

**Structural Health Monitoring of a pedestrian bridge with strain gauges
using iot technologies, sap 2000, bim- revit**

**Monitoreo de Salud Estructural de un puente peatonal con galgas
extensiométricas mediante el uso de iot technologies, sap 2000, bim- revit**

Autores:

Guamán-González, Gisel Graciela
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA, ECUADOR
Ingeniera Civil
Azogues- Ecuador



gguamang39@est.ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0008-8837-0503>

Ing. Maldonado-Noboa, Cesar Humberto
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA, ECUADOR
Docente Tutor del área
Cuenca – Ecuador



cmaldonadon@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-0383-5460>

Ing. Maldonado-Noboa, Juan Sebastián
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA, ECUADOR
Docente Tutor del área
Cuenca – Ecuador



jmaldonadon@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

Fechas de recepción: 04-MAR-2025 aceptación: 04-ABR-2025 publicación: 30-JUN-2025



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>



Resumen

La evaluación e integridad de estructuras como puentes peatonales simbolizan un aspecto primordial en ingeniería civil, los diversos factores como decadencia, condiciones medioambientales y cargas dinámicas variables afectan funcionalidad, seguridad y pérdida en un puente. Para mitigar estos problemas se implementa un sistema de monitoreo de modo continuo y en tiempo real, resultando preciso para gestionar desafíos que se presenten, con el objetivo de detectar e identificar indicios tempranos de deterioro estructural y la adopción de medidas preventivas.

En este sentido, se recurre a la implementación de la tecnología en monitoreo, incluyendo galgas extensiométricas, Internet de las Cosas (IoT) y Building Information Modeling (BIM) que proporcionan un enfoque innovador en la supervisión y mantenimiento estructural.

La ciudad de Azogues carece de un sistema de monitoreo para puentes, en especial el puente peatonal ubicado en el Parque del Migrante, el objetivo es plantear un sistema de monitoreo con una metodología de evaluación integral, incluyendo inspección meticulosa, instalación de galgas extensiométricas para deformaciones y configuración de sistema IoT que permite obtener datos en tiempo real para una evaluación continua de la estructura.

Para el modelado del puente se usa el software SAP2000, que provee un análisis del comportamiento del puente bajo condiciones de carga. El monitoreo se enfoca en deformaciones para identificar inconvenientes en etapas tempranas. Al analizar los resultados del monitoreo en campo y del modelo, se verifica su precisión, pues varía en un 4,58%. Obtenido un sistema para evaluación exhaustiva en puentes peatonales de la ciudad y operaciones de mantenimiento.

Palabras clave: Condición; Galgas; Internet; Monitoreo; Peatonal



Abstract

The assessment and integrity of structures such as pedestrian bridges represent a fundamental aspect of civil engineering. Various factors such as decay, environmental conditions, and varying dynamic loads affect bridge functionality, safety, and loss. To mitigate these problems, a continuous, real-time monitoring system is implemented, proving accurate and effective in managing any challenges that arise. This system aims to detect and identify early signs of structural deterioration and implement preventive measures.

In this regard, monitoring technology, including strain gauges, the Internet of Things (IoT), and Building Information Modeling (BIM), is used to provide an innovative approach to structural monitoring and maintenance. The city of Azogues lacks a monitoring system for bridges, especially the pedestrian bridge located in Parque del Migrante. The objective is to propose a monitoring system with a comprehensive assessment methodology, including meticulous inspection, installation of strain gauges for deformations, and configuration of an IoT system that allows for real-time data collection for continuous structural assessment.

SAP2000 software is used for bridge modeling, which provides an analysis of the bridge's behavior under loading conditions. Monitoring focuses on deformations to identify problems at early stages. Analyzing the results of field monitoring and the model, their accuracy is verified, with a variation of 4.58%. A comprehensive system for the evaluation of pedestrian bridges in the city and for maintenance operations has been obtained.

Keywords: Condition; Gauges; Internet; Monitoring; Pedestrian

Introducción

En las circunstancias actuales de la gestión de infraestructuras e ingeniería civil, la evaluación y supervisión de la funcionalidad estructural en puentes peatonales simboliza un reto inmutable para avalar la funcionalidad y seguridad de estas significativas estructuras urbanas. Los puentes para peatones, como componentes imprescindibles de una infraestructura urbana, son trascendentales para proporcionar la movilidad segura de transeúntes, mejorando la conectividad de zonas urbanas y sus alrededores. Por la decadencia, las condiciones ambientales y la exposición a cargas dinámicas es posible que se comprometa la seguridad y estabilidad de los puentes con el transcurrir del tiempo, lo que demanda una evaluación y monitoreo continuos para atenuar posibles riesgos [1].

En contestación a esta gradual necesidad, la aplicación de los avances tecnológicos como el uso de galgas extensiométricas, el internet de las cosas y el modelado de información de construcción han surgido como una solución competente para optimizar las metodologías tradicionales de evaluación y monitoreo en pasarelas peatonales. Los procesos brindan la capacidad de compilar información actualizada en tiempo real, ejecutar avanzados análisis y refinar el proceso de decisión en la gestión de las infraestructuras [2].

La estructura de paso peatonal ubicada en el “Parque del Migrante” en la ciudad de Azogues de la provincia del Cañar, funciona como modelo prototípico de progreso en la gestión de infraestructuras. El puente es un enlace importante para residentes locales y visitantes, además afronta retos significativos en requisitos de seguridad y mantenimiento por su uso incesante y exposición a condiciones ambientales desfavorables. Por lo tanto, se necesita una perspectiva avanzada y sistemática para avalar su funcionalidad y durabilidad a largo plazo. El estudio en cuestión se enfoca en la aplicación de un sistema de monitoreo en el puente peatonal del “Parque del Migrante” para la evaluación de la integridad estructural, este monitoreo está compuesto de galgas extensiométricas en colaboración del uso de tecnologías IoT, SAP 2000 y BIM en este caso Revit que son funcionales para su gestión, mantenimiento, diseño y operación. Las galgas extensiométricas, son sensores de alta precisión que miden deformaciones en estructuras, al integrarse a la tecnología IoT permiten un monitoreo en tiempo real y continuo de la situación del puente.

El objetivo de este estudio es suministrar una metodología efectiva y precisa para la evaluación, monitoreo e integridad estructural del puente peatonal del “Parque del Migrante”, empleando una composición de tecnologías innovadoras y avanzadas. Esta perspectiva busca optimizar la precisión, capacidad y eficiencia previsional en la identificación anticipada de posibles problemas y en actividades planificadas para mantenimiento preventivo, lo cual permite apoyar la durabilidad y seguridad del puente a largo plazo con el fin de salvaguardar a todos sus usuarios.

En la literatura técnica la implementación de los sensores como galgas extensiométricas para monitorear la salud estructural es ampliamente estudiada. En diversos trabajos se demuestra la eficiencia de estos equipos para la temprana detección de deformaciones en puentes de diferentes materiales como el hormigón armado o el acero [3]. El uso de las tecnologías IoT en estructuras civiles son estudiados por diversos autores que enfatizan el potencial para optimar la seguridad y gestión en otras estructuras, de manera especial en los puentes [4]. No obstante, la perspectiva integrada con BIM se emplea, aplica y desarrolla en todo el mundo en varios proyectos de ingeniería civil, un ejemplo clave es un caso de estudio sobre la ejecución exitosa de esta metodología en un puente de carretera en Corea del Sur [5]. Estos estudios suministran un fundamento estable para la composición de estas tecnologías en la evaluación y monitoreo de puentes peatonales, tal como se sugiere en este estudio.

