



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN**

**TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

TEMA

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL MONITOREO
PERIÓDICO DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES
BASADO EN EL MODELO DE ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL Y
RED DE SENSORES ACELERÓMETROS MEM'S”**

Autores

Br. Allan Mauricio Hernández

Br. Gerardo José Huerta Robles

Tutor:

TeKnL. Marco Munguía Mena.

Septiembre 2023

Managua, Nicaragua

DEDICATORIA

La culminación de este trabajo monográfico ha representado para mí todos los años de esfuerzo e incansables horas de dedicación con el fin de lograr la meta de mi profesión. A continuación, hago mención a las personas que han sido las más influyentes en alcanzar este logro y por lo tanto considero justo dedicarles esta obra.

Este trabajo monográfico va dedicado a mis padres: Elda Robles y Gerardo Huerta Tercero quienes con tanto amor me han regalado el privilegio de educarme, más aún el deseo indomable de seguir aprendiendo, ambos valores que cobijo como mis más grandes tesoros.

Adicional, a la señora Aura María Ocon Moreno, a quien considero mi segunda madre. Pocas son las veces en nuestra vida que nos topamos con personas de tan noble corazón, su ejemplo virtuoso de darlo todo aun teniendo poco demuestra lo invaluable que es. Espero que con este trabajo refleje todo el cariño y apoyo recibido de su parte.

Finalmente quiero mencionar al resto de familiares y amigos cercanos quienes aportaron en lo posible de ver este sueño cumplirse.

Dedico este logro con todos ustedes bajo el recuerdo de los momentos que lo hicieron realidad.

Br Gerardo José Huerta Robles

Al creador, por sus infinitas bendiciones. A mi madre, por su amor y apoyo incondicional, quien ha estado siempre a mi lado en mi formación profesional, este trabajo es el resultado su lucha constante.

A Elianne y Priscilla, gracias por apoyarme en todo momento y por estar siempre conmigo, su amor me ha enseñado a ser mejor persona, son la motivación que hace posible lograr mis metas.

A mi hermano; siempre ha sido mi ejemplo a seguir. A mis familiares, maestros y amigos quienes contribuyeron sobremanera al logro de mis objetivos, en especial a José Dolores, quien me motivó a ser un profesional.

Br. Allan Mauricio Hernández.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a cada persona que nos apoyó en el desarrollo de este proyecto. También a todos aquellos que tuvieron un papel importante durante nuestros años de estudio, quienes conocen del esfuerzo que realizamos para culminar con éxito.

Al Ing. Imer Díaz, por su disposición y buena voluntad. Al TeKnL. Marco Munguía, por su gran labor en la tutoría de este trabajo monográfico. Al Ing. Maycol Rugama, por abrirnos las puertas del departamento de Normas de Construcción del MTI. A la constructora MECO, por permitirnos el espacio para realizar las pruebas de campo. A la FEC de la UNI, por los espacios facilitados para el aprendizaje y las pruebas de laboratorio.

A nuestras familias por su apoyo constante en cada etapa de la vida.

RESUMEN

El presente trabajo monográfico muestra los resultados obtenidos de la implementación de un prototipo para el monitoreo periódico de la condición estructural de puentes basado en el modelo de análisis modal operacional y red de sensores acelerómetros MEM's. Este prototipo está orientado a brindar una solución aplicando nuevas tecnologías, de bajo costo y alto rendimiento.

El objetivo es contribuir a la implementación de sistemas sensoriales en el proceso de monitorización de la condición estructural de puentes en Nicaragua, facilitando la detección de daños o cambios del estado físico, de modo que, al generar una memoria histórica de monitoreo a lo largo de los años, permitiría visualizar el proceso de deterioro durante su vida útil y evaluar los métodos constructivos actuales para establecer criterios de mejora a futuro.

Inicialmente se realizó un análisis del comportamiento dinámico de los puentes para establecer los criterios que propiciaron la selección adecuada de los elementos del sistema y el diseño de cada etapa. Luego, se procedió con las pruebas de laboratorio que permitieron comprobar el correcto funcionamiento del hardware. Para finalizar, se realizaron ensayos de campo con una viga tipo C previamente modelada en el software Ansys Mechanical, donde se verificó la efectividad del algoritmo de análisis desarrollado.

Como conclusión, se logró el desarrollo de un sistema con componentes de bajo costo, capaz de generar reportes de los modos de vibración de las estructuras, auxiliar el proceso de análisis del estado de puentes y la generación de data para el historial de monitoreo. Se puede decir que, el prototipo ha proporcionado una guía para continuar con el desarrollo e investigación de sistemas de este tipo en el país, bajo el marco de una nueva normativa de construcción nacional que motive a la implementación de instrumentación en las estructuras.

Índice General:

DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
RESUMEN	5
Índice de ecuaciones:	8
Índice de Tablas:	8
Índice de Figuras:	9
OBJETIVOS	12
GENERAL:	12
ESPECIFICOS:	12
JUSTIFICACIÓN	13
CAPITULO 1: GENERALIDADES DEL MONITOREO DE CONDICIÓN ESTRUCTURAL	15
1.1. Análisis Modal.	16
1.1.2. Análisis Modal Teórico.	16
1.1.3. Análisis Modal Experimental.	22
1.1.4. Análisis modal operacional.	24
1.2. Monitoreo de la Salud Estructural. (SHM).	28
1.2.1. Métodos y clasificación de los sistemas SHM.	29
1.2.2. SHM basado en vibraciones.	30
1.2.3. Detección de daños basado en vibraciones.	31
1.2.4. Componentes de un sistema SHM.	32
CAPITULO 2: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO SHM BASADO EN EL ANALISIS MODAL OPERACIONAL.	33
2.1. Investigación.	34
2.2. Componentes del prototipo SHM.	34
2.3. Adquisición de datos.	35
2.3.1. Medición de Variables.	35
2.3.2. Pre-Acondicionamiento de la señal.	37
2.3.3. Diseño PCB de sensores.	39
2.4. Comunicación de datos.	42
2.5. Procesamiento inteligente.	44

2.5.1.	Filtrado de la señal.....	44
2.5.2.	Microcontrolador.....	47
2.5.3.	Desarrollo del software embebido.....	50
2.6.	Fuente de alimentación	64
2.6.1.	Diseño del circuito.....	65
2.6.2.	Diseño en PCB.....	67
2.7.	Almacenamiento de datos procesados.....	68
2.8.	Diagnostico.....	69
2.8.1.	Modelo general del programa.....	70
2.8.2.	Administración remota.....	70
2.8.3.	Análisis de datos.....	71
2.9.	Recuperación de datos.....	74
2.10.	Ensamble del sistema.....	75
CAPITULO 3: PRUEBAS Y ENSAYOS EN LABORATORIOS.....		76
3.1.	Calibración de sensores.....	77
3.2.	Ensayo con sensores en viga simplemente soportada.....	77
3.2.1.	Mediciones con el sistema ModalFQ desarrollado.....	78
3.2.2.	Simulación por computadora.....	79
3.2.3.	Análisis de Resultados con datos obtenidos por sistema ModalFQ. 79	
3.2.4.	Análisis de viga tipo “C” mediante ANSYS Mechanical 2022.....	83
CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		85
4.1.	Conclusiones.....	86
4.2.	Recomendaciones.....	87
5.	Bibliografía.....	88
6.	Anexos.....	91
	Tabla general de costos del equipo:	91

Índice de ecuaciones:

Ecuación 1. Relación masa y aceleración	17
Ecuación 2. Sumatoria de fuerzas diagrama de cuerpo libre	17
Ecuación 3. Ecuación del movimiento de un sistema de 1 grado de libertad	18
Ecuación 4. Solución ecuación de movimiento de un cuerpo de 1 grado de libertad.....	18
Ecuación 5. Ecuación de movimiento, sistemas de n grados de libertad.	21
Ecuación 6. Ecuación de movimiento en vibración libre.....	22
Ecuación 7. Derivación de la descomposición en dominio de la frecuencia.	26
Ecuación 8. Descomposición matricial de la densidad espectral de potencia del movimiento de una estructura.	26
Ecuación 9. Densidad espectral de potencia de estructuras amortiguadas:	26
Ecuación 10. Descomposición en valores singulares de la matriz PSD	26
Ecuación 11. Porcentaje de variación entre 2 frecuencias tomadas en 2 momentos distintos....	31
Ecuación 12. Relación voltaje de salida con respecto a la entrada en la tarjeta del sensor	38
Ecuación 13. Cálculo punto Q filtro pasa bajos	45
Ecuación 14. Frecuencia de corte filtro pasa bajos	45
Ecuación 15. Función de transferencia del filtro pasa bajos	46
Ecuación 16. Sensibilidad mínima del sistema:	47
Ecuación 17. Cálculo de la frecuencia de oversampling	48
Ecuación 18. Variación mínima de voltaje detectable por el ADC.....	49
Ecuación 19 Cálculo de resistencias para regulador LM317 +3.3V.....	66
Ecuación 20 Cálculo de resistencias para regulador de voltaje LM337 -3.3v.....	67
Ecuación 21 Cantidad de bytes en una muestra del sistema	68
Ecuación 22 Cantidad de bytes en un segundo de medición	68
Ecuación 23 Cantidad de bytes en 10 minutos.....	68
Ecuación 24 Coherencia de magnitud cuadrada de 2 señales	73

