

Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica



## **Sistema Integrado para el monitoreo estructural de puentes**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Sebastián Bastos Salas

27 de noviembre de 2025

**Sistema Integrado para el Monitoreo Estructural de Puentes** © 2025 by Sebastián

Bastos Salas is licensed under CC BY-NC 4.0 

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**


**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

**ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa del Trabajo Final de Graduación  
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
Grado Académico de Licenciatura  
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del Trabajo Final de Graduación denominado *Sistema Integrado para el monitoreo estructural de puentes*, realizado por Sebastian Bastos Salas y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.


Miembros del Tribunal Evaluador

  
JUAN SCOTT CHAVES  
NOGUERA (FIRMA)  
2025.11.25 16:46:48 Z  
2025.001.20937

Ing. Juan Scott Chaves Noguera

Profesor lector

FABIAN ALBERTO  
PICADO GARCIA  
(FIRMA)

  
Firmado digitalmente por FABIAN  
ALBERTO PICADO GARCIA (FIRMA)  
Fecha: 2025.11.25 10:57:01 -06'00'

Ing. Fabián Alberto Picado García

Profesor lector

  
TEC Tecnológico de Costa Rica  
Firmado digitalmente  
por HUGO ANDRES  
SANCHEZ ORTIZ (FIRMA)  
Fecha: 2025.11.25  
18:25:41 +01'00'

Ing. Hugo Andrés Sánchez Ortiz

Profesor asesor

Cartago, 25 de noviembre del 2025

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Sebastián Bastos Salas

Cartago, 27 de noviembre de 2025

Céd: 4-0237-0008



# Resumen

El monitoreo del estado de salud estructural en puentes es una necesidad para garantizar la seguridad de los usuarios y tener el conocimiento de los cuidados que este debe tener, por lo tanto hacer un monitoreo de manera eficiente puede minimizar el tiempo de la toma de datos y dedicarse a analizar los resultados.

Se creó un sistema que sea capaz de manejar los datos de los equipos de *Campbell Scientific* y *Bridge Diagnostics* para reducir el tiempo de toma de datos, pasando de 7 software utilizados para recopilación, visualización y calibración a solo 3. Para mejorar los tiempos de toma de datos se crea un sistema inalámbrico con un ESP32 para que guarde los datos de galgas extensiométricas y LVDT en una microSD para ser cargados en un programa general en *python*.

Para hacer este sistema integrado se toman equipos que se encontraban inactivos y se ponen en funcionamiento, se verifica que el sistema sea capaz de manejar los datos de todos los equipos, para ser procesados y almacenados en un solo lugar.

Finalmente se crea un dashboard en *Streamlit* para cargar los datos de los equipos y observar los datos clasificados por cada tipo de prueba de carga (dinámica o estática) y se modifican los archivos originales para estandarizar sus datos y tener una mejor lectura para su posterior análisis.

**Palabras clave:** Dashboard, monitoreo de puentes, sistema inalámbrico y sistema integrado.



# Abstract

Structural health monitoring in bridges is essential to ensure user safety and to maintain awareness of the necessary care and maintenance of these structures. Therefore, implementing an efficient monitoring system can minimize data collection time and allow greater focus on result analysis.

A system was developed to manage data from Campbell Scientific and Bridge Diagnostics equipment, aiming to reduce data collection time. This improvement was achieved by consolidating seven different software tools—previously used for data acquisition, visualization, and calibration—into just three. To further enhance data collection efficiency, a wireless system based on an ESP32 was designed to record strain gauge and LVDT data onto a microSD card, which can then be uploaded to a general-purpose Python program.

To build this integrated system, previously inactive equipment was restored and put into operation. The system was verified to ensure its ability to handle data from all devices, allowing the information to be processed and stored in a single location.

Finally, a dashboard was developed in Streamlit to upload and visualize the data from the different instruments. The data were organized by test type (dynamic or static) and the original files were standardized to improve data readability and facilitate subsequent analysis.

**Keywords:** Bridge monitoring, Dashboard, integrated system and wireless system.



*A mis queridos padres y abuelos que estuvieron a mi lado en todo este tiempo.*



# Agradecimientos

A todos los que estuvieron presentes en este proceso de mi carrera profesional, tanto profesores como amigos que estuvieron en estos años.

Al equipo del CIVCO que me acogieron durante estos 6 meses, en especial a Luis Carlos, David, Juan Carlos y Heiner que compartieron sus conocimientos conmigo. A Giannina Ortiz y Paola Vega que me brindaron este proyecto y el apoyo para realizarlo. A Fabián Coto por su ayuda y conocimientos.

A mi profesor asesor Hugo Sánchez por su ayuda, consejos y conocimientos a lo largo de la carrera.

A mis padres y abuelos que siempre me han apoyado con mis metas, y un especial agradecimiento a mi novia Ana Meza por estar desde el día uno que inicié esta carrera.

Sebastián Bastos Salas

Cartago, 27 de noviembre de 2025



# Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Lista de símbolos y abreviaciones	vii
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 El papel que tiene el CIVCO en el diagnóstico de puentes . . . . .	1
1.1.1 Antecedentes . . . . .	2
1.2 La necesidad de generar un sistema integrado e inalámbrico . . . . .	3
1.3 Objetivos y estructura del documento . . . . .	5
1.3.1 Meta . . . . .	5
1.3.2 Objetivo General . . . . .	5
1.3.3 Objetivos Específicos . . . . .	5
1.3.4 Estructura del Documento . . . . .	6
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1 Conceptos Generales . . . . .	7
2.1.1 Monitoreo de Salud Estructural (SHM) . . . . .	7
2.1.2 Dataloggers . . . . .	8
2.1.3 Tipos de Esfuerzos Físicos . . . . .	8
2.1.4 Streamlit . . . . .	10
2.2 Sensores . . . . .	11
2.2.1 Galga Extensiométrica ST350 . . . . .	11
2.2.2 Plasticidad y comportamiento viscoelástico . . . . .	11
2.2.3 Transformadores Diferenciales Variables Lineales . . . . .	12
2.2.4 Acelerómetros . . . . .	13
2.3 Protocolos de Comunicación . . . . .	13
2.3.1 I2C (Inter-Integrated Circuit) . . . . .	13
2.3.2 SPI (Serial Peripheral Interface) . . . . .	14
<b>3 Sistema integrado con conexión inalámbrica</b>	<b>17</b>
3.1 Introducción a la solución Planteada . . . . .	17
3.2 Activación del equipo disponible . . . . .	19
3.2.1 Activación equipo de Campbell Scientific . . . . .	19

3.2.2	Activación equipo Bridge Diagnostics . . . . .	22
3.3	Diseños Inalámbricos del sistema . . . . .	24
3.3.1	Diseño para galga extensiométrica . . . . .	24
3.3.2	Diseño para LVDT . . . . .	28
3.4	Diseño del sistema integrado . . . . .	29
3.4.1	Cambio de formato de archivos . . . . .	31
3.4.2	Limpieza y estandarización de datos . . . . .	32
3.5	Diseño del Dashboard . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Resultados y Análisis</b>	<b>35</b>
4.1	Activación de Equipos . . . . .	35
4.1.1	Campbell Scientific . . . . .	35
4.1.2	Bridge Diagnostics . . . . .	39
4.2	Sistema Inalámbrico para Galga Extensiométrica . . . . .	40
4.2.1	Prototipo final en PCB . . . . .	42
4.3	Mediciones con Galga Extensiométrica . . . . .	44
4.3.1	Comportamiento con CR1000 . . . . .	45
4.3.2	Comportamiento con ESP32 . . . . .	46
4.4	Mediciones con LVDT . . . . .	48
4.4.1	Comportamiento con el CR1000 y ESP32 . . . . .	48
4.5	Carga de datos al sistema integrado . . . . .	49
4.6	Modificación y limpieza de archivos . . . . .	51
4.7	Visualización de datos . . . . .	52
4.7.1	Barra lateral . . . . .	52
4.7.2	Dashboard para Pruebas Estáticas . . . . .	53
4.7.3	Dashboard para Pruebas Dinámicas . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>55</b>
5.1	Recomendaciones . . . . .	56
	<b>Bibliografía</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Anexos</b>	<b>61</b>
A.1	Tablas de mediciones . . . . .	61
A.2	Código . . . . .	65

# Índice de figuras

2.1	Fuerza de Tracción [6]	9
2.2	Fuerza de compresión [6]	10
2.3	Diagrama de cableado eléctrico [3]	11
2.4	Plasticidad de sólidos en múltiples pasos de medición [31]	12
2.5	Máximo, mínimo y nulo en bobinas del LVDT [28]	13
2.6	Protocolo I2C comunicación dispositivo primario a secundario	14
2.7	Comunicación I2C bus de datos [20]	14
2.8	Ejemplo de comunicación SPI [32]	15
3.1	Diagrama de primer nivel	17
3.2	Diagrama de bloques del Sistema	18
3.3	Agregar sensor LVDT con Short cut	19
3.4	Valores para inicializar el LVDT	20
3.5	Medición digital con el LVDT en base y regla	21
3.6	Comprobación de desplazamiento del sensor LVDT	21
3.7	Carga de archivos de calibración	22
3.8	Ingreso manual de sensores con permiso de administrador	23
3.9	Conexión de los acelerómetros	23
3.10	Toma de datos desde STS-live	24
3.11	Módulo ADS1115 ADC [4]	25
3.12	Módulo de carga TP4056 [5]	25
3.13	Módulo elevador de tensión MT3608 [33]	26
3.14	Módulo para micro SD [1]	26
3.15	Módulo RTC DS1302 [2]	26
3.16	Microcontrolador ESP32 devkit v1 [15]	27
3.17	Esquemático del sistema inalámbrico para ST-350	27
3.18	Prueba de compresión y tracción en la galga	28
3.19	Esquemático del diseño del LVDT	29
3.20	Diagrama del sistema general	30
3.21	Diagrama de Flujo de código principal	31
3.22	Interfaz gráfica para cargar archivos	34
4.1	Base magnética para la mediciones con el LVDT	36
4.2	Calibración a cero para establecer punto de partida	36
4.3	Medición con LVDT a 10mm vs valor en regla	37

---

4.4	Medición con LVDT vs regla, regreso a origen . . . . .	37
4.5	Medición con LVDT a 20mm vs valor de regla . . . . .	39
4.6	Medición del LVDT regreso al origen . . . . .	39
4.7	Medición proveniente de los acelerómetros a 3 ejes . . . . .	40
4.8	Esquemático para la PCB . . . . .	41
4.9	Vista preliminar de la PCB . . . . .	42
4.10	PCB en físico parte Botton . . . . .	43
4.11	PCB en físico parte Top . . . . .	43
4.12	PCB en físico con los módulos . . . . .	44
4.13	Base para realizar mediciones en Galga . . . . .	45
4.14	Comportamiento de Galga en CR1000 . . . . .	46
4.15	Comportamiento de Galga en ESP32 . . . . .	47
4.16	Medición de galga con CR1000 vs ESP32 . . . . .	47
4.17	Comparativa del LVDT en CR1000 y ESP32 . . . . .	49
4.18	Comparativa del LVDT en CR1000 y ESP32 a 5mm . . . . .	49
4.19	Archivos agregados a la Carpeta Datos . . . . .	50
4.20	Visualización de archivos cargados en Streamlit . . . . .	50
4.21	Datos de BDI sin modificar . . . . .	51
4.22	Datos de BDI modificados . . . . .	51
4.23	Barra lateral de Navegación . . . . .	52
4.24	Prueba de carga estática con galgas . . . . .	53
4.25	Prueba de carga estática con LVDT . . . . .	53
4.26	Prueba de carga dinámica con acelerómetros . . . . .	54
4.27	Prueba de carga dinámica con LVDT . . . . .	54

# Índice de tablas

2.1	Modos de operación del SPI . . . . .	16
3.1	Lista de componentes para sistema inalámbrico . . . . .	28
3.2	Formato a utilizar para pruebas de carga estáticas . . . . .	32
3.3	Formato a utilizar para pruebas de carga dinámicas . . . . .	33
4.1	Mediciones con acelerómetros de BDI . . . . .	40
4.2	Mediciones del consumo de cada módulo . . . . .	41
A.1	Mediciones con LVDT (1450-2) de CS para $10mm$ . . . . .	61
A.2	Mediciones con LVDT (1450-2) de CS para $-10mm$ . . . . .	61
A.3	Mediciones con LVDT (1450-6) de CS para $20mm$ . . . . .	62
A.4	Mediciones con CR1000 y galga extensiométrica . . . . .	63
A.5	Mediciones con ESP32 y galga extensiométrica . . . . .	64
A.6	Mediciones con LVDT (1450-2) con CR1000 y ESP32 . . . . .	65



# Lista de símbolos y abreviaciones

## Abreviaciones

ADC	Analog to Digital Converter
BDI	Bridge Diagnostics
CIVCO	Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción
CS	Campbell Scientific
I2C	Inter Integrated Circuit
LoRa	Low Rank Adaptation
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PCB	Printed Circuit Board
SPI	Serial Peripheral Interface

## Notación general []

A	Amperios
Hz	Hertz
mm	Milímetros
$\mu\epsilon$	micro Strain
V	Voltios



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 El papel que tiene el CIVCO en el diagnostico de puentes

La infraestructura vial es uno de los pilares para el desarrollo económico y social del país, permitiendo movilidad, bienes y servicios, integrando comunidades y un dinamismo del comercio. Los puentes cumplen un papel estratégico al conectar territorios separados ya sea por su geografía por ríos, valles u otro; el buen estado estructural de estos garantiza la productividad nacional y el no controlar su deterioro puede generar pérdidas de todo tipo (económicas, materiales o vidas) un ejemplo de esto es el caso del puente del río Tárcoles en 2009 [25], que evidencia la vulnerabilidad existente de no llevar un control estructural y un mantenimiento oportuno de los puentes.

Hasta el año 2013, tanto el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) como el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) carecían de datos actualizados sobre las condiciones estructurales, lo que dificulta la intervención en estas para prevenir incidentes [25], esto anterior motiva a organizaciones nacionales e internacionales a crear un sistema para evaluar y dar seguimiento al estado de los puentes a nivel país, la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA) en 2007 y la Contraloría General de la República en 2010 fueron actores que impulsan un Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP) [12].

En este contexto surge el proyecto eBridge que fue desarrollado en el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) dentro del Tecnológico de Costa Rica (TEC), este proyecto surge de un grupo multidisciplinario con la participación de diversas escuelas y programas del mismo TEC. Su primera etapa se desarrolla en el 2010 [24], esta buscó la predicción remota de fallas de puentes mediante diferentes metodologías que identificaran variables críticas que influyeran en el desempeño estructural. En la segunda etapa eBridge 2.0 se avanza en un sistema integrado que permita centralizar información y la creación de las bases de un sistema nacional para el monitoreo en puentes[11].

Actualmente en la etapa eBridge 3.0 se trabaja en el diseño y validación del prototipo de monitoreo sobre salud estructural en riesgos ambientales, métodos de evaluación no destruc-

tiva y estrategias de mantenimiento preventivo, con el fin de optimizar los recursos y mejorar la seguridad vial en el país.[10]

El CIVCO dispone del equipamiento especializado para llevar a cabo pruebas estructurales en puentes, ofrece servicios de monitoreo a entidades pública y privadas, dando pruebas de carga dinámica realizadas con el equipo de la empresa *Bridge Diagnostics* y las pruebas de carga estática con el equipo de *Campbell Scientific*. Las pruebas de carga dinámica sirven para conocer el comportamiento de vibraciones en las estructuras, captando frecuencias naturales y modos de vibración, para inferir el nivel de rigidez y posibles deterioros. Las pruebas de carga estática se utilizan para medir deformaciones, desplazamientos y esfuerzos bajo una carga, esto para saber sobre la resistencia del puente o su capacidad.

Gran parte de las evaluaciones se realizan mediante pruebas en campo [23], el equipo especializado debe trasladarse al sitio para obtener las mediciones directas que genera el puente. En estos casos factores ambientales como vientos fuertes, variaciones de temperatura o humedad pueden introducir ruido en las mediciones; por esta razón se busca minimizar estas interferencias y garantizar una información precisa.

Complementario a lo anterior, el CIVCO también ejecuta pruebas controladas en su laboratorio, simulan escenarios que pueden sufrir estas estructuras a diferentes esfuerzos o cargas en algunos segmentos. Se someten a fuerzas de compresión, torsión, tracción y flexión para observar el comportamiento de estos y poder medirlos de manera controlada.

Este conjunto de pruebas generan una base para tener un diagnostico con detalle del estado de salud de las estructuras, sin embargo, existen limitaciones por la cantidad de equipos que se pueden manejar y llevar al campo, la eficiencia de toma de datos marca una diferencia en el tiempo que toma hacer un diagnostico y poder generar un informe que los clientes puedan consultar, por lo que un sistema que pueda integrar las diferentes mediciones y generar sus gráficos puede optimizar los procesos de análisis y medición.

### 1.1.1 Antecedentes

**Diseño de una red inalámbrica de sensores para la monitorización del desempeño estructural de puentes** *Eugenia María Guzmán Rivera, 2012* [17]

Se plantea el desarrollo de una red inalámbrica de sensores para medir las variables críticas en la salud estructural de los puentes, como deflexión y tensión superficial. Se utilizaron los ST350 para medir tensión superficial en concreto y SR50A para medir deflexión con alta precisión.

Se integraron a un circuito acondicionado de señal (CAS) para la lectura de datos, se conectan a nodos Waspnote y se transmite la información a un nodo central mediante módulos XBee en banda de 2.4GHz.

El sistema se toma como válido comparado a su medición con un datalogger CR1000 y se valida el uso para el monitoreo pasado en una red inalámbrica de sensores.

**Diseño del sistema de comunicación de una red inalámbrica de sensores para el**

**estudio de la salud estructural en puentes** *Franz Vargas Acuña, 2016* [34]

Este proyecto da continuación al proyecto anterior para predicción de fallas en puentes mediante el monitoreo remoto. Muestra que el anterior proyecto presentaba fallas y limitaciones en la transferencias de datos y pérdidas en los enlaces realizados.

Se plantea un sistema de comunicación de red con topología en estrella con un nodo central y varios nodos remotos. Se utilizan Raspberry Pi 3 en cada nodo y se conectan mediante radiofrecuencia nRF24L01+ que ofrece un mayor ancho de banda y confiabilidad de comunicación.

Este proyecto demostró la factibilidad de contar con un sistema de comunicación más robusto, escalable y de bajo costo para el monitoreo en tiempo real.

**Red de sensores para el análisis de vibración en puentes utilizando acelerómetros triaxiales** *Omar Vargas Ruiz, 2018* [35]

En este proyecto se hace un análisis de vibraciones y el comportamiento dinámico que puede tener una estructura. El proyecto diseña una red de sensores para hacer mediciones con un sistema de bajo costo e implementar un sistema inalámbrico con una topología estrella con un nodo central con un raspberry y nodos adicionales con módulos Xbee.

El sistema creado muestra un error del 38,31% comparado con el sensor industrial BDI 2120 y se logra tener una comunicación estable con nodos a 10 metros de distancia. Los datos obtenidos se almacenan en una tarjeta SD. Finalmente logra hacer una red de 3 nodos secundarios y un nodo central que logran comunicarse mediante una topología tipo estrella.

## 1.2 La necesidad de generar un sistema integrado e inalámbrico

El mantenimiento y conocimiento de las estructuras garantizan la seguridad para los usuarios, a nivel país se tienen limitaciones en cuanto a este tema, más que todo en el monitoreo y seguimiento de estado en que se encuentran los puentes, el proceso de inspección actual presenta obstáculos de eficiencia, confiabilidad y capacidad de respuesta ante el deterioro progresivo de estos [19]. EBridge busca dar esta respuesta temprana para conocer el estado de salud de estos mediante informes de su mantenimiento por hacer o los puntos donde presentan fallas.

Estos trabajos de mediciones buscan ser lo menos invasivos tanto para la estructura como para los usuarios que utilizan los puentes, por lo que se busca reducir el tiempo de inspección o cierre de la vía, lo que con un sistema rápido y eficiente es lo ideal para que la toma de datos se haga en un corto tiempo. Por otro lado se busca que donde se vayan a colocar los diferentes sensores estos no afecten la estructura ni se le hagan modificaciones que puedan afectar las propiedades del mismo.

La toma de datos es un proceso manual y fragmentado, se deben transportar el equipo de

medición e instalar cada sensor con su respectivo cable desde el punto de anclaje hasta el datalogger, en caso de no tener suficientes entradas para todos los sensores, se debe recurrir a un multiplexor que está destinado a manejar exclusivamente galgas extensiométricas, pero la limitación de otros sensores como LVDT (transductor de desplazamiento lineal variable) o celda de carga se ven limitadas.

Las condiciones del tiempo pueden añadir interferencia a los datos que se están tomando, como lo son los fuertes vientos que al trabajar con cables de más de diez metros estos al moverse tiran de los sensores, generando falsas mediciones. No solo esto anterior afecta tener un sistema cableado, sino que los cables pueden quebrarse y agregar interferencia o del todo dejar de transmitir datos por una falla física, adicionalmente el recoger estos cables y colocarlos es tiempo adicional que se agrega a la medición final.

Para las pruebas de carga dinámica y estática se utilizan diferentes softwares y equipos de diferentes empresas, por un lado el equipo de *Bridge Diagnostics* (BDI) es utilizado para pruebas dinámicas, este tiene un software de hace más de diez años y es difícil de manejar por el equipo técnico, requiere de más de 3 programas adicionales al de toma de datos y genera archivos .tdms que es un formato que el equipo técnico no maneja ni tiene conocimiento de como manejarlos para observar sus datos. Por parte de las pruebas estáticas se utiliza el equipo de *Campbell Scientific* (CS) que en un solo software se logra hacer la toma de datos y ver los valores recolectados, pero este genera archivos .dat que al final son manejados con Excel.

