



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

**MONITOREO ELECTRÓNICO DE DEFORMACIONES EN
INFRAESTRUCTURA MEDIANTE SENSORES ÓPTICOS Y
ANÁLISIS EN MATLAB**

**TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA
PROFESIONAL**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERA ELECTRÓNICA

PRESENTA:
ALAN ALFONSO RODRÍGUEZ IBARRA

NOMBRE DEL ASESOR:
JUAN CARLOS GÓMEZ CONDE



APIZACO, TLAXCALA., OCTUBRE DE 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Apizaco
Departamento de Ingeniería Eléctrica Electrónica
Apizaco, Tlaxcala, **04/junio/2025**

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Electrónica
No. OFICIO IEE/309/2025

Asunto: Liberación de Proyecto
para la Titulación Integral

ISRAEL JORGE SÁNCHEZ SÁNCHEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E.

Por este medio me permito informar a usted que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre del egresado:	ALAN ALFONSO RODRÍGUEZ IBARRA
Carrera:	INGENIERÍA ELECTRÓNICA
No. de Control:	20370519
Nombre del proyecto:	"MONITOREO ELECTRÓNICO DE DEFORMACIONES EN INFRAESTRUCTURA MEDIANTE SENSORES ÓPTICOS Y ANÁLISIS EN MATLAB"
Producto:	TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Agradeciendo de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados, le envié un cordial saludo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
Pensar para Servir, Servir para Triunfar*

JAIME ALBERTO ELIZALDE OLIN
JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA
Y ELECTRÓNICA

Juan Carlos Gómez Conde
Asesor de Proyecto

c.c.p. Expediente



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec,
Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel. (241)
4172010 Ext. 145, e-mail: electronica@apizaco.tecnm.mx |
apizaco.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios Profesionales

Tzompantepec, Tlaxcala **20/octubre/2025**

RODRÍGUEZ IBARRA ALAN ALFONSO
EGRESADO(A) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA
CON NÚMERO DE CONTROL 20370519.
P R E S E N T E.

Por este medio, me permito informar a usted que por aprobación de la comisión revisora asignada para valorar el trabajo que mediante la opción **TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL** y cuyo tema es: **MONITOREO ELECTRÓNICO DE DEFORMACIONES EN INFRAESTRUCTURA MEDIANTE SENSORES ÓPTICOS Y ANÁLISIS EN MATLAB**, conforme a lo establecido en el procedimiento para la obtención del Título Profesional en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios Profesionales a mi cargo le otorga la:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar **1 USB** del mismo, apropiadamente empastado, a la brevedad, para presentar su Acto de Recepción Profesional.

Sin otro particular por el momento me despido.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

CECILIA YARELY ARREGUÍN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



ccp. Archivo

CYAL/rrc



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec,
Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel. (241) 4172010
Ext. 304, e-mail: dep_titulacion@apizaco.tecnm.mx | apizaco.tecnm.mx



Agradecimientos

Con el corazón lleno de gratitud y una profunda satisfacción, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que, de manera invaluable y significativa, contribuyeron a la culminación de esta etapa crucial en mi vida académica y profesional, así como a la realización de este proyecto de titulación.

En primer lugar, mi más grande reconocimiento y agradecimiento al **Instituto Tecnológico Nacional de México**, y en particular al **Instituto Tecnológico de Apizaco**, por haberme brindado la oportunidad de formarme en la **Licenciatura en Ingeniería Electrónica**. Las bases, los conocimientos y los desafíos enfrentados en esta institución son el cimiento de mi desarrollo.

Un agradecimiento que trasciende lo profesional a mi director de proyecto, el **Dr. Juan Carlos Gómez Conde**. Su compromiso, su inagotable paciencia, su guía experta, y su constante apoyo en cada proyecto, duda y etapa de mi carrera, incluyendo la titulación, han sido absolutamente fundamentales. Gracias, Dr. Gómez Conde, por estar siempre ahí, por ser mi asesor en prácticamente toda mi trayectoria universitaria y por la invaluable dedicación.

Extiendo mi gratitud a distinguidos miembros del cuerpo docente que han dejado una huella profunda en mi formación:

- Al **Dr. Raúl Cortés Maldonado**, por su asesoría y apoyo en diversas áreas como Innovatec, titulación y el Verano de Investigación, que enriquecieron mi perspectiva.
- A la **Mtra. Teres Rodríguez Hernández**, por su incansable apoyo en ENECB y ANFEI, y por estar siempre pendiente de nosotros, demostrando un compromiso excepcional.
- Al **Maestro Mauricio Ramírez Juárez** y a la **Maestra Josefina Montiel Corte**, por su asesoramiento y por dedicar tanto de su valioso tiempo para el proyecto nacional ENECB2022.

De manera muy personal y desde lo más profundo de mi ser, agradezco a mi amada madre, **Juana Araceli Rodríguez Ibarra**. A ti, mamá, por darme todo lo que soy: la vida, la oportunidad de estudiar, mi educación y, lo más importante, por enseñarme que todo es posible, que nunca debo rendirme y que cada problema tiene una solución. Tu amor incondicional ha sido mi mayor fuerza.

Mi gratitud se extiende también a **Juan José Carmona Cortés**, por su invaluable apoyo económico, sus sabios consejos y por estar siempre presente para mi madre y para mí, especialmente en los momentos difíciles. Sin su generosidad y respaldo, culminar mis estudios no habría sido posible.

A mis tíos, **Gisela Jaqueline Rodríguez Ibarra** y **Juan José Hernández Hernández**, quienes desde pequeño han sido como una segunda madre y un segundo padre para mí, cuidándome y viéndome crecer como un hijo más. Su cariño y dedicación son algo que valoro inmensamente.

A mis abuelitos, **María Santos Ibarra Cardona** y **José Alfonso Rodríguez Rodríguez**, por ser un constante ejemplo de vida, por su sabiduría y por su apoyo incondicional que siempre me brindaron.

También deseo agradecer a **Doña Rigoberta Hernández**, quien, aunque no es mi abuela de sangre, siempre me trató como un nieto más. Su cariño y bondad son algo que aprecio enormemente.

A mis amigos, que se convirtieron en familia en este camino:

- A mi querida amiga **Dafne Esmeralda Aguilar Guevara**, por su apoyo inquebrantable en tiempos difíciles. Ese pequeño detalle, al igual que ella, lo guardaré y apreciaré para siempre.
- A mi mejor amigo, **Dylan Sánchez Hernández**, por ser un compañero excepcional, por su amistad sincera y por aguantarme tanto. Gracias por ser tú te apreciare siempre.

Y un agradecimiento muy especial a mi novia, **Paola Méndez Manzano**, por estar a mi lado, por brindarme tanta seguridad y lealtad en este tiempo, y por siempre querer lo mejor para mí. Tu apoyo ha sido un pilar fundamental en esta etapa final.

Finalmente, agradezco a la vida y a Dios que siempre me ha cuidado y guiado mis pasos, permitiendo que las cosas sucedieran de la manera perfecta para llegar hasta aquí.

Este logro es el resultado del esfuerzo colectivo y el apoyo incondicional de todos ustedes.

Atentamente,

Alan Alfonso Rodríguez Ibarra No. de Control: 20370519

Índice

1. Introducción	8
1.1 Contextualización del problema o área de estudio	8
1.2 Justificación del proyecto	8
1.3 Objetivos del estudio	8
1.3.1 Objetivo General	8
1.3.2 Objetivos Específicos	8
2. Marco Teórico	9
2.1 Revisión de la literatura relevante relacionada con el tema del proyecto	9
2.2 Explicación de los conceptos teóricos necesarios para entender el estudio	9
2.2.1 Procesamiento Digital de Imágenes	10
2.2.2 Tipos de imágenes utilizadas en el análisis	10
2.2.3 Sensores Ópticos y Cámaras de Alta Resolución	10
2.2.4 Matlab y Herramientas de Procesamiento de Imágenes	10
2.2.5 Consideraciones de Iluminación	10
3. Métodos	11
3.1 Descripción detallada de cómo se llevó a cabo el estudio	11
3.2 Explicación de los materiales y métodos utilizados	11
3.3 Procedimientos experimentales	11
4. Resultados	12
4.1 Presentación de los datos obtenidos durante el estudio	12
4.2 Uso de tablas, gráficos u otros medios visuales para facilitar la comprensión	12
5. Discusión	13
5.1 Interpretación de los resultados obtenidos	13
5.2 Comparación con la literatura existente	13
5.3 Explicación de las implicaciones de los hallazgos	13
5.4 Limitaciones del estudio y posibles áreas para futuras investigaciones	13
6. Conclusiones	14
6.1 Resumen de los hallazgos principales	14
6.2 Respuesta a los objetivos planteados al inicio del proyecto	14
7. Referencias Bibliográficas	15
8. Anexos	17
Anexo 1	17
Anexo 2	19
Anexo 3	24
Anexo 4	31

Anexo 5	32
Anexo 6	33
Anexo 7	35
Anexo 8	36

Índice de figuras

Figura 1 Esquema general de un sistema para Monitoreo de Salud Estructural.....	9
Figura 2 Dimensiones del puente	11
Figura 3 Tomas a distintas distancias del puente.....	11
Figura 4 Grafica ilustrativa de la deformación	12
Figura 5 Comparación de desplazamiento: foto binaria con toma 0 como referencia ..	12
Figura 6 Estructura de la base y tapa del puente.....	17
Figura 7 Estructura de la base y tapa del puente con sección transversal.....	17
Figura 8 Estructura con laterales del puente	17
Figura 9 Estructura del puente terminada	18
Figura 10 Cámara Blackfly S BFS-U3-63S4M.....	19
Figura 11 UGREEN Cámara Web HD.....	19
Figura 12 Lente FUJINON LENS OBJECTIF HF25HA-1S	20
Figura 13 Lente TAMRON IP/CCTV	20
Figura 14 Nivelador BOSCH Self-Leveling Cross-Line Laser GLL 30 S	20
Figura 15 Medidor de distancia BOSCH GLM165-10.....	20
Figura 16 Diagrama de flujo del código	23
Figura 17 Foto del 100% del puente a una distancia de 2.228m	24
Figura 18 Foto del 75.83% aprox. del puente a una distancia de 1.624m	25
Figura 19 Foto del 59.56% aprox. del puente a una distancia de 1.296m	25
Figura 20 Foto del 45.46% aprox. del puente a una distancia de 1.057 m.....	26
Figura 21 Foto del 4% aprox. del puente a una distancia de 0.350m.....	26
Figura 22 Foto del 1.6% aprox. del puente a una distancia de 0.235m	27
Figura 23 Foto del 100% del puente a una distancia de 2.197m	27
Figura 24 Foto del 68.79% aprox. del puente a una distancia de 1.546m	28
Figura 25 Foto del 52.01% aprox. del puente a una distancia de 1.139m	28
Figura 26 Foto del 33% aprox. del puente a una distancia de 0.753m.....	29
Figura 27 Foto del 5.77% aprox. del puente a una distancia de 0.477m	29
Figura 28 Foto del 1.94% aprox. del puente a una distancia de 0.266m	29
Figura 29 Foto del 0.5% aprox. del puente a una distancia de 0.171m	30
Figura 30 Proceso realizado para la captura de deformación.....	31
Figura 31 Grafica con 1864 imágenes tomadas a una distancia de 79 cm	31
Figura 32 Deformación con referencia en la primera toma	32
Figura 33 Vibración con referencia a la mitad de las tomas.....	33
Figura 34 Comparación del comportamiento de escala de grises y Binarizada	33
Figura 35 Zoom de la gráfica de deformación	34

Índice de tablas

Tabla 1 Imagen con su distancia y porcentaje del lente FUJINON LENS OBJECTIF HF25HA-1S	30
Tabla 2 Imagen con su distancia y porcentaje del lente TAMRON IP/CCTV	30

1. Introducción

1.1 Contextualización del problema o área de estudio

Al implementar un procesamiento digital de imágenes, la observación de las deformaciones pequeñas en estructuras nos permitirá un sistema de monitoreo avanzados. La detección de pequeñas deformaciones en estructuras es un aspecto crítico en la ingeniería estructural y el monitoreo de infraestructuras. Identificar deformaciones mínimas en etapas tempranas puede prevenir fallos estructurales mayores y garantizar la seguridad y longevidad de las construcciones. Para abordar este desafío, se ha implementado un enfoque basado en el uso de procesamiento de imágenes mediante MATLAB, utilizando una cámara Blackfly S BFS-U3-63S4M. Esto nos deja en desventaja cuando queremos crear un sistema de monitoreo fiables que puedan alertar sobre posibles fallos estructurales antes de que sea demasiado tarde. Al encontrar esta carencia, podemos contribuir a la seguridad y eficiencia de diversas construcciones y aplicaciones tecnológicas.

