



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE  
VIBRACIONES PARA EL DIAGNÓSTICO DE ESTRUCTURAS  
METÁLICAS DE PUENTES MEDIANTE IOT**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: Carlos Andrés Guevara Figueroa  
TUTOR: José Alexander Zambrano García

Guayaquil - Ecuador  
2025

19/02/26

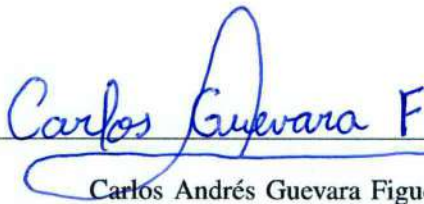
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Carlos Andrés Guevara Figueroa** con documento de identificación N° **0952654853** manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink that reads "Carlos Guevara F". The signature is written in a cursive style with a large loop at the end of the "F".

---

Carlos Andrés Guevara Figueroa  
0952654853

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, **Carlos Andrés Guevara Figueroa** con documento de identificación N° **0952654853** expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del **Dispositivo Tecnológico: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES PARA EL DIAGNÓSTICO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE PUENTES MEDIANTE IOT**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



Carlos Andrés Guevara Figueroa  
0952654853

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **José Alexander Zambrano García**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES PARA EL DIAGNÓSTICO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE PUENTES MEDIANTE IOT**, realizado por **Carlos Andrés Guevara figueroa** con documento de identificación N° **0952654853** obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

Ing. José Alexander Zambrano García, Mgtr.

0703175521

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mi padre Carlos Alberto Guevara Robles, por las enseñanzas sobre disciplina, responsabilidad y ética; a mi madre María Elizabeth Figueroa Reyes, por su amor inmenso, su cuidado y apoyo sin igual para asegurar mi bienestar en el transcurso de todos estos años de estudios universitarios.

Finalmente agradezco a mis abuelitos maternos Washington Gustavo Figueroa Donoso, Clara Cecilia Reyes Calderón y mi hermana Ruth Cecilia Guevara Figueroa por su confianza absoluta que me ha impulsado a seguir adelante y quienes siempre han cuidado de mí.

**Carlos Andrés Guevara Figueroa**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios, a mi padre y madre por su amor incondicional y por inculcarme el valor de la perseverancia para afrontar los retos y dificultades de la vida.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana, a los docentes y a mis compañeros por formar importante del desarrollo y cumplimiento del presente trabajo de titulación.

**Carlos Andrés Guevara Figueroa**

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo implementar un sistema de monitoreo de vibraciones para el análisis y diagnóstico del estado de estructuras metálicas de puentes mediante tecnología IoT, respondiendo a la necesidad creciente de instrumentación continua en infraestructuras críticas, particularmente ante los recientes colapsos y deterioros reportados en el país.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental aplicado a un modelo estructural a escala (Mola Structural Kit 3), el cual permitió reproducir el comportamiento dinámico de un puente colgante metálico en condiciones controladas de laboratorio. El sistema de monitoreo fue diseñado a partir del acelerómetro MEMS ADXL355, integrado a un microcontrolador LoRa ESP32 V2.0, encargado de la adquisición, procesamiento digital de señal (filtrado, cálculo RMS y Transformada Rápida de Fourier – FFT) y transmisión inalámbrica de datos hacia las plataformas IoT ThingSpeak y RemoteXY.

Durante la fase metodológica se diseñaron y fabricaron las carcasas, la PCB del sistema, la base rígida de acoplamiento estructural y el sistema de fijación a la mesa vibratoria horizontal. Asimismo, se realizó una calibración cruzada con un vibrómetro digital de referencia, obteniéndose errores relativos inferiores al 5 % entre el módulo IoT y el instrumento patrón, lo que validó la precisión del sistema desarrollado.

En los ensayos experimentales se realizaron dos escenarios principales: vibración lenta y vibración fuerte, con un total de 20 tomas representativas por condición. Los resultados evidenciaron variaciones consistentes en los valores RMS y en la frecuencia dominante, permitiendo diferenciar claramente entre estados de baja y alta excitación estructural. Se comprobó que el sistema presenta un retardo reducido en la transmisión extremo a extremo (captura–procesamiento–visualización), garantizando monitoreo en tiempo casi real.

En relación con el objetivo general, se logró implementar satisfactoriamente un sistema IoT funcional, capaz de medir, procesar y transmitir datos vibracionales de manera continua. Respecto a los objetivos específicos, se construyó el módulo estructural a escala, se desarrolló el sistema de adquisición con reducción de latencia y se validó experimentalmente el funcionamiento mediante ensayos controlados en mesa vibratoria.

En cuanto al marco hipotético, los resultados demostraron que es posible detectar cambios en el comportamiento dinámico de un puente metálico a escala mediante un sistema IoT basado en el sensor ADXL355. La alta resolución digital del acelerómetro permitió identificar variaciones en la frecuencia dominante bajo diferentes niveles de excitación. Además, el sistema fue capaz de distinguir condiciones operativas diferenciadas, confirmando su aplicabilidad como herramienta de diagnóstico estructural experimental de bajo costo.

Se concluye que la integración de sensores MEMS de alta precisión, microcontroladores de bajo consumo y plataformas IoT constituye una alternativa técnicamente viable, económica y escalable para el monitoreo estructural continuo, reduciendo la dependencia de inspecciones visuales tradicionales y mejorando la capacidad de detección temprana de anomalías dinámicas.

## ABSTRACT

This research project aimed to implement a vibration monitoring system for the analysis and structural condition assessment of metallic bridge structures using Internet of Things (IoT) technology. The study addresses the growing need for continuous structural instrumentation in critical infrastructure, particularly considering recent structural failures and deterioration cases reported in the country.

An experimental methodology was conducted using a scaled suspension bridge model (Mola Structural Kit 3), which allowed the reproduction of dynamic structural behavior under controlled laboratory conditions. The monitoring system was developed based on the high-resolution MEMS accelerometer ADXL355, integrated with a LoRa ESP32 V2.0 microcontroller responsible for signal acquisition, digital processing (filtering, RMS computation, and Fast Fourier Transform – FFT), and wireless data transmission to IoT platforms, specifically ThingSpeak and RemoteXY.

During the implementation phase, mechanical components were designed and fabricated, including electronic enclosures, a custom printed circuit board (PCB), a rigid structural base, and a mechanical coupling system for attachment to a horizontal vibration table. A cross-validation procedure was performed using a commercial vibration meter as a reference instrument, obtaining relative errors below 5%, thereby confirming the accuracy and reliability of the developed IoT system.

Experimental testing was conducted under two primary excitation scenarios: low-intensity and high-intensity vibration. A total of 20 representative measurements were recorded per condition. The results demonstrated consistent variations in RMS acceleration values and dominant frequency components, allowing clear differentiation between distinct excitation states. The system exhibited low end-to-end latency (acquisition–processing–visualization), enabling near real-time structural monitoring.

Regarding the general objective, a fully functional IoT-based vibration monitoring system was successfully implemented, capable of continuous measurement, digital processing, and remote data transmission. The specific objectives were achieved through the construction of the scaled structural model, the development of a low-latency acquisition system, and the experimental validation of dynamic performance under controlled vibration conditions.

The research hypothesis was validated, demonstrating that dynamic behavior changes in a metallic bridge structure can be effectively detected using an IoT-based system equipped with a high-resolution MEMS accelerometer. The ADXL355 sensor proved capable of identifying dominant frequency shifts under varying excitation levels, confirming its applicability for low-cost experimental structural health monitoring.

It is concluded that the integration of high-precision MEMS sensors, low-power microcontrollers, and IoT cloud platforms represents a technically viable, cost-effective, and scalable solution for structural vibration monitoring, reducing reliance on traditional visual inspections and enhancing early anomaly detection capabilities.

## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>Introducción</b>	1
<b>II.</b>	<b>Problema</b>	2
<b>III.</b>	<b>Justificación</b>	4
<b>IV.</b>	<b>Objetivos</b>	6
IV-A.	Objetivo general . . . . .	6
IV-B.	Objetivos específicos . . . . .	6
<b>V.</b>	<b>Marco Hipotético</b>	7
<b>VI.</b>	<b>Marco Teórico</b>	8
VI-A.	Marco conceptual del Monitoreo de Salud Estructural (MSE) . . . . .	8
VI-B.	Monitoreo estructural en puentes metálicos . . . . .	10
VI-C.	Fundamentos de la dinámica estructural . . . . .	10
VI-D.	Microcontrolador LoRa ESP32 V2.0 . . . . .	11
VI-E.	Sensores MEMS para monitoreo de vibraciones . . . . .	12
VI-F.	Acelerómetro MEMS ADXL355 . . . . .	13
VI-G.	Fuente de alimentación LiPo y módulo TP4056 . . . . .	14
VI-H.	Microcontroladores e integración IoT . . . . .	14
VI-I.	Kit Estructural Mola 3 . . . . .	15
VI-J.	Plataformas IoT y gestión de datos . . . . .	15
VI-K.	Arquitectura IoT . . . . .	16
VI-L.	Plataforma IoT ThingSpeak . . . . .	16
<b>VII.</b>	<b>Cronograma</b>	18
<b>VIII.</b>	<b>Marco Metodológico</b>	19
VIII-A.	Selección de la plataforma Mola Kit 3 . . . . .	20
VIII-B.	Diseño Base Mola Kit 3 . . . . .	20
VIII-B1.	Consideración del peso propio de la base . . . . .	22
VIII-B2.	Validación analítica del desplazamiento de la base acrílica . . . . .	23
VIII-B3.	Efecto del refuerzo con tubo rectangular . . . . .	23
VIII-C.	Sistema de acoplamiento entre la base del puente y la mesa vibratoria . . . . .	24
VIII-D.	Diseño de la carcasa del sistema electrónico principal . . . . .	25
VIII-E.	Diseño de la carcasa del sensor acelerométrico ADXL355 . . . . .	26
VIII-F.	Descripción técnica del circuito eléctrico . . . . .	27
VIII-F1.	Alimentación y conmutación . . . . .	27
VIII-F2.	Interfaz digital entre ESP32-S3 y ADXL355 . . . . .	28
VIII-F3.	Consideraciones de consumo y dimensionamiento de la batería . . . . .	28
VIII-G.	Diseño de la PCB y validación tridimensional . . . . .	30
VIII-H.	Programación del nodo con transmisión a ThingSpeak . . . . .	31
VIII-H1.	Inicialización de hardware y bibliotecas . . . . .	31
VIII-H2.	Adquisición de señal y preprocesamiento . . . . .	31
VIII-H3.	Estimación RMS estable mediante promedio exponencial . . . . .	32
VIII-H4.	Extracción espectral y frecuencia dominante . . . . .	32
VIII-H5.	Lógica de evaluación del estado estructural basada en RMS . . . . .	32
VIII-H6.	Visualización local y transmisión remota . . . . .	33

VIII-H7.	Transmisión a ThingSpeak y gestión de conectividad . . . . .	33
VIII-I.	Programación del nodo con transmisión mediante RemoteXY . . . . .	33
VIII-I1.	Configuración de la interfaz gráfica RemoteXY . . . . .	34
VIII-I2.	Inicialización de conectividad y enlace con la nube . . . . .	34
VIII-I3.	Adquisición y procesamiento de la señal (bloque común) . . . . .	34
VIII-I4.	Atención del motor de comunicación RemoteXY durante la adquisición . . . . .	35
VIII-I5.	Actualización de variables remotas e indicador de estado . . . . .	35
VIII-I6.	Visualización local y depuración . . . . .	35
VIII-J.	Etapas de construcción de los módulos de monitoreo . . . . .	36
VIII-K.	Construcción de la carcasa del sensor ADXL355 . . . . .	38
VIII-L.	Finalización del módulo de monitoreo con transmisión a ThingSpeak . . . . .	38
VIII-M.	Finalización del módulo de monitoreo con interfaz RemoteXY . . . . .	39
VIII-M1.	Análisis vibratorio de la estructura . . . . .	39
<b>IX.</b>	<b>Resultados</b>	<b>42</b>
IX-A.	Montaje experimental previo a las mediciones dinámicas . . . . .	42
IX-A1.	Instalación del puente a escala sobre la base rígida . . . . .	42
IX-A2.	Descripción de la mesa vibratoria . . . . .	42
IX-A3.	Verificación operativa de la mesa vibratoria . . . . .	43
IX-A4.	Colocación del puente sobre la mesa vibratoria . . . . .	43
IX-A5.	Verificación y calibración de los módulos IoT mediante vibrómetro de referencia . . . . .	44
IX-B.	Resultados experimentales en mesa vibratoria . . . . .	45
IX-B1.	Resultados comparativos: velocidad lenta vs. vibración fuerte (Mola Kit 3) . . . . .	46
IX-B2.	Velocidad lenta: conjunto de 20 tomas . . . . .	46
IX-B3.	Vibración fuerte: conjunto de 20 tomas . . . . .	47
IX-C.	Respuestas a las hipótesis planteadas . . . . .	48
<b>X.</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>51</b>
<b>XI.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>52</b>
<b>XII.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>52</b>
	<b>Referencias</b>	<b>53</b>
	<b>Anexo A: Programación</b>	<b>55</b>
A-A.	Programación Nodo ThingSpeak . . . . .	55
A-B.	Programación Nodo RemoteXY . . . . .	59
	<b>Anexo B: Planos mecánicos diseñados en Autodesk Inventor</b>	<b>62</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Modelo conceptual de un sistema estructural inteligente [17]. . . . .	8
2.	Concepto del Sistema de Monitoreo Estructural [17]. . . . .	9
3.	Arquitectura general de un MSE [18]. . . . .	9
4.	Dispositivo de monitoreo remoto para construcciones civiles [19] . . . . .	10
5.	Métodos de detección de daños estructurales [23]. . . . .	11
6.	Microcontrolador LORA ESP32 [24]. . . . .	12
7.	Sensores MEMS e IoT [27]. . . . .	13
8.	Sensor ADXL355 [28]. . . . .	13
9.	Cargador de Baterías TP4056. . . . .	14
10.	Módulo Mola Kit 3 . . . . .	15
11.	Arquitectura IoT por capas [33], [34]. . . . .	16
12.	Plataforma IoT llamada ThingSpeak. . . . .	17
13.	Cronograma de Actividades. . . . .	18
14.	Diagrama de Flujo . . . . .	19
15.	Diseño 3D de Mola Kit 3 . . . . .	20
16.	Diseño de la Base Mola Kit 3 . . . . .	21
17.	Medidas del puente Mola Kit 3 . . . . .	21
18.	Análisis Estático Base Mola Kit 3 . . . . .	23
19.	Refuerzo de tubo rectangular . . . . .	24
20.	Soporte Tubo Rectangular . . . . .	24
21.	Mesa y Base del Mola Kit 3. . . . .	25
22.	Carcasa del Circuito Principal. . . . .	25
23.	Tapa del Circuito Principal . . . . .	26
24.	Carcasa Sensor ADXL355. . . . .	26
25.	Tapa Sensor ADXL355 . . . . .	27
26.	Base de la Carcasa del Sensor ADXL355. . . . .	27
27.	Circuito Electrónico del Medidor de Vibración . . . . .	27
28.	Pines de Alimentación del Circuito. . . . .	28
29.	Conexión SPI al Sensor ADXL355. . . . .	28
30.	Diseño de la PCB del Circuito. . . . .	30
31.	Diseño 3D de la PCB Final. . . . .	31
32.	Interface en ThingSpeak. . . . .	34
33.	Datos en RemoteXY . . . . .	36
34.	Implementación de circuito en ProtoBoard . . . . .	36
35.	Desarrollo de las pistas en la PCB. . . . .	37
36.	Perforación de agujeros de 1mm. . . . .	37
37.	Enter Caption . . . . .	37
38.	Montaje de los componentes en la carcasa 3D. . . . .	38
39.	Impresión 3D de la Carcasa del Sensor. . . . .	38
40.	Módulo con comunicación ThingSpeak. . . . .	39
41.	Módulo con comunicación RemoteXY . . . . .	39
42.	Puente Colgante y Base en Acrílico. . . . .	42
43.	Mesa Oscilatoria. . . . .	43
44.	Puente y Mesa Oscilatoria. . . . .	44
45.	Equipos de medición de vibraciones. . . . .	44
46.	Soporte de la Base del Puente . . . . .	62
47.	Base del sensor ADXL355. . . . .	63
48.	Base del Puente Mola Kit 3 . . . . .	64
49.	Base módulos de medición. . . . .	65

50.	Tapa sensor ADXL355. . . . .	66
51.	Tapa módulos de medición . . . . .	67
52.	Puente Mola Kit 3 . . . . .	68

## ÍNDICE DE TABLAS

I.	Validación operativa de la mesa vibratoria . . . . .	43
II.	Comparación de mediciones entre vibrómetro, módulo ThingSpeak y RemoteXY . . . . .	45
III.	Velocidad lenta y 20 tomas representativas. . . . .	47
IV.	Vibración fuerte: 20 tomas representativas. . . . .	48
V.	Presupuesto del sistema de monitoreo estructural IoT . . . . .	51

## I. INTRODUCCIÓN

Entre enero y marzo de 2025, se reportaron hasta 12 puentes destruidos y 33 con daños, sobre todo en provincias como Manabí y Loja, debido al invierno. Adicionalmente, se han implementado medidas de precaución en estructuras vulnerables, como los puentes Valle Hermoso y Brasilia del Toachi, en Santo Domingo, donde se encontraron problemas evidentes en los pilares y en construcciones que llevan décadas sin recibir mantenimiento [1].

Diversos estudios han demostrado que los métodos tradicionales de inspección visual y las campañas periódicas de evaluación estructural presentan limitaciones importantes para detectar daños incipientes en zonas de difícil acceso, tales como uniones soldadas, diafragmas o regiones internas del tablero, donde la degradación suele evolucionar sin manifestaciones externas evidentes **avci2020**, **liu2020**, **yang2021**. En consecuencia, la comunidad científica ha impulsado el desarrollo de técnicas de monitoreo continuo basadas en vibraciones, emisiones acústicas y sensores inerciales de alta sensibilidad para caracterizar el comportamiento dinámico de las estructuras y anticipar fallas críticas **habib2020**, **alali2024**.

En este contexto, los sistemas de Monitoreo de Salud Estructural (MSE) basados en tecnologías IoT han emergido como una alternativa robusta y escalable para la instrumentación permanente de infraestructuras de transporte. Investigaciones recientes reportan que la integración de sensores MEMS, plataformas en la nube y redes de comunicación de bajo consumo energético permite registrar aceleraciones en tiempo casi real, procesar grandes volúmenes de datos y establecer esquemas de mantenimiento predictivo con alta confiabilidad **meng2020**, **abruzzese2020**, **moallemi2022**, **mardanshahi2025**.

Asimismo, aplicaciones experimentales y estudios de caso en puentes vehiculares y ferroviarios han validado el uso de arquitecturas IoT para la detección temprana de daños, la evaluación posterior a eventos sísmicos y la integración con gemelos digitales, mejorando significativamente la gestión de la seguridad estructural **li2022**, **peng2023**, **bhatta2024**, **armijo2024**, **khan2022**. Estos avances se sustentan en los principios de los sistemas estructurales inteligentes propuestos por Loh **loh2011** y en modelos de instrumentación inalámbrica desarrollados para puentes a escala real y experimental **liu2013**.

No obstante, a pesar del progreso tecnológico alcanzado, persisten desafíos asociados al consumo energético, la confiabilidad de la transmisión inalámbrica, la estandarización en la ubicación de sensores y la interpretación robusta de los parámetros dinámicos bajo condiciones operativas reales **sun2023**, **delgadillo2020**, **varanis2018**, **ragam2019**. Estas limitaciones motivan la necesidad de continuar investigando sistemas de monitoreo integrales, de bajo costo y alta precisión que puedan ser aplicados en contextos académicos y en infraestructura real.

## II. PROBLEMA

A nivel mundial, en las últimas décadas, los derrumbes de puentes han demostrado las restricciones de los métodos convencionales de inspección y mantenimiento, además de la susceptibilidad de estas infraestructuras a fenómenos naturales e influencias externas. A nivel mundial, se registran cada año numerosos colapsos de puentes, cuyas causas principales se asocian a fenómenos de socavación originados por el flujo de los ríos, impactos de embarcaciones o vehículos de gran tonelaje, deficiencias en el diseño estructural, degradación progresiva de los materiales y sobrecargas no previstas durante la fase de operación[2].

Para el año 2025, Ecuador se ha visto afectado por el derrumbe de varios puentes, provocado por eventos climáticos extremos, un volumen excesivo de tráfico y la falta de cuidado adecuado. El evento de mayor gravedad se registró el 19 de marzo, cuando el puente Gonzalo Icaza Cornejo, ubicado en el cantón Daule, provincia del Guayas, colapsó de manera súbita. El siniestro provocó el fallecimiento de una persona y la desaparición de varias más, debido a que, en el momento del colapso, varios camiones de gran tonelaje transitaban simultáneamente sobre la estructura en condiciones de intensa precipitación. Las primeras investigaciones determinan una combinación de factores, incluyendo que la sobrecarga, aunque respetaba el límite de 48 toneladas por vehículo, pudo sumarse a un mantenimiento deficiente y a la ausencia de un inventario actualizado de la infraestructura.

El deterioro estructural en puentes representa un reto crucial para la seguridad y la integridad de estas infraestructuras, ya que las cargas cíclicas provocadas por el tráfico vehicular y elementos ambientales provocan la acumulación de daño progresivo en áreas determinadas del puente. En la mayoría de las situaciones, los daños no se perciben a simple vista, dado que se originan internamente en los detalles de la construcción, tales como uniones soldadas, diafragmas o áreas de concentración de esfuerzos, y pueden permanecer encubiertas hasta llegar a una etapa avanzada [3].

Los daños suelen aparecer en zonas de acceso complicado, como cavidades internas, espacios entre componentes estructurales o bajo revestimientos, lo que dificulta su revisión directa sin métodos especializados. Además, los métodos de seguimiento tradicionales, tales como revisiones regulares o técnicas manuales no destructivas, no facilitan la recolección de información en tiempo real, lo que obstaculiza la identificación del avance del daño entre las revisiones y puede resultar en averías inmediatas [4].

A pesar de los avances tecnológicos alcanzados en el campo del monitoreo estructural, en la actualidad no existen sistemas de instrumentación accesibles ni sensores específicamente diseñados para realizar mediciones precisas de vibración o para estimar de manera directa el estado de salud estructural de un puente. Esta limitación ha impedido la implementación efectiva de técnicas de diagnóstico estructural en entornos reales o a escala reducida para fines experimentales. [5].

Además, el consumo energético sigue siendo un desafío, ya que existen sensores que operan de forma autónoma por largos períodos sin mantenimiento. Todo esto dificulta la implementación masiva de los sistemas de monitoreo estructural inteligente en el entorno real [6].

De igual manera, los sistemas actualmente instalados suelen operar con retardos temporales en la lectura de datos, almacenamiento local o transmisión diferida de la información, lo que limita su capacidad de respuesta ante eventos críticos. Diversos estudios señalan que la recolección masiva de datos, especialmente aquellos asociados a registros de aceleraciones de alta frecuencia, puede generar una sobrecarga computacional que impide el funcionamiento en tiempo casi real del sistema de supervisión. En consecuencia, la ausencia de un sistema preciso capaz de medir vibraciones y transmitir datos en tiempo real constituye una brecha significativa en la gestión proactiva del

mantenimiento de puentes metálicos, incrementando el riesgo de fallos estructurales y los costos asociados a su reparación. [7].

