

Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Sistema de Visión para la Clasificación de la Carga en un Puente para su Correlación con el Desplazamiento de sus Coordenadas.”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA
Cuauhtémoc Mariscal García

DIRECTOR
Dra. Wendy Flores Fuentes

CODIRECTOR
Dr. Lars Lindner

Mexicali, B.C. a 16 de junio de 2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Cuauhtémoc Mariscal García, declaro que esta tesis titulada, “Sistema de Visión para la Clasificación de la Carga en un Puente para su Correlación con el Desplazamiento de sus Coordenadas” y el trabajo presentado en ella es de mi autoría. Y confirmo que este trabajo enviado para mi evaluación es original y se expresa en mis propias palabras y fue realizado principalmente para obtener el grado de Maestría en Ciencias en esta universidad. Afirmo que he citado el trabajo de otros y he proporcionado debidamente las fuentes de estas citas. Cualquier uso que hice de la información de las obras de otros autores en cualquier forma y momento (tales como ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente. Constato que en esta tesis he reconocido el trabajo hecho por mí en colaboración con otros aclarando explícitamente mi contribución y la aportación de otros. Por último, ratifico que esta tesis fue revisada en su totalidad por un comité evaluador.

Firma:

Fecha:

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindar el apoyo tanto económico como material para financiar la investigación y el trabajo, y al constante apoyo con becas para poder continuar con los estudios de posgrado en México y en el extranjero.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por darme la oportunidad de estudiar mi posgrado, y poder obtener mi grado en Maestría en Ciencias.

Al Instituto de Ingeniería y Facultad de Ingeniería de la UABC campus Mexicali, por brindar las aulas, los espacios y a los catedráticos en la formación académica de los estudiantes de posgrado.

A mi directora de tesis Dra. Wendy Flores Fuentes, por generar este proyecto de investigación y permitirme participar en él, compartiendo su conocimiento respecto al campo de estudio y su experiencia.

A mi subdirector de tesis, Dr. Lars Lindner, por trabajar en colaboración con la Dra. Wendy Flores Fuentes en este proyecto de investigación, por su tiempo y consejos al proyecto.

DEDICATORIA

Dedicado a mi esposa Mónica de Lourdes y
mis hijos Mónica Alejandra y Angel Ivan

RESUMEN

El crecimiento de la población y la modernización de las ciudades redundan en la construcción de nuevas redes de transporte. Destacando entre ellas "los puentes para tráfico vehicular".

Los puentes son infraestructura del sistema de transporte del país que tienen como objetivo comunicar diversos puntos de la nación, y/o diversos puntos de una ciudad, así como evitar congestionamiento y habilitar nuevas rutas para llegar a destinos en menos tiempo y con recorridos menores.

Los puentes al igual que todos los distintos tipos de infraestructuras sufren de deterioro como consecuencia de diversos agentes: a) Diseño, uso de materiales y técnicas de construcción inadecuados. b) Un crecimiento desmesurado de las cargas dinámicas que los transitan. c) Sobrecarga. d) Fenómenos naturales, como el transcurso del tiempo, cambios de temperatura, vientos, humedad y movimientos sísmicos. e) E incluso debido a colisiones que se propician dentro del puente (vehículo-vehículo) o contra el mismo puente (vehículo-puente). Para más detalles acerca de las causas que provocan daños en los puentes se recomienda consultar los estándares de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

El monitoreo de la salud estructural de puentes es una práctica de gran importancia para que estos puedan proveer seguridad y servicio a la ciudadanía. Además, permite visualizar los requerimientos de mantenimiento, y por lo tanto predecir con suficiente anticipación el monto de los recursos que son necesarios para su conservación y de esta manera proteger la inversión patrimonial.

Tradicionalmente el monitoreo de la salud estructural de puentes consiste de inspecciones y evaluaciones sistemáticas por medio de personal especializado, enfocadas principalmente en la detección de socavación, grietas y asentamientos en la subestructura, daños en dispositivos de apoyo, grietas en la superestructura, desplomes, hundimientos, golpes, daños en juntas de dilatación y corrosión [1]. Se analiza el apego de la geometría del puente a su diseño y se realizan mediciones de vibración para conocer el comportamiento dinámico del puente.

Sin embargo, con el desarrollo de las diversas técnicas para monitoreo de salud estructural han surgido opciones para realizar monitoreo de tipo continuo de la salud estructural de puentes en apoyo y/o reemplazo del monitoreo periódico o circunstancial.

Tal es el caso de los sistemas de barrido óptico [2], el cual permite monitorear de manera continua coordenadas previamente seleccionadas sobre una estructura para verificar si sufre un desplazamiento que indique que la estructura del puente está sufriendo deterioro.

Sin embargo, debido a la interacción vehículo-puente (VBI, de sus siglas en inglés Vehicle-Bridge Interaction), se producen oscilaciones en el puente de aproximadamente 1 a 8 Hz que ocasionan que la coordenada bajo monitoreo también presente un comportamiento oscilatorio [3].

Por esta razón se requiere de un sistema de apoyo para el sistema de barrido óptico con el objetivo de identificar si los desplazamientos de las coordenadas bajo monitoreo corresponden a una degradación del puente o al efecto de la interacción vehículo-puente (VBI).

En la presente investigación se desarrolló un sistema de visión para la clasificación de la carga en un puente para su correlación con el desplazamiento de sus coordenadas.

Se utilizó una cámara de video comercial para capturar los carriles vehiculares de un puente a fin de definir la carga que está experimentando el puente debido al tránsito que circula sobre él en un determinado instante de tiempo a fin de relacionar la carga presente en ese instante de tiempo con la posición de la coordenada bajo monitoreo en el mismo instante de tiempo.

El presente proyecto se realizó para establecer las bases técnicas y científicas para la clasificación de vehículos en las imágenes obtenidas a través de algoritmos de inteligencia artificial y de procesamiento de imágenes, para proveer de precedentes para un futuro sistema de visión artificial con mayor resolución y su integración al sistema de barrido óptico.

ABSTRACT

The construction of the new lanes of transportation redound with the population's growth and the modernization of cities. Highlighting among them "Bridges for vehicular traffic".

The bridges as infrastructure from the transportation system of the country have the aim to communicate diverse points from the nation and/or diverse points of the city, as to avoid traffic jam and habilitate new routes to arrive the destiny in less time and with shorter distances.

Bridges as all the other types of infrastructure suffer from deterioration as consequence from different agents, such as: a) Design, use of inadequate materials and techniques of construction. b) Disproportionate growth in the dynamic loads from those who travel. c) Overload. d) Natural phenomena as the pass of time, temperature changes, wind, humidity, and seismic movements. e) And even crashes that act on the bridge (vehicle-vehicle) or against the bridge (vehicle-bridge). For more details, about the causes that can damage bridges, we recommend to consult the standards of the AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). The structural health monitoring system of bridges is a practice of great importance so these can provide safety and service to the community. Furthermore, it allows to visualize maintenance requirements, and therefore predict with enough anticipation the amount of resources that'll be needed for their conservation.

Traditionally the structural health monitoring system of bridges consist in systemic inspection and evaluation made by specialized staff, manly focused in the detection of scours, cracks, and settlements on the substructure, support dispositive damage, cracks on the superstructure, slumps, collapses, crashes, expansion joints damage and corrosion [1]. The attachment gets

analyzed by the bridge's design geometry and vibration measurements are realized to understand the bridge's dynamic behavior.

Nevertheless, with the developing of diverse techniques for the structural health monitoring system of bridges has emerged options to realize a constant type of structural health monitoring system of bridges to support and/or replace the periodic or circumstantial monitoring.

In this case the optical scanning system [2] allows to monitor continuously previously selected coordinates over a structure to verify if it suffers from displacement that indicates that the bridge's structure is being deteriorated.

However, due to the Vehicle-Bridge Interactions (VBI), vibrations of 1 to 8 Hz approximately are being produced in the bridge which causes that the coordinate under monitoring also presents fluctuate behavior [3].

Because of this, a support system for the optic scanning system is required to identify if the displacement of the coordinates under monitoring concord with a degradation of the bridge or if they're due to the Vehicle-Bridge Interaction (VBI). In this research a vision system was developed to classify the loads of the bridge for its correlation with the displacement of its coordinates.

A commercial camera for video recording was used to capture the transit lanes on a bridge with the purpose of defining the loads that the bridge is experimenting with due to the transit circulation on a determined instant in time with the intention to relate the loads present on that instant in time with the position of the coordinates under monitoring in the same instant.

The present project was realized to establish technological and scientific bases for the classification of vehicles in the images obtained through artificial intelligence algorithms, and image processing to provide the test cases for a future system of artificial vision with mayor resolution and integrate it to the optic scanning system.

ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	I
AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
2. PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1. Planteamiento del problema	6
2.2. Justificación	9
2.3. Hipótesis	11
2.4. Objetivos de la investigación	11
2.4.1. Objetivo general	11
2.4.2. Objetivos específicos	11
3. ESTADO DEL ARTE Y TRABAJOS RELACIONADOS	13
3.1. Monitoreo de salud estructural en puentes	13

4. MARCO TEÓRICO	17
4.1. Beneficio de los puentes vehiculares para el desarrollo de una población y su jerarquización de acuerdo a la normatividad vigente	17
4.2. Monitoreo estructural de la salud en puentes vehiculares	22
4.2.1. Monitoreo estructural de la salud	23
4.2.2. Tipos de estructuras	24
4.2.3. Puentes de concreto y sus principales componentes	27
4.2.4. Puentes y tipos de mantenimiento	30
4.3. Sistemas de barrido	38
4.3.1. Sistema de barrido óptico para medición de desplazamiento	38
4.3.2. Principio de la apertura de barrido optoelectrónica	39
4.4. Evaluación de la interacción vehículo-puente	44
4.5. Modelos computacionales del aprendizaje máquina	45
4.6. Modelos computacionales como clasificadores de carga de puentes para evaluación de la interacción de puente-vehículo	45
4.6.1. Aprendizaje profundo para la clasificación de cargas de puentes	46
4.6.2. Proceso de registro de imágenes	48
4.7. Correlación de datos de dos sistemas de medición	51
4.7.1. Múltiple regresión/correlación	52
4.7.2. Correlación de dos variables a través del coeficiente de correlación de Pearson	52
4.7.3. Correlación de dos variables a través del coeficiente de correlación de Spearman	54
4.7.4. Comparación de los coeficientes de Pearson y Spearman	55
5. METODOLOGÍA Y RESULTADOS	59
6. CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS	76

ANEXOS	77
A. Mantenimiento rutinario	78
B. Mantenimiento periódico	81

Índice de Figuras

4.1. Estimación de CONAPO en el año de 2017	18
4.2. Unidad piloto para paso de vehículos con cargas especiales.	21
4.3. Inspección visual debajo de un puente.	24
4.4. Estructura de muros.	25
4.5. Estructura de columnas.	26
4.6. Estructura de vigas.	27
4.7. Trabajos en la superficie de rodadura.	31
4.8. Limpieza en parapetos.	32
4.9. Limpieza de juntas de muros de tierra armada.	32
4.10. Protección contra intemperismo a base de espuma de poliuretano.	33
4.11. Pintura en losas de protección y conos de derrame.	34
4.12. Reposición de marcas en el pavimento.	34
4.13. Rencarpetado de superficie de rodadura.	35
4.14. Reparación de guarniciones y banquetas.	36
4.15. Construcción de conos de derrame.	36
4.16. Renivelación de accesos.	37
4.17. Principio de apertura de barrido optoelectrónica.	38
4.18. Sistema de referencia para el cálculo de la frecuencia de barrido.	39
4.19. Representación de señal optoelectrónica.	40
4.20. Sistema de barrido óptico basado en emisión de luz coherente para SHM.	42

4.21. Sistema de barrido óptico basado en emisión de luz incoherente para SHM. . .	43
4.22. Pearson = +1, Spearman = +1	55
4.23. Pearson = +0.851, Spearman = +1	56
4.24. Pearson = -0.093, Spearman = -0.093	56
4.25. Pearson = -1, Spearman = -1	57
4.26. Pearson = -0.799, Spearman = -1	57
4.27. Coeficiente de 0	58
5.1. Diagrama de flujo general de aprendizaje profundo.	62
5.2. Diagrama de flujo general de registro de imágenes.	63

Índice de Tablas

4.1. Clasificación de los caminos según sus características geométricas	20
4.2. Interpretación del coeficiente de Pearson	54
5.1. Forma de salida de la estructura del modelo CNN	60
5.2. Descripción del Dataset	60
5.3. Métricas de clases	61
5.4. Resultados del registro de imágenes	64

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

México tenía una población de 81,249,645 habitantes en el año de 1990 y continuo creciendo hasta 112,336,538 en 2010. Tan solo en el estado de Baja California en el año de 1990 tenía una población de 1,660,855 la cuál aumentó a 3,155,070 personas para el año 2010. La humanidad para su desarrollo económico y social ha requerido de sistemas de transporte eficientes. En la antigüedad los transportes se realizaban vía terrestre para el transporte de personas y cargas ligeras. Para cargas más pesadas se volvía mas lento su traslado. Las vías marítimas requerían de puertos y de cualquier modo también las carreteras para transportar las cargas al interior de algunas regiones. Estas carreteras eran ineficientes debido a que eran cortos, normalmente eran construídos para comunicar las principales ciudades. En México se agravaba las redes carreteras por contar con una gran diversidad geográfica. En consecuencia se necesitaban de la construcción de puentes.

En el contexto geográfico como el de la República Mexicana, las carreteras interconectan las zonas rurales con el resto del país integrando a la población de estas zonas. Esta es la razón por lo que el sistema nacional de carreteras y puentes debe permanecer en óptimas condiciones para el tránsito por la red de carreteras, con el fin de que el transporte se desarrolle en forma eficiente y seguro. La norma NOM-012-SCT-2-2017, sobre el peso y dimensiones máximas con

los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, clasifica los puentes en:

- Carretera de cuatro carriles. Eje de Transporte (ET4).
- Carretera de dos carriles. Eje de Transporte (ET2).
- Carretera de cuatro carriles (A4).
- Carretera de dos carriles (A2).
- Carretera de cuatro carriles. Red primaria (B4).
- Carretera de dos carriles. Red primaria (B2).
- Carretera de dos carriles. Red secundaria (C).
- Carretera de dos carriles. Alimentadora (D).

Es frecuente que los puentes sean las estructuras más vulnerables de las redes carreteras y con altos costos del desarrollo carretero.

Las condiciones que afectan a las estructuras de un puente son las sobrecargas que realizan los transportes al transitar por las carreteras, y en el entendido que una gran cantidad de puentes tiene más de medio siglo de edad. También las afectaciones se deben a:

- Diseño, uso de materiales y técnicas de construcción inadecuados.
- Un crecimiento desmesurado de las cargas dinámicas que los transitan.
- Sobrecarga.

- Fenómenos naturales, como el transcurso del tiempo, cambios de temperatura, vientos, humedad y movimientos sísmicos.
- Colisiones que se propician dentro del puente (vehículo-vehículo) o contra el mismo puente (vehículo-puente).

Todo esto origina que algunas de las estructuras presenten fallas en su estabilidad estructural y capacidad de carga, esta condición trae como consecuencia falta de la seguridad del tránsito con riesgos crecientes.

El monitoreo de salud estructural (SHM, de sus siglas en inglés Structural Health Monitoring) es un proceso que permite observar la integridad de una estructura a través del tiempo permitiendo crear estrategias de mantenimiento con el objetivo de prevenir daños desastrosos en la estructura y evitar daños a las personas. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) da a conocer el Manual de Inspección y Conservación de Puentes Tomo I y II, basados en la normatividad de los Estados Unidos de Norteamérica (AASHTO Manual for Bridge Maintenance, 1976, Manual for Maintenance Inspection of Bridges and Optimizing Maintenance Activities.-Bridge Painting.) y es la que sigue vigente hasta la fecha. En México existen dos sistemas de administración de puentes:

- El Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) fué establecido por la Dirección General de Conservación de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para la administración de los puentes de la red federal libre de peaje que tiene a su cargo.
- El Sistema de Caminos y Puentes (CAPUFE) que tiene como misión la operación, conservación, administración de los caminos y puentes de cuota como concesionario.

El procedimiento normal del monitoreo de salud estructural del personal especializado es analizar la geometría del puente en su diseño y de realizar mediciones de vibración para conocer el comportamiento dinámico del puente, básicamente consiste en inspecciones visuales. Se

busca fallas en socavación, grietas y asentamientos en la subestructura, daños en dispositivos de apoyo, grietas en la superestructura, desplomes, hundimientos, golpes, daños en juntas de dilatación y corrosión [1]. Se analiza el apego de la geometría del puente a su diseño y se realizan mediciones de vibración para conocer el comportamiento dinámico del puente. Los agentes naturales provocan daños a las estructuras construídas por la ingeniería civil. En los puentes el concreto se agrieta y tiende a convertirse en grava y separar los materiales pétreos provocado por los cambios de temperatura o el contacto continuo del agua. De igual manera el acero sufre deterioro por oxidación. Los suelos sobre los que se asienta estas estructuras, también, por el paso del agua y lluvias torrenciales provocan erosión y asentamientos. Los sismos también ponen en peligro la integridad de los puentes, y por último, las colisiones contra la estructura del puente [1].