Índice de Tablas:

Tabla 1. Tipos de excitaciones en el análisis modal experimental.	23
Tabla 2. Especificaciones técnicas del sensor.....	36
Tabla 3. Comparativa sensores en el mercado.....	36
Tabla 4. Lista de componentes - 4 tarjetas sensoriales	42
Tabla 5. Puntos Q para las etapas del filtro.....	45
Tabla 6. Familia de procesadores.	48
Tabla 7. Tareas creadas en FreeRTOS.	59
Tabla 8. Lista de componentes tarjeta de procesamiento.....	64
Tabla 9. Tabla de censo de carga del sistema.....	65
Tabla 10. Parámetros y calibración de acelerómetros.....	77
Tabla 11. Matriz de canales del equipo.....	77
Tabla 12. Características físicas y mecánicas de la viga	78
Tabla 13. Frecuencias encontradas en las mediciones.	81
Tabla 14. Frecuencias obtenidas de las mediciones 2.	83
Tabla 15. Comparación de resultados: Pruebas vs simulación.....	84

Índice de Figuras:

Figura 1. Diagrama de cuerpo libre Sistema lineal de un grado de libertad	17
Figura 2. Vibración libre de sistemas sub amortiguados, sobre y críticamente amortiguados.....	20
Figura 3. Comparación entre sistemas amortiguados y no amortiguados.	20
Figura 4. Sistema de 2 grados de libertad	21
Figura 5. Picos de la PSD por el método Peak Picking.....	25
Figura 6. Gráfica de los valores singulares (Rainieri & Fabbrocino, 2014)	27
Figura 7. Ventana empleada para obtener los parámetros del modo k)	28
Figura 8. Cuadro sinóptico estrategias de SHM(Chen & Ni, 2018)	29
Figura 9. Subconjuntos de un sistema de Monitoreo de Salud Estructural.	32
Figura 10. Esquema Completo prototipo SHM.....	35
Figura 11. Sensor LIS344ALH - LGA16 (4mm x 4mm x 1.5mm)	37
Figura 12. Pre-procesamiento señal aceleración.....	38
Figura 13. Diagrama esquemático preprocesamiento de la señal:	38
Figura 14. PIN IO Tarjeta sensores.	39
Figura 15. Voltaje y potenciómetro de referencia.....	39
Figura 16. Conexiones del sensor acelerómetro.	40
Figura 17. Circuitería completa OPAMPs.	40
Figura 18. Diagrama completo del sistema de adquisición de datos.	41
Figura 19. Vista en ambas caras la tarjeta impresa.	41
Figura 20. Tarjeta impresa del sistema de adquisición de datos.....	42
Figura 21. Conexiones físicas entre las distintas etapas.	43
Figura 22. chip Wiznet 5500.	43
Figura 23. Ejemplo módulo WIZNET 5500.....	44
Figura 24. Diagrama de circuito del filtro anti-aliasing pasa bajos de orden 4.	44
Figura 25. Función de transferencia de los filtros.....	46
Figura 26. Diagrama de bode del filtro orden 4 Butterworth pasa bajos.	46
Figura 27. Tareas ejecutadas por el Microcontrolador.	47
Figura 28. Cada Av es la suma de las muestras y luego decimadas a la cantidad de bits deseadas.	48
Figura 29. Ejemplo de conversión dual mode scan.	49
Figura 30. Tarjeta NUCLEO-64-474RE adquirida.....	50
Figura 31. Máquina de estados finitos y estados de las tareas.	51
Figura 32. Ecosistema STM32 Cube.	51
Figura 33. Configuración de señal de reloj para los periféricos.	52
Figura 34. Configuración del ADC.	53
Figura 35. Configuración del Timer.....	54
Figura 36. Arquitectura de software con FATFS.	54
Figura 37. Configuración SPI2 SD.....	55
Figura 38. Configuración FATFS.	55
Figura 39. Prioridad de las tareas e interrupción.	56
Figura 40. Configuración SPI3 Wiznet w5500.....	57
Figura 41. Pines GPIO configurados en el MCU.....	58
Figura 42. Configuración RTC interno.	58

Figura 43. Partes completas del código embebido.....	59
Figura 44. FreeRTOS uso de memoria.....	59
Figura 45. Uso de memoria del sistema completo	60
Figura 46. Directorio Core del código.	60
Figura 47. Archivos de librerías HAL, Drivers y middlewares.	61
Figura 48. Enclaves de la tarjeta Nucleo-64 con la asignación de pines.	61
Figura 49. Puerto RJ45 I/O de señal analógica a Tarjeta principal.	62
Figura 50. Diagrama de esquemático de componentes para la primera etapa del filtro.	62
Figura 51. Diagrama de esquemático de componentes para la segunda etapa del filtro.	62
Figura 52. Switch de direccionamiento IP y jumpers de alimentación.	63
Figura 53. Diseño de la Tarjeta principal.....	63
Figura 54. Diseño de fuentes de alimentación.	64
Figura 55. Circuito 7805 salida +5V.....	65
Figura 56. Circuito 7905 salida -5V.	66
Figura 57. Circuito LM317 salida +3.3V.....	66
Figura 58. Circuito LM337 salida -3.3V.....	67
Figura 59. Pistas de la tarjeta de alimentación de voltaje.	67
Figura 60. Ejemplo Catalex módulo microSD.	69
Figura 61. Diagrama de flujo interfaz de administración.	70
Figura 62. Ventana principal GUI.	71
Figura 63. Ventana principal módulo de Calibración.....	71
Figura 64. Ventana de Análisis de datos.	72
Figura 65. Flujograma de script de análisis.	72
Figura 66. Función que calcula la SVD entre los canales.....	73
Figura 67. Salida del dataset creado.	74
Figura 68. Caja Plexo LG92022 105x105x55mm.....	75
Figura 69. Caja Plexo LG92062 220x170x86mm.....	75
Figura 70. Etapas del sistema ensambladas.	75
Figura 71. Dimensiones del perfil "C".	78
Figura 72. Colocación de sensores sobre la viga.	78
Figura 73. Estructura de análisis dinámico en ANSYS MECHANICAL.	79
Figura 74. Valores singulares y frecuencias sobresalientes.	79
Figura 75. Densidad espectral de potencia canal 0.	80
Figura 76. Parámetros obtenidos sin ejercer fuerza sobre la viga.....	80
Figura 77. Frecuencias modales encontradas durante el segundo ensayo.....	81
Figura 78. PSD de acelerómetro 1, canales X, Y y Z ensayo 2.....	81
Figura 79. Parámetros encontrados aplicando fuerza en el centro de la viga.	82
Figura 80. Frecuencias modales encontradas durante el tercer ensayo.	82
Figura 81. PSD de acelerómetro 1, canales X, Y y Z ensayo 3.....	82
Figura 82. Parámetros encontrados aplicando fuerza en cualquier parte de la viga.	83
Figura 83. Viga tipo "C" simplemente soportada en sus extremos.	83
Figura 84. Resultados obtenidos por simulación.....	83
Figura 85. Modo de vibración 1 (44.92Hz), masa modal 9.62 Kg en dirección X.....	84
Figura 86. Modo de vibración 2 (58.67Hz), masa modal 15.02 en dirección Y	84

INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico y la era computacional, han permitido la creación e implementación de sistemas de monitoreo cada vez más sofisticados, que se han convertido en grandes aliados para afrontar las problemáticas y necesidades de la sociedad. Quizás sin darnos cuenta, la manera como cualquier ser humano “gestiona” su vida hoy en día, está basada en informaciones provistas directa o indirectamente de algún sistema de monitoreo.

Los puentes son obras civiles que permiten al tránsito vehicular, superar los accidentes geográficos y constituyen además elementos claves en la infraestructura vial, estos permiten comunicar dos espacios geográficos distantes y aportan al desarrollo de actividades mercantiles, turísticas, recreativas, entre otras; por lo tanto, es vital el análisis de su condición estructural a través de un monitoreo periódico que permita conocer los cambios o deterioros con el uso y el paso del tiempo.

El concepto de Monitoreo de la Condición Estructural, término que es una adaptación al español de la denominación original inglesa “Structural Health Monitoring” (SHM), consiste en “dar, en cada momento de la vida útil de una estructura, un diagnóstico del estado de los materiales constituyentes de sus diferentes componentes, así como del sistema global formado por los mismos como un todo” (Balageas, et. al., 2006).

En el presente documento se describe el desarrollo de un prototipo para el SHM enfocado a puentes, con el que se pretende generar una herramienta que contribuya a la gestión de la estructura vial del país, puesto que el sistema utilizado actualmente para dicha acción no da indicios de contar con herramientas especializadas que permitan obtener y almacenar información precisa sobre el estado de las estructuras.

OBJETIVOS

GENERAL:

Desarrollar un sistema prototipo para el monitoreo periódico de la condición estructural de puentes, basado en análisis modal operacional, sensores acelerómetros MEMS y algoritmos de identificación de parámetros dinámicos.