1.2 Justificación del proyecto

La implementación de un sistema que permita la detección de pequeñas deformaciones en estructuras es crucial para mejorar la evaluación y comprensión de lo que sucede en el material. Este proyecto contribuirá a la formación de ingenieros civiles y electrónicos al proporcionar herramientas avanzadas para el análisis estructural, mejorando así la seguridad y la durabilidad de las construcciones. Además, la metodología propuesta permitirá a los estudiantes y profesionales comprender mejor el comportamiento estructural antes del colapso, proporcionando una visión más completa y precisa de las deformaciones iniciales y su impacto.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de detección de pequeñas deformaciones en un modelo de puente mediante el uso de procesamiento digital de imágenes utilizando Matlab.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un modelo de puente utilizando materiales accesibles.
- Implementar técnicas de procesamiento digital de imágenes para la detección de deformaciones en MATLAB.
- Evaluar la precisión y efectividad del sistema mediante pruebas a diferentes distancias y resoluciones.
- Explorar aplicaciones futuras y mejoras del sistema.

2. Marco Teórico

2.1 Revisión de la literatura relevante relacionada con el tema del proyecto

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., 2015). 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 el ámbito de la ingeniería estructural, la detección y análisis de pequeñas deformaciones en modelos de puentes es crucial para asegurar la integridad y seguridad de las construcciones. A pesar de su importancia, actualmente no existen procedimientos, algoritmos o metodologías estandarizadas que permitan medir de forma precisa estas deformaciones durante los estudios y concursos de estructuras. Este vacío limita la capacidad de los ingenieros para entender completamente el comportamiento de los materiales y las estructuras bajo diversas condiciones de carga.

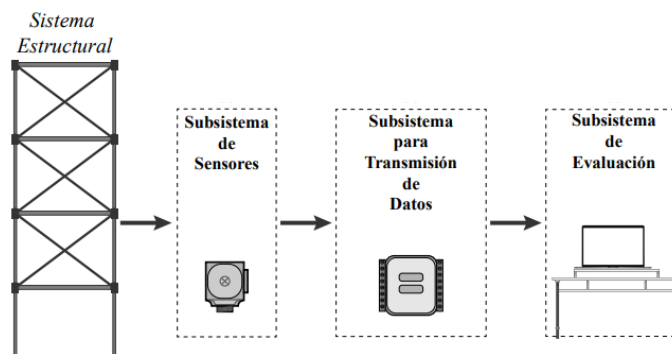


Figura 1 Esquema general de un sistema para Monitoreo de Salud Estructural.

En el monitoreo de estructuras civiles, las variables físicas se dividen en tres categorías principales: cinemáticas, mecánicas y ambientales. Las variables cinemáticas, como el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, se utilizan comúnmente para evaluar la condición general de las estructuras. Las variables mecánicas se enfocan en medir las propiedades de los materiales, como la fatiga, la deformación y las fuerzas aplicadas, siendo esenciales para evaluar la integridad y el rendimiento de los elementos críticos de las estructuras. Las variables ambientales, como la temperatura y el viento, ayudan a compensar las variaciones en las propiedades de los materiales debido a las condiciones cambiantes (Moreno-Gomez et al., 2018).

Asimismo, las tecnologías y dispositivos en los subsistemas de medición abarcan una variedad de sensores, incluyendo capacitivos, piezoeléctricos, galgas extensiométricas y celdas electrolíticas. También se utilizan dispositivos como servomecanismos, giroscopios, anemómetros, detectores de temperatura por resistencia (RTD), sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID), sistemas microelectromecánicos (MEMS), vibrómetros láser de efecto Doppler (LDV), transformadores diferenciales variables lineales (LVDT) y sistemas de posicionamiento global (GPS). Todos estos dispositivos emplean principios físicos eléctricos y mecánicos para obtener señales relacionadas con la dinámica estructural.

2.2 Explicación de los conceptos teóricos necesarios para entender el estudio

Para entender a fondo este estudio sobre la detección de pequeñas deformaciones en estructuras mediante procesamiento de imágenes, es crucial familiarizarse con varios conceptos teóricos clave. Aquí se describen los principales conceptos involucrados:

2.2.1 Procesamiento Digital de Imágenes

El procesamiento digital de imágenes se refiere a la manipulación de imágenes digitales a través de algoritmos computacionales. En este estudio, utilizamos técnicas de procesamiento de imágenes para detectar y analizar deformaciones en un modelo de puente. Los pasos básicos incluyen la captura de imágenes, preprocesamiento (como la eliminación de ruido y la corrección de iluminación), y el análisis de las imágenes para identificar cambios o deformaciones.

2.2.2 Tipos de imágenes utilizadas en el análisis

Existen diversas modalidades de imágenes, algunas de ellas incluyen RGB, escala de grises y binarias, para asegurar una detección precisa y robusta de las deformaciones:

Imágenes RGB: Estas imágenes proporcionan información detallada y en color de la superficie.

Imágenes en Escala de Grises: Simplificando la información a un solo canal de intensidad, las imágenes en escala de grises reducen la complejidad computacional y pueden mejorar la precisión del análisis en condiciones de iluminación variables.

Imágenes Binarias: Convertir las imágenes a un formato binario, donde los píxeles se representan solo en blanco y negro, permite un análisis más rápido y puede ayudar a destacar las áreas de deformación más claramente.

2.2.3 Sensores Ópticos y Cámaras de Alta Resolución

Los sensores ópticos, como los utilizados en cámaras de alta resolución, son esenciales para capturar imágenes detalladas necesarias para el análisis de deformaciones. En este proyecto, utilizamos cámaras como la Blackfly S BFS-U3-63S4M, que ofrece alta resolución y velocidad de captura.

2.2.4 Matlab y Herramientas de Procesamiento de Imágenes

Matlab es una herramienta potente para el procesamiento y análisis de datos, especialmente en el ámbito del procesamiento de imágenes. Este software permite la implementación de algoritmos de procesamiento de imágenes, la visualización de resultados y la realización de cálculos complejos necesarios para el análisis de deformaciones. En este proyecto, Matlab se utiliza para desarrollar y ejecutar los algoritmos necesarios para detectar y analizar deformaciones en tiempo real.

2.2.5 Consideraciones de Iluminación

La iluminación es un factor crítico en el procesamiento de imágenes, ya que las condiciones de iluminación pueden afectar significativamente la calidad de las imágenes capturadas y, por ende, la precisión del análisis. Este estudio incluye la consideración de diferentes condiciones de iluminación para garantizar que el sistema de detección de deformaciones funcione de manera confiable en diversas situaciones.

3. Métodos

3.1 Descripción detallada de cómo se llevó a cabo el estudio

El estudio se llevó a cabo utilizando un sistema de procesamiento digital de imágenes para detectar deformaciones en un modelo de puente (Anexo 1). Se emplearon diversos pasos y métodos como:

- ✓ Diseño y construcción del modelo de puente
- ✓ Configuración del Nivelador y Medidor de Distancia
- ✓ Diseño y Preparación del Experimento
- ✓ Captura de imágenes
- ✓ Procesamiento de imágenes
- ✓ Validación y evaluación

3.2 Explicación de los materiales y métodos utilizados

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron diversos materiales y métodos el cual se detalla de mejor forma en el Anexo 2.

Cámaras y Equipos:

- Lentes:
 - FUJINON LENS OBJECTIF / HF25HA-1S / F1.4/25mm
 - TAMRON / Lens IP/CCTV
- Nivelador:
 - BOSCH / Self-Leveling Cross-Line Laser / GLL 30 S
- Medidor de distancia láser:
 - BOSCH / Medidor de distancia láser / GLM165-10
- Cámara de alta resolución:
 - Model: Blackfly S BFS-U3-63S4M
- Cámara web:
 - UGREEN Cámara Web HD con Micrófono, 1080P@30FPS, Plug&Play, HD Corrección de Luz Automática, Cámara Web de Vídeo USB
 - Blackfly S USB3 Modelo: BFS-U3-63S4M-C: 6,3 MP, 59,6 FPS, Sony IMX178, monocromático
- Puente:

Estas dimensiones incluyen la longitud, el ancho y la altura del puente.

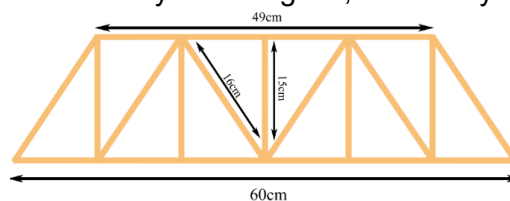


Figura 2 Dimensiones del puente

3.3 Procedimientos experimentales

Para llevar a cabo este estudio, se realizaron pruebas experimentales con un modelo de puente a diferentes distancias (Anexo 3), utilizando una cámara industrial ya que la cámara UGREEN solo fue para entrenamiento. El objetivo fue validar la efectividad del sistema de detección de deformaciones, empleando imágenes en escala de grises y binarias para facilitar un procesamiento digital más rápido.

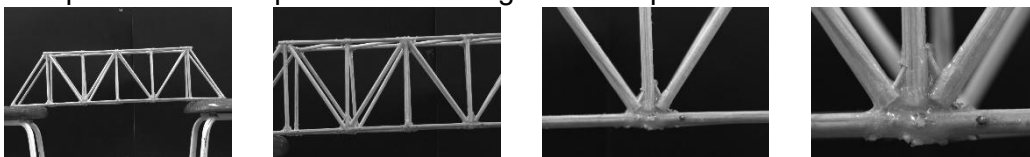


Figura 3 Tomas a distintas distancias del puente

4. Resultados

Se realizó la comparación de desplazamiento estructural, llevé a cabo una serie de capturas a diferentes distancias y en distintas cantidades (Anexo 4).

4.1 Presentación de los datos obtenidos durante el estudio

Este gráfico ilustra la relación directa entre la carga aplicada y la deformación medida. En el eje X se representan el desplazamiento entre la primera imagen con la toma n como se muestra hubo un cambio, mientras que en el eje Y se muestran la intensidad lumínica registradas, observando que no es la misma en cada punto, sin embargo, tenemos casi la misma tendencia.

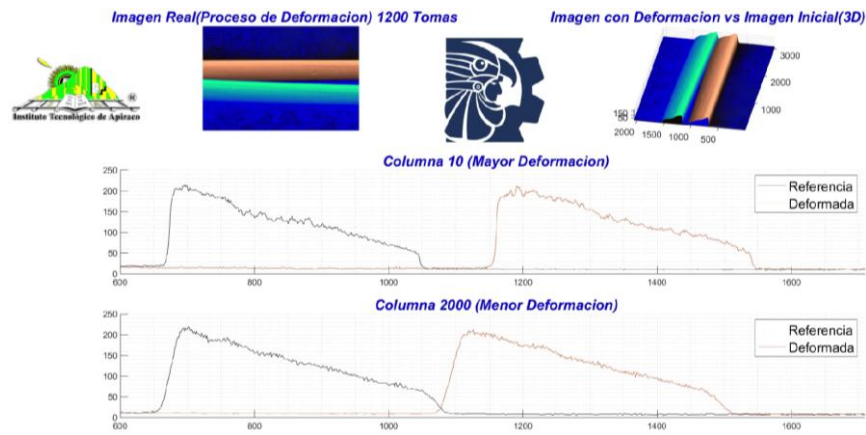


Figura 4 Grafica ilustrativa de la deformación

En el Anexo 5, encontrarás un enlace a un video que muestra cómo se comporta el material en términos de deformación y vibración, basado en el trabajo realizado.

