la componente vertical,  $x$  es el desplazamiento en la componente horizontal y  $t$  es el tiempo.

Resolviendo la ecuación 2 con las condiciones de frontera para un cable de un puente atirantado, se define el valor de las frecuencias naturales de la siguiente forma.

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (3)$$

Siendo  $f_n$  la frecuencia del  $n$  modo de vibrar y  $L$  la longitud del tirante.

Posteriormente, se puede estimar la fuerza de tensión utilizando la frecuencia del primer modo de vibrar con la ecuación 4.

$$T = m(2Lf_1)^2 \quad (4)$$

Donde  $f_1$  es la frecuencia del primer modo de vibrar.

Con el objetivo de obtener mayor precisión en la estimación de la fuerza de tensión, se puede utilizar un promedio de frecuencias pertenecientes a varios modos de vibrar en vez de utilizar solamente información del primero, el cual se puede calcular como lo muestra la siguiente ecuación.

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{\sum_{i=1}^n i} \quad (5)$$

Siendo  $i$  el número del modo de vibrar y  $f_i$  su respectiva frecuencia.

## 2.2 Calibración de la cámara

En esta investigación se utilizó una cámara de un iPhone 12 pro, una de marca Kodak modelo AZ401 y una de un vehículo aéreo no tripulado de la compañía DJI modelo Phantom 4 pro. Antes de utilizar las cámaras en el desarrollo experimental, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración; para efectuar este procedimiento, en el presente trabajo se implementaron más de 19 imágenes correspondiente a un tablero de ajedrez, capturadas en diferentes posiciones. Los parámetros resultantes en cada proceso de calibración son sus parámetros intrínsecos y extrínsecos, con los cuales se puede realizar correcciones de distorsiones en cada una de las imágenes que forman parte del vídeo, así como la conversión de unidades, es decir, pasar de píxeles a mm/cm.

## 2.3 Algoritmo

La metodología propuesta consiste en determinar la frecuencia de vibración de los tirantes a través de vídeo-imágenes y relacionarla con su respectiva tensión utilizando la ecuación 4. Para obtener las frecuencias mediante vídeo-imágenes, es necesario seguir el procedimiento definido en la figura 2.1. El paso inicial es transformar cada una de las imágenes que componen el vídeo a escala de grises, posteriormente, una zona o elemento en el tirante debe ser seleccionada para detectar su posición en cada uno de los cuadros que conforman el vídeo. Al precisar la posición de la zona de interés del tirante se obtiene una matriz de coordenadas, la cual representa el desplazamiento en función del tiempo que sufrió el tirante en el área seleccionada. Es importante mencionar que los desplazamientos contemplados en el proceso son los perpendiculares a la dirección del cable. Para finalizar, a los desplazamientos resultantes se le aplica la transformada de Fourier con el objetivo de conocer el comportamiento del tirante en el dominio de la frecuencia. Una vez obtenidas las diferentes frecuencias a las que vibra el tirante, se prosigue a utilizar la ecuación 4 y 5. El algoritmo empleado en este trabajo de investigación se desarrolló en Python utilizando principalmente la librería OpenCV.



Fuente: Propia (2022).

**Figura 2.1 Procesamiento para determinar frecuencias a partir de imágenes**

### 2.3.1 Recolección de vídeo

Los vídeos fueron obtenidos en dirección perpendicular al tirante para reducir las afectaciones en las imágenes y así simplificar el tratamiento de la información, de esta manera toda el área de interés presentará la misma profundidad. En el caso de la distancia a la cual la cámara se colocó con respecto al tirante, fue en función de que la distancia cámara-objetivo no afectará el desplazamiento mínimo detectable mayor a 0.5 mm. Como se mencionó, entre mayor distancia se establezca con el objetivo, el mínimo cambio detectable al nivel del píxel se reduce, es decir, que se pierde resolución para detectar desplazamientos. En las pruebas de laboratorio se implementó una resolución de 4K a 60 fps, posicionando la cámara fijamente en un trípode a 90 centímetros (iPhone 12 pro) de la mesa vibratoria, mientras que la cámara montada en el dron recolectó datos a más de 2 metros de distancia respecto al elemento de interés, debido a su inestabilidad.