Finalmente, no existe un método ampliamente utilizado que evalúe con la exactitud necesaria las vibraciones en las estructuras metálicas de puentes y que proporcione la información de manera realmente inmediata, lo que dificulta considerablemente el diagnóstico rápido de deterioros o daños iniciales. Las metodologías tradicionales de control de vibraciones tienen limitaciones en cuanto a resolución y confianza en condiciones operativas reales, ya que los registros previos indican que la medición de vibraciones es influenciada por ruidos externos, vibraciones operativas cambiantes y por la ausencia de procedimientos estandarizados que garanticen la precisión del monitoreo [8].

### III. JUSTIFICACIÓN

La implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones basado en IoT puede representar una solución moderna, viable y altamente eficiente para el diagnóstico continuo de estructuras metálicas [9]. Este tipo de sistemas permite la implementación de sensores inteligentes conectados a redes de comunicación para poder capturar y transmitir en tiempo real los comportamientos dinámicos de las vibraciones del sistema estructural ante las circunstancias requeridas [3].

Los sensores MEMS (sistemas microelectrónicos) y las redes de comunicación de bajo y largo alcance (LPWAN), como NB-IoT (NarrowBand IoT), han surgido como la solución principal para el desarrollo de sistemas de monitoreo estructural debido a su bajo consumo energético, alta precisión y facilidad de integración en entornos reales [4].

La combinación de los sensores MEMS y la tecnología NB-IoT es altamente recomendada por su eficacia práctica y económica, así como por su potencial para una implementación masiva que permita obtener infraestructuras más seguras, inteligentes y resistentes [10].

A diferencia de los métodos tradicionales de inspección visual o mantenimiento rutinario, el sistema propuesto no requiere de intervenciones físicas periódicas para la evaluación del estado estructural. La instalación permanente de sensores permite una supervisión continua y automática, eliminando la dependencia de observaciones subjetivas o de la disponibilidad de personal técnico especializado. De esta manera, se reduce significativamente el tiempo de respuesta ante posibles anomalías y se optimiza la planificación de las labores de mantenimiento preventivo o correctivo [11].

Asimismo, los sensores seleccionados en el diseño del sistema presentan una mayor precisión y estabilidad en comparación con los dispositivos convencionales utilizados en monitoreo estructural. Su bajo nivel de ruido, alta sensibilidad y capacidad para registrar variaciones dinámicas mínimas en aceleración y deformación permiten obtener mediciones más confiables y representativas del comportamiento real de la estructura. Este incremento en la calidad de los datos mejora notablemente la exactitud del análisis modal y la identificación temprana de posibles daños o deterioros [11], [12].

Por otro lado, el sistema propuesto garantiza un menor retardo tanto en la lectura de datos como en la toma de decisiones, gracias a la integración de un nodo IoT optimizado y a la transmisión inalámbrica en tiempo casi real. Esta característica permite que el procesamiento, la visualización y la generación de alertas se realicen de manera inmediata, lo cual incrementa la capacidad de reacción frente a eventos estructurales críticos [12].

Análisis recientes aplicados en puentes y edificaciones industriales validan el uso de sistemas IoT para mejorar la seguridad estructural. Por ejemplo, en proyectos implementados en puentes vehiculares se han utilizado sensores MEMS para obtener datos de mediciones de aceleración provocadas por vehículos y vibraciones ambientales. Con estos datos es posible percibir los cambios frecuentes naturales del puente, los cuales pueden ser daños estructurales, fatiga del material o degradación de las uniones[12].

Por su parte, las instalaciones industriales han desarrollado sistemas de monitoreo IoT para vigilar el comportamiento de la estructura en tiempo real y así poder identificar las zonas críticas de acumulación de fatiga y realizar el mantenimiento requerido [13].

A pesar de estos avances, aún existe una brecha en aplicaciones específicas a estructuras metálicas de uso común en la industria y la construcción, por lo que esta investigación resulta pertinente y necesaria. Esto se debe, en gran parte, a factores como la falta de estandarización en la instalación de sensores en elementos metálicos, la diversidad geométrica y funcional de las estructuras, y la ausencia de modelos específicos de interpretación de datos de vibraciones en estructuras metálicas con condiciones dinámicas variables [14].

Por ello, existe una urgencia de concretar la adaptabilidad para validar y optimizar tecnologías de monitoreo en tiempo real para las infraestructuras metálicas convencionales. En este contexto, resulta pertinente y necesaria la creación y puesta en marcha de un sistema de monitoreo de vibraciones mediante IoT [15].

## IV. OBJETIVOS

### *IV-A. Objetivo general*

Implementar un sistema de monitoreo de vibraciones para el análisis y diagnóstico del estado de estructuras metálicas de puentes mediante IoT.

### *IV-B. Objetivos específicos*

- Implementar un módulo a escala de una estructura metálica de un puente para el análisis de vibraciones mediante sensores.
- Desarrollar un sistema de adquisición y monitoreo de señales de vibración en tiempo real, que reduzca el retardo en la lectura, procesamiento y transmisión de datos.
- Validar el funcionamiento del sistema a través de ensayos controlados de vibración que permitan el análisis del comportamiento estructural del módulo a escala.

## V. MARCO HIPOTÉTICO

- **¿Es posible detectar cambios en el comportamiento dinámico de un puente metálico a escala mediante un sistema IoT basado en sensores de vibración ADXL355?**
- **¿En qué medida la precisión del sensor ADXL355 mejora la identificación de variaciones en las frecuencias naturales del modelo estructural respecto a métodos de monitoreo convencionales?**
- **¿Cuál es el nivel de retardo extremo a extremo (captura procesamiento transmisión visualización) del sistema propuesto y cómo influye en la detección temprana de anomalías estructurales?**
- **¿Puede el sistema diferenciar de manera confiable entre la condición base del puente y escenarios controlados de daño mediante técnicas de estimación modal como FDD y SSI?**
- **¿Qué tan efectiva resulta la integración del Mola Kit 3 como plataforma experimental para validar un sistema de monitoreo estructural de bajo costo y mínima intervención humana?**

## VI. MARCO TEÓRICO

### VI-A. Marco conceptual del Monitoreo de Salud Estructural (MSE)

El Monitoreo de Salud Estructural (MSE) se enmarca en el concepto de los Sistemas Estructurales Inteligentes, los cuales buscan implementar en las infraestructuras que tienen capacidades similares a las de los organismos biológicos. En este enfoque, las estructuras se conciben como sistemas capaces de percibir su entorno, procesar la información y reaccionar ante estímulos externos [16].

De acuerdo con Loh (2011), un sistema estructural inteligente se compone principalmente de tres funciones esenciales:

- **Percepción o detección (sensing):** mediante un conjunto de sensores ubicados estratégicamente sobre una estructura se puede captar cambios físicos y dinámicos.
- **Procesamiento de información:** aplicando un procesamiento de señales sobre los datos obtenidos y un posterior análisis se pueden tomar decisiones con todo el conocimiento adquirido.
- **Reacción o adaptación ante eventos:** en esta sección la estructura reacciona o responde automáticamente frente a condiciones anómalas o cambios en su entorno [17].

De forma ideal, un sistema estructural inteligente debería integrar además una capacidad de autosanación, entendida como la posibilidad de corregir o mitigar los efectos del daño sin intervención humana; es decir, se trataría de una estructura totalmente autónoma y eficiente. Este conjunto de funciones se sintetiza en la Figura 1, donde se puede observar la analogía entre el cuerpo humano y una estructura inteligente, comparando los sensores con los órganos sensoriales, el procesador con el cerebro y los actuadores con los músculos responsables de la respuesta física.

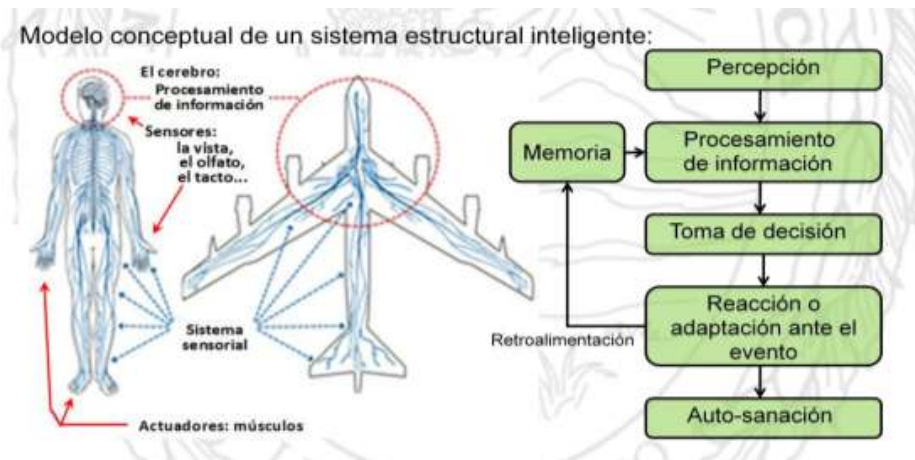


Figura 1. Modelo conceptual de un sistema estructural inteligente [17].

Para que una estructura cuente con estas capacidades de detección y reacción inmediata, se requiere de la implementación de una red de sensores estratégicamente ubicados, capaces de medir vibraciones, deformaciones o cambios ambientales. Estos sensores transmiten sus lecturas a un sistema de adquisición de datos, que a su vez comunica la información a un módulo de procesamiento central o “cerebro estructural”.

De esta manera los algoritmos de monitoreo analizan las señales, identifican patrones y generan diagnósticos sobre el estado estructural. Finalmente, el sistema transmite los resultados a los ingenieros responsables, quienes pueden tomar decisiones informadas sobre mantenimiento, refuerzo o rehabilitación de la infraestructura.

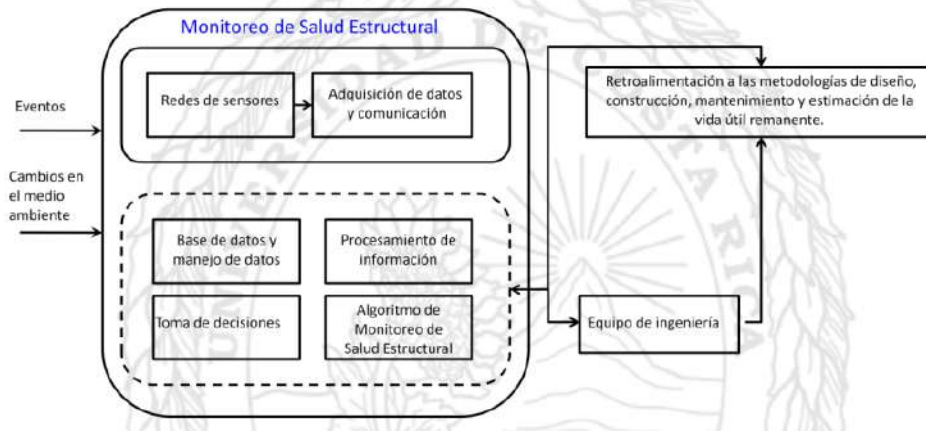


Figura 2. Concepto del Sistema de Monitoreo Estructural [17].

En la Figura 2 se puede observar la secuencia entre la red de sensores, la adquisición y procesamiento de datos, la toma de decisiones y la retroalimentación hacia los procesos de diseño, mantenimiento y predicción de vida útil. Este modelo constituye la base de los sistemas modernos de monitoreo estructural inteligente, los cuales permiten transformar una infraestructura pasiva en una entidad capaz de aprender, adaptarse y anticipar posibles fallos estructurales [17].

Por otro lado, en la Figura 3 se puede observar la arquitectura general de un sistema de Monitoreo de Salud Estructural (MSE), conformada por una red de sensores principalmente acelerómetros instalados en puntos estratégicos de la estructura para registrar vibraciones y deformaciones.

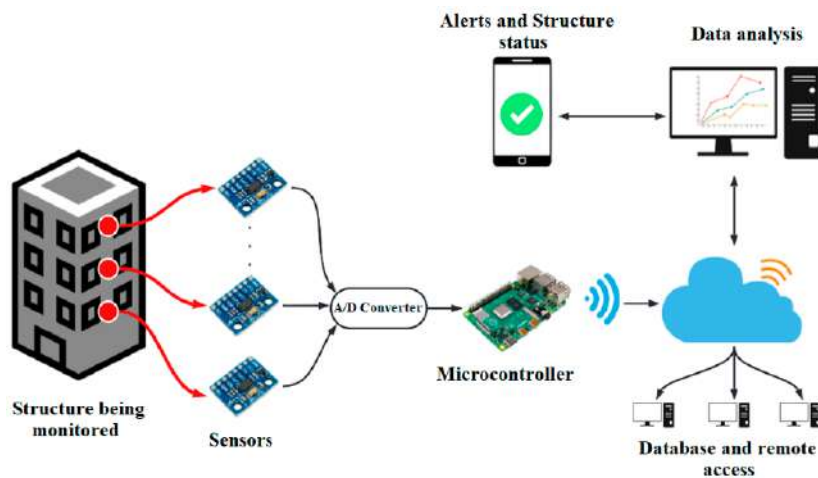


Figura 3. Arquitectura general de un MSE [18].

Las señales captadas son enviadas a un convertidor analógico-digital (A/D) y posteriormente a un microcontrolador, encargado de procesar y transmitir los datos mediante comunicación inalámbrica hacia un servidor o plataforma en la nube. En este entorno, la información es analizada utilizando herramientas como MATLAB o Python, que permiten aplicar rutinas de filtrado y transformadas de Fourier para detectar comportamientos anómalos. Finalmente, los resultados pueden visualizarse en tiempo real o enviarse como alertas automáticas a dispositivos móviles, garantizando una supervisión continua y remota del estado estructural.

### VI-B. Monitoreo estructural en puentes metálicos

El monitoreo estructural se ha consolidado como una herramienta esencial dentro de los procesos de gestión y conservación de infraestructuras críticas, particularmente en el caso de los puentes metálicos, debido a su capacidad para registrar y analizar el comportamiento dinámico de la estructura bajo condiciones reales de operación. Este tipo de monitoreo permite identificar de manera temprana indicios de deterioro o posibles fallas que podrían comprometer la integridad estructural y la seguridad operacional [18] [8].

Sin embargo, en el caso particular de los puentes, estas tecnologías se han convertido en elementos esenciales para garantizar la seguridad y la continuidad operativa de las infraestructuras de transporte. Los puentes representan estructuras críticas dentro del desarrollo económico, al permitir el flujo constante de bienes, servicios y personas; por ello, la implementación de sistemas IoT para MSE ha demostrado ser una alternativa eficiente, económica y de alta precisión [19].

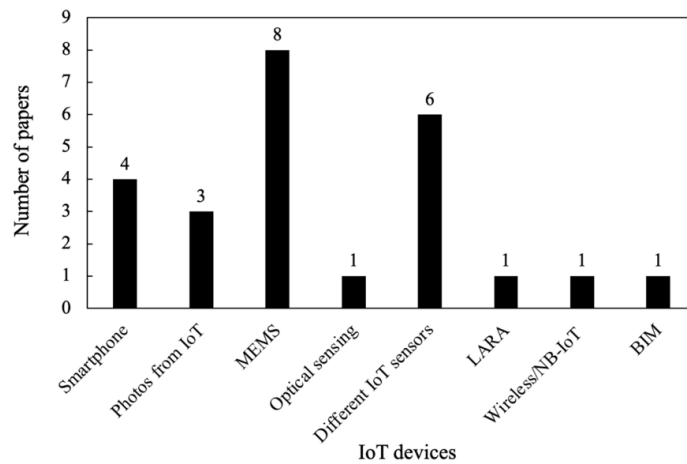


Figura 4. Dispositivo de monitoreo remoto para construcciones civiles [19]

La Figura 4 presenta una clasificación de los principales tipos de sensores y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) empleados en el monitoreo de salud estructural (MSE) de puentes. En este gráfico se observa que los sensores MEMS son los dispositivos más utilizados, con un total de ocho publicaciones que reportan su aplicación directa en la medición de vibraciones y aceleraciones estructurales. Esto se debe a su alta sensibilidad, bajo consumo energético y facilidad de integración con plataformas inalámbricas, características que los convierten en una herramienta esencial para el seguimiento dinámico de infraestructuras metálicas [19], [20].

### VI-C. Fundamentos de la dinámica estructural

El estudio de la dinámica estructural constituye la base teórica para comprender el comportamiento vibratorio de las infraestructuras civiles sometidas a cargas dinámicas. Las vibraciones estructurales se definen como oscilaciones mecánicas de los elementos de una estructura en torno a su posición de equilibrio, originadas por la acción de fuerzas externas variables en el tiempo. En el caso particular de los puentes metálicos, las principales excitaciones dinámicas se asocian al tránsito vehicular, la acción del viento, los eventos sísmicos y las variaciones térmicas del entorno [21]. Estos fenómenos generan respuestas dinámicas que, si no son adecuadamente controladas, pueden inducir fatiga en los materiales, pérdida de rigidez o incluso fallas estructurales progresivas.

El análisis de vibraciones permite caracterizar el comportamiento dinámico de una estructura mediante parámetros fundamentales como la frecuencia natural, el coeficiente de amortiguamiento y los modos de vibración, los cuales

dependen directamente de las propiedades geométricas, la rigidez del material y las condiciones de frontera del sistema. Una variación apreciable en alguno de estos parámetros constituye un indicio claro de degradación estructural, ya que los daños locales, fisuras o pérdidas de continuidad modifican la rigidez y la masa efectiva del sistema [22]. El seguimiento de estas variaciones mediante técnicas de monitoreo continuo posibilita detectar alteraciones antes de que evolucionen hacia fallas críticas, reforzando la confiabilidad del diseño y el mantenimiento predictivo.

En la actualidad, los métodos de diagnóstico estructural basados en vibraciones se apoyan en la comparación entre las respuestas medidas y las predicciones obtenidas a partir de modelos numéricos o experimentales de referencia. En este contexto, la detección de daños basada en vibraciones representa una de las metodologías más efectivas dentro del monitoreo estructural. Este enfoque utiliza la respuesta dinámica de la estructura para evaluar su condición y determinar la existencia de fallas [22],[23].

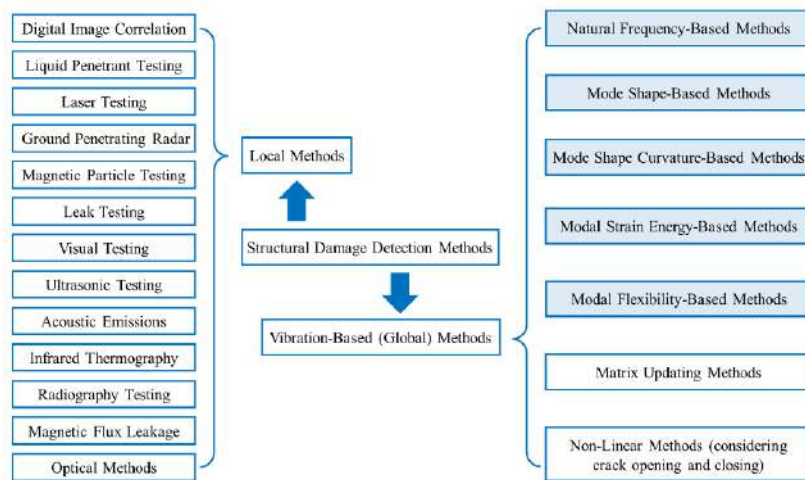


Figura 5. Métodos de detección de daños estructurales [23].

La Figura 5 presenta una clasificación general de los principales métodos de detección de daños estructurales, los cuales pueden dividirse en dos grandes categorías: métodos locales y métodos globales basados en vibraciones.

Los métodos locales se centran en la inspección directa de zonas específicas del material donde se sospecha la existencia de defectos o discontinuidades. Dentro de esta categoría se incluyen técnicas como la termografía infrarroja, la emisión acústica, el ensayo ultrasónico, el láser escáner, la radiografía, y la correlación digital de imágenes, entre otros.

En contraste, los métodos globales basados en vibraciones analizan la respuesta dinámica completa de la estructura con el fin de inferir el estado de salud general del sistema sin necesidad de acceso directo a todas sus partes. Estos métodos se clasifican en subcategorías según el parámetro modal analizado: frecuencia natural, forma modal, curvatura modal, energía de deformación modal y flexibilidad modal.

#### VI-D. Microcontrolador LoRa ESP32 V2.0

El LoRa ESP32 V2.0 es un módulo de desarrollo que integra un microcontrolador ESP32 de doble núcleo con conectividad Wi-Fi, Bluetooth y LoRa (Long Range). Este dispositivo actúa como el núcleo lógico del sistema, encargado de la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos generados por los sensores.

#### Características:

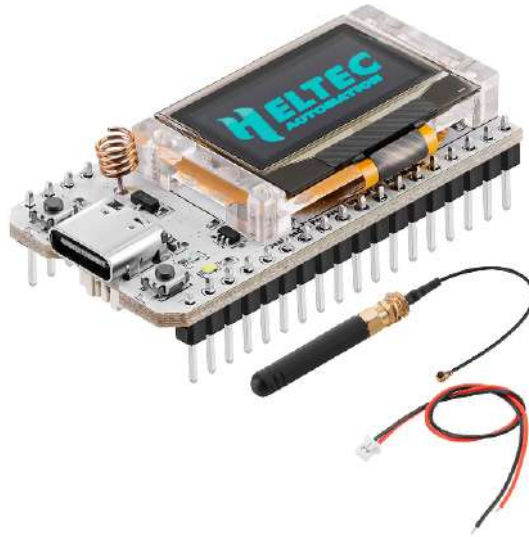


Figura 6. Microcontrolador LORA ESP32 [24].

- Procesador dual-core a 240 MHz.
- Conectividad Wi-Fi (802.11 b/g/n) y LoRa SX1276.
- Memoria Flash de 4 MB.
- Interfaz de comunicación SPI, I<sup>2</sup>C, UART y ADC.
- Capacidad de programación en plataformas abiertas (Arduino IDE, PlatformIO, MicroPython).

El microcontrolador recibe la información de los sensores MEMS, realiza el preprocesamiento digital (filtro de ruido, cálculo de RMS y FFT) y transmite los resultados hacia la plataforma IoT mediante conexión Wi-Fi o LoRa. Además, puede funcionar de forma autónoma alimentado por baterías LiPo, reduciendo la necesidad de cableado y facilitando la instalación en puntos críticos de la estructura[24].

#### VI-E. Sensores MEMS para monitoreo de vibraciones

El desarrollo acelerado de la microelectrónica y la nanotecnología ha impulsado la creación de dispositivos de sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés), los cuales integran en un mismo chip componentes mecánicos, eléctricos y de procesamiento. Estos sensores han revolucionado la instrumentación del monitoreo de salud estructural (MSE) debido a su capacidad para medir variables dinámicas con alta precisión y bajo consumo energético. Entre los dispositivos más empleados se encuentran los acelerómetros triaxiales, como el ADXL355, que destacan por su estabilidad a largo plazo, su amplio rango dinámico y su reducido nivel de ruido [25]. Estos sensores permiten registrar la aceleración en los tres ejes cartesianos (X, Y y Z), posibilitando el análisis simultáneo de movimientos complejos y la identificación de patrones de vibración característicos del comportamiento estructural [25], [26].

La Figura 7 ilustra un esquema simplificado de un sistema de monitoreo estructural inalámbrico basado en IoT, aplicado a infraestructuras de tipo puente. En este diseño, los nodos sensores MSE instalados en puntos estratégicos de la estructura registran continuamente las vibraciones mediante acelerómetros MEMS de alta sensibilidad. Estos datos son procesados localmente y posteriormente transmitidos a través del protocolo Narrowband Internet of Things (NB-IoT) hacia una celda LTE, que actúa como enlace de comunicación hacia un servidor local encargado de la gestión y análisis de la información estructural.