Con las técnicas actuales para el monitoreo de salud estructural, y con el personal especializado se verifican estructuras que se encuentran a varios kilómetros del lugar de residencia del personal y esto ocasiona que sea mas costoso, es por esto que se necesita contar con monitoreo de tipo continuo de la salud estructural de puentes en apoyo al monitoreo periódico o circunstancial. Tal es el caso de los sistemas de barrido óptico [2], que realizan monitoreo continuo de coordenadas previamente seleccionadas sobre una estructura para verificar si tiene desplazamiento sobre la estructura del puente e indique que pueda estar sufriendo deterioro. Estos datos pueden ser recolectados desde cualquier lugar.

Sin embargo, debido a la interacción vehículo-puente (VBI, de sus siglas en inglés Vehicle Bridge Interaction), se producen oscilaciones en el puente que ocasionan que la coordenada bajo monitoreo también presente un comportamiento oscilatorio [3].

En la presente investigación se desarrolló un sistema de visión para la clasificación de la carga en un puente para su correlación con el desplazamiento de sus coordenadas. Se utilizó una cámara de video comercial para capturar los carriles vehiculares de un puente a fin de definir la carga que está experimentando el puente debido al tránsito que circula sobre él en un determinado instante de tiempo a fin de relacionar la carga presente en ese instante de tiempo

con la posición de la coordenada bajo monitoreo.

El presente proyecto se realizó para establecer las bases técnicas y científicas para la clasificación de vehículos en las imágenes obtenidas a través de algoritmos de inteligencia artificial y procesamiento de imágenes para proveer de precedentes para un futuro sistema de visión artificial con mayor resolución y su integración al sistema de barrido óptico.

CAPÍTULO 2

PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Planteamiento del problema

Tradicionalmente el monitoreo de la salud estructural de puentes consiste de inspecciones y evaluaciones sistemáticas por medio de personal especializado, enfocadas principalmente en la detección de socavación, grietas y asentamientos en la subestructura, daños en dispositivos de apoyo, grietas en la superestructura, desplomes, hundimientos, golpes, daños en juntas de dilatación y corrosión [1]. Se analiza el apego de la geometría del puente a su diseño y se realizan mediciones de vibración para conocer el comportamiento dinámico del puente.

Sin embargo, con el desarrollo de las diversas técnicas para monitoreo de salud estructural han surgido opciones para realizar monitoreo de tipo continuo de la salud estructural de puentes en apoyo y/o reemplazo del monitoreo periódico o circunstancial.

Tal es el caso de los sistemas de barrido óptico [2], los cuales permiten monitorear de manera continua coordenadas previamente seleccionadas sobre una estructura para verificar si sufren un desplazamiento que indique que la estructura del puente está sufriendo deterioro.

Sin embargo, debido a la interacción vehículo-puente, se producen vibraciones en el puente de aproximadamente 1 a 8 Hz que ocasionan que la coordenada bajo monitoreo también presente un comportamiento oscilatorio [3].

Por esta razón se requiere de un sistema de apoyo para el sistema de barrido óptico con el objetivo de identificar si los desplazamientos de las coordenadas bajo monitoreo corresponden a una degradación del puente o al efecto de la interacción vehículo-puente.

De acuerdo a un estudio realizado en Canadá con el propósito de evaluar la capacidad de carga de puentes con envejecimiento, el riesgo de morir debido a fallas estructurales es de 100,000 personas por año [4]. Aun cuando esta estadística pueda categorizar el hecho como de bajo riesgo, el monitoreo de salud estructural contribuye a que esta cifra se mantenga baja, debido a que provee de datos para asistir la toma de decisiones acerca del mantenimiento preventivo, uso y reparaciones de las estructuras.

Las tecnologías convencionales para la evaluación de puentes consisten en inspecciones visuales, pruebas destructivas de elementos de la estructura del puente y en algunas ocasiones pruebas no destructivas. Mientras que, los sistemas de monitoreo de estructuras basados en técnicas no convencionales suelen estar integrados de sensores, subsistemas de adquisición de datos, subsistemas de procesamiento de señales y almacenamientos de datos, subsistemas de comunicación, así como de sistemas inteligentes para el modelado del comportamiento de la estructura y la detección de daños en base al conocimiento del comportamiento de la estructura [1].

Las nuevas tecnologías para el monitoreo de estructuras permiten que el monitoreo se realice en función de la demanda del servicio o de manera continua, ya que, debido al impacto del uso de los puentes en una comunidad, es importante que se encuentre en funcionamiento, es decir, con la menor interrupción de su servicio, y por lo tanto es de gran valor que pueda permanecer habilitado durante su monitoreo estructural.

En la literatura científica se encuentran algunos reportes de innovación y desarrollo de sistemas autónomos y capaces de realizar monitoreo continuo, tal es el caso de los siguientes sistemas:

- Sistemas basados en sensores de fibra óptica, y polímero reforzado con fibra [5].

- Sistemas basados en sensores de tensión (electrical resistance strain) y el método BWIM (bridge weigh-in-motion) [6].
- Sistemas basados en diversos transductores y sensores, como es el caso del sistema WA-SHMS (wind and structural health monitoring system) desarrollado en Hong Kong, el cual está equipado con tres módulos:
 - a) Parámetros de entrada para monitorear el viento, temperatura, tráfico, y cargas sísmicas
 - b) Parámetros del sistema para monitorear los coeficientes de influencia estática y las características dinámicas globales
 - c) Parámetros de salida para monitorear variaciones en la geometría del puente (desplazamientos), y la tensión de sus elementos [7].
- Sistemas basados en sensores piezoeléctricos para sensar la tensión y las aceleraciones en la estructura [8].
- Sistemas basados en medidores de inclinación y sistemas de posicionamiento global (GPS, de sus siglas en inglés Global Positioning System) [9] [10].
- Sistemas basados en el análisis de señales acústicas obtenidas con micrófonos [11] [12].
- Sistemas basados en tecnología inteligente, smartphones, cámaras accesibles de alta-resolución, drones (UAVs, de sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicles), y sensores robóticos [13].
- Sistemas de barrido basados en tecnología láser [14].
- Sistemas de barrido basado en una apertura optoelectrónica y una fuente de luz incoherente para medición de coordenadas y estimación de desplazamientos [15].

El sistema de barrido óptico ha obtenido resultados satisfactorios para realizar medición de desplazamientos, este ha monitoreado desplazamientos de estructuras estáticas como es el caso de edificios [2]. Sin embargo, para utilizarse en el monitoreo de puentes fue necesario investigar en qué rangos de frecuencia es común que los puentes presenten oscilación, ya que el rango de

operación del sistema de barrido es de 20 Hz a 60 Hz.

Se encontró registro de que los puentes presentan oscilaciones pequeñas debido a la influencia de varios factores, incluidos la rugosidad del camino, la interacción vehículo-puente, la velocidad de viaje de los vehículos, y a la longitud del puente. Estas frecuencias están dentro del rango de 1 a 8 Hz de acuerdo a la publicación [3]. Trayendo en consideración que es viable y conveniente utilizar el sistema de barrido óptico para monitorear el desplazamiento en puentes, pero se requiere de un sistema de apoyo para el sistema de barrido óptico con el objetivo de identificar si los desplazamientos de las coordenadas bajo monitoreo corresponden a una degradación del puente o al efecto de la interacción vehículo-puente. Para lo cual se desarrolló un sistema de visión para la clasificación de la carga en un puente para su correlación con el desplazamiento de sus coordenadas, a través del uso de conjunto de datos de automoviles y uso de una cámara comercial para capturar los carriles vehiculares de un puente a fin de definir la carga que está experimentando el puente debido al tránsito que circula sobre él en un determinado instante de tiempo a fin de relacionar la carga presente en ese instante de tiempo con la posición de la coordenada bajo monitoreo.

2.2. Justificación

Aun cuando la tecnología se ha desarrollado en gran manera en la última década y exista una gran cantidad de publicaciones científicas acerca del desarrollo de sistemas para monitoreo continuo de la salud estructural de puentes como los descritos en el planteamiento del problema, en la actualidad en México la inspección y evaluación de puentes sigue realizándose de manera visual [16], donde se describe la práctica de inspección de puentes en el sistema carretero nacional, que permite conocer, de manera genérica, el estado actual estructural que guarda cada obra, mediante los Reportes del Sistema de Puentes en México (SIPUMEX), y del Sistema de Administración de Puentes (SIAP).

De acuerdo a la Dirección General de Conservación de Carreteras de la Subsecretaría de

Infraestructura de la SCT (2019), el listado de puentes pertenecientes a la Red Federal Pavi-mentada Libre de Peaje contiene un registro de 9,167 puentes en toda la Nación, de los cuales 213 se ubican en el Estado de Baja California y al menos 123 están relacionados con la Ciudad de Mexicali, clasificados por los obstáculos que cruzan (Canal, Río ó Arroyo, Paso Peatonal, Carretera SCT, Carretera no SCT, Ferrocarril, y Autopista). Entre los que destaca el icónico puente en Blvd. Lazaro Cardenas y Periferico Oriente, mejor conocido como “El Puente Pando”. El cual es también un motivo de inspiración y justificación para la adaptación del sistema de barrido óptico previamente mencionado a fin de ser utilizado no solamente para el monitoreo de estructuras estáticas como lo son los edificios, sino también para monitorear puentes. Para realizar esta adaptación se desarrolló un sistema de apoyo para el sistema de barrido óptico con el objetivo de identificar si los desplazamientos de las coordenadas bajo monitoreo corresponden a una degradación del puente o al efecto de la interacción vehículo-puente. Dicha tarea se llevó a cabo a través del desarrollo de un sistema de visión para la clasificación de la carga en un puente para su correlación con el desplazamiento de sus coordenadas.

La carga de un vehículo circulando en un puente puede ser estimada a través del método BWIM (bridge weigh-in-motion), este método analiza la respuesta del puente para estimar el peso de un vehículo en un eje o un grupo de ejes [6][17], se instalan medidores de tensión en sus elementos y su estimación se basa en un análisis matemático de los momentos de flexión que sufre el puente ante la presencia de los distintos vehículos. Sin embargo, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2014 sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales, la carga de estos puede clasificarse de acuerdo a su clase (automóvil, autobús, camión unitario, camión remolque, tractocamión articulado y tractocamión doblemente articulado). En base a esta clasificación se decidió estimar la carga en un puente con sus coordenadas de desplazamiento, de acuerdo al porcentaje de ocupancia de un carril vehicular en el puente en el instante de tiempo en que se realiza la medición de las coordenadas del puente.

El presente trabajo establece las bases técnicas y científicas para la clasificación de vehículos

en imágenes obtenidas con una cámara y procesadas a través de algoritmos de inteligencia artificial y procesamiento de imágenes para proveer de precedentes para un futuro sistema de visión artificial con mayor resolución y su integración al sistema de barrido óptico.

2.3. Hipótesis

La hipótesis que le dió origen al proyecto, planteó que era posible desarrollar un sistema de visión para la medición de la carga dinámica a la que está sometida un puente con el objetivo de correlacionar el efecto de dicha carga con el desplazamiento de las coordenadas de indicadores en el puente, a fin de conocer si la estructura está sufriendo deterioro o si se encuentra en una situación de riesgo de colapso.

El sistema de visión que se diseñó e implementó es genérico para pruebas de laboratorio a fin de desarrollar un algoritmo que permita cuantificar la carga de un puente a través del procesamiento digital de imágenes del tránsito en un puente, para entregar como producto un conjunto de datos y/o datos en tiempo real de un código de carga por unidad de tiempo.

2.4. Objetivos de la investigación

2.4.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo de tesis consistió en diseñar un sistema de visión para medir la carga dinámica de vehículos que transitan en un instante de tiempo dado sobre un puente para ser correlacionado con los desplazamientos de las coordenadas del puente en dicho instante de tiempo.

2.4.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la presente tesis son los siguientes:

- Selección e instrumentación de sensores para la adquisición de datos sobre la carga de un puente.
- Creación de un conjunto de datos con distintos casos de carga de un puente.
- Selección e implementación de un algoritmo inteligente y/o procesamiento de imágenes para la clasificación automática de datos del sensor de carga de un puente.
- Preprocesamiento de datos.
- Evaluación de parámetros, mezclado aleatorio de datos para el entrenamiento y prueba de la exactitud y precisión del algoritmo de clasificación.
- Implementación de un sistema de visión en una plataforma que incluya la adquisición de datos de carga de un puente, su clasificación, así como una etapa de respuesta para correlacionar los datos de carga del puente con las coordenadas de desplazamiento de dicho puente.
- Identificación de las variables del entorno que pudieran afectar el resultado del sistema de visión y definir los valores de las variables críticas del sistema.
- Cálculo de exactitud y precisión de los resultados obtenidos.
- Publicación de resultados en Tesis y Reporte Técnico.
- Registro de los derechos de autor del programa de cómputo ante el IMPI.
- Transferencia de tecnología al Laboratorio de Optoelectrónica y Mediciones Automáticas del Instituto de Ingeniería.

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE Y TRABAJOS RELACIONADOS

3.1. Monitoreo de salud estructural en puentes

El monitoreo continuo de la salud estructural (SHM) de los puentes es indispensable para buscar información sobre su salud. Esto es esencial para comprender sus comportamientos, para saber si están operando en condiciones saludables, están sobrecargados y/o están bajo un proceso de degradación baja / media / alta.

A medida que las ciudades crecen y se modernizan, aumenta el tráfico de vehículos y el diseño de puentes es cada vez más sofisticado, sumado a esto, las ciudades inteligentes, los conceptos de sostenibilidad y el surgimiento de la tecnología inteligente, guían la sustitución de los métodos del monitoreo de salud estructural convencionales por los de no contacto, métodos de SHM continuos.

Por otro lado, SHM siempre ha sido una tarea desafiante. Ha surgido una amplia gama de tecnologías, dando lugar a diferentes sistemas SHM, según las características de la estructura bajo monitoreo, los diferentes sistemas SHM adaptan su metodología de aplicación e implementación. Tal es el caso de los sistemas ópticos de barrido (OSS 's) utilizados para la medición de

desplazamiento, los cuales han alcanzado resultados satisfactorios en sus implementaciones en estructuras estáticas como edificios [2], pero cuando se implementan en el SHM de puentes se requiere analizar la Interacción Vehículo-Puente (VBI) para correlacionar la carga del tráfico vehicular con el desplazamiento de la estructura del puente.

La carga de tráfico se puede estimar por la presencia de vehículos. Existen varios enfoques de detección de vehículos basados en diferentes tecnologías y sus combinaciones, tales como son:

- El sensor de presión flexible, que se basa en cambios en la capacitancia debido a la variación en la distancia entre dos electrodos en una presión externa aplicada [18].
- Los sensores de bucle inductivo que consisten en 2-3 vueltas de cable aislado incrustado en el pavimento para medir el cambio de inductancia del sistema a medida que el vehículo pasa por los bucles [19].
- El radar de microondas basado en ondas continuas moduladas en frecuencia transmitidas para ser reflejadas desde la superficie de los vehículos, cuyas direcciones de ecos de señales se estiman mediante procesamiento de señales para poder detectar vehículos y su velocidad [20].
- La tecnología de radar en sinergia con sensores infrarrojos mediante algoritmos de fusión de datos [21]. La visión monocular en imágenes infrarrojas, basada en el análisis de las señales proporcionadas por los niveles de calor en los tubos de escape y neumáticos de los vehículos en la carretera mediante algoritmos de clasificación [22].
- El sensor de detección de luz y rango (lidar) basado en un principio similar al radar, dispara pulsos rápidos de luz láser en la superficie del vehículo, para medir la cantidad de tiempo que tarda cada pulso en recuperarse, de esta manera determina la distancia de los objetos que lo rodean, proporcionando una nube de puntos [23].
- El sensor ultrasónico que utiliza el principio básico de propagación y reflexión del sonido

a través del material en el rango de frecuencia ultrasónica, este sensor tiene un transmisor que transmite ondas ultrasónicas, cuando las ondas golpean un vehículo, parte de su energía se refleja de regreso a un receptor del sensor como señal de eco para determinar su posición y velocidad [24].