Esto anterior genera que el flujo de trabajo se vea cortado varias veces al tener que utilizar más de cinco software diferentes para manejar los datos obtenidos por los diferentes sensores. Esto genera que se tengan que capacitar al personal en múltiples programas y deban aprender a generar códigos en diferentes lenguajes, debido a esto no se han podido instalar ni utilizar el equipo adquirido recientemente por falta de conocimiento técnico de cómo configurarlos en el software, escribir código en CRbasic y conexión física de los sensores al equipo actual.

Al tener un sistema que logre unir todos los datos que se obtienen por los diferentes sensores y solo trabajar desde un programa, facilita el trabajo de manejo de datos y eliminar la necesidad de crear códigos y diferentes formatos para el manejo de datos, lo que permite que la creación de dashboard con todos los datos obtenidos sea más viable. Por otro lado la utilización de sensores inalámbricos facilita la instalación de estos y las falsas mediciones. Al crear un sistema integrado se reducen los tiempos de medición y procesamiento de datos para entregar informes en un menor tiempo.

## 1.3 Objetivos y estructura del documento

### 1.3.1 Meta

Implementar un sistema integrado funcional y automatizado para monitoreo estructural de puentes capaz de integrar los datos de al menos tres tipos de sensores distintos, manejando la información en un solo sistema que permita visualizar los resultados en un dashboard.

### 1.3.2 Objetivo General

Desarrollar un sistema integrado para un sistema de monitoreo estructural de puentes, para el procesamiento y visualización de datos.

### 1.3.3 Objetivos Específicos

- Implementar sistema inalámbrico con un ESP32 para recopilar datos de una galga extensiométrica o un LVDT para que almacene los datos y sean analizados.
- Desarrollar un sistema de integración para el almacenamiento y la verificación de datos, compatible con los distintos equipos disponibles.
- Crear un dashboard interactivo que muestre los datos recopilados por el sistema en sus distintas pruebas de carga.

### 1.3.4 Estructura del Documento

El presente documento está organizado en cinco capítulos principales, más un apartado de Anexos, para facilitar la lectura y su distribución se detalla la estructura y el contenido de cada sección:

**Capítulo 1: Introducción** Define el contexto del proyecto, establece la problemática de investigación, revisa los antecedentes relevantes y presenta los objetivos generales y específicos del trabajo.

**Capítulo 2: Marco Teórico** Establece los fundamentos conceptuales y técnicos esenciales para la comprensión del tema y la solución propuesta. Incluye la explicación de los componentes clave, como los sensores utilizados, los protocolos de comunicación (*SPI* e *I2C*), y los sistemas implementados.

**Capítulo 3: Diseño y Desarrollo de la Solución** Describe el proceso de diseño y documenta la implementación técnica de la solución desarrollada.

**Capítulo 4: Resultados y Análisis** Presenta de manera sistemática los resultados obtenidos de la implementación, seguido de un análisis de los resultados obtenidos.

**Capítulo 5: Conclusiones y Trabajo Futuro** Recapitula los hallazgos principales del estudio, valida el cumplimiento de los objetivos y sugiere líneas de investigación o mejoras para el trabajo futuro.

**Anexos** Incluye material de apoyo que facilita la comprensión técnica del proyecto, como código fuente, tablas de mediciones o manuales de usuario.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1 Conceptos Generales

En esta sección se aborda los conceptos generales para entender el contexto al rededor del proyecto y sus mediciones en puentes. Adicional a esto se añaden secciones sobre herramientas y equipo que se utiliza en el proyecto.

#### 2.1.1 Monitoreo de Salud Estructural (SHM)

El Monitoreo de Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés de *Structural Health Monitoring*) define como el registro, ya sea permanente, continuo o periódico, de parámetros que reflejan la condición y el rendimiento de una estructura civil [9], parámetros se asocian a vibraciones medidas a través de un sensor asociado a una viga de un puente.

Por otro lado, el informe generado por la Universidad de Costa Rica toma el SHM como un estudio más enfocado a las vibraciones que se presentan en las estructuras, estas pueden caracterizarse a través de parámetros dinámicos o modales (frecuencias, amortiguamiento, masa y rigidez). “Es posible extraer experimental y directamente los parámetros modales de las vibraciones del puente, una comparación de las frecuencias identificadas en 2 tiempos distintos permite detectar si hubo cambios en la rigidez durante el lapso, y en caso de no contar con la medición en el estado inicial o “sano” de la estructura ” [14].

El equipo de Campbell Scientific y un estudio realizado en puentes en China se refieren al monitoreo de salud estructural como una disciplina que combina sensores, adquisición de datos y técnicas analíticas para evaluar de forma continua la condición de una estructura civil. Este monitoreo permite identificar el deterioro estructural, validar los diseños y optimizar las labores de mantenimiento [30][21]

Un sistema SHM está compuesto por cuatro subsistemas principalmente, por sensores los cuales se encargan de medir parámetros físicos como vibraciones, deformación y desplazamiento, también se tiene un sistema de adquisición de datos y transmisión de estos, otro subsistema es el almacenamiento y procesamiento de estos datos y por último se tiene un

módulo de evaluación de la condición estructural para detectar posibles daños [30].

En los últimos años se ha desarrollado tecnologías de sensores inalámbricos y transmisión de datos impulsando el SHM como ha sido en los puentes *Juanguyin Bridge* y *Runyang Bridge* en China, donde monitorean viento, temperatura, aceleraciones, deformaciones y desplazamiento; esto ha permitido tener una alerta temprana y estrategias para el mantenimiento predictivo en la infraestructura [30]

En el caso de Estados Unidos en el puente de Oregon el *Fremont* de Portland se monitoreó y se utilizaron varios registradores de datos de *Campbell Scientific* (CR800 y CR1000) para utilizar 64 sensores de deformación y ver los ciclos de esfuerzo debido a la carga térmica, donde estos datos se transmitieron de forma inalámbrica para su análisis continuo.[21]

### 2.1.2 Dataloggers

Un data logger es un grabador independiente que monitorea y registra datos en tiempo real, es una opción al sistema de adquisición de datos cuando no se requiere una grabación a alta velocidad y en tiempos prolongados como meses o años. Estos se caracterizan por su frecuencia de muestreo, tipos de entrada, recuento de canales, almacenamiento de datos, tiempos de grabación, interfaz de usuario, sistema de poder y monitoreo local [27].

La velocidad de muestreo no es alta, la mayoría son para señales lentas, para guardar datos a lo largo del tiempo por un largo periodo, pero a baja frecuencia de muestreo como 1 muestra por segundo o 100 por canal [27].

La mayoría de las entradas de los sensores están limitados a tensiones bajas y corrientes de 4 a 20mA, la mayoría de las entradas no se están cambiando frecuentemente y tienen entradas de tornillo.[27]

### 2.1.3 Tipos de Esfuerzos Físicos

Como se menciona en la revista de la federación de enseñanza de Andalucía “los elementos de una estructura deben aguantar, además de su propio peso, otras fuerzas y cargas exteriores que actúan sobre ellos”[6], esto depende de la posición que tenga en la estructura, esta deformación depende de su dirección, sentido o punto de aplicación de la fuerza.

Estas fuerzas tienen diferentes orígenes como puede ser soportar su propio peso, debido a movimiento o vibraciones que se puedan producir en los elementos que conforman la estructura y también por agentes externos que puedan agregar fuerzas (como pueden ser vientos, carros, temperaturas entre otros factores). [6]

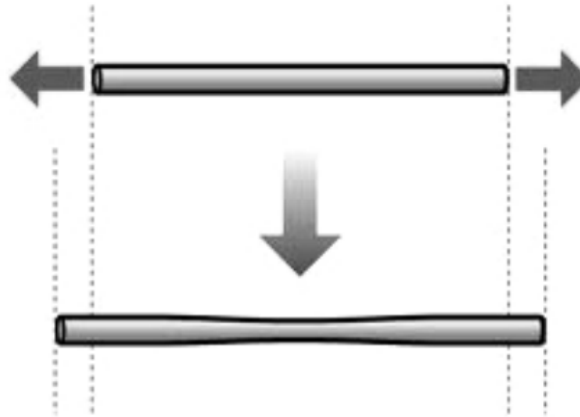
Algunas cargas que puede sufrir la estructura son las cargas estáticas y cargas dinámicas, la carga estática es la fuerza que se aplica gradualmente comenzando en un valor inicial definido en cero hasta su valor máximo, donde esta fuerza va incrementando poco a poco como cuando ingresa un vehículo pesado a un puente y la estructura poco a poco va deformándose y reaccionando al peso que se le ejerce.

Otra carga que sufre la estructura es la carga dinámica, esta es la fuerza que incrementa súbitamente, esta tiene relación con la velocidad y la energía cinética que tenga esta. Puede darse una carga súbita que es cuando el valor máximo se aplica de forma instantánea, otra es la carga de choque libre que es cuando se produce por la caída de un cuerpo sobre un elemento resistente, por último, se tiene la carga de choque forzado que se debe cuando dos masas colisionan y se deforman después del choque.[6]

La tensión de contracción se opone a la fuerza que tiende a estirar un cuerpo, esto ocurre cuando un cuerpo sufre cargas de igual magnitud en sentido contrario y divergente, por otro lado, la tensión de compresión es la que se opone a la fuerza de compresión cuando 2 fuerzas someten a un cuerpo de manera convergente.[6]

### Tracción

Es el esfuerzo al que se somete un cuerpo al aplicarle dos fuerzas que actúan en sentido contrario y tienden a estirarlo o alargarlo; este alargamiento se produce en el eje X disminuyendo su dimensión del eje Z (tomando el eje X como el plano horizontal y el eje Z el vertical)



**Figura 2.1:** Fuerza de Tracción [6]

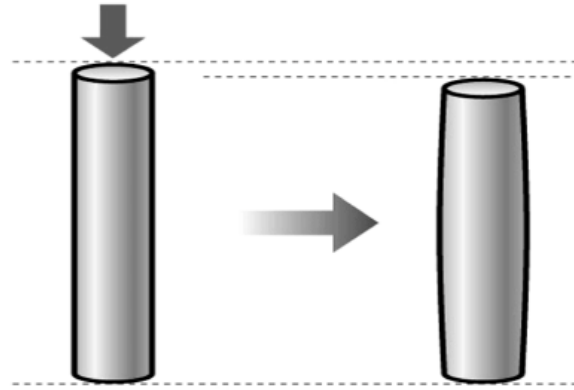
Si el cuerpo luego de sufrir estas fuerzas permanece deformado o alargado, este se considera que tiene un comportamiento plástico, si el cuerpo más bien vuelve a su estado original previo a su alargamiento este se considera que tiene un cuerpo elástico. Este esfuerzo aparece en cadenas, cables, tornillos entre otras estructuras de puentes.

Para calcular el alargamiento total de una pieza, se utiliza la formula 2.1 donde  $\delta$  es el alargamiento expresado en  $cm$ ,  $\mathbf{F}$  la fuerza de tracción en  $Kg$ ,  $\mathbf{L}$  la Longitud de la pieza en  $cm$ ,  $\mathbf{E}$  es el módulo de elasticidad del material en  $kg/cm^2$  y  $\mathbf{A}$  es la sección transversal en  $cm^2$ .

$$\delta = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad (2.1)$$

## Compresión

Es el esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de fuerzas que actúan en el mismo sentido, es un esfuerzo contrario a la tracción, lo que produce acortamiento o aplastamiento en un cuerpo [6].



**Figura 2.2:** Fuerza de compresión [6]

Los pilares y columnas de una estructura son ejemplos de compresión, estos elementos se diseñan para resistir esfuerzos de compresión como se ve en la figura 2.2. Para el cálculo del acortamiento se utiliza la misma ecuación 2.1 y para el acortamiento unitario se utiliza la ecuación

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.2)$$

### 2.1.4 Streamlit

*Streamlit* es una biblioteca de Python para crear aplicaciones web interactivas, que va dirigido al análisis y visualización de datos, es una herramienta de código abierto que permite a los desarrolladores crear aplicaciones de datos de manera sencilla; esto genera que en poco tiempo se tenga un fácil interacción en los datos y gráficas usadas, con posibilidad de sincronizar datos en tiempo real y analizar datos en línea [26].

Permite mostrar información de manera clara, puede ser compartida fácilmente en línea y tener colaboraciones entre equipos y presentar los datos de manera profesional[26].

Algunos puntos a favor que presenta según la página de Pypro [26]:

- **Facilidad de Uso:** Permite a desarrolladores y científicos de datos transformar scripts de Python en aplicaciones interactivas en pocas líneas de código.
- **Componentes Interactivos:** Ofrece variedad en widgets interactivos como sliders, botones, checkboxes y selectboxes.
- **Actualización en tiempo real:** Cada vez que se hace una interacción el script entero se ejecuta y se utiliza caché para no recalcular todo.

## 2.2 Sensores

### 2.2.1 Galga Extensiométrica ST350

Para la medición de deformaciones se utiliza la unidad de medida  $\mu\epsilon$  (*micro strain*) se utiliza para hacer evaluaciones de pruebas de cargas estáticas y dinámicas, estas destacan por su precisión, estabilidad y adaptabilidad a los entornos, estas funcionan mediante la variación de la resistencia eléctrica en un conductor o semiconductor en la superficie del material que cuando hay una deformación provoca un cambio proporcional a su resistencia y produce microdeformaciones o microstrain ( $\mu\epsilon$ ) [30]

El modelo ST350 es una galga extensiométrica especializada para aplicaciones de monitoreo estructural permanente. Este sensor tiene la capacidad de medir microstrain de  $\pm 3000$  y una sensibilidad de  $500mV/V$  para tener mediciones muy precisas [18].

Este sensor se puede instalar directamente a las superficies metálicas o de concreto mediante anclajes o adhesivos epóxicos, este tiene protección IP68 que lo hacer resistente a polvo y agua. Este sensor se suele utilizar para monitorear columnas, arcos, vigas o cables[3].

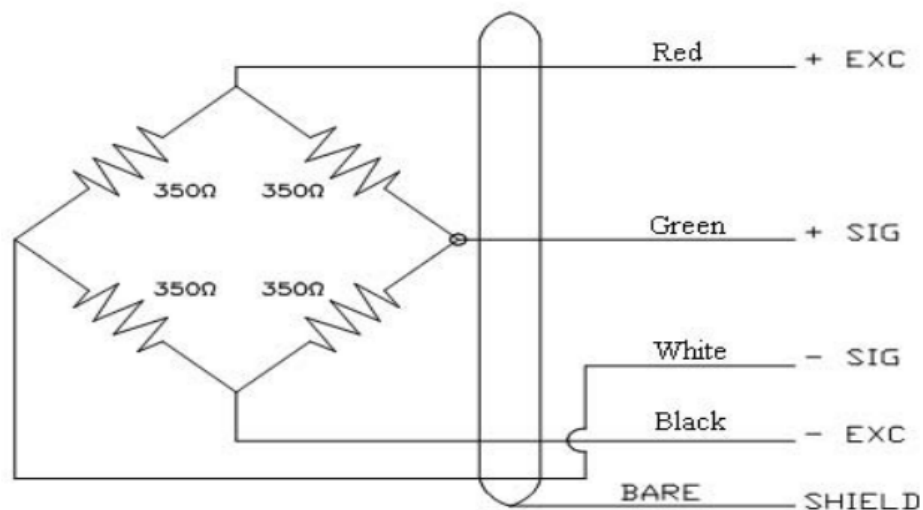
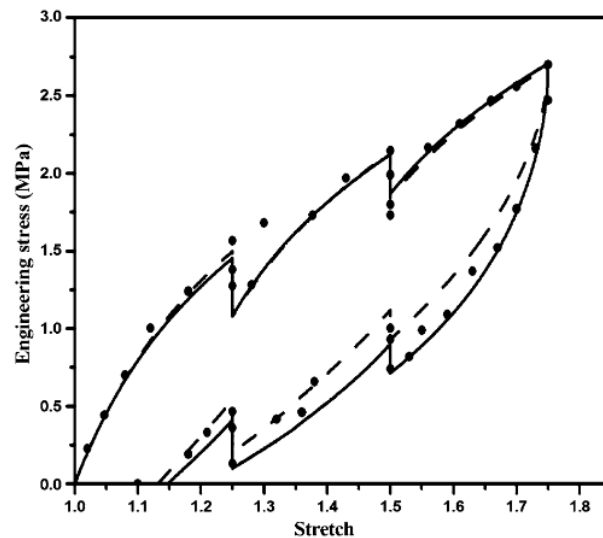


Figura 2.3: Diagrama de cableado eléctrico [3]

En la figura 2.3 se observa el sistema de varias galgas para crear un puente de Wheatstone completo, donde este se alimenta con 2 a 5 voltios y consume una corriente máxima de aproximadamente  $14mA$  y una salida de tensión de más menos 2 voltios [3].

### 2.2.2 Plasticidad y comportamiento viscoelástico

Cuando un material se somete a esfuerzos mecánicos, cuando suceden deformaciones prolongadas o elevadas, aparece un comportamiento viscoelástico o plástico y esta deformación depende del tiempo, los materiales no se recuperan inmediatamente tras retirar la carga, el tiempo de recuperación dependerá de cada material [31].



**Figura 2.4:** Plasticidad de sólidos en múltiples pasos de medición [31]

Este fenómeno afecta a las galgas extensiométricas ya que estos sensores registran variaciones de resistencia eléctrica asociada a la deformación local del material. De acuerdo con Tauheed y Sarangi [31] los materiales con elasticidad limitada, como elastómeros o polímeros metálicos, presentan “*stress-softening*” o efecto Mullins, donde presentan una disminución progresiva del esfuerzo requerido para alcanzar un mismo nivel de deformación tras ciclos repetidos de carga y descarga.

### 2.2.3 Transformadores Diferenciales Variables Lineales

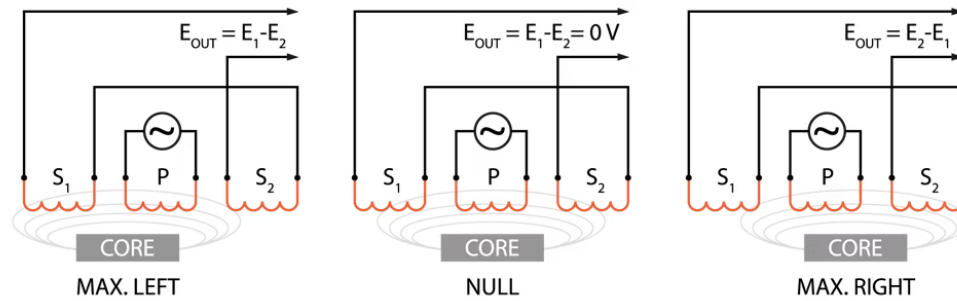
Se utilizan para medir el desplazamiento lineal y la posición en distancias cortas, que pueden ir de millonésimas de cm a 0.7 metros [28]. Este tiene una base de posición fija y al extremo una varilla que se mueve dependiendo de su posición lineal para delante o hacia atrás.

Dentro del LVDT tiene una bobina principal, cerca de esta tiene 2 bobinas secundarias, para la bobina principal esta recibe una tensión constante en corriente alterna aproximadamente de 3kHz, dependiendo de la posición de la varilla esta puede estar en un punto muerto donde el flujo magnético para las otras 2 bobinas secundarias tendrán el mismo valor [28] dependiendo de la diferencia entre las 2 bobinas secundarias así registra su posición.

Para los LVDT en corriente continua, estos son más fáciles de conectar, pero poseen más elementos que pueden acortar su vida útil. La salida de corriente de estos sensores es aproximadamente de 4 a 20mA y no requieren acondicionamiento de señal [28].

Los LVDT presentan alta resolución y son resistentes a daños, también pueden funcionar en condiciones de temperatura críticas desde los  $-200$  grados Celsius a los 1200 grados Celsius; poseen bajo histéresis y alta repetibilidad [13].

El LVDT de corriente continua se utiliza para el monitoreo constante para pozos, cimientos o para registrar desplazamientos, permite ser trabajados en ambientes con temperatura, humedad y polvo [13].



**Figura 2.5:** Máximo, mínimo y nulo en bobinas del LVDT [28]

Este sensor trabaja con tensiones desde los 6 a 18V, y no necesita de corrientes altas para trabajar, tiene una salida de  $\pm 2.2V$  al trabajar con tensiones diferenciales y puede desplazarse cerca de los 50mm [13].

## 2.2.4 Acelerómetros

Los acelerómetros se utilizan para medir intensidades de la vibración, miden las aceleraciones en unidades de “g” y esta es equivalente a una aceleración sentida en la tierra[8]. Algunas características son la sensibilidad, el rango dinámico, su respuesta en frecuencia, ruido y temperatura; la mayoría de estos sensores se basan en la ley de Hooke y la segunda ley de Newton [35].

$$F = ma = kx \quad (2.3)$$

En la ecuación 2.3 la fuerza será igual a masa por aceleración, y se puede también hacer una equivalencia con un una masa que al desplazarse puede deformar un resorte que tendrá una constante elástica “k” y “x” la cantidad de desplazamiento. [35]

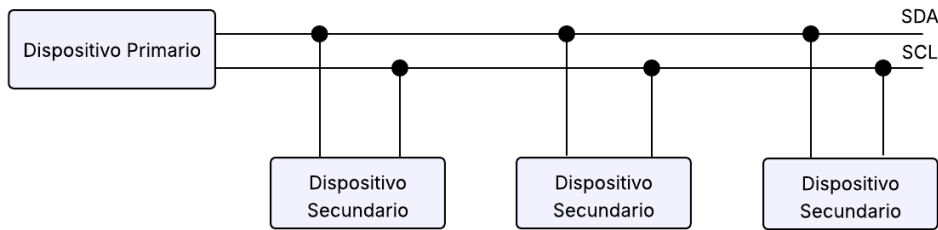
Hay acelerómetros MEMS que su nombre viene de un sistema microelectromecánico, ya que posee tanto sistemas electrónicos como mecánicos, donde la parte mecánico tiene un papel de transductor y este reacciona ante una variación física. Por otro lado el sistema electrónico se encarga de tomar la parte de medición del sensor y traducir la información que recopila el sistema [35]

## 2.3 Protocolos de Comunicación

### 2.3.1 I2C (Inter-Integrated Circuit)

Para dar una solución a no utilizar tantos pines para conectar diferentes módulos y que cada dispositivo se pueda comunicar de manera eficiente y estar conectados entre sí se crea el protocolo  $I^2C$  o I2C, este se desarrolla en los años ochentas para crear un protocolo de corta

distancia, bajo ancho de banda y conectar todos los dispositivos con solo dos cables, el serie (SDA) y el reloj (SCL) [20].