4.2 Uso de tablas, gráficos u otros medios visuales para facilitar la comprensión

El gráfico presentado muestra la "Diferencia Binarizada" en función del número de tomas realizadas durante el experimento.

Eje X (Número de Toma): Este eje representa la secuencia de imágenes capturadas durante el experimento, numeradas consecutivamente. Cada punto en el eje X corresponde a una imagen específica dentro de la serie temporal.

Eje Y (Desplazamiento): Este eje muestra el desplazamiento medido, que es la diferencia entre la imagen inicial (primera toma) y la imagen correspondiente en la secuencia temporal.

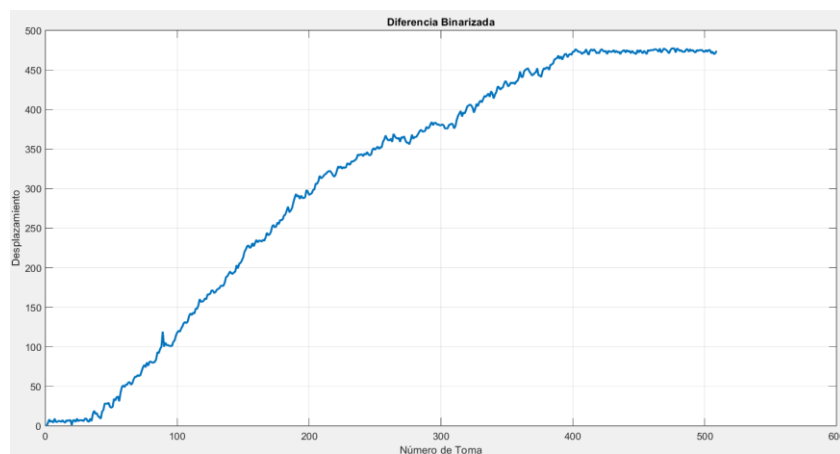


Figura 5 Comparación de desplazamiento: foto binaria con toma 0 como referencia

5. Discusión

5.1 Interpretación de los resultados obtenidos

El gráfico muestra una tendencia ascendente continua, indicando una deformación creciente de la estructura a medida que se aplican fuerzas. Los picos representan momentos en los que la resistencia del material es probada significativamente, mientras que los valles sugieren momentos de relajación relativa. Esta descripción se detalla mejor en el Anexo 6.

5.2 Comparación con la literatura existente

En estudios previos, como los realizados por Chen et al. (2015) y Feng y Feng (2018), se utilizaron técnicas de procesamiento de imágenes para la detección de desplazamientos estructurales con resultados comparables. Chen et al. (2015) lograron identificar modos modales de estructuras simples utilizando video de alta velocidad y magnificación de movimiento, mientras que Feng y Feng (2018) revisaron el uso de la visión computarizada para el monitoreo de la salud estructural, destacando su efectividad en la detección de respuestas dinámicas y daños estructurales.

5.3 Explicación de las implicaciones de los hallazgos

Los hallazgos de este estudio sobre la detección de pequeñas deformaciones tienen varias implicaciones importantes para la ingeniería estructural y el monitoreo de infraestructuras. Se mencionan a continuación, sin embargo, se detalla en el Anexo 7:

- Precisión y fiabilidad del sistema.
- Optimización de procedimientos de monitoreo.
- Interferencia del fondo y desenfoque en escala de grises.
- Evaluación de la capacidad de carga y comportamiento estructural.
- Potencial para futuras investigaciones.

5.4 Limitaciones del estudio y posibles áreas para futuras investigaciones

El estudio presentó varias limitaciones que afectaron, tal es el caso de la sobresaturación de algunas tomas. Además, la implementación en tiempo real (faltando permisos del software) y el procesamiento de datos intensivos exigieron soluciones específicas (Anexo 8).

Limitaciones del estudio

- Interferencia de objetos en imágenes en escala de grises.
- Variabilidad en las condiciones de iluminación.
- Resolución y distancia de captura en la cámara web.
- Permisos de software para implementarse en tiempo real.
- Equipo rápido por la densidad de datos.
- Imagen a color y tiempo de cómputo.
- Cuidado en capturar imágenes no saturadas.
- Amplificación y tipos de lentes.

Posibles áreas para futuras investigaciones

- Optimización del preprocesamiento de imágenes.
- Uso de imágenes a color y técnicas avanzadas.
- Aplicación de técnicas de aprendizaje automático.
- Integración con sistemas de monitoreo en tiempo real.
- Análisis de resistencia de materiales.

6. Conclusiones

Al explorar y validar la capacidad de detectar mínimas deformaciones en estructuras. A través de un enfoque meticuloso en la captura y análisis de imágenes, hemos podido identificar deformaciones con una alta precisión, esto permitiendo incluso bajar las cargas haciéndolas aún más pequeñas y seguir notando la deformación.

6.1 Resumen de los hallazgos principales

El estudio demostró que es efectivo para detectar pequeñas deformaciones. Los resultados confirmaron que, a medida que se aplicaba carga por mínima que fuera y no era notoria para el ojo humano, la deformación aumentaba proporcionalmente. El análisis mostró una alta precisión en la detección de deformaciones, aunque las condiciones de iluminación provocaran saturación en las imágenes y los objetos desenfocados nos daba una diferencia para la captura binaria y en escala de grises no impidió observar que existía una deformación y seguía la misma tendencia. Comparado con estudios previos, la metodología empleada validó la capacidad del sistema para identificar cambios sutiles en la estructura con un rendimiento comparable.

6.2 Respuesta a los objetivos planteados al inicio del proyecto

El sistema de detección de pequeñas deformaciones se desarrolló con éxito. Se emplearon diferentes modalidades de imágenes, como escala de grises y binarias, para mejorar la precisión y eficacia del análisis. La implementación permitió la detección efectiva de deformaciones menores en el modelo de puente, validando la capacidad del sistema para operar en tiempo real y ofrecer resultados precisos.

Objetivos Específicos:

Diseñar y construir un modelo de puente utilizando materiales accesibles: Se diseñó y construyó un modelo de puente, lo que permitió realizar pruebas experimentales en un entorno controlado y manejable. Este modelo sirvió como base para aplicar y evaluar las técnicas de detección de deformaciones.

Implementar técnicas de procesamiento digital de imágenes para la detección de deformaciones en MATLAB: Se implementaron técnicas de procesamiento digital de imágenes en MATLAB, incluyendo el análisis de imágenes en escala de grises y binarias. Esto permitió una evaluación detallada de las deformaciones en el modelo de puente, optimizando la detección y análisis de pequeñas deformaciones.

Evaluar la precisión y efectividad del sistema mediante pruebas a diferentes distancias y resoluciones: Se llevaron a cabo pruebas a diversas distancias para evaluar la precisión y efectividad del sistema. Las imágenes binarias demostraron ser más precisas para la detección de deformaciones, mientras que las pruebas a diferentes distancias ayudaron a verificar que a menor distancia es más evidente la deformación.

Explorar aplicaciones futuras y mejoras del sistema: Se exploraron posibles aplicaciones futuras y mejoras del sistema, incluyendo la optimización del preprocesamiento de imágenes, el uso de técnicas avanzadas como el aprendizaje automático, y la integración con sistemas de monitoreo en tiempo real. Estas direcciones futuras prometen aumentar la precisión y la aplicabilidad del sistema en diferentes contextos y condiciones.

7. Referencias Bibliográficas

- 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
- 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-Rodriguez, 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-Rodriguez, 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-Rodriguez, 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>

8. Anexos

Anexo 1

1._ Diseño y Construcción del Modelo de Puente

Selección de Materiales:

- Elementos de madera: Utilizamos palos de madera con un diámetro específico para asegurar la estabilidad y resistencia del puente.
- Resistol Blanco: Empleado para unir las diferentes partes del puente, asegurando una adhesión fuerte y duradera.
- Refuerzos con palillos de madera caseros: En cada nodo de unión, se reforzaron los puntos de conexión con palillos de madera adicionales para aumentar la estabilidad estructural del puente.

Detalles Constructivos

1. Base y Tapa: La base y la tapa del puente se construyeron primero, ensamblándolas de manera similar a una escalera. Cada "peldaño" de estas estructuras está formado por palos de madera unidos a intervalos regulares.

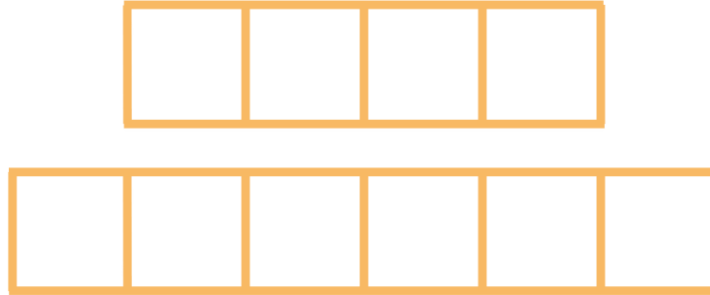


Figura 6 Estructura de la base y tapa del puente

2. Sección Transversal: Una vez completadas la base y la tapa, se conectaron transversalmente utilizando palos adicionales, formando una estructura reticulada que proporciona resistencia y rigidez al puente.



Figura 7 Estructura de la base y tapa del puente con sección transversal

3. Laterales: Con la sección transversal completa, la base y la tapa se pegarán para formar los laterales del puente. Estos laterales son esenciales para la distribución de las cargas y la integridad estructural del modelo.



Figura 8 Estructura con laterales del puente

4. Puente: Se muestra el resultado del puente terminado.

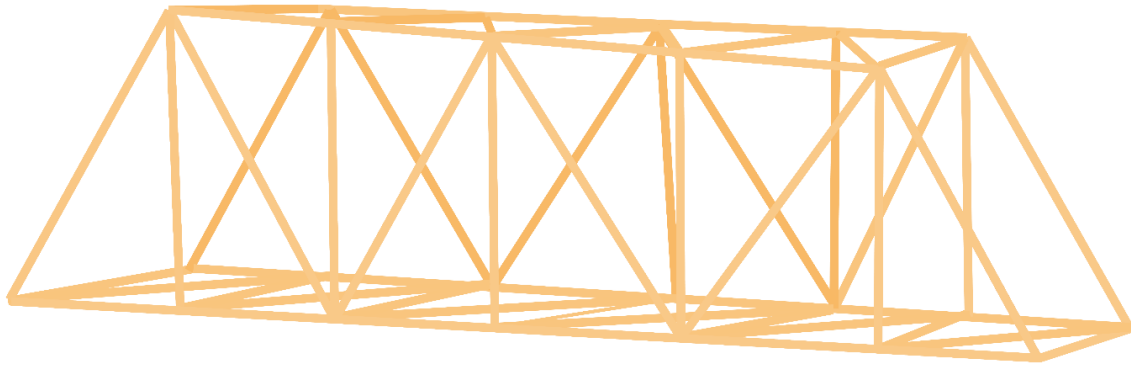


Figura 9 Estructura del puente terminada

2._ Configuración del Nivelador y Medidor de Distancia:

Nivelador BOSCH Self-Leveling Cross-Line Laser GLL 30 S: Se utilizó para asegurar que las cámaras y el modelo de puente estuvieran perfectamente alineados, minimizando errores debidos a inclinaciones.

Medidor de distancia láser BOSCH GLM165-10: Este dispositivo ayudó a medir y registrar distancias precisas entre las cámaras y el modelo, asegurando una configuración consistente durante las pruebas.

3._ Diseño y Preparación del Experimento:

Construcción del Modelo de Puente: Se construyó un modelo de puente. El modelo se reforzó para asegurar que las pequeñas deformaciones pudieran ser detectadas claramente, aunque el ojo humano no lo notara.

Configuración de Equipos: Se instalaron las cámaras y lentes en posiciones estratégicas alrededor del modelo de puente. El nivelador láser BOSCH se utilizó para garantizar que todo el equipo estuviera correctamente alineado.

