



Desarrollo de un prototipo de sistema de monitorización de vibraciones para la salud estructural de edificaciones ante sismos basado en el Internet de las Cosas.

Barreno Riera, Marco Polo y Landázuri Avilés, Bryan Xavier

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica, Automatización y Control

Ing. Arcos Avilés, Diego Gustavo, Ph. D.

3 de febrero del 2023

26/1/23, 8:40

Tesis Barreno_Landázuri

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

Revision Tesis

NOMBRE DEL ALUMNO

MARCO POLO BARRENO RIERA



NOMBRE DEL ARCHIVO

MARCO POLO BARRENO RIERA - Documento sin título

SE HA CREADO EL INFORME

26 ene 2023

Resumen

Fragmentos marcados	15	2 %
Fragmentos citados o entrecomillados	8	1 %

Coincidencias de la Web

docplayer.es	8	1 %
redalyc.org	1	0,2 %
aliexpress.com	1	0,2 %
unicen.edu.ar	2	0,2 %
puce.edu.ec	1	0,1 %
unam.mx	1	0,1 %
udlap.mx	1	0,1 %
doccity.com	1	0,1 %
microchipotle.com	1	0,1 %
revistaespacios.com	1	0,1 %
sandorobotics.com	1	0,1 %
opencircuit.es	1	0,1 %
luisllamas.es	1	0,1 %
unsj.edu.ar	1	0,1 %
filtrosbutterworthw.blogspot.com	1	0,1 %

1 de 23 fragmentos

Fragmento del alumno MARCADO

Las redes de sensores inalámbricos (WSN, del inglés Wireless Sensor Network) están formadas por pequeños nodos. Su arquitectura se compone de elementos tales como sensores...

[Mejor coincidencia en la Web](#)



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Desarrollo de un prototipo de sistema de monitorización de vibraciones para la salud estructural de edificaciones ante sismos basado en el Internet de las Cosas”** fue realizado por los señores **Barreno Riera, Marco Polo y Landázuri Avilés, Bryan Xavier**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 02 de febrero del 2023

Firma:



.....
Ing. Arcos Avilés, Diego Gustavo, Ph. D.

C. C. 1710879444



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Barreno Riera, Marco Polo** y **Landázuri Avilés, Bryan Xavier**, con cédulas de ciudadanía n° 0550052955 y n° 1720477544, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Desarrollo de un prototipo de sistema de monitorización de vibraciones para la salud estructural de edificaciones ante sismos basado en el Internet de las Cosas** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de enero del 2023

Barreno Riera, Marco Polo

C.C.: 0550052955

Landázuri Avilés, Bryan Xavier

C.C.: 1720477544



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Autorización de Publicación

Nosotros **Barreno Riera, Marco Polo** y **Landázuri Avilés, Bryan Xavier**, con cédulas de ciudadanía n° 0550052955 y n° 1720477544, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Desarrollo de un prototipo de sistema de monitorización de vibraciones para la salud estructural de edificaciones ante sismos basado en el Internet de las Cosas** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 30 de enero del 2023

Barreno Riera, Marco Polo

C.C.: 0550052955

Landázuri Avilés, Bryan Xavier

C.C.: 1720477544

Dedicatoria

Este proyecto va dedicado: A mis padres y a mi hermana. Por su apoyo incondicional, por ser mi soporte durante esta travesía en la Universidad. A mis amigos, que sin ellos no hubiera llegado hasta donde estoy ahora. Por ser esa motivación e inspiración para superarme y crecer.

Gracias a todos ustedes, por los gratos momentos de felicidad y ser ese pilar que siempre estará para poder superar las adversidades.

Muchas gracias.

Marco Polo Barreno Riera

Este proyecto va dedicado:

A mi madre por siempre ser mi apoyo y nunca rendirse en hacerme una mejor persona, a mi padre quien me animó a seleccionar la carrera y lo interesante que puede ser, a mis hermanas que siempre me estuvieron apoyando y aconsejando. A mi familia y a mis amigos que me ayudaron a crecer como persona y profesional.

A las personas que marcaron un antes y un después en mi vida, que brindaron gratos momentos de felicidad para superar las adversidades.

Muchas gracias

Bryan Xavier Landazuri Avilés

Agradecimiento

Agradezco al Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por el conocimiento, aprendizaje y experiencia adquirida en esta etapa académica de mi vida.

A mi familia por su apoyo incondicional. A mi padre por siempre motivarme desde pequeño a no conformarme con lo mínimo, sino esforzarme en conseguir lo mejor, sin importar las adversidades que se deban atravesar, lo intentamos, y si lo logramos es un obstáculo superado. A mi madre por siempre estar presente, ya que sin ella ya me habría rendido desde hace mucho tiempo de este camino.

A mi amigo Bryan Landázuri por brindarme su amistad desde los inicios de la Universidad hasta este punto. Estoy en total agradecimiento por tu colaboración en el proyecto e igual siempre dando ánimos en momentos difíciles para poder solventar los obstáculos que tuvimos en este proyecto.

A todos los profesores que conocí en mi etapa de la Universidad, por inculcarme la empatía con las demás personas e innovar en beneficio del pueblo, apoyar con el conocimiento obtenido a las personas más vulnerables, además del conocimiento necesario para culminar con la carrera.

Marco Polo Barreno Riera

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y al Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por el conocimiento, aprendizaje y experiencia que me brindaron durante mi etapa en la universidad. A los docentes por su guía y apoyo brindado para la realización de este proyecto, gracias por toda la paciencia y el conocimiento contribuido para innovar en beneficio de la sociedad.

A mi familia que me brindó su apoyo incondicional y excelentes consejos para superar las diferentes adversidades. A mis amigos que me ayudaron a superarme con esa motivación e inspiración. A las personas que han estado presente en este proceso de titulación y han puesto su granito de arena.

A mi amigo Marco Barreno por brindarme su amistad desde los inicios de la Universidad hasta este punto. Estoy en total agradecimiento por tu colaboración en el proyecto e igual siempre dando ánimos en momentos difíciles para poder solventar los obstáculos que tuvimos en este proyecto.

A los Puñales, el grupo que se formó por casualidad en la universidad y que al final fuimos el apoyo que necesitábamos dentro de la misma. Al grupo LoL entre panas, que se formó por la pandemia para divertirnos en juegos online y ha sido una ayuda para distraerme de la universidad, aunque siempre trolean y toca carrearlos.

Bryan Xavier Landazuri Avilés

Índice

Análisis de similitud	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen.....	18
Abstract	19
Capítulo I.....	20
Introducción.....	20
Antecedentes	20
Justificación.....	25
Alcance del proyecto.....	28
Objetivos.....	30
<i>Objetivo General</i>	30
<i>Objetivos específicos</i>	30
Capítulo II.....	32
Marco Conceptual.....	32
Salud Estructural	32

	10
Monitoreo de Salud Estructural	33
Comunicaciones	35
<i>Comunicaciones alámbricas</i>	36
<i>Comunicaciones inalámbricas</i>	38
Sensores	42
<i>Sensor Digital</i>	42
<i>Sensor Analógico</i>	43
<i>Acelerómetro</i>	44
Microcontrolador	47
<i>NodeMCU ESP8266</i>	48
Software	49
<i>Desarrollo web</i>	49
<i>Matlab</i>	51
Procesamiento de señales	51
<i>Transformada de Fourier</i>	52
<i>Transformada de Wavelet</i>	53
<i>Filtro Butterworth</i>	55
<i>Corrección de línea base</i>	58
Capítulo III	64
Diseño e implementación del prototipo	64
Análisis comparativo de los sensores preseleccionados	64
<i>ADXL345</i>	64

	11
<i>MMA8452</i>	65
<i>MPU6050</i>	66
<i>Comparación de sensores</i>	67
Desarrollo del nodo sensor	70
<i>Conexión del sensor</i>	70
<i>Diseño de la alimentación del nodo sensor</i>	73
Broker	78
Arquitectura propuesta.....	79
Comunicación	80
Desarrollo de las interfaces de usuario	84
<i>Desarrollo del software para la adquisición de datos (Matlab)</i>	84
<i>Desarrollo del software para el procesamiento de señales</i>	87
<i>Desarrollo de una interfaz web para la visualización</i>	92
Pruebas de calibración con respecto al instrumento patrón	94
<i>Análisis de picos positivos</i>	94
<i>Análisis de picos negativos</i>	96
Capítulo IV	98
Análisis de Resultados.....	98
Análisis de datos del edificio administrativo	98
<i>Desplazamientos relativos</i>	100
<i>Frecuencia y período natural de vibración de la estructura</i>	107
<i>Registro de Alarmas</i>	108

Capítulo V	110
Manual de Usuario.....	110
Introducción.....	110
Seismic Signal Acquisition	110
<i>Monitoreo de aceleración</i>	110
<i>Alarmas</i>	114
Seismic Signal Processing	116
<i>Ingreso de datos</i>	116
<i>Gráficas</i>	120
<i>Corrección de línea Base y Filtrado</i>	121
<i>Transformada de Fourier</i>	126
<i>Transformada Wavelet</i>	128
<i>Guardado de datos</i>	129
Conclusiones.....	134
Recomendaciones.....	135
Bibliografía.....	136

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Ventajas y desventajas de los tipos de comunicación</i>	36
Tabla 2 <i>Resumen del protocolo Wi-Fi IEEE 802.11</i>	39
Tabla 3 <i>Estándares de voltaje y corriente en sensores analógicos</i>	44
Tabla 4 <i>Valoración de la escala cuantitativa</i>	67
Tabla 5 <i>Características de los sensores digitales de aceleración</i>	68
Tabla 6 <i>Valoración de las características de los sensores digitales de aceleración</i>	68
Tabla 7 <i>Porcentaje de priorización de alternativas</i>	69
Tabla 8 <i>Descripción de los terminales de conexión del sensor MPU6050</i>	71
Tabla 9 <i>Descripción de la conexión del sensor MPU6050 con el ESP8266 NodeMCU</i>	72
Tabla 10 <i>Configuración de la corriente de carga por la resistencia programable</i>	74
Tabla 11 <i>Pruebas RSSI sin obstrucciones del nodo sensor</i>	81
Tabla 12 <i>Pruebas RSSI con obstrucciones del nodo sensor</i>	82
Tabla 13 <i>Valores de desplazamiento por eje del Sensor 3 y Sensor 1</i>	106
Tabla 14 <i>Desplazamientos relativos con respecto al Sensor 3</i>	106
Tabla 15 <i>Frecuencias de oscilación del sexto piso registrados durante la noche</i>	107

Índice de Figuras

Figura 1 Diagrama representativo de la adquisición de datos	29
Figura 2 Conceptos básicos de un SHM.....	35
Figura 3 Conexión del protocolo I2C.....	37
Figura 4 Niveles del protocolo de comunicación I2C	38
Figura 5 Sensor de aceleración. a) Sistema de placas del sensor capacitivo. b) Diagrama del sensor piezoeléctrico	45
Figura 6 Diagrama del sensor de aceleración con tecnología piezoresistiva.....	46
Figura 7 Sensor de aceleración. a) Diagrama del acelerómetro mecánico. b) Acelerómetro ST con tecnología MEMS.....	47
Figura 8 Placa NodeMCU ESP8266.....	49
Figura 9 Funcionamiento de la transformada Wavelet.....	55
Figura 10 Respuesta en magnitud para filtros Butterworth de diversos órdenes con $\epsilon = 1$	57
Figura 11 Desplazamiento continuo del acelerómetro respecto a la línea base	60
Figura 12 Acelerómetro digital ADXL345	65
Figura 13 Acelerómetro digital MMA8452.....	66
Figura 14 Sensor Acelerómetro Giroscopio MPU6050	67
Figura 15 Estructura y componentes del nodo sensor	70
Figura 16 Sensor MPU6050.....	71
Figura 17 Diagrama de conexión entre el microcontrolador ESP8266 NodeMCU y el sensor MPU6050...	73
Figura 18 Descripción de los terminales del módulo TP4056	74
Figura 19 Ciclo completo de carga de una batería de 1000mAh	76
Figura 20 Diagrama eléctrico de conexiones del nodo sensor	77
Figura 21 Arquitectura de la comunicación del proyecto	80

Figura 22 <i>Comparación de RSSI con y sin obstrucciones del nodo sensor</i>	83
Figura 23 <i>Seismic Signal Acquisition - sección adquisición de datos</i>	84
Figura 24 <i>Seismic Signal Acquisition - Ventana emergente de guardado individual</i>	85
Figura 25 <i>Seismic Signal Acquisition - sección de alarmas</i>	86
Figura 26 <i>Seismic Signal Processing - sección Ingreso de datos</i>	87
Figura 27 <i>Seismic Signal Processing - sección de Gráficas</i>	88
Figura 28 <i>Seismic Signal Processing - sección de Corrección de línea base y Filtrado</i>	89
Figura 29 <i>Seismic Signal Processing - sección de Transformada de Fourier</i>	90
Figura 30 <i>Seismic Signal Processing - sección de Transformada Wavelet</i>	91
Figura 31 <i>Seismic Signal Processing - sección de Exportación de datos</i>	92
Figura 32 <i>Descripción del proyecto mostrada en la interfaz web</i>	93
Figura 33 <i>Alarmas de la interfaz web</i>	93
Figura 34 <i>Visualización de datos de los sensores en la interfaz web</i>	94
Figura 35 <i>Comparación de las señales adquiridas por el instrumento patrón y el prototipo</i>	95
Figura 36 <i>Distribución normal del análisis de picos positivos entre el instrumento patrón y prototipo</i>	96
Figura 37 <i>Distribución normal del análisis de picos negativos entre el instrumento patrón y prototipo</i> ...	97
Figura 38 <i>Ubicación y distribución de ejes de los nodos sensores</i>	98
Figura 39 <i>Ubicación del nodo sensor en el primer piso del edificio</i>	99
Figura 40 <i>Ubicación del nodo sensor en el sexto piso del edificio</i>	99
Figura 41 <i>Picos máximos registrados durante el período de muestreo</i>	100
Figura 42 <i>Pico máximo de aceleración del Sensor 3 - Eje X</i>	101
Figura 43 <i>Pico máximo de aceleración del Sensor 3 - Eje Y</i>	101
Figura 44 <i>Pico máximo de aceleración del Sensor 3 - Eje Z</i>	102
Figura 45 <i>Pico máximo de desplazamiento y tiempo del Sensor 3 – Eje X</i>	102

Figura 46 Pico máximo de desplazamiento y tiempo del Sensor 3 – Eje Y.....	103
Figura 47 Pico máximo de desplazamiento y tiempo del Sensor 3 – Eje Z.....	103
Figura 48 Valor de desplazamiento registrado en un tiempo de 7614.474 [s] del Sensor 1 – Eje X.....	104
Figura 49 Valor de desplazamiento registrado en un tiempo de 1476.496 [s] del Sensor 1 – Eje Y.....	105
Figura 50 Valor de desplazamiento registrado en un tiempo de 167.286 [s] del Sensor 1 – Eje Z.....	105
Figura 51 Transformadas de Fourier - sensor 3.....	108
Figura 52 Seismic Signal Acquisition – Ventana de adquisición de datos	110
Figura 53 Archivo generado mediante botón de guardado general del sensor 1	111
Figura 54 Datos del Sensor 1 en formato archivo de texto (.txt)	112
Figura 55 Cursores y botón de guardado individual Sensor 1 – Eje X	112
Figura 56 Ventana emergente de guardado individual.....	113
Figura 57 Archivo generado mediante botón de guardado individual del Sensor 1 – Eje X.....	114
Figura 58 Datos del Sensor 1- Eje X en formato archivo de texto (.txt)	114
Figura 59 Seismic Signal Acquisition – Ventana de alarmas	115
Figura 60 Archivo generado automáticamente al pulsar el botón de Descarga de historial de alarmas	115
Figura 61 Datos del registro de alarmas en archivo de texto (.txt)	116
Figura 62 Seismic Signal Processing – Selección de archivo a analizar.....	116
Figura 63 Seismic Signal Processing - Ventana de Ingreso de Datos	117
Figura 64 Sección de seteo de datos a analizar.....	118
Figura 65 Sección de unidades del archivo.....	118
Figura 66 Sección de datos a ingresar	119
Figura 67 Sección de seteo para la posición de aceleración y tiempo	119
Figura 68 Seismic Signal Processing - Ventana de gráficas	120
Figura 69 Gráficas de corrección por línea base.....	121

Figura 70 <i>Filtro Pasa-Alto</i>	122
Figura 71 <i>Filtro Pasa-Banda</i>	123
Figura 72 <i>Filtro Pasa-Bajo</i>	123
Figura 73 <i>Gráficas de Corrección por Filtro</i>	124
Figura 74 <i>Tabla de valores de corrección por línea base</i>	125
Figura 75 <i>Gráficas de Corrección por línea base y Corrección por Filtro</i>	126
Figura 76 <i>Seismic Signal Processing – Ventana de Transformada de Fourier</i>	127
Figura 77 <i>Seismic Signal Processing – Ventana de Transformada Wavelet</i>	128
Figura 78 <i>Seismic Signal Processing - Ventana de exportación de datos</i>	129
Figura 79 <i>Ventana emergente para guardado de datos</i>	129
Figura 80 <i>Archivo generado al exportar datos de Seismic Signal Processing</i>	130
Figura 81 <i>Libro Datos sin Corregir</i>	131
Figura 82 <i>Libro Datos Corregidos</i>	132
Figura 83 <i>Libro Datos Fourier</i>	133

Resumen

En la presente tesis se desarrolla el diseño y arquitectura de un prototipo de sistema de monitorización de vibraciones para la salud estructural de edificaciones ante sismos basado en el Internet de las Cosas. El prototipo de sistema para el monitoreo de salud estructural (SHM, del inglés Structural Health Monitoring) se encuentra compuesto por 3 nodos sensores que cuentan con un acelerómetro triaxial MPU6050 con tecnología MEMS capacitiva, un microcontrolador NodeMCU v3 ESP8266 desarrollado con WiFi y un circuito de alimentación y recarga para una batería recargable 18650 de 6800mAh. El nodo sensor transmite los datos recopilados mediante protocolo MQTT. El prototipo se encuentra basado en el instrumento patrón NI9234 disponible en los laboratorios del departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, del cual, mediante una serie de pruebas se llegó a la conclusión que se presenta un error estimado de $1.35062 \text{ [m/s}^2\text{]}$ para picos positivos y $2.43494 \text{ [m/s}^2\text{]}$ para picos negativos. Además, se identificó que existe una variación de 0.7 [Hz] en la frecuencia de oscilación entre el instrumento patrón y el prototipo. Se desarrolló un software para el monitoreo en tiempo real de la aceleración transmitida por el nodo sensor y el procesamiento de los datos recopilados mediante herramientas como: Corrección por Línea Base, Filtrado, Transformada de Fourier y Transformada Wavelet. El proyecto fue instalado en el edificio administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, campus Sangolquí.

Palabras clave: Monitorización, salud estructural, Internet de las cosas, procesamiento de datos.

Abstract

This thesis develops the design and architecture of a prototype vibration monitoring system for structural health monitoring of buildings against earthquakes based on the Internet of Things. The prototype system for structural health monitoring (SHM) is composed of 3 sensor nodes, which have a triaxial accelerometer MPU6050 with capacitive MEMS technology, a NodeMCU v3 ESP8266 microcontroller developed with WiFi and a power and charging circuit for a rechargeable 18650 6800mAh battery. The sensor node transmits the collected data via MQTT protocol. The prototype is based on the NI9234 standard instrument available in the laboratories of the Department of Earth Sciences and Construction of the University of the Armed Forces - ESPE, from which, through a series of tests, it was concluded that there is an estimated error of 1.35062 [m/s²] for positive peaks and 2.43494 [m/s²] for negative peaks. In addition, it was identified that there is a variation of 0.7 [Hz] in the oscillation frequency between the standard instrument and the prototype. Software was developed for real-time monitoring of the acceleration transmitted by the sensor node and processing of the collected data using tools such as: Baseline Correction, Filtering, Fourier Transform and Wavelet Transform. The project was installed in the administrative building of the Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Sangolquí campus.

Keywords: Monitoring, structural health, Internet of Things, data processing.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Ecuador se encuentra ubicado en el “Cinturón de Fuego del Pacífico”, donde se llega a liberar el 85% de la energía sísmica total del planeta. Por tal razón, la presencia de terremotos es más frecuente con magnitudes superiores a seis en la escala de Richter, que provocan el retraso en el desarrollo económico y social en los sectores afectados debido a las pérdidas en infraestructura. Un ejemplo es el suceso que ocurrió el 16 de abril de 2016 en Ecuador, donde se detectó un terremoto de 7.8 [Mw] en la costa central del país. Los edificios y sus elementos estructurales no solo suelen estar expuestos a terremotos sino también a la corrosión, humedad, fatiga, reacciones químicas, deterioro, dislocaciones y variables ambientales. Por tal motivo es necesario la evaluación del comportamiento estructural del edificio a través del monitoreo inteligente de manera periódica en tiempo real para garantizar la operatividad del edificio y la seguridad de sus ocupantes. (Lanning et al., 2016)

Debido a la ubicación geográfica del Ecuador en el cinturón de fuego del Pacífico, la Placa Oceánica de Nazca y la presencia de un complejo de fallas activas locales, el país ha sufrido gran cantidad de actividad sísmica a lo largo de su historia (Parra, 2016), lo que ha generado un alto factor de vulnerabilidad sísmica en las edificaciones y una reducción de la vida útil de las estructuras. Al no tener un correcto sistema de monitorización las edificaciones presentan problemas graves, visibles únicamente cuando la situación es excesivamente crítica, donde su solución conlleva grandes gastos y en el peor de los casos puede acarrear el derribo de la estructura por daños irremediables (Safina, 2003).

Una solución a este problema es la implementación de una red de sensores inalámbricos que permita la monitorización de la salud estructural ante sismos en edificaciones, con el propósito de

generar un sistema de alerta cuyo análisis de datos ayudará a que los expertos determinen los desplazamientos y daños en la estructura. El sistema permitirá cuidar las edificaciones a largo plazo y reducir los costos asociados a reparaciones y mantenimiento (Seguel, 2019).

Las redes de sensores inalámbricos (WSN, del inglés Wireless Sensor Network) están formadas por pequeños nodos. Su arquitectura se compone de elementos tales como sensores, controladores y otros dispositivos, que permiten la comunicación entre sí para recopilar, procesar y transportar la información al operador (Comas et al., 2018). Las WSN fueron planteadas inicialmente para facilitar las operaciones militares. Sin embargo, sus aplicaciones han llegado a ser en la salud, análisis de tráfico, áreas industriales entre otras. Las WSN pueden constar de uno, cientos o miles de nodos de sensores. El equipo del nodo sensor por lo general está constituido por un transceiver de radio con antena, un microcontrolador, un circuito electrónico de interfaz y una fuente de energía, lo que lo transforma en un dispositivo multifuncional de bajo consumo para almacenar información de los entornos con el propósito de realizar aplicaciones específicas (Mejía & Salazar, 2019).

La inspección física de infraestructuras posee ciertas limitaciones y desventajas debido a que ciertos lugares son difíciles de acceder directamente, existe la necesidad de remover materiales para comprobar el estado actual de la estructura, los costos son elevados y el tiempo invertido es considerable. Por otro lado, el sistema de monitoreo de salud estructural puede optimizar este proceso para identificar el nivel de daño presente en la estructura sin una verificación visual.

La monitorización de la salud estructural emplea un equipo compuesto por sensores, acondicionadores de señal, dispositivos para adquisición de datos y soportes físicos y lógicos empleados para la interpretación de los valores adquiridos. Los dispositivos más usados para la medición son: acelerómetros, detectores de resistencia/temperatura, termocuplas, extensómetros, detectores de corrosión y transformadores lineales de voltaje/desplazamiento. Por lo general, estos dispositivos se

encuentran instalados en las estructuras y los datos que adquieren son transmitidos mediante microondas, señales de radio o fibra óptica con dirección a la central encargada de la interpretación de los datos. Estos datos se almacenarán para un análisis posterior (Marulanda et al., 2000).

La monitorización de la salud estructural se ha trabajado desde finales del siglo XIX, en épocas donde se detectaban fallas o grietas en edificaciones una vez se escuchaba las emisiones acústicas. Las técnicas de reconocimiento más utilizadas fueron de forma visual o auditiva, debido a que se carecía del avance tecnológico necesario para realizar un estudio más adecuado. Gracias al desarrollo computacional de los últimos 30 años, se han generado varias técnicas de reconocimiento basado en principios físicos y análisis más profundos. En los últimos años algunos de los factores que se monitorizan en la estructura de un edificio son: vibraciones, calidad del hormigón, inclinación, temperatura, humedad, aparición de grietas, fisuras y sus alteraciones (Quintero & Villamizar, 2010).

Organizaciones como International Association for Structural Control and Monitoring (IASCM) y American Society of Civil Engineers (ASCE) con el objetivo de “avanzar en la ciencia y la práctica del control y monitorización estructural mediante la educación, la investigación y la aplicación de conocimientos, incluida la respuesta de las estructuras a los terremotos, el viento y las fuerzas provocadas por el hombre” (GLOBAL CIVIL SOCIETY DATABASE, 2022), por medio del estudio de problemas resueltos, a través de diversos métodos empleados por investigadores e ingenieros, plantea la monitorización de la salud estructural mediante la eficiente recopilación de toda la información posible para mejorar (Marulanda et al., 2000).

Existen varios estudios en relación a este tema, en el Ecuador se ha desarrollado un sistema de monitorización para estructuras de puentes, donde se utiliza la metodología de monitorización de vibraciones en los principales puentes de la ciudad de Loja. La base principal de este estudio es el procesamiento digital de las señales de los acelerómetros, con el propósito de utilizar la información de

las variables adquiridas por la red de sensores inalámbricos, para prevenir accidentes y comunicar el estado de la estructura mediante una alarma. Los resultados fueron eficientes, debido a que a través de pruebas se pudo determinar la aceleración normal de los puentes y los umbrales de aceleración para activar la alarma e informar si el puente se encuentra en peligro de daño estructural a fin de que se tomen las debidas precauciones. (Quezada Sarmiento et al., 2018)

Otro estudio realizado en Ecuador es el diseño e implementación de un prototipo para el análisis de salud estructural de un puente en la ciudad de Durán a través de sensores inalámbricos, donde se utilizó el software Matlab para el procesamiento de datos y la realización de la interfaz gráfica. Los resultados fueron eficientes, debido a que el prototipo funcionó sin problemas y se llegó a adquirir valores de vibraciones menores a los 15 Hz, por lo que no se exceden los límites establecidos por la norma internacional PAN50. La norma PAN50 tiene como bases los estándares de la Institución de Estándares Británicos (BSI, del inglés British Standard Institute) y está orientada a los factores de impacto al que está expuesto el medio ambiente, personas y construcciones. Como resultado se obtuvo una monitorización en tiempo real y un análisis de datos a partir de las vibraciones realizadas por los vehículos que transitaban el puente (Mejía & Salazar, 2019).

El sistema SHM utiliza una red de sensores para el monitoreo y análisis de los edificios a través de técnicas encargadas de predecir y detectar daños prematuros garantizando la seguridad de la estructura. El cálculo de la velocidad y desplazamiento permite apreciar un análisis general de la estructura. Por tal motivo, existen varios estudios centrados en el diseño y análisis de sistemas de monitoreo estructural centrándose en el monitoreo de puentes y edificios (Sofi et al., 2022). Por ejemplo, para los estudios centrados en el análisis estructural de puentes de tramo largo se propone un monitoreo de salud estructural a través de tres acelerómetros de un eje, un convertidor análogo digital, un registrador de datos y un microprocesador (Lin et al., 2014). Otro ejemplo, pero en estudios enfocados en el monitoreo y análisis de edificios se propone una arquitectura de red diseñada con

sensores inalámbricos utilizando acelerómetros de bajo costo para aplicaciones SHM. En este estudio se propone estimar el desempeño del sistema de monitoreo de ediciones para sectores que usualmente suelen ser afectados por terremotos. Este sistema posee dos nodos sensores inalámbricos y un nodo sensor inalámbrico central que funciona como maestro de red. El nodo sensor inalámbrico está compuesto por una placa de desarrollo que se comunica con una unidad de almacenamiento, el sensor de aceleración y un módulo de radio (Valenti et al., 2018). Los autores (Jayawardana et al., 2016) proponen un diseño de sistema para la adquisición de aceleraciones dinámicas de la estructura a través de etiquetas de identificación por radiofrecuencia considerando el desplazamiento de frecuencia para identificar el cambio de estado de la estructura. En este estudio se utilizó acelerómetros piezoeléctricos y módulos de adquisición para obtener la frecuencia natural de la estructura.

Los sistemas de monitoreo de salud estructural también han aumentado significativamente el interés en monitorear las estructuras del patrimonio cultural. Por ejemplo, los estudios realizados en (Barsocchi et al., 2021) muestran la aplicación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de salud estructural de una torre histórica de mampostería. El estudio también presenta la generación de modelos matemáticos de la estructura a partir de la información recopilada por varios sensores. Además, el estudio muestra un acelerómetro hecho a medida con un acelerómetro piezoeléctrico de alta sensibilidad como referencia. El resultado de este estudio muestra la forma en que el sistema utilizado logró registrar datos con confiabilidad y sin interrupciones, brindando prevención y concientización de riesgos para la estructura del patrimonio cultural. Además, (Zini et al., 2022) presenta la aplicación de monitoreo continuo de salud estructural en dos torres y una escultura de la época medieval en Italia. El estudio muestra un algoritmo matemático utilizado para un análisis modal operativo automatizado. Este algoritmo es un rastreador modal de parámetros dinámicos como frecuencias principales, formas de modo y amortiguación modal. Con esto, el sistema proporcionó con éxito información más valiosa para un monitoreo continuo de salud estructural. Este estudio también

proyecta sus ideas sobre la importancia del uso y los problemas del big data en este campo. Además, el estudio de (Zonno et al., 2018) también muestra una aplicación interesante de un sistema de monitoreo de salud estructural en dos construcciones históricas emblemáticas: una iglesia de mampostería en Portugal y una iglesia de adobe en Perú. Este estudio propone una metodología para la identificación automática de los parámetros modales estructurales, el proceso utilizado contiene cuatro etapas: adquisición de datos, identificación del sistema mediante el método SSI-data, una etapa de limpieza de la señal con criterios y, por último, una detección automática mediante agrupación jerárquica. Los resultados mostraron una estimación precisa de los parámetros modales utilizando solo unos pocos sensores y una importante influencia del entorno sobre las propiedades dinámicas de la estructura. Además, los autores en (Kita et al., 2021) presentan un método para abordar la identificación de daños inducidos por terremotos en torres históricas. Finalmente, el estudio presentado en (Betti et al., 2023) informa una interpretación estadística de los parámetros de respuesta estructural realizados durante 30 años de actividad en una plataforma de acero en alta mar. Si bien este estudio representó un factor esencial en la gestión del mantenimiento de la plataforma, se destaca por el uso de una correlación entre la estructura y los datos marítimos, mostrando la consideración de parámetros ambientales. Los datos estructurales recogidos son un registro de aceleración de la estructura, y los datos de navegación son el registro de parámetros meteorológicos y comportamiento del mar, que se mide por la altura de las olas. Los resultados presentan un comportamiento estructural al igual que el diseño esperado realizado con la estructura.

Justificación

El tiempo de vida útil de una estructura como edificios, puentes, fábricas se encuentra directamente relacionado con las condiciones climáticas del entorno donde se encuentra, el análisis estructural y el mantenimiento preventivo y correctivo que se realice. Estos tres factores representan puntos clave a la hora de determinar si la estructura podría representar un riesgo para las personas del

sector. En la actualidad, gracias al avance de la tecnología se ha vuelto posible la implementación de sistemas de monitorización a un bajo costo y permite extender la vida útil de una estructura, prevenir accidentes y el prematuro derribo de la edificación.

Ecuador se caracteriza por su alta sismicidad y pérdidas económicas críticas y número de muertos después de terremotos severos (Schultz et al., 2018) que han obligado a las autoridades a seguir fortaleciendo los estándares de construcción a través de teorías y tecnologías avanzadas. En efecto, desde inicios del 2021, varios capítulos del área estructural de la Norma Ecuatoriana de la Construcción han sufrido mejoras cuya evidencia se verá reflejada en el 2023. Uno de estos nuevos enfoques es incluir una sección en la Norma de Riesgo Sísmico, Evaluación y Reforzamiento estructural Capítulo (MIDUVI, 2015) sobre la regularización de los sistemas SHM, especialmente para edificios críticos como escuelas, hospitales e infraestructura de respuesta a emergencias. El propósito principal es guiar a los profesionales de la construcción sobre cómo, cuándo y dónde instalar diferentes sensores y distinguir las diversas respuestas de los edificios para alertar a los usuarios o funcionarios y actuar de acuerdo con el mensaje de advertencia.

Los sistemas de monitorización de salud estructural ante sismos permiten identificar los daños presentes en una estructura y el grado del mismo sin la necesidad de verificarlos visualmente, ya que existe una limitación en cuanto a lugares que pueden ser inspeccionados de una manera directa. Esto genera la necesidad de eliminar materiales para revisar el estado de la estructura y su posterior aplicación después de realizar la inspección, lo cual representa un costo elevado y una inversión de tiempo considerable. (Daisuke et al., 2014)

La inspección de las edificaciones es de gran importancia en la seguridad pública. Con respecto a la acumulación de daños a largo plazo se estima que la vida útil de una edificación se encuentra entre los 50 y 75 años, por lo cual, el empleo de un sistema de monitorización de salud estructural facilitará el

proceso de detección temprana de daños. Este sistema permite realizar un mantenimiento preventivo y correctivo de la edificación, reduciendo costos y alargando la vida útil del edificio. (S. Hernández Moreno, 2016)

La respuesta dinámica de una edificación durante un sismo depende de la relación entre el período de vibración de las ondas sísmicas y su propio periodo de vibración. En el instante en que los dos períodos igualen sus valores y su relación se acerque a la unidad la edificación entra en resonancia. Si la estructura entra en resonancia la aceleración y los desplazamientos se amplifican enormemente dando lugar a posibles daños estructurales y colapsos. (M. Domínguez Caicedo, 2014)

El análisis de los periodos de vibración es un parámetro de gran importancia para considerar la salud estructural en edificaciones, ya que es un componente dominante en las vibraciones inducidas por los vientos y los sismos. Muchos países tienen equipados algunos de sus edificios con instrumentos y monitores grabando la respuesta de los edificios a los sismos. Antes de que ocurra un terremoto es importante identificar los parámetros actuales que rigen el comportamiento dinámico de la construcción. (InvenSense, 2013)

El análisis de los picos de aceleración obtenidos de la respuesta dinámica de una edificación es importante para asociarlo a los daños que pueden presentarse a nivel de los componentes de la edificación, como equipos o sistemas no estructurales (cielos, paneles, ventanas, puertas, instalaciones sanitarias, etc).