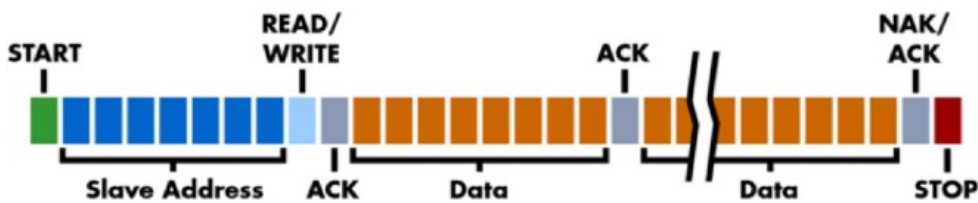


**Figura 2.6:** Protocolo I2C comunicación dispositivo primario a secundario

Este protocolo utiliza dos líneas de drenaje o colectoras bidireccionales, la línea de datos en serie y la línea de reloj, trabajando con tensiones de 3,3V o 5V [20].

Este protocolo funciona con un amo que inicia una comunicación y el dispositivo secundario responde, donde el dispositivo primario manda una condición de inicio y los demás deben esperar a obtener instrucciones, el dispositivo primario manda una dirección del dispositivo secundario con su destino y un indicador para lectura o escritura [20].

El dispositivo secundario que tenga esta dirección responde con una señal de recibido positivo o de recibido negativo y se comienza la comunicación entre el dispositivo primario y el dispositivo secundario en el bus de datos. Entre ellos pueden recibir o transmitir datos dependiendo de si es comunicación de escritura o lectura. El transmisor envía 8 bits de datos al receptor y responde con un bit de recibido. Se pueden conectar hasta 128 dispositivos secundarios y todos permanecen sincronizados a un reloj central [20].



**Figura 2.7:** Comunicación I2C bus de datos [20]

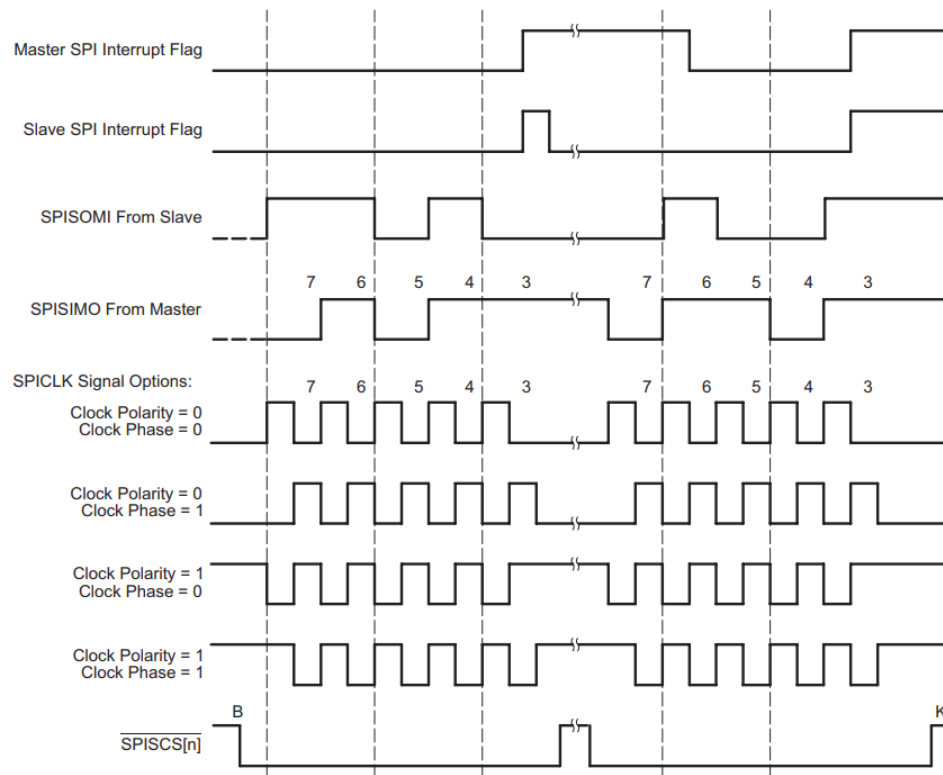
Este protocolo tiene diferentes velocidades de comunicación que van desde los  $100kHz$  a los  $5MHz$

### 2.3.2 SPI (Serial Peripheral Interface)

Protocolo de Interfaz Periférica Serial (SPI) es un estándar de comunicación para el intercambio de datos a alta velocidad en sistemas embebidos. Es una comunicación serial síncrona para comunicación a corta distancia, fácil de usar y rápida para comunicarse [29].

El protocolo funciona a través de cuatro líneas de señales, que garantiza una comunicación síncrona entre ellas [29].

- Dispositivo primario o Controlador: Controla el proceso de comunicación, inicia el intercambio de datos.
- Dispositivo secundario: Uno o más dispositivos que responden a lo que indica el controlador.
- MOSI (Master Out Slave In): Transmite datos del controlador al dispositivo secundario y opera de 3,3V a 5V.
- MISO (Master in Slave Out): esta línea transmite datos del dispositivo secundario al controlador.
- SCLK (Reloj Serial): Generado por el controlador, esta señal de reloj se encarga de sincronizar toda la transmisión de datos, maneja el momento en que se transfieren los datos.
- SS/CS (Selección de dispositivo secundario/ Selección de chip): Control de selección de dispositivo secundario activo. Se habilita cuando la línea está en nivel bajo.



**Figura 2.8:** Ejemplo de comunicación SPI [32]

En la figura 2.8 se explica cómo se sincronizan los datos y las interrupciones entre el controlador y el dispositivo secundario, esto según la polaridad y fase del reloj. El SPI tiene cuatro modos de operación determinados por polaridad del reloj CPOL y fase del reloj CPHA [32].

**Tabla 2.1:** Modos de operación del SPI

Modo	CPOL	CPHA	Estado	Flanco de muestreo
0	0	0	Bajo	Subida
1	0	1	Bajo	Bajada
2	1	0	Alto	Bajada
3	1	1	Alto	Subida

Para la transmisión de datos cada byte tiene 8 bits transmitidos y sincronizados con el reloj, el controlador genera los pulsos de reloj y controla cuando empieza la transferencia y cada ciclo de reloj se transmite un bit por SPISIMO; ambos dispositivos leen los datos en el flanco configurado según el CPHA [32].

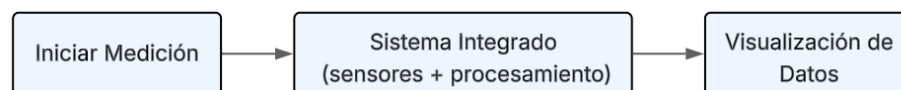
# Capítulo 3

## Sistema integrado con conexión inalámbrica

Para este capítulo se desarrolla la solución el sistema inalámbrico para comportarse de manera similar al equipo industrial y que sea una alternativa para situaciones donde se requieran más sensores, una instalación rápida y que no se requiere una precisión mayor a la industrial. Se desarrolla la lógica y diseño que tendrá el sistema integrado de recopilación de datos, cómo es su flujo de trabajo y cómo hace una estandarización de los archivos y datos. Por último se desarrolla el diseño que tendrá el sistema de visualización de datos que genera el sistema central de manejo de datos.

### 3.1 Introducción a la solución Planteada

Se plantea un sistema que integra ambos equipos de las diferentes empresa que pueda disminuir la cantidad de software que se utilizan para realizar las mediciones y facilitar el manejo de los datos, donde solo se tenga que medir y visualizar los datos obtenidos. Adicional a lo anterior se crea un diseño inalámbrico para las galgas extensiométricas ST-350 y los LVDT 1450 para que estas no tengan interferencia por movimientos externos en la medición.

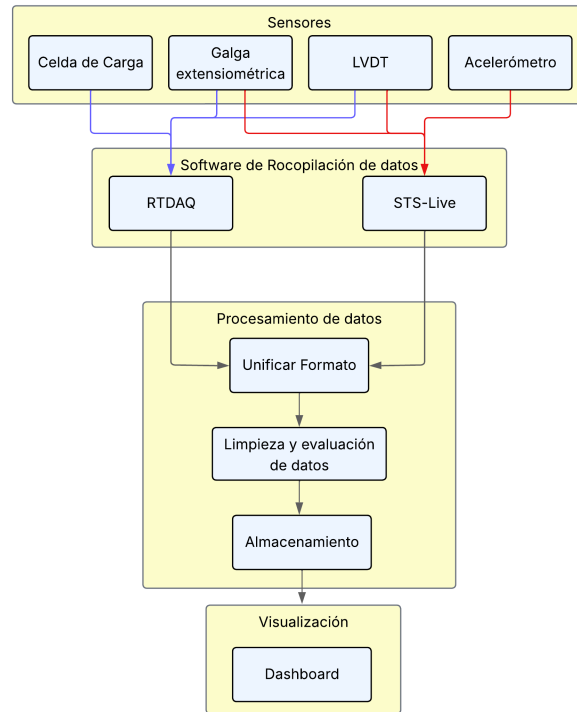


**Figura 3.1:** Diagrama de primer nivel

En el diagrama de primer nivel 3.1 se da un flujo de lo que hará el sistema integrado, generar una medición y que luego de ser procesada se pueda visualizar los diferentes sensores y pruebas realizadas.

En la figura 3.2 se observa un diagrama a más detalle del sistema utilizado, se visualiza las mediciones con cada equipo y al generarse un archivos de datos estos son procesados y se

utilizan en un solo formato, para facilitar el manejo y visualización de los datos en un solo programa.



**Figura 3.2:** Diagrama de bloques del Sistema

El formato manejado para los datos recopilados por el sistema es .csv que es el formato que utilizado por el equipo técnico del CIVCO, la visualización de los datos en el dashboard se hace mediante la biblioteca de python Streamlit para observar las gráficas de los diferentes sensores y sus diferentes pruebas.

En el caso de la creación de sensores inalámbricos se utiliza un ADC ADS1115 para convertir las señales analógicas a digitales provenientes del sensor, esta señal digital es enviada al ESP32 que procesa los datos, los almacena en una tarjeta microSD mediante una comunicación SPI.

Para la prueba de carga estática se utiliza el equipo de Campbell Scientific, con un datalogger CR1000 y un CR3000 recopila datos y almacena estos en archivos .dat, en esta prueba se utilizan galgas extensiométricas, LVDT y celda de carga. Se crea un programa en CRbasic para la conexión de todos estos sensores y un multiplexor AM16/32 para tener mayor número de entradas.

Por otro lado con el equipo de Bridge Diagnostics con el STS4 se conectan los acelerómetros, LVDT y galgas extensiométricas y los datos son guardados por su propio datalogger y es guardado en un formato .tdms

Con un programa generado en python toma los formatos .tdms, .dat y los pasa a formato .csv, una vez cambiado el formato se toman los datos generados por el ESP32 en .csv y genera un dashboard que se muestra con Streamlit. Esto genera un sistema que pueda trabajar con

todos los sensores disponibles y se puedan manejar todos los datos en un solo sistema y ser presentados de una manera amigable.

Componentes principales:

- CR3000 + Multiplexor AM16/32 (Para pruebas de campo)
- CR1000 (Para pruebas de laboratorio)
- ESP32 (Para nodos inalámbricos)
- STS4 (Para pruebas de campo)

## 3.2 Activación del equipo disponible

Como se expresa en el primer capítulo, mucho del equipo a trabajar no se encuentra activo por falta de conocimiento técnico de como instalarlo y generar el código para hacer mediciones directamente desde el datalogger de su respectiva empresa. Por esta razón se empieza con la activación del equipo a utilizar.

### 3.2.1 Activación equipo de Campbell Scientific

Para realizar la conexión de los sensores LVDT, se crea un primer código de prueba para asegurar el correcto funcionamiento del sensor con el datalogger CR1000, este se genera con el software RTDAQ con su herramienta de Short Cut como se observa en la figura 3.3 y posteriormente se modifica con CRbasic para hacer el código más entendible y poder modificar el factor de calibración para cada distinto sensor.

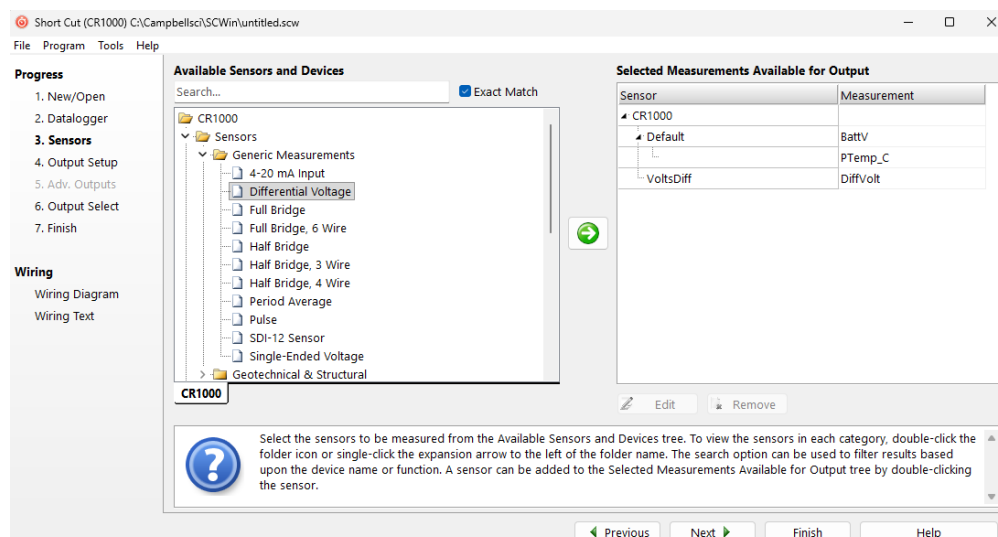
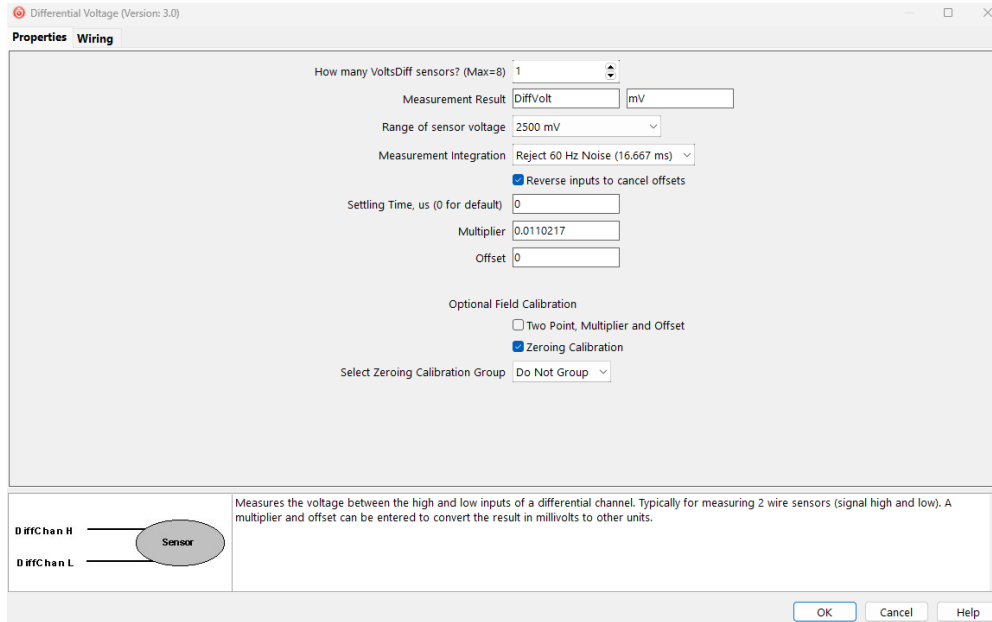


Figura 3.3: Agregar sensor LVDT con Short cut

Se crea un nuevo programa desde Short Cut y se escoge el datalogger a trabajar, en este caso se toma el CR1000; luego se toma un sensor de medidas genéricas (ya que el sensor LVDT no aparece por defecto en este software) y se toma un sensor de voltaje diferencial como se muestra en la figura 3.3



**Figura 3.4:** Valores para inicializar el LVDT

Para agregar los correctos valores en el Short Cut se revisa la hoja de datos del sensor 1450 dc-dc LVDT [13] ya que este se alimenta con una tensión desde los 6V a los 18V con tensiones de salida de  $\pm 2.2$  y se agrega un multiplicador por su sensibilidad (este valor es dado por una empresa de calibración certificada) para este sensor se tiene un valor de  $90.73\text{mV}/\text{mm}$ , este valor ingresa al dividir 1 entre la sensibilidad, lo que genera el valor aproximado de 0.0110217, esto se observa en la figura 3.4.

La conexión requerida para que entre en funcionamiento el LVDT necesita ser alimentado por el datalogger por el canal de 12V con su cable rojo (Ex+), su cable negro y transparente (Ex- y shield) van a tierra del datalogger, el cable verde y blanco (output + y output -) van a H3 y L3 respectivamente según se hizo la conexión en CRbasic.

Se genera el código de Short Cut y en CRbasic se escoge el canal donde se mide los datos desde el datalogger CR1000, se utiliza una regla para medir el desplazamiento que tiene y comprobar que los milímetros indicados por el LVDT corresponden con el desplazamiento físico observado en la regla.

Se observa en la figura 3.5 la variable llamada “Disp-mm” que corresponde al LVDT que está tomando los datos, este se calibra a cero en 7 cm, por lo tanto 7 cm será el punto de referencia a 0 mm de desplazamiento. Al mover el LVDT 10 mm en la regla como se observa en la figura 3.6 se espera que ambas mediciones sean iguales, tanto en la medición física como en la digital en el datalogger.

Field Monitor	
RecNum	99
TimeStamp	3/9/2025 11:25:18
Disp_mm	-10,1002900
Disp2_mm	4,96
Strain_2	NAN
Vr1000_2	NAN
Strain_3	-33,17
Vr1000_3	0,07

**Figura 3.5:** Medición digital con el LVDT en base y regla

Para hacer la medición se coloca en 7cm y se calibra a cero, a partir de aquí si se desplaza hacia delante tendrá valores positivos de medición y si se aleja tendrá valores negativos. Esto se refleja en la imagen 3.6 al correr la base del LVDT 1 cm este obtiene mediciones negativas de -10mm.



**Figura 3.6:** Comprobación de desplazamiento del sensor LVDT

Una vez que se comprueba que el sensor mide correctamente se crea un nuevo programa en short cut, pero esta vez se le agregan dos galgas extensiométricas st-350 y una celda de carga más un sensor LVDT adicional. El código generado para esta sección se encuentra disponible para su consulta en el repositorio de github que esta en la sección de Anexos A.2.

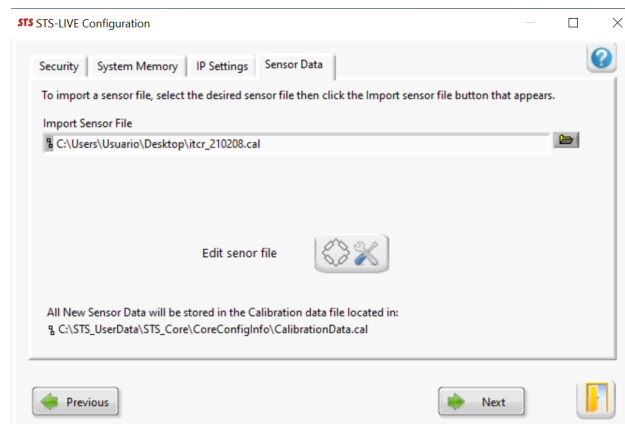
Con esto anterior se ponen activos todos los sensores disponibles para las pruebas de carga estática con el CR1000, que estas son mediciones generadas dentro del CIVCO. Para el caso de las pruebas de campo se utiliza el datalogger CR3000.

Con el CR3000 se hace el mismo procedimiento anterior con el CR1000, se crea un Short Cut para el datalogger CR3000 y se agregan dos sensores LVDT, una celda de carga y un multiplexor con las 16 galgas extensiométricas, donde se puede agregar otros sensores en dado caso de ser necesario en vez de las 16 galgas. El código de esta sección se encuentra de igual forma en el github de anexos para ser consultado.

### 3.2.2 Activación equipo Bridge Diagnostics

Para el caso del equipo de BDI se tiene un equipo inalámbrico con varios nodos para galgas extensiométricas, LVDT y acelerómetros. Este equipo no se encuentra activo por problemas al leer los archivos de calibración que cargan los datos e información de cada sensor conectado al software de STS live desde el programa de carga *STS live configuration*, para solucionar este problema temporalmente hasta que el equipo de BDI manden el archivo con los valores a cargar, se activa cada sensor de manera manual con permisos de administrador y se ponen los valores necesarios según su hoja de datos.