Materiales y métodos

Este acápite presenta el desarrollo que se realizó para la supervisión del estado del puente peatonal, comenzando con una descripción del modelo efectuado a través del levantamiento de información estructural y con asistencia del software SAP 2000, haciendo uso de las herramientas que colaboran con el procesamiento de señales, datos y resultados.

A. Ubicación del puente peatonal

El puente peatonal que se analizó se lo conoce como “Puente Rojo”, se ubica en el “Parque del Migrante” en la ciudad de Azogues, con coordenadas al Este: 739239,95 y al Norte: 9695899,48, aproximadamente a 1,1 kilómetros de distancia del terminal terrestre “Segundo Serrano” y a 2,6 kilómetros del casco urbano del centro de la ciudad, como indica la **figura 1**. El puente está edificado sobre el cauce del río “Burgay”, además como características

fundamentales presenta una longitud total de 42,30 metros, con una altura máxima de 12,28 metros.

Figura 1

Zona de ubicación del puente peatonal del “Parque del Migrante”



Fuente: Google Earth

B. Levantamiento estructural

El levantamiento estructural del puente peatonal del "Parque del Migrante" en Azogues, fue un proceso fundamental para obtener una comprensión precisa sobre la geometría, estructura, disposición, material, estado estructural actual y demás elementos que constituyen el puente. El proceso abarcó inspecciones técnicas minuciosas que incluían la obtención de medidas directas, geometría y material constitutivo del puente que es especialmente acero, como se observa en la **figura 2**. Este enfoque admite efectuar una estimación absoluta de capacidad de resistencia, propiedades mecánicas y estabilidad, teniendo en cuenta las circunstancias operativas existentes a las que se sujeta la estructura [6].

Figura 2





Fuente: Elaboración propia

Por tal motivo, fue indispensable efectuar un detallado levantamiento estructural que ayude a caracterizar apropiadamente los elementos que integran la estructura. Esta fase incluye la compilación de información técnica y dimensional, además de un análisis de materiales y elementos que conforman el puente, para avalar su desempeño frente a los requerimientos operativos a las que está sometido [7].

Los datos recopilados son primordiales para trazar estrategias eficaces para restauración, rehabilitación o mantenimiento estructural. Estos datos posibilitan establecer técnicas encaminadas a extender la vida útil del puente y determinar las necesarias intervenciones para asegurar su eficacia en el futuro. En este tipo de estructuras como puentes peatonales, es esencial preservar su material original y garantizar su estabilidad, componentes primordiales que conservan la seguridad humana e integridad de infraestructura en el medio urbano [8].

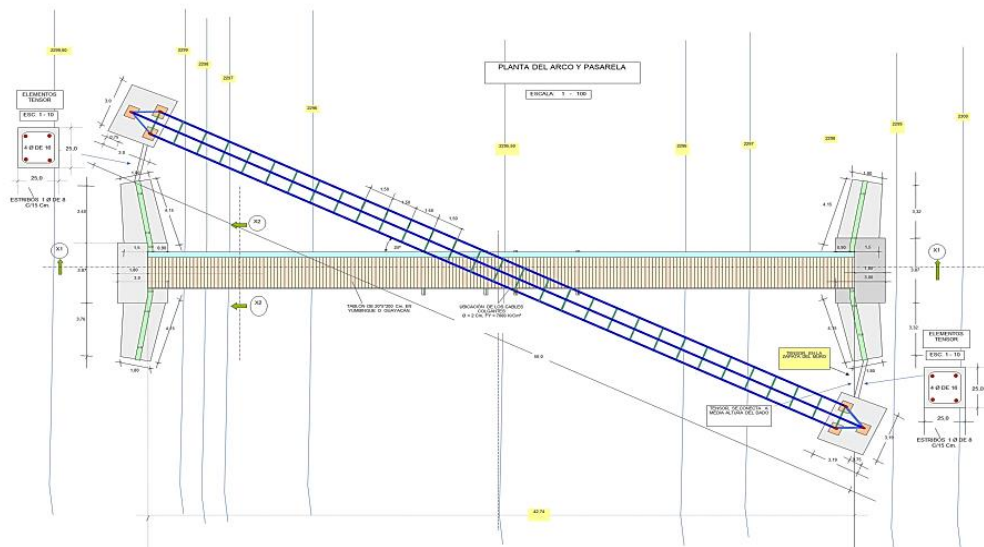
El levantamiento de información estructural colabora de manera significativa con la gestión de amenazas al determinar zonas de deterioro potencial que pueden necesitar acciones correctivas o precautorias. Este procedimiento asegura que un puente peatonal cumpla de forma eficaz y segura con sus funciones, suministrando datos veraces que son cruciales para el uso y preservación humana de estas infraestructuras [9].

C. Descripción de la estructura

En la **figura 3** se aprecia la vista en planta del puente peatonal. Se presenta el arco principal, pasarela que está constituido por tabloncillos de madera de 20x5x200cm y los elementos de acero a tensión que se encuentran a media altura del dado con un diámetro de 2 cm. El diseño del tablero presenta una sección transversal formada por tubos cuadrados de acero, planita de refuerzo y perfiles tipo 2G. Los materiales del puente tienen las siguientes propiedades mecánicas: el acero en barras resiste esfuerzos de hasta 4200 kg/cm², los perfiles de acero hasta 2350 kg/cm², el hormigón tiene una resistencia a la compresión de 210 kg/cm², el acero una densidad de 7850kg/m³ y la madera una densidad de 800 kg/m³.

Figura 3

Vista en planta del "Parque del Migrante"



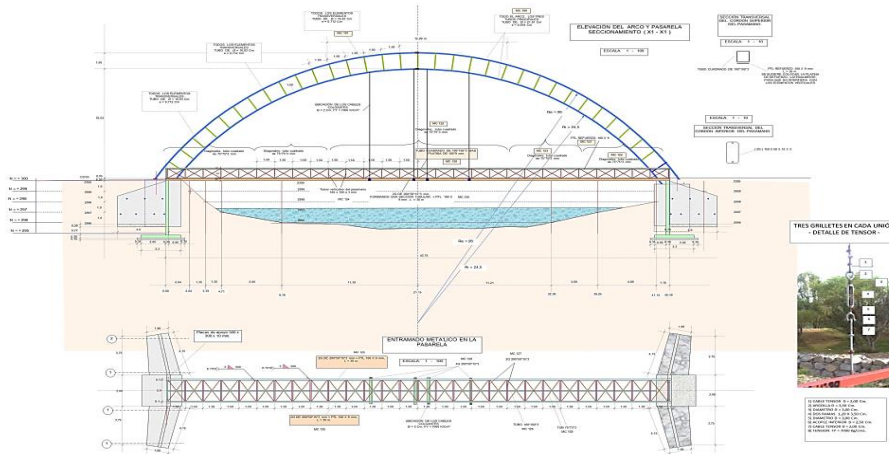
Fuente: Elaboración propia

La **figura 4** indica la vista frontal del puente, el arco está diseñado con tres tubos principales de 21,91cm y tubos de 200x10mm, sus elementos transversales de 16,83cm y tubos de 150x0,8mm. La pasarela tiene elementos de acero con pasamanos contruados con secciones

cuadrada de 100x100x5mm, diagonales de 60x60x4mm y 50x50x4mm, elementos verticales de 100x100x3mm. El peso total de acero es 19900,76kg, esta configuración estructural asegura la resistencia y durabilidad del puente.