El análisis de la velocidad es importante para obtener los cambios bruscos entre los diferentes tiempos. Los cambios bruscos están asociados a respuestas peligrosas de la estructura, debido a que si ocurre un sismo se podrá apreciar como respuesta algunos saltos muy altos de velocidad conocidos como sismos de velocidad o sismos de pulso que pueden reportar daños excesivos sin necesidad de que exista alguna disipación de energía apropiada en la estructura.

Conocer el valor del desplazamiento es importante para obtener las derivas de piso. Las derivas de piso son los corrimientos diferenciales o relativos entre niveles sucesivos. La deriva de piso se puede calcular a través del desplazamiento relativo de piso (diferencia entre los desplazamientos de cada piso) dividido para la altura entre pisos, el valor obtenido se puede expresar en términos de porcentaje o como relación directa. La relación obtenida es utilizada para compararse con los niveles de daño a nivel de estructura o de particiones, como son las paredes. Dependiendo de la estructura puede existir un menor o mayor valor de deriva e intrínsecamente a partir de estos valores se puede comparar con el desempeño de la estructura y la amenaza a la que se encuentre sujeta la estructura, el daño que sufrió y si se encuentra cerca de un colapso parcial o total.

El rango de los periodos que se manejan para estructuras comunes no debe ser mayor de dos segundos (0.5 Hz), para medir la aceleración, velocidad y desplazamientos.

Alcance del proyecto

En el presente proyecto, se realizará un prototipo de sistema para la monitorización de vibraciones para la salud estructural de edificaciones ante sismos basado en el Internet de las Cosas, para el edificio administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sangolquí, por fines institucionales.

El sistema constará de 4 etapas principales que son:

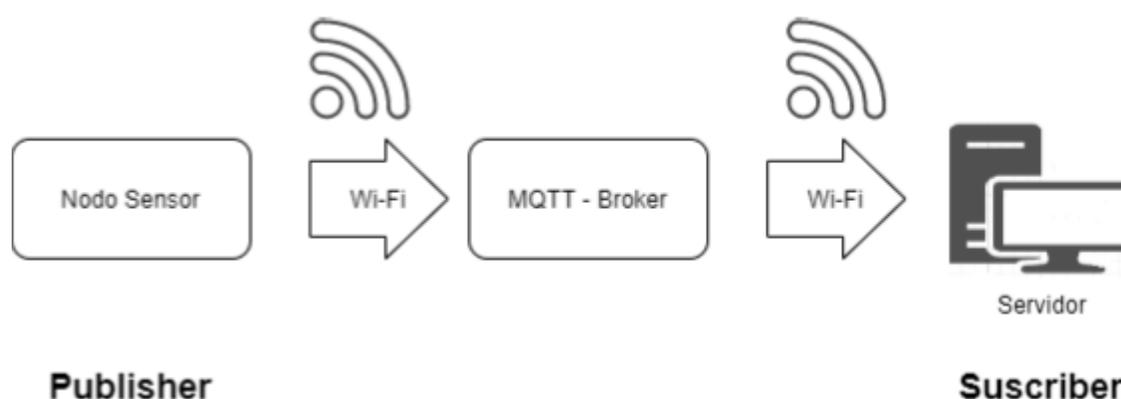
- Adquisición
- Procesamiento
- Almacenamiento
- Visualización

Para la etapa de adquisición de datos se analizará el sensor apropiado para el sistema de monitorización de vibraciones para posteriormente realizar un prototipo de nodo sensor inalámbrico. El

nodo sensor estará compuesto por un acelerómetro y giroscopio, encargado de recopilar información en el edificio, y una placa de desarrollo, que realizará la obtención y transmisión de datos mediante el protocolo MQTT hacia un broker-servidor. Se considerará un computador como servidor, el cual recibirá los valores obtenidos por el nodo sensor, como se muestra en la Figura 1. El prototipo realizado será calibrado en función del instrumento patrón NI9234 (módulo de entrada de sonido y vibración), disponible en los laboratorios de Ciencias de la Tierra y la Construcción de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El nodo sensor tendrá una alimentación constante de 110VAC y si esta alimentación se interrumpe funcionará a través de baterías.

Figura 1

Diagrama representativo de la adquisición de datos.



El almacenamiento y procesamiento de datos se realizará en el computador utilizado como servidor. Se encontrará el periodo fundamental de vibración del sistema de cada uno de los pisos a través de la transformada de Fourier de las tres variables, estos datos servirán para el análisis posterior de los expertos. Se presentará la aceleración y posteriormente se calculará la velocidad y desplazamiento a través de un software de procesamiento, estos datos servirán para generar un sistema de alerta que ayudará a los expertos a determinar los daños y desplazamientos en la estructura. Se realizará el análisis de desempeño del prototipo de sistema para la monitorización de vibraciones. Se

evaluará el desempeño del prototipo basado en el instrumento patrón NI9234 disponible en los laboratorios del departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción, al cual tendremos acceso a través de la Dr. Ana Gabriela Haro colaboradora del proyecto.

Para la visualización de datos se realizará una plataforma web a la cual tendrá acceso cualquier usuario conectado a Internet. La plataforma web mostrará los datos procesados, las gráficas resultantes y el estado de la alimentación del nodo sensor. El sistema para la Monitorización de Vibraciones para la Salud Estructural ante Sismos dispondrá de al menos 3 nodos sensores. Los nodos sensores serán ubicados en la intersección de la columna y la viga del primer, tercer y sexto piso del edificio administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sangolquí.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un prototipo de sistema de monitorización de vibraciones para la salud estructural de edificaciones ante sismos basado en el Internet de las Cosas.

Objetivos específicos

- Analizar el sensor apropiado para el sistema de monitorización de vibraciones.
- Diseñar un prototipo de nodo sensor inalámbrico compuesto por un acelerómetro encargado de la adquisición de datos.
- Realizar el algoritmo para el almacenamiento de la velocidad, aceleración y desplazamiento de los datos adquiridos en el edificio administrativo.
- Diseñar una interfaz de usuario en Matlab y una plataforma web para la visualización de datos y gráficas resultantes.
- Evaluar el desempeño del prototipo del sistema de monitorización desarrollado.

- Implementar el prototipo formado por 3 nodos sensores en el edificio administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE campus Matriz-Sangolquí.

Capítulo II

Marco Conceptual

Salud Estructural

Uno de los factores que han provocado un sinfín de problemas en la historia del ser humano ha sido el daño a las estructuras provocadas por desastres naturales, condiciones ambientales bruscas o simplemente el pasar del tiempo, representando un riesgo para la sociedad. Debido a esto se ha generado la necesidad de crear e implementar una serie de sistemas enfocados a la monitorización de la salud estructural.

El monitoreo de salud estructural (SHM, del inglés *Structural Health Monitoring*) surgió como un área de investigación dedicada a solucionar el riesgo que representan las estructuras debilitadas por daños. Este monitoreo se enfoca en la evaluación de las condiciones estructurales para identificar y cuantificar los daños presentes en la misma (Sánchez, 2015).

La práctica de monitorización de salud estructural se ha venido dando desde algún tiempo atrás de una manera tradicional, esta consiste en el empleo de personas como supervisores, las cuales examinan mediante métodos ortodoxos la condición de las estructuras. Este tipo de monitoreo tradicional donde se emplea al ojo humano como el sensor encargado de diagnosticar el estado de las edificaciones presenta una gran cantidad de imprecisiones debido a la subjetividad del análisis.

El uso de un sistema de monitoreo aumenta la precisión y confiabilidad de la información obtenida, debido a que la adquisición de datos es realizada de forma continua y los daños pueden ser identificados y alertados inmediatamente (Roy Huston & Maher, 2018).

Monitoreo de Salud Estructural

El monitoreo de salud estructural tiene como principal objetivo proveer un diagnóstico del estado de la estructura evaluada, identificar la presencia de daños en la misma, basados en los cambios presentados en los parámetros estáticos y dinámicos, mediante análisis e interpretación de los datos obtenidos por la red de sensores que conforman el sistema de monitorización (Balageas et al., 2006).

El SHM se encuentra formado por varios equipos que consisten en sensores, acondicionadores de señal, dispositivos de adquisición de datos y soportes físicos de hardware y software para el procesamiento e interpretación de los datos obtenidos. Por lo general los sensores son instalados en la estructura y la información que recopilan es transmitida mediante comunicación alámbrica o inalámbrica hasta la central donde se realiza el procesamiento e interpretación de los datos. Finalmente, estos datos se los puede almacenar para un análisis posterior, aunque existe la posibilidad de automatizar esta interpretación (Marulanda C. et al., 2000).

La tendencia principal de estos sistemas va dirigida a un enfoque de una red inalámbrica confiable, como los sistemas estudiados en (Chintalapudi et al., 2006; Morello et al., 2010; Muñoz et al., 2015; Sindhuja & Kevildon, 2015). Además, los sistemas SHM deben ser autónomos, eficientes y de bajo costo, como se presenta en (Riggio & Dilmaghani, 2020; Sivasuriyan et al., 2021). Por otra parte, el progreso tecnológico juega un papel fundamental dentro de estos sistemas. Por ejemplo, en (Balek & Klokočník, 2021; Basko et al., 2021; Iasha & Darwito, 2020), el Internet de las cosas (IoT) se usa para la comunicación inalámbrica de los dispositivos del sistema, el trabajo presentado en (Muin & Mosalam, 2021) usa inteligencia artificial para el procesamiento de datos y los estudios presentados en (Lei et al., 2020; Li et al., 2022) muestran el uso del modelado digital de estructuras para estudiar su comportamiento.

Una de las principales ventajas del SHM es su naturaleza no destructiva ya que se realiza de manera no invasiva para la edificación, dentro de este procedimiento se registran las propiedades dinámicas, es decir los parámetros relacionados al movimiento de la estructura, ya sea mediante mediciones permanentes o puntuales a lo largo del tiempo. El registro de propiedades dinámicas de una edificación puede limitarse únicamente a la respuesta de la estructura (conocido como SHM de tipo OMA) o a la respuesta y fuente que origina los movimientos de la estructura (conocido como SHM de monitoreo dinámico). Estos movimientos estructurales pueden darse debido a varios factores, pero si estos son provocados por algún evento sísmico se registra tanto la respuesta de la estructura, como el sismo que lo generó.

La ubicación del sensor en la estructura es de gran importancia en los sistemas SHM, porque de acuerdo a su ubicación es posible detectar frecuencias principales de forma óptima. Para determinar el posicionamiento del sensor se utiliza un análisis de la densidad espectral de potencia (PSD, del inglés Power Spectral Density). Este análisis es utilizado para evitar problemas de simetría de los edificios y demuestra la importancia del posicionamiento de los sensores en lugares críticos como en las uniones de placa de piso y columnas. El estudio muestra que es imprescindible y necesario la colocación de sensores de medición en la planta más alta del edificio. (Pentaris et al., 2013)

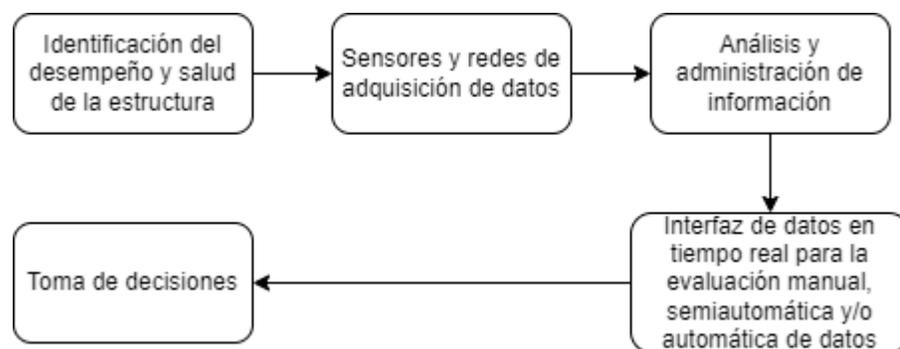
Otro estudio respecto a la ubicación de los sensores y la cantidad necesaria para el monitoreo de estructuras es el uso de un modelo de elementos finitos. Este estudio propone un método para solucionar este problema basado en la relación entre los desplazamientos observados y las respuestas modales a través de la matriz de información de Fisher, donde la máxima norma de la matriz es una configuración adecuada del sensor. En este estudio se utiliza un modelo numérico basado en frecuencias experimentales para obtener el número óptimo de sensores y su posicionamiento para garantizar el monitoreo de la salud estructural de edificaciones históricas. Se analiza la maximización de la matriz de información de Fisher a través de una simulación de vibración ambiental con el propósito de obtener la

configuración adecuada para el posicionamiento de los sensores y el número de los mismos (Stephan, 2012).

La Figura 2 representa los componentes básicos para que un sistema de monitoreo pueda estar completo y ser considerado un Sistema de Monitoreo de Salud Estructural (Vistasp & Farhad, 2009).

Figura 2

Conceptos básicos de un SHM.



Nota: Adaptada de *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*, por Vistasp & Farhad, 2009.

Comunicaciones

La comunicación entre dispositivos electrónicos puede ser efectuada por dos maneras, alámbrica e inalámbrica, la principal diferencia existente entre estos dos métodos de comunicación radica en el medio por el cual se transmite la información, la comunicación alámbrica necesita de un medio físico para poder transmitir las señales, mientras que la comunicación inalámbrica prescinde de este medio físico, también se presentan varias ventajas y desventajas entre estos dos tipos de comunicación presentados en la Tabla 1.

Tabla 1

Ventajas y desventajas de los tipos de comunicación.

Comunicación Alámbrica		Comunicación Inalámbrica	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Velocidad de transmisión	Espacio para la instalación de la red física	Fácil instalación	Baja velocidad de transmisión
Seguridad de transmisión	Dificultad para mover los puntos de red	Facilidad de movimiento en los dispositivos electrónicos	Sujeta a interferencias
Baja interferencia	Limitado por número de puertos	Permite la conexión de varios dispositivos a la vez	Seguridad limitada

Comunicaciones alámbricas

Protocolo de comunicación serial I²C (inter integrated circuits)

Proviene de la Abreviatura de Inter-IC (Inter Integrated Circuits), es un protocolo de comunicación serie diseñado por Philips Semiconductors a principio de los años 80s, este protocolo de comunicación sólo necesita de dos líneas de señal y un común o masa, se emplea para la conexión de circuitos integrados, microcontroladores, memorias y otros dispositivos. La velocidad de comunicación alcanzada con este protocolo puede llegar a ser de unos 100 Kbits por segundo, aunque se puede llegar a encontrar casos especiales en los que el reloj llegue a los 3.4 MHz (Carletti, 2021).

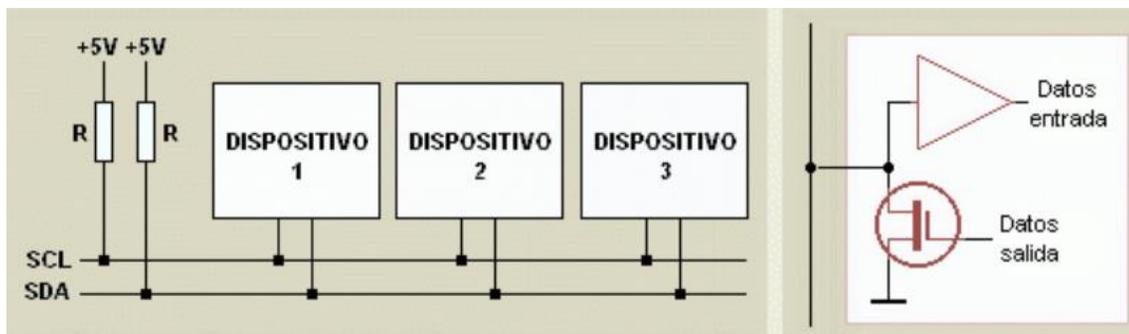
Las señales transmitidas mediante I²C son:

- SCL (System Clock) línea encargada de transmitir los pulsos de reloj que sincronizan el sistema.
- SDA (System Data) línea por la cual se transmiten los datos entre los dispositivos que forman el sistema.
- GND (Ground) es el común entre los dispositivos.

El protocolo I²C es en serie y síncrona, es decir que la información es enviada a partir de una señal de reloj base transmitida por la línea SCL. La Figura 3 presenta la forma de conexión al bus de datos en este tipo de comunicación (Carletti, 2021).

Figura 3

Conexión del protocolo I²C.



Nota: Tomada de Comunicación-Bus I2C, por E. Carletti, 2021.

El protocolo de comunicación I2C se encuentra estructurado por maestros y esclavos, tiene la capacidad de adherir un número ilimitado de maestros, mientras que el número de esclavos que se pueden conectar se encuentra limitado a 1008.

El protocolo I2C se encuentra caracterizado por:

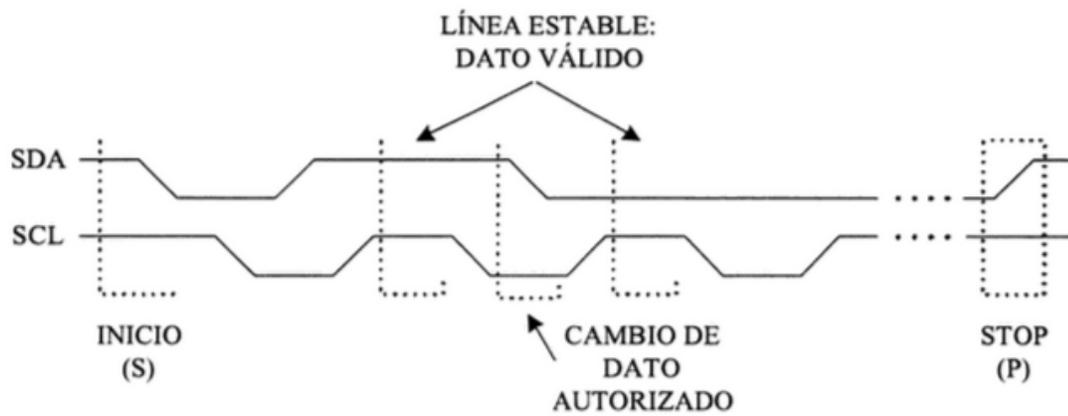
- La transferencia de datos se encuentra delimitada por las líneas SDA y SCL.

- El bit de inicio (S) es el encargado de determinar el inicio de la transmisión, consiste en una transición de “1” a “0” de la línea SDA, mientras que la línea SCL se mantiene en “1”.
- El bit stop (P) es el encargado de establecer el final de la transmisión, se da por la transición de “0” a “1” de la línea SDA, mientras que la línea SCL se encuentra en “1”.
- Los datos transmitidos solo pueden varias si la línea SCL se encuentra en “0”.

La Figura 4 muestra los niveles de señal con los cuales trabaja el protocolo I2C.

Figura 4

Niveles del protocolo de comunicación I2C.



Nota: Tomada de Fundamentos de Electrónica Digital, por C. Blanco, 2005.

Comunicaciones inalámbricas

Wi-Fi (Wireless Fidelity)

El Wi-Fi (Wireless Fidelity o fidelidad sin cables) se basa en ondas de radio para la transmisión de información entre dispositivos, es decir no necesita de un medio físico como un cable para lograr esto. El 802.11 es catalogado como el estándar más utilizado para realizar la conexión de dispositivos, dentro de este existen varios formatos donde sobresale el 802.11b que opera en la banda 2.4 GHz.

A continuación, se presenta la Tabla 2, la cual detalla las principales características de los protocolos de Wi-Fi y sus velocidades de datos (Intel, 2021):

Tabla 2

Resumen del protocolo Wi-Fi IEEE 802.11.

Protocolo	Frecuencia	Ancho del canal	MMO	Velocidad de datos máxima
802.11 Tradicional	2.4 GHz	20 MHz	No se aplica	2 Mbps
802.11b	2.4 GHz	20 MHz	No se aplica	11 Mbps
802.11a	5 GHz	20 MHz	No se aplica	54 Mbps
802.11g	2.4 GHz	20 MHz	No se aplica	54 Mbps
802.11n	2.4 o 5 GHz	20, 40 MHz	Un solo usuario (MIMO-MU)	450 Mbps
802.11ac wave 2	5 GHz	20, 40, 80 MHz	Un solo usuario (MIMO-MU)	866.7 Mbps
802.11ac wave 1	5 GHz	20, 40, 80 ,160 MHz	Usuario múltiple (MIMO-MU)	1.73 Gbps
802.11ax	2.4 o 5 GHz	20, 40, 80 ,160 MHz	Usuario múltiple (MIMO-MU)	2.4 Gbps

Nota: Tomada de Diferentes protocolos de Wi-Fi y velocidades de datos, por Intel, 2021,

(<https://www.intel.la/content/www/xl/es/support/articles/000005725/wireless/legacy-intel-wireless-products.html>).

Protocolo IP

El protocolo IP (Internet Protocol) forma parte de la familia de estándares TCP/IP, se encuentra en el tercer puesto de los protocolos de nivel red, y posibilita el transporte y desarrollo de los datos, este protocolo toma el mensaje y lo divide en datagramas de hasta 64 kB, este datagrama es transmitido por medio de la red fragmentándose en unidades más pequeñas a lo largo de su recorrido. La capa de transporte se encarga de reconstruir dicho mensaje a su forma original una vez el datagrama llegue a su destino (Huidobro et al., 2007).

Entre las características de este protocolo sobresale que se encuentra basado en datagramas IP, esto quiere decir que a cada entrada y salida se le adhiere un encabezado donde se detallan características de la información de transporte de los paquetes.

El protocolo IP asigna un identificador a cada equipo conectado a la red, a este se le conoce como Dirección IP, la cual contiene los datos de identificación para que el equipo conectado pueda ser localizado. Esta dirección cuenta con un número único para el equipo o "host", se encuentra representado por cuatro cifras separadas por puntos, donde el 255 representa el límite. Con esta dirección se identifica la máquina del usuario y la red a la cual pertenece (Estrada, 2004).

En la actualidad se puede encontrar dos tipos de IP que son IPv4 e IPv6. Las direcciones IPv4 poseen secuencias de 32 bits, representadas por secuencias de 4 números enteros entre 0 y 255 separados por puntos, este tipo de dirección permite 2^{32} direcciones de red, aunque estas se encuentran previamente ya asignadas. En cambio, el protocolo IPv6 posibilita tener 2^{128} combinaciones, además de implementar servicios como privacidad, movilidad, autenticación y calidad de servicios (QoS). Este tipo de direcciones constan de 32 dígitos hexadecimales, que se encuentran reducidos a 8 grupos de 4 dígitos hexadecimales (Romero et al., 2010).

MQTT (Message Queing Telemetry Transport)

El protocolo de comunicación MQTT se encuentra enfocado a la mensajería basada en la publicación y suscripción, este se encuentra diseñado para ser abierto, ligero y simple, es una de las mejores opciones a tomar en cuenta cuando se dispone de entornos restringidos con una red costosa o se tiene dispositivos con recursos de memoria limitados. El protocolo MQTT es un protocolo de comunicación M2M (machine to machine) que se implementa sobre TCP/IP (IBM & Eurotech, 2010).

MQTT posee niveles de calidad de servicio (QoS, del inglés *Quality of Service*), los cuales se pueden interpretar como la manera en la que se gestiona la robustez de la transmisión de los mensajes, estos niveles de QoS son:

- QoS 0 (como mucho una vez): El mensaje se envía una única vez, el receptor no envía ninguna respuesta y el remitente no realiza ningún intento extra, por lo que el mensaje llega a su destino una vez o ninguna.
- QoS 1 (al menos una vez): El mensaje se envía hasta que se garantiza la entrega. En caso de fallo, el mensaje se envía hasta que se garantice la recepción, una vez confirmado el mensaje se elimina del emisor.
- QoS 2 (exactamente una vez): Se garantiza que cada mensaje se entrega al suscriptor, por lo que deben existir entre el remitente y el receptor al menos dos pares de transmisiones antes de que el remitente elimine el mensaje.

El protocolo MQTT se encuentra basado en una topología tipo estrella que posee un nodo central, el cual se denomina como bróker y es capaz de conectar con hasta 10000 clientes, el bróker es el encargado de la transmisión de los mensajes, la gestión de red y mantener el canal activo, los clientes envían de manera periódica un paquete (PINGREQ) y esperan recibir una respuesta del bróker (PINGRESP). La comunicación entablada por este protocolo se basa en "topics", estos se encuentran

representados por una cadena jerárquica, la cual es creada por el cliente que se encarga de publicar el mensaje y a la cual los nodos que reciben el mensaje se suscriben, esto hace posible crear comunicaciones de tipo uno a uno y de uno a muchos (Stack Overflow Contributors, 2017).

Sensores

El sensor es un dispositivo utilizado para percibir una determinada variable de acuerdo a un cambio en el entorno y en consecuencia proporcionar una segunda variable más fácil de interpretar como señal de salida. De igual manera, se considera sensor al transductor, que transforma o cambia una variable física (magnética, térmica, óptica, etc.) en una magnitud eléctrica. Es posible clasificar los sensores según la magnitud física que pueden medir (posición, aceleración, velocidad, humedad, temperatura, presión, etc.), según la naturaleza de la señal de salida (digital y analógico) o según su principio de transducción (resistivo, capacitivo, inductivo, piezoeléctrico, termoeléctrico, ultrasónico, fotoeléctrico y químico) (Weebly, 2022).

Sensor Digital

En respuesta a los avances tecnológicos y el aumento de la disposición de sistemas digitales para el procesamiento, demostración y distribución de la información en sistemas de medida y control, se ha considerado a los sensores que ofrecen directamente una señal digital a su salida como una opción muy atractiva, debido a la simplificación que supone el acondicionamiento de señales y su protección contra interferencias electromagnéticas en ciertos casos. Existen dos tipos de sensores digitales: los codificadores de posición, que a través de una entrada analógica entregan una señal digital, y los autoresonantes de frecuencia variable, basados en un fenómeno físico tipo oscilatorio que es transducido a través de un sensor modular, estos necesitan un circuito electrónico para entregar la señal digital deseada (InfoPLC, 2022).

Los sensores codificadores de posición poseen dos tipos: los codificadores incrementales y absolutos. Los codificadores de posición incrementales poseen un elemento lineal o un disco con baja inercia que se desplaza hacia la pieza que se desea conocer su posición, considerando un cambio de estado al momento que el elemento codificado se traslada a una determinada magnitud. Estos se pueden clasificar en función del tipo de marca utilizada como: marca magnética, óptica o eléctrica. Los codificadores de posición absolutos son similares a los incrementales pero tienen marcas complejas distribuidos en anillos concéntricos, estos poseen un sensor por cada anillo que permitirá conocer la posición del elemento codificado a través de unos y ceros, estos sensores utilizan códigos para impedir que existan variaciones de más de un bit entre el cambio de posiciones en la salida y es necesaria el uso de convertidores de códigos para aplicaciones de cómputo, siendo este tipo de sensores más costosos. (Armando Martínez Reyes, 2020)

Los sensores autoresonantes brindan una frecuencia de salida que deriva de la magnitud que influye a la frecuencia de oscilación, estos necesitan un frecuencímetro-contador para una correcta medición de la frecuencia o el periodo de oscilación, se puede escoger el uno o el otro dependiendo de la resolución esperada y el tiempo asequible para la medida.

Sensor Analógico

El sensor analógico se caracteriza por proporcionar un conjunto continuo de valores, este tipo de dispositivos utilizan circuitos de acondicionamiento, con el propósito de obtener una señal eléctrica normalizada, es decir, que la señal de salida que se obtiene serán magnitudes con un rango de valores normalizados por las organizaciones internacionales como IEC, IEEE, ISA entre otros. Las señales analógicas deben conectarse al controlador de algún proceso, que posee varios módulos para convertir las señales analógicas a digitales bajo normas y estándares establecidos en los rangos de corriente y voltaje, como se muestra en la Tabla 3. (Antonio & Campos, 2008)

Tabla 3

Estándares de voltaje y corriente en sensores analógicos.

Estándares de corriente	Estándares de voltaje
De 0 a 5 mA	De 0 a 5 Vcc
De 1 a 5 mA	De 2 a 10 Vcc
De 0 a 20 mA	De -10 a +10 Vcc
De 4 a 20 mA	De 0 a 10 Vcc

Nota: Tomada de Sensores, acondicionadores y procesadores de señal, por J. Mayné, 2003,

(http://arantxa.ii.uam.es/~gdrivera/robotica/h_datos/Sensores_Acond.pdf).

Acelerómetro

Los sensores de aceleración o acelerómetros a través de varios componentes externos, están diseñados para medir vibraciones, ya sea de maquinaria o distintos tipos de estructuras, localización de movimiento y/o impacto, etc. Los acelerómetros basados en circuitos integrados no llegan a tener las mejores especificaciones necesarias para aplicaciones en sismología, debido a su elevada escala que involucra una baja sensibilidad del transductor. La gran mayoría de sensores de aceleración comerciales poseen un principio de funcionamiento piezoeléctrico con frecuencia de trabajo mínimo superior a cero, por tal razón es incapaz de medir aceleraciones estáticas, como la gravedad, o frecuencias muy bajas, con la que trabajan los registros sísmicos. (Santalucia & Gargiulo, 2006)

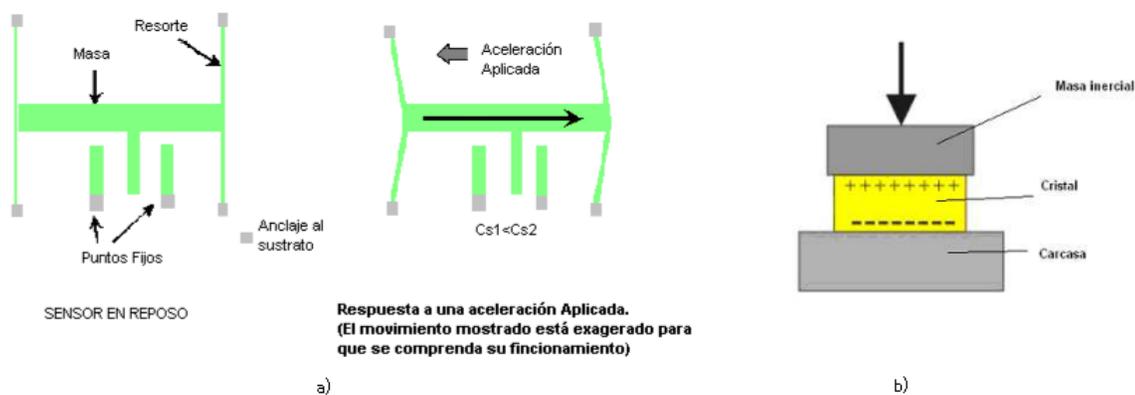
Existen diferentes modelos de acelerómetros según las tecnologías existentes como acelerómetros piezoresistivos, piezoeléctricos, capacitivos, mecánicos y sistema microelectromecánico (MEMS, del inglés Microelectro-mechanical Systems). Los rangos de medición son variados, pueden medir miles de g's desde 1 g (g es la medida de aceleración basada en la aceleración producida por la gravedad), también poseen rangos de frecuencia desde 0 Hz, para medir frecuencias bajas de vibración, hasta miles de Hz, para altas frecuencias de vibración. Según la aplicación los acelerómetros pueden

apreciarse de varios formatos como aluminio, acero inoxidable, titanio, etc., con montajes en tornillos, pegada, magnético entre otros. (Aguilar et al., 2016)

Los acelerómetros basados en tecnología capacitiva entregan la variación de la capacidad entre dos o más conductores, los cuales poseen entre ellos material dieléctrico, al momento de estar sometido a aceleraciones. Estos sensores miden la aceleración siempre y cuando se encuentren integrados en un chip de silicio, debido a que este chip reduce los problemas con humedad, capacidades parásitas, temperatura entre otras cosas. Los acelerómetros con tecnología piezoeléctrica funcionan por el efecto piezoeléctrico, es decir, que al someterse el material a una deformación física se llega a producir una variación en la estructura cristalina, cambiando así sus peculiaridades eléctricas, visibles en la Figura 5 (HRICH, 2009).

Figura 5

Sensor de aceleración. a) Sistema de placas del sensor capacitivo. b) Diagrama del sensor piezoeléctrico



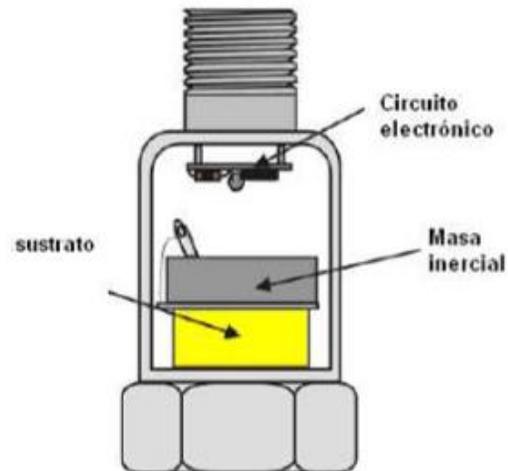
Nota: Tomada de *Sensor medidor de Aceleración*, por la Universidad de Sevilla, 2018.

Los acelerómetros con tecnología piezoresistiva funcionan aprovechando la propiedad de la resistencia eléctrica, variando su valor al momento que el material se modifica mecánicamente. Esta modificación varía dependiendo del tipo de material y de su dopaje. Este tipo de acelerómetros utilizan una masa, suspendida por cuatro semiconductores, la cual es acelerada de manera perpendicular a la

superficie para deformar las galgas y cambiar su resistencia de manera proporcional a la aceleración, visible en la Figura 6 (HRICH, 2009).

Figura 6

Diagrama del sensor de aceleración con tecnología piezoresistiva

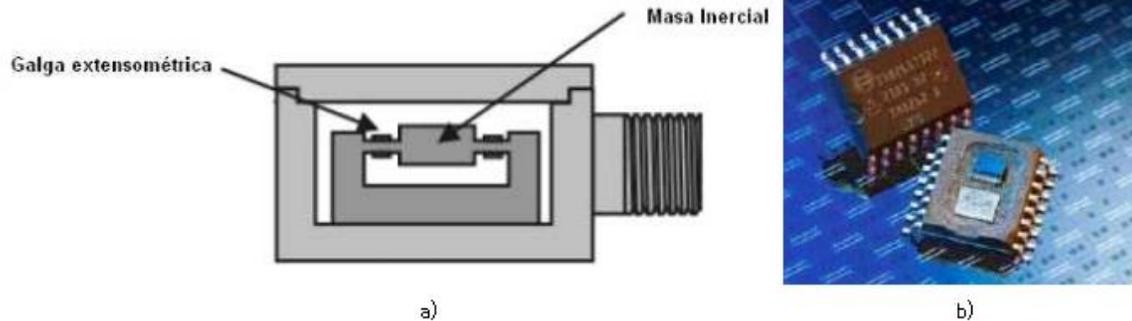


Nota: Tomada de *Sensor medidor de Aceleración*, por la Universidad de Sevilla, 2018.

