

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SENSOR INTELIGENTE PARA APLICACIONES DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Jose Alejandro Tovar Briceño
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, mayo de 2024

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SENSOR INTELIGENTE PARA APLICACIONES DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Romero

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Jose Alejandro Tovar Briceño
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, mayo de 2024

Dedicado a Gregoria del Valle Briceño Aray y José Edmundo Tovar Silva.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Tovar B., José A.

DISEÑO DE UN SENSOR INTELIGENTE PARA APLICACIONES DE MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL

Tutor Académico: Prof. Jose Romero. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Electrónica y Control. Institución: IMME Año 2024, 153 h. + anexos

Palabras Claves: Salud estructural, Sensor inteligente, Respuesta dinámica, Frecuencia natural, Microcontrolador, Acelerómetro, LoRa, ESP32, MQTT, Espectro en frecuencia.

Resumen.- En el siguiente trabajo se plantea el diseño de un sensor inteligente para ser utilizado en aplicaciones de salud estructural. En primer lugar, se llevó a cabo la investigación documental necesaria para identificar las variables de interés al evaluar la respuesta dinámica de los sistemas estructurales y su relación con la instrumentación electrónica. Posteriormente se escogió el hardware necesario para la implementación de un prototipo de pruebas capaz de verificar el funcionamiento del diseño. Se escogieron sensores de tecnología MEMS como el MPU6250, MPU9250 y BME280, en conjunto con el microcontrolador ESP32 y el módulo Ra-02 de Ai-Thinker para las comunicaciones inalámbricas. Se diseñó el software necesario para controlar el sistema haciendo uso de FreeRTOS y se implementaron con éxito las tareas tanto en el sensor inteligente como en la estación base para obtener los registros de vibración y de las variables cuasi-estáticas (temperatura, humedad relativa e inclinación). Fue implementada una interfaz gráfica de monitoreo y control para observar los registros y enviar comandos al sensor inteligente. Las pruebas realizadas en el IMME demostraron el funcionamiento satisfactorio del sensor inteligente al comparar los registros obtenidos con el equipo de vibración comercial basado en la tarjeta PCI-6221 de National Instruments, obteniendo resultados muy similares que permitieron caracterizar el comportamiento dinámico de una estructura de acero.

ÍNDICE GENERAL

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE GENERAL	VIII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABLAS	XVII
LISTA DE ACRÓNIMOS	XVIII
INTRODUCCIÓN	1
MARCO REFERENCIAL	5
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Justificación	5
1.3. Alcance y limitaciones	7
1.4. Objetivos	8
1.4.1. Objetivo general	8
1.4.2. Objetivos específicos	8
1.5. Antecedentes	9
MARCO TEÓRICO	12
2.1. Estructuras civiles	12
2.1.1. Características generales	12
2.1.2. Tipos de estructuras	12

2.1.3.	Comportamiento de las estructuras civiles	13
2.1.4.	Daño en estructuras	17
2.1.5.	Principios de la sismo-resistencia	18
2.2.	Salud estructural	20
2.2.1.	Definición	20
2.2.2.	Reseña histórica	21
2.2.3.	Línea de trabajo del Monitoreo de Salud Estructural . . .	23
2.2.4.	Criterios de evaluación	25
2.2.5.	Variables de interés	28
2.3.	Métodos de identificación de daño	31
2.3.1.	Basado en modelo	31
2.3.2.	Basado en respuesta	31
2.4.	Ensayos estructurales	31
2.4.1.	Ensayos invasivos	32
2.4.2.	Ensayos no invasivos o mínimamente invasivos	32
2.5.	Microcontroladores (MCU)	33
2.5.1.	Definición y características	33
2.5.2.	Placas de desarrollo	35
2.5.3.	Protocolos de comunicación	36
2.5.4.	Sistemas Operativos en Tiempo Real (RTOS)	38
2.6.	Sensores	41
2.6.1.	Definición	41
2.6.2.	Características de los sensores	42
2.6.3.	Sensores de interés para el Monitoreo de Salud Estructural	42
2.6.4.	Fusión de sensores	48

2.7.	Sensores inteligentes	51
2.7.1.	Definición:	51
2.7.2.	Características:	52
2.8.	Monitoreo	53
2.8.1.	Monitoreo cableado	53
2.8.2.	Monitoreo inalámbrico	54
2.9.	Sistemas de adquisición de datos	55
2.9.1.	Definición y esquema general	55
2.9.2.	Acondicionamiento de señales	55
2.9.3.	DAQ basados en MCU	55
2.10.	Sistemas de comunicaciones inalámbricos	56
2.10.1.	Características y conceptos básicos	56
2.10.2.	Protocolos de comunicación para distancias cortas	57
2.10.3.	Protocolos de comunicación de larga distancia	59
2.10.4.	Protocolo LoRa	60
2.11.	Procesamiento digital de señales:	65
2.11.1.	Estudio en el dominio de la frecuencia	66
2.11.2.	Transformada de Fourier	67
2.11.3.	Transformada Rápida de Fourier	68
2.11.4.	Aventanamiento	70
MARCO METODOLÓGICO		72
3.1.	Descripción breve del sistema	72
3.2.	Selección de componentes	75
3.2.1.	Protocolo de comunicaciones	75
3.2.2.	Sensores	77

3.2.3. Microcontroladores	78
3.2.4. Diagramas de selección de componentes:	79
3.3. Detalle del diseño	88
3.3.1. Descripción detallada del sistema:	88
3.3.2. Diagrama general funcionamiento del sensor inteligente en conjunto con la estación base	92
3.3.3. Descripción del hardware	93
3.3.4. Descripción del software	94
PRUEBAS Y RESULTADOS	115
4.1. Pruebas de comunicaciones	115
4.2. Pruebas para estimación de inclinación	117
4.3. Pruebas de funcionamiento del prototipo	122
4.3.1. Vibración forzada por impacto	131
4.3.2. Vibración libre por condición inicial	136
4.3.3. Vibración ambiental	142
CONCLUSIONES	150
RECOMENDACIONES	153
CÓDIGO DEL SENSOR INTELIGENTE	157
CÓDIGO DE LA ESTACIÓN BASE	171
CÓDIGO DE LA INTERFAZ GRÁFICA	185
PROGRAMAS DE POST-PROCESAMIENTO	201
REFERENCIAS	205

LISTA DE FIGURAS

2.1. Modelo de masa concentrada de 1 grado de libertad (Hurtado, 2000).	15
2.2. Respuesta ante vibración libre en sistema Subamortiguado (Hurtado, 2000).	17
2.3. Esquema de un sistema de SHM (Li, Deng, y Xie, 2015).	24
2.4. Diagrama general del proceso de SHM.	25
2.5. Esquema general del microcontrolador ESP32 (Systems, 2016).	35
2.6. Estados de las tareas en FreeRTOS (FreeRTOS, 2024).	40
2.7. Arquitectura de sistema embebido basado en FreeRTOS (FreeRTOS, 2024).	41
2.8. Esquema general de funcionamiento de un termopar (Dunn, 2005).	43
2.9. Esquema general de un sensor de temperatura de tecnología MEMS (Dunn, 2005).	44
2.10. Esquema general de un sensor de humedad capacitivo (Dunn, 2005).	45
2.11. Esquema general de un sensor de humedad resistivo (Dunn, 2005).	45
2.12. Esquema general de un sensor de humedad de tecnología MEMS (Alfaifi y Zaman, 2021).	46
2.13. Esquema general de un acelerómetro piezoeléctrico (Dunn, 2005).	46
2.14. Esquema general de un acelerómetro de tecnología MEMS (Dunn, 2005).	47
2.15. Acelerómetro micro-electromecánico (Dunn, 2005).	47
2.16. Esquema general de un acelerómetro por balance de fuerza (Sharma y Kumar, 2006).	48

2.17. Esquema general del protocolo MQTT (Aloufi, Alhazmi, y cols., 2020).	58
2.18. Esquema comparativo entre distintas tecnologías tomando en cuenta el rango de alcance y el ancho de banda (Khorsandi y Jalalizad, 2023).	60
2.19. Señal chirp utilizada para la transmisión CSS (Aloufi y cols., 2020).	61
2.20. Ancho de banda representado en el espectro (Aloufi y cols., 2020).	62
2.21. Representación de símbolos en una transmisión LoRa (Aloufi y cols., 2020).	63
2.22. Forma de la trama LoRa (Aloufi y cols., 2020).	64
2.23. Descomposición de señal temporal en el espectro de frecuencia (Siemens, 2019).	67
2.24. Método de <i>peak picking</i> (Jin, Jeong, y Sim, 2021).	69
2.25. Método de obtención de amortiguamiento por ancho de banda local (Andresen, Bäger, y Hamm, 2019).	70
2.26. Funciones de aventanamiento más utilizadas (Francone, Domenicali, y Di Benedetto, 2006).	71
 3.1. Diagrama de araña para selección de microcontrolador.	80
3.2. Placa de desarrollo ESP32 DevKit1 basada en el ESP32 de Espressif Systems.	81
3.3. Diagrama de araña para selección de acelerómetro.	82
3.4. Módulo GY-521 basado en el MPU6050 (Mechatronics, 2016).	83
3.5. Diagrama de araña para selección de sensor de temperatura y humedad.	84
3.6. Módulo GY-BME280 basado en el sensor BME280 de Bosch (Mechatronics, 2023).	85

3.7. Diagrama de araña para selección de unidad de medición inercial.	86
3.8. Módulo GY-9250 basado en el MPU9250 de Invensense (Ewald, 2021).	87
3.9. Diagrama de araña para selección del módulo de comunicaciones.	88
3.10. Esquema general del sistema.	92
3.11. Diagrama de bloques del sensor inteligente.	93
3.12. Diagrama de bloques de la estación base.	94
3.13. Ilustración del proceso para programar el ESP32 (Systems, 2016).	95
4.1. Vista en mapa de distancia máxima de pruebas usando módulo SX1278.	116
4.2. Entorno TelePlot.	118
4.3. Comparación entre métodos de estimación de inclinación en vibra- ción ambiental.	119
4.4. Comparación entre métodos de estimación de inclinación ante vi- braciones.	120
4.5. Comparación entre métodos de estimación de inclinación ante mo- vimientos sostenidos.	121
4.6. Tarjeta de adquisición de datos PCI-6221 de National Instruments.	123
4.7. Tarjeta de conexiones SCB-68 de National Instruments (Artisan Technology).	124
4.8. Acelerómetro FBA-11 de Kinematics.	125
4.9. Vista frontal de la configuración utilizada en ensayo.	127
4.10. Vista de planta de la configuración utilizada en ensayo.	127
4.11. Instrumentación de la estructura	128
4.12. Ventana 1 de la interfaz gráfica diseñada.	129
4.13. Ventana 2 de la interfaz gráfica diseñada.	129

4.14. Ventana de la interfaz gráfica de MATLAB para importar los datos obtenidos mediante LabVIEW.	130
4.15. Respuesta del sistema ante vibración por impacto según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments	132
4.16. Registro de vibración por impacto en la dirección Este-Oeste obtenido mediante el sensor inteligente.	133
4.17. Ventana auxiliar de la GUI para observar la inclinación y la densidad espectral de potencia.	133
4.18. Respuesta del sistema ante vibración por impacto según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments	135
4.19. Registro de vibración por impacto en la dirección Norte-Sur obtenido mediante el sensor inteligente.	136
4.20. Respuesta del sistema ante vibración libre sin lastres según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments	138
4.21. Registro de vibración libre sin lastres obtenido mediante el sensor inteligente.	139
4.22. Respuesta del sistema ante vibración libre con lastres según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments	140
4.23. Registro de vibración libre con lastres obtenido mediante el sensor inteligente.	141
4.24. Respuesta del sistema ante vibración ambiental según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments	143
4.25. Ventana de la interfaz gráfica diseñada con el registro de vibración ambiental obtenido.	144
4.26. Forma del registro concatenado tras aventanamiento de Hanning utilizando Python.	145
4.27. Forma del espectro del registro concatenado.	146

4.28. Respuesta del sistema ante vibración ambiental en los ejes “X” y “Y” 147

IV.1. Flujo de nodos diseñado para el formateo de los datos provenientes del sistema receptor en la estación base. 204

LISTA DE TABLAS

2.1. Ventajas y desventajas de los enfoques de monitoreo.	54
3.1. Comparación entre protocolos de comunicación inalámbrica, (Ogdol, Ogdol, y Samar, 2018) y (Blackman, 2019)	76
3.2. Comparación entre módulos LoRa del fabricante Semtech (Semtech, 2015).	76
3.3. Comparación entre placas de desarrollo basadas en MCU	79
3.4. Especificaciones del MPU6050 de Invensense.	82
3.5. Especificaciones del sensor BME280 de Bosch.	84
3.6. Especificaciones del MPU9250 de Invensense.	86
4.1. Resultados de pruebas realizadas con módulo de comunicaciones Ra-02.	117
4.2. Especificaciones de la tarjeta de adquisición PCI-6221 de National Instruments	124
4.3. Especificaciones del acelerómetro FBA-11 de Kinematics	125
4.4. Características de instrumentación del sensor inteligente.	126
4.5. Comparación entre características de los sistemas de medición utilizados.	131

LISTA DE ACRÓNIMOS

IMME Instituto de Materiales y Modelos Estructurales

SHM Structural Health Monitoring

ADC Analog-to-Digital Converter

NASA National Aeronautics and Space Administration

SMIS Shuttle Modal Inspection System

DOF Degrees of Freedom

VLSI Very Large Scale Integration

RAM Random Access Memory

ROM Read-Only Memory

DAC Digital-to-Analog Converter

SoC System on a Chip

MCU Microcontroller Unit

SBC Single Board Computer

UART Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

I2C Inter-Integrated Circuit

SDA Serial Data Line

SCL Serial Clock Line

SPI Serial Peripheral Interface

USB Universal Serial Bus

RTOS Real-Time Operating System

SMP Symmetric Multiprocessing

MIT Massachusetts Institute of Technology

FIFO First In, First Out

MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems

DSP Digital Signal Processing

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

DAQ Data Acquisition

WiFi Wireless Fidelity

MQTT Message Queuing Telemetry Transport

IoT Internet of Things

M2M Machine to Machine

CSS Chirp Spread Spectrum

CMRR Common Mode Rejection Ratio

CRC Cyclic Redundancy Check

FFT Fast Fourier Transform

NTP Network Time Protocol

RTC Real-Time Clock

IMU Inertial Measurement Unit

MARG Magnetic, Angular Rate, and Gravity

JSON JavaScript Object Notation

CSV Comma-Separated Values

GUI Graphical User Interface

ISR Interrupt Service Routine

INTRODUCCIÓN

La seguridad de las infraestructuras es un tema de gran importancia en la actualidad, especialmente cuando se trata de estructuras como edificios o puentes.

Los primeros indicios del monitoreo del estado de las infraestructuras data de nuestros comienzos como especie sedentaria. En la antigüedad, los especialistas utilizaban técnicas de inspección visual y auditiva para detectar posibles problemas en las estructuras, como grietas o ruidos inusuales. Con el tiempo, se desarrollaron técnicas más avanzadas para el monitoreo de estructuras, como la utilización de medidores de deformación, inclinación, sensores de vibración, entre otros.

La integración de la instrumentación con el análisis estructural comenzó a desarrollarse en la década de 1960 con el advenimiento de la informática y la disponibilidad de computadoras capaces de realizar cálculos estructurales complejos. En esa época, se comenzaron a utilizar sistemas de adquisición de datos para recopilar información sobre el comportamiento de las estructuras en tiempo real y utilizarla para calibrar y validar los modelos estructurales.

Actualmente, las normas sismo-resistentes apuntan a estructuras que sean capaces de mantener su integridad ante un evento de cierta magnitud. Además, el monitoreo continuo de ciertos indicadores en la estructura permiten determinar un índice de la salud estructural y ajustar el modelo a las condiciones actuales de la misma para evaluar el cumplimiento de la normativa sismorresistente. Para el monitoreo a largo plazo, el resultado de este proceso es información actualizada periódicamente sobre la capacidad de la estructura para desempeñar su función prevista a la luz del inevitable envejecimiento y degradación resultantes de los

entornos operativos.

Según Balageas, Fritzen, y Güemes (2010), el monitoreo de la salud estructural (SHM por sus siglas en inglés) tiene por objeto proporcionar, en cada momento de la vida de una estructura, un diagnóstico del estado de los materiales constitutivos, de las diferentes partes, y del conjunto de estas partes que constituyen la estructura en su totalidad. El estado de la estructura debe permanecer en el ámbito especificado en el diseño, aunque este puede verse alterado por el envejecimiento normal debido al uso, por la acción del medio ambiente y por sucesos accidentales. Gracias a la dimensión temporal de la supervisión, que permite tener en cuenta toda la base de datos histórica de la estructura, y con la ayuda del monitoreo del funcionamiento. También puede proporcionar un pronóstico (evolución de los daños, vida residual, entre otros).

Si consideramos solo la primera función, el diagnóstico, podríamos estimar que el monitoreo de la salud estructural es una forma nueva y mejorada de realizar una evaluación no destructiva. Esto es parcialmente cierto, pero SHM es mucho más. Implica la integración de sensores, posiblemente materiales inteligentes, transmisión de datos, potencia computacional y capacidad de procesamiento en el interior de las estructuras. Permite reconsiderar el diseño de la estructura y la gestión completa de la propia estructura y de la estructura considerada como parte de sistemas más amplios.

En este sentido, el monitoreo de las estructuras se ha convertido en una herramienta esencial para garantizar la seguridad de las personas durante la vida útil de la misma, incluyendo la ocurrencia de eventos de cierta magnitud. Además, el monitoreo de las estructuras puede ayudar a mejorar la eficacia de las normas sismorresistentes, ya que permite validar y mejorar los modelos estructurales utilizados en la normativa.

Según Nagayama (2007), dado que las edificaciones suelen ser grandes y complejas, la información de unos pocos sensores es inadecuada para evaluar con precisión el estado estructural. El comportamiento dinámico de estas estructuras es complejo tanto a escala espacial como temporal. Además, los daños y/o el deterioro es intrínsecamente un fenómeno local. Por lo tanto, para comprender el comportamiento dinámico, el movimiento de las estructuras debe ser supervisado por sensores con una frecuencia de muestreo suficiente para captar las características dinámicas más destacadas. Esta información combinada con el registro del comportamiento estático de la estructura permiten tener una visión más amplia del estado actual de la estructura.

El primer paso, además de un mantenimiento adecuado, para garantizar la seguridad de estas estructuras, es contar con sistemas de monitoreo que permitan detectar posibles daños o fallas en su funcionamiento y tomar medidas preventivas. Por tanto, los sistemas de adquisición de datos y monitoreo son herramientas esenciales en la prevención de accidentes y daños.

A su vez, según Nagayama (2007), un dispositivo inteligente, es decir, con capacidad de procesamiento de datos en el caso de los sensores, es una característica esencial que permite incrementar el potencial de los sensores al ser estos inalámbricos. Los sensores inteligentes pueden procesar localmente los datos medidos y transmitir solo la información importante a través de comunicaciones inalámbricas. Cuando estos son configurados como una red, se extienden las capacidades de los mismos.

Los sensores inteligentes, con sus capacidades de cómputo y de comunicación integradas, ofrecen nuevas oportunidades para la SHM. Sin necesidad de cables de alimentación o comunicación, los costes de instalación pueden reducirse drásticamente. Los sensores inteligentes ayudarán a que el monitoreo de las estructuras con un denso conjunto de sensores sea económicamente práctico. Se espera que los

sensores inteligentes instalados en masa sean fuentes de información muy valiosa para la SHM.

En este trabajo de grado se abordó el diseño para una futura implementación de un sistema de adquisición de datos de bajo costo basado en dispositivos programables con capacidad de interconexión para el monitoreo y procesamiento de variables como aceleración, inclinación, humedad y temperatura en estructuras críticas, con el objetivo de prevenir daños y accidentes.

El presente trabajo se estructuró de la siguiente forma. En el capítulo I se expone la necesidad por la cual surge la realización del diseño, además de algunos trabajos previos de los cuales se obtuvo información valiosa para darle la dirección correcta al proyecto. En el capítulo II se definen las bases teóricas necesarias para comprender el comportamiento de las estructuras y conocer la relación entre la instrumentación y el comportamiento dinámico de estos sistemas, ilustrando además los conceptos de salud estructural y su estrecha relación con la medición de variables físicas.

En el capítulo III se describe el sistema en detalle, escogiendo el hardware necesario para el desarrollo del prototipo de pruebas y se detallan la metodología seguida para el diseño del software del sistema. En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos tras la realización de pruebas sobre una estructura real, comparando los resultados obtenidos con los del equipo disponible en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela. Finalmente se presentan las conclusiones que se obtuvieron a partir de las pruebas realizadas y se sugieren algunas recomendaciones a seguir en trabajos consecuentes para mejorar el desempeño del sistema.

CAPÍTULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1. Planteamiento del problema

La seguridad en las estructuras es un tema crítico en la ingeniería, especialmente en lo que respecta a estructuras críticas como edificios y puentes. A medida que el tiempo pasa, estas estructuras pueden deteriorarse y presentar fallas que pueden poner en riesgo la vida de las personas que las utilizan. Por lo tanto, es fundamental contar con sistemas de monitoreo que permitan detectar posibles problemas en las estructuras y tomar medidas preventivas.

Sin embargo, la mayoría de los sistemas de monitoreo de estructuras disponibles en el mercado son costosos y no están diseñados específicamente para aplicaciones de salud estructural. Además, muchos de estos sistemas no tienen capacidad para admitir comunicación inalámbrica, lo que limita su aplicación en estructuras de gran tamaño o en áreas de difícil acceso, además de los costos asociados a un sistema de cableado fiable que no perturbe las mediciones.

1.2. Justificación

Un sensor inteligente que conste de un sistema de adquisición de datos basado en un microcontrolador que recolecte y procese la información adquirida en

conjunto con varios sensores dispuestos en un solo dispositivo permite realizar la medición de variables ambientales y mecánicas de interés en aplicaciones de salud estructural a un bajo costo; además, un sistema de este tipo es flexible en cuanto a las variables a medir, puesto que es compatible con distintos tipos de sensores y métodos de comunicación a utilizarse, permitiendo crear soluciones canalizadas a proyectos en específico, logrando disminuir costos y contribuir de una forma más eficaz al proceso de toma de decisiones estructurales.

Existe variedad en cuanto al hardware de bajo costo que puede utilizarse para la implementación de un prototipo del sistema, lo que ofrece una alternativa atractiva a los sistemas de adquisición actuales, además de la capacidad de transmisión que ofrecen las redes de larga distancia disponibles en conjunto con las capacidades de los microcontroladores, permitiendo que la estación base pueda ubicarse lejos de la estructura.

Para lograr medir todas estas variables en tiempo real es conveniente contar con uno o más microcontroladores capaces de gestionar toda esta información, sin dejar de lado la confiabilidad en la adquisición de estos datos y que a su vez sea capaz de emplear las herramientas necesarias para comunicar estos datos de forma inalámbrica.

Sabiendo esto, existe una necesidad clara de desarrollar un sistema de adquisición de datos y monitoreo inalámbrico de bajo costo para aplicaciones de salud estructural que permita reducir la acción humana, minimizando el error humano y los recursos necesarios, aumentando a su vez la confiabilidad y la seguridad; con este desarrollo se busca verificar que el desempeño de la estructura se encuentra entre los rangos establecidos, y en caso contrario notificarlas con el objetivo de garantizar la seguridad de las personas, mediante la realización de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo.

1.3. Alcance y limitaciones

Los principales equipos de medición estructural cuentan con salidas digitales o en su defecto salidas analógicas que pueden ser convertidas y soportan distintos protocolos de comunicación, lo que representa una ventaja al trabajar con microcontroladores, pues estos son adaptables a la mayoría de los protocolos lo que facilita la adquisición de los datos a partir del medidor. Los desafíos al usar el convertidor analógico-digital (ADC por sus siglas en inglés) de un microcontrolador en mediciones estructurales pueden ser varios. Uno de los principales es la precisión de la medición, ya que el ADC puede presentar errores en la conversión analógico digital. Además, la resolución del ADC puede limitar la precisión de las mediciones, lo que puede afectar la calidad de los datos obtenidos, esto se verificará comparando los resultados obtenidos con datos. Otro desafío importante es la velocidad de muestreo, ya que en aplicaciones estructurales puede ser necesario tomar mediciones en tiempo real para detectar posibles fallas o cambios en el comportamiento de la estructura. En este sentido, es importante que el ADC del microcontrolador tenga una velocidad de muestreo adecuada para las necesidades de la aplicación. Para validar el funcionamiento del sistema diseñado se propone la realización de un prototipo de pruebas para demostrar el desempeño del diseño.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sensor inteligente para aplicaciones de monitoreo de salud estructural.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Documentar las principales características y la importancia del monitoreo para aplicaciones de salud estructural.
2. Documentar los principales métodos de recolección de datos soportados por los sensores necesarios para la medición de las variables de interés.
3. Evaluar y proponer el protocolo de comunicación que permita el envío fiable de los datos recolectados por el sensor.
4. Seleccionar el hardware adecuado tanto sensores como microcontroladores para la implementación futura del sistema.
5. Diseñar el módulo de programa encargado de la recolección y almacenamiento de los datos provenientes de los sensores.
6. Desarrollar el módulo de programa encargado de la comunicación de los datos usando la plataforma escogida.
7. Desarrollar una aplicación para el monitoreo y ajuste del sensor inteligente.
8. Validar el funcionamiento del sistema haciendo uso de un prototipo de pruebas.

1.5. Antecedentes

La implementación de microcontroladores para sistemas de adquisición de datos es un tema que se ha desarrollado en múltiples aplicaciones. Muchas veces, se logran desarrollar soluciones que permiten disminuir costos sin que eso afecte la calidad de las mediciones. Las soluciones que se tomarán como referencia lograron: Desarrollar sistemas de adquisición de datos basados en microcontroladores para la medición de variables físicas. Además, se han logrado crear redes de sensores inteligentes que permiten facilitar el envío de los datos de forma inalámbrica.

El trabajo de Federici (2014) en "*Design of Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring applications*" publicado en Procedia Engineering, aborda el diseño de redes de sensores inalámbricos para el monitoreo del estado de estructuras civiles, centrándose específicamente en el diseño de nodos en relación con los requisitos de diferentes clases de aplicaciones de monitoreo estructural. Los problemas de diseño se analizan con referencia específica a una configuración experimental a gran escala (el monitoreo estructural a largo plazo de la Basílica S. Maria di Collemaggio, L'Aquila, Italia). Se destacaron las principales limitaciones que surgieron y se esbozan las estrategias de solución adoptadas, tanto en el caso de la plataforma de detección comercial como de las soluciones totalmente personalizadas. Se revisan las opciones para el diseño y despliegue del sistema de monitoreo, tanto en el caso de la selección de plataformas comerciales como en el caso del desarrollo de plataformas a la medida. El análisis de los registros llevó a importantes consideraciones en la integridad estructural y seguridad, y permitió la identificación de los parámetros modales de la estructura.

En cuanto al desarrollo realizado por Komarizadehasl (2022) en "*Development of Low-Cost Sensors for Structural Health Monitoring Applications*", el ingeniero Komarizadehasl propone cuatro sistemas de monitorización de alta precisión y

bajo coste. En primer lugar, para medir correctamente las respuestas estructurales, se desarrolla el *Cost Hyper-Efficient Arduino Product* (CHEAP). CHEAP es un sistema compuesto por cinco acelerómetros sincronizados de bajo coste conectados a un microcontrolador Arduino que hace el papel de dispositivo de recogida de datos. Para validar su rendimiento, se efectuaron unos experimentos de laboratorio y sus resultados se compararon con los de dos acelerómetros de alta precisión (PCB393A03 y PCB 356B18). Se concluye que CHEAP puede usarse para Monitoreo de Salud Estructural en estructuras convencionales con frecuencias naturales bajas cuando se cuente con presupuestos de monitoreo escasos.

En segundo lugar, se presenta un inclinómetro de bajo coste, un *Low-cost Adaptable Reliable Angle-meter* (LARA), que mide la inclinación mediante la fusión de distintos sensores: cinco giroscopios y cinco acelerómetros. LARA combina un microcontrolador basado en la tecnología del Internet de las Cosas (*NODEMCU*), que permite la transmisión inalámbrica de datos, y un software comercial gratuito para la recogida de datos (*SerialPlot*). Para confirmar la precisión y resolución de este dispositivo, se compararon sus mediciones en condiciones de laboratorio con las teóricas y con las de un inclinómetro comercial (*HI-INC*). Los resultados de laboratorio de una prueba de carga en una viga demuestran la notable precisión de LARA. Se concluye que la precisión de LARA es suficiente para su aplicación en la detección de daños en puentes.

En tercer lugar, también se dilucida el efecto de la combinación de sensores de rango similar para investigar el aumento de la precisión y la mitigación de los ruidos ambientales. Para investigar la teoría de la combinación de sensores, el ingeniero Komarizadehasl, propone un equipo de medición compuesto por 75 sensores para la medición de distancias acoplados a dos microcontroladores de Arduino. Los 75 sensores son 25 HC-SR04 (analógicos), 25 VL53L0X (digitales) y 25 VL53L1X (digitales). Los resultados muestran que promediando la salida de

varios sensores sin calibrar, la precisión en la estimación de distancia aumenta considerablemente.

El último sistema propuesto por Komarizadehasl presenta un novedoso y versátil sistema de adquisición de datos a distancia que permite el registro del tiempo con una resolución de microsegundos para la sincronización posterior de las lecturas de los sensores inalámbricos situados en diversos puntos de una estructura. Esta funcionalidad es lo que permitiría su aplicación a pruebas de carga estáticas, quasi-estáticas o al análisis modal de las estructuras.

Muttillo (2019) en su trabajo "*Structural health continuous monitoring of buildings - A modal parameters identification system*" propone en su tesis el diseño de un Sistema de Monitoreo de la Salud Estructural (*Structural Health Monitoring*) para monitorear y comprobar continuamente el comportamiento estructural a lo largo de la vida útil del edificio. El sistema, compuesto por un datalogger personalizado y dispositivos esclavos, permite el monitoreo continuo de la aceleración de la estructura gracias a su facilidad de instalación y bajo coste. El sistema propuesto se basa principalmente en un microcontrolador que:

- Se comunica con los nodos a través del bus RS485,
- Sincroniza las muestras de adquisición
- Adquiere los datos medidos por los nodos.

El sistema fue probado en una estructura de aluminio en voladizo, a través de tres campañas experimentales diferentes y los datos medidos, recogidos en una memoria interna del *datalogger*, fueron post-procesados a través de *Matlab*. Los resultados permitieron evaluar con éxito los parámetros modales (frecuencias, amortiguamiento y formas modales) de la estructura analizada y su estado de salud.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definirán los conceptos o fundamentos de instrumentación estructural, sensores inteligentes, adquisición y procesamiento de datos, necesarios para llevar a cabo esta investigación.

2.1. Estructuras civiles

2.1.1. Características generales

Una estructura se refiere a un sistema de partes o elementos que se interconectan para cumplir una función específico. En el caso de la ingeniería civil, suelen ser miembros que se utilizan para soportar una carga. Algunos ejemplos importantes son los edificios, los puentes y las torres; y en otras ramas de la ingeniería, son importantes las corazas de barcos y aviones, los sistemas mecánicos y las estructuras que soportan las líneas de transmisión eléctrica (Hibbeler y Nolan, 1997).

2.1.2. Tipos de estructuras

Según Hibbeler y Nolan (1997), cada sistema está formado por uno o varios de los cuatro tipos básicos de estructuras:

- Celosías.
- Cables y arcos.
- Armazones.
- Estructuras de superficie.

En general, estos elementos suelen soportar cargas, pueden ser estacionarios y también estar restringidos. Sus diferencias suelen basarse en la cantidad de fuerzas a las que están sujetos estos elementos en un instante dado.

La combinación de estos elementos y los materiales que los componen es lo que se denomina un sistema estructural. Estos sistemas, aunque sean pasados por alto, son utilizados diariamente por industrias y personas, siendo elementos claves en el desarrollo y progreso de la civilización actual.

2.1.3. Comportamiento de las estructuras civiles

La gran mayoría de los sistemas cuentan con una respuesta dinámica y estática. Ambas respuestas permiten conocer el comportamiento completo del sistema en estudio ante distintas entradas o en diferentes situaciones. Al estudiar el comportamiento estructural se encuentra una extensa literatura tanto para el estudio dinámico como para el régimen estático, recopilándose lo siguiente:

- Respuesta estática: En la ingeniería civil toda estructura se diseña para que se encuentre en reposo cuando actúan sobre esta fuerzas externas, es decir, la estructura en conjunto debe cumplir con las condiciones de equilibrio, siendo la fuerza y el momento resultante sobre esta igual a cero en todo momento. Para describir estas condiciones de equilibrio se cuentan con herramientas

matemáticas que proporcionan las condiciones necesarias para su cumplimiento. Estas ecuaciones permiten la resolución estática de la estructura, la cual permite determinar el valor de todas las incógnitas estáticas de interés (Basset Salom, 2014).

Cuando las fuerzas que actúan sobre la estructura pueden calcularse a partir de las ecuaciones de equilibrio, se tiene una estructura en equilibrio y se denomina estructura estáticamente determinada. En caso de tenerse más fuerzas desconocidas que ecuaciones de equilibrio se habla de una estructura estáticamente indeterminada.

- Rigidez: Uno de los parámetros más importantes dentro de la respuesta estática es la rigidez. Esta se define como la propiedad que tiene un elemento estructural de soportar la deformación o deflección al estar bajo la acción de una fuerza o carga. Una medida de la rigidez viene dada por el Módulo de Young; esta es una constante del material y es independiente de la cantidad de material.
- Respuesta dinámica: La dinámica estructural se encarga de estudiar el efecto que tienen cargas dinámicas sobre el sistema. La respuesta ante estos eventos, como pueden ser sismos, vientos, equipos mecánicos, paso de vehículos o personas, se denomina respuesta dinámica (Hurtado, 2000). Además, la respuesta dinámica permite caracterizar algunos parámetros de gran interés para estudiar su comportamiento conocidos como parámetros modales. Estos parámetros surgen al estudiar las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de la estructura, partiendo de un modelo idealizado simple de masa concentrada como el de la Figura 2.1.

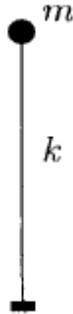


Figura 2.1: Modelo de masa concentrada de 1 grado de libertad (Hurtado, 2000).

La dinámica de este modelo puede describirse utilizando la ecuación diferencial de movimiento:

$$m\ddot{u} + f_R(t) = p(t) \quad (2.1)$$

La ecuación 2.1 se conoce como ecuación de vibración libre sin amortiguamiento. Donde $p(t)$ representa las cargas dinámicas y $f_R(t)$ la fuerza de restitución propia de un material elástico. Esta ecuación es una ecuación diferencial de coeficientes constantes, que consta de una solución homogénea más una solución particular. La solución homogénea será la respuesta de la estructura a la vibración libre, es decir, si la masa de la Figura 2.1 se deja oscilar libremente.

Se sabe que una ecuación de este tipo tendrá una solución como:

$$u = A \cdot \sin \omega t + B \cdot \cos \omega t \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 contiene información relevante para la caracterización dinámica de la estructura. Esta caracterización parte del estudio de los parámetros modales de la misma.

Entre estos parámetros modales se encuentran:

- Frecuencia natural: Toda estructura física tiene asociada una frecuencia de vibración natural. Las máquinas, los puentes, los edificios; todas estas estructuras vibran u oscilan al ser perturbadas o removidas de su estado de reposo inicial. Es una propiedad intrínseca del sistema y depende de su masa, rigidez y amortiguamiento. Todas tienen al menos una frecuencia natural y es posible que tengan múltiples frecuencias de resonancia (Irvine, 2000).

Se suele calcular la frecuencia natural de resonancia de un sistema libre usando:

$$f = \frac{1}{\sqrt{\frac{k}{m}}} \quad (2.3)$$

- Amortiguamiento: Toda estructura comienza a oscilar una vez es removida de su estado de reposo o equilibrio, sin embargo, ese movimiento no es perpetuo. El amortiguamiento se define como la capacidad de disipación de energía que posee la estructura bajo excitaciones externas. Al añadir el amortiguamiento de tipo viscoso, las soluciones a la ecuación 2.1 arrojan 3 posibles casos:

1. Sistema críticamente amortiguado: El sistema no vibra.
2. Subamortiguado o amortiguado subcrítico: Caso más común por la naturaleza de los materiales utilizados en las estructuras. La respuesta del sistema decae con el tiempo de forma exponencial, como se puede ver en la Figura 2.2.

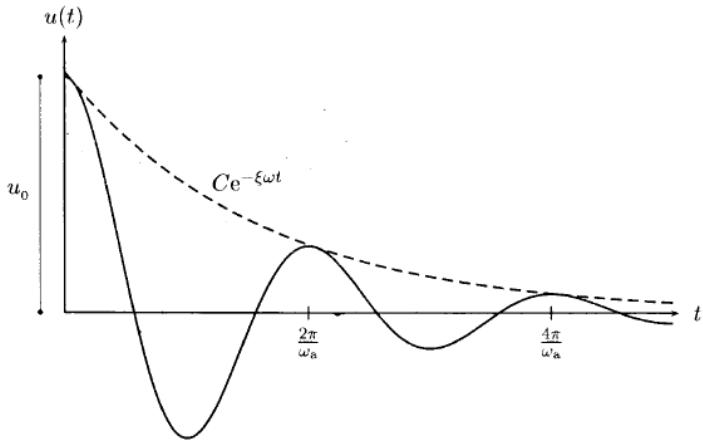


Figura 2.2: Respuesta ante vibración libre en sistema Subamortiguado (Hurtado, 2000).

3. Sobreamortiguado: Nunca se encuentra esta respuesta en sistemas estructurales por los materiales utilizados.

2.1.4. Daño en estructuras

El daño a una estructura civil o mecánica puede definirse como todo cambio en las propiedades materiales o geométricas del material que llegan a afectar de forma adversa la confiabilidad y el desempeño actual o futuro del sistema. Por tanto, el daño es una comparación entre el sistema en cuestión en 2 instantes de tiempo distintos (Farrar y Worden, 2007). Estos efectos adversos pueden ser, en el caso estructural, desplazamientos, estrés indeseado en un elemento o vibraciones estructurales indeseadas (Chen, 2018).

Todas las estructuras civiles, como puentes y edificios, acumulan daño de forma continua a medida que están en servicio y transcurre su vida útil. Este daño puede manifestarse como fracturas, fatiga, socavaciones o desprendimiento del concreto. El daño que no sea detectado puede conducir a una falla estructural que a su vez ocasione pérdidas humanas. Por tanto, es imperativo y necesario

detectar el daño en una estructura tan pronto como sea posible, (Chen, 2018).

Entre algunos de los factores que influyen del deterioro de una estructura se encuentran:

- Proceso de degradación natural de los materiales.
- Corrosión del acero de refuerzo.
- Evento sísmico, incendios o condiciones de guerra.
- Carga por encima del límite de diseño.

Las escalas de tiempo y de extensión del daño son diversas. Por ejemplo, el deterioro por el paso del tiempo bajo ciertas condiciones climáticas es muy lento comparado al daño causado por un evento catastrófico.

2.1.5. Principios de la sismo-resistencia

Una edificación sismorresistente es aquella que está diseñada y construida para soportar las fuerzas causadas por eventos sísmicos. Sin embargo, incluso las edificaciones diseñadas y construidas según las normas sismorresistentes pueden sufrir daños en caso de un terremoto muy fuerte, sin embargo, las normas establecen los requisitos mínimos para proteger la vida de las personas que ocupan la edificación

Algunas de las características de una estructura sismorresistente son:

- Forma regular.
- Bajo peso.
- Mayor rigidez.

- Buena estabilidad.
- Suelo firme y buena cimentación.
- Materiales competentes.
- Capacidad de disipación de energía.
- Fijación de acabados e instalaciones.

En Venezuela las estructuras deben cumplir con la Norma Venezolana CO- VENIN 1756-1:20019 (Construcciones Sismorresistentes), (Comisión Venezolana de Normas Industriales, 2019).

Se ha observado que al estudiar el comportamiento de las estructuras luego de un evento sísmico, es evidente que cuando se toman en cuenta las normas de diseño sismorresistente dispuestas en la ley y la construcción es debidamente supervisada, los daños estructurales resultan ser considerablemente menores que en las edificaciones en las cuales no se cumplen los requerimientos mínimos indispensables estipulados en la norma, (Blanco, 2012).

Importancia de la instrumentación

La instrumentación estructural permite medir y monitorear las acciones y respuestas estructurales ante distintos eventos. Esto proporciona datos en tiempo real y fuera de línea sobre el comportamiento dinámico y estático de la estructura, como deformaciones, aceleraciones y desplazamientos, que son fundamentales para evaluar y verificar si la estructura cumple con los criterios de diseño sismorresistente establecidos en la norma.

La instrumentación estructural ayuda a validar los modelos y suposiciones utilizados en el diseño estructural inicial. Al comparar los datos recopilados por

la instrumentación durante un evento sísmico con las predicciones del modelo, es posible verificar si la estructura se comporta de acuerdo con las expectativas y si cumple con los criterios de seguridad establecidos en la norma.

Además, el monitoreo continuo de la estructura permite conocer el estado actual de la misma, tema que representa la idea principal del Monitoreo de Salud Estructural, permitiendo a los ingenieros evaluar si se sigue cumpliendo con la norma para luego tomar decisiones y actuar en pro de la seguridad de la edificación.

2.2. Salud estructural

2.2.1. Definición

El proceso de implementar una estrategia de identificación de daño para estructuras civiles, mecánicas o aeroespaciales se conoce como Monitoreo de Salud Estructural (SHM por sus siglas en inglés). Esta estrategia requiere medir las condiciones y el ambiente en el que opera la estructura, además de la respuesta de la misma durante un período de tiempo tomando muestras periódicamente espaciadas, (Farrar y Worden, 2007).

La estrategia del SHM requiere de equipos multidisciplinarios de ingeniería, ya que necesita de una red de sensores que midan las variables de interés, el procesamiento y análisis de los datos obtenidos y posteriormente una prognosis del daño para una eventual toma de decisiones. El objetivo del SHM es proveer, en toda la vida útil de la estructura, un diagnóstico del estado de sus materiales constitutivos, de los diferentes elementos que la componen y de la estructura en sí como el conjunto de todas estas partes. Esto para garantizar que la misma se comporte dentro de los parámetros iniciales de diseño, aunque estos cambien por la acción natural del tiempo, el ambiente y accidentes, (Balageas y cols., 2010).

El resultado de este proceso es información actualizada sobre el estado de la estructura y sobre su capacidad actual para seguir desempeñando la función para la cual fue diseñada.

Según Enckell (2006), el SHM se ha convertido en una herramienta muy conocida y utilizada en ingeniería estructural en los últimos años en diferentes países.

2.2.2. Reseña histórica

Las técnicas de detección de daño basadas en vibración tienen sus primeras aplicaciones desde hace cientos de años. En la antigüedad, los constructores golpeaban las estructuras para encontrar espacios vacíos o grietas en elementos de arcilla. La utilidad de estas inspecciones tan simples indicaban que la sofisticación de estos métodos podía proveer información muy valiosa sobre el elemento de interés, sin embargo, esto requiere de instrumentos y herramientas matemáticas que se han desarrollado con el pasar de los años. El auge en el uso de SHM en años recientes es consecuencia de la evolución y miniaturización del hardware computacional actual.

El uso más exitoso del SHM ha sido el monitoreo de la condición de máquinas rotativas, las cuales actualmente han adoptado un enfoque de identificación de daño sin basarse en un modelo de forma casi exclusiva, (Farrar y Worden, 2007).

En los años 70 la industria petrolera consideró el uso de técnicas basadas en vibración para identificar daños en plataformas costa-afuera, este enfoque se diferenció de las máquinas rotativas al estudiar un sistema en donde la ubicación del daño es desconocida y difícil de instrumentar.

En esa misma época, la comunidad aeroespacial y la *National Aeronautics*

Space Agency (NASA), comenzaron a estudiar esta técnica de identificación de daño en los comienzos de la era de lanzamientos espaciales. Este trabajo continúa hoy en día y el *Shuttle Modal Inspection System* (SMIS) se desarrolló para identificar fatiga en distintos componentes de cohetes espaciales reutilizables, los cuales representan el futuro de esta industria.

Usualmente, los enfoques de estas industrias se basan en comparar modelos analíticos de estructuras sin daño con las mediciones de estructuras con daño, observando principalmente las propiedades modales de las mismas. Se ha observado que cambios en la rigidez en ambos modelos han permitido localizar y cuantificar el daño, (Farrar y Worden, 2007).

Inicialmente, las técnicas no destructivas fueron introducidas en la ingeniería civil a mediados de los años 40, (Abdo, 2014). La necesidad principal surgió en determinar propiedades del concreto fresco *in-situ*. Estas técnicas, que buscaban evaluar la homogeneidad y la resistencia del concreto eran en su mayoría pruebas con martillo y pruebas de *pull-out*. A medida que las estructuras envejecieron, los ingenieros necesitaban idear maneras de medir o estimar las propiedades mecánicas de los elementos que constituyen las estructuras, además de detectar daños que no eran fáciles de observar por la envergadura de las estructuras civiles que se han desarrollado en los últimos 150 años. Es ahí, en los años 70, donde surgen nuevas estrategias no destructivas tales como:

- Emisión acústica.
- Métodos de ultrasonido y radar.
- Termografía.
- Métodos basados en vibración

La comunidad de ingeniería civil ha estudiado la identificación de daño basada en vibración en puentes y edificios desde comienzos de los años 80. Las propiedades modales han sido estudiadas por diferentes autores y son las principales características que se analizan al identificar daño. El auge del SHM es tal, que algunos países asiáticos han implementado regulaciones en donde las compañías constructoras deben verificar la salud estructural de los puentes periódicamente. Estas regulaciones han provocado que la investigación e inversión en esta área siga aumentando de forma considerable (Chen, 2018).