Figura 4

Levantamiento estructural del "Puente del Migrante" (Vista Frontal)

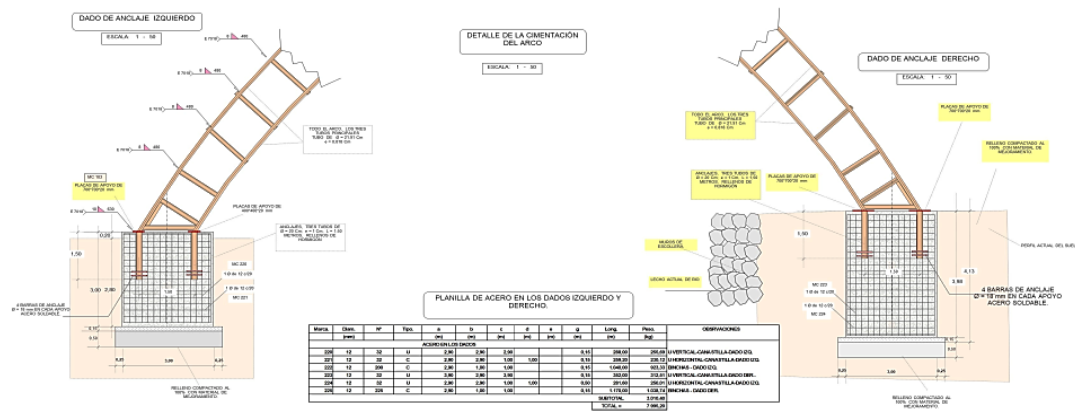


Fuente: Elaboración propia

La **figura 5** detalla la cimentación del arco, mostrando el anclaje izquierdo y derecho sobre bases de hormigón de 3,65x3,50m compuesto por un anclaje de 4 barras de acero soldable de 18mm en cada apoyo y anclajes de tres tubos de 20cm y longitud de 1,50m rellenos de hormigón.

Figura 5

Detalle de la cimentación del arco



Fuente: Elaboración propia

D. Descripción del modelo con el uso del Software SAP 2000



Structural Analysis Program (SAP) es un software para el diseño y análisis estructural, destinado al modelado, análisis y simulación del comportamiento de múltiples estructuras. Además, brinda una interacción accesible e instrumentos sofisticados para una representación gráfica [10].

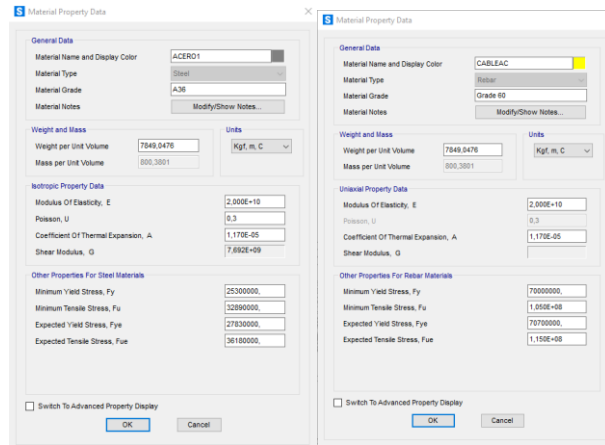
Con SAP se crea un modelo detallado tridimensional del puente, con todos sus elementos como arco, pasamanos, diagonales y conexiones, considerando sus configuraciones y dimensiones reales. El software simula diferentes condiciones de carga, incluye peso propio, acción peatonal, sismos, vientos y otros factores externos que suelen influir en la estabilidad del puente. SAP es un instrumento clave para avalar que el diseño estructural efectúe los requisitos de durabilidad, seguridad y funcionalidad al considerar las circunstancias actuales y futuras de la estructura.

Empleando SAP 2000, se define un sistema de coordenadas tridimensional en el cual se posicionan los elementos que componen al modelo. Los componentes del modelo se disponen en función de las referencias geométricas conocidas como grilla, se localiza y precisa puntos, líneas de manera más precisa; además facilitan la visualización del modelo en tres dimensiones. La grilla se utiliza para dimensionar la estructura respecto a las especificaciones del levantamiento estructural, incluye detalles importantes como tablero, pasamanos, secciones transversales y verticales, entre otros.

Para iniciar con el modelado se definió las propiedades de los materiales del puente peatonal, en este caso acero de grado A36, el peso por unidad de volumen de 7849,0476kgf/m³, un esfuerzo de fluencia mínimo de 25300000; para los cables del puente se utiliza acero con una resistencia de Grade 60 con un esfuerzo de fluencia mínimo de 70000000, las unidades del modelo son kgf, m, C. Se puede observar la configuración de las propiedades de los materiales en la **figura 6**.

Figura 6

Propiedades de los materiales que constituyen el puente peatonal

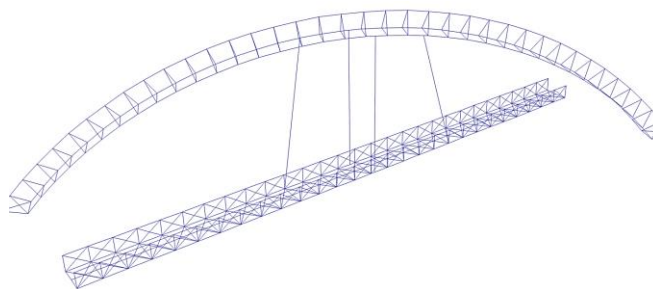


Fuente: Elaboración propia

El arco del puente fue modelado con tres tubos principales con un diámetro de 0,2191m y tubería secundaria que se refiere a las secciones que unen la tubería principal con un diámetro de 0,1683m. Los cables de suspensión que conectan el arco con la pasarela tienen un diámetro de 0,02m. La pasarela está conformada por secciones verticales con dimensiones de 0,1x0,1m, las diagonales de piso tienen dimensiones de 0,075x0,075m, la viga principal entre las diagonales de piso tiene dimensiones de 0,1x0,1m, los elementos principales del pasamano inferior son de 0,2x0,1m y el superior de 0,109x0,1m. Todos estos son perfiles de secciones cuadradas que se muestran en la **figura 7**.

Figura 7

Modelado del puente peatonal en SAP 2000



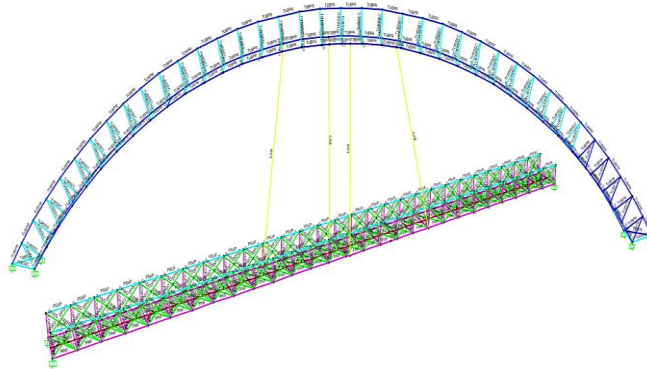
Fuente: Elaboración propia

En la **figura 8** y **figura 9** se indican las secciones especificadas previamente y empleadas en el modelado. Cada sección se identifica de manera unívoca mediante una etiqueta y un color

asignado, características que el SAP2000 nos permiten colocar para facilitar la comprensión y visualización de la estructura. Además, se puede observar que tanto el arco como la pasarela se modelaron como elementos simplemente apoyados.