4._ Captura de Imágenes:

Imágenes de Referencia: Se capturaron imágenes del modelo de puente en su estado inicial, sin cargas aplicadas. Estas imágenes sirvieron como base para detectar cambios y deformaciones.

Aplicación de Cargas: Se aplicaron cargas incrementales al modelo de puente para inducir deformaciones. Después de cada incremento de carga, se capturaron nuevas imágenes utilizando las cámaras de alta resolución.

5._ Procesamiento de Imágenes:

Preprocesamiento: Las imágenes capturadas se importaron a MATLAB, donde se transformaron a escala de grises y binarias. Este preprocesamiento incluyó ajustes para optimizar el contraste y reducir el ruido, lo que facilitó un análisis más claro y preciso de las deformaciones. La conversión a estas modalidades mejoró la calidad visual y permitió una detección más eficiente de las deformaciones.

Escala de Grises con Luminiscencia de 110: En el caso de las imágenes en escala de grises, se ajusta el brillo y el contraste para que el valor de

luminiscencia sea 110. Este ajuste se realiza para destacar las diferencias en la intensidad de las imágenes y mejorar la visibilidad de las deformaciones. La luminiscencia se utiliza para filtrar y resaltar las características relevantes, facilitando la detección de deformaciones al convertir las imágenes en una escala de gris donde el valor 110 representa un punto de referencia importante.

Imágenes Binarias con Umbral de 1: En el caso de las imágenes binarias, se aplica una binarización utilizando un umbral de 1. Esto implica que los píxeles con un valor superior al umbral (en este caso, mayor que 1) se convierten en blanco (valor 1), y los píxeles con un valor igual o menor al umbral se convierten en negro (valor 0). Este método simplifica la imagen a dos colores, facilitando la identificación clara de áreas de deformación y resaltando las diferencias estructurales en el modelo de puente. La binarización hace que el análisis sea más rápido y directo, al eliminar detalles irrelevantes y enfocarse en las áreas críticas.

6._ Validación y Evaluación:

Pruebas de Repetibilidad: Se realizaron múltiples pruebas para asegurar que los resultados fueran consistentes y reproducibles.

Comparación con Métodos Tradicionales: Se compararon los resultados obtenidos mediante procesamiento de imágenes con métodos de medición tradicionales para evaluar la precisión del sistema.

Anexo 2

Materiales Utilizados

a) Cámaras de Alta Resolución:

- Blackfly S BFS-U3-63S4M: Esta cámara tiene una resolución de 6.3 megapíxeles y puede capturar hasta 59.6 fotogramas por segundo (FPS), utilizando el sensor Sony IMX178 monocromático. Esta cámara es ideal para capturar imágenes detalladas de las estructuras bajo estudio.



Figura 10 Cámara Blackfly S BFS-U3-63S4M

- UGREEN Cámara Web HD: Con resolución de 1080P a 30FPS y corrección automática de luz, esta cámara proporciona imágenes adicionales útiles en diferentes condiciones de iluminación. Esta cámara solo se utilizara como entrenamiento.



Figura 11 UGREEN Cámara Web HD

b) Lentes:

- FUJINON LENS OBJECTIF HF25HA-1S: Lente con apertura F1.4 y distancia focal de 25mm, adecuado para obtener imágenes de alta calidad y precisión.



Figura 12 Lente FUJINON LENS OBJECTIF HF25HA-1S

- Lente TAMRON IP/CCTV: Utilizado para asegurar claridad y nitidez en las imágenes capturadas.



Figura 13 Lente TAMRON IP/CCTV

c) Nivelador:

BOSCH Self-Leveling Cross-Line Laser GLL 30 S: Este nivelador láser auto-nivelante se utilizó para alinear correctamente las cámaras y el modelo de puente, garantizando que las imágenes capturadas sean consistentes y precisas.



Figura 14 Nivelador BOSCH Self-Leveling Cross-Line Laser GLL 30 S

d) Medidor de Distancia Láser:

BOSCH GLM165-10: Medidor de distancia láser utilizado para medir y registrar distancias precisas entre las cámaras y el modelo de puente, asegurando una configuración exacta y repetible.



Figura 15 Medidor de distancia BOSCH GLM165-10

Método Utilizado

Procesamiento de Imágenes en Matlab

Las imágenes capturadas se importaron a Matlab. Se aplicaron técnicas de preprocesamiento.

Código:

Este código de MATLAB está diseñado para leer, procesar y visualizar una serie de imágenes desde una carpeta específica, mostrando cada imagen y su histograma de escala de grises de manera secuencial. Además, se añade la visualización de la versión binarizada de cada imagen junto con su histograma correspondiente.

Lectura de Imágenes:

- Se define la carpeta que contiene las imágenes a procesar.
- Se verifica que existan imágenes en la carpeta especificada.
- Se leen y procesan las imágenes una por una.

Conversión a Escala de Grises:

Si una imagen no está en escala de grises, se convierte.

Conversión a Binaria:

Se convierte en 0 y 1.

Cálculo del Histograma:

Para cada imagen, se calcula el histograma de escala de grises, que representa la distribución de los niveles de intensidad en la imagen.

```
clear all  
clc
```

```
% Definir la carpeta que contiene las imágenes  
folder = 'D:\Pequeñas_Defo_01_07_24\Imagenes\Alan Estructura\Posicion 000  
79 cm';  
I = dir(fullfile(folder, '*.jpg'));
```

```
% Verificar si se encontraron imágenes en la carpeta  
if isempty(I)  
    error('No se encontraron imágenes en la carpeta especificada.');
```

```
end  
  
% Crear una figura para mostrar las imágenes y sus histogramas  
figure;
```

```
% Leer y procesar cada imagen  
for n = 1:numel(I)  
    % Leer la n-ésima imagen  
    nombre_n_imagen = fullfile(folder, I(n).name);  
    I_n = imread(nombre_n_imagen);
```

```
% Convertir a escala de grises si la imagen no lo está ya
```

```

if size(I_n, 3) == 3
    I_n = rgb2gray(I_n);
end

% Calcular el histograma de la imagen en escala de grises
histograma = imhist(I_n);

% Binarizar la imagen con un umbral global (Otsu)
nivel_umbral = graythresh(I_n);
I_n_binaria = imbinarize(I_n, nivel_umbral);

% Calcular el histograma de la imagen binarizada
histograma_binario = imhist(I_n_binaria);

% Limpiar los subplots para actualizar con nuevas imágenes y histogramas
subplot(2, 2, 1);
cla;
imshow(I_n);
title(sprintf('Imagen %d', n));

subplot(2, 2, 2);
cla;
bar(histograma);
title('Histograma de Escala de Grises');
xlabel('Intensidad de Gris');
ylabel('Frecuencia');

% Mostrar la imagen binarizada y su histograma
subplot(2, 2, 3);
cla;
imshow(I_n_binaria);
title(sprintf('Imagen Binaria %d', n));

subplot(2, 2, 4);
cla;
bar(histograma_binario);
title('Histograma Binario');
xlabel('Intensidad Binaria');
ylabel('Frecuencia');

% Pausar para permitir la visualización de la figura
pause(1);
end

```

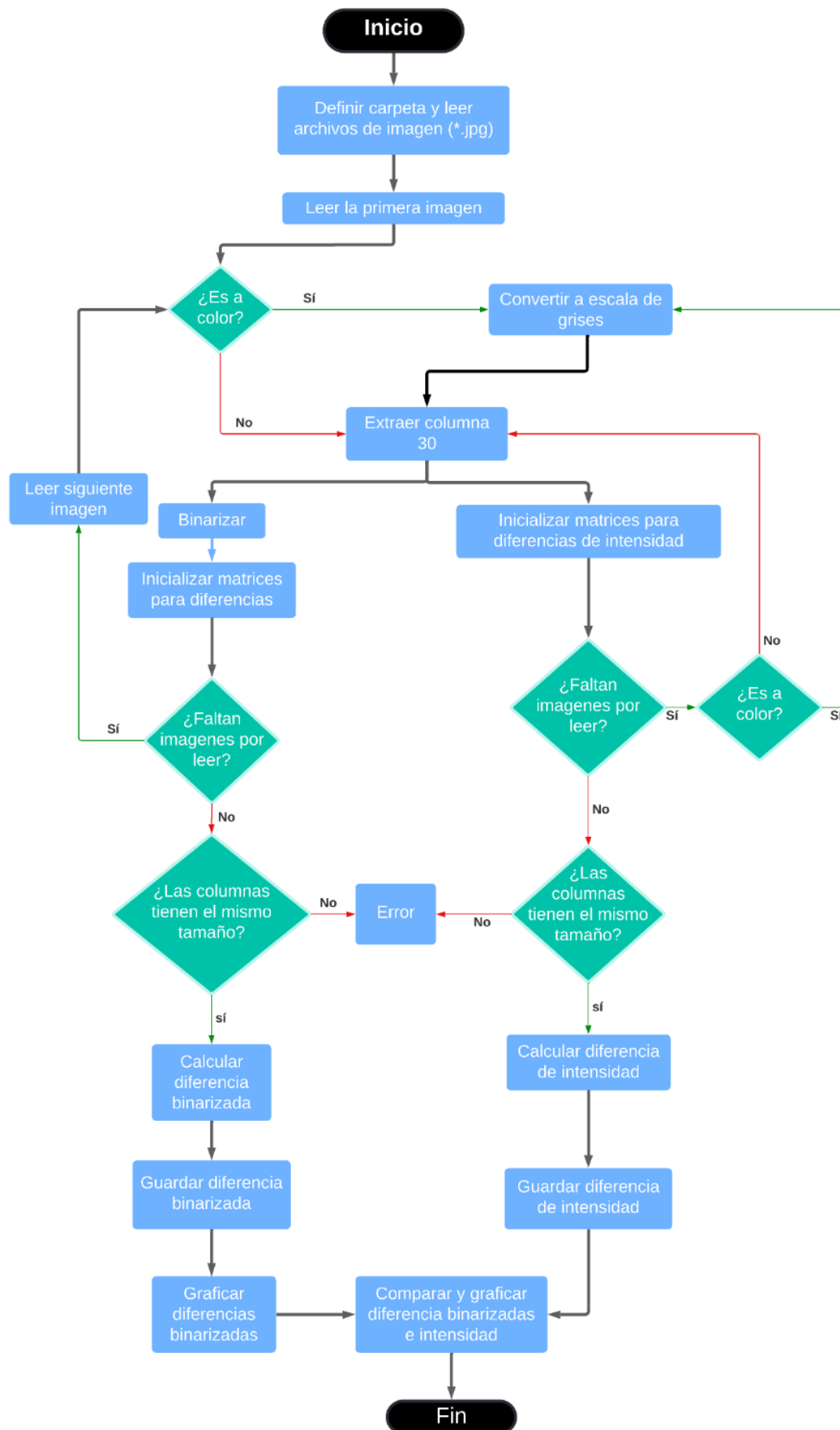


Figura 16 Diagrama de flujo del código

Anexo 3

Análisis del Potencial de Ampliación Óptica con Diferentes Distancias y Dimensiones:

En este estudio, evaluó el potencial de una técnica de ampliación óptica utilizando una cámara con dimensiones de 3072x2048 píxeles.

El objetivo de reducir el área de captura del puente en estas imágenes es centrarse en la identificación y el análisis de pequeñas deformaciones en la estructura. Al reducir el área capturada y acercarnos al puente, podemos observar detalles que serían difíciles de detectar en una imagen que muestra el 100% del puente. Esto permite una captura más visible y detallada de las deformaciones, lo que es crucial para el mantenimiento y la evaluación estructural. A continuación, se presentan las figuras que muestran imágenes del puente a diversas distancias, destacando cómo esta técnica permite mantener la misma densidad de píxeles mientras se varía la distancia.

Lente FUJINON LENS OBJECTIF HF25HA-1S

Como se puede observar en la Figura 17 muestra la vista completa del puente, capturando todos sus detalles en el campo de visión. La distancia de 2.228 metros permite una perspectiva amplia y global del puente, pero puede no ser suficiente para identificar pequeñas deformaciones debido a la menor resolución de los detalles finos.