- El sensor acústico pasivo que registra el ruido de conducción del vehículo para estimar el patrón de onda acústica de las señales recibidas generadas por el motor, los neumáticos, el sistema de escape, los efectos aerodinámicos y los efectos mecánicos (por ejemplo, rotación del eje, pastillas de freno y suspensión) para determinar el perfil del vehículo [25].
- Los sistemas con un principio de funcionamiento basado en dos emisores de infrarrojos modulados y un fotodiodo con un filtro óptico como receptor, ambos montados sobre el plano de detección, cada vez que se interrumpe su comunicación el sistema lo contabiliza como ocupación de vehículo [26].
- El sensor magnetorresistivo anisotrópico inalámbrico utilizado para detectar perturbaciones geomagnéticas alrededor del ecuador de la Tierra en tiempo real debido al material ferromagnético, en combinación con el sensor de medición de distancia ultrasónico para determinar la posición de los vehículos [27] [28].

Los basados en sistemas de cámara mono o estéreo, por ejemplo en [29] se utiliza una cámara monocular para estimar la distancia de los vehículos mediante la información de carril detectada y un modelo de cámara estenopeica, que consiste en una relación matemática entre las coordenadas de un punto en el espacio 3D y su proyección sobre el plano de la imagen del vehículo de una cámara estenopeica ideal, donde la apertura de la cámara se describe como un punto y no se utilizan lentes para enfocar la luz, mientras que en [30] una combinación de ambos métodos es una fusión, una cámara monocular y una cámara estéreo binocular se combinan para optimizar la estimación de un marco de obstáculos del vehículo objetivo. La mayoría de los métodos basados en la visión por computadora se alimentan de vídeo y se basan principalmente

en el procesamiento de imágenes digitales, la inteligencia artificial y las tecnologías relacionadas con la minería de datos [31]. Para el desarrollo de este trabajo se ha seleccionado una evaluación de la interacción vehículo-puente basada en el procesamiento de imágenes de tráfico de vehículos. La decisión se tomó considerando que hoy en día la tendencia de las ciudades modernas que contienen puentes en sus sistemas de transporte es adoptar conceptos de ciudad inteligente [32]. Eso implica la instalación de videovigilancia en puentes para detección y seguimiento de vehículos para varios propósitos. Dado que el video de vigilancia es una fuente infravalorada de información de tráfico, ya instalada y disponible en la mayoría de los puentes, se ha seleccionado el procesamiento de imágenes para extraer un indicador de carga del puente para correlacionarlo con las mediciones de desplazamiento [33].

CAPÍTULO 4

MARCO TEÓRICO

4.1. Beneficio de los puentes vehiculares para el desarrollo de una población y su jerarquización de acuerdo a la normatividad vigente

En México la Red Federal Pavimentada Libre de Peaje contiene un registro en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes bajo la Dirección General de conservación de Carreteras y del Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) publicada en su sitio web¹. De los 9,167 puentes en toda la Nación, registrados hasta el 2019, 213 se ubican en el Estado de Baja California y al menos 123 están relacionados con la Ciudad de Mexicali, clasificados por los obstáculos que cruzan (Canal, Río ó Arroyo, Paso Peatonal, Carretera SCT, Carretera no SCT, Ferrocarril, y Autopista). Entre los que destaca el icónico puente en Blvd. Lazaro Cardenas y Periferico Oriente, mejor conocido como “El Puente Pando”.

Estos puentes de la Red Federal Pavimentada, interconecta a las ciudades en México ha beneficiado comercial y socialmente a una población de alrededor de 120 millones de personas en el país y tan solo en Baja California a 3,155,070 personas, según el último censo de INEGI

¹<http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/puentes-de-la-red-federal-de-carreteras/>

en el 2010. Debido al crecimiento de la población y a su proyección de acuerdo al Consejo Nacional de Población (CONAPO), en el 2017, como se muestra en la Figura (4.1) es de vital importancia que sea una prioridad que el sistema nacional de carreteras y puentes estén en excelentes condiciones y con gran seguridad para transitar por estos puentes.

Baja California: Proyección de población
a mitad del año 2017, 2030

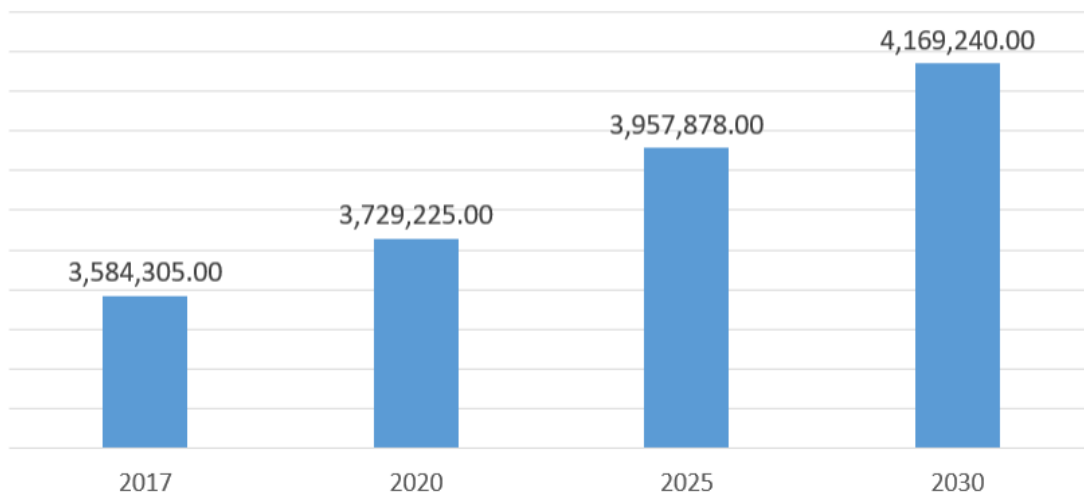


Figura 4.1: Estimación de CONAPO en el año de 2017

Jerarquización

Debido a esto surgen normatividades del transporte y los puentes. Como la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. Debido a la capacidad para soportar las cargas por transporte pesados es necesario que el programa SIPUMEX tipifique los caminos federales. Estos caminos se dividen en cuatro clases: A, B, C y D según su TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual).

- Tipo A: para un tránsito promedio diario anual de más de 3,000 vehículos, equivalente a un tránsito horario máximo anual de 360 vehículos o más.

- Tipo B: para un tránsito promedio diario anual de más de 1,500 a 3,000 vehículos, equivalente a un tránsito horario máximo anual de 60 a 180 vehículos.
- Tipo C: para un tránsito promedio diario anual de más de 500 a 1,500 vehículos, equivalente a un tránsito horario máximo anual de hasta 60 vehículos.
- Tipo D: para un tránsito promedio diario anual de más de 100 a 500 vehículos.
- Tipo E: para un tránsito promedio diario anual de hasta 100 vehículos.

La Norma Oficial Mexicana NOM-040-SCT-2-2012, "Para el transporte de objetos indivisibles de gran peso y/o volumen, peso y dimensiones de las combinaciones vehiculares y de las grúas industriales y su tránsito por caminos y puentes de jurisdicción federal", establece los horarios de tránsito en caminos y puentes con los que deben de cumplir los vehículos para cargas especiales, de acuerdo a la tabla (4.1):

Tabla 4.1: Clasificación de los caminos según sus características geométricas

Tipo de carretera	Nomenclatura	Descripción
Carretera de cuatro carriles, Eje de Transporte	ET4	Son aquellas que forman parte del eje de transporte que establece la SCT, cuyas características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso sin exceptuar los de dimensiones especiales.
Carretera de dos carriles, Eje de Transporte	ET2	
Carretera de cuatro carriles	A4	Son aquellas que por sus características geométricas y estructurales permiten la operación de los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso, excepto aquellos vehículos que por sus dimensiones y peso sólo se permitan en las carreteras tipo ET.
Carretera de dos carriles	A2	
Carretera de cuatro carriles, red primaria.	B4	Son aquellas que conforman la red primaria prestando servicio de comunicación interestatal.
Carretera de dos carriles, red primaria.	B2	
Carretera de dos carriles, red secundaria.	C	Red secundaria. Su servicio, se reduce al ámbito estatal con longitudes medias, estableciendo conexiones con la red.
Carretera de dos carriles, alimentadora.	D	Red alimentadora. Prestan servicio dentro del ámbito municipal con longitudes relativamente cortas, estableciendo conexiones con la red secundaria.

- Solo podrán circular por caminos tipo ET4, A4, B4: de lunes a viernes, de las 00:00 horas a las 23:59. Los días sábado de 6:00 a 14:00 horas.
- Cuando circulen por caminos tipo ET2, A2, B2, C o D, tendrán los siguientes horarios: de lunes a viernes, con luz diurna de 6:00 a 18:30 horas y en un horario nocturno de 00:00 a 6:00 horas; y de 18:30 a 23:59 horas condicionado a que circulen con dos carros piloto, uno en la parte frontal y otro en la parte trasera. Los días sábado de 6:00 a 14:00 horas.

Como un dato adicional, es importante mencionar que los vehículos con cargas especiales están obligados a ser guiados por unidades piloto de color amarillo y rotuladas con su nombre

en un costado, ver Figura (4.2). Estos vehículos, deben de contar con torretas y señalamiento el cual aclaré que se esta custodiando el paso de un vehículo con exceso de ancho, exceso de longitud o exceso de dimensiones.



Figura 4.2: Unidad piloto para paso de vehículos con cargas especiales.

4.2. Monitoreo estructural de la salud en puentes vehiculares

Los puentes están sujetos a diversos tipos de mecanismos de deterioro como corrosión, fatiga, carbonatación o reacciones álcali-agregado, debido al envejecimiento, las condiciones ambientales y la sobrecarga. Durante siglos, el SHM se ha realizado mediante inspección visual por parte de expertos para identificar defectos, deterioro y daños. Hoy en día, las estrategias de SHM utilizan sensores y tecnología de la información para la recopilación continua de datos para desarrollar métodos para proporcionar un conocimiento más preciso del desempeño de las estructuras que las estrategias tradicionales. Las ventajas de los métodos de monitoreo continuo son que permiten monitorear las estructuras mientras están en servicio. También permiten conocer el comportamiento histórico global de los puentes para evidenciar tendencias de degradación, en lugar de solo detectar los efectos de eventos extremos, como colisiones o ataque ambiental (terremotos de fuerte movimiento o huracanes) [34]. El SHM de puentes evalúa su integridad, y también incluye el análisis de vida restante y su capacidad de carga. Los datos recopilados se utilizan para optimizar la operación, el mantenimiento y la reparación de puentes. En el estado de la técnica de las estrategias de SHM continuas se encuentran las basadas en vibraciones para el análisis [35] [36] de modos de frecuencias de propagación de ondas guiadas, las redes de sensores inalámbricos activadas por tensión, aceleración y basadas en el tiempo [37], por computadora basado en visión para procesamiento de imágenes digitales y señales láser a través de algoritmos tradicionales y de aprendizaje automático [38], y luz estructurada basada en barrido óptico [39].

Las mediciones de magnitudes SHM no son universales; dependen de la tecnología y el método utilizado, además de las características del puente. La magnitud del desplazamiento es particularmente importante para la estimación del estado del puente, ya que indica las desviaciones del puente con respecto al rendimiento del diseño original, pero es difícil de medir porque requiere un punto de referencia inmóvil [40] o un método de correlación entre las mediciones de desplazamiento y el movimiento del puente de debido a la interacción puente-vehículo, como se propone en esta tesis. Se han utilizado diferentes sensores para calcular el desplazamiento,

acelerómetros, galgas extensométricas, inclinómetros, fibra óptica deformación de la rejilla de Bragg, sin embargo, la información adquirida se limita al número de puntos equipados con sensores, como solución, para ampliar las medidas se propone el uso de sistemas de barrido óptico, que de manera continua y sin contacto pueden monitorear una gran cantidad de puntos sobre una estructura determinada, como puentes, con un solo sistema.

4.2.1. Monitoreo estructural de la salud

El monitoreo de salud estructural busca la obtención de datos de manera continua y a larga distancia que se requieren para evaluar las estructuras civiles e industriales, para poder predecir si dichas estructuras están con las condiciones óptimas para cumplir con sus funciones.

Con el monitoreo de salud estructural se puede evaluar si existen daños que pongan en riesgo la estructura que se está monitoreando. En general, existen una gran variedad de sensores que se podrían emplear para recolectar los datos continuamente a través del tiempo a lo largo de la estructura para la toma de datos en diferentes puntos. De esta manera se podría predecir la vida útil de la estructura y tomar decisiones del mantenimiento adecuado o determinar si se tiene que reemplazar la estructura. Con la aplicación de tecnología se pueden crear un mejor plan de mantenimiento de las estructuras civiles e industriales, ya que actualmente se hace de manera visual. Se pueden reemplazar las técnicas de tomas de evidencias destructivas de la estructura, así como evitar poner en riesgo la salud de los supervisores que actualmente revisan los lugares inaccesibles, ya sea colgados debajo de un puente o con tráfico continuo [41], como se muestra en la Figura (4.3) donde se muestra una inspección visual que es de alto riesgo.



Figura 4.3: Inspección visual debajo de un puente.

Con la evolución de las tecnologías, el procesamiento de datos permite el manejo de grandes volúmenes de información que el monitoreo de salud estructural y la inteligencia artificial pueden utilizar para realizar análisis, tanto para la extracción de patrones, como para su clasificación, para permitir una mejor comprensión de comportamiento estructural. También es posible tener alertas en tiempo real sobre posibles daños en la estructura, así como ser más preciso en la localización de daños estructurales.

Las estructuras y en especial los puentes sufren de daños por diversas causas día a día y es importante el monitoreo de salud estructural porque debido a estos daños se han provocado numerosos desastres ocasionando muchas pérdidas tanto económicas como de vidas humanas. Por esta razón el monitoreo de salud estructural es el encargado de dictaminar y localizar los daños de las estructuras y predecir el ciclo de vida de esas estructuras [42].

4.2.2. Tipos de estructuras

Estructura. En construcción, es el nombre que recibe el conjunto de elementos, unidos, ensamblados o conectados entre sí, que tienen la función de recibir cargas, soportar esfuerzos y

transmitir esas cargas al suelo, garantizando así la función estático - resistente de la construcción.

Toda edificación tiene una serie de elementos sin los que sería imposible mantenerla estática. Estos se hacen necesarios para lograr la inmovilidad total o parcial de la construcción, teniendo por tanto una función mecánica o estático-resistente, lo que permitirá que la edificación mantenga sus características esenciales de acuerdo con su finalidad y requisitos económicos.

Estos elementos, conocidos como estructura, están unidos de alguna manera entre sí, y constituyen el sostén de la edificación.

Desde el punto de vista estructural, toda edificación esta compuesta por elementos soportantes y soportados. Un ejemplo de esto está en la estructura que soporta la cubierta de una vivienda; es necesario construir una estructura que soporte el techo a sí mismo, y que a su vez, soporte la cubierta para que no caiga.

Muros

Son los elementos de la estructura que tienen la función de cerrar, soportar o contener. El muro soporta cargas que le son aplicadas, y las transmiten al suelo mediante la cimentación. Esta transmisión es lineal, o sea, a lo largo del muro, ver Figura (4.4).



Figura 4.4: Estructura de muros.

Columnas

Trabajan generalmente a compresión, transmitiendo la carga al suelo mediante su cimentación. Fundamentalmente su función es soportante, ver Figura (4.5).



Figura 4.5: Estructura de columnas.

Vigas

Son elementos simples, generalmente de eje rectilíneo, que tienen la función de recibir cargas. Están soportadas en uno o más apoyos: cuando están soportadas por sus extremos, y estos giran libremente, se les llama apoyadas. Si las vigas tienen varias luces y se comportan como una unidad, se les llama vigas continuas. Si las vigas tienen varias luces y se comportan como una unidad, se les llama vigas continuas. Los esfuerzos más comunes a que están sometidas las vigas, son los de flexión y cortantes. Transmiten cargas a otras vigas, a las columnas o a los muros, según el tipo de trabajo que realicen en la estructura, ver Figura (4.6).



Figura 4.6: Estructura de vigas.

4.2.3. Puentes de concreto y sus principales componentes

El monitoreo de salud estructural inspecciona los daños a las estructuras para garantizar que son seguras. Los deterioros son los daños que se dan con el funcionamiento de las estructuras de los puentes durante su vida efectiva. Es por esto que el puente debe ser inspeccionado. Cuando un puente empieza a tener su función y se presentan daños inmediatos se debe a un proyecto defectuoso, principalmente en los puentes se verifican si hay grietas en el concreto, deformaciones y corrosión en los materiales de metal y soldadura [41].

Superficie de desgaste o rodamiento

Es la pavimentación de la superficie superior y accesos al puente. Se construye con pavimentos de materiales de concreto o asfálticos.

Vigas

Su tarea es soportar cargas, pero dando flexibilidad a la construcción. El concreto es el material para la viga más comúnmente empleado. Estas en su mayoría son colocados longitudinalmente en dirección del tráfico.

Diafragmas

Los diafragmas transmiten fuerzas para apoyar directamente a la losa que está sobre las vigas. Esto se logra atravesando las vigas con varillas de hierro. Los diafragmas se construyen con diversos materiales tales como hierro, concreto o madera.