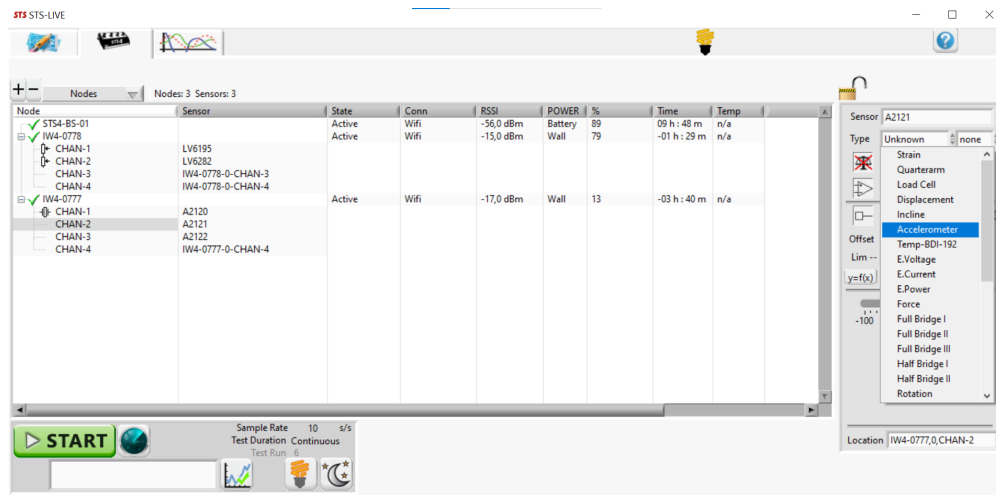
Para usar el equipo se abre el programa “STS live configuration”, en el apartado de *Security* se establece una contraseña y nombre de administrador, luego se establece la dirección IP tanto para que la laptop y el equipo de STS 4 se conecten a una misma red y puedan enviarse datos. Una vez realizados estos pasos (Estos pasos anteriores se pueden consultar en [7], no se muestran por temas de información sensible del CIVCO) se carga el archivo de calibración como se observa en la figura 3.7 y se envía al software STS Live al darle al botón “Next” y al ícono de la puerta en la parte inferior derecha.



**Figura 3.7:** Carga de archivos de calibración

Una vez que se carga el archivo al programa, se abre el software STS Live, dentro del software se ingresa la contraseña y nombre de administrador para tener permisos para modificar los datos que se cargaron al equipo. Al dirigirse al apartado de configuración del software en la segunda pestaña de la parte superior izquierda se observa que no se logran cargar los datos de calibración correctamente ni el programa logra identificar que tipo de sensores son, por lo tanto se procede a modificar cada canal de manera manual para agregar sus datos, se debe especificar el tipo de dato al que pertenece el canal al que se conectó el sensor, su tensión de entrada y salida, su unidad de medición y el rango de trabajo de este. Una vez que se modifican los datos con los permisos de administrador se verifica que los sensores los esté leyendo el software STS live, esto se observa en la figura 3.8.

y se activa manualmente cada sensor se realizan las mediciones con los sensores y se exportan estos datos en formato .tdms (no se exportan en formato .dat porque el software presenta fallas con esta opción)



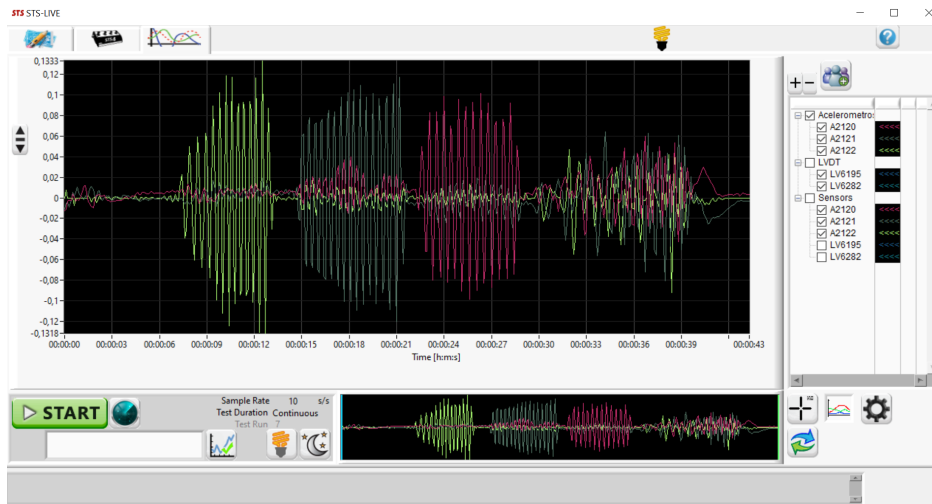
**Figura 3.8:** Ingreso manual de sensores con permiso de administrador

Una vez que se verifica que esta conectado el equipo se puede comenzar la medición al darle al botón “START” que se observa en 3.8, estos datos se guardan automáticamente en la carpeta que se escoge en el apartado de configuración, estos datos se guardan en formato .tdms que es el tipo de formato por defecto (el formato .dat genera errores en este equipo, por lo que no se utiliza).

En la figura 3.10 se observa al equipo de BDI recopilando datos de los acelerómetros, se conectan tres acelerómetros para visualizar la aceleración en tres diferentes ejes (X, Y y Z) como se observa en la figura 3.9 donde estos trabajan desde un bloque de aluminio para que se muevan juntos y puedan registrar la aceleración de cualquier eje, si se desea trabajar los acelerómetros de manera independiente también se pueden medir colocandolos por separado. Las mediciones que se hicieron se observan en la pantalla de visualización de datos del software STS Live en la figura 3.10 y se observa como miden su aceleración en cada eje y luego en conjunto al tener movimiento en todos los ejes.



**Figura 3.9:** Conexión de los acelerómetros



**Figura 3.10:** Toma de datos desde STS-live

Para la visualización de estos datos en .tdms se debe hacer con el software “STS-View”, pero este requiere de una versión específica de “Matlab 13.a” lo que genera que se dependa de otro software adicional, al abrir los archivos desde este nuevo software no se logran observar los datos por temas de versiones y se debe realizar más modificaciones al equipo, por lo que se descarta esta opción y se decide que el mismo sistema de integración implementado más adelante sea el encargado de cambiar el formato a .csv y se puedan leer y observar los datos obtenidos por este equipo desde el nuevo dashboard.

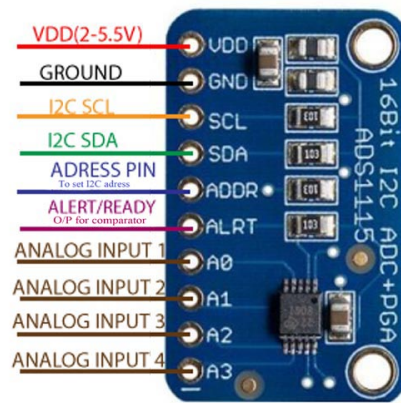
### 3.3 Diseños Inalámbricos del sistema

Para el diseño inalámbrico se busca que puedan tener una fuente de energía independiente, capacidad para guardar los datos recolectados de manera local y que puedan enviar estos datos por WiFi en caso de que te tenga una red disponible.

Adicional a lo anterior se busca que los datos obtenidos sea similares a los datos obtenidos con los diferentes dataloggers anteriormente mencionados, por esta razón se compara los datos de las galgas extensiométricas en ambos dispositivos para ver su precisión.

#### 3.3.1 Diseño para galga extensiométrica

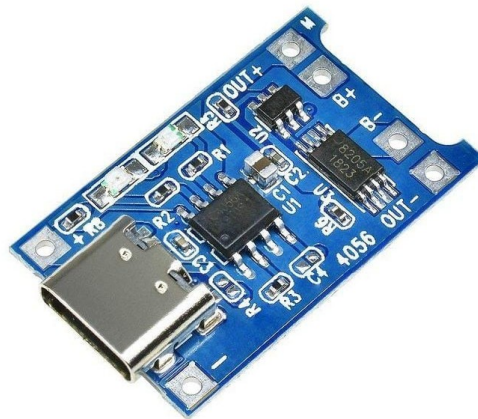
La galga ST-350 al funcionar como un puente de Wheatstone completo, requiere que se haga una medición diferencial para tomar el cambio de tensión inducida por la deformación. Por lo tanto con el ADS1115 permite utilizar sus entradas para medir la diferencia de voltaje entre los pines de señal positiva y negativa; también la sensibilidad del ST-350 es aproximadamente  $500\mu V/V$  lo que los cambios de voltaje de salida son muy pequeños y se necesita medir con precisión, con el ADC de 16 bits permite recolectar estas pequeñas variaciones. Este módulo se comunica con el protocolo I2C junto al microcontrolador.



**Figura 3.11:** Módulo ADS1115 ADC [4]

El ST-350 trabaja con valores de tensión de entrada desde los 2V a los 6V y genera voltajes de salida de  $\pm 2V$  lo que el ADS1115 logra trabajar con estos valores y entregar una señal digital para el microcontrolador.

Para la alimentación del microcontrolador y los demás componentes a utilizar se escoge una batería 18650 para alimentar al sistema, para la carga de esta batería se utiliza el módulo de carga TP4056, este protege a la batería de sobre carga y tensiones bajas lo que le da una protección y eliminan problemas para la batería y el sistema.



**Figura 3.12:** Módulo de carga TP4056 [5]

Para poder suministrar la tensión de 5V que requiere la galga y el microcontrolador se utiliza el módulo elevador de tensión MT3608, y ya que la batería 18650 solo entrega 3.7V y la tensión requerida es mayor y se usa este módulo para poder entregar la tensión necesaria.

Para almacenar los datos generados por el sensor se utiliza el módulo microSD de *adafruit*, este tiene la posibilidad de comunicarse con el microcontrolador por medio del protocolo SPI. Los datos guardados en la microSD se guardan en formato .csv con su fecha, hora, valor de microstrain y tensión de salida.

Para manejar la hora y fecha de los archivos .csv del sistema se utiliza el módulo RTC DS1302, esto porque este módulo permite almacenar la hora y entregar este valor aunque el

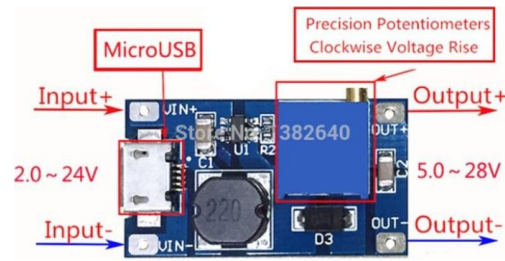


Figura 3.13: Módulo elevador de tensión MT3608 [33]

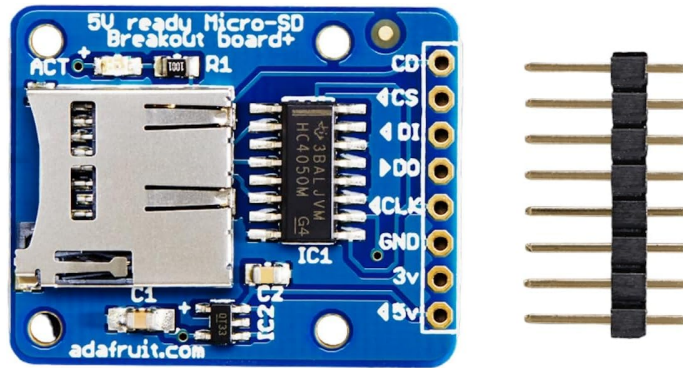


Figura 3.14: Módulo para micro SD [1]

sistema del microcontrolador esté apagado o sin conexión a WiFi.

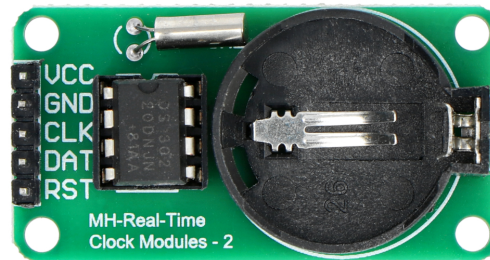
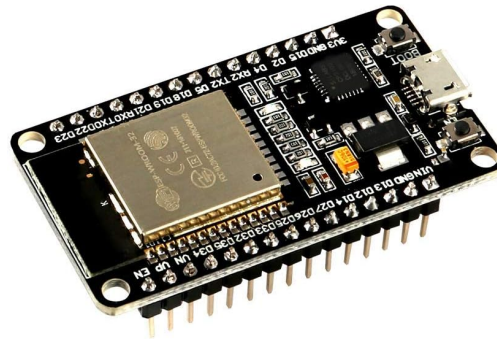


Figura 3.15: Módulo RTC DS1302 [2]

Se utiliza este módulo para no depender de una señal WiFi para poder actualizar la hora y poder escribir en los archivos el tiempo en que se tomaron. Esto porque el microcontrolador ESP32 no tiene un reloj interno que guarde la hora.

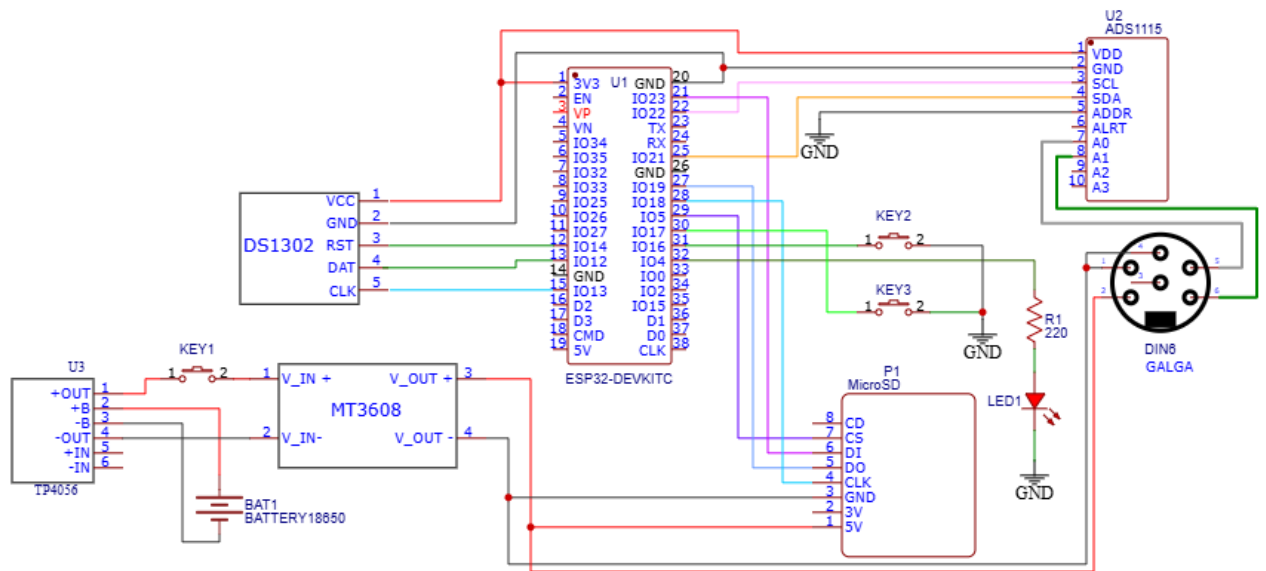
Para procesar todos los datos, guardarlos y enviar los datos se utiliza el microcontrolador ESP32, esto por su capacidad de conectividad inalámbrica por WiFi y Bluetooth, cantidad de pines versátiles y bajo consumo energético para poder coordinar todos los componentes del sistema.

Por otro lado al tener pines configurables se pueden adaptar a los diferentes protocolos de comunicación para el proyecto como el I2C para el ADS1115 o el SPI para el modulo micro SD. También su capacidad de procesamiento que tiene con su doble núcleo hace que se pueda manejar todo el sistema al mismo tiempo y enviar estos datos.



**Figura 3.16:** Microcontrolador ESP32 devkit v1 [15]

Para hacer la conexión de la galga ST-350 se utiliza un conector DIN de 6 pines, esta es la entrada que utiliza el equipo del CIVCO para la mayoría de sus sensores, por lo tanto se utiliza una conexión DIN 6 hembra para conectarlo al ADS1115 y alimentarlo desde el MT3608 como se observa en la figura 3.17.



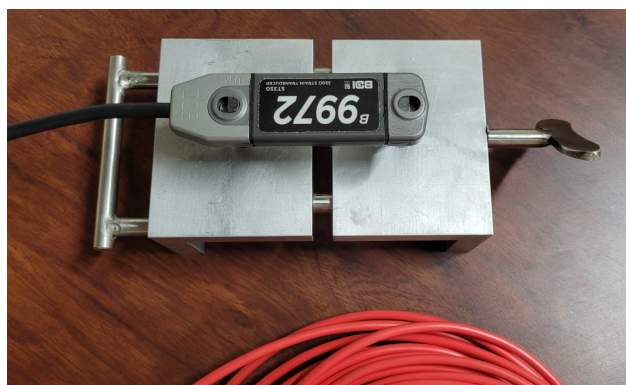
**Figura 3.17:** Esquemático del sistema inalámbrico para ST-350

Adicional a los módulos descritos anteriormente se le añaden 2 botones físicos, uno para la calibración a cero de la medición (ya que siempre hay pequeñas perturbaciones al colocar la galga en el soporte) y el otro botón para la pausa en el envío de datos y la reanudación de la misma, este último botón trabaja en conjunto con el LED 1 que permite saber que hay envío de datos o no, cuando se envían datos el LED está encendido y cuando está en pausa este se apaga.

Para probar las mediciones desde el datalogger CR1000 y compararlo con el ESP32, se utiliza esta base de aluminio 3.18 para hacerle pruebas de compresión y tracción y medir que tanto se desplaza y su valor de microstrain; estos valores se comparan entre sí para ver que tan cercano se está del equipo industrial.

**Tabla 3.1:** Lista de componentes para sistema inalámbrico

Componente	Cantidad
ESP32	1
Módulo micro SD	1
ADS1115	1
DS1302	1
MT3608	1
TP4056	1
Batería 18650	1
Conector DIN6	1
Resistencia 220 $\Omega$	1
Botón pulsador	2
LED	1

**Figura 3.18:** Prueba de compresión y tracción en la galga

### 3.3.2 Diseño para LVDT

Para la creación del sistema inalámbrico para medir con el sensor LVDT se utiliza el mismo diseño de la galga extensiométrica, pero se le añade un módulo adicional MT3608 para que la salida de 5V que tiene el sistema se convierta en una salida de 12V, ya que el LVDT trabaja con tensiones superiores a los 6V.

Lo anterior es a nivel físico del circuito, pero dentro del ESP32 se debe cambiar el código para que cambie su constante de sensibilidad y también cambiar las características de tensión diferencial.

Al tener el mismo diseño prácticamente, se puede realizar una PCB con el circuito general y luego agregarle el módulo por aparte para que no se tengan dos diseños diferentes y de esta manera se pueden usar más sensores dependiendo de la necesidad de la medición se requiera.

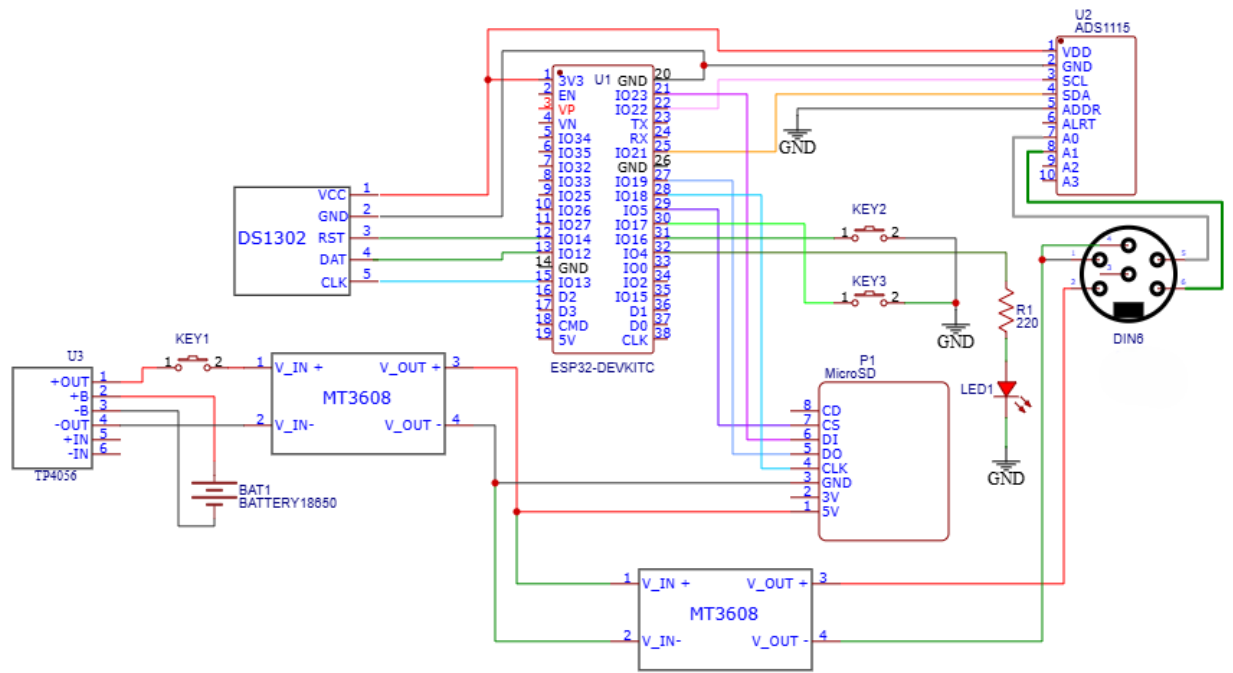


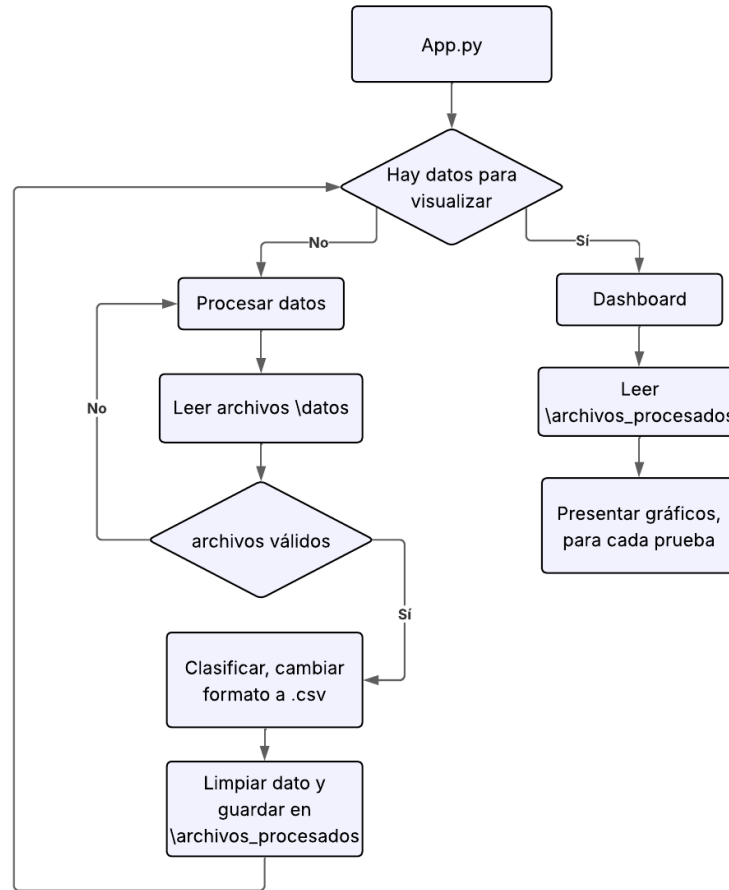
Figura 3.19: Esquemático del diseño del LVDT

### 3.4 Diseño del sistema integrado

Para el diseño del sistema integración de datos. lo que se busca es unir todos los diferentes equipos a utilizar en las mediciones y pruebas de carga, idealmente se buscaría un solo programa pero el equipo de CS y BDI no son de código abierto lo que limita que se pueda hacer todo desde un solo programa.