2.2.3. Línea de trabajo del Monitoreo de Salud Estructural

Los sistemas de SHM consisten de varios elementos que permiten a los ingenieros tener información sobre el estado de una estructura, entre esos elementos se encuentran:

- Sensores.
- Sistemas de adquisición de datos.
- Sistema de transmisión de datos.
- Sistema de procesamiento de datos.
- Sistema de manejo y almacenamiento de datos.
- Equipo de análisis y toma de decisiones.

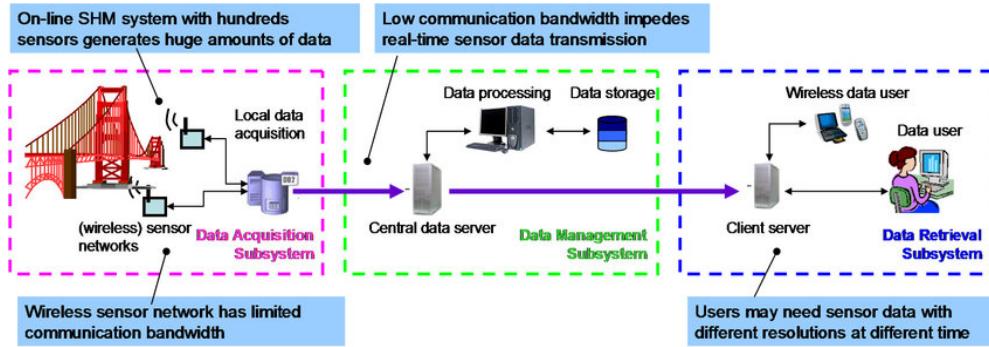


Figura 2.3: Esquema de un sistema de SHM (Li y cols., 2015).

Autores como Rytter (1993) y Farrar y Worden (2007) han esquematizado la estrategia del SHM categorizando el daño en una estructura por niveles de la siguiente forma:

1. Nivel I (detección del daño) ¿Presenta daño el sistema? Es una indicación cualitativa de que puede haber daño presente en la estructura.
2. Nivel II (localización o ubicación del daño) ¿Dónde está presente el daño? Indica la posible localización del mismo.
3. Nivel III (clasificación del daño) ¿Qué tipo de daño está presente? Da información sobre el tipo de daño.
4. Nivel IV (alcance/grado/extensión del daño) ¿Cuál es el alcance del daño? ¿Qué tan grave es? Da un estimado del alcance.
5. Nivel V (prognosis del daño) ¿Cuánta vida útil le queda a la estructura? Da un estimado de la seguridad de la estructura.

En la mayoría de los casos, para alcanzar el nivel final es necesario obtener información sobre los niveles previos. Esto indica que a medida que se sube de nivel se tiene un mayor conocimiento sobre el estado de la estructura.

De acuerdo a Chen (2018), los primeros dos niveles, detección y localización, generalmente pueden alcanzarse usando métodos de detección basados en vibración para obtener mediciones sobre la respuesta dinámica de la estructura.

Por su parte, Chen (2018) describe el proceso de SHM en general como:

1. Observación.
2. Evaluación.
3. Calificación.
4. Gestión.

La estrategia de Monitoreo de Salud Estructural podría resumirse en el siguiente diagrama:

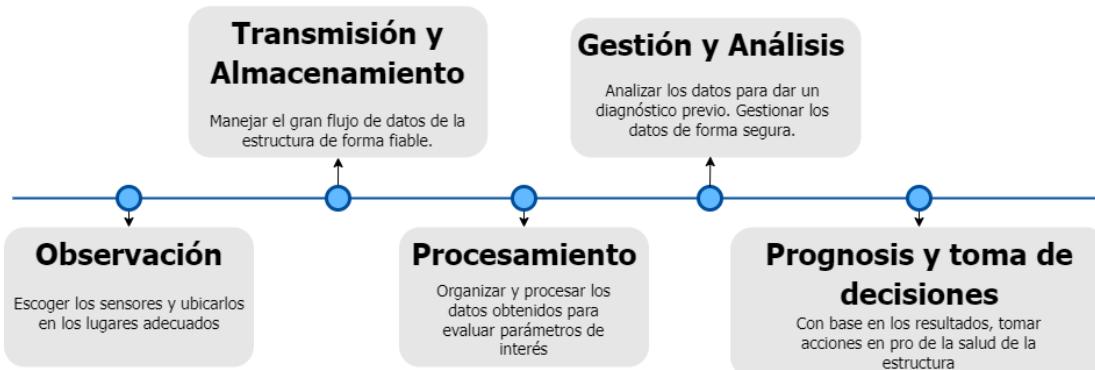


Figura 2.4: Diagrama general del proceso de SHM.

2.2.4. Criterios de evaluación

Como se definió anteriormente, el daño estructural puede tener distintas causas y formas. Lo que se sabe con certeza es que una estructura, una vez entra en

funcionamiento, análogo a los seres humanos al nacer, estará sujeta a envejecimiento natural y a condiciones adversas. Ahora bien, en el caso del SHM, surge la siguiente pregunta: ¿Qué se debe medir para poder detectar este daño?.

Numerosos autores concluyen que uno de los indicativos de daño de una estructura viene dado por los parámetros modales definidos anteriormente, frecuencia y amortiguamiento. Esta relación entre los parámetros modales y el daño viene dada por la premisa de que todo daño presente en la estructura se reflejará en un cambio en las propiedades dinámicas de la misma. Worden y Friswell (2009), comprobó la relación entre el cambio progresivo en todas las frecuencias naturales de 15 vigas estudiadas a las cuales se les introdujo un daño relacionado con un cambio del Módulo de Young, el cual, como fue mencionado anteriormente, provee un indicativo de la rigidez de un elemento.

Anteriormente, en la ecuación 2.1, se definió un sistema con un grado de libertad (DOF por sus siglas en inglés), sin embargo, en la realidad las estructuras tienen múltiples grados de libertad, por lo que es conveniente modelarlas de estar forma para obtener resultados más precisos. En el caso de los sistemas con “n grados de libertad”, la ecuación de movimiento que describe la dinámica del sistema en vibración libre vendrá dada por:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (2.4)$$

Donde M, C y K representan las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura, respectivamente.

Si se asume un sistema sin amortiguamiento, a fines de estudiar el efecto que tiene sobre la rigidez un cambio en los parámetros modales, de la ecuación 2.4 se obtiene:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (2.5)$$

Si se asume una solución osculatoria pura, por ser un sistema sin amortiguamiento:

$$u = ve^{j\omega t} \quad (2.6)$$

Al derivar, sustituir y despejar en la ecuación 2.5 se obtiene:

$$(K - \lambda M)\phi = 0 \quad (2.7)$$

Esta ecuación 2.7 representa claramente un problema de autovalores, donde λ representa los autovalores asociados a las frecuencias naturales del sistema y ϕ representa el autovector de desplazamiento.

Si se introduce un pequeño cambio ΔK con perturbaciones similares en los otros parámetros:

$$[(K - \Delta K) - (\lambda - \Delta \lambda)(M - \Delta M)](\phi - \Delta \phi) = 0 \quad (2.8)$$

El daño estructural suele venir asociado a un cambio en la rigidez, más no a cambios en la masa de la estructura, por lo que se asume $\Delta M = 0$, (Hearn y Testa, 1991). A su vez, se tiene que $(K - \lambda M)\phi = 0$. Abdo (2014), Shi, Law, y Zhang (1998) y Hearn y Testa (1991) desarrollan estas ecuaciones obteniendo la siguiente relación:

$$\Delta\lambda = \phi^T \Delta K \phi \quad (2.9)$$

De la ecuación 2.9 se observa que cambios en los autovalores λ que representan las frecuencias naturales, y en los autovectores ϕ (formas modales) están directamente relacionados con cambios en la matriz de rigidez (K) del sistema. De aquí surge el interés en monitorear los parámetros modales como indicadores de daño estructural. Es importante recalcar que estos cambios son indicativos de daño global, más no de la localización del mismo, para lo que se necesitan otras técnicas, (Abdo, 2014).

2.2.5. Variables de interés

Tomando en cuenta la relación entre los parámetros modales y el daño presente en una estructura, es preciso definir las variables de interés para el monitoreo de la salud estructural de una estructura. Si bien existen distintas variables que permiten obtener información valiosa sobre la estructura en estudio, algunas de estas no proporcionan información global del daño, como es el caso de las formas modales y la deflección local (Rytter, 1993). Sin embargo, estas mediciones proveen indicativos de la ubicación del daño, por lo que pueden constituir parte del sistema de monitoreo en una etapa más avanzada, es decir, una vez el daño fue detectado. A continuación se presentan las más relevantes para el daño global:

- Frecuencias naturales y amortiguamiento: Los parámetros modales de la estructura están ligados de forma directa al estado de la misma. El deterioro en una edificación induce cambios en la rigidez estructural, como se observa claramente en la ecuación 2.9. El daño puede tener efectos distintos en cada modo o cada frecuencia de vibración, por lo que es importante no ubicar

los sensores sobre los nodos modales, ya que experimentos han demostrado la ineeficacia en las mediciones. Usualmente, el daño se refleja como una disminución en las frecuencias naturales afectadas, aunque se han observado casos de aumento en las frecuencias de vibración en estructuras de concreto pretensado, (Rytter, 1993).

A su vez, el amortiguamiento varía al introducir daño en la estructura, puesto que su capacidad de disipar energía se ve afectada. Usualmente, los investigadores observan un aumento en el amortiguamiento a medida que el daño aumenta, como se ha demostrado experimentalmente por autores como Hearn y Testa (1991) y Rytter (1993).

- Temperatura y humedad: En los sistemas de monitoreo, la detección del daño estructural puede tomar períodos de tiempo considerables, durante los cuales las características sujetas a temperatura y humedad, sufren cambios que afectan la respuesta estructural.

Es evidente que las condiciones climáticas contribuyen con el deterioro de las edificaciones. A pesar de esta conclusión, relacionar las condiciones climáticas con el daño introducido usando mediciones ambientales es difícil. La medición de estas variables suele tomarse en cuenta para poder cuantificar el cambio que producen estas condiciones en los demás indicadores de daño. Rytter (1993) observó que la humedad y temperatura afectaban las mediciones de amortiguamiento. Por su parte, Abdo (2014), observó que las frecuencias naturales de barras y vigas disminuían a medida que aumentaba la temperatura. A su vez, Sohn (2007) determinó que cuando hay humedad presente en el ambiente, los puentes de hormigón absorben una cantidad considerable de esta, lo que aumenta sus masas y altera sus frecuencias naturales.

- Inclinación y desplazamiento: Una de las variables más comunes en Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural es el desplazamiento lineal, que refleja de

forma directa el comportamiento de un elemento o estructura. Esta podría considerarse una variable de tipo estático, ya que a pesar de variar con el tiempo, es decir, depender de un componente dinámico como el viento o la carga vehicular, su interacción con el medio suele ser quasi-estática, causada por la carga estática de la estructura, efectos térmicos y asentamiento.

Los inclinómetros son utilizados en elementos estructurales para medir el desplazamiento lineal de un elemento respecto a una referencia. Suelen ser utilizados para dar una idea de la fijación que presentan los puentes en sus soportes o para monitorear a largo plazo el movimiento de estructuras sobre superficies propensas a deslizamientos.

La deflexión, que puede medirse haciendo uso de inclinómetros los cuales han generado un gran interés en la industria por su sensibilidad y bajo costo, es una variable muy importante a medirse en una estructura. La deflexión puede ser consecuencia de la corrosión de los elementos de soporte, pérdida del pretensado o el crecimiento de grietas en el concreto. Es decir, a medida que la deflexión aumenta se acelera la acumulación de daño, por tanto, medir esta variable puede proveer alertas tempranas sobre posibles cambios estructurales o deterioro (Zhang, Sun, y Sun, 2017).

Autores como Komarizadehasl (2022) destacan la medición de la inclinación en las últimas décadas en el sector de la Ingeniería Estructural, inicialmente con propósitos geotécnicos. Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos en los sensores, se comenzó a emplear su uso en otras áreas, sobre todo en el monitoreo de salud estructural.

2.3. Métodos de identificación de daño

2.3.1. Basado en modelo

El método basado en modelo consiste en estructurar un modelo de elemento finito que será utilizado para identificar y localizar el daño en la estructura. Su precisión dependerá de su nivel de correlación con la estructura real, por lo que este método suele emplearse luego de realizar mediciones sobre el sistema y obtener datos experimentales, que permiten ajustar el modelo y disminuir las discrepancias, (García-Fernandez, 2023).

2.3.2. Basado en respuesta

El monitoreo de salud estructural basado en datos hace uso de datos reales de la estructura obtenidos a través de mediciones experimentales en sitio. Diferentes arreglos de sensores se utilizan para medir los parámetros de interés para el SHM (Abdo, 2014).

En este método, se comparan los datos obtenidos con los datos históricos de la estructura sin daño. Esta información previa puede ser suministrada por un software de simulación de la estructura basado en sus características iniciales de construcción. Autores como Fritzen (2005) estudiaron el uso de la información modal mediante estudios de vibración ambiental y forzada.

2.4. Ensayos estructurales

Los ensayos estructurales se utilizan para evaluar la integridad y el comportamiento de estructuras. Estos ensayos pueden clasificarse en invasivos y no

invasivos, según la forma en que interactúan con la estructura en estudio. A continuación, se describen brevemente ambos tipos de ensayos:

2.4.1. Ensayos invasivos

- Extracción y análisis de núcleos de concreto: Estos ensayos implican la extracción de muestras de material de la estructura para someterlas a pruebas en laboratorio. Por ejemplo, se pueden realizar pruebas de compresión, tracción o flexión en muestras de concreto, acero u otros materiales utilizados en la construcción. A su vez, los núcleos se someten a distintas condiciones de temperatura y humedad para evaluar su comportamiento.
- Pruebas de carga: Consisten en aplicar cargas controladas a la estructura y medir su respuesta. Esto puede incluir la aplicación de cargas estáticas o dinámicas para evaluar la capacidad de carga, la rigidez y la respuesta estructural.

2.4.2. Ensayos no invasivos o mínimamente invasivos

Los ensayos no invasivos se introdujeron en la ingeniería civil durante los años 40 (Abdo, 2014). Desde entonces, muchas de estas pruebas han sido estandarizadas, siendo las normas COVENIN 2221:84 y COVENIN 318-84 algunas de las normativas para este tipo de ensayos en Venezuela.

Con el envejecimiento progresivo de las estructuras, la industria de la construcción ideó nuevas técnicas durante los años 70, permitiendo evaluar de forma más rigurosa las propiedades mecánicas de los materiales y detectar anomalías o daños sin perjudicar la estructura. Algunos de estos métodos se describen a continuación:

- Inspección visual: Estos ensayos se basan en la inspección visual de la estructura para detectar signos de daño, deformaciones o fallas.
- Radiografía: Se utilizan rayos X o rayos gamma para inspeccionar estructuras en busca de defectos internos, como grietas, inclusiones de materiales o corrosión.
- Ultrasonido: Estos ensayos se basan en la inspección visual de la estructura para detectar signos de daño, deformaciones o fallas.
- Análisis de vibración estructural: Los ensayos de vibración permiten describir y evaluar el comportamiento dinámico de la estructura en estudio. Se hace uso de acelerómetros para obtener registros del movimiento estructural ante distintos tipos de vibración y posteriormente se ejecuta el estudio de estos datos en el dominio de la frecuencia, prestando especial interés a las frecuencias de resonancia presentes en el espectro, tanto propias del sistema (modos de vibración), como ajena al mismo que puedan afectar su funcionamiento.

2.5. Microcontroladores (MCU)

2.5.1. Definición y características

Un microcontrolador es un dispositivo diseñado para controlar tareas específicas en sistemas electrónicos. Usualmente se fabrican utilizando técnicas de miniaturización como VLSI (*Very Large Scale Integration*). Varios tipos de microcontroladores están disponibles en el mercado con diferentes características, clasificándose generalmente por su tamaño en bits (2, 4, 8, 64 y 128 bits). Los microcontroladores encapsulan en un solo chip un microprocesador, memoria, periféricos de entrada/salida y otros componentes necesarios para controlar y

ejecutar tareas específicas. Esencialmente, es un pequeño ordenador en un solo circuito integrado.

Los microcontroladores se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones donde se requiere control y procesamiento de datos en tiempo real. Pueden encontrarse en dispositivos electrónicos como electrodomésticos, automóviles, equipos médicos, sistemas de seguridad, robots, entre otros.

Entre los elementos que componen un microcontrolador se encuentran:

- Unidad Central de Procesamiento.
- Memoria RAM (*Random Access Memory*) y ROM (*Read Only Memory*).
- Periféricos.
- Convertidores analógico digital (ADC) y digital-analógico (DAC).
- Temporizadores.
- Interfaces de comunicación.
- Real Time Clock (RTC).

En la figura 2.5 se observa el diagrama de bloques de las partes que constituyen un microcontrolador del fabricante Espressif.

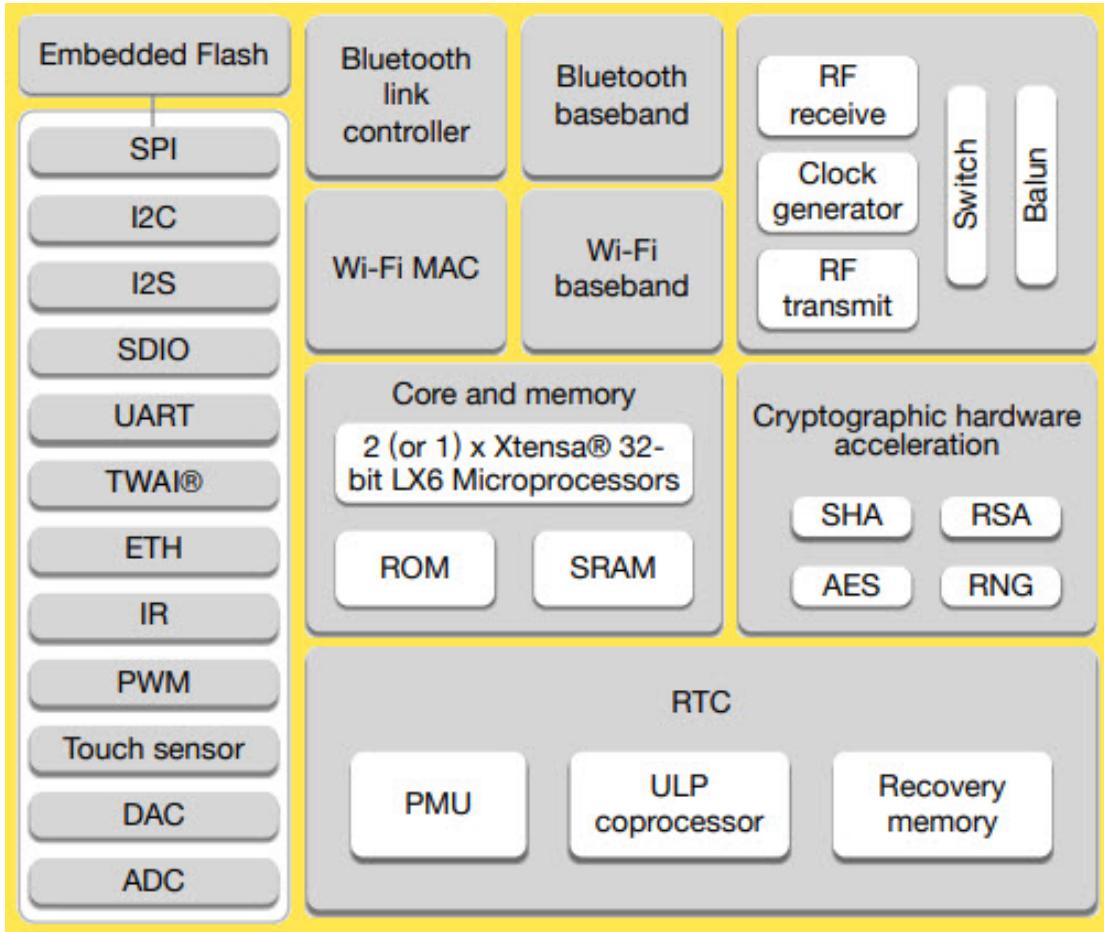


Figura 2.5: Esquema general del microcontrolador ESP32 (Systems, 2016).

2.5.2. Placas de desarrollo

Actualmente existen numerosas formas de hacer uso de las bondades que ofrecen los microcontroladores, especialmente al utilizar las distintas placas de desarrollo que se han diseñado para facilitar su programación e interfaz, ofreciendo la capacidad de comunicarse con un computador de forma sencilla a través del puerto USB, brindando distintas funcionalidades a los periféricos y facilitando la alimentación al microcontrolador. Estas tarjetas han logrado disminuir el costo del uso de los microcontroladores, especialmente para la creación de prototipos que permiten evaluar la factibilidad de un proyecto antes de diseñar la placa de circuito.

impreso (PCB por sus siglas en inglés) con un microcontrolador pre-programado.

Las placas de desarrollo se pueden subdividir en:

- *System-on-Chip* (SoC).
- Basadas en microcontrolador (*MCU-based*).
- *Single-Board-Computer* (SBC).

Algunas de los fabricantes de tarjetas de desarrollo más reconocidos que cuentan con comunidades y soporte técnico son:

- STMicroelectronics.
- Espressif.
- Texas Instruments.
- Nordic Semiconductors.
- NXP.
- Arduino.
- Raspberry Pi.

2.5.3. Protocolos de comunicación

Los protocolos de comunicación fueron desarrollados y estandarizados para que sensores, drivers y diferentes periféricos y dispositivos de entrada y salida pudieran comunicarse entre sí sin problemas, evitando la tediosa tarea de buscar dispositivos compatibles dependiendo de la aplicación y el fabricante a utilizar.

Cada protocolo tiene sus características y aplicaciones, siendo diseñados para propósitos distintos. El desarrollador o diseñador puede escoger uno o más dependiendo de las especificaciones del producto a diseñar. A continuación se mencionan los más utilizados por los microcontroladores:

- **UART** (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*): Uno de los protocolos más simples y comúnmente utilizado para comunicación entre dos dispositivos. Como su nombre lo indica, no utiliza una señal de reloj para sincronizar al dispositivo transmisor y receptor. Es por esto que, a diferencia de la mayoría de los protocolos, solo utiliza 2 cables para lograr la comunicación.

UART requiere de bits de inicio y parada para detectar datos entrante, además de requerir que la velocidad de comunicación sea configurada al mismo valor en bits por segundo (bps) en el receptor y transmisor. Admite comunicaciones Simplex, Half-Duplex y Full-Duplex.

- **I2C** (*Inter-Integrated Communication*): El protocolo I2C fue desarrollado por Philips Semiconductors en 1982. Se utiliza principalmente para comunicación entre periféricos, sensores y circuitos integrados en distancias cortas. Requiere 2 cables de datos (SDA y SCL, *serial data line* y *serial clock line* respectivamente) para el envío de la data serial. Este protocolo utiliza un bus de reloj para sincronizarse y verificar que los datos se envíen y reciban correctamente.
- **SPI** (*Serial Peripheral Interface*): Desarrollado por Motorola en los años 80. Es un protocolo de un solo maestro, varios esclavos. Requiere una señal de reloj para la sincronización entre los dispositivos esclavos y el maestro. Siendo una comunicación Full-Duplex, puede enviar y recibir datos de forma simultánea. Requiere 4 cables para la comunicación serial.

- USB (*Universal Serial Bus*): El protocolo USB es el más popular dentro de los protocolos seriales, con un uso extendido en el mundo computacional y electrónico. No requiere señal de clock siendo un protocolo serial asíncrono. Suele ser el estándar para conectar periféricos.

2.5.4. Sistemas Operativos en Tiempo Real (RTOS)

Un sistema operativo en tiempo real (RTOS por sus siglas en inglés), es un sistema operativo diseñado para manejar tareas que requieran ser monitoreadas de forma precisa y eficiente. Usualmente estas tareas son críticas en el tiempo, lo que lo diferencia de un sistema operativo de propósito general, el cual se especializa en ejecutar varias tareas al mismo tiempo, mientras que el RTOS se concentra en ejecutar las tareas en tiempo real.

El primer RTOS fue un programa desarrollado en la Universidad de Cambridge en los años 60. Este sistema permitía que varios procesos se llevaran a cabo bajo restricciones de tiempo precisas. Desde entonces, numerosos avances en la industria han hecho crecer la demanda por sistemas operativos en tiempo real, siendo utilizados en aplicaciones espaciales, médicas, militares y entre otras.

Entre las características principales de un RTOS se encuentran:

- Planificador (Scheduler): Administra el tiempo de CPU de cada tarea y determina qué tarea debe ejecutar en qué momento. Es el encargo de que el sistema sea determinístico.
- Despachador (Dispatcher): Provee o cede el control del CPU a una tarea. También se encarga de guardar el contexto de la tarea que se ejecuta para seguir su ejecución la próxima vez que esta se utilice.

- Multi-procesamiento simétrico: El RTOS es el sistema operativo ideal para una arquitectura de multi-procesamiento simétrico (SMP por sus siglas en inglés), en la cual cada núcleo de un procesador tiene su propio sistema operativo y tiene la capacidad de acceder a la lista de tareas disponibles. Todos los núcleos deben tener la misma arquitectura, lo que lo diferencia del multi-procesamiento asimétrico.

FreeRTOS

FreeRTOS es una clase de RTOS diseñado para ser ejecutado en microcontroladores. A pesar de ser un kernel muy liviano, su uso se ha extendido más allá de los sistemas embebidos. Es distribuido de forma libre bajo la licencia MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) de software libre.

En aplicaciones basadas en microcontroladores rara vez se requiere una implementación completa de un RTOS, por las restricciones de memoria de los mismos. Es por esto que FreeRTOS implementó un sistema enfocado en la sincronización, funcionalidades de comunicación entre tareas y planificación de tareas. Este RTOS incluye además distintas librerías que expanden sus funciones y mejoran la experiencia de uso.

Los principales elementos de un programa basado en FreeRTOS contienen:

- Colas (*Queues*): Las colas son el método principal de comunicación entre tareas. Pueden enviar datos de una tarea a otra o entre interrupciones y tareas. Suelen utilizarse como buffers FIFO (First-In-First-Out).
- Tareas (*Tasks*): Las tareas son las funciones que el sistema operativo en tiempo real ejecutará una vez el scheduler inicie el ciclo de programa. En ellas se contienen las distintas acciones que se quieren implementar en el

microcontrolador. No tiene valores de retorno y se implementan como un loop infinito. En la figura 2.6 se observan los distintos estados en los que puede encontrarse una tarea de FreeRTOS. Estas distintas posibilidades son las que permiten controlar el orden de ejecución de un programa de forma sincronizada. La ejecución de las tareas está regida por su prioridad y estas deben ser creadas antes de poderse ejecutar.

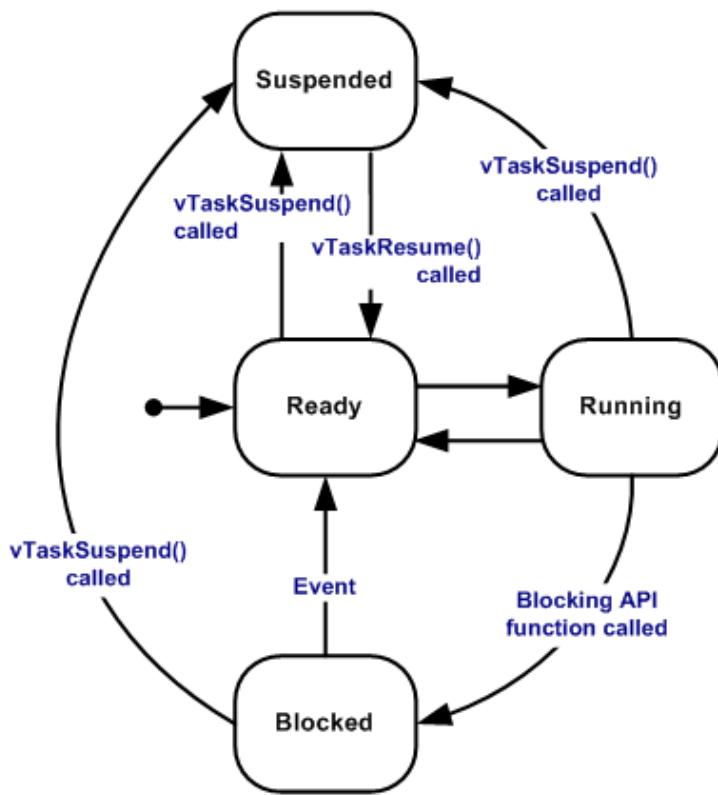


Figura 2.6: Estados de las tareas en FreeRTOS (FreeRTOS, 2024).

- Semáforos binarios (*Binary Semaphores*): La idea general de los semáforos binarios es permitir que las tareas accedan a recursos compartidos y ejecutar tareas complejas de sincronización. Suelen usarse en conjunto con los mutex (que viene del término *mutual exclusion*), los cuales evitan que se corrompan sectores de memoria cuando 2 tareas (que pueden estar ejecutándose en paralelo) quieran acceder a un espacio de memoria al mismo tiempo.

La arquitectura de un sistema basado en FreeRTOS se muestra en la figura 2.7:

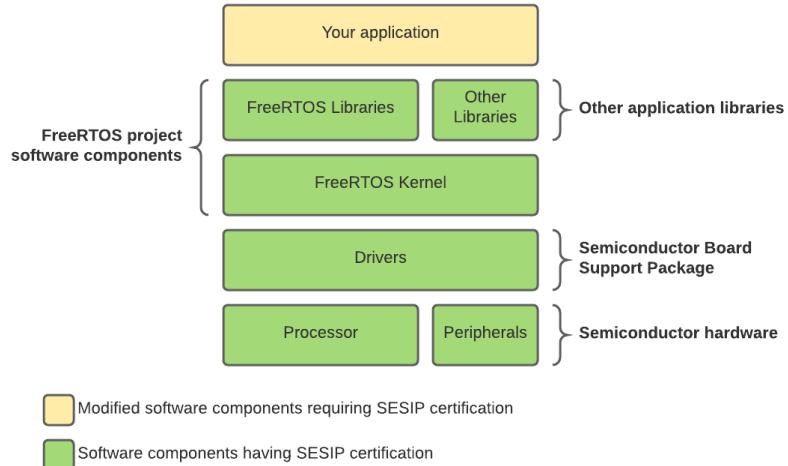


Figura 2.7: Arquitectura de sistema embebido basado en FreeRTOS (FreeRTOS, 2024).

2.6. Sensores

2.6.1. Definición

Los sensores son dispositivos capaces de detectar un parámetro físico y responder a la entrada de este fenómeno físico con una señal, usualmente eléctrica, que puede ser medida y transmitida. Usualmente se clasifican según la variable a medir, por el tipo de señal que emiten (digital o analógica, en el caso de señales eléctricas) y por su interacción con la variable a medir, siendo los activos los que generan una señal para obtener la medición y los pasivos los que responden a los cambios del medio físico. Son la base principal de todo sistema de instrumentación al representar el vínculo entre los variables físicas que se desean medir y el ser humano, cuyas capacidades sensoriales no están diseñadas para medir ciertas variables y mucho menos tomar valores y registros de las mismas.

2.6.2. Características de los sensores

- Sensibilidad: Razón entre el incremento en la señal de salida del sensor y la variación en la variable medida.
- Resolución: Representa la variación mínima de la variable a medir que puede ser detectada por el sensor.
- Rango: Representa el conjunto de valores comprendidos entre el límite superior e inferior de la capacidad del instrumento de medición. Este espectro suele representarse mediante los valores extremos.
- Temperatura de operación: Rango de temperaturas dentro del cual el comportamiento del sensor es el esperado dentro de un límite de error.
- Frecuencia de respuesta o ancho de banda: Rango de valores en el espectro de frecuencia dentro de los cuales los sensores son capaces de obtener mediciones de la variable de interés. Esta característica es particularmente importante en ensayos de vibración y ensayos dinámicos.

2.6.3. Sensores de interés para el Monitoreo de Salud Estructural

En el campo de la monitorización de salud estructural (SHM), existen varios tipos de sensores que se utilizan comúnmente. Algunos de los sensores más utilizados en SHM son los siguientes:

- Deformación: Estos sensores miden la deformación o la tensión en la estructura. Pueden incluir galgas extensiométricas, sensores de fibra óptica o sensores de cable extensométrico.
- Temperatura: Estos sensores miden la temperatura ambiente o la temperatura de la estructura. Son útiles para evaluar el efecto del calor en el

comportamiento estructural y detectar anomalías relacionadas con cambios térmicos. Se suelen utilizar los siguientes tipos:

- Termopares: consisten en dos cables de diferente material metálico unidos en un extremo. La diferencia de temperatura entre los extremos genera una pequeña corriente eléctrica que se puede medir y relacionar con la temperatura.

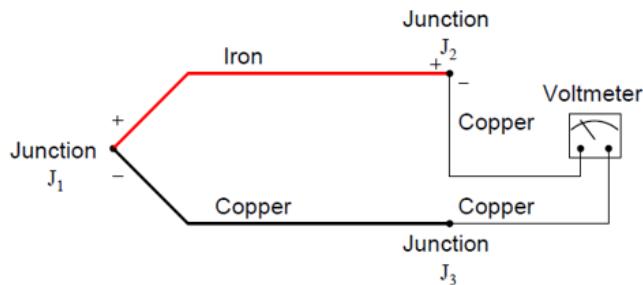


Figura 2.8: Esquema general de funcionamiento de un termopar (Dunn, 2005).

- Termistores: Utilizan materiales semiconductores cuya resistencia eléctrica cambia con la temperatura.
- Micro-electromecánicos (MEMS): Suelen utilizar el efecto termoeléctrico o la variación de las propiedades eléctricas de los materiales con la temperatura para medir y cuantificar los cambios térmicos.

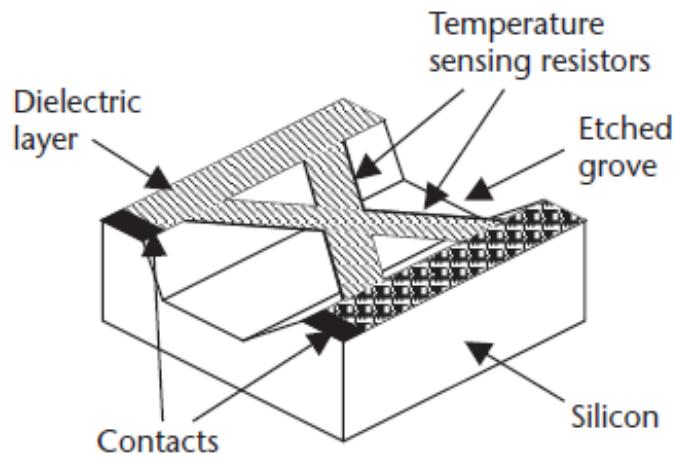


Figura 2.9: Esquema general de un sensor de temperatura de tecnología MEMS (Dunn, 2005).

- Humedad: Los sensores de humedad se utilizan para medir la humedad relativa o la presencia de agua en la estructura. Son particularmente útiles para evaluar el grado de corrosión en estructuras metálicas.
 - Capacitivos: utilizan la capacidad dieléctrica de un material sensible a la humedad para medir el contenido de agua en el aire o en el suelo. El cambio en la capacidad dieléctrica se traduce en una señal de salida proporcional a la humedad relativa.

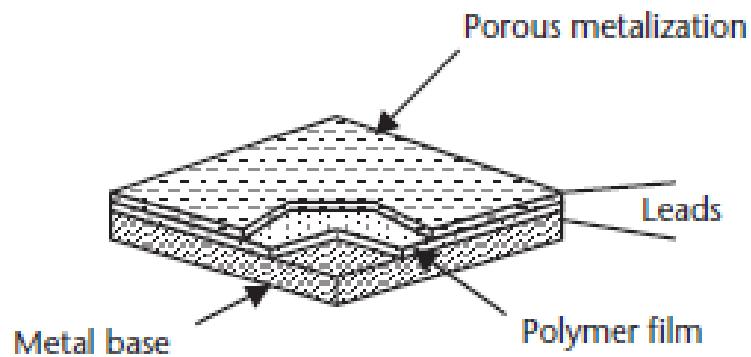


Figura 2.10: Esquema general de un sensor de humedad capacitivo (Dunn, 2005).

- Resistivos: Utilizan un material sensible a la humedad, como una película polimérica o un material cerámico, cuya resistencia eléctrica varía con la humedad.

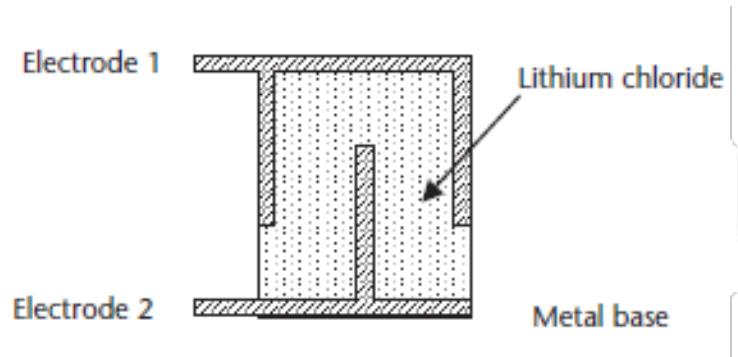


Figura 2.11: Esquema general de un sensor de humedad resistivo (Dunn, 2005).

- Micro-electromecánicos (MEMS): suelen utilizar una capa de material sensible a la humedad, como un polímero higroscópico, que experimenta cambios en sus propiedades físicas, eléctricas o capacitivas en respuesta a la humedad del ambiente.

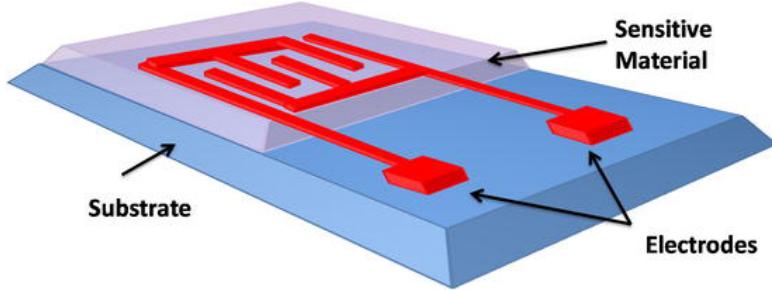


Figura 2.12: Esquema general de un sensor de humedad de tecnología MEMS (Alfaifi y Zaman, 2021).

- Acelerómetros: Estos sensores se encargan de medir la aceleración de la estructura en una o varias direcciones. Son útiles para evaluar la respuesta dinámica de la estructura ante cargas externas, vibraciones o sismos. Existen varios tipos de acelerómetros, entre los que se encuentran:
 - Piezoeléctrico: Se basan en el principio piezoeléctrico, donde un cristal piezoeléctrico genera una carga eléctrica proporcional a la aceleración aplicada. Son sensibles, ofrecen una amplia respuesta en frecuencia y son adecuados para medir tanto bajas como altas frecuencias de vibración.

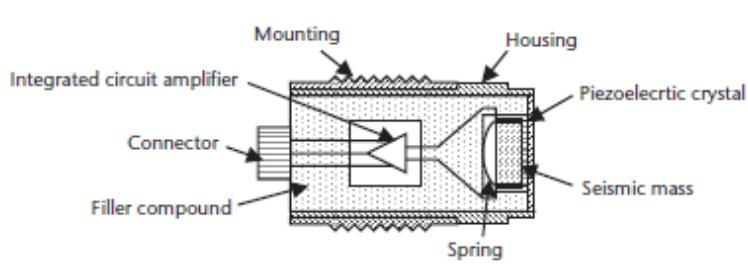


Figura 2.13: Esquema general de un acelerómetro piezoeléctrico (Dunn, 2005).

- Capacitancia Diferencial: utilizan un conjunto de placas móviles y fijas separadas por una pequeña distancia. La aceleración causa un cambio en la distancia entre las placas, lo que a su vez modifica la capacitancia del dispositivo. Este cambio en la capacitancia es proporcional a la aceleración.

- Micro-electromecánicos (MEMS): Se basan en el desplazamiento de una masa suspendida mediante resortes micro-mecánicos. Son pequeños, económicos y se utilizan ampliamente en aplicaciones de monitoreo estructural debido a su tamaño compacto y bajo consumo de energía.

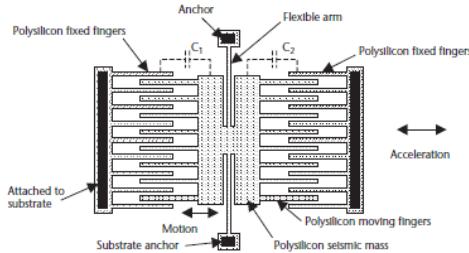


Figura 2.14: Esquema general de un acelerómetro de tecnología MEMS (Dunn, 2005).

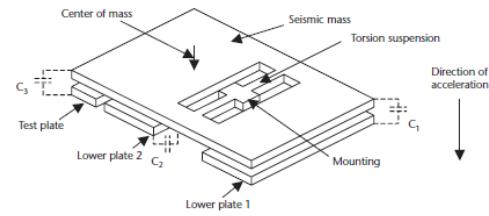


Figura 2.15: Acelerómetro micro-electromecánico (Dunn, 2005).

- Balance de fuerzas: Este tipo de acelerómetro consiste en un detector de posición, un amplificador y un sistema electromecánico de posicionamiento. El sistema convierte una fuerza mecánica en una corriente proporcional que se convierte en una fuerza en dirección contraria para contrarrestar el movimiento de la masa suspendida.

El detector de posición registra la posición de una masa acoplada al generador de fuerza. Un cambio inducido externamente en la posición de la masa resulta en una combinación de la salida del detector de posición y del amplificador de tal forma que el generador de fuerza o motor de torque lleve la masa de vuelta a su posición original. La salida del sensor es una medida de la corriente a través del generador de fuerza o motor, siendo esta corriente proporcional a la fuerza de restauración que es igual a la fuerza de entrada a través de la masa calibrada.

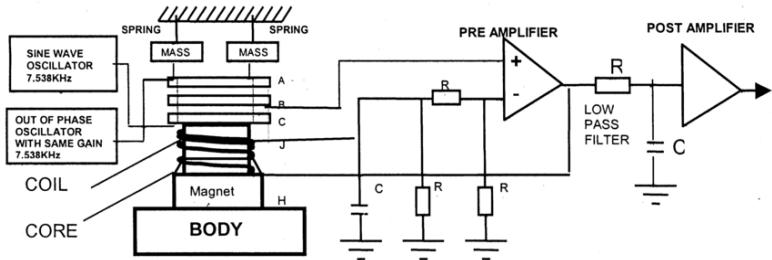


Figura 2.16: Esquema general de un acelerómetro por balance de fuerza (Sharma y Kumar, 2006).

Si no hay aceleración en la masa, la corriente a través del motor de torque es nula. El amortiguamiento es controlado por un condensador y se coloca en paralelo con la resistencia de muestreo.

2.6.4. Fusión de sensores

La fusión de sensores consiste en combinar la información de múltiples sensores para obtener una medida más precisa y confiable de la variable de interés (Lamkin-Kennard y Popovic, 2019). La fusión de sensores puede mejorar la precisión, la confiabilidad y la robustez de las mediciones, ayudando también a reducir la incertidumbre y el ruido presente en los datos. La combinación de estas mediciones se puede hacer de distintas formas, las cuales se mencionan a continuación:

- Sensores redundantes: Todos los sensores proporcionan la misma información sobre la variable de interés. La redundancia de sensores puede mejorar la confiabilidad y la precisión de las mediciones, ya que si un sensor falla, los otros sensores pueden seguir proporcionando datos.
- Sensores complementarios: Los sensores proporcionan información independiente o complementaria sobre la variable de interés. Al combinar la información de sensores complementarios, se puede obtener una medida más precisa y completa de la variable de interés.

- Sensores coordinados: Los sensores recopilan información sobre la variable de interés de forma secuencial.

La fusión de sensores permite obtener información a partir de varios sensores que no está disponible a través de un sensor en específico, siendo necesario reco-
pilar distintas variables físicas para reconstruir la variable de interés. La fusión
de sensores es una técnica comúnmente utilizada en aplicaciones de monitoreo
estructural, robótica, navegación y sistemas de control, entre otros.

Estimación de ángulos

Una de las variables físicas que suele obtenerse a partir de la fusión de infor-
mación de varios sensores es la inclinación. Existen distintos métodos, cada uno
con sus ventajas y deficiencias, para obtener una estimación de la inclinación de
un sistema a partir de mediciones de acelerómetros, giróscopos y magnetómetros.
Algunos de los métodos más comunes son:

- Integración de la medición del giróscopo: Se utiliza la medición de la ve-
locidad angular del giróscopo para estimar la orientación del sistema. Sin
embargo, la integración de la velocidad angular puede acumular errores y
derivar en una estimación incorrecta de la orientación.
- Estimación por trigonometría: Se utilizan las mediciones de los aceleróme-
tros y magnetómetros para estimar la orientación del sistema a partir de
cálculos trigonométricos. Este método puede ser sensible a errores en las
mediciones y a la presencia de campos magnéticos externos.
- Filtro de Kalman: El Filtro de Kalman es uno de los algoritmos de estimación
más utilizados en la industria. En el caso de la estimación de inclinación,

combina mediciones de sensores con un modelo dinámico del sistema para obtener una estimación precisa de la orientación. El filtro de Kalman es particularmente útil para fusionar mediciones de acelerómetros, giróscopos y magnetómetros y estimar la orientación en tiempo real.