ESPECIFICOS:

- Diseñar los subsistemas de: adquisición de datos, comunicación y procesamiento a partir de la información requerida para cada uno.
- Validar el funcionamiento individual de las distintas etapas del sistema SHM a través de ensayos en laboratorio.
- Desarrollar interfaz de administración y gestión de datos empleando lenguajes de programación de propósito general.
- Verificar la efectividad del sistema, mediante pruebas mecánicas a perfiles estructurales previamente modelados en software Ansys Mechanical.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la división de administración vial del ministerio de transporte e infraestructura, reporta 3065 estructuras de puentes para el año 2019. El manejo de estas estructuras está a cargo del sistema de administración de puentes de la oficina de diagnóstico, evaluación de pavimentos y puentes.

Según este reporte, el sistema está dotado de personal, equipo tanto de campo como de oficina, y un sistema informático llamado NICASAP, donde se procesa la información que se incluye en los reportes mensuales e informes de daños encontrados para el diseño de propuestas anuales de planes de mantenimiento, seguimiento y actualización de los mismos. (MTI, Ministerio de Transporte e Infraestructura, Division de administracion Vial, 2019).

En el mismo informe se explica el proceso de trabajo del sistema, aunque no muy detallado, presenta un esquema de 4 etapas: recopilación de la información de campo, análisis, introducción de costos de las reparaciones necesarias y finalmente, el diagnóstico y formulación de propuestas de planes de mantenimiento.

La etapa de recopilación de información de campo se realiza a través de la inspección y diagnóstico de la estructura con registro documental y fotográfico, pero no da indicios de utilizar sistemas especializados para estudios complementarios más profundos.

La inspección visual, posee sus desventajas en primer lugar porque la mayoría de los puentes son de difícil acceso por la accidentalidad geográfica en donde se ubican, lo que puede resultar sumamente peligroso e ineficiente, o prácticamente imposible en ciertos puntos de la estructura, como en vigas principales o elementos, y aun en partes accesibles, no todos los daños son aparentes. En segundo lugar, en caso de localizar el daño, la inspección visual está ligada al proceso cognitivo-subjetivo de cada inspector, por lo cual, varía de persona en persona imposibilitando la exactitud para cuantificar el daño y determinar su efecto

en el desempeño del puente de manera objetiva, numérica y precisa. (LanammeUCR, 2017).

La etapa de análisis se realiza aplicando criterios estructurales del estado actual de la estructura, sin embargo, a pesar que se lleva la documentación, no sugiere una evaluación en base a un monitoreo periódico, es decir, no se comparan estados pasados de la estructura con el estado actual, para revisar la evolución de la condición estructural durante su vida en servicio.

Esto incumple con la esencia del monitoreo de la condición estructural, el cual tiene como objeto la detección de daño o cambio de su estado físico, de modo que, al generar una memoria histórica de monitoreo a lo largo de los años, permitiría visualizar el proceso de deterioro durante su vida útil y evaluar los métodos constructivos actuales para establecer criterios de mejora a futuro.

A pesar de las limitantes que puede tener el sistema de reportes e informes de daños, los equipos especializados para este tipo de tarea conllevan una alta inversión en su implementación, mantenimiento y capacitación de uso. Por lo que, es posible que debido a las barreras anteriores la oficina de diagnóstico, evaluación de pavimentos y puentes no haya querido implementar un sistema de monitoreo de la condición estructural más avanzado. Sumado al poco desarrollo y documentación en la implementación de este tipo de sistemas en la región, no despierta el interés en aplicar más tecnología en la detección del daño estructural.

En respuesta a las limitaciones detectadas en el proceso de elaboración de informes de daños encontrados y los altos costos de equipos, el presente documento tiene como objetivo, desarrollar un prototipo para el monitoreo de la condición estructural, basado en análisis modal operacional, capaz de generar reportes que puedan auxiliar el proceso de análisis del estado de puentes y la generación de data para el historial de monitoreo, con el que se pretende obtener resultados sobre la viabilidad y eficacia de aplicar un sistema desarrollado con componentes de bajo costo e indirectamente propiciar el uso de estas tecnologías en los estudios realizados por el MTI.

CAPITULO 1: GENERALIDADES DEL MONITOREO DE CONDICIÓN ESTRUCTURAL

1.1. Análisis Modal.

El análisis modal deriva de la disciplina de dinámica estructural. Una explicación objetiva la encontramos en el libro (He & Fu, 2001, p. 2), y cita lo siguiente: “Es el proceso de determinar las características dinámicas de un sistema, tales como:

- Frecuencias naturales.
- Factores de amortiguamiento.
- Formas modales.

Con el objetivo de formular un modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de la estructura”.

La identificación de los parámetros modales se separa en 2 grupos de estudios: el análisis modal teórico y el análisis modal experimental. Ambos enfoques son de gran importancia en el estudio del análisis modal, ya que, se pueden complementar mutuamente para mejorar la precisión de los estudios realizados sobre las estructuras. En base a esta filosofía se crea una especie de correlación entre los estudios.

1.1.2. Análisis Modal Teórico.

El análisis modal teórico se aboca a la identificación de parámetros modales en base a las ecuaciones diferenciales que modelan el sistema; los sistemas pueden ser:

- Masas puntuales con un solo grado de libertad.
- Masas puntuales con múltiples grados de libertad.
- Sistemas de masa distribuida con infinitos grados de libertad, en este caso utilizamos vibración libre un estado en donde no se ejerce ninguna carga al sistema.

De acuerdo a la definición de (Humar, 2012), un sistema de un grado de libertad es el que varía su desplazamiento en el tiempo a lo largo de una sola dirección y está sujeto a cargas dinámicas.

La figura 1, muestra un sistema simple lineal de un grado de libertad, con masa m , constante de rigidez del resorte k , constante de amortiguamiento c , y la fuerza ejercida sobre la masa F_x . Para formular la ecuación que rige el sistema, (Brincker & Ventura, 2015), explica que debemos tomar en cuenta la fuerza inercial resultante debido al movimiento de la masa, por ello, se consideran las contribuciones de Isaac Newton, en específico la segunda ley del movimiento, de las más importantes en la dinámica estructural.

En la figura 1 se muestra el diagrama de cuerpo libre del sistema, aquí se demuestra las relaciones entre la fuerza inercial resultante del movimiento de la masa F_{total} , la fuerza debido al resorte que evita que la masa se mueva libremente F_s , y la fuerza asociada a la disipación de energía debido al amortiguamiento del sistema F_v .

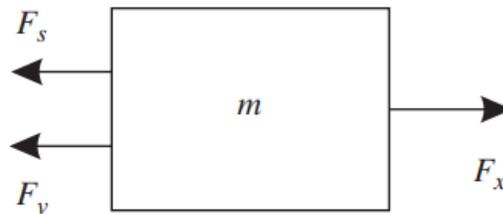


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre Sistema lineal de un grado de libertad

De la segunda ley de Newton tomamos que la fuerza total del sistema conserva relación con la masa y la aceleración de la siguiente forma:

Ecuación 1. Relación masa y aceleración

$$F_{total} = m * a = m\ddot{y}$$

En este caso $y(t)$ es el desplazamiento con respecto al tiempo.

La expresión de las fuerzas que interactúan en el sistema queda de la forma:

Ecuación 2. Sumatoria de fuerzas diagrama de cuerpo libre.

$$F_{total} = F_x - F_s - F_v$$

donde:

$$F_s = k * y$$

$$F_v = c * \dot{y}$$

F_x es la fuerza ejercida al sistema $x(t)$ y se puede considerar entrada, a la vez que, $y(t)$ es la salida del sistema.

Reescribiendo la ecuación nos queda:

Ecuación 3. Ecuación del movimiento de un sistema de 1 grado de libertad

$$m * \ddot{y} + c * \dot{y} + k * y = x(t)$$

La ecuación 3 es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden, y se denomina la ecuación del movimiento del sistema. De la solución de esta ecuación diferencial derivamos la frecuencia natural y la relación de amortiguamiento.

Antes de extraer estas características debemos considerar lo siguiente, a fin de un análisis menos complejo se ejecuta un análisis en lo que se conoce como vibración libre, este marco de referencia sugiere (Chopra, 2012), pp39, se da cuando una estructura se altera de su posición de equilibrio estático y se le permite vibrar sin ninguna excitación dinámica externa. Para una mejor comprensión, primero analizamos el sistema sin amortiguamiento F_v .

$$m * \ddot{y} + k * y = 0$$

La respuesta de esta ecuación es:

Ecuación 4. Solución ecuación de movimiento de un cuerpo de 1 grado de libertad.

$$y(t) = y(0) * \cos(\omega_n * t) + \frac{\dot{y}(0)}{\omega_n} \sin(\omega_n * t)$$

Donde ω_n es la frecuencia de vibración angular natural del sistema y es dado por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

El periodo natural de vibración del sistema T_n es el tiempo requerido para un sistema sin amortiguamiento en completar un ciclo de vibración libre es llamado

$$T_n = \frac{2 * \pi}{\omega_n}$$

Finalmente, la frecuencia natural de vibración F_n es denotada por:

$$F_n = \frac{\omega_n}{2 * \pi}$$

Deducimos que las propiedades de vibración natural tanto ω_n , T_n , F_n dependen solo de la masa y la rigidez del sistema. Se le llaman naturales para enfatizar que estas son propiedades naturales del sistema cuando se le deja vibrar libremente sin ninguna excitación externa, extraído de (Chopra, 2012), pp41. Son independientes de la posición y la velocidad inicial. Además, estas características se conservan en todos los sistemas incluso en los sistemas amortiguados como veremos en las siguientes ecuaciones.