Se implementa un código en *python* para manejar todos los archivos que son generados desde los equipos y desde este código se estandarizan los datos capturados para que se puedan manejar como un solo conjunto de datos y facilitar su visualización en el dashboard.

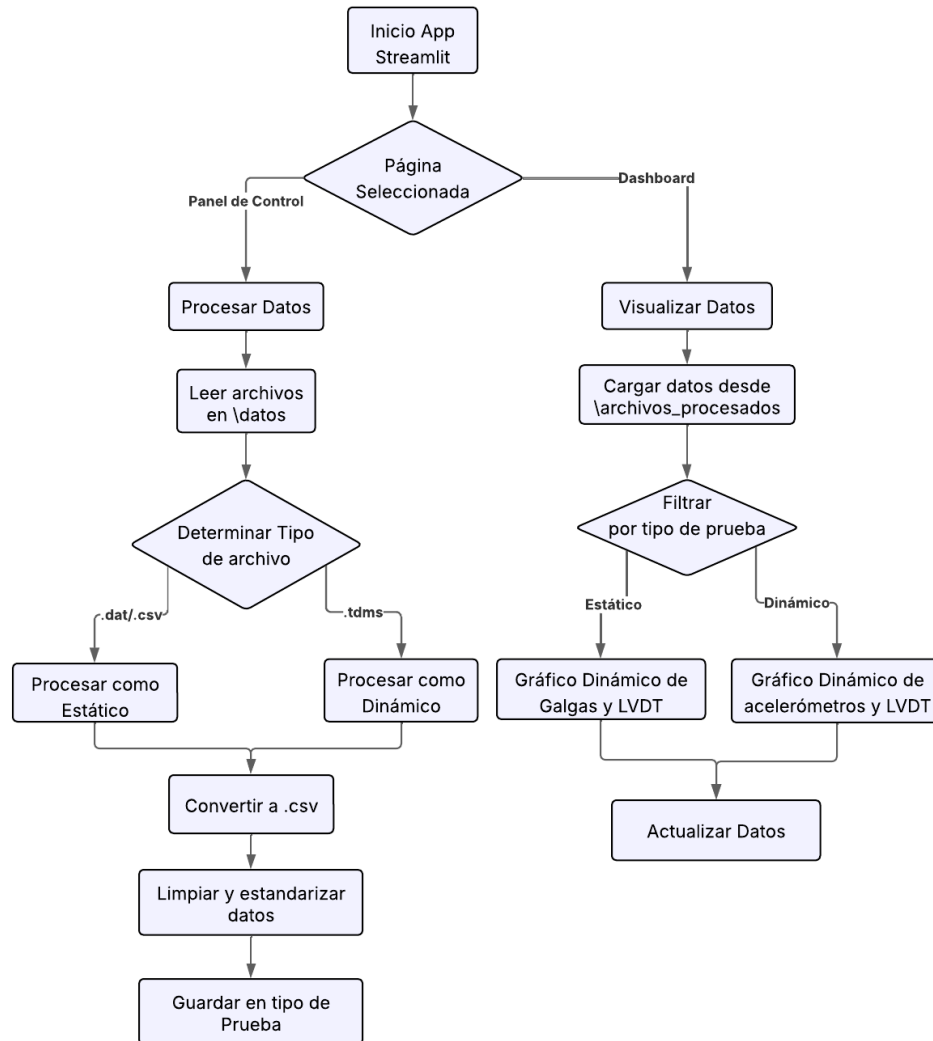
Para tener claro el flujo que tendrá el código se muestran tanto un diagrama general de cómo se maneja la lógica para modificar archivos y visualizarlos, esto se observa en la figura 3.20 y la parte del diagrama de flujo del código principal se observa en la figura 3.21.



**Figura 3.20:** Diagrama del sistema general

Este programa lo que hace es primeramente comprobar que hayan datos a procesar o visualizar, si no hay datos para visualizar no se muestra nada en el dashboard hasta que se carguen archivos dentro de la carpeta “datos”, una vez que se añaden los archivos a esta carpeta se les cambia de formato a .csv, se genera un archivo original sin modificar sus datos y otro modificado donde se eliminan datos inválidos, valores NAN o celdas vacías; también se eliminan columnas de canales que no están siendo utilizados por sensores y se cambian los nombres de las columnas por otros más adecuados para una mejor lectura del usuario.

Una vez que se tiene el archivo listo este se guarda en la carpeta “archivos procesados”, en la pestaña dashboard esta toma los archivos que se encuentran en esa carpeta y los convierte en gráficos de muestras contra desplazamiento, muestra contra *micro strain* o fuerza g contra numero de muestras.



**Figura 3.21:** Diagrama de Flujo de código principal

Con los anteriores diagramas 3.21 y 3.20 se genera la noción de cómo se van a comunicar cada modulo y bloque dentro del código, para captar los datos de los equipos, limpiar estos datos y luego ser presentados en el dashboard, donde estos se separan en dos categorías distintas dependiendo de su tipo de prueba. En las próximas secciones se presenta en detalle cada una de estas etapas.

### 3.4.1 Cambio de formato de archivos

Una vez que los equipos han guardado sus datos, estos datos son cargados a la carpeta del programa de python a utilizar, el código de python con las librerías *TdmsFile* y *pandas* cambian los archivos *.dat* y *.tdms* a archivos *.csv* para mantener un solo formato para todos.

Los código para cambiar el formato se pueden observar en anexos, en las siguientes referencias

1 2

### 3.4.2 Limpieza y estandarización de datos

Una vez que se tiene en el formato requerido se hace una limpieza y estandarización de los datos, primero se busca el punto de calibración en cada archivo, tanto para los archivos .csv que vienen del ESP32 como para los .dat provenientes del equipo de CS, ya que antes de la calibración se tienen datos con ruido por la manipulación de estos para instalarlos y tensarlos o algún valor relacionado a la sensibilidad de cada sensor, por lo tanto se calibra a cero para hacer un offset a todos estos valores.

En el archivo original el programa toma los valores de la fila que estén dentro del rango de -1 a 1 (ya que algunos programas del datalogger no calibran todos los sensores a cero de una vez lo que genera ingreso de ruido en las mediciones) con esta fila cercana a cero se eliminan los datos anteriores y se establece el comienzo de la medición en ese punto.

Para estandarizar los archivos se cambian los nombres a las columnas por nombres iguales para todos para no mezclar nombres en inglés, español o abreviaturas que se utilizan dentro de estos archivos, de igual manera el formato para el registro de la fecha y hora se cambia para mantener un solo formato.

Para el caso de que se tengan valores NAN en las mediciones estos se eliminan por celdas vacías o en caso de ser una fila entera se elimina toda, de igual manera en caso de tener valores no numéricos dentro de las celdas.

El formato que se utiliza para todos los equipos se muestra en tabla 3.3, este tiene una primera columna llamada “TIMESTAMP” donde se encuentra la fecha y la hora de recopilación del dato, seguidamente una columna llamada “RECORD” que muestra el número de muestra que se a tomado (para el equipo de CS y con el ESP32 se toman muestras cada segundo), luego se tiene una columna llamada “Cargakg” para los datos de la celda de carga en kilogramos, luego vienen todas las galgas extensiométricas, estas se identifican mediante un número partiendo desde la 1 hasta n cantidad de galgas que se quieran conectar (siempre manteniendo el formato de strain(#) o Strain-#). Por último se tiene los sensores LVDT que tienen la columna llamada “Dispmm” donde estas se diferencian una con la otra con su número del medio (Disp#mm).

**Tabla 3.2:** Formato a utilizar para pruebas de carga estáticas

TIMESTAMP	RECORD	Cargakg	Strain(1)	Strain(n)	Dispmm	Disp2mm
23/9/2025 11:31:00	0	0.22	-34.57		10.34	10.44
23/9/2025 11:31:05	1	0.23	-35.02		10.33	10.42

En la tabla 3.3 se observa un ejemplo del formato a manejar, este tipo de formato se establece en los códigos de los datalogger CR1000 y CR3000 para que todos los archivos generados por estos mantengan estos nombres y no haya problemas al generar su grafico.

## Manejo de datos para formato .tdms

Para el equipo de BDI este software ya tiene predeterminado un tipo de formato en el que guarda los datos, este no se puede modificar y también guarda todos los canales aunque no se estén utilizando, lo que genera que muchas columnas no tengan datos relevantes.

Lo que se hace es que se establece un formato nuevo a trabajar, este nuevo formato solo tiene los nombres de los sensores que se utilizan y su número de muestra, ya que el equipo de BDI no guarda la fecha y hora en que se recopilan los datos. Este nuevo formato se ve en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3:** Formato a utilizar para pruebas de carga dinámicas

RECORD	LV6195	LV6282	A2120	A2121	A2122
0.1	-0.0002	-0.0013	-0.00144	3.68E-06	-9.93E-08
0.2	-0.0010	-0.0011	-0.00148	2.78E-06	-6.97E-07

En este nuevo formato de guardado se establecen nombres fijos de los sensores que se tienen disponibles en el equipo del CIVCO y el programa de python una vez que identifica un nombre de la lista de sensores disponibles guarda esta columna y elimina todas las columnas que no tengan estos nombres predeterminados, con esto se consigue eliminar datos que no se van a utilizar.

## 3.5 Diseño del Dashboard

Para la creación del dashboard se utiliza Streamlit, una herramienta de python para crear aplicaciones de datos dinámicos. Este mismo se utiliza para generar la interfaz gráfica para el usuario final para que convierta los archivos al formato deseado y cargue estos mismos datos al dashboard para visualizarlos.

Se crea una barra lateral para que el usuario pueda cargar los archivos a ser procesados y modificados o visualizar los archivos ya cargados anteriormente, en caso de no tener archivos procesados previamente no se visualizará nada en esta sección de dashboard.

Una vez que se han cargado los archivos en formato .csv estos se cargan a la sección de dashboard y aquí el usuario puede seleccionar los sensores que desea visualizar y que archivo desea obtener la información.

Dentro de este apartado se puede escoger si se desea ver los datos de las pruebas de carga dinámicas o las pruebas de carga estáticas.

Como no todos los archivos manejan la misma cantidad de datos se crea una barra dinámica horizontal para que se escoja el rango que se quiere mostrar en pantalla, de igual manera se da la opción al usuario para que este pueda escoger cuales son los archivos que desea visualizar en el dashboard y cuales sensores desea cargar dentro de este, porque no siempre



Figura 3.22: Interfaz gráfica para cargar archivos

el usuario va a querer visualizar todos los datos juntos, para hacer el análisis se suele manejar por grupos de galgas o por sectores de medición.

# Capítulo 4

## Resultados y Análisis

En esta sección se documenta el funcionamiento del equipo de CS, BDI y el sistema inalámbrico, se hace una verificación de su repetibilidad para hacer mediciones, su porcentaje de error y la desviación estándar que tienen al regresar a su estado original.

Se hace una comparativa del equipo industrial contra el sistema inalámbrico creado para ver que tan similares son las mediciones de ambos y en qué entornos estos se deberían utilizar y las ventajas que presentan uno con otro.

### 4.1 Activación de Equipos

#### 4.1.1 Campbell Scientific

Para la activación del equipo de Campbell Scientific con los sensores existentes y con los códigos actuales, se observa que estos logran tomar datos de manera precisa y con errores inferiores al 2% . Se hace la activación de dos LVDT para el equipo CR1000 y otros dos para el CR3000. Se comprueba que el nuevo código no interfiera con las funciones de los sensores anteriormente activados como son las 16 galgas extensiométricas. Para esto se realiza una medición con los LVDT y una galga extensiométrica para comprobar que recopila información de todos los sensores.

#### LVDT

Al tener el nuevo código en CRbasic para la activación de los sensores LVDT se inicia con la verificación de que este haga mediciones precisas con la constante de sensibilidad que indica el fabricante.

Para las mediciones se coloca en una base magnética como se observa en la figura 4.1 y se coloca una regla y se toma la marca de 8 cm como el cero del sistema como se observa en la figura 4.2 luego se calibra a cero en el software para establecer este como un nuevo punto de inicio, esto permite que el LVDT pueda detectar valores negativos y positivos en un rango

de  $\pm 25$  mm.



**Figura 4.1:** Base magnética para la mediciones con el LVDT



**Figura 4.2:** Calibración a cero para establecer punto de partida

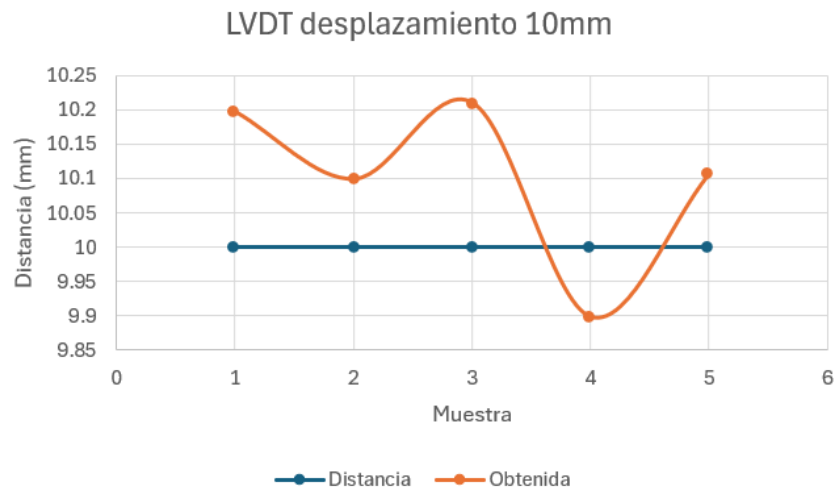
Para observar la precisión del equipo se hacen 10 mediciones partiendo del punto de calibración a un desplazamiento de 10 mm y regresando al punto de partida, de la misma manera con el desplazamiento negativo a -10 mm. Estas mediciones se presentan en las tablas [A.1](#) [A.2](#) si se desea ver el resultado con más detalle.

Para obtener el porcentaje de error se utiliza la siguiente ecuación [4.1](#)

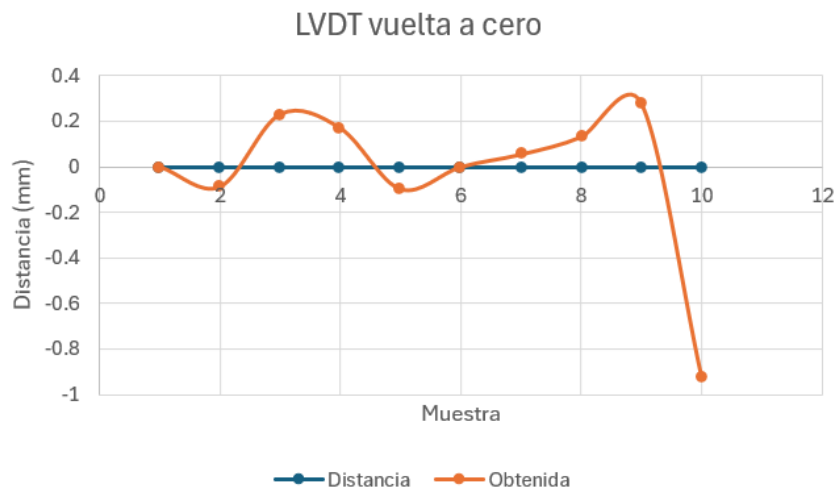
$$\%Error = \frac{(Valor_{Medido} - Valor_{Esperado})}{Valor_{Esperado}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

La regla que se utilizó tiene una resolución de 1 mm por lo tanto no se puede obtener una precisión alta para comparar con el resultado obtenido con el LVDT, que este tiene un certificado de calibración de 13.0 micrometros o 0.013 mm con una linealidad de 0.12

% a una temperatura de 19 grados Celsius. Pero se puede analizar su repetibilidad y su comportamiento respecto a la medición en la regla.



**Figura 4.3:** Medición con LVDT a 10mm vs valor en regla



**Figura 4.4:** Medición con LVDT vs regla, regreso a origen

En las figuras 4.3 y 4.4 se observa como el LVDT presenta una oscilación cercana a su valor esperado por la regla, este al tener una mayor resolución presenta más exactitud en los valores medidos, pero la precisión no se logra determinar al no tener una regla con mayor resolución para verificar el valor medido.

En el caso del desplazamiento de 10mm este presenta una oscilación entre 10.2 y 9.9 mm, lo que genera una media de 10.10mm. El porcentaje de error no se usa para las mediciones de 0mm para no realizar una división por cero, pero se utiliza la fórmula de la media 4.2 y la desviación estándar 4.3.

$$Media = \bar{x} = \frac{Sumad todos los datos}{Numerod e datos} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (4.2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.3)$$

Se toma el valor del desplazamiento de  $0mm$  para la tabla A.1 y A.2 que se encuentran en el apartado de anexos y se calcula la media y su desviación estándar. Para el primer caso se tiene una media de  $0.0429mm$  y una desviación estándar de  $0.15mm$ , para el segundo caso se tiene una media de  $-0.0918mm$  y una desviación estándar de  $0.47mm$ .

Aunque la regla utilizada no tenga una resolución adecuada para verificar la precisión del sensor se observa que logra regresar a su punto de inicio con una desviación estándar menor a  $0.16mm$  y una media de  $0.0429mm$ , esto anterior se ve reflejado con su porcentaje de error para las mediciones de  $\pm 10mm$  que no supera un  $2\%$  de error en las mediciones tomadas. Para obtener su repetibilidad de las mediciones se usa la ecuación 4.4 obtenida del curso de taller de instrumentación del TEC [22].

$$Repetibilidad = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Valor_{real_i} - Valor_{medido_i})^2}{N}} \quad (4.4)$$

Al tomar la ecuación 4.4 y las 10 medidas de  $10mm$  y  $-10mm$  se obtiene una repetibilidad de un  $0.016$  o  $1.6\%$ , que según el SPC group es una repetibilidad aceptable [16] conforme a la norma IATF 16949.

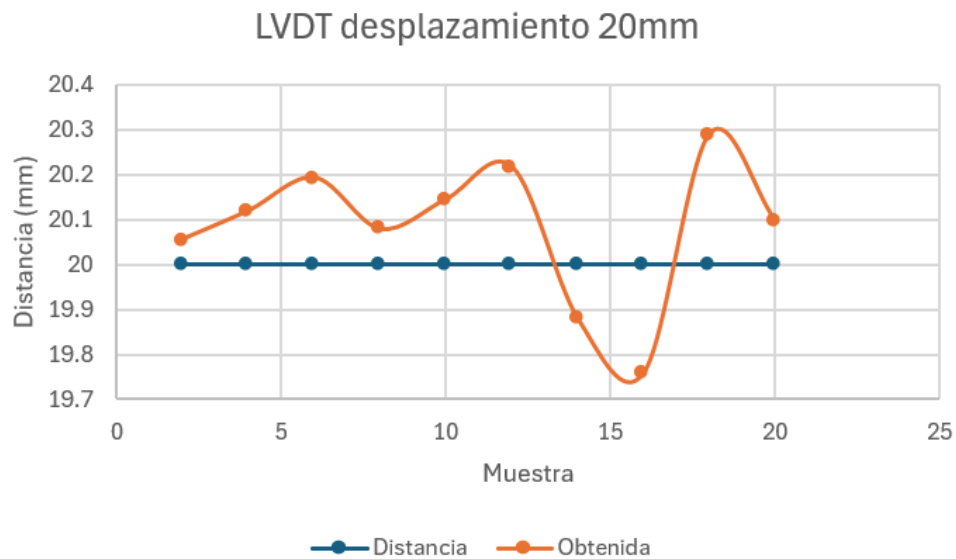
Con los resultados obtenidos se puede determinar que tanto su repetibilidad, desviación estándar y porcentaje de error son bajos y se considera que el equipo logra activarse de manera correcta y medir con precisión y exactitud.

Para el equipo de CR3000 se tienen sensores LVDT de mayor rango de trabajo y se hace el mismo procedimiento anterior, para tener una mejor lectura de los datos obtenidos, estos se presentan en la figura 4.5 y 4.6. Los datos completos con su porcentaje de error se presentan en la tabla A.3 que se encuentra en los anexos.