- Filtro de Madgwick: El filtro de Madgwick es un algoritmo de fusión de sensores que utiliza mediciones de giroscopios, acelerómetros y magnetómetros para estimar la orientación del sistema. El filtro de Madgwick es una versión simplificada del filtro de Kalman y es ampliamente utilizado en aplicaciones de realidad virtual, aumentada y sistemas de navegación inercial.

Este método, desarrollado por Madgwick y cols. (2010), hace uso de cuaterniones para la representación espacial. Estos son una extensión de los números complejos y se utilizan para representar rotaciones en el espacio tridimensional.

Las representaciones tridimensionales traen problemas como el bloqueo de cardán, que consiste en la pérdida de un grado de libertad en la representación de los ángulos de Euler.

Un cuaternion consta de cuatro componentes:

1. Parte escalar (w).
2. Tres partes vectoriales (x, y, z).

Se representan de la siguiente forma:

$$q = w + xi + yj + zk \quad (2.10)$$

El filtro emplea esta representación para evitar los problemas asociados con la representación tridimensional de los ángulos de Euler, permitiendo que los datos de aceleración y magnetómetro se utilicen en un algoritmo de descenso de gradiente derivado de forma analítica y optimizado para

calcular la dirección del error de medición del giroscopio como una derivada de cuaternion.

El algoritmo utiliza una combinación de la información proporcionada por los giroscopios (para estimar la velocidad angular) y los acelerómetros y magnetómetros (para estimar la gravedad y el vector magnético terrestre) para calcular la orientación.

2.7. Sensores inteligentes

2.7.1. Definición:

Si bien los sensores por sí mismos han permitido un rápido y sostenido desarrollo en todos los ámbitos de la instrumentación en distintas áreas de la industria, el advenimiento de la era digital y la miniaturización de los componentes ha impulsado cambios en la manera en la que se mide hoy en día. Con el poder de cómputo actual, los sensores aumentan sus capacidades cuando son parte de un sistema más grande capaz de procesar la información que estos proveen.

Un sensor inteligente es un sistema en donde uno o varios sensores y una interfaz electrónica dedicada trabajan en conjunto. La tecnología empleada para llevar a cabo estos sistemas ha avanzado rápidamente en años recientes, lográndose obtener sistemas de un solo chip para medir temperatura o campo magnético (Nagayama, 2007).

El término sensor inteligente o “*smart sensor*” surgió a mediados de los años 80. La “inteligencia” de estos dispositivos viene dada por un microcontrolador (MCU), un procesador de señales digitales (DSP) y circuitos de aplicación específica (Frank, 2002). Posteriormente, en el año 1998, el *IEEE* en su estándar *Networked smart transducer interface standard 1451* definió un “*smart sensor*”

como un transductor que provee funciones más allá de las necesarias para generar y representar una cantidad medida (Song y Lee, 2008).

2.7.2. Características:

Un sensor inteligente suele tener 5 características esenciales, las cuales se resumen a continuación:

- **Microporcesador integrado:** Es lo que diferencia un sensor común de un sensor inteligente, siendo este el encargado de hacer los cálculos necesarios, guardar los datos de forma local, enviar resultados y coordinar las tareas a ejecutarse.
- **Capacidades de medición:** La principal característica de un sensor es su capacidad de convertir una variable física en algún tipo de señal que pueda ser posteriormente procesada, en este caso por el microporcesador integrado, siendo el sensor el vínculo entre el procesador y los fenómenos físicos de interés. Un sensor inteligente, también llamado nodo, puede constar de varios sensores que miden distintas variables.
- **Comunicación inalámbrica:** En gran medida, se busca que los sensores inteligentes sean capaces de reemplazar los actuales sistemas de medición cableados, permitiendo esto la expansión del sistema de medición a un bajo costo, además de las capacidades de transmisión que ofrecen alternativas como láser, infrarrojo, o incluso ondas de radio y telefonía.
- **Alimentación autónoma:** Con frecuencia los sensores inteligentes son alimentados de forma autónoma con baterías, en particular en aplicaciones de difícil acceso, como es el caso de algunas estructuras civiles. Si bien esto representa un desafío, la logística y los requerimientos asociados a conectar

todo un sistema mallado de sensores a la red eléctrica atenta en contra de la facilidad de instalación y mantenimiento de un sistema inteligente.

- Bajo costo: Una de las características más importantes que se busca obtener al hacer uso de sistemas basados en sensores inteligentes es reducir los costos generados por un sistema basado en sensores comunes. Tecnologías como MEMS (*Micro electro-mechanical systems*) han logrado reducir de forma considerable el tamaño y el costo por su producción en masa basada en semiconductores. Esta característica permite que redes densas de sensores sean implementadas en estructuras civiles.

2.8. Monitoreo

El monitoreo se refiere a la observación continua de un proceso, medición o medición para obtener información sobre su estatus y comportamiento. Estos datos pueden ser procesados y analizados posteriormente para detectar cambios, anomalías, fallas y tomar decisiones de control. Se puede subdividir en dos enfoques:

2.8.1. Monitoreo cableado

Involucra el uso de cables que comunican los dispositivos de adquisición o medición y el sistema central de procesamiento o almacenamiento. La información viaja a través de estos cables que pueden ser coaxiales, fibra óptica, de par trenzado, entre otros.

2.8.2. Monitoreo inalámbrico

Involucra el uso de redes de comunicaciones inalámbricas para el envío de los datos adquiridos por los dispositivos de medición. Los sensores deben contar con un transmisor de datos, enviando los datos en forma de ondas electromagnéticas hasta el receptor, el cual debe encargarse de recibir y decodificar estas señales en la estación central. Algunas de las tecnologías más utilizadas para el monitoreo inalámbrico son WiFi, Bluetooth, Zigbee, LoRa y la red celular.

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de los enfoques de monitoreo.

Monitoreo	Ventajas	Desventajas
Cableado	<ul style="list-style-type: none">■ Confiabilidad.■ Seguridad.■ Gran ancho de banda.	<ul style="list-style-type: none">■ Movilidad limitada■ Instalación compleja■ Costo elevado.
Inalámbrico	<ul style="list-style-type: none">■ Flexibilidad y movilidad.■ Fácil instalación■ Escalabilidad y bajo costo.	<ul style="list-style-type: none">■ Complejidad elevada.■ Posibilidad de interferencia.■ Ancho de banda limitado.

2.9. Sistemas de adquisición de datos

2.9.1. Definición y esquema general

Un sistema de adquisición de datos o DAQ (*Data acquisition systems*) consiste en un sistema que incluye sensores, un computador o procesador y software de adquisición de datos integrado. Es capaz de obtener, almacenar, visualizar y procesar los datos de interés. Fueron diseñados con el fin de obtener información sobre algún fenómeno físico aislado o parte de un proceso o sistema más grande, siendo la interfaz entre las variables físicas y el monitoreo del sistema en cuestión.

2.9.2. Acondicionamiento de señales

Las señales obtenidas por el DAQ presentan ruido y pueden verse atenuadas por el canal de comunicación que comunica los sensores con el dispositivo de almacenamiento y procesamiento, es por esto que es preciso filtrar y amplificar la señal previo a su entrada al sistema de adquisición, o en su defecto, previo a su almacenamiento y procesamiento.

2.9.3. DAQ basados en MCU

Dadas las capacidades de procesamiento y comunicación de los microcontroladores en la actualidad, es común ver sistemas de adquisición de datos basados en microcontroladores, haciendo uso de sus periféricos para leer el voltaje de los sensores usando el ADC integrado en los mismos, o a su vez, interpretando las señales digitales provenientes de sensores que utilizan protocolos de comunicación serial.

2.10. Sistemas de comunicaciones inalámbricos

2.10.1. Características y conceptos básicos

Un sistema de comunicaciones inalámbrico es un sistema de transmisión de información que utiliza ondas electromagnéticas para transmitir datos sin la necesidad de cables físicos. En lugar de utilizar conexiones cableadas, se emplean tecnologías de radio, microondas, infrarrojos u otras frecuencias electromagnéticas para la transmisión de datos de manera inalámbrica. Los elementos principales de un sistema de comunicaciones se describen a continuación:

- **Transmisor:** Se refiere al dispositivo o sistema que se encarga de convertir una señal o información en una forma adecuada para su transmisión a través de un medio de comunicación. El transmisor realiza procesos de modulación y amplificación de la señal para adaptarla a las características del canal de transmisión del sistema.
- **Canal de transmisión:** Es el medio físico o inalámbrico a través del cual se envía la señal o información desde el transmisor al receptor. En el caso inalámbrico, este canal es el aire. Puede introducir distorsiones, atenuación, retardos o interferencias en la señal transmitida.
- **Receptor:** Dentro de un canal de comunicaciones, es el dispositivo o sistema que recibe la señal transmitida a través del canal de transmisión y la convierte nuevamente en una forma adecuada para su interpretación o uso. El receptor realiza procesos de demodulación, filtrado y amplificación de la señal recibida para recuperar la información original.
- **Interferencias:** Las interferencias se refieren a señales o perturbaciones no deseadas que afectan la señal transmitida en el canal de comunicación.

Estas interferencias pueden ser causadas por fuentes externas, como señales electromagnéticas de otros dispositivos o fenómenos naturales, o por interferencias internas generadas por componentes electrónicos o ruido en el propio sistema de comunicación. Las interferencias pueden degradar la calidad de la señal, causar errores en la transmisión o incluso impedir la correcta recepción de la información.

- Ruido: Puede definirse como una señal o perturbación no deseada que se superpone a la señal útil durante la transmisión o recepción de datos. El ruido puede ser generado internamente en los componentes electrónicos, introducido por fuentes externas o ser el resultado de las características inherentes del canal de transmisión.

2.10.2. Protocolos de comunicación para distancias cortas

- WiFi (*Wireless Fidelity*): Es el protocolo de comunicación inalámbrica más popular. Consiste en una tecnología inalámbrica que hace uso del estándar 802.11 del IEEE a través de frecuencias como 2.4 GHz y 5 GHz. Suele tener un rango entre 20 y 40 metros y se caracteriza por velocidades de transmisión muy altas, de hasta 600 Mbps.
- Bluetooth: Uno de los medios de comunicación más utilizados en la actualidad. Bluetooth es una tecnología utilizada para el intercambio de datos a distancias cortas (con un rango entre 50 y 100 metros) que hace uso de frecuencias entre 2.4 a 2.485 GHz. Tiene una velocidad máxima de 1 Mbps y es ampliamente utilizado para transferencia de datos entre dispositivos móviles.
- Zigbee: Es un estándar de comunicación inalámbrica de corto alcance y bajo consumo de energía diseñado para aplicaciones de Internet de las cosas

(IoT). Utiliza la tecnología de radio de baja potencia y bajo consumo para permitir la comunicación inalámbrica entre dispositivos Zigbee, como sensores, actuadores y controladores. Zigbee opera en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz, 900 MHz u 868 MHz y se basa en una topología de malla, lo que significa que los dispositivos pueden comunicarse directamente entre sí o a través de otros dispositivos Zigbee cercanos.

- MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): MQTT es un protocolo ligero basado en el modelo “publish/subscribe”, diseñado por ingenieros de la IBM y Arcom Systems específicamente para aplicaciones del internet de las cosas (*Internet of Things*), requiriendo poco ancho de banda y siendo fiable en redes inestables. Consiste en un broker, encargado de gestionar los datos, al cual se conectan los clientes, los cuales pueden publicar (enviar datos), o suscribirse a un tópico del broker (acceder a los datos que se publicaron a ese tópico desde algún cliente).

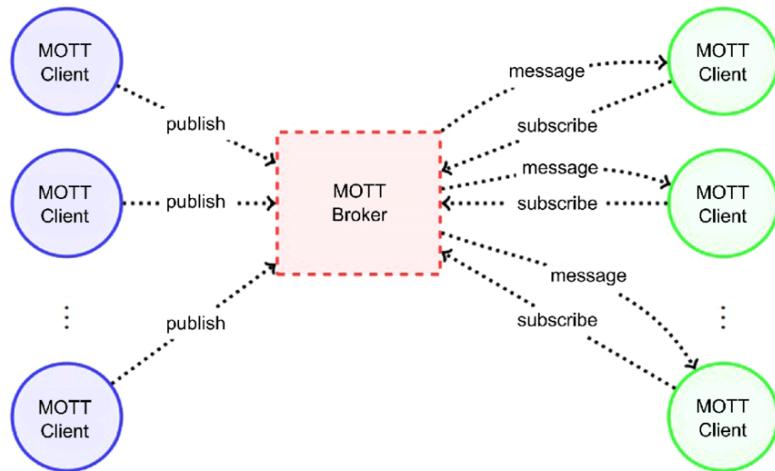


Figura 2.17: Esquema general del protocolo MQTT (Aloufi y cols., 2020).

2.10.3. Protocolos de comunicación de larga distancia

- NB-IoT: NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) es un estándar de comunicación de larga distancia y bajo consumo de energía para dispositivos IoT. Utiliza la infraestructura de redes celulares existentes y opera en bandas de frecuencia estrechas para proporcionar conectividad de bajo ancho de banda y larga duración de la batería.
- Sigfox: Es una tecnología de comunicación de larga distancia y bajo consumo de energía diseñada para el IoT (*Internet of Things*). Utiliza una red de bajo consumo de energía y bajo costo para transmitir pequeñas cantidades de datos de forma eficiente. Sigfox es utilizado en aplicaciones de seguimiento de activos, monitoreo ambiental y aplicaciones industriales.
- LoRa: LoRa (cuyas siglas provienen de *Long Range*) es una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y baja potencia diseñada para aplicaciones de IoT y M2M (*machine-to-machine*). Se basa en el estándar LoRaWAN (*LoRa Wide Area Network*) y utiliza una modulación de espectro ensanchado para lograr una mayor cobertura y capacidad de penetración en comparación con otras tecnologías inalámbricas. LoRa opera en las bandas de frecuencia libre de licencia y puede proporcionar alcances de varios kilómetros en áreas urbanas y aún mayores en áreas rurales. Debido a su bajo consumo de energía, es adecuado para dispositivos de batería de larga duración y aplicaciones de bajo ancho de banda.

Dependiendo de la aplicación se debe escoger la tecnología más conveniente. Esto dependerá de la distancia entre los dispositivos que recolectan datos y la estación base, la naturaleza de los datos a enviar y las restricciones de tiempo impuestas por el sistema en estudio. A continuación se presenta un gráfico comparativo entre las distintas tecnologías:

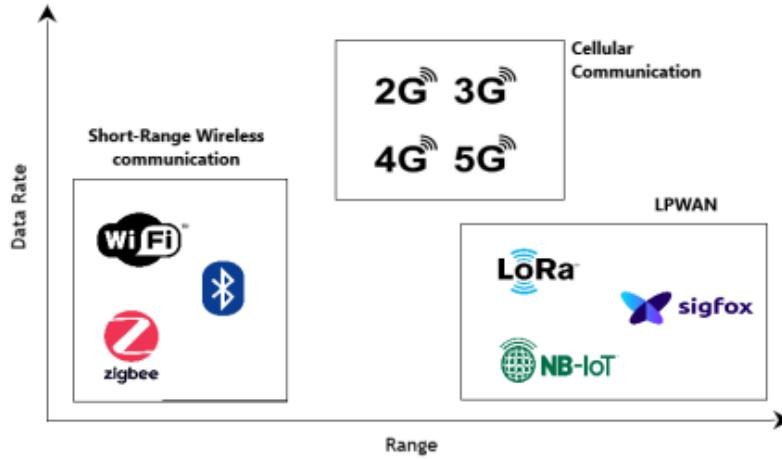


Figura 2.18: Esquema comparativo entre distintas tecnologías tomando en cuenta el rango de alcance y el ancho de banda (Khorsandi y Jalalizad, 2023).

2.10.4. Protocolo LoRa

Esta tecnología fue desarrollada en Francia en el año 2012 por la empresa francesa Semtech. Es el tipo de modulación utilizado entre dos dispositivos LoRa o entre un *end-device* y un *gateway*.

El récord mundial para una transmisión LoRa es de 832 km, logrado por Thomas Telkamp en la banda EU868 utilizando 25 mW / 14 dBm (Montagny, 2021).

Suelen confundirse los términos LoRa y LoRaWAN (Long Range Wide Area Network). LoRa se refiere al tipo de modulación mientras que LoraWAN es una extensión del protocolo LoRa que da la capacidad de conectar los dispositivos a un servidor para servir de interfaz con el usuario final. Puede definirse LoRaWAN como una arquitectura de red que consta de dispositivos finales, gateways y servidores.

- Funcionamiento: LoRa utiliza una técnica de modulación de espectro ensanchado llamada modulación de espectro ensanchado de baja potencia (CSS, por sus siglas en inglés). Esta técnica permite que las señales de radio se propaguen a distancias más largas y atraviesen obstáculos, lo que proporciona una mayor cobertura en comparación con otras tecnologías inalámbricas.

Para transmitir los datos hace uso de “Chirps” (Compressed High Intensity Radar Pulse por sus siglas en inglés), de donde viene su nombre CSS. Esta señal, que puede observarse en la figura 2.19. Un chirp es una señal que varía en frecuencia linealmente con el tiempo.

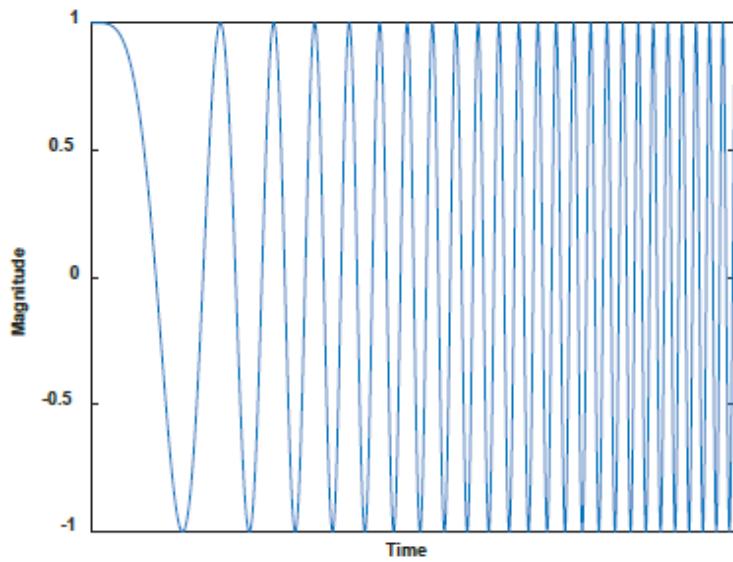


Figura 2.19: Señal chirp utilizada para la transmisión CSS (Aloufi y cols., 2020).

- Ancho de banda: Uno de los parámetros más importantes dentro de un canal de comunicaciones. Puede definirse como la cantidad de espectro de frecuencia ocupado por una señal de transmisión. Es un parámetro importante que determina la capacidad de transmisión de datos y la eficiencia espectral de la comunicación. En LoRa, el ancho de banda se puede configurar en diferentes

opciones, como 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. La elección del ancho de banda afecta directamente la velocidad de transmisión de datos y el alcance de la comunicación.

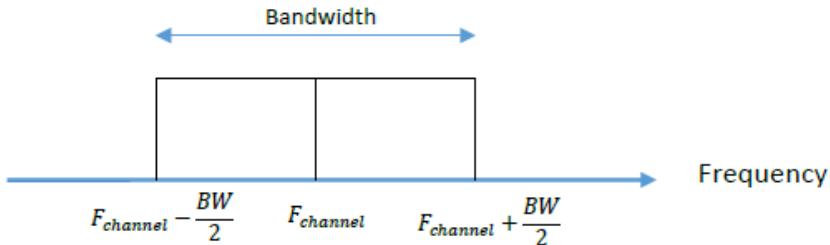


Figura 2.20: Ancho de banda representado en el espectro (Aloufi y cols., 2020).

- Factor de propagación: El factor de propagación (Spreading Factor) se refiere a un parámetro que determina la velocidad de transmisión de datos y la robustez de la comunicación.

El spreading factor se representa como un número entero que varía típicamente de 7 a 12 en la tecnología LoRa. Un spreading factor más bajo indica una velocidad de transmisión de datos más alta, pero con menor alcance y capacidad de penetración de la señal. Por otro lado, un factor de propagación más alto proporciona un mayor alcance de comunicación, pero con una velocidad de transmisión de datos más baja.

En LoRa cada símbolo representa un número de bits transmitidos. Por tanto, se define la siguiente regla:

$$\text{Número de bits transmitidos en un símbolo} = \text{Factor de propagación}$$

(2.11)

Para un SF10, un símbolo o *Chirp* representará 10 bits. Esto se observa claramente en la figura 2.21:

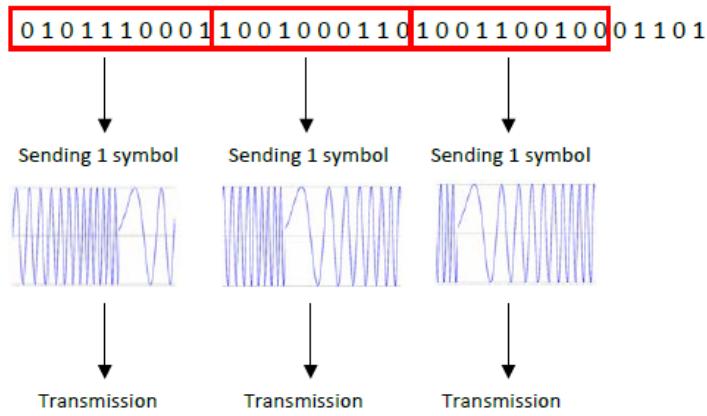


Figura 2.21: Representación de símbolos en una transmisión LoRa (Aloufi y cols., 2020).

- Potencia: Los dispositivos LoRa generalmente permiten ajustar la potencia de transmisión de la señal. Esto proporciona flexibilidad para adaptarse a diferentes escenarios y requisitos de alcance. Por ejemplo, en áreas densamente pobladas o con obstáculos, se puede aumentar la potencia de transmisión para superar la atenuación de la señal y mejorar la cobertura. En Venezuela la potencia máxima de transmisión está regulada por CONATEL, siendo en la banda libre de telemetría alrededor de los 470 MHz de 250 mW (24 dBm) (Comisión Nacional de Telecomunicaciones, 2010).
- Rango: El rango de transmisión en LoRa puede variar desde unos pocos cientos de metros hasta varios kilómetros, dependiendo de los factores mencionados anteriormente. Utilizando técnicas como factor de propagación alto, potencia de transmisión adecuada y condiciones de propagación favorables, es posible lograr comunicaciones en rangos de varios kilómetros en entornos abiertos y sin obstrucciones.
- Tiempo de transmisión: El tiempo de transmisión de cada símbolo depende del factor de propagación. Es decir, a mayor SF, el tiempo de transmisión será mayor manteniendo el ancho de banda igual. Tomando esto en cuenta

se tiene la siguiente ecuación:

$$T_{symbol} = \frac{2^{SF}}{\text{Ancho de banda}} \quad (2.12)$$

- Forma de la trama: Las tramas de LoRa, como la que se muestra en la figura 2.22, siguen una estructura predefinida que consta de 4 partes:

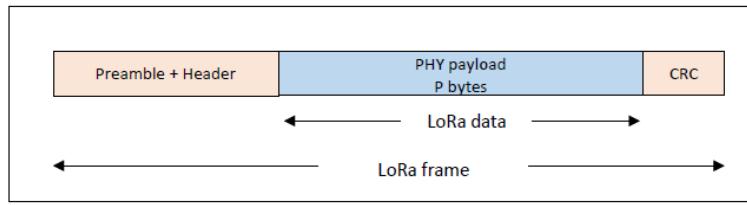


Figura 2.22: Forma de la trama LoRa (Aloufi y cols., 2020).

1. Preámbulo (*Preamble*): Secuencia de bits que se utiliza para sincronizar el receptor con la transmisión y permitir la detección y sincronización de la trama.
 2. Encabezado (*Header*): Se puede utilizar un encabezado adicional para incluir información adicional sobre la trama, como la dirección de origen o destino, los identificadores de servicio, etc. Puede ser generada de forma automática o programada.
 3. Carga útil (*Payload*): Campo principal de la trama que contiene los datos que se van a transmitir.
 4. CRC (*Cyclic Redundancy Checking*): Campo que contiene un código de detección de errores para verificar la integridad de la trama recibida. El receptor realiza un cálculo CRC sobre los datos recibidos y compara el resultado con el valor de CRC incluido en la trama. Si el valor calculado y el valor de CRC coinciden, se asume que la trama se recibió sin errores.
- Tasa de codificación (CR): En LoRa, se utiliza la codificación de corrección de errores de tipo “forward error correction” (FEC), que permite detectar

y corregir errores en la recepción de los datos. El coding rate especifica la cantidad de bits redundantes que se agregan a los datos para mejorar la confiabilidad de la comunicación. En el caso de un $CR = 4/8$, 8 bits son transmitidos mientras que solo 4 bits contienen información útil.

- Consumo de energía: El protocolo se caracteriza por tener un bajo consumo de energía, permitiendo ser empleado en dispositivos a baterías para envío de datos periódicos. Esto se traduce en velocidades bajas de transmisión y cargas útiles (*payloads*) menores a los encontrados en otras tecnologías, sin embargo, la relación entre las distancias largas a cubrir y los algoritmos de detección permiten que para ciertas aplicaciones este protocolo sea el ideal, razón por la cual se ha convertido en uno de los más utilizados en años recientes.

2.11. Procesamiento digital de señales:

El procesamiento digital de señales (DSP por sus siglas en inglés) es un proceso que involucra la manipulación de señales de distinta naturaleza en un procesador o computador. La necesidad de este procesamiento surge por la necesidad de mejorar, cambiar o mostrar los datos obtenidos de señales reales en distintas formas mediante métodos matemáticos (Proakis y Manolaki, 1999).

En gran cantidad de aplicaciones, los procesadores analógicos están siendo reemplazados por chips de DSP, esto debido a la disminución en el costo además de la capacidad de procesamiento que sigue en aumento. Si bien se puede hacer procesamiento digital con cualquier procesador o microcontrolador, estos chips están diseñados para realizar cálculos matemáticos y llevar a cabo algoritmos de procesamiento de forma eficiente.

En el contexto de SHM, el DSP es necesario una vez los datos fueron adquiridos en campo, siendo esta herramienta la que permite realizar un estudio exhaustivo de las señales adquiridas por los sensores en el dominio de la frecuencia, siendo este estudio uno de los más importantes y utilizados en esta área.

2.11.1. Estudio en el dominio de la frecuencia

El estudio de señales en el dominio de la frecuencia se remonta al siglo XIX y está estrechamente relacionado con los trabajos del matemático francés Jean-Baptiste Joseph Fourier. Desde entonces, el impacto que ha tenido en la ingeniería y las ciencias es notable. En nuestro día a día, muchos de los sistemas de uso diario hacen uso, de alguna forma u otra, del concepto inicial planteado por Fourier.

En el SHM, el análisis de frecuencia también desempeña un papel importante. En el monitoreo de salud estructural se utilizan técnicas de análisis de frecuencia, como la transformada de Fourier, para identificar patrones y características de frecuencia en las señales registradas por los sensores. Esto permite detectar cambios en las propiedades dinámicas de la estructura, como frecuencias naturales, modos de vibración, y cambios en la rigidez o la masa.

Como se planteó anteriormente, al estudiar el dominio de la frecuencia en el SHM, se pueden identificar patrones anómalos, compararlos con datos de referencia y tomar medidas preventivas o correctivas para garantizar la integridad y la seguridad de la estructura.

Los análisis de vibración suelen analizarse utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés), un algoritmo computacional que ha permitido hacer uso de la Transformada de Fourier en todo tipo de aplicaciones. Para entender la FFT, es necesario definir el desarrollo matemático de la Transformada

de Fourier.

2.11.2. Transformada de Fourier

Es una herramienta matemática utilizada para descomponer una función en sus componentes de frecuencia. Permite analizar una señal en el dominio de la frecuencia y determinar las diferentes frecuencias que la componen. Se ha convertido en una de las principales herramientas para resolver muchos desafíos de la comunidad científica, siendo su aplicación más conocida en el análisis de sistemas lineales invariantes en el tiempo. Se define matemáticamente como sigue:

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi ikx}dx \quad (2.13)$$

En la figura 2.23 se observa como una señal compuesta por distintas sinusoidales que varían en amplitud y frecuencia, son representadas en el dominio de la frecuencia como componentes aislados.

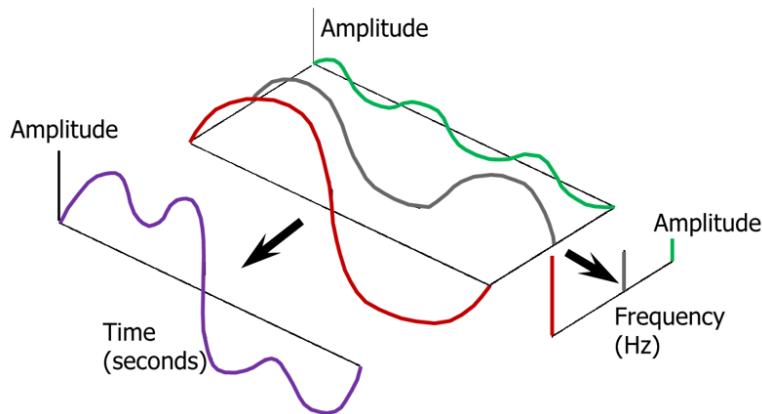


Figura 2.23: Descomposición de señal temporal en el espectro de frecuencia (Siemens, 2019).

2.11.3. Transformada Rápida de Fourier

Tal vez uno de los algoritmos más importantes de todos los tiempos. Descrita por algunos de sus autores principales, la transformada rápida de Fourier (FFT) es una herramienta computacional que facilita el análisis de señales en el espectro de la frecuencia mediante el uso de computadores digitales. Ejecuta la transformada discreta de fourier de una forma más eficiente

La transformada de Fourier exige un cálculo que puede ser computacionalmente costoso, especialmente cuando se trata de muchos puntos. Es ahí donde la FFT explota las simetrías matemáticas para lograr disminuir el cálculo de una complejidad $O(N^2)$, una función prácticamente lineal en “n”, a mayor “n” el valor no crece tan rápidamente que la expresión cuadrática original. Siendo N es el número de datos, a una complejidad de $O(N \log_N)$. Se describe matemáticamente utilizando la siguiente expresión:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.14)$$

Donde:

- $X[k]$ = Muestra “k” de la transformada discreta de Fourier (DFT).
- $x[n]$ = Muestra “n” de la señal de entrada.
- N = Cantidad de muestras.
- j = Unidad imaginaria.
- e = base del logaritmo natural.

Una vez se lleva a cabo la FFT, se debe analizar el espectro en frecuencia para así obtener los parámetros de interés, entre algunas de estas técnicas se encuentran:

- Método de *Peak Picking*: Este método es utilizado para determinar la ubicación de los picos sobresalientes de la representación gráfica de una unidad física. En el contexto del dominio de la frecuencia, estos picos se corresponden con la respuesta en frecuencia del sistema, asociándose con las frecuencias de vibración del sistema en estudio. El *peak picking* asume que todo pico en frecuencia se corresponde con uno de los modos de vibración natural del sistema, en el caso del espectro de la figura 2.24, serían los picos encerrados en círculo en el espectro. Esta premisa implica que al estar los picos muy cercanos entre sí, se dificulte el proceso de evaluación usando esta técnica.

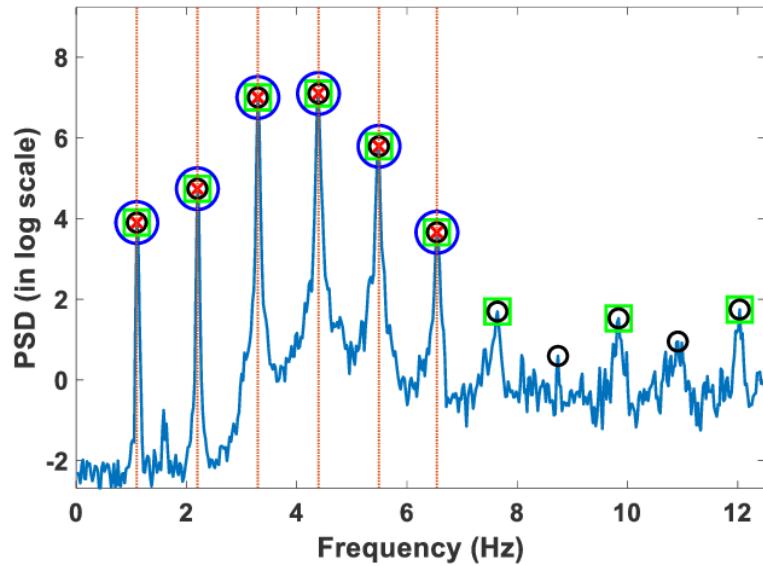


Figura 2.24: Método de *peak picking* (Jin y cols., 2021).

- Estimación del amortiguamiento por ancho de banda local: Una vez identificadas las frecuencias naturales del sistema, es de interés conocer el factor de amortiguamiento que corresponde a cada uno. Para esto, se suele aplicar

el método de ancho de banda local, también conocido como método de la potencia mitad. Consiste en estudiar el espectro de potencia y ubicar los valores en los cuales la potencia de la señal se reduce a la mitad, en el caso de la figura 2.25, estas frecuencias serían f_{max} y f_{min} , siendo la diferencia entre ambos Δf y la frecuencia central f_o . Una vez obtenidas estas frecuencias se calcula el amortiguamiento de la siguiente forma:

$$\% \zeta = \frac{\Delta f}{2f_o} \quad (2.15)$$

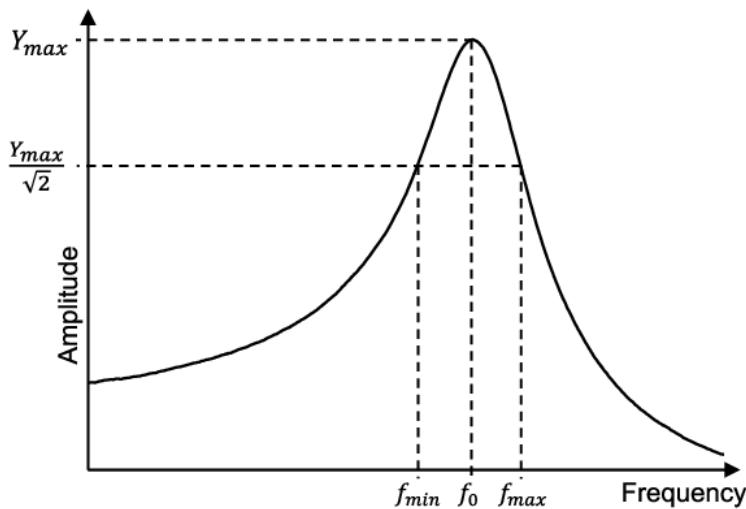


Figura 2.25: Método de obtención de amortiguamiento por ancho de banda local (Andresen y cols., 2019).

2.11.4. Aventanamiento

Las señales provenientes de los sensores representan una ventana finita de tiempo, es decir, contienen una cantidad finita de datos. Es bien conocido que la FFT asume señales periódicas en el tiempo, eso se traduce en que las ecuaciones asumen que los datos se repiten una vez se termina el registro hasta el infinito. Esto genera discontinuidades notables en los bordes del registro que suelen verse como

componentes frecuenciales que aparecen alrededor de las frecuencias naturales reales del sistema en estudio, fenómeno conocido como filtración de espectro o *spectral leakage*, estas señales de alta frecuencia aparecen como “*alias*” en las componentes de baja frecuencia, comportamiento que es indeseado para términos de análisis.

Para evitar este fenómeno se utiliza el método de aventanamiento, en el cual se multiplica la ventana de tiempo por una función que suaviza los ejes y disminuye su contribución en el espectro. Estas funciones hacen que los bordes del registro se “encuentren” como si se tratase de una señal periódica, resultando en un espectro mucho más limpio y en picos más claros.

Algunas de las funciones de aventanamiento más utilizadas:

- Hanning.
- Hamming.
- Blackman.

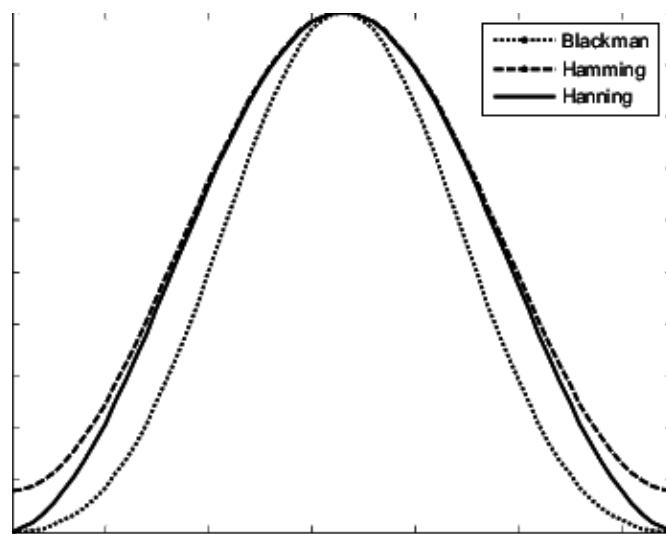


Figura 2.26: Funciones de aventanamiento más utilizadas (Franccone y cols., 2006).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el diseño del sensor inteligente, explicando en detalle el hardware y software del mismo. En primer lugar se esbozan de forma general las actividades que debe llevar a cabo el sistema, luego se seleccionan los componentes necesarios para la implementación del prototipo de pruebas y finalmente se describen en detalle las actividades y los componentes que forman parte del sistema.

3.1. Descripción breve del sistema

El sistema diseñado integra un conjunto de sensores y módulos que permiten medir variables dinámicas y quasi-estáticas de un sistema estructural, enviarlas a larga distancia y posteriormente procesarlas y almacenarlas.

Una vez el sistema es encendido, ajusta de forma automática todos los sensores, eliminando el offset de los 3 ejes del acelerómetro y también del giróscopo utilizado para la estimación de inclinación. Además, se llevan a cabo comprobaciones de “*self test*”, que consiste en una prueba que verifica si el funcionamiento del sensor se encuentra dentro de los valores originales de fabricación, comparando con valores almacenados en registros internos del sensor. Una vez ajustado, el sistema envía de forma inalámbrica un mensaje a estación base para sincronizar la fecha y hora actual. El sistema ejecutará estas tareas de inicialización cada 2

registros de datos enviados con éxito.

Luego de la inicialización de los distintos módulos y el ajuste de la hora y fecha, el sistema comienza a medir de forma continua la aceleración triaxial, temperatura, humedad y estima la inclinación con sensores electrónicos de bajo consumo para posteriormente enviar los datos de forma inalámbrica a la estación base. Allí son recibidos, decodificados y pre-procesados para luego ser subidos vía inalámbrica a un computador que sirve de servidor en donde se almacenarán los datos, siendo controlado el sistema desde esta misma estación base, pudiendo enviar comandos de adquisición de datos de forma remota. A su vez, en la estación base se encuentra una interfaz gráfica que permite visualizar los datos obtenidos, realizar peticiones de datos a distancia, observar sus características principales, acceder al histórico de datos recogidos por el sensor, descargar los datos y ejecutar post-procesamiento a los mismos para evaluar las variables de interés para el monitoreo de salud estructural.

Puesto que la estación base está conectada a internet, el microcontrolador ubicado en la estación adquiere la fecha y hora actualizada utilizando un servidor del protocolo NTP (*Network Time Protocol*) y sincroniza su RTC (*Real Time Clock*) interno con estos valores. Una vez obtenida la fecha y hora, espera el comando de inicialización que envía de forma automática el sensor inteligente y ajusta el offset sus sensores, la cual le indica a la estación base que debe enviar la fecha y hora actual. De esta forma se sincronizan los relojes internos de ambos y permite al sensor inteligente tener la fecha y hora a la cual tomó el registro, enviando esta información como parte del registro de datos. La fecha y hora se envía bajo el formato *UNIX Epoch*, el cual indica la cantidad de segundos transcurridos desde el 1 de Enero de 1970.

En la estación base, el sistema receptor se conectará a internet a través de la red WiFi, enviará los datos recibidos al computador en la estación base, siendo

esta herramienta la encargada de pre-procesar los datos recibidos vía inalámbrica y convertirlos a un formato adecuado para poder ser almacenados en el computador y posteriormente procesados usando librerías de análisis numérico.

El comportamiento de los sistemas estructurales a estudiar condiciona los rangos e intervalos de medición de los sensores. La frecuencia de muestreo de la aceleración debe ser tal que al pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se obtenga un espectro que permita visualizar las componentes frecuenciales típicas para una estructura, las cuales suelen encontrarse por debajo de 100 Hz. Por su parte, la temperatura, humedad e inclinación suelen considerarse variables cuasi-estáticas, permitiendo que el sistema mida estas variables con intervalos lo suficientemente largos para poder monitorear cambios considerables en las mismas y posteriormente correlacionarlos a las condiciones estructurales. La frecuencia de muestreo de aceleración es deseable que esté limitada de tal forma que el espectro en frecuencia contenga las frecuencias de interés de la estructura.

El sistema en su funcionamiento normal está ejecutando las siguientes tareas principales:

- Escuchando petición de trama de datos inmediata (Envía trama ante petición de estación base): Al recibir desde la estación base el comando de adquisición de datos, ejecutado desde la interfaz de control por el operador, el sistema comienza a tomar un registro de datos de forma inmediata, siempre y cuando el mismo no haya detectado previamente un evento importante que superara los límites establecidos, y lo envía a la estación base permitiendo que el usuario obtenga información del sistema en el instante en el cual se realiza la petición de los datos. Una vez es enviado y recibido con éxito la trama de datos, el sistema regresa a su estado anterior, tomando datos de forma continua y esperando alertas, comandos u horas programadas.

- Adquisición continua (envío programado a ciertas horas del día o ante eventos importantes): El sensor inteligente mide constantemente las variables de interés y envía periódicamente, a ciertas horas del día programadas con antelación, un registro de datos a la estación base. Al estar midiendo de forma continua, está atento a generar una interrupción o alerta ante algún valor de aceleración o inclinación que esté por encima de algún límite escogido con anterioridad que dependerá en gran medida de la estructura a monitorear y su naturaleza. Se escogió el valor de $2\frac{m}{s^2}$ como generador de alerta, basado en la *Escala de Mercalli* (Survey, 2011), la cual indica que este valor de aceleración (que corresponde a 0.20 g) equivale a un sismo fuerte con daño moderado. El sistema envía de forma automática un registro de datos del acontecimiento importante que generó la alerta.

3.2. Selección de componentes

Una vez definidas las tareas a realizar por parte del sistema, se procedió a escoger el hardware y los protocolos de comunicación para llevar a cabo el objetivo de diseñar un sensor inteligente para aplicaciones de monitoreo de salud estructural.

3.2.1. Protocolo de comunicaciones

Para el protocolo de comunicación se buscaron protocolos capaces de manejar los datos recogidos por los sensores de forma eficaz y confiable. En este caso se refiere al protocolo utilizado para enviar los datos desde el sensor inteligente hasta la estación base. Sin embargo, se utilizaron distintos protocolos para la comunicación de los sensores con el microcontrolador y a su vez para comunicar la estación base con el receptor de datos.

Para el envío de datos a la estación base, preferiblemente el protocolo debía ser capaz de funcionar en rangos de distancia amplios, permitiendo que el sensor inteligente esté ubicado lejos de la estación base en donde serán monitoreadas las variables de interés. En primer lugar se escogieron algunos protocolos de forma preliminar, para luego estudiar a fondo sus características. Estos protocolos y sus características se resumen en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Comparación entre protocolos de comunicación inalámbrica, (Ogdol y cols., 2018) y (Blackman, 2019)

Protocolo	Frecuencia	Rango	Velocidad	Consumo de energía
Zigbee	784 MHz/2.4 GHz	100 m - 300 m	250 kbps-500 kbps	Bajo
Sigfox	868 MHz/915 MHz	3km - 10km	100 bps	Bajo
NB-IoT	LTE	1km - 10km	200 kbps	Bajo
WiFi	2.4 GHz/5.8 GHz	100m	54Mbps/1.3Gbps	Alto
Bluetooth	2.4 GHz	10m - 100m	720 kbps	Bajo
LoRa	430 MHz/433 MHz /868 MHz/915 MHz	15 km-30 km	0.3kbs hasta 50 kbps	Bajo

Con base en esta información, se escogió el protocolo LoRa como el más adecuado para el sensor inteligente, debido a su amplio rango y bajo consumo de energía. En general, la vasta mayoría de los módulos están basados en los chips fabricados por Semtech (los precursores del protocolo LoRa) SX126X y SX127X, por tanto se compararon ambas tecnologías en la tabla 3.2 para escoger el módulo más adecuado para el prototipo de pruebas a realizar:

Tabla 3.2: Comparación entre módulos LoRa del fabricante Semtech (Semtech, 2015).

Módulo	Modem	Amplificador	Corriente RX	Sensibilidad	Velocidad (bit rate)
SX1261/62/68	LoRa y FSK	+15 dBm - +22 dBm	4.6 mA	-148 dBm	62.5 kbps - 300 kbps
S1272/73	LoRa	+14 dBm	10 mA	-137 dBm	300 kbps
S1276/77/78/79	LoRa	+14 dBm	9.9 mA	-148 dBm	300 kbps

3.2.2. Sensores

Para la selección de los sensores a utilizarse, es preciso definir las necesidades de un sistema de adquisición para sistemas estructurales, siendo su comportamiento el que define las características de los instrumentos de medición.