Los acelerómetros con tecnología mecánica usan bobinas e imanes para medir la aceleración a través de una masa y resortes. Pueden llegar a ser utilizados en sistemas rotativos desequilibrados que generan movimientos oscilatorios al estar sometidos a una aceleración (servo acelerómetros). Los acelerómetros con tecnología micromecánica MEMS son considerados microsistemas electromecánicos que son utilizados para generar dispositivos que pueden llegar a medir un tamaño de micras hasta milímetros de diámetro, visible en la Figura 7 (HRICH, 2009).

Figura 7

Sensor de aceleración. a) Diagrama del acelerómetro mecánico. b) Acelerómetro ST con tecnología MEMS



Nota: Tomada de Sensor medidor de Aceleración, por la Universidad de Sevilla, 2018.

Microcontrolador

El microcontrolador es un circuito integrado conformado por una unidad central de procesamiento (CPU, del inglés Central Processing Unit), el cual es considerado como el “cerebro” del microcontrolador, unidades de memoria, puertos de entrada/salida y periféricos. El microcontrolador es considerado como una microcomputadora en un circuito integrado utilizado para diversas aplicaciones, posee un programa con el propósito de gobernar una aplicación concreta, sus puertos de entrada/salida toleran las conexiones con los sensores y actuadores que se desea controlar. Este dispositivo tiene como objetivo leer y ejecutar el código de programa realizado por el usuario para cumplir una función específica, además otorga flexibilidad y modularidad con el propósito de ser utilizado para diversas aplicaciones (Ochoa, 2017).

Actualmente por los avances tecnológicos se encuentra una gran cantidad de dispositivos electrónicos que interactúan con las personas en la vida cotidiana, por tal razón se ha aumentado la necesidad de comunicarnos y realizar diversas funciones a través del internet de manera inalámbrica, utilizando microcontroladores con las características necesarias para desarrollar una conexión con

diferentes dispositivos a través de Wifi para desarrollar proyectos de aplicación del internet de las cosas (Ochoa, 2017).

NodeMCU ESP8266

NodeMCU visible en la Figura 8 es un módulo de desarrollo de Firmware basado de Lua de código abierto que se ejecuta en el módulo Wifi ESP8266 y hardware basado en el módulo ESP-12. Esta placa está diseñada para aplicaciones en el internet de las cosas. La placa cuenta con un convertidor de USB-Serial, 4Mb de memoria flash (facilitando el uso de lenguajes de programación como Arduino IDE, Lua NodeMCU, JavaScript y ESP8266 Basic), un puerto micro-USB para la programación y alimentación del módulo, un convertidor analógico digital y posee compatibilidad con el protocolo I²C. La placa NodeMCU posee las siguientes características y especificaciones (Ochoa, 2017):

- El voltaje de alimentación es de 5V DC y el voltaje de entradas/salidas es de 3.3V DC.
- Emplea con una corriente 10 μ A – 170 mA.
- Posee una memoria flash externa de 4 MB y un procesador Tensilica Xtensa LX3 de 32 bit.
- El procesador trabaja a una frecuencia de reloj de 80 a 160 MHz.
- Admite los estándares 802.11 b/g/n para el uso de la red Wifi.
- Tiene integrado el stack de protocolo TCP/IP.
- Entrega una potencia de salida en modo 802.11b de +19.5dBm.

Figura 8*Placa NodeMCU ESP8266*

Nota: Tomada de Nodemcu Wifi Esp8266-Resumen de características, por D. Bolaños, 2019.

Software**Desarrollo web**

Es el proceso que a través de lenguajes de programación permite la creación y mantenimiento de páginas web. Este implica varias funciones como codificación, diseño, gestión de contenido y administración de servidores web. Para el desarrollo web se suele dividir el trabajo en dos términos Front-End y Back-End, que trabajan conjuntamente para realizar una interfaz web con un correcto desempeño.

Front-End

El Front-End es término que hace referencia a todo lo que el usuario puede visualizar o percibir como los gráficos y diseños en una aplicación, con el propósito de permitir una interactividad entre la aplicación y el usuario. Los elementos gráficos pueden tener características específicas, colores, estilos y animaciones. Para el desarrollo Front-End se puede realizar con lenguajes de programación específicos utilizados para aplicaciones o interfaces. Los lenguajes de programación mayormente usados para el

desarrollo del Front-End son Hojas de Estilo en Cascada (CSS, del inglés Cascading Style Sheets) y Lenguaje de Marcas de Hipertexto (HTML, del inglés HyperText Markup Language) (García Silva, 2022).

HTML

Este es un lenguaje que funciona con etiquetas para definir la estructura del contenido de la interfaz web. Las etiquetas en este lenguaje de marcado suelen tener algunas características como apertura de etiqueta, contenido de etiqueta y cierre de la etiqueta. Es necesario definir los atributos de las etiquetas para un funcionamiento adecuado de la interfaz. Es de vital importancia la semántica en la programación con este lenguaje ya que el orden de las etiquetas para cada sección influye significativamente en el diseño de la interfaz (García Silva, 2022).

CSS

Este lenguaje influye en la personalización de la interfaz web debido a que se encarga de dar estilos a las etiquetas HTML, que debieron ser estructuradas previamente. Con este lenguaje de programación se puede dar tamaño, color, posición entre otros diseños para una imagen visual más amigable con el usuario. Para la programación con este lenguaje es necesario considerar los siguientes pasos: escribir la etiqueta con llave de apertura, anotar el nombre de lo que se desea modificar, el valor que se desea dar y por último cerrar la llave (García Silva, 2022).

Back-End

El Back-End es un término que hace referencia a la parte lógica de la arquitectura del software, esta área es utilizada para la funcionalidad del sitio web, la seguridad y la optimización de recursos. Presenta una gran importancia para el correcto funcionamiento de toda la arquitectura, que puede ser usada para el envío y recepción de datos con el servidor, el desarrollo de acciones lógicas y funciones que simplifiquen procesos (García Silva, 2022).

Existen una gran variedad de lenguajes de programación que se pueden utilizar en Back-End y es necesario que los programadores que estén familiarizados con este campo los puedan llegar a utilizar. Los lenguajes de programación que tiene el Back-End son Hipertexto Preprocesado (PHP, del inglés Hipertext Preprocessor) utilizado en interfaces web, este lenguaje puede ser introducido en HTML. Otro lenguaje de programación es Python, el cual es muy popular actualmente debido a su simple codificación y sintaxis ya que es de fácil entendimiento (García Silva, 2022).

JAVASCRIPT

Es un lenguaje de programación que nos ayuda a implementar funciones complejas en interfaces web. Permite que las páginas web no solo muestren información estática sino también actualizaciones de contenido oportunas, animaciones 2D/3D, mapas interactivos, etc. Además, se utiliza para creaciones de back-end y su ejecución en servidores. Es el lenguaje de programación más usado para el desarrollo de aplicaciones de escritorio, desarrollo web, aplicaciones móviles entre otras aplicaciones. Este lenguaje de programación trabaja conjuntamente con HTML y CSS para el desarrollo de interfaces web (Redacción KeepCoding, 2022).

Matlab

Matlab es una plataforma de programación de fácil manejo que permite realizar cálculos numéricos y visualizar resultados gráficos por su interfaz. Se trata de un sistema matricial interactivo que permite resolver problemas numéricos en muy poco tiempo y expresarlos tal y como están escritos matemáticamente, sin necesidad de programación tradicional. Una de sus grandes ventajas es que el software permite a los usuarios crear sus propias aplicaciones (The MathWorks, 2022).

Procesamiento de señales

El propósito del procesamiento de señales es la eliminación de ruidos ambientales, offset y otros ruidos que pueden ser generados por el mismo dispositivo, esto se puede corregir a través del método

de corrección de línea base para que los valores del acelerómetro no se desplacen del eje cero. También, se utilizará un filtro Butterworth debido a que mantiene su forma para órdenes mayores. Aumenta la pendiente a partir de la frecuencia de corte. Posee una respuesta de amplitud mayormente plana con una pequeña banda de transición y la ausencia de ondulaciones en la banda de paso en comparación con otros filtros (Hernández Martínez & Mercado López, 2015).

En los sistemas SHM normalmente se utiliza la señal de los acelerómetros, donde a través de la doble integración de la aceleración se puede obtener el desplazamiento para determinar el estado de la estructura. La información del sensor ejecuta un plan de acción que implica alertas, notificaciones o la activación de algún otro sistema, en función de los datos obtenidos. Es necesario obtener la Transformada de Fourier para conocer la frecuencia natural de la estructura y la Transformada Wavelet para saber a través de un espectro la frecuencia en el periodo de tiempo.

Transformada de Fourier

A la hora de representar las señales estacionarias en el dominio de la frecuencia la transformada de Fourier sobresale como una de las mejores herramientas. Se encuentra fundamentada en la señal analizada puede ser reconstruida a partir de la suma de sinusoides, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia, eligiendo de manera adecuada las fases y amplitudes (Duoandikoetxea, 2003).

Al definir f como una función integrable definida en \mathbb{R} . La transformada de Fourier resultante también se encontrará definida en \mathbb{R} , y se encuentra representada por la Ecuación (1).

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

La transformada de Fourier se emplea para realizar una descomposición o a su vez un análisis de f en componentes, donde se aprecia un rango continuo de frecuencias, esta transformada es aplicada para el análisis dinámico de sistemas lineales que poseen excitaciones complejas descritas

numéricamente. La integral presentada en la Ecuación (1) se evalúa empleando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier.(Bonafonte, 2009)

Para explicar el funcionamiento de esta transformada es necesario plantear su fórmula básica detallada en la Ecuación (2).

$$F\left(\frac{n}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} m(kT) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (2)$$

Donde:

- N es el número de muestras que se va a analizar.
- T es el periodo de muestreo, es decir, el inverso de la frecuencia de muestreo.
- n es el índice de la frecuencia.
- m(kT) indica la muestra tomada en el instante kT (muestra Késima).

El valor de n se encarga de determinar la frecuencia que se va a analizar, ya que representa una de las frecuencias en las que se descompondrá la señal analizada, por esta razón, al realizar un análisis con todas las frecuencias, se emplea todo el rango de variaciones de n, es decir, n=0, 1, 2, ..., N-1. (Bobadilla et al., 1999)

Transformada de Wavelet

La Transformada Wavelet es la descomposición de una señal en un conjunto de funciones obtenidas de una única función llamada wavelet “madre” o prototipo por medio de dilataciones y contracciones (escalados), así como desplazamientos en el tiempo, las funciones resultantes forman una base y se las denomina “Wavelets”.

Entre las características que sobresalen de esta transformada se encuentra que posee una resolución tiempo-frecuencia variable:

- Posee una buena resolución en función del tiempo para frecuencias altas.
- Presenta una buena resolución en el dominio de la frecuencia para frecuencias altas.

Esta transformada se encuentra definida por la Ecuación (3), y la Wavelet madre se define por la Ecuación (4).

$$W_f(s, \tau) = \int f(t)\psi_{s,\tau}(t) dt \quad (3)$$

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (4)$$

Donde s es el factor de escala, y τ es el factor de traslación.

Las wavelets $\psi_{s,\tau}(t)$ generadas a partir de la misma wavelet madre tienen diferente escala s y ubicación τ , pero tienen toda la misma forma. Por lo general se emplean factores de escala s mayores que cero. Las wavelets son dilatadas cuando la escala de s es mayor que 1, y son contraídas cuando este factor es menor que uno. Así, cambiando el valor de s se logra cubrir diversos rangos de frecuencias. Valores grandes del parámetro s se atribuyen a frecuencias de menor rango, o una escala grande de Las wavelets, mientras que valores pequeños de s corresponden a frecuencias de menor rango o una escala muy pequeña de las wavelets (*Introducción a La Transformada Wavelet*, 2006).

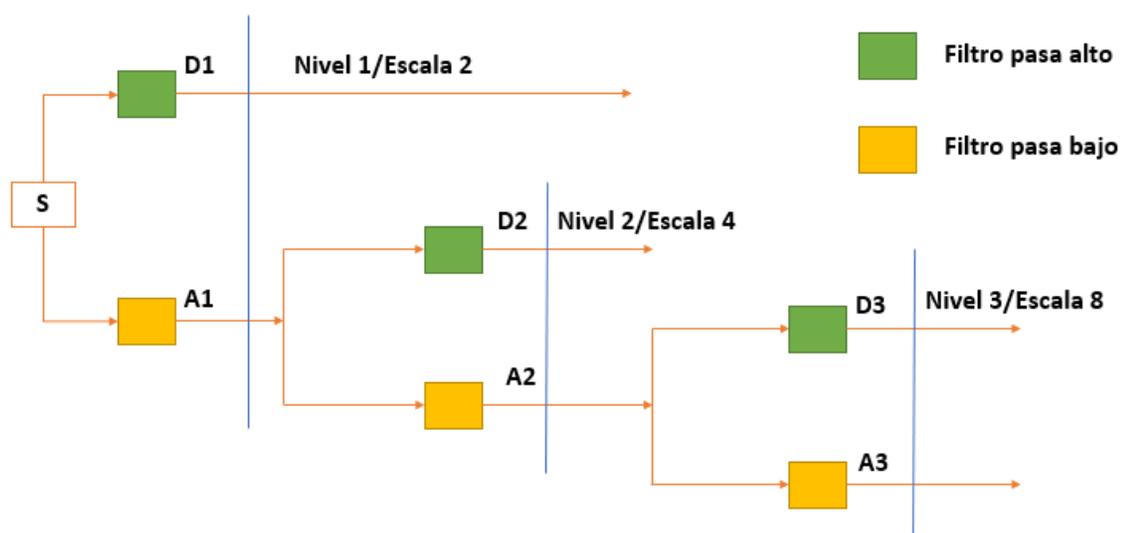
Existe una gran variedad de wavelets madre que se encuentran agrupadas en familias en función de su utilidad. Ingrid Daubechies reconocido como el mayor constructor de wavelets ha propuesto tres familias, la Daubechies que se encuentra formada por un conjunto de wavelets ortonormales, estas son apropiadas para aplicarse en el análisis de señales discretas, la Coiflets, denominada de este modo porque fueron elaboradas a solicitud de Coifman, y finalmente la Symmlet, son similares a las Daubechies tendiendo a ser casi simétricas (Castro & Castro, 1995).

El principio de aplicación de la transformada wavelet se basa en la aplicación sucesiva de filtros, por ejemplo, a una señal S , se filtra con un filtro especial pasa bajo y pasa alto para producir subbandas

de pasa bajo (A1-Nivel de aproximación) y pasa alto (D1-Nivel de detalle). La primera mitad obtenida es descartada después del filtrado basados en el criterio de Nyquist. Para el siguiente nivel de descomposición, la subbanda A1 es filtrada iterativamente aplicando la misma técnica para generar subbandas más estrechas: A2 y D2, y así se repite el proceso en función del nivel de descomposición deseado. La longitud de los coeficientes obtenidos en cada subbanda es la mitad del número de coeficientes en la etapa posterior, esto se puede visualizar en la Figura 9 (*Introducción a La Transformada Wavelet*, 2006).

Figura 9

Funcionamiento de la transformada Wavelet



Filtro Butterworth

El filtro empleado para el procesamiento de la señal obtenida es un filtro Butterworth ya que posee una pequeña banda de transición y la ausencia de ondulaciones presentes en la banda de paso. Butterworth se realiza mediante una función de transferencia, la cual es especificada en el dominio de la frecuencia. Las especificaciones del diseño son expresadas en términos de la magnitud $H(\omega)$.

Los requerimientos para la magnitud $H(\omega)$ se encuentran por una selección de la función de transferencia normalizada $|N(j\omega)|$, donde se tiene la ventaja de que $|N(j\omega)|^2$ es función racional de ω .

Para escribir la función general $|N(j\omega)|^2$ con característica máximamente plana, se considera la Ecuación (5) descrita en (Quiroz Córdova, 2007):

$$|N(j\omega)|^2 = H^2 \frac{1 + b_1\omega^2 + b_2\omega^4 + \dots}{1 + a_1\omega^2 + a_2\omega^4 + \dots} \quad (5)$$

Se divide el denominador entre el numerador y se obtiene la Ecuación (6):

$$|N(j\omega)|^2 = H^2 [1 + (b_1 - a_1)\omega^2 + (b_2 - a_2 + a_1^2 - a_1b_1)\omega^4 + \dots] \quad (6)$$

Se toma una serie general de McLaurin, la serie de expansión de Taylor en el origen, y se define una función arbitraria $F(\omega)$, con la forma presentada en la Ecuación (7):

$$F(\omega) = F(0) + \frac{F^{(1)}(0)}{1!}\omega + \frac{F^{(2)}(0)}{2!}\omega^2 + \frac{F^{(3)}(0)}{3!}\omega^3 + \frac{F^{(4)}(0)}{4!}\omega^4 + \dots \quad (7)$$

Donde $F^{(l)}$ es la l -ésima derivada de $F(\omega)$ evaluada en $\omega = 0$.

Al comparar la Ecuación 7 y la Ecuación 6 se observa que debido a la naturaleza par de $|N(j\omega)|^2$, todas las derivadas de orden impar son cero, y es necesario que se cumpla la Ecuación (8), para tantos coeficientes como sea posible y así conseguir que la segunda derivada sea cero (Miyara, F. 2004).

$$a_i = b_i \quad (8)$$

La función de magnitud al cuadrado resultante tiene la forma de la Ecuación (9):

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H^2}{1 + \varepsilon^2\omega^{2n}} \quad (9)$$

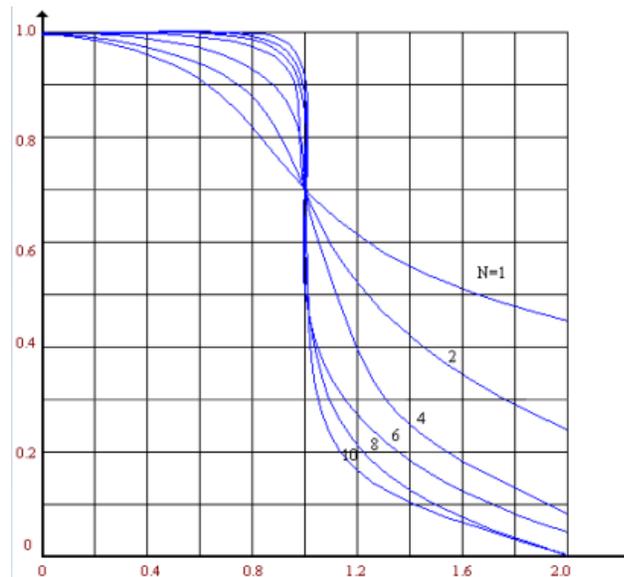
Donde:

- H es el valor de $|N(0)|$, el valor máximo que alcanza $|N(j\omega)|$.
- ε es el parámetro encargado de ajustar la relación a la cual se disminuye la magnitud.
- La banda de paso se encuentra dentro del rango de $0 \leq \omega \leq 1 \text{ rad/s}$ y la banda de rechazo abarca las frecuencias de $\omega > 1 \text{ rad/s}$.

El grado de planeidad de la banda de paso incrementa en función del aumento del orden N, como se puede ver en la Figura 10. Esta figura también indica que, como es de esperarse, a medida que el orden N aumenta, la respuesta del filtro se aproxima a la respuesta del tipo ideal (Peña, 2009).

Figura 10

Respuesta en magnitud para filtros Butterworth de diversos órdenes con $\varepsilon = 1$



Nota: Tomada de *Filtros Activos*, por J. Peña, 2009,

(<https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>).

Pasa alto

Este filtro bloquea las frecuencias inferiores a la frecuencia de corte declarada ω_c . La respuesta en frecuencia $H(\omega)$ del filtro Pasa alto permite el paso de exponenciales complejas, $e^{i\omega t}$ para valores de ω representados en la Ecuación (10):

$$H(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega < \omega_c \\ 1, & |\omega| \geq \omega_c \end{cases} \quad (10)$$

Pasa bajo

Las frecuencias mayores a la frecuencia de corte ω_c declarada en un filtro pasa bajo son rechazadas. La respuesta en frecuencia $H(\omega)$ del filtro Pasa bajo permite el paso de exponenciales complejas, $e^{i\omega t}$ para valores de ω presentes en la Ecuación (11):

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \leq \omega_c \\ 0, & \omega > \omega_c \end{cases} \quad (11)$$

Pasa banda

Este tipo de filtro se encarga de transmitir un rango de frecuencias específica y rechaza o elimina dos bandas de frecuencias, es decir, elimina todas las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte ω_1 y también las frecuencias sobre la frecuencia de corte ω_2 .

La respuesta en frecuencia $H(\omega)$ del filtro Pasa banda permite el paso de exponenciales complejas, $e^{i\omega t}$ para valores de ω presentes en la Ecuación (12):

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ 0, & \text{Cualquier otro valor de } \omega \end{cases} \quad (12)$$

Corrección de línea base

En ocasiones, los valores del acelerómetro se desplazan respecto a la línea de aceleración cero, esto ocurre debido a que el acelerómetro no se encuentra perfectamente nivelado en el lugar determinado, o tal vez por el sistema de registro al provocar desvío de datos respecto a la línea base.

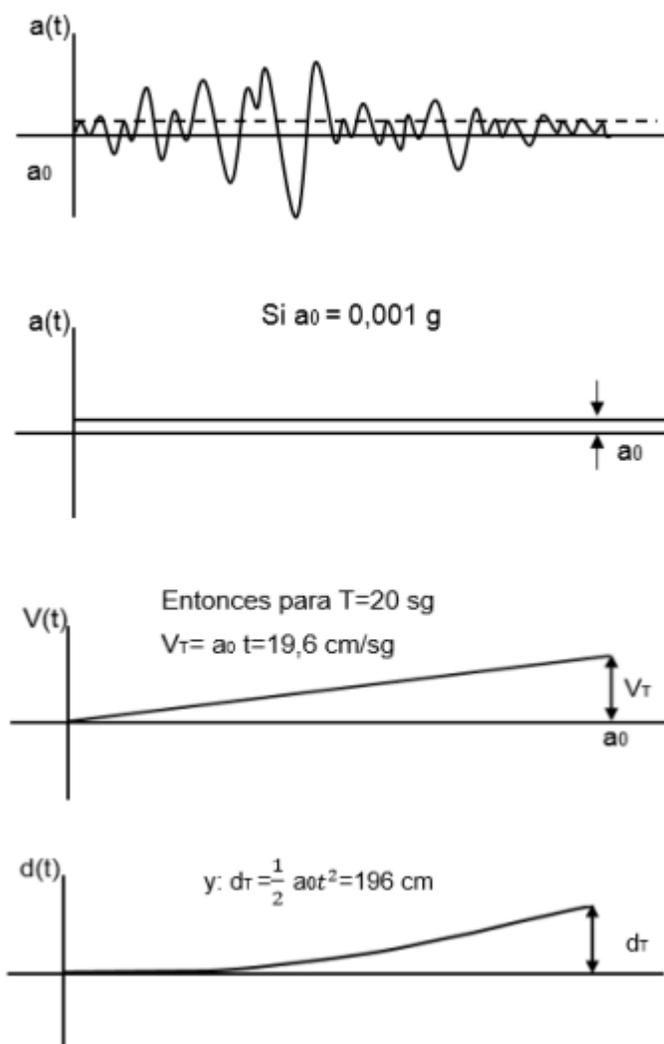
Este error no se puede apreciar en la señal de aceleración, pero puede llegar a ser muy importante al obtener las señales de velocidad y desplazamiento a través de la integración, debido a que la integración está contabilizando el área bajo la curva con respecto a la línea base (Hernández Martínez & Mercado López, 2015).

El acelerómetro puede estar expuesto a distorsiones en el proceso de digitalización, registro y por la presencia de componentes de baja frecuencia. Por tal razón, la velocidad y desplazamiento como resultados de la integración numérica de la aceleración llegan a mostrar tendencias irreales a causa de las distorsiones en un periodo largo. El resultado que se puede observar comúnmente es una velocidad final no nula que no oscila en torno a cero y la exposición de ondas de periodo largo que son complicadas de visualizar en la aceleración original (Hernán & Robalino, 2011).

Aplicar la corrección de línea base a los registros presenta una gran ventaja debido a que se puede obtener la aceleración, velocidad y desplazamiento lo más exacto posible a su valor real respecto al movimiento del suelo por el sismo, para lograr resultados favorables en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Para comprender de mejor manera el error, como se muestra en la Figura 11, se plantea un desplazamiento constante del acelerómetro respecto a la línea base de 0.001 g, una vez realizada la integración con este desplazamiento se llega a visualizar un incremento lineal de la velocidad y después de integrar nuevamente se presenta un incremento parabólico del desplazamiento obteniendo un valor alejado al valor real (Darío et al., 2020).

Figura 11

Desplazamiento continuo del acelerómetro respecto a la línea base



Nota: Tomada de Desarrollo de un software para procesamiento y corrección de registros, y generación de espectros de respuesta sísmica, por B. Darío, E. Silva, P. Alexandra & V. Yépez, 2020.

Método de Berg y Housner

Para realizar la corrección de la línea base se utilizó el método de Berg y Housner debido a que es un método clásico que presenta buenos resultados incluso con registros de períodos cortos. A continuación, se presenta el procedimiento para la corrección de registros del acelerómetro:

Se determina la velocidad y desplazamiento del suelo, después de digitalizar la señal del acelerómetro, a través de la integración numérica. Considerando una variación lineal entre aceleraciones a través de una integración numérica se puede obtener el cálculo del registro de velocidad para casos generales, como se muestra en la Ecuación (13).

$$V_{i+1} = V_i + \frac{a_i + a_{i+1}}{2} \Delta t_i \quad (13)$$

Utilizando la Ecuación (13), se puede obtener el valor de velocidad para cualquier instante de tiempo como se puede observar en la Ecuación (14), que será utilizada para el cálculo del registro de velocidad.

$$V_{i+1} = \left[\sum_{j=0}^{i+1} a_j - \frac{a_0 + a_{i+1}}{2} \right] \Delta t_i \quad (14)$$

Posteriormente considerando que exista una variación lineal entre velocidades a través de una integración numérica se puede obtener el cálculo del registro de desplazamiento para casos generales, como se muestra en la Ecuación (15)(15).

$$d_{i+1} = d_i + V_i \Delta t_i + \frac{2a_i + a_{i+1}}{6} \Delta t_i^2 \quad (15)$$

Utilizando la Ecuación (15), se puede obtener el valor de desplazamiento para cualquier instante de tiempo como se puede observar en la Ecuación (16), que será utilizada para el cálculo del registro de desplazamiento.

$$d_{i+1} = \left[\sum_{j=0}^{i+1} V_j - \frac{V_0 + V_{i+1}}{2} \right] \Delta t_i \quad (16)$$

En donde $i = 1, 2, 3, \dots, T$ y $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$

Se obtiene la ecuación de la velocidad y desplazamiento en cualquier instante de tiempo, porque además de los errores de lectura debido a la resolución y el desconocimiento de la verdadera línea cero, no se conoce la velocidad inicial del suelo de cuando comenzó a registrar la primera aceleración. Por tal razón, Berg, G.V. y Housner plantean los valores de velocidad y desplazamiento inicial igual a cero.

Posteriormente se presentan las expresiones que se usan para obtener las ecuaciones que serán importantes para realizar la corrección de la línea base. Como resultado se obtienen las constantes C_0, C_1, C_2 necesarias para el cálculo de la aceleración, velocidad y desplazamiento corregidos a través del método.

$$A1_i = \frac{1}{2} \cdot V_i \cdot \Delta t_i \cdot (t_i + t_{i+1}) + \frac{1}{24} \cdot \Delta t_i^2 \cdot [a_i \cdot (3 \cdot t_i + 5 \cdot t_{i+1}) + a_{i+1} \cdot (t_i + 3 \cdot t_{i+1})]$$

$$A2_i = \frac{1}{3} \cdot V_i \cdot \Delta t_i \cdot (t_i^2 + t_i \cdot t_{i+1} + t_{i+1}^2) + \frac{1}{60} \cdot \Delta t_i^2 \cdot [a_i \cdot (4 \cdot t_i^2 + 7 \cdot t_i \cdot t_{i+1} + 9 \cdot t_{i+1}^2) + a_{i+1} \cdot (t_i^2 + 3 \cdot t_i \cdot t_{i+1} + 6 \cdot t_{i+1}^2)]$$

$$A3_i = \frac{1}{4} \cdot V_i \cdot \Delta t_i \cdot (t_i^3 + t_i^3 \cdot t_{i+1} + t_{i+1}^2 + t_{i+1}^3) + \frac{1}{120} \cdot \Delta t_i^2 \cdot [a_i \cdot (5 \cdot t_i^3 + 9 \cdot t_i^2 \cdot t_{i+1} + 12 t_i \cdot t_{i+1}^2 + 14 \cdot t_{i+1}^3) + a_{i+1} \cdot (t_i^3 + 3 \cdot t_i^2 \cdot t_{i+1} + 6 t_i \cdot t_{i+1}^2 + 10 \cdot t_{i+1}^3)]$$

$$A1 = \sum_{i=1}^T A1_i$$

$$A2 = \sum_{i=1}^T A2_i$$

$$A3 = \sum_{i=1}^T A3_i$$

$$A1_0 = 0$$

$$A2_0 = 0$$

$$A3_0 = 0$$

$$W = \frac{378000}{t}$$

$$S_{11} = \frac{W \cdot t_T^4}{1260} = \frac{300}{t_T^3} \quad S_{12} = S_{21} = \frac{W \cdot t_T^3}{420} = \frac{900}{t_T^4} \quad S_{13} = S_{31} = \frac{W \cdot t_T^2}{600} = \frac{630}{t_T^5}$$

$$S_{22} = \frac{4 \cdot W \cdot t_T^2}{525} = \frac{2880}{t_T^5} \quad S_{23} = S_{32} = \frac{W \cdot t_T}{180} = \frac{2100}{t_T^6} \quad S_{33} = \frac{W}{240} = \frac{1575}{t_T^7}$$

$$C_0 = S_{11} \cdot A1 + S_{12} \cdot A2 + S_{13} \cdot A3 = \frac{300}{t_T^3} \cdot A1 + \frac{900}{t_T^4} \cdot A2 + \frac{630}{t_T^5} \cdot A3$$

$$C_1 = S_{21} \cdot A1 + S_{22} \cdot A2 + S_{23} \cdot A3 = \frac{900}{t_T^4} \cdot A1 + \frac{2880}{t_T^5} \cdot A2 + \frac{2100}{t_T^6} \cdot A3$$

$$C_2 = S_{31} \cdot A1 + S_{32} \cdot A2 + S_{33} \cdot A3 = \frac{630}{t_T^5} \cdot A1 + \frac{2100}{t_T^6} \cdot A2 + \frac{1575}{t_T^7} \cdot A3$$

Para $i = 1, 2, 3, \dots, T$:

Una vez se conocen las constantes C_0, C_1, C_2 se puede obtener la aceleración como se puede observar en la Ecuación (17), velocidad como se puede observar en la Ecuación (18) y el desplazamiento como se puede observar en la Ecuación (19) corregidos por línea base.

$$a_{i,corr} = a_i - C_0 - 2 \cdot C_1 \cdot t_i - 3 \cdot C_2 \cdot t_i^2 \quad (17)$$

$$v_{i,corr} = v_i - C_0 \cdot t_i - C_1 \cdot t_i^2 - C_2 \cdot t_i^3 \quad (18)$$

$$d_{i,corr} = d_i - \frac{1}{2} \cdot C_0 \cdot t_i^2 - \frac{1}{3} \cdot C_1 \cdot t_i^3 - \frac{1}{4} \cdot C_2 \cdot t_i^4 \quad (19)$$

Capítulo III

Diseño e implementación del prototipo

Análisis comparativo de los sensores preseleccionados

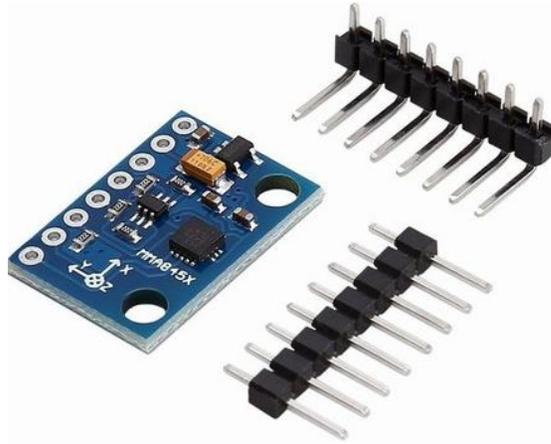
Para la implementación del proyecto se determinó los sensores a emplear tomando en consideración varios factores detallados en la Tabla 5. En función de dichos factores se tomó en cuenta tres posibles sensores existentes en el mercado que podrían cumplir con el objetivo del proyecto. El sensor empleado para el proyecto se determinó entre los acelerómetros digitales presentes en el mercado como el ADXL345, MMA8452Q y MPU6050. En el presente apartado se detalla una breve descripción de cada sensor con su respectiva ilustración, posteriormente se realiza una comparación entre los sensores propuestos para determinar a través de una valoración cuantitativa el sensor apropiado que cumpla con las necesidades del proyecto.

ADXL345

El ADXL345 visible en la Figura 12 mide la aceleración estática de la gravedad en aplicaciones de detección de inclinación, así como la aceleración dinámica resultante del movimiento o impacto. Su alta resolución (4 mg/LSB) permite la detección de cambios de inclinación de 0.25°. Es un acelerómetro triaxial de baja potencia que posee una medición de alta resolución (13 bits) capaz de llegar hasta ± 16 g. La información de salida digital posee un formato de complemento a dos de 16 bits y son accesibles a través de un bus de interfaz de periféricos serie (SPI, del inglés Serial Peripheral Interface) o I2C (Analog Devices, 2008).