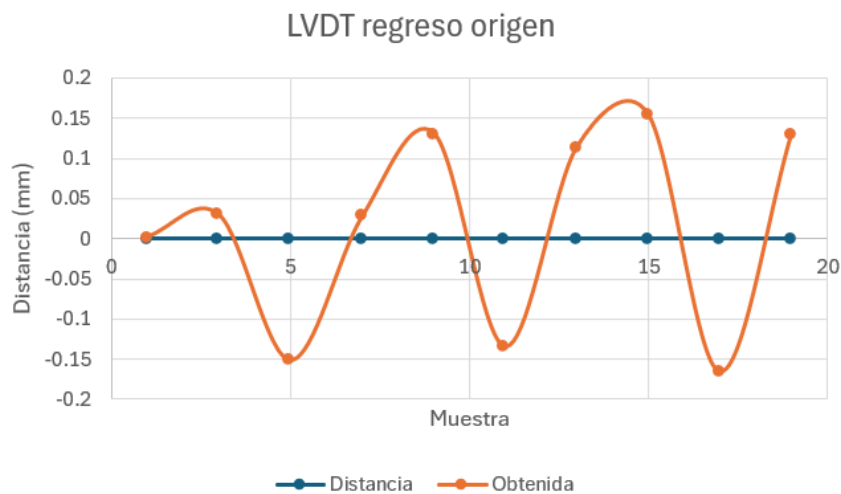
Presenta el mismo comportamiento que el anterior LVDT, tiene un oscilamiento en el valor esperado por la regla, presenta un rango entre  $20.3mm$  a  $19.7mm$  aproximadamente, esta exactitud que presenta también se debe al error humano de tomar la medición, ya que no se cuenta con un equipo especial para hacer una repetibilidad del desplazamiento sin agregar error debido a la manipulación.

Se calcula el porcentaje de error correspondiente para cada recorrido de  $20mm$  y se calcula el porcentaje de repetibilidad que tiene, al tomar la ecuación 4.4 se obtiene que tiene un valor de  $0.0297$ , que de la misma manera que con el equipo anterior da una fidelidad alta de repetibilidad.

Para el caso de los valores que regresan a punto de origen se calcula su media y desviación estándar y se obtiene una media de  $0.0144mm$  y  $0.1243mm$  de desviación estándar.



**Figura 4.5:** Medición con LVDT a 20mm vs valor de regla



**Figura 4.6:** Medición del LVDT regreso al origen

### 4.1.2 Bridge Diagnostics

Para el equipo de BDI se carga primeramente los archivos de calibración mediante el software “STS Live configuration”, se establece una IP para que tanto el equipo de BDI y la laptop a capturar los datos puedan comunicarse y seguidamente de esto se conecta a la red generada.

Una vez que se está conectado a la red de STS 4 se ingresa cada sensor de manera manual y se le agregan sus parámetros de trabajo según el datasheet de cada sensor. Esto anterior se ve con más detalle en el capítulo anterior en las figuras 3.7 3.8. Una vez que se configura cada sensor se procede a iniciar la medición.

## Acelerómetros

Para esta sección se analiza el funcionamiento de los acelerómetros del equipo de BDI, que es el elemento diferenciador respecto al equipo de CS, en la figura 4.7 se tiene la medición de tres acelerómetros que están siendo excitados por una fuerza en cada eje, las mediciones se miden en fuerzas g o de gravedad y pueden soportar hasta 9 gravedades. Los acelerómetros se conectan a un bloque de aluminio para que se muevan juntos y detectar su movimiento en todos los ejes.



**Figura 4.7:** Medición proveniente de los acelerómetros a 3 ejes

Se observa el cambio de aceleración en los 3 diferentes ejes, el X, Y y Z; para la verificación de que estas aceleraciones son correctas no se cuenta con algún tipo de prueba para comprobar el correcto funcionamiento, pero este equipo cada año recibe un documento de calibración desde un laboratorio certificado y se utilizan estos valores de sensibilidad para activar cada sensor, por lo que se espera que este equipo siguiendo los parámetros del fabricante y laboratorio esté midiendo correctamente. Los valores obtenidos por los acelerómetros se observan en la tabla 4.1, donde no se observan aceleraciones bruscas ni fuera de rango.

**Tabla 4.1:** Mediciones con acelerómetros de BDI

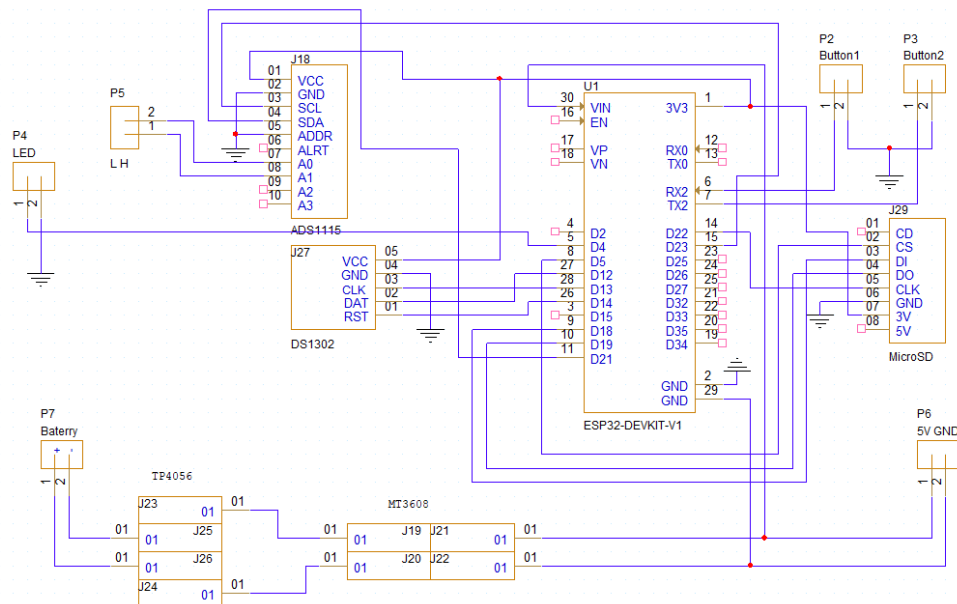
	A2120	A2121	A2122
Max +	0.1017	0.1172	0.1332
Max -	-0.0989	-0.1202	-0.1217

## 4.2 Sistema Inalámbrico para Galga Extensiométrica

Para el sistema inalámbrico de la galga se crea un arreglo de varios módulos para que el microprocesador ESP32 pueda tomar los datos de manera precisa y exacta. Para que este prototipo de sistema inalámbrico se pueda usar en campo se le agrega una caja eléctrica de plástico para resistir el transporte y el manejo del equipo, también en caso de que falle algún

módulo en particular se crea un diseño modular que sea fácil de cambiar dentro de la PCB diseñada.

Para la creación de la PCB se utiliza el siguiente diagrama esquemático para hacer las conexiones.



**Figura 4.8:** Esquemático para la PCB

Este es alimentado por una batería 18650 que le permite una autonomía necesaria para la toma de datos, para este calculo se mide cuanto consume todos los módulos individualmente y lo que da la siguiente tabla 4.2.

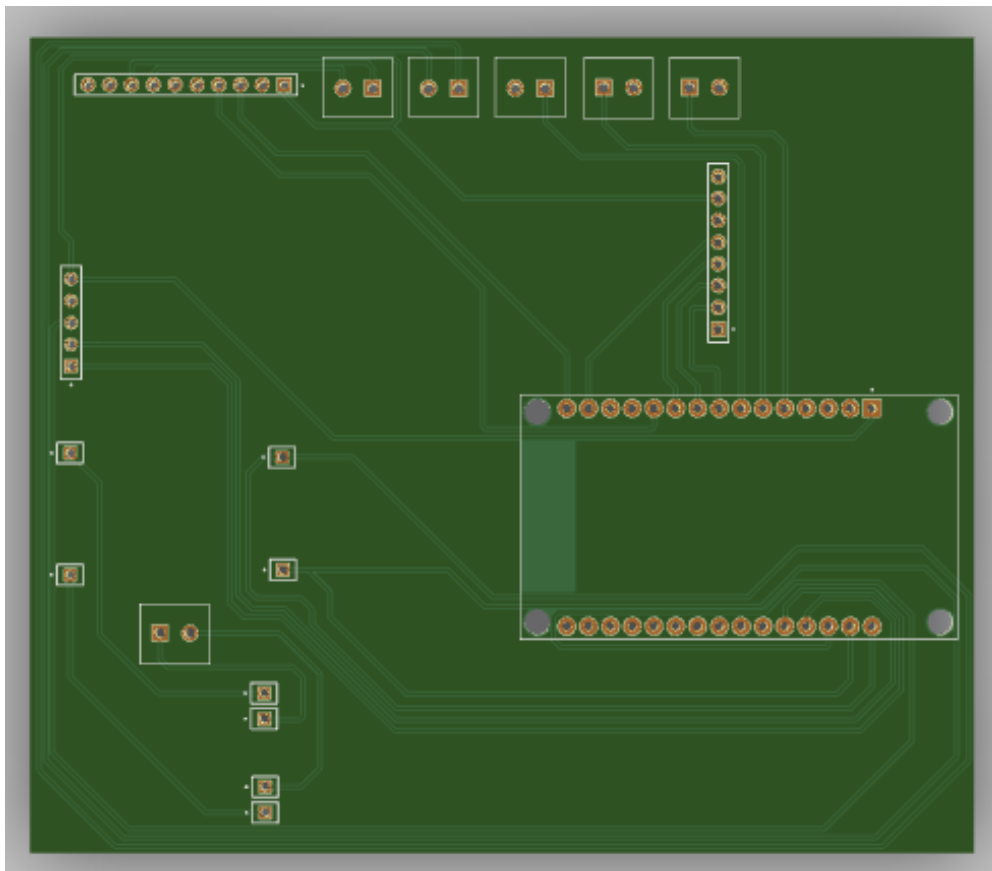
**Tabla 4.2:** Mediciones del consumo de cada módulo

Módulo	Consumo mínimo (mA)	Consumo máximo (mA)
ESP32	25	240
ADS1115	0.15	0.9
RTC DS1302	0.3	0.3
Lector MicroSD	50	100
MT3608	2	80
TP4056	25	25
Total	102.45	446.2

Al alimentar el sistema con una batería 18650 de 2500mAh esta en caso de trabajar en su consumo mínimo tiene una autonomía de 24 horas aproximadamente al dividir su capacidad de 2500mAh entre el consumo de 102mA, para un consumo máximo este duraría aproximadamente unas 5.6 horas al realizar el mismo calculo de dividir la capacidad de la batería entre el consumo máximo.

### 4.2.1 Prototipo final en PCB

Para el prototipo del sistema inalámbrico para la galga extensiométrica se utilizan *female headers* para conectar cada módulo dentro de la PCB y con esto tener un diseño más fácil de instalar y cambiar. El diseño preliminar se observa en la figura 4.9 y la PCB obtenida se observa en la figura 4.12.



**Figura 4.9:** Vista preliminar de la PCB

Se utiliza un dieléctrico de 1.6 mm y sus pistas de un grosor de 0.3 mm, los trazos de la PCB se colocan en la capa *bottom* por ser todos pines *through hole*. Por último se añaden los *headers female pins* y se soldan para agregar cada módulo y por último se agregan interruptores externos a la caja eléctrica para que se pueda calibrar a cero o detener la medición, con una luz LED se indica si se están captando datos o no.

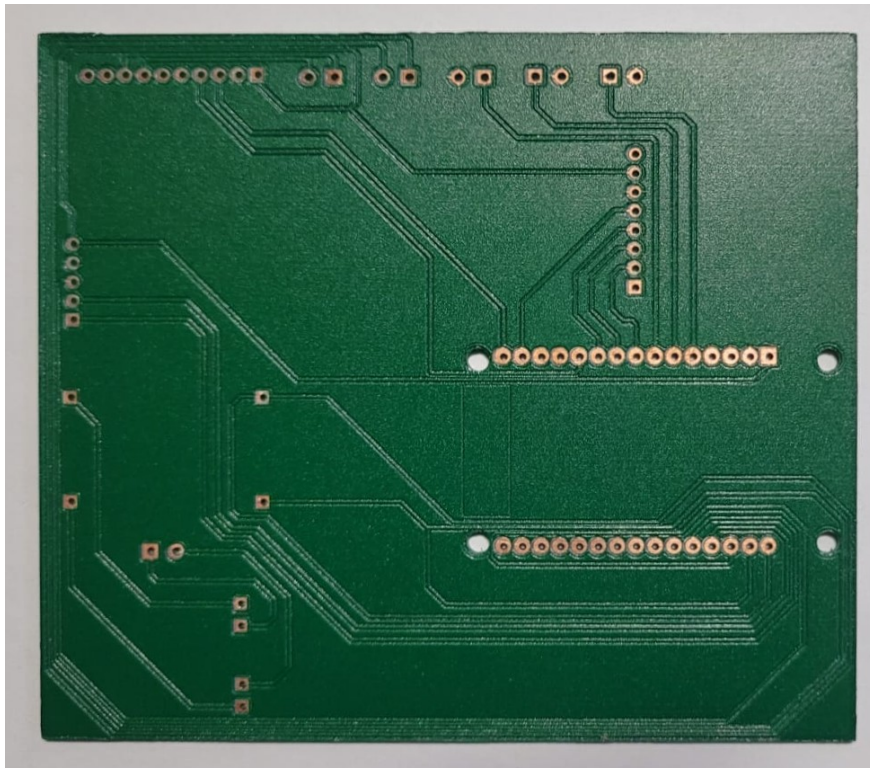


Figura 4.10: PCB en físico parte Botton

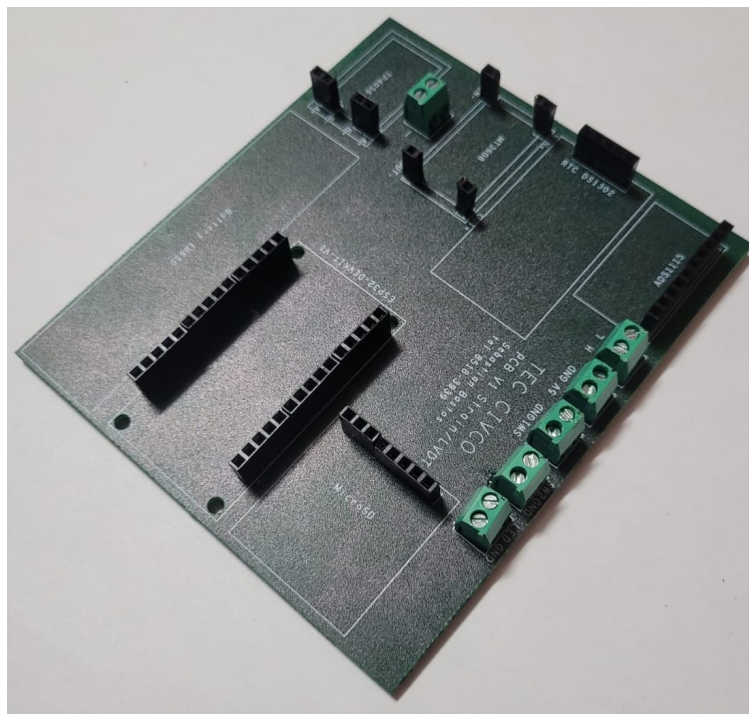


Figura 4.11: PCB en físico parte Top



### 4.3.1 Comportamiento con CR1000

Para hacer las mediciones del equipo se coloca la galga extensiométrica st-350 en una base de aluminio que tiene un mecanismo para expandir o contraer la base y con esto hacer pruebas de tracción y compresión. Para comprobar estas mediciones se utiliza un calibrador o pie de rey para medir el desplazamiento que sufre la galga en la base al experimentar una tracción o compresión y ver las mediciones que entrega en micro strain como se observa en la figura 4.13.



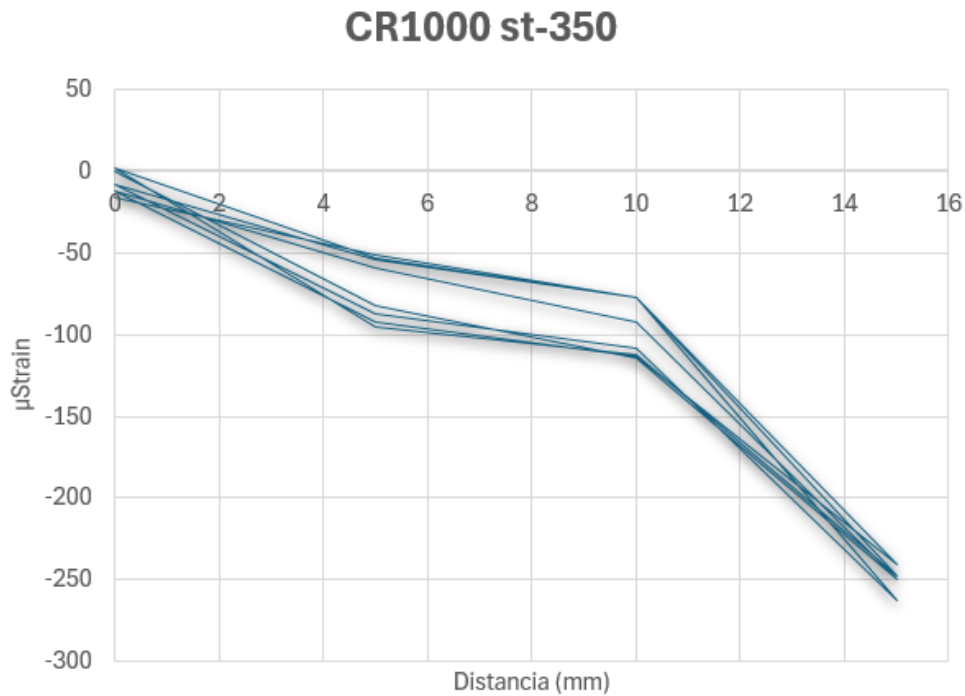
**Figura 4.13:** Base para realizar mediciones en Galga

Para verificar el comportamiento que experimenta la galga se hacen 24 mediciones de tracción, partiendo desde el estado en reposo de la galga se le aplica una fuerza para extenderla poco a poco hasta llegar a 15mm haciendo pasos de 5 milímetros para cada medición generando mediciones en 0, 5, 10 y 15 mm.

Para comprobar la repetibilidad de los resultados y ver qué tanta desviación estándar pueden tener los resultados se utilizan las ecuaciones 4.3 y 4.4. Esto permite ver la dispersión que pueden tener el conjunto de datos.

Las mediciones obtenidas con el datalogger CR1000 muestra una consistencia en los valores máximos alcanzados para cada desplazamiento como se observa en la figura 4.14; esto indica que el sistema tiene alta estabilidad y bajo ruido, lo que favorece a una repetibilidad.

En las mediciones con la galga st-350 se observa que no vuelve a su estado inicial o base de 0 strain, le cuesta volver a su estado inicial y esto se debe a su rango plástico del material, al someterse a las fuerzas de tracción y compresión la galga debe retomar su estado inicial, pero por sus características plásticas este retorno a su estado inicial no se da de manera espontánea, se le debe dar un tiempo para que sus materiales retomen su estado de reposo y con esto la medición registrada pueda volver a su punto inicial, en caso de tener que hacer mediciones a una velocidad mayor al tiempo de recuperación del material se debe volver a calibrar a cero para cambiar su punto de referencia a cero y continuar con las mediciones o



**Figura 4.14:** Comportamiento de Galga en CR1000

esperar a su plasticidad vuelva a su estado inicial.

Esta presenta una curva marcada por su desplazamiento horizontal por tracción, en 5, 10 y 15 milímetros, conforme esta se somete a las fuerzas su curva va teniendo una ligera compensación por su plasticidad que hace que en cada ciclo esta eleve ligeramente sus valores, pero conservando su comportamiento lineal.

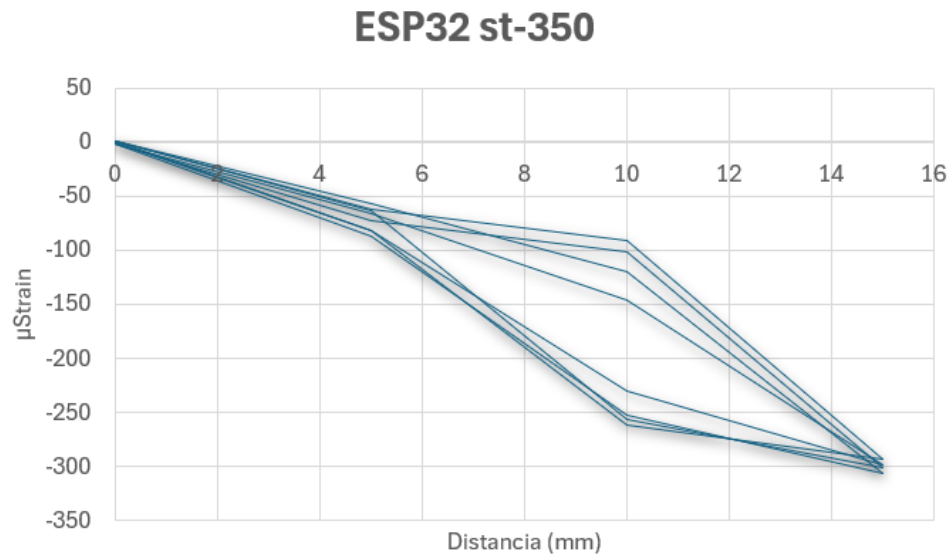
Para el rango máximo registrado a una apertura de 15mm se alcanzan los  $263\mu strain$  esto en tracción. El comportamiento que presenta la galga en el CR1000 se observa en la figura 4.14. Todos los datos obtenidos se pueden observar en la tabla A.4 en la sección de anexos.