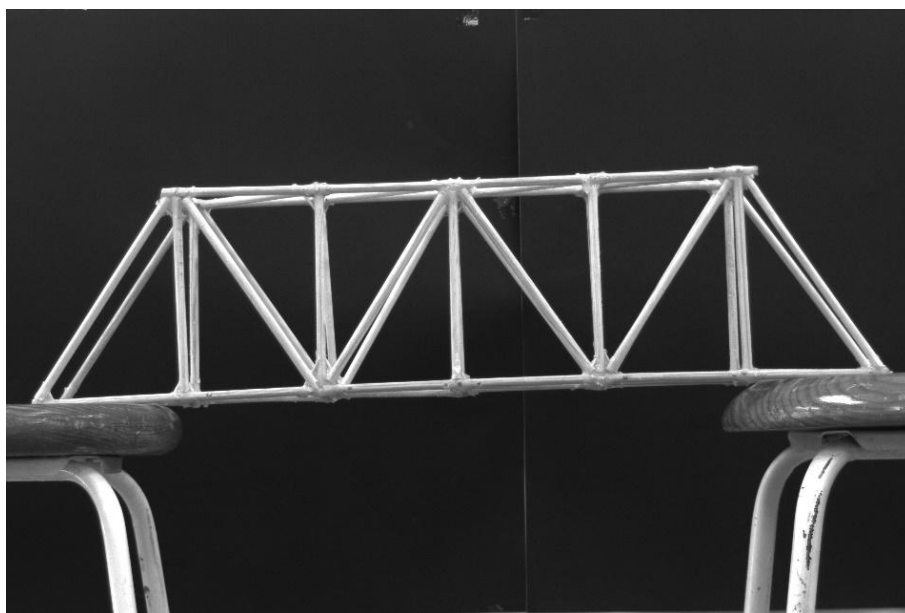


Figura 17 Foto del 100% del puente a una distancia de 2.228m

Al reducir la distancia a 1.624 metros, se observa un recorte de la imagen original, mostrando aproximadamente tres cuartas partes del puente. Esta perspectiva aún ofrece una vista amplia, pero con mayor detalle (Observar la Figura 18), facilitando la detección de pequeñas irregularidades.

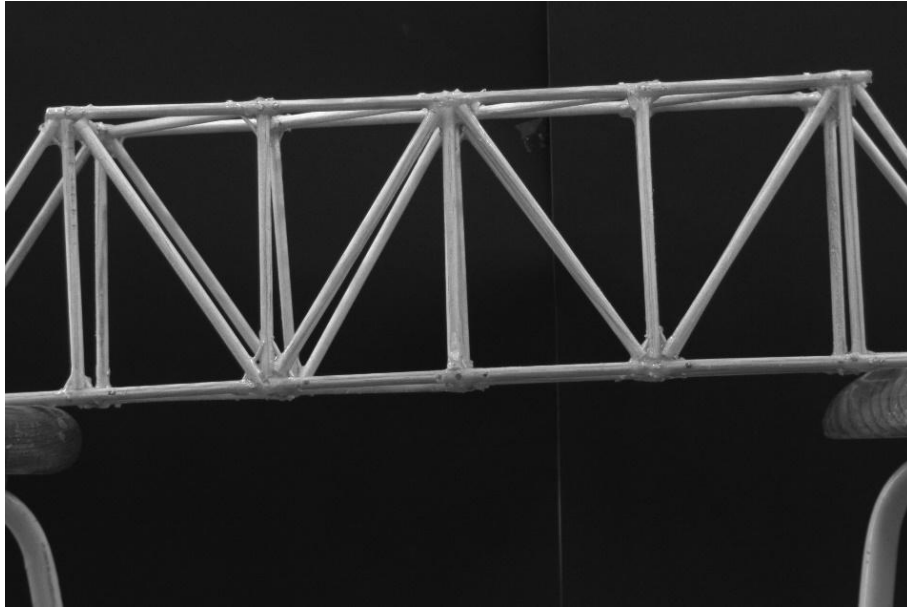


Figura 18 Foto del 75.83% aprox. del puente a una distancia de 1.624m

Siguiendo el mismo procedimiento estamos a una distancia de 1.296 metros, la imagen captura un poco más de la mitad del puente (Figura 19). Esto permite una inspección más detallada de la estructura sin perder el contexto general, lo cual es útil para identificar deformaciones más pequeñas.

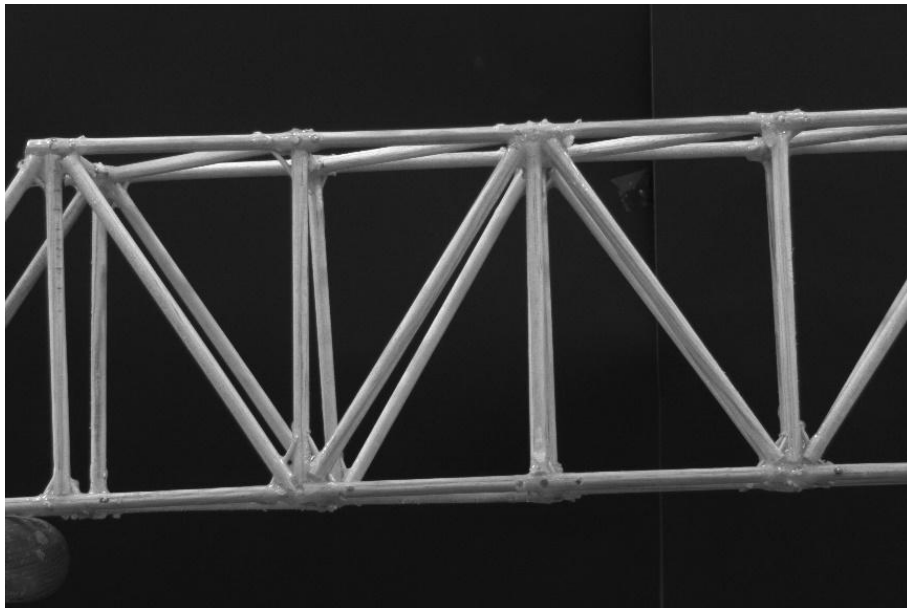


Figura 19 Foto del 59.56% aprox. del puente a una distancia de 1.296m

Para la Figura 20 que se muestra a continuación, se hizo una toma a 1.057 metros, mostrando menos de la mitad del puente. La vista se enfoca más en los detalles específicos, aumentando la capacidad de detectar pequeñas deformaciones.

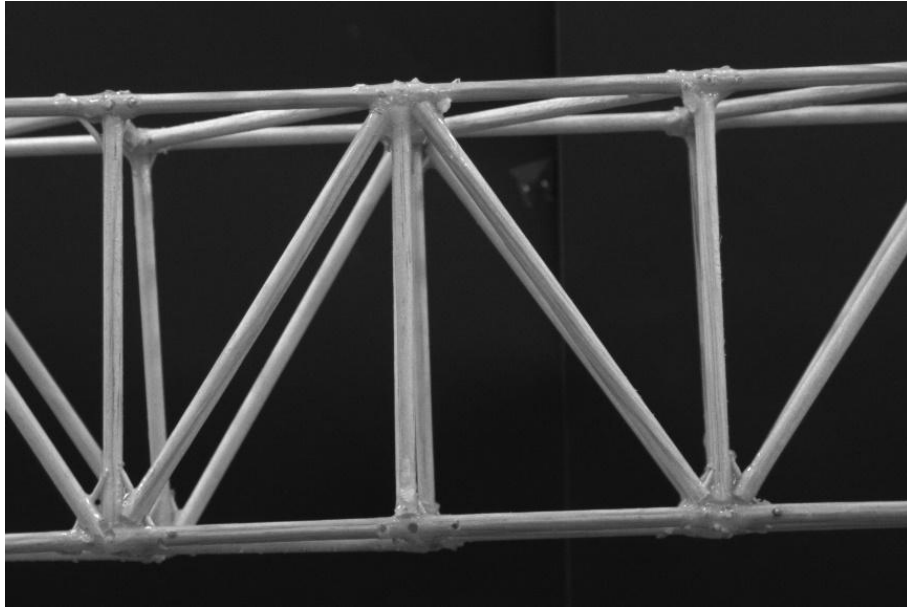


Figura 20 Foto del 45.46% aprox. del puente a una distancia de 1.057 m

A 0.350 metros, la Figura 21 captura una pequeña sección del puente, permitiendo una inspección cercana de los materiales y detalles estructurales. Esta ampliación es ideal para un análisis detallado de pequeñas deformaciones que serían invisibles en una vista más amplia.

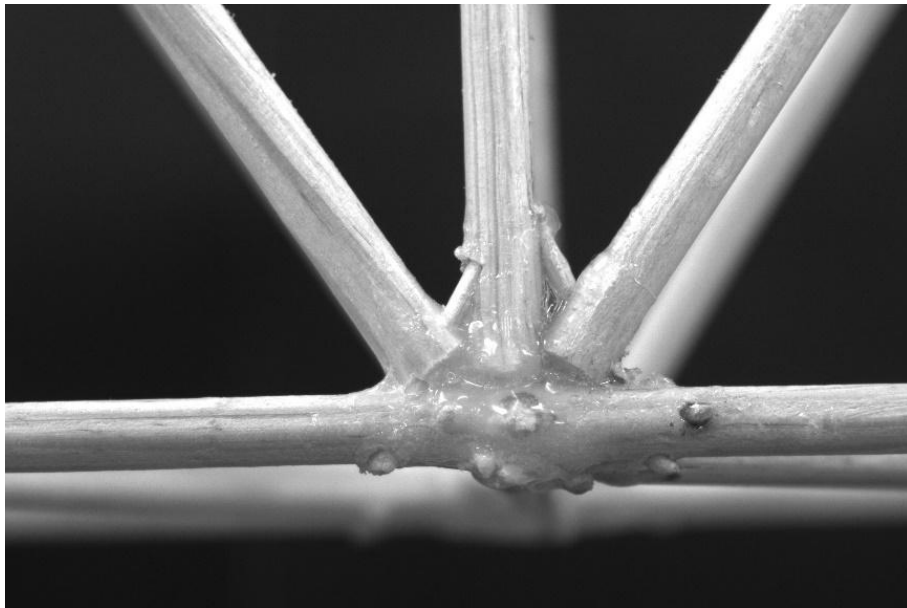


Figura 21 Foto del 4% aprox. del puente a una distancia de 0.350m

Con una distancia de 0.235 metros, se obtiene una imagen muy cercana que muestra solo el 1.6% del puente. Esta vista es extremadamente detallada, adecuada para estudios de microestructuras y pequeñas deformaciones (Observar Figura 22).

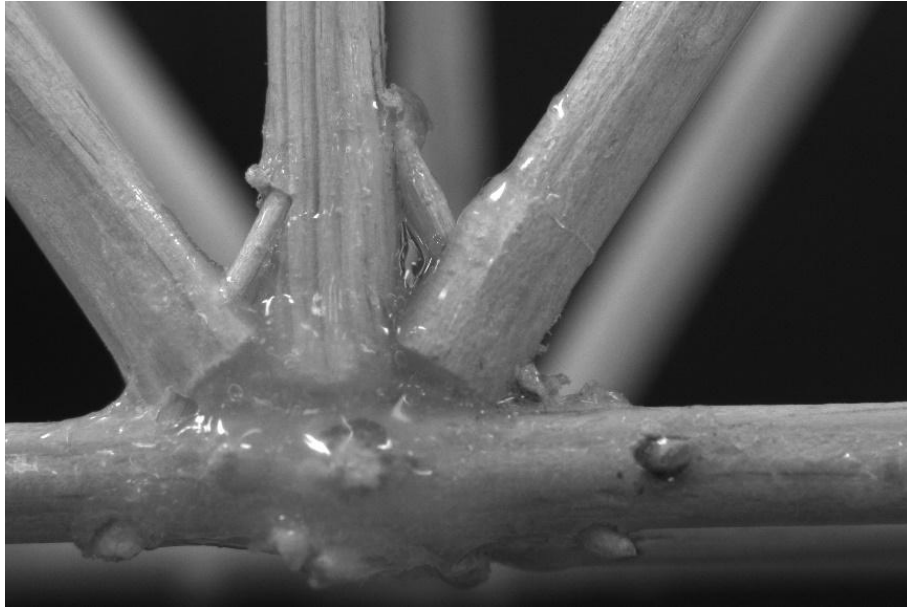


Figura 22 Foto del 1.6% aprox. del puente a una distancia de 0.235m

Lente TAMRON IP/CCTV

Similar a la Figura 17, esta imagen muestra nuevamente el puente completo, pero a una distancia ligeramente menor de 2.197 metros, lo que podría proporcionar una perspectiva ligeramente diferente, aunque aún no es suficiente para detectar pequeñas deformaciones (Figura 23).