Figura 13

Acelerómetro digital MMA8452



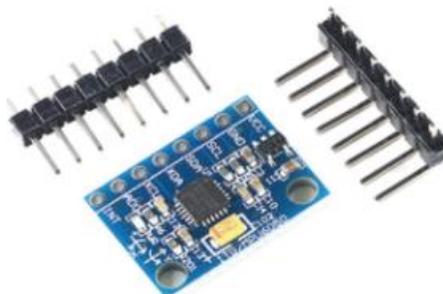
Nota: Tomado de *Acelerómetro Digital I2c 3 Ejes Mma8452 Arduino*, por MGSYSTEM, 2022, (<https://www.ocompra.com/ecuador/item/mgssystem-acelerometro-digital-i2c-3-ejes-mma8452-arduino-509352883/>)

MPU6050

El sensor MPU-6050, visible en la Figura 14, posee 6 ejes que combina un giroscopio de 3 ejes, un acelerómetro de 3 ejes y un Procesador de movimiento digital (DMP, del inglés Digital Motion Processor™). Tiene tres convertidores de analógico a digital (ADC, del inglés Analog to Digital Converter) de 16 bits para digitalizar las salidas del giroscopio y tres ADC de 16 bits para digitalizar las salidas del acelerómetro. Para un seguimiento preciso de movimientos rápidos y lentos, cuenta con un giroscopio y un acelerómetro de escala de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$. Además, está diseñado para interactuar con múltiples dispositivos a través de su puerto I2C (InvenSense, 2013a).

Figura 14

Sensor Acelerómetro Giroscopio MPU6050



Nota: Tomado de *Sensor Acelerómetro Giroscopio MPU6050*, ROBOTICS ECUADOR, 2022,
(<https://roboticsec.com/producto/5a1115-sensor-acelerometro-giroscopio-mpu6050/>)

Comparación de sensores

A continuación, se presentan las características más relevantes para el proyecto, que serán evaluados a través de valores cuantitativos del 0 (nada) al 4 (máximo), se realiza el análisis con respecto a cada sensor propuesto anteriormente.

Tabla 4

Valoración de la escala cuantitativa

Valoración				
0	1	2	3	4
0%	25%	50%	75%	100%

Tabla 5*Características de los sensores digitales de aceleración*

Características	ADXL345	MMA8452	MPU6050	Unidad
Rango de aceleración	±2/±4/±8/±16	±2/±4/±8	±2/±4/±8/±16	g
Sensibilidad	256/128/64/32	1024/512/256	16384/8192/4096/2048	LSB/g
Voltaje de alimentación	1.8 a 3.6	1.95 a 3.6	2.375 a 3.46	V
Interface serial soportada	SPI/I2C	I2C	I2C	
Valor de mercado	4.50	5.00	3.50	\$
Resolución	10/10/11/12/13	12	16	Bits
Disponibilidad	Si	Si	Si	

Tabla 6*Valoración de las características de los sensores digitales de aceleración*

Características	ADXL345	MMA8452	MPU6050
Rango de aceleración	4	3	4
Sensibilidad	2	3	4
Voltaje de alimentación	4	4	4

Características	ADXL345	MMA8452	MPU6050
Interface serial soportada	4	3	3
Valor de mercado	3	2	4
Resolución	3	2	4
Disponibilidad	4	4	4
Total	24	21	27

Tabla 7

Porcentaje de priorización de alternativas

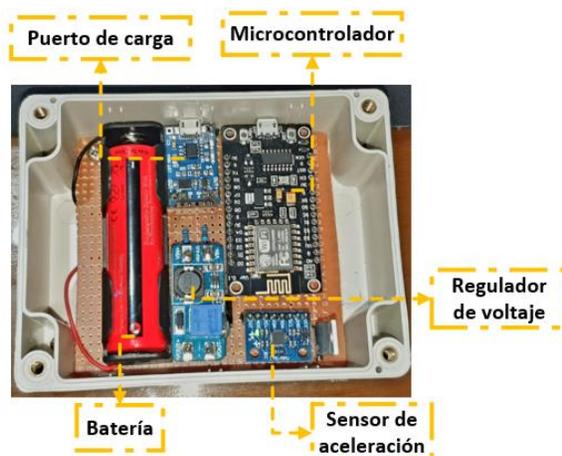
Puntos Máximos	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
28	24	21	27
100%	85.71%	75%	96.43%

Análisis: Basado en la Tabla 7 el sensor a elegir es el acelerómetro MPU6050 (Alternativa 3), debido a que posee un porcentaje de 96.43%, calificándolo como el más adecuado para la realización del presente proyecto. Además, el sensor MPU6050 posee varias referencias en proyectos similares de sistemas de monitorización de vibraciones. Este sensor triaxial utiliza tecnología MEMS (Sistema Micro-Electro-Mecánico), una estructura micromecanizada construida sobre una oblea de silicio, siendo un sensor tipo capacitivo. Su funcionamiento consiste en la variación de la capacidad, que ocurre a través del desplazamiento de una masa inercial que bajo el efecto de aceleración desplaza las placas móviles respecto de las placas fijas. La variación de la capacidad entrega valores de corriente eléctrica al microcontrolador.

Desarrollo del nodo sensor

Figura 15

Estructura y componentes del nodo sensor



El nodo sensor está compuesto por un acelerómetro MPU6050 triaxial con tecnología MEMS (Sistema Micro-Electro-Mecánico) que es una estructura micromecanizada construida sobre una oblea de silicio. Además, cuenta con un microcontrolador NodeMCU v3 ESP8266 que es un módulo de desarrollo con WiFi compatible con Arduino y usualmente es empleado para aplicaciones IoT. Posee un circuito de recarga y alimentación compuesto por un cargador Tp4056 con protección de sobrecarga, sobredescarga y cortocircuito de baterías, seguido de un regulador de voltaje MT3608 para una alimentación de voltaje constante al microcontrolador. El nodo sensor posee una batería recargable 18650 de 6800mAh con el propósito de mantenerlo en funcionamiento en caso de que la fuente de alimentación principal sea interrumpida, como se observa en la Figura 15 .

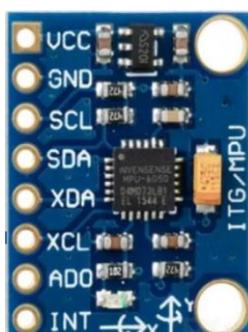
Conexión del sensor

El sensor MPU6050, como se muestra en la Figura 16, posee comunicación serial I²C incorporado que se encarga de proporcionar valores de giroscopio, acelerómetro y sensor de temperatura al microcontrolador. Incluye resistencia de pull-up por lo que no será necesario añadir resistencias

externas para la interfaz de bus I²C. El giroscopio y acelerómetro son programables a través de un convertidor analógico a digital de 16 bits.

Figura 16

Sensor MPU6050



En la Tabla 8, se puede apreciar una breve descripción de cada pin del sensor MPU6050.

Tabla 8

Descripción de los terminales de conexión del sensor MPU6050

Pin	Descripción
VCC	Este pin alimentará al sensor que puede soportar un rango de voltaje de 3.3V a 5V.
GND	Este pin es de tierra que deberá conectarse a una tierra común.
SCL	Este pin es el serial clock que se usa para conectarse al microcontrolador por comunicación serial I ² C.
SDA	Este pin entrega los datos en serie al microcontrolador por comunicación serial I ² C.
XDA	Este pin es auxiliar de datos en serie que se conecta a otros sensores por comunicación serial I ² C.
XCL	Este pin es auxiliar de serial clock que se conecta a otros sensores por comunicación serial I ² C.
ADO	Este es el pin que permite cambiar la dirección I ² C.

Pin	Descripción
INT	Este pin es de interrupción que puede usarse para verificar la transmisión de nuevos datos de medición.

Como se pudo observar el sensor MPU6050 posee ocho terminales, pero para la conexión con el microcontrolador ESP8266 NodeMCU solo es necesario conectar los cuatro primeros pines como: VCC, GND, SCL y SDA. La Tabla 9 muestra las conexiones entre el módulo sensor y el microcontrolador.

Tabla 9

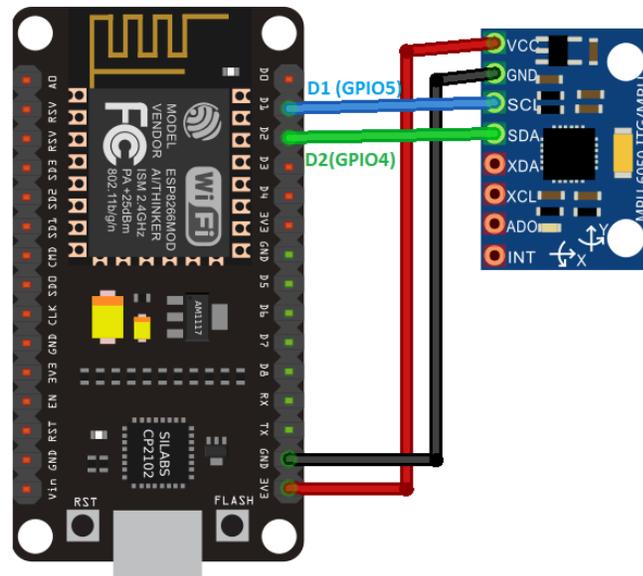
Descripción de la conexión del sensor MPU6050 con el ESP8266 NodeMCU

Sensor MPU6050	ESP8266 NodeMCU
VCC	3.3V
GND	GND (la tierra común)
SCL	GPIO5 (I2C SCL)
SDA	GPIO4 (I2C SDA)

El pin VCC estará conectado al pin de 3.3V que entrega el microcontrolador con su respectivo pin GND que será el pin común entre módulos para la alimentación del sensor. El pin SCL y SDA del módulo sensor estarán conectados a los pines GPIO5 y GPIO4 que son los predeterminados como pines SCL y SDA del microcontrolador para la comunicación serial I²C. En la Figura 17 se puede apreciar la conexión entre el microcontrolador ESP8266 NodeMCU y el módulo sensor MPU6050.

Figura 17

Diagrama de conexión entre el microcontrolador ESP8266 NodeMCU y el sensor MPU6050



Diseño de la alimentación del nodo sensor

Para el diseño se revisó la alimentación aceptable del microcontrolador, la cual es de 5V a través del pin Vin. El consumo de corriente que puede entregar el pin del microcontrolador es de aproximadamente 80mA y el consumo activo de corriente del módulo WiFi de 2.4GHz es aproximadamente entre 56mA y 170mA. Considerando la información de consumo del microcontrolador con el nodo sensor se plantea un voltaje de alimentación de 5V y una entrega de corriente de aproximadamente 1 A.

Se considera el módulo TP4056 para cargar baterías de una celda y para la alimentación del microcontrolador. El módulo presenta protección de sobrecarga, sobredescarga y cortocircuito para la batería. El módulo presenta una entrada USB Micro y dos terminales adjuntos para la alimentación, se puede energizar el módulo por los terminales o por el USB Micro debido a que ambas entradas están conectadas. Posee los terminales OUT+ y OUT- que pueden ser conectados al circuito de carga que se

desea alimentar, además incluye los terminales B+ y B- que se usarán para conectar la batería que no debe ser mayor a 3.7V. En la Figura 18 se puede visualizar los terminales de entrada y salida del módulo.

Figura 18

Descripción de los terminales del módulo TP4056



El módulo TP4056 posee una resistencia programable R3 que nos permite una corriente de carga de hasta 1A para la batería, como se muestra en la Tabla 10 obtenida de la hoja de especificaciones del módulo. Por defecto la corriente de carga de la resistencia programada del módulo es de 1A.

Tabla 10

Configuración de la corriente de carga por la resistencia programable

Resistencia programable ($k\Omega$)	Corriente de carga para la batería (mA)
10	130
5	250
4	300
3	400
2	580
1.66	690

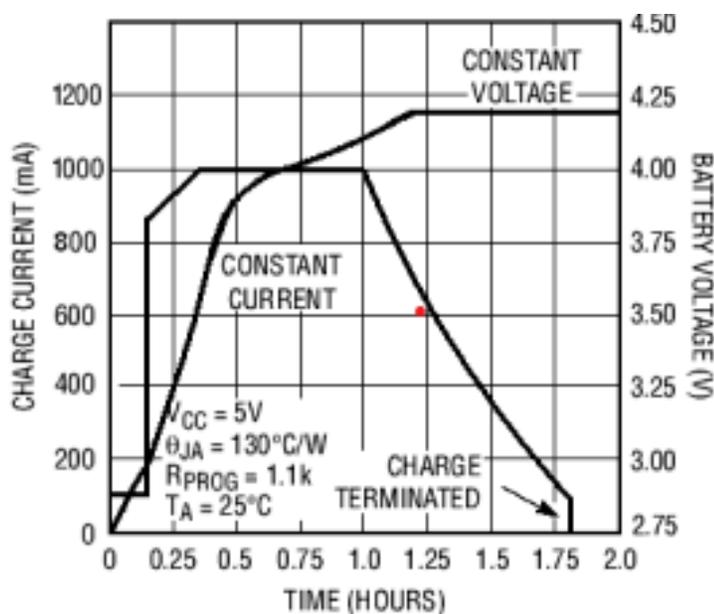
Resistencia programable ($k\Omega$)	Corriente de carga para la batería (mA)
1.5	780
1.33	900
1.2	1000

Nota: Tomada de TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8, por NanJing Top Power ASIC Corp, 2022.

El módulo TP4056 termina automáticamente el ciclo de carga cuando la corriente de carga cae a 1/10 del valor programado después de alcanzar el voltaje final de flotación, es decir que el TP4056 va a parar de cargar la batería solo cuando el voltaje final haya alcanzado el voltaje de 4.2V y además la corriente de carga caiga a una décima parte de la corriente de carga programada. Considerando la corriente de carga de 1A esto supone que hasta que no exista un consumo inferior a 100 mA el proceso de carga no se interrumpirá llegando a cargar siempre la batería como se muestra en la Figura 19. Este problema puede ser ignorado en circuito de bajo consumo, pero en este caso debido al uso de un microcontrolador y un módulo sensor es necesario diseñar un circuito externo.

Figura 19

Ciclo completo de carga de una batería de 1000mAh



Nota: Tomada de *TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8*, por NanJing Top Power ASIC Corp, 2022.

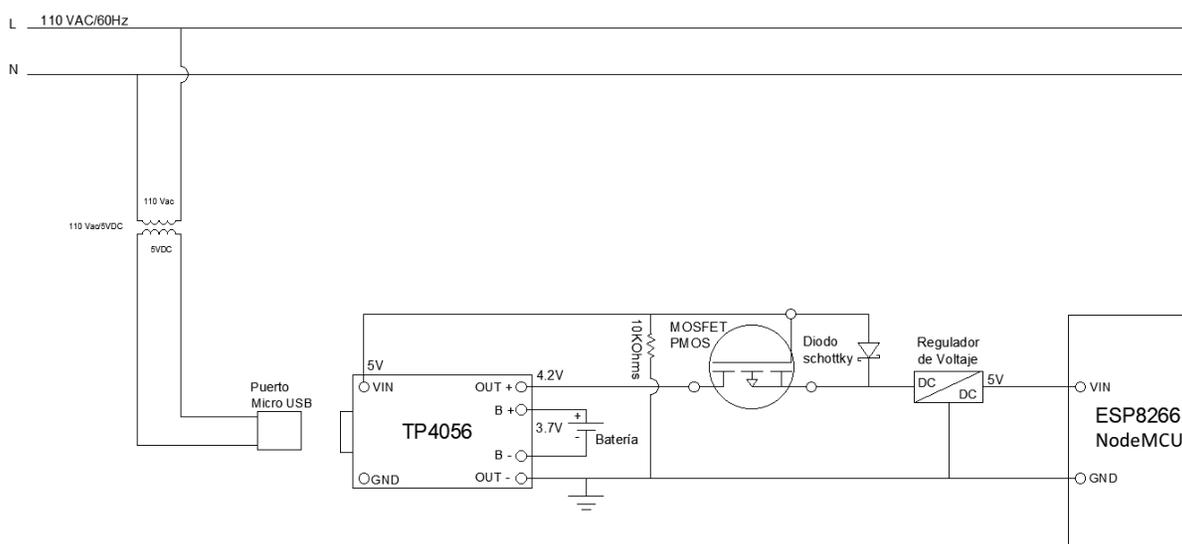
El voltaje de salida que brinda el TP4056 es de máximo 4.2V que varía si la alimentación es por el puerto Micro USB o por la batería. Por tal razón es necesario un regulador de voltaje para la alimentación del microcontrolador. El módulo TP4056 maneja corriente de 1A que se reparte para cargar la batería y para la alimentación del circuito, debido a esto la corriente para la alimentación del microcontrolador es insuficiente para la transmisión de datos continuos. Por tal motivo se planteó otro diseño.

Como se observa en la Figura 20, se diseñó un circuito que aproveche el TP4056 y el regulador de voltaje MT3608 añadiendo un transistor MOSFET PMOS y un diodo schottky de tal forma que la corriente de carga para la batería no se utilice para el microcontrolador. Este diseño permite alimentar al microcontrolador de manera constante con 5V ya sea desde la entrada Micro USB como de la batería,

funcionando el transistor MOSFET PMOS como un switch. Las ventajas de este diseño es que mejora el tiempo de carga de la batería, aumenta la vida útil de la batería y entrega la corriente necesaria para el funcionamiento de óptimo del microcontrolador, con el propósito de que el microcontrolador no deje de estar energizado intercambiando entre la alimentación por el Micro USB y la batería en caso de que exista alguna interrupción con la fuente de alimentación principal.

Figura 20

Diagrama eléctrico de conexiones del nodo sensor



Para la implementación del circuito se consideró un regulador de voltaje que brinde una tensión constante de 5 V superior a la tensión de entrada. El regulador de voltaje escogido es el MT3608 que puede aceptar una entrada de voltaje de 2V a 24V y puede entregar una salida de voltaje constante de 2V a 28V que se puede regular a través de un potenciómetro ubicado en el módulo. La corriente máxima que puede llegar a proporcionar es de 2A, además posee una eficiencia superior al 93% y se autoprotege apagándose si la temperatura en el módulo aumenta. Posee protección de limitación de corriente a un máximo de 4A, pero no posee protección con la inversión de polaridad.

De acuerdo a las especificaciones del regulador de voltaje MT3608 se dimensionó las especificaciones de los demás componentes del circuito. Se consideró un MOSFET PMOS capaz de soportar 5V y una corriente máxima de 4A. Se escogió el MOSFET PMOS IRF9530N capaz de soportar una tensión de 100V y una corriente máxima de 14A cumpliendo así los requerimientos. Debido a su alta capacidad en tensión y corriente no estará expuesto a temperaturas altas por disipación de potencia. Se escogió un diodo schottky NTE573-1 capaz de soportar una tensión de 100V y una corriente máxima de 5A cumpliendo así los requerimientos.

Se escogió una batería de 3.7V recargable 18650 de 6800mAh. Se realizaron pruebas de durabilidad de la batería como única fuente de alimentación del nodo sensor obteniendo un tiempo de descarga de la batería de 4 horas y 25 minutos aproximadamente, y un tiempo de carga de la batería de 1 hora aproximadamente. El tiempo de carga de la batería es más eficiente debido al diseño del circuito presentado en la Figura 20 ya que aprovecha toda la corriente de carga del TP4056.

Broker

El Broker es el encargado de recibir los mensajes enviados por Clientes MQTT y distribuirlos entre los mismos clientes tomando en cuenta la configuración de suscripción y publicación. En el presente trabajo se considera al nodo sensor como un Cliente MQTT que se encarga solo de publicar los mensajes al Broker, el cual enviará la información a todos los Clientes suscritos. El servicio de Broker puede ser instalado en un dispositivo o se puede acceder a sus servicios por la web.

Existen una gran variedad de servidores Broker gratuitos que cumplen con la calidad de servicio QoS 0, QoS 1 y QoS 2, con soporte de autenticación, puerto WebSocket entre otras características para la comunicación por protocolo MQTT. Los servidores Broker más conocidos son Mosquitto, RabbitMQ, S, Emq X, HiveMQ y Apache ActiveMQ. Para el presente trabajo se escogió el servidor Broker Emq X, el cual presentó una menor latencia en la adquisición de datos en comparación con los otros servidores,

además posee el puerto WebSocket necesario para realizar el visualizador web del envío de datos de los nodos sensores.

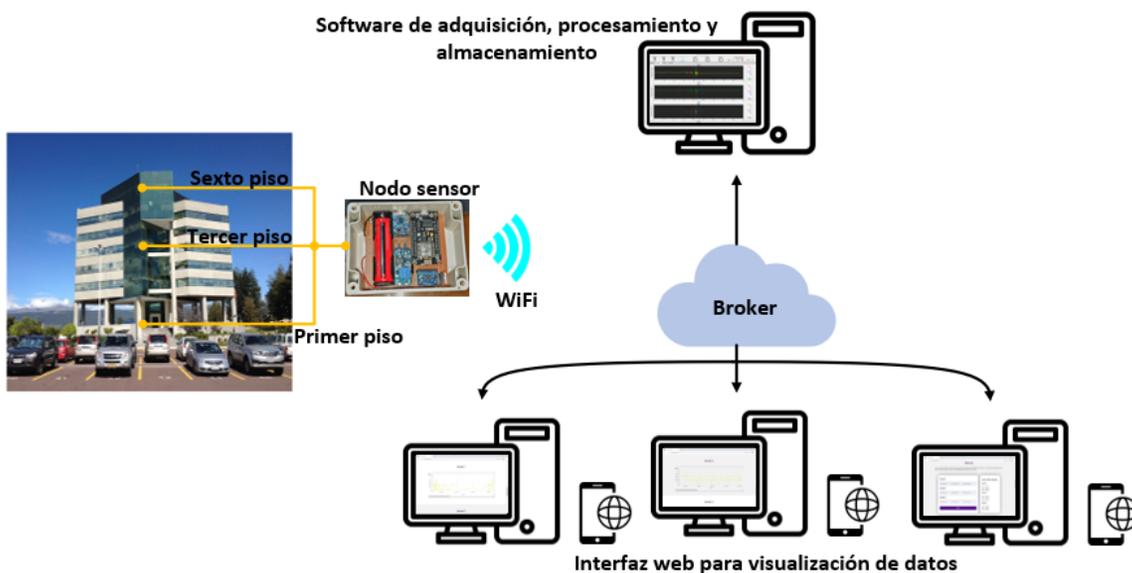
Se configuró el nodo sensor para que acceda a la dirección del Broker *broker.emqx.io* a través del puerto TCP 1883 como publicador con una calidad de servicio de transmisión QoS 0. Se escogió una calidad de servicio de transmisión QoS 0 debido a que si se solicita niveles de servicio QoS 1 y 2 se gestionará la retransmisión de información para garantizar la entrega entre el nodo sensor y el broker aumentando la latencia en el envío de la información. Para acceder a la información de los sensores se configuró el software de adquisición como suscriptor, este programa ingresa a la dirección del Broker *broker.emqx.io* por el puerto TCP 1883, mientras que para acceder a la información a través de la web es necesario acceder a la dirección del Broker y al puerto WebSocket 8083.

Arquitectura propuesta

Para la arquitectura del sistema se plantea usar redes de sensores inalámbricos. Esta red se compone de nodos sensores que utilizarán WiFi para la comunicación con el servidor Broker, el cual a su vez transmitirá la información por la red al software de adquisición y procesamiento. El nodo sensor integra las funcionalidades de adquisición de las aceleraciones en los tres ejes del acelerómetro y la transmisión de información a la red. Se dispondrá de una página web para que cualquier usuario pueda acceder a la información de los nodos sensores, además de un software de adquisición y procesamiento para el monitoreo de los sensores desde el computador como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Arquitectura de la comunicación del proyecto



Comunicación

La comunicación de los nodos sensores con la web es a través de la tecnología WiFi que soporta el estándar 802.11b/g/n. El estándar utilizado para los nodos sensores es el 802.11b debido a que posee una potencia de recepción de -80dbm para una mayor sensibilidad en la transmisión de datos en interiores. Es el estándar con mayor potencia de recepción en comparación con el 802.11g/n. Esta configuración le permite al nodo sensor conectarse con el punto de acceso de red considerando que existen materiales de por medio que atenúen la señal WiFi, como pueden ser las columnas, paredes y ventanas dentro del edificio.

El microcontrolador ESP8266 NodeMCU posee integrado un módulo WiFi. Este microcontrolador se encuentra dentro de una caja fabricada en polímero de alta resistencia cuyo propósito es que el circuito no esté expuesto al polvo o líquidos que puedan dañarlo. Por tal razón se realizaron pruebas para medir la potencia de la señal WiFi a través de un indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, del

inglés Received Signal Strength Indicator). Estas pruebas nos indicarán si el circuito necesitará una antena externa para aumentar la ganancia y el alcance de la señal WiFi.

Tabla 11

Pruebas RSSI sin obstrucciones del nodo sensor

Distancia(m)	Sin obstrucciones										Media(x)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.3	-53	-52	-48	-47	-49	-47	-49	-53	-50	-50	-49.8
0.6	-58	-59	-60	-58	-56	-59	-54	-56	-58	-59	-57.7
0.9	-62	-63	-62	-59	-57	-60	-57	-60	-60	-63	-60.3
1.2	-67	-67	-66	-67	-67	-66	-67	-64	-65	-66	-66.2
1.5	-68	-69	-67	-68	-68	-69	-69	-70	-67	-69	-68.4
1.8	-73	-71	-71	-70	-73	-72	-69	-70	-68	-72	-70.9
2.1	-73	-72	-70	-69	-71	-73	-72	-70	-70	-71	-71.1
2.4	-78	-77	-76	-76	-76	-75	-77	-78	-73	-70	-75.6
2.7	-77	-76	-75	-75	-76	-77	-75	-75	-78	-77	-76.1
3	-78	-78	-78	-79	-78	-77	-80	-79	-78	-81	-78.6
3.3	-80	-79	-78	-79	-79	-80	-81	-78	-79	-80	-79.3
3.6	-81	-79	-78	-80	-79	-81	-80	-79	-80	-79	-79.6
3.9	-81	-80	-79	-81	-82	-79	-81	-81	-80	-79	-80.3
4.2	-81	-83	-82	-80	-81	-80	-83	-81	-81	-80	-81.2
4.5	-83	-80	-82	-80	-81	-83	-82	-80	-83	-82	-81.6
4.8	-84	-83	-80	-81	-82	-80	-83	-84	-83	-82	-82.2
5.1	-83	-83	-84	-82	-84	-83	-84	-83	-82	-83	-83.1
5.4	-84	-84	-83	-82	-84	-84	-83	-82	-83	-83	-83.2
5.7	-85	-83	-82	-84	-83	-82	-83	-84	-83	-84	-83.3
6	-84	-83	-85	-82	-83	-84	-84	-83	-83	-84	-83.5

Tabla 12*Pruebas RSSI con obstrucciones del nodo sensor*

Distancia(m)	Con obstrucciones										Media(x)
	RSSI (dBm)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.3	-49	-51	-50	-49	-52	-51	-50	-53	-48	-50	-50.3
0.6	-59	-56	-58	-59	-59	-56	-58	-60	-58	-58	-58.1
0.9	-59	-62	-61	-62	-59	-61	-63	-60	-60	-60	-60.7
1.2	-67	-66	-66	-67	-67	-67	-67	-66	-66	-65	-66.4
1.5	-68	-67	-69	-68	-69	-68	-69	-69	-70	-68	-68.5
1.8	-70	-71	-72	-73	-69	-73	-71	-72	-70	-69	-71
2.1	-71	-70	-71	-73	-72	-71	-72	-73	-70	-72	-71.5
2.4	-76	-76	-70	-78	-77	-76	-77	-75	-78	-75	-75.8
2.7	-77	-75	-77	-77	-75	-76	-76	-77	-75	-78	-76.3
3	-79	-78	-81	-78	-80	-78	-80	-77	-79	-78	-78.8
3.3	-79	-80	-80	-80	-81	-79	-79	-80	-78	-79	-79.5
3.6	-80	-80	-79	-81	-80	-79	-79	-82	-79	-80	-79.9
3.9	-81	-81	-79	-81	-81	-82	-80	-79	-81	-80	-80.5
4.2	-80	-82	-82	-81	-83	-81	-83	-80	-81	-81	-81.4
4.5	-80	-82	-82	-83	-82	-81	-81	-84	-80	-83	-81.8
4.8	-81	-80	-82	-84	-83	-82	-83	-81	-85	-83	-82.4
5.1	-82	-84	-84	-83	-84	-84	-83	-83	-83	-83	-83.3
5.4	-82	-83	-83	-84	-83	-84	-85	-84	-83	-83	-83.4
5.7	-84	-83	-84	-85	-83	-83	-84	-82	-84	-83	-83.5
6	-83	-85	-85	-84	-84	-83	-83	-84	-83	-83	-83.7

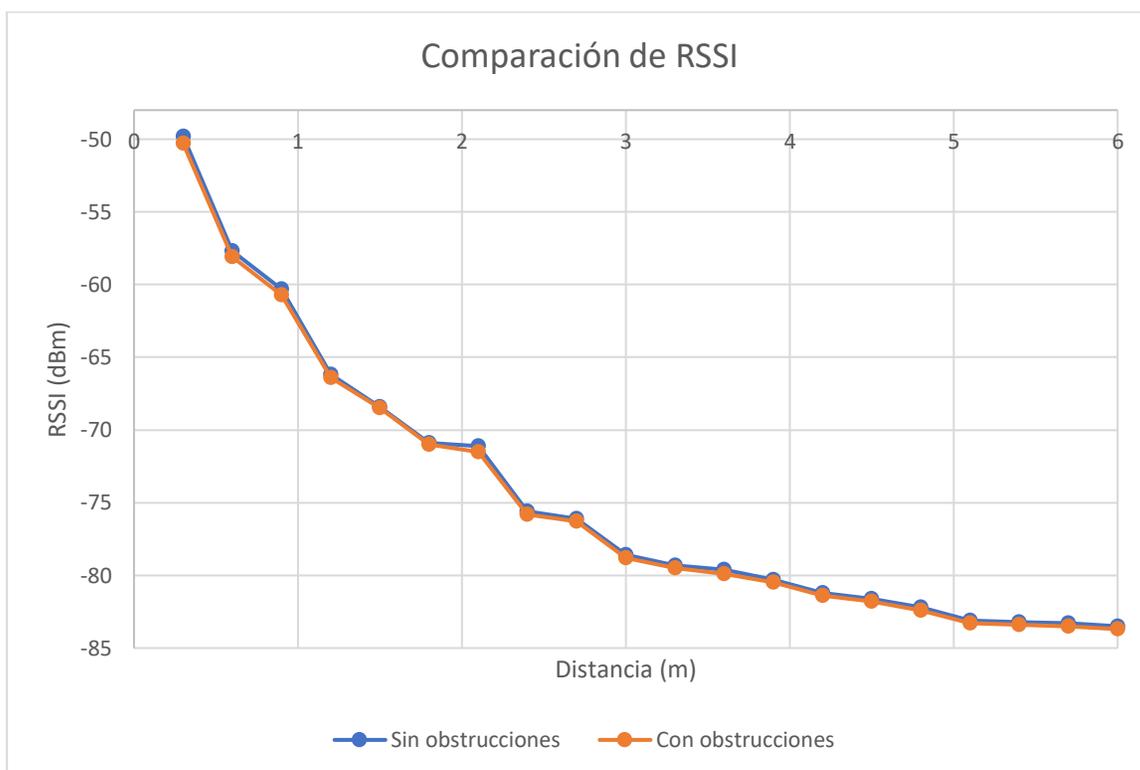
Como se puede apreciar en la Tabla 11 y la Tabla 12, se tomaron diez muestras a diferentes distancias entre el nodo sensor y el punto de acceso sin obstrucciones, es decir, sin la caja.

Posteriormente se tomaron otras diez muestras a diferentes distancias entre el nodo sensor y el punto

de acceso con obstrucciones, es decir, dentro de la caja. Como se puede visualizar en la Figura 22 una vez obtenida la media de las diez muestras se graficó la variación de RSSI con respecto a sus distancias con el punto de acceso a la red y se puede apreciar que entre ambas condiciones no varía significativamente. Por tal razón se consideró que no es necesario la implementación de una antena externa para aumentar la ganancia y alcance de la señal WiFi.

Figura 22

Comparación de RSSI con y sin obstrucciones del nodo sensor



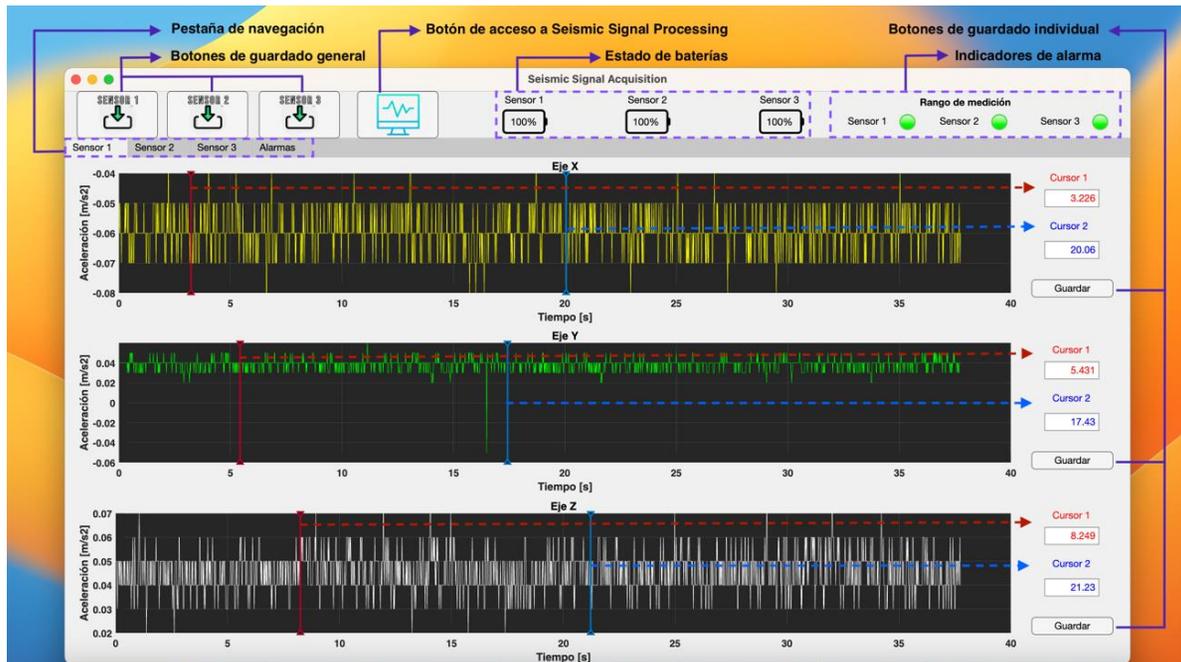
Desarrollo de las interfaces de usuario

Desarrollo del software para la adquisición de datos (Matlab)

Ventana de adquisición de datos

Figura 23

Seismic Signal Acquisition - sección de adquisición de datos



La Figura 23 presenta la ventana de adquisición de datos, es la primera en desplegarse al ejecutar el software, aquí se puede visualizar en tiempo real la aceleración captada por cada uno de los sensores, la interfaz cuenta con varias opciones y herramientas como:

- Pestaña de navegación. - Mediante esta pestaña se puede alternar entre las ventanas de monitoreo y alarmas de los tres sensores.
- Botones de guardado general. - Al pulsar uno de estos botones se genera un archivo de texto (.txt) que contiene los datos de los tres ejes del sensor seleccionado.