Ahora, podemos continuar con sistemas con amortiguamiento como el caso de la ecuación (3) y excitación externa $x(t) = 0$. Cuando dividimos por m nos queda:

$$\ddot{y} + 2 * \zeta * \omega_n \dot{y} + \omega_n^2 * y = 0$$

ω_n es igual a (6) y el nuevo termino $\zeta = \frac{c}{\omega_n * 2 * m}$

ζ es ahora la relación de amortiguamiento, una propiedad del sistema que también depende de la masa y la rigidez; directamente proporcional a la constante de amortiguamiento.

La forma clásica de resolver esta ecuación utiliza algebra y el hecho de que la única función no trivial cuya derivada es una constante múltiple de sí misma es la función exponencial, su desarrollo se detalla en (Zill, 2009), pp 133.

Sustituyendo las derivadas nos queda una ecuación cuadrática llamada ecuación auxiliar. Las raíces de esta ecuación deben satisfacer a y habrá 3 formas de la solución general en dependencia de los coeficientes.

Si $\zeta < 1$ el sistema oscila alrededor de su posición de equilibrio con una amplitud progresivamente decreciente, raíces conjugados complejos. Si $\zeta = 1$ el sistema

regresa a su posición de equilibrio sin oscilar, raíces reales e iguales. Si $\zeta > 1$ igual regresa a su posición de equilibrio sin oscilar, pero más lento que el anterior, raíces reales y distintas. La figura 2 ilustra este comportamiento.

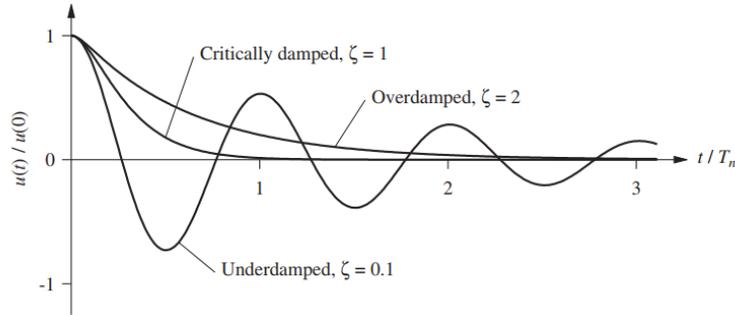


Figura 2. Vibración libre de sistemas sub amortiguados, sobre y críticamente amortiguados.

Según el autor (Chopra, 2012), las estructuras como los puentes tienen relaciones de amortiguamiento menores de 0.10, por lo tanto, caen en la categoría de sub amortiguados.

La solución completa es:

$$y(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[y(0) \cos(\omega_D * t) + \frac{\dot{y}(0) + \zeta\omega_n y(0)}{\omega_D} * \sin(\omega_D * t) \right]$$

Aquí introducimos el termino frecuencia natural de vibración amortiguada como ω_D conserva relación con frecuencia de vibración angular natural y se define:

$$\omega_D = \omega_n * \sqrt{1 - \zeta^2}$$

El efecto del amortiguamiento en los sistemas lo observamos en la figura 4. Es la reducción paulatina de la amplitud de vibración debido a la disipación de energía del amortiguamiento.

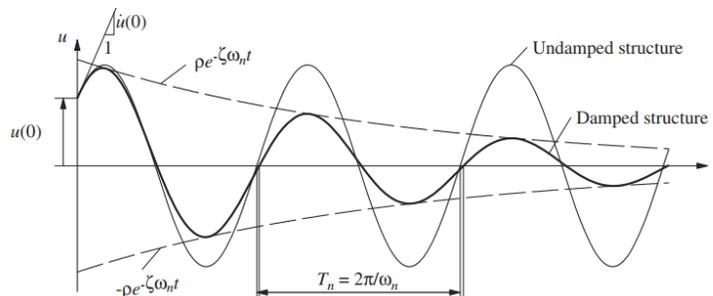


Figura 3. Comparación entre sistemas amortiguados y no amortiguados.

El periodo natural con vibración amortiguada es:

$$T_D = \frac{2 * \pi}{\omega_D} = \frac{T_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

Mientras, la frecuencia natural de vibración amortiguada es:

$$F_D = \frac{1}{T_D}$$

1.1.2.1. Sistemas de múltiples grados de libertad.

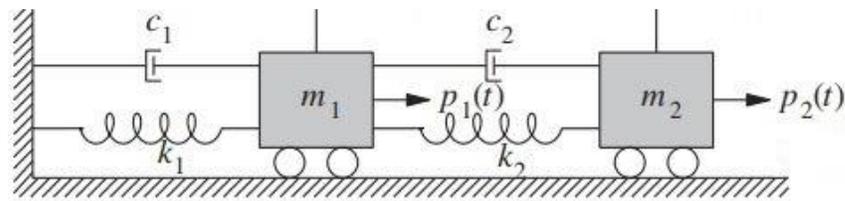


Figura 4. Sistema de 2 grados de libertad

Al igual que en los sistemas de un grado de libertad (SUGL), el estudio de sistemas con múltiples grados de libertad (SMGL), véase figura 5, inicia con la ecuación de movimiento. Como describe (Brincker & Ventura, 2015), pp92, la ecuación de movimiento de sistemas de N grados de libertad es una generalización de (3), se convierte en una ecuación matricial:

Ecuación 5. Ecuación de movimiento, sistemas de n grados de libertad.

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = x(t)$$

Las fuerzas de entrada $x(t)$, y la respuesta $y(t)$ son ahora vectores de N elementos. Las matrices M de masa, C de amortiguamiento y K de rigidez son ahora simétricas reales de $N \times N$ con coeficientes constantes.

Las soluciones a la ecuación 5 se pueden encontrar con el mismo método utilizado para SUGL, la sustitución de $y(t) = be^{\lambda t}$, en este caso se utiliza λ en forma de ecuación característica para cada ecuación generada por los N grados de libertad que posee el sistema. Lo anterior indica poseemos formas modales por cada grado de libertad del sistema. De hecho obtendremos una columna de b y cada columna es un vector propio que representan las formas modales de

vibración del sistema y los correspondientes valores propios son el cuadrado de la frecuencia angular natural del sistema. La ecuación (5) se desarrolla en (Brincker & Ventura, 2015) y es válida para los sistemas con amortiguamiento clásico.

El autor concluye que el resultado de la ecuación de movimiento en vibración libre es la combinación lineal de todos los estados de vibración libre de cada ecuación y por lo tanto de cada grado de libertad del sistema.

Ecuación 6. Ecuación de movimiento en vibración libre.

$$y(t) = \sum_{n=1}^N b_n (c_{n1} e^{\lambda_n t} + c_{n2} e^{\lambda_n^* t})$$

$$\lambda_n = \frac{-c_n \pm i\sqrt{c_n^2 - 4m_n k_n}}{2m_n}$$

$$\omega_{0n} = \sqrt{\frac{k_n}{m_n}}$$

$$\omega_{dn} = \omega_{0n} * \sqrt{1 - \zeta_n^2}$$

Como se observa en (16), (17) y 18 las relaciones son idénticas a los casos de SUGL. A esto se le suma que las frecuencias naturales ω_{0n} son vibraciones armónicas y constituyen los modos de forma b_n .

1.1.3. Análisis Modal Experimental.

A diferencia del análisis teórico, en el enfoque experimental obtenemos los parámetros y formas modales a partir de datos adquiridos en ensayos realizados sobre la estructura. Los tipos de excitación que se pueden aplicar al sistema son clave para separar los tipos de análisis modal experimental, véase tabla 1. Los métodos aplicados sacan ventaja de la linealidad e invariancia en el tiempo de los sistemas lineales, aplicando herramientas en el dominio de la frecuencia con el fin de analizar los datos obtenidos de los ensayos.

Tabla 1. Tipos de excitaciones en el análisis modal experimental.

CARACTERÍSTICA DETERMINANTE	TIPOS DE VIBRACIÓN	DESCRIPCIÓN
Excitación Externa	Vibración libre	Vibración inducida solo por estado inicial.
	vibración forzada	Vibración sujeta a una o más entradas continuas externas.
Presencia de Amortiguamiento	Vibración sin amortiguación	Vibración sin pérdida o excitación de energía.
	Vibración amortiguada	Vibración con pérdida de energía.
Linealidad	Vibración lineal	Vibración en donde el principio de superposición se conserva.
	Vibración no lineal	Vibración que no viola el principio de superposición.
Predictibilidad	Vibración determinística	El valor de vibración es conocido en cualquier momento.
	Vibración aleatoria	El valor de vibración no es conocido en ningún momento, pero las propiedades estadísticas de vibración son conocidas.

Nota. Los datos fueron extraídos de libro *Modal Analysis*. (He & Fu, 2001).