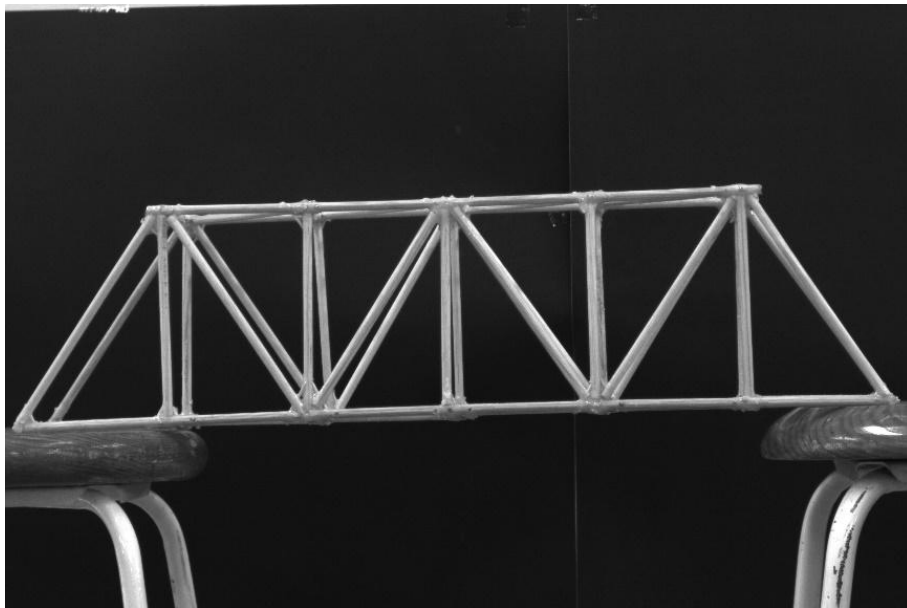


Figura 23 Foto del 100% del puente a una distancia de 2.197m

A 1.546 metros, se observa una parte significativa del puente, más de dos tercios. La Figura 24 combina una vista detallada con un buen contexto estructural, mejorando la visibilidad de deformaciones menores.

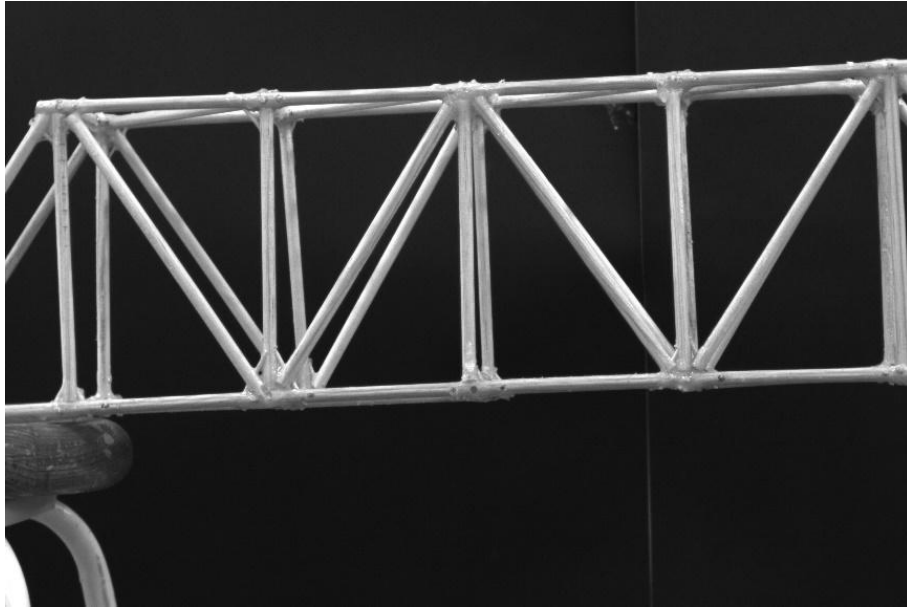


Figura 24 Foto del 68.79% aprox. del puente a una distancia de 1.546m

Se puede observar en la Figura 25 donde la cámara se ubica a 1.139 metros esta imagen muestra un poco más de la mitad del puente, proporcionando un equilibrio entre detalle y vista general, lo cual es útil para identificar pequeñas deformaciones en un área considerable.

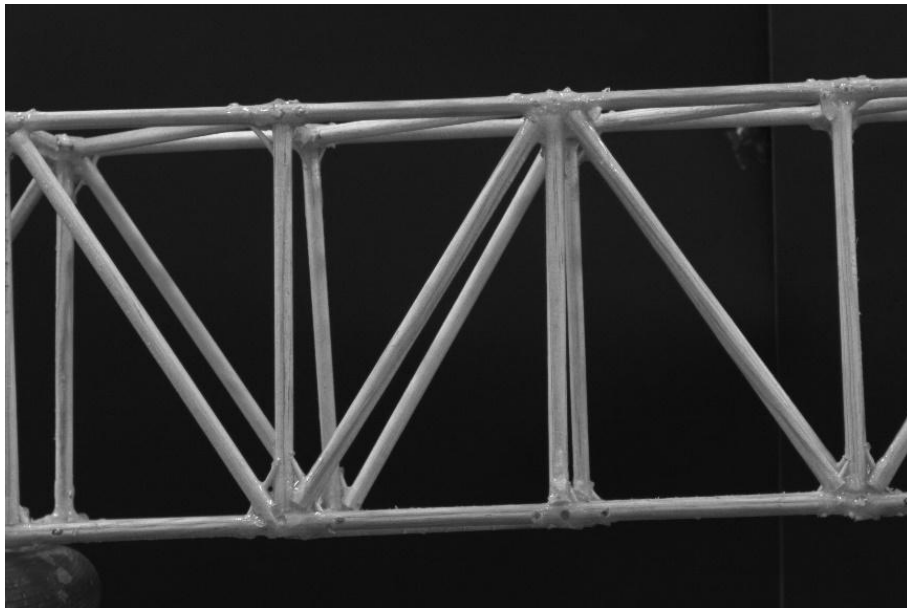


Figura 25 Foto del 52.01% aprox. del puente a una distancia de 1.139m

A una distancia de 0.753 metros, se captura aproximadamente un tercio del puente. La siguiente imagen (Figura 26) ofrece una vista más enfocada y detallada, ideal para análisis específicos de deformaciones.

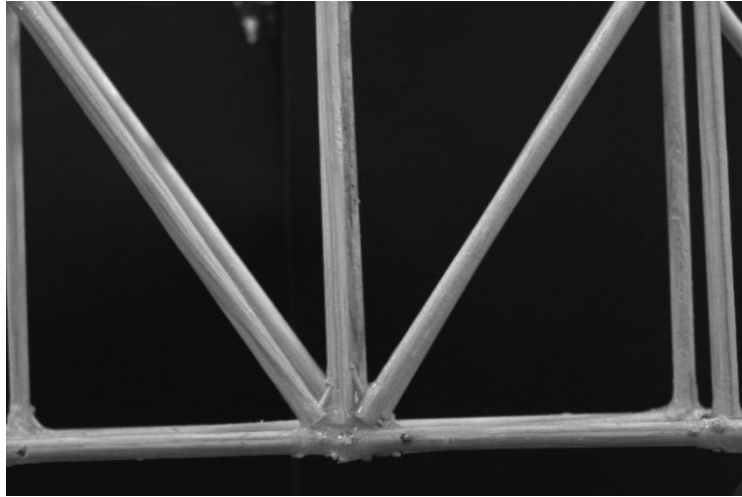


Figura 26 Foto del 33% aprox. del puente a una distancia de 0.753m

Con una distancia de 0.477 metros, la Figura 27 muestra una pequeña porción del puente, permitiendo una inspección detallada y cercana de su estructura, facilitando la detección de pequeñas deformaciones.

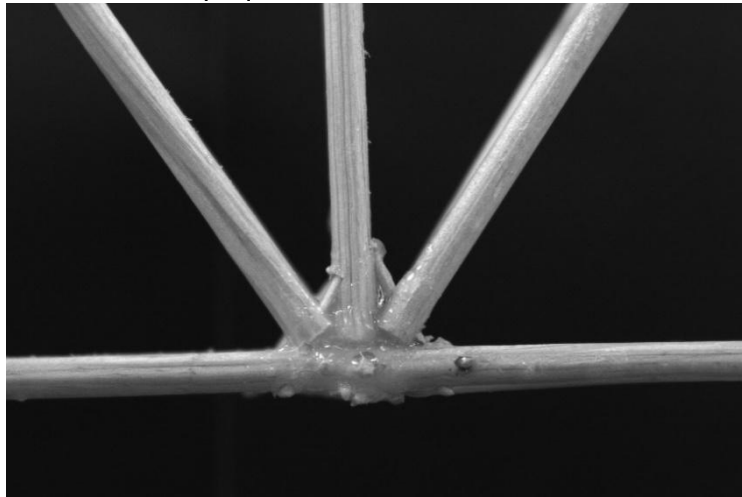


Figura 27 Foto del 5.77% aprox. del puente a una distancia de 0.477m

A 0.266 metros, en la Figura 28 se observa una sección muy pequeña del puente. Esta vista es extremadamente detallada y útil para análisis de componentes específicos y la detección de deformaciones mínimas.

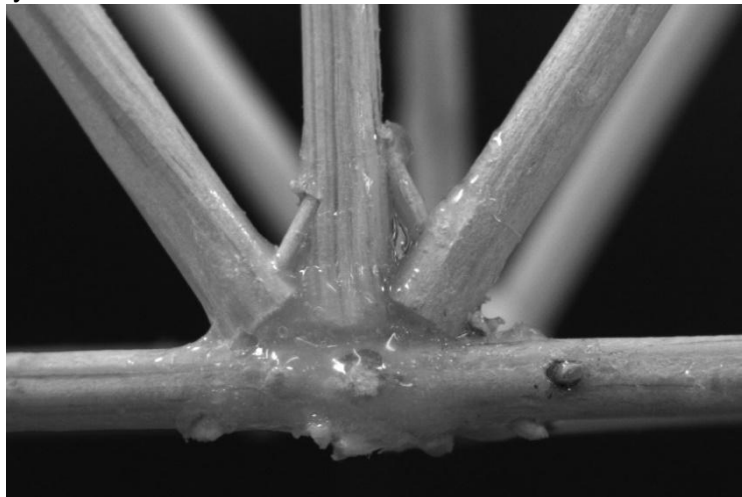


Figura 28 Foto del 1.94% aprox. del puente a una distancia de 0.266m

Finalmente, a una distancia de 0.171 metros, se obtiene en la Figura 29 donde se muestra solo el 0.5% del puente, dando la oportunidad de detectar con mayor facilidad y precisión las pequeñas deformaciones dentro de la estructura.