Figura 8

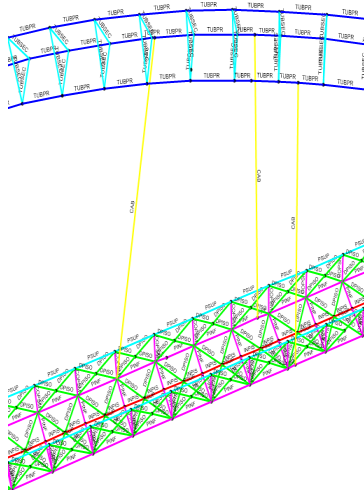
Puente peatonal con sus respectivas secciones y etiquetas



Fuente: Elaboración propia

Figura 9

Elemento del puente como arco, pasarela y cables a tensión

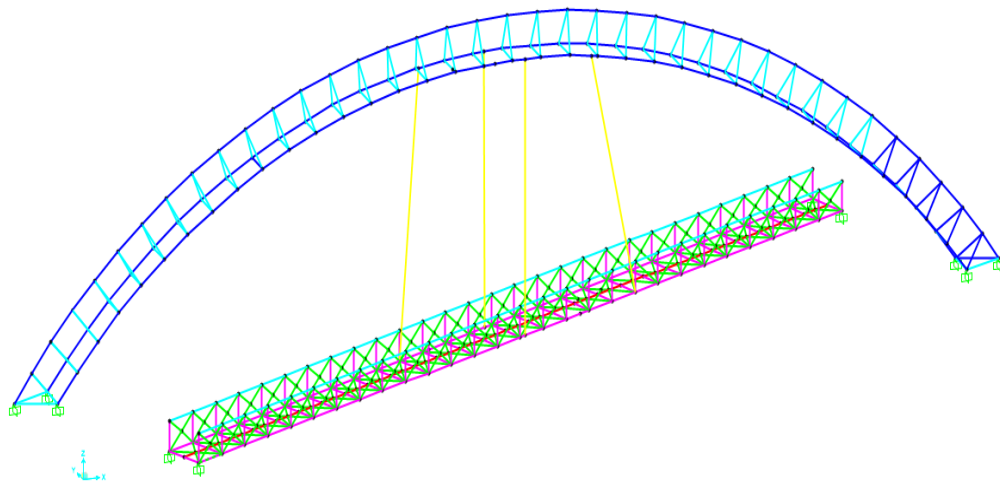


Fuente: Elaboración propia

En la **figura 10** todos los elementos estructurales han sido diseñados para suministrar resistencia y estabilidad del puente, asegurando una distribución óptima de las cargas. El uso de perfiles de sección cuadrada mejora la rigidez estructural y optimiza la capacidad de carga. Se observa los cables de suspensión que conectan la pasarela con el arco.

Figura 10

Puente con miembros estructurales diferenciados cromáticamente para identificación

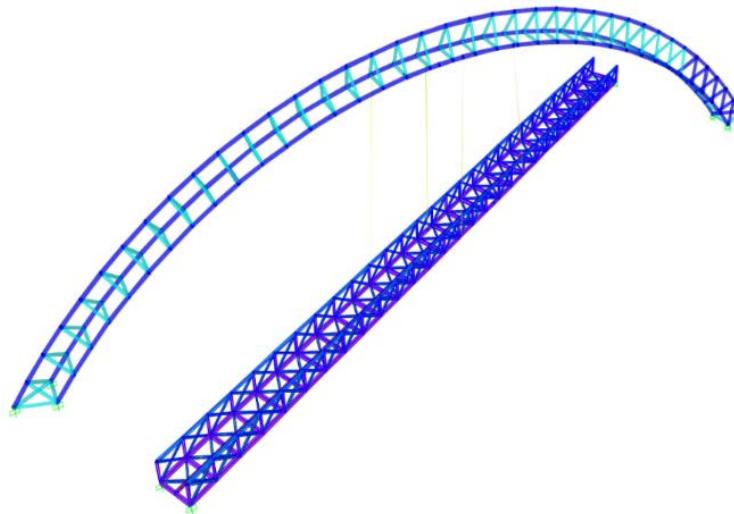


Fuente: Elaboración propia

El modelo tridimensional de la **figura 11** del puente muestra un arco de 50m de longitud con una separación de 1,50 m compuesto por tubos secundarios de sección circular, colocados perpendicularmente a los tubos principales, con una separación de 1,50 m y alturas de 9,56 m y 8,81 m. La pasarela tiene una longitud de 42,74m, separada entre sí a 1,50m, con una altura de 1,25m.

Figura 11

Modelo tridimensional del puente peatonal

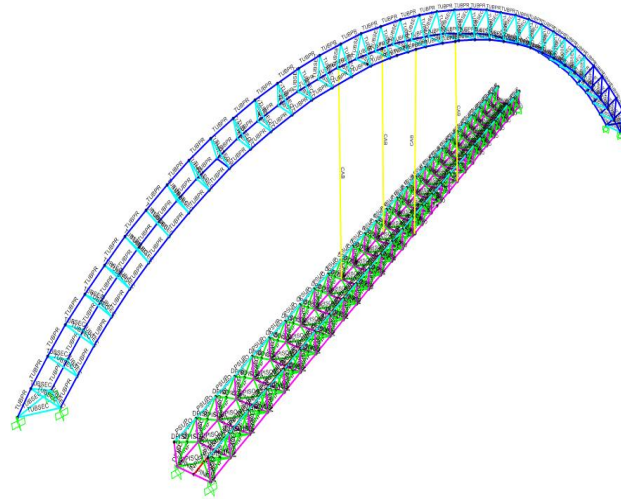


Fuente: Elaboración propia

En la **figura 12** se exhibe el modelado estructural, compuesto por todos sus elementos de acero que conforman el pasamanos y el tablero. Este diseño se ha desarrollado considerando la distribución y la resistencia de los perfiles de acero, los cuales están optimizados para garantizar la estabilidad y funcionalidad del puente peatonal.

Figura 12

Numeración de elementos del puente peatonal



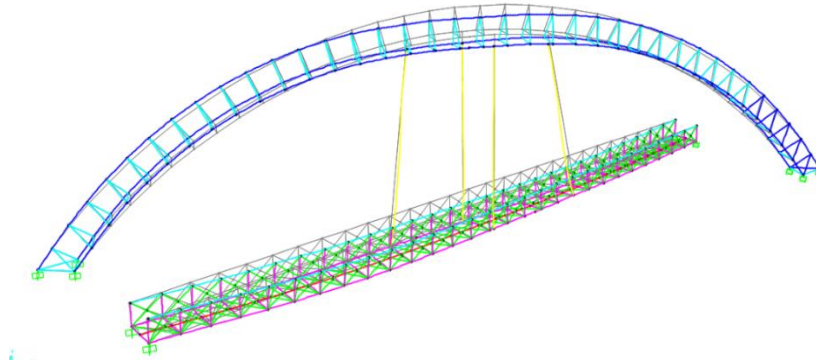
Fuente: Elaboración propia

E. Cargas del puente peatonal

La carga viva en la pasarela es de 480 kg/m^2 , debido al peso de personas y objetos que pueden transitarán por el puente, con un factor de impacto por longitud de puente de 1,20. Se considera para el monitoreo el efecto dinámico de las cargas en movimiento, con un total de carga viva a 360 kg/m^2 , en el modelado se coloca el peso de los elementos de acero densidad de 7850 kg/m^3 . Se incluyen las cargas sísmicas equivalentes de acuerdo con el código de construcción NEC, lo que sugiere que el análisis se realiza en una zona sísmicamente activa. Los factores de seguridad son $F_a=1.50$, $F_d=1.75$ y $F_s=1.60$, con un $t_o=0.1861$, $t_c=0.933$, $C_t=0.072$, $a=0.80$, $T=0.53$, $I=1.50$, $R=7.00$, $\phi_p=0.90$, $\phi_e=0.90$. La carga reactiva W correspondiente al 100% de la carga muerta más 25% de la carga viva teniendo $9072,00 \text{ kg}$, un factor Z de 0,25 en un suelo tipo E, en donde, $V=1183,00 \text{ kg}$.