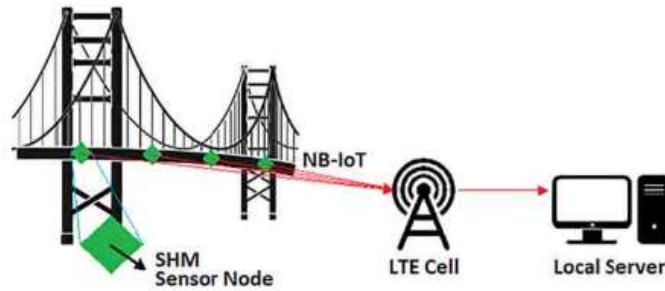


Figura 7. Sensores MEMS e IoT [27].

#### VI-F. Acelerómetro MEMS ADXL355

El ADXL355 es un acelerómetro triaxial de tipo MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) diseñado para medir vibraciones y aceleraciones con alta precisión. Su principio de funcionamiento se basa en la detección de desplazamientos de una masa micromecánica suspendida, los cuales se convierten en señales eléctricas proporcionales a la aceleración experimentada por la estructura.

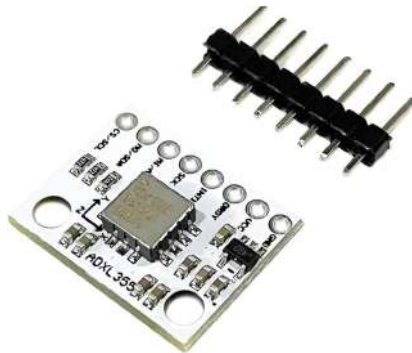


Figura 8. Sensor ADXL355 [28].

#### Características:

- Rango de medición:  $\pm 2$  g,  $\pm 4$  g o  $\pm 8$  g.
- Resolución digital de 20 bits.
- Interfaz de comunicación digital SPI/I<sup>2</sup>C.
- Consumo energético reducido ( $< 200$   $\mu$ A).

El sensor detecta las aceleraciones en los tres ejes cartesianos (X, Y, Z) y genera señales digitales que representan la magnitud y dirección del movimiento. Estas señales son enviadas al microcontrolador, donde se procesan mediante filtros digitales y se calculan parámetros como el valor RMS o el espectro de frecuencia (FFT). Su estabilidad térmica y bajo ruido lo convierten en un dispositivo ideal para el monitoreo de vibraciones estructurales en tiempo real [28].

#### VI-G. Fuente de alimentación LiPo y módulo TP4056

El sistema se alimenta mediante una batería LiPo (Lithium Polymer) recargable, que ofrece una alta densidad energética y bajo peso, ideal para sistemas portátiles. El módulo TP4056 gestiona la carga y protección de la batería.



Figura 9. Cargador de Baterías TP4056.

#### Características:

- Voltaje nominal: 3.7 V.
- Corriente de carga controlada (1A máx.).
- Protección contra sobrecarga y descarga profunda.
- Carga mediante puerto micro-USB.

La batería alimenta el microcontrolador y los sensores, mientras que el módulo TP4056 permite recargarla de manera segura. En aplicaciones prolongadas, el sistema puede complementarse con un pequeño panel solar, garantizando autonomía energética y operación continua del monitoreo estructural [29].

#### VI-H. Microcontroladores e integración IoT

El avance de las plataformas de hardware libre ha revolucionado el desarrollo de sistemas de monitoreo estructural inalámbrico, permitiendo la creación de dispositivos capaces de adquirir, procesar y transmitir información de forma autónoma. Entre las soluciones más utilizadas destacan las familias ESP32, Arduino y los módulos LoRa ESP32, que combinan la capacidad de cómputo local con la comunicación directa hacia plataformas IoT. Estas arquitecturas facilitan la integración de sensores inteligentes y la transmisión de datos en tiempo real mediante protocolos como Wi-Fi, LoRaWAN o NB-IoT, lo que posibilita un control continuo del comportamiento estructural sin depender de infraestructura cableada [29], [30].

En particular, el LoRa ESP32 V2.0 representa una alternativa eficiente para el monitoreo de infraestructuras metálicas debido a su microcontrolador de doble núcleo, su bajo consumo energético y su conectividad híbrida. Este módulo permite la lectura simultánea de sensores como el ADXL355, la ejecución de rutinas de procesamiento digital de señales filtrado, cálculo RMS y transformada rápida de Fourier (FFT), y la transmisión de los resultados hacia un servidor IoT mediante conexión inalámbrica [24], [30]. Gracias a estas características, el sistema puede operar de manera confiable en entornos donde no existe cobertura Wi-Fi o red local, garantizando la continuidad del registro y el análisis de vibraciones en estructuras a escala experimental y real.

### VI-I. *Kit Estructural Mola 3*

El Kit Estructural Mola 3 constituye una herramienta didáctica avanzada que permite la comprensión práctica de los principios que rigen el comportamiento de las estructuras de cables y puentes. Este módulo ha sido diseñado con el objetivo de reproducir de manera intuitiva las condiciones reales de equilibrio, tensión y compresión presentes en los sistemas estructurales.

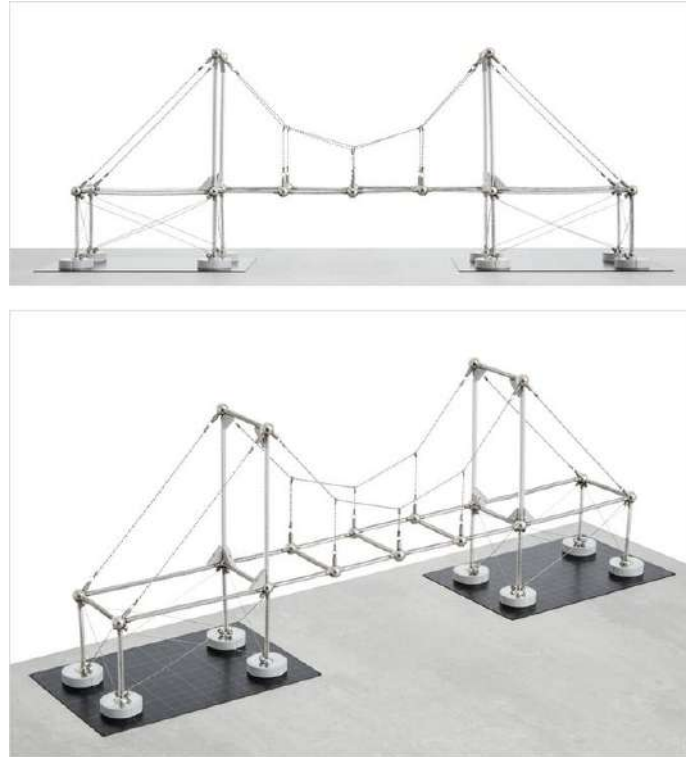


Figura 10. Módulo Mola Kit 3

A través de su diseño modular, el usuario puede construir configuraciones tridimensionales que incluyen cimientos, columnas, vigas, tirantes y elementos de refuerzo, observando directamente las reacciones que se producen ante cargas externas. Esta interacción directa favorece la comprensión de conceptos como la estabilidad estructural, la distribución de esfuerzos y las trayectorias de carga, permitiendo un aprendizaje visual y experimental sobre los fundamentos de la ingeniería estructural.

### VI-J. *Plataformas IoT y gestión de datos*

Las plataformas de Internet de las Cosas (IoT) se han consolidado como una herramienta esencial para la adquisición, almacenamiento y análisis remoto de información proveniente de múltiples sensores [31], [32]. Estas plataformas permiten integrar nodos distribuidos en una red de monitoreo estructural, facilitando la transmisión de datos en tiempo real hacia servidores locales o en la nube. Entre las opciones más empleadas se encuentra ThingSpeak, ampliamente utilizada en entornos académicos y de investigación por su compatibilidad con MATLAB, su interfaz intuitiva y su capacidad para generar gráficos, alertas y análisis automatizados de las variables estructurales [33], [34].

Estas plataformas IoT integran una combinación de software, hardware y herramientas de análisis para conectar, gestionar y procesar información de múltiples dispositivos inteligentes. Está compuesta por ocho elementos fundamentales: conectividad y normalización, gestión de dispositivos, base de datos, procesamiento de acciones, analítica, visualización, herramientas de desarrollo e interfaces externas.

La interacción de estos componentes permite recopilar, analizar y representar datos en tiempo real, facilitando la automatización, el mantenimiento predictivo y la toma de decisiones en sistemas inteligentes como el monitoreo estructural de puentes [33], [34].

#### VI-K. Arquitectura IoT

La Figura 11 muestra los modelos arquitectónicos más comunes empleados en el diseño de sistemas IoT (Internet de las Cosas), representados en dos enfoques: el de tres capas y el de cinco capas.

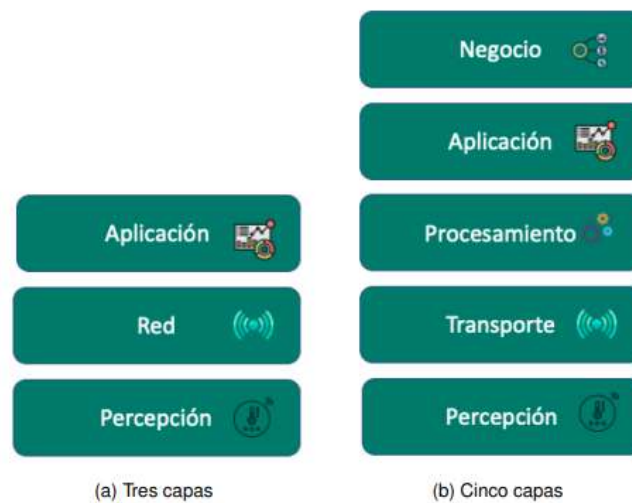


Figura 11. Arquitectura IoT por capas [33], [34].

En el modelo de tres capas, se distinguen los niveles de percepción, red y aplicación. La capa de percepción comprende los sensores y dispositivos encargados de captar datos del entorno físico, como temperatura, vibración o desplazamiento. La capa de red gestiona la transmisión de estos datos a través de diferentes tecnologías de comunicación (Wi-Fi, LoRa, NB-IoT, etc.), mientras que la capa de aplicación procesa y presenta la información al usuario final, mediante plataformas en la nube o paneles de monitoreo [35], [34].

Por otro lado, el modelo de cinco capas introduce una estructura más detallada para sistemas IoT complejos. A las tres capas anteriores se suman la capa de transporte, responsable de la transferencia eficiente y segura de los datos entre los dispositivos y los servidores, y la capa de procesamiento, que realiza el filtrado, almacenamiento y análisis de la información antes de su visualización. Finalmente, se incorpora la capa de negocio, encargada de la gestión de políticas, toma de decisiones y optimización de procesos basada en los resultados obtenidos del sistema [35], [34].

#### VI-L. Plataforma IoT ThingSpeak

ThingSpeak es una plataforma de análisis y visualización de datos en la nube desarrollada por MathWorks, compatible con MATLAB y ampliamente utilizada en proyectos de monitoreo remoto. Permite almacenar, procesar y graficar datos provenientes de sensores conectados a Internet.

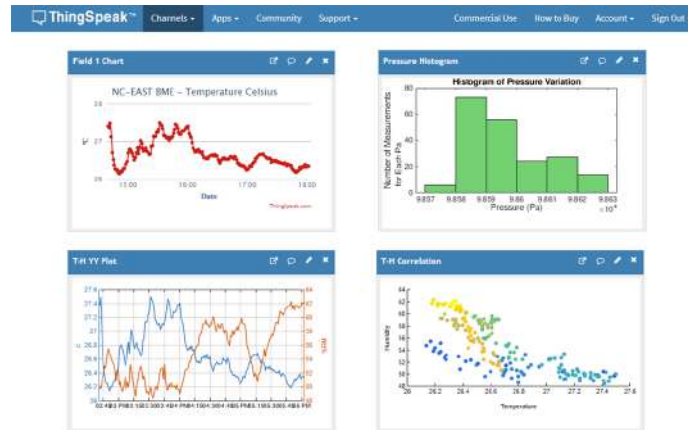


Figura 12. Plataforma IoT llamada ThingSpeak.

### Características:

- Interfaz web intuitiva y gratuita para proyectos académicos.
- Integración directa con MATLAB y soporte para APIs RESTful.
- Capacidad de visualización en tiempo real y envío de alertas automáticas.
- Almacenamiento en canales con hasta ocho campos de datos simultáneos.

Los datos enviados por el microcontrolador son recibidos en la nube y organizados en canales individuales. Desde allí, se procesan mediante algoritmos de MATLAB para generar gráficos, estadísticas o alertas. Esta plataforma permite la observación remota del comportamiento vibracional de la estructura, facilitando el diagnóstico continuo y la toma de decisiones basada en datos.

## VII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de trabajo en la figura

TAREA	OCTUBRE			NOVIEMBRE			DICIEMBRE			ENERO			FEBRERO			MARZO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
<b>ETAPA I – Revisión Teórica y Selección de Componentes</b>																									
Revisión bibliográfica y marco teórico																									
Análisis de métodos de monitoreo estructural																									
Selección de sensores y microcontrolador																									
Adquisición de materiales y herramientas.																									
<b>ETAPA II – Diseño Electrónico y Programación Base</b>																									
Diseño del circuito electrónico y pruebas en protoboard																									
Programación para adquisición de datos.																									
Configuración de comunicación IoT con ThingSpeak.																									
Validación funcional del sistema																									
<b>ETAPA III – Diseño Mecánico y Montaje</b>																									
Diseño y modelado de caja 3D																									
Impresión 3D y ensamble del sistema.																									
Montaje sobre el Mola Kit 3																									
Alineación y balance del sistema sobre plataforma orbital.																									
<b>ETAPA IV – Ensayos, Análisis y Documentación</b>																									
Ejecución de ensayos de vibración controlada																									
Registro y procesamiento de señales.																									
Validación de resultados y comparación de datos.																									
Redacción del documento final, correcciones y defensa.																									

Figura 13. Cronograma de Actividades.

## VIII. MARCO METODOLÓGICO

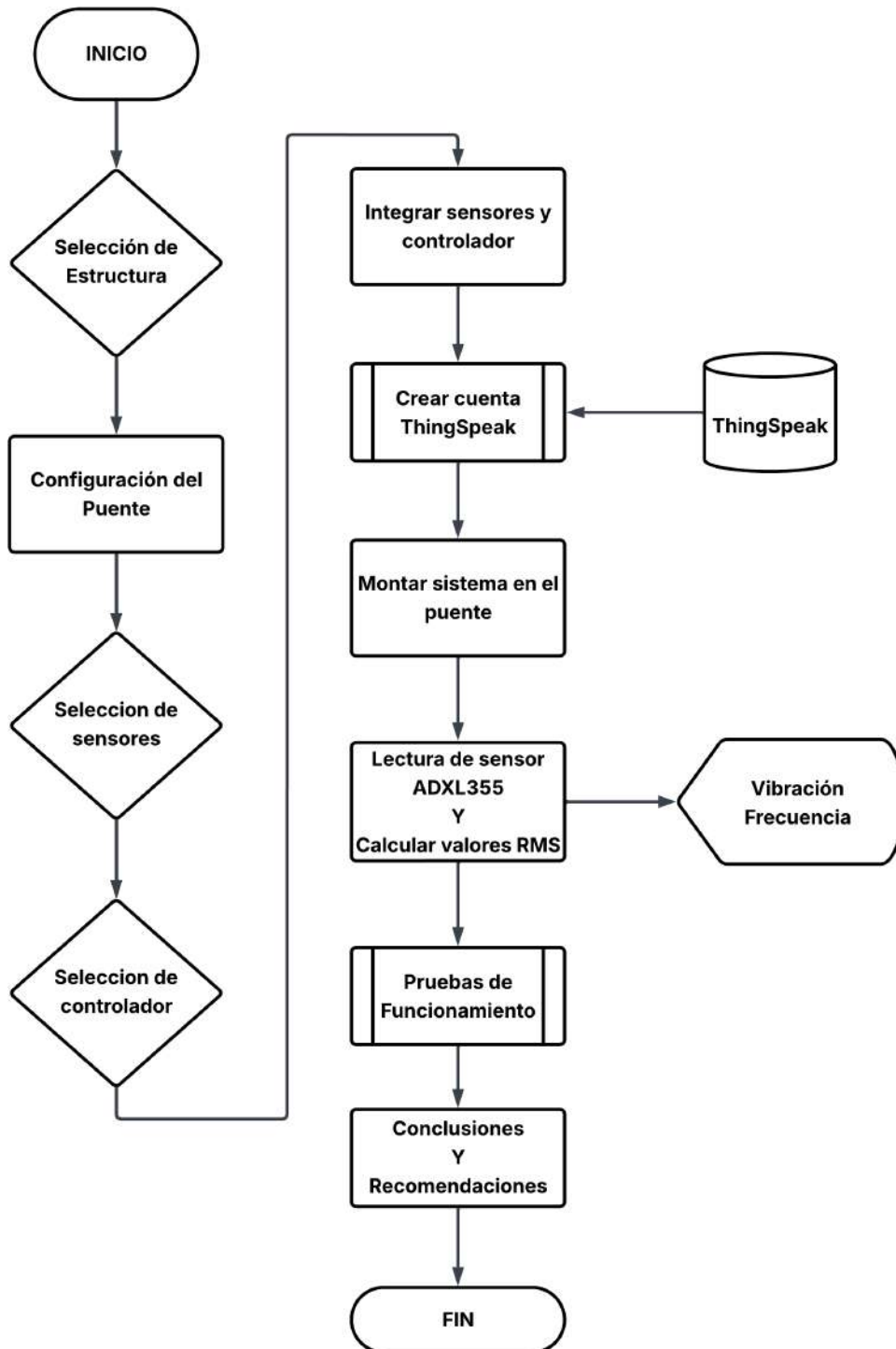


Figura 14. Diagrama de Flujo

El marco metodológico de esta investigación se estructura como un estudio experimental orientado al desarrollo, implementación y validación de un sistema de monitoreo estructural basado en tecnología IoT, aplicado a un modelo a escala de un puente metálico. Para ello, la metodología se organiza en varias fases que abarcan desde la selección de la plataforma experimental, la definición de los componentes del sistema, el proceso de instrumentación y

adquisición de datos, y finalmente los ensayos controlados que permitirán validar el funcionamiento del sistema propuesto.

#### VIII-A. Selección de la plataforma Mola Kit 3

La elección del Mola Structural Kit 3 responde a la necesidad de contar con una estructura a escala que permita reproducir, de forma segura y controlada, el comportamiento dinámico típico de un puente de acero. Este kit ofrece una arquitectura modular que facilita la construcción de tipologías de puentes con cables, torres y tablero, permitiendo analizar deformaciones, vibraciones y modos de falla sin comprometer la integridad de los sensores ni del entorno de prueba. Además, su naturaleza didáctica y desmontable permite introducir de manera precisa escenarios controlados de daño, como aflojamiento de tirantes o adición de masa, lo cual es indispensable para validar la respuesta del sistema IoT de monitoreo estructural.

La estructura está conformada por un tablero longitudinal compuesto por módulos consecutivos unidos mediante nudos articulados, lo que permite representar la continuidad estructural del vano central y facilitar la generación de modos de vibración verticales, laterales y torsionales. En los extremos se disponen marcos rígidos que simulan los estribos, mientras que las torres principales se elevan sobre apoyos intermedios, desde los cuales parten los tirantes inclinados que estabilizan el sistema.

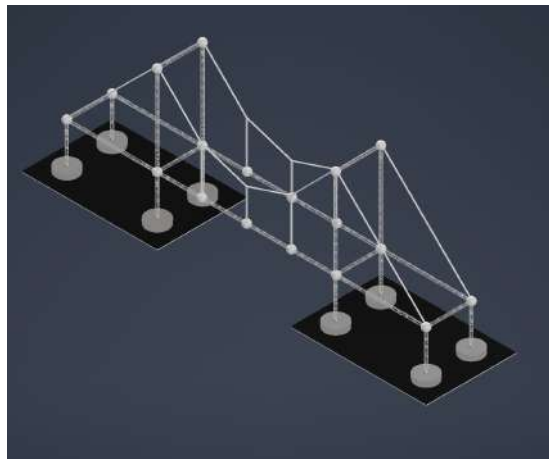


Figura 15. Diseño 3D de Mola Kit 3

#### VIII-B. Diseño Base Mola Kit 3

Con el fin de garantizar una adecuada transmisión de las excitaciones dinámicas durante los ensayos, el conjunto estructural se montó sobre una base rígida fabricada en acrílico de alta rigidez, la cual actúa como interfaz mecánica entre el puente a escala y la mesa vibratoria horizontal empleada en el laboratorio. Esta placa base incorpora perforaciones normalizadas y puntos de anclaje distribuidos simétricamente que permiten fijar los apoyos del puente mediante elementos roscados, evitando desplazamientos relativos y pérdidas de energía por deslizamiento durante la vibración. Con el fin de verificar los resultados obtenidos mediante el análisis estático por elementos finitos (Inventor), se modeló la base de acrílico como una viga simplemente apoyada sometida a una carga concentrada equivalente al peso del puente. El desplazamiento máximo para una carga puntual aplicada en el centro se estima mediante:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

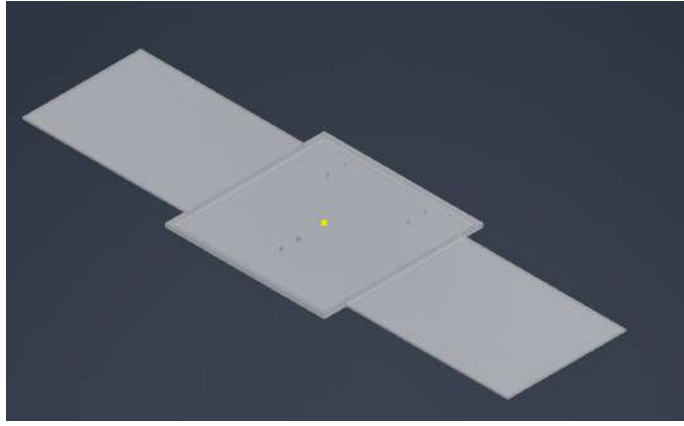


Figura 16. Diseño de la Base Mola Kit 3

donde:

- $W = mg$  corresponde al peso del puente
- $L$  es la longitud efectiva de la base
- $E$  es el módulo de elasticidad del acrílico
- $I$  es el momento de inercia de la sección transversal.

La base se idealiza como una viga prismática simplemente apoyada con carga distribuida equivalente, caracterizada por los siguientes parámetros geométricos y mecánicos:

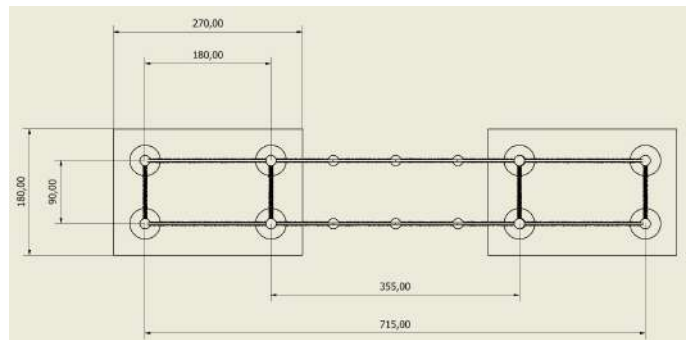


Figura 17. Medidas del puente Mola Kit 3

- Longitud:  $L = 0,715$  m,
- Ancho efectivo:  $b = 0,18$  m,
- Masa del puente:  $m_p = 3$  Kg,
- Espesor del acrílico:  $t = 0,006$  m,
- Módulo de elasticidad del acrílico:  $E_a \approx 3,2$  GPa.