Aceleración

En el caso de la medición de aceleración, el sensor inteligente debe contar con un sensor con las siguientes características:

- Bajo nivel de ruido.
- Compensación de temperatura.
- Ancho de banda dentro del rango deseado en sistemas estructurales.
- Buena resolución.
- Suficientes grados de libertad.
- Compatibilidad con microcontroladores disponibles en el mercado.
- Bajo consumo

Temperatura y humedad

Para la medición de temperatura y humedad, el sensor inteligente debe contar con un sensor con las siguientes características:

- Rango de trabajo dentro de las condiciones en las que se encuentre la estructura.

- Buena resolución y sensibilidad.
- Compatibilidad con microcontroladores.
- Bajo consumo.

Inclinación

Para la medición de inclinación, la cual, como se explica en la sección 2.6.4 el sensor inteligente debe contar con un sensor que cuente con las siguientes características:

- Acelerómetro, giróscopo incorporado, convirtiéndose en una IMU (*Inertial Measurement Unit*) o en el mejor de los casos, incluir un magnetómetro, para convertirse en un MARG (*Magnetic, Angular Rate, and Gravity*)
- Bajo nivel de ruido.
- Buena resolución y sensibilidad.
- Compatibilidad con microcontroladores.
- Bajo consumo.

3.2.3. Microcontroladores

En el caso de los microcontroladores, se buscaron dispositivos capaces de obtener los datos provenientes de los sensores, procesarlos, almacenarlos temporalmente y posteriormente hacer uso del módulo de comunicaciones para su envío, usando este mismo módulo para recibir mensajes o comandos. También se tomaron en cuenta las capacidades de conexión inalámbrica de cada microcontrolador, su

documentación y soporte por parte de los fabricantes, y por último su compatibilidad con los distintos frameworks, librerías y entornos de programación disponibles para los sensores y módulos, los cuales disminuyen el tiempo necesario para poner en marcha el funcionamiento del sistema. Se estudiaron las características de distintas placas de desarrollo, para posteriormente escoger la más adecuada. A continuación, en la tabla 3.3, se presentan las placas de desarrollo consideradas de forma preliminar y sus características principales:

Tabla 3.3: Comparación entre placas de desarrollo basadas en MCU

Placa	Procesador	Velocidad de reloj	RAM (kB)	ROM (kB)	GPIO	Conectividad
Teensy 4.0	ARM M7	600 MHz	1024	2048	40	-
Raspberry Pi Pico W	Dual ARM-M0	133 MHz	264	2048	26	WiFi
STM32 Discovery	ARM M4	168 MHz	192	1024	82	-
STM32 Nucleo	ARM M0 - ARM M4	84 MHz - 180 MHz	96 - 128	512	50	-
Espressif ESP32	Dual Xtensa LX6	240 MHz	520	4096	34	WiFi/BT(BLE)
STM32 Blackpill	ARM M4	100 MHz	128	512	37	-

3.2.4. Diagramas de selección de componentes:

Selección del microcontrolador

Siendo el componente central del sensor inteligente y el encargado de darle al sensor sus capacidades de interconexión y preprocesamiento, el microcontrolador cumple el rol más importante dentro del sistema. Para la elección de la placa de desarrollo a usar se tomaron en cuenta las placas estudiadas y mostradas en la tabla 3.3 que mostraron potencial, obteniendo los resultados observados en la figura 3.1

Diagrama de araña para selección de tarjeta de desarrollo basada en MCU

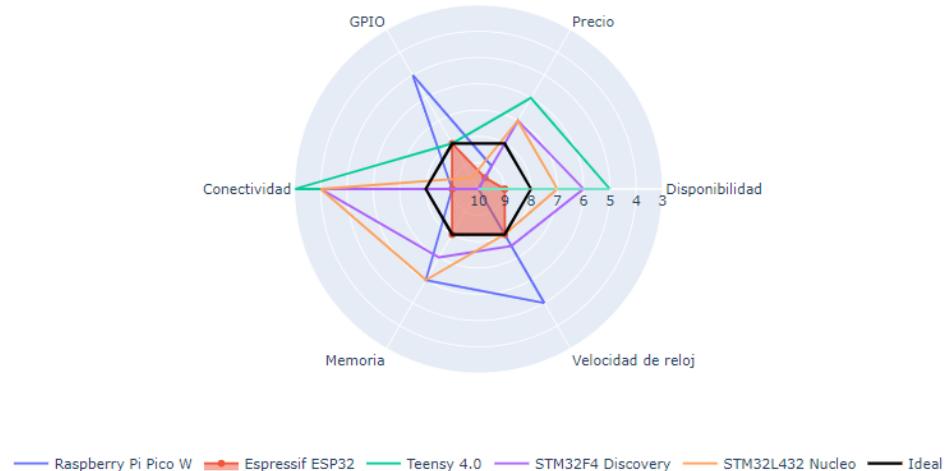


Figura 3.1: Diagrama de araña para selección de microcontrolador.

Con base en estos resultados, se escogió el microcontrolador ESP32 de Espressif Systems para ser el encargado de gestionar los datos provenientes de los sensores al ser el que se ajusta a las necesidades del proyecto para la construcción del prototipo de pruebas.

El DevKit v1 es una placa de desarrollo creada por la empresa DOIT para evaluar el módulo ESP-WROOM-32. Esta permite acceder fácilmente a los pines del microcontrolador, además de proveer un puerto USB para la programación del mismo, incorporando un convertidor USB a serial en la tarjeta de desarrollo. También incorpora un regulador de voltaje que permite alimentar al microcontrolador con voltajes de hasta 12 V. En la figura 3.2 se observa la placa de desarrollo DevKit v1.

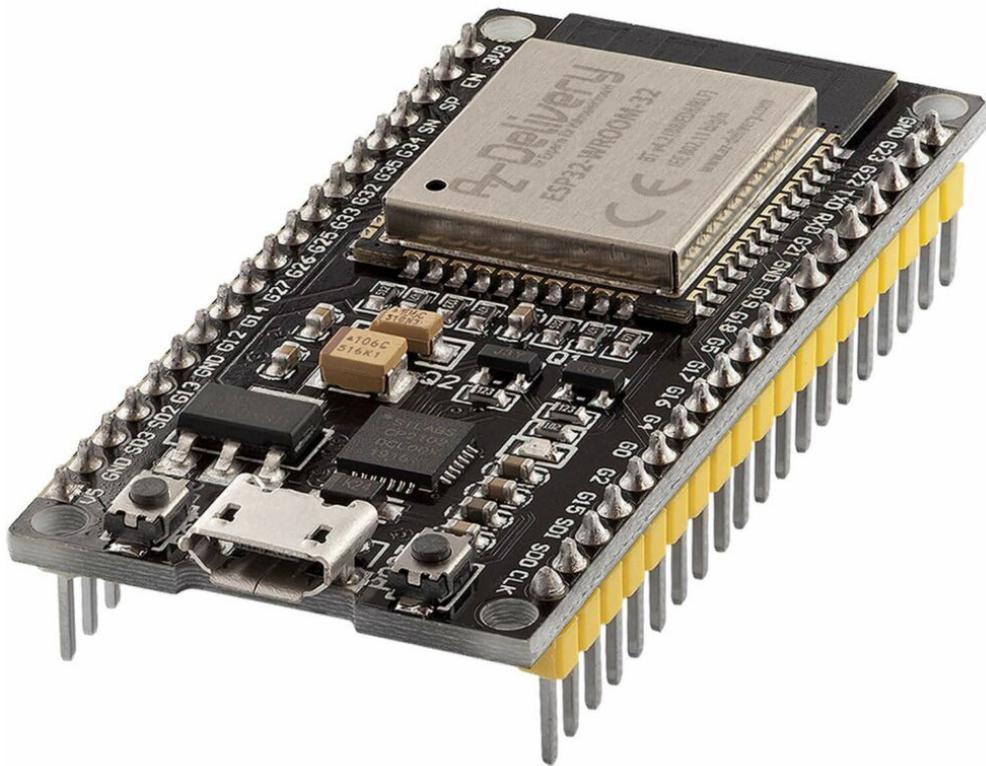


Figura 3.2: Placa de desarrollo ESP32 DevKit1 basada en el ESP32 de Espressif Systems.

Selección del sensor de aceleración

Con base en la información recopilada de distintos módulos de acelerómetros, se observa en la figura 3.3 que el MPU6050 de Invensense se ajusta a las necesidades del acelerómetro necesario para tomar los registros de vibración.

Diagrama de araña para selección de sensor de aceleración

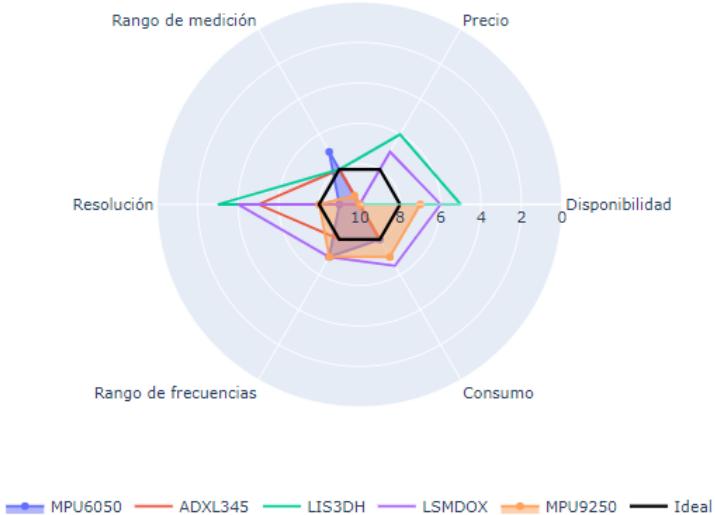


Figura 3.3: Diagrama de araña para selección de acelerómetro.

En la tabla 3.4 se encuentran las especificaciones del módulo:

Tabla 3.4: Especificaciones del MPU6050 de Invensense.

Parámetro	Acelerómetro	Giróscopo
Rango a escala completa	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$	$\pm 250^\circ/s, \pm 500^\circ/s, \pm 1000^\circ/s, \pm 2000^\circ/s$
Porcentaje de no linealidad	0.5 %	0.2 %
Muestreo simultáneo	Sí	Sí
Densidad espectral de potencia de ruido	$400\mu g//\sqrt{Hz}$	$0,005\mu g/\sqrt{Hz}$
Protocolo de comunicaciones	I2C	I2C
Resolución del ADC	16 bits	16 bits
Corriente	$500\mu A$.6 mA

En la figura 3.4 se observa el módulo o *breakout board* GY-521, el cual integra el acelerómetro MPU6050 y provee los pines necesarios para su integración en prototipos:



Figura 3.4: Módulo GY-521 basado en el MPU6050 (Mechatronics, 2016).

Selección del sensor de temperatura y humedad

Se observa en la figura 3.5 que la mayoría de los sensores de temperatura y humedad, los cuales suelen estar integrados en un mismo módulo, no distan mucho en desempeño entre sí, sin embargo, entre ellos destaca el BME280 del reconocido fabricante Bosch, el cual cuenta con buena resolución además de una excelente documentación y librerías para distintos microcontroladores. El módulo SHT31 muestra potencial por su resolución. En este caso se descarta por la poca disponibilidad del módulo, pero es una buena opción para futuras implementaciones. Es por esta razón que se escogió el BME280 para llevar a cabo las mediciones de las variables ambientales en el prototipo de pruebas.

Diagrama de araña para selección de sensor de temperatura y humedad

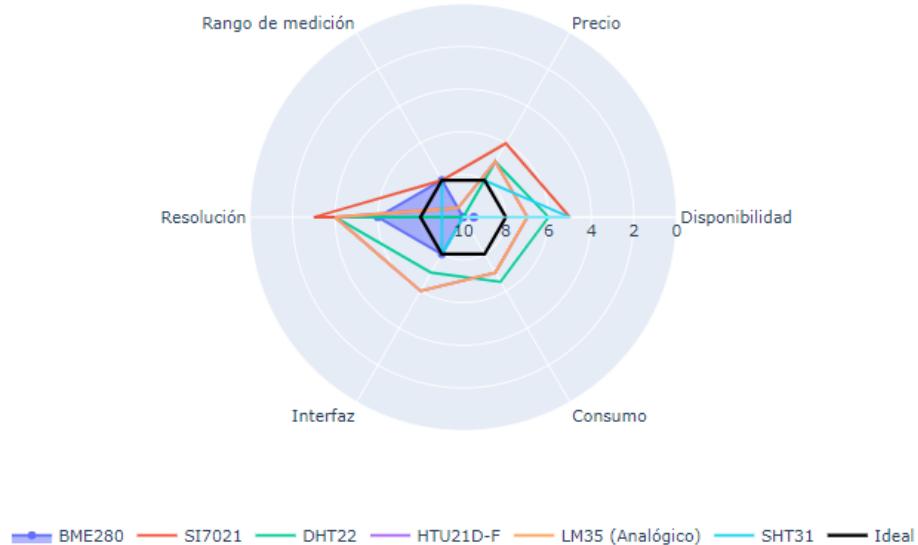


Figura 3.5: Diagrama de araña para selección de sensor de temperatura y humedad.

En la tabla 3.5 se recopilaron las especificaciones más relevantes del sensor BME280:

Tabla 3.5: Especificaciones del sensor BME280 de Bosch.

Parámetro	Valor
Rango de humedad relativa	0-100 % RH
Precisión de humedad relativa	±3 %
Rango de temperatura	-40° a 85°
Resolución de temperatura	0,01°
Protocolo de comunicaciones	I2C
Voltaje de operación	1.8 V - 3.3 V DC
Frecuencia de muestreo máxima	157 Hz

El módulo GY-BME280 de la figura 3.6 permite acceder a los pines del sensor de forma sencilla, facilitando su integración en el prototipo de pruebas implementado:

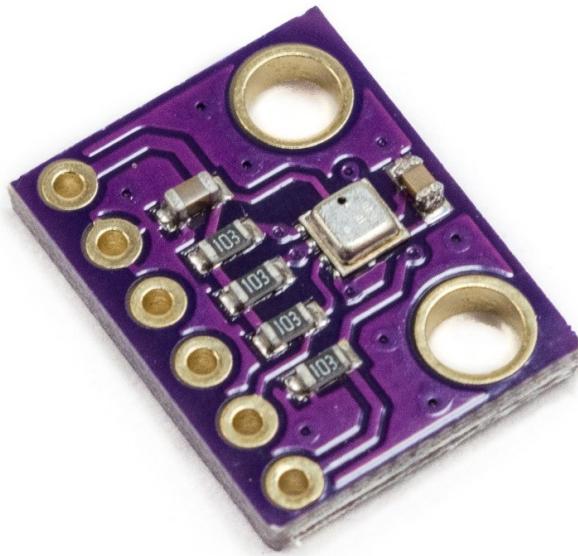


Figura 3.6: Módulo GY-BME280 basado en el sensor BME280 de Bosch (Mechatronics, 2023).

Selección del acelerómetro para estimación de ángulos

Utilizando el mismo análisis que se llevó a cabo en la figura 3.3, se modifica para fines de estimación de ángulo tomando en cuenta las premisas de la sección 2.6.4 para la fusión de sensores. Por tanto, con base en la figura 3.7 se escogió el módulo MPU9250, el cual cumple con la función de ser una MARG (*Magnetic, Angular Rate, and Gravity*) de 9 grados de libertad, siendo ideal para la estimación de ángulos en el prototipo.

Diagrama de araña para selección de unidad de medición inercial

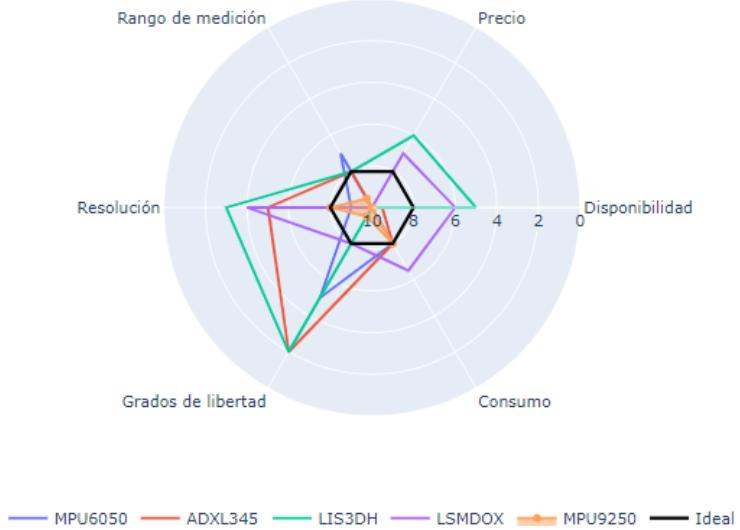


Figura 3.7: Diagrama de araña para selección de unidad de medición inercial.

En la tabla 3.6 se observan las características más relevantes del módulo:

Tabla 3.6: Especificaciones del MPU9250 de Invensense.

Parámetro	Acelerómetro	Giroscopio	Magnetómetro
Rango a escala completa	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$	$\pm 250^\circ/s, \pm 500^\circ/s, \pm 1000^\circ/s, \pm 2000^\circ/s$	$\pm 4800\mu T$
Porcentaje de no linearidad	0.5 %	0.1 %	-
Muestreo simultáneo	Sí	Sí	No
Densidad espectral de potencia de ruido	$300\mu g/\sqrt{Hz}$	$0.1^\circ/\sqrt{Hz}$	-
Protocolo de comunicaciones	I2C/SPI	I2C/SPI	I2C/SPI
Resolución del ADC	16 bits	16 bits	14 bits
Corriente	$450\mu A$	3.2 mA	$280\mu A$

Similar al módulo GY-521, el módulo GY-9250 contiene al MPU9250 de Invensense y facilita el acceso a sus pines, además de incorporar un regulador de voltaje para poder alimentar el módulo con 5V. El módulo se observa en la figura 3.8

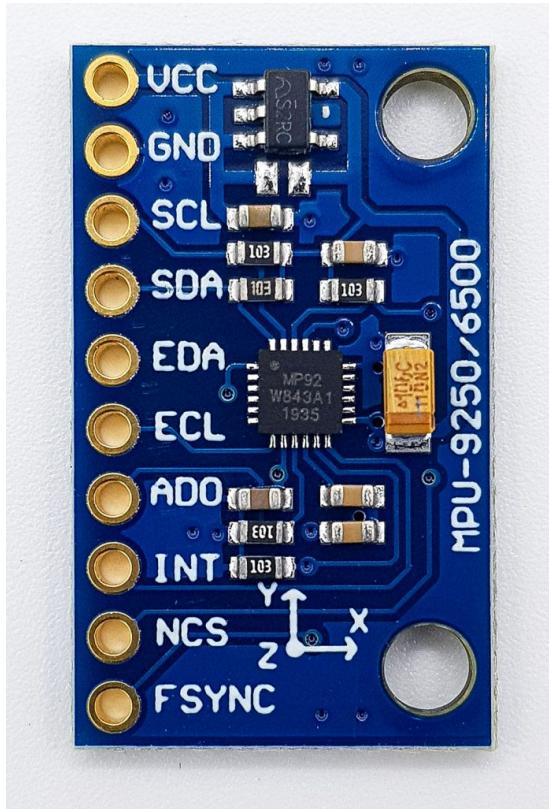


Figura 3.8: Módulo GY-9250 basado en el MPU9250 de Invensense (Ewald, 2021).

Selección del módulo de comunicaciones

Se ubicaron módulos de comunicaciones LoRa que fueran compatibles con el microcontrolador escogido, con documentación disponible y cuyas características se ajustaran a las necesidades del proyecto a llevar a cabo. Si bien el protocolo es el que condiciona las características de la gran mayoría de los módulos de comunicación del protocolo en cuestión, se buscó un módulo con facilidad de conexión e intercomunicación con el microcontrolador. Se observa en la figura 3.9 que la mayoría de los módulos tienen un desempeño similar, esto se debe a que están basados en distintas versiones de los módulos estudiados en la tabla 3.2. Sin embargo, el condicionante es la disponibilidad y precio de los mismos, siendo el

RA-02 de Ai-Thinker el seleccionado en este caso.

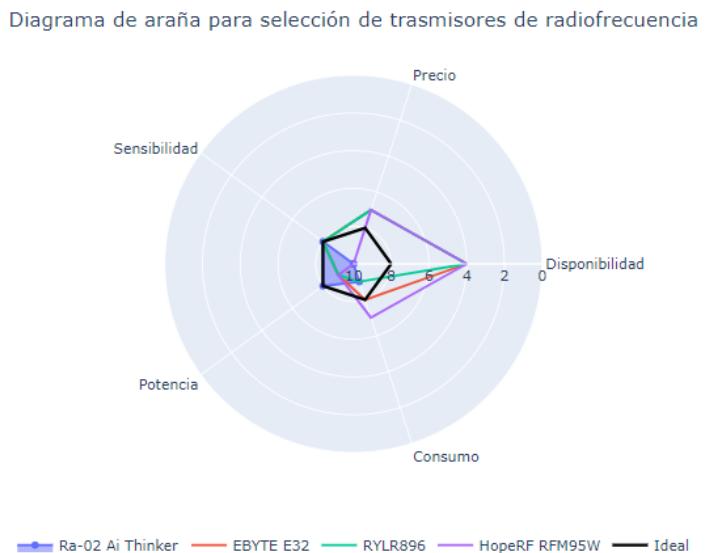


Figura 3.9: Diagrama de araña para selección del módulo de comunicaciones.

3.3. Detalle del diseño

A continuación se describe en detalle tanto el hardware como el software utilizado para llevar a cabo el sensor inteligente, además de las herramientas utilizadas para verificar su funcionamiento.

3.3.1. Descripción detallada del sistema:

Complementando lo descrito en el apartado 3.1, el prototipo del sistema se encarga de tomar registros de vibración estructural utilizando el acelerómetro MPU6050 mientras se miden variables ambientales, mediante el sensor de temperatura y humedad BM280, y se estima la inclinación mediante el módulo MARG MPU9250. Estos datos son recopilados y preprocesados por la tarjeta de desarrollo ESP32 DOIT DEVKIT, basada en el ESP32 de Espressif. Al encender el sensor

inteligente, el cual será alimentado mediante el puerto USB-C de la tarjeta de desarrollo o mediante una fuente de 5 V a los pines de alimentación del ESP32, este comienza la inicialización de los sensores con tareas que serán descritas con más detalle en apartados siguientes. Una vez culmina el ajuste inicial de los sensores, el sensor inteligente inicializa el módulo de comunicaciones LoRa RA-02 de Ai-Thinker, el cual una vez inicializado, envía un mensaje a la estación base solicitando la fecha y hora actual, con lo cual la estación base recibe, decodifica y responde al mensaje con los datos solicitados, lográndose la sincronización del reloj RTC interno del ESP32.

Luego de realizadas las tareas de inicialización y sincronización satisfactoriamente, el sensor inteligente comienza a tomar datos de todos los sensores de forma continua, manteniéndose alerta a cualquier evento que supere los valores límite en donde está ubicado el sensor. Como se describió en el apartado 3.1, el sensor inteligente está configurado para enviar un registro ante los siguientes eventos:

- El valor de aceleración medido por el sensor en algún eje supera el valor límite establecido.
- El reloj RTC interno indica que la hora actual se corresponde con una de las horas de envío programadas previamente.
- El sensor inteligente recibe un comando desde la estación base el cual indica que se comience a tomar un registro inmediato.

Una vez se toma el registro, este es almacenado temporalmente en buffers que son parte de estructuras de datos para posteriormente ser enviado utilizando el módulo de comunicaciones RA-02 de Ai-Thinker mediante paquetes sucesivos. Al terminar de enviar todos los paquetes, el sensor inteligente vuelve a su estado normal de toma de datos continua.

El sensor inteligente cuenta con 3 leds (*Light Emitting Diodes*) indicativos:

- LED Amarillo encendido: Ajuste e inicialización.
- LED Rojo intermitente: Toma de datos continua activa en espera de eventos.
- LED Verde encendido: Toma de un registro de datos por evento.

La tarjeta de desarrollo basada en el ESP32 utilizada cuenta con un LED azul integrado que se utiliza para notificar sobre la recepción o envío de algún paquete LoRa por el módulo de comunicaciones.

En la estación base se cuenta con otro módulo ESP32 DOIT DEVKIT, el cual se conecta a la red WiFi, dentro de la cual está ubicado un computador que cuenta con los servicios de NodeRED y Mosquitto, herramientas que se describirán en detalle más adelante. Este computador sirve de base de datos y broker para los datos a recibirse vía MQTT desde el ESP32 de la estación base, y además, proporciona una interfaz de monitoreo y control, basada en Python, la cual permite acceder a los registros y enviar comandos de adquisición de datos al sensor inteligente vía LoRa.

Al estar conectado a WiFi, el ESP32 sincroniza su reloj RTC interno con el de un servidor del protocolo NTP. El ESP32 es el encargado de recibir los datos provenientes del sensor inteligente mediante un módulo de comunicaciones LoRa Ra-02 similar al del sensor inteligente. Los datos se almacenan temporalmente en buffers de datos para posteriormente convertirlos a formato JSON (*JavaScript Object Notation*), el cual permite enviar los datos al broker MQTT en la red local. Una vez los datos son recibidos por el broker, estos son recibidos y procesados utilizando la herramienta NodeRED, la cual genera un formato tal que puede almacenarse en local usando el formato CSV (*Comma separated values*). A su

vez, NodeRED genera una notificación que envía un mensaje MQTT a la interfaz gráfica indicando que un nuevo registro está disponible. Los registros se guardan según su fecha y hora de llegada al broker en una carpeta específica en local.

La interfaz gráfica de usuario o GUI (*Graphic User Interface*), basada en Python, se encarga de proporcionar una aplicación sencilla en donde pueden verse datos importantes de los registros, tales como:

- Valores de inclinación de la estructura durante el registro escogido.
- Valores de temperatura y humedad del registro.
- Gráfico de aceleración vs. tiempo tomado por el sensor inteligente.
- Espectro en frecuencia utilizando la FFT del registro de aceleración.
- Valores máximos de picos en espectro en frecuencia (método de peak picking automatizado).
- Gráfico de la Densidad Espectral de Potencia (PSD por sus siglas en inglés).
- Gráfico de barras de los valores de inclinación para verificar si el dispositivo está a nivel.

Además de la posibilidad de visualizar y monitorear el estado de la estructura mediante la lectura de sus registros, la GUI permite:

- Enviar un comando de adquisición de datos al sensor inteligente.
- Seleccionar el archivo a estudiar.
- Guardar el archivo seleccionado en otra ubicación, como puede ser un dispositivo extraíble o en una carpeta creada para un estudio en específico, en formato CSV.

- Indicación de registro nuevo disponible.
- Indicación de sensor inteligente a nivel, y de no estarlo, indica el eje en el que se debe ajustar.
- Fecha y hora del registro escogido para control de eventos.
- Botón de actualización de gráfica.
- Menú para escoger entre 3 funciones de aventanamiento distintas para ser aplicadas a los datos a procesarse.

3.3.2. Diagrama general funcionamiento del sensor inteligente en conjunto con la estación base

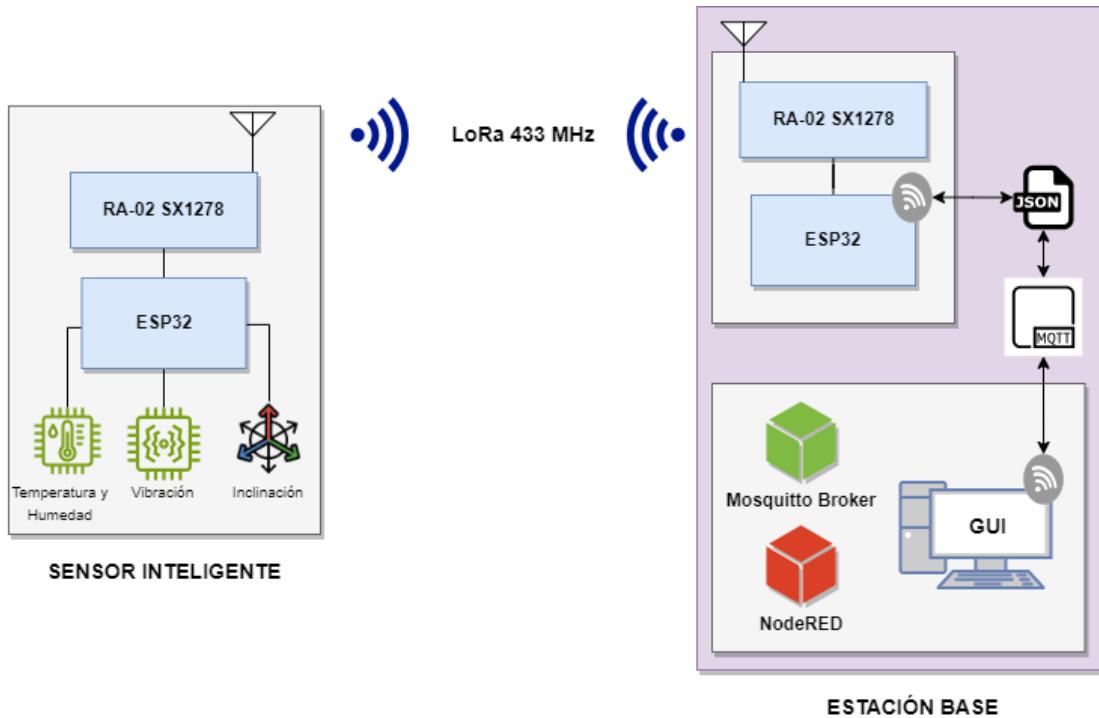


Figura 3.10: Esquema general del sistema.

3.3.3. Descripción del hardware

A continuación se describen las conexiones de hardware utilizando los componentes escogidos tanto para el sensor inteligente como para la estación base.

Basados en el funcionamiento del sistema explicado en el apartado 3.3.1 y 3.1, y tomando en cuenta los componentes escogidos en el apartado 3.2, se procede a realizar los siguientes diagramas de bloques de conexión:

Sensor inteligente:

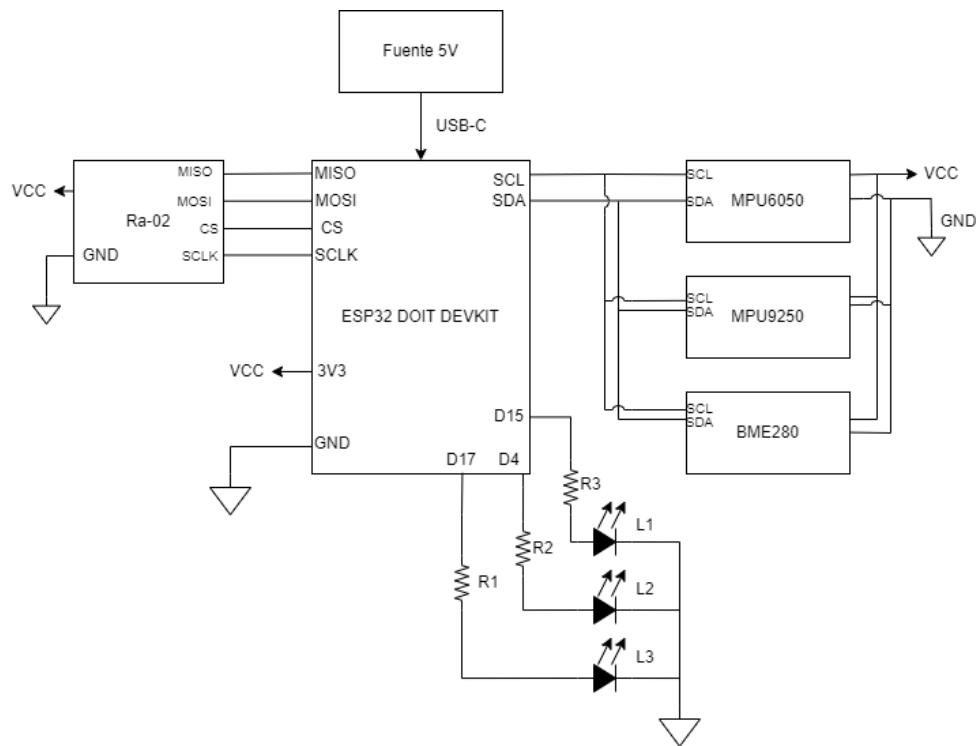


Figura 3.11: Diagrama de bloques del sensor inteligente.

Estación base:

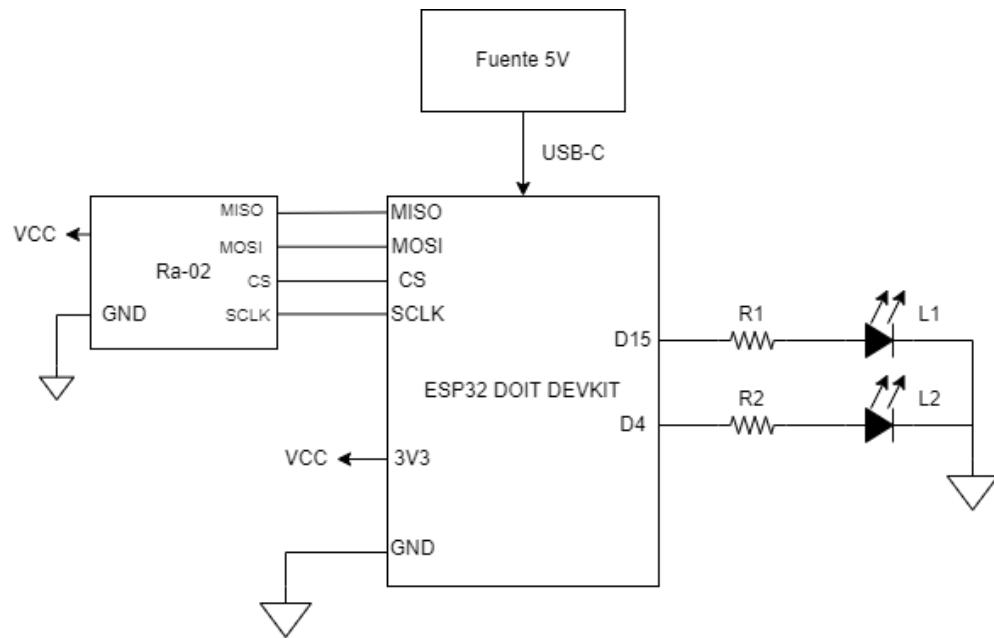


Figura 3.12: Diagrama de bloques de la estación base.

3.3.4. Descripción del software

A continuación se describen las distintas tareas programadas tanto en el sensor inteligente como en la estación base para cumplir con el funcionamiento descrito en el apartado 3.3.1.

Programación del ESP32:

La documentación del fabricante del ESP32 *Espressif Systems* especifica los requerimientos de hardware y software para poder programar el ESP32. En la figura 3.13, se observan las herramientas requeridas para subir un programa al microcontrolador.

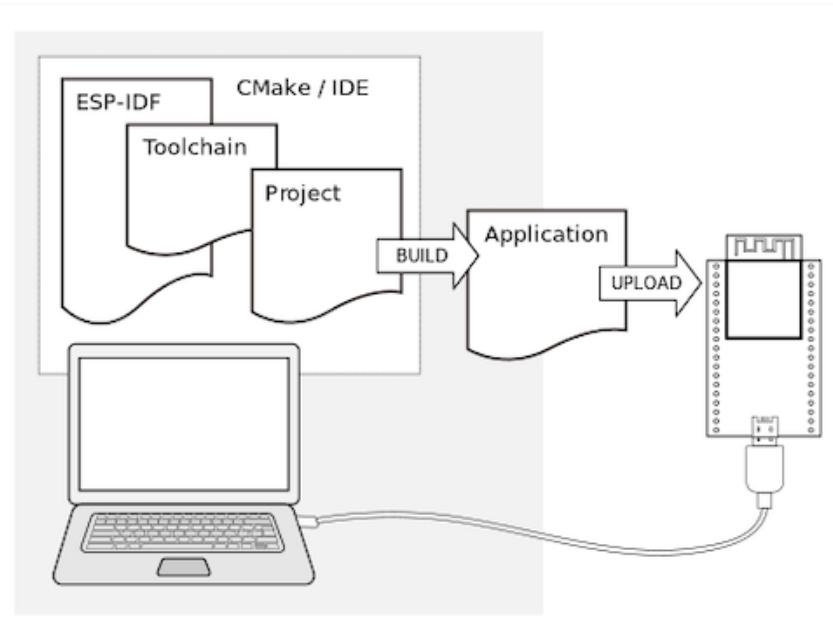


Figura 3.13: Ilustración del proceso para programar el ESP32 (Systems, 2016).

PlatformIO surge como una necesidad de los desarrolladores de sistemas embebidos al tener que instalar herramientas específicas para cada fabricante de hardware, además de la tediosa tarea de la instalación de los toolchains y frameworks de trabajo para cada placa de desarrollo. El IDE (*Integrated Development Environment*) de PlatformIO es una herramienta para sistemas embebidos que permite trabajar con múltiples plataformas, arquitecturas y frameworks en el mismo lugar, permitiendo programar distintos microcontroladores, acceder a librerías, e incluso depurar el código por línea dentro del mismo IDE. PlatformIO está disponible como una extensión del conocido IDE Visual Studio Code, desarrollado por Windows. Visual Studio Code es un editor de código ligero que permite crear aplicaciones en Windows y Linux.

Para el desarrollo del programa se utilizó PlatformIO v3.3.3 y Visual Studio Code en el sistema operativo Windows 10. El microcontrolador utilizado fue el ESP32 DOIT DevKit1, usando el Arduino Core del mismo. El Arduino Core

permite programar el microcontrolador usando el lenguaje C++, además de las facilidades para la implementación de librerías por la gran comunidad que desarrolla proyectos usando esta herramienta.

Librerías

Para llevar a cabo las distintas tareas del proyecto se hizo uso de una serie de librerías escritas en C++ para facilitar la comunicación con los sensores y módulos. A continuación se mencionan las librerías utilizadas y su función dentro del proyecto:

- AdafruitBME280: Desarrollada por Adafruit, implementa rutinas para facilitar la comunicación con sensores Bosch BME280 de temperatura, humedad y presión, permitiendo acceder a los registros donde se almacenan las mediciones a través de la clase AdafruitBME280.
- AdafruitMPU6050: También desarrollada por Adafruit Industries, facilita la comunicación con sensores MPU6050, especialmente con placas de componentes o “*breakout boards*”, las cuales contienen el sensor y el hardware necesario para facilitar su comunicación y conexión a un microcontrolador a través de pines de salida. Implementa funciones de adquisición al leer los registros del sensor MPU6050. Para mejorar las capacidades de esta librería, se añadieron funciones de “*Self test*” y de lectura de bytes tomadas de la implementación de Kris Winer de la librería MPU6050. La implementación de la clase AdafruitMPU6050 permite acceder a esta función de forma ordenada y sencilla.
- MPU9250: Desarrollada por Hideaki Tai. Se escogió por implementar algoritmos de estimación de inclinación basados en el filtro de Madgwick y Mahony. Se puede acceder a estas funciones a través de la clase MPU9250.

- RadioLib: Desarrollada por Jan Gromes, representa una de las librerías más utilizadas para comunicaciones inalámbricas en proyectos de software libre, soportando 13 módulos de comunicaciones distintos y 8 protocolos de comunicaciones distintos. Se escogió esta librería por su facilidad para controlar los módulos de Semtech de las series SX126X y SX127X, permitiendo configurar el módulo, sus parámetros más importantes, y posteriormente implementar funciones propias basadas en interrupciones usando las funciones de la librería.
- ESP32Time y time: Desarrollada por Felix Biego, ESP32Time permite actualizar la estructura que contiene la fecha y hora actual del RTC interno del ESP32. A su vez, la librería “time”, estándar de C, permite acceder a estos valores de fecha y hora.
- PubSubClient: Desarrollada por Nick O’Leary, permite implementar la comunicación como cliente MQTT de forma sencilla en microcontroladores. Facilita la suscripción y publicación de datos a tópicos ubicados en un broker.
- ArduinoJson: Desarrollada por Benoit Blanchon, se complementa con la librería PubSubClient, permitiendo generar cadenas JSON para facilitar el envío de datos mediante MQTT.

Programación de la aplicación de monitoreo y control

Es conveniente contar con plataformas de monitoreo y control que sean de fácil acceso a los operadores del sistema para poder acceder a la información de la estructura de forma rápida y sencilla.

Es común conseguir plataformas o aplicaciones propias de un fabricante. Estas suelen ser limitadas y, al ser propiedad del fabricante, usualmente no permiten ser personalizadas según la aplicación o caso de uso lo requiera.

Se buscaba implementar una aplicación sencilla que permitiera a los operadores acceder a los datos, almacenarlos en una ubicación deseada, que provea un formato de datos replicable y compatible con distintos programas, que permitiera acceder a los valores claves para el monitoreo de la salud estructural y que diera la posibilidad de modificarse según la aplicación lo requiera. Para esto, se diseñó una GUI utilizando Python en conjunto con la librería “CustomTkinter”.

El programa, alojado en el computador y corriendo al estar el intérprete de Python instalado en el mismo, es capaz de enviar y recibir información vía MQTT usando la librería “paho-mqtt”. Se implementó una interfaz gráfica de usuario utilizando “customTkinter” la cual provee distintos botones, widgets, menús y gráficas que permiten monitorear y controlar el sensor inteligente a distancia.

A continuación se mencionan las librerías de Python 3.11.3 utilizadas en el programa para procesar y mostrar los gráficos una vez se accede a los archivos guardados en el computador, además del uso que se la da en la GUI:

- CustomTkinter 5.2.2: Provee las herramientas para la creación de la GUI. Crea la ventana y subventanas, permite crear los distintos botones y menús, además de adjuntar gráficas y texto.
- Numpy 1.24.3: Permite ejecutar cálculos matemáticos y provee las funciones necesarias para llevar a cabo la FFT de los datos obtenidos del archivo leído. Permite manejar los arreglos de datos como matrices.
- Matplotlib 3.7.1: Es la responsable de graficar los datos de aceleración, inclinación, densidad espectral de potencia y el espectro en frecuencia a partir de arreglos de datos.
- Pandas 2.2.1: Permite acceder a los datos guardados como archivo CSV (“comma-separated-values”) y guardarlos para su posterior procesamiento.

- Scipy 1.11.1: Permite acceder a distintos tipos de filtro para pre-procesar los datos antes de ejecutar la FFT.
- Paho-mqtt 2.0.0: Provee las herramientas para crear un cliente MQTT capaz de suscribirse y publicar información a tópicos. Esta herramienta es la que permite recibir notificaciones sobre paquetes nuevos y enviar comandos al microcontrolador de la estación base para su posterior envío vía LoRa al sensor inteligente.

Inicialización y setup

Antes de comenzar con las rutinas de toma de datos, el sensor inteligente debe inicializar el hardware y eliminar el offset, además de la creación de tareas y colas. En primer lugar, las colas, encargadas de enviar información entre tareas como se describió en el apartado 2.5.4, que fueron implementadas en el sensor inteligente son:

- data_tempHumQueue
- aclQueue
- bufferQueue
- incQueue
- tramaLoRaQueue
- tempHumarrayQueue
- incarrayQueue

Estas colas permiten que se envíe la información adquirida por una tarea, como puede ser obtener los valores leídos por el sensor mediante el objeto correspondiente a su clase, a otra tarea encargada de almacenarla en un buffer temporal para su posterior envío.

Una vez creadas las colas, se inicializa el hardware del sensor inteligente con las siguientes funciones:

- `bme.begin()`: Inicializa el sensor BME280 usando el objeto `bme`. Dentro de esta rutina de la librería se definen los parámetros como modo de operación, cantidad de sobre muestreo en datos, duración del tiempo de standby.
- `setup_acl_MP6050()`: Esta función inicializa el sensor MP6050, configura su tiempo de muestreo a 200 Hz, enciende el led amarillo de ajuste, lleva a cabo la función de *self test* y verifica que el valor se encuentre dentro de los valores nominales de fabricación. Posteriormente, se elimina el offset en todos los ejes al tomar 1000 mediciones y tomar el promedio de estas aceleraciones. Se inicializan los rangos del acelerómetro y se desactiva el filtro pasa-alto ya que, según la documentación del MP6050 de Invensense, esto introduce retardo en las mediciones.
- `setup_mpu9250()`: Esta función, análoga a las funciones anteriores, inicializa el MP6050 usando el objeto creado perteneciente a la clase definida en la librería MP6050. Se ejecuta una rutina de eliminación de offset similar a la del MP6050 en donde se toman mediciones por un intervalo de tiempo, se promedian, y posteriormente se guardan en los registros de “bias” del dispositivo.
- `setup_lora_radiolib()`: La función de inicialización del módulo LoRa Ra-02 se encarga de configurar la frecuencia de trabajo, el factor de propagación y el ancho de banda. Luego de esto, envía un mensaje de inicialización en

donde le hace saber al dispositivo de la estación base que el sensor inteligente ya se encuentra operativo y con sus sensores listos para las mediciones. Luego, se activa la interrupción (ISR por sus siglas en inglés), y se configura la función de *callback* a ejecutar en caso de que la señal cambie de 0 V a un valor positivo en el pin 2 del microcontrolador. Esta ISR es la que permite manejar el caso en el que el módulo reciba una señal desde estación base. Una vez configurada la interrupción, se configura el módulo tal que escuche a mensajes presentes en el espectro.

- `Wire.setClock(400000)`: Ajusta la frecuencia de las comunicaciones I2C del microcontrolador a 400 kHz.