- Botón de acceso a Seismic Signal Processing. - Abre una nueva ventana la cual contiene el software Seismic Signal Processing, el cual es empleado para el procesamiento de señales.
- Estado de baterías. - En esta sección se monitorea el estado de carga en tiempo real de las baterías de emergencia que contiene cada nodo sensor.
- Botones de guardado individual. - Esta opción trabaja en conjunto con los cursores presentes en cada eje de los sensores, al pulsar el botón se genera un archivo de texto (.txt) y se despliega una ventana emergente como la mostrada en la Figura 24. Si se selecciona "Si" se abre automáticamente la ventana del software Seismic Signal Processing para realizar el procesamiento de la señal, caso contrario solo se genera el archivo de texto.

Figura 24

Seismic Signal Acquisition - Ventana emergente de guardado individual



- Indicadores de alarma. - Se encarga de mostrar visualmente si se ha superado uno de los offset seteados en la ventana de Alarmas, en caso de superarse el indicador tendrá color rojo.

Además de tener las ventanas de visualización de aceleración de los tres sensores, la interfaz cuenta con una ventana de alarmas. Esta ventana mostrada en la Figura 25 presenta una sección de seteo de offset, en la cual se define el valor de amplitud mínimo que se desea tener antes de que se registre una alarma para cada uno de los ejes en los tres sensores. La ventana presenta una tabla de

registro donde se podrá visualizar los datos (sensor, eje, valor de aceleración y fecha/hora) que generaron la alarma. Además, dispone de tres botones para el reseteo de indicadores de alarma, la descarga de historial de alarmas y la limpieza de historial de alarmas.

Figura 25

Seismic Signal Acquisition - sección de alarmas

The screenshot displays the 'Seismic Signal Acquisition' software interface, specifically the alarm management section. At the top, there are three sensor status indicators (Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3) and a 'Rango de medición' (Measurement Range) section showing 100% for all sensors. Below this is a 'Sección de seteo de offsets' (Offset settings section) with a table for configuring offsets for three sensors. The table has columns for Sensor 1, Sensor 2, and Sensor 3, and rows for Eje X, Eje Y, and Eje Z. The values are: Sensor 1 (Eje X: 0.5, Eje Y: 0.5, Eje Z: 0.5), Sensor 2 (Eje X: 0.5, Eje Y: 0.5, Eje Z: 0.5), and Sensor 3 (Eje X: 0, Eje Y: 0.5, Eje Z: 0.5). An 'Aplicar' button is located to the right of the table. To the right of the offset settings are three buttons: 'Reseteo de indicadores de alarma' (Reset alarm indicators), 'Descarga de historial de alarmas' (Download alarm history), and 'Limpieza de historial de alarmas' (Clean alarm history). Below these buttons is the 'Historial de alarmas' (Alarm history) table, which has columns for Sensor, Eje, Valor, and Fecha y Hora. The table contains one entry: Sensor 2, Eje X, Valor 0.66, Fecha y Hora 22-Nov-2022 20:37:37.

Sensor	Eje	Valor	Fecha y Hora
Sensor 2	Eje X	0.66	22-Nov-2022 20:37:37

Desarrollo del software para el procesamiento de señales

Ventana Ingreso de datos

Figura 26

Seismic Signal Processing - sección de Ingreso de datos

Ingreso de Datos

Primera Línea:

Última Línea:

Intervalo dt:

Datos a ingresar

Valor de aceleración individual en columna

Valores de Tiempo y Aceleración en columna

Múltiples valores de Aceleración por línea

Unidades del archivo

mm/sec2 g

cm/sec2 in/sec2

m/sec2 ft/sec2

Columna de Aceleración:

Columna de Tiempo:

Valor Inicial:


```

0 0 0 0
0.2 -0.19 0.01 9.88
0.4 -0.16 -0.01 9.88
0.6 -0.16 0.02 9.86
0.8 -0.2 -0.01 9.87
1 -0.21 -0.01 9.89
1.2 -0.18 -0 9.87
1.4 -0.16 0 9.88
1.6 -0.18 -0 9.85
1.8 -0.17 -0.02 9.86
2 -0.17 0 9.87
2.2 -0.2 -0 9.88
2.4 -0.2 -0.01 9.89
2.6 -0.19 -0.01 9.88
2.8 -0.16 -0 9.87
3 -0.18 -0.01 9.89
3.2 -0.18 -0 9.89
3.4 -0.18 -0 9.88
3.6 -0.15 -0.02 9.9
3.8 -0.17 0 9.88

```

En la Figura 26 se observa la interfaz de Ingreso de Datos, esta se despliega una vez se haya seleccionado el archivo de texto (.txt) que contenga los datos de aceleración que se desea procesar. En esta ventana se podrá delimitar los datos ingresados, con parámetros como la primera y la última línea que se lee del archivo, así como el formato con el que se ingresó este archivo. Los formatos ingresados pueden poseer una sola columna que contenga los datos de aceleración (valor de aceleración individual en columna), dos columnas, una que contenga los datos de aceleración y otra que contenga los datos

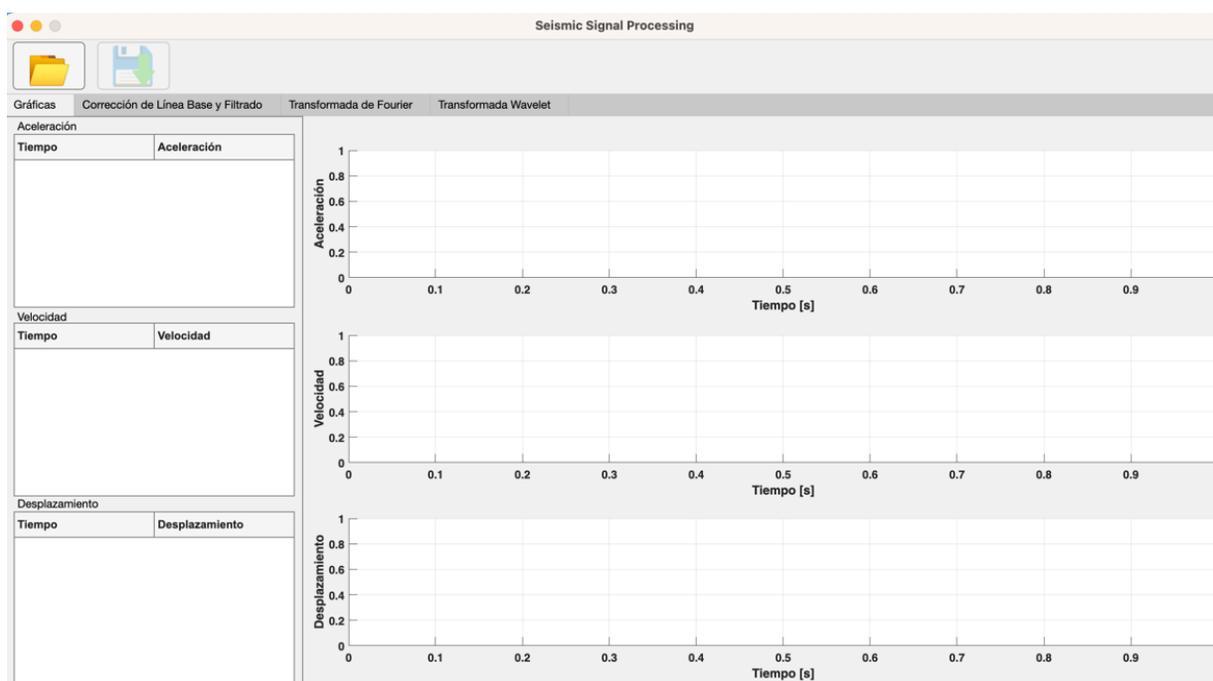
del vector tiempo (Valores de tiempo y aceleración en columna) o un archivo de varias columnas que contenga los datos de aceleración. Además, se podrá establecer el intervalo dt con el cual fue muestreado los valores de aceleración.

Ventana de procesamiento

La ventana de procesamiento es considerada la ventana principal de Seismic Signal Processing, en esta se podrá realizar y visualizar varios de los procesos de acondicionamiento y evaluación a la señal ingresada.

Figura 27

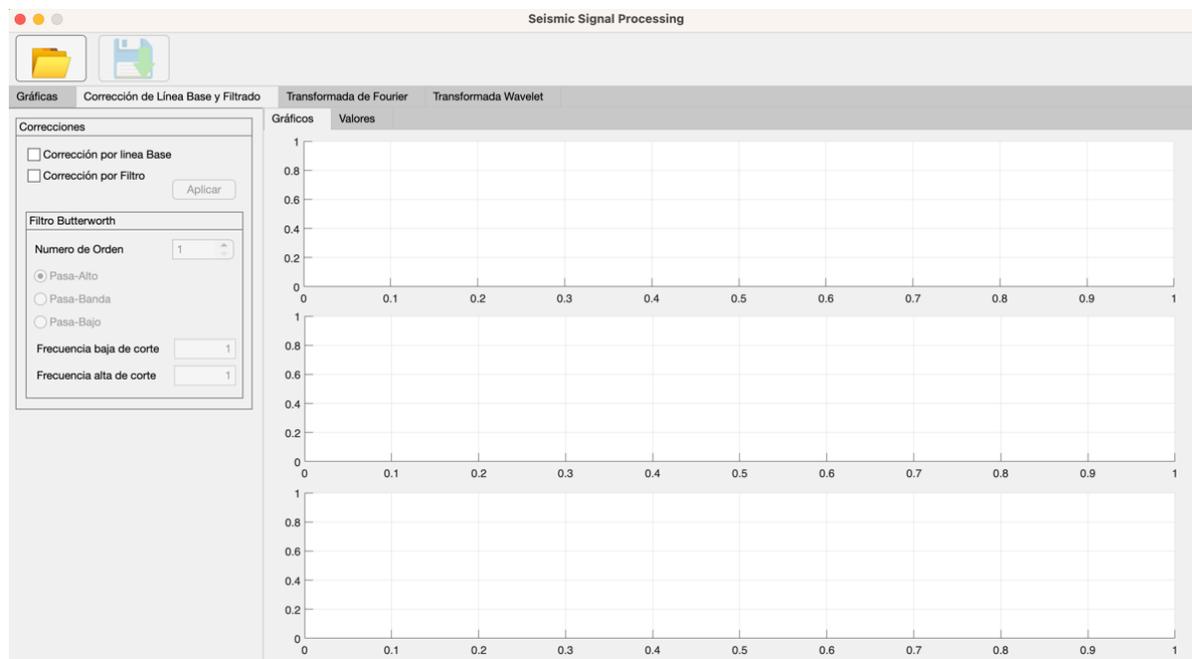
Seismic Signal Processing - sección de Gráficas



La Figura 27 representa la sección de Gráficas de la ventana principal en esta se podrá visualizar la gráfica de aceleración obtenida de los datos ingresados, además de las gráficas de velocidad y desplazamiento obtenidas después de integrar los datos de aceleración ingresados.

Figura 28

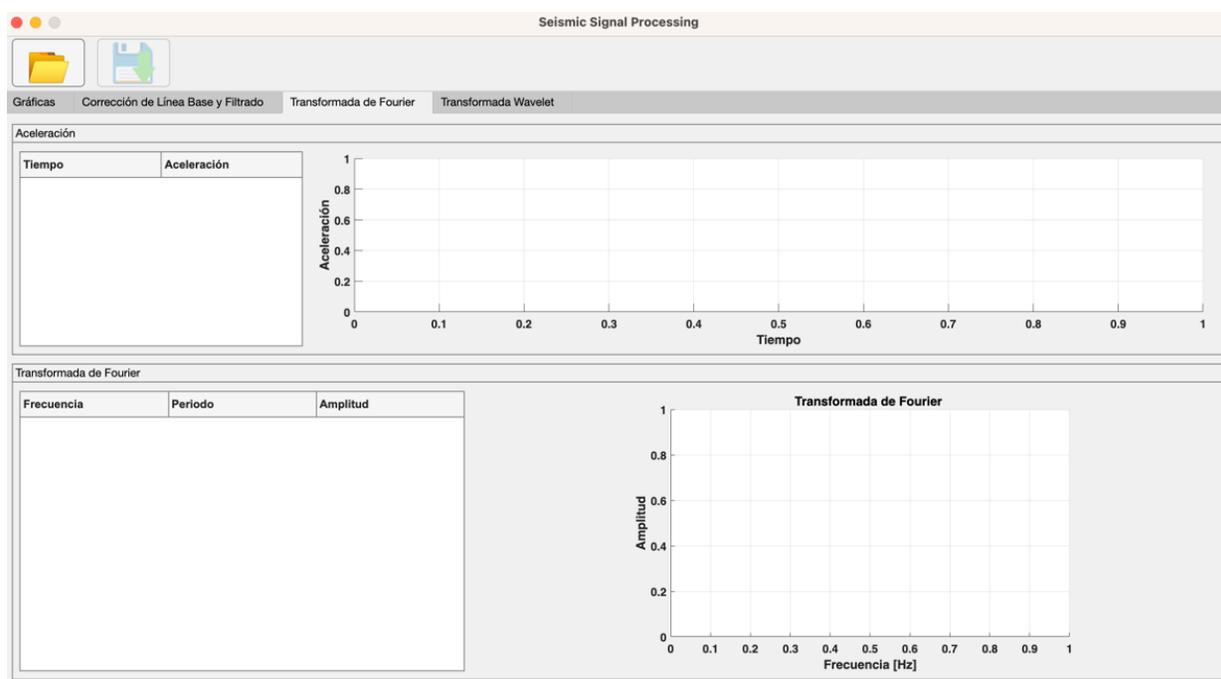
Seismic Signal Processing - sección de Corrección de línea base y Filtrado



La Figura 28 presenta la sección de Corrección de Línea Base y Filtrado de la ventana principal. La corrección por línea base, que busca corregir la distorsión generada por la digitalización de la señal y la introducción de componentes de baja frecuencia, que generan gráficas resultantes no nulas ni oscilatorias en torno a cero. Corrección por filtro que permite aplicar un filtro Butterworth de tipo pasa-alto, pasa-bajo o pasaba-banda según lo considere necesario el usuario. El filtrado se emplea para eliminar los ruidos provocados por equipos externos o el ruido ambiental existente en el entorno. Estas correcciones se ven reflejadas tanto en la señal de aceleración como en la de velocidad y desplazamiento.

Figura 29

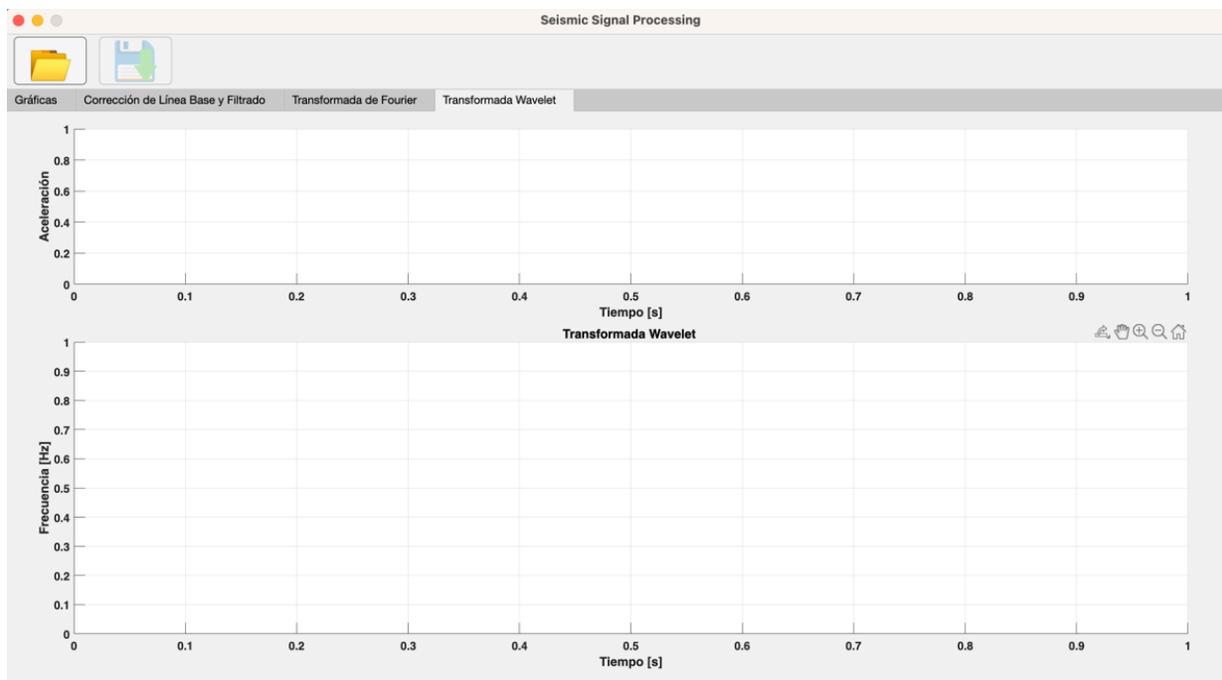
Seismic Signal Processing - sección de Transformada de Fourier



La Figura 29 representa la sección de Transformada de Fourier, aquí se podrá visualizar la transformada de Fourier resultante de la señal de aceleración ingresada, mediante esta gráfica se puede determinar la frecuencia de oscilación del sensor. La transformada de Fourier corresponderá a la señal de aceleración pura, en caso de haber realizado las correcciones de línea base o por filtro presentadas en la sección anterior, la transformada de Fourier corresponderá a la señal de aceleración corregida.

Figura 30

Seismic Signal Processing - sección de Transformada Wavelet



La Figura 30 corresponde a la sección de Transformada Wavelet, esta representa la información de manera sucinta, mediante una gráfica de potencia en función de la frecuencia y del tiempo, la gráfica se utiliza para el análisis del contenido frecuencial y energía liberada contenida en los registros del sismo, al igual que la sección de Transformada de Fourier, esta sección aplicará la transformada wavelet a la señal de aceleración pura ingresada, en caso de haber realizado las correcciones de línea base o por filtro, la Transformada Wavelet corresponderá a la señal de aceleración corregida.

Ventana de exportación de datos

Figura 31

Seismic Signal Processing - sección de Exportación de datos



La Figura 31 presenta la venta de Exportación de datos, desde aquí se puede seleccionar los datos que se desea exportar a nuestro ordenador, una vez seleccionado lo que se desea exportar se podrá seleccionar el nombre y el directorio donde se guardará el archivo en formato Libro de Excel (.xlsx).

Desarrollo de una interfaz web para la visualización

Se desarrolló una interfaz web que muestra una breve descripción del proyecto de sistema de monitoreo de la salud estructural del edificio Administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE acompañada de la arquitectura de red propuesta para la comunicación de los nodos sensores como se puede ver en la Figura 32. La interfaz cuenta con un apartado para el ingreso de los valores Offset en caso que se desee personalizar las alarmas. Los Offset ingresados por defecto de los tres nodos sensores es de 2 m/s^2 para evitar los envíos excesivos de notificaciones por alerta de haber superado los valores de referencia como se muestra en la Figura 33. Las notificaciones serán enviadas por la interfaz web hacia el computador o celular, dependiendo de donde se abrió el explorador web. Además, cuenta

con un apartado para la visualización en tiempo real de los valores de aceleración en los tres ejes de cada sensor obtenidos por los nodos sensores, como se muestra en la Figura 34.

Figura 32

Descripción del proyecto mostrada en la interfaz web



Descripción del Proyecto

1 Hardware

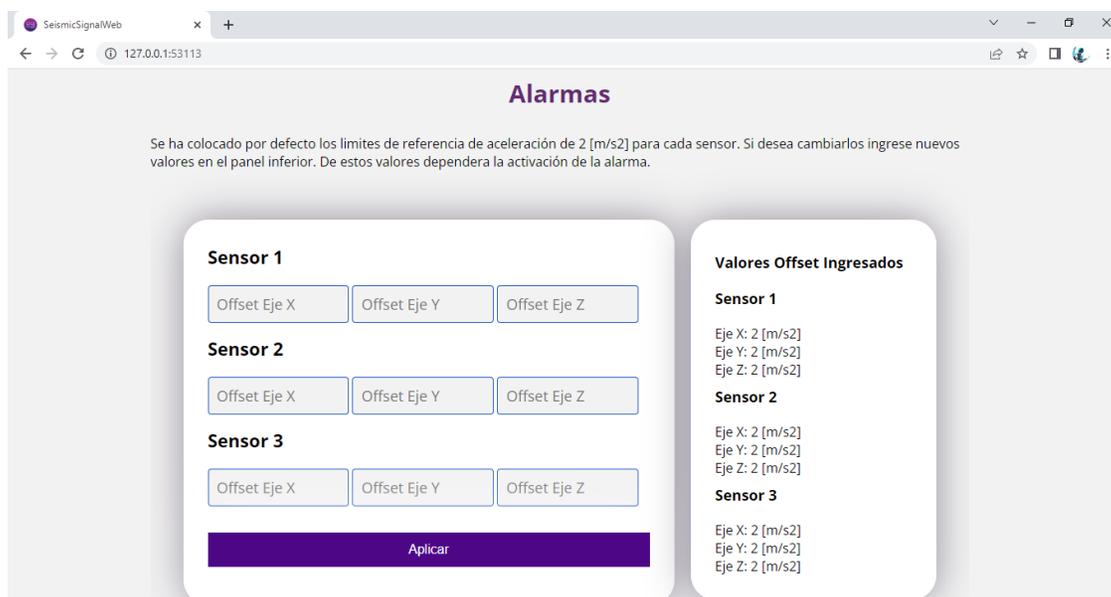
Prototipo de sistema de monitorización de salud estructural (SHM) compuesto por 3 nodos sensores que cuentan con un acelerómetro triaxial MPU6050 con tecnología MEMS capacitiva, un microcontrolador NodeMCU v3 ESP8266 desarrollado con WiFi y un circuito de alimentación y recarga para una batería recargable 18650 de 6800mAh. El nodo sensor transmite los datos recopilados mediante protocolo MQTT.

2 Software

Se dispone de un software para el monitoreo en tiempo real de la aceleración transmitida por el nodo sensor y el procesamiento de los datos recopilados.

Figura 33

Alarmas de la interfaz web



Alarmas

Se ha colocado por defecto los límites de referencia de aceleración de 2 [m/s²] para cada sensor. Si desea cambiarlos ingrese nuevos valores en el panel inferior. De estos valores dependerá la activación de la alarma.

Sensor 1

Offset Eje X Offset Eje Y Offset Eje Z

Sensor 2

Offset Eje X Offset Eje Y Offset Eje Z

Sensor 3

Offset Eje X Offset Eje Y Offset Eje Z

Valores Offset Ingresados

Sensor 1

Eje X: 2 [m/s²]
Eje Y: 2 [m/s²]
Eje Z: 2 [m/s²]

Sensor 2

Eje X: 2 [m/s²]
Eje Y: 2 [m/s²]
Eje Z: 2 [m/s²]

Sensor 3

Eje X: 2 [m/s²]
Eje Y: 2 [m/s²]
Eje Z: 2 [m/s²]

Aplicar

Figura 34

Visualización de datos de los sensores en la interfaz web



Pruebas de calibración con respecto al instrumento patrón

Se realizó un análisis de los datos obtenidos por el prototipo y el instrumento patrón NI9234. Se realizó un análisis de picos positivos y negativos debido a que las señales de aceleración ocurren en un instante de tiempo y no son constantes por tal razón es complejo obtener la ecuación de la recta que pueda modificar la información del sensor prototipo para que se asemeje a la señal del instrumento patrón. Se realizaron pruebas colocando el sensor del prototipo y el sensor del instrumento patrón en igualdad de condiciones sobre una tabla de madera ubicados lo más cercano posible entre ellos y se realizaron pequeños movimientos en un periodo de tiempo controlado por un cronómetro para obtener ambas señales en el mismo periodo de tiempo.

Análisis de picos positivos

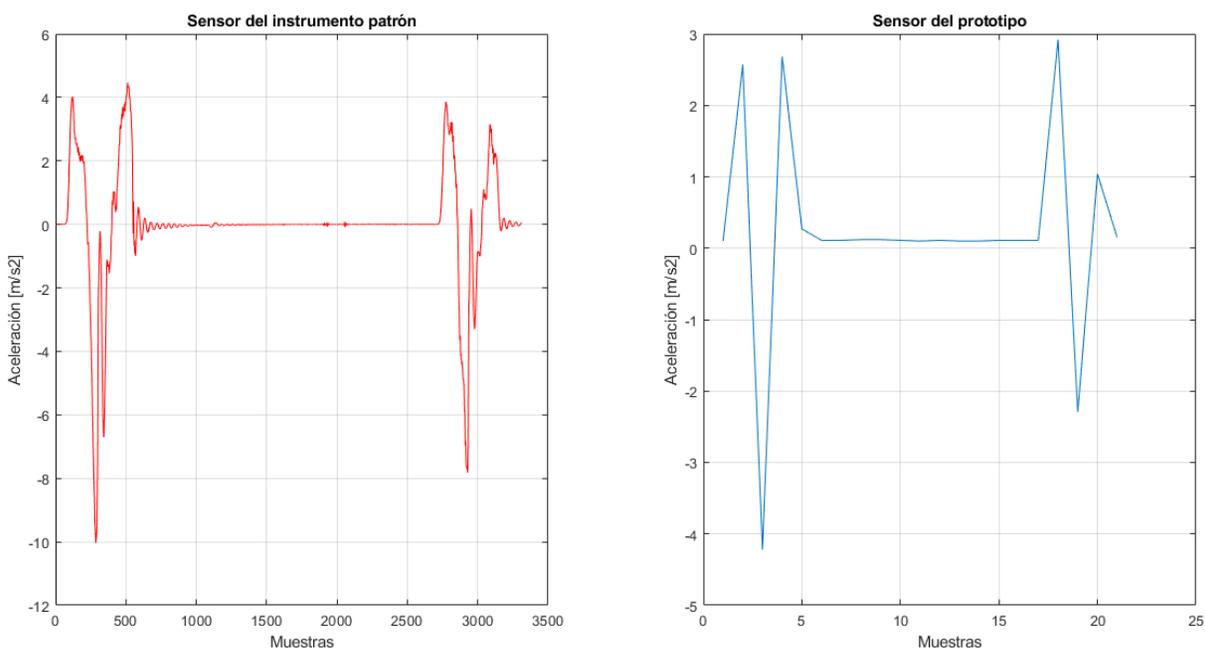
Se utilizó el software de Matlab para el análisis de las señales obtenidas por el sensor del prototipo y el sensor del instrumento patrón. Como se puede visualizar en la Figura 35, existe una gran diferencia en la cantidad de datos enviados por el sensor del instrumento patrón con respecto al sensor

del prototipo, además se puede apreciar una diferencia de amplitudes entre ambas señales obtenidas demostrando que un sensor es más sensible que el otro. El sensor del instrumento patrón debido a su alta sensibilidad en picos positivos entrega una señal con más ruido a diferencia del sensor del prototipo.

Se evaluó los picos positivos de ambas señales a través de una distribución normal obteniendo una concentración de error estimado de 3.06976 con respecto a la densidad de datos y una variación de error estimado de 1.35062, es decir, que la mayor concentración de datos posee una diferencia entre picos positivos de 3.06976 y una vez sumado este valor a todos los picos, existirá un error estimado de 1.35062.

Figura 35

Comparación de las señales adquiridas por el instrumento patrón y el prototipo

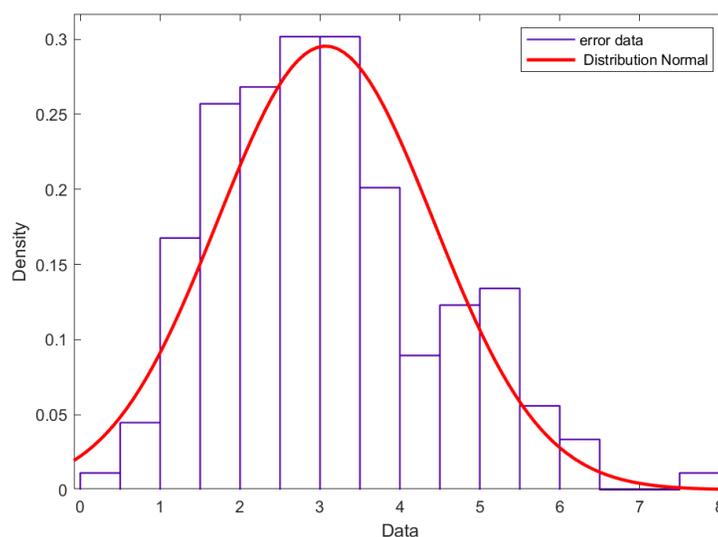


Se evaluó los picos positivos de ambas señales a través de una distribución normal, como se puede visualizar en la Figura 36, obteniendo una concentración de error estimado de 3.06976 con

respecto a la densidad de datos y una variación de error estimado de 1.35062, es decir, que la mayor concentración de datos posee una diferencia entre picos positivos de 3.06976 y una vez sumado este valor a todos los picos, existirá un error estimado de 1.35062.

Figura 36

Distribución normal del análisis de picos positivos entre el instrumento patrón y prototipo



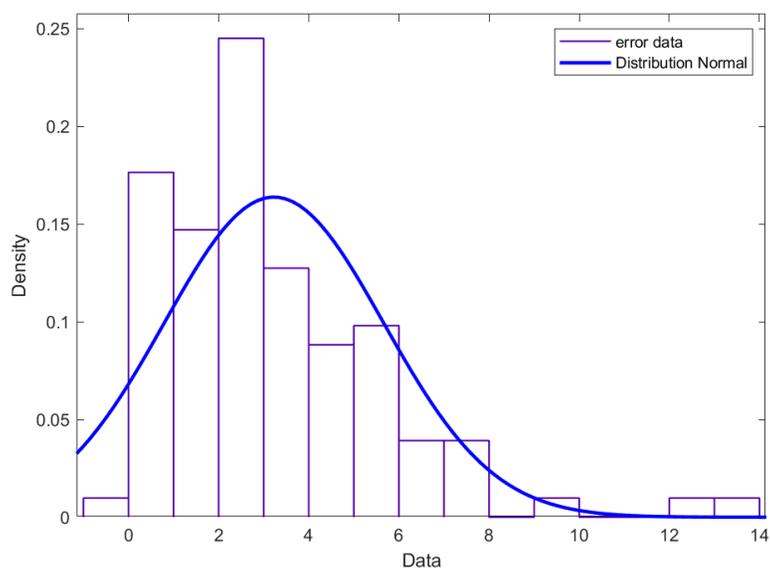
Análisis de picos negativos

Como se puede visualizar en la Figura 37, debido a la diferencia en la cantidad de datos enviados por el sensor del instrumento patrón con respecto al sensor del prototipo, se puede apreciar que existe escasez de picos negativos en el sensor del prototipo, además de una diferencia de amplitudes entre ambas señales obtenidas. El sensor del instrumento patrón presenta una alta sensibilidad en picos negativos por tal razón entrega una señal con más ruido a diferencia del sensor del prototipo. Se evaluó los picos negativos de ambas señales a través de una distribución normal, como se puede visualizar en la Figura 37, obteniendo una concentración de error estimado de 3.22671 con respecto a la densidad de datos y una variación de error estimado de 2.43494, es decir, que la mayor concentración de datos

posee una diferencia entre picos negativos de 3.22671 y una vez sumado este valor a todos los picos existirá un error estimado de 2.43494.

Figura 37

Distribución normal del análisis de picos negativos entre el instrumento patrón y prototipo



Capítulo IV

Análisis de Resultados

Análisis de datos del edificio administrativo

Se desarrolló un sistema capaz de recopilar información de la aceleración presente en el edificio administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sangolquí mediante una red de nodos sensores que estarán ubicados en el primer y sexto piso del edificio con sus respectivos avisos para evitar que exista alguna manipulación de los sensores como se muestra en la Figura 39 y Figura 40. Se detalla la distribución de los ejes de los nodos sensores en la Figura 38.