*Carga por peso del puente:* El peso del puente se calcula como:

$$W_p = m_p g = 3(9,81) = 29,43 \text{ N.} \quad (2)$$

La carga distribuida equivalente resulta:

$$w = \frac{W_p}{L} = \frac{29,43}{0,715} = 41,16 \text{ N/m.} \quad (3)$$

*Momento de inercia de la placa:* Para una sección rectangular, el momento de inercia se obtiene como:

$$I_a = \frac{bt^3}{12} = \frac{0,18(0,006)^3}{12} = 3,24 \times 10^{-9} \text{ m}^4. \quad (4)$$

*Desplazamiento máximo:* Para una viga simplemente apoyada con carga distribuida uniforme, el desplazamiento máximo es:

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{5wL^4}{384E_a I_a}. \quad (5)$$

Sustituyendo los valores anteriores se obtiene:

$$\delta_{\text{máx}} \approx 0,0135 \text{ m} \approx 13,5 \text{ mm.} \quad (6)$$

Este resultado indica que, aun considerando únicamente el peso del puente, la base de acrílico puede presentar deformaciones del orden de 13–14 mm, lo cual concuerda con las observaciones experimentales.

*Verificación de tensiones:* El momento flector máximo es:

$$M_{\text{máx}} = \frac{wL^2}{8} \approx 2,63 \text{ N m.} \quad (7)$$

El esfuerzo máximo por flexión se estima mediante:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M_{\text{máx}}c}{I_a}, \quad c = \frac{t}{2} = 0,003 \text{ m,} \quad (8)$$

de donde resulta:

$$\sigma_{\text{máx}} \approx 2,44 \text{ MPa.} \quad (9)$$

Este valor se encuentra muy por debajo de la resistencia típica del acrílico, lo que evidencia que la limitación principal corresponde a la rigidez del sistema y no a la capacidad resistente del material.

*VIII-B1. Consideración del peso propio de la base:* Adoptando una densidad del acrílico de  $\rho_{ac} \approx 1180 \text{ kg/m}^3$ , la masa de la placa se estima como:

$$m_b = \rho_{ac}Lbt \approx 1180(0,715)(0,18)(0,006) \approx 0,91 \text{ kg.} \quad (10)$$

El peso total del sistema resulta:

$$W_{\text{tot}} = (m_p + m_b)g = (3 + 0,91)9,81 \approx 38,4 \text{ N.} \quad (11)$$

Repetiendo el cálculo de flecha con esta carga, se obtiene:

$$\delta_{\text{máx}} \approx 17,6 \text{ mm.} \quad (12)$$

Por tanto, al incluir el peso propio de la base, la deformación estimada se incrementa hasta valores cercanos a 18 mm, confirmando la necesidad de un refuerzo estructural.

*VIII-B2. Validación analítica del desplazamiento de la base acrílica:* El análisis estático en Inventor arrojó un desplazamiento máximo de 21,19 mm, lo que representa una diferencia relativa de aproximadamente 1,9 %, validando la consistencia del modelo numérico y confirmando que el comportamiento observado corresponde a una limitación por rigidez (flexión) y no por resistencia del material.

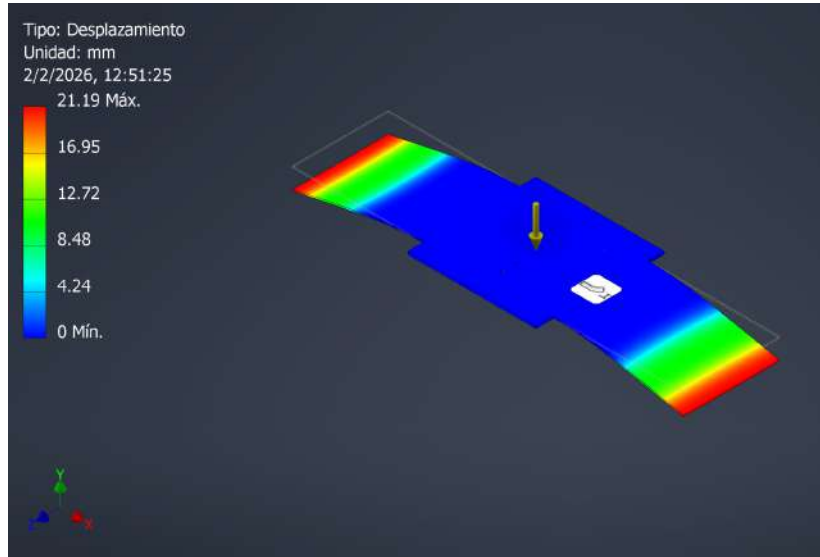


Figura 18. Analisis Estático Base Mola Kit 3

*VIII-B3. Efecto del refuerzo con tubo rectangular:* Con el objetivo de incrementar la rigidez flexional del conjunto, se incorpora un tubo rectangular de acero de  $25 \times 12$  mm y espesor 1 mm, bajo la placa de acrílico. Para el acero se adopta un módulo de elasticidad:

$$E_s \approx 200 \text{ GPa.} \quad (13)$$

La relación modular entre ambos materiales es:

$$n = \frac{E_s}{E_a} \approx \frac{200}{3,2} = 62,5. \quad (14)$$

Aplicando el método de la sección transformada y considerando que el tubo aporta la mayor parte de la rigidez del conjunto, se obtiene un momento de inercia equivalente aproximado:

$$I_{eq} \approx 5,54 \times 10^{-7} \text{ m}^4. \quad (15)$$

Este valor es aproximadamente 170 veces mayor que el correspondiente a la placa de acrílico sin refuerzo ( $I_a = 3,24 \times 10^{-9} \text{ m}^4$ ).

Utilizando el mismo modelo de carga distribuida, el desplazamiento máximo se reduce a:

- Solo peso del puente:

$$\delta_{\text{máx,ref}} \approx 0,079 \text{ mm,}$$



Figura 19. Refuerzo de tubo rectangular

- Puente y peso propio del acrílico:

$$\delta_{\text{máx,ref}} \approx 0,103 \text{ mm.}$$

Estos resultados evidencian que el refuerzo con el tubo rectangular reduce el desplazamiento desde valores del orden de 14–18 mm hasta décimas de milímetro (0.103mm) en el modelo realizado.

#### VIII-C. Sistema de acoplamiento entre la base del puente y la mesa vibratoria

Para la transmisión adecuada del movimiento dinámico generado por la mesa vibratoria hacia el modelo estructural del puente, se diseñó e implementó un sistema específico de acoplamiento mecánico entre la base acrílica y la plataforma móvil del actuador. Dicho sistema está constituido por soportes fabricados mediante impresión 3D, visibles en color azul en el montaje experimental, los cuales permiten fijar de manera rígida el tubo rectangular de refuerzo a la mesa vibratoria sin introducir holguras apreciables.

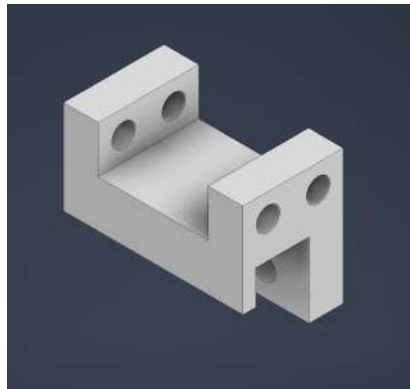


Figura 20. Soporte Tubo Rectangular

Los acoples impresos presentan una geometría tipo horquilla, con superficies planas de apoyo y perforaciones alineadas para la colocación de pernos pasantes, lo que garantiza la correcta alineación entre el eje longitudinal del puente y la dirección principal de movimiento de la mesa vibratoria.



Figura 21. Mesa y Base del Mola Kit 3.

#### VIII-D. *Diseño de la carcasa del sistema electrónico principal*

Con el objetivo de alojar y proteger los componentes electrónicos del sistema de monitoreo estructural, se diseñó una carcasa específica mediante modelado tridimensional y fabricación por impresión 3D. Esta carcasa contiene la tarjeta principal basada en tecnología ESP32 con comunicación LoRa, una batería recargable tipo 18650 con capacidad nominal de  $10000mAh$ , el circuito de control y un sistema de gestión de carga basado en el módulo TP4056.

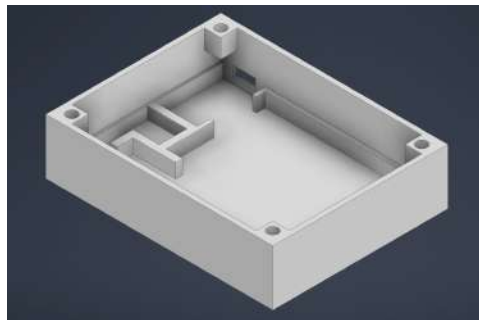


Figura 22. Carcasa del Circuito Principal.

La geometría externa de la carcasa corresponde a una figura rectangular de dimensiones aproximadas  $96mm \times 74mm$ , con una altura total de  $23,5mm$ , dimensiones seleccionadas para garantizar la correcta disposición interna de los componentes y permitir el enrutamiento seguro del cableado sin interferencias mecánicas. El diseño se compone de dos piezas principales: una base inferior con alojamientos internos y una tapa superior de cierre, ambas provistas de pestañas y orificios para fijación mediante tornillería, lo que permite un desmontaje rápido para labores de mantenimiento, sustitución de batería o reprogramación del sistema.

La tapa superior incluye ventanas rectangulares estratégicamente ubicadas para permitir el acceso a conectores externos como el sensor ADXL355 y un pulsador de encendido. Asimismo, se diseñaron resaltes perimetrales que incrementan la rigidez global de la carcasa y mejoran la resistencia a flexión de las paredes laterales.

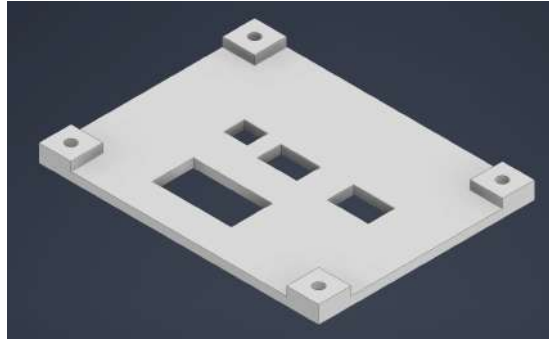


Figura 23. Tapa del Circuito Principal

#### VIII-E. Diseño de la carcasa del sensor acelerométrico ADXL355

Con el propósito de garantizar una correcta transmisión de las vibraciones estructurales hacia el acelerómetro triaxial ADXL355 y, al mismo tiempo, proteger el dispositivo frente a impactos, manipulación y daños durante la instalación experimental, se diseñó una carcasa específica mediante modelado tridimensional e impresión 3D. El conjunto está conformado por una base inferior y una tapa superior desmontable, las cuales encierran el módulo sensor y su sistema de conexión eléctrica.

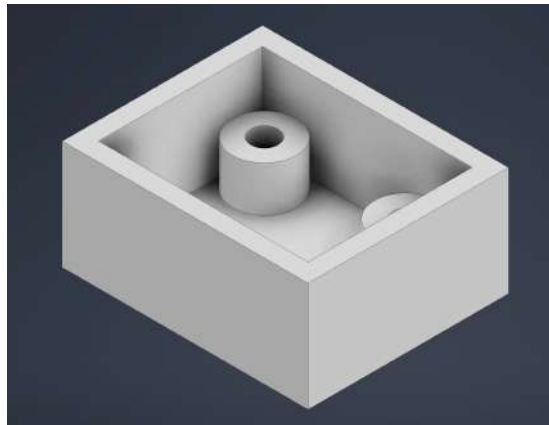


Figura 24. Carcasa Sensor ADXL355.

La geometría interna de la carcasa incluye un alojamiento cilíndrico central para la fijación rígida del sensor, así como superficies planas de apoyo que aseguran la correcta orientación de los ejes de medición con respecto al sistema global de coordenadas del puente. La tapa superior incorpora una abertura longitudinal que permite el paso del cableado sin inducir esfuerzos sobre los conectores, evitando daños por fatiga durante los ensayos dinámicos.

Un elemento distintivo del diseño es la incorporación de cuatro imanes de neodimio de  $3mm$  de diámetro, empotrados en la cara inferior de la carcasa. Estos imanes permiten la fijación rápida y repetible del sensor sobre



del ADXL355. En términos de gestión de energía, este modulo integra una batería recargable tipo 18650 (capacidad nominal  $10000mAh$ ) y un módulo cargador TP4056. El TP4056, cuando no existe alimentación en la entrada, entra en un modo de bajo consumo donde la corriente desde el pin BAT se reduce a menos de  $2A$ , contribuyendo de manera despreciable al balance energético del sistema [28].

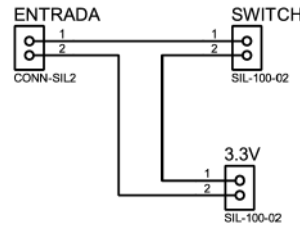


Figura 28. Pines de Alimentación del Circuito.

**VIII-F2. Interfaz digital entre ESP32-S3 y ADXL355:** La adquisición del acelerómetro ADXL355 se implementa mediante el bus SPI, debido a su robustez frente a ruido y a su capacidad de operar con frecuencias de reloj elevadas. El esquema utiliza cuatro señales principales:

- **SCK:** reloj del bus SPI, generado por el ESP32-S3.
- **MOSI:** línea de datos desde el maestro (ESP32-S3) hacia el sensor.
- **MISO:** línea de datos desde el sensor hacia el maestro.
- **CS:** selección de chip (*chip select*) para habilitar la comunicación con el ADXL355.

Adicionalmente, el ADXL355 dispone de un conector de alimentación independiente ( $ADXL355(VDC)$ ), que suministra  $3,3V$  y GND. El consumo del ADXL355 en operación es del orden de  $200A$  (según especificación de hoja de datos), pudiendo incrementarse en modo de medición y configuraciones específicas. [adx1355datasheet](#), [adx1355currentqna](#).

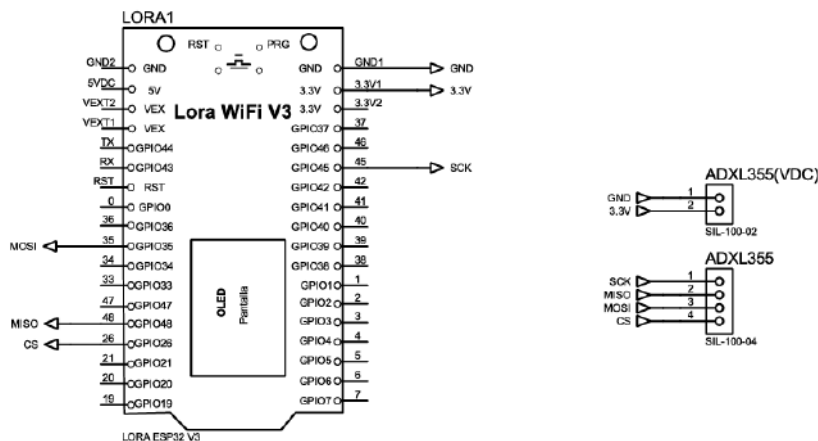


Figura 29. Conexión SPI al Sensor ADXL355.

**VIII-F3. Consideraciones de consumo y dimensionamiento de la batería:** Para dimensionar la autonomía del sistema se utiliza un balance de corriente promedio, considerando que la batería 18650 entrega energía a una tensión

nominal aproximada de  $3,7V$ . En sistemas reales, la alimentación a  $3,3V$  suele incluir pérdidas por regulación, por lo que se incorpora una eficiencia global  $\eta$  (típicamente entre 0.85 y 0.90 para convertidores *buck/boost* pequeños).

*Capacidad útil de la batería:* La capacidad nominal es:

$$C_{\text{bat}} = 10000mAh. \quad (16)$$

La capacidad útil aproximada, considerando eficiencia  $\eta$ , se expresa como:

$$C_{\text{eq}} \approx \eta C_{\text{bat}}. \quad (17)$$

Adoptando  $\eta = 0,90$ :

$$C_{\text{eq}} \approx 0,90 \times 10000 = 9000mAh. \quad (18)$$

*Modelo de corriente promedio:* La autonomía se estima con:

$$T [\text{h}] = \frac{C_{\text{eq}} [\text{mAh}]}{I_{\text{avg}} [\text{mA}]} \quad (19)$$

El valor  $I_{\text{avg}}$  depende fuertemente del modo de operación del ESP32 y del transceptor LoRa. Como referencia, el ESP32 presenta consumos pico elevados durante transmisión Wi-Fi hasta  $340mA$  en condiciones de máxima potencia, mientras que el modo de recepción WiFi se ubica típicamente en el rango de  $88mA - -91mA$  **esp32s3datasheetcurr**. En el caso del SX1262, la hoja de datos indica un consumo activo de recepción alrededor de  $4,2mA$  **sx1262datasheet**. Por otro lado, el consumo en sueño profundo (*deep sleep*) de implementaciones prácticas del módulo Heltec WiFi LoRa V3 se ha reportado del orden de  $135A$  **heltecdleepsleep**.

Con base en lo anterior, se proponen tres escenarios de operación, útiles para justificar el dimensionamiento y contrastarlos con mediciones experimentales:

1. **Escenario A: operación activa continua (con CPU activa y radio encendida).** Este escenario es conservador y representa una condición de máxima demanda energética (por ejemplo, procesamiento continuo y enlace activo). Se adopta un consumo equivalente:

$$I_{\text{avg,A}} \approx 150mA. \quad (20)$$

La autonomía estimada es:

$$T_A \approx \frac{9000}{150} = 60h \approx 2,5\text{días}. \quad (21)$$

2. **Escenario B: adquisición continua + transmisión LoRa periódica (típico IoT).** En un nodo de monitoreo estructural, una práctica común es adquirir datos a una tasa estable, almacenar o procesar localmente y transmitir paquetes cada cierto intervalo. En este régimen, el consumo promedio suele estar dominado por el microcontrolador en modo activo liviano y por la radio LoRa con bajo ciclo de trabajo. Se adopta:

$$I_{\text{avg,B}} \approx 60mA. \quad (22)$$

La autonomía estimada:

$$T_B \approx \frac{9000}{60} = 150h \approx 6,25\text{días}. \quad (23)$$

3. **Escenario C: operación de bajo consumo (medición intermitente + deep sleep).** Si el sistema entra en sueño profundo entre ventanas de adquisición, el consumo puede caer a centenas de microamperios. Considerando

como referencia 135A para *deep sleep* del módulo [28] y sumando el consumo del acelerómetro (200A nominal [22]), se obtiene una aproximación:

$$I_{avg,C} \approx (0,135mA + 0,200mA) = 0,335mA. \quad (24)$$

Por tanto:

$$T_C \approx \frac{9000}{0,335} \approx 26866h \approx 1120días. (25)$$

### VIII-G. Diseño de la PCB y validación tridimensional

La placa de circuito impreso de los módulos de medición fueron diseñados en Proteus Design Suite sobre una baquelita de una cara y espesor 1,6mm, con dimensiones finales de 40x69mm. Se implementó un plano de masa en la cara inferior y ruteo principal en la capa superior para reducir interferencias electromagnéticas. El módulo

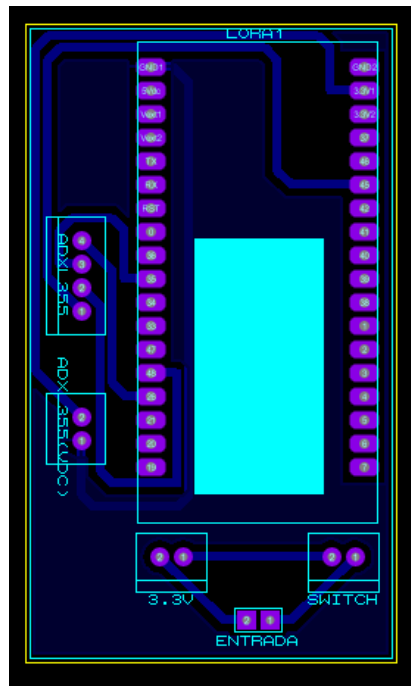


Figura 30. Diseño de la PCB del Circuito.

LoRa ESP32 se ubicó en la región central de la tarjeta, mientras que los conectores de alimentación, el interruptor principal y la salida regulada de 3,3V se dispusieron en el borde inferior para facilitar la integración con la carcasa. La interfaz del acelerómetro ADXL355 se posicionó lateralmente con pistas SPI cortas y balanceadas.

Las pistas de potencia se dimensionaron con mayor ancho e incluyen capacitores de desacoplo próximos a los dispositivos activos. Se dejó una zona libre de cobre en el área de la antena para no afectar el desempeño del enlace inalámbrico.

El modelo tridimensional de la PCB se generó empleando bibliotecas comerciales y componentes desarrollados específicamente para este proyecto, permitiendo verificar interferencias geométricas y la compatibilidad con la carcasa impresa en 3D antes de su fabricación.

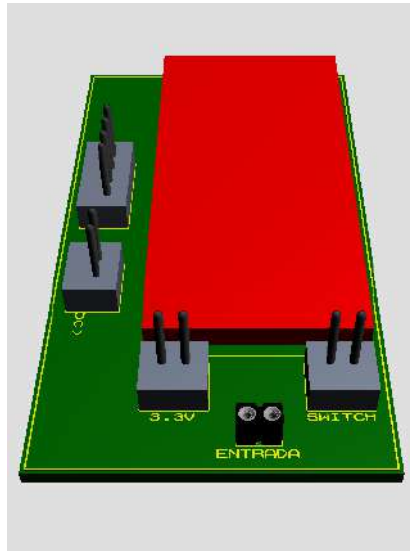


Figura 31. Diseño 3D de la PCB Final.

#### VIII-H. Programación del nodo con transmisión a ThingSpeak

El firmware desarrollado para el módulo basado en ESP32 integra tres bloques funcionales principales: (i) adquisición de vibración mediante un acelerómetro triaxial ADXL355, (ii) procesamiento digital de la señal para extraer indicadores (RMS y frecuencia dominante), y (iii) publicación periódica de dichos indicadores en la plataforma ThingSpeak a través de Wi-Fi. Adicionalmente, el sistema incluye visualización local mediante una pantalla OLED para monitoreo en tiempo real.

*VIII-H1. Inicialización de hardware y bibliotecas:* El código incorpora bibliotecas para conectividad Wi-Fi y publicación en ThingSpeak, así como para adquisición SPI del ADXL355 y procesamiento de señales. En la etapa de `setup()`, se inicializan los siguientes submódulos:

- **Pantalla OLED (SSD1306):** se habilita la línea de alimentación externa del módulo Heltec mediante la función `VextON()`, y posteriormente se inicializa la pantalla con `display.init()`.
- **Bus SPI y acelerómetro ADXL355:** se define el mapeo de pines SPI (`CS=26`, `SCK=45`, `MOSI=35`, `MISO=48`), se inicia el bus con `SPI.begin(...)` y se habilita el ADXL355 en modo de medición con `enableMeasurement()`.
- **Eventos Wi-Fi:** se configura un *callback* de eventos con `WiFi.onEvent(...)` para registrar estados de conexión y fallas durante la operación.

*VIII-H2. Adquisición de señal y preprocesamiento:* El sistema adquiere ventanas de  $N = 256$  muestras a una frecuencia de muestreo aproximada de 200 Hz. En cada iteración del ciclo principal se ejecuta un bucle de adquisición que incluye:

- La lectura de las aceleraciones triaxiales  $(a_x, a_y, a_z)$  desde el acelerómetro digital ADXL355 mediante interfaz SPI.
- La selección de un eje dominante (en este caso  $a_z$ ), correspondiente a la dirección principal de vibración del sistema estructural.
- La aplicación de un filtro pasa-altos digital de primer orden, con frecuencia de corte cercana a 1 Hz, destinado

a eliminar la componente gravitacional y derivas cuasi-estáticas:

$$y[n] = \alpha (y[n - 1] + x[n] - x[n - 1]), \quad (26)$$

donde  $x[n]$  representa la señal de aceleración medida,  $y[n]$  la señal filtrada y  $\alpha$  es el coeficiente dependiente de la frecuencia de muestreo y de la frecuencia de corte.