Figura 13

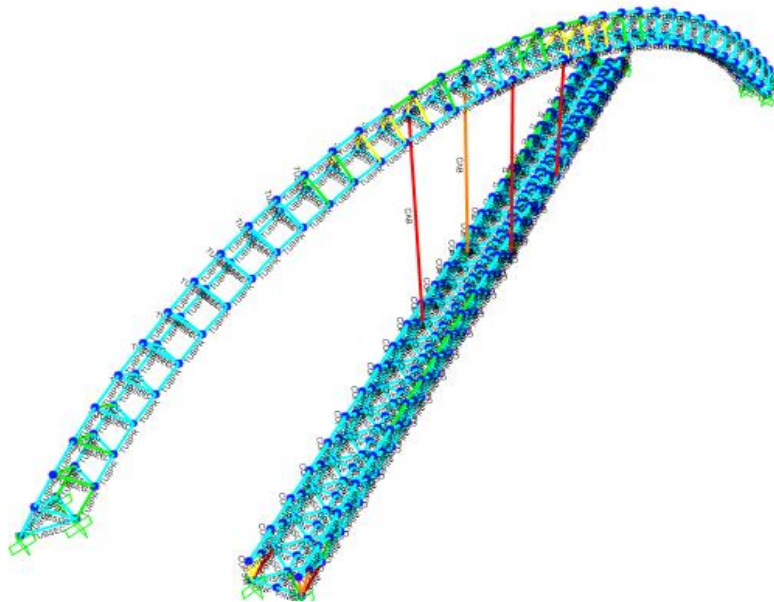
Aplicación de cargas en el puente



Fuente: Elaboración propia

Figura 14

Aplicación de carga viva en el puente peatonal



Fuente: Elaboración propia

En la **figura 13** y **figura 14** se evidencia que, al someter a la estructura a la combinación de carga máxima, compuesta por el 100% de la carga muerta más el 100% de la carga viva más efectos de impacto, se evidencia una máxima deformación concentrada en la zona central del puente debido a la interacción entre los elementos constitutivos del puente, es decir, el tablero, los cables y el arco superior, los cuales funcionan de manera sinérgica como un sistema integrado.

F. Sistema de monitoreo

El procedimiento empleado para el análisis en campo se sustenta exclusivamente en la aplicación de sensores resistivos, que con equipos de acondicionamiento de señal, software especializado y componentes eléctricos permiten el procesamiento y recolección de información [11].

El software del prototipo se fundamenta en un código abierto de lenguaje de programación C++, lenguajes avanzados para un entorno adaptable para la mejora y diseño de diferentes aplicaciones. La plataforma micro controlada de hardware se integra de placas con microprocesadores que ejecutan instrucciones de modo recurrente. Estas plataformas brindan alternativas de ajuste y personalización para simplificar y mejorar la producción de variantes modificadas del modelo original [12].

Los sensores “galgas extensiométricas”, se sitúan estratégicamente en el componente estructural central inferior del tablero como se indica en la **figura 15**, los datos se propagan por red WI-Fi satelital a un servidor central para su análisis y almacenamiento. Luego se envía la información a una plataforma web para el monitoreo y visualización continua en tiempo real de la estructura.

Figura 15

Colocación de los sensores en la sección central del tablero parte inferior



Fuente: Elaboración propia

Para la recolección de datos en campo se toma en cuenta la combinación de tecnologías avanzadas con sensores, IoT y SAP2000, las galgas extensiométricas permiten medir la deformación en la parte central del tablero proporcionando información sobre la distribución de tensiones y la respuesta estructural ante las cargas. La metodología de campo implicó la recolección directa de datos, con un enfoque en el monitoreo y evaluación del puente.

G. Instrumentos utilizados

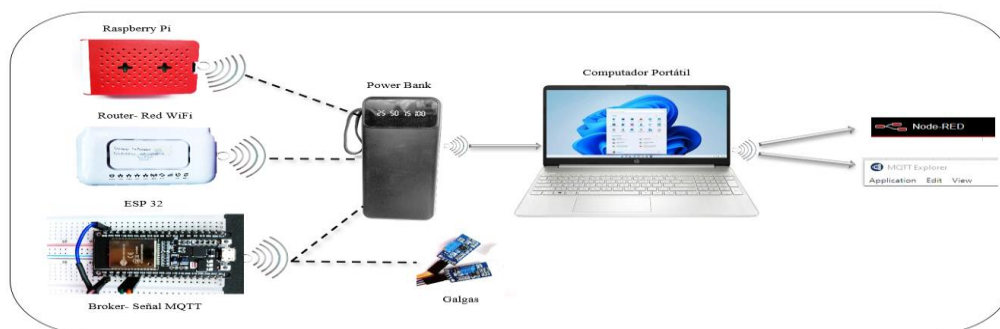
En la **figura 16** se observa la conexión empelada con un Raspberry Pi, miniordenador compacto y asequible que precisa un enlace a un teclado y receptor para su comunicación, se relaciona con ARM GNU/Linux y Microsoft Windows 10 IoT, haciéndolo flexible para herramientas de programación. Además, se aplicó una tarjeta ESP32, microcontrolador con procesador ARMv8, factible que incorpora Wi-Fi o Bluetooth y posee dos núcleos a 240MHz, disponible para varios lenguajes de desarrollo, lo que agiliza su incorporación en el desarrollo electrónico e IoT [13].

Las galgas empleadas en la medición poseen un factor de sensibilidad igual a 2, sus características de rejilla son de 2x3,5mm, límite de esfuerzo del 2%, resistencia de 350 ohmios, vida útil de fatiga más de 10 millones de ciclos y un power bank es un suministro eficaz para la gestión de energía en procedimientos electrónicos [14].

Adicionalmente, se empleó la metodología experimental con galgas extensiométricas conectadas a un Raspberry Pi y a un ESP32 mediante red Wi-Fi, conectados a un power bank que suministra energía, facilitando así la transmisión de datos al instante mediante un Red Note y MQTT para el seguimiento y monitoreo dinámico [15].

Figura 16

Estructura de Comunicación



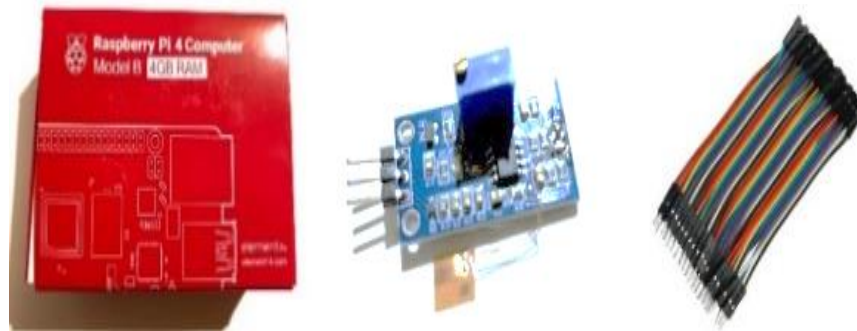
Fuente: Elaboración propia

H. Materiales, equipos y herramientas

Los equipos utilizados se muestran en la **figura 17**, se observa que para la actividad en campo se aprovecharon módulos de galgas extensiométricas basadas en fibra óptica, ESP32 y Raspberry Pi como sistemas que proporcionan datos inalámbricos, cableado basado en la tecnología RFID, la energía se suministra con un power bank de 20000 miliamperios. Los materiales manejados para adhesivo o pegamento es el cianocrilato, para limpieza acetona, alcohol y lijas, además alambre de amarre y cables Dupont macho-hembra para conexión, todos estos materiales garantizan una correcta protección y adherencia de los sensores. Por último, se emplearon de forma correcta herramientas estándar para instalación de sensores o galgas, suministrando un sistema completo que detecta anomalías estructurales [16].