Figura 38

Ubicación y distribución de ejes de los nodos sensores

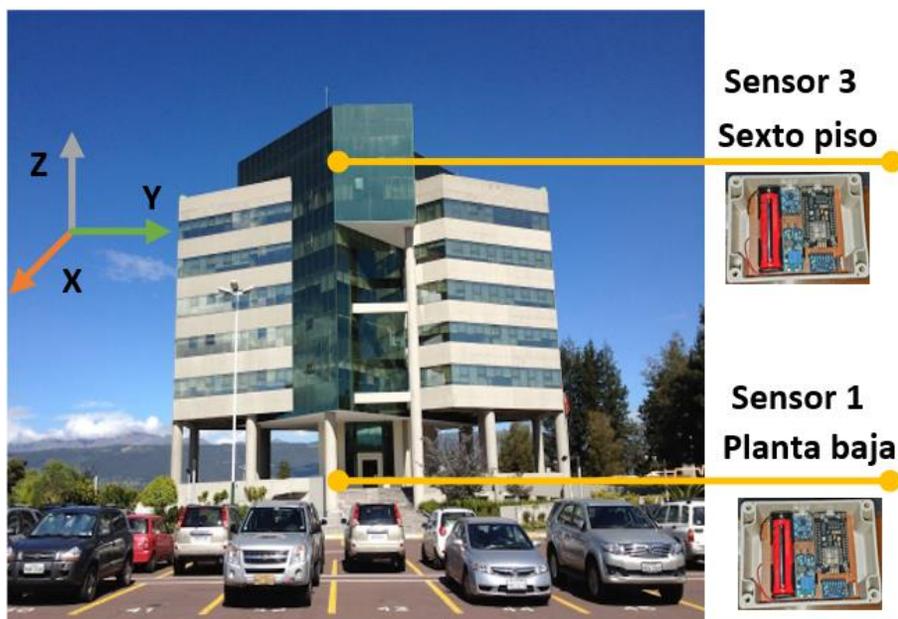


Figura 39

Ubicación del nodo sensor en el primer piso del edificio

**Figura 40**

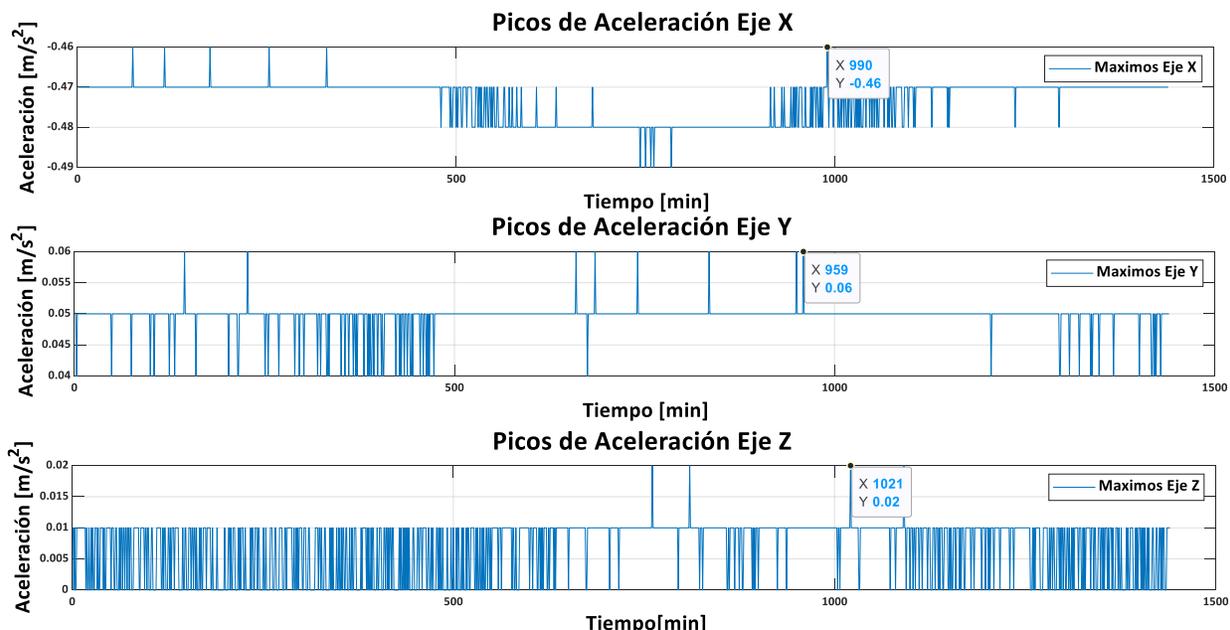
Ubicación del nodo sensor en el sexto piso del edificio



El período de muestreo de datos se realizó desde el 22 de noviembre del 2022 hasta el 06 de diciembre del 2022, obteniendo valores de aceleración del Eje X, Y y Z. Una vez culminado el período de monitoreo de la edificación, se procesaron los datos del sensor 3 ubicado en el sexto piso para obtener los picos máximos de aceleración registrados a lo largo del período de muestreo. Estos picos se presentaron el día 28 de noviembre del 2022 para los tres ejes como se puede observar en la Figura 41.

Figura 41

Picos máximos registrados durante el período de muestreo.



En el Eje X se registró una aceleración máxima de $-0.46 \text{ [m/s}^2\text{]}$ en el minuto 990 que representa las 16h30 del día. El Eje Y tiene una aceleración máxima de $0.06 \text{ [m/s}^2\text{]}$ en el minuto 959 que representa las 15h59 del día. Mientras que el Eje Z presenta una aceleración máxima de $0.02 \text{ [m/s}^2\text{]}$ en el minuto 1021 que representa 16h59 del día. Debido a que los picos máximos no se presentan a la misma hora se optó por tomar un registro de datos en un intervalo de tres horas, de 15h00 a 18h00.

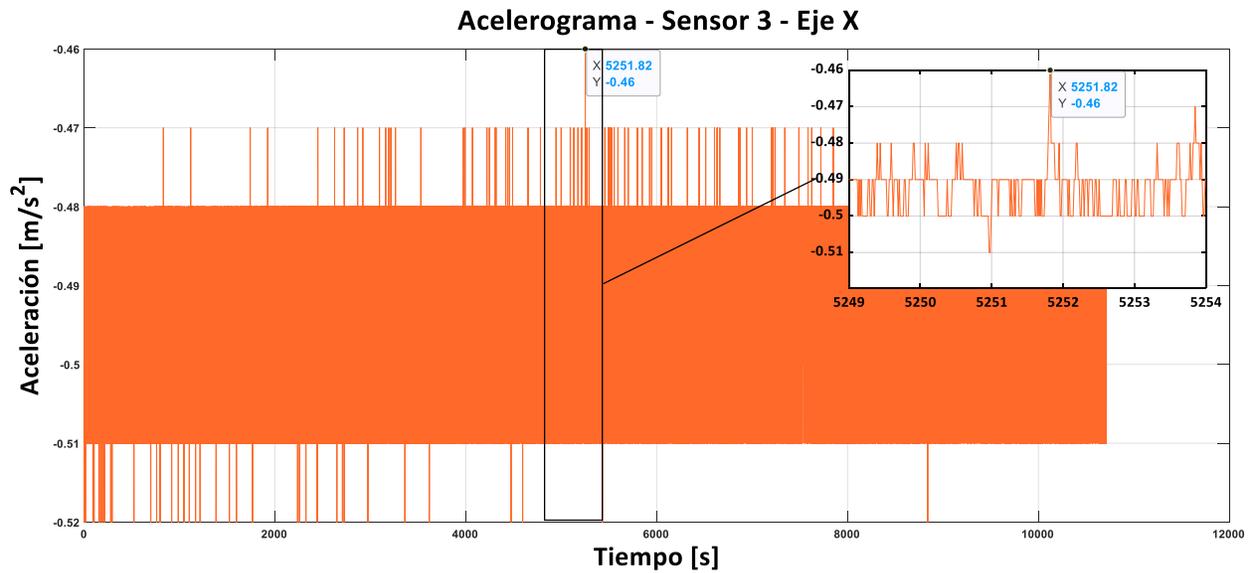
Desplazamientos relativos

Una vez determinado los picos máximos y la hora a las cuales fueron registrados, se procede a obtener los valores de desplazamiento relativo:

1. Se ubica el pico máximo de aceleración del registro de tres horas previamente delimitado de los tres ejes como se muestra en la Figura 42, Figura 43 y Figura 44.

Figura 42

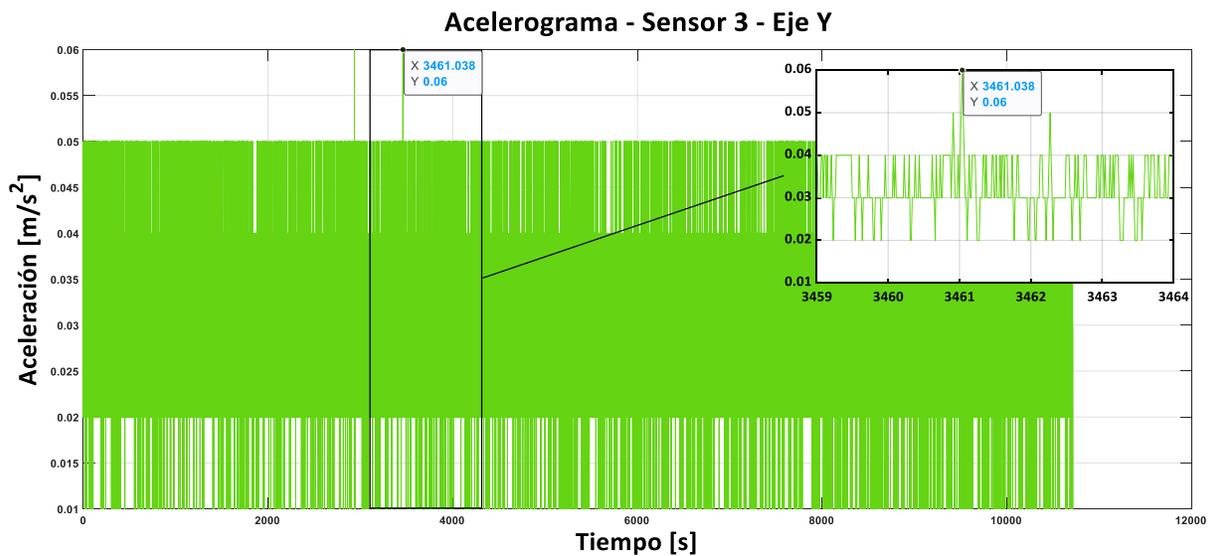
Pico máximo de aceleración del Sensor 3 - Eje X.



Nota: Pico máximo: $-0.46 \text{ [m/s}^2\text{]}$.

Figura 43

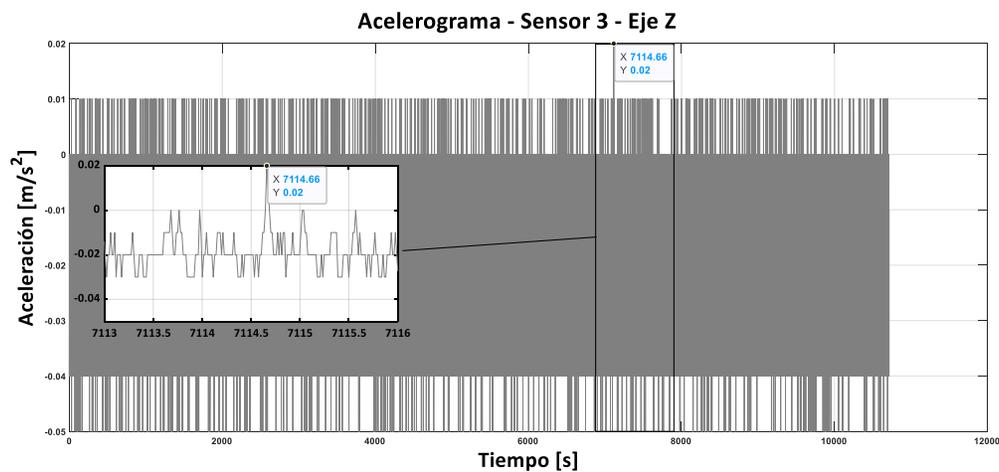
Pico máximo de aceleración del Sensor 3 - Eje Y.



Nota: Pico máximo: $0.06 \text{ [m/s}^2\text{]}$.

Figura 44

Pico máximo de aceleración del Sensor 3 - Eje Z.

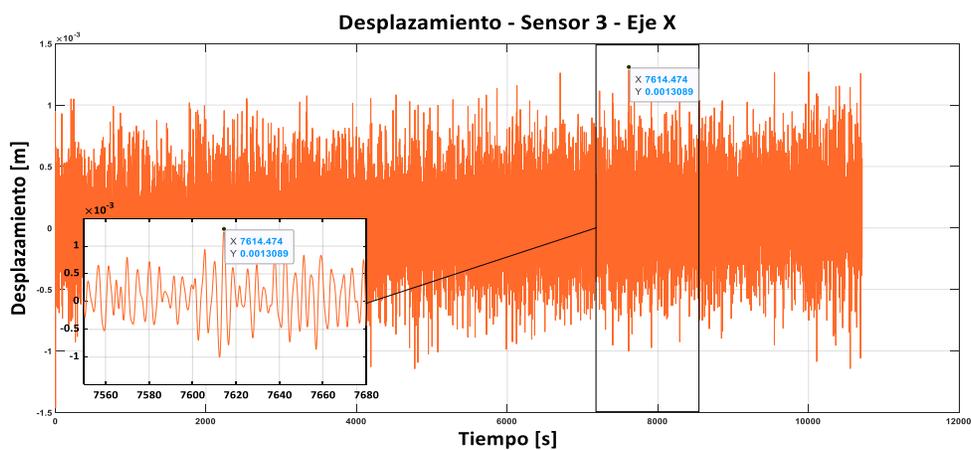


Nota: Pico máximo: 0.02 [m/s²].

2. Se obtiene la señal de desplazamiento correspondiente a los datos de aceleración de los tres ejes y se ubica el pico máximo y el tiempo como se observa en la Figura 45, Figura 46 y Figura 47.

Figura 45

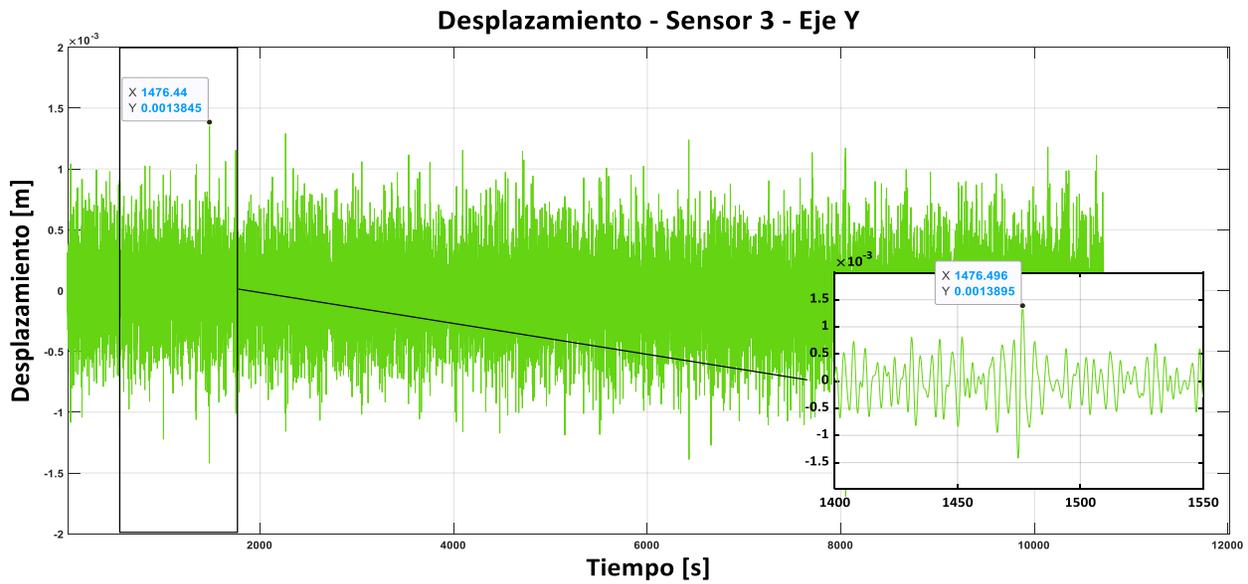
Pico máximo de desplazamiento y tiempo del Sensor 3 – Eje X.



Nota: Pico máximo: 1.3089 [mm] y tiempo: 7614.474 [s].

Figura 46

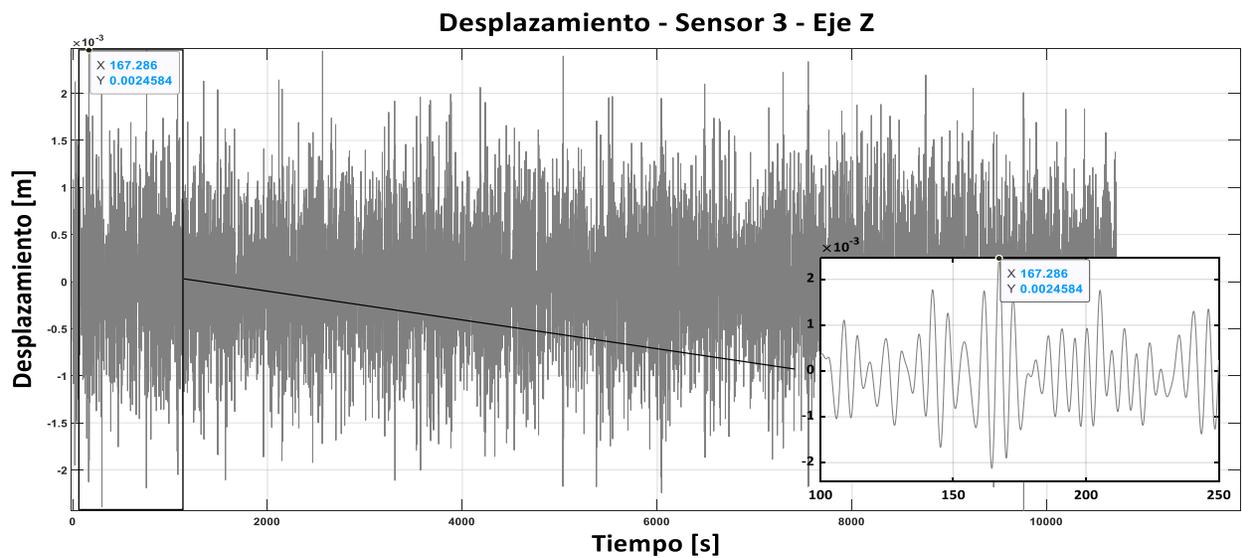
Pico máximo de desplazamiento y tiempo del Sensor 3 – Eje Y.



Nota: Pico máximo: 1.3895 [mm] y tiempo: 1476.496 [s].

Figura 47

Pico máximo de desplazamiento y tiempo del Sensor 3 – Eje Z.

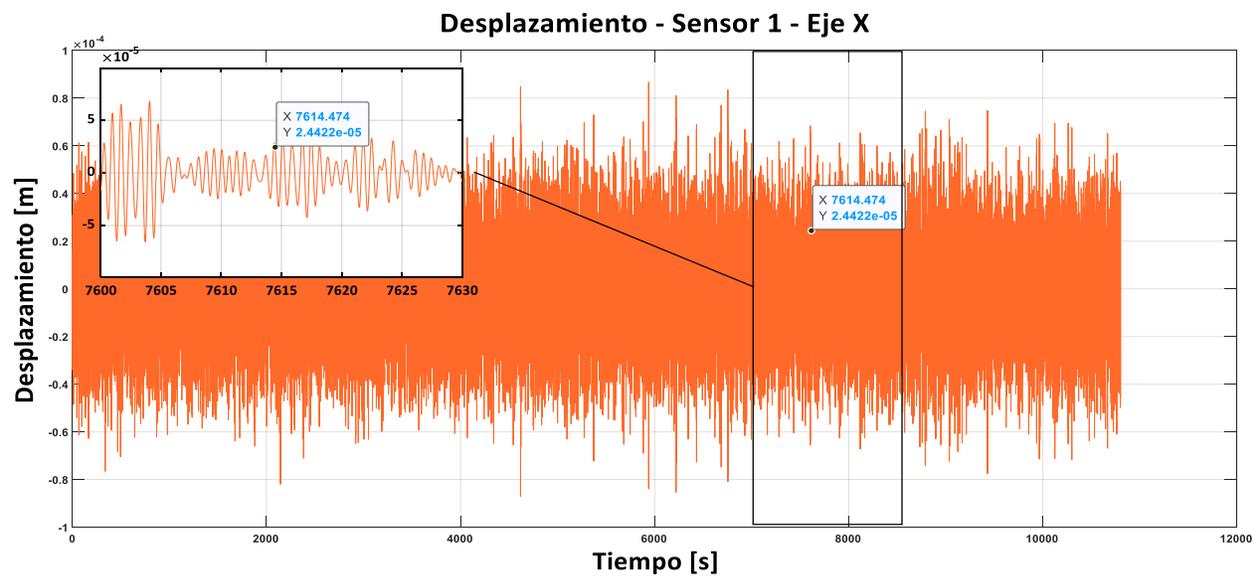


Nota: Pico máximo: 2.4584 [mm] y tiempo: 167.286 [s].

- Una vez determinado el tiempo al cual se presenta el pico máximo del desplazamiento de los tres ejes del sensor 3 del sexto piso, se identifica el valor de desplazamiento registrado en el mismo tiempo del sensor 1 del primer piso para los tres ejes como se observa en la Figura 48, Figura 49 y Figura 50.

Figura 48

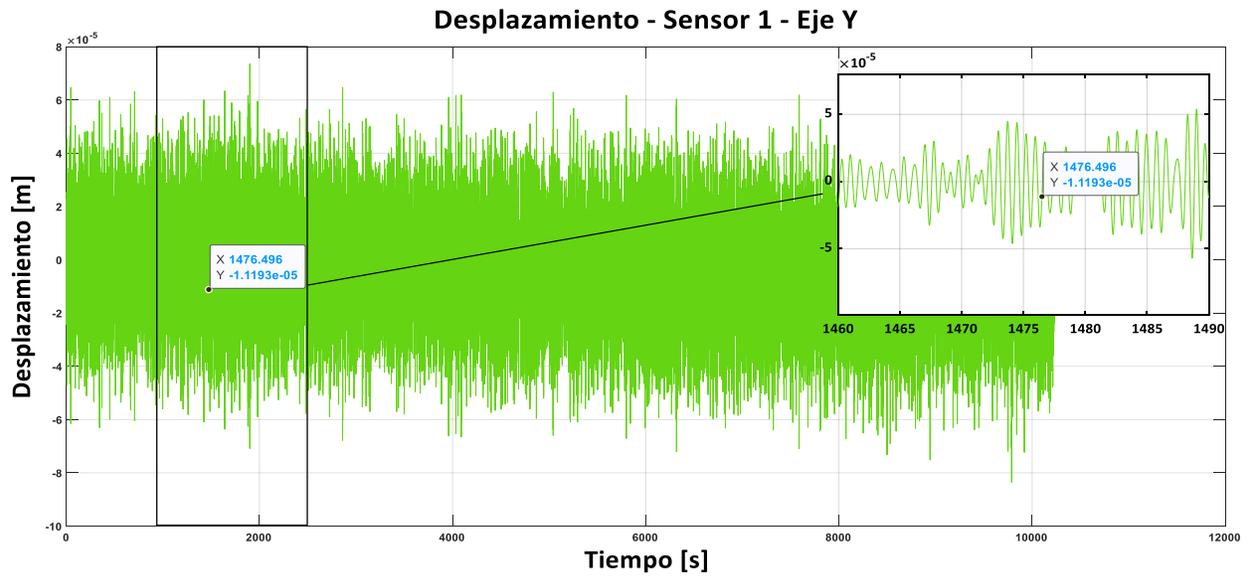
Valor de desplazamiento registrado en un tiempo de 7614.474 [s] del Sensor 1 – Eje X.



Nota: Desplazamiento: 0.0244 [mm] y tiempo: 7614.474 [s].

Figura 49

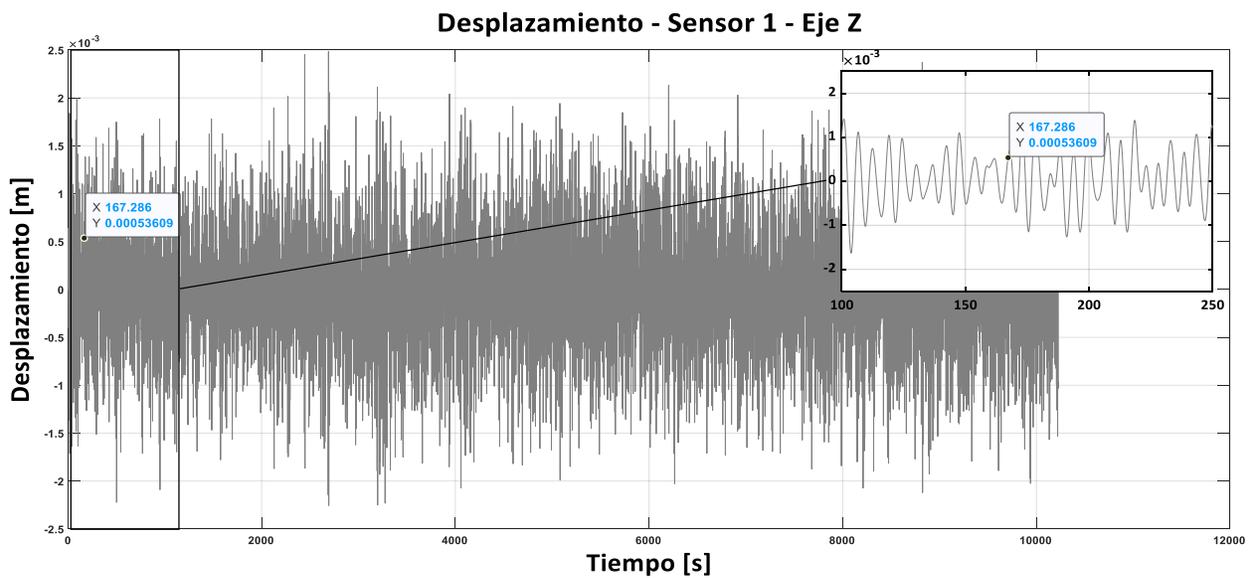
Valor de desplazamiento registrado en un tiempo de 1476.496 [s] del Sensor 1 – Eje Y.



Nota: Desplazamiento: -0.0119 [mm] y tiempo: 1476.496 [s].

Figura 50

Valor de desplazamiento registrado en un tiempo de 167.286 [s] del Sensor 1 – Eje Z.



Nota: Desplazamiento: 0.5361 [mm] y tiempo: 167.286 [s].

4. Después de identificar los valores de desplazamiento del sensor 1 registrados en los tiempos determinados por los valores picos del sensor 3, detallados en la Tabla 13, se realiza el cálculo de los desplazamientos relativos tomando como referencia el sensor 3, como se detalla en la Tabla 14.

Tabla 13

Valores de desplazamiento por eje del Sensor 3 y Sensor 1.

Sensor	Desplazamiento Eje X [mm]	Desplazamiento Eje Y [mm]	Desplazamiento Eje Z [mm]
Sensor 3	1.3089	1.3895	2.4584
Sensor 1	0.0244	0.0119	0.5361

Nota: Los valores de desplazamiento del sensor 3 son picos máximos, mientras que los valores de desplazamiento del sensor 1 son los registrados en el tiempo exacto en el que se registraron los valores picos del sensor 3.

Tabla 14

Desplazamientos relativos con respecto al Sensor 3.

	Desplazamiento Eje X [mm]	Desplazamiento Eje Y [mm]	Desplazamiento Eje Z [mm]
Sensor 1	1.2845	1,3776	1,9223

Nota: Los valores fueron obtenidos de la diferencia entre los valores de desplazamiento del sensor 3 y el sensor 1 registrados en la Tabla 13.

Frecuencia y período natural de vibración de la estructura

Tabla 15

Frecuencias de oscilación del sexto piso registrados durante la noche.

Día	Jornada	Frecuencia [Hz]
1	Nocturno	1.3544
2	Nocturno	1.3544
3	Nocturno	1.355
4	Nocturno	1.355
5	Nocturno	1.3548
6	Nocturno	1.3546
7	Nocturno	1.355
8	Nocturno	1.355
9	Nocturno	1.3548
10	Nocturno	1.3553
11	Nocturno	1.355
12	Nocturno	1.3544
13	Nocturno	1.3551
14	Nocturno	1.3554
15	Nocturno	1.3544
Promedio		1.35484

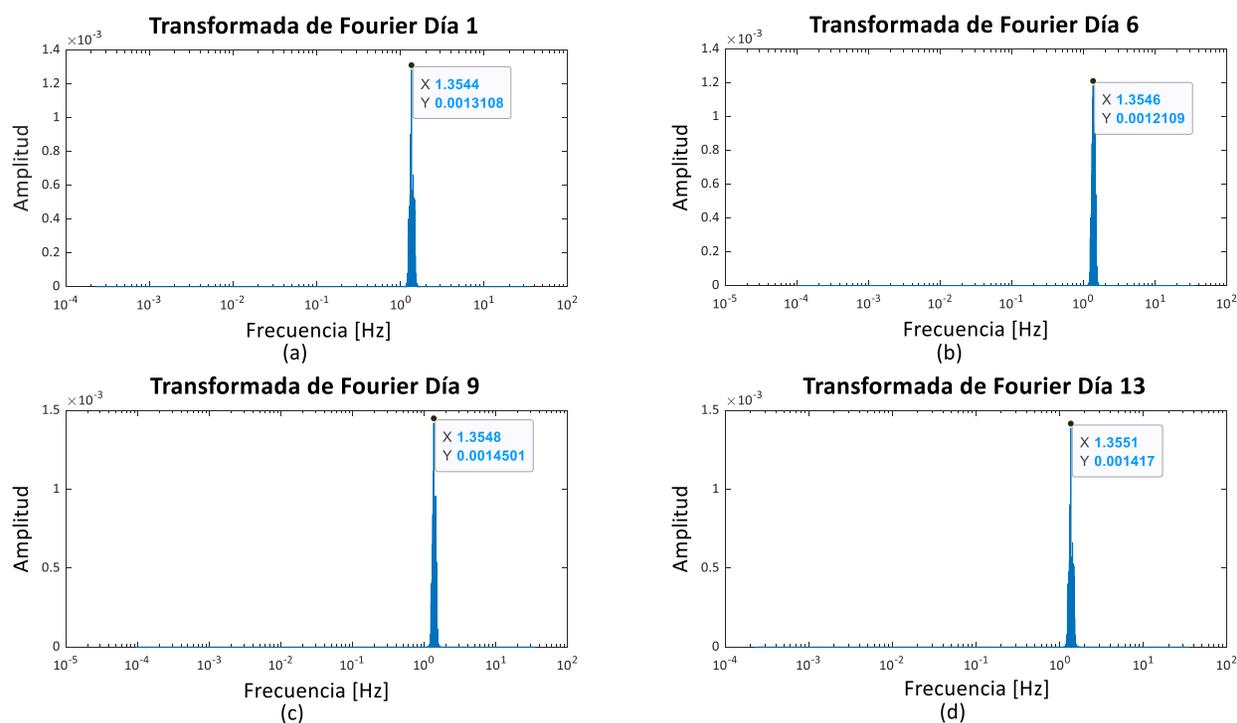
Se analizó los valores obtenidos durante 15 días del sensor 3, ubicado en el sexto piso del edificio administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Considerando las frecuencias

obtenidas en la noche presentados en la Tabla 15, utilizando la Transformada Fourier como se observa en la Figura 51 ,se tiene:

- Frecuencia natural de vibración: 1.35 [Hz]
- Período natural de vibración: 0.74 [s]

Figura 51

Transformadas de Fourier - sensor 3



Nota: a) Transformada de Fourier del día 22-11-2022, b) Transformada de Fourier del día 27-11-2022, c) Transformada de Fourier del día 30-11-2022 y d) Transformada de Fourier del día 04-12-2022.

Registro de Alarmas

Los sensores fueron ubicados en el edificio administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE del 22 de noviembre del 2022 al 6 de diciembre del 2022. Según el Instituto Geofísico en dicho periodo no se presenciaron sismos cercanos a las instalaciones como se detalla en sus registros

publicados en la página web <https://www.igepn.edu.ec/portal/eventos/informes-ultimos-sismos.html>.

Por tal razón el prototipo de sistema de monitorización de salud estructural no registró ninguna alarma durante el periodo de prueba.

Capítulo V

Manual de Usuario

Introducción

Seismic Signal A&P es un software que consta de dos aplicativos principales que son:

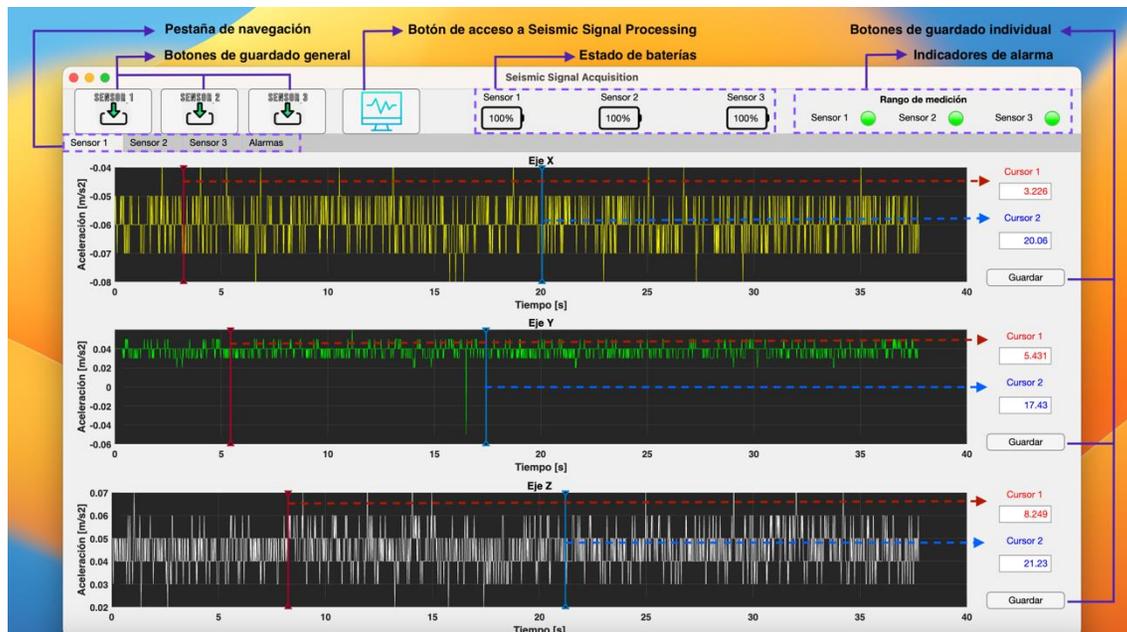
- Seismic Signal Acquisition: Software encargado del monitoreo en tiempo real mediante comunicación MQTT con los sensores.
- Seismic Signal Processing: Software capaz de procesar señales de aceleración mediante varias herramientas.

Seismic Signal Acquisition

Monitoreo de aceleración

Figura 52

Seismic Signal Acquisition – Ventana de adquisición de datos.



La Figura 52 presenta la primera ventana en desplegarse al ejecutar el software, aquí se puede visualizar en tiempo real la aceleración captada por cada uno de los sensores, la interfaz cuenta con varias opciones y herramientas como:

- Pestaña de navegación. - Mediante esta pestaña se puede alternar entre las ventanas de monitoreo y alarmas de los tres sensores.
- Botones de guardado general. - Al pulsar uno de estos botones se genera un archivo de texto (.txt) que contiene los datos de los tres ejes del sensor seleccionado. El formato con el cual se guardará el archivo es: SensorX-Fecha Hora.txt. Donde "SensorX" corresponde al sensor del cual se haya guardado. La Figura 53 presenta un ejemplo de archivo guardado manualmente del sensor 1 con fecha del 21 de noviembre del 2022 y hora 23:34:31.