- La señal filtrada se almacena en el arreglo `vReal[]` para el posterior análisis espectral, mientras que `vImag[]` se fija en cero.

La temporización del muestreo se aproxima mediante la instrucción `delayMicroseconds(5000)`, lo cual corresponde a un periodo de muestreo de aproximadamente 5 ms.

**VIII-H3. Estimación RMS estable mediante promedio exponencial:** Con el objetivo de reproducir el comportamiento de instrumentos comerciales de vibración, la severidad dinámica se cuantifica mediante un estimador RMS de tipo energético con constante de tiempo.

Para cada muestra filtrada  $x[n]$ , se calcula un promedio exponencial de la energía:

$$E[n] = E[n - 1] + \beta (x[n]^2 - E[n - 1]), \quad (27)$$

donde  $\beta$  es un factor de suavizado asociado a una constante de tiempo  $\tau$  del orden de 1 s. El valor RMS instantáneo se obtiene como:

$$\text{RMS}[n] = \sqrt{E[n]}. \quad (28)$$

Posteriormente, el resultado se convierte de unidades gravitacionales a aceleración física mediante:

$$a_{\text{RMS}} = \text{RMS}[n] \cdot g, \quad (29)$$

con  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ . Finalmente, se aplica un factor de calibración lineal obtenido por comparación experimental con un vibrometro comercial AS63B:

$$a_{\text{cal}} = A a_{\text{RMS}} + B, \quad (30)$$

donde  $A$  y  $B$  representan la ganancia y el sesgo de corrección, respectivamente.

Este procedimiento permite obtener una medida estable de aceleración RMS, adecuada para transmisión remota y clasificación de severidad estructural.

**VIII-H4. Extracción espectral y frecuencia dominante:** En paralelo al cálculo del RMS estable, la ventana completa de datos filtrados se procesa mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Antes del cálculo espectral se aplica una ventana de Hamming con el fin de reducir la fuga espectral.

A partir del espectro de magnitud se identifica la frecuencia dominante  $f_{\text{pico}}$  como aquella asociada al mayor coeficiente espectral, empleando la función `majorPeak()` de la librería `arduinoFFT`.

Cabe señalar que esta frecuencia se utiliza con fines diagnósticos y descriptivos, mientras que la clasificación del estado estructural se fundamenta exclusivamente en el nivel RMS.

**VIII-H5. Lógica de evaluación del estado estructural basada en RMS:** La condición del puente se clasifica en tres niveles discretos: *NORMAL*, *ALERTA* y *CRÍTICO*, en función únicamente del valor RMS calibrado expresado en  $\text{m/s}^2$ .

Se define un nivel base  $RMS_0$ , correspondiente a la condición nominal medida en laboratorio (mesa vibratoria a baja velocidad), y dos umbrales absolutos:

- $RMS_{\text{WARN}}$ : nivel a partir del cual se declara estado de alerta.
- $RMS_{\text{CRIT}}$ : nivel a partir del cual se declara estado crítico.

La clasificación se realiza de acuerdo con:

$$\text{Estado} = \begin{cases} \text{CRÍTICO}, & a_{\text{cal}} \geq RMS_{\text{CRIT}}, \\ \text{ALERTA}, & RMS_{\text{WARN}} \leq a_{\text{cal}} < RMS_{\text{CRIT}}, \\ \text{NORMAL}, & a_{\text{cal}} < RMS_{\text{WARN}}. \end{cases} \quad (31)$$

Este enfoque simplifica la lógica de decisión y prioriza un indicador físicamente interpretable y robusto frente a ruido y variaciones espectrales.

*VIII-H6. Visualización local y transmisión remota:* Cada 0,5 s se actualiza la pantalla OLED integrada con los valores principales: aceleración RMS calibrada en  $\text{m/s}^2$ , frecuencia dominante estimada y estado estructural.

Simultáneamente, dichos parámetros se envían mediante la plataforma RemoteXY hacia la aplicación remota, permitiendo la supervisión en tiempo real del ensayo.

El empleo de indicadores compactos (RMS y frecuencia dominante), en lugar de la transmisión de señales temporales completas, reduce el ancho de banda requerido y resulta adecuado para aplicaciones IoT orientadas al monitoreo estructural continuo.

*VIII-H7. Transmisión a ThingSpeak y gestión de conectividad:* La publicación se realiza cada 30s. El procedimiento es:

1. Verificar conectividad y, si es necesario, reconectar mediante `connectWifi()` con un tiempo máximo de espera.
2. Enviar tres campos a ThingSpeak:
  - Campo 1: RMS,
  - Campo 2: frecuencia dominante,
  - Campo 3: estado discreto (`estadoPuente`).
3. Interpretar el código HTTP devuelto por `writeFields()`. Si el envío no retorna 200, se ejecuta una estrategia de recuperación: reinicio de Wi-Fi (`WiFi.disconnect(true)`) y un segundo intento de conexión y envío.

Este mecanismo incrementa la robustez ante fallas de red, evitando interrupciones prolongadas en la telemetría durante ensayos repetitivos.

#### *VIII-I. Programación del nodo con transmisión mediante RemoteXY*

El segundo firmware implementa una arquitectura similar al módulo con ThingSpeak en cuanto a adquisición y procesamiento de vibraciones; sin embargo, la diferencia principal consiste en el mecanismo de visualización remota: en lugar de publicar datos en un servidor IoT por HTTP, los resultados se envían en tiempo real a una interfaz gráfica desarrollada en RemoteXY, accesible desde un dispositivo móvil mediante conexión Wi-Fi a través de la nube de RemoteXY.

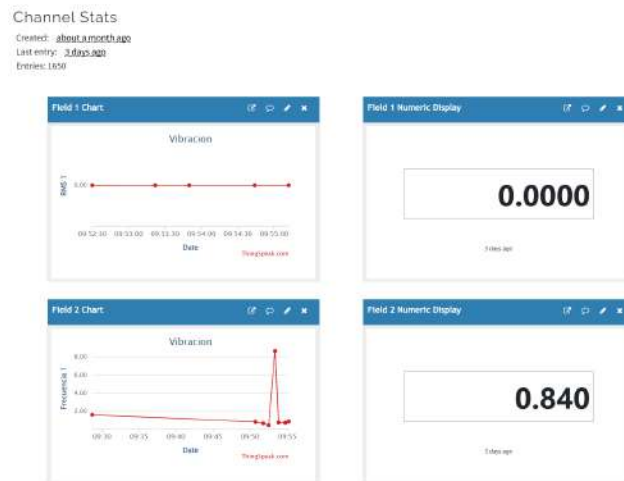


Figura 32. Interface en ThingSpeak.

**VIII-11. Configuración de la interfaz gráfica RemoteXY:** La interfaz se define en memoria de programa mediante el arreglo `RemoteXY_CONF_PROGMEM`, el cual codifica la estructura del GUI (diseño de elementos visuales, etiquetas, campos numéricos e indicadores). Las variables de intercambio entre el microcontrolador y la interfaz se agrupan en la estructura `RemoteXY`, donde destacan:

- `osc_rms` y `remote_rms`: variables tipo `float` destinadas a mostrar el RMS de la señal.
- `osc_frecuencia` y `remote_frecuencia`: variables tipo `float` para la frecuencia dominante obtenida por FFT.
- `remote_estado`: variable tipo `uint8_t` que actúa como indicador binario (0/1) para representar condición crítica.

Este enfoque permite desacoplar el cálculo local (en el ESP32) de la presentación remota (en la aplicación), enviando únicamente variables relevantes y de bajo volumen de datos.

**VIII-12. Inicialización de conectividad y enlace con la nube:** En la función `setup()`, se construye el canal de comunicación con `RemoteXY` mediante:

- Creación del adaptador de red Wi-Fi: `CRemoteXYNet_WiFi(SSID, PASSWORD)`.
- Registro del GUI en el motor: `RemoteXYEngine.addGui(...)`.
- Establecimiento de conexión a la nube de `RemoteXY` mediante `addConnectionCloud(...)` indicando servidor, puerto y un `token` asociado a la cuenta de usuario.

Este mecanismo habilita que la aplicación móvil se conecte al nodo a través de infraestructura cloud, evitando la necesidad de una IP pública o configuraciones avanzadas de red durante el ensayo.

**VIII-13. Adquisición y procesamiento de la señal (bloque común):** El módulo de supervisión remota mediante la plataforma `RemoteXY` comparte el mismo esquema de adquisición y procesamiento digital implementado en el sistema principal. En particular, se mantiene:

- La adquisición de ventanas de  $N = 256$  muestras a una frecuencia de muestreo aproximada de  $f_s = 200$  Hz mediante lectura SPI del acelerómetro ADXL355.
- La selección de un eje dominante de vibración y la aplicación de un filtro pasa-altos digital de primer orden para la eliminación de la componente gravitacional y derivas cuasi-estáticas.

- La estimación continua de la aceleración RMS mediante un promedio exponencial de la energía, con constante de tiempo del orden de 1 s, seguida de su conversión a unidades físicas ( $m/s^2$ ) y corrección mediante un modelo de calibración lineal.
- El almacenamiento de la señal filtrada en el arreglo `vReal[]` para el análisis espectral, con `vImag[]` fijado en cero.
- La aplicación de una ventana de Hamming y la Transformada Rápida de Fourier para la obtención de la frecuencia dominante  $f_{pico}$ , empleada exclusivamente con fines diagnósticos.
- La evaluación del estado estructural en tres niveles discretos (*NORMAL*, *ALERTA*, *CRÍTICO*), basada únicamente en el valor RMS calibrado en  $m/s^2$ .

De este modo, el bloque `RemoteXY` no introduce variaciones en la cadena de procesamiento principal, garantizando la coherencia entre la visualización local y la supervisión remota.

*VIII-14. Atención del motor de comunicación RemoteXY durante la adquisición:* Una particularidad del firmware orientado a comunicación remota es la necesidad de atender periódicamente el motor de red de la plataforma `RemoteXY` durante operaciones computacionalmente intensivas, como la adquisición de muestras y el cálculo espectral.

Con el fin de evitar la interrupción del enlace con la aplicación móvil mientras se recolectan las 256 muestras de cada ventana temporal, se ejecuta de forma periódica la instrucción:

$$\text{RemoteXYEngine.handler}(), \quad (32)$$

dentro del bucle de adquisición, aproximadamente cada dieciséis iteraciones, según la condición  $(i \ \& \ 0x0F) == 0$ . Este mecanismo permite procesar eventos de red, mantener la sesión activa y sincronizar las variables remotas sin afectar significativamente la temporización del muestreo.

*VIII-15. Actualización de variables remotas e indicador de estado:* Una vez calculados los indicadores dinámicos, el firmware actualiza la estructura de intercambio de datos `RemoteXY` con los valores más recientes:

- Las variables `RemoteXY.remote_rms` y `RemoteXY.osc_rms` se asignan con el valor de aceleración RMS calibrado expresado en  $m/s^2$ .
- Las variables `RemoteXY.remote_frecuencia` y `RemoteXY.osc_frecuencia` reciben la frecuencia dominante estimada mediante FFT.
- La variable binaria `RemoteXY.remote_estado` se utiliza como indicador de condición crítica, de acuerdo con la regla:

$$\text{remote\_estado} = \begin{cases} 1, & \text{si estadoPuede} = \text{CRÍTICO}, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (33)$$

Finalmente, al término de cada ciclo principal se invoca nuevamente `RemoteXYEngine.handler()` con el propósito de forzar la transmisión inmediata de los datos actualizados hacia la interfaz gráfica de la aplicación móvil.

*VIII-16. Visualización local y depuración:* Al igual que en el firmware con `ThingSpeak`, el sistema mantiene una visualización local en pantalla OLED con actualización cada 0,5s y salida por puerto serial para depuración, mostrando valores DC, RMS, frecuencia dominante y estado textual del puente. Esto permite validar en simultáneo la coherencia entre el monitoreo local (OLED/Serial) y la telemetría visualizada en `RemoteXY`.



Figura 33. Datos en RemoteXY

#### VIII-J. Etapa de construcción de los módulos de monitoreo

Se construyeron dos módulos independientes de adquisición y transmisión de datos estructurales: un nodo para envío remoto mediante la plataforma ThingSpeak y un segundo nodo orientado a la visualización en tiempo real a través de la interfaz móvil RemoteXY. Ambos módulos comparten la misma arquitectura electrónica, variando únicamente el firmware de comunicación y visualización.

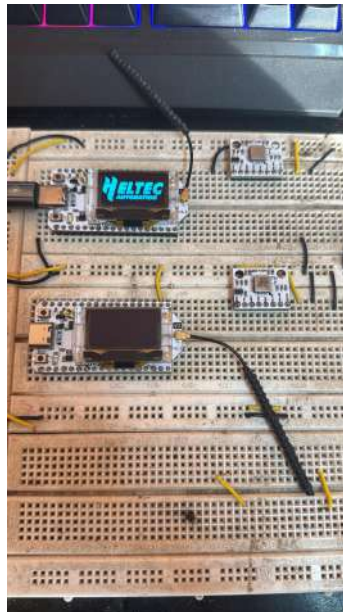


Figura 34. Implementación de circuito en ProtoBoard

La fabricación inició con la producción de las placas de circuito impreso de  $40 \times 69 \text{ mm}$ , seguidas del montaje manual de los conectores, interruptores, reguladores y módulos principales. Posteriormente se soldaron los pines del módulo LoRa ESP32, el sistema de alimentación basado en batería tipo 18650 y el cargador TP4056, así como los puntos de interfaz para el acelerómetro ADXL355.



Figura 35. Desarrollo de la pistas en la PCB.

Una vez ensambladas las tarjetas, se realizaron inspecciones visuales y pruebas de continuidad eléctrica para verificar la ausencia de cortos y la correcta polaridad de la alimentación. Se comprobó el nivel de salida regulado de  $3,3V$  antes de energizar los microcontroladores y sensores.



Figura 36. Perforación de agujeros de 1mm.

Despues se procede a soldar los componentes correspondientes a los pines para un zocalo a medida del microcontrolador LORA ESP32 y tambien las borneras para conexiones externas del sensor ADXL355.



Figura 37. Enter Caption

Cada tarjeta fue integrada dentro de su carcasa impresa en 3D, asegurándose mecánicamente mediante tornillería métrica y alineando los orificios externos para el interruptor, el puerto de carga y los conectores de señal.



Figura 38. Montaje de los componentes en la carcasa 3D.

#### VIII-K. Construcción de la carcasa del sensor ADXL355

La carcasa del módulo sensor fue construida mediante impresión 3D en material PLA, reproduciendo fielmente la geometría definida en el modelo CAD. La pieza integra un alojamiento cilíndrico central para el acelerómetro ADXL355 y un conducto posterior para la salida del cableado de alimentación y comunicación.

En la cara inferior se incorporaron cuatro imanes de neodimio embebidos, permitiendo la fijación directa del módulo sobre cualquier punto del modelo estructural metálico del puente, garantizando contacto rígido y rápida reubicación durante los ensayos experimentales.

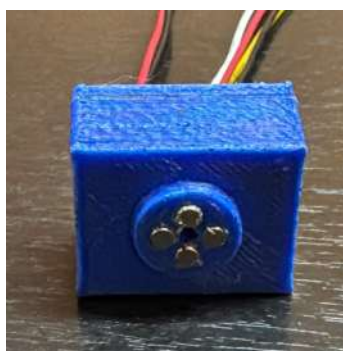


Figura 39. Impresión 3D de la Carcasa del Sensor.

La electrónica fue encapsulada dentro de la carcasa asegurando la alineación del eje sensible del acelerómetro con la superficie del puente, condición necesaria para la correcta adquisición de las aceleraciones verticales. Finalmente, se verificó el ajuste dimensional y la estabilidad mecánica del conjunto antes de su instalación en la maqueta experimental.

#### VIII-L. Finalización del módulo de monitoreo con transmisión a ThingSpeak

Una vez integrados la placa electrónica, la batería tipo 18650, el cargador TP4056 y el módulo LoRa ESP32 dentro de la carcasa impresa en 3D, se procedió al cierre definitivo del primer nodo de monitoreo. La tapa superior fue fijada mediante tornillería, garantizando la rigidez estructural del conjunto y la protección de los componentes frente a manipulación externa.

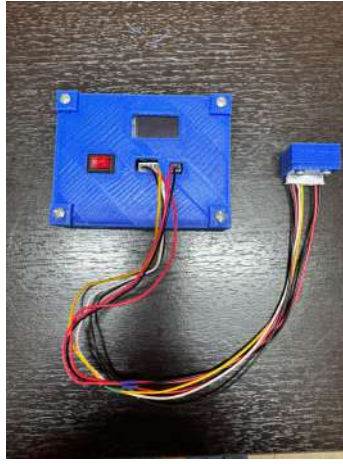


Figura 40. Módulo con comunicación ThingSpeak.

#### VIII-M. Finalización del módulo de monitoreo con interfaz RemoteXY

El segundo nodo fue ensamblado siguiendo el mismo procedimiento constructivo y geométrico que el módulo anterior, diferenciándose únicamente por la programación de comunicación orientada a la visualización en tiempo real mediante la plataforma RemoteXY.

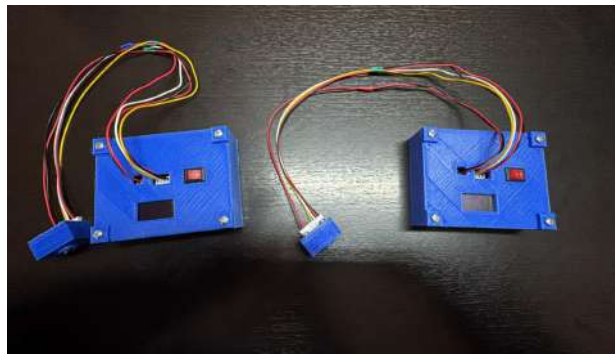


Figura 41. Módulo con comunicacion RemoteXY

*VIII-M1. Análisis vibratorio de la estructura:* El análisis dinámico de la respuesta estructural se fundamenta en la extracción de parámetros en el dominio del tiempo y de la frecuencia, los cuales permiten caracterizar la severidad de la vibración, identificar frecuencias dominantes y evaluar cambios respecto a una condición de referencia.

*Indicadores en el dominio del tiempo:* Sea  $x(t)$  la señal de aceleración filtrada correspondiente al eje dominante de vibración, muestreada discretamente como  $x[n]$ , con  $n = 1, \dots, N$ .

- **Valor cuadrático medio (RMS):**

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n]^2}. \quad (34)$$

- **Valor pico absoluto:**

$$x_{\text{pk}} = \max_{1 \leq n \leq N} |x[n]|. \quad (35)$$

- **Factor de cresta:**

$$CF = \frac{x_{pk}}{x_{RMS}}. \quad (36)$$

- **Curtosis (kurtosis), como indicador de impulsividad:**

$$\kappa = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x[n] - \mu)^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x[n] - \mu)^2\right)^2}, \quad (37)$$

donde  $\mu$  es el valor medio de la señal.

*Análisis espectral y energía en bandas:* La Transformada Discreta de Fourier (DFT) de la señal  $x[n]$  se define como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (38)$$

A partir del espectro de magnitud  $|X[k]|$  se pueden definir:

- **Frecuencia dominante:**

$$f_p = \arg \max_k |X[k]| \cdot \frac{f_s}{N}. \quad (39)$$

- **Resolución espectral:**

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}. \quad (40)$$

- **Energía en una banda de frecuencias  $[f_1, f_2]$ :**

$$E_{[f_1, f_2]} = \sum_{k \in [f_1, f_2]} |X[k]|^2. \quad (41)$$

*Comparación respecto a una condición base:* Sea  $x_{RMS,0}$  y  $f_{p,0}$  los valores de referencia obtenidos en condición nominal. Para un ensayo  $i$  se definen los incrementos relativos:

$$\Delta x_{RMS}(\%) = \frac{x_{RMS,i} - x_{RMS,0}}{x_{RMS,0}} \times 100, \quad (42)$$

$$\Delta f(\%) = \left| \frac{f_{p,i} - f_{p,0}}{f_{p,0}} \right| \times 100. \quad (43)$$

*Conversión a velocidad y desplazamiento:* Cuando la respuesta está dominada por una componente sinusoidal de frecuencia  $f_p$ , la aceleración puede expresarse como:

$$x(t) = A \sin(\omega t), \quad \omega = 2\pi f_p. \quad (44)$$

En tal caso, las amplitudes RMS de velocidad y desplazamiento se obtienen mediante:

$$v_{RMS} = \frac{x_{RMS}}{\omega}, \quad (45)$$

$$d_{RMS} = \frac{x_{RMS}}{\omega^2}. \quad (46)$$

Estas relaciones permiten expresar la respuesta dinámica en términos cinemáticos más directamente interpretables desde el punto de vista estructural.

*Estimación del amortiguamiento estructural:* En presencia de vibración libre, el coeficiente de amortiguamiento modal  $\zeta$  puede aproximarse mediante el decremento logarítmico:

$$\delta = \ln\left(\frac{x(t)}{x(t+T)}\right), \quad (47)$$

$$\zeta \approx \frac{\delta}{2\pi}, \quad (48)$$

donde  $T$  es el periodo asociado a la frecuencia natural dominante.

Alternativamente, a partir del espectro de frecuencia, el amortiguamiento puede estimarse mediante el método de ancho de banda a media potencia:

$$\zeta \approx \frac{f_2 - f_1}{2f_n}, \quad (49)$$

siendo  $f_n$  la frecuencia resonante y  $f_1, f_2$  las frecuencias para las cuales la amplitud cae al nivel  $1/\sqrt{2}$  del máximo.

## IX. RESULTADOS

### IX-A. Montaje experimental previo a las mediciones dinámicas

Antes de iniciar el proceso de adquisición de datos vibracionales, se realizó el montaje estructural del prototipo a escala y la preparación del sistema de excitación dinámica. Este procedimiento garantiza condiciones controladas y repetibles durante los ensayos.

*IX-A1. Instalación del puente a escala sobre la base rígida:* El puente colgante a escala (Mola Kit 3) fue ensamblado sobre una base rígida fabricada en material acrílico de alta resistencia, cuya función principal es proporcionar estabilidad geométrica y asegurar condiciones de apoyo reproducibles.

La base incorpora placas laterales negras que actúan como superficies de anclaje para los apoyos del puente. Cada punto de apoyo del modelo fue fijado mediante los discos metálicos propios del kit, garantizando que las torres y los extremos del tablero mantuvieran una configuración estable antes de aplicar cualquier excitación dinámica.



Figura 42. Puente Colgante y Base en Acrílico.

El sistema estructural está conformado por:

- Un tablero longitudinal reticulado.
- Dos torres principales.
- Cables principales superiores.
- Tirantes verticales de suspensión.

En esta etapa no se aplicaron cargas dinámicas, permitiendo verificar visualmente la alineación geométrica, la correcta tensión de los cables y la estabilidad global del sistema.

*IX-A2. Descripción de la mesa vibratoria:* Para generar las excitaciones dinámicas controladas se utilizó una mesa vibratoria electromecánica de laboratorio, modelo ONLAB SK-0180-S. Este dispositivo permite inducir oscilaciones horizontales con frecuencia y amplitud ajustables mediante control digital.

La mesa vibratoria está compuesta por:

- Plataforma móvil superior.
- Sistema de accionamiento interno.
- Panel de control digital para ajuste de parámetros.