Esta forma de analizar la estructura se separa en dos tipos de ensayos: los de excitación forzada o artificial y los de excitación operacional.

La excitación forzada se auxilia de aplicar una entrada conocida a la estructura mediante sistemas como excitadores electromecánicos, electromagnéticos y electrohidráulicas; Otros tipos de excitadores son los que no se mantienen en contacto como los martillos de impacto y la excitación por cargas estáticas, (Rodríguez Súnico, 2005), pp66.

En cambio, la excitación operacional se apoya de las vibraciones durante el servicio de la estructura como: el viento, oleaje, tráfico, maquinaria propia, temperatura; estas entradas son consideradas como ruido blanco, véase tabla 1 Anexos, en los análisis con excitación forzada (Castro Triguero, 2016), pp10 es común referirse a la excitación operacional como método Output-only.

La vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es la variación, normalmente con el tiempo, de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica cuando dicha magnitud se hace alternativamente más grande y más pequeña que la referencia, (Rodríguez Súnico, 2005).

1.1.4. Análisis modal operacional.

El análisis modal operacional se basa a partir de los datos crudos de vibración recolectados en campo, y el análisis de la variación de las frecuencias modales, incremento del amortiguamiento o cambios en las formas modales debido al daño usando solo el ambiente y las fuerzas de servicio como entrada al sistema, como describe (Liu Kuan & Agüero Barrantes, 2017). Entre más preciso sean los datos medidos para obtener los parámetros, mejores posibilidades obtenemos de ajustar los valores a los reales.

Se emplea cuando no es conveniente excitar con martillos o excitadores la estructura que se desea estudiar. Por lo general, se generan dificultades al excitar estas estructuras por su tamaño, forma o localización. Según (Rodríguez Súnico, 2005) las principales ventajas de estos ensayos son:

- Menor tiempo para realizar el ensayo.
- Más barato con respecto al ensayo por excitaciones forzadas. Los equipos excitadores suelen ser caros y poco comunes.
- Se evita interferir en la operación de la estructura, por lo que puede seguir en servicio durante el ensayo.
- Se evita dañar la estructura debido a la aplicación de cargas artificiales.

Existen una variedad de métodos que se utilizan para extraer los datos de interés de los datos de aceleración adquiridos en crudo. Algunos de ellos son:

- Peak Picking (PP).
- Descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD).
- Identificación de subespecies estocásticas (SSI).

Es usual utilizar algoritmos en el dominio de la frecuencia por su simplicidad y velocidad de procesamiento.

1.1.4.1. Peak Picking.

Es el método más simple conocido, se fundamenta en que la Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) alcanza sus máximos valores en frecuencias modales, dichas frecuencias se obtienen simplemente observando la gráfica de la función de densidad espectral, ver ejemplo en la figura 1. Las estimaciones de este tipo están sujetas a aproximaciones y errores, por lo que no siempre proporcionan resultados fiables.

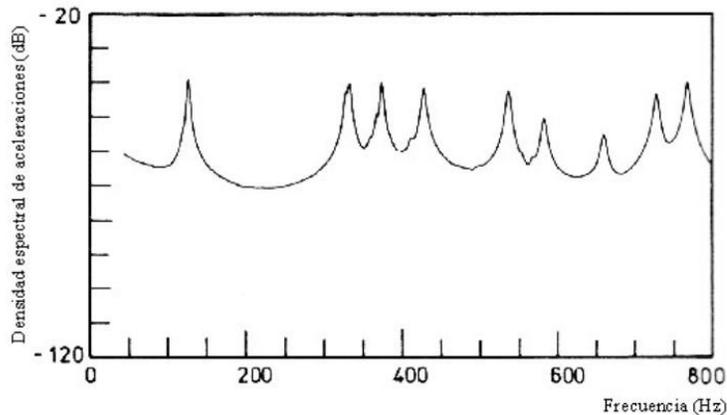


Figura 5. Picos de la PSD por el método Peak Picking

1.1.4.2. Descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD).

La técnica fue introducida en (Brincker & Ventura, 2015), como una extensión del enfoque clásico referido como la técnica Peak Picking. Es un método de subespacios en el dominio de la frecuencia que consiste en aplicar Descomposición de Valores Singulares (SVD) de la matriz de densidad espectral de potencia. Tiene la ventaja de encontrar modos de vibración cercanos entre sí con gran precisión incluso con señales fuertemente afectadas por ruido.

La idea de esta técnica es mayoritariamente introducida expresando la respuesta $y(t)$ de los modos y coordenadas modales:

Ecuación 7. Derivación de la descomposición en dominio de la frecuencia.

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n (c_{n1} e^{\lambda_n t} + c_{n2} e^{\lambda_n^* t})$$

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n q(t)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_y(\tau) &= E [\mathbf{y}(t) \mathbf{y}^T(t + \tau)] \\ &= \mathbf{A} E [\mathbf{q}(t) \mathbf{q}^T(t + \tau)] \mathbf{A}^T \\ &= \mathbf{A} \mathbf{R}_q(\tau) \mathbf{A}^T \end{aligned}$$

Tomando la transformada de Fourier en ambos lados obtenemos lo siguiente:

Ecuación 8. Descomposición matricial de la densidad espectral de potencia del movimiento de una estructura.

$$\mathbf{G}_y(f) = \mathbf{A} \mathbf{G}_q(f) \mathbf{A}^T$$

Asumiendo que de entrada al sistema excitamos con ruido blanco, la Densidad espectral de potencia (PSD) de la salida $G_{yy}(j\omega)$ se relaciona con la Densidad espectral de potencia de la entrada $G_{xx}(j\omega)$ y la función respuesta en frecuencia (FRF) del sistema $H(j\omega)$ en la ecuación 9. La demostración la encontramos en (Brincker & Ventura, 2015), pp134.

Ecuación 9. Densidad espectral de potencia de estructuras amortiguadas:

$$G_{yy}(j\omega) = \bar{H}(j\omega) G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T$$

El algoritmo funciona de la siguiente manera: el primer paso es estimar la matriz PSD de la salida, que se considera resultado del procesamiento de los datos adquiridos en los sistemas sensoriales de la estructura. Una vez que se tienen los valores de $\widehat{G}_{yy}(j\omega)$ para frecuencias discretas $\omega = \omega_i$ (aplicarle ventanas a la señal) son luego descompuestos en valores singulares (SVD):

Ecuación 10. Descomposición en valores singulares de la matriz PSD

$$\widehat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^T$$

Donde $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ contiene los vectores singulares y S_i es una matriz diagonal que contiene los valores singulares.

Desde la interpretación de (Rainieri & Fabbrocino, 2014) es posible identificar una relación directa entre los vectores singulares y las formas modales (ϕ), además los valores singulares están relacionados con la respuesta modal (polos). Los valores singulares pueden ser usados para definir el espectro de múltiples sistemas de un grado de libertad equivalentes caracterizados por los mismos parámetros modales que contribuyen a la respuesta del sistema con múltiples grados de libertad en análisis. Obteniendo los modos de vibración a partir de los picos en la representación de los valores singulares.

Desde que el SVD provee un arreglo de los valores en forma descendiente, cerca de una resonancia, el primer valor singular contiene la fuerza del modo dominante a esa frecuencia i , figura 6 línea negra. El número de valores singulares dominantes a ciertas frecuencias equivalen al número de modos que dan una contribución significativa a la respuesta de la estructura

El primer vector singular u_{i1} será una estimación del modo de vibración $\hat{\phi} = u_{i1}$. Los vectores singulares contienen las distintas maneras de las que se deforma la estructura.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de la representación de valores singulares.

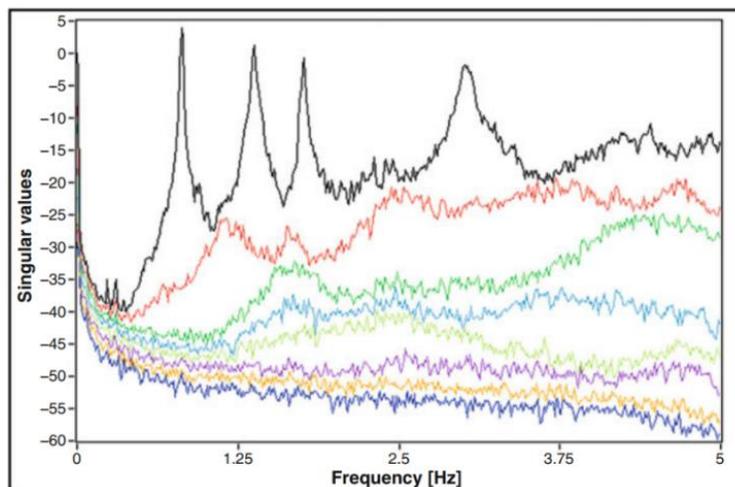


Figura 6. Gráfica de los valores singulares (Rainieri & Fabbrocino, 2014)

Si se transforma la función de densidad espectral de los picos k al dominio del tiempo, se obtiene la respuesta del sistema de un grado de libertad amortiguado (Rodríguez Súnico, 2005)pp.68. Con dicha señal en el dominio del tiempo se pueden calcular los parámetros que la caracterizan, que son el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural, ambos independientemente de la resolución de la frecuencia en el espectro utilizada en la gráfica de valores singulares. Esta idea se aclara en la figura 7:

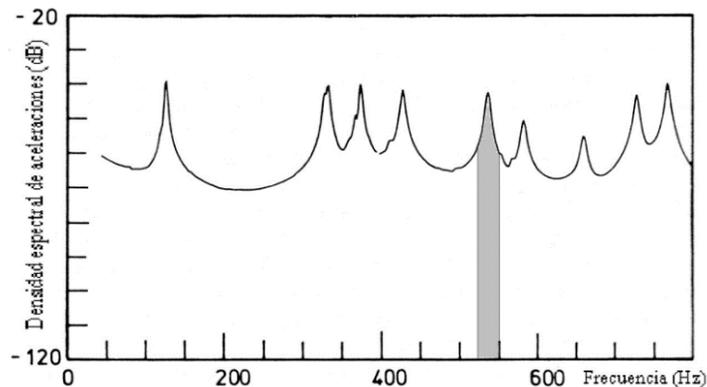


Figura 7. Ventana empleada para obtener los parámetros del modo k

1.2. Monitoreo de la Salud Estructural. (SHM).

El SHM (Structural Health Monitoring) según el autor (Chen & Ni, 2018) es definido como el proceso de implementar una estrategia de detección de daño y evaluación de salud sobre una estructura civil a lo largo de su vida en operación.