Por otro lado, en las pruebas sobre el puente Río Papaloapan, la resolución fue Full HD a 30 fps, con la cámara instalada (Kodak) fijamente a 90 centímetros de cada uno de los tirantes. Es importante mencionar que las cámaras implementadas en la prueba de laboratorio no se contemplaron para desarrollar la campaña de medición sobre el puente Río Papaloapan, ya que la finalidad de la validación en condiciones controladas fue verificar que el algoritmo funcionara adecuadamente con dos diferentes dispositivos, para posteriormente utilizarlo en conjunto con cualquier otra cámara.

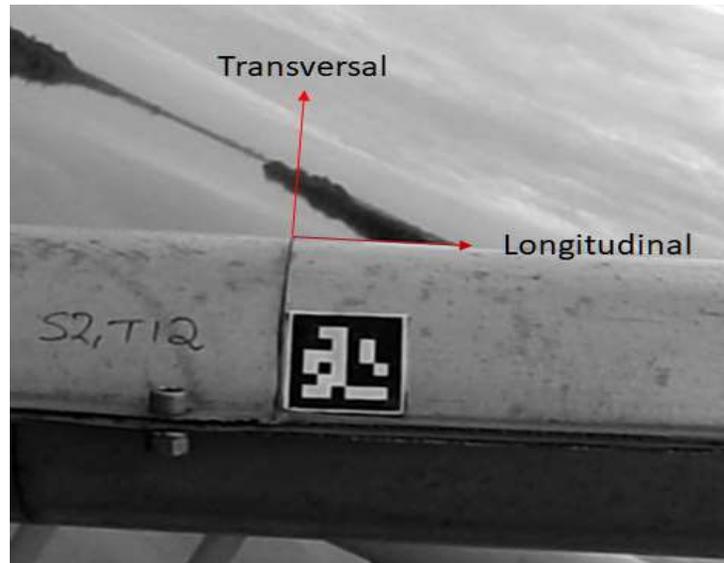
### 2.3.2 Transformación de RGB a escala de grises

La imagen es una matriz de píxeles donde cada uno tiene una tonalidad en dependencia del número de bits que cuenta, es decir, si el valor de bits es igual a 8, ese píxel tiene la capacidad de adquirir 256 tonos diferentes, entre mayor es el número bits, mayor es el rango de tonos que pueden establecerse en un píxel. Aunado a lo anterior, el tono del píxel se forma por información de tres canales, color rojo, verde y azul (Red, Green y Blue); por lo tanto, para disminuir la complejidad computacional del algoritmo se decidió transformar las imágenes de formato RGB a escala de grises.

### 2.3.3 Selección de la zona de interés

El área de interés en el tirante se localiza a un metro y medio de su anclaje inferior, el cual se caracteriza por estar cubierto por una protección denominada antivandálica.

En esta zona del tirante se encuentran patrones característicos que facilitan la determinación de desplazamientos como algunos tornillos; sin embargo, se contempló, además de utilizar los tornillos, adherir una marca (ArUco) con dimensiones de 4 x 4 centímetros con el objetivo de mejorar el resultado al momento de detectar la zona en todo el vídeo (figura 2.2).



Fuente: Propia (2022).

**Figura 2.2 Área de interés en el tirante.**

### **2.3.4 Detección de cambios**

Para determinar los desplazamientos es necesario seleccionar un área de interés en la primera imagen del vídeo, posteriormente, esa secuencia de tonalidades contenida en un área (X x Y píxeles) se compara segmento por segmento dentro de la segunda imagen del vídeo, al final, se guardan las coordenadas de la zona más parecida al patrón de referencia.

Este proceso se realiza en cada una de las imágenes restantes que conforman el vídeo, resultando una matriz de coordenadas que definen el desplazamiento que tiene el tirante en esta área.