Losa principal

Las losas son las estructuras que tienen formas planas y continuas y están apoyadas sobre vigas y diafragmas. El trabajo que realizan es el soportar las cargas que reciben del tráfico vehicular.

Juntas

Las juntas permiten movimientos en la estructura del puente como en los cambios de temperatura, efectos de retracción, cargas de tráfico o asentamientos diferenciales garantizando la seguridad del puente.

Estribos de puentes

Los estribos tienen el propósito de transferir las cargas hacia la cimentación para ayudar al terraplen y evitar la erosión.

Pila de puentes

Las pilas de un puente tienen la función de unir y transferir las cargas horizontales y verticales a las zapatas que reciben de tráfico vehicular. Estas pilas se construyen donde hay paso de agua debajo del puente. No debe interferir en la corriente del agua.

Cimentaciones en puentes

Las cimentaciones transfieren las cargas hacia el suelo dándole seguridad a la estructura del puente. Estas están construidas normalmente de concreto.

Losas de cimentación

Estas estructuras son construidas para aumentar el área sobre el suelo que recibirá las cargas. Estas pueden ser de concreto armado o de hierro estructural de refuerzo. Se emplean en suelos

con bajas resistencias.

Protecciones adyacentes a la estructura de un puente

Estos son necesarios debido a los daños que ocasionan los fenómenos naturales para garantizar el buen funcionamiento de los puentes. Algunas de estas protecciones son: taludes, muros, losas de aproximación, emplantillados y badenes.

Elementos complementarios

■ Barandales

Se emplean para proteger a los peatones, evitando posible caídas del puente o que vehículos ligeros se salgan del puente.

■ Aceras

Las aceras permiten el paso seguro de los peatones. Comúnmente se construyen a los laterales del puente.

■ Aparatos de apoyo

Los aparatos de apoyo proporcionan la interacción de las cargas entre las pilas y los estribos del puente.

■ Topes antisísmicos

Los topes antisísmicos son contruidos de concreto por debajo los separadores entre vigas. su función es disminuir el movimiento transversal que pudieran tener durante un sismo.

■ Barras antisísmicas

Las barras antisísmicas se colocan en la losa de apoyo de las vigas, se lubrican y se forran de poliducto para evitar su oxidación. Su función es que en caso de sismo durante las

oscilaciones eviten movimiento brusco para que las vigas y los estribos del puente se separen durante el sismo.

■ Pernos y dispositivos de anclaje

Estos dispositivos se utilizan en las zapatas para fijar los estribos y pilas. Frecuentemente se construyen de acero inoxidable y se emplea un recubrimiento metálico para evitar la corrosión ante el concreto.

■ Ductos y drenajes

Estos elementos evitan la acumulación de agua y canalizan el flujo del agua hacia el exterior del puente. Pueden ser cunetas de mampostería, cunetas de concreto, tuberías, cunetas de concreto con asiento asfáltico.

4.2.4. Puentes y tipos de mantenimiento

Para realizar una planificación del mantenimiento de un puente, primero se realiza la inspección del puente para detectar defectos en sus estructuras. Con esto además se pretende realizar un programa de trabajos desde los más urgentes por su gravedad hasta los de mantenimiento preventivo y por el tránsito diario promedio anual (TDPA). También sirven para crear un presupuesto ².

Algunos de los trabajos del mantenimiento rutinario y periódico son similares, pero sus diferencias son que los volúmenes de trabajo en el mantenimiento periódico son más grandes y se incluyen principalmente los trabajos de: reposición total o parcial de losas de concreto, reparaciones de concreto y acero en las estructuras y reposiciones de señalamiento.

²Manual para conservación de puentes y estructuras similares 2018 de la Secretaría de Comunicaciones y transporte en su sitio web http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_Conservación_de_Puentes/Manual_de_Conservacion_de_Puentes.pdf

Mantenimiento rutinario

Superficie de rodadura

El proceso del mantenimiento de la superficie de rodamiento es dejar la calzada sin ningún tipo de materiales u objetos para su funcionamiento correcto.



Figura 4.7: Trabajos en la superficie de rodadura.

Superestructura

Son los procesos de mantenimiento que se realizan en la superestructura que garanticen el buen estado en cuanto a imagen y seguridad, así como para que no se presente el deterioro de alguno de sus elementos.



Figura 4.8: Limpieza en parapetos.

Subestructura

Son los procesos de mantenimiento que se realizan en la subestructura que garanticen el buen estado en cuanto a imagen y seguridad, así como para que no se presente el deterioro de alguno de sus elementos.



Figura 4.9: Limpieza de juntas de muros de tierra armada.

Cimentación

Las actividades de mantenimiento rutinario en algunas estructuras de cimentación no se realizan, esto se debe a que no son accesibles.

Dispositivos de apoyo

Se realizan actividades de mantenimiento rutinario en los dispositivos de apoyo para garantizar su buen estado y funcionamiento, así como prevenir su deterioro.



Figura 4.10: Protección contra intemperismo a base de espuma de poliuretano.

Accesos

Para garantizar las condiciones óptimas de los accesos a las estructuras de los puentes en cuanto a drenaje, seguridad e imagen, se realizan los trabajos necesarios de mantenimiento rutinario.



Figura 4.11: Pintura en losas de protección y conos de derrame.

Señalamiento

Se realizan trabajos de reposiciones, limpieza e instalación de nuevos señalamientos, en los señalamientos verticales u horizontales.



Figura 4.12: Reposición de marcas en el pavimento.

Para más información acerca del mantenimiento rutinario ver anexo A.

Mantenimiento periódico

Superficie de rodamiento

El proceso del mantenimiento de la superficie de rodamiento es dejar la calzada sin ningún tipo de materiales u objetos para su correcto funcionamiento.



Figura 4.13: Rencarpetado de superficie de rodadura.

Superestructura

Son los procesos de mantenimiento que se realizan en la superestructura que garanticen el buen estado en cuanto a imagen y seguridad, así como para que no se presente el deterioro de alguno de sus elementos.



Figura 4.14: Reparación de guarniciones y banquetas.

Subestructura

Son los procesos de mantenimiento que se realizan en la subestructura que garanticen el buen estado en cuanto a imagen y seguridad, así como para que no se presente el deterioro de alguno de sus elementos.



Figura 4.15: Construcción de conos de derrame.

Cimentación

Las actividades de mantenimiento periódico en algunas estructuras de cimentación no se realizan, esto se debe a que no son accesibles.

Elementos complementarios y de operación de la estructura

Son los accesos, señalamientos, limitaciones al tránsito y todas las actividades que se realizan para la reparación o renovación de todo elemento o dispositivo físico ya sea de concreto, acero, neopreno, madera, etc. que son los elementos responsables en el funcionamiento de un puente y/o accesos.



Figura 4.16: Renivelación de accesos.

Para más información acerca del mantenimiento periódico ver anexo B.

4.3. Sistemas de barrido

4.3.1. Sistema de barrido óptico para medición de desplazamiento

El sistema de barrido óptico propuesto para la medición del desplazamiento realiza mediciones de coordenadas espaciales para evaluar los sesgos en los valores de medición de las coordenadas y determina si se ha producido un desplazamiento espacial en los elementos estructurales bajo control. Su principio de funcionamiento se basa principalmente en la apertura de barrido optoelectrónica que se muestra en la Figura 4.17 y un método de triangulación dinámica.

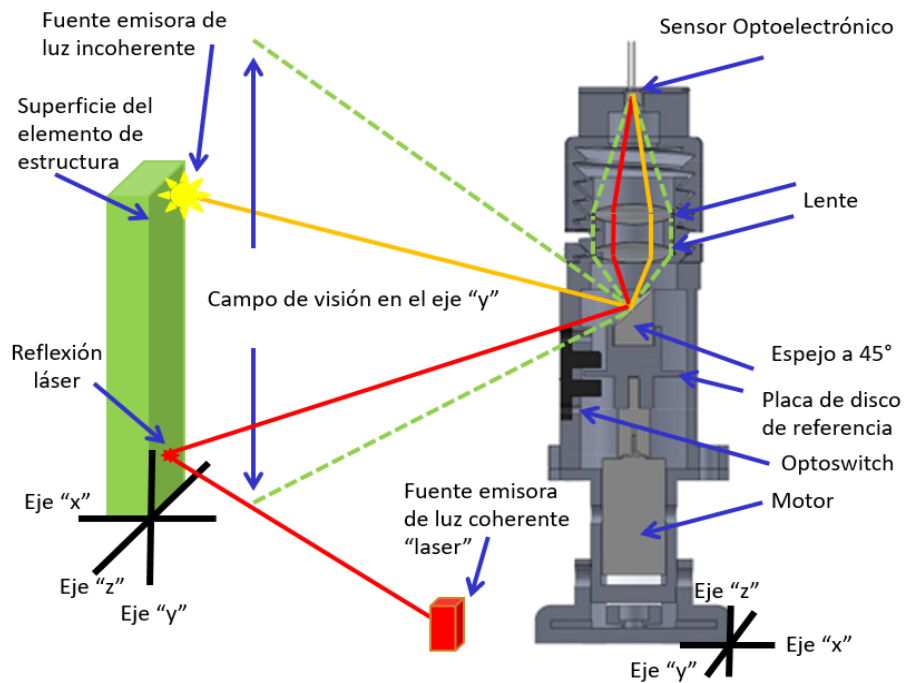


Figura 4.17: Principio de apertura de barrido optoelectrónica.

El sistema se puede configurar para realizar mediciones de coordenadas espaciales 2D o 3D. Incluso en su forma básica, se puede configurar para que solo realice mediciones de ángulos. El sistema de barrido óptico puede configurarse para trabajar con fuentes de luz incoherentes o con una fuente de luz coherente como un láser. Por lo general, la luz incoherente se utiliza para mediciones de larga distancia (de 5 a 20 metros de distancia), mientras que el láser se utiliza

para distancias cortas y medias (de 1 a 5 metros de distancia).

4.3.2. Principio de la apertura de barrido optoelectrónica

El principio de funcionamiento de la apertura de barrido optoelectrónica y sus partes fundamentales se describen a continuación. Contiene un motor de CC que gira continuamente en una frecuencia específica entre un rango aproximado de 20 a 60 Hz. En el eje del motor se monta una placa de disco, con una muesca de referencia para medir la frecuencia de rotación del motor. Cuando la posición de la muesca del disco coincide con la posición del optoswitch, el receptor puede detectar la señal enviada por el emisor, produciendo un pulso en cada revolución como se muestra en la Figura 4.18, donde $T_{2\pi}$ expresado por (4.1) corresponde al tiempo necesario para hacer un barrido, y f corresponde a la frecuencia de barrido.

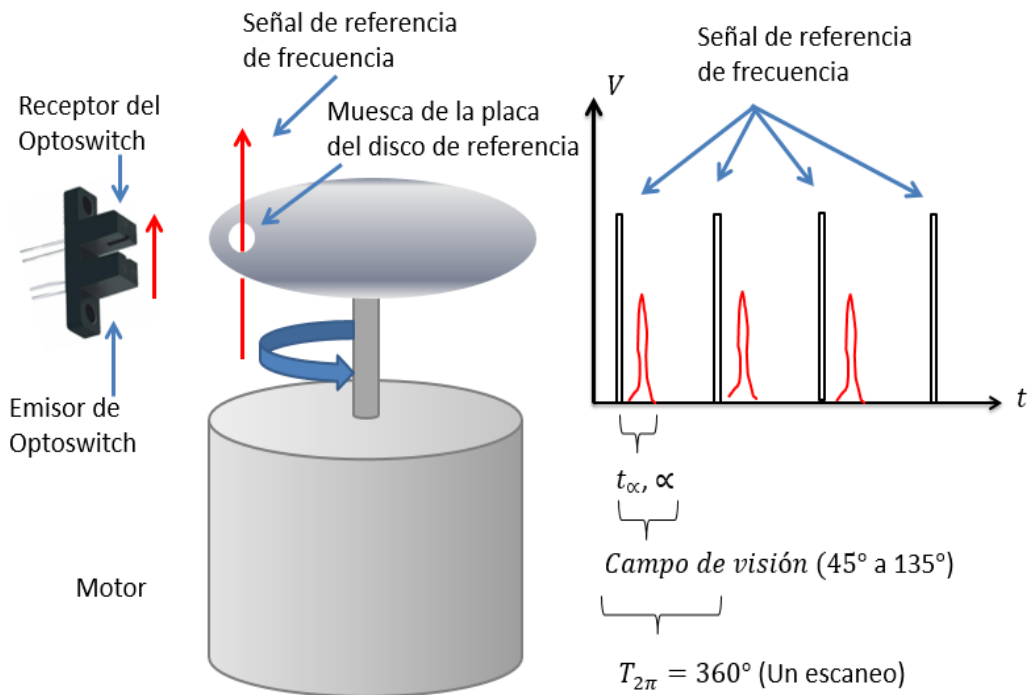


Figura 4.18: Sistema de referencia para el cálculo de la frecuencia de barrido.

$$T_{2\pi} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi f} = \frac{1}{f} \quad (4.1)$$

El camino óptico está formado por un espejo de 45° que gira con la rotación del motor durante el proceso de barrido para encontrar las emisiones de luz y de acuerdo con la ley de reflexión, la refleja a 90° a través de lentes que coliman las emisiones de luz a un sensor optoelectrónico que transduce la señal de luz a una señal optoelectrónica, como se ilustra en la Figura 4.19, donde t_α es el tiempo entre la señal de referencia y el momento en que se percibe la emisión de luz, mientras que α es la medición de ángulo utilizada para calcular las coordenadas bajo medición a través del método de triangulación dinámica.

$$\alpha = t_\alpha 2\pi f \quad (4.2)$$

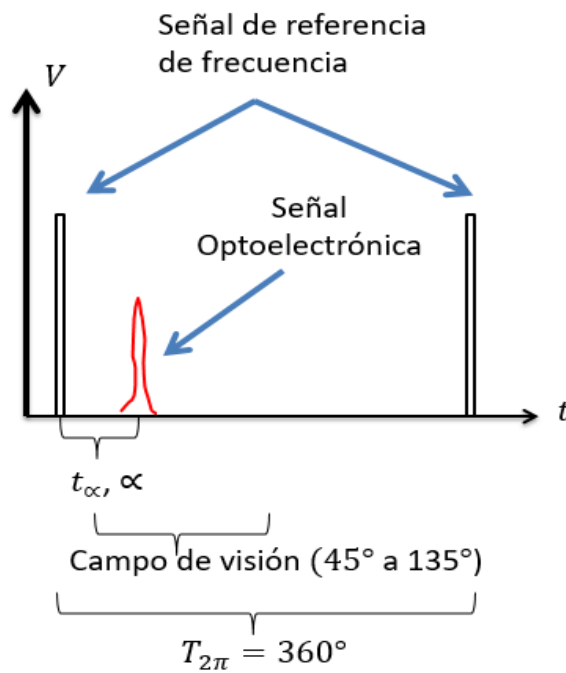


Figura 4.19: Representación de señal optoelectrónica.

La selección del sensor optoelectrónico y el tipo de fuente de luz a detectar depende de la aplicación para la que está configurado el sistema. Esto incluye consideraciones de condiciones ambientales de operación como fuentes de ruido óptico [43], temperatura [44], iluminación u oscuridad, distancias de detección y características de la superficie del objeto. De esta selección

se derivan diversos tipos de esquemas de control y procesamiento de señales optoelectrónicas para condicionar el proceso de medición [45], [46], [47]. La configuración más común para el monitoreo de la salud estructural a distancias cortas y largas se describe a continuación.

Distancia corta

La configuración del sistema de barrido óptico también llamado sistema de visión técnica (TVS, por sus siglas en inglés) ha demostrado ser una opción confiable en tareas de SHM, presentando un equilibrio entre precisión y rangos de operación a distancias cortas (entre 1 a 5 metros de distancia). Sin embargo, presenta limitaciones para medir coordenadas 3D en ángulos más amplios; debido a la capacidad de la reflexión del láser, la intensidad que puede recibir el sensor fotoeléctrico depende de la distancia y el ángulo de emisión del rayo láser. Para distancias cortas, las limitaciones pueden ajustarse mediante la implementación de estrategias de aprendizaje automático a través de métodos de corrección de medición, pero para distancias largas, el sensor fotoeléctrico no puede percibir la señal láser reflejada [48].