Los puentes son estructuras que se manejan bajo estrés constante pensados para una larga vida útil. A fin de establecer estrategias de gestión óptimas para mantener la infraestructura segura y confiable para el uso diario, la evaluación precisa de la seguridad presente y futura es necesaria. Como sugiere (Chen & Ni, 2018) pp.20 “Así, la salud estructural puede ser establecida como la actual capacidad para proporcionar el nivel de servicio previsto de manera segura y rentable contra los peligros esperados durante su vida útil”.

1.2.1. Métodos y clasificación de los sistemas SHM.

Se reconocen dos estrategias para abordar el SHM en una estructura: los métodos globales y los métodos locales, (Liu Kuan & Aguero Barrantes, 2017). Su diferencia radica en el alcance de la evaluación e información que proporcionan.

Los métodos globales son aquellas metodologías basadas en parámetros que permiten detectar si existen o no daños y su localización a nivel general. Por otra parte, los métodos locales brindan información detallada en una zona específica lo que los vuelve no apropiados para el rastreo general. Ver figura 4.

Los métodos de monitoreo globales son las herramientas tradicionales utilizadas para evaluar puentes. Un monitoreo global es seleccionado cuando la accesibilidad a partes específicas de la estructura es imposible, como suele ser el caso de puentes de larga envergadura.

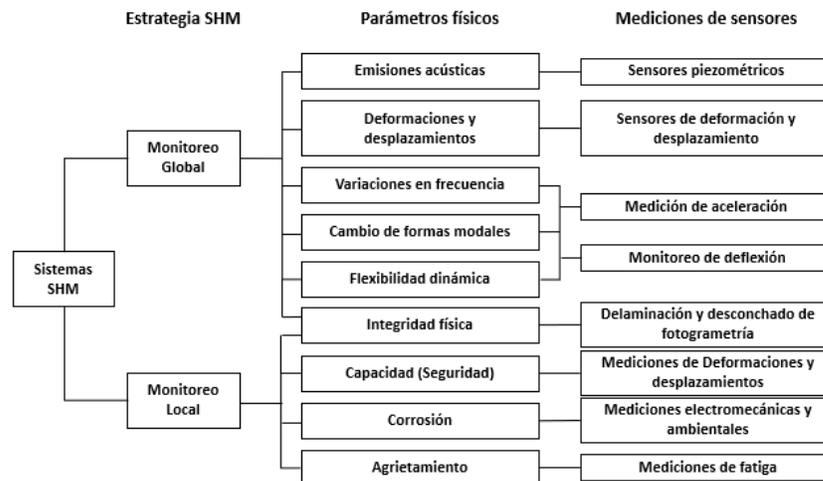


Figura 8. Cuadro sinóptico estrategias de SHM(Chen & Ni, 2018)

Algunos métodos de monitoreo global son: el método basado en vibraciones y el método basado en deformaciones (Liu Kuan & Aguero Barrantes, 2017). Siguiendo la línea de estudio, el de mayor interés a analizar es el basado en vibraciones, el cual aplica las herramientas de análisis modal a los datos de vibración captados.

Para aplicar los métodos de monitoreo se debe planear el tipo de prueba y la escala de tiempo a la que se someterá la estructura a dicha prueba y aquí se pueden observar 4 categorías distintas de SHM (ISIS Canada Corporation, 2001):

- Pruebas de campo estáticas.
- Pruebas de campo dinámica.
- Monitoreo periódico.
- Monitoreo Continuo.

Las pruebas son las distintas formas que se puede excitar una estructura, como lo habíamos estudiado en el análisis modal experimental, pueden ser por cargas estáticas, cargas dinámicas o vibraciones ambientales (excitación operacional).

La escala de tiempo de monitoreo puede ser periódico o continuo. Un monitoreo periódico se puede realizar en intervalos de horas cada tantas semanas, meses o años. Algún cambio detectado con respecto al último monitoreo puede ser usado como un indicativo de daño o deterioro. En contraparte el monitoreo continuo se realiza por largos periodos de tiempo pueden semanas, meses o años tiene la desventaja de elevar los costos y complejidad ya que los datos deben ser enviados continuamente hacia una localidad de administración y análisis.

1.2.2. SHM basado en vibraciones.

El uso del análisis modal como instrumento para el monitoreo estructural se le conoce como el método de monitoreo basado en vibraciones. Como da a conocer (He & Fu, 2001) la base teórica recae en que la respuesta dinámica de una estructura varia a causa de un daño inherente, incrementando la posibilidad de identificar daños debido a la variación de la respuesta estructural antes y después de ocurrido el daño.

Una práctica común en esta aplicación en particular es obtener una “baseline” o línea de partida de parámetros modales cuando la estructura está en perfectas condiciones. Con el tiempo algún cambio en los parámetros va sugerir algún daño ocurrido en la estructura. Según (Chen & Ni, 2018) las formas modales son los

parámetros más sensibles a daños locales convirtiéndolos en los más precisos para la localización de daños.

El método es implementado cuando se considera la estrategia global de monitoreo lo que da una ventaja en identificar el daño incluso en zonas inaccesibles. El tipo de análisis modal más común para esta aplicación es el análisis modal operacional, ya que la mayoría de estructuras puestas en análisis ya están en servicio. En la siguiente sección se discutirá la identificación de daño utilizando los parámetros modales y sus derivados como la frecuencia natural, formas modales y su curvatura

1.2.3. Detección de daños basado en vibraciones.

Utilizando la frecuencia natural para identificar daños nos encontramos con la siguiente ecuación descrita en (Rainieri & Fabbrocino, 2014):

Ecuación 11. Porcentaje de variación entre 2 frecuencias tomadas en 2 momentos distintos

$$\Delta f_n = \frac{f_{2,n} - f_{1,n}}{f_{1,n}} * 100$$

Donde $f_{1,n}$ y $f_{2,n}$ son 2 valores de frecuencia natural para el modo n antes y después de las pruebas respectivamente.

Una anormal pérdida de rigidez es reflejada cuando las medidas de frecuencia natural son sustancialmente menores a las esperadas. Por otro lado, frecuencias más altas de las esperadas son indicativos de soportes más rígidos de lo esperado, (Salawu, 1997). Además, el autor sugiere que sería necesario un desplazamiento en 5% de la frecuencia para detectar daños con confianza, aunque, agrega que cambios significativos aislados no implican automáticamente la existencia de daños debido a que se han medidos los mismos desplazamientos a causa de condiciones ambientales. Concluyendo que solo los cambios en la frecuencia no son suficientes para identificar y localizar daños estructurales.

Cuando se pretende utilizar las formas modales para la identificación de daños es requisito previo disponer de sensores suficientes (Chen & Ni, 2018). Las formas

modales tienen la ventaja de proveer directamente la información de localización de daño por el hecho que son más sensibles a los daños en una estructura. Se utiliza el criterio de evaluación modal (MAC) para determinar el nivel de correlación entre los modos de vibración sin daños con medidas actuales con daños (Doebling, Farrar, & Prime, 1998).

1.2.4. Componentes de un sistema SHM.

Según (ISIS Canada Corporation, 2001) un sistema para SHM por lo general consiste de 6 componentes:

- Adquisición de datos.
- Comunicación de datos.
- Procesamiento inteligente de datos.
- Almacenamiento de datos procesados.
- Diagnósticos.
- Recuperación de datos.

Estos subconjuntos son presentados en orden secuencial en la Figura 9.