### **2.3.5 Aplicación de la FFT**

La transformada de Fourier se aplica para determinar a partir de la respuesta dinámica del desplazamiento del área de interés, las diferentes frecuencias de los modos de vibrar del tirante, a los cuales, posteriormente se les calcula su valor promedio con la ecuación 5 y finalmente, el valor resultante se introduce a la ecuación 4 para estimar la fuerza de tensión.

## 2.4 Pruebas de laboratorio

El ensayo de validación en laboratorio consistió en establecer una marca ArUco de 4×4 cm sobre una mesa vibratoria (figura 2.3) y medir sus desplazamientos con una cámara, como se describe en el apartado 2.3. La cámara (iPhone 12 pro) se colocó en un trípode a 90 cm de la marca (fijamente durante todas las pruebas), con la finalidad de grabar un video de 2 minutos por cada sesión utilizando una frecuencia de muestreo de 60 fps. En el caso del Dron, se realizó el mismo procedimiento, la diferencia en este caso fue que la inestabilidad del dron provocó que las mediciones fueran desde una distancia mayor a 2 metros respecto a la mesa de vibración.

Las frecuencias de desplazamiento sinusoidal seleccionadas para la mesa vibratoria fueron ajustadas con los siguientes valores, 11.31 Hz, 12.69 Hz, 14.53 Hz, 17.66 Hz, 21.87 Hz, y 26.37 Hz, considerando cada frecuencia en tres sesiones diferentes, es decir, un total de 18 pruebas fueron desarrolladas. Los valores de frecuencia seleccionados son el promedio del quinto modo de vibración de los cables número 2 al 7 del puente Río Papaloapan. A partir de las pruebas se puede comprobar que el algoritmo desarrollado es capaz de determinar correctamente las frecuencias de vibración de los cables del puente.



Fuente: Propia (2022).

**Figura 2.3. Validación experimental.**

## 2.5 Pruebas en campo

Para evaluar la metodología definida en campo, se propuso realizar mediciones en 14 tirantes pertenecientes al puente Río Papaloapan.

La tabla 2.1 presenta la semi-arpa donde se ubican los tirantes, así como su posición dentro de éstas, siendo el tirante 14 el más largo y 1 el más corto.

**Tabla 2.1 Ubicación de los tirantes seleccionados para la evaluación**

Número	Semi-arpa	Posición	Nomenclatura
1	8	9	S8T9
2	8	8	S8T8
3	2	10	S2T10
4	4	4	S4T4
5	6	7	S6T7
6	2	12	S2T12
7	3	5	S3T5
8	3	11	S3T11
9	7	3	S7T3
10	7	6	S7T6
11	7	13	S7T13
12	6	2	S6T2
13	8	1	S8T1
14	5	14	S5T14

Fuente: Propia (2022).

En los cables descritos en la tabla 2.1, se efectuaron mediciones simultaneas con el acelerómetro (G-Link-LXRS de Lord MicroStrain) y la cámara de vídeo (Kodak AZ401), durante dos minutos.

En el caso del primer instrumento, se colocó directamente ajustado por un cinto de tela, midiendo con una frecuencia de muestreo de 128 Hz, mientras que, el segundo se instaló en un trípode a una distancia de 90 centímetros de cada uno de los cables analizados, recolectando datos con una resolución de 1920×1080 pixeles (Full HD) y una frecuencia de muestreo de 30 fps.

La figura 2.4 describe el arreglo experimental desarrollado para capturar la información en los tirantes del puente Río Papaloapan.



Fuente: Propia (2022).