En cuanto a la estación base, la inicialización consta de las siguientes funciones de configuración:

- `setup_wifi()`: Se encarga de conectarse a una red WiFi cuyas credenciales se encuentran definidas en un archivo `wifi_credentials.h`. Si no logra conectarse, seguirá intentando hasta lograr la conexión a la red especificada.
- `setup_mqtt()`: Si la conexión a la red WiFi es exitosa, el microcontrolador de la estación base se conecta al broker ubicado en la dirección IP especificada y asignada al computador donde está alojado el broker MQTT. Una vez ahí, se suscribe a un tópico al cual envía mensajes periódicos para que no se pierda la conexión. Finalmente, configura el tamaño del buffer del cliente a 40000 bytes.
- `update_timepacket()`: Esta función tiene como objetivo actualizar el reloj RTC interno del ESP32 usando el protocolo NTP, con el cual el microcontrolador solicita a un servidor la fecha y hora actual, el servidor responde y esta información es almacenada en el ESP32.

Una vez configurado el hardware, se procedió a crear las tareas que se ejecutarán por el sensor inteligente. Para esto, se hace uso del comando xTaskCreatePinnedToCore de la siguiente forma:

```
1 BaseType_t xTaskCreatePinnedToCore(TaskFunction_t pvTaskCode,
  const char * const pcName, const uint32_t usStackDepth, void
  * const pvParameters, UBaseType_t uxPriority, TaskHandle_t *
  const pvCreatedTask, const BaseType_t xCoreID);
```

Código 3.1: Creación de tareas en FreeRTOS

A todas las tareas se les asigna una prioridad, un *handle*, el núcleo donde se ejecutarán y el espacio de memoria que pueden ocupar dependiendo de la que necesite una vez se ejecute.

Estructuras de datos del sensor inteligente

Se crearon distintas estructuras de datos para manejar las mediciones tomadas por los sensores y además permitir la comunicación entre tareas mediante colas, manteniendo los datos ordenados para posteriormente enviarlos a larga distancia hacia y desde la estación base. Las estructuras más relevantes fueron:

- BufferACL: Estructura que almacena los datos provenientes del sensor MPU6050 para enviarlos por paquetes utilizando el módulo de comunicaciones. Consta de 3 arreglos de 1024 flotantes cada uno.
- BufferTempHumedad: Almacena los valores de temperatura y humedad obtenidos por el sensor BME280. Estos valores son promediados previos al almacenamiento y además pasan por un filtro de primer orden que le asigna un mayor peso a la medición anterior para evitar cambios bruscos.

- BufferInclinacion: Almacena los valores de inclinación estimados por el sensor MPU9250 luego de implementar el Filtro de Madgwick.
- Packet: Corresponde a la estructura principal del sistema, ya que es la encargada de almacenar los distintos paquetes que surgen producto de la subdivisión del arreglo de flotantes de aceleraciones. Este paquete consta de los bytes de encabezado y el payload (los datos de aceleración adquiridos).
- Packet2: Sigue la estructura de Packet con la diferencia de tener un *payload* de tamaño 1. Este paquete se corresponde con los mensajes de comandos desde y hacia estación base, los cuales constan de 1 solo byte.
- TimePacket: Se utiliza para actualizar el reloj RTC interno del ESP32 del sensor inteligente con la fecha y hora obtenida usando el protocolo NTP en la estación base.
- StringPacket: Es la encargada de almacenar el string de inicialización enviado por el sensor inteligente una vez termina su inicialización y notifica a la estación base que está listo para actualizar su RTC y tomar datos.
- THIPacket: Siguiendo la estructura de los paquetes anteriores, esta estructura almacena los valores promedio de inclinación, temperatura y humedad que estaban almacenados en los buffers BufferInclinacion y BufferTempHumedad. Además, se incluye en esta estructura el timestamp correspondiente al momento en el cual se comienza a tomar el registro de datos de aceleración en formato “*UNIX Epoch*”, que corresponde al número de segundos transcurridos desde el 1 de enero de 1970, siendo este formato más sencillo de enviar y luego reconvertir en la estación base al formato de fecha y hora más adecuado.

Programas del sensor ingeligente

A continuación se describe el funcionamiento de las tareas y funciones para la adquisición y preprocesamiento de los datos:

- Tarea de adquisición de datos de aceleración: Esta tarea es una de las más importantes del sensor inteligente. Se encarga de adquirir las mediciones de aceleración en los intervalos de tiempo especificados por el macro F_SAMPLING. En esta tarea se verifica si los valores sobrepasan el límite de aceleración en alguno de los 3 ejes, también verifica si es hora de adquirir un registro según el reloj RTC interno del ESP32 y por último se asegura de que la bandera flag_acl, la cual corresponde a una petición de datos vía LoRa desde la estación base, no se haya activado. En cualquiera de estos casos, la tarea envía los últimos 3 valores de aceleración registrados a una cola, la cual es recibida por una función que se encarga de almacenar estos valores en un buffer sucesivo hasta que se completan según el tamaño de registro fijado.
- Tarea de creación de buffer: Esta rutina es de gran importancia para el control y la sincronización de los eventos del sensor inteligente. Esto se debe a que es la encargada de evaluar si el buffer de datos ya fue llenado en su totalidad por los datos provenientes de la función de adquisición. De ser así, desactiva las tareas de adquisición temporalmente y activa la rutina de envío de datos por LoRa, la cual se encargará de reiniciar las tareas de adquisición. Además, reinicia todas las banderas límite para que el sensor inteligente esté alerta a nuevos eventos una vez se envíen todos los paquetes.
- Evaluación de valores límite: La evaluación de los valores límite consiste en comparar los últimos valores de aceleración escogidos y levantar una bandera en caso de que alguno de los ejes sobrepase el límite de $2[\frac{m}{s^2}]$.

- Verificación de hora actual: Esta función se encarga de verificar si la hora actual del microcontrolador, a la cual se puede acceder a través del objeto rtc de la librería ESP32Time, se corresponde con alguna de las horas previamente programadas en el sistema. De ser así, levanta una bandera para que el sensor inteligente comience a tomar un registro de datos.
- Tarea de adquisición de datos de temperatura y humedad: Esta tarea se encarga de adquirir los valores de temperatura y humedad del sensor BME280 y enviarlos mediante una cola a la función encargada de ejecutar los promedios y aplicar el filtro de primer orden a los datos para posteriormente llenar el buffer temporal de temperatura y humedad de forma sucesiva.
- Tarea de estimación de datos de inclinación: Análogo a las tareas de adquisición de aceleración, temperatura y humedad, esta tarea es la encargada de adquirir los valores de estimación de inclinación por parte del sensor MPU9250 para posteriormente, si se está tomando un registro de datos, enviar estos valores, usando una cola, a una función encargada de almacenar los valores promedio en un buffer temporal.

A continuación se describen las tareas encargadas de la comunicación de los datos vía LoRa en el sensor inteligente:

- Rutina de interrupción: La rutina de interrupción o ISR es la encargada de reactivar la tarea de recepción de datos cuando en el pin asignado para la ISR se detecta un flanco ascendente. Estas rutinas se ejecutan en RAM por lo que requieren el macro ICACHE_RAM_ATTR específico para ESP32. Es decir, esta rutina siempre se ejecuta independientemente de la tarea que se esté ejecutando en el microcontrolador. Es importante acotar que se programó el sistema para desactivar esta interrupción mientras se está tomando un registro de datos. Esto impide que la recepción de un mensaje interrumpa

la toma de los datos que ya está ejecutándose. A continuación, en el código 3.2, se observa la ISR implementada:

```
1     void ICACHE_RAM_ATTR setFlag(void){  
2         //Activo tarea de recepcion de datos  
3         vTaskResume(xHandle_receive_task);  
4         receivedFlag = true;  
5     }  
6
```

Código 3.2: ISR de recepción de datos en sensor inteligente

La bandera de transmisión “receivedFlag” debe ser de tipo *volatile*, para que pueda ser modificada dentro de una ISR.

La interrupción se genera gracias a la configuración del módulo Ra-02 SX1278 de Ai-Thinker, el cual, al recibir un mensaje que cumpla con las características de encabezado de un mensaje LoRa, activa el pin DIO0 del módulo. Esta salida digital se conecta al pin configurado para detectar el flanco de subida y se genera la interrupción.

- Tarea de recepción de datos: Esta tarea es clave al ser la que decodifica la naturaleza del mensaje recibido desde la estación base. Dependiendo de la longitud del mensaje recibido, se identifica si el mensaje corresponde a un comando de adquisición o a una actualización de RTC. Si la longitud no se corresponde con ninguno de los 2 casos, los datos están corruptos o no es para este receptor. Una vez se recibe el paquete con éxito, se verifica el payload y se levanta bandera de adquisición inmediata o se ejecuta función de actualización de RTC, según sea el caso.
- Tarea de envío de mensaje de inicialización: Es la encargada de enviar un string de inicialización a la estación base para notificar que el sensor inteligente ya culminó su período de inicialización y ajuste y está listo para una actualización de RTC.

- Función de actualización de RTC: Toma como entrada el arreglo de bytes recibido que contiene la información de la fecha y hora actual. La información se convierte a una estructura de datos de tipo TimePacket y se sincroniza el reloj interno del ESP32.
- Tarea de envío de paquetes de datos de aceleración: Una de las tareas de mayor importancia en todo el sistema al ser la encargada de gestionar el envío de los paquetes sucesivos de byte arrays a la estación base con la información almacenada en los buffers de aceleración correspondientes.
- Función para generar arreglo de datos a enviar: Función para generar el arreglo de subpaquetes (chunks) que contienen 128 bytes cada uno para su posterior envío, mediante una cola, a la tarea de envío de datos LoRa en forma de byte array.
- Tarea de envío de datos de temperatura, humedad e inclinación: Una vez se envían todos los datos de aceleración, siguiendo la misma estructura de envío de datos de aceleración, se envían los contenidos del buffer promedio.

Programas de la estación base:

- Rutina de interrupción: Análoga a la ISR implementada en el sensor inteligente, se encarga de ejecutar en RAM la activación de la tarea encargada de la recepción de los datos independientemente del código que se esté ejecutando.
- Tarea de envío de fecha y hora para actualización de RTC: Esta tarea es la encargada de enviar una estructura de tiempo, dentro de una estructura de tipo TimePacket, al sensor inteligente con el fin de sincronizar su reloj RTC interno. Para el envío del paquete, se llena la estructura de tiempo y luego se convierte a un arreglo de bytes usando la línea de código presente en 3.3,

esto consiste en “castea” de un tipo de datos a otro. En este caso, es un cast de reinterpretación, permitiendo que esta conversión sea compatible en distintas arquitecturas. La notación es originaria del lenguaje C y permite efectuar operaciones de bajo nivel con el puntero que contiene el byte array.

```
1     byte *byteArrTime = (byte *)&time_packet;  
2
```

Código 3.3: Conversión de datos a tipo byte array usando casting

Una vez los datos están en el tipo byte array, el cual es aceptado por el módulo Ra-02 Ai-Thinker, los datos se envían utilizando el comando “*startTransmit*” de la librería RadioLib. Este comando recibe como entradas el arreglo de datos de toda la estructura a enviar, la cual contiene el encabezado y el payload, y el tamaño del arreglo de datos final. Este comando devuelve un código de respuesta indicativo del estado del envío, notificando sobre si el envío fue exitoso o no.

Una vez el arreglo de bytes es enviado con éxito, se debe introducir un retardo de 500 ms antes de configurar el módulo para que escuche comando nuevamente con el comando “*startReceive*”, como se observa en la figura 3.4. La necesidad de este retardo surgió luego de observar que el módulo no recibía comandos si se configuraba para escuchar comandos inmediatamente después. Esto se debe a la necesidad del módulo de unos cuantos milisegundos para enviar el paquete exitosamente. Luego de enviar el paquete, se debe reiniciar la ISR para comenzar a escuchar paquetes nuevamente.

```
1     int state2 = radio.startReceive();  
2  
3         attachInterrupt(digitalPinToInterruption(2), setFlag,  
4             RISING); // Reinicia ISR
```

Código 3.4: Configuración del módulo LoRa para escuchar paquetes

- Rutina para recepción de mensajes por MQTT: Para poder recibir mensajes vía MQTT, primero debe definirse la función callback a llamarse cuando se recibe un mensaje vía MQTT desde el tópico al cual está suscrito el microcontrolador.

La función de callback está implementada como se observa en el código 3.5:

```

1      void messageReceived(char* topic, byte* payload,
2                           unsigned int length) {
3
4           //Convierte payload a string
5           String mensaje;
6           for (int i = 0; i < length; i++) {
7               mensaje += (char)payload[i];
8           }
9
10          //Chequear si el mensaje recibido es "ON"
11          if (mensaje == "ON") {
12              //Llama a la ISR, peticion de datos al Smart
13              Sensor
14              if(!transmitFlag){
15                  ISR_MQTT_Request(); //ISR
16              }
17          }

```

Código 3.5: Función de callback para recepción de mensajes MQTT

- Tarea de envío de comandos de adquisición al sensor inteligente:

Una vez se recibe vía MQTT el comando, ejecutado desde la GUI por el operador, de enviar un comando de adquisición de datos al sensor inteligente, se ejecuta la ISR, que se implementó como se observa en el código 3.6 que activa la envío de datos usando el módulo LoRa:

```

1 //Rutina de ISR por software en caso de recibir una
2 peticion por MQTT
3
4     void IRAM_ATTR ISR_MQTT_Request()
5 {
6     transmitFlag = true;
7     vTaskResume(xHandle_send_task);
8 }
```

Código 3.6: ISR de activación de envío de comando por LoRa

La tarea de envío de datos por LoRa, se encarga de enviar en el payload el byte 0x01, este payload es decodificado e identificado por el sensor inteligente y lo interpreta como un comando, activando la toma de datos.

Los comandos utilizados son análogos a los utilizados en el envío de datos para la actualización del RTC, definida anteriormente. Podrían numerarse de la siguiente forma:

1. Desactivar interrupción.
2. Llenar la estructura de datos a enviar.
3. Convertir la estructura de datos al tipo de datos byte array para su envío.
4. Enviar el paquete LoRa usando el comando “startTransmit” de la librería RadioLib.
5. Introducir retardo de 500 ms para que el módulo pueda enviar con éxito el paquete.
6. Reiniciar bandera de transmisión.
7. Configurar el módulo a modo “*listening*”.
8. Reactivar interrupción.

- Tarea de recepción de datos provenientes del sensor inteligente: Corresponde a la tarea principal de la estación base. Se encarga de recibir y almacenar los datos recibidos vía LoRa para su posterior subida al broker MQTT.

Para lograr esto, la tarea lleva a cabo los siguientes pasos:

1. Reinicia bandera de ISR.
2. Crea unión packetUnion para que contenga las distintas estructuras que pueden utilizarse.
3. Lee los datos recibidos y obtiene el tamaño del paquete.
4. Dependiendo del tamaño del paquete se activan distintas banderas que identifican el mensaje como datos de aceleración, datos de temperatura y humedad o un mensaje de inicialización del sensor inteligente.
 - Caso 0 (Datos de aceleración): Se guardan los arreglos de datos en buffers sucesivos, los cuales se identifican dependiendo de la identificación presente en el encabezado del mensaje. El número de paquetes está fijado por el número de bytes que se envían en cada payload. Una vez se reciben todos los paquetes, se envían los buffers en una cola para su posterior envío vía MQTT.
 - Caso 1 (Mensaje de inicialización de sensor inteligente): Al recibir un mensaje de inicialización del sensor inteligente, esto significa que el sensor culminó su proceso de ajuste e inicialización y está listo para sincronizar su RTC. En este caso, se identifica el messageID del mensaje y si cumple con las características de la inicialización del RTC, se envía el mensaje correspondiente.
 - Caso 2 (Datos de temperatura y humedad): Análogo al caso 0, si se identifica el mensaje como uno que corresponde a datos de temperatura y humedad a partir de se almacenan los datos de temperatura humedad e inclinación en una estructura dedicada.

Esta se envía mediante una cola a la tarea encargada de subir los datos al broker MQTT.

5. En caso de tratarse de datos corruptos cuya CRC no corresponda con la esperada por el receptor, se descartan.

- Tarea de envío de datos de temperatura, humedad e inclinación al broker vía MQTT:

Esta tarea tiene como objetivo subir los datos recibidos mediante una cola, enviada por el RTOS luego de recibir los datos de temperatura, humedad e inclinación, al broker ubicado en el computador cuya dirección IP es conocida. Para lograrlo se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Suspende temporalmente la tarea *keepalive_task*, encargada de enviar mensajes cortos de forma periódica al broker y mantener activa la conexión mientras no se están enviando datos.
2. Crea estructura de datos de tipo THIPacket.
3. Recibe la cola con los datos.
4. Ejecuta la función *sendTHI*, la cual recibe como entrada el tópico y el dato a enviar. Esta función convierte los datos a tipo string y luego los publica en el tópico de interés.
5. Activa la tarea para envío de datos de aceleración
6. Se suspende a sí misma.

- Tarea de envío de arreglos de datos de aceleración al broker vía MQTT:

Similar a la tarea anterior, se encarga de subir los datos de aceleración recibidos mediante una cola al broker MQTT. Se llevaron a cabo los siguientes pasos para subir exitosamente los datos:

1. Recibe la cola con los arreglos de aceleración y los almacena en una estructura de datos.

2. Ejecuta la función “*sendAxis*”, similar a “*sendTHI*”, la cual recibe como entrada el tópico, el nombre del eje que está siendo enviado, el arreglo de datos almacenado en la estructura y el tamaño del arreglo. Esta función crea un “*nestedArray*”, es decir, crea nuevo array JSON anidado. El arreglo se llena con los datos de forma sucesiva utilizando un bucle. Luego, serializa el documento JSON a una cadena de texto. Finalmente, la representación en texto del documento JSON es publicada al tópico de interés.
3. Reinicia la ejecución de la tarea *keepalive_task*.
4. Se suspende a sí misma hasta que sea reanudada en el próximo envío.

Aplicación de monitoreo y control:

A continuación se describen las funciones del sistema de monitoreo y control:

- Conexión MQTT: La aplicación se conecta al broker MQTT ubicado en la dirección IP del computador. Para lograrlo, se ejecuta la función *connect* de la librería paho-mqtt, la cual recibe como entradas la dirección IP del broker, el puerto de conexión y el nombre del cliente. Una vez conectado, se suscribe y publica a los tópicos de interés.
- Petición de datos a sensor inteligente: La aplicación permite al operador solicitar datos al sensor inteligente mediante el envío de un mensaje vía MQTT al tópico encargado de gestionar el envío de comandos al sensor inteligente. Para lograrlo, se ejecuta la función *publish* de la librería paho-mqtt, la cual recibe como entradas el tópico de interés y el mensaje a enviar.
- Gráfica de aceleración en tiempo: Para las gráficas se hizo uso de la librería matplotlib, la cual proporciona las herramientas necesarias para mostrar

gráficamente series de datos que pueden estar almacenados en arreglos. En el caso de la aceleración, se lee el registro escogido por el operador en formato “csv” y se almacenan las columnas correspondientes en arreglos de la librería “NumPy”. El eje x, que representa el tiempo, se construye a partir de la frecuencia de muestreo y el número de muestras. Luego, se grafican los datos en función del tiempo.

- Gráfica de espectro en frecuencia: Ejecutando la FFT sobre los datos de aceleración almacenados en arreglos de NumPy, se obtiene el espectro en frecuencia del registro escogido. El eje x debe truncarse para graficar solo las frecuencias positivas. Se incluyen en la gráfica indicadores que apuntan a los valores máximos por eje.
- Valores de temperatura, humedad e inclinación: En el archivo escogido por el operador se encuentran los valores de las variables ambientales y la inclinación en columnas separadas. Estos datos se almacenan y se agregan a la ventana.
- Gráfica de barras para inclinación: Los valores de inclinación utilizados para ser mostrados en la ventana, se usan para construir un gráfico de barras que permite al operador saber si el sensor inteligente se encuentra a nivel en un rango dado. Además, en caso de no estar dentro del rango deseado, se notifica sobre el ángulo que debe ajustarse para que el sensor inteligente esté a nivel.
- Gráfica de Densidad Espectral de Potencia: Similar al proceso para obtener la gráfica del espectro en frecuencia, se ejecuta la densidad espectral de potencia elevando al cuadrado los arreglos que contienen los espectros, graficando posteriormente estos valores contra el número de datos obtenidos en frecuencia.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presentan las pruebas y sus resultados obtenidos aplicando la metodología descrita en el capítulo 3. Se presentan las pruebas de comunicaciones inalámbricas para determinar las características del canal, las pruebas para la estimación de la inclinación y finalmente las pruebas de funcionamiento del prototipo.

4.1. Pruebas de comunicaciones

Con el hardware seleccionado en la sección 3.2, se realizaron una serie de pruebas de los módulos de comunicación inalámbrica para alcanzar mayor velocidad de transmisión y la menor pérdida de información.

El protocolo LoRa implementado en el módulo Ra-02 de Ai-Thinker, que fue descrito en el apartado 2.10.4, requiere fijar el valor de los siguientes parámetros de comunicaciones:

- Factor de propagación.
- Ancho de banda.
- Período de envío de paquetes.

En primer lugar se escogieron los parámetros iniciales del canal. Se fijaron los siguientes:

- Frecuencia de operación: 433 MHz.
- Tasa de codificación: 4/8.
- Potencia: 10 dBm.
- Longitud del preámbulo: 8 bytes.
- Tamaño de la carga útil (*payload*): 128 bytes.

La prueba consistió en el envío de un paquete de bytes a una distancia de aproximadamente 115 metros, con obstáculos de acero y concreto (sin línea de vista directa), como se puede observar en el mapa de la figura 4.1.

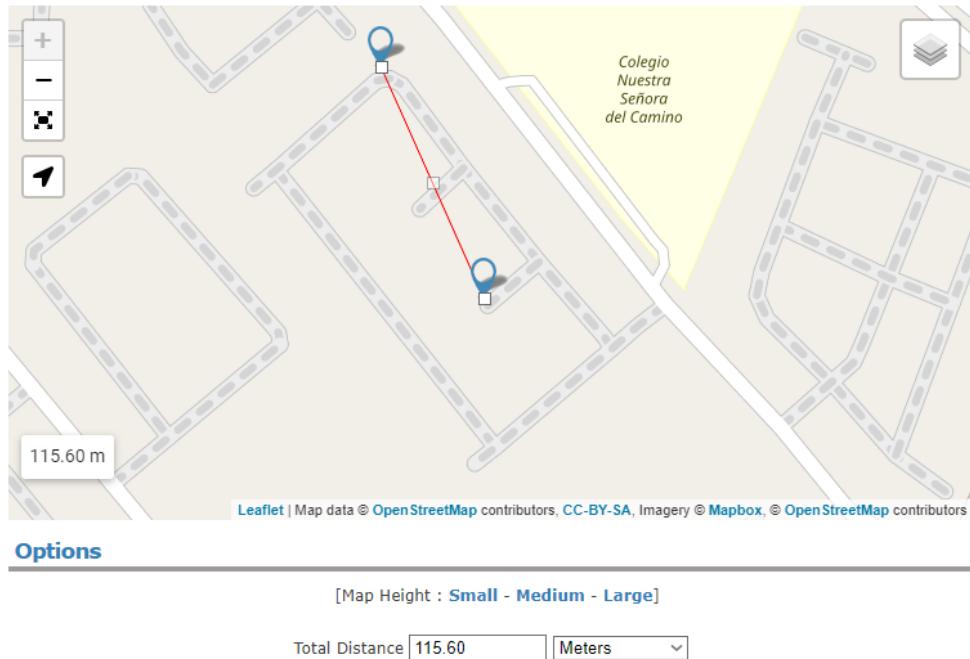


Figura 4.1: Vista en mapa de distancia máxima de pruebas usando módulo SX1278.

Las pruebas se realizaron haciendo uso del módulo Ra-02 de Ai-Thinker, el cual se conectó a un microcontrolador ESP32, ambos escogido en el capítulo 3. En el microcontrolador se implementaron rutinas de envío y recepción de datos mediante rutinas de interrupción (ISR, por sus siglas en inglés).

Los parámetros que se modificaron fueron el factor de propagación, el ancho de banda y el período de envío entre paquetes. Los resultados de las pruebas se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resultados de pruebas realizadas con módulo de comunicaciones Ra-02.

Configuración	F. de Propagación	Ancho de banda	Período	Tasa de paquetes perdidos
1	9	125 kHz	500 ms	105/500
2	7	250 kHz	150 ms	2/500
3	8	125 kHz	150 ms	300/500
4	8	250 kHz	500 ms	2/500
5	8	250 kHz	200 ms	Error de CRC
6	7	250 kHz	250 ms	2/500
7	7	250 kHz	200 ms	2/500
8	7	250 kHz	150 ms	1/500
9	7	250 kHz	100 ms	Error de CRC

Basados en estos resultados, se escogió la configuración 8 para las pruebas de comunicaciones, ya que es la que presenta la menor tasa de paquetes corruptos a la velocidad más alta de envío de paquetes. Esta configuración se utilizó para las pruebas de estimación de inclinación y para las pruebas de funcionamiento del prototipo.

4.2. Pruebas para estimación de inclinación

Para escoger el método de estimación de ángulos, se compararon los siguientes:

- Cálculo trigonométrico a partir de mediciones de acelerómetro.

- Filtro de Kalman.
- Filtro de Madgwick.

Para evaluar el desempeño de cada método, se observaron los resultados en un graficador de datos seriales disponible de forma libre, creado por Alexander Brehmer, llamado *TelePlot*, el cual puede observarse en la figura 4.2. Este funciona como una extensión de Visual Studio Code y permite graficar los datos provenientes del puerto serial a una velocidad de transmisión fija. Se realizaron pruebas con cada método y se compararon gráficamente los resultados obtenidos.

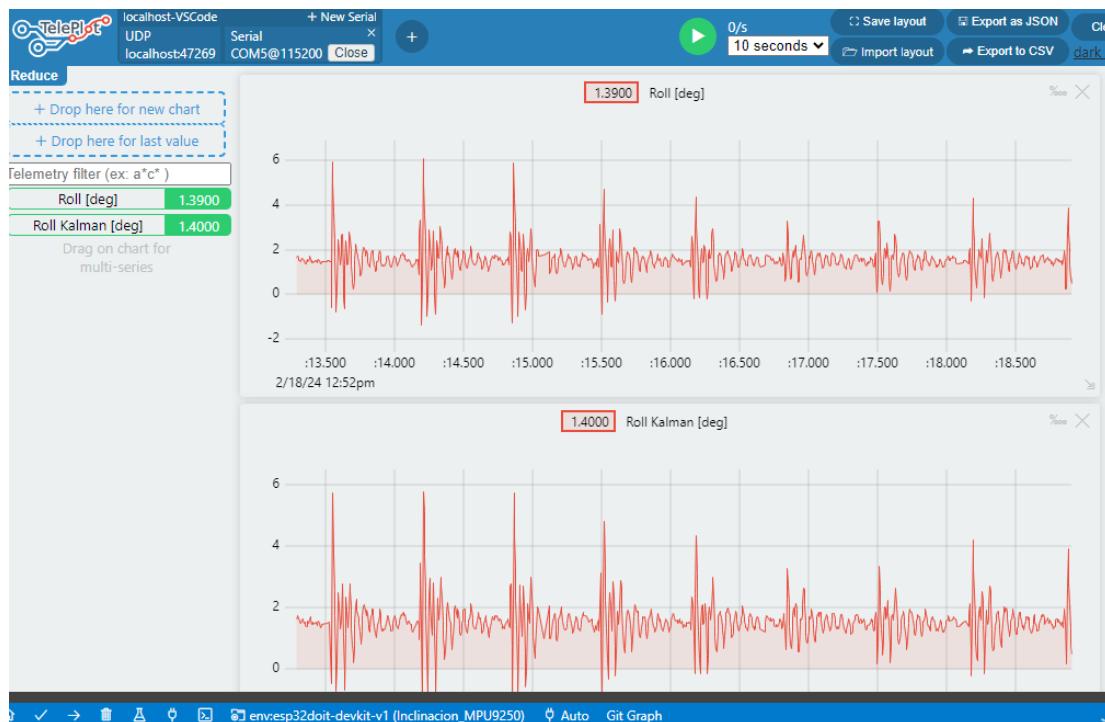


Figura 4.2: Entorno TelePlot.

Se realizaron pruebas ante vibración ambiental, vibraciones forzadas como golpes y finalmente movimientos sostenidos para poder observar el cambio en el ángulo, todas estas mientras se ejecutaban los 3 algoritmos al mismo tiempo.

Las distintas pruebas se realizaron haciendo uso del acelerómetro de 9 grados de libertad MPU9250 de Invensense escogido previamente en el capítulo 3.

Los resultados gráficos de las pruebas ante vibración ambiental se presentan en la figura 4.3.

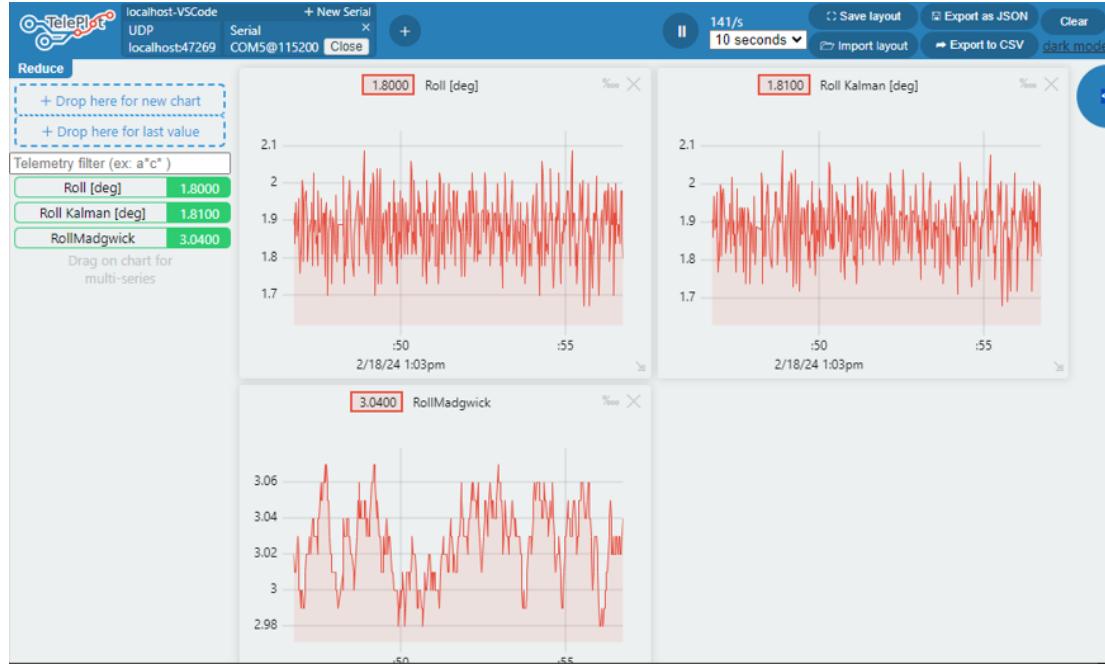


Figura 4.3: Comparación entre métodos de estimación de inclinación en vibración ambiental.

Al golpear y soplar cerca del sensor, se obtuvieron los resultados que pueden observarse en la figura 4.4:

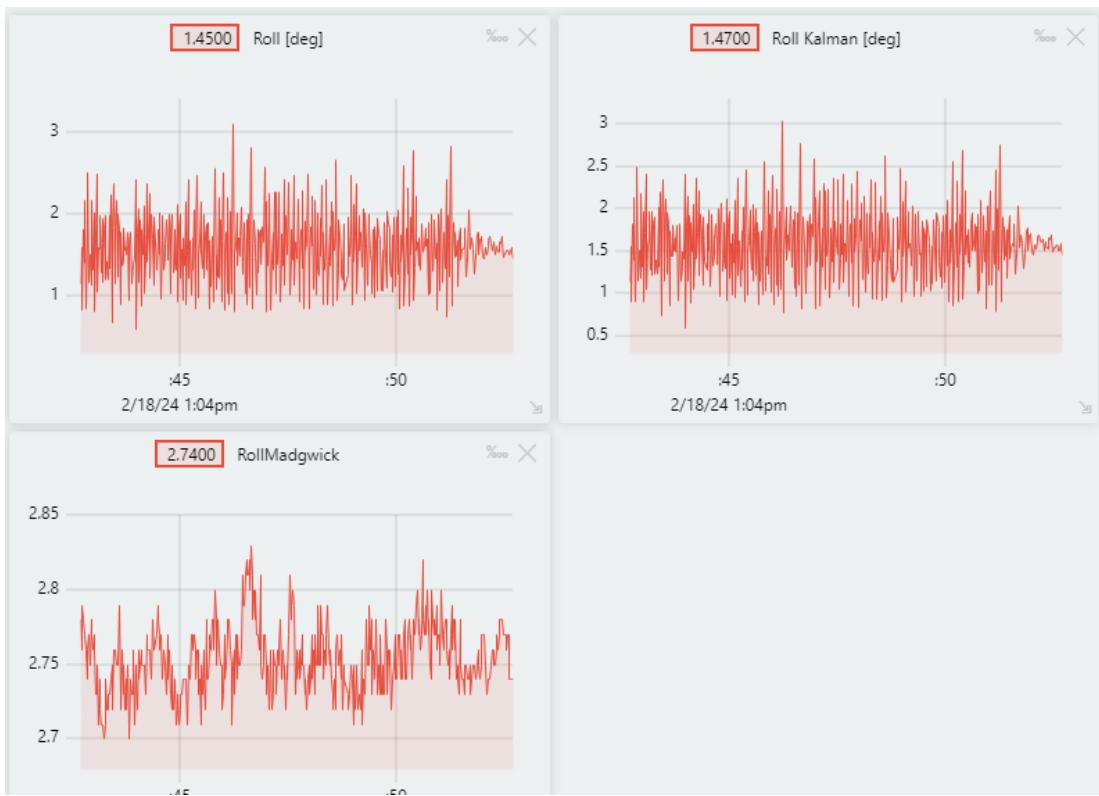


Figura 4.4: Comparación entre métodos de estimación de inclinación ante vibraciones.

Por último, se observó el desempeño de los algoritmos ante movimientos sostenidos que cambiaran el ángulo en el eje de interés. Los resultados obtenidos pueden observarse en la figura 4.5:



Figura 4.5: Comparación entre métodos de estimación de inclinación ante movimientos sostenidos.

Se observa claramente en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 que el filtro de Madgwick es el que presenta el mejor desempeño ante vibraciones, golpes y movimientos sostenidos, ya que suaviza las variaciones bruscas. De igual forma, ante vibración ambiental se observa que el filtro de Madgwick es el que presenta un comportamiento más estable y con menor ruido, viéndose incluso la resolución en términos de LSB (*Least Significant Bit*) del acelerómetro.

Con base en estos resultados, se escogió el filtro de Madgwick para la estimación de inclinación en el sensor inteligente.

4.3. Pruebas de funcionamiento del prototipo

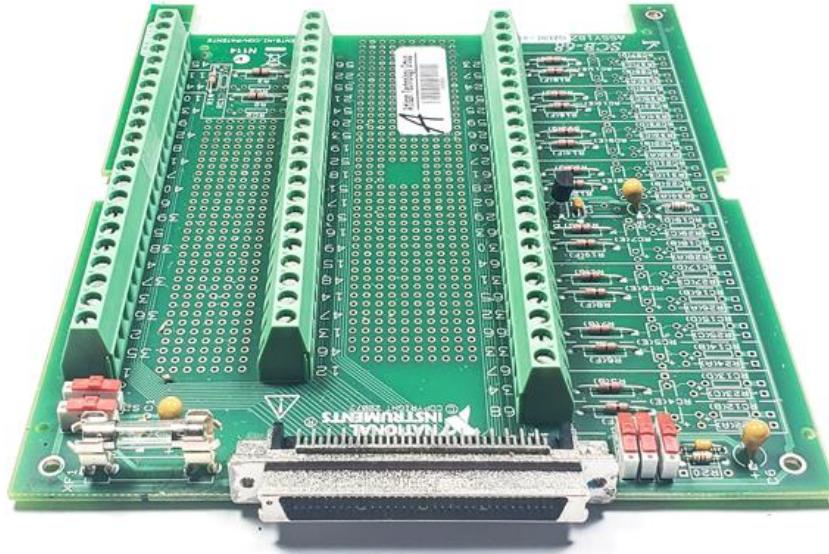
Para probar el funcionamiento del prototipo y comparar los resultados obtenidos con un equipo comercial, se llevó a cabo un estudio de vibración sobre una estructura de acero ubicada en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela.

La estructura es de tipo aporticada, con una altura de 2,20 metros y una longitud de 2 metros. Cuenta con 4 columnas de acero y distintas vigas con perfil C.^o de canal. El techo de la estructura se encuentra en voladizo, es decir, no está soportado por ninguna columna en uno de sus extremos. La estructura se encuentra en el edificio norte del IMME y se suele utilizar para hacer ensayos de permeabilidad del concreto. Se escogió esta estructura debido a la facilidad para la instrumentación de la misma para realizar las pruebas, siendo esta de poca altura y estando ubicada en un espacio abierto y de fácil acceso por el personal del IMME.

El equipo de medición utilizado para ser usado como referencia está basado en la tarjeta de adquisición de datos de *National Instruments* PCI-6221, cuyas características se describen en la tabla 4.2, y que puede observarse en la figura 4.6. Para la conexión de los sensores se utilizó la tarjeta de conexiones SCB-68 de *National Instruments*, que se observa en la figura 4.7.



Figura 4.6: Tarjeta de adquisición de datos PCI-6221 de National Instruments.



© Artisan Technology Group

Figura 4.7: Tarjeta de conexiones SCB-68 de National Instruments (Artisan Technology).

Tabla 4.2: Especificaciones de la tarjeta de adquisición PCI-6221 de National Instruments

Parámetro	Valor
Número de canales	8 diferenciales o 16 de un solo canal
Resolución del ADC	16 bits
Tasa de muestreo	250 kS/s
Rango de entrada	$\pm 0,2V, \pm 1V, \pm 5V, \pm 10V$
CMRR (Rechazo del modo común)	92dB
Tamaño del FIFO de entrada	4095 muestras
Exactitud estándar (100 muestras, $\Delta T = 10C^\circ$)	$3100\mu V$

Los sensores utilizados para el ensayo fueron acelerómetros de balance de fuerza de 1 eje modelo *FBA-11* de la marca *Kinemetrics*. Las características de

estos sensores se describen en la tabla 4.3 y puede observarse en la figura 4.8. El funcionamiento de este tipo de acelerómetros se describe en detalle en la sección 2.6.3.



Figura 4.8: Acelerómetro FBA-11 de Kinemetrics.

Tabla 4.3: Especificaciones del acelerómetro FBA-11 de Kinemetrics

Parámetro	Valor
Rango de escala completa	$\pm 1,0g$ (.1, .25, .5 y 2 g opcionales)
Frecuencia Natural	50 Hz
Amortiguamiento	70 %
Salida	$\pm 2,5V/0,5g$
Linealidad	Menos de 1 %
Ruido (entre 0 - 50 Hz)	$\pm 2,5\mu V$
Rango dinámico	130dB de 0.01 a 50 Hz
Alimentación	$\pm 12Vdc$ (2.5 mA por eje)

Este equipo es el que se utiliza comúnmente en el IMME para realizar ensayos de vibración en estructuras.

El programa para la adquisición de los datos fue diseñado en LabVIEW 8.20 (Versión 2006), el cual es un software de programación gráfica desarrollado por National Instruments. Este programa se encarga de adquirir los datos de los sensores, procesarlos y graficarlos en tiempo real.

Por su parte, el sensor inteligente contaba con las características que pueden observarse en la tabla 4.4:

Tabla 4.4: Características de instrumentación del sensor inteligente.

Parámetro	Valor
Frecuencia de muestreo (aceleración)	200 Hz
Frecuencia de muestreo (temperatura, humedad e inclinación)	5 Hz
Rango de aceleración (MPU6050)	$\pm 2g$
Rango de aceleración (MPU9250)	$\pm 2g$
Rango de giróscopo (MPU9250)	$\pm 250^\circ/s$
Rango de magnetómetro (MPU9250)	$\pm 4800\mu T$

Para fijar los sensores a la estructura se utilizó yeso, como es común en los ensayos de vibración para acoplar los sensores a la estructura.

Los ensayos se dividieron en 3 partes:

- Vibración ambiental.
- Vibración forzada por impacto.
- Vibración libre por condición inicial.

La configuración utilizada se puede observar en las figuras 4.9 y 4.10.

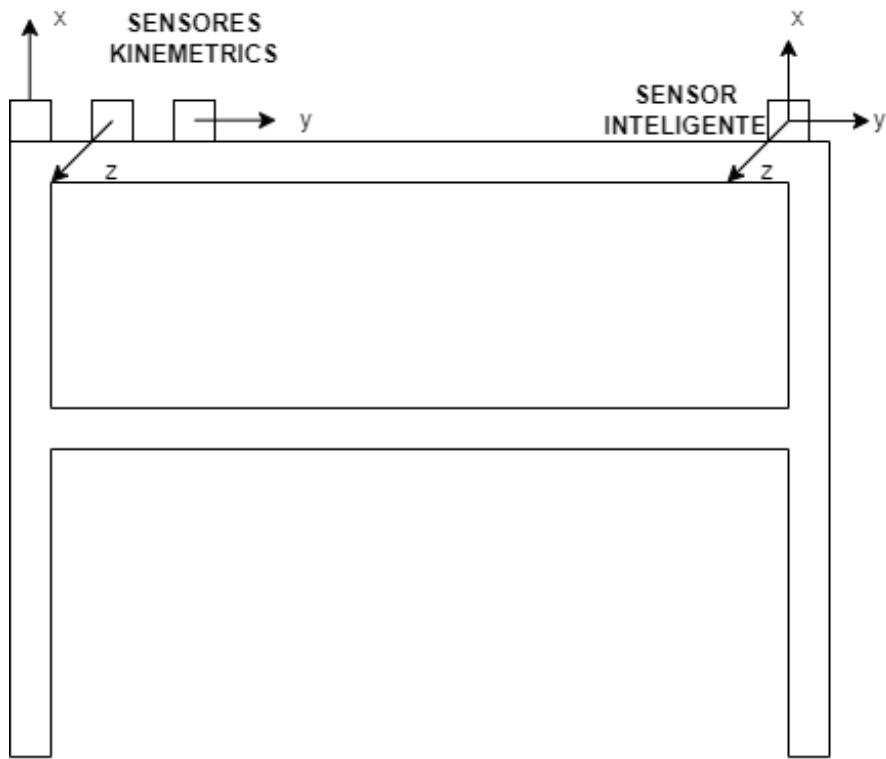


Figura 4.9: Vista frontal de la configuración utilizada en ensayo.



Figura 4.10: Vista de planta de la configuración utilizada en ensayo.

Para comparar los resultados obtenidos con el prototipo y con el equipo comercial, se realizaron las pruebas en paralelo, es decir, se colocaron los sensores del prototipo y del equipo comercial en la estructura y se ejecutaron las pruebas al mismo tiempo. La instrumentación puede verse en las figuras 4.11a y 4.11b.

Los resultados obtenidos se compararon en términos de la respuesta en frecuencia y la respuesta en el tiempo.



(a) Vista de la estructura instrumentada con los acelerómetros FBA-11 de Kinematics



(b) Vista de la estructura instrumentada incluyendo el prototipo de pruebas

Figura 4.11: Instrumentación de la estructura

Durante el ensayo, el sensor inteligente estaba siendo controlado y monitoreado desde la estación base ubicada a pocos metros de la estructura. En esta estación base se encontraba el computador que, a través de una interfaz gráfica, permitía

visualizar los datos obtenidos y guardarlos en un archivo de texto para su posterior análisis. El diseño de la interfaz gráfica de usuario puede observarse en las figuras 4.12 y 4.13. La programación y características principales de esta interfaz fueron descritas en la sección 3.3.4.

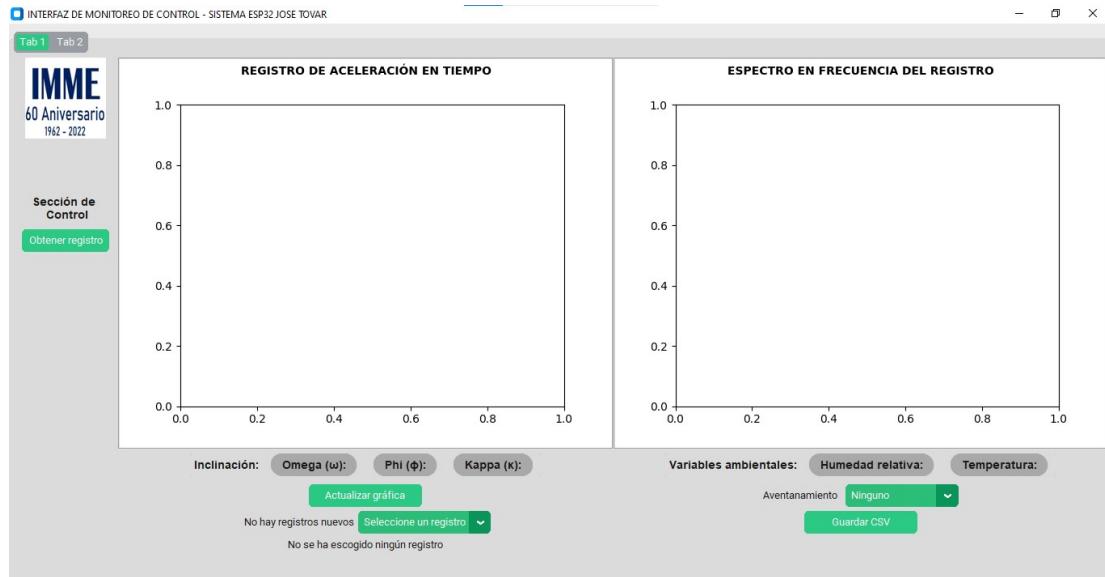


Figura 4.12: Ventana 1 de la interfaz gráfica diseñada.