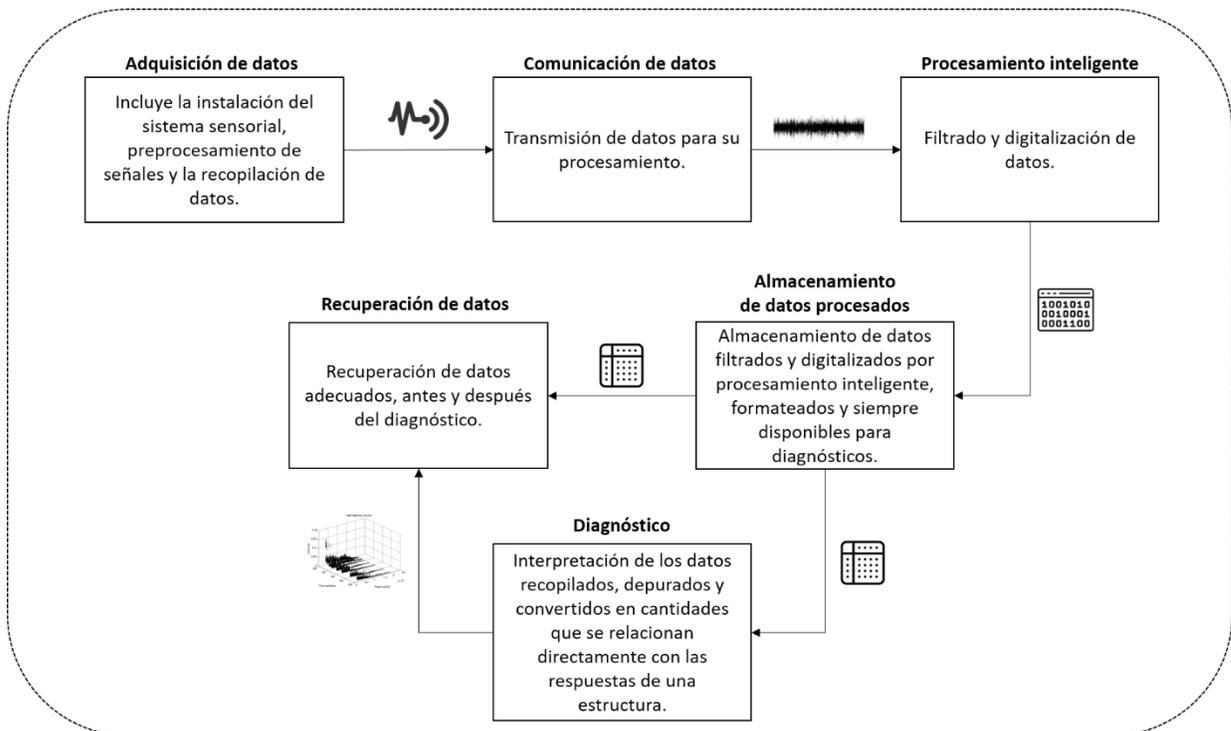


Figura 9. Subconjuntos de un sistema de Monitoreo de Salud Estructural.

**CAPITULO 2: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO
SHM BASADO EN EL ANALISIS MODAL OPERACIONAL.**

Resumen del capítulo

En este capítulo se abordará detalladamente todos los procedimientos llevados a cabo durante éste proyecto, desde la etapa de diseño hasta la implementación del prototipo SHM, detallando sus herramientas de hardware y desarrollo de software.

2.1. Investigación.

En esta etapa inicial del proyecto, se realizó un análisis del comportamiento dinámico de los puentes para establecer los criterios que propiciaron la selección adecuada del modelo de análisis, las variables a medir y el método utilizado para la extracción de datos de interés.

Se estudiaron las distintas tecnologías para el hardware y software del sistema, sus parámetros de funcionamiento y sus beneficios, los cuales resultaron ser tanto económicos como técnicos.

La idea de utilizar una herramienta multiplataforma de código abierto en el desarrollo de la interfaz gráfica, para la visualización y análisis de resultados, fue de gran relevancia en la implementación del proyecto, debido a que representa una solución económica y garantiza compatibilidad con diferentes dispositivos y sistemas operativos.

2.2. Componentes del prototipo SHM.

El prototipo diseñado cuenta con todos los subconjuntos de un sistema de Monitoreo de Salud Estructural, el esquema general consta de tres bloques fundamentales, en el primer bloque se encuentran las etapas de adquisición de datos y comunicación, en el segundo bloque consta de las etapas de procesamiento inteligente y almacenamiento de datos procesados, y en el tercer bloque se integran las etapas de diagnóstico y recuperación de datos.

En la figura 10, se puede observar el diagrama en bloques completo, cada una de estas etapas serán analizadas a detalle en las siguientes secciones del documento.

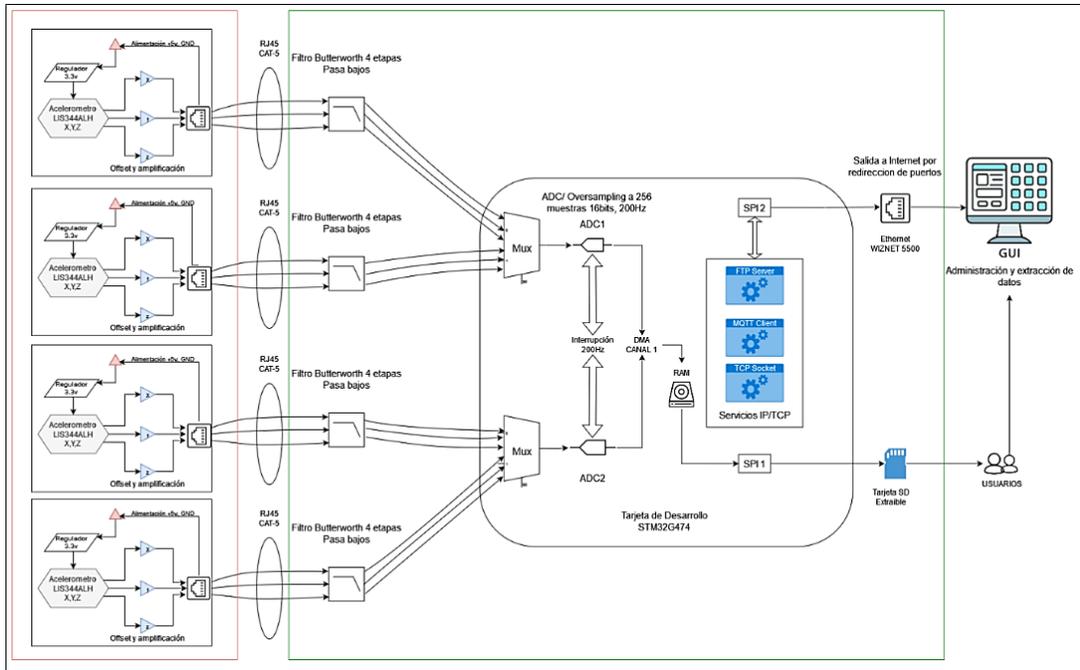


Figura 10. Esquema Completo prototipo SHM.

2.3. Adquisición de datos.

La primera etapa del sistema, a nivel estructural, forma parte del primer bloque, esta ensamblada en 4 tarjetas PCB similares, compuestas por los elementos sensoriales, amplificadores operacionales para preprocesamiento de señal.

2.3.1. Medición de Variables.

El núcleo central de esta etapa es el medio para adquirir las variables físicas necesarias en mediciones eléctricas capaces de ser analizadas, por lo cual, definir las fue el primer paso. En este proyecto se utilizan técnicas de monitoreo estructural basados en análisis dinámico modal de estructuras en operación, por lo tanto, el objetivo principal es determinar la cantidad de movimiento oscilante de la estructura cuando es sometida a cargas dinámicas durante lapsos.

2.3.1.1. Variables a medir.

Para cuantificar la cantidad de movimiento oscilante de la estructura, tomaremos muestra de dos variables principales.

- **Aceleración:** Unidad de medida (SI) es el m/s^2
- **Tiempo:** Unidad de medida (SI): **s** (segundos).

2.3.1.2. Sensores seleccionados.

Para la medición de aceleración se tomaron de referencia los valores estudiados en la publicación de (Sabato, Niezrecki, & Fortino, 2016), donde se analizan las

diferentes características deseables que debe cumplir un acelerómetro, con el objetivo de monitoreo estructural. A continuación, se presenta la tabla estudiada:

Tabla 2. Especificaciones técnicas del sensor.

Parámetro	Descripción	Valor optimo
Densidad de ruido ($\text{ms}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$)	Densidad espectral de potencia del ruido de salida del sensor.	$<0.49 \cdot 10^{-3}$
Sensibilidad ($\text{mV} \cdot \text{m/s}^2$)	Proporción física entre la entrada y la salida eléctrica.	>100
Rango de detección (ms^{-2})	Rango de amplitud detectable.	± 14.71
Ancho de banda (Hz)	Rango de frecuencia detectable.	0.10 - 50
*Resolución (ms^{-2})	Aceleración mínima detectable.	$0.98 \cdot 10^{-3}$

Nota. *Si bien la resolución se establece en el orden de fracciones de mg (mili gravedad) en el mismo documento se aclara que con una resolución mínima de $9.86 \cdot 10^{-3}$ es suficiente para extraer parámetros modales.

Algunas otras consideraciones:

- Voltaje de alimentación.
- Tipo de salida digital o analógica.
- Número de canales.
- Precio.
- Disponibilidad en el mercado.