Está estructurado con un posicionador láser y una apertura de barrido optoelectrónico, para obtener coordenadas 3D mediante principios de triangulación dinámica láser, como se muestra en la Figura (4.20). Donde la coordenada (x, y, z) se calcula mediante (4.3) a (4.6), [49].

$$x_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - B_{ij} + C_{ij}]} \quad (4.3)$$

$$y_{ij} = a \left(\frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin[180^\circ - B_{ij} + C_{ij}]} \right) \text{ at } B_{ij} \leq 90^\circ \quad (4.4)$$

$$y_{ij} = a \left(\frac{1}{2} + \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin[180^\circ - B_{ij} + C_{ij}]} \right) \text{ at } B_{ij} > 90^\circ \quad (4.5)$$

$$z_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \tan \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - B_{ij} + C_{ij}]} \quad (4.6)$$

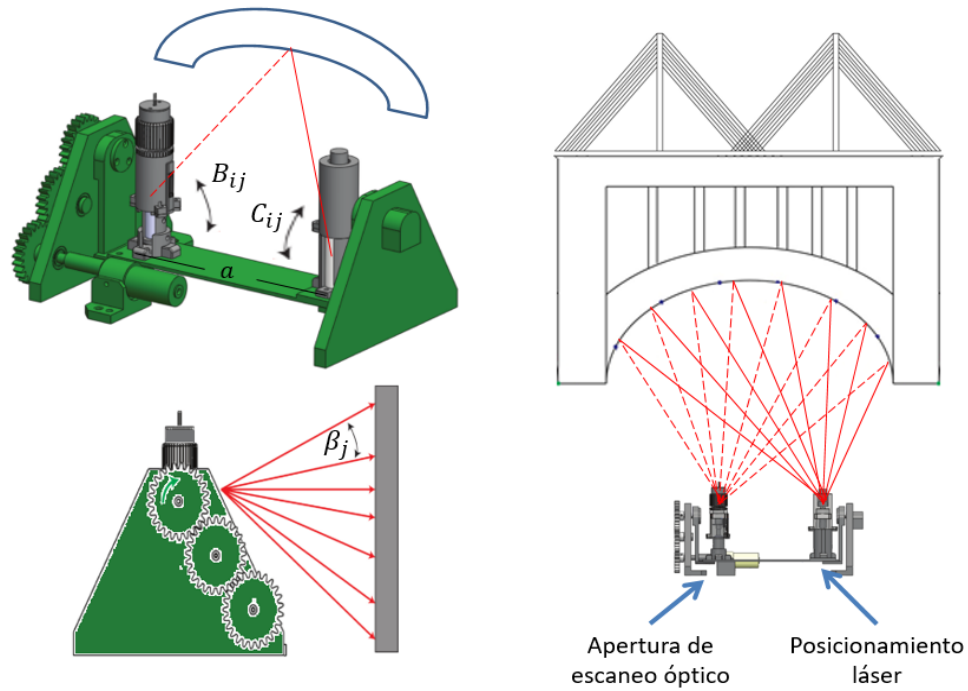


Figura 4.20: Sistema de barrido óptico basado en emisión de luz coherente para SHM.

Distancia larga

Esta configuración conocida como OSS (de sus siglas en inglés), también ha demostrado ser una opción confiable en tareas de SHM, presentando un equilibrio entre precisión y rangos de operación a grandes distancias (entre 5 y 20 metros de distancia) [2]. Sin embargo, su diseño comúnmente basado en el uso de fotodiodo presenta limitaciones para medir coordenadas 3D en entornos con ruido óptico; especialmente en ambientes exteriores con alta concentración de luz solar, resultando en la saturación del sensor fotoeléctrico en el rango aproximado de día entre las 10:00 y las 18:00 horas (en Mexicali, BC, México, donde se realizaron los experimentos) [50]. Después de una comparación de los diferentes tipos de sensores fotoeléctricos como fotodiodos, fototransistores, diodo emisor de luz (LED, de sus siglas en inglés) como receptor, LED infrarrojos como receptor e inclusive la resistencia dependiente de la luz (LDR, de sus siglas en inglés), se ha observado que con el uso de un LED como sensor fotoeléctrico, en especial aquellos que trabajan en el rango de longitud de onda de la luz azul (427- 476 nm) [43], es posible discriminar el ruido de la luz solar con el apoyo de filtros digitales, como respuesta

de impulso finito (FIR, de sus siglas en inglés) y el filtro Savitzky-Golay, que permiten que el sistema funcione en entornos hostiles con contaminación lumínica [14]. Además, con uso de técnicas computacionales basadas en la clasificación de patrones, como el análisis discriminante lineal (LDA, de sus siglas en inglés) y la regresión lineal (LR, de sus siglas en inglés), es posible clasificar las diferentes fuentes de luz detectadas para discriminar aquellas que no son de interés [51].

A diferencia del TVS, el OSS está estructurado con dos aperturas de barrido optoelectrónicas, en lugar de un posicionador láser y una apertura de barrido optoelectrónica. Las fuentes emisoras de luz se utilizan como indicadores. Las fuentes emisoras de luz se colocan en diferentes puntos de interés sobre la estructura, y luego ambas aperturas de barrido optoelectrónico, barren el campo de visión proporcionando los valores de medidas angulares B_{ij} y C_{ij} en el plano específico definido por β_j para aplicar el principio de triangulación dinámica para calcular la coordenada (x, y, z) por (4.3) a (4.6), como se muestra en la Figura (4.21).

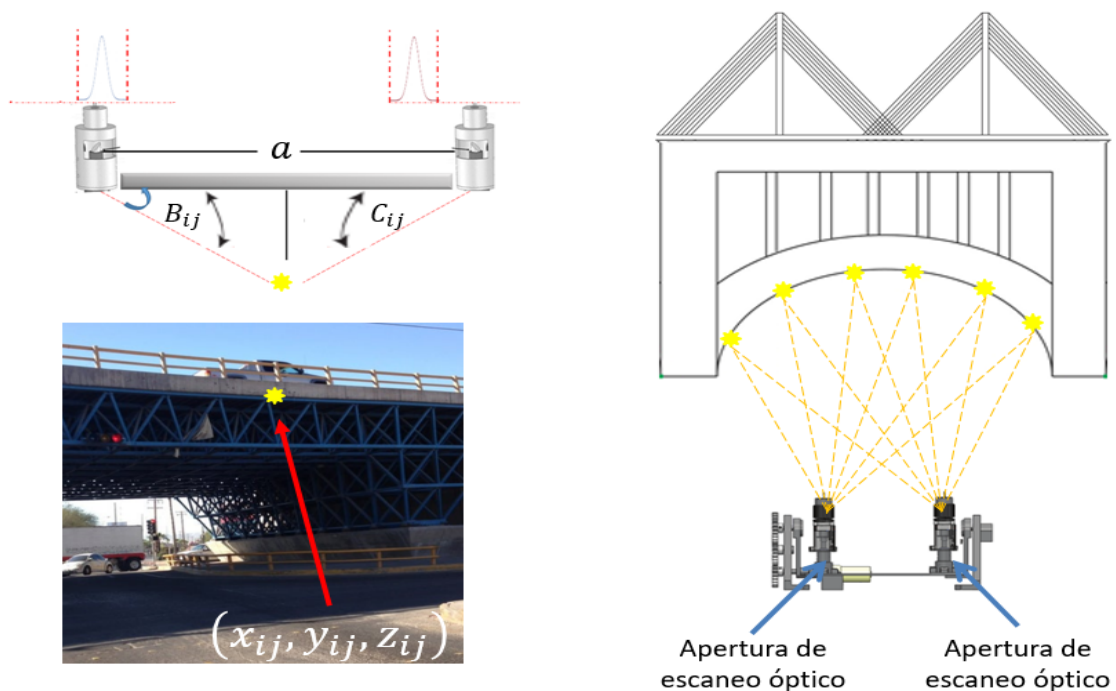


Figura 4.21: Sistema de barrido óptico basado en emisión de luz incoherente para SHM.

Uno o más sistemas OSS pueden utilizarse para monitorear estructuras en cualquiera de las configuraciones descritas pero en ambos casos, para ser aplicados para monitoreo SHM de puentes requieren ser complementados con un sistema para conocer la carga en el puente en el tiempo específico cuando sus coordenadas espaciales estructurales se miden para correlacionar el desplazamiento del puente con el efecto de la interacción vehículo-puente.

4.4. Evaluación de la interacción vehículo-puente

Algunos daños en el puente se pueden inferir a partir del análisis de datos obtenidos de eventos VBI (de sus siglas en inglés), como en el uso de la respuesta de aceleración, donde el análisis de la frecuencia y amplitud de los datos de vibración se usa para detectar daños en grietas locales [52]. Pero en otros casos, los datos de eventos VBI se correlacionan con otras medidas del puente, como en [53], donde se usa el método de la cuña para medir la excitación del impulso VBI que se correlacionará con la respuesta de aceleración del puente. O como en [54] y [55], donde las posiciones de las cargas de tráfico y el historial de carga se tienen en cuenta durante el proceso de correlación con el movimiento vertical del puente. Dado que la carga de tráfico en los puentes es un parámetro importante en las tareas de SHM, en [56] se lleva a cabo una revisión y clasificación de artículos dedicados a los métodos de monitoreo de la salud basados en la clasificación de vehículos en puentes, de donde se identifica la clasificación basada en sistemas de visión. Los métodos basados en la visión se consideran una aplicación de la tecnología de detección inteligente en SHM. Estos son compatibles con sensores inteligentes y robóticos, cámaras digitales, teléfonos inteligentes, vehículos aéreos no tripulados (drones) y algoritmos computacionales. La carga podría detectarse a través de un sensor fijo, a través del área de monitoreo, mediante una visión global o un híbrido de estos métodos. El trabajo previo más relacionado con el desarrollo de este artículo se encuentra en [57], donde se propone un método SHM para puentes, basado en la correlación de dos sistemas basados en visión (cámaras), uno para detección de carga de vehículos y el otro para desplazamiento de puentes, para una revisión detallada de sistemas basados en visión para monitoreo de puentes, ver [13].

4.5. Modelos computacionales del aprendizaje máquina

Los algoritmos de aprendizaje máquina tienen como base, la afirmación de que una computadora aprende de los datos y pueda lograr separar en clases los datos para aplicar métodos estadísticos para comprender tareas de regresión y clasificación. Este aprendizaje permite aprender en términos de jerarquías de conceptos.[58].

4.6. Modelos computacionales como clasificadores de carga de puentes para evaluación de la interacción de puente-vehículo

Se han desarrollado diferentes métodos para la detección de vehículos en los datos de video de las cámaras de vigilancia al aire libre, la mayoría de ellos para evaluar la distribución de velocidad y la densidad de los vehículos, mientras que otros para rastrear el paso de vehículos.

En el desarrollo del sistema basado en visión propuesto para la correlación con los desplazamientos de coordenadas 3D del puente, se han investigado diferentes enfoques para seleccionar un método adecuado para desarrollar un clasificador de carga de puente.

La clasificación de la carga del puente mediante el procesamiento de imágenes a partir de datos de video de tráfico requiere algoritmos de visión por computadora para extraer la información de los vehículos detectados en los cuadros de video, además el proceso de seleccionar la mejor configuración de posición de la cámara para los diferentes escenarios está relacionado con la selección del enfoque de procesamiento de imágenes para dicho conjunto de datos para construir una aplicación de monitoreo específica. Para aplicaciones donde se requiere información en tiempo real, técnicas de procesamiento de imágenes eficientes y de bajo costo están en constante desarrollo, además se desea un desempeño robusto en condiciones ambientales cambiantes.

En busca de un algoritmo robusto con rendimiento en condiciones ambientales cambiantes, se han seleccionado dos enfoques para realizar esta tarea. Un enfoque basado en el autoaprendizaje, a través del aprendizaje automático mediante un algoritmo que hace uso de "Big Data", que se encuentra en el estado del arte, aprendizaje profundo de redes neuronales (Deep Learning), y un segundo enfoque clásico y simple basado en el registro de imágenes, sin un enfoque de aprendizaje automático, y definitivamente con un costo computacional muy bajo.

4.6.1. Aprendizaje profundo para la clasificación de cargas de puentes

Un número cada vez mayor de investigadores intentan aprovechar las técnicas de aprendizaje profundo en diversas aplicaciones. Cada día, se desarrollan modelos novedosos de redes neuronales de aprendizaje profundo para mejorar el conocimiento de la relación de características multidimensionales no lineales en imágenes, principalmente con fines de clasificación. Todo este desarrollo proporciona una herramienta potencialmente útil que puede automatizar la clasificación de cargas de puentes [59].

La red neuronal es un modelo matemático inspirado en los patrones neurofisiológicos que describen las funciones del cerebro humano a través de miles de millones de neuronas dispuestas en una estructura jerárquica de seis capas diferentes en la corteza humana, conectadas con otras neuronas que transmiten, procesan y almacenan mediante conexiones de sinapsis en neuronas constantes en procesos de plasticidad para el aprendizaje. La codificación de la sinapsis y los procesos simplificados de plasticidad neuronal son la base para la formulación del modelo matemático de la red neuronal, expresado por (4.7)-(4.8) para cada neurona, donde $x_{i=1:1:n}$ es cada una de las n entradas de neuronas, $w_{i=1:1:n}$ sus correspondientes pesos sinápticos, y ξ la suma ponderada de las entradas de las neuronas. Mientras que y es la salida de la neurona después que la función de activación σ es evaluada con ξ .

$$\xi = \sum_{n=1}^i w_i x_i \quad (4.7)$$

$$y = \sigma(\xi) \quad (4.8)$$

La selección adecuada de σ determina las capacidades de convergencia de la red neuronal para alcanzar precisión y eficiencia. Las funciones de activación más comunes son el paso binario gobernado por h (4.9), la función lineal (4.10), donde c es una constante, y las funciones de activación no lineales, como la unidad lineal sigmoidea, tangente hiperbólica, rectificadora (ReLU), leaky ReLU, Paramétrica ReLU, Softmax, y Swish, este último expresado en (4.11) con la mayor precisión de clasificación según [44].

$$\sigma(\xi) = \begin{cases} 0 & \text{if } \xi < h \\ 1 & \text{if } \xi \geq h \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\sigma(\xi) = c(\xi) \quad (4.10)$$

$$\sigma(\xi) = \frac{\xi}{1 + e^{-\xi}} \quad (4.11)$$

La arquitectura de la red neuronal se define por la cantidad de neuronas y su interconexión (capas de entrada, ocultas y de salida). Es en las capas ocultas donde se propagan las señales, estableciendo el estado de las neuronas y el peso de las interconexiones que definen la configuración de la red neuronal. La más popular es la red neuronal feedforward (NN), donde las salidas de una capa se utilizan como entradas de la siguiente capa; las redes neuronales recurrentes (RNN), donde las salidas de una capa se retroalimentan en forma cíclica, este proceso puede crear una “memoria a corto plazo” o “memoria a largo-corto plazo”, también conocida como retropropagación; la red neuronal convolucional (CNN), donde tres capas realizan tres tareas diferentes, convolucional (las entradas se analizan mediante filtros para generar un mapa de características), agrupación, conocida como "pooling"(se reduce el tamaño del mapa de características) y completamente conectada, conocida como fully-connected (aplana los mapas

juntos y compara las probabilidades de que cada característica ocurra junto con las demás, hasta que se determine la mejor clasificación). Todas estas configuraciones con múltiples capas, redes neuronales profundas (DNN), se definen como modelos de aprendizaje profundo, expresadas por hiperparámetros, el número de capas ocultas, la función de activación y cuántas veces (épocas) se debe repetir el entrenamiento.

Una DNN comúnmente tiene entre 2-8 capas adicionales de neuronas. Los diferentes tipos de redes neuronales son el núcleo del aprendizaje profundo, una red neuronal que aumenta en precisión con la cantidad de capas ocultas, dicho proceso convierte la red neuronal en una red neuronal profunda, también identificada como un enfoque de aprendizaje profundo. Una comparación entre las redes neuronales tradicionales contra las redes neuronales novedosas en especial para la tarea postulada en este trabajo que consiste en la clasificación de imágenes se relaciona con la eficiencia de los procesos, correlación y comprensión de una gran cantidad de datos en imágenes de alta resolución para su simplificación, extracción de características y clasificación. Las nuevas propuestas de estructuras de redes neuronales, evolucionan para resolver problemas presentes en las redes neuronales tradicionales, tales como el sobreajuste de parámetros que produce modelos complejos que son difíciles de depurar y ajustar debido a los intensos requisitos de computación. La principal diferencia entre las redes neuronales tradicionales es que se basan en una arquitectura completamente conectada, mientras que en las redes neuronales más novedosas las neuronas de una capa no se conectan a todas las neuronas de la siguiente.

4.6.2. Proceso de registro de imágenes

El registro de imágenes es un método clásico [60] que continúa en el estado del arte, utilizado para diversas aplicaciones basadas en enfoques de procesamiento de imágenes [61], algunos ejemplos son, procesamiento de imágenes para análisis corporales y diagnóstico médico [62], eliminación de fondo de imágenes [63], reconstrucción de modelos 2D y 3D [64], detección y seguimiento de objetos en movimiento [65], como en el trabajo propuesto.