**Figura 2.4 Descripción de la prueba en campo**



## 3. Resultados

---

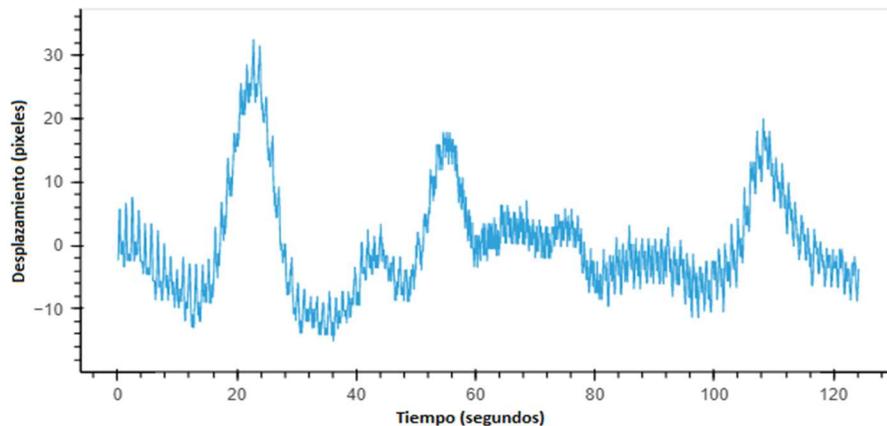
### 3.1 Pruebas de laboratorio

Los resultados obtenidos a través de las pruebas desarrolladas en el laboratorio con la cámara fijan (iPhone 12 pro) y el dron (DJI Phantom 4 pro), de acuerdo con la configuración experimental descrita en la sección 2.4, confirman que el algoritmo generado funciona bien en condiciones ideales para determinar frecuencias de vibración.

### 3.2 Pruebas en puente Río Papaloapan

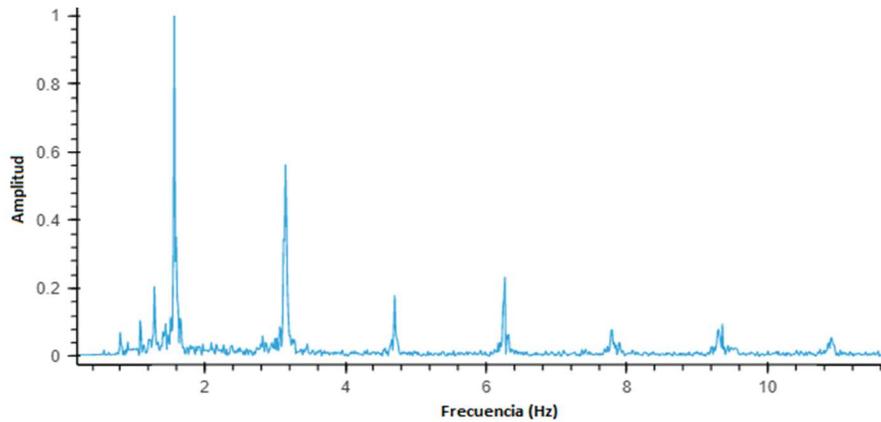
Basado en la metodología definida en la sección 2.3 y la configuración experimental explicada en la sección 2.5, la figura 3.1 ilustra el desplazamiento obtenido en el tirante S3T11 y la figura 3.2, muestra su comportamiento en el dominio de la frecuencia. Las dos figuras anteriores presentan la capacidad de la cámara utilizada para definir el desempeño del tirante siendo afectado por el tráfico durante una de las sesiones.

Una vez procesados los vídeos y calculada la fuerza de tensión de cada uno de los tirantes enumerados en la tabla 2.1, se evaluaron los resultados con respecto a los valores de referencia obtenidos a través del acelerómetro. Para iniciar esta comparación se presenta la tabla 3.1, en donde se establece el número de modos de vibrar a los cuales se les detectó su frecuencia mediante la cámara de video durante la campaña de medición.



Fuente: Propia (2022).

**Figura 3.1** Desplazamiento capturado por la cámara en el tirante S3T11



Fuente: Propia (2022).

**Figura 3.2 FFT del desplazamiento obtenido por la cámara en el tirante S3T11**

Los resultados indicaron que existe una tendencia de que, en la mayoría de los tirantes más cortos (tirantes desde la posición 1 a la 7), menos modos de vibrar se determinaron, ocasionado por la relación de menor magnitud de desplazamiento por mayor frecuencia de vibración; sucediendo lo contrario en los tirantes más largos, donde el desplazamiento es de mayor magnitud y su frecuencia es menor.

Con la información de la fuerza de tensión estimada de ambos instrumentos, se desarrollaron dos análisis, el primero utilizó para el cálculo el mismo número de modos de vibrar en ambos instrumentos y el segundo, consideró información de solamente 5 modos de vibrar en los cálculos para la estimación con el acelerómetro.