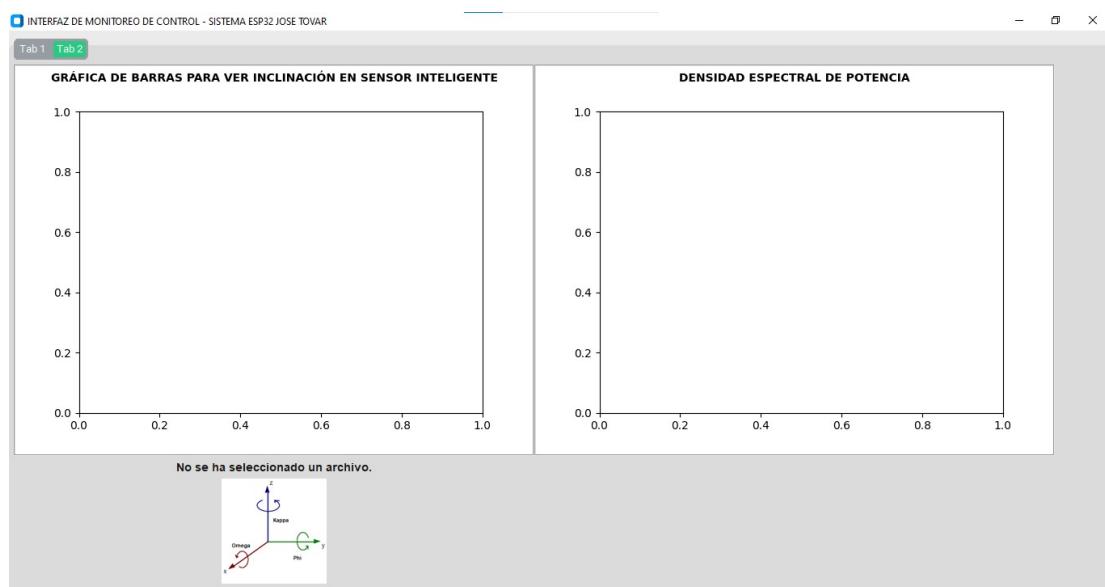
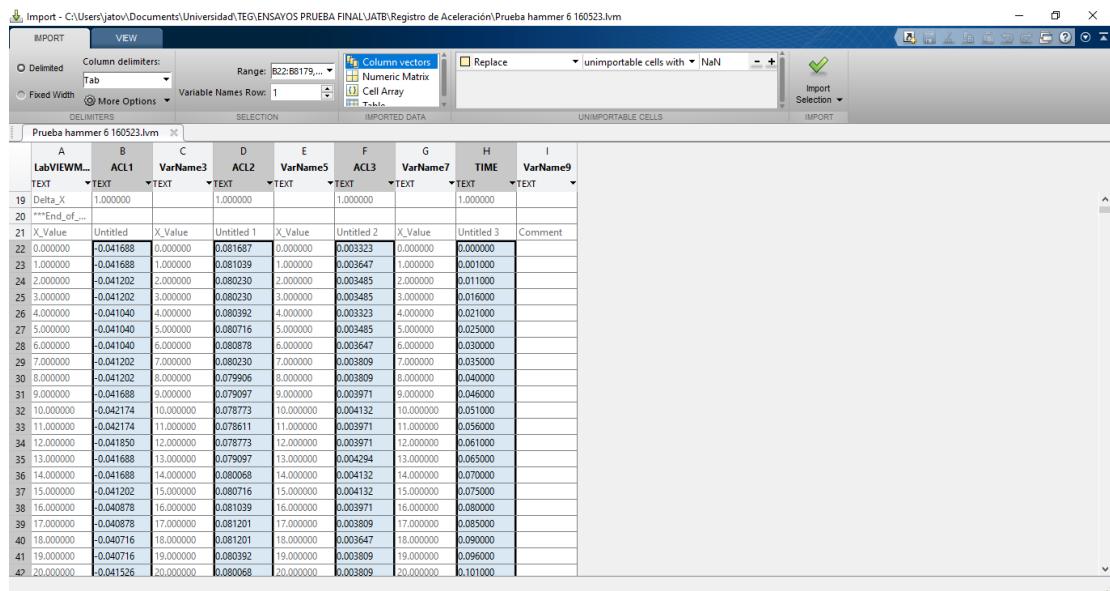


Figura 4.13: Ventana 2 de la interfaz gráfica diseñada.

Para el procesamiento de los datos obtenidos haciendo uso de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6221 se implementó un código en MATLAB, donde, de forma similar a la interfaz de la figura 4.12, se graficaron los datos obtenidos y el espectro en frecuencia correspondiente.

Los datos se importaron directamente del archivo *.lvm* generado en el entorno LabView y fueron pre-procesados con la interfaz de MATLAB para importar datos de archivos externos, como se puede observar en la figura 4.14.



The screenshot shows the MATLAB Import tool window titled 'Import - C:\Users\jatov\Documents\Universidad\TEG\ENSAYOS PRUEBA FINAL\JATB\Registro de Aceleración\Prueba hammer 6 160523.lvm'. The 'IMPORT' tab is selected. In the 'DELIMITERS' section, 'Column delimiters' is set to 'Tab' and 'Variable Names Row' is set to '1'. The 'IMPORTED DATA' pane displays a table with columns labeled A through I. The first few rows of data are as follows:

	A LabVIEW... TEXT	B ACL1 TEXT	C VarName3 TEXT	D ACL2 TEXT	E VarName5 TEXT	F ACL3 TEXT	G VarName7 TEXT	H TIME TEXT	I VarName9 TEXT
19	Delta_X	1.000000		1.000000		1.000000		1.000000	
20	***End of ...								
21	X_Value	Untitled	X_Value	Untitled 1	X_Value	Untitled 2	X_Value	Untitled 3	Comment
22	0.000000	-0.041688	0.000000	0.001687	0.000000	0.003323	0.000000	0.000000	
23	1.000000	-0.041688	1.000000	0.081039	1.000000	0.003647	1.000000	0.001000	
24	2.000000	-0.041202	2.000000	0.080230	2.000000	0.003485	2.000000	0.011000	
25	3.000000	-0.041202	3.000000	0.080230	3.000000	0.003485	3.000000	0.016000	
26	4.000000	-0.041040	4.000000	0.080392	4.000000	0.003323	4.000000	0.021000	
27	5.000000	-0.041040	5.000000	0.080716	5.000000	0.003485	5.000000	0.025000	
28	6.000000	-0.041040	6.000000	0.080878	6.000000	0.003647	6.000000	0.030000	
29	7.000000	-0.041202	7.000000	0.080230	7.000000	0.003809	7.000000	0.035000	
30	8.000000	-0.041202	8.000000	0.079905	8.000000	0.003809	8.000000	0.040000	
31	9.000000	-0.041688	9.000000	0.079097	9.000000	0.003971	9.000000	0.046000	
32	10.000000	-0.042174	10.000000	0.078773	10.000000	0.004132	10.000000	0.051000	
33	11.000000	-0.042174	11.000000	0.078611	11.000000	0.003971	11.000000	0.056000	
34	12.000000	-0.041850	12.000000	0.078773	12.000000	0.003971	12.000000	0.061000	
35	13.000000	-0.041688	13.000000	0.079097	13.000000	0.004284	13.000000	0.065000	
36	14.000000	-0.041688	14.000000	0.080068	14.000000	0.004132	14.000000	0.070000	
37	15.000000	-0.041202	15.000000	0.080716	15.000000	0.004132	15.000000	0.075000	
38	16.000000	-0.040878	16.000000	0.081039	16.000000	0.003971	16.000000	0.080000	
39	17.000000	-0.040878	17.000000	0.081201	17.000000	0.003809	17.000000	0.085000	
40	18.000000	-0.040716	18.000000	0.081201	18.000000	0.003647	18.000000	0.090000	
41	19.000000	-0.040716	19.000000	0.080392	19.000000	0.003809	19.000000	0.096000	
42	20.000000	-0.041526	20.000000	0.080068	20.000000	0.003809	20.000000	0.101000	

Figura 4.14: Ventana de la interfaz gráfica de MATLAB para importar los datos obtenidos mediante LabVIEW.

Una vez se procesaron los registros obtenidos por cada equipo de medición, se compararon las gráficas obtenidas en tiempo y en el dominio de la frecuencia, observando principalmente los picos en frecuencia obtenidos mediante el método de *peak picking*.

Las características de instrumentación para ambos sistemas fueron las mostradas en la tabla 4.5:

Tabla 4.5: Comparación entre características de los sistemas de medición utilizados.

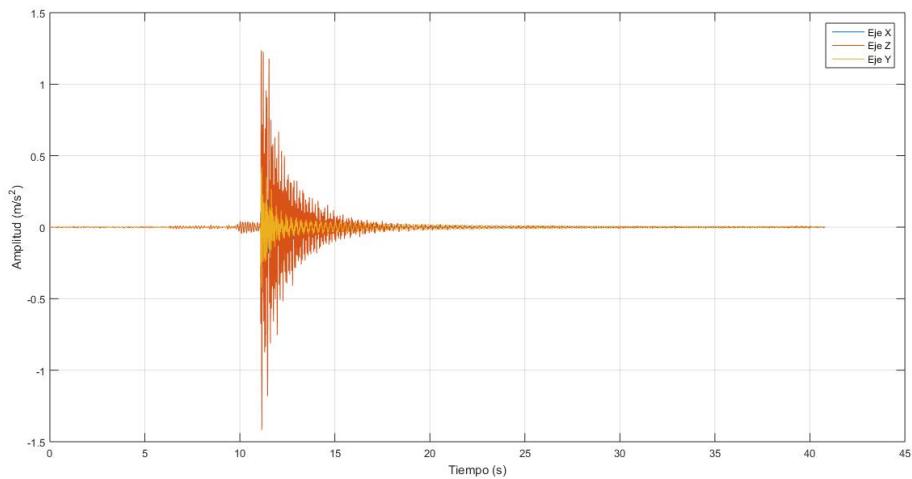
Parámetro	Sistema basado en PCI6221	Sensor inteligente
Frecuencia de muestreo	200 Hz	200 Hz
Número de muestras máx.	12000	1024
Alimentación	120 Vac	5 Vdc
Peso aproximado	25-30 kg	800 g
Dimensiones aproximadas	1,5 m (solo estación base)	25 cm
Cableado	Sí	No
Alerta ante eventos	No	Sí

A continuación se presentan y comparan los resultados obtenidos en cada ensayo:

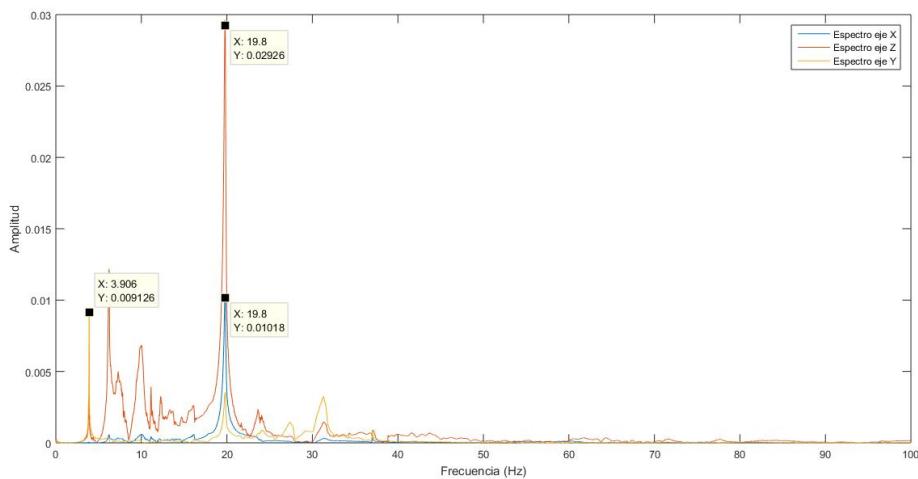
4.3.1. Vibración forzada por impacto

Este ensayo consistió en excitar la estructura haciendo uso de un martillo de goma, haciendo que la misma comience a vibrar. Para este ensayo se contó con la ayuda de personal del IMME para coordinar la toma de datos con el impacto sobre el sistema. Además de buscar la semejanza entre ambos resultados, se buscaba comprobar el efecto que produce un cambio en la masa sobre la frecuencia natural del sistema. Para esto, se añadieron 5 lastres de 17 kg al sistema luego del primer ensayo de vibración por impacto.

En primer lugar, se observa en las figuras 4.15 la respuesta en tiempo y en frecuencia usando el sistema basado en la tarjeta PCI-6221:



(a) Aceleración en el tiempo del sistema ante vibración por impacto en dirección Este-Oeste



(b) Espectro en frecuencia del sistema ante vibración por impacto en dirección Este-Oeste

Figura 4.15: Respuesta del sistema ante vibración por impacto según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments

El registro obtenido para este mismo impacto haciendo uso del sensor inteligente se puede observar en la figura 4.16. En la figura 4.17 se incluye la ventana auxiliar de la interfaz gráfica que permite al operador verificar la inclinación del sensor y si este se encuentra a nivel, así como identificar el ángulo en desnivel para su corrección. También se incluye la gráfica de la densidad espectral de potencia,

que en ocasiones permite caracterizar de forma más rápida las frecuencias de vibración, sobre todo en espectros que contienen múltiples frecuencias. La densidad espectral de potencia también es útil para aplicar el método del ancho de banda local, utilizado para estimar el amortiguamiento del sistema.

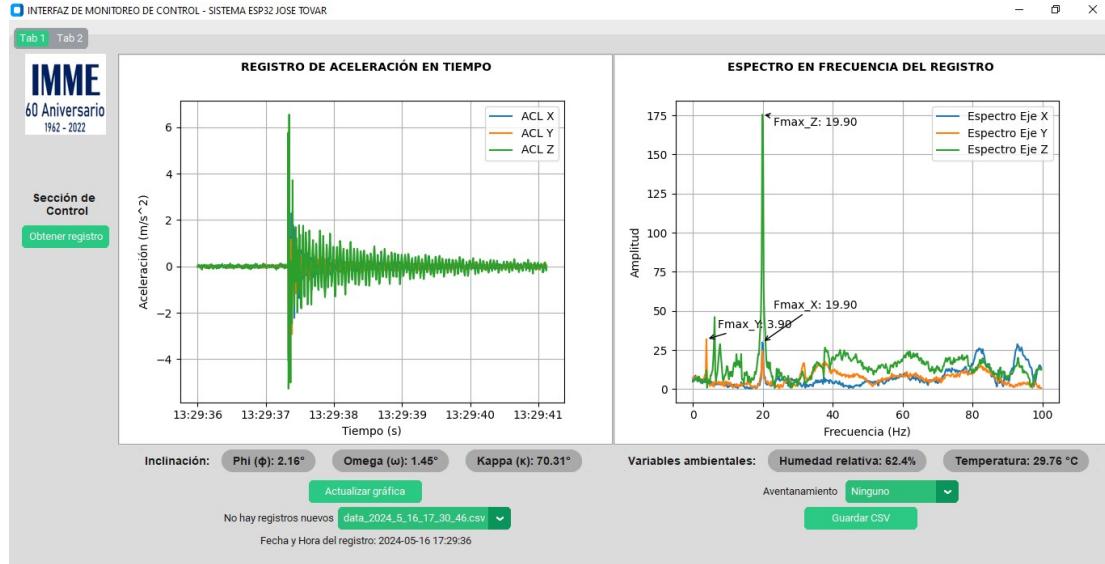


Figura 4.16: Registro de vibración por impacto en la dirección Este-Oeste obtenido mediante el sensor inteligente.

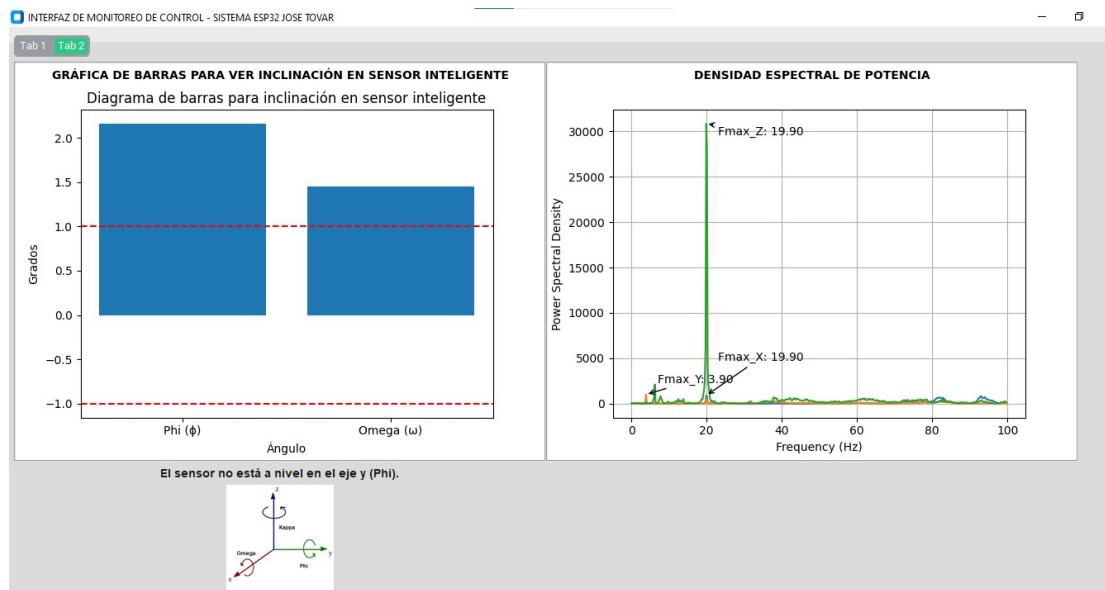
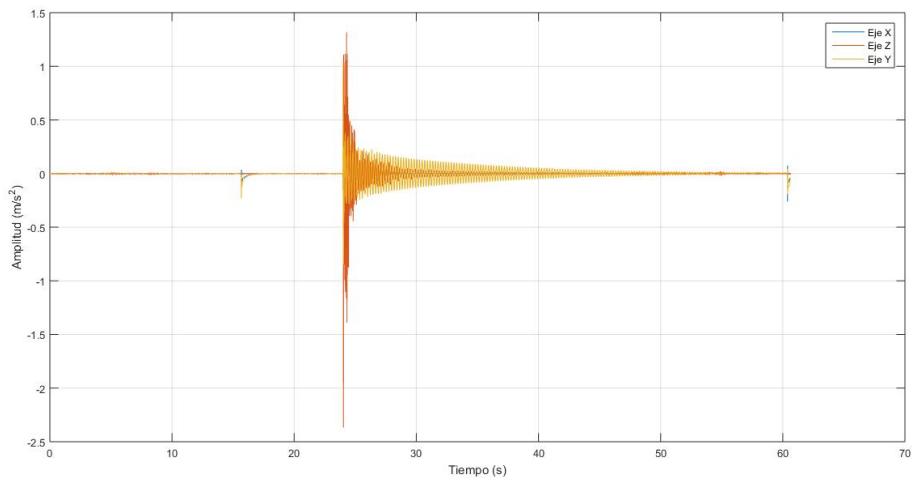


Figura 4.17: Ventana auxiliar de la GUI para observar la inclinación y la densidad espectral de potencia.

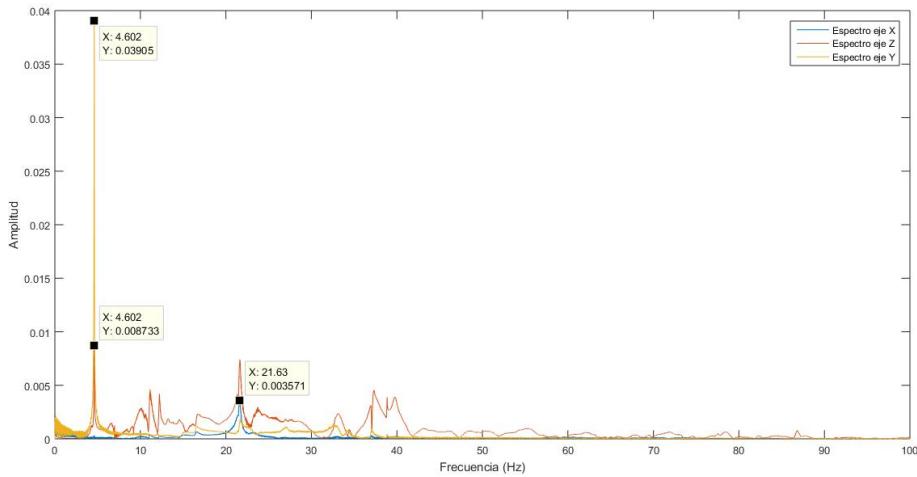
Al observar las figuras 4.16 y 4.15a, se observan gráficas de aceleración en tiempo muy similares. Sin embargo, los valores de aceleración medidos por el sensor inteligente en el momento del impacto son mayores a los medidos por la tarjeta PCI-6221, lo cual puede deberse a la sensibilidad de los sensores utilizados en el sensor inteligente.

Al comparar los espectros en frecuencia obtenidos en las figuras 4.15b y 4.16 se observa que las frecuencias de vibración obtenidas se corresponden entre ambos sistemas de medición, siendo el error entre ambos picos en frecuencia de 0.1 Hz para el pico de mayor amplitud en el eje “Z”, correspondiendo este eje a la dirección Este-Oeste del sistema, también llamada “dirección corta” por las características geométricas de esta estructura en particular.

Por otro lado, se impactó el sistema sin los lastres en la dirección Norte-Sur, obteniéndose la respuesta observada en la figura 4.18 según el sistema basado en la tarjeta PCI-6221:



(a) Aceleración en el tiempo del sistema ante vibración por impacto en dirección Norte-Sur



(b) Espectro en frecuencia del sistema ante vibración por impacto en dirección Norte-Sur

Figura 4.18: Respuesta del sistema ante vibración por impacto según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments

Por su parte, el sensor inteligente obtuvo la respuesta del sistema observada en la figura y 4.19:

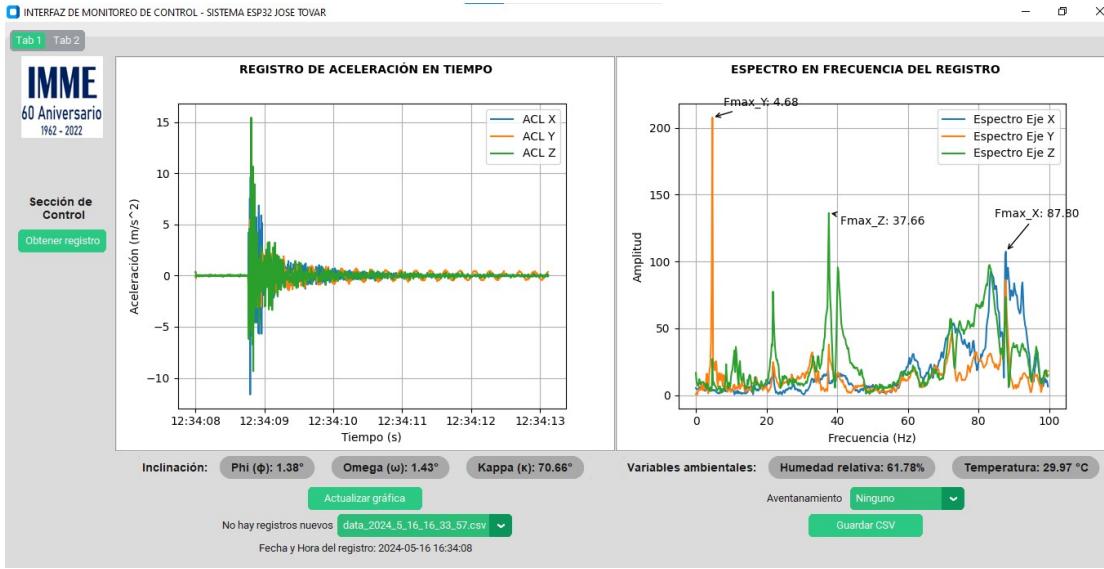


Figura 4.19: Registro de vibración por impacto en la dirección Norte-Sur obtenido mediante el sensor inteligente.

En primer lugar, se observa la gran similitud entre ambas respuestas, siendo la frecuencia de vibración en la dirección larga de 4.6 Hz en ambos sistemas, con un error de 0.08 Hz en este caso. Además, se comprueba que el peso influye en la respuesta en frecuencia, al observarse que la frecuencia de vibración en la dirección larga (que en este caso corresponde al eje y por la configuración de los acelerómetros), disminuye al agregarse los lastres, siendo de 4.6 Hz inicialmente, y cambiando a 3.9 Hz luego de agregar los lastres.

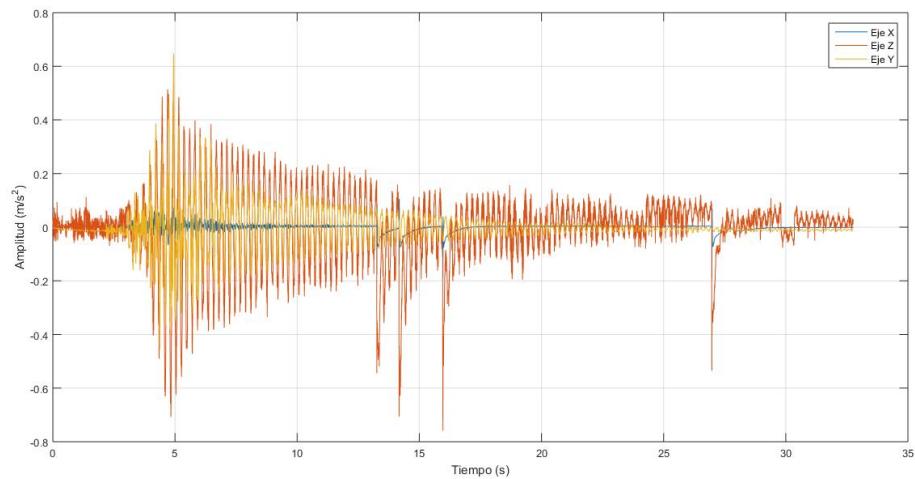
4.3.2. Vibración libre por condición inicial

El ensayo de vibración libre consiste en aplicar una condición inicial a la estructura para posteriormente eliminar esta condición, que puede ser un peso o fuerza aplicada, y permitir que la estructura vibre libremente hasta alcanzar su condición de reposo o de vibración ambiental.

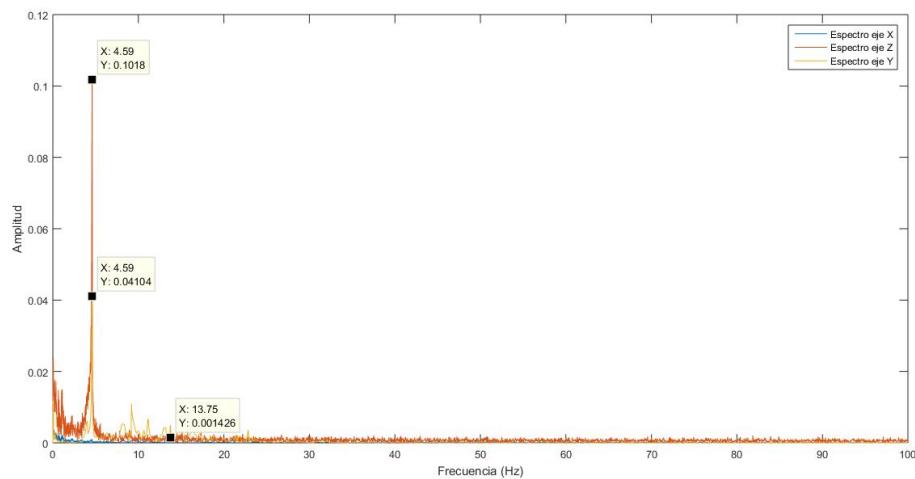
En este caso, se realizaron pruebas aplicando una condición inicial en el sentido

norte-sur a la estructura y luego se dejó vibrar libremente al retirar la condición inicial. Análogo al ensayo anterior, se hizo el estudio con y sin lastres para evaluar el efecto del cambio en la respuesta dinámica del sistema al variar la masa del sistema.

En las figuras 4.20a y 4.20a se observa la respuesta del sistema en vibración libre antes de la colocación de los 5 lastres de 17 kg:



(a) Aceleración en el tiempo del sistema ante vibración libre sin lastres



(b) Espectro en frecuencia del sistema ante vibración libre sin lastres

Figura 4.20: Respuesta del sistema ante vibración libre sin lastres según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments

Por su parte, la respuesta obtenida por el sensor inteligente durante este ensayo se observa en la figura

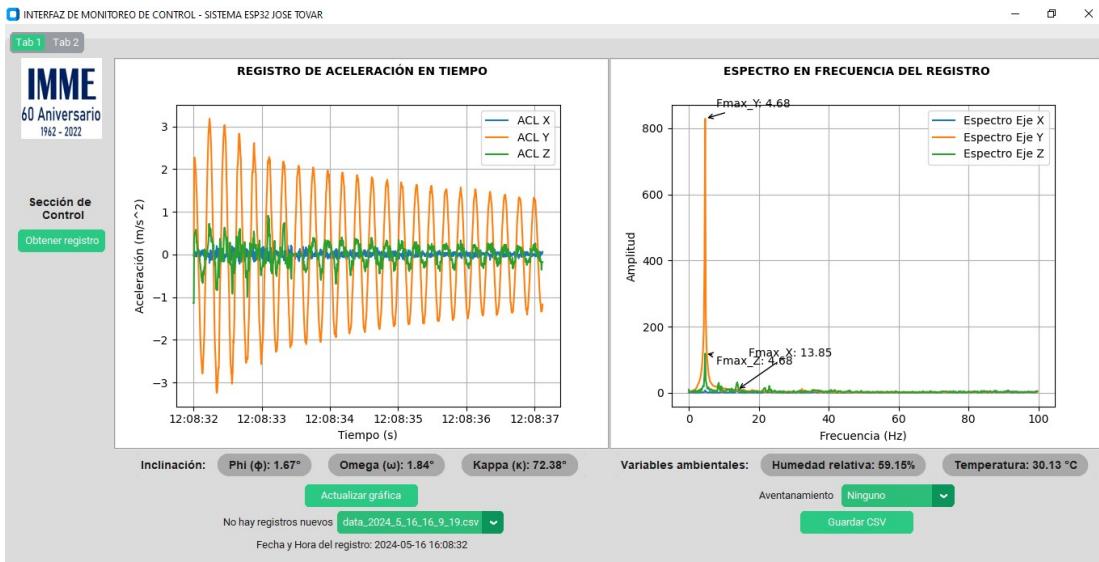
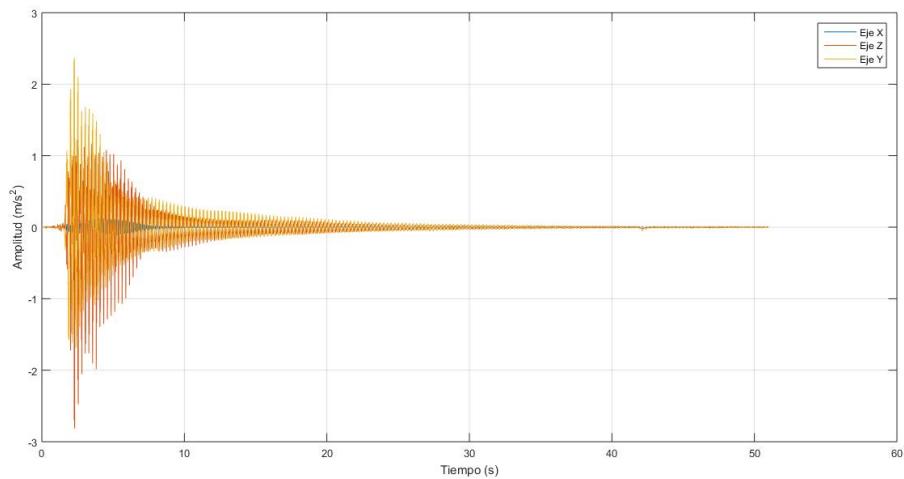


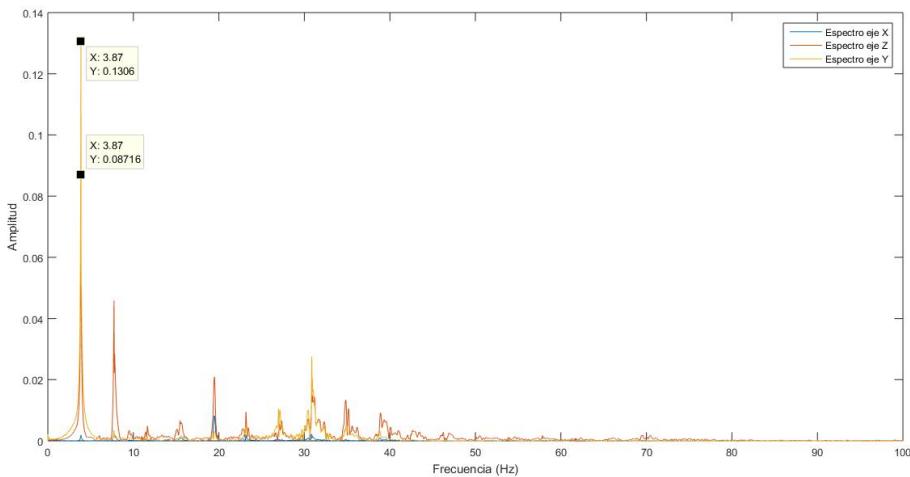
Figura 4.21: Registro de vibración libre sin lastres obtenido mediante el sensor inteligente.

Al comparar los resultados obtenidos en el espectro en frecuencia usando ambos sistemas, como se observa en las figuras 4.21 y 4.20, se puede notar la similitud entre el espectro en frecuencia del sistema basado en el sensor inteligente diseñado y el sistema comercial disponible en el IMME. En este caso, la diferencia entre la frecuencia natural del sistema en la dirección Norte-Sur obtenida por el sensor inteligente en comparación a la obtenida por la tarjeta PCI-6221 es de 0.09 Hz, observándose además que el sensor inteligente mostró un comportamiento estable mientras que el sistema basado en la tarjeta de adquisición presenta problemas de deriva y picos indeseados que agregan componentes frecuenciales ajenas al sistema estructural, demostrándose así la confiabilidad del sensor inteligente en campo.

De igual forma, se ejecutó la misma prueba luego de añadir los lastres, obteniéndose los resultados mostrados en la figura 4.22:



(a) Aceleración en el tiempo del sistema ante vibración libre con lastres



(b) Espectro en frecuencia del sistema ante vibración libre con lastres

Figura 4.22: Respuesta del sistema ante vibración libre con lastres según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments

Mientras que en la figura 4.23 se pueden observar los resultados arrojados por el sensor inteligente:

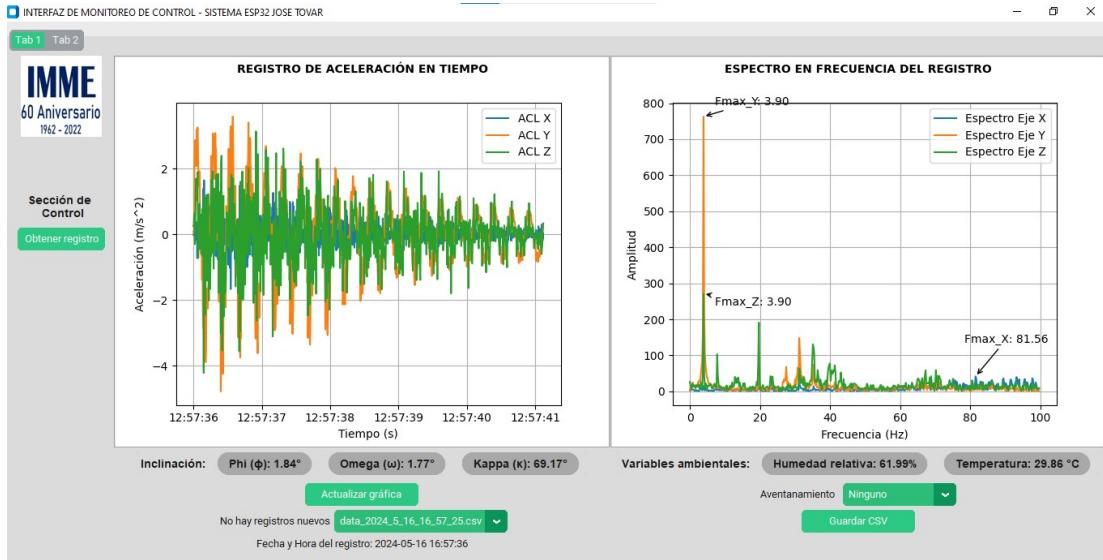


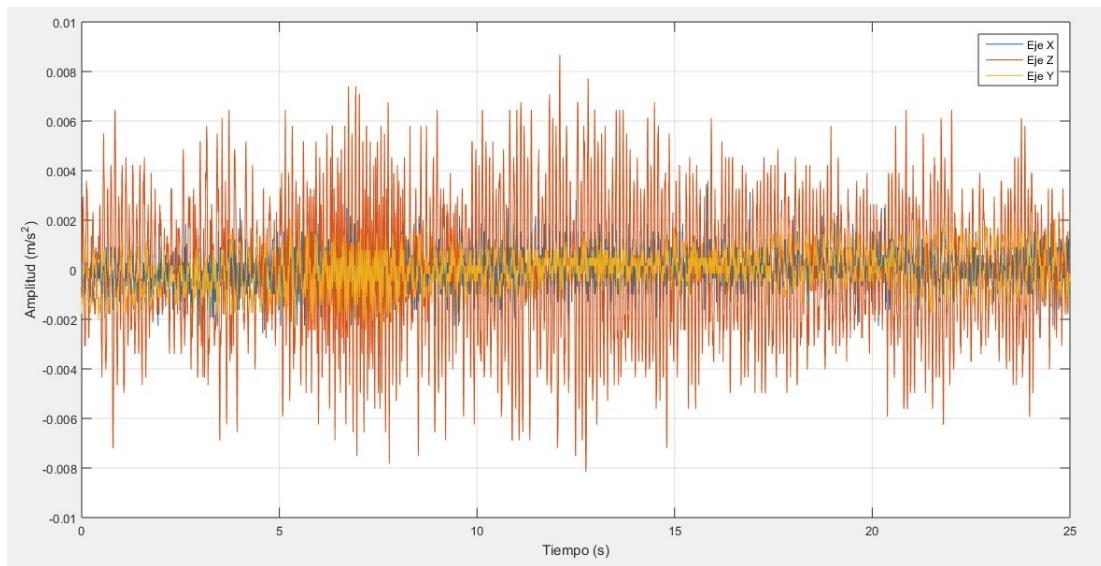
Figura 4.23: Registro de vibración libre con lastres obtenido mediante el sensor inteligente.

Al observar los resultados obtenidos en las figuras 4.23 y 4.22, se pueden apreciar las similitudes entre los espectros en frecuencia de ambos sistemas, donde resaltan claramente la frecuencia de vibración que corresponde a la frecuencia en la dirección larga del sistema. En el caso del sensor inteligente, se obtuvo un valor de 3.90 Hz, mientras que en el sistema basado en la tarjeta PCI-6221 el valor es de 3.87 Hz, siendo el error entre ambos sistemas de apenas 0.03 Hz. Además de confirmarse que los datos obtenidos por el sensor inteligente son confiables y permiten caracterizar el comportamiento dinámico del sistema, se observa como el valor de esta frecuencia disminuyó respecto al valor de 4.6 Hz observado en las figuras 4.20 y 4.21, demostrándose la capacidad del sistema de medir cambios en la respuesta natural del sistema producto de cambios en la masa del mismo.

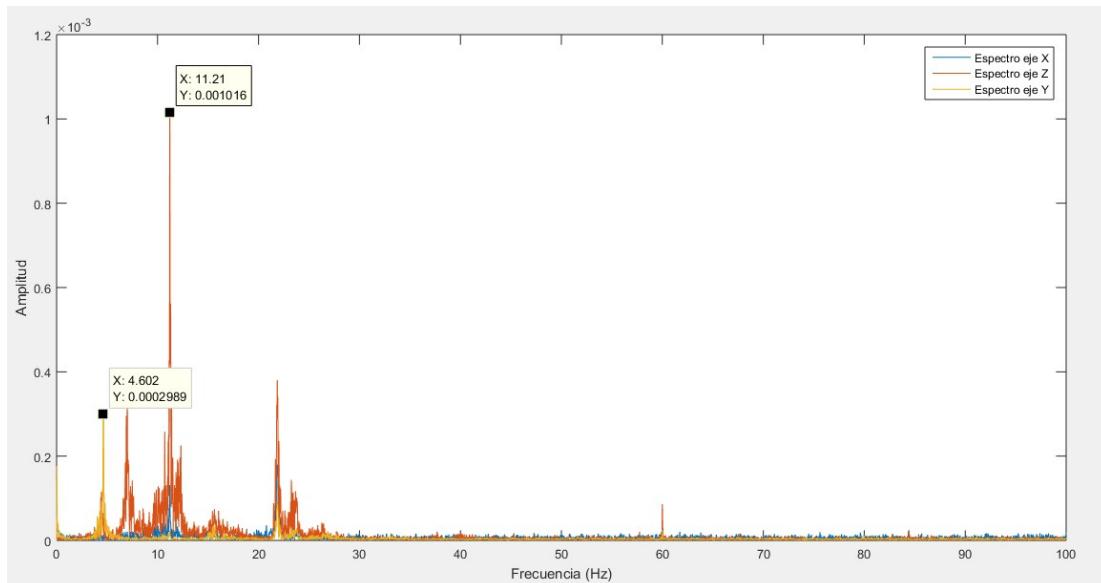
4.3.3. Vibración ambiental

Este ensayo consistió en tomar registros de datos sin perturbar la estructura. Es decir, siendo esta excitada únicamente por factores naturales como el viento o el paso de personas.

En primer lugar, se puede observar en las figuras 4.24a y 4.24b la respuesta en tiempo y el espectro en frecuencia del sistema ante vibración ambiental. En la figura 4.24a se observa la respuesta en tiempo del sistema ante vibración ambiental, es importante notar el nivel de los valores de aceleración medidos por los acelerómetros FBA11, encontrándose estos alrededor de $\pm 0,006 \frac{m}{s^2}$, esto es equivalente a aproximadamente $\pm 0,0006g$.



(a) Aceleración en el tiempo del sistema ante vibración ambiental



(b) Espectro en frecuencia del sistema ante vibración ambiental

Figura 4.24: Respuesta del sistema ante vibración ambiental según la tarjeta PCI-6221 de National Instruments

En la figura 4.25 se observa la interfaz gráfica diseñada para el sensor inteligente al leer uno de los registros de vibración ambiental obtenido durante el ensayo:

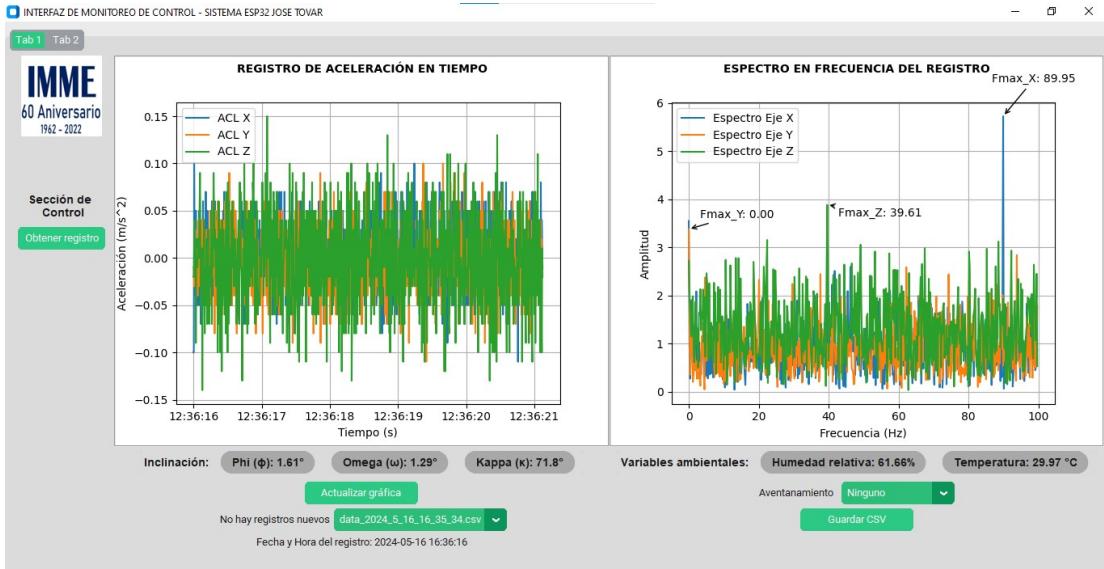


Figura 4.25: Ventana de la interfaz gráfica diseñada con el registro de vibración ambiental obtenido.

Si bien los resultados obtenidos por vibración ambiental pueden verse por registro directamente en la interfaz, como se observa en la figura 4.25, es conveniente concatenar varios archivos debido a la longitud de cada registro. Mientras mayor es el tamaño del registro, mayor resolución tendrá el espectro al tener más datos. Es decir, el Δf mejora al aumentar la longitud de los registros.

Al concatenar registros es necesario aventanar cada registro, usando alguna función de aventanamiento como las definidas en la sección 2.11.4, para evitar que se introduzcan al espectro cambios bruscos producto de la concatenación de archivos. En la figura 4.26 se observa el resultado de concatenar 5 registros de vibración ambiental que fueron tomados de forma sucesiva mientras se tomó el registro con la tarjeta PCI-6221 registrado en la figura 4.24a. Para esto, se implementó un código en Python capaz de concatenar 5 archivos, generando un registro continuo utilizando la ventana de Hanning. El resultado de concatenar 5 archivos, de 1024 datos cada uno, se puede ver en la figura 4.26.