### 4.3.2 Comportamiento con ESP32

Teniendo la información y el comportamiento del equipo industrial de CS, se tiene un punto de comparación y se sabe el resultado esperado que debe tener la galga ante estos esfuerzos. Se utiliza el mismo procedimiento y herramientas para la toma de datos del datalogger CR1000. Todos los datos obtenidos para esta medición se observan en la tabla A.5, pero para una mejor lectura de estos se presentan los datos en su versión gráfica.

Al obtener los datos de tracción en la galga se observa que tiene un rango similar al del equipo industrial, pero tiene más marcada la caída de micro strain al regresar a cero, esto se observa con mayor claridad en la figura 4.15 donde esta tiene un comportamiento muy similar al visto en el datalogger CR1000, pero con una caída mayor en los valores de retorno al punto inicial en 10mm, a pesar de esto logra mantener mejor los valores de retorno a cero o punto de partida, pero se presenta un aumento en los puntos máximos conforme avanza la

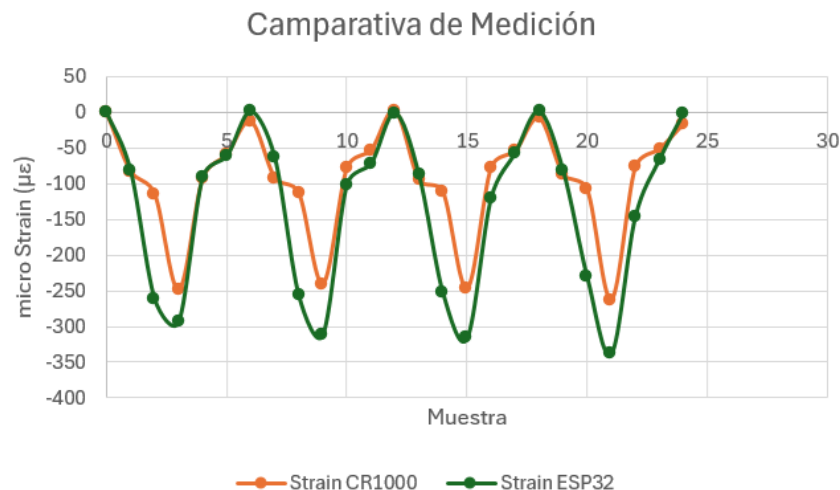
medición.



**Figura 4.15:** Comportamiento de Galga en ESP32

Al comparar ambas mediciones obtenidas, haciendo una comparativa de su medición en micro strain vs sus muestras en el tiempo se obtiene la figura 4.16 que muestran comportamientos similares, donde cada punto en la gráfica representa una nueva tracción con un desplazamiento de 5mm para cada punto.

Se observa que con el equipo del ESP32 conforme avanza la prueba sus valores máximo cada vez son mayores ante el mismo desplazamiento, esto se debe a tener un sistema menos filtrado y más susceptible a ruido electrónico lo que provoca picos más pronunciados, también se le suma el comportamiento plástico de la galga, que acumula fatiga en sus materiales y los valores se van desviando conforme se hace más mediciones y no se da el tiempo suficiente a que esta repose.



**Figura 4.16:** Medición de galga con CR1000 vs ESP32

Para el equipo del CR1000 se observa que tiene una mejor repetibilidad para los valores máximos a lo largo de la prueba, pero para su regreso al origen este se empieza a desviar del valor inicial en cada ciclo. Esto no se debe a una deficiencia del CR1000 sino a la plasticidad acumulada del material al ser sometido repetidamente a una tracción y compresión y al no tener tiempo para su recuperación genera un error de retorno o *zero drift*.

En el punto de tracción a 10mm es donde se encuentra una diferencia de comportamiento, el ESP32 presenta un suavizado, los valores de  $\mu\epsilon$  crecen más rápido que los valores del equipo de CS.

## 4.4 Mediciones con LVDT

Para esta sección se utiliza el mismo diseño de la PCB que se diseñó para las galgas, pero con una leve diferencia que se le añade el módulo MT3608 en las terminales de 5V y Ground para que este pueda incrementar la tensión hasta unos 12V y con esto alimentar el LVDT. Otra diferencia está en el código utilizado en el ESP32 pero comparten la mayoría de las funciones.

Para hacer las comparaciones con ambos equipos se hacen medidas a 5mm, 10mm y también con su desplazamiento negativo. De la misma manera que se hizo con la sección de activación del equipo de CS, los valores de 0mm no se les calcula su porcentaje de error para no realizar una división por cero, pero se obtiene su media y desviación estándar.

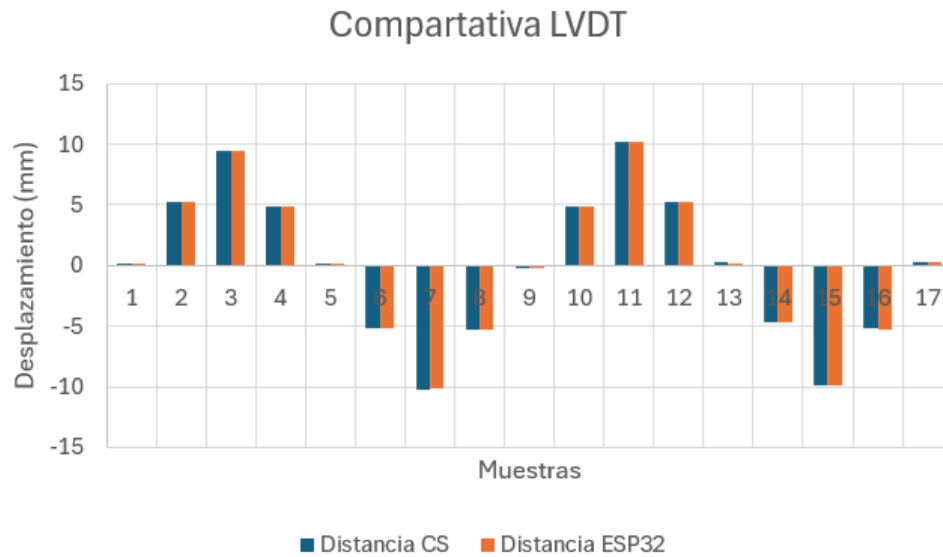
### 4.4.1 Comportamiento con el CR1000 y ESP32

Se utiliza el mismo procedimiento que se utilizó en la sección de activación del equipo de CS, se toma el LVDT y se coloca en una base de aluminio y se coloca una regla en la base para medir su desplazamiento, luego esta se compara con el valor medido, pero para esta sección se toma como referencia el valor marcado por el equipo industrial de CS y se compara con los valores obtenidos con el ESP32, se miden al mismo tiempo y su salida de voltaje diferencial se conecta en paralelo al ESP32 para obtener las mismas mediciones.

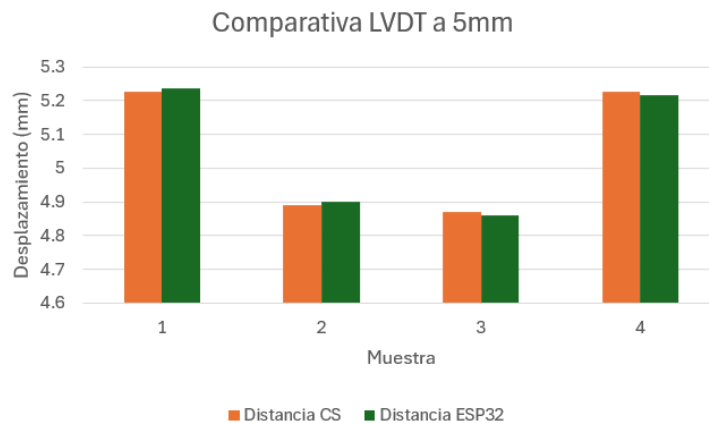
Para una mejor lectura de los valores obtenidos en ambas mediciones se presentan las figuras 4.17 y 4.18 para ver el comportamiento que estas tuvieron. Los datos obtenidos se pueden ver a detalle en la tabla A.6 en el apartado de anexos.

Lo que se observa es que la precisión del ESP32 está en el primer decimal, el segundo no coincide con el valor del equipo industrial, esto se debe al módulo ADS1115 que tiene 2 tipos de rangos de trabajo, en un rango de  $\pm 2V$  y  $\pm 4V$ , al tener una salida del LVDT de  $\pm 2.2V$  se sale del rango por 0.4V, por lo que se toma el rango más amplio de  $\pm 4V$  lo que hace que pierda resolución en la toma de datos.

La media que se obtiene en los valores de 0mm es de 0.1322 con una desviación estándar de 0.1655, valores cercanos a su punto de origen y que no se desvían significativamente del equipo industrial.



**Figura 4.17:** Comparativa del LVDT en CR1000 y ESP32

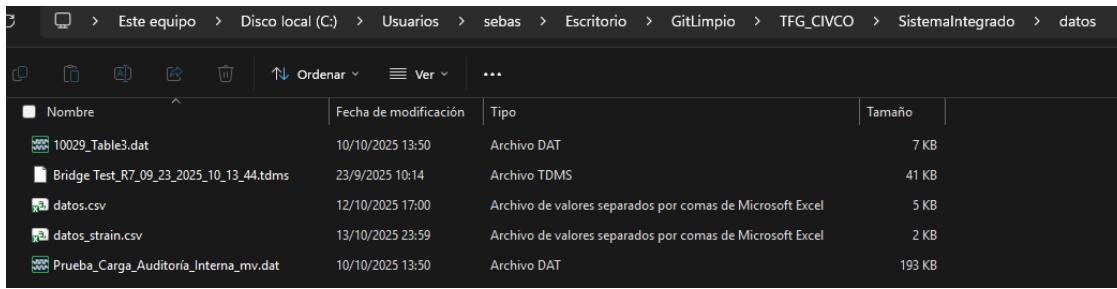


**Figura 4.18:** Comparativa del LVDT en CR1000 y ESP32 a 5mm

## 4.5 Carga de datos al sistema integrado

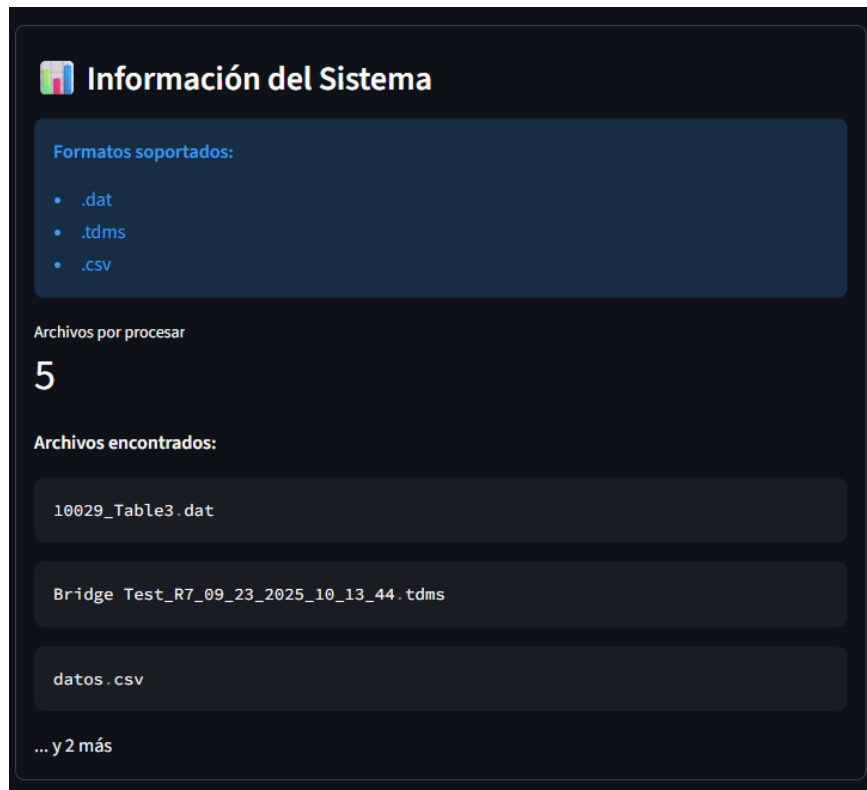
Para el sistema integrado es crucial que los datos obtenidos por los diversos equipos puedan ser captados por el programa y de esta manera procesarlos para eliminar columnas vacías o columnas con sensores que no fueron utilizados, para esto se verifica que el sistema esté cargando los datos desde las carpetas al streamlit que es donde se da la orden para modificar los archivos originales y crear nuevos.

Se cargan 5 diferentes archivos con los tres formatos posibles, un .dat, .tdms y .csv; estos archivos se guardan en la carpeta llamada “datos” como se observa en la figura 4.19, el programa de python extrae todos los archivos de esta carpeta y los clasifica en datos de pruebas estáticas o pruebas dinámicas dependiendo de su formato.



**Figura 4.19:** Archivos agregados a la Carpeta Datos

Una vez que los archivos se cargan en la carpeta "datos" se observan los archivos y sus respectivos formatos en el programa de Streamlit, este programa solo toma archivos compatibles y cualquier otro formato no lo tomará en cuenta. En la figura 4.20 se observa como están los archivos cargados en la carpeta "datos" con su respectivo tipo de formato



**Figura 4.20:** Visualización de archivos cargados en Streamlit

Los archivos se logran cargar en la página de Streamlit y se visualiza su tipo de archivo y la cantidad de archivos que se cargaron en la página, en caso de no corresponder con ningún formato predeterminado este no se muestra.

## 4.6 Modificación y limpieza de archivos

En esta sección se evalúa que el código de python luego de cargar los archivos cree una copia de los archivos en un formato .csv y otra copia pero con los archivos modificados donde se eliminen datos vacíos o columnas de sensores que no se están utilizando.

Para el caso de los archivos que provienen del equipo de BDI, estos archivos vienen en formato .tdms y no se les puede modificar su nombres, número de columnas o los datos de los sensores en particular que se quieren guardar; por lo tanto se descarga el archivo con las ocho entradas que tiene para cada canal y su hora de inicio.

Los datos en el código de python se cambian de formato a .csv y se guardan en su respectiva categoría de prueba dinámica o estática. Los datos originales sin modificar provenientes del equipo de BDI se observan en la figura 4.21 (en la imagen solo se presenta una sección de los datos originales para mejor visualización), donde tienen nombres fijos y dificultan la lectura para saber sobre que sensor se trata.

	A	B	C	D	E
1	Sensors_Started @ 10:13:44,437_Time	Sensors_Started @ 10:13:44,437_A2120	Sensors_Started @ 10:13:44,437_A2121	Sensors_Started @ 10:13:44,437_A2122	Sensors_Started @ 10:13:44,437_IW4-0777-0-CHAN-4
2		0.1	-0.012613932	-0.011442057	0
3		0.2	-0.011149089	-0.005582682	0.0078125
4		0.3	-0.002848307	-0.004361979	0
5		0.4	-0.002604167	-0.009000651	0
6		0.5	-0.002237956	-0.002164714	0
7		0.6	0.004109701	0.005403646	0
8		0.7	0.000447591	0.001741536	-0.0078125
9		0.8	-0.003214518	0.005647786	0
10		0.9	-0.000773112	0.010530599	0
11		1	-0.002237956	0.005159505	0
12		1.1	-0.000528971	0.002718099	0
13		1.2	0.006429036	0.000276693	0
14		1.3	0.011067708	-0.001432292	0

**Figura 4.21:** Datos de BDI sin modificar

Al eliminar nombres innecesarios en las columnas y quedarse solo con los sensores activos se obtiene un archivo como el que se observa en la figura 4.22, con esta modificación brinda una lectura más fácil y se logra presentar en el dashboard de mejor manera.

	A	B	C	D	E	F
1	RECORD	A2120	A2121	A2122	LV6195	LV6282
2		0.1	-0.01261393	-0.01144206	0	0.00094401
3		0.2	-0.01114909	-0.00558268	0.0078125	0.00094401
4		0.3	-0.00284831	-0.00436198	0	0.00094401
5		0.4	-0.00260417	-0.00900065	0	0.00069987
6		0.5	-0.00223796	-0.00216471	0	0.00045573
7		0.6	0.0041097	0.00540365	0	0.00045573
8		0.7	0.00044759	0.00174154	-0.0078125	0.00021159
9		0.8	-0.00321452	0.00564779	0	-3.26E-05
10		0.9	-0.00077311	0.0105306	0	-0.00027669
11		1	-0.00223796	0.00515951	0	-0.00027669
12		1.1	-0.00052897	0.0027181	0	-0.00052083
13		1.2	0.00642904	0.00027669	0	-0.00076497
14		1.3	0.01106771	-0.00143229	0	-0.00076497
15		1.4	0.01167806	0.0014974	0	-0.00100911
16		1.5	0.00447591	0.00100911	0	-0.00100911

**Figura 4.22:** Datos de BDI modificados

Estas modificaciones se hacen de igual manera con el equipo de CS, para que todos los archivos que se vayan a generar un estándar en los archivos y no hayan problemas en la carga de datos para el dashboard.

## 4.7 Visualización de datos

Para la visualización de datos se crea una aplicación en Streamlit donde se cargan los datos provenientes de todos los equipos y para su mejor manejo se crea una barra lateral de navegación para cargar los archivos y la parte de la visualización, tanto para las pruebas estáticas o dinámicas.

### 4.7.1 Barra lateral

En la barra de navegación se indica en qué ventana se encuentra, si en la de visualización del dashboard o en el panel de control donde se hace la carga de datos, en la sección de carga de datos será la que convierta los archivos provenientes de los diversos equipos en un solo formato, si aun no se ha realizado el paso de conversión de archivos no se visualizan los datos en la sección de dashboard.

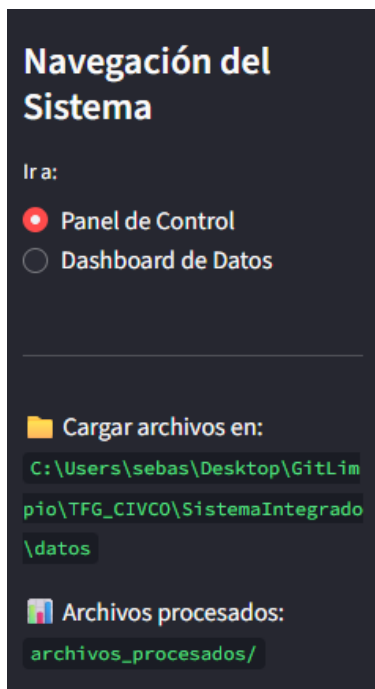


Figura 4.23: Barra lateral de Navegación

Dentro de la barra de navegación también se indica donde deben estar situados los archivos a ser cargados según su ruta de ubicación de la carpeta. De igual manera se indica donde se almacenan los archivos procesados, los originales como los modificados.

## 4.7.2 Dashboard para Pruebas Estáticas

Con los datos cargados y modificados en el programa de python se crean los dashboard para las pruebas de carga estática, se añade una barra para seleccionar el rango en el que se desea visualizar los datos para tener más detalle si se desea. También se tiene la opción de escoger las galgas que se quieren visualizar, si ver todas o solo las que se consideren más relevantes.

En la barra lateral también se escogen los archivos a visualizar, para el caso de la figura 4.24 se toman los datos de una supervisión hecha en un puente con 16 galgas.

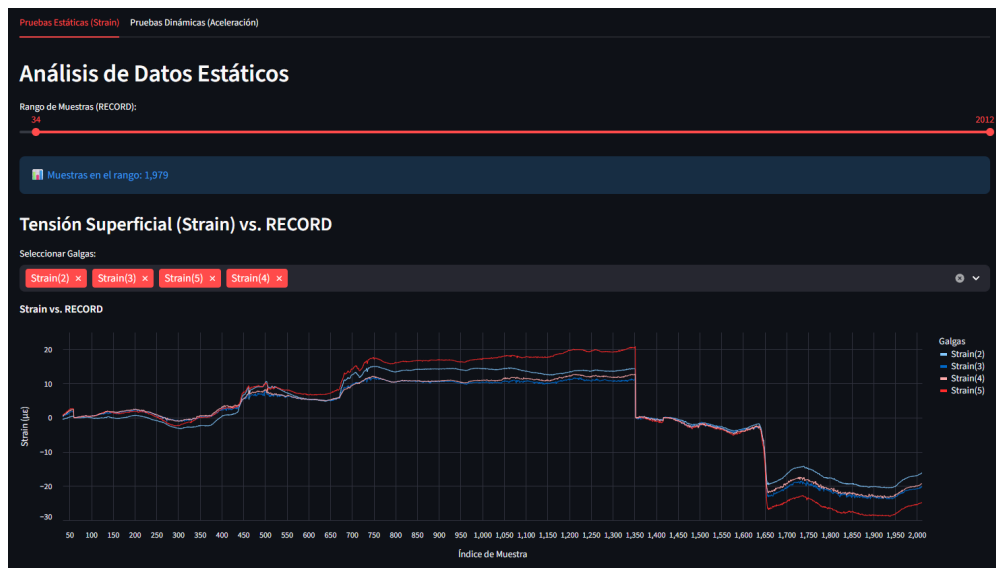


Figura 4.24: Prueba de carga estática con galgas

Se logran visualizar los datos de cada galga, con la posibilidad de descargar la imagen o ampliarla en alguna zona de interés. De igual forma para las pruebas estáticas se necesitan otros datos como son el desplazamiento y estos se visualizan en esta misma sección en el apartado de desplazamiento con la figura 4.25

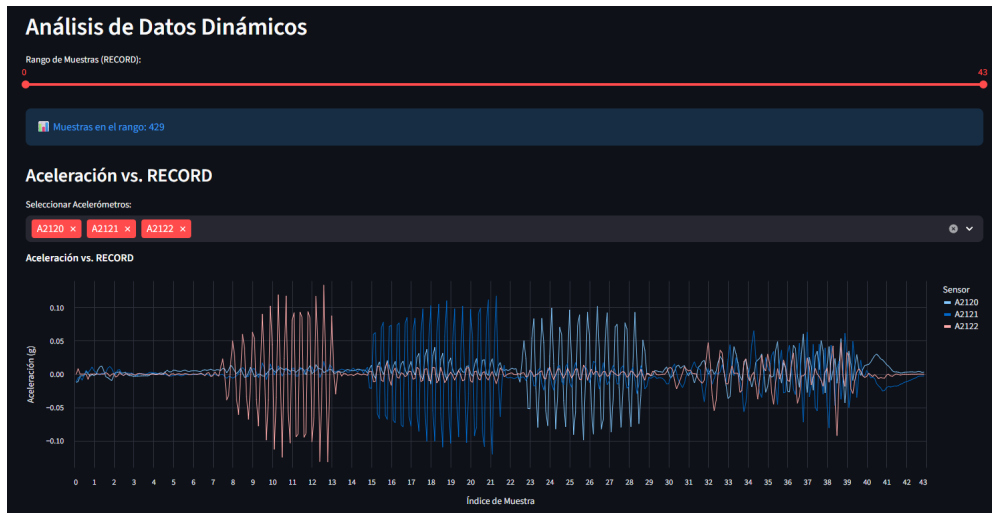


Figura 4.25: Prueba de carga estática con LVDT

Para la visualización de los datos de los LVDT, se toman los dos sensores que se conectaron al CR1000 y se cargan sus archivos al programa, se visualizan ambos sensores trabajando, también se puede escoger la cantidad de sensores a visualizar o el tipo de archivo a visualizar.