En la tabla 3.2 se establece el porcentaje de error en la fuerza de tensión calculada con el mismo número de frecuencias de vibrar por los dos instrumentos, es decir, el número de modos de vibrar definidos en la tabla 3.1.

En estos resultados se puede apreciar que la diferencia no superó el porcentaje de 1.8% (tirante S4T4) en todos los casos, el mínimo error fue de 0.004% (cable S8T8), y el promedio de 0.47%, lo cual indica que en términos de frecuencia la cámara tuvo una precisión similar a la del acelerómetro.

En el caso de los errores obtenidos cuando la fuerza de tensión se determinó considerando el comportamiento de únicamente 5 modos de vibrar para el acelerómetro y el número definido en la tabla 3.1 para la cámara; arrojan un máximo de 6.2% (tirante S7T3), mínimo de 0.004% (tirante S8T9), y un promedio de 1.52% (ver tabla 3.3).

**Tabla 3.1 Número de modos de vibrar detectados con la cámara por tirante**

Tirante	Número de frecuencias
S8T9	3
S8T8	5
S2T10	2
S4T4	4
S6T7	2
S2T12	5
S3T5	3
S3T11	7
S7T3	1
S7T6	5
S7T13	5
S6T2	1
S8T1	2
S5T14	5

Fuente: Propia (2022).

**Tabla 3.2 Porcentaje de error de la cámara obteniendo la fuerza de tensión con el mismo número de modos de vibrar**

Tirante	Porcentaje de Diferencia (%)
S8T9	0.825
S8T8	0.004
S2T10	0.043
S4T4	1.773
S6T7	0.012
S2T12	0.396
S3T5	0.251
S3T11	0.053
S7T3	0.094
S7T6	1.058
S7T13	0.264
S6T2	0.841
S8T1	0.740
S5T14	0.279

Fuente: Propia (2022).

El valor mínimo se mantiene, pero el error máximo aumento 4.4% y el promedio de error fue de 1.05%, lo cual permite señalar que la principal diferencia entre los instrumentos es la capacidad del acelerómetro para detectar los modos de vibrar caracterizados por frecuencias más altas.

**Tabla 3.3 Porcentaje de error de la cámara obteniendo la fuerza de tensión con diferente número de modos de vibrar**

<b>Tirante</b>	<b>Porcentaje de Diferencia (%)</b>
S8T9	0.0495
S8T8	0.0037
S2T10	1.1019
S4T4	3.0494
S6T7	1.1958
S2T12	0.3960
S3T5	0.7516
S3T11	0.4875
S7T3	6.2647
S7T6	1.0583
S7T13	0.0679
S6T2	4.7708
S8T1	1.8142
S5T14	0.2794

Fuente: Propia (2022).

## Conclusiones

---

A partir de las pruebas en laboratorio tanto con la cámara fija (iPhone 12 pro) como montada en el dron (DJI phantom 4 pro), se concluyó que el algoritmo funcionó adecuadamente en condiciones ideales. Lamentablemente, la situación en campo es más compleja para implementar el algoritmo cuando las mediciones son realizadas con un dron, ya que es necesario considerar su movimiento siendo afectado por el medio ambiente, así como su estabilidad para mantener una distancia con poca variación respecto a la posición del tirante, por lo cual, en trabajos futuro se propone el desarrollo metodológico para reducir los movimientos aleatorios del Dron o generar un algoritmo que brinde desplazamientos al nivel del subpíxel.

En el caso de las mediciones sobre el puente Rio Papaloapan a partir de la cámara fija (Kodak), la comparación de la fuerza de tensión (calculada con diferente número de modos de vibrar) obtenida por ambos instrumentos indicó un porcentaje de diferencia máxima de 6.4%, mínima de 0.004% y un promedio de 1.52%.