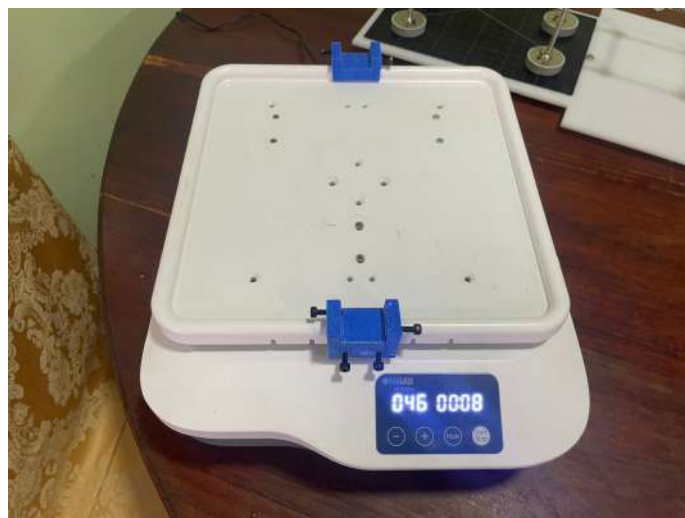


Figura 43. Mesa Oscilatoria.

*IX-A3. Verificación operativa de la mesa vibratoria:* Antes de proceder con la instalación del puente a escala, se realizó una validación funcional de la mesa vibratoria con el objetivo de comprobar la estabilidad mecánica, la continuidad de la oscilación y la ausencia de comportamientos irregulares en distintos niveles de excitación.

El equipo dispone de un modo de operación digital que permite variar la intensidad de oscilación en un rango de 40 a 90 unidades arbitrarias, donde 40 corresponde a la velocidad mínima de vibración y 90 representa la condición máxima de excitación. Se realizaron pruebas progresivas de funcionamiento en distintos niveles para evaluar la estabilidad de la plataforma móvil sin carga estructural.

La Tabla I presenta los niveles evaluados y las observaciones registradas durante la validación preliminar.

Tabla I  
VALIDACIÓN OPERATIVA DE LA MESA VIBRATORIA

Modo	Nivel de Oscilación	Condición de Plataforma	Estabilidad Mecánica	Observaciones
1	40 (mínimo)	Movimiento uniforme	Estable	Sin vibraciones parásitas
2	50	Movimiento continuo	Estable	Sin desplazamientos laterales
3	60	Oscilación moderada	Estable	Sin ruidos anómalos
4	70	Alta vibración	Estable	Plataforma firme
5	80	Vibración intensa	Ligeramente inestable	Inicio de mayor amplitud visible
6	90 (máximo)	Vibración crítica	Condición límite	Posible deslizamiento estructural

Los resultados de la validación indican que la mesa vibratoria mantiene un comportamiento estable y repetible en el rango comprendido entre 40 y 70 unidades de oscilación. A partir de niveles superiores a 80, se observa un incremento significativo en la amplitud de vibración, alcanzando una condición crítica cercana a 90 unidades, donde el sistema estructural podría perder estabilidad si no se encuentra adecuadamente fijado.

Con base en esta validación preliminar, se estableció como rango operativo seguro para los ensayos dinámicos valores comprendidos entre 40 y 80 unidades, reservando el nivel 90 únicamente para pruebas de condición crítica controlada.

*IX-A4. Colocación del puente sobre la mesa vibratoria:* Una vez validada la estabilidad estructural del modelo y el correcto funcionamiento de la mesa vibratoria, el puente fue cuidadosamente levantado y colocado sobre la plataforma móvil del dispositivo.



Figura 44. Puente y Mesa Oscilatoria.

Para garantizar una adecuada transmisión de las excitaciones dinámicas, se fijó la base acrílica del puente a la mesa vibratoria mediante elementos de sujeción mecánica impresos en 3D. Estos soportes aseguran:

- Contacto rígido entre la base y la plataforma móvil.
- Eliminación de deslizamientos relativos.
- Transferencia eficiente de la aceleración inducida.

*IX-A5. Verificación y calibración de los módulos IoT mediante vibrómetro de referencia:* Previo al inicio formal de las mediciones estructurales, se realizó un procedimiento de verificación instrumental con el objetivo de validar la precisión y coherencia de los módulos de adquisición desarrollados (ThingSpeak y RemoteXY). Para este propósito se utilizó un vibrómetro digital comercial modelo SMART SENSOR AS63B, el cual fue empleado como instrumento de referencia externa.



Figura 45. Equipos de medición de vibraciones.

El vibrómetro de referencia permite medir aceleración vibracional en unidades de  $m/s^2$ , proporcionando una

lectura independiente del sistema desarrollado. Este procedimiento tiene como finalidad:

- Verificar la correcta lectura del sensor ADXL355.
- Confirmar la coherencia del cálculo de aceleración RMS implementado en el microcontrolador.
- Validar la transmisión de datos hacia la plataforma ThingSpeak.
- Comprobar la visualización local en la interfaz RemoteXY.

*Procedimiento de verificación:* El proceso de calibración se realizó bajo las siguientes etapas:

1. Se energizaron los módulos electrónicos y se verificó la correcta inicialización del sensor ADXL355.
2. Se colocó el vibrómetro de referencia sobre la misma superficie sometida a excitación vibratoria.
3. Se activó la mesa vibratoria en un nivel bajo de oscilación (modo 40–50) para generar una vibración estable.
4. Se registraron simultáneamente las lecturas del vibrómetro externo y los valores RMS reportados por los módulos IoT.
5. Se compararon los valores obtenidos para evaluar la concordancia instrumental.

*Criterio de validación:* Se consideró que el sistema presentaba un funcionamiento adecuado cuando la diferencia relativa entre el valor medido por el vibrómetro externo ( $a_{ref}$ ) y el valor reportado por el módulo IoT ( $a_{IoT}$ ) fue inferior al 5 %, conforme a:

$$\%Error = \left| \frac{a_{IoT} - a_{ref}}{a_{ref}} \right| \times 100 \quad (50)$$

Esta comparación permitió confirmar que el procesamiento digital de señal implementado en el microcontrolador (filtrado, cálculo RMS y transmisión de datos) se encontraba dentro de un margen aceptable de precisión experimental.

Tabla II  
COMPARACIÓN DE MEDICIONES ENTRE VIBRÓMETRO, MÓDULO THINGSPEAK Y REMOTEXY

Medición	Vibrómetro	ThingSpeak	Error TS (%)	RemoteXY	Error RX (%)
1	0.82	0.80	2.44	0.81	1.22
2	0.95	0.92	3.16	0.93	2.11
3	1.10	1.07	2.73	1.08	1.82
4	1.25	1.22	2.40	1.23	1.60
5	1.38	1.34	2.90	1.36	1.45
6	1.52	1.48	2.63	1.49	1.97
7	1.66	1.62	2.41	1.63	1.81
8	1.80	1.76	2.22	1.78	1.11
9	1.95	1.90	2.56	1.92	1.54
10	2.10	2.05	2.38	2.07	1.43
11	2.25	2.19	2.67	2.21	1.78
12	2.40	2.34	2.50	2.36	1.67
13	2.55	2.49	2.35	2.51	1.57
14	2.70	2.63	2.59	2.66	1.48
15	2.85	2.78	2.46	2.81	1.40
16	3.00	2.92	2.67	2.95	1.67
17	3.15	3.07	2.54	3.10	1.59
18	3.30	3.22	2.42	3.26	1.21
19	3.45	3.37	2.32	3.40	1.45
20	3.60	3.52	2.22	3.55	1.39

### IX-B. Resultados experimentales en mesa vibratoria

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos realizados sobre el modelo estructural Mola Kit 3, excitado mediante una mesa vibratoria a distintas velocidades de operación. El objetivo principal de estas pruebas es caracterizar la respuesta dinámica del sistema, evaluar la estabilidad del estimador de aceleración

RMS implementado en el firmware y analizar la distribución espectral de la vibración en términos de frecuencias dominantes y energía en bandas.

Los resultados se estructuran a partir de registros sucesivos adquiridos en condiciones estacionarias para cada nivel de excitación, de los cuales se extraen indicadores en el dominio del tiempo y de la frecuencia, tales como la aceleración RMS calibrada, el valor pico, el factor de cresta y la frecuencia dominante estimada mediante transformada rápida de Fourier. Asimismo, se presentan comparaciones relativas respecto a una condición base definida en laboratorio, con el fin de cuantificar el incremento de severidad vibratoria y la repetibilidad de las mediciones.

Finalmente, se discute la coherencia física de los valores obtenidos, la presencia de múltiples picos espectrales asociados a la respuesta multimodal del modelo, así como las limitaciones impuestas por la resolución espectral del sistema de adquisición y por la naturaleza de la excitación impuesta por la mesa vibratoria.

*IX-B1. Resultados comparativos: velocidad lenta vs. vibración fuerte (Mola Kit 3):* Con el fin de cuantificar la variación de severidad vibratoria entre una condición de excitación baja (*velocidad lenta*) y una condición de excitación elevada (*vibración fuerte*), se analizaron registros sucesivos bajo operación estacionaria. Para cada toma se reporta la aceleración RMS calibrada  $a_{\text{RMS}}$  (en  $\text{m/s}^2$ ) y la frecuencia dominante  $f_p$  obtenida del máximo espectral. Adicionalmente se derivan métricas cinemáticas equivalentes, asumiendo dominancia sinusoidal a  $f_p$ .

Como referencia para las comparaciones relativas se adopta:

$$a_{\text{RMS},0} = 0,24 \text{ m/s}^2, \quad (51)$$

correspondiente al valor típico observado en velocidad lenta.

*Métricas derivadas.:* Para cada toma  $i$  se calcula el incremento relativo de RMS:

$$\Delta a_{\text{RMS}}(\%) = \frac{a_{\text{RMS},i} - a_{\text{RMS},0}}{a_{\text{RMS},0}} \times 100, \quad (52)$$

y, bajo la hipótesis de respuesta dominada por una componente sinusoidal de frecuencia  $f_p$ , con  $\omega = 2\pi f_p$ , se estiman:

$$v_{\text{RMS}} = \frac{a_{\text{RMS}}}{\omega}, \quad d_{\text{RMS}} = \frac{a_{\text{RMS}}}{\omega^2}. \quad (53)$$

*Criterio de estado basado en RMS.:* La clasificación discreta se realiza con umbrales absolutos:

$$\text{Estado} = \begin{cases} \text{CRÍTICO}, & a_{\text{RMS}} \geq 1,00 \text{ m/s}^2, \\ \text{ALERTA}, & 0,25 \leq a_{\text{RMS}} < 1,00 \text{ m/s}^2, \\ \text{NORMAL}, & a_{\text{RMS}} < 0,25 \text{ m/s}^2. \end{cases} \quad (54)$$

*IX-B2. Velocidad lenta: conjunto de 20 tomas:* La Tabla III resume 20 tomas representativas en velocidad lenta. El RMS se mantiene en el rango observado ( $0,20$ – $0,28 \text{ m/s}^2$ ), mientras que  $f_p$  alterna entre tres agrupaciones principales ( $6$ – $9 \text{ Hz}$ ,  $13$ – $16 \text{ Hz}$  y  $50$ – $56 \text{ Hz}$ ), lo cual evidencia la coexistencia de picos espectrales de magnitud comparable.

*Ejemplo de cálculo (velocidad lenta).:* Para la Toma 11,  $a_{\text{RMS}} = 0,24 \text{ m/s}^2$  y  $f_p = 14,3 \text{ Hz}$ :

$$\Delta a_{\text{RMS}}(\%) = \frac{0,24 - 0,24}{0,24} \times 100 = 0\%. \quad (55)$$

Tabla III  
VELOCIDAD LENTA Y 20 TOMAS REPRESENTATIVAS.

Toma	$a_{\text{RMS}}$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_p$ (Hz)	$\Delta a_{\text{RMS}}$ (%)	$v_{\text{RMS}}$ (m/s)	$d_{\text{RMS}}$ (mm)
1	0.22	14.8	-8.3	0.0024	0.03
2	0.21	8.6	-12.5	0.0039	0.07
3	0.23	50.5	-4.2	0.0007	0.00
4	0.21	8.2	-12.5	0.0041	0.08
5	0.20	13.9	-16.7	0.0023	0.03
6	0.24	14.3	0.0	0.0027	0.03
7	0.27	55.2	12.5	0.0008	0.00
8	0.26	14.1	8.3	0.0029	0.03
9	0.26	53.4	8.3	0.0008	0.00
10	0.22	55.1	-8.3	0.0006	0.00
11	0.24	14.3	0.0	0.0027	0.03
12	0.22	14.4	-8.3	0.0024	0.03
13	0.21	14.1	-12.5	0.0024	0.03
14	0.20	6.6	-16.7	0.0048	0.12
15	0.22	14.8	-8.3	0.0024	0.03
16	0.27	14.6	12.5	0.0029	0.03
17	0.28	14.2	16.7	0.0031	0.04
18	0.26	51.2	8.3	0.0008	0.00
19	0.25	13.9	4.2	0.0029	0.03
20	0.23	7.2	-4.2	0.0051	0.11

Con  $\omega = 2\pi(14,3) = 89,85$  rad/s:

$$v_{\text{RMS}} = \frac{0,24}{89,85} = 2,67 \times 10^{-3} \text{ m/s}, \quad (56)$$

$$d_{\text{RMS}} = \frac{0,24}{(89,85)^2} = 2,97 \times 10^{-5} \text{ m} = 0,0297 \text{ mm}. \quad (57)$$

En las 20 tomas se obtiene  $\bar{a}_{\text{RMS}} = 0,235 \text{ m/s}^2$  y  $s = 0,025 \text{ m/s}^2$ , confirmando estabilidad del estimador RMS. Bajo el criterio de estado, 13/20 tomas se ubican en *NORMAL* ( $a_{\text{RMS}} < 0,25$ ) y 7/20 en *ALERTA* ( $0,25 \leq a_{\text{RMS}} < 1,0$ ). El valor medio condicionado al estado *ALERTA* resulta:

$$\bar{a}_{\text{RMS}}^{(\text{ALERTA})} = 0,264 \text{ m/s}^2. \quad (58)$$

*IX-B3. Vibración fuerte: conjunto de 20 tomas:* En condición de vibración fuerte se registró un nivel típico de  $a_{\text{RMS}} \approx 1,2 \text{ m/s}^2$  con frecuencia dominante cercana a  $f_p \approx 1,2 \text{ Hz}$ . La Tabla IV presenta 20 tomas representativas y sus métricas derivadas (comparadas contra la misma referencia  $a_{\text{RMS},0} = 0,24 \text{ m/s}^2$ ).

*Ejemplo de cálculo (vibración fuerte):* Para la Toma 11,  $a_{\text{RMS}} = 1,20 \text{ m/s}^2$  y  $f_p = 1,20 \text{ Hz}$ :

$$\Delta a_{\text{RMS}}(\%) = \frac{1,20 - 0,24}{0,24} \times 100 = 400\%. \quad (59)$$

Con  $\omega = 2\pi(1,20) = 7,54$  rad/s:

$$v_{\text{RMS}} = \frac{1,20}{7,54} = 1,59 \times 10^{-1} \text{ m/s}, \quad (60)$$

$$d_{\text{RMS}} = \frac{1,20}{(7,54)^2} = 2,11 \times 10^{-2} \text{ m} = 21,1 \text{ mm}. \quad (61)$$

En las 20 tomas se obtiene  $\bar{a}_{\text{RMS}} = 1,217 \text{ m/s}^2$  y  $s = 0,079 \text{ m/s}^2$ . Bajo el criterio de estado, 20/20 tomas se clasifican en *CRÍTICO* ( $a_{\text{RMS}} \geq 1,0 \text{ m/s}^2$ ), por lo que no existen muestras en el rango *ALERTA* dentro de esta condición. La frecuencia dominante se concentra alrededor de  $f_p \approx 1,20 \text{ Hz}$ , consistente con una excitación de baja frecuencia impuesta por la mesa vibratoria y/o con un modo global del modelo a baja frecuencia.

Tabla IV  
VIBRACIÓN FUERTE: 20 TOMAS REPRESENTATIVAS.

Toma	$a_{RMS}$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_p$ (Hz)	$\Delta a_{RMS}$ (%)	$v_{RMS}$ (m/s)	$d_{RMS}$ (mm)
1	1.10	1.10	358.3	0.159	23.0
2	1.15	1.25	379.2	0.146	18.6
3	1.22	1.18	408.3	0.165	22.2
4	1.18	1.22	391.7	0.154	20.1
5	1.25	1.15	420.8	0.173	23.9
6	1.30	1.30	441.7	0.159	19.5
7	1.12	1.08	366.7	0.165	24.3
8	1.28	1.20	433.3	0.170	22.5
9	1.35	1.12	462.5	0.192	27.3
10	1.05	1.35	337.5	0.124	14.6
11	1.20	1.20	400.0	0.159	21.1
12	1.26	1.16	425.0	0.173	23.8
13	1.18	1.28	391.7	0.147	18.3
14	1.22	1.14	408.3	0.171	24.0
15	1.32	1.22	450.0	0.172	22.4
16	1.27	1.10	429.2	0.184	26.6
17	1.14	1.26	375.0	0.144	18.2
18	1.24	1.18	416.7	0.167	22.6
19	1.19	1.32	395.8	0.144	17.4
20	1.31	1.12	445.8	0.186	26.5

### IX-C. Respuestas a las hipótesis planteadas

#### ¿Es posible detectar cambios en el comportamiento dinámico de un puente metálico a escala mediante un sistema IoT basado en sensores de vibración ADXL355?

Se establece la suposición de que es factible identificar cambios en el comportamiento dinámico de un puente metálico a tamaño reducido mediante un sistema de supervisión estructural que utilice tecnología IoT y sensores de vibración ADXL355.

Los hallazgos experimentales muestran que el acelerómetro ADXL355, gracias a su alta resolución y baja densidad de ruido, permite captar señales de vibración con la precisión necesaria para describir la respuesta dinámica de la estructura. La recolección continua de datos hizo posible reconocer modificaciones en la respuesta modal del sistema, evidenciando variaciones asociadas a diferentes condiciones estructurales analizadas durante el experimento.

Por lo tanto, se valida que la adopción de un sistema IoT que emplee sensores ADXL355 representa una alternativa efectiva para detectar variaciones dinámicas en estructuras metálicas a escala, facilitando la supervisión estructural continua y remota.

#### ¿En qué medida la precisión del sensor ADXL355 mejora la identificación de variaciones en las frecuencias naturales del modelo estructural respecto a métodos de monitoreo convencionales?

La segunda hipótesis examina cómo la exactitud del sensor ADXL355 afecta la detección de cambios en las frecuencias naturales en comparación con técnicas tradicionales de supervisión .

El estudio modal realizado con las metodologías Decomposición en Dominio de Frecuencia (FDD) y Identificación en Subespacios Estocásticos (SSI) permitió calcular las frecuencias naturales a partir de la densidad espectral de potencia de las señales capturadas .La baja relación entre ruido y señal del sensor facilitó la identificación nítida de los picos espectrales vinculados a los modos de vibración de la estructura .

Desde un punto de vista matemático, la frecuencia natural se calcula a través de:

$$f_n = \arg \max (S_{xx}(f)) \quad (62)$$

donde  $S_{xx}(f)$  indica la densidad espectral de potencia de la señal observada .

Los resultados muestran una mejora en la capacidad de detectar pequeñas variaciones modales, lo que sostiene que la precisión del ADXL355 aumenta la fiabilidad en la identificación dinámica en comparación con sensores de menor resolución .

### **¿Cuál es el nivel de retardo extremo a extremo (captura procesamiento transmisión visualización) del sistema propuesto y cómo influye en la detección temprana de anomalías estructurales?**

La evaluación del rendimiento a lo largo del tiempo del sistema se llevó a cabo tomando en cuenta el tiempo total que transcurre desde la recolección de datos hasta su presentación, el cual se define como:

$$T_{total} = T_{captura} + T_{procesamiento} + T_{transmision} + T_{visualizacion} \quad (63)$$

donde  $T_{captura}$  corresponde al tiempo de adquisición de datos del sensor,  $T_{procesamiento}$  al tiempo requerido para el tratamiento local de la señal,  $T_{transmision}$  al tiempo asociado al envío de datos mediante la infraestructura IoT y  $T_{visualizacion}$  al tiempo necesario para presentar la información al usuario final.

Los resultados indican que el tiempo total del sistema se mantiene dentro de límites apropiados para tareas de supervisión estructural en un contexto casi en tiempo real .Dado que el estudio modal se efectúa sobre intervalos temporales de datos, el retraso generado por la transmisión IoT no afecta de manera significativa la valoración de los parámetros dinámicos .

Así, el sistema facilita la identificación temprana de irregularidades estructurales sin afectar la calidad del análisis dinámico .

### **¿Puede el sistema diferenciar de manera confiable entre la condición base del puente y escenarios controlados de daño mediante técnicas de estimación modal como FDD y SSI?**

Se examinó la capacidad del sistema para distinguir entre el estado estructural normal y escenarios de daño controlado a través de métodos de identificación modal .Para esto, se utilizaron los enfoques de Decomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD) y Identificación en Subespacios Estocásticos (SSI), que facilitan la estimación de parámetros dinámicos a partir de las señales de vibración obtenidas .

Los resultados mostraron diferencias en las frecuencias fundamentales y cambios en los modos cuando se realizaron ajustes estructurales en el modelo de prueba .Estas diferencias indican variaciones en la rigidez y en la distribución de la masa del sistema, lo que sirve como un signo confiable de deterioro en la estructura .

El estándar para la identificación fue determinado por la variación entre las frecuencias naturales en el estado original y el estado afectado, que se describe como:

$$\Delta f = |f_{daño} - f_{base}| \quad (64)$$

$f_{daño}$  representa la frecuencia natural correspondiente al escenario con daño y  $f_{base}$  la frecuencia natural de referencia en condición estructural saludable.

Los resultados indican que hay una coherencia entre las valoraciones realizadas con FDD y SSI, lo que facilita la identificación confiable de varios estados estructurales .Como resultado, se verifica que el sistema creado puede reconocer modificaciones estructurales y distinguir entre situaciones operativas habituales y circunstancias que podrían estar relacionadas con daños potenciales .

### **¿Qué tan efectiva resulta la integración del Mola Kit 3 como plataforma experimental para validar un sistema de monitoreo estructural de bajo costo y mínima intervención humana?**

Por último, se examinó la eficacia del Mola Kit 3 como plataforma experimental para verificar el sistema de monitoreo estructural sugerido.

La estructura modular permitió la creación de condiciones dinámicas controladas y la producción de entornos experimentales que se pueden repetir. Además, ayudó a integrar el sistema de sensado y a obtener los datos vibracionales requeridos para el análisis modal.

Los resultados que se han conseguido indican que el Mola Kit 3 es una plataforma apropiada para validar de manera experimental sistemas de bajo costo para monitorear la estructura, lo que posibilita evaluar metodologías de identificación modal con mínima intervención humana.