Cada vez que sea necesario comparar dos o más imágenes de diferentes fuentes, tiempos o puntos de vista de referencia, se pueden aplicar métodos de registro de imágenes. A veces para eliminar variaciones de imágenes, otras para identificar un objetivo en una imagen o para comparar dos imágenes de una escena fija.

Se han desarrollado varios métodos de registro de imágenes en la búsqueda de una estrategia para obtener resultados satisfactorios, la mayoría de las veces cada método se ha desarrollado para una aplicación específica. Sin embargo, la mayoría de los métodos incluyen detección de características, coincidencia de características, una estimación del modelo de transformación, re-muestreo y transformación de imágenes.

Cuando es necesario comparar dos imágenes, es necesario alinearlas para identificar sus diferencias, por lo que es obligatoria una transformación para relacionar los puntos de la primera imagen con sus puntos correspondientes en la segunda imagen. Por lo general, estas imágenes son multi-temporales y el objetivo es encontrar y evaluar cambios en la escena entre las dos imágenes. Las variaciones se identifican por la diferencia de valores (intensidad) y la ubicación de los píxeles.

El registro de imágenes se puede definir como un proceso de transformación para alinear imágenes con un sistema de coordenadas específico. Dando como resultado un mapeo entre las dos imágenes, para relacionar sus diferencias espaciales y de intensidad. Las imágenes se expresan como matrices 2D indicadas por $I_1(x, y)$, y $I_2(x, y)$, relacionada por (4.12), donde f es la transformación de coordenadas espaciales 2D para mapear la coordenada original (x, y) a la nueva coordenada espacial (x', y') , como se indica en (4.13), mientras g es una transformación de intensidad 1D, para exponer la diferencia entre imágenes mediante el proceso de registro.

$$I_2(x, y) = g(I_1(f(x, y))) \quad (4.12)$$

$$(x', y') = f(x, y) \quad (4.13)$$

Los principales parámetros de cualquier método de registro de imágenes son relacionados con el enfoque de transformación espacial, como polinomio rígido, afín, proyectivo y global. De donde la más común es la transformación afín (que incluye las operaciones cartesianas de traslación, rotación, escala, estiramiento y cizallamiento), una transformación lineal t_x expresado por (4.14) y t_y expresado por (4.15) para hacer coincidir dos imágenes de una escena, mapeando el punto (x, y) en la primera imagen a (x', y') punto en la segunda imagen, como se expresa en (4.16) y (4.17).

$$t_x = t(x + x') = t(x) + t(x') \quad (4.14)$$

$$t_y = t(y + y') = t(y) + t(y') \quad (4.15)$$

$$x' = t_x(x, y) \quad (4.16)$$

$$y' = t_y(x, y) \quad (4.17)$$

Entonces, la transformación afín se puede expresar por (4.18), donde S es el parámetro de escala, $\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ es la matriz de rotación, y $\begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$ es el vector de traslación. Además, puede expresarse mediante (4.19) como la forma general 2D, o en la forma expresada en (4.20) a través del uso de coordenadas homogéneas. Se consideraron las siguientes transformaciones geométricas: traslación, rotación, escalado, estiramiento y corte, la transformada afín tiene seis parámetros, θ_2 y θ_5 para translación, θ_0 para rotación agregada, θ_1 para escalar, θ_3 para estirar y θ_5 para cizallar [66].

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 & \theta_1 & \theta_2 \\ \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

4.7. Correlación de datos de dos sistemas de medición

El monitoreo de salud estructural en puentes juega un papel importante en la prevención de fallas catastróficas. Sin embargo, la cuantificación de las condiciones de los puentes debido a su deterioro no es una tarea sencilla, y aunque existen distintos sensores y sistemas (acelerómetros, galgas extensiométricas, sistemas de barrido óptico, sistemas basados en láser, sistemas basados en fibra óptica, etc), su aplicación en una determinada estructura puede requerir o verse beneficiada con la implementación de más de un tipo de sensor y/o sistema.

La implementación de más de un tipo de sensor y/o sistema en el monitoreo de un puente puede involucrar una fusión o correlación de datos de los distintos sensores y/o sistemas.

A continuación se describen los métodos de correlación propuestos para la correlación de la carga de un puente con el desplazamiento de sus coordenadas.

Cabe aclarar que no se presentan resultados de experimentación de dicha correlación debido a que el alcance de este proyecto de tesis consistió en el desarrollo de un sistema de visión para la clasificación de la carga en un puente. A fin de que una vez implementados ambos sistemas, el de medición de desplazamiento y el de la carga vehicular, a través de un período prolongado de tiempo estos puedan ser correlacionados y contrastados con las inspecciones y evaluaciones “tradicionales” para identificar el comportamiento normal de un puente, versus un

comportamiento que indique que se está sufriendo deterioro [67][68].

4.7.1. Múltiple regresión/correlación

El método de múltiple regresión/correlación (MRC, de sus siglas en inglés), es un sistema genérico de análisis de datos para estudiar la interrelación de dos o más variables. Es un método muy flexible que puede ser utilizado para el análisis de relaciones de variables simples o complejas, cualitativas o cuantitativas, y que además permite la inclusión de técnicas para lidiar con datos perdidos o corrompidos (atípicos), es considerado un método certero y versátil para ser aplicado a distintos tipos de datos de las diversas aplicaciones.

Mientras que también puede ser utilizado para realizar predicciones, a partir del objetivo de pronosticar un resultado basado en datos que se recopilaron anteriormente durante el proceso de correlación de variables. Sin embargo, en esta sección nos enfocaremos en los métodos de correlación.

4.7.2. Correlación de dos variables a través del coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de dependencia lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. Se puede definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas y continuas. Si la asociación entre los elementos no es lineal, entonces el coeficiente no se representa adecuadamente.

El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra. Un valor menor que 0 indica una asociación negativa; es decir, a medida que aumenta el

valor de una variable, el valor de la otra disminuye.

Uno de los primeros problemas a resolver mediante un índice del grado de asociación entre dos variables es el de la unidad de medida. Debido a que las dos variables se expresan típicamente en unidades diferentes, se necesita algún medio para convertir las puntuaciones en unidades de medida comparables. Es decir, la escala de medida debe ser una escala de intervalo o relación. Las variables deben estar distribuidas de forma aproximada. La asociación debe ser lineal. No debe haber valores atípicos en los datos. Uno de los primeros problemas a resolver mediante un índice del grado de asociación entre dos variables es el de la unidad de medida. Debido a que las dos variables se expresan típicamente en unidades diferentes, se necesita algún medio para convertir las puntuaciones en unidades de medida comparables. Es decir, la escala de medida debe ser una escala de intervalo o relación. Las variables deben estar distribuidas de forma aproximada. La asociación debe ser lineal. No debe haber valores atípicos en los datos.

El coeficiente de correlación de Pearson se expresa por medio de la ecuación (4.21), donde x es igual a la primera variable, y pertenece a la segunda variable, z_x es la desviación estándar de la primera variable, z_y es la desviación estándar de la segunda variable y N es el número de datos. Mientras que su interpretación se describe en la Tabla (4.2).

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N} \quad (4.21)$$

Tabla 4.2: Interpretación del coeficiente de Pearson

Criterio	Interpretación
Correlación menor a cero	Si la correlación es menor a cero, significa que es negativa, es decir, que las variables se relacionan inversamente. Cuando el valor de una variable es alto, el valor de la otra variable es bajo. Mientras más próximo se encuentre a -1, más clara será la covariación extrema. Si el coeficiente es igual a -1, nos referiremos a una correlación negativa perfecta.
Correlación mayor a cero	Si la correlación es igual a +1 significa que es positiva perfecta. En este caso significa que la correlación es positiva, es decir, que las variables se correlacionan directamente. Cuando el valor de una variable es alto, el valor de la otra también lo es, sucede lo mismo cuando son bajos. Si es cercano a +1, el coeficiente será la covariación.
Correlación igual a cero	Cuando la correlación es igual a cero significa que no es posible determinar algún sentido de covariación. Sin embargo, no significa que no exista una relación no lineal entre las variables. Cuando las variables son independientes significa que estas se encuentran correlacionadas, pero esto no significa que esto sea verdadero.

4.7.3. Correlación de dos variables a través del coeficiente de correlación de Spearman

La correlación de Spearman evalúa la relación monótona entre dos variables continuas u ordinales. En una relación monótona, las variables tienden a cambiar al mismo tiempo, pero no necesariamente a un ritmo constante. El coeficiente de correlación de Spearman se basa en los valores jerarquizados de cada variable y no en los datos sin procesar. La correlación de Spearman suele utilizarse para evaluar relaciones en las que intervienen variables ordinales.

El coeficiente de correlación de Spearman es una medida no paramétrica de la correlación de rango (dependencia estadística del ranking entre dos variables). Mide la fuerza y la dirección de la asociación entre dos variables clasificadas. Se calcula por medio de la ecuación (4.22), donde n es el número de puntos de datos de las dos variables, d_i es la diferencia de rango del elemento n .

$$r_R = 1 - \frac{6 \sum_i d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4.22)$$

El Coeficiente Spearman, puede tomar un valor entre +1 y -1 donde, un valor de +1 significa una perfecta asociación de rango, un valor 0 significa que no hay asociación de rangos, un valor de -1 significa una perfecta asociación negativa entre los rangos. Si el valor se acerca a 0, la asociación entre los dos rangos es más débil. Es importante observar que si se incrementa una variable, la otra sigue una relación monótona.

4.7.4. Comparación de los coeficientes de Pearson y Spearman

El valor de los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman puede variar de -1 a $+1$. Para que el coeficiente de correlación de Pearson sea $+1$, cuando una variable aumenta, la otra variable aumenta en una cantidad consistente. Esta relación forma una línea perfecta. El coeficiente de correlación de Spearman también es $+1$ en este caso, ver Figura (4.22).

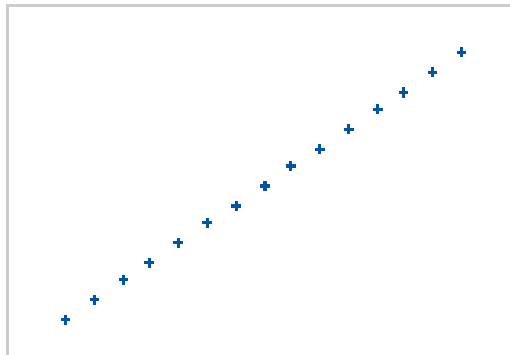


Figura 4.22: Pearson = +1, Spearman = +1

Si la relación es que una variable aumenta cuando la otra aumenta, pero la cantidad no es consistente, el coeficiente de correlación de Pearson es positivo pero menor que $+1$. El coeficiente de Spearman sigue siendo igual a $+1$ en este caso, ver Figura (4.23).

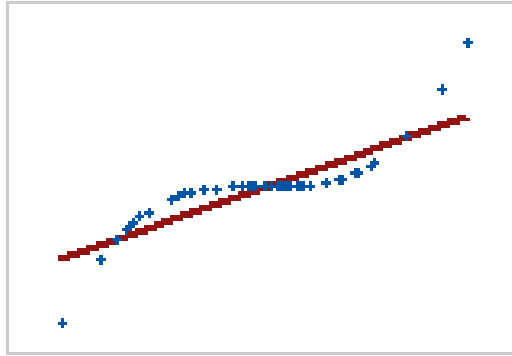


Figura 4.23: Pearson = +0.851, Spearman = +1

Cuando una relación es aleatoria o no existe, entonces ambos coeficientes de correlación son casi cero, ver Figura (4.24).

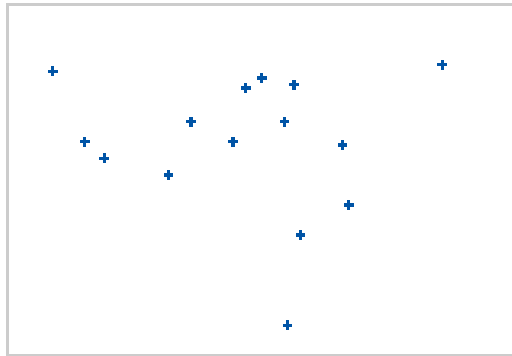


Figura 4.24: Pearson = -0.093 , Spearman = -0.093

Si la relación es una línea perfecta para una relación decreciente, entonces ambos coeficientes de correlación son -1 , ver Figura (4.25).

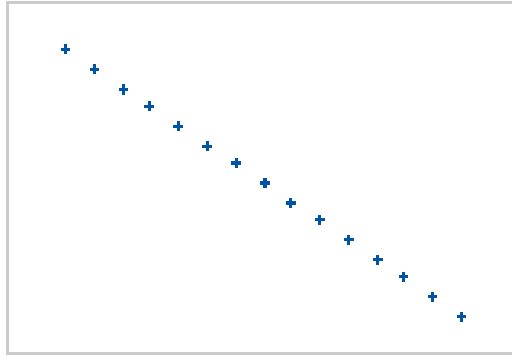


Figura 4.25: Pearson = -1 , Spearman = -1

Si la relación es que una variable disminuye cuando la otra aumenta, pero la cantidad no es consistente, entonces el coeficiente de correlación de Pearson es negativo, pero mayor que -1 . El coeficiente de Spearman sigue siendo igual a -1 en este caso, ver Figura (4.26).

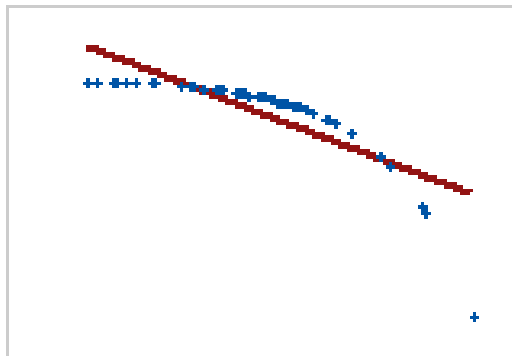


Figura 4.26: Pearson = -0.799 , Spearman = -1

Los valores de correlación de -1 o 1 implican una relación lineal exacta, como la existente entre el radio y la circunferencia de un círculo. Sin embargo, el valor real de los valores de correlación está en cuantificar las relaciones que son menos que perfectas. El descubrir que dos variables están correlacionadas suele ser útil para un análisis de regresión que intenta describir más detalladamente este tipo de relación.

Los coeficientes de correlación de Pearson solo miden relaciones lineales. Los coeficientes de correlación de Spearman solo miden relaciones monótonas. Por lo tanto, puede existir una relación significativa aunque los coeficientes de correlación sean 0 , ver Figura (4.27), donde

muestra una relación muy fuerte. Los coeficientes de Pearson y de Spearman son aproximadamente 0.

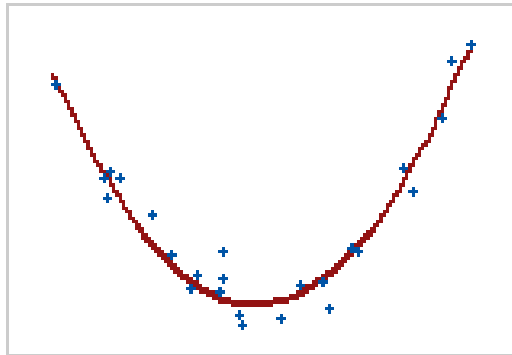


Figura 4.27: Coeficiente de 0

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para el propósito descrito, se desarrolló un clasificador de carga puente basado en un enfoque de aprendizaje profundo, con la arquitectura descrita en la Tabla (5.1), el conjunto de datos usado se dividió en 80 % para el procedimiento de entrenamiento y 20 % de prueba, mientras que el entrenamiento se dividió en 80 % de entrenamiento y 20 % de validación entre épocas. Inicialmente, se ha evaluado la mejor configuración de poses de cámaras de vigilancia mediante el uso de los Autos del dataset de Stanford [69], que proporciona imágenes de diversos tipos de vehículos en diferentes entornos, con múltiples orientaciones; desde donde se han identificado cuatro clases, vista frontal, vista trasera, vista lateral y vista angular. De esta evaluación inicial con cuatro clases se ha observado que cuanto mayor es el área cubierta por el vehículo, mejores son los resultados de precisión [70]. En consecuencia, se agregó una quinta clase con vista superior con imágenes personalizadas adquiridas en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. El conjunto de datos de autos de Stanford contiene originalmente 16,185 imágenes de 196 clases de vehículos. Los datos se dividen en 8,144 imágenes de entrenamiento y 8,041 imágenes de prueba, donde cada clase se ha dividido aproximadamente en una división 50-50. Las clases suelen estar en el nivel de marca, modelo, año. Sin embargo, para esta experimentación, se ha reclasificado de acuerdo con la vista de clase del vehículo (vista frontal, vista trasera, vista lateral y vista inclinada) y se ha completado con una nueva vista de clase con un área más grande cubierta (vista superior), como se muestra en Tabla (5.2). Tenga en cuenta que se recuperaron

15,935 imágenes del conjunto de datos de Stanford CARS, mientras que se discriminaron 250 imágenes, debido a que no encajan en ninguna clase.