Los resultados obtenidos por la cámara fueron muy parecidos a los medidos con el acelerómetro, en la mayoría de los casos, las discrepancias más considerables se obtuvieron en los tirantes más cortos debido a los problemas para detectar modos de vibrar caracterizados por frecuencias altas, los cuales no pueden ser identificados por la cámara al estar fuera de su rango de resolución de imagen, ya que los desplazamientos asociados a estas frecuencias son menores que en los tirantes de mayor longitud; adicionalmente, como la recolección de datos en los tirantes se desarrolló con carga vehicular aleatoria, en algunas sesiones, los cables presentaron una excitación baja, lo cual dificultó el procesamiento a través de video-imágenes, pero no afectó los resultados brindados por el acelerómetro.

Por otro lado, las diferencias entre el acelerómetro y la cámara disminuyen cuando se utiliza el mismo número de modos de vibrar, por ejemplo, las diferencias en tensión no superaron el porcentaje de 1.8% en todos los casos, la mínima diferencia fue de 0.004%, y el promedio fue 0.47%, lo cual indica que en términos de frecuencia la cámara tuvo una precisión similar a la del acelerómetro.

Basado en los resultados obtenidos y el análisis desarrollado se puede concluir que la cámara tiene el potencial para ser implementada en el monitoreo de la tensión de cables que forman parte de un puente, considerando que tiene la ventaja de efectuar sus mediciones remotamente sin necesidad de requerir acceso al tirante, lo cual implica no utilizar escaleras, andamios, o grúas para colocar un sensor. Además de que, las mediciones pueden mejorar al incrementar la resolución y los fps de la cámara, por ejemplo, registrando imágenes de 3840×2160 pixeles a 60 fps, lo cual es el doble de lo que utilizó en esta investigación.

## Bibliografía

---

- Andrés, C. (2015). *Detección de color OpenCV Python* [Consulta en línea] <http://blogcarlos12.blogspot.com/2015/07/deteccionde-color-opencv.html>
- Arrieta, E. (2022). *HD, Full HD, Ultra HD, 4K, 8K y otras resoluciones de pantalla*. [Consulta en línea] <https://www.diferenciador.com/hd-full-hd-ultra-hd-4k-8k-y-otras-resoluciones-de-pantalla/>
- Carrión, F., Hernández, J. y Terán, J. (2005). *Estudio Experimental de un Puente Atirantado: Evaluación de Cables*. [Publicación técnica No. 265]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt265.pdf>
- Esnarriaga, S. (2018). *Procesamiento digital de imágenes*. [Consulta en línea] <https://es.slideshare.net/sebastianesnarriaga/algo-de-filtros>
- Feng, M. Q., Fukuda, Y., Feng, D. & Mizuta, M. (2015). Nontarget vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response. *Journal of Bridge Engineering*, 20(12), 04015023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000747](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000747)
- Fertis, D. (1995). *Mechanical and structural vibrations*. Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc.
- Hoskere, V., Park, J., Yoon, H. & Spencer Jr, B. (2019). *Vision-based modal survey of civil infrastructure using unmanned aerial vehicles*. *Journal of Structural Engineering*, 145(7), 04019062. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002321)
- Khuc, T., Nguyen, T., Dao, H. & Catbas, F. (2020). Swaying displacement measurement for structural monitoring using computer vision and an unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 159(1), 107769. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107769>
- Runbenguo, A. (2022). *Descubre a cuántos FPS debes grabar y editar*. [Consulta en línea] <https://rbgescuela.com/tutoblogs/a-cuantos-fps-es-mejor-grabar/>

Takeuchi, R. (2017). *UMATracker Quick Start Guide . Binarize*. [Consulta en línea] [https://umatracker.github.io/UMATracker-manual-en/\\_md/quick\\_ref.html](https://umatracker.github.io/UMATracker-manual-en/_md/quick_ref.html)

Widiyanata (2022). *Define spatial and gray level resolution. Explain about isopreference curves*. [Consulta en línea] <http://legendtechz.blogspot.com/2013/04/Define-spatial-and-gray-level-resolution-Explain-about-isopreference-curves.html>





**COMUNICACIONES**

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"  
San Fandila, Pedro Escobedo  
C.P. 76703  
Querétaro, México  
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>