Figura 17

Materiales para el monitoreo

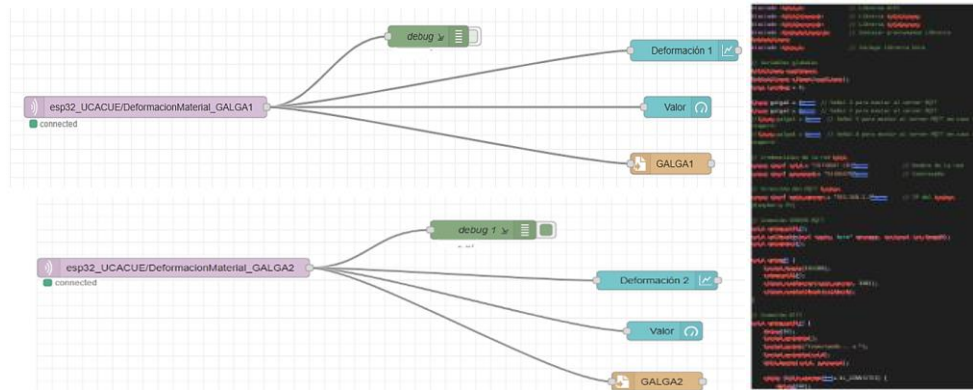


Fuente: Elaboración propia

La transmisión de datos es posible por la activación de un bróker empleado en Node-Red. La distribución tecnológica admite una conexión inalámbrica mediante una señal MQTT que transmite datos para el monitoreo, el microprocesador ESP32 está conectado al Node-Red gracias a una programación en lenguaje informático, como se indica en la **figura 18** [17].

Figura 18

Programación en Node-RED y código informático de ESP32



Fuente: Elaboración propia

I. Calibración de galgas extensiométricas

La calibración en las galgas es fundamental y confiable porque se comprueba y ajusta su exactitud al instante de una medición, en caso de no realizar la calibración de presentan errores que no concuerdan con la realidad [18]. Se utilizó un tubo de sección cuadrada con espesor de 2mm, dimensión de 1,3cm x 1,3cm y una longitud de 108cm, en el que se empleó una carga de 3kilos (29,43 N) en el centro y proporcionó una deformación de 2mm según la lectura de un deformímetro analógico, como se observa en la **figura 19**.

Figura 19

Deformación de barra y resultado de galga calibrada



Fuente: Elaboración propia

Se verificó la precisión del cálculo mediante el análisis matemático de la ecuación correspondiente a la deformación por carga viva que contiene el peso aplicado, longitud del tubo, módulo de elasticidad del material y la inercia de la sección, como sigue en la Deformación por carga viva:

$$\Delta = \frac{P * L^3}{48 * E * I} = \frac{29,43N * (108cm)^3}{48 * 2,1 \times 10^7 \frac{N}{cm^2} * \left(\frac{(1,3cm)^4}{12} - \frac{(1,3cm - 2(1,1cm))^4}{12} \right)} = 0,2cm$$

Consecutivamente, se obtuvo un coeficiente de calibración que concierne la deformación medida y el voltaje generado por las galgas que se instalaron en el centro de la barra donde se empleó la carga, el coeficiente se usa para convertir las consecutivas lecturas de voltaje en deformaciones. Para establecer la relación voltaje y deformación se multiplica el nuevo voltaje registrado o medido por el coeficiente de calibración.

Coeficiente de calibración:

$$C = \frac{\text{Deformación real}}{\text{Voltaje medido Galga 1}} = \frac{0,2m}{761,66mV} = 2,63 \times 10^{-4} cm/mV$$

$$C = \frac{\text{Deformación real}}{\text{Voltaje medido Galga 2}} = \frac{0,2cm}{814,54mV} = 2,46 \times 10^{-4} cm/mV$$

Relación voltaje- deformación:

$$D = \text{voltaje 1(mV)} * \text{Coeficiente} \left(\frac{m}{mV} \right) = 761,66mV * 2,63 \times 10^{-4} \frac{cm}{mV} = 0,20cm$$

$$D = \text{voltaje 2(mV)} * \text{Coeficiente} \left(\frac{m}{mV} \right) = 814,54mV * 2,46 \times 10^{-4} \frac{cm}{mV} = 0,20cm$$

J. Instalación y colocación de instrumentos

La instalación del sistema de monitoreo, como indica la **figura 20**, inicia con el tratamiento superficial de la viga central inferior del tablero, con un escrupuloso lijado para tener un área uniforme y lisa; se eliminan residuos que ponen en riesgo la adherencia del sensor mediante el uso de alcohol isopropílico. Después, se resguarda el circuito del sistema con cintas para eludir complicaciones. Las galgas se instalaron en una orientación inferior horizontal con adhesivos para cuantificar la deformación y así minimizar errores [19].

Figura 20

Instalación de equipos y galgas en el puente peatonal



Fuente: Elaboración propia

Para la instalación se aplicó carga viva de 360kg a lo largo del puente peatonal, utilizando peso combinado de 6 personas con valores entre 49.22 kg, 68.5kg, 69.63kg, 56.5kg, 58.63kg y 57.90kg, para medir la deformación del puente al colocar la galga en la viga central inferior y en uno de los cables sometidos a tensión. Se considero el peso que generan las personas al circular por el puente peatonal, sin embargo, se pudo evidenciar que se movilizan personas en bicicletas lo que genera mayor peso, movimiento y vibración en el puente pareciendo que está a punto de ceder, como muestra la **figura 21**.

Figura 21

Equipo instalado y peatones circulando por el puente



Fuente: Elaboración propia

K. Procesamiento y análisis de datos

La deformación del puente se determinó mediante el modelado considerando una carga viva aplicada en la estructura, usando SAP2000, herramienta en la que se incluyen parámetros estructurales y propiedades geométricas, datos determinados con anterioridad.

Los datos obtenidos se estudiaron para establecer los patrones de comportamiento, revelar anomalías y evaluar el estado del puente, para así comparar con los datos del monitoreo en tiempo real, avalando la eficacia del modelo estructural, el sistema de monitoreo y la fiabilidad del análisis estructural.

Los resultados adquiridos del monitoreo son posible observarlos en directo por la intervención del sistema MQTT Explorer, que es un protocolo de red desarrollado para enlaces con puntos distantes de anchos de banda como el internet de las cosas (IoT). Al conectarse a este sistema se utiliza un lenguaje de programación que admita obtener gráficas de deformación referente al peso aplicado en el puente cuando transitan peatones de las galgas instaladas, como se indica en la **figura 22**.