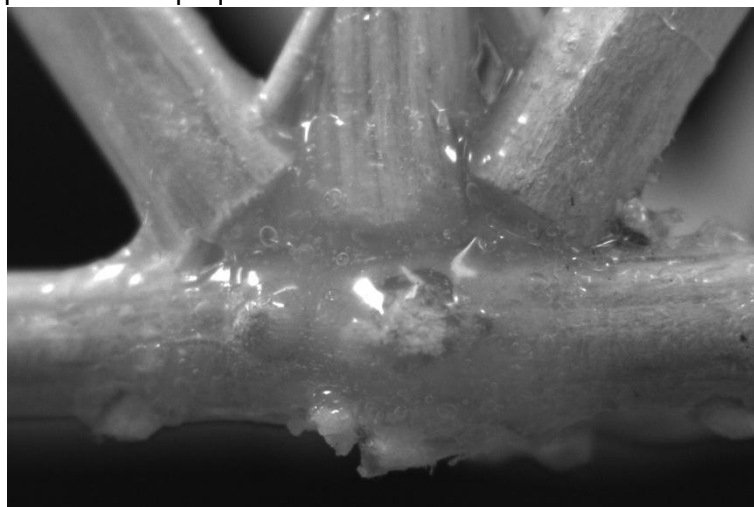


Figura 29 Foto del 0.5% aprox. del puente a una distancia de 0.171m

Estas figuras demuestran cómo la técnica de amplificación óptica permite capturar diferentes proporciones del puente desde diversas distancias, manteniendo una densidad de píxeles constante (3072x2048 en todas las imágenes). Reducir el área de captura es esencial para aplicaciones que requieren alta resolución y detalles precisos, como la identificación de pequeñas deformaciones, cruciales para el mantenimiento y la evaluación estructural.

Organización de Datos

Figura	Distancia (m)	Porcentaje capturado de la estructura total (%)
17	2.228	100
18	1.624	75.83
19	1.296	59.56
20	1.057	45.46
21	0.350	4
22	0.235	1.6

Tabla 1 Imagen con su distancia y porcentaje del lente FUJINON LENS OBJECTIF HF25HA-1S

Figura	Distancia (m)	Porcentaje capturado de la estructura total (%)
23	2.197	100
24	1.546	68.79
25	1.139	52.01
26	0.753	33
27	0.477	5.77
28	0.266	1.94
29	0.171	0.5

Tabla 2 Imagen con su distancia y porcentaje del lente TAMRON IP/CCTV

Anexo 4

En el laboratorio de Física del Instituto Tecnológico de Apizaco se llevó a cabo la captura de la deformación en donde se colocó sobre soportes la estructura a analizar y a continuación se llevó a cabo la captura de las correspondientes deformaciones, pero considerando una carga/peso distribuido sobre la estructura que fue el que yo ejercí siendo de un peso de 62kg aprox., por lo que sobre la estructura se colocó una tabla para distribuir el peso (proceso que se muestra en la Figura 30).



Figura 30 Proceso realizado para la captura de deformación

A continuación, se muestra el comportamiento de la deformación que tuvo el puente con la misma carga (una persona encima del puente) con diferentes distancias y dos tipos de lentes:

Lente FUJINON LENS OBJECTIF HF25HA-1S

- 1864 imágenes tomadas a una distancia de 79 cm.

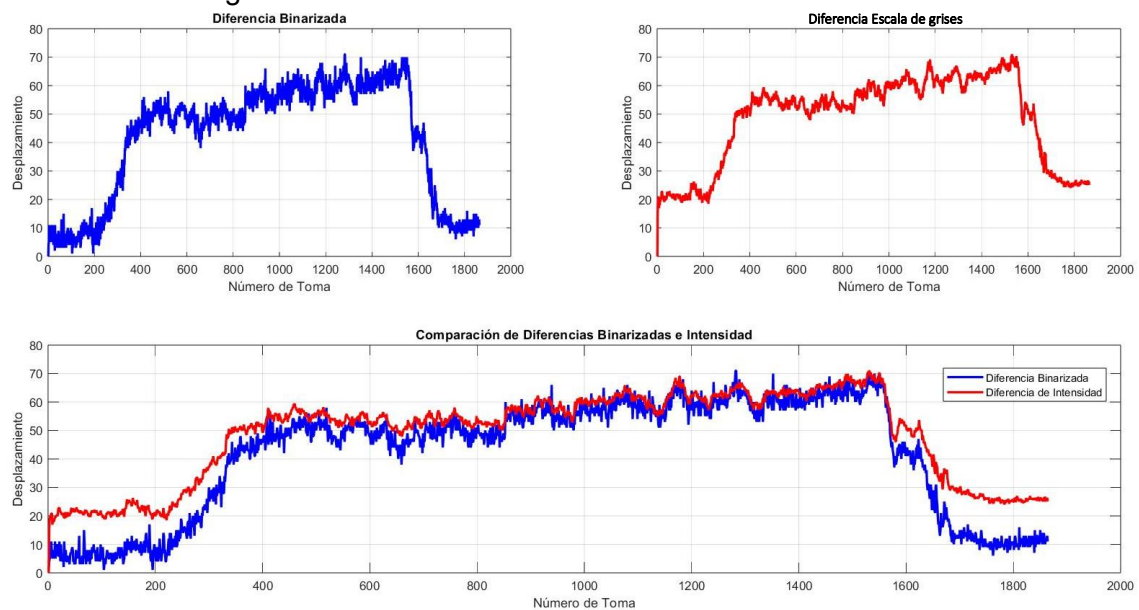


Figura 31 Grafica con 1864 imágenes tomadas a una distancia de 79 cm

Anexo 5

En este enlace se muestran 2 videos uno donde se muestra la deformación de todas las tomas y el otro muestra la vibración del material.

https://drive.google.com/drive/folders/1S2g5BysNlF8NIAAvH0o_wMZqc0xQIEO?usp=drive_link

Deformación:  **Deformacion.mp4** 

La referencia es la primera toma y va haciendo la comparación con las diferentes tomas

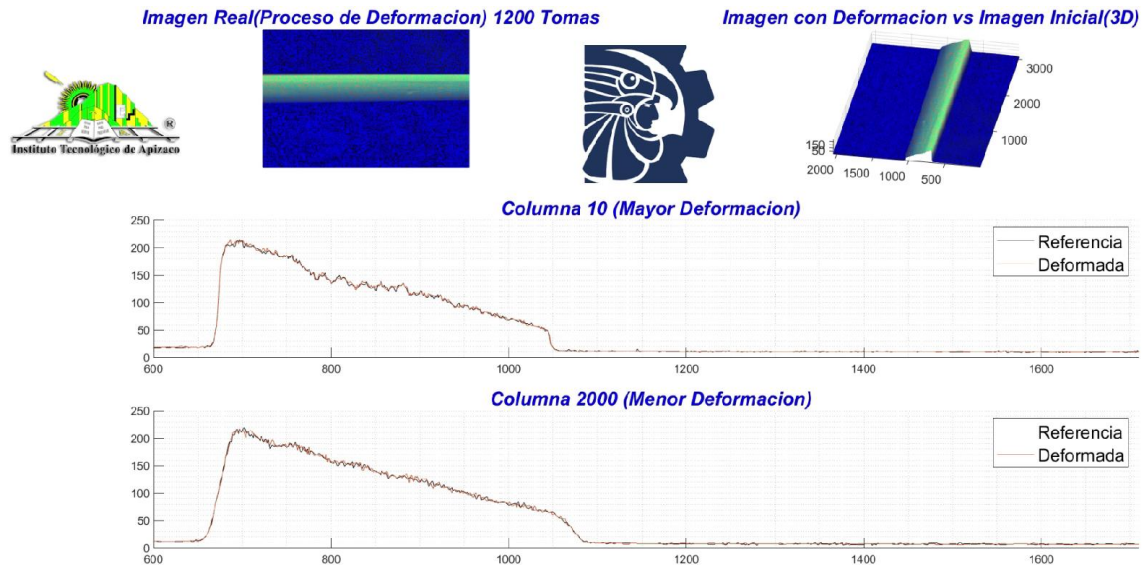


Figura 32 Deformación con referencia en la primera toma

1. Observe como la diferencia de la información inicial con respecto a la que se está deformando es mínima en las tomas iniciales eso indica que el método es tan sensible que puede distinguir esas pequeñas variaciones sin la necesidad de considerar una carga con gran magnitud.
2. En la animación se muestra la oscilación de la información que se está deformando esto comprueba lo explicado en las gráficas (Figura 39).

Vibración:  **Vibracion.mp4** 

Otra aplicación del meto desarrollado consiste en lo siguiente:

De todas las tomas adquiridas (ejemplo 1800 tomas) se toma como referencia justo la que se encuentra a la mitad (toma 900) y a continuación se analiza con cualquier otra toma restante tomada al azar, eso implica que el desplazamiento puede encontrarse a la derecha o la izquierda de la referencia y con una diferencia mínima o máxima todo este proceso generaría una vibración aleatoria la cual se muestra en la animación llamada "vibración".

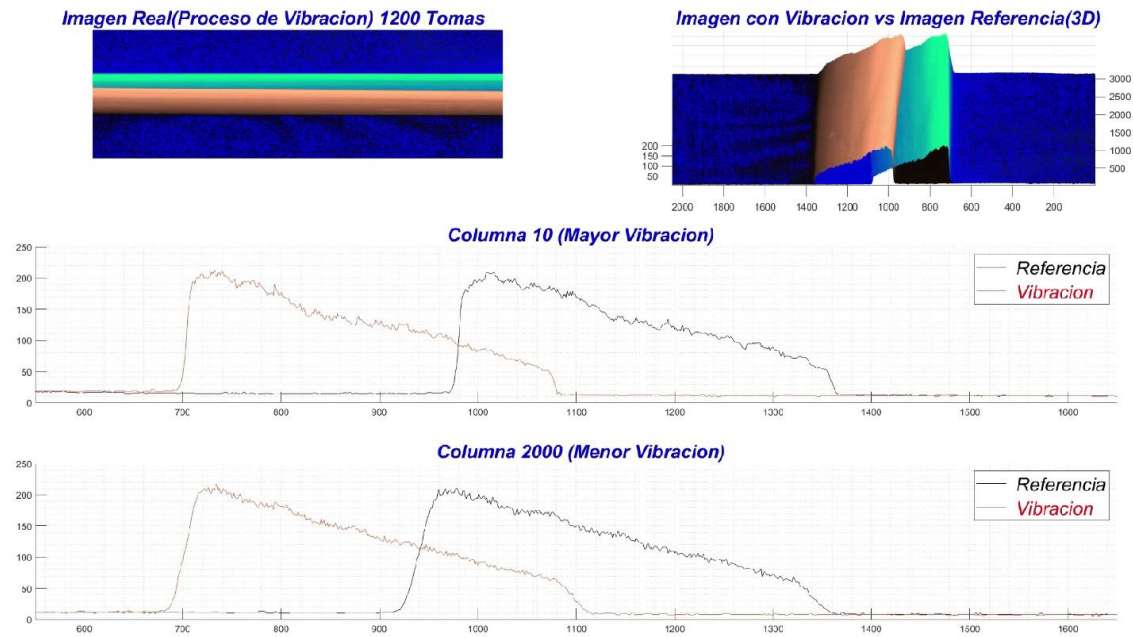


Figura 33 Vibración con referencia a la mitad de las tomas

Anexo 6

En la imagen se muestra una comparación entre la intensidad de una columna de la imagen en escala de grises y su versión binarizada. La línea azul representa la intensidad original en escala de grises, mostrando variaciones detalladas en los niveles de intensidad a lo largo de la columna. La línea roja representa la versión binarizada, que toma valores de 0 y 255. Los segmentos donde la línea naranja alcanza 255 corresponden a las áreas de la columna donde la intensidad original superó el umbral de 0.3 en la binarización. Esta comparación permite observar cómo se simplifican los datos en el proceso de binarización, resaltando las diferencias clave mientras se pierde detalle fino.