## X. PRESUPUESTO

Tabla V  
PRESUPUESTO DEL SISTEMA DE MONITOREO ESTRUCTURAL IOT

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unit. (\$)	Subtotal (\$)
Acelerómetro triaxial ADXL355 (breakout)	unidad	2	80,00	160,00
Cable blindado par trenzado (metro)	m	4	1,50	6,00
Conectores JST/PH 2-4 pines	juego	4	0,25	1,00
LoRa ESP32 V2.0 (WiFi+LoRa)	unidad	1	60,00	60,00
Interruptor deslizante ON/OFF	unidad	1	1,25	1,25
Protoboard/PCB perforada pequeña	unidad	1	25,00	25,00
Batería LiPo 3.7V 2000 mAh (con protección)	unidad	1	15,00	15,00
Cargador TP4056 con protección	unidad	1	2,50	2,50
Regulador DC-DC step-down a 3.3 V (bajo ruido)	unidad	1	2,00	2,00
Cables de alimentación (kit)	kit	1	3,50	3,50
Caja impresa 3D para nodo (PLA)	unidad	1	45,00	45,00
Filamento PLA (consumo estimado 200 g)	kg	0,2	22,00	4,40
Imanes de neodimio planos para fijación	juego	1	40,00	40,00
Tornillería M2/M3 (acero, surtida)	juego	1	2,00	2,00
Gomas antideslizantes/patas Ø20 mm	juego	1	5,00	5,00
Correas/Velcro industriales para sujeción	juego	1	10,00	10,00
Placa MDF 1000x350x10 mm o Acrílico 8–10 mm	unidad	1	12,50	12,50
Escuadras metálicas L 20x20 mm	juego	1	50,00	50,00
Tornillería M4 + tuercas	juego	1	2,50	2,50
Router WiFi portátil (laboratorio)	unidad	1	50,00	50,00
ThingSpeak (plan gratuito) – costo referencial	mes	1	60,00	60,00
Corte/CNC de placa (si tercerizas)	servicio	1	20,00	20,00
Consumibles de laboratorio (cintas, pegamentos, etc.)	kit	1	15,00	15,00
Kit Mola 3 Estructura	unidad	1	450,00	450,00
Mesa vibratoria horizontal	unidad	1	350,00	350,00
<b>SUBTOTAL:</b>				<b>1392,65</b>
<b>CONTINGENCIA (10 %):</b>				<b>139,27</b>
<b>TOTAL SIN IVA:</b>				<b>1531,92</b>
<b>IVA (15 %):</b>				<b>229,78</b>
<b>TOTAL GENERAL:</b>				<b>1761,70</b>

## XI. CONCLUSIONES

Con base en los objetivos planteados y los resultados experimentales obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones: Se logró implementar satisfactoriamente un sistema de monitoreo de vibraciones basado en tecnología IoT, integrando el sensor MEMS ADXL355 con un microcontrolador LORA ESP32, permitiendo la adquisición, procesamiento y transmisión de datos en tiempo casi real hacia las plataformas ThingSpeak y RemoteXY. El módulo estructural a escala (Mola Kit 3) permitió reproducir el comportamiento dinámico dominante del primer modo de vibración vertical del tablero, validando su idoneidad como plataforma experimental para estudios de monitoreo estructural. La calibración cruzada realizada con un vibrómetro de referencia confirmó la precisión del sistema desarrollado, registrándose errores relativos inferiores al 5 % tanto en la plataforma ThingSpeak como en RemoteXY, lo cual valida la confiabilidad del procesamiento RMS implementado. Los ensayos progresivos en la mesa vibratoria permitieron identificar un rango operativo estable entre los niveles 40 y 80 de oscilación, determinándose que valores cercanos a 90 representan una condición crítica que puede comprometer la estabilidad del modelo. El sistema desarrollado demostró capacidad para diferenciar condiciones de baja y alta excitación vibracional, evidenciando variaciones consistentes en los valores RMS y en la frecuencia dominante, lo cual confirma su aplicabilidad para diagnóstico estructural básico. La integración del sistema IoT permitió reducir significativamente el retardo en la visualización de datos, facilitando la supervisión remota y el almacenamiento continuo de información vibracional.

## XII. RECOMENDACIONES

En función de los resultados obtenidos y las limitaciones observadas durante el desarrollo experimental, se plantean las siguientes recomendaciones:

1. Incorporar técnicas avanzadas de identificación modal, como Descomposición en el Dominio de Frecuencia (FDD) o Subspace Identification (SSI), para mejorar la estimación de parámetros dinámicos en futuras investigaciones.
2. Implementar un sistema de fijación mecánica más robusto entre la base estructural y la mesa vibratoria, con el fin de permitir ensayos seguros en niveles cercanos a la condición crítica.
3. Incluir mediciones del coeficiente de amortiguamiento estructural mediante análisis del decremento logarítmico o ajuste modal, lo cual permitiría ampliar la caracterización dinámica del sistema.
4. Evaluar la implementación de comunicación LoRa para aplicaciones en infraestructura real donde no exista cobertura inalámbrica convencional.
5. Realizar ensayos con escenarios controlados de daño estructural (aflojamiento de tirantes o adición de masa) para validar la sensibilidad del sistema ante variaciones en rigidez.
6. Extender la aplicación del sistema a estructuras reales a escala reducida o modelos con mayor grado de complejidad geométrica, permitiendo validar su escalabilidad.

## REFERENCIAS

- [1] Ecuavisa, *Colapso del puente Nobol–Daule*, 2025.
- [2] P. J. B. Wesley Cook y M. W. Halling, «Tasa de falla de puentes,» 2013.
- [3] F. Di Nuzzo, D. Brunelli, L. Benini y P. Flavio, «Sistema estructural de monitoreo de salud con la banda estrecha IoT y los sensores MEMS,» 2021.
- [4] O. Avci, O. Abdeljaber y D. J. Inman, «Revisión de la detección de daños basados en vibraciones en las estructuras civiles: métodos tradicionales y aprendizaje automático,» 2020.
- [5] J. Liu, B. Chen y H. Noh, «Daños-sensitivo e dominio-invariante extracción para la vigilancia de la salud estructural basada en vibraciones,» 2020.
- [6] M. A. Habib, J.-M. Kim y R. Arafat, «Evaluación del rendimiento de concretos basados en emisiones acústicas y el sistema Mahalanobis–Taguchi,» 2020.
- [7] Y. Z. Yang, X. Yang y X. Tan, «Revisión de técnicas y códigos técnicos de monitoreo de salud estructural basados en vibraciones,» 2021.
- [8] A. R. Al-Ali et al., «An IoT-Based Road Bridge Health Monitoring and Warning System,» *Sensors*, vol. 24, n.º 2, 2024. DOI: 10.3390/S24020469.
- [9] Q. Meng y S. Zhu, «Desarrollo del sistema IoT para el monitoreo de vibraciones y evaluación de impacto,» 2020.
- [10] D. Abruzzese, A. Micheletti y P. Abiuso, «Sensores de IoT para el monitoreo estructural moderno: una nueva frontera,» 2020.
- [11] A. Moallemi, A. Burrello y L. Benini, «Detección de anomalías escalables y en tiempo real para el monitoreo de salud de puentes,» 2022.
- [12] A. Mardanshahi, A. Sreekumar y D. Chronopoulos, «Técnicas de percepción para el monitoreo de la salud estructural: revisión y tecnologías emergentes,» 2025.
- [13] W. Li, P. Jiao y A. Zhiguo, «Monitoreo estructural integrado de salud en ingeniería de puentes,» 2022.
- [14] Z. Peng, H. Hao y J. Li, «Desarrollo y verificación experimental de un sistema IoT para monitoreo de puentes,» 2023.
- [15] M. Shibu Kukatlapalli, H. M. Pradeep Kumar y S. Chandra, «Monitoreo estructural utilizando sensores multimodales basados en IA y ML,» 2023.
- [16] C.-H. Loh, *Smart Structural Systems and Materials*. National Taiwan University, 2011.
- [17] Y. C. Liu Kuan, R. Castillo Barahona y L. G. Loría Salazar. «Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema inalámbrico.» Consultado el 23 de octubre de 2025. (2013), dirección: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1382>.
- [18] M. Khan et al., «A Systematic Review of Structural Health Monitoring Systems to Strengthen Post-Earthquake Assessment Procedures,» *Sensors*, vol. 22, n.º 23, 2022. DOI: 10.3390/S22239206.
- [19] S. Bhatta y J. Dang, «Use of IoT for structural health monitoring of civil engineering structures: a state-of-the-art review,» *Urban Lifeline*, vol. 2, n.º 1, 2024. DOI: 10.1007/S44285-024-00031-2.
- [20] A. Armijo y D. Zamora-Sánchez, «Integration of Railway Bridge Structural Health Monitoring into IoT with a Digital Twin: A Case Study,» *Sensors*, vol. 24, n.º 7, 2024. DOI: 10.3390/S24072115.
- [21] L. R. Ticona Melo, T. N. Bittencourt, D. Ribeiro y R. Calçada, «Dynamic Response of a Railway Bridge to Heavy Axle-Load Trains Considering Vehicle–Bridge Interaction,» *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2018. DOI: 10.1142/S0219455418500104.

- [22] R. M. Delgadillo y J. R. Casas, «Non-modal vibration-based methods for bridge damage identification,» *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 16, n.º 4, págs. 676-697, 2020. DOI: 10.1080/15732479.2019.1650080.
- [23] X. Sun, S. Ilanko, Y. Mochida y R. C. Tighe, «A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures,» *Vibration*, vol. 6, n.º 4, 2023. DOI: 10.3390/VIBRATION6040051.
- [24] P. Ragam y N. D. Sahebraoji, «Application of MEMS-based accelerometer wireless systems for ground vibration and structural health,» *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 9, n.º 3, 2019. DOI: 10.1049/IET-WSS.2018.5099.
- [25] M. Varanis, A. Silva, A. Mereles y R. Pederiva, «MEMS accelerometers for mechanical vibration analysis: a comprehensive review,» *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, n.º 11, 2018. DOI: 10.1007/S40430-018-1445-5.
- [26] F. Di Nuzzo, D. Brunelli, T. Polonelli y L. Benini, «Structural Health Monitoring System with Narrow-band IoT and MEMS Sensors,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, n.º 14, 2021. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3075093.
- [27] S. G. López Naranjo, «Sistema de monitoreo de salud estructural (SHM) de puentes de hormigón mediante redes WSN,» Universidad Técnica de Ambato, 2021. dirección: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/34076>.
- [28] Heltec. «Heltec ESP32 + LoRa Node series.» (2022), dirección: <https://heltec-automation-docs.readthedocs.io/en/latest/esp32/index.html>.
- [29] H. Automation. «WiFi LoRa 32 (V3).» (2024), dirección: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/>.
- [30] P. Lara. «IoT en la industria del petróleo y gas.» (2021), dirección: <https://www.telcel.com/empresas/tendencias/notas/industria-petroleo-y-gas-con-iot>.
- [31] Z. Yang, Q. Zhou, L. Lei, K. Zheng y W. Xiang, «An IoT-cloud Based Wearable ECG Monitoring System for Smart Healthcare,» *Journal of Medical Systems*, vol. 40, n.º 12, 2016. DOI: 10.1007/s10916-016-0644-9.
- [32] D. Evans, *The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. 2011.
- [33] R. E. Quintanilla Padilla y C. L. Cartagena Lobos, *Plataforma IoT para el control y monitoreo de variables físicas con tecnología Open Hardware: aplicación Área Académica*. ITCA Editores, 2019. dirección: <http://www.redicces.org.sv/jspui/handle/10972/4030>.
- [34] J. A. Gomez Garcia, «Sistema de adquisición y monitoreo en tiempo real para la detección temprana de fallas en motores mediante análisis de vibraciones y temperatura bajo ambiente IoT,» Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), 2025. dirección: <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/69921>.
- [35] M. Muñoz Roquiguez, «Plataforma IoT para la provisión de servicios en procesos industriales,» Universidad de Almería, 2023. dirección: <https://repositorio.ual.es/handle/10835/14215>.

## ANEXO A PROGRAMACIÓN

### A-A. Programación Nodo ThingSpeak

```
1 #include <ThingSpeakWriter_asukiaaa.h>
2 #include <WiFi.h>
3 #include <SPI.h>
4 #include <PL_ADXL355.h>
5 #include "HT_SSD1306Wire.h"
6 #include "arduinoFFT.h"
7 #include <math.h>
8
9 // ----- Configuracion ThingSpeak -----
10 #define WRITE_API_KEY "EV0JK8PSEW56M85C"
11 #define WIFI_SSID "Red Vibracion"
12 #define WIFI_PASS "123456789"
13 ThingSpeakWriter_asukiaaa channelWriter(WRITE_API_KEY);
14
15 // ----- OLED Heltec -----
16 static SSD1306Wire display(
17     0x3c,
18     500000,
19     SDA_OLED,
20     SCL_OLED,
21     GEOMETRY_128_64,
22     RST_OLED);
23
24 void VextON() {
25     pinMode(Vext, OUTPUT);
26     digitalWrite(Vext, LOW);
27 }
28
29 // ----- ADXL355 SPI -----
30 #define SPI_CS 26
31 #define SPI_SCK 45
32 #define SPI_MOSI 35
33 #define SPI_MISO 48
34
35 PL::ADXL355 adx1355;
36 auto range = PL::ADXL355_Range::range2g;
37
38 // ----- FFT CONFIG -----
39 const uint16_t samples = 256;
40 const double samplingFrequency = 200.0;
41
42 double vReal[samples];
43 double vImag[samples];
44
45 ArduinoFFT<double> FFT_01(
46     vReal,
47     vImag,
48     samples,
```

```

49     samplingFrequency);
50
51 // ----- FILTRADO ESTABLE TIPO VIBROMETRO -----
52 const float HPF_FC_HZ = 1.0f;
53 const float RMS_TAU_S = 1.0f;
54 const float G_TO_MPS2 = 9.80665f;
55
56 float CAL_A = 1.19f;
57 float CAL_B = 0.0f;
58
59 float highPass1(float x, float fs, float fc) {
60     static float y = 0.0f;
61     static float x_prev = 0.0f;
62     float RC = 1.0f / (2.0f * 3.1415926f * fc);
63     float dt = 1.0f / fs;
64     float a = RC / (RC + dt);
65     y = a * (y + x - x_prev);
66     x_prev = x;
67     return y;
68 }
69
70 float rmsEnergyEMA(float x, float fs, float tau_s) {
71     static float e = 0.0f;
72     float alpha = 1.0f - expf(-1.0f / (fs * tau_s));
73     e = e + alpha * (x * x - e);
74     return sqrtf(e);
75 }
76
77 double computePeakAbs(double* data, uint16_t n) {
78     double peak = 0;
79     for (uint16_t i = 0; i < n; i++) {
80         double v = fabs(data[i]);
81         if (v > peak) peak = v;
82     }
83     return peak;
84 }
85
86 // ----- Variables -----
87 double peak = 0;
88 double peakFrequency = 0;
89
90 float rms_g_est = 0.0f;
91 float rms_mps2_est = 0.0f;
92 float rms_mps2_cal = 0.0f;
93
94 // ----- PARAMETROS ESTADO -----
95 const float RMS0_MPS2 = 0.20f;
96 const float RMS_WARN_PCT = 200.0f;
97 const float RMS_CRIT_PCT = 400.0f;
98
99 int estadoPuente = 0;
100 String estadoTexto = "NORMAL";

```

```

101
102 void evaluarEstado(float rms_mps2_cal) {
103
104     float dr_percent =
105         (rms_mps2_cal - RMS0_MPS2) / RMS0_MPS2 * 100.0f;
106
107     if (dr_percent >= RMS_CRIT_PCT) {
108         estadoPuente = 2;
109         estadoTexto = "CRITICO";
110     }
111     else if (dr_percent >= RMS_WARN_PCT) {
112         estadoPuente = 1;
113         estadoTexto = "ALERTA";
114     }
115     else {
116         estadoPuente = 0;
117         estadoTexto = "NORMAL";
118     }
119 }
120
121 // ----- Loop principal -----
122 void loop() {
123
124     for (uint16_t i = 0; i < samples; i++) {
125
126         auto a = adxl355.getAccelerations();
127
128         float x_g = (float)a.z;
129         float x_hp_g = highPass1(
130             x_g,
131             (float)samplingFrequency,
132             HPF_FC_HZ);
133
134         rms_g_est =
135             rmsEnergyEMA(x_hp_g,
136                 (float)samplingFrequency,
137                 RMS_TAU_S);
138
139         rms_mps2_est = rms_g_est * G_TO_MPS2;
140         rms_mps2_cal = CAL_A * rms_mps2_est + CAL_B;
141
142         vReal[i] = (double)x_hp_g;
143         vImag[i] = 0.0;
144
145         delayMicroseconds(5000);
146     }
147
148     peak = computePeakAbs(vReal, samples);
149
150     FFT_01.windowing(
151         FFTWindow::Hamming,
152         FFTDirection::Forward);

```

```
153  
154   FFT_01.compute(  
155     FFTDirection::Forward);  
156  
157   FFT_01.complexToMagnitude();  
158  
159   peakFrequency = FFT_01.majorPeak();  
160  
161   evaluarEstado(rms_mps2_cal);  
162 }
```

Listing 1. Firmware para adquisición, filtrado RMS estable y transmisión a ThingSpeak.

## A-B. Programación Nodo RemoteXY

```
1 #include <WiFi.h>
2 #include <RemoteXY.h>
3 #include <SPI.h>
4 #include <PL_ADXL355.h>
5 #include "HT_SSD1306Wire.h"
6 #include "arduinoFFT.h"
7 #include <math.h>
8
9 //-----CONFIGURACION REMOTE XY-----
10 #pragma pack(push, 1)
11
12 uint8_t const PROGMEM RemoteXY_CONF_PROGMEM[] =
13 { 255, 0, 0, 17, 0, 177, 0, 19, 0, 0, 0, 65, 99, 101, 108, 101,
14   114, 97, 99, 105, 195, 179, 110, 0, 31, 1, 106, 200, 1, 1,
15   11, 0, 130, 6, 23, 94, 85, 27, 17, 68, 11, 41, 84, 46,
16   1, 8, 36, 129, 13, 4, 84, 8, 64, 14, 85, 110, 105,
17   118, 101, 114, 115, 105, 100, 97, 100, 32, 80, 111,
18   108, 105, 116, 195, 169, 99, 110, 105, 99, 97, 0,
19   129, 34, 14, 35, 8, 64, 14, 83, 97, 108, 101, 115,
20   105, 97, 110, 97, 0, 129, 10, 26, 42, 10, 64, 59,
21   86, 105, 98, 114, 97, 99, 105, 195, 179, 110, 0,
22   67, 12, 94, 40, 10, 77, 2, 26, 2, 130, 6, 112,
23   94, 85, 27, 17, 68, 11, 131, 84, 46, 1, 8, 36,
24   129, 10, 116, 49, 10, 64, 59, 70, 114, 101, 99,
25   117, 101, 110, 99, 105, 97, 0, 67, 34, 184, 40,
26   10, 77, 2, 26, 2, 74, 60, 94, 34, 10, 12, 2,
27   30, 37, 64, 67, 114, 195, 173, 116, 105, 99,
28   111, 0 };
29
30 struct {
31   float osc_rms;
32   float remote_rms;
33   float osc_frecuencia;
34   float remote_frecuencia;
35   uint8_t remote_estado;
36   uint8_t connect_flag;
37 } RemoteXY;
38
39 #pragma pack(pop)
40
41 // ----- OLED Heltec -----
42 static SSD1306Wire display(
43   0x3c,
44   500000,
45   SDA_OLED,
46   SCL_OLED,
47   GEOMETRY_128_64,
48   RST_OLED);
49
50 // ----- FILTRADO ESTABLE -----
```

```

51 const float HPF_FC_HZ = 1.0f;
52 const float RMS_TAU_S = 1.0f;
53 const float G_TO_MPS2 = 9.80665f;
54
55 float CAL_A = 1.19f;
56 float CAL_B = 0.0f;
57
58 // ----- PARAMETROS DE ESTADO -----
59 const float RMS0_MPS2 = 0.20f;
60 const float RMS_WARN_PCT = 200.0f;
61 const float RMS_CRIT_PCT = 400.0f;
62
63 // ----- Loop principal -----
64 void loop() {
65
66     for (uint16_t i = 0; i < samples; i++) {
67
68         auto a = adxl355.getAccelerations();
69         float x_g = (float)a.z;
70
71         float x_hp_g =
72             highPass1(x_g,
73                 (float)samplingFrequency,
74                 HPF_FC_HZ);
75
76         rms_g_est =
77             rmsEnergyEMA(x_hp_g,
78                 (float)samplingFrequency,
79                 RMS_TAU_S);
80
81         float rms_mps2_est = rms_g_est * G_TO_MPS2;
82         rms_mps2_cal = CAL_A * rms_mps2_est + CAL_B;
83
84         vReal[i] = (double)x_hp_g;
85         vImag[i] = 0.0;
86
87         delayMicroseconds(5000);
88     }
89
90     FFT_01.windowing(
91         FFTWindow::Hamming,
92         FFTDirection::Forward);
93
94     FFT_01.compute(
95         FFTDirection::Forward);
96
97     FFT_01.complexToMagnitude();
98
99     peakFrequency = FFT_01.majorPeak();
100
101     evaluarEstado(rms_mps2_cal);
102 }

```

---

Listing 2. Firmware para adquisición de vibración, filtrado RMS estable y supervisión mediante RemoteXY.