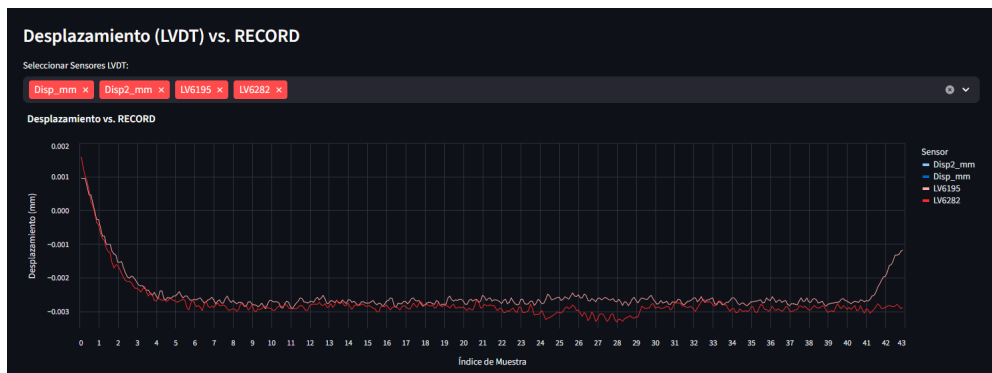
### 4.7.3 Dashboard para Pruebas Dinámicas

Para la visualización de datos de las pruebas dinámicas, estas se cargan de igual manera como se hizo con la anterior sección, ambas pruebas se presentan en ventanas separadas por tratarse de pruebas independientes.



**Figura 4.26:** Prueba de carga dinámica con acelerómetros

Se tiene la posibilidad de escoger que eje se desea visualizar, en caso que solo se requiera visualizar su aceleración horizontal o vertical. Para esta sección solo se utilizan los archivos con formato .tdms.



**Figura 4.27:** Prueba de carga dinámica con LVDT

Por último se tienen los datos obtenidos por los LVDT del equipo de BDI, se cargan sus datos en el programa y se presenta su desplazamiento contra su número de muestras.

# Capítulo 5

## Conclusiones

La reducción en el tiempo y complejidad del proceso de medición y procesamiento de datos, primeramente al reducir el uso de herramientas de software, pasando de 7 a 3 y solo se deban utilizar las necesarias para operar el equipo de medición y el sistema generado para visualizar datos y obtener los archivos de Excel con los que ellos trabajan. Esto simplifica las tareas y reduce errores de incompatibilidad entre formatos y manejo de la información.

El funcionamiento del sistema inalámbrico basado en un ESP32 para la recopilación de datos de galgas extensiométricas y LVDT, en condiciones de laboratorio se determina que el porcentaje de error entre el equipo industrial CR1000 y ESP32 no supera el 5% para las galgas extensiométricas y para los LVDT se tiene un porcentaje de error menor al 0.3% y una exactitud de  $\pm 0.01$  mm. Se determina que el sistema inalámbrico está facultado para tomar datos, ya sea como un apoyo o redundancia al sistema existente o en situaciones donde no se necesite una alta exactitud de los datos y sea de difícil instalación para el equipo cableado.

Se activan y validan los sistemas para realizar las pruebas de carga estática y dinámica al recuperar el equipo que no se estaba utilizando y activarlo con el CR1000, CR3000 y el STS4 haciendo tomas de datos para la verificación del funcionamiento de este.

El sistema implementado de integración de datos logra unificar los diversos archivos provenientes de diferentes fabricantes y convertir los formatos .dat, .tdms y .csv a un solo formato para estandarizar el proceso y que sea de mejor manejo para el equipo del CIVCO al eliminar datos sin información, con ruido o corruptos. Con esto se ahorra tiempo en la limpieza manual de los archivos, el cambio de formato de los archivos y la posibilidad de tener todas las pruebas en un solo lugar y poder consultarlas por su tipo de prueba. Finalmente con este sistema de integración de datos se minimiza la cantidad de software utilizados pasando de 7 herramientas a solo 3.

La construcción de un dashboard interactivo para centralizar los resultados de las pruebas que se hacen en los puentes y poder visualizar los datos obtenidos sin utilizar herramientas adicionales, con la posibilidad de trabajar con múltiples archivos, escoger los sensores y el rango de muestras que se desean visualizar en una sola interfaz.

El cumplimiento de los objetivos al desarrollar el sistema inalámbrico funcional con una

repetibilidad del 1.3 % y un porcentaje menor al 2%. La creación del sistema de procesamiento y estandarización de datos para los equipos de CS y BDI para unificar el manejo de sus archivos. Por último la creación del dashboard interactivo para visualizar las pruebas de carga y visualizar varios archivos en una sola interfaz.

## 5.1 Recomendaciones

- El sistema inalámbrico se puede mejorar su precisión al limitar su salida de voltaje diferencial a  $\pm 2V$  y con esto se trabaja en el rango de mayor precisión del ADS1115.
- Crear una red de nodos para que se comuniquen entre los diferentes sistemas inalámbricos y transmitan en tiempo real a una red como LoRa o Wi-Fi puede permitir en un futuro tener un sistema de monitoreo permanente y guarde estos datos en una base de datos centralizada con todos los registros históricos del puente.
- Creación de filtros para reducir las interferencias al realizar las calibraciones y con esto mejorar la precisión y calidad de los datos tomados.

# Bibliografía

- [1] Amazon. Adafruit tarjeta microsd breakout board, 2025. URL <https://www.amazon.com/-/es/Adafruit-Tarjeta-MicroSD-Breakout-ADA254/dp/B00NAY2NAI>. iii, 26
- [2] botland. Echtzeituhr ds1302 rtc, 2025. URL <https://botland.de/rtc-module/14303-echtzeituhr-ds1302-rtc-5903351241830.html>. iii, 26
- [3] Campbell Scientific. St350 strain transducer [online]. February 2008. URL <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/st350.pdf>. iii, 11
- [4] cb electronics. Ads1115 module with programmable gain amplifier, 2025. URL <https://cb-electronics.com/products/ads1115-board>. iii, 25
- [5] Cytron. Lithium battery tp4056 1a usb-c, 2025. URL <https://www.cytron.io/p-lithium-battery-tp4056-1a-usb-c-charger-with-protection>. iii, 25
- [6] Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía. Tipos de esfuerzos físicos. *Temas para la Educación: Revista digital para profesionales de la enseñanza*, (15):1–10, jul 2011. URL <https://www2.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8567.pdf>. Depósito Legal: GR 2786-2008. iii, 8, 9, 10
- [7] Bridge Diagnostics. Sts live, 2025. URL <https://bditest.com/product/sts-live>. 22
- [8] G. F. Galindo. *Construcción y Validación de un Sensor de Vibraciones usando un Sistema Micro-Electrico-Mecanico (MEMS)*. Universidad Austral de Chile, 2010. 13
- [9] Cesar Garita. *Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes*, volume 29. Tecnología en Marcha, 1ra edition, 2015. 7
- [10] César Garita and Giannina Ortiz. ebridge 3.0: A strategic approach to structural health monitoring of bridges in costa rica, 2016. URL [https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/ebridge\\_3.pdf](https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/ebridge_3.pdf). Accedido: 14 de junio de 2025. 2
- [11] César Garita Rodríguez and Giannina Ortiz Quesada. ebridge 3.0: Sistema para el monitoreo de puentes, 2018. URL [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9982/ebrige\\_sistemas\\_monitoreo\\_puentes.pdf](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9982/ebrige_sistemas_monitoreo_puentes.pdf). Accedido: 31 de mayo de 2025. 1

- [12] Cesar Gatira, Giannina Ortiz, and Juliana Mora. Análisis de requerimientos para un sistema nacional de monitoreo de puentes, 2018. URL [https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/analisis\\_de\\_requerimientos\\_para\\_un\\_sistema\\_nacional\\_de\\_monitoreo\\_de\\_puentes.pdf](https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/analisis_de_requerimientos_para_un_sistema_nacional_de_monitoreo_de_puentes.pdf). 1
- [13] GEOKON. Model 1450 dc-dc displacement transducer instruction manual [online]. 2024 [visitado el 27 de noviembre de 2025]. URL <https://www.geokon.com/content/manuals/1450-DC-DC-LVDT-Transducers.pdf>. 12, 13, 20
- [14] Gerita, Hellen and Cheng, Yi and Agüero, Pablo. Monitoreo de salud estructural del puente sobre río virilla, ruta 2 nacional 27 [online]. 2019. URL <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/2103>. 7
- [15] grobotronics. Esp32 development board, 2025. URL [https://grobotronics.com/esp32-development-board-devkit-v1.html?sl=en&srsltid=AfmB0or10e788kQaEUkbf1NGmUumk1g2JGnJbdLm5DPWH\\_NZ2R94HJQi](https://grobotronics.com/esp32-development-board-devkit-v1.html?sl=en&srsltid=AfmB0or10e788kQaEUkbf1NGmUumk1g2JGnJbdLm5DPWH_NZ2R94HJQi). iii, 27
- [16] SPC Group. Criterios para la aceptación de un estudio gage rr, 2017. URL <https://spcgroup.com.mx/criterios-para-la-aceptacion-de-un-estudio-gage-rr>. 38
- [17] Eugenia María Guzmán Rivera. Diseño de una red inalámbrica de sensores para la monitorización del desempeño estructural de puentes, 2012. URL [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2957/Informe\\_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2957/Informe_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y). 2
- [18] Li, H. and Ou, J. Applications of sensing technologies in civil infrastructure. *Structural Health Monitoring*, pages 219–232, 2010. 11
- [19] MOPT. *Manual de Puentes de Costa Rica. Gestión, Inspección y Conservación de puentes*. Gobierno de Costa Rica, Costa Rica, 1 edition, 2024. URL <https://www.mopt.go.cr/sites/default/files/destacados/planificacion-sectorial/normativa/manuales/cr-2020/2025/mp2024-tomo-i.pdf>. 3
- [20] Murphy, Brendan. Understanding i2c communication and how to debug the i2c protocol? [online]. January 2024. URL <https://www.totalphase.com/blog/2020/07/understanding-i2c-communication-and-how-to-debug-the-i2c-protocol/?srsltid=AfmB0oowUNaobxVSJK75SQ8E5wiQZL1wqh-4Groa1oxq05MshYx0HXRK>. iii, 14
- [21] Myers, B. Oregon: Monitoring bridge stress and strain [online]. 2023. URL <https://s.campbellsci.com/documents/us/case-studies/oregon-bridge-stress-strain.pdf>. 7, 8
- [22] Francisco Navarro. Taller de instrumentación EL5842. Notas de clase, 2024. 38
- [23] Giannina Ortiz, Johan Carvajal, Casia Soto, and Hugo Navarro. Documento i informe técnico de los resultados del proyecto, 2013. URL [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/15762/PI106\\_BIB314381\\_eBridge\\_Prediccion\\_remota....pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/15762/PI106_BIB314381_eBridge_Prediccion_remota....pdf?sequence=1&isAllowed=y). 2

- [24] Giannina Ortiz Quesada. ebridge: Predicción remota de fallas en puentes. *Investiga TEC*, N/A(15):10–11, 2013. 1
- [25] Alonso Poveda, Giannina Ortiz, Gustavo Rojas, and Sonia Vargas. Inventario de puentes en rutas nacionales de costa rica. 2014-2018., 2018. URL [https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/informe\\_final\\_inventario\\_y\\_evaluacion\\_puentes-2014-2018.pdf](https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/informe_final_inventario_y_evaluacion_puentes-2014-2018.pdf). 1
- [26] Pypro. Introducción a streamlit [online]. August 2024. URL <https://www.pypro.mx/app/curso/aplicaciones-de-datos-con-streamlit-en-python/introduccion-a-streamlit>. 10
- [27] Smith, Grant. ¿qué es un data logger y cómo funciona? [online]. Semptember 2025. URL <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-data-logger>. 8
- [28] Smith, Grant Maloy. Medición de posición y desplazamiento con sensores lvdt [online]. February 2023. URL <https://dewesoft.com/es/blog/medir-posicion-desplazamiento-con-sensores-lvdt>. iii, 12, 13
- [29] Sufyan, Muhammad. Spi protocol: Revolutionizing data communication in embedded systems [online]. June 2024. URL <https://www.wevolver.com/article/spi-protocol>. 14, 15
- [30] Sun,Z. and Zou, Z. and Zhang, Y. Utilization of structural health monitoring in long-span bridges: Case studies [online]. 2017. URL [https://www.researchgate.net/publication/312144939\\_Utilization\\_of\\_structural\\_health\\_monitoring\\_in\\_long-span\\_bridges\\_Case\\_studies](https://www.researchgate.net/publication/312144939_Utilization_of_structural_health_monitoring_in_long-span_bridges_Case_studies). 7, 8, 11
- [31] F. Tauheed and S. Sarangi. *Damage-induced stress-softening and viscoelasticity of limited elastic materials*. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014. URL [https://www.researchgate.net/publication/272012678\\_Damage-induced\\_stress-softening\\_and\\_viscoelasticity\\_of\\_limited\\_elastic\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/272012678_Damage-induced_stress-softening_and_viscoelasticity_of_limited_elastic_materials). iii, 11, 12, 44
- [32] Texas Instruments. Keystone architecture serial peripheral interface (spi) [online]. March 2012. URL <https://www.ti.com/lit/ug/sprugp2a/sprugp2a.pdf?ts=1759924050684>. iii, 15, 16
- [33] Todomicro. Fuente step up mt3608 con conector micro-usb, 2025. URL [https://www.todomicro.com.ar/step-up/318-fuente-step-up-mt3608-con-conector-microusb.html?srsIid=AfmB0oobVF-4LN\\_-\\_Vk0UMiRfLpPHErsTJW\\_OQtX9Rw-ckNOKMVEueHs](https://www.todomicro.com.ar/step-up/318-fuente-step-up-mt3608-con-conector-microusb.html?srsIid=AfmB0oobVF-4LN_-_Vk0UMiRfLpPHErsTJW_OQtX9Rw-ckNOKMVEueHs). iii, 26
- [34] Franz Vargas Acuña. Diseño del sistema de comunicación de una red inalámbrica de sensores para el estudio de la salud estructural en puentes, 2016. URL [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10417/disenosistema\\_comunicacion\\_red\\_sensores.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10417/disenosistema_comunicacion_red_sensores.pdf?sequence=1&isAllowed=y). 3

- [35] Omar Fernando Vargas Ruiz. Red de sensores para el análisis de vibración en puentes utilizando acelerómetros triaxiales., 2018. URL [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10404/red\\_sensores\\_analisis\\_vibracion\\_puentes\\_utilizando\\_acelerometros\\_triaxiales.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10404/red_sensores_analisis_vibracion_puentes_utilizando_acelerometros_triaxiales.pdf?sequence=1&isAllowed=y). 3, 13

# Apéndice A

## Anexos

### A.1 Tablas de mediciones

**Tabla A.1:** Mediciones con LVDT (1450-2) de CS para  $10mm$

Medición	Distancia medida (mm)	Distancia obtenida (mm)	% Error
1	0	0.000341	0
2	10	10.197311	1.9731
3	0	-0.087525	
4	10	10.099832	0.9983
5	0	0.230866	
6	10	10.210458	2.1045
7	0	0.169248	
8	10	9.899457	-1.0054
9	0	-0.098203	
10	10	10.10769	1.0769

**Tabla A.2:** Mediciones con LVDT (1450-2) de CS para  $-10mm$

Medición	Distancia medida (mm)	Distancia obtenida (mm)	% Error
1	0	-0.000874	
2	-10	-10.189140	1.8914
3	0	0.053752	
4	-10	-9.899568	-1.0043
5	0	0.0130533	
6	-10	-10.010577	0.1057
7	0	0.027851	
8	-10	-9.994845	-0.0515
9	0	-0.092103	
10	-10	-10.007580	0.0758

**Tabla A.3:** Mediciones con LVDT (1450-6) de CS para 20mm

Medición	Distancia medida (mm)	Distancia obtenida (mm)	% Error
1	0	0.003277	
2	20	20.057101	0.2855
3	0	0.030224	
4	20	20.120398	0.6019
5	0	-0.150675	
6	20	20.193360	0.9667
7	0	0.028267	
8	20	20.079102	0.3955
9	0	0.132103	
10	20	20.145666	0.7283
11	0	-0.133780	
12	20	20.217121	1.0856
13	0	0.114527	
14	20	19.879301	-0.6034
15	0	0.155038	
16	20	19.759131	-1.2043
17	0	-0.165002	
18	20	20.291205	1.4560
19	0	0.130677	
20	20	20.097112	0.4855

**Tabla A.4:** Mediciones con CR1000 y galga extensiométrica

Medición	Distancia (mm)	Strain
0	0	-0.08808
1	5	-82.70486
2	10	-114.58867
3	15	-249.31203
4	10	-92.1295
5	5	-59.09371
6	0	-12.3825
7	5	-92.2365
8	10	-113.44398
9	15	-240.71445
10	10	-77.7647
11	5	-53.2791
12	0	2.2749
13	5	-94.91528
14	10	-111.94756
15	15	-247.40752
16	10	-77.36787
17	5	-54.4208
18	0	-7.7674
19	5	-87.28703
20	10	-108.51308
21	15	-262.99637
22	10	-76.95232
23	5	-51.6736
24	0	-16.0579

**Tabla A.5:** Mediciones con ESP32 y galga extensiométrica

Medición	Distancia (mm)	Strain
0	0	-0.2411
1	5	-82.0013
2	10	-261.4379
3	15	-293.2965
4	10	-90.7612
5	5	-61.6847
6	0	1.3403
7	5	-63.7232
8	10	-256.5401
9	15	-311.4502
10	10	-101.4315
11	5	-72.5402
12	0	-1.395
13	5	-87.7322
14	10	-253.0784
15	15	-316.5603
16	10	-120.1318
17	5	-57.4739
18	0	0.9833
19	5	-81.7283
20	10	-230.5618
21	15	-338.4381
22	10	-146.7429
23	5	-66.7385
24	0	-1.6432

**Tabla A.6:** Mediciones con LVDT (1450-2) con CR1000 y ESP32

Medición	Distancia CS (mm)	Distancia ESP32 (mm)	% Error
1	0.00452	0.088	1846.90
2	5.2249	5.236	0.2124
3	9.4785	9.464	-0.1529
4	4.8903	4.902	0.1983
5	0.1305	0.145	11.1111
6	-5.212	-5.196	-0.3069
7	-10.1744	-10.163	-0.1120
8	-5.3116	-5.302	-0.1807
9	-0.1098	-0.120	9.2199
10	4.8703	4.860	-0.2114
11	10.1908	10.204	0.1287
12	5.2254	5.215	-0.1990
13	0.2406	0.231	-3.9900
14	-4.7091	-4.71	0.0191
15	-9.8971	-9.902	0.049
16	-5.2130	-5.223	0.1918
17	0.3276	0.317	-3.2356

## A.2 Código

Para ver los código utilizados en este proyecto se encuentran en el siguiente repositorio de GitHub: [https://github.com/SebasBastos/TFG\\_CIVCO](https://github.com/SebasBastos/TFG_CIVCO)

```
import pandas as pd
from nptdms import TdmsFile

def convert_tdms_to_csv(input_filepath, output_filepath):
    """
    Convierte archivos .tdms de Bridge Diagnostics (BDI) a .csv
    """
    try:
        with TdmsFile.open(input_filepath) as tdms_file:
            data = {}
            for group in tdms_file.groups():
                for channel in group.channels():
                    column_name = f"{group.name}_{channel.name}"
                    data[column_name] = channel[:]

            df = pd.DataFrame(data)
            df.to_csv(output_filepath, index=False)
            print(f" Archivo '{input_filepath}' convertido a
                  '{output_filepath}' con éxito.")
    except Exception as e:
        print(f" Error al convertir el archivo {input_filepath}: {e}")
```

**Código 1:** Función para conversión de archivos TDMS a CSV

```
def convert_dat_to_csv(input_filepath, output_filepath):
    """
    Convierte archivos .dat de Campbell Scientific a .csv
    """
    try:
        df = pd.read_csv(input_filepath, delimiter=',', skiprows=[0, 2, 3])
        df.columns = df.columns.str.strip()
        df.to_csv(output_filepath, index=False)
        print(f" Archivo '{input_filepath}' convertido a
              '{output_filepath}' con éxito.")
    except Exception as e:
        print(f" Error al convertir el archivo {input_filepath}: {e}")
```

**Código 2:** Función para conversión de archivos DAT a CSV