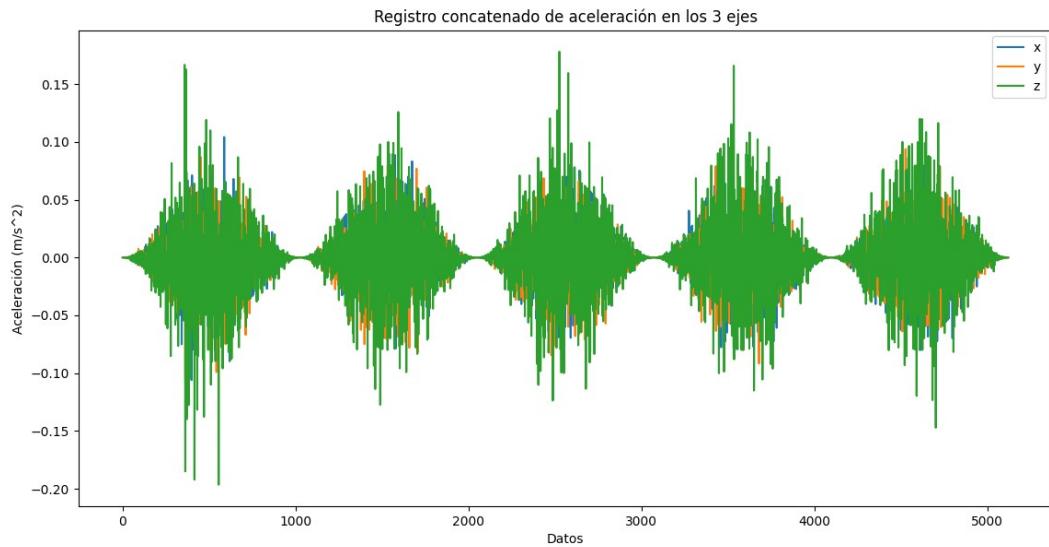


Figura 4.26: Forma del registro concatenado tras aventanamiento de Hanning utilizando Python.

De esta figura 4.26 se debe recalcar el nivel de vibración medido por el sensor en vibración ambiental, estando este entre $\pm 0,15 \frac{m}{s^2}$, esto es equivalente a aproximadamente $\pm 0,01g$. De aquí se observa que el nivel de ruido del MPU6250 es considerablemente mayor al nivel de ruido de los acelerómetros FBA11, siendo esta característica clave a la hora de escoger un sensor para este tipo de aplicaciones. En este caso, el uso de los sensores FBA11 se usó como referencia para determinar la calidad de los registros obtenidos por el sensor inteligente como sistema.

Una vez concatenados, se procedió a ejecutar la FFT sobre los datos, obteniéndose el espectro de la figura 4.27:

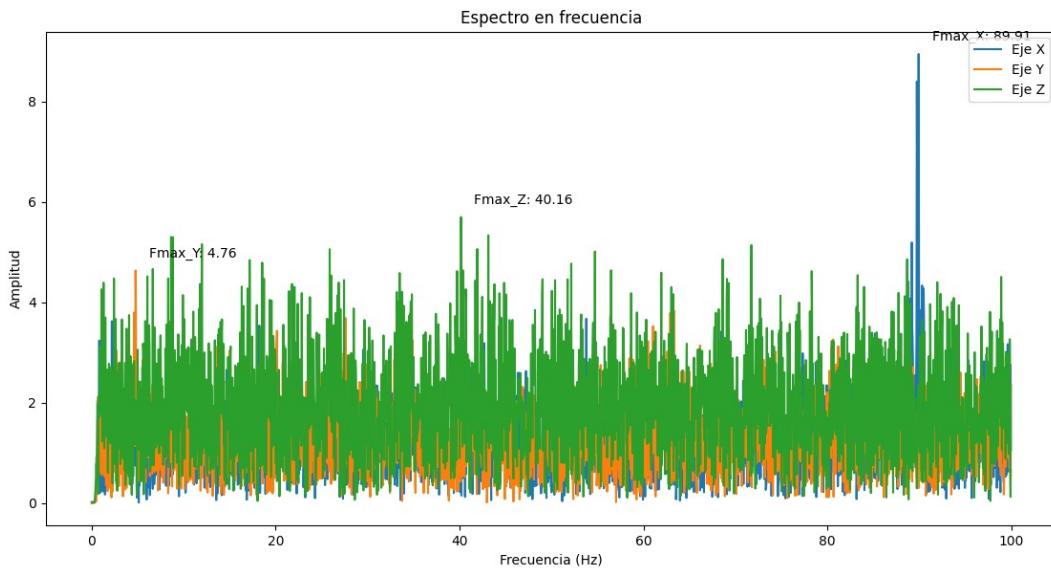
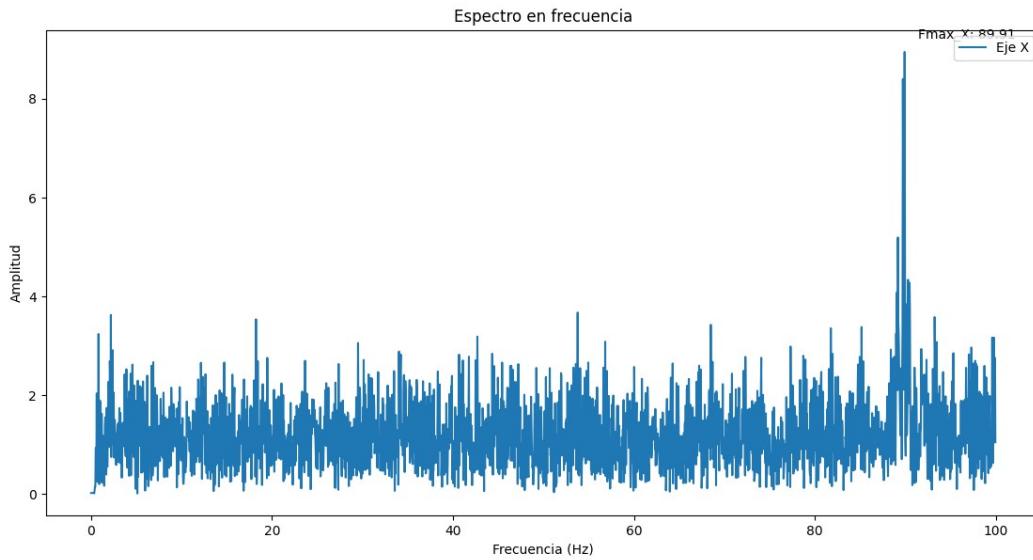
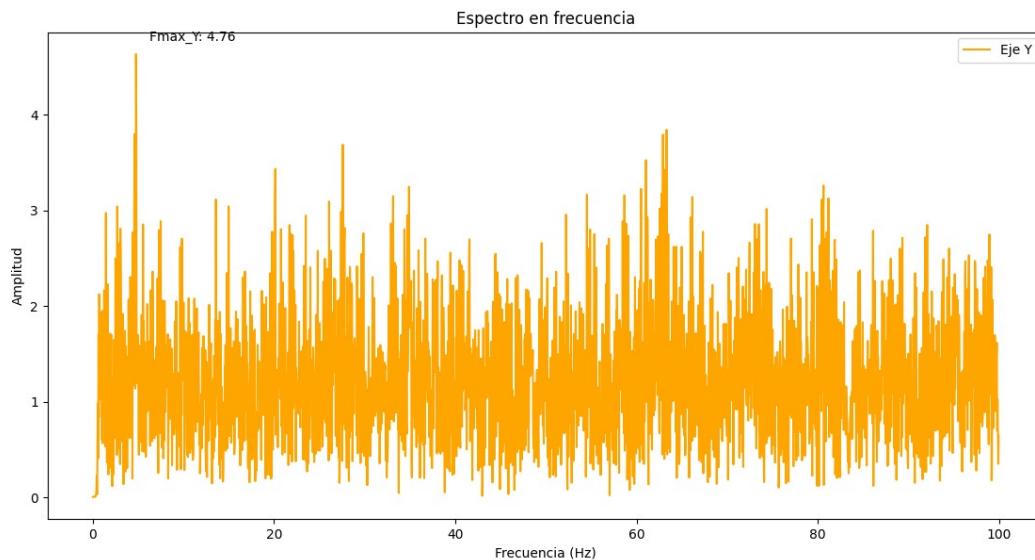


Figura 4.27: Forma del espectro del registro concatenado.

El espectro de la figura 4.27 muestra que el nivel de ruido del Eje Z no permite visualizar con claridad el resto de las componentes frecuenciales. Este nivel de ruido elevado en el Eje Z se debe a que el sensor, por como se encontraba conectado a la placa de prototipos, estaba sujeto a vibraciones pequeñas en la dirección Z. Con el fin de visualizar el espectro en los ejes “X” y “Y”, se graficaron estos espectros por separado, obteniéndose los resultados mostrados en las figuras 4.28a y 4.28b:



(a) Espectro en frecuencia del sistema ante vibración ambiental en el eje “X”



(b) Espectro en frecuencia del sistema ante vibración ambiental en el eje “Y”

Figura 4.28: Respuesta del sistema ante vibración ambiental en los ejes “X” y “Y”

Al comparar las figuras 4.28b y 4.24b se observa que el espectro obtenido mediante el sensor inteligente contiene el pico en frecuencia correspondiente a la frecuencia natural de vibración en la dirección corta (Norte-Sur) de la estructura y este se corresponde al obtenido por la tarjeta PCI-6221. Sin embargo, el resto

de la información en el espectro se encuentra en un nivel de ruido elevado, lo que dificulta la visualización de otras componentes frecuenciales, que sí son visibles en el espectro de la figura 4.24b, obtenida por la tarjeta PCI-6221.

Al observar los resultados de la figura ??, se observa un pico de alta frecuencia en el eje “X” correspondiente a 89.91 Hz. Esta frecuencia de vibración se encuentra en todos los registros tomados por el sensor inteligente, incluso los que se realizaron en pruebas preliminares de funcionamiento. Cabe la posibilidad de que esta frecuencia se deba a la posición en la que se encuentra el acelerómetro sobre el prototipo, estando esta simplemente apoyada sobre la base.

En principio, el desempeño de los sensores MPU6250 en vibraciones ambientales es aceptable, ya que es capaz de captar las vibraciones de la estructura en estudio. Sin embargo, el nivel de ruido en el eje “Z” es considerablemente mayor al nivel de ruido de los acelerómetros FBA11, lo que dificulta la visualización de otras componentes frecuenciales en el espectro. A pesar de esta limitación, el ruido presente en el espectro corresponde a ruido blanco, estando esta limitación asociada al acelerómetro, su fabricación y componentes internos, y no al sensor inteligente en sí.

Si bien el registro de la figura 4.25 muestra el comportamiento esperado por un registro de vibración ambiental en tiempo, para que el sensor sea capaz de captar los leves movimientos de la estructura en vibración ambiental, este debe estar bien acoplado al sistema y presentar bajos niveles de ruido, como es el caso de los acelerómetros FBA-11 de referencia. A pesar de estas discrepancias entre ambos espectros, el tipo de ruido presentado por el sensor en vibraciones ambientales y la facilidad para concatenar registros debido al formato del mismo, permitiendo aplicar técnicas de procesamiento de datos fuera de línea a los registros, lo proyectan como un buen candidato para tomar registros de vibraciones ambientales siempre y cuando este se encuentre firmemente acoplado al sistema en estudio y

se escojan sensores con densidades espectrales de ruido aceptables.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Se logró plantear el diseño de un sensor inteligente para aplicaciones de monitoreo de salud estructural con éxito, identificando las variables de interés para este tipo de sistemas y posteriormente implementando exitosamente un prototipo de pruebas funcional capaz de llevar a cabo ensayos dinámicos similares a los que se llevan a cabo en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales.

La revisión bibliográfica mostró los avances realizados por distintos autores en cuanto a la implementación de sistemas de monitoreo de variables estructurales basados en microcontroladores y haciendo uso de canales de comunicación inalámbrica, lo cual permitió concentrar y canalizar el trabajo de investigación de forma efectiva.

Se diseñaron con éxito los distintos programas necesarios para obtener registros de vibración y mediciones de variables quasi-estáticas haciendo uso de un microcontrolador y posteriormente enviarlos de forma inalámbrica haciendo uso del protocolo LoRa. El ESP32 en conjunto con FreeRTOS, el cual permitió controlar de forma efectiva y ordenada las distintas tareas, mostraron ser herramientas capaces de manejar el preprocesamiento y adquisición de los datos de forma exitosa.

Se implementó con éxito una interfaz de monitoreo y control capaz de enviar comandos de control y a la vez visualizar los registros tomados por el sensor

inteligente, aplicando herramientas de procesamiento numérico con bajo costo computacional dentro de la misma aplicación, con capacidades de personalización dependiendo del cliente o proyecto y con la posibilidad de guardar los registros en un formato compatible con la gran mayoría de programas de post-procesamiento.

Se comprobó el funcionamiento del diseño propuesto haciendo uso de un prototipo de pruebas, el cual se comparó con un equipo comercial del fabricante National Instruments, el cual se tomó como referencia, obteniendo resultados muy similares. De esta forma se constató la efectividad y veracidad de los datos obtenidos por el sensor inteligente.

Al haber tomado en cuenta la fecha y hora de adquisición de los datos, y por las características del protocolo LoRa y el control que permite tener sobre los dispositivos esclavos asignándoles números de identificación única, se sentaron las bases a la posibilidad de escalar el número de sensores inteligentes de bajo costo en la estructura, aumentando la resolución espacial y permitiendo tener acceso a las gráficas del comportamiento modal de la estructura.

A pesar de las limitaciones de memoria de sistemas basados en microcontroladores, el sensor inteligente cumple sus funciones de monitorear las variables estructurales de interés; permitiendo que el operador tenga acceso a un histórico de datos de la estructura, disminuyendo además los costos y la complejidad de sistemas cableados con fines similares.

En este tipo de aplicaciones es esencial garantizar la integridad de los datos. A pesar de ser LoRa un protocolo lento en comparación a otros, la seguridad que ofrece al tener muy bajo porcentaje de pérdida de paquetes y el largo alcance, que permite ubicar la estación base en una ubicación segura alejada de la estructura lo posicionan como un protocolo prometedor para aplicaciones de monitoreo de salud estructural.

Los sistemas de adquisición de datos basados en microcontroladores representan una opción confiable y de bajo costo para implementar soluciones de monitoreo estructural periódico que sustituyen a los sistemas cableados.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Implementar múltiples sensores inteligentes y hacer uso de la fecha y hora exacta de registro para sincronizar los datos provenientes de los múltiples esclavos.
- Para comprobar que los cambios introducidos en un sistema estructural controlado se corresponden con cambios en la respuesta dinámica del mismo, y que estos cambios son detectados por el sensor inteligente, es conveniente realizar una prueba sobre un modelo a escala de una estructura en un entorno controlado, previamente caracterizada tomando en cuenta su modelo estático y los materiales que la constituyen. Sobre esta estructura se pueden ejecutar ensayos de vibración a medida que se introducen cambios en los elementos estructurales, pudiendo así caracterizar cómo este cambio influye en la respuesta dinámica del sistema y permitiendo llevar un registro de estos cambios en el tiempo.
- Se sugiere ejecutar ensayos periódicos sobre una estructura a escala en donde se puedan controlar las condiciones de temperatura y humedad relativa, además del cambio inducido en el sistema. Este estudio permitiría caracterizar los cambios en la respuesta dinámica producto de las variables ambientales respecto a los que son consecuencia de cambios en la rigidez del sistema, siendo estos últimos los de mayor interés.
- Si bien en este trabajo de investigación se consideraron las variables de

interés principales para el monitoreo de salud estructural, se recomienda evaluar la posibilidad de incorporar sensores de variables químicas y electroquímicas que pueden atentar en contra de la integridad de la estructura, como sensores de pH, potencial de corrosión, agentes gaseosos, entre otros. Por la escalabilidad del sistema, se pueden incorporar estos sensores en los sensores inteligentes, permitiendo tener un monitoreo más completo de la estructura.

- Hacer uso del Digital Motion Processing Unit de los módulos MPU9250 y MPU6050 para ver cómo se comparan respecto a los resultados obtenidos en cuanto a fusión de sensores se refiere.
- Si bien el sensor MPU6250 permitió comprobar el correcto funcionamiento del diseño planteado, se recomienda hacer uso de un sensor cuyo nivel de ruido permita obtener registros de vibración ambiental de mejor calidad. Algunos acelerómetros de tecnología similar que presentan mejor comportamiento en bajas amplitudes y a baja frecuencia son el MMA8451 del fabricante NXP, el LSM6DSOX de STMicroelectronics y el ADXL355 de Analog Devices. Todos estos cuentan con un comportamiento en ruido menor a $120 \frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$ en el rango de frecuencia de interés.
- Se sugiere implementar una solución alternativa en estación base a la tecnología MQTT, como por ejemplo HTTP. Las dificultades encontradas que limitaron el tamaño del registro surgen al intentar subir los datos usando MQTT al servidor-computador. El buffer del cliente MQTT utilizado por la librería *PubSubClient* es limitado, y la misma no está diseñada para manejar desbordamiento del buffer, por lo que los datos son truncados de forma inesperada. Se sugiere implementar un manejo de excepción para este caso.
- El módulo LoRa tiene pocas pérdidas de datos, pero su velocidad no es la mejor, sin embargo el rango permite ubicar la estación base en un lugar

seguro alejado de la estructura. Intentar utilizar otra red diferente de LoRa y enviar datos mientras se están adquiriendo. Las velocidades de Lora no son las mejores para esta topología, la red de 2.4 GHz que utilizan módulos como el nRF24L01 disminuye el rango, más sin embargo, permite alcanzar velocidades de transmisión mucho más alta. Si no se debe esperar a que se tome todo el registro para empezar a enviar, se evita tener que guardar el registro completo de forma temporal. Esto sería conveniente para aplicaciones en donde se requiera una respuesta en tiempo real como ensayos de vibración en campo.

- Hacer portátil el dispositivo al evaluar las necesidades de energía del sistema para ser alimentado por baterías, posiblemente implementando alguna función de deep-sleep del microcontrolador.
- Integrar nuevos comandos en estación base como la posibilidad de calibrar a distancia, obtener solo algunos datos y no todo el registro, modificar frecuencia de muestreo y número de datos a tomar.
- Incorporar al sistema los puertos analógicos del ESP32. Permitiendo incluir sensores de temperatura, humedad, presión, entre otros, cuya interfaz sea analógica.
- Puesto que no se necesita de WiFi en el sensor inteligente, se puede prescindir de las capacidades de conectividad del microcontrolador, escogiendo uno que tenga menos posibilidades de conectividad, pero que cuente con otras fortalezas, como por ejemplo el Teensy 4.0. Teniendo 1024kb de RAM, a diferencia de los 520kb del ESP32.
- El módulo de comunicaciones LoRa RYLR896 de REYAX TECHNOLOGY ofrece funcionalidad de control por comandos AT y serial, evitando así el uso de librerías como RadioLib para controlar el módulo. Esto ahorraría

espacio en memoria y facilita el código a implementar, además de hacerlo compatible con distintos microcontroladores sin soporte a esa librería.

- Evaluar la posibilidad de utilizar variantes del ESP32 (como el ESP32-S3) más potentes que permitirían aumentar las capacidades de cómputo y almacenamiento sin la necesidad de cambiar el código, manteniendo el firmware actual en funcionamiento.
- Implementar uso de memoria SD en sensor inteligente. Por la dimensión temporal del sistema actual (no en tiempo real) el guardado en SD usando SPI no representaría retrasos en la adquisición de los datos, pues se llevaría a cabo luego de la toma de datos.
- Evaluar la posibilidad de usar la transformada de ondículas o Wavelet en vez de la FFT para darle una dimensión temporal a los registros.
- Expandir la memoria SRAM del ESP32 haciendo uso de módulos comerciales como el W25Q128 de 16 MB. Esto permitiría almacenar registros más largos, mejorando la resolución de los mismos y permitiendo llevar a cabo ensayos con constantes de tiempo mayores.
- Para mejorar la precisión en la hora de toma de datos, se recomienda implementar rutinas de iteración en la sincronización del RTC comparando la hora actual y la hora del sensor inteligente luego de la sincronización inicial hasta disminuir el error. Paralelo a esto se puede utilizar un módulo GPS en la estación base y comparar con hora de NTP adquirida.

Apéndice I

CÓDIGO DEL SENSOR INTELIGENTE

```
1 void leerDatosACL(void *pvParameters){
2     //Leer los valores del Acelerometro de la IMU
3     while(true){
4         mpu.getEvent(&a, &g, &tem);
5         ACLData aclData; //Estructura a ser llenada con 3 ejes
6
7         aclData.AclX = a.acceleration.x - acl_offset[0];
8         aclData.AclY = a.acceleration.y - acl_offset[1];
9         aclData.AclZ = a.acceleration.z - acl_offset[2];
10
11        if(F_SAMPLING != 0){
12            vTaskDelay(F_SAMPLING/portTICK_PERIOD_MS);
13        }
14
15        //Evaluo los valores actuales de aceleracion
16        if(flag_limite == 0){
17            flag_limite = evaluar_limites_acl(aclData.AclX,
18                                              aclData.AclY, aclData.AclZ);
19            flag_time = checktime();
20            if(flag_limite != 0){
21                flag_acl == true;
22                globalTimestamp = getEpochTime();
23                //Activando banderas para registro de temperatura y
24                humedad
25                flag_inc = 1;
26                flag_temp_hum = 1;
```

```

25
26          //Cambio en el LED de toma de datos
27          digitalWrite(LED_EST1 , HIGH);
28          //Suspende tarea de LED IDLE
29          vTaskSuspend(xHandle_blink);
30      }
31
32      if(flag_time){
33          flag_limite = 1;
34          flag_inc = 1;
35          flag_temp_hum = 1;
36          globalTimestamp = getEpochTime();
37
38          //Cambio en el LED de toma de datos
39          digitalWrite(LED_EST1 , HIGH);
40          //Suspende tarea de LED IDLE
41          vTaskSuspend(xHandle_blink);
42      }
43
44      //solo evalua si no se sobrepaso el limite al mismo
45      //tiempo
46      if(flag_acl == true && flag_limite == 0){
47          //Se cambia el valor de flag limite para solo
48          //ejecutar esto 1 vez
49          flag_limite = 1;
50          flag_inc = 1;
51          flag_temp_hum = 1;
52          globalTimestamp = getEpochTime();
53
54          //Cambio en el LED de toma de datos
55          digitalWrite(LED_EST1 , HIGH);
56          //Suspende tarea de LED IDLE
57          vTaskSuspend(xHandle_blink);
58      }

```

```

57
58     //Envia los datos a la cola solo si se supero el limite
59     if(flag_limite != 0 || flag_acl == true || flag_time ==
60     1)
61     {
62         if(xQueueSend(aclQueue, &aclData, portMAX_DELAY)){
63             vTaskResume(xHandle_crearBuffer); //Se llenan los
64             buffers para enviar los datos
65         }
66         else{
67             continue;
68         }
69     }
70 }
71
72 }
```

Código I.1: Tarea de lectura de datos de aceleración triaxial

```

1
2 void crearBuffer(void *pvParameters){
3     while(true){
4
5         ACLData datos_acl;
6
7         //Recibo los datos de la cola y los guardo en la estructura
8         creada
9         if(xQueueReceive(aclQueue, &datos_acl, portMAX_DELAY)){
10            if( k <= NUM_DATOS ){
11                if(k == 1) tiempo1 = millis();
12                //Lleno el buffer de datos
13                struct_buffer_acl.bufferX[k] = datos_acl.Ac1X;
14                struct_buffer_acl.bufferY[k] = datos_acl.Ac1Y;
```

```

14         struct_buffer_acl.bufferZ[k] = datos_acl.AclZ;
15
16     }
17
18     else{
19         //Reiniciando para sobreescribir en buffers "nuevos" en
20         la siguiente accion
21
22         k = 0;
23
24         cont2 = 0;
25
26         cont2_inc = 0;
27
28
29         //Se siguen tomando datos mas no se guardan en los
30         buffers
31
32         flag_limite = 0;
33
34         flag_inc = 0;
35
36         flag_temp_hum = 0;
37
38         flag_time = 0;
39
40         flag_acl = false; //Reinicio booleano de recepcion LoRa
41         para toma de decisiones en proxima peticion
42
43
44         //Apago led indicativo de toma de datos
45
46         digitalWrite(LED_EST1, LOW);
47
48
49
50         //Envio los resultados a la cola
51
52         if(xQueueSend(tramaLoRaQueue, &struct_buffer_acl,
53         portMAX_DELAY)){
54
55             vTaskSuspend(xHandle_leerDatosACL); //suspendo
56             adquisicion hasta que se envie todo
57
58             vTaskSuspend(xHandle_readBMETask);
59
60             vTaskSuspend(xHandle_readMPU9250);
61
62
63             //Se envian los datos mediante lora
64
65             vTaskResume(xHandle_send_packet);
66
67         }

```

```

43     else{
44         Serial.println("No se envio la cola...");
45     }
46
47     vTaskResume(xHandle_blink);
48 }
49 }
50 else{
51     Serial.println("No se recibio la cola correctamente..."); 
52 }
53
54 //vPortFree(NULL);
55
56 //Se suspende esta tarea para esperar la toma de datos
57 vTaskSuspend(xHandle_crearBuffer);
58
59 }
60 }
```

Código I.2: Tarea de creación de buffer para envío a módulo LoRa

```

1
2 int generararray(int contador_paquetes)
3 {
4
5     //Recibiendo cola con datos de aceleracion en estructura de
6     //datos
7     //Los datos son un float array dentro del buffer
8     if(contador_paquetes == 0){
9         const int chunkSize = 64;
10        contador_paquetes_interno = 0; //REINICIO CONTADOR
11        INTERNO INDEPENDIENTE DE SI ENTRÓ POR PRIMERA VEZ
12
13        if(xQueueReceive(tramaLoRaQueue, &trama, portMAX_DELAY))
14    }
```

```

12     {
13         //Evita el error por MeditationGuru en Core0
14         //Copia los datos por partes en vez de completos,
15         evita problemas de reboot
16         for (int i = 0; i < NUM_DATOS; i += chunkSize)
17         {
18             // Calculate the size of the current chunk
19             int currentChunkSize = min(chunkSize, NUM_DATOS -
20             i);
21
22             // Copy and process the chunk
23             memcpy(floatArrayX + i, trama.bufferX + i,
24             currentChunkSize * sizeof(float));
25             memcpy(floatArrayY + i, trama.bufferY + i,
26             currentChunkSize * sizeof(float));
27             memcpy(floatArrayZ + i, trama.bufferZ + i,
28             currentChunkSize * sizeof(float));
29
30             // Process the data in floatArrayX, floatArrayY,
31             and floatArrayZ here
32         }
33
34         /*The memcpy function takes three arguments: the
35         destination pointer, the source pointer, and the number of
36         bytes to copy.*/
37     }
38
39     selectedFloatArray = floatArrayX;
40 }
41
42 else if(contador_paquetes == NUM_DATOS/CHUNK_SIZE) //(
43 32/64/128...
44 {
45     contador_paquetes_interno = 0;
46     selectedFloatArray = floatArrayY;
47 }
48
49 else if(contador_paquetes == NUM_DATOS/CHUNK_SIZE*2) // (

```

```

    NUM_DATOS/CHUNKSIZE - 1)*2

37    {
38        contador_paquetes_interno = 0;
39        selectedFloatArray = floatArrayZ;
40    }

41
42    // Calculate the number of chunks
43    int numChunks = sizeof(floatArrayX) / sizeof(float) /
44    CHUNK_SIZE; //El numero de chunks indica el numero de bytes
45    final
46    //Print the amount of chunks
47    Serial.print("Amount of chunks calculated: ");
48    Serial.println(numChunks);

49
50
51    // Check if the size of floatArray is divisible by CHUNK_SIZE
52    if (NUM_DATOS / sizeof(float) % CHUNK_SIZE != 0) {
53        Serial.println("Error: Size of floatArray is not
54        divisible by CHUNK_SIZE");
55    }
56
57    // Create an array to hold the chunks
58    float chunks[numChunks][CHUNK_SIZE];

59
60    // Split the array into chunks
61    for (int i = 0; i < numChunks; i++) {
62        memcpy(chunks[i], &selectedFloatArray[i * CHUNK_SIZE],
63        CHUNK_SIZE * sizeof(float)); //Copiar 128bytes de Float Array
64        (a partir de la posicion especificada por i) en chunks
65    }

66
67    if(xQueueSend(arrayQueue, &chunks[contador_paquetes_interno],
68    portMAX_DELAY) == pdTRUE){
69        Serial.println("Se envio la cola a la tarea de envio LoRa."
70    );

```

```

63 }
64 else{
65     Serial.println("Problema al enviar cola...");
66     return 0;
67 }
68
69 contador_paquetes_interno++;
70
71 return 1;
72 }

```

Código I.3: Función del sensor inteligente para generar arreglos de datos de aceleración en paquetes de 128 bytes

```

1
2 void send_packet(void *pvParameters){
3     while(1){
4         transmitFlag = true;
5
6         //detach interrupt from pin 2
7         detachInterrupt(2);
8
9         Serial.print("Contador de paquetes actual antes de entrar en
10        generararray: ");
11        Serial.println(contador_paquetes);
12
13        // if(contador_paquetes >= ((NUM_DATOS * 4)*3 / 128){
14        //     contador_paquetes = 0;
15        // }
16
17        generararray(contador_paquetes); //Genero el array y mando un
18        chunk, dependiendo del contador
19
20        if(contador_paquetes < (((NUM_DATOS * 4)*3 / 128)){

```

```

20         contador_paquetes++; //Aumento el contador para enviar
21         el siguiente paquete en el proximo envio
22     }
23
24     float floatarray[CHUNK_SIZE];
25     byte data[CHUNK_SIZE * sizeof(float)]; //Inicializacion de
26     byte array
27
28     if(xQueueReceive(arrayQueue, &floatarray, portMAX_DELAY)){
29         Serial.println("Se recibio la cola con los datos");
30     }
31
32     memcpy(data, floatarray, sizeof(floatarray)); //CHUNK_SIZE *
33     sizeof(float)
34
35     size_t size_data;
36
37     size_data = sizeof(data);
38
39     //Llamo a la funcion que crea la trama de datos (payload)
40     sendmessage_radiolib(size_data, data);
41     Serial.println("Sending byte array con datos!");
42     Serial.println();
43
44     //Espero X segundos luego de enviar mensaje
45     vTaskDelay(interval/portTICK_PERIOD_MS);
46
47     //Suspendo esta tarea hasta que se reciba otro mensaje
48     if(contador_paquetes >= (((NUM_DATOS * 4)*3 / 128)){
49
50         //Ejecuto funciones para calcular valor promedio de variables
51         cuasiestaticas
52
53         promediofinal_inc();
54         promediofinal_tempum();

```

```

50     send_thi();
51
52     iteraciones_peticiones++;
53     Serial.print("Iteraciones: ");
54     Serial.println(iteraciones_peticiones);
55
56     if(iteraciones_peticiones == 2){
57         Serial.println("Reiniciando micro... ");
58         esp_restart();
59     }
60
61     Serial.println("Reactivando tareas de adquisicion de datos!");
62
63     contador_paquetes = 0;
64     vTaskResume(xHandle_leerDatosACL);
65     vTaskResume(xHandle_readBMETask);
66     vTaskResume(xHandle_readMPU9250);
67
68     Serial.print("Memoria disponible en send task: ");
69     Serial.println(ESP.getFreeHeap());
70     Serial.println(ESP.getFreePsram());
71     Serial.println(uxTaskGetStackHighWaterMark(NULL));
72
73     transmitFlag = false;
74     Serial.print(F("[SX1278] Comienza a escuchar comandos de
nuevo... "));
75     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), setFlag, RISING);
76     int state = radio.startReceive();
77     if (state == RADIOLIB_ERR_NONE) {
78         Serial.println(F("exito!"));
79     }
80     else{
81         Serial.print(F("fallo, codigo "));
82         Serial.println(state);

```

```

82         //while (true);
83     }
84
85     vTaskSuspend(NULL);
86 }
87 }
88 }
```

Código I.4: Tarea de envío de datos de aceleración desde sensor inteligente

```

1
2 void readBMETask(void *parameter) {
3     while (true) {
4         //Crea una estructura de tipo BMEData
5         BMEData data_readtemp;
6
7         //Lee los valores del sensor y los guarda en la estructura
8         data_readtemp.humidity = bme.readHumidity();
9         data_readtemp.temperature = bme.readTemperature();
10
11        //Envia los datos a la cola dataQueue si bandera esta
12        //activada
13        if(flag_temp_hum){
14            if(xQueueSend(data_temphumQueue , &data_readtemp ,
15                portMAX_DELAY)){
16                //Serial.println("Se envio correctamente la cola de
17                //temperatura");
18                vTaskDelay(10 / portTICK_PERIOD_MS);
19                vTaskResume(xHandle_receive_temphum); //Reactivo tarea
20                de creacion de buffers y promedios
21            }
22            else{
23                Serial.println("No se envio correctamente la cola de
24                temperatura");
25            }
26        }
27    }
28 }
```

```

21 }
22
23 //Delay dependiendo del tiempo de muestreo
24 vTaskDelay(T_SAMPLING_TEMPHUM / portTICK_PERIOD_MS); //5Hz
25 }
26 }
27
28
29 \begin{lstlisting}[language=C++, caption= Tarea de lectura de
30 datos del MPU9250]
31 void readMPU9250(void *pvParameters){
32     while (true) {
33         //Crea una estructura de tipo IncData
34         IncData data_inc;
35
36         //Lee los valores del sensor y los guarda en la estructura
37         if(mpu9250.update()){
38             data_inc.IncRoll = mpu9250.getRoll();
39             data_inc.IncPitch = mpu9250.getPitch();
40             data_inc.IncYaw = mpu9250.getYaw();
41
42             //Envia los datos a la cola incQueue solo si la bandera
43             //esta activada
44             if(flag_inc){
45                 if(xQueueSend(incQueue, &data_inc, portMAX_DELAY)){
46                     //Serial.println("Se envio correctamente la cola de
47                     //inclinacion");
48                     vTaskResume(xHandle_recInclinacion); //Reactiva tarea
49                     de creacion de buffers y promedios
50                 }
51                 else{
52                     Serial.println("No se envio correctamente la cola
53                     de inclinacion");
54                 }
55             }
56         }
57     }
58 }
```

```

50         continue;
51     }
52   }
53   vTaskDelayUntil(&xLastWakeTime, T_SAMPLING_INC /
54   portTICK_PERIOD_MS)
55 }
```

Código I.5: Tarea de lectura de datos de temperatura y humedad

```

1
2 int send_thi_radiolib(time_t tstamp, float temp, float hum,
3   float yaw, float pitch, float roll){
4   if(transmitFlag){
5     Serial.print(F("[SX1278] Transmitiendo T.H.I ... "));
6
7     THIPacket packet; //Creando paquete como estructura Packet
8
9     //Se llena estructura de datos
10    packet.messageID = 200;
11    packet.senderID = 0x2;
12    packet.receiverID = 0x1;
13    packet.timestamp = tstamp;
14    packet.temperature = temp;
15    packet.humidity = hum;
16    packet.yaw = yaw;
17    packet.pitch = pitch;
18    packet.roll = roll;
19
20    //Generacion de byte array
21    byte* packetBytes = reinterpret_cast<byte*>(&packet);
22
23    int state = radio.startTransmit(packetBytes, sizeof(packet));
24
25    if (state == RADIOLIB_ERR_NONE) {
26
27      //Lectura de los datos
28      //...
29
30      //Envio de los datos
31      //...
32
33      //Almacenamiento de los datos
34      //...
35
36      //Actualizacion de la ultima hora
37      //...
38
39      //Envio de los datos
40      //...
41
42      //Almacenamiento de los datos
43      //...
44
45      //Actualizacion de la ultima hora
46      //...
47
48      //Envio de los datos
49      //...
50
51      //Almacenamiento de los datos
52      //...
53
54      //Actualizacion de la ultima hora
55      //...
56
57      //Envio de los datos
58      //...
59
60      //Almacenamiento de los datos
61      //...
62
63      //Actualizacion de la ultima hora
64      //...
65
66      //Envio de los datos
67      //...
68
69      //Almacenamiento de los datos
70      //...
71
72      //Actualizacion de la ultima hora
73      //...
74
75      //Envio de los datos
76      //...
77
78      //Almacenamiento de los datos
79      //...
80
81      //Actualizacion de la ultima hora
82      //...
83
84      //Envio de los datos
85      //...
86
87      //Almacenamiento de los datos
88      //...
89
90      //Actualizacion de la ultima hora
91      //...
92
93      //Envio de los datos
94      //...
95
96      //Almacenamiento de los datos
97      //...
98
99      //Actualizacion de la ultima hora
100     //...
101
102     //Envio de los datos
103     //...
104
105     //Almacenamiento de los datos
106     //...
107
108     //Actualizacion de la ultima hora
109     //...
110
111     //Envio de los datos
112     //...
113
114     //Almacenamiento de los datos
115     //...
116
117     //Actualizacion de la ultima hora
118     //...
119
120     //Envio de los datos
121     //...
122
123     //Almacenamiento de los datos
124     //...
125
126     //Actualizacion de la ultima hora
127     //...
128
129     //Envio de los datos
130     //...
131
132     //Almacenamiento de los datos
133     //...
134
135     //Actualizacion de la ultima hora
136     //...
137
138     //Envio de los datos
139     //...
140
141     //Almacenamiento de los datos
142     //...
143
144     //Actualizacion de la ultima hora
145     //...
146
147     //Envio de los datos
148     //...
149
150     //Almacenamiento de los datos
151     //...
152
153     //Actualizacion de la ultima hora
154     //...
155
156     //Envio de los datos
157     //...
158
159     //Almacenamiento de los datos
160     //...
161
162     //Actualizacion de la ultima hora
163     //...
164
165     //Envio de los datos
166     //...
167
168     //Almacenamiento de los datos
169     //...
170
171     //Actualizacion de la ultima hora
172     //...
173
174     //Envio de los datos
175     //...
176
177     //Almacenamiento de los datos
178     //...
179
180     //Actualizacion de la ultima hora
181     //...
182
183     //Envio de los datos
184     //...
185
186     //Almacenamiento de los datos
187     //...
188
189     //Actualizacion de la ultima hora
190     //...
191
192     //Envio de los datos
193     //...
194
195     //Almacenamiento de los datos
196     //...
197
198     //Actualizacion de la ultima hora
199     //...
200
201     //Envio de los datos
202     //...
203
204     //Almacenamiento de los datos
205     //...
206
207     //Actualizacion de la ultima hora
208     //...
209
210     //Envio de los datos
211     //...
212
213     //Almacenamiento de los datos
214     //...
215
216     //Actualizacion de la ultima hora
217     //...
218
219     //Envio de los datos
220     //...
221
222     //Almacenamiento de los datos
223     //...
224
225     //Actualizacion de la ultima hora
226     //...
227
228     //Envio de los datos
229     //...
230
231     //Almacenamiento de los datos
232     //...
233
234     //Actualizacion de la ultima hora
235     //...
236
237     //Envio de los datos
238     //...
239
240     //Almacenamiento de los datos
241     //...
242
243     //Actualizacion de la ultima hora
244     //...
245
246     //Envio de los datos
247     //...
248
249     //Almacenamiento de los datos
250     //...
251
252     //Actualizacion de la ultima hora
253     //...
254
255     //Envio de los datos
256     //...
257
258     //Almacenamiento de los datos
259     //...
260
261     //Actualizacion de la ultima hora
262     //...
263
264     //Envio de los datos
265     //...
266
267     //Almacenamiento de los datos
268     //...
269
270     //Actualizacion de la ultima hora
271     //...
272
273     //Envio de los datos
274     //...
275
276     //Almacenamiento de los datos
277     //...
278
279     //Actualizacion de la ultima hora
280     //...
281
282     //Envio de los datos
283     //...
284
285     //Almacenamiento de los datos
286     //...
287
288     //Actualizacion de la ultima hora
289     //...
290
291     //Envio de los datos
292     //...
293
294     //Almacenamiento de los datos
295     //...
296
297     //Actualizacion de la ultima hora
298     //...
299
299 }
```

```

25     Serial.println(F(" exito!"));
26     return 1;
27
28 } else if (state == RADIOLIB_ERR_PACKET_TOO_LONG) {
29     Serial.println(F("muy largo!"));
30     return 0;
31
32 } else if (state == RADIOLIB_ERR_TX_TIMEOUT) {
33     Serial.println(F("timeout!"));
34     return 0;
35
36 } else {
37     Serial.print(F("fallo, codigo "));
38     Serial.println(state);
39     return 0;
40 }
41     return 1;
42 }
43 else{
44     Serial.println("Se estan recibiendo datos");
45     return 0;
46 }
47 }
```

Código I.6: Tarea de envío de datos de variables ambientales e inclinación desde sensor inteligente

Apéndice II

CÓDIGO DE LA ESTACIÓN BASE

```
1 void receive_task(void *pvParameter)
2 {
3     while (true)
4     {
5         if (transmitFlag != true)
6         {
7             // reset flag
8             receivedFlag = false;
9
10            PacketUnion packetUnion;
11
12            int numBytes = radio.getPacketLength();
13            byte byteArr[numBytes];
14
15            if (numBytes == 22)
16            {
17                Serial.println("Se recibio una actualizacion de
SmartSensor.");
18                data_o_comando = 1;
19            }
20            else if (numBytes == 131)
21            {
22                Serial.println("Se recibieron datos del SS.");
23                data_o_comando = 0;
24            }
25            else if (numBytes == 28)
```

```

26
27         Serial.println("Se recibieron datos de temp y humedad
28         .");
29     }
30     else
31     {
32         Serial.println("Se recibio algo que no es un comando
33         ni una actualizacion de RTC.");
34         datacorrupta = true;
35     }
36
37     Serial.print("Packet length: ");
38     Serial.println(numBytes);
39     int state = radio.readData(byteArr, numBytes);
40
41     if (state == RADIOLIB_ERR_NONE || state == 0 &&
42 datacorrupta == false)
43     {
44         // packet was successfully received
45         Serial.println(F("[SX1278] Paquete recibido!"));
46
47         // Serial.print("Valor actual de datacomando> ");
48         // Serial.println(data_o_comando);
49
50         contador++;
51
52         switch(data_o_comando)
53         {
54             case 0:
55                 memcpy(&packetUnion.packet1, byteArr, sizeof(
56                     packetUnion.packet1));
57
58                 Serial.print("[SX1278] Message ID: ");

```

```

56             Serial.println(packetUnion.packet1.messageID);
57             Serial.print("[SX1278] Sender ID: ");
58             Serial.println(packetUnion.packet1.senderID);
59             Serial.print("[SX1278] Receiver ID: ");
60             Serial.println(packetUnion.packet1.receiverID);
61
62             //Muestra payload
63             Serial.print(F("[SX1278] Payload:\t\t"));
64             //print the byte array
65             for (int i = 0; i < sizeof(packetUnion.packet1.
66             payload); i+=4) {
67                 float value = *((float*)(packetUnion.packet1.
68             payload + i));
69                 Serial.print(value);
70                 Serial.print(F(" "));
71             }
72             Serial.println("");
73
74             leer_datos(sizeof(packetUnion.packet1.payload),
75             packetUnion.packet1.messageID, packetUnion.packet1.senderID,
76             packetUnion.packet1.receiverID, packetUnion.packet1.payload);
77
78             //ERA 95
79             if(packetUnion.packet1.messageID == ((((
80             NUM_DATOS * 4))*3 / 128) - 1){
81                 if(xQueueSend(xQueueBufferACL, &buffer_prueba
82                 , portMAX_DELAY)){
83                     Serial.println("Se envio la estructura
84                     bufferprueba a la cola xQueueBufferACL");
85                     //vTaskResume(xHandle_send_mqtt);
86                 }
87                 else{
88                     Serial.println("No se pudo enviar la
89                     estructura bufferprueba a la cola xQueueBufferACL");

```

```

82         }
83     }
84
85     break;
86
87 case 1:
88     memcpy(&packetUnion.stringPacket, byteArr,
89 numBytes);
90     Serial.println("El SS esta activo... ");
91
92     Serial.print("[SX1278] Message ID: ");
93     Serial.println(packetUnion.stringPacket.
94 messageID);
95     Serial.print("[SX1278] Sender ID: ");
96     Serial.println(packetUnion.stringPacket.
97 senderID);
98     Serial.print("[SX1278] Receiver ID: ");
99     Serial.println(packetUnion.stringPacket.
100 receiverID);
101
102     if(int(packetUnion.stringPacket.messageID) ==
103 255){
104         Serial.println("Listo para enviar RTC... ");
105         transmitFlag = true; //Activo bandera de
106         envio
107         vTaskResume(xHandle_send_RTC_task);
108     }
109     break;
110 case 2:
111     memcpy(&packetUnion.thipacket, byteArr,
112 numBytes);
113
114     Serial.print("[SX1278] Message ID: ");
115     Serial.println(packetUnion.thipacket.messageID)