La siguiente tabla muestra los sensores bajo consideración, cabe señalar que todos los acelerómetros listados son MEM's:

Tabla 3. Comparativa sensores en el mercado

PARÁMETRO	ADXL335	ADXL345	LIS344ALH	IIS2ICLX
*Densidad de ruido	$150 \mu\text{ms}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$	0.75 LSB rms	$50 \mu\text{ms}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$	$15 \mu\text{ms}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$
Sensibilidad	300 mV/g	256 LSB	0.66 mV/g	0.122mg/LSB
Rango de detección	$\pm 3.6\text{g}$	$\pm 16\text{g}$	$\pm 2\text{g}$	$\pm 3\text{g}$
Ancho de banda	1600Hz	0.1-3200Hz	0-1.8kHz	260Hz
Resolución	No disponible	3.9mg/LSB	**500 μg	No disponible
Voltaje de alimentación	3.3V	3.3V	3.3V	3.3V
Salida	Analógica	Digital (13 bits)	Analógica	Digital (16 bits)
# de canales	3 (x, y, z)	3 (x, y, z)	3 (x, y, z)	2 (x, y)
Precio	~7\$	~6.71\$	~5\$	~30\$
Disponibilidad en el mercado	Alta	Alta	Media (end of sale)	Baja (1 distribuidor)

Nota. Ordenados de izquierda a derecha desde el de menor rendimiento hasta el tope de línea de la marca ST. *Densidad de ruido tomada a un ancho de banda de 100Hz.

En la tabla anterior se identifican dos fabricantes: Analog Devices y STmicroelectronics; ambos fabricantes presentan modelos similares y tienen alta

presencia en el mercado. Todos los sensores MEM's a consideración tienen el encapsulado LGA16 (4mm x 4mm x 1.5mm); no se tomaron en cuenta sus versiones en tarjetas de desarrollo debido a que para este proyecto se diseñaron las PCB's.

Al momento de la adquisición de los sensores, se logró identificar un patrón en el mercado, los de mejores prestaciones poseían bajo nivel de ruido y baja sensibilidad, lo que los vuelve apropiados para SHM, sin embargo, los altos precios sumados a la escasez de semiconductores producto de la pandemia, provocaron una baja en la disponibilidad.

A parte de las limitaciones en disponibilidad, otro aspecto que sesgó la elección del sensor fue el tipo de salida. Para los casos de salida analógica favorece la posibilidad de diseñar el sistema de procesamiento de la señal en función de nuestras necesidades, incluyendo el diseño del software embebido en el microcontrolador (MCU).

En cambio, los de salidas digitales están sujetos a las especificaciones del ADC embebido, la implementación de SPI o I2C al Bit Rate soportado por el sensor y su nivel lógico. Adicional, el software se caracteriza por ser poco escalable: al aumentar la cantidad de sensores el cuello de botella provocado por la comunicación SPI o I2C entre el sensor y el MCU dificulta la adquisición de la señal a frecuencias de muestreo altas, creando un software más complejo.

Debido a las razones mencionadas se seleccionó el acelerómetro analógico LIS344ALH con piso de ruido dentro los estándares requeridos, con ancho de banda suficiente para las señales de vibración, finalmente por su precio y disponibilidad en el mercado.



Figura 11. Sensor LIS344ALH - LGA16 (4mm x 4mm x 1.5mm)

2.3.2. Pre-Acondicionamiento de la señal

Para esta primera etapa se decidió por un pre acondicionamiento de la señal que robusteciera la salida del sensor, excluyendo rangos de aceleración no necesarios para el análisis y amplificando aquellos que si son relevantes. Partimos del hecho que para el análisis modal operacional son necesarias las micro vibraciones de la estructura a causa del viento, tráfico o tránsito de peatones; a estas escalas se habla de amplitudes menores a 1g, debido a que el acelerómetro tiene un rango de +2g existe el espacio para cortar la señal al rango necesario y amplificar en la ventana creada. En la siguiente imagen se puede apreciar el manejo de la señal:

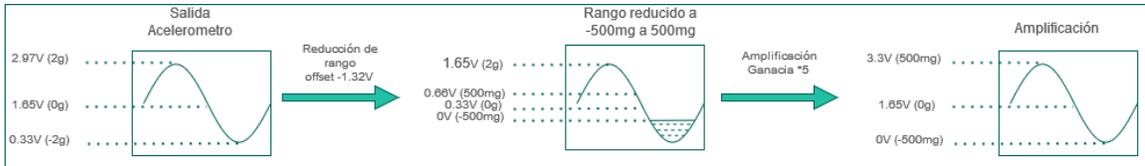


Figura 12. Pre-procesamiento señal aceleración.

El circuito diseñado es el siguiente:

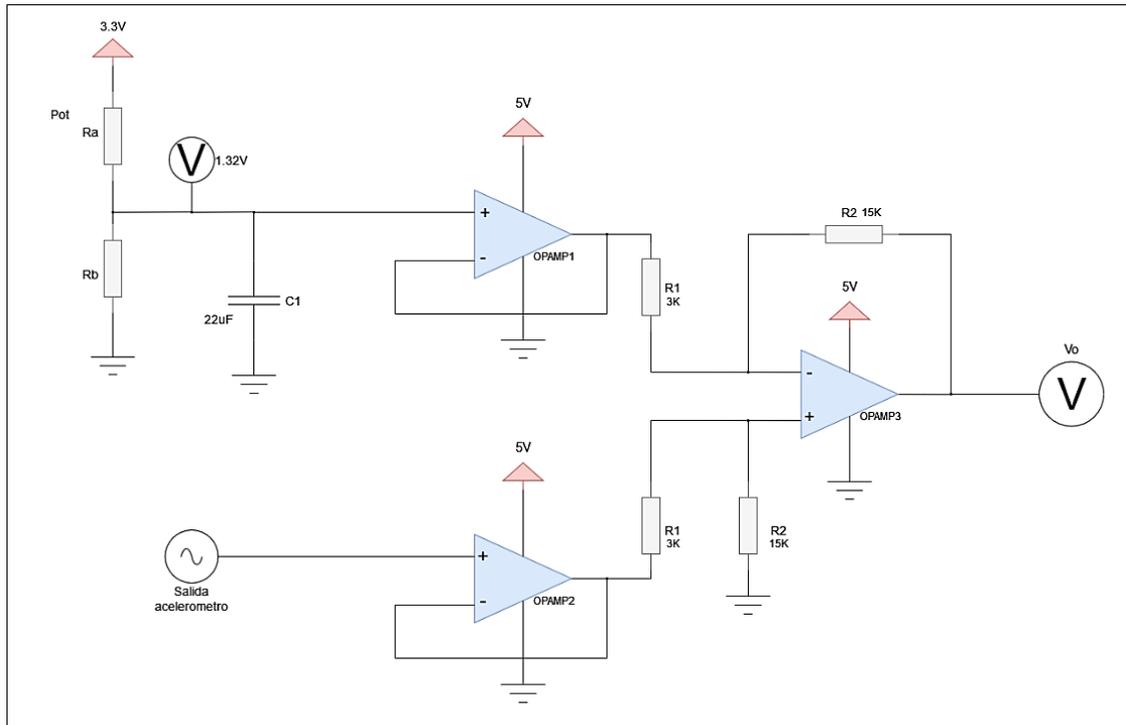


Figura 13. Diagrama esquemático preprocesamiento de la señal:

OPAMP 1 y 2 funcionan de buffer de las señales de entrada, el voltaje de referencia para el circuito se obtiene del potenciómetro (Ra y Rb). OPAMP 3 es un amplificador diferencial, el voltaje de salida se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 12. Relación voltaje de salida con respecto a la entrada en la tarjeta del sensor

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (\text{Voltaje del sensor} - 1.32V)$$

El voltaje de referencia de 1.32V es obtenido del offset del sensor cuando la aceleración es de -500mg (1.32V) llevado a 0V, ver Ilustración 2. La amplificación se obtiene de la relación entre R1 y R2, para este caso la ventana se corta en 500mg donde el voltaje del sensor es de 0.66V (ya con el offset), con una relación de 5:1 entre $\frac{R_2}{R_1}$ ubicamos 500mg en 3.3V aprovechando de esta manera todo el rango lógico de un ADC con voltaje de referencia a 3.3V

2.3.3. Diseño PCB de sensores.

Las tarjetas fueron diseñadas utilizando el software CAD Eagle, en las siguientes se aprecia el diagrama y conexiones realizadas para el diseño de la tarjeta impresa:

Entradas y salidas de la tarjeta:

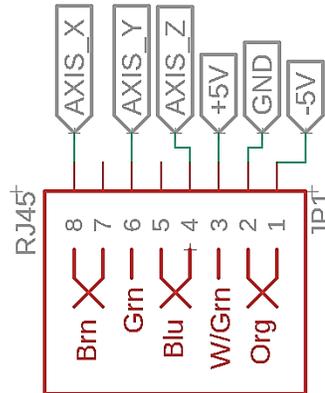


Figura 14. PIN IO Tarjeta sensores.

A través de un conector RJ45 se transporta la señal de los sensores ya pre procesados (salida), al mismo tiempo la entrada de alimentación de la tarjeta (entrada).

Reguladores de voltaje y potenciómetro para voltaje de referencia.