Figura 22

MQTT Explorer y resultados gráficos de la galga 1

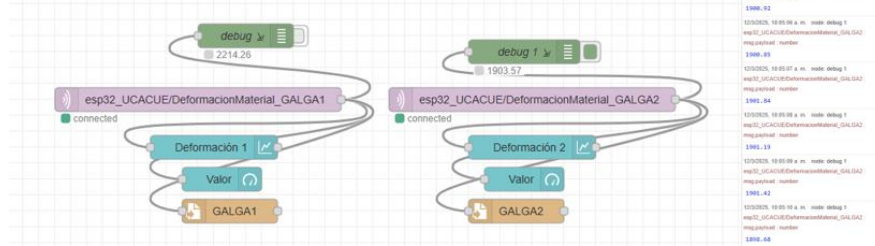


Fuente: Elaboración propia

A través del Red Note se tiene los resultados de manera directa y se registra una secuencia ordenada cronológica de la deformación generada por cada individuo que transita por el puente, estos datos se consiguen y guardan en formato JSON mediante el Red Note y se pueden exportar al computador por medio del formato TXT con características de codificación que indica horas, minutos y segundos, teniendo así datos completos de las galgas instaladas, como se muestra en la **figura 23**.

Figura 23

Red Note y resultados de la galga 2 en formato JSON



Fuente: Elaboración propia

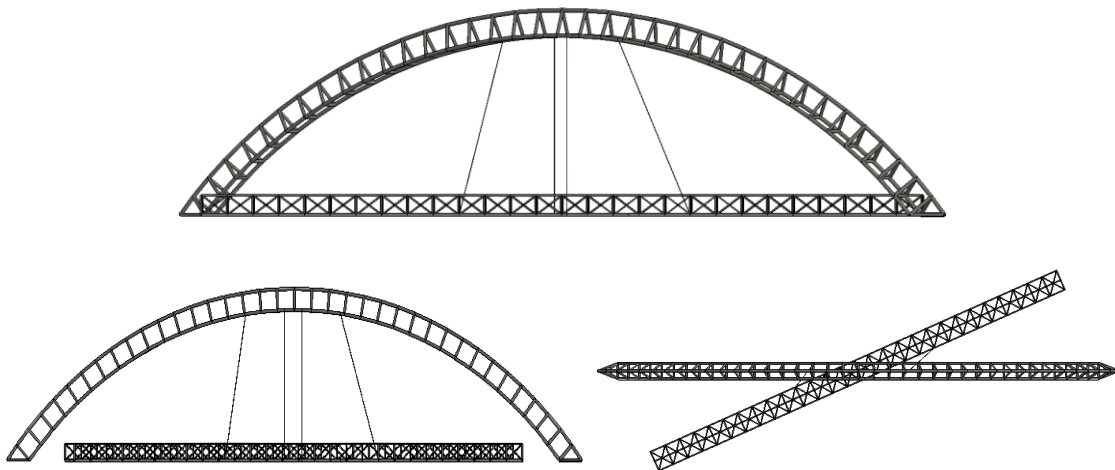
Es importante destacar que se consideraron los valores en los que transitaron 6 personas equivalente a la carga de 360kg, seguidamente de 7 personas (se adiciono 20kg) con un total de 380kg y posteriormente de 8 personas de las cuales una se movilizaba en bicicleta (se adiciona 52kg) con una carga total de 432kg.

L. Modelado en software Revit que implementa BIM

El modelado BIM en el software REVIT se ejecuta por medio del archivo de SAP 2000 con una extensión de trabajo guardado en el formato IFC, mediante importación o vinculación con la extensión IFC en REVIT, teniendo así el modelado 3D con diversos niveles y rejillas que permiten una observación óptima, se coloca una textura realista y un nivel de visualización alta para contemplar el modelado de manera precisa para mayor comprensión y ayuda con el estado actual del puente peatonal, como indica la **figura 24**.

Figura 24

Vista frontal, posterior y superior del modelado BIM en REVIT



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Los resultados de deformación del modelado SAP 2000 son de 0,661 cm en la viga central del puente peatonal y 0,509 cm en el cable a tensión. En el monitoreo con galgas y la asistencia de IoT (Internet de las Cosas) se instalaron los sensores o galgas 1 y 2 en la viga central y en el cable a tensión respectivamente, teniendo como resultados que las deformaciones cuando circulan 6 personas (valor correspondiente a la carga de 360kg) es de 0,582cm y 0,467cm, como se indica en la **figura 25**, de la misma manera para 7 personas con un total de 0,585cm y 0,469cm y de forma similar para 8 personas que corresponde a 0,588cm y 0,477cm.

Con 6 personas transitando por el puente peatonal:

$$D1 = \text{galga 1 (mV)} * \text{Coeficiente} \left(\frac{\text{m}}{\text{mV}} \right) = 2214,26\text{mV} * 2,63 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{mV}} = 0,582\text{cm}$$

$$D2 = \text{galga 2 (mV)} * \text{Coeficiente} \left(\frac{\text{m}}{\text{mV}} \right) = 1901,83\text{mV} * 2,46 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{mV}} = 0,467\text{cm}$$

Con 7 personas circulando por el puente peatonal:

$$D1 = \text{galga 1 (mV)} * \text{Coeficiente} \left(\frac{\text{m}}{\text{mV}} \right) = 2224,93\text{mV} * 2,63 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{mV}} = 0,585\text{cm}$$

$$D2 = \text{galga 2 (mV)} * \text{Coeficiente} \left(\frac{\text{m}}{\text{mV}} \right) = 1910,46\text{mV} * 2,46 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{mV}} = 0,469\text{cm}$$

Con 8 personas caminando por el puente peatonal:

$$D1 = \text{galga 1 (mV)} * \text{Coeficiente} \left(\frac{\text{m}}{\text{mV}} \right) = 2236,43\text{mV} * 2,63 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{mV}} = 0,588\text{cm}$$

$$D2 = \text{galga 2 (mV)} * \text{Coeficiente} \left(\frac{\text{m}}{\text{mV}} \right) = 1940,36\text{mV} * 2,46 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{mV}} = 0,477\text{cm}$$

Figura 25

Comparación de resultados

Aplicación de carga	Deformación SAP 200	Aplicación de Sensores	Deformación Sensores
			
Deformación viga central	0,661 cm		0,582 cm
Deformación cable a tensión	0,509 cm		0,467 cm

Fuente: Elaboración propia

Al tener las respuestas se determina la diferencia porcentual, teniendo que entre el valor del modelado y el monitoreo de la galga 1 con un total de 13,57% y de la galga 2 es de 8,99%. Además, la diferencia entre el porcentaje 1 y 2 es del 4,58%.

$$\%1 = \frac{|0,582cm - 0,661cm|}{0,582cm} * 100 = 13,57\%$$

$$\%2 = \frac{|0,467cm - 0,509cm|}{0,467cm} * 100 = 8,99\%$$

Conclusiones

El análisis realizado he permitido concluir que el monitoreo con galgas extensiométricas son una herramienta práctica, eficiente y ágil para obtener datos e información en base a lo que el usuario desee determinar o conocer, para así diagnosticar, determinar e identificar posibles problemas en una estructura. Un ejemplo de ello es el puente peatonal del parque del Migrante, en el que en campo se evidenció una gran vibración y deformación al instante que una o varias personas con un peso menor al diseñado o modelado se desplazan por el puente, provocando que algunos individuos se sientan temerosos, preocupados y con gran incertidumbre al pensar que el puente podría colapsar.

Se evidenció que la deformación calculada por el software SAP2000 con una carga de 480kg en la viga central de 0,661cm y el cable a tensión de 0,509cm es cercano pero aún considerable respecto a los datos recolectados en campo con una carga de 360kg que corresponden a una deformación de 0,582cm para la viga y 0,467cm para el cable, se concluye que el puente tiene capacidad para soportar pesos entre 6 y 8 personas pues el valor es muy cercano pero la capacidad del puente se limita y la vibración aumenta considerando que estos resultados se obtiene solamente con una carga de 360kg en tiempo real; los valores obtenidos son próximos al estimado porque durante la colocación del puente algunos técnicos desestimaron condiciones no previstas como pesos adecuados de todo tipo, factores ambientales, valores de cargas mínimas, cimientos del puente en un área susceptible a desbordamientos por lluvia, la vida útil de la obra, además de la falta de mantenimiento continuo a través de los años.