```

```

;
109     Serial.print("[SX1278] Sender ID: ");
110     Serial.println(packetUnion.thipacket.senderID);
111     Serial.print("[SX1278] Receiver ID: ");
112     Serial.println(packetUnion.thipacket.receiverID
);
113
114     Serial.print(F("[SX1278] Payload:\t\t"));
115     //Print the temperature and humidity
116     Serial.print(F("Temperature: "));
117     Serial.print(packetUnion.thipacket.temperature)
;
118     Serial.print(F(" Humidity: "));
119     Serial.println(packetUnion.thipacket.humidity);
120     //Print the angle values
121     Serial.print(F("Yaw: "));
122     Serial.print(packetUnion.thipacket.yaw);
123     Serial.print(F(" Pitch: "));
124     Serial.print(packetUnion.thipacket.pitch);
125     Serial.print(F(" Roll: "));
126     Serial.println(packetUnion.thipacket.roll);

127
128
129     if(packetUnion.thipacket.messageID == 200){
130         if(xQueueSend(xQueueTempHumInc , &packetUnion.
131         thipacket , portMAX_DELAY)){
132             Serial.println(xPortGetFreeHeapSize());
133             Serial.println("Se envio la estructura THI
a la cola");
134             vTaskResume(xHandle_send_mqtt_thi);
135         }
136         else{
137             Serial.println("No se pudo enviar la
estructura bufferprueba a la cola xQueueBufferACL");
}

```

```

137             }
138         }
139         break;
140     }
141
142     }
143
144     else if (state == RADIOLIB_ERR_CRC_MISMATCH)
145     {
146         //Paquete recibido pero esta corrupto
147         Serial.println(F("[SX1278] CRC error!"));
148
149         // EJECUTAR CASO ESPECIAL DE DATA CORRUPTA PARA
150         // AUMENTAR CURRENTPOS Y GUARDAR Os EN BUFFER DE INTERES
151
152         if (numBytes == 131)
153         {
154             fillBuffer(bufferactual, NULL, sizeof(packetUnion.
155             packet1.payload), true);
156
157         }
158
159         contador_errores++;
160     }
161     else if (state == -1)
162     {
163         // some other error occurred
164         Serial.print(F("[SX1278] Fallo, codigo "));
165         Serial.println(state);
166         contador_errores++;
167     }

```

```

168         else if (datacorrupta)
169     {
170         // some other error occurred
171         Serial.print(F("[SX1278] Data corrupta..."));
172         Serial.println(state);
173         datacorrupta = false; //Reinicio bandera
174         contador_errores++;
175     }
176
177     Serial.print(F("[SX1278] Contador: "));
178     Serial.println(contador);
179     Serial.print(F("[SX1278] Contador error: "));
180     Serial.println(contador_errores);
181
182     Serial.println("");
183 }
184 else
185 {
186     Serial.println("Se estan enviando datos... ");
187 }
188 vTaskSuspend(NULL);
189 }
190 }
191
192

```

Código II.1: Tarea de recepción de datos de aceleración vía Lora en estación base

```

1
2     void send_RTC_task(void *pvParameters)
3     {
4         while (1)
5         {
6             if (transmitFlag == true)
7             {

```

```

8     Serial.print(F("[SX1278] Transmisiendo actualizacion
9     de RTC... "));
10
11
12     TimePacket packet;
13
14     //Estructura de tiempo
15     timestruct time_packet;
16
17     struct tm timeinfo = rtc.getTimeStruct();
18
19     time_packet.year = timeinfo.tm_year + 1900;
20     time_packet.month = timeinfo.tm_mon + 1;
21     time_packet.day = timeinfo.tm_mday;
22     time_packet.hour = timeinfo.tm_hour;
23     time_packet.minute = timeinfo.tm_min;
24     time_packet.second = timeinfo.tm_sec;
25
26     //Convierte estructura a byte array
27     byte *byteArrTime = (byte *)&time_packet;
28
29     //Muestra el payload
30     Serial.print(F("[SX1278] Payload:\t\t"));
31     //print the byte array
32     // Print the byte array
33     for (int i = 0; i < sizeof(time_packet); i++) {
34         Serial.print(byteArrTime[i], HEX);
35         Serial.print(F(" "));
36     }
37
38
39     Serial.println("");
40

```

```

41         Serial.println(sizeof(time_packet));
42
43         packet.messageID = 255;
44         packet.senderID = 1;
45         packet.receiverID = 2;
46         memcpy(packet.payload, byteArrTime, sizeof(packet.
47 payload));
48
49             //Convierte estructura packet a byte array incluyendo
50             //encabezado
51             byte *packetBytes = reinterpret_cast<byte *>(&packet);
52
53             // Delay antes de transmitir para permitir que SS se
54             // configure en modo listening
55             delay(500);
56
57             int state = radio.startTransmit(packetBytes, sizeof(
58             packet));
59
60             if (state == RADIOLIB_ERR_NONE)
61             {
62                 //Paquete transmitido con exito
63                 Serial.println(F(" exito!"));
64             }
65             else if (state == RADIOLIB_ERR_PACKET_TOO_LONG)
66             {
67                 //Paquete mayor a 256 bytes
68                 Serial.println(F("muy largo!"));
69             }
70             else if (state == RADIOLIB_ERR_TX_TIMEOUT)
71             {
72                 //timeout
73                 Serial.println(F("timeout!"));
74             }

```

```

71         else
72     {
73         // Otro error
74         Serial.print(F("fallo, codigo "));
75         Serial.println(state);
76     }
77
78     // Delay para permitir que se termine de enviar el
79     // paquete, no poner en modo receptor de inmediato
80     delay(500);
81
82     transmitFlag = false;
83
84     Serial.print(F("[SX1278] Comienza a escuchar paquetes
85     otra vez... \n"));
86
87     int state2 = radio.startReceive();
88
89     attachInterrupt(digitalPinToInterruption(2), setFlag,
90     RISING); // Reinicia ISR
91
92     if (state2 == RADIOLIB_ERR_NONE)
93     {
94         Serial.println(F("Exito!"));
95     }
96     else
97     {
98         Serial.print(F("fallo, codigo "));
99         Serial.println(state2);
100        // while (true);
101    }
102
103    vTaskSuspend(NULL);
104}

```

```
102     else
103     {
104         Serial.println("Se estan recibiendo datos en este
105         momento...");  

106     }
107 }
108
109
```

Código II.2: Tarea para envío de actualización de RTC desde estación base

```
1
2
3 //Se activa una vez se reciben todos los paquetes Lora...
4 void send_mqtt(void *pvParameters){
5     while(true){
6
7         if(xQueueReceive(xQueueBufferACL, &bufferaceleracion,
8             portMAX_DELAY)){
9             Serial.println("Recibido de la cola BufferACL");
10        } else {
11            Serial.println("Error recibiendo de la cola BufferACL
12            ");
13        }
14
15        sendAxis("esp32/x", "x", bufferaceleracion.bufferX,
16             ARRAY_SIZE);
17        sendAxis("esp32/y", "y", bufferaceleracion.bufferY,
18             ARRAY_SIZE);
19        sendAxis("esp32/z", "z", bufferaceleracion.bufferZ,
20             ARRAY_SIZE);
21
22    }
23
24}
```

```

19         // Wait for some time before publishing again
20
21         vTaskResume(xHandle_keepalive_task);
22
23     }

```

Código II.3: Tarea de envío de datos de aceleración vía MQTT

```

1
2 void sendAxis(const char* topic, char* axis, const float* data,
3   size_t dataSize) {
4
5   DynamicJsonDocument doc(15000);
6
7
8   //Crea arreglo JSON
9   JSONArray array = doc.createNestedArray(axis);
10
11
12   //Genera el arreglo a partir del float array
13   for (size_t i = 0; i < dataSize; i++) {
14     // Limit the float to 2 decimal places
15     float value = round(data[i] * 100.0) / 100.0;
16     array.add(value);
17   }
18
19
20   //Convierte el documento a string
21   String json;
22   serializeJson(doc, json);
23
24
25   //Publica al topico escogido
26   if(mqttClient.publish(topic, json.c_str()))
27   {
28     Serial.println("Mensaje publicado en topico MQTT");
29   } else {
30     Serial.println("Error publicando mensaje en topico
MQTT");
31   }

```

```
26     }
27 }
```

Código II.4: Tarea de conversión a tipo JSON de un eje de aceleración

```
1
2     void send_mqtt_thi(void *pvParameter){
3         while(1){
4             vTaskSuspend(xHandle_keepalive_task);
5
6             THIPacket thipacket;
7
8             // Recibe arreglos de la cola
9             if(xQueueReceive(xQueueTempHumInc , &thipacket ,
10                portMAX_DELAY)){
11                 Serial.println("Recibido de la cola TempHumInc");
12             } else {
13                 Serial.println("Error recibiendo de la cola
14 TempHumInc");
15             }
16
17             sendTHI("esp32/temp" , thipacket.temperature);
18             sendTHI("esp32/hum" , thipacket.humidity);
19             sendTHI("esp32/inc_y" , thipacket.yaw);
20             sendTHI("esp32/inc_p" , thipacket.pitch);
21             sendTHI("esp32/inc_r" , thipacket.roll);
22             sendTHI("esp32/timestamp" , (float)thipacket.timestamp);
23
24             vTaskResume(xHandle_send_mqtt);
25             vTaskSuspend(NULL);
26         }
27 }
```

Código II.5: Tarea de envío de datos de variables cuasi-estáticas vía MQTT

```

1
2     void messageReceived(char* topic, byte* payload, unsigned int
length) {
3         Serial.print("Mensaje recibido en topico: ");
4         Serial.println(topic);
5
6         // Step 2: Convert payload to string
7         String message;
8         for (int i = 0; i < length; i++) {
9             message += (char)payload[i];
10        }
11
12        // Step 3: Check if the message is "ON"
13        if (message == "ON") {
14            // Step 4: Call the software ISR
15            Serial.println("Peticion de datos via MQTT... Enviando
paquete Lora si no se estan enviando datos");
16            if (!transmitFlag){
17                ISR_MQTT_Request();
18            }
19        }
20    }
21
22

```

Código II.6: Tarea de callback ante recepción de datos MQTT

Apéndice III

CÓDIGO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

```
1
2 import customtkinter as ctk
3 import tkinter as tk
4 import tkinter.filedialog as fd
5 import pandas as pd
6 import numpy as np
7 import matplotlib.pyplot as plt
8 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
9 import os
10 import shutil
11 #import tkinter.filedialog
12 import paho.mqtt.client as mqtt
13 from tkinter import PhotoImage
14 import filtros
15 from datetime import datetime, timedelta
16 from tkinter import ttk
17 from PIL import Image
18 from scipy.signal import butter, filtfilt
19 from scipy.integrate import cumtrapz
20
21 #Funcion callback cuando se recibe un mensaje MQTT con el payload
22     received
23 def on_message(client, userdata, message):
24     #Chequea si el payload es "received"
25     if message.payload.decode() == "received":
26         #Crea el label con el texto y lo muestra en pantalla
```

```

26         label.configure(text="Nuevo registro disponible!")
27
28 #Funcion para enviar comando via MQTT al topico esp32/command
29 def send_mqtt_message():
30     #Publica el mensaje al topico
31     client.publish("esp32/command", "ON")
32
33     #Desactiva el boton temporalmente
34     control_button.configure(state="disabled")
35
36     #Reactiva el boton luego de 5 segundos
37     tab1.after(5000, lambda: control_button.configure(state="normal"))
38
39 #CLIENTE MQTT
40 client = mqtt.Client(mqtt.CallbackAPIVersion.VERSION2)
41 #Se conecta al broker
42 client.connect("127.0.0.1", 1883, 60) #El broker esta en
43     localhost
44 #Configura la funcion callback a llamar cuando se recibe mensaje
45 client.on_message = on_message
46 #Se suscribe al topico de alerta o notificacion de recepcion
47 client.subscribe("esp32/alerta_rx")
48 #Inicia el loop que mantiene la conexion de MQTT y gestiona los
49     mensajes
50 client.loop_start()
51
52 ctk.set_appearance_mode("Light")
53 ctk.set_default_color_theme("green")
54
55 #VENTANA PRINCIPAL
56 window = ctk.CTk()
57 window.title("INTERFAZ DE MONITOREO DE CONTROL - SISTEMA ESP32
58             JOSE TOVAR")

```

```

56
57
58 #Crea 2 tabs
59 notebook = ctk.CTkTabview(window, anchor="nw")
60
61 # Frames de cada tab
62 tab1 = notebook.add('Tab 1')
63 tab2 = notebook.add('Tab 2')
64
65 #columnas
66 tab1.columnconfigure(0, weight=1)
67 tab1.columnconfigure(1, weight=1)
68 tab1.columnconfigure(2, weight=1)
69
70
71 image = Image.open("C:\\\\Users\\\\jatov\\\\Documents\\\\Universidad\\\\TEG
    \\\\CosasTEG_JT\\\\FFT-Python\\\\Códigos-Python\\\\IMME.jpg")
72 background_image = ctk.CTkImage(image, size=(100, 100))
73 # Create a label with the image
74 image_label = ctk.CTkLabel(tab1, image=background_image, text="")
75 # Place the label in the grid
76 image_label.grid(column=0, row=0, sticky='n')
77
78
79 image2 = Image.open("C:\\\\Users\\\\jatov\\\\Documents\\\\Universidad\\\\
    TEG\\\\CosasTEG_JT\\\\FFT-Python\\\\Códigos-Python\\\\angulos.png")
80 pruebaang = ctk.CTkImage(image2, size=(130, 130))
81 # Create a label with the image
82 image_label = ctk.CTkLabel(tab2, image=pruebaang, text="")
83 # Place the label in the grid
84 image_label.grid(column=0, row=2, sticky='n')
85
86
87 #SECCION DE CONTROL

```

```

88 control_frame = ctk.CTkFrame(tab1)
89 control_frame.grid(column=0, row=0, sticky='n', pady=170, padx
=10)
90 #Crea label para seccion de control
91 control_label = ctk.CTkLabel(control_frame, text="Seccion de
    Control", font=("Arial", 14, "bold"))
92 control_label.pack()
93 #Crea boton para seccion de control
94 control_button = ctk.CTkButton(control_frame, text="Obtener
    registro", command=send_mqtt_message)
95 control_button.pack(pady=10)
96
97 #LISTA DE ARCHIVOS
98 folder_path = "C:\\\\Users\\\\jatov\\\\Documents\\\\Universidad\\\\TEG\\\\
    Pruebas_DatosAceleracion\\\\DatosACL_P1"
99 file_names = os.listdir(folder_path)
100
101 #crea el frame para los archivos
102 frameArchivos = ctk.CTkFrame(tab1)
103 frameArchivos.grid(column=1, row=3)
104
105 label = ctk.CTkLabel(frameArchivos, text="No hay registros nuevos
    ")
106 label.grid(column=0, row=1, padx = 5)
107
108 selected_file_name = ctk.StringVar(tab1)
109 selected_file_name.set("Seleccione un registro")
110 #MENU DROPODOWN PARA ESCOGER ARCHIVO
111 option_menu = ctk.CTkOptionMenu(master=frameArchivos, variable=
    selected_file_name, values=file_names)
112 option_menu.grid(column=0, row=2)
113
114 # Funcion para actualizar lista de archivos
115 def update_file_list(option_menu):

```

```

116     #Consigue la lista de archivos disponibles
117     file_names = os.listdir(folder_path)
118
119     # Sort the files by modification time
120     file_names.sort(key=lambda x: os.path.getmtime(os.path.join(
121         folder_path, x)))
122
123     # Destroy the existing CTkOptionMenu widget
124     option_menu.destroy()
125
126     # Create a new CTkOptionMenu widget with the updated options
127     option_menu = ctk.CTkOptionMenu(master=frameArchivos,
128                                     variable=selected_file_name, values=file_names)
129     option_menu.grid(column=1, row=1)
130
131
132     # #Configura un timer para actualizar la lista cada 5
133     # segundos
134     # tab1.after(5000, update_file_list)
135
136 #FIGURA DE ACELERACION
137 fig, ax = plt.subplots()
138 fig.suptitle('REGISTRO DE ACELERACION EN TIEMPO', fontsize=10,
139               fontweight='bold')
140 #fig.set_facecolor('lightgray')
141 #fig.set_edgecolor('black')
142 fig.set_alpha(0.5)
143 canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=tab1)
144 widget = canvas.get_tk_widget()
145 widget.grid(column=1, row=0)
146 widget.config(bd = 2, relief = "groove")

```

```

146 #FIGURA PARA FFT
147 fig_fft, ax_fft = plt.subplots()
148 fig_fft.suptitle('ESPECTRO EN FRECUENCIA DEL REGISTRO', fontsize
149 =10, fontweight='bold')
150 #fig.set_facecolor('lightgray')
151 canvas_fft = FigureCanvasTkAgg(fig_fft, master=tab1)
152 widget_fft = canvas_fft.get_tk_widget()
153 widget_fft.grid(column=2, row=0)
154 widget_fft.config.bd = 2, relief = "groove" #'flat', 'raised', ,
155 sunken', 'ridge', 'groove' and 'solid'.
156
157 #FIGURA DE PSD
158 figpsd, ax_psd = plt.subplots()
159 figpsd.suptitle('DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA', fontsize=10,
160 fontweight='bold')
161 #figpsd.set_facecolor('lightgray')
162 #figpsd.set_edgecolor('black')
163 figpsd.set_alpha(0.5)
164 canvas_psd = FigureCanvasTkAgg(figpsd, master=tab2)
165 widget_psd = canvas_psd.get_tk_widget()
166 widget_psd.grid(column=1, row=0)
167 widget_psd.config.bd = 2, relief = "groove"
168
169 #FIGURA DE BARRA
170 figbar, ax_bar = plt.subplots()
171 figbar.suptitle('GRAFICA DE BARRAS PARA VER INCLINACION EN SENSOR
172 INTELIGENTE', fontsize=10, fontweight='bold')
173 #figpsd.set_facecolor('lightgray')
174 #figpsd.set_edgecolor('black')
175 figbar.set_alpha(0.5)
176 canvas_bar = FigureCanvasTkAgg(figbar, master=tab2)
177 widget_bar = canvas_bar.get_tk_widget()
178 widget_bar.grid(column=0, row=0)
179 widget_bar.config.bd = 2, relief = "groove")

```

```

176
177 label_nivel = ctk.CTkLabel(master=tab2, text="No se ha
    seleccionado un archivo.", font=("Arial", 14, "bold"))
178 label_nivel.grid(column=0, row=1)
179
180
181
182 #FRAME DE ABAJO A LA DERECHA
183 frameVentanas = ctk.CTkFrame(tab1)
184 frameVentanas.grid(column=2, row=2)
185 windowing_label = ctk.CTkLabel(master=frameVentanas, text=""
    Aventanamiento")
186 windowing_label.grid(column=1, row=1, padx=5, pady= 5)  # Adjust
    the grid position as needed
187
188 #AVENTANAMIENTO
189 windowing_functions = ['Ninguno', 'Hanning', 'Hamming', 'Blackman',
    ]
190 #Guarda aventanamiento seleccionado
191 selected_windowing_function = ctk.StringVar()
192 #Configura el aventanamiento default
193 selected_windowing_function.set(windowing_functions[0])
194
195 #Crea el menu dropdown de aventanamientos
196 windowing_menu = ctk.CTkOptionMenu(master=frameVentanas, variable
    =selected_windowing_function, values=windowing_functions)
197 windowing_menu.grid(column=2, row=1, padx=5, pady= 5)  # Adjust
    the grid position as needed
198
199 #FUNCION DE GUARDADO EN CSV
200 def save_file():
201     #Pregunta al usuario el archivo a escoger
202     dest_filename = ctk.filedialog.asksaveasfilename(
        defaultextension=".csv")

```

```

203
204     #Si el usuario no cancela el dialogo
205     if dest_filename:
206
206         #Copia el archivo actual en la direccion especificada
207         shutil.copyfile(folder_path + "\\" + selected_file_name.
208                         get(), dest_filename)
209
209 #Crea el boton para guardar CSV en pantalla
210 save_button = ctk.CTkButton(tab1, text="Guardar CSV", command=
211                             save_file)
211 save_button.grid(column=2, row=3)
212
213 # VALORES ACTUALES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
214 #Crea frame de temperatura y humedad
215 frameTH = ctk.CTkFrame(tab1, bg_color="lightgray")
216 frameTH.grid(column=2, row=1, pady = 5)
217 #Crea los labels de temperatura y humedad con color
218 current_value_label_x = ctk.CTkLabel(frameTH, text="Variables
219 ambientales:", font=("Arial", 14, "bold"))
219 current_value_label_x.grid(column=1, row=1, padx=5)
220 current_value_label_x = ctk.CTkLabel(frameTH, text="Humedad
221 relativa:", font=("Arial", 14, "bold"), corner_radius=50,
222 fg_color="darkgray")
221 current_value_label_x.grid(column=2, row=1, padx=10)
222 current_value_label_y = ctk.CTkLabel(frameTH, text="Temperatura:",
223                                         font=("Arial", 14, "bold"), corner_radius=50, fg_color="
224 darkgray")
223 current_value_label_y.grid(column=3, row=1, padx=10)
224
225 # VALORES ACTUALES DE INCLINACION
226 #Crea el frame donde se mostraran las inclinaciones
227 frameInc = ctk.CTkFrame(tab1, bg_color="lightgray")
228 frameInc.grid(column=1, row=1, pady = 5)
229 #Labels de valor actual de inclinacion

```

```

230 current_value_label_inc = ctk.CTkLabel(frameInc, text=""
231     Inclinacion:", font=("Arial", 14, "bold"))
232 current_value_label_inc.grid(column=1, row=1, padx=5)
233
233 current_value_label_roll = ctk.CTkLabel(frameInc, text="Omega:",
234     font=("Arial", 14, "bold"), corner_radius=50, fg_color=""
235     darkgray)
234 current_value_label_roll.grid(column=2, row=1, padx=10)
235 current_value_label_pitch = ctk.CTkLabel(frameInc, text="Phi:",
236     font=("Arial", 14, "bold"), corner_radius=50, fg_color=""
237     darkgray)
236 current_value_label_pitch.grid(column=3, row=1, padx=10)
237 current_value_label_yaw = ctk.CTkLabel(frameInc, text="Kappa:",
238     font=("Arial", 14, "bold"), corner_radius=50, fg_color=""
239     darkgray)
239 current_value_label_yaw.grid(column=4, row=1, padx=10)
240
240 #FECHA Y HORA DE REGISTRO
241 time_label = ctk.CTkLabel(tab1, text="No se ha escogido ningun
242     registro")
242 time_label.grid(column=1, row=4)
243
244 #FUNCION PRINCIPAL DE ACTUALIZACION DE PLOTS
245 def update_plots():
246     #Obtiene el nombre del archivo seleccionado
247     file_name = selected_file_name.get()
248
249     #Borra los contenidos previos del label para no solapar
250     label.configure(text = "No hay registros nuevos")
251
252     #Lee el archivo CSV y asigna nombres a las columnas por orden
253     df = pd.read_csv(os.path.join( folder_path, file_name),
254         header=None, names=[ 'x', 'y', 'z', 'temp', 'hum', 'yaw', '
255         pitch', 'roll', 'time'])

```

```

254
255     #Extrae las columnas x,y,z
256     x = df[ 'x' ]
257     y = df[ 'y' ]
258     z = df[ 'z' ]
259     temp = df[ 'temp' ].iloc[0] #Extrae solo el valor de la primera
260     fila
261     hum = df[ 'hum' ].iloc[0]
262     yaw = df[ 'yaw' ].iloc[0]
263     pitch = df[ 'pitch' ].iloc[0]
264     roll = df[ 'roll' ].iloc[0]
265     time = df[ 'time' ].iloc[0]
266
267     if(pitch < -1 or pitch > 1):
268         label_nivel.configure(text="El sensor no esta nivel en el
269         eje y (Phi).", font=("Arial", 14, "bold"))
270     elif(roll < -1 or roll > 1):
271         label_nivel.configure(text="El sensor no esta a nivel en
272         el eje x (Omega).", font=("Arial", 14, "bold"))
273     else:
274         label_nivel.configure(text="El sensor esta a nivel.", font=("Arial", 14, "bold"))
275
276     #Lista de angulos
277     angles = [pitch, roll]
278     labels = [ 'Phi' , 'Omega' ]
279
280     #Convierte de UNIX epoch a datetime
281     time = datetime.fromtimestamp(df[ 'time' ].iloc[0]) + timedelta
282     (hours=4) #Diferencia de 4 horas por GMT
283
284     #Actualiza la etiqueta de tiempo
285     time_label.configure(text="Fecha y Hora del registro: " + str

```

```

        (time))

283
284     #Actualiza los labels de valores actuales de temperatura,
humedad e inclinacion
285     current_value_label_x.configure(text="Humedad relativa: " +
str(hum) + "%")
286     current_value_label_y.configure(text="Temperatura: " + str(
temp))
287     current_value_label_yaw.configure(text="Kappa: " + str(yaw))
288     current_value_label_pitch.configure(text="Omega: " + str(roll
))
289     current_value_label_roll.configure(text="Phi: " + str(pitch))
290
291     # Aplica el aventanamiento seleccionado a los datos de
aceleracion
292     if selected_windowing_function.get() == 'Hanning':
293         window = np.hanning(len(x))
294     elif selected_windowing_function.get() == 'Hamming':
295         window = np.hamming(len(x))
296     elif selected_windowing_function.get() == 'Blackman':
297         window = np.blackman(len(x))
298     elif selected_windowing_function.get() == 'Ninguno':
299         window = 1 # No windowing
300
301     windowed_data_x = x * window
302     windowed_data_y = y * window
303     windowed_data_z = z * window
304
305     #Aplica FFT en datos aventanados con la funcion escogida
306     fft_1 = np.fft.fft(windowed_data_x)
307     fft_2 = np.fft.fft(windowed_data_y)
308     fft_3 = np.fft.fft(windowed_data_z)
309
310     # Calculate the PSD

```

```

311     xfil_psd = np.abs(fft_1)**2
312     yfil_psd = np.abs(fft_2)**2
313     zfil_psd = np.abs(fft_3)**2
314
315     #Obtiene las frecuencias positivas de la FFT
316     freq = np.fft.fftfreq(len(x), d=1/200) # d is the inverse of
317     the sampling rate
318     positive_freq = freq[:len(freq)//2]
319
320     #Limpia la grafica anterior
321     ax.clear()
322     ax_fft.clear()
323     ax_psd.clear()
324     ax_bar.clear()
325
326     # Genera eje de tiempo
327     start_time = datetime.fromtimestamp(df['time'].iloc[0])
328
329     timearr = [start_time + timedelta(seconds=i/200) for i in
330     range(len(x))]
331
332     #Grafica los nuevos datos
333
334     #ACCELERACION
335     ax.plot(timearr, x, label='ACL X')
336     ax.plot(timearr, y, label='ACL Y')
337     ax.plot(timearr, z, label='ACL Z')
338     ax.set_xlabel('Tiempo (s)')
339     ax.set_ylabel('Aceleracion')
340     ax.grid(True)
341
342     #FFT SIN FILTRAR
343
344     xfil = fft_1

```

```

343     yfil = fft_2
344     zfil = fft_3
345
346     #FFT filtrada
347     # xfil = filtros.butter_lowpass_filter(fft_1, 40, 200, 5)
348     # yfil = filtros.butter_lowpass_filter(fft_2, 40, 200, 5)
349     # zfil = filtros.butter_lowpass_filter(fft_3, 40, 200, 5)
350
351     #FFT
352     ax_fft.plot(positive_freq, np.abs(xfil[:len(positive_freq)]),
353                  label='Espectro Eje X')
353     ax_fft.plot(positive_freq, np.abs(yfil[:len(positive_freq)]),
354                  label='Espectro Eje Y')
354     ax_fft.plot(positive_freq, np.abs(zfil[:len(positive_freq)]),
355                  label='Espectro Eje Z')
355
356     ax_fft.set_xlabel('Frecuencia (Hz)')
357     ax_fft.set_ylabel('Amplitud')
358     ax_fft.grid(True)
359
360     #Grafica la densidad espectral de potencia
361     ax_psd.plot(positive_freq, np.abs(xfil_psd[:len(positive_freq)]),
362                  label='Densidad Espectral X')
362     ax_psd.plot(positive_freq, np.abs(yfil_psd[:len(positive_freq)]),
363                  label='Densidad Espectral Y')
363     ax_psd.plot(positive_freq, np.abs(zfil_psd[:len(positive_freq)]),
364                  label='Densidad Espectral Z')
364     #ax_psd.set_yscale('log')
365     ax_psd.set_xlabel('Frequency (Hz)')
366     ax_psd.set_ylabel('Power Spectral Density')
367     ax_psd.grid(True)
368
369     #Grafico de barras para inclinacion
370     ax_bar.axhline(1, color='r', linestyle='--')

```

```

371     ax_bar.axhline(-1, color='r', linestyle='--')
372     ax_bar.bar(labels, angles)
373     ax_bar.set_title('Diagrama de barras para inclinacion en'
374                       'sensor inteligente')
375     ax_bar.set_xlabel('Angulo')
376     ax_bar.set_ylabel('Grados')
377
378     #Obtiene las frecuencias maximas de cada eje
379     max_freq1 = positive_freq[np.argmax(np.abs(xfil[:len(positive_freq)]))]
380     max_freq2 = positive_freq[np.argmax(np.abs(yfil[:len(positive_freq)]))]
381     max_freq3 = positive_freq[np.argmax(np.abs(zfil[:len(positive_freq)])�)]
382
383     median_freq = positive_freq[len(positive_freq)//2]
384
385     #Muestra las frecuencias maximas en la grafica
386     ax_fft.annotate(f'Fmax_X: {max_freq1:.2f}', xy=(max_freq1, np
387 .max(np.abs(xfil[:len(positive_freq)]))), xytext=(-10 if
388 max_freq1 > median_freq else 10,30), textcoords='offset points',
389 , arrowprops=dict(arrowstyle='->'))
390     ax_fft.annotate(f'Fmax_Y: {max_freq2:.2f}', xy=(max_freq2, np
391 .max(np.abs(yfil[:len(positive_freq)]))), xytext=(-10 if
392 max_freq2 > median_freq else 10,10), textcoords='offset points',
393 , arrowprops=dict(arrowstyle='->'))
394     ax_fft.annotate(f'Fmax_Z: {max_freq3:.2f}', xy=(max_freq3, np
395 .max(np.abs(zfil[:len(positive_freq)]))), xytext=(-10 if
396 max_freq3 > median_freq else 10,-10), textcoords='offset
397 points', arrowprops=dict(arrowstyle='->'))
398
399     #Frecuencias maximas en PSD
400     ax_psd.annotate(f'Fmax_X: {max_freq1:.2f}', xy=(max_freq1, np

```

```

    .max(np.abs(xfil_psd[:len(positive_freq)]))), xytext=(-10 if
max_freq1 > median_freq else 10,30), textcoords='offset points
', arrowprops=dict(arrowstyle='->'))
392 ax_psd.annotate(f'Fmax_Y: {max_freq2:.2f}', xy=(max_freq2, np
.max(np.abs(yfil_psd[:len(positive_freq)]))), xytext=(-10 if
max_freq2 > median_freq else 10,10), textcoords='offset points
', arrowprops=dict(arrowstyle='->'))
393 ax_psd.annotate(f'Fmax_Z: {max_freq3:.2f}', xy=(max_freq3, np
.max(np.abs(zfil_psd[:len(positive_freq)]))), xytext=(-10 if
max_freq3 > median_freq else 10,-10), textcoords='offset
points', arrowprops=dict(arrowstyle='->'))

394
395
396 ax.legend()
397 ax_fft.legend()

398
399 #Redibuja las graficas
400 canvas.draw()
401 canvas_fft.draw()
402 canvas_bar.draw()
403 canvas_psd.draw()

404
405 #Crea el boton para actualizar grafica
406 button = ctk.CTkButton(tab1, text="Actualizar grafica", command=
    update_plots)
407 button.grid(column=1, row=2)

408
409 #Ejecuta la funcion de actualizacion de archivos disponibles
410 update_file_list(option_menu)

411
412 notebook.pack(expand=True, fill='both')
413
414 #Loop principal de la ventana

```

```
415 window.mainloop()
```

Código III.1: Código para interfaz gráfica de control y monitoreo

Apéndice IV

PROGRAMAS DE POST-PROCESAMIENTO

```
1
2 %Variables iniciales
3 L = length(ACL1);
4 Fs = 200;
5 Reg = L/Fs
6 deltat = 1/Reg
7 count = 0;
8 time = [];
9
10 %Se convierten datos de string a double para poder graficarlos
11 %A = str2double(ACL1(1:5000));
12 A = str2double(ACL1);
13 B = str2double(ACL2);
14 C = str2double(ACL3);
15 time = str2double(TIME);
16
17 %Eliminacion de offset
18 A = A - mean(A);
19 B = B - mean(B);
20 C = C - mean(C);
21
22 %Kinematics FBA-11 1g = 2.5V
23 A = A*1.96; %Para convertir a m/s^2 > (9.8m/s^2)/(2.5V)
24 B = B*1.96;
25 C = C*1.96;
26
```

```

27 %Generacion de graficas en tiempo
28 plot(time, A)
29 grid on;
30 hold on;
31 plot(time, B)
32 plot(time, C)
33 legend('Eje X','Eje Z', 'Eje Y')
34 % Add axis labels
35 ylabel('Amplitud (m/s^2)')
36 xlabel('Tiempo (s)')
37
38
39 %Calculo de la FFT y graficas del espectro en frecuencia
40 NFFT = 2^nextrpow2(L);
41 Yout1 = fft(A,NFFT)/L;
42 Yout2 = fft(B,NFFT)/L;
43 Yout3 = fft(C,NFFT)/L;
44 fOut = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
45 figure;
46 plot(fOut,2*abs(Yout1(1:NFFT/2+1)))
47 hold on;
48 plot(fOut,2*abs(Yout2(1:NFFT/2+1)))
49 plot(fOut,2*abs(Yout3(1:NFFT/2+1)))
50
51 legend('Espectro eje X','Espectro eje Z', 'Espectro eje Y')
52 ylabel('Amplitud')
53 xlabel('Frecuencia (Hz)')
54
55 clearvars L;

```

Código IV.1: Programa de procesamiento de datos provenientes de tarjeta PCI-6221

//Generacion de variables iniciales

```

1
2         var xArray = msg.payload["esp32/x"]["x"];
3         var yArray = msg.payload["esp32/y"]["y"];
4         var zArray = msg.payload["esp32/z"]["z"];
5         var temp = msg.payload["esp32/temp"];
6         var hum = msg.payload["esp32/hum"];
7         var yaw = msg.payload["esp32/inc_y"];
8         var pitch = msg.payload["esp32/inc_p"];
9         var roll = msg.payload["esp32/inc_r"];
10        var time = msg.payload["esp32/timestamp"];

11
12        //FECHA Y HORA DE RECEPCION DEL REGISTRO
13        var date = new Date();
14        var path = "C:\\\\Users\\\\jatov\\\\Documents\\\\Universidad\\\\TEG
15        \\\\Pruebas_DatosAceleracion\\\\DatosACL_P1";
16
17        var filename = path + "\\\" + "data_" + date.getFullYear()
18        + "_" + (date.getMonth() + 1) + "_" + date.getDate() + "_" +
19        date.getHours() + "_" + date.getMinutes() + "_" + date.
20        getSeconds() + ".csv";
21
22        if (!Array.isArray(xArray) || !Array.isArray(yArray) || !
23        Array.isArray(zArray)) {
24            node.error("msg.payload.x, msg.payload.y, and msg.
25        payload.z must be arrays");
26            return;
27        }
28
29        var output = [];
30
31        for (var i = 0; i < xArray.length; i++) {
32            if(i == 0){
33                output.push({x: xArray[i], y: yArray[i], z:
34                zArray[i], temp: temp, hum: hum, yaw: yaw, pitch: pitch, roll:
35                roll, time: time});

```

```

27
28         output.push({x: xArray[i], y: yArray[i], z: zArray[i]
29     });
30
31
32     //return {payload:output, filename:filename};
33
34     msg.payload = output;
35     msg.filename = filename;
36
37     return msg;

```

Código IV.2: Programa de procesamiento para generación de archivos .csv en NodeRED

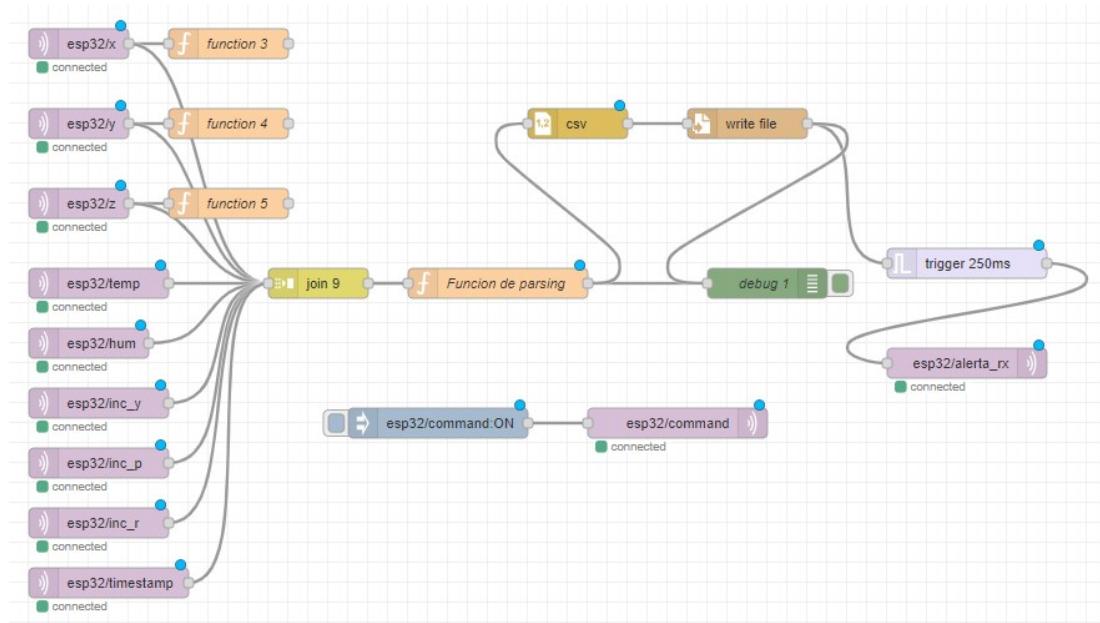


Figura IV.1: Flujo de nodered diseñado para el formateo de los datos provenientes del sistema receptor en la estación base.

REFERENCIAS

- Abdo, M. (2014). *Structural health monitoring, history, applications and future. a review book.* Open Science Publishers.
- Alfaifi, A., y Zaman, A. (2021). Mems humidity sensors. *Humidity Sensors-Types and Applications.*
- Aloufi, K. S., Alhazmi, O. H., y cols. (2020). A hybrid iot security model of mqtt and uma. *Communications and Network*, 12(04), 155.
- Andresen, S., Bäger, A., y Hamm, C. (2019, 10). Eigenfrequency maximisation by using irregular lattice structures. *Journal of Sound and Vibration*, 465, 115027. doi: 10.1016/j.jsv.2019.115027
- Balageas, D., Fritzen, C.-P., y Güemes, A. (2010). *Structural health monitoring* (Vol. 90). John Wiley & Sons.
- Basset Salom, L. (2014). Análisis estático de estructuras planas. *Universitat Politècnica de València. oai:riunet.upv.es:10251/38538.*
- Blackman, J. (2019). *Lpwa matchup / lorawan vs. sigfox vs. nb-iot vs. lte-m: technical draw (round 5).* Descargado de <https://www.rcrwireless.com/20190829/carriers/lpwa-matchup-round-five> (Consultado: 02/05/2024)
- Blanco, M. (2012). Criterios fundamentales para el diseño sismorresistente. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 27(3), 071–084.
- Chen, H.-P. (2018). *Structural health monitoring of large civil engineering structures* (Vol. 1). John Wiley & Sons Ltd.
- Comisión Nacional de Telecomunicaciones. (2010). *REFORMA DE LAS CONDICIONES PARA LA CALIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE USO*

- LIBRE.* Norma. Descargado de http://www.conatel.gob.ve/files/consulta/2011/2_PA_EUL_CP_PROYECTO_WEB.pdf
- Comisión Venezolana de Normas Industriales. (2019). *Norma COVENIN 1756-1:2019 CONSTRUCCIONES SISMORRESISTENTES - PARTE 1: REQUISITOS.* Norma. Descargado de <https://comisionpresidencialucv.gob.ve/wp-content/uploads/2024/01/Normas.pdf>
- Dunn, W. (2005). *Introduction to instrumentation, sensors, and process control.* Artech.
- Enckell, M. (2006). *Structural health monitoring using modern sensor technology: long-term monitoring of the new årsta railway bridge* (Tesis Doctoral no publicada). KTH.
- Ewald, W. (2021). *Mpu9250 - 9-axis sensor module - part 1.* Descargado de <https://wolles-elektronikkiste.de/en/mpu9250-9-axis-sensor-module-part-1> (Consultado: 28/12/2023)
- Farrar, C. R., y Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303–315.
- Federici, R., Fabio y Alesii. (2014). Design of wireless sensor nodes for structural health monitoring applications. *Procedia Engineering*, 87, 1298–1301.
- Francone, M., Domenicali, D., y Di Benedetto, M.-G. (2006, 12). Time-varying interference spectral analysis for cognitive uwb networks. En (p. 3205 - 3210). doi: 10.1109/IECON.2006.348076
- Frank, R. (2002). Understanding smart sensors 2nd edn. *Measurement Science and Technology*, 13(9), 1501–1502.
- FreeRTOS. (2024). *Freertos documentation.* Descargado de https://www.freertos.org/Documentation/RTOS_book.html (Consultado: 18/01/2024)
- Fritzen, C. P. (2005). Vibration-based structural health monitoring–concepts and applications. *Key Engineering Materials*, 293, 3–20.

- García-Fernandez, M., Natalia y Aenlle. (2023). A review on fatigue monitoring of structures. *International Journal of Structural Integrity*, 14(2), 133–165.
- Hearn, G., y Testa, R. B. (1991). Modal analysis for damage detection in structures. *Journal of structural engineering*, 117(10), 3042–3063.
- Hibbeler, R. C., y Nolan, G. (1997). *Structural analysis*. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey New Jersey.
- Hurtado, J. E. (2000). Introducción a la dinámica de estructuras. *Universidad Nacional de Colombia SEDE Manizales*.
- Irvine, T. (2000). An introduction to frequency response functions. *Rapport, College of Engineering and Computer Science, 2000*.
- Jin, S.-S., Jeong, S., y Sim. (2021, 06). Fully automated peak-picking method for an autonomous stay-cable monitoring system in cable-stayed bridges. *Automation in Construction*, 126, 103628. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103628
- Khorsandi, K., y Jalalizad, S. (2023). *Performance evaluation of lora networks for air-to-ground communications*.
- Komarizadehasl, S. (2022). Development of low-cost sensors for structural health monitoring applications. *Sensors*. Descargado de <http://hdl.handle.net/2117/379464>
- Lamkin-Kennard, K. A., y Popovic, M. B. (2019). Sensors: Natural and synthetic sensors. *Biomechatronics*, 81–107.
- Li, J., Deng, J., y Xie, W. (2015, 04). Damage detection with streamlined structural health monitoring data. *Sensors*, 15, 8832-8851. doi: 10.3390/s150408832
- Madgwick, S., y cols. (2010). An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Report x-io and University of Bristol (UK)*, 25, 113–118.
- Mechatronics, N. (2016). *Tutorial mpu6050, acelerómetro y giroscopio*. Descargado de https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial

- mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html (Consultado: 20/12/2023)
- Mechatronics, N. (2023). Sensor bme280 presión, temperatura y humedad. Descargado de <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-iniciales-gps/357-sensor-bme280-presion-temperatura-y-humedad.html> (Consultado: 15/12/2023)
- Montagny, S. (2021). Lora-lorawan and internet of things. *Université Savoie Mont Blanc. Available on: https://www.univ-smb.fr/lorawan/en/free-book/.* (Accessed on 23.03. 2022).
- Muttillo, M. (2019). Structural health continuous monitoring of buildings—a modal parameters identification system. En *2019 4th international conference on smart and sustainable technologies (splitech)* (pp. 1–4).
- Nagayama, B. F., Tomonori y Spencer Jr. (2007). Structural health monitoring using smart sensors. *Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series 001*.
- Ogdol, J. M., Ogdol, G., y Samar, B.-L. (2018, 12). IoT-based framework for a centralized monitoring of solid waste disposal facilities.
- Proakis, J. G., y Manolaki, D. G. (1999). Digital signal processing. principles, algorithms, and applications. *Journal of Computer Science and Technology*, 1 (1), 1.
- Rytter, A. (1993). Vibration based inspection of civil engineering structures ph. d. *Aalborg University, Aalborg, Denmark*.
- Semtech. (2015). Sx1276/77/78/79 - 137 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver datasheet. Descargado de <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1278> (Consultado: 10/01/2024)
- Sharma, B., y Kumar, S. (2006, 07). Characteristics evolution of indigenously designed and developed tri-axial force balance accelerometer. *Journal of scientific and industrial research*, 65.
- Shi, Z., Law, S., y Zhang, L. (1998). Structural damage localization from modal

- strain energy change. *Journal of sound and vibration*, 218(5), 825–844.
- Siemens. (2019). *What is the fourier transform?* Descargado de <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-the-fourier-transform> (Consultado: 04/05/2024)
- Sohn, H. (2007). Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 539–560.
- Song, E. Y., y Lee, K. (2008). Understanding ieee 1451-networked smart transducer interface standard-what is a smart transducer? *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 11(2), 11–17.
- Survey, U. S. G. (2011). *Earthquake hazards program*. Descargado de <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/background.php> (Consultado: 04/05/2024)
- Systems, E. (2016). *Esp-idf programming guide*. Descargado de <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/index.html> (Consultado: 15/11/2024)
- Worden, K., y Friswell, M. I. (2009). Modal-vibration-based damage identification. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*.
- Zhang, W., Sun, L., y Sun, S. (2017). Bridge-deflection estimation through inclinometer data considering structural damages. *Journal of Bridge Engineering*, 22(2), 04016117.