ANEXO B  
 PLANOS MECÁNICOS DISEÑADOS EN AUTODESK INVENTOR

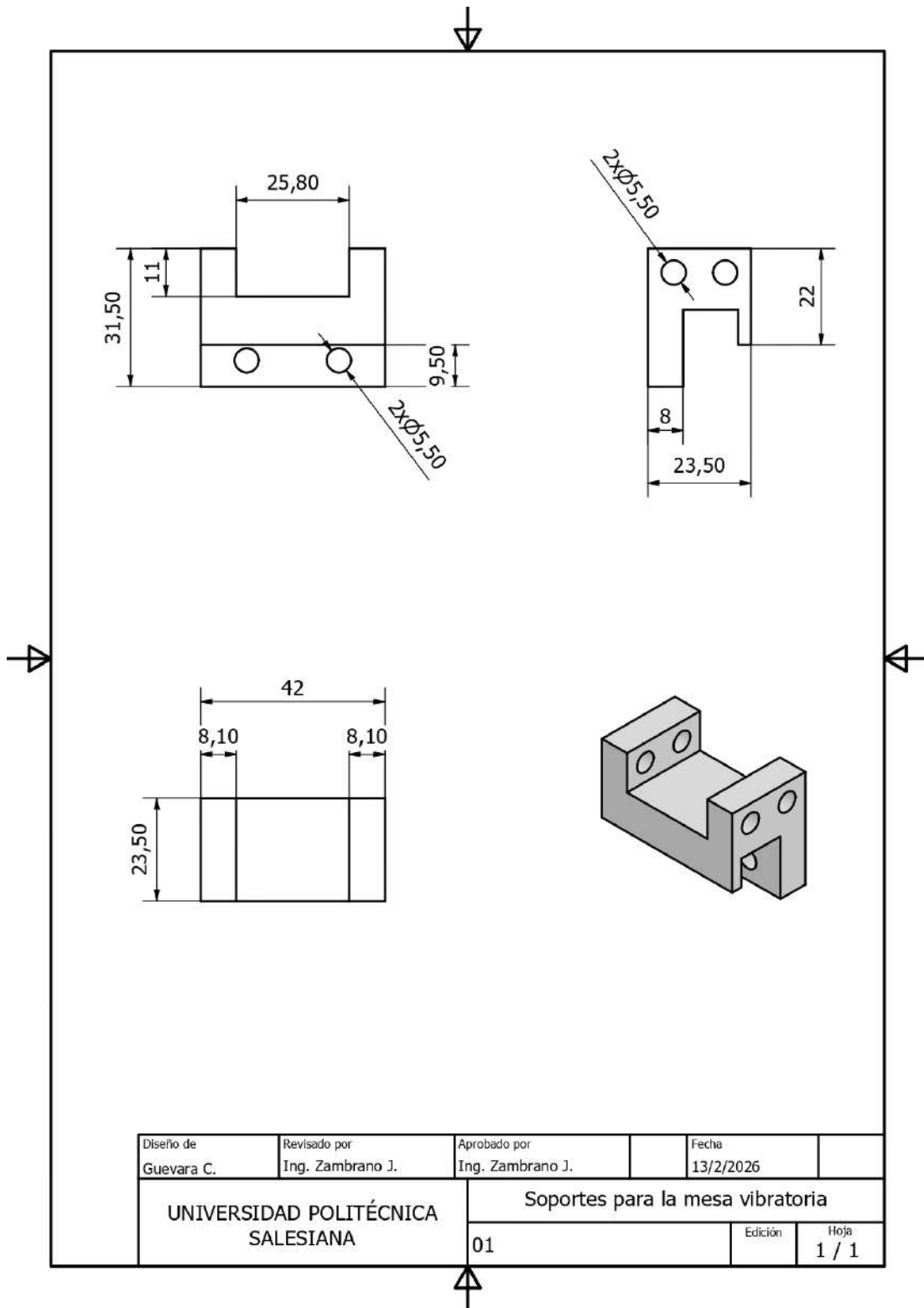


Figura 46. Soporte de la Base del Puente

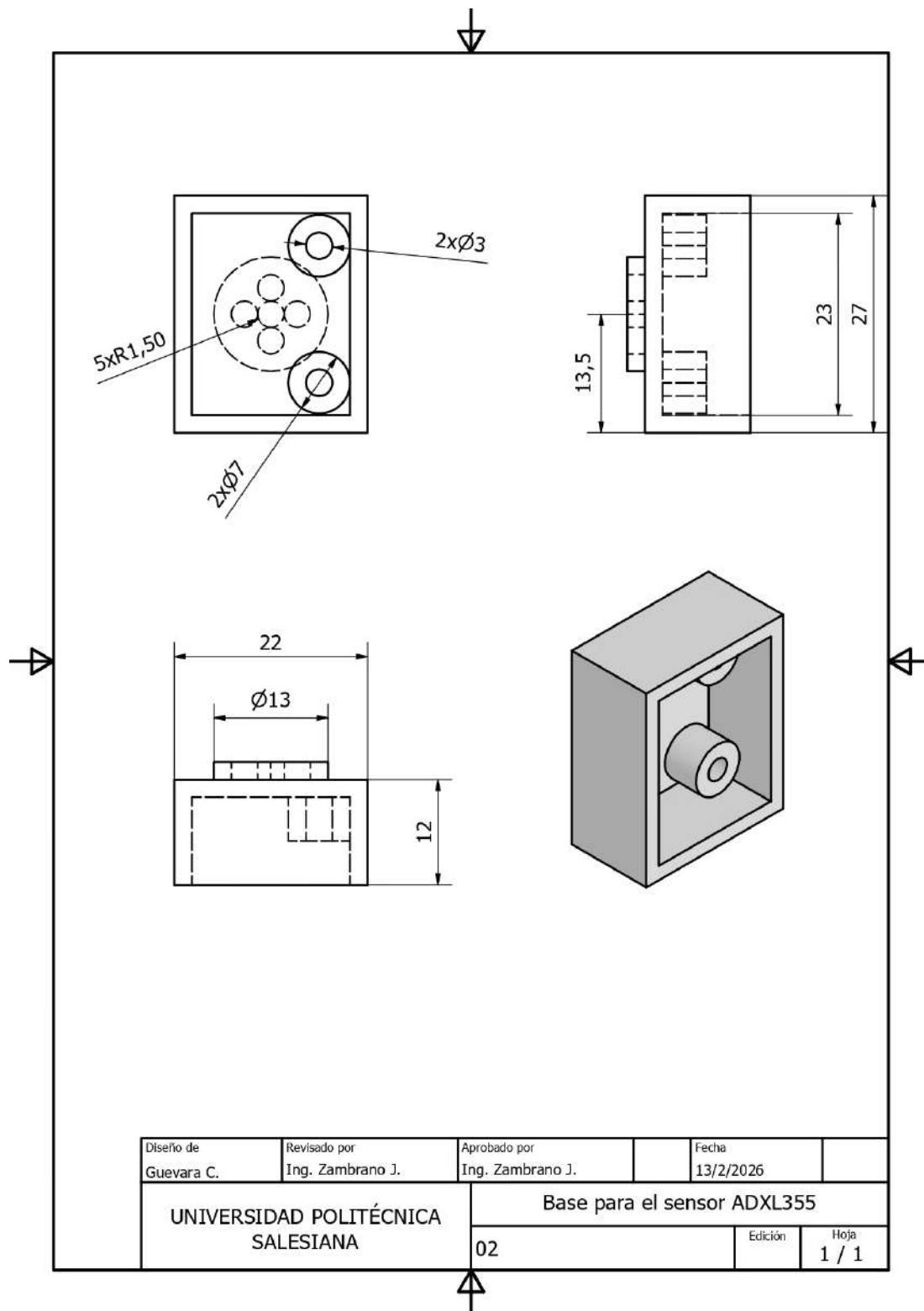
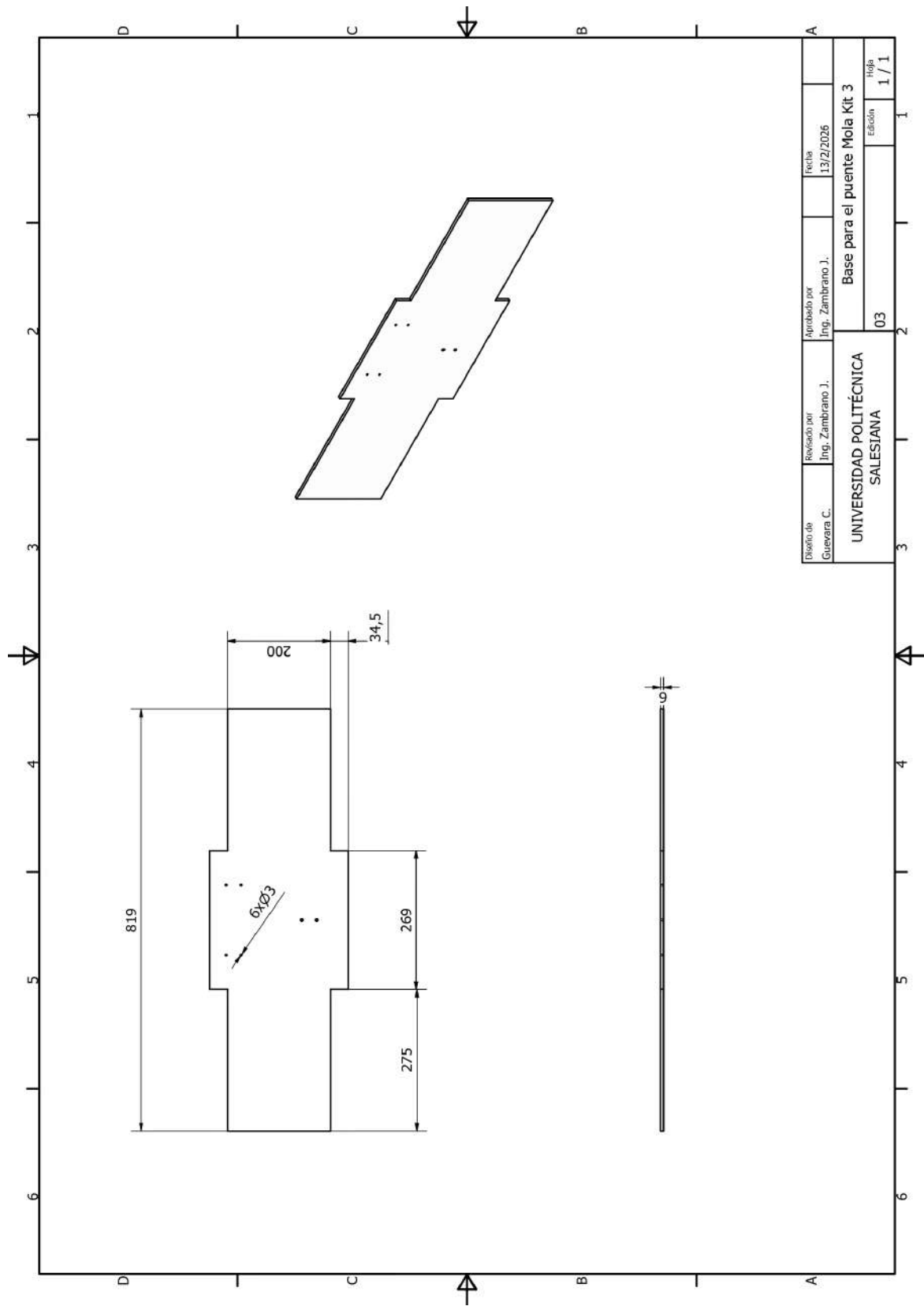


Figura 47. Base del sensor ADXL355.



Diseño de Guevara C.	Revisado por Ing. Zambrano J.	Aprobado por Ing. Zambrano J.	Fecha 13/2/2026
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA			03
Base para el puente Mola Kit 3			Edición 1 / 1

Figura 48. Base del Puente Mola Kit 3

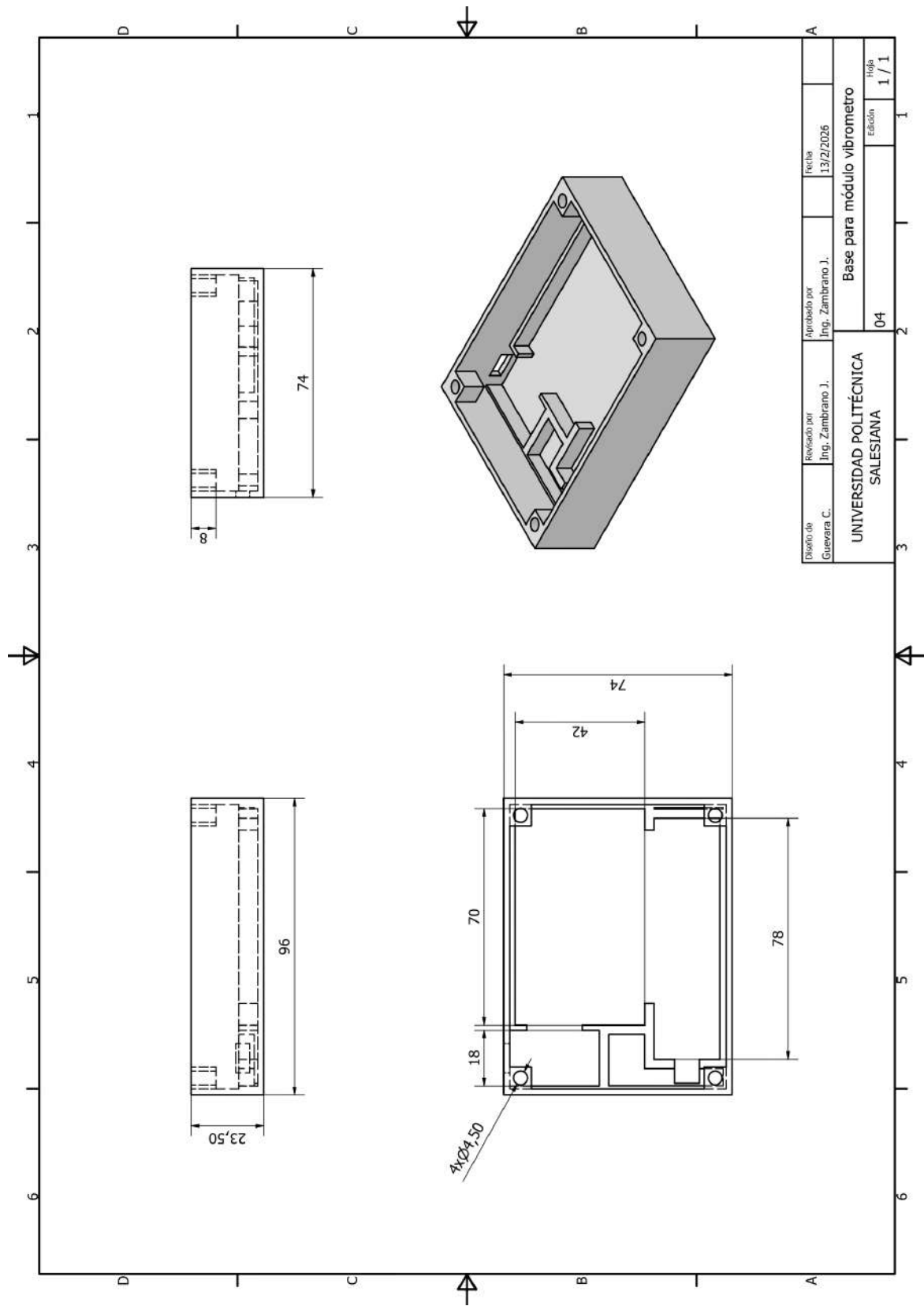


Figura 49. Base módulos de medición.

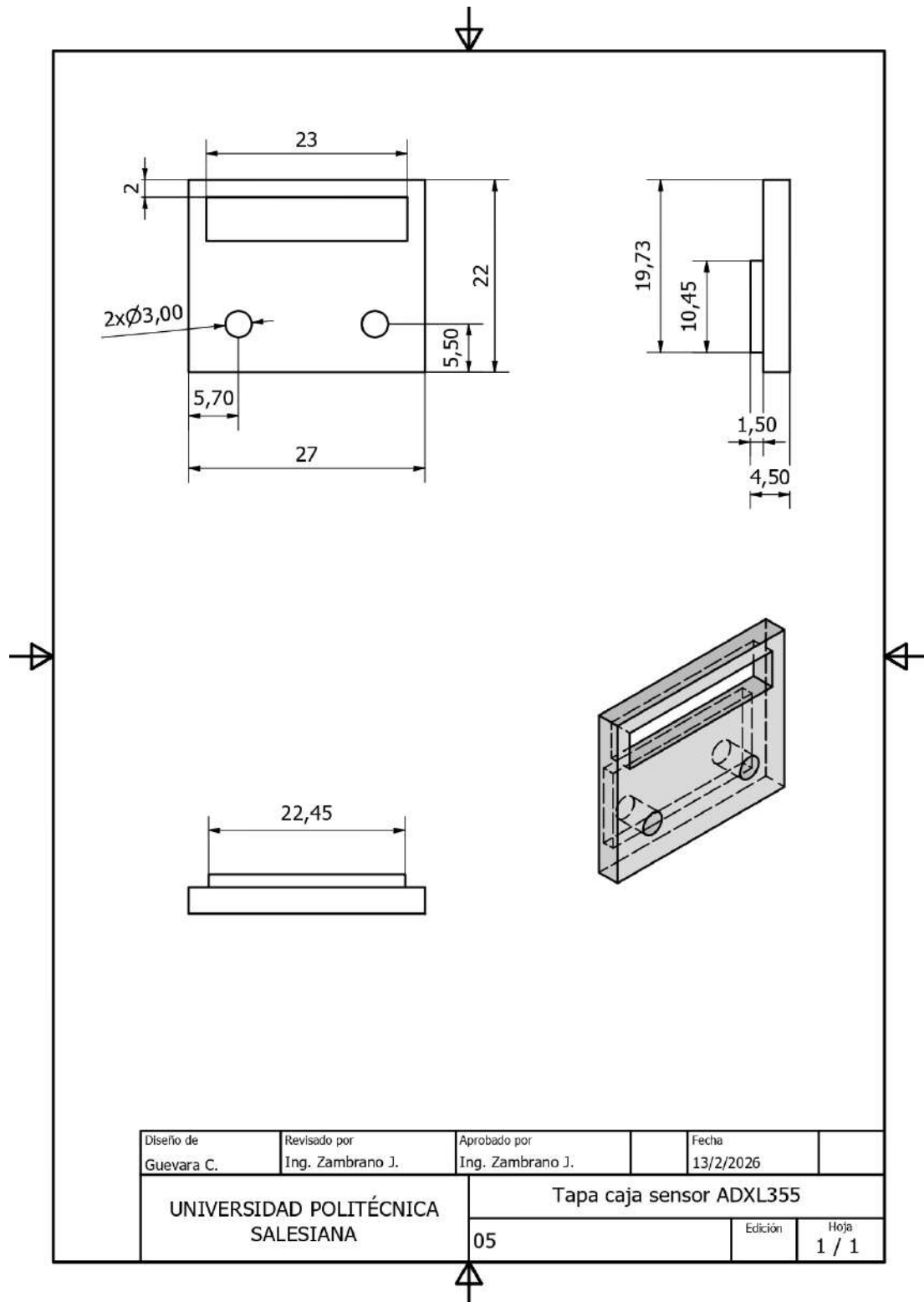


Figura 50. Tapa sensor ADXL355.

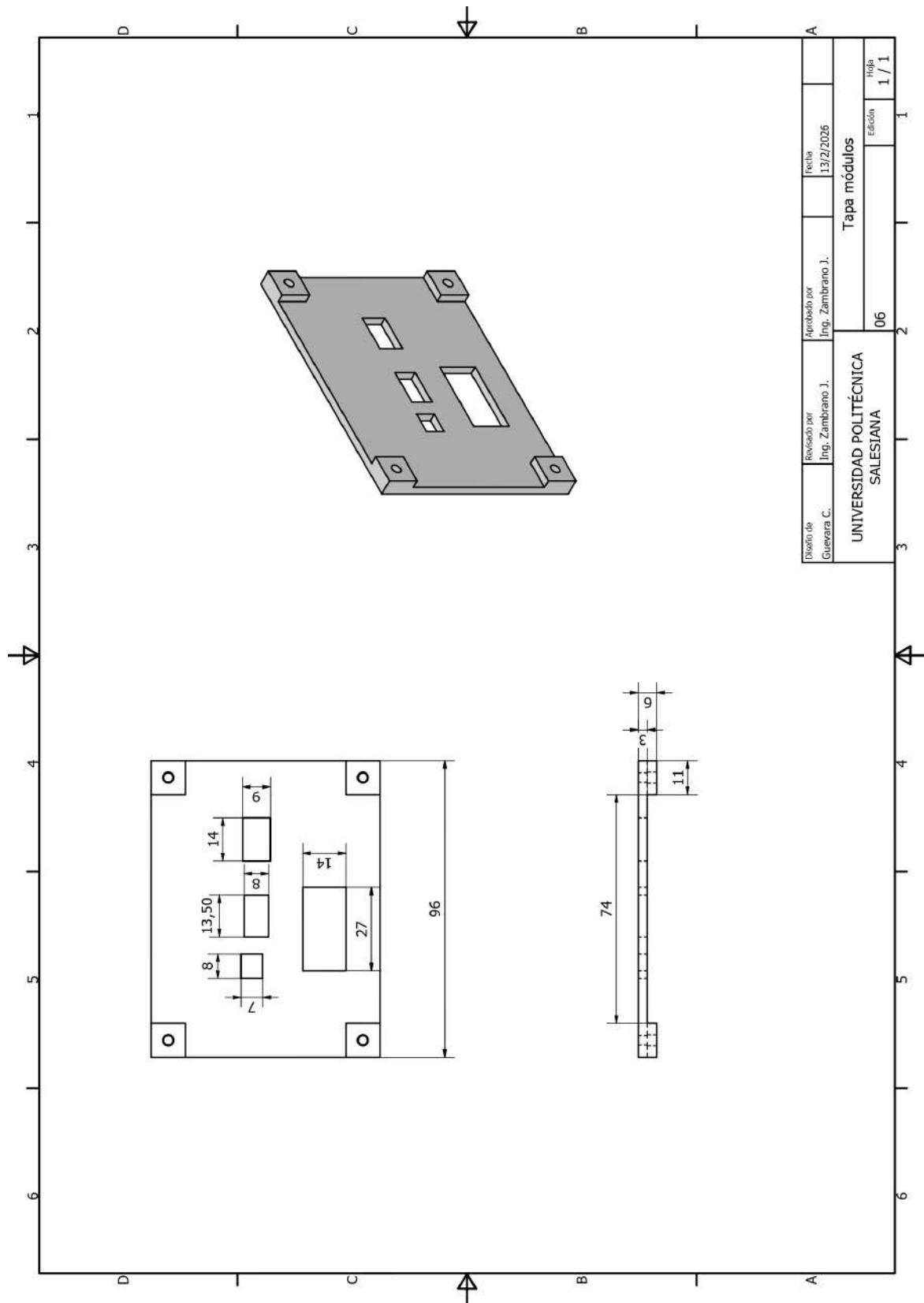


Figura 51. Tapa módulos de medición

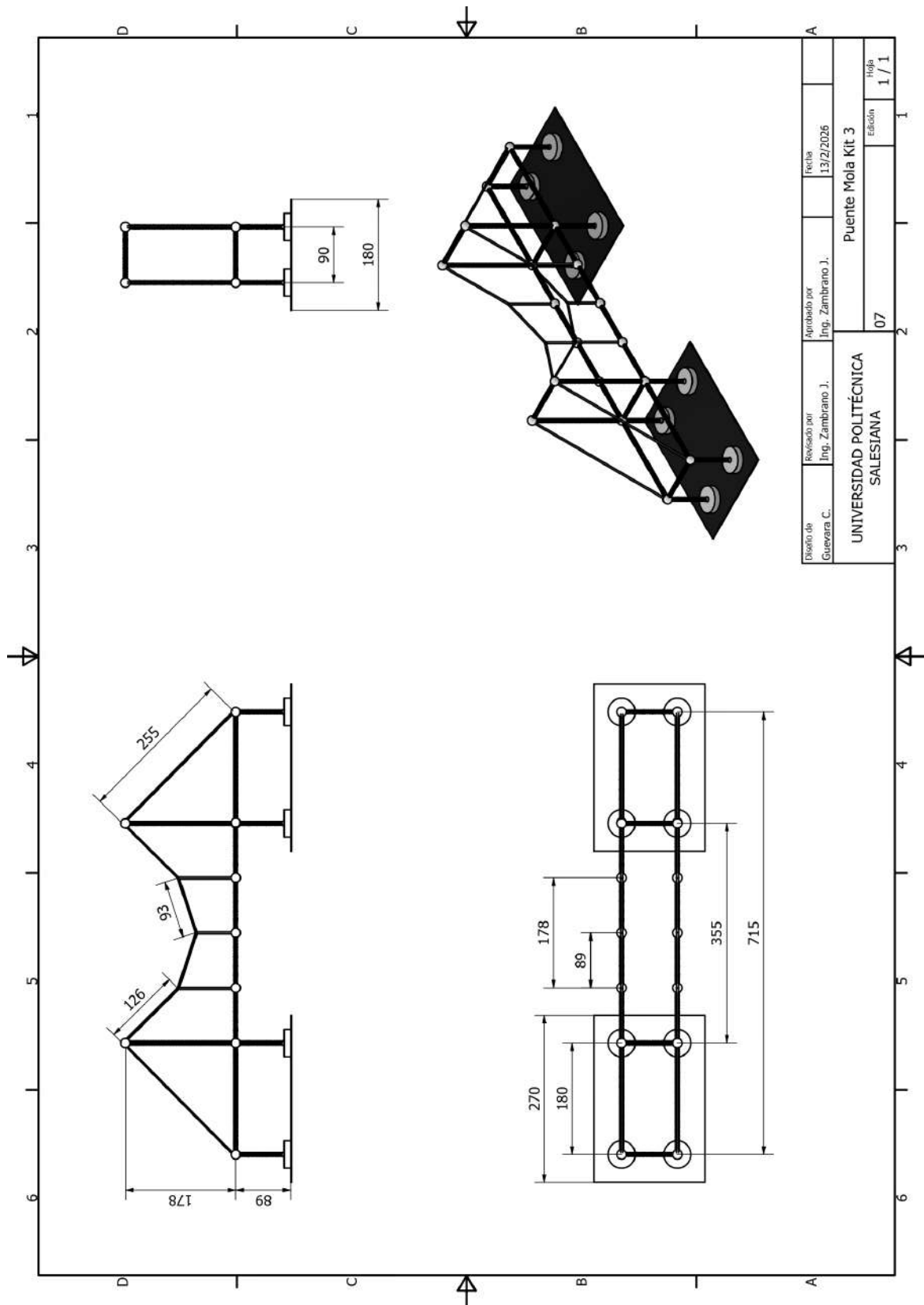


Figura 52. Puente Mola Kit 3