El monitoreo es una alternativa adecuada, óptima y eficaz que proporciona datos en tiempo real gracias a la intervención de IoT, los cuales pueden ser accesibles, consultados y



visualizados por cualquier usuario con el uso de dispositivos móviles, computadores u otros equipos electrónicos. Además, con la intervención del modelo en BIM- Revit se puede explorar y analizar con mayor detalle a una estructura. En la ciudad de Azogues estos sensores pueden emplearse para analizar, inspeccionar y estudiar estructuras semejantes al puente peatonal y obtener detalles sobre su funcionamiento; con la intervención de un modelado digital es posible obtener especificaciones precisas de la estructura tal y como se presenta en la realidad.

El sistema de monitoreo en tiempo real implementado para conocer la salud estructural del puente peatonal del parque del Migrante de la Ciudad de Azogues es eficaz, ya que nos demuestra que el puente se encuentra defectuoso, debido a que las deformaciones son contiguas al límite de deformación calculada en el software Sap2000 pero con un peso de 360kg con respecto al peso de diseño de 480kg, cabe recalcar que el monitoreo resulta innovador pues permitió conocer datos de deformaciones mediante el uso de IoT (Internet de las cosas) proporcionando así resultados ágiles, veraces e inmediatos. Los sensores contribuirán en la toma de decisiones sobre cómo gestionar, enfrentar y resolver los inconvenientes futuros del puente.

Recomendaciones

Se sugiere un estudio e investigación exhaustiva de toda la estructura del puente peatonal porque puede acarrear graves problemas o hasta atentar con la vida de los transeúntes, pues es una estructura que tiene un exceso desproporcionado de vibración al momento que alguien corre, camina, entre otros.

Es recomendable que se realice un tratamiento específico del material del puente pues en algunas secciones presenta desgaste y hendiduras que afectan con la funcionalidad y no es efectivo para el propósito para el cual fue construido.

Es aconsejable que las autoridades correspondientes analicen con prioridad urgente las obras u estructuras similares existentes en la ciudad con un monitoreo, lo cual les evitará realizar estudios técnicos agotadores y prolongados, para que así proporcionen las diversas soluciones a posibles problemas o se proceda a un respectivo mantenimiento y cuidado.

Para futuros estudios, sería útil desarrollar una codificación que proporcione información como temperatura, efectos del viento y esfuerzos en las estructuras a evaluar, teniendo acceso a estos datos relevantes se pueden dar opciones y alternativas frente a problemas que puedan surgir en el futuro.

Referencias bibliográficas

- [1] A. V. Calderón, A. Gonzalez, J. Ferguson, J. Puga y V. Serrano, «Generador eléctrico excitado por la vibración, como fuente de alimentación para sistema de monitoreo de puentes,» *RECISTA DE INICIACIÓN CIENTÍFICA*, vol. 6, pp. 1-6, 2021.
- [2] R. Ahmed, R. Osman y M. Amer, «Navigating urban congestion: A Comprehensive strategy based on an efficient smart IoT wireless communication for PV powered smart traffic management system,» *PloS one*, vol. XIX, n° 10, pp. 1-8, 2024.
- [3] B. Ghahremani, A. Enshaeian y P. Rizzo, «Bridge Health Monitoring Using Strain Data and High-Fidelity Finite Element Analysis,» *Sensors*, n° 14, pp. 1-17, 2022.
- [4] M. Mayank, L. Paulo y R. G.V, «Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review,» *Journal of Building Engineering*, vol. 48, pp. 1-10, 2022.
- [5] J. Saravanan, M. Mishra, A. Aherwar y P. Lourenço, «Internet of things (IoT)-based structural health monitoring of laboratory-scale civil engineering structures,» *Springer*, vol. IX, n° 110, pp. 1-15, 2024.
- [6] D. Razo y O. García , «Evaluación integral de la seguridad estructural de edificaciones existentes dañadas por sismos de gran magnitud,» *Ingeniería Sísmica*, n° 104, pp. 51-71, 2020.
- [7] B. Pérez y A. Navarro, «Método para la comprensión estructural de los edificios históricos a partir del levantamiento gráfico por láser escaner,» *Revista EGA*, vol. 27, n° 46, pp. 100-109, 2022.
- [8] F. Núñez, L. Lozano, M. Silva, E. Muñoz y I. Campo, «Fatigue vulnerability assessment of a steel arch bridge using the probabilistic weibull model and considering its remaining service life under localized corrosion effects,» *Ingeniería de Construcción RIC*, vol. 39, n° 1, pp. 32-50, 2024.

- [9] D. Frangopol y M. Soliman, «Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions,» *Structure and Infrastructure Engineering*, n° 12, pp. 1-20, 2016.
- [10] M. E. Quennie, J. B. Florencio, K. Baldoz, R. J. Ogalesco, R.-j. Gracilla y N. Furiscal, «The performance of steel fiber reinforced concrete as structural elements of a seismic resistant three-story low-cost housing using SAP 2000,» *E3S Web of Conferences*, vol. 488, n° 03018, pp. 1-9, 2024.
- [11] C. Garita, «Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes,» *Tecnología En Marcha*, vol. 29, n° 1, pp. 96-107, 2016.
- [12] P. Teixeira, L. Dwoeakowski, Â. Hartmann y E. Kakuno, «Uso da plataforma Arduino e do software PLX-DAQ para construção de gráficos de movimento em tempo real,» *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 38, n° 3, 2016.
- [13] V. Kamath, A. Renuka, V. Kini y S. Prabhu, «Exploratory Data Preparation and Model Training Process for Raspberry Pi-Based Object Detection Model Deployments,» *IEEE Xplore*, vol. 11, 2024.
- [14] R. Esparza, A. Quevedo, C. Ramírez, R. Ascencio y B. Zamora, «Efecto de la oscilación térmica diaria sobre celdas de carga de galgas extensiométricas genéricas,» *Ciencia Ergo Sum*, vol. 12, n° 2, 2007.
- [15] L. Sacoto y C. Zaruma, «Implementación de un sistema de control mediante galgas extensiométricas para estructuras esenciales,» *ODUCAL*, vol. XIII, 2021.
- [16] G. Liu, Q.-A. Wang, G. Jiao, P. Dang, G. Nie, Z. Liu y J. Sun, «Review of Wireless RFID Strain Sensing Technology in Structural Health Monitoring,» *Sensors*, vol. 23, n° 15, p. 6925, 2023.
- [17] A. Sofi, J. Regita, B. Rane y H. Ho Lau, «Structural health monitoring using wireless smart sensor network – An overview,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 163, n° 23, p. 108113, 2022.
- [18] G. Rodríguez, A. Hernández, A. López y J. Ramírez, «Sistema para la medición de deformación usando galgas extensiométricas metálicas,» *RIELAC*, vol. XXXVII, pp. 80- 93, 2016.
- [19] L. Tarricone y J. Grosinger, «Augmented RFID Technologies for the Internet of Things and Beyond,» *Sensors*, vol. 20, n° 4, p. 987, 2020.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

Agradezco a mis padres Ginson, Jaqueline, mi abuelita Benita que me han apoyado y ayudado en este magnífico proceso

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.