Figura 53

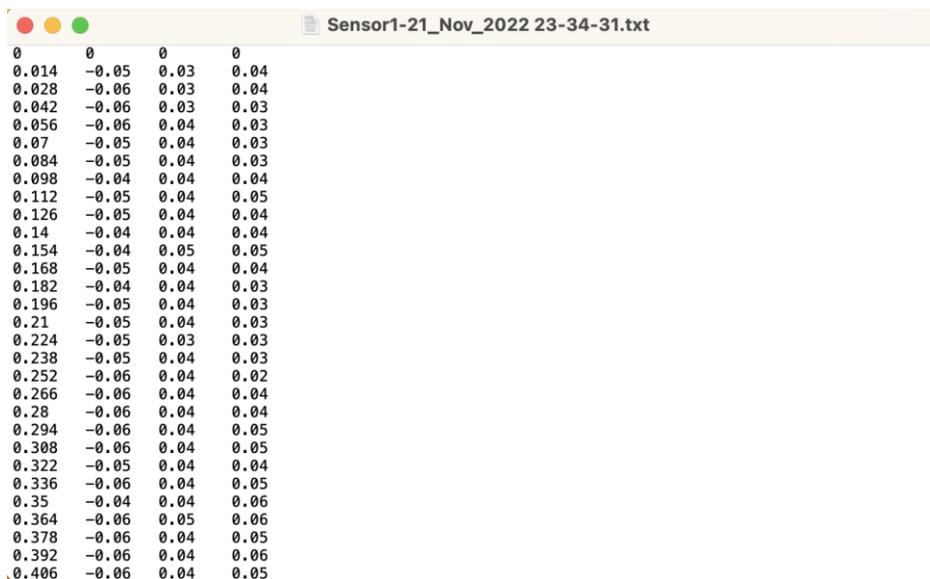
Archivo generado mediante botón de guardado general del sensor 1

Nombre	Fecha de modificación	Tamaño	Clase
 Sensor1-21_Nov_2022 23-34-31.txt	21 nov. 2022 23:34	31,3 MB	Texto

El archivo de texto generado contiene los datos de tiempo, aceleración Eje X, aceleración Eje Y y aceleración Eje Z, distribuidos respectivamente en columnas como se muestra en la Figura 54.

Figura 54

Datos del Sensor 1 en formato archivo de texto (.txt)

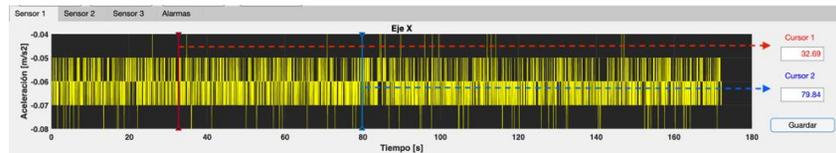


0	0	0	0
0.014	-0.05	0.03	0.04
0.028	-0.06	0.03	0.04
0.042	-0.06	0.03	0.03
0.056	-0.06	0.04	0.03
0.07	-0.05	0.04	0.03
0.084	-0.05	0.04	0.03
0.098	-0.04	0.04	0.04
0.112	-0.05	0.04	0.05
0.126	-0.05	0.04	0.04
0.14	-0.04	0.04	0.04
0.154	-0.04	0.05	0.05
0.168	-0.05	0.04	0.04
0.182	-0.04	0.04	0.03
0.196	-0.05	0.04	0.03
0.21	-0.05	0.04	0.03
0.224	-0.05	0.03	0.03
0.238	-0.05	0.04	0.03
0.252	-0.06	0.04	0.02
0.266	-0.06	0.04	0.04
0.28	-0.06	0.04	0.04
0.294	-0.06	0.04	0.05
0.308	-0.06	0.04	0.05
0.322	-0.05	0.04	0.04
0.336	-0.06	0.04	0.05
0.35	-0.04	0.04	0.06
0.364	-0.06	0.05	0.06
0.378	-0.06	0.04	0.05
0.392	-0.06	0.04	0.06
0.406	-0.06	0.04	0.05

- Botón de acceso a Seismic Signal Processing. - Abre una nueva ventana la cual contiene el software Seismic Signal Processing, el cual es empleado para el procesamiento de señales (el funcionamiento de este software la puede ver en la Sección de Seismic Signal Processing).
- Estado de baterías. - En esta sección se monitorea el estado de carga en tiempo real de las baterías de emergencia que contiene cada nodo sensor.
- Botones de guardado individual. - Esta opción trabaja en conjunto con los cursores presentes en cada eje de los sensores. Al pulsar el botón se genera un archivo de texto (.txt) el cual contiene los datos de tiempo y aceleración obtenidos de la señal entre los cursores. A continuación, se presenta un ejemplo de aplicación paso a paso de esta herramienta.
 1. Colocar los cursores de manera que encierre la señal que se desea obtener. En este caso se desea obtener la señal presente entre 32.69 y 79.84 como se muestra en la Figura 55.

Figura 55

Cursores y botón de guardado individual Sensor 1 – Eje X



2. Una vez se ha encerrado entre los cursores la señal que se desea obtener, se pulsa el botón guardar (Botón de guardado individual) presente al costado derecho de la gráfica de aceleración.
3. Se despliega una ventana emergente como la mostrada en la Figura 56. Si se selecciona “Si” se abre automáticamente la ventana del software Seismic Signal Processing para realizar el procesamiento de la señal, caso contrario solo se genera el archivo de texto (.txt).

Figura 56

Ventana emergente de guardado individual



La Figura 57 presenta un ejemplo de archivo guardado manualmente del sensor 1 – eje x con fecha del 02 de diciembre del 2022 y hora 13:03:22.

Figura 57

Archivo generado mediante botón de guardado individual del Sensor 1 – Eje X

Nombre	Fecha de modificación	Tamaño	Clase
Sensor1_EjeX-02_Dec_2022 13-03-22.txt	hoy 13:03	43 KB	Texto

El archivo de texto generado contiene los datos de tiempo (desde el tiempo seleccionado por el cursor 1 hasta el tiempo seleccionado por el cursor 2) y aceleración Eje X, distribuidos respectivamente en columnas como se muestra en la Figura 58.

Figura 58

Datos del Sensor 1- Eje X en formato archivo de texto (.txt)



32.69	-0.06
32.704	-0.06
32.718	-0.05
32.732	-0.06
32.746	-0.06
32.76	-0.06
32.774	-0.05
32.788	-0.05
32.802	-0.06
32.816	-0.06
32.83	-0.06
32.844	-0.05
32.858	-0.05
32.872	-0.05
32.886	-0.06
32.9	-0.06
32.914	-0.06
32.928	-0.06
32.942	-0.06
32.956	-0.06
32.97	-0.05
32.984	-0.05
32.998	-0.06
33.012	-0.06
33.026	-0.07
33.04	-0.06
33.054	-0.06
33.068	-0.05
33.082	-0.05
33.096	-0.06

- Indicadores de alarma. - Se encarga de mostrar visualmente si se ha superado uno de los offset seteados en la ventana de Alarmas, en caso de superarse el indicador tendrá color rojo.

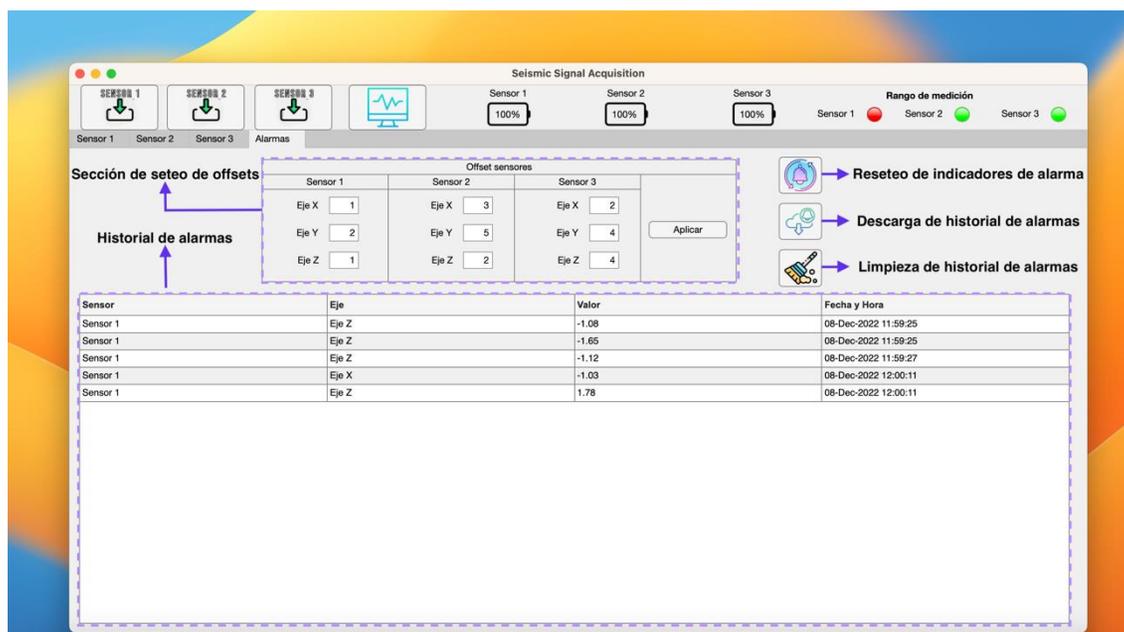
Alarmas

La ventana de alarmas mostrada en la Figura 59 presenta una sección de seteo de offset, en la cual se define el valor de amplitud mínimo que se desea tener antes de que se registre una alarma para cada uno de los ejes en los tres sensores. La ventana presenta una tabla de registro donde se podrá

visualizar los datos (sensor, eje, valor de aceleración y fecha/hora) que generaron la alarma. Además, dispone de tres botones para el reseteo de indicadores de alarma, la descarga de historial de alarmas y la limpieza de historial de alarmas.

Figura 59

Seismic Signal Acquisition – Ventana de alarmas



Al presionar el botón de descarga de historial de alarmas, se genera automáticamente un archivo de texto (.txt) como el mostrado en la Figura 60.

Figura 60

Archivo generado automáticamente al pulsar el botón de Descarga de historial de alarmas.

Nombre	Fecha de modificación	Tamaño	Clase
Alarmas-08_Dec_2022 12-01-48.txt	ayer 12:01	209 bytes	Texto

El archivo de texto contiene toda la información presentada en el historial de alarmas visible en la ventana de alarmas, la Figura 61 muestra el contenido de este archivo.

Figura 61

Datos del registro de alarmas en archivo de texto (.txt)



Alarmas-08_Dec_2022 12-01-48.txt			
Sensor 1	Eje Z	-1.08	08-Dec-2022 11:59:25
Sensor 1	Eje Z	-1.65	08-Dec-2022 11:59:25
Sensor 1	Eje Z	-1.12	08-Dec-2022 11:59:27
Sensor 1	Eje X	-1.03	08-Dec-2022 12:00:11
Sensor 1	Eje Z	1.78	08-Dec-2022 12:00:11

Seismic Signal Processing

Para acceder al software se debe pulsar el botón de acceso a Seismic Signal Processing detallado en la Figura 52.

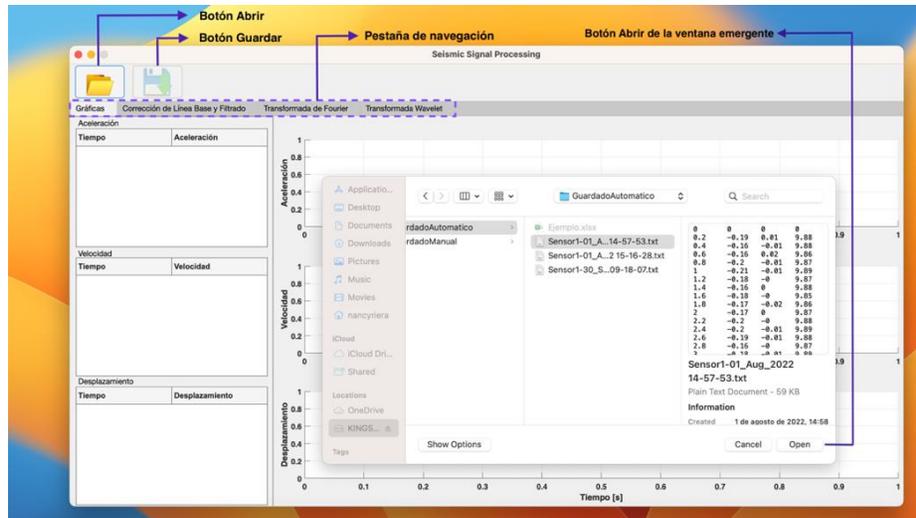
Ingreso de datos

Para importar un archivo que contenga datos de aceleración se debe:

1. Pulsar en el botón Abrir, se desplegará una ventana emergente para seleccionar el archivo que contenga los datos de aceleración que se desea analizar, el archivo debe ser de formato archivo de texto (.txt), una vez se elige el archivo pulse el botón Abrir de la ventana emergente. Lo antes mencionado se puede visualizar en la Figura 62.

Figura 62

Seismic Signal Processing – Selección de archivo a analizar



- Se abre una ventana en la cual se podrá seleccionar con detalle los datos que se desea procesar del archivo importado previamente, visible en la Figura 63.

Figura 63

Seismic Signal Processing - Ventana de Ingreso de Datos

Unidades del archivo

mm/sec2 g

cm/sec2 in/sec2

m/sec2 ft/sec2

Datos a ingresar

Valor de aceleración individual en columna

Valores de Tiempo y Aceleración en columna

Múltiples valores de Aceleración por línea

Columna de Aceleración: 1

Columna de Tiempo: 1

Valor Inicial: 1

Aceptar Cancelar

```

0 0 0 0
0.2 -0.19 0.01 9.88
0.4 -0.16 -0.01 9.88
0.6 -0.16 0.02 9.86
0.8 -0.2 -0.01 9.87
1 -0.21 -0.01 9.89
1.2 -0.18 -0 9.87
1.4 -0.16 0 9.88
1.6 -0.18 -0 9.85
1.8 -0.17 -0.02 9.86
2 -0.17 0 9.87
2.2 -0.2 -0 9.88
2.4 -0.2 -0.01 9.89
2.6 -0.19 -0.01 9.88
2.8 -0.16 -0 9.87
3 -0.18 -0.01 9.89
3.2 -0.18 -0 9.89
3.4 -0.18 -0 9.88
3.6 -0.15 -0.02 9.9
3.8 -0.17 0 9.88

```

3. Se debe colocar el número de la fila en la que inicia y termina los valores de aceleración que se desea procesar, así como el valor del intervalo de tiempo con el cual se han muestreado los datos ingresados, como se observa en la Figura 64. Por defecto se encuentra configurado como la fila de inicio el número uno, la última fila del archivo ingresado como la final y el valor del intervalo dt en cero.

Figura 64

Sección de seteo de datos a analizar

Primera Línea	<input type="text" value="1"/>
Última Línea	<input type="text" value="2780"/>
Intervalo dt	<input type="text" value="0"/>

4. Se selecciona las unidades en las que se encuentran los datos ingresados en la sección de unidades de archivo. Los datos ingresados pueden tener formato: milímetros por segundo cuadrado (mm/sec²), unidades de gravedad (g), centímetros por segundo cuadrado (cm/sec²), pulgadas por segundo cuadrado (in/sec²), metros por segundo cuadrado (m/sec²) o pies por segundo cuadrado (ft/sec²), como se muestra en la Figura 65.

Figura 65

Sección de unidades del archivo

Unidades del archivo	
<input checked="" type="radio"/> mm/sec ²	<input type="radio"/> g
<input type="radio"/> cm/sec ²	<input type="radio"/> in/sec ²
<input type="radio"/> m/sec ²	<input type="radio"/> ft/sec ²

- Se debe verificar de qué manera se encuentran los datos de aceleración para poder seleccionar la opción correcta en la sección de Datos a ingresar, ya sea que los valores de la aceleración se encuentren en una sola columna, valores de aceleración y tiempo en columnas o en múltiples valores de aceleración por fila, mostrados en la Figura 66.

Figura 66

Sección de datos a ingresar

Datos a ingresar	
<input checked="" type="radio"/>	Valor de aceleración individual en columna
<input type="radio"/>	Valores de Tiempo y Aceleración en columna
<input type="radio"/>	Múltiples valores de Aceleración por línea

- De acuerdo a la selección realizada en el literal 5 se habilita la casilla donde se ingresa la posición de la aceleración o el tiempo, visible en la Figura 67.

Figura 67

Sección de seteo para la posición de aceleración y tiempo

Columna de Aceleración	<input type="text" value="1"/>
Columna de Tiempo	<input type="text" value="1"/>
Valor Inicial	<input type="text" value="1"/>

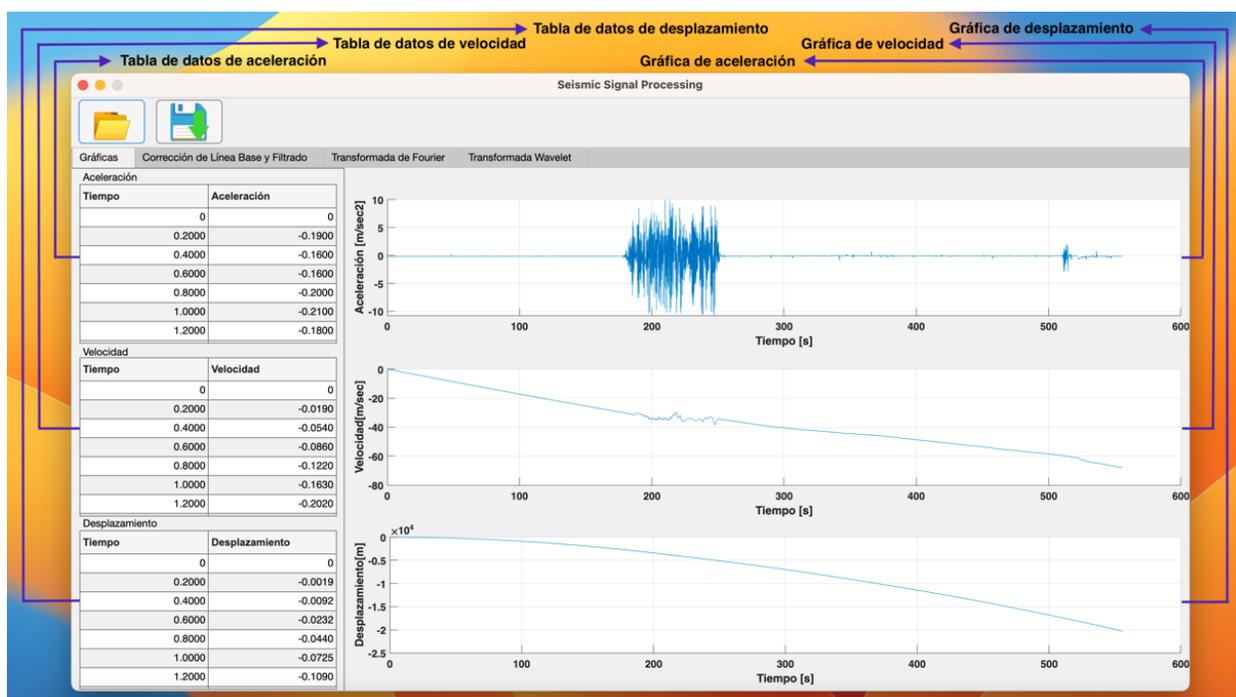
- Una vez se haya configurado todos los campos seleccione el botón aceptar.

Gráficas

La ventana de gráficas nos presenta tres tablas que contendrán los datos de aceleración, tiempo y desplazamiento con su respectivo tiempo, al igual que sus respectivas gráficas donde el eje horizontal de la gráfica corresponde al tiempo en segundos y el eje vertical a la aceleración, velocidad o desplazamiento con las unidades que se hayan seleccionado al importar los datos. Esto se encuentra detallado en la Figura 68.

Figura 68

Seismic Signal Processing - Ventana de gráficas



Corrección de línea Base y Filtrado

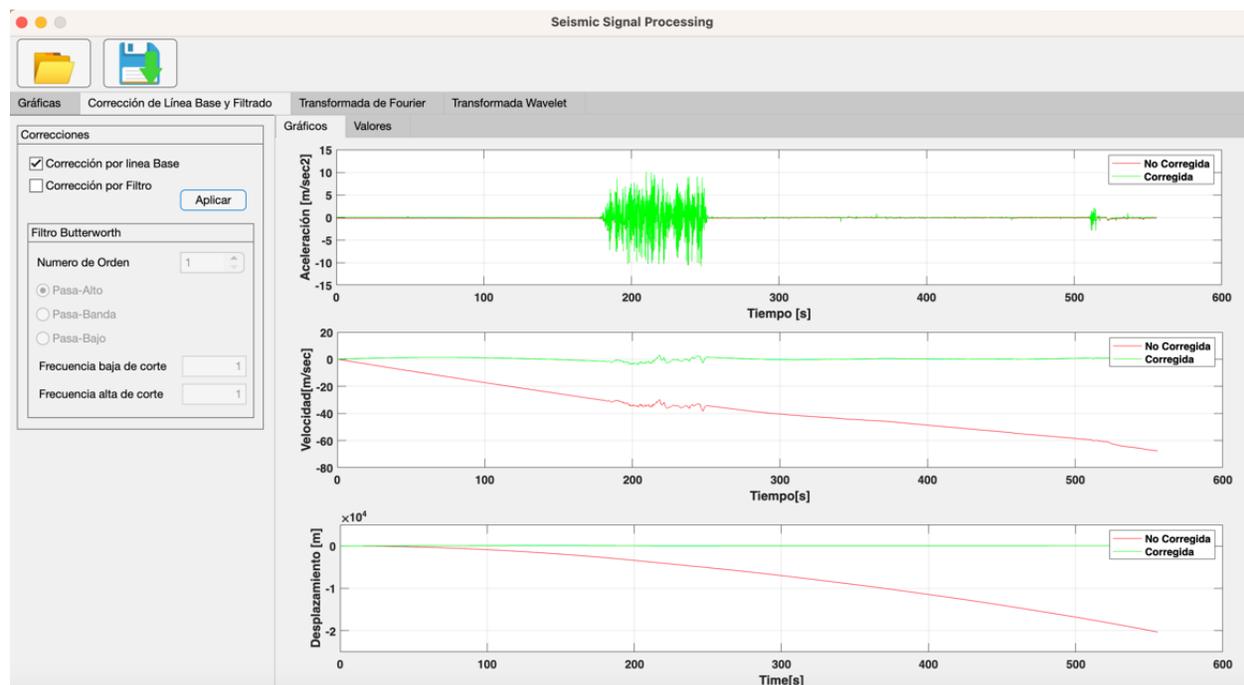
Corrección de línea Base

La corrección de línea base se realiza a partir del acelerograma digitalizado y el tiempo. Al seleccionar la opción Corrección por línea base y dar clic en el botón Aplicar presentes en la sección de correcciones, los datos de aceleración, velocidad y desplazamiento se corrigen automáticamente.

Se podrá evidenciar los resultados como en la Figura 69 a través de graficas en la pestaña Gráficos, en donde las gráficas de color verde muestran los datos ya corregidos y las de color rojo los datos sin corregir.

Figura 69

Gráficas de corrección por línea base



Corrección por Filtro

Para realizar la corrección por filtro se debe seleccionar la opción Corrección por Filtro, una vez se haya seleccionado se habilitarán las opciones de la sección Filtro Butterworth. Dentro de esta sección se tiene tres tipos de filtro que son:

- Pasa-Alto: Este filtro tiene como propiedad atenuar las frecuencias que se encuentran por debajo de la frecuencia de corte ω_c y transmitir todas aquellas componentes de frecuencias que sean mayores a esta frecuencia ω_c . La Figura 70 presenta el modo de selección del filtro pasa-alto, donde la frecuencia de corte ω_c es de 2.46 [Hz].

Figura 70

Filtro Pasa-Alto

The image shows a dialog box titled "Filtro Butterworth". It contains the following controls:

- Numero de Orden:** A numeric input field with the value "5" and up/down arrow buttons.
- Filter Type:** Three radio buttons: "Pasa-Alto" (selected), "Pasa-Banda", and "Pasa-Bajo".
- Frecuencia baja de corte:** A numeric input field with the value "2.2".
- Frecuencia alta de corte:** A numeric input field with the value "2.46".

- Pasa-Banda: Tiene la característica de transmitir un rango de frecuencias (banda de paso) y de rechazar dos bandas de frecuencias (banda de rechazo), una de las bandas de rechazo contiene frecuencias menores que las frecuencias de la banda de paso (ω_1), mientras que la otra banda de rechazo contiene frecuencias mayores a las de la banda de paso (ω_2). La Figura 71 presenta

el modo de selección del filtro pasa-banda, donde la frecuencia de corte ω_1 es de 2.2 [Hz] y la frecuencia de corte ω_2 es de 2.46 [Hz].

Figura 71

Filtro Pasa-Banda

Filtro Butterworth	
Numero de Orden	5
<input type="radio"/> Pasa-Alto	
<input checked="" type="radio"/> Pasa-Banda	
<input type="radio"/> Pasa-Bajo	
Frecuencia baja de corte	2.2
Frecuencia alta de corte	2.46

- Pasa Bajo: Este filtro tiene como propiedad atenuar las frecuencias que se encuentran sobre la frecuencia de corte ω_c y transmitir todas aquellas componentes de frecuencias que sean menores a esta frecuencia ω_c . La Figura 72 presenta el modo de selección del filtro pasa-alto, donde la frecuencia de corte ω_c es de 2.2 [Hz].

Figura 72

Filtro Pasa-Bajo

Filtro Butterworth	
Numero de Orden	5
<input type="radio"/> Pasa-Alto	
<input type="radio"/> Pasa-Banda	
<input checked="" type="radio"/> Pasa-Bajo	
Frecuencia baja de corte	2.2
Frecuencia alta de corte	2.46

El filtro Butterworth presentado anteriormente tiene la posibilidad de variar su orden según lo considere necesario el usuario, este filtro puede ir desde orden uno hasta orden cinco.

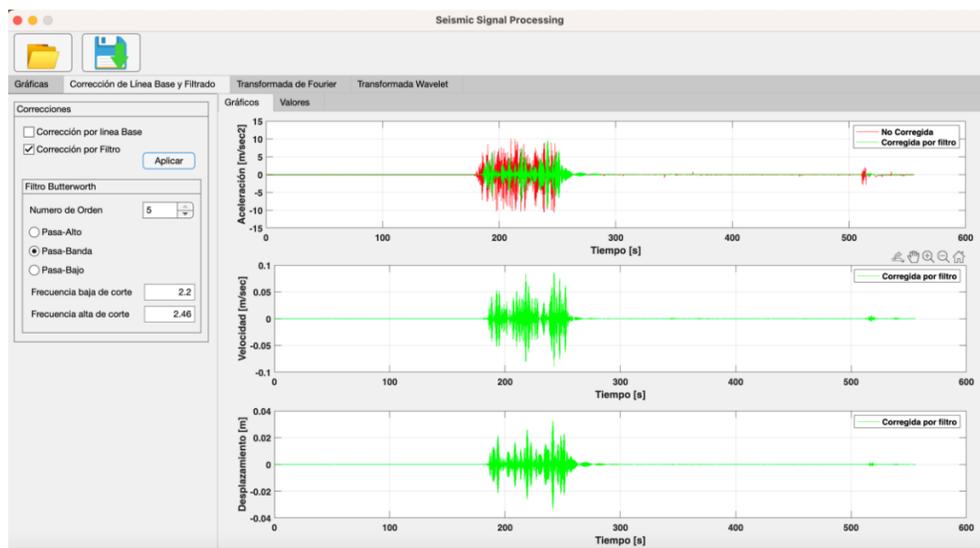
Los pasos que se deben seguir para aplicar la corrección por filtro de manera correcta son:

1. Seleccionar la opción Corrección por Filtro en la sección Correcciones.
2. Escoger el número de orden de filtro deseado.
3. Seleccionar el tipo de filtro, ya sea Pasa Alto, Pasa-Banda o Pasa-Bajo.
4. Ingresar el o los valores de frecuencia de corte, las casillas se activarán dependiendo del filtro escogido en el literal tres.
5. Por último, dar clic en el botón Aplicar, y se podrá evidenciar la corrección.

Se podrá evidenciar los resultados de la corrección como en la Figura 73 a través de gráficas en la pestaña Gráficas, en donde las gráficas de color verde muestran los datos ya corregidos y las de color rojo los datos sin corregir.

Figura 73

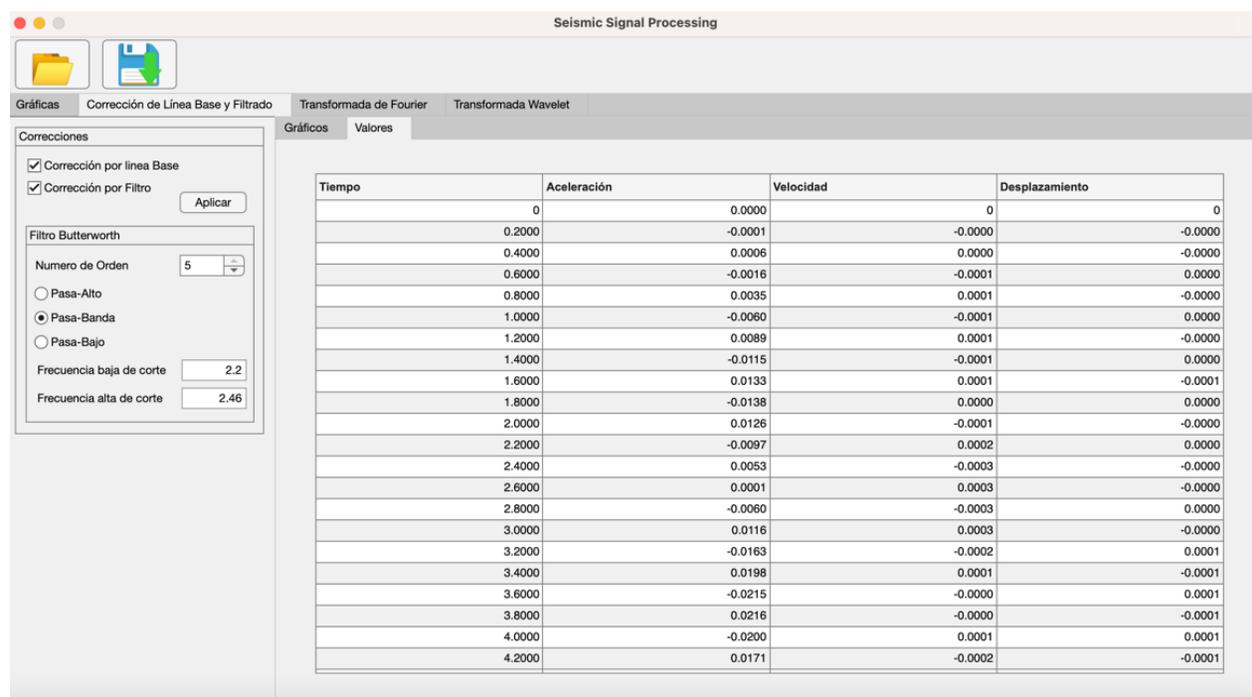
Gráficas de Corrección por Filtro



Los valores de la corrección realizada podrán ser visualizados en una tabla en la pestaña Valores, donde se presentan datos de tiempo, aceleración, velocidad y desplazamiento, como se muestra en la Figura 74.

Figura 74

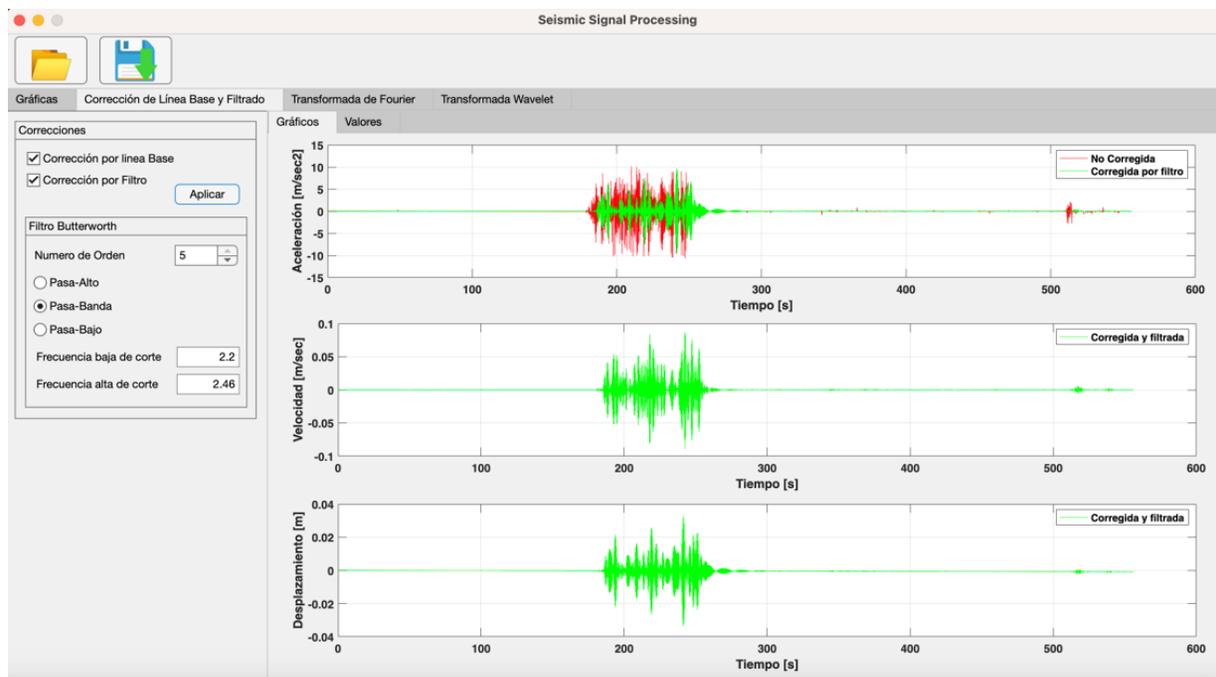
Tabla de valores de corrección por línea base



Tanto la corrección de línea base y la corrección por filtro pueden realizarse individualmente, así como las dos al mismo tiempo, como se muestra en la Figura 75 así como en los casos anteriores las gráficas de color verde muestran los datos ya corregidos y las de color rojo los datos sin corregir.

Figura 75

Gráficas de Corrección por línea base y Corrección por Filtro



Transformada de Fourier

La ventana de Transformada de Fourier presenta dos tablas:

- Tabla de datos de aceleración: ubicada en la sección de aceleración presenta los datos de tiempo y aceleración.
- Tabla de datos de la transformada de Fourier: ubicada en la sección de Transformada de Fourier presenta los datos de frecuencia, periodo y amplitud.