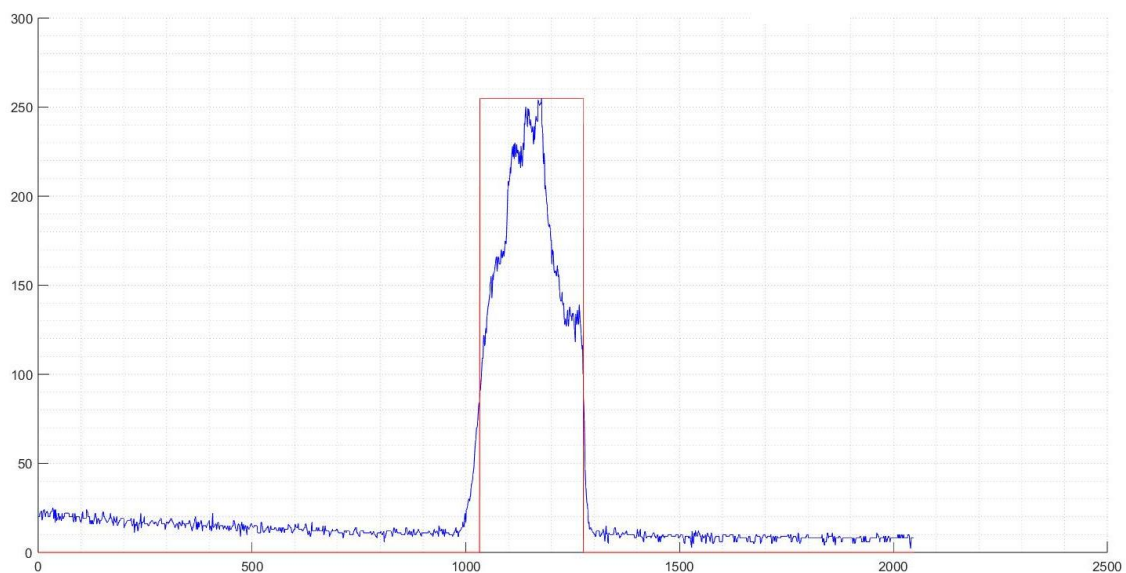


Figura 34 Comparación del comportamiento de escala de grises y Binarizada

En este anexo se muestra un análisis detallado, la Figura 41 es un acercamiento que podemos hacer a cualquiera de los análisis realizados anteriormente. En este punto, utilizaremos este fragmento de tomas para explicar su comportamiento.

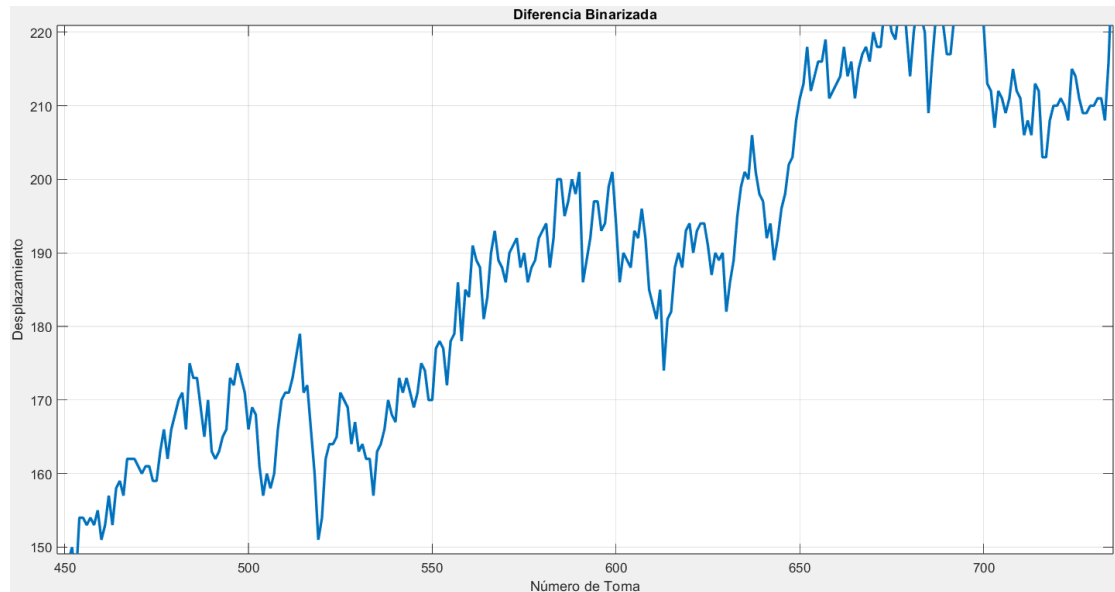


Figura 35 Zoom de la gráfica de deformación

Descripción del Comportamiento del Gráfico:

Tendencia General Ascendente:

El gráfico muestra una tendencia ascendente continua, lo que indica una deformación creciente de la estructura a medida que se aplican fuerzas.

Picos y Valles:

Los picos en la gráfica representan los instantes en los cuales se hace presente la resistencia del material, es decir, que el material está tratando de regresar a su estado de equilibrio, por lo que ejercer una fuerza contraria hace que el material se desplace en sentido opuesto a la dirección de deformación, indicando fluctuaciones en la rigidez estructural.

Los valles menores entre los picos pueden sugerir momentos de relajación relativa antes de que se aplique más fuerza o antes de que la estructura vuelva a ceder.

Interpretación:

Resistencia del Material:

Los picos observados en la gráfica son indicativos de los puntos en los que la estructura resiste más antes de ceder. Estos pueden ser usados para analizar la capacidad de carga máxima del material.

Deformación:

La tendencia ascendente general confirma que el experimento está logrando su objetivo de inducir y medir la deformación.

La estabilización al final puede proporcionar información sobre el comportamiento a largo plazo del material bajo carga sostenida.

Anexo 7

Los hallazgos de este estudio sobre la detección de pequeñas deformaciones tienen varias implicaciones importantes para la ingeniería estructural y el monitoreo de infraestructuras:

Precisión y Fiabilidad del Sistema

La capacidad del sistema para detectar pequeñas deformaciones con alta precisión y fiabilidad es crucial para la ingeniería estructural. Esto significa que se pueden identificar y abordar problemas estructurales en etapas tempranas, antes de que se conviertan en fallas críticas. Un sistema preciso y fiable mejora la seguridad y la integridad de las estructuras, permitiendo intervenciones preventivas más eficaces y reduciendo el riesgo de colapsos o daños significativos.

Optimización de Procedimientos de Monitoreo

Los resultados de este estudio sugieren que los procedimientos de monitoreo de infraestructuras pueden optimizarse significativamente mediante el uso de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes. La capacidad de capturar y analizar datos de manera eficiente permite un monitoreo más frecuente y detallado, lo que facilita una respuesta rápida ante cualquier señal de deterioro.

Interferencia del fondo y desenfoque en escala de grises

La interferencia de fondo, causada por elementos de la estructura que se encuentran en la parte posterior, dificultan el análisis de la deformación de forma directa, por lo que se tiene que aplicar un criterio distinto para el análisis de este tipo de información. Algunas partes traseras del puente al estar cerca lo desenfocaba causando ligero problema en área de interés a igual que las variaciones en la iluminación también contribuyeron a la dificultad de encontrar un punto de interés para las áreas deformadas para nuestra imagen en escala de grises.

Aunque las imágenes en escala de grises proporcionaron una reducción en la complejidad computacional, estas limitaciones afectan el procesamiento directo de la información del sistema para detectar con precisión deformaciones menores, especialmente en condiciones de iluminación no óptimas o con fondos que interferían.

Evaluación de la capacidad de carga y comportamiento estructural

Picos y Valles: Los picos en el gráfico representan momentos críticos de máxima resistencia, mientras que los valles indican relajaciones temporales. El análisis de estos elementos permite una mejor comprensión de la capacidad de carga máxima del material y su comportamiento bajo cargas sostenidas o repetidas.

Potencial para Futuras Investigaciones

Los resultados encontrados nos muestran que existen más propiedades físicas que pueden ser estudiadas a mayor detalle, generando así la posibilidad de realizar futuras investigaciones que nos permitan entender y mostrar de forma contundente los fenómenos físicos que están en el campo de la ingeniería

estructural y el monitoreo de infraestructuras. Se pueden explorar mejoras adicionales en las técnicas de captura y análisis de imágenes, así como en el desarrollo de algoritmos más avanzados para la detección de deformaciones. Además, se pueden investigar aplicaciones en otros campos, como la salud estructural de infraestructuras críticas y el monitoreo de materiales avanzados, potenciando el alcance y el impacto de estas tecnologías.

Anexo 8

Limitaciones del Estudio

Interferencia de objetos en imágenes en escala de grises: La presencia de elementos en el fondo puede afectar la precisión del análisis al introducir ruido en las imágenes capturadas, especialmente en escalas de grises donde la diferenciación de elementos puede ser más desafiante.

Variabilidad en las condiciones de iluminación: Las diferencias en la iluminación entre las sesiones de captura pueden impactar la consistencia de los resultados, haciendo que algunos detalles sean más o menos visibles en diferentes tomas.

Resolución y distancia de captura en la cámara web: La calidad de las imágenes y la precisión del análisis están directamente relacionadas con la resolución de la cámara y la distancia de captura. Diferentes distancias pueden resultar en variaciones en la calidad de los datos capturados.

Permisos de software para implementación en tiempo real: La implementación del sistema en tiempo real requiere de permisos específicos de software, lo que puede limitar la velocidad y eficiencia del procesamiento de datos.

Equipo rápido por la densidad de datos: La gran densidad de píxeles que contiene una imagen de alta resolución y la gran cantidad de tomas necesarias para el análisis, debido al alto número de imágenes capturadas, requiere de equipos con alta capacidad de procesamiento para manejar y analizar eficientemente estos datos.

Imágenes a color y tiempo de cómputo: Trabajar con imágenes a color implica manejar tres matrices (rojo, azul y verde), lo que aumenta significativamente el tiempo de cómputo. Actualmente, el proceso está diseñado para trabajar con imágenes en escala de grises, lo que simplifica el análisis, pero puede limitar la información capturada.

Cuidado en capturar imágenes no saturadas: Es crucial asegurarse de que las imágenes no estén sobreexpuestas o subexpuestas, ya que la saturación puede ocultar detalles importantes necesarios para el análisis preciso del desplazamiento estructural.

Amplificación y tipos de lentes: Dependiendo de la magnitud del desplazamiento que se necesita capturar, puede ser necesario utilizar diferentes tipos de lentes para amplificar la imagen adecuadamente. La selección incorrecta de lentes puede resultar en imágenes menos precisas o con distorsiones.

Posibles Áreas para Futuras Investigaciones

Optimización del Preprocesamiento de Imágenes: Investigar métodos avanzados para el preprocesamiento de imágenes que mejoren la eliminación del ruido y la corrección del fondo. El desarrollo de técnicas para manejar

eficazmente los fondos complejos y las variaciones en la iluminación podría mejorar la precisión del análisis de deformaciones.

Uso de Imágenes a Color y Técnicas Avanzadas: Explorar el uso de imágenes a color en lugar de escala de grises podría proporcionar más información contextual y ayudar a diferenciar entre las deformaciones reales y el ruido del fondo. Además, integrar técnicas avanzadas como el análisis de imágenes multiespectrales podría mejorar la capacidad para detectar y medir deformaciones.

Aplicación de Técnicas de Aprendizaje Automático: Incorporar algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales para analizar las imágenes y detectar deformaciones. Estos enfoques podrían adaptarse a las variaciones en las condiciones de captura y mejorar la capacidad del sistema para identificar deformaciones sutiles con mayor precisión.

Integración con Sistemas de Monitoreo en Tiempo Real: Investigar la integración del sistema de procesamiento de imágenes con sistemas de monitoreo en tiempo real para proporcionar alertas inmediatas sobre deformaciones detectadas. Esta integración podría mejorar la capacidad de respuesta y la gestión proactiva del mantenimiento estructural.

Análisis de resistencia de materiales: El análisis de resistencia de materiales es una posible área de investigación que podría beneficiarse de los métodos utilizados en el estudio de diferencias en imágenes. Utilizando técnicas de procesamiento de imágenes y análisis comparativos, se puede evaluar cómo los materiales responden a diferentes cargas y condiciones. Esto podría incluir la observación de deformaciones, fracturas y otros cambios estructurales en tiempo real. Además, la implementación de algoritmos avanzados de visión por computadora podría mejorar la precisión en la detección de puntos críticos y zonas de falla en los materiales, proporcionando información valiosa para el diseño y la mejora de materiales más resistentes y duraderos.