Tabla 5.1: Forma de salida de la estructura del modelo CNN

Layer Type	Output Shape
Conv2D	(None, 100, 100, 32)
LeakyReLU	(None, 100, 100, 32)
MaxPooling	(None, 50, 50, 32)
Dropout	(None, 50, 50, 32)
Flatten	(None, 80000)
Dense	(None, 32)
LeakyReLU	(None, 32)
Dropout	(None, 32)
Dense	(None, 5)

Tabla 5.2: Descripción del Dataset

Class Label	Description	Class view example 1	Class view example 2	Class view example 3	Images quantity
Class 1	Front view				733
Class 2	Rear view				275
Class 3	Side view				1,020
Class 4	Tilt view				13,907
Class 5	Top view				250

Como las imágenes corresponden a diferentes entornos, cada imagen presentaba diferentes

Tabla 5.3: Métricas de clases

Class	Precision	Recall	F-score
1	0.88	0.15	0.26
2	0.00	0.00	0.00
3	0.86	0.20	0.32
4	0.89	1.00	0.94
5	0.92	1.00	0.98

relaciones de aspecto, que requieren un preprocesamiento para cambiar su tamaño a 100 px de ancho por 100 px de alto, con un modo de recorte normal. La arquitectura del algoritmo de aprendizaje profundo se desarrolló en Python, a través de la biblioteca de Keras que se ejecuta en TensorFlow mediante el diagrama de flujo general que se muestra en Figura (5.1). La precisión de entrenamiento, validación y prueba alcanzada ha sido del 88.32 %, 89.41 % y 87.96 % correspondientemente, mientras que las métricas de las clases se muestran en Tabla (5.3), donde la precisión (P), la recuperación (R) y las puntuaciones (F) han sido calculadas por (5.1)-(5.3). Donde la precisión es la capacidad del modelo para identificar la relevancia, es el porcentaje de predicciones positivas correctas, TP es la verdadera predicción, y FP es la falsa predicción. La recuperación es el porcentaje de verdaderos positivos detectados entre todas las verdades fundamentales relevantes, FN es una verdad fundamental no predicha. El F-score es la combinación lineal de precisión y recuperación para tener un valor de rendimiento único para la clasificación de métodos.

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5.1)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5.2)$$

$$F = 2 * \frac{P * R}{P + R} \quad (5.3)$$

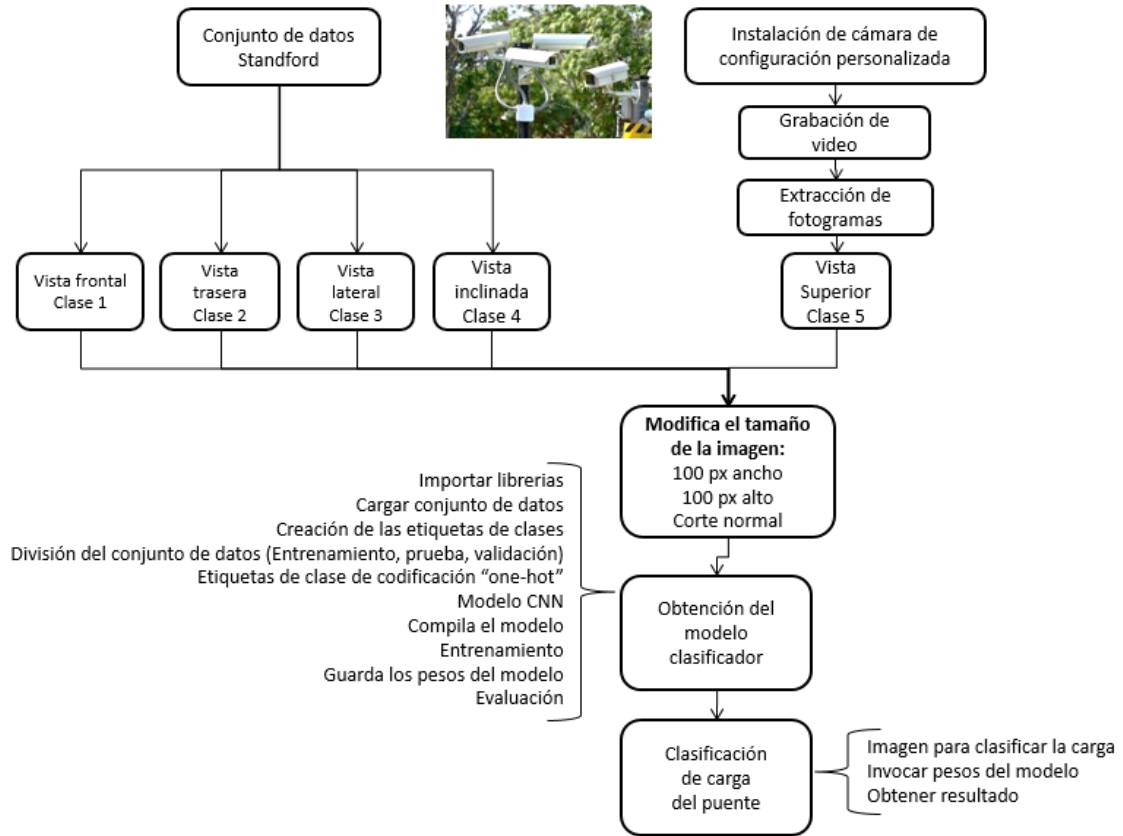


Figura 5.1: Diagrama de flujo general de aprendizaje profundo.

Esta sección propone un clasificador de carga basado en aprendizaje profundo. Mediante el aprendizaje profundo, las funciones se pueden extraer automáticamente de los datos preprocesados. La estructura de la red profunda diseñada y el rendimiento del método propuesto se evaluaron en una combinación de datos obtenidos existentes y personalizados, ambos recopilados en un nuevo conjunto de datos.

Para el enfoque de visión por computadora propuesto, el modelo diseñado puede clasificar las imágenes de los datos de video de acuerdo con el porcentaje de ocupación de vehículos del carril de la autopista del puente. Supone que la cámara está estacionaria. Se centra en detectar el vehículo como un objeto y calcular el porcentaje de ocupación de un tramo determinado del carril por el vehículo detectado. Se selecciona un fotograma inicial sin objetos en movimiento para mostrar el fondo fijo, para registrar posteriormente la imagen con un fotograma en

movimiento para identificar sus diferencias y calcular el número de píxeles que cambiaron del fotograma fijo al fotograma en movimiento, como se describe en la Figura (5.2). Se evaluaron cuarenta y ocho imágenes de la trayectoria de un vehículo a través de la sección de carril de la autopista de interés con 100 % de precisión de donde se extrajeron dos imágenes de cada clase para mostrar los resultados en la Tabla (5.4).

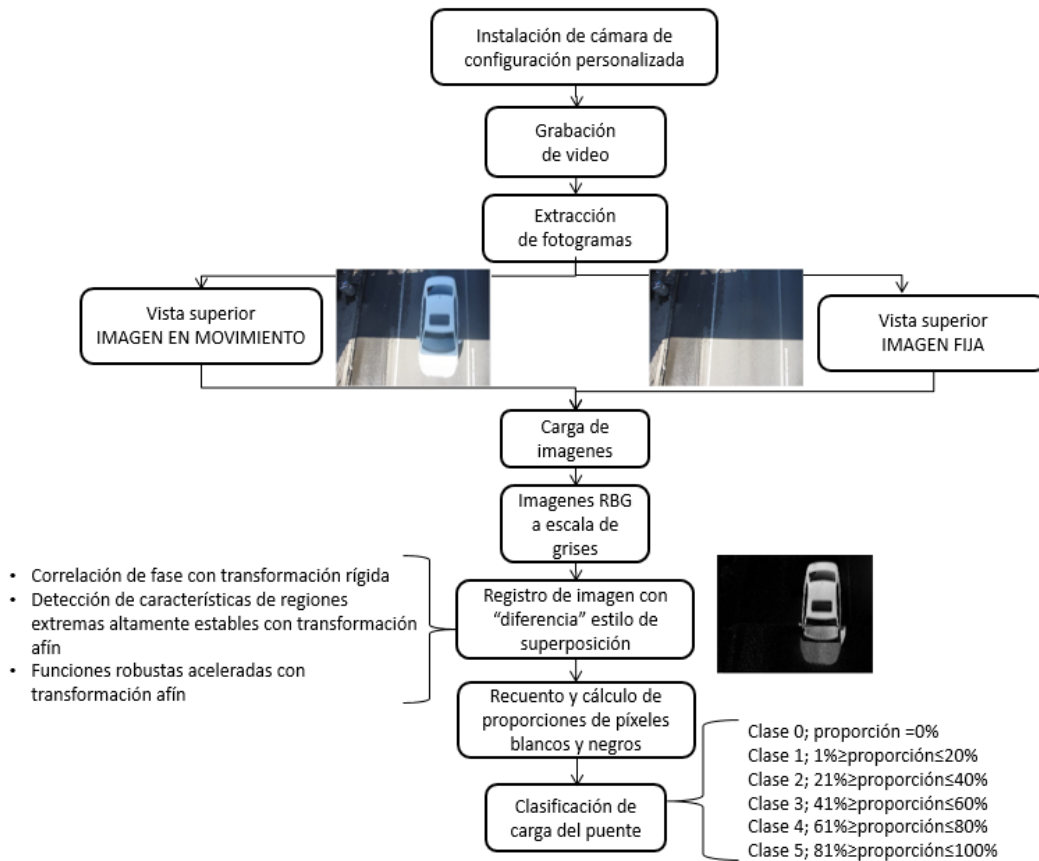


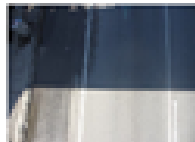





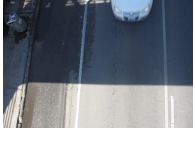

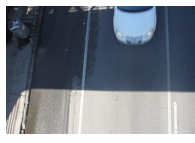

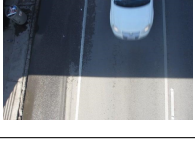

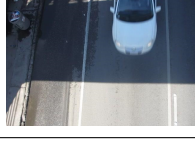

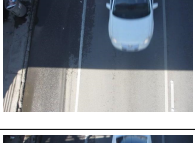

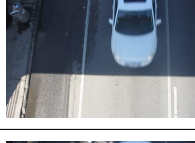

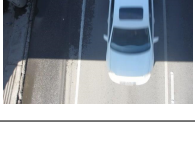

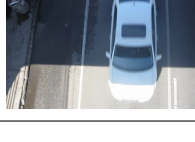



Figura 5.2: Diagrama de flujo general de registro de imágenes.

Para la autointegración del modelo desarrollado a cualquier entorno, como trabajo futuro se debe desarrollar un algoritmo para analizar automáticamente un segmento de un video para extraer de sus cuadros los objetos en movimiento a segmentar del fondo con el fin de definir la imagen fija a ser seleccionada para ejecutar el modelo desarrollado.

Tabla 5.4: Resultados del registro de imágenes

Class Category	Original image example 1	Black and white image example 1	Original image example 2	Black and white image example 2
Class 0				
Class 1				
Class 2				
Class 3				
Class 4				
Class 5				

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Con el propósito de realizar tareas de monitoreo de salud estructural de puentes, comprender el comportamiento de inestabilidad estática de los puentes debido a la interacción vehículo-puente es obligatorio, la carga del puente es un parámetro de alta relevancia al correlacionarse con las mediciones de desplazamiento de puntos de puente. La evaluación de dicha correlación es necesaria para verificar si el desplazamiento observado del puente se debe a la naturaleza de su operación o debido a que presenta daño estructural. Un método de monitoreo continuo de la salud estructural para puentes, basado en un sistema de escaneo óptico sin contacto utilizado para medir las coordenadas espaciales seleccionadas sobre una estructura para calcular el desplazamiento de las coordenadas estructurales seleccionadas a través de un tiempo continuo, y se ha calculado la carga del puente propuesto. Se desarrollaron dos métodos de clasificador de carga puente, uno basado en deep learning para la clasificación de diversos vehículos de diversas vigilancias configuradas, con el inconveniente relacionado con el enfoque de deep learning relacionado con el big data requerido para entrenar el modelo; y un modelo simple basado en el registro de imágenes para una cámara fija de vista superior para clasificar el porcentaje de ocupación de una sección de carril de autopista definida. Ambos enfoques se han desarrollado para compararlos y seleccionar uno de ellos que mejor se adapte a la videovigilancia, nuevo o ya instalado en cada estructura de puente bajo monitoreo. Los métodos no dependen de los parámetros del tráfico, como el peso, la carga por eje, la configuración de los ejes, la dirección

o la velocidad del vehículo; solo dependen de la posición del vehículo en el puente. El trabajo futuro debe centrarse en la búsqueda de técnicas de procesamiento de imágenes más eficientes y menos costosas con un rendimiento sólido bajo cargas de tráfico pesado y condiciones ambientales variadas, así como el desarrollo de la metodología de análisis de correlación.

Referencias

- [1] M BAROUSSE MORENO and A GALINDO SOLOZANO. Bridge managment system (siap). *PUBLICACION TECNICA*, (49), 1994.
- [2] Javier Rivera-Castillo, Wendy Flores-Fuentes, Moisés Rivas-López, Oleg Sergiyenko, Felix F Gonzalez-Navarro, Julio C Rodríguez-Quíñonez, Daniel Hernández-Balbuena, Lars Lindner, and Luis C Básaca-Preciado. Experimental image and range scanner datasets fusion in shm for displacement detection. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(10):e1967, 2017.
- [3] L Ma, W Zhang, WS Han, and JX Liu. Determining the dynamic amplification factor of multi-span continuous box girder bridges in highways using vehicle-bridge interaction analyses. *Engineering Structures*, 181:47–59, 2019.
- [4] Aftab Mufti and Karim Helmi. A case for structural health monitoring (shm) and civio-nics enhances the evaluation of the load carrying capacity of aging bridges. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4(1):3, 2019.
- [5] José Miguel López-Higuera, Luis Rodriguez Cobo, Antonio Quintela Incera, and Adolfo Cobo. Fiber optic sensors in structural health monitoring. *Journal of lightwave technology*, 29(4):587–608, 2011.
- [6] Myra Lydon, Su E Taylor, Desmond Robinson, A Mufti, and EJO Brien. Recent developments in bridge weigh in motion (b-wim). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1):69–81, 2016.

- [7] Kai-Yuen Wong. Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges. *Structural control and health monitoring*, 11(2):91–124, 2004.
- [8] Kenji Aono, Hassene Hasni, Owen Pochettino, Nizar Lajnef, and Shantanu Chakrabartty. Quasi-self-powered piezo-floating-gate sensing technology for continuous monitoring of large-scale bridges. *Frontiers in Built Environment*, 5:29, 2019.
- [9] Eser Çaktı and Erdal Şafak. Structural health monitoring: Lessons learned. In *Seismic isolation, structural health monitoring, and performance based seismic design in earthquake engineering*, pages 145–164. Springer, 2019.
- [10] G Michel Guzman-Acevedo, G Esteban Vazquez-Becerra, Jesus R Millan-Almaraz, Hector E Rodriguez-Lozoya, Alfredo Reyes-Salazar, J Ramon Gaxiola-Camacho, and Carlos A Martinez-Felix. Gps, accelerometer, and smartphone fused smart sensor for shm on real-scale bridges. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019.
- [11] Sergio Lobo-Aguilar, Zhenyu Zhang, Zhaoshuo Jiang, and Richard Christenson. Infrasound-based noncontact sensing for bridge structural health monitoring. *Journal of Bridge Engineering*, 24(5):04019033, 2019.
- [12] Wael A Megid, Marc-André Chainey, Paul Lebrun, and D Robert Hay. Monitoring fatigue cracks on eyebars of steel bridges using acoustic emission: A case study. *Engineering Fracture Mechanics*, 211:198–208, 2019.
- [13] Sandeep Sony, Shea Laventure, and Ayan Sadhu. A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3):e2321, 2019.
- [14] Jesús E Miranda-Vega, Moisés Rivas-López, Wendy Flores-Fuentes, Oleg Sergiyenko, Lars Lindner, and Julio C Rodríguez-Quiñonez. Implementación digital de filtros fir para la minimización del ruido óptico y optoelectrónico de un sistema de barrido óptico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática.*, 16(3):344–357, 2019.

- [15] O Yu Sergiyenko, W Flores-Fuentes, VV Tyrsa, and P Mercorelli. Environmental and structural health monitoring by optoelectronic scanner. , (2):116–128, 2014.
- [16] Betancourt H. Cruz G., Olguín C. Comparativa de dos sistemas de gestión de puentes, aplicados al proceso de inspección. *Revista Pakbal*, 40:19–27, 2017.
- [17] Fred Moses. Weigh-in-motion system using instrumented bridges. *Journal of Transportation Engineering*, 105(3), 1979.
- [18] Chien Khong Duc, Van-Phuc Hoang, Duy Tien Nguyen, and Toan Thanh Dao. A low-cost, flexible pressure capacitor sensor using polyurethane for wireless vehicle detection. *Polymers*, 11(8):1247, 2019.
- [19] Monika Wasilewska and Bartomiej Golenko. Convolutional neural network based vehicle classification. pages 291–295, 09 2019.
- [20] Alberto Asensio López, Álvaro Duque de Quevedo, Francisco Salmerón Yuste, Jesús Muñoz Dekamp, Víctor Aparicio Mequiades, Virgilio Medel Cortés, Daniel García Cobeña, Diego Madueño Pulido, Fernando Ibañez Urzaiz, and Javier Gismero Menoyo. Coherent signal processing for traffic flow measuring radar sensor. *IEEE Sensors Journal*, 18(12):4803–4813, 2017.
- [21] Tiantian Bao, Zhenkai Zhang, and Mohamad Farzan Sabahi. An improved radar and infrared sensor tracking fusion algorithm based on imm-ukf. In *2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pages 420–423. IEEE, 2019.
- [22] David Savastürk, Bjoern Froehlich, Nicolai Schneider, Markus Enzweiler, and Uwe Franke. A comparison study on vehicle detection in far infrared and regular images. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 1595–1600. IEEE, 2015.
- [23] Limin Guan, Yi Chen, Guiping Wang, and Xu Lei. Real-time vehicle detection framework based on the fusion of lidar and camera. *Electronics*, 9(3):451, 2020.

- [24] Roni Stiawan, Adhi Kusumadjati, Nina Siti Aminah, Mitra Djamal, and Sparisoma Viridi. An ultrasonic sensor system for vehicle detection application. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1204, page 012017. IOP Publishing, 2019.
- [25] Volkan Cevher, Rama Chellappa, and James H McClellan. Vehicle speed estimation using acoustic wave patterns. *IEEE Transactions on signal processing*, 57(1):30–47, 2008.
- [26] Moisés Rivas-López, Carlos A Gomez-Sanchez, Javier Rivera-Castillo, Oleg Sergiyenko, Wendy Flores-Fuentes, Julio C Rodríguez-Quiñonez, and Pedro Mayorga-Ortiz. Vehicle detection using an infrared light emitter and a photodiode as visualization system. In *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pages 972–975. IEEE, 2015.
- [27] Junlei Song, Yi Wei, Chaoyu Xu, Qi Liu, Kaifeng Dong, Wenqin Mo, and Fang Jin. Research of vehicle detection system based on geomagnetic disturbance detection. In *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, pages 7840–7844. IEEE, 2018.
- [28] Zusheng Zhang, Tiezhu Zhao, Xin Ao, and Huaqiang Yuan. A vehicle speed estimation algorithm based on dynamic time warping approach. *IEEE Sensors Journal*, 17(8):2456–2463, 2017.
- [29] J Han, O Heo, M Park, S Kee, and M Sunwoo. Vehicle distance estimation using a mono-camera for fcw/aeb systems. *International journal of automotive technology*, 17(3):483–491, 2016.
- [30] Daming Li, Lianbing Deng, and Zhiming Cai. Design of traffic object recognition system based on machine learning. *Neural Computing and Applications*, pages 1–14, 2020.
- [31] Mark Bugeja, Alexiei Dingli, Maria Attard, and Dylan Seychell. Comparison of vehicle detection techniques applied to ip camera video feeds for use in intelligent transport systems. *Transportation Research Procedia*, 45:971–978, 2020.

- [32] Oleg Sergiyenko, Moisés Rivas-López, Jesús E Miranda-Vega, Wendy Flores-Fuentes, Julio C Rodríguez-Quñonez, Lars Lindner, Daniel Hernández-Balbuena, Félix F Gonzalez-Navarro, and Vera Tyrsa. Sensors for structural health monitoring. In *Nanosensors for Smart Cities*, pages 227–248. Elsevier, 2020.
- [33] Vitalijs Komasilovs, Aleksejs Zacepins, Armands Kviessis, and Claudio Estevez. Traffic monitoring using an object detection framework with limited dataset. In *VEHITS*, pages 291–296, 2019.
- [34] Ayaho Miyamoto, Risto Kiviluoma, and Akito Yabe. Frontier of continuous structural health monitoring system for short & medium span bridges and condition assessment. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(3):569–604, 2019.
- [35] Carmelo Gentile and Antonella Saisi. Continuous dynamic monitoring of a centenary iron bridge for structural modification assessment. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 9(1):26–41, 2015.
- [36] Enrique García-Macías and Filippo Ubertini. Automated operational modal analysis and ambient noise deconvolution interferometry for the full structural identification of historic towers: A case study of the sciri tower in perugia, italy. *Engineering Structures*, 215:110615, 2020.
- [37] Muhammad Zohaib Sarwar, Muhammad Rakeh Saleem, Jong-Woong Park, Do-Soo Moon, and Dong Joo Kim. Multimetric event-driven system for long-term wireless sensor operation in shm application. *arXiv*, pages arXiv–1910, 2019.
- [38] Song Ee Park, Seung-Hyun Eem, and Haemin Jeon. Concrete crack detection and quantification using deep learning and structured light. *Construction and Building Materials*, 252:119096, 2020.
- [39] H Jeon, S Choi, J-U Shin, Youngjae Kim, and Hyun Myung. High-speed 6-dof structural displacement monitoring by fusing visp (visually servoed paired structured light sys-

- tem) and imu with extended kalman filter. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(6):e1926, 2017.
- [40] Limin Sun, Yixian Li, and Wei Zhang. Experimental study on continuous bridge-deflection estimation through inclination and strain. *Journal of Bridge Engineering*, 25(5):04020020, 2020.
- [41] XW Ye, T Jin, and CB Yun. A review on deep learning-based structural health monitoring of civil infrastructures. *Smart Structures and Systems*, 24(5):567–585, 2019.
- [42] Andrés Felipe Quintero Parra and Rodolfo Villamizar Mejía. Estado del arte en monitorización de salud estructural: Un enfoque basado en agentes inteligentes. *Ciencia e Ingeniería neogranadina*, 20(1):117–132, 2010.
- [43] Wendy Flores-Fuentes, Jesús Elías Miranda-Vega, Moisés Rivas-López, Oleg Sergiyenko, Julio C Rodríguez-Quiñonez, and Lars Lindner. Comparison between different types of sensors used in the real operational environment based on optical scanning system. *Sensors*, 18(6):1684, 2018.
- [44] Carlos Villa-Angulo. Cdse 0.4 te 0.6 quantum well-based photodetector toward imaging vision sensors. *IEEE Sensors Journal*, 20(22):13357–13363, 2020.
- [45] Wendy Flores-Fuentes, Moises Rivas-Lopez, Oleg Sergiyenko, Felix F Gonzalez-Navarro, Javier Rivera-Castillo, Daniel Hernandez-Balbuena, and Julio C Rodríguez-Quiñonez. Combined application of power spectrum centroid and support vector machines for measurement improvement in optical scanning systems. *Signal Processing*, 98:37–51, 2014.
- [46] JC Rodríguez-Quiñonez, O Sergiyenko, D Hernandez-Balbuena, M Rivas-Lopez, W Flores-Fuentes, and LC Basaca-Preciado. Improve 3d laser scanner measurements accuracy using a ffbp neural network with widrow-hoff weight/bias learning function. *Opto-Electronics Review*, 22(4):224–235, 2014.

- [47] Lars Lindner, Oleg Sergiyenko, Julio C Rodríguez-Quiñonez, Moises Rivas-Lopez, Daniel Hernandez-Balbuena, Wendy Flores-Fuentes, Fabian Natanael Murrieta-Rico, and Vera Tyrsa. Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application. *Industrial Robot: An International Journal*, 2016.
- [48] Moises J Castro-Toscano, Julio C Rodríguez-Quiñonez, Oleg Sergiyenko, Wendy Flores-Fuentes, Luis R Ramírez-Hernández, Daniel Hernández-Balbuena, Lars Lindner, and Raúl Rascón. Novel sensing approaches for structural deformation monitoring and 3d measurements. *IEEE Sensors Journal*, 2020.
- [49] Oscar Real-Moreno, Moises J Castro-Toscano, Julio C Rodríguez-Quiñonez, Daniel Hernández-Balbuena, Wendy Flores-Fuentes, and Moises Rivas-Lopez. Implementing k-nearest neighbor algorithm on scanning aperture for accuracy improvement. In *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 3182–3186. IEEE, 2018.
- [50] Javier Rivera Castillo, Moises Rivas-Lopez, Wendy Flores-Fuentes, Oleg Sergiyenko, Julio Cesar Rodríguez-Quiñonez, and Daniel Hernandez-Balbuena. Machine vision optical scanners for landslide monitoring. In *Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision*, pages 206–235. IGI Global, 2017.
- [51] JE Miranda-Vega, M Rivas-López, W Flores-Fuentes, Oleg Sergiyenko, L Lindner, and JC Rodríguez-Quiñonez. Reconocimiento de patrones aplicando Ida y Ir a señales optoelectrónicas de sistemas de barrido óptico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 17(4):401–411, 2020.
- [52] Mohsen Mousavi, Damien Holloway, JC Olivier, and Amir H Gandomi. Beam damage detection using synchronisation of peaks in instantaneous frequency and amplitude of vibration data. *Measurement*, 168:108297, 2021.
- [53] Marek Szafranski. A dynamic vehicle-bridge model based on the modal identification

- results of an existing en57 train and bridge spans with non-ballasted tracks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146:107039, 2021.
- [54] LR Ticona Melo, J Malveiro, D Ribeiro, R Calçada, and T Bittencourt. Dynamic analysis of the train-bridge system considering the non-linear behaviour of the track-deck interface. *Engineering Structures*, 220:110980, 2020.
- [55] Soheil Sadeghi Eshkevari, Thomas J Matarazzo, and Shamim N Pakzad. Simplified vehicle–bridge interaction for medium to long-span bridges subject to random traffic load. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(4):693–707, 2020.
- [56] Hoofar Shokravi, Hooman Shokravi, Norhisham Bakhary, Mahshid Heidarrezaei, Se-ayed Saeid Rahimian Kolor, and Michal Petr. Vehicle-assisted techniques for health monitoring of bridges. *Sensors*, 20(12):3460, 2020.
- [57] FN Catbas, CZ Dong, O Celik, and T Khuc. A vision for vision-based technologies for bridge health monitoring. In *Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges. Proceedings of the Ninth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2018)*, pages 54–62, 2018.
- [58] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville, and Yoshua Bengio. *Deep learning*, volume 1. MIT press Cambridge, 2016.
- [59] S Vasavi, N Kanthi Priyadarshini, and K Harsha Vardhan. Invariant feature based darknet architecture for moving object classification. *IEEE Sensors Journal*, 2020.
- [60] Lisa Gottesfeld Brown. A survey of image registration techniques. *ACM computing surveys (CSUR)*, 24(4):325–376, 1992.
- [61] Barbara Zitova and Jan Flusser. Image registration methods: a survey. *Image and vision computing*, 21(11):977–1000, 2003.

- [62] A Selvapandian, R Athilingam, and P Sivakumar. Performance analysis of glioma brain tumor detection and segmentation using image registration technique. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [63] Cailing Wang, Yuchun Zhang, Pu Guo, and Jun Xu. Airborne high-resolution image motion target detection combined with hyperspectral features. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1544, page 012100. IOP Publishing, 2020.
- [64] Se-Won Park, Ra Gyoung Yoon, Hyunwoo Lee, Heon-Jin Lee, Yong-Do Choi, and Du-Hyeong Lee. Impacts of thresholds of gray value for cone-beam computed tomography 3d reconstruction on the accuracy of image matching with optical scan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17):6375, 2020.
- [65] Dan Wang, Kai Zhao, and Yi Wang. Based on deep learning in traffic remote sensing image processing to recognize target vehicle. *International Journal of Computers and Applications*, pages 1–7, 2020.
- [66] Mosab Bazargani, António Anjos, Fernando Lobo, Ali Mollahosseini, and Hamid Shahbazkia. Affine image registration transformation estimation using a real coded genetic algorithm with sbx. In *Proceedings of the 14th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation*, pages 1459–1460, 2012.
- [67] Jacob Cohen, Patricia Cohen, Stephen G West, and Leona S Aiken. *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*. Routledge, 2013.
- [68] Gretel Martinez Curbelo, Manuel E Cortes Cortes, and Annia del C Perez Fernandez. Methodology for correlation and concordance analysis on equipment of similar measurement. *Revista Universidad y Sociedad*, 8(4):64–69, 2016.
- [69] Jonathan Krause, Michael Stark, Jia Deng, and Li Fei-Fei. 3d object representations for fine-grained categorization. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision workshops*, pages 554–561, 2013.

- [70] Cuauhtémoc Mariscal-García, Wendy Flores-Fuentes, Daniel Hernández-Balbuena, Julio C Rodríguez-Quíñonez, Oleg Sergiyenko, Félix Fernando González-Navarro, and Jesús Elías Miranda-Vega. Classification of vehicle images through deep neural networks for camera view position selection. In *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pages 1376–1380. IEEE, 2020.

ANEXOS

ANEXO A

Mantenimiento rutinario

Superficie de rodadura

- Limpieza de la superficie de rodadura y acotamientos.
- Limpieza de juntas de dilatación.
- Limpieza de drenes.
- Reposición de drenes y/o extensión de drenes.
- Sellado de drenes.
- Sellado de grietas aisladas en carpeta asfáltica.
- Bacheo superficial aislado.
- Sellado de grietas y juntas en losa de concreto hidráulico.

Superestructura

- Limpieza de parapetos, banquetas y camellones.
- Pintura de parapetos, banquetas y camellones.

- Desazolve de tuberías y canalones.
- Limpieza de trabes, diafragmas y losa.

Subestructura

- Limpieza de estribos, pilas, columnas y aleros.
- Pintura en subestructura.

Cimentación

- Limpieza en zapatas y cilindros de cimentación.

Dispositivos de Apoyo

- Pintura anticorrosiva en dispositivos de apoyo metálicos.
- Protección contra intemperismo a base de espuma de poliuretano en dispositivos de apoyo.

Elementos complementarios y de operación

- Limpieza de cunetas.
- Limpieza de lavaderos.
- Limpieza de registros.
- Limpieza de obras especiales de control y protección.
- Pintura en bordillos y/o guarniciones
- Limpieza en losas de protección, taludes de aproches, márgenes de ríos y/o conos de derrame.
- Pintura en losas de protección y/o conos de derrame.
- Retiro de vegetación en acotamientos.

- Sellado de juntas en losas de acceso y/o conos de derrame.
- Reposición de marcas en el pavimento.
- Reposición de marcas en guarniciones.
- Reposición de marcas en estructuras y objetos adyacentes a la superficie de rodadura.
- Limpieza de vialetas y botones.
- Limpieza de señales verticales.
- Limpieza de defensa metálica y barreras centrales.
- Reposición de indicadores de alineamiento para defensas y barreras centrales.
- Instalación de señalamiento y dispositivos para protección en obras de conservación.

ANEXO B

Mantenimiento periódico

Superficie de rodamiento

- Colocación o Reemplazo de Neopreno en juntas.
- Bacheo superficial.
- Reparación de desconchamientos en losas de concreto hidráulico.
- Fresado y reconstrucción de superficie de rodadura de carpeta asfáltica.
- Reposición total o parcial de losas de concreto.

Superestructura

- Reparación de parapetos, guarniciones y banquetas.
- Calafateo de fisuras.
- Reparación de grietas.
- Reparación y resanes de elementos de concreto.
- Reparación y/o sustitución y pintura de elementos metálicos.

Subestructura

- Protección contra socavación (cono de derrame).
- Calafateo de fisuras.
- Reparaciones en el concreto y el acero de refuerzo.
- Reparación de grietas en mampostería.

Cimentación

- Calafateo de fisuras.
- Reparaciones en el concreto y el acero de refuerzo.
- Reparación de grietas en cimentaciones de mampostería.
- Protección contra socavación.
- Reparación de concreto en cimentación.
- Protección de acero expuesto.
- Reparación de grietas en cimentaciones de mampostería.

Dispositivos de Apoyo

- Reemplazo de Apoyos de Neopreno.

Elementos complementarios y de operación

- Construcción o reparación de revestimiento de taludes.
- Renivelación de accesos.
- Reposición de defensa metálica.

- Reposición de malla ciclónica.
- Reparación de barreras centrales de concreto hidráulico.
- Reposición aislada de vialetas y botones.
- Reposición de señales verticales.
- Reposición de indicadores de alineamiento.
- Reparación de limitaciones al tránsito permanentes.