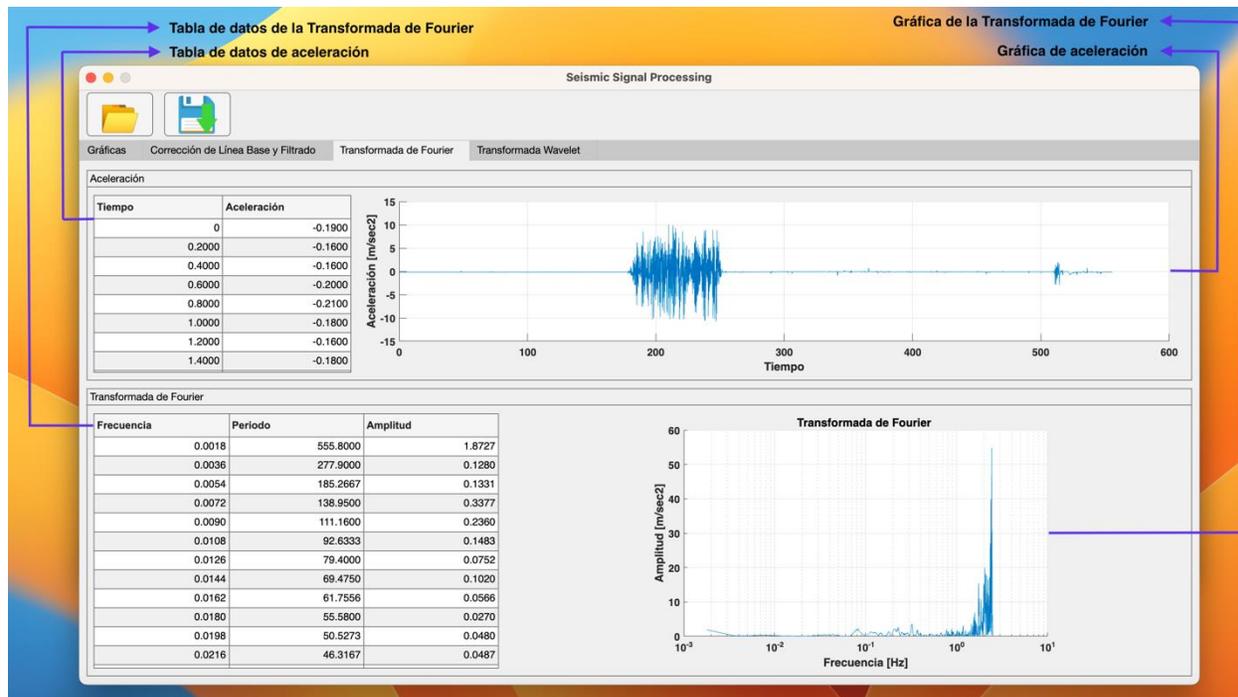
También se presenta dos gráficas:

- Gráfica de aceleración: representa los datos de aceleración en una gráfica donde el tiempo representado en segundos se encuentra en el eje horizontal y en el eje vertical los datos de aceleración con las unidades seleccionadas al importar el archivo.
- Gráfica de la transformada de Fourier: representa las frecuencias de oscilación del sensor. El eje horizontal de la gráfica representa las frecuencias en Hertz, mientras que el eje vertical representa la amplitud en unidades de aceleración.

Lo antes mencionado se puede visualizar en la Figura 76. Tanto las gráficas como las tablas se generan automáticamente al momento de importar los datos de aceleración.

Figura 76

Seismic Signal Processing – Ventana de Transformada de Fourier



Transformada Wavelet

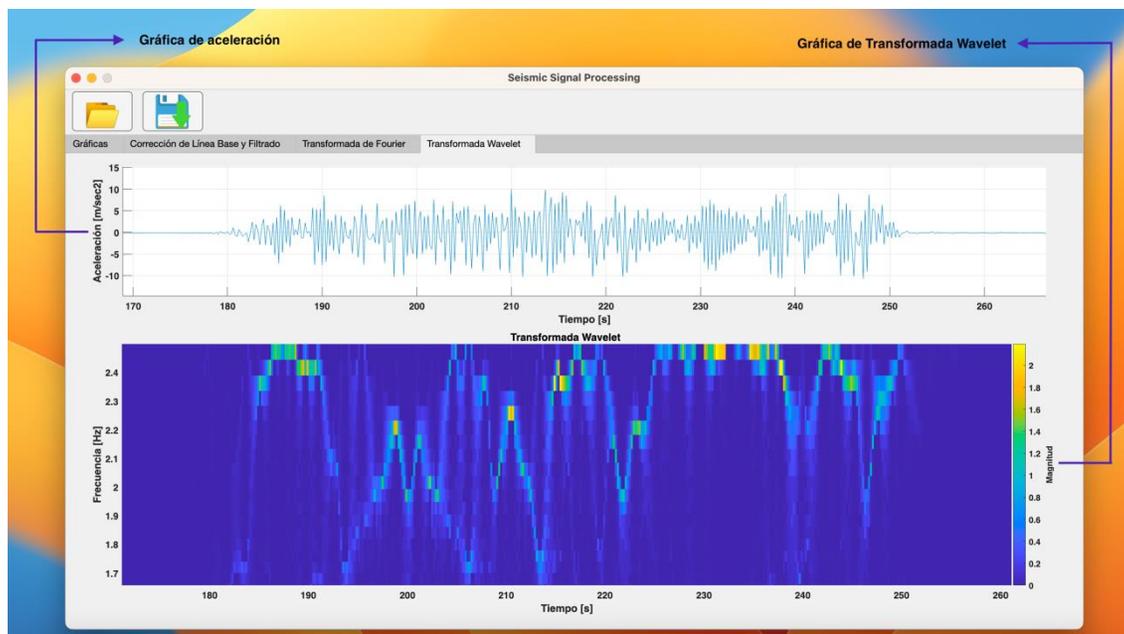
La ventana de transformada Wavelet presenta dos gráficas:

- Gráfica de aceleración: representa los datos de aceleración en una gráfica donde el tiempo representado en segundos se encuentra en el eje horizontal y en el eje vertical los datos de aceleración con las unidades seleccionadas al importar el archivo.
- Gráfica de la transformada Wavelet: entrega una gráfica de potencia en función de la frecuencia y del tiempo.

Lo antes mencionado se puede visualizar en la Figura 77. Las gráficas se generan automáticamente al momento de importar los datos de aceleración.

Figura 77

Seismic Signal Processing – Ventana de Transformada Wavelet.



Guardado de datos

Para guardar los datos se debe seleccionar el botón Guardar detallado en la Figura 69, el cual se habilitará una vez se haya importado los datos de aceleración. Al pulsar el botón se desplegará una ventana emergente, mostrada en la Figura 78.

Figura 78

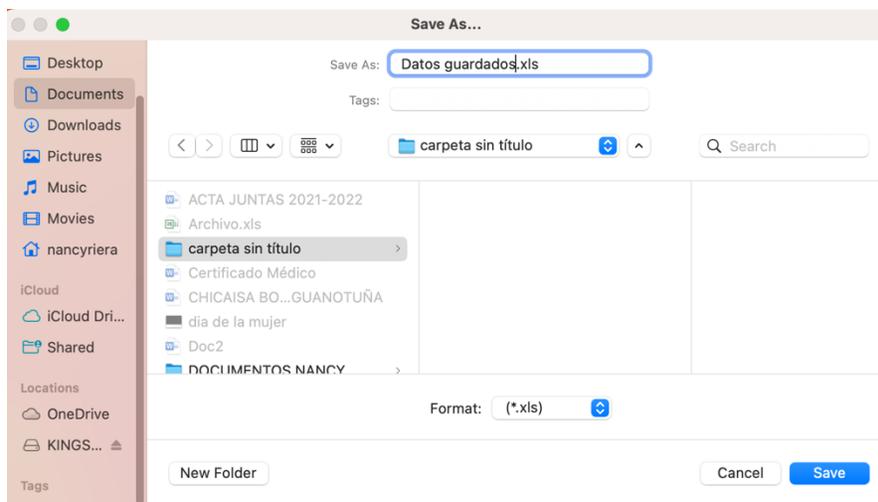
Seismic Signal Processing - Ventana de exportación de datos



En esta ventana emergente seleccionar lo que se desee guardar y el botón para exportar datos se habilitará automáticamente. Una vez seleccionado el botón se desplegará una ventana donde se selecciona la ubicación y el nombre con el que se desea guardar el archivo como se muestra en la Figura 79.

Figura 79

Ventana emergente para guardado de datos



El archivo guardado tendrá el formato de Archivo de Excel (.xls) como se visualiza en la Figura 80.

Figura 80

Archivo generado al exportar datos de Seismic Signal Processing

Nombre	Fecha de modificación	Tamaño	Clase
Datos guardados.xls	hoy 20:03	620 KB	Micros...ok (.xls)

El Archivo de Excel generado contiene un libro por cada opción que se haya seleccionado para exportar. En este ejemplo se seleccionó las tres opciones posibles mostradas en la Figura 78, por lo cual, se tiene tres libros dentro del archivo:

- El primer libro corresponde a los Datos sin Corregir y contiene los datos de Tiempo, Aceleración, Velocidad y Desplazamiento distribuidos en columnas, como se observa en la Figura 81.

Figura 81

Libro Datos sin Corregir

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Tiempo	Aceleración	Velocidad	Desplazamiento													
2	0	0	0	0													
3	0,2	-0,19	-0,019	-0,0019													
4	0,4	-0,16	-0,054	-0,0092													
5	0,6	-0,16	-0,086	-0,0232													
6	0,8	-0,2	-0,122	-0,044													
7	1	-0,21	-0,163	-0,0725													
8	1,2	-0,18	-0,202	-0,109													
9	1,4	-0,16	-0,236	-0,1528													
10	1,6	-0,18	-0,27	-0,2034													
11	1,8	-0,17	-0,305	-0,2609													
12	2	-0,17	-0,339	-0,3253													
13	2,2	-0,2	-0,376	-0,3968													
14	2,4	-0,2	-0,416	-0,476													
15	2,6	-0,19	-0,455	-0,5631													
16	2,8	-0,16	-0,49	-0,6576													
17	3	-0,18	-0,524	-0,759													
18	3,2	-0,18	-0,56	-0,8674													
19	3,4	-0,18	-0,596	-0,983													
20	3,6	-0,15	-0,629	-1,1055													
21	3,8	-0,17	-0,661	-1,2345													
22	4	-0,18	-0,696	-1,3702													
23	4,2	-0,2	-0,734	-1,5132													
24	4,4	-0,18	-0,772	-1,6638													
25	4,6	-0,17	-0,807	-1,8217													
26	4,8	-0,16	-0,84	-1,9864													
27	5	-0,16	-0,872	-2,1576													
28	5,2	-0,19	-0,907	-2,3355													
29	5,4	-0,2	-0,946	-2,5208													
30	5,6	-0,2	-0,986	-2,714													
31	5,8	-0,17	-1,023	-2,9149													

- El segundo libro corresponde a los Datos Corregidos y contiene los datos de Tiempo, Aceleración, Velocidad y Desplazamiento distribuidos en columnas, como se observa en la Figura 82.

Figura 82

Libro Datos Corregidos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Tiempo	Aceleración	Velocidad	Desplazamiento													
2	0	1,57084E-05	0	0													
3	0,2	-0,000137044	-1,21336E-05	-7,04184E-07													
4	0,4	0,000583295	3,24914E-05	-1,06953E-06													
5	0,6	-0,001641767	-7,33558E-05	2,26091E-06													
6	0,8	0,00348879	0,000111346	-1,10419E-05													
7	1	-0,006033754	-0,000143152	1,75192E-05													
8	1,2	0,008997892	0,000143262	-3,22419E-05													
9	1,4	-0,011520416	-0,00011899	3,82463E-05													
10	1,6	0,013309323	5,99002E-05	-5,04295E-05													
11	1,8	-0,013767696	1,40629E-05	4,72245E-05													
12	2	0,01258474	-0,000104233	-4,9634E-05													
13	2,2	-0,009698203	0,000184421	3,26614E-05													
14	2,4	0,00531867	-0,000253532	-2,4306E-05													
15	2,6	0,000101434	0,000288478	-3,42062E-06													
16	2,8	-0,005952456	-0,000296624	1,59444E-05													
17	3	0,01157182	0,000265292	-4,56023E-05													
18	3,2	-0,016337499	-0,000211295	5,28278E-05													
19	3,4	0,019754469	0,000130402	-7,55682E-05													
20	3,6	-0,021519848	-4,61363E-05	7,04394E-05													
21	3,8	0,021550308	-4,30903E-05	-8,20504E-05													
22	4	-0,0199669	0,00011525	6,35563E-05													
23	4,2	0,017060991	-0,00017534	-6,5879E-05													
24	4,4	-0,013246974	0,000206061	3,82196E-05													
25	4,6	0,00899859	-0,000218777	-3,72039E-05													
26	4,8	-0,00478488	0,000202594	7,12267E-06													
27	5	0,001019353	-0,000173959	-9,3613E-06													
28	5,2	0,001977796	0,000125756	-1,73764E-05													
29	5,4	-0,004001356	-7,86E-05	7,46969E-06													
30	5,6	0,004970624	2,03268E-05	-2,80642E-05													
31	5,8	-0,004931632	2,42259E-05	9,39857E-06													
32	6	0,004040635	-6,48738E-05	-2,45738E-05													
33	6,2	-0,0025283	8,63598E-05	-5,28717E-07													
34	6,4	0,00066233	-0,000100237	-1,25519E-05													
35	6,6	0,00128078	9,40738E-05	-1,52297E-05													
36	6,8	-0,003034067	-8,12548E-05	4,35007E-07													
37	7	0,00226816	8,14002E-05	-9,70194E-06													

- El tercer libro corresponde a los Datos Fourier y contiene los datos de Frecuencia, Periodo y Amplitud distribuido en columnas, como se observa en la Figura 83.

Conclusiones

Se consideraron siete características para realizar el análisis comparativo de los sensores propuestos concluyendo que el sensor MPU6050 es el más adecuado para realizar el proyecto.

Se logró desarrollar el prototipo a través de la integración de un acelerómetro MPU6050 triaxial con tecnología MEMS que es una estructura micromecanizada construida sobre una oblea de silicio. Además, cuenta con un microcontrolador NodeMCU v3 ESP8266 que es un módulo de desarrollo con WiFi compatible con Arduino. Posee un circuito de recarga y alimentación compuesto por un cargador Tp4056 con protección de sobrecarga, sobredescarga y cortocircuito de baterías, seguido de un regulador de voltaje MT3608 para una alimentación de voltaje constante al microcontrolador. El nodo sensor posee una batería recargable 18650 de 6800mAh.

Se elaboró e implementó dos algoritmos para la visualización y almacenamiento de la aceleración obtenida del nodo sensor. Seismic Signal Acquisition es un software encargado del monitoreo y almacenamiento en tiempo real mediante comunicación MQTT con los nodos sensores. Seismic Signal Web es una interfaz web de libre acceso encargada del monitoreo en tiempo real de los datos obtenidos por el nodo sensor.

Se elaboró e implementó un algoritmo para el procesamiento y almacenamiento de las aceleraciones obtenidas por el nodo sensor, llamado Seismic Signal Processing. Integra herramientas de corrección de línea base, filtrado, transformada Fourier y transformada Wavelet.

Se realizó una serie de pruebas entre el prototipo y el instrumento patrón, mediante las cuales se llegó a la conclusión que existe una diferencia entre picos positivos de $3.06976 \text{ [m/s}^2\text{]}$ y picos negativos de $3.22671 \text{ [m/s}^2\text{]}$, una vez sumados estos valores a todos los picos, existirá un error estimado de $1.35062 \text{ [m/s}^2\text{]}$ para picos positivos y $2.43494 \text{ [m/s}^2\text{]}$ para picos negativos. Además, se identificó que existe una variación de 0.7 [Hz] en la frecuencia de oscilación entre el instrumento patrón y el prototipo.

Se implementó tres nodos sensores en el edificio Administrativo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE campus Matriz-Sangolquí. Los sensores se encuentran localizados sobre la intersección entre la columna y la viga del primer y sexto piso.

Recomendaciones

En el presente proyecto se implementó el microcontrolador ESP8266 el cual presentó problemas de conexión con la red privada de la institución, por tal razón se empleó routers que faciliten la comunicación entre el nodo sensor y el broker. Se recomienda implementar un microcontrolador más robusto que permita la conexión directa con la red institucional.

Actualmente la red de sensores se encuentra conectada a un broker de acceso público gratuito limitando la velocidad de transferencia de datos y la cantidad de datos transmitidos, por tal razón en el proceso de adquisición el período de muestreo del instrumento patrón es mayor a la del prototipo. Se recomienda el empleo de un broker de acceso pago que presente una tasa de transferencia de datos mayor al empleado actualmente.

En el presente proyecto se emplea un computador como servidor para el almacenamiento de datos en tiempo real. Se recomienda el empleo de un servidor de acceso pago que permita el almacenamiento de datos en línea, para reducir la carga del software en el computador y permitir el acceso público a los datos almacenados.

En el presente trabajo se empleó un sensor de bajo costo, por tal razón la sensibilidad es menor con respecto al instrumento patrón. Se recomienda el estudio y el empleo de redes neuronales que solventen el error de sensibilidad por la diferencia de hardware entre sensores.

Bibliografía

- Aguilar, M., Ramírez, B., & Meza, G. M. (2016). *Sensores inerciales: acelerómetro MPU6050*.
https://www.academia.edu/24324242/Sensores_inerciales_aceler%C3%B3metro_MPU6050_Investigaci%C3%B3n_4
- Analog Devices. (2008). *Three-Axis, $\pm 2/4/8/16g$ Digital Accelerometer ADXL345*. <http://www.analog.com>
- Antonio, P., & Campos, C. (2008). *Sensores analógicos utilizados en la Automatización Industrial*.
https://www.academia.edu/36347268/Sensores_anal%C3%B3gicos_utilizados_en_la_Automatizaci%C3%B3n_Industrial_Por
- Armando Martínez Reyes. (2020). *Sistemas electrónicos y automáticos*.
<https://repositorio.tec.mx/handle/11285/629338>
- Balageas, D., Fritzen, C.-P., & Güemes, A. (2006). *Structural Helth Monitoring*. ISTE Ltd.
- Balek, J., & Klokočník, P. (2021). Development of low-cost inclination sensor based on MEMS accelerometers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 906(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012057>
- Barsocchi, P., Bartoli, G., Betti, M., Girardi, M., Mammolito, S., Pellegrini, D., & Zini, G. (2021). Wireless Sensor Networks for Continuous Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(1), 22–44.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1719229>
- Basko, A., Ponomarova, O., & Prokopchuk, Y. (2021). Review of technologies for automatic health monitoring of structures and buildings. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 12(2). <https://doi.org/10.36001/IJPHM.2021.V12I2.3015>

- Betti, M., Castelli, P., Galano, L., Spadaccini, O., & Zini, G. (2023). Long-Term Structural Monitoring of a Steel Jacket Offshore Platform. Validation of Meteo-Marine Data and Implications for Maintenance. En P. Rizzo & A. Milazzo (Eds.), *European Workshop on Structural Health Monitoring* (pp. 1038–1047). Springer International Publishing.
- Bobadilla, J., Gómez, P., & Bernal, J. (1999). *La transformada de fourier una visión pedagógica*. Estudios de fonética experimental. <https://raco.cat/index.php/EFE/article/view/144488>.
- Bonafonte, A. (2009). *Transformada de Fourier*.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/191346/tema2.transf_fourier_v29may2009-2742.pdf
- Carletti, E. J. (2021). *Comunicación-Bus I2C*.
<https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/ComunicacionBusI2C.pdf>
- Castro, L. R., & Castro, S. M. (1995). *Wavelets y sus Aplicaciones*.
<http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/24289/03-Castro+%E7.pdf?sequence=1>
- Chintalapudi, K., Fu, T., Paek, J., Kothari, N., Rangwala, S., Caffrey, J., Govindan, R., Johnson, E., & Masri, S. (2006). *Monitoring Civil Structures with a Wireless Sensor Network*.
<https://doi.org/10.1109/MIC.2006.38>
- Comas, Z., Simancas, J., Vélez, J., Bernal, V., & Percia, I. (2018, julio 10). *Redes de sensores inalámbricos para la monitorización de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado*. 13.
<https://www.revistaespacios.com/a18v39n45/a18v39n45p13.pdf>
- Daisuke, C., Ken'ichi, Y., & Mikio, S. (2014). *Engineering for Earthquake Disaster Prevention Based on Observations, Experiments, and Analyses*. <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201411fa13.html>

Darío, B., Silva, E., Alexandra, P., & Yépez, V. (2020). *Desarrollo de un software para procesamiento y corrección de registros, y generación de espectros de respuesta sísmica.*

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19347>

Duoandikoetxea, J. (2003). *Lecciones sobre las series y transformadas de fourier.*

<https://www.ugr.es/~acanada/docencia/maticas/analisisdefourier/Duoandikoetxeafourier.pdf>

Estrada, A. (2004). *Protocolos tcp/ip de internet internet: del uso militar al uso civil.*

<http://www.revista.unam.mx/vol.5/num8/art51/art51.htm>

Miyara, F. (2004). *Filtros Activos.* <https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/filtros-t.pdf>

Peña, J. (2009). *Filtros Activos.* <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>

Freescale Semiconductor. (2008). *Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer MMA7361L.*

<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMA7361L.pdf>

García Silva, L. J. (2022). Diseño e implementación de un sistema domótico basado en la web of things (WoT) para la orquestación y descubrimiento de componentes cyber físicos. *Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE; Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.*

<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/28590>

Global civil society database. (2022). *International Association for Structural Control and Monitoring (IASCM).* Union of International Associations. <https://uia.org/>

Hernán, D., & Robalino, H. (2011). *Procesamiento de los acelerogramas de la red de acelerógrafos de la ciudad de quito tesis previa a la obtención del grado de máster en estructuras.*

<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7737>

- Hernández Martínez, M. D., & Mercado López, O. J. (2015). *Diseño y aplicación de códigos en matlab para cálculo de parámetros dinámicos en análisis sísmicos de suelo y estructuras*. universidad centroamericana. <http://repositorio.uca.edu.ni/id/eprint/2819>
- HRICH, B. (2009). *Diseño e implementación de un acelerómetro, velocímetro móvil digital Controlado por un pic de microchip*.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7998/Mem%C3%B2ria.pdf>
- Huidobro, J., Blanco, A., & Calero, J. (2007). *Administración de sistemas informáticos Redes de Area Local*. Thomson Ediciones Paraninfo, S.A.
- Iasha, F., & Darwito, P. A. (2020, febrero 1). Design of Algorithm Control for Monitoring System and Control Bridge Based Internet of Things (IoT). *Proceeding - ICoSTA 2020: 2020 International Conference on Smart Technology and Applications: Empowering Industrial IoT by Implementing Green Technology for Sustainable Development*.
<https://doi.org/10.1109/ICoSTA48221.2020.1570615709>
- IBM, & Eurotech. (2010). *MQTT V3.1 Protocol Specification 2 of 42*.
https://public.dhe.ibm.com/software/dw/webservices/ws-mqtt/MQTT_V3.1_Protocol_Specific.pdf
- InfoPLC. (2022). *Sensores digitales*. <https://www.infoplac.net/documentacion/12-instrumentacion-deteccion/1092-sensores-digitales>
- Intel. (2021). *Diferentes protocolos de Wi-Fi y velocidades de datos*.
<https://www.intel.la/content/www/xl/es/support/articles/000005725/wireless/legacy-intel-wireless-products.html>

Introducción a la Transformada Wavelet. (2006).

<https://users.exa.unicen.edu.ar/catedras/escuelapav/cursos/wavelets/apunte.pdf>

InvenSense. (2013a). *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification.* [https://www.ic-](https://www.ic-components.com/products/InvenSense/MPU-6000.jsp?gclid=Cj0KCQiA2-2eBhCIARIsAGLQ2RmunDGLHlJc5Pu7x8yQIEP7Yj_MnJRMEKeg1t0agWbYU6uycBtIEVQaAgjvEALw_wcB)

[components.com/products/InvenSense/MPU-6000.jsp?gclid=Cj0KCQiA2-](https://www.ic-components.com/products/InvenSense/MPU-6000.jsp?gclid=Cj0KCQiA2-2eBhCIARIsAGLQ2RmunDGLHlJc5Pu7x8yQIEP7Yj_MnJRMEKeg1t0agWbYU6uycBtIEVQaAgjvEALw_wcB)

[2eBhCIARIsAGLQ2RmunDGLHlJc5Pu7x8yQIEP7Yj_MnJRMEKeg1t0agWbYU6uycBtIEVQaAgjvEALw_wcB](https://www.ic-components.com/products/InvenSense/MPU-6000.jsp?gclid=Cj0KCQiA2-2eBhCIARIsAGLQ2RmunDGLHlJc5Pu7x8yQIEP7Yj_MnJRMEKeg1t0agWbYU6uycBtIEVQaAgjvEALw_wcB)

InvenSense. (2013b). *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification MPU-6000/MPU-6050 Product*

Specification. [https://www.ic-components.com/products/InvenSense/MPU-](https://www.ic-components.com/products/InvenSense/MPU-6000.jsp?gclid=Cj0KCQiA2-2eBhCIARIsAGLQ2RmunDGLHlJc5Pu7x8yQIEP7Yj_MnJRMEKeg1t0agWbYU6uycBtIEVQaAgjvEALw_wcB)

[6000.jsp?gclid=Cj0KCQiA2-](https://www.ic-components.com/products/InvenSense/MPU-6000.jsp?gclid=Cj0KCQiA2-2eBhCIARIsAGLQ2RmunDGLHlJc5Pu7x8yQIEP7Yj_MnJRMEKeg1t0agWbYU6uycBtIEVQaAgjvEALw_wcB)

[2eBhCIARIsAGLQ2RmunDGLHlJc5Pu7x8yQIEP7Yj_MnJRMEKeg1t0agWbYU6uycBtIEVQaAgjvEALw_wcB](https://www.ic-components.com/products/InvenSense/MPU-6000.jsp?gclid=Cj0KCQiA2-2eBhCIARIsAGLQ2RmunDGLHlJc5Pu7x8yQIEP7Yj_MnJRMEKeg1t0agWbYU6uycBtIEVQaAgjvEALw_wcB)

Jayawardana, D., Kharkovsky, S., Liyanapathirana, R., & Zhu, X. (2016). Measurement System With

Accelerometer Integrated RFID Tag for Infrastructure Health Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(5), 1163–1171.

<https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2507406>

Kita, A., Cavalagli, N., Venanzi, I., & Ubertini, F. (2021). A new method for earthquake-induced damage

identification in historic masonry towers combining OMA and IDA. *Bulletin of Earthquake*

Engineering, 19(12), 5307–5337. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01167-0>

Lanning, F., Haro, A. G., Liu, M. K., Monzón, A., Monzón-Despang, H., Schultz, A., & Tola, A. (2016). EERI

Earthquake Reconnaissance Team Report: M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16, 2016.

Earthquake Engineering Research Institute (EERI). [http://learningfromearthquakes.org/2016-04-](http://learningfromearthquakes.org/2016-04-16-muisne-ecuador/images/2016_04_16_Muisne_Ecuador/pdfs/EERI-Ecuador-2016-Recon-Report-Reduced.pdf)

[16-muisne-ecuador/images/2016_04_16_Muisne_Ecuador/pdfs/EERI-Ecuador-2016-Recon-Report-Reduced.pdf](http://learningfromearthquakes.org/2016-04-16-muisne-ecuador/images/2016_04_16_Muisne_Ecuador/pdfs/EERI-Ecuador-2016-Recon-Report-Reduced.pdf)

- Lei, Y., Rao, Y., Wu, J., & Lin, C.-H. (2020). BIM based cyber-physical systems for intelligent disaster prevention. *Journal of Industrial Information Integration*, 20, 100171.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100171>
- Li, Z., Hou, J., & Jankowski, Ł. (2022). Structural damage identification based on estimated additional virtual masses and Bayesian theory. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(2), 45.
<https://doi.org/10.1007/s00158-021-03156-y>
- Lin, C.-H., Chen, S.-Y., Yang, C.-C., Wu, C.-M., Huang, C.-M., Kuo, C.-T., & Huang, Y.-D. (2014). Structural health monitoring of bridges using cost-effective 1-axis accelerometers. *2014 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 24–27. <https://doi.org/10.1109/SAS.2014.6798910>
- M. Domínguez Caicedo. (2014). Períodos de vibración de las edificaciones. *Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de Matanzas*. <https://www.redalyc.org/pdf/1939/193932724001.pdf>
- Marulanda C., J., Thomson, P., & Marulanda A., J. (2000). *Monitoreo de salud estructural*.
<https://doi.org/10.25100/iyc.v2i2.2342>
- Marulanda, J., Thomson, P., & Muralanda, A. (2000). *Monitoreo de salud estructural*. 2.
https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2342/3092
- Mejía, Á., & Salazar, J. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo para el análisis de salud estructural de un puente a través de una red de sensores inalámbricos utilizando el software Matlab*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16827/1/UPS-GT002460.pdf>
- MIDUVI. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción—NEC*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

- Morello, R., de Capua, C., & Meduri, A. (2010). *Remote Monitoring of Building Structural Integrity by a Smart Wireless Sensor Network*. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2010.5488136>
- Muin, S., & Mosalam, K. M. (2021). Structural health monitoring using machine learning and cumulative absolute velocity features. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(12).
<https://doi.org/10.3390/app11125727>
- Muñoz, J., González, R., Alma, O., Luis, G., Huerta, M., & Sagbay, G. (2015). *A flooding routing algorithm for a wireless sensor network for seismic events*. <https://doi.org/10.1109/ICCSAT.2015.7362953>
- Ochoa, R. (2017). Módulo ESP8266 y sus aplicaciones en el internet de las cosas. En *Artículo Revista de Ingeniería Eléctrica Septiembre* (Vol. 1, Issue 2). <https://www.ecorfan.org/republicofperu>
- Parra, H. (2016). *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador Continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito*.
<https://www.bibliotecasdelecuador.com/Record/oai:localhost:28000-2465>
- Pentaris, F. P., Stonham, J., & Makris, J. P. (2013). A review of the state-of-the-art of wireless SHM systems and an experimental set-up towards an improved design. *Eurocon 2013*, 275–282.
<https://doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6624997>
- Quezada Sarmiento, P., Chango Cañaverl, P., Benavides, V., Ramirez, R., & Enciso, L. (2018). Desarrollo de un Sistema de Monitoreo para estructuras de puentes. *Espacios*, 39.
https://www.researchgate.net/publication/319312309_Desarrollo_de_un_Sistema_de_Monitoreo_para_estructuras_de_puentes
- Quintero, A., & Villamizar, R. (2010, mayo 28). *Estado del arte en monitorización de salud estructural: Un enfoque basado en agentes inteligentes*. https://redib.org/Record/oai_articulo2515191-estado-del-arte-en-monitorización-de-salud-estructural-un-enfoque-basado-en-agentes-inteligentes

Quiroz Córdova, G. (2007). *Teoría de Filtros*.

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/quiroz_c_g/

Redacción KeepCoding. (2022, agosto 22). *JavaScript*. <https://keepcoding.io/blog/5-razones-para-aprender-javascript-este-ano/>

Riggio, M., & Dilmaghani, M. (2020). Structural health monitoring of timber buildings: a literature survey. *Building Research & Information*, 48(8), 817–837.

<https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1681253>

Romero, M., Barbancho, J., Benjumea, J., Rivera, O., Roperro, J., Sánchez, G., & Sivianes, F. (2010). *Redes Locales*. Paraninfo. Ediciones Paraninfo S.A. <https://books.google.com.ec/books?id=duk7k-YoYwEC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Roy Huston, D., & Maher, A. (2018). *The study of factors affecting the implementation of clinical guidelines in Iran View project Capability of Different Multi-Criteria Decision-Making Techniques in the Performance Assessment of the Hospitals in Terms of Medical Waste Management View project*. <https://www.researchgate.net/publication/326097488>

S. Hernández Moreno. (2016). *¿Cómo se mide la vida útil de los edificios?*.

https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/67_4/PDF/VidaUtilEdificios.pdf

Safina, S. (2003). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93538>

Sánchez, K. (2015). *Monitoreo de Salud Estructural empleando Análisis de Componentes Principales con Árboles de Decisión y Máquinas de Soporte Vectorial*.

<https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/2215>

- Santalucia, J. R., & Gargiulo, ; E. (2006). *Transductor de Aceleración para la Detección de Sismos Fuertes*.
<https://docplayer.es/81063629-Transductor-de-aceleracion-para-la-deteccion-de-sismos-fuertes.html>
- Schultz, A. E., Haro, A. G., Liu, M. K., Monzón, A., Monzón, H., Lanning, F., & Tola, A. (2018). *Influence of ground motion on performance of RC infill frames in the 2016 Ecuador earthquake*.
https://www.researchgate.net/publication/326518627_INFLUENCE_OF_GROUND_MOTION_ON_PERFORMANCE_OF_RC_INFILL_FRAMES_IN_THE_2016_ECUADOR_EARTHQUAKE
- Seguel, J. (2019). *Bases metodológicas para implementación de sistemas de instrumentación y monitoreo de salud estructural en tiempo real de puentes en Chile*.
https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/173750/cf-seguel_ja.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sindhuja, S., & Kevildon, J. (2015). *MEMS-based wireless sensors network system for post-seismic tremor harm evaluation and building monitoring*. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2015.7159335>
- Sivasuriyan, A., Vijayan, D. S., Górski, W., Wodzyń, Ł., Vaverková, M. D., & Koda, E. (2021). Practical implementation of structural health monitoring in multi-story buildings. *Buildings*, 11(6).
<https://doi.org/10.3390/buildings11060263>
- Sofi, A., Jane Regita, J., Rane, B., & Lau, H. H. (2022). Structural health monitoring using wireless smart sensor network – An overview. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163, 108113.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108113>
- Stack Overflow Contributors. (2017). *Aprendizaje MQTT*. <https://riptutorial.com/es/home>
- Stephan, C. (2012). Sensor placement for modal identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 27, 461–470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.07.022>

The MathWorks, Inc. (2022). *Matlab*. <https://La.Mathworks.Com/Products/Matlab.Html>.

Valenti, S., Conti, M., Pierleoni, P., Zappelli, L., Belli, A., Gara, F., Carbonari, S., & Regni, M. (2018). A low cost wireless sensor node for building monitoring. *2018 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/EESMS.2018.8405827>

Vistasp, K., & Farhad, A. (2009). *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*.
<https://shop.elsevier.com/books/structural-health-monitoring-of-civil-infrastructure-systems/karbhari/978-1-84569-392-3>

Weebly. (2022). *Introducción a los sensores*.
https://tableroalparque.weebly.com/uploads/5/1/6/9/51696511/introducciÓn_a_los_sensores.pdf

Zini, G., Bartoli, G., Betti, M., & Marafini, F. (2022). A quality-based framework for data-driven SHM of heritage buildings. *2022 IEEE Workshop on Complexity in Engineering (COMPENG)*, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/COMPENG50184.2022.9905472>

Zonno, G., Aguilar, R., Boroschek, R., & Lourenço, P. B. (2018). Automated long-term dynamic monitoring using hierarchical clustering and adaptive modal tracking: validation and applications. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(5), 791–808.
<https://doi.org/10.1007/s13349-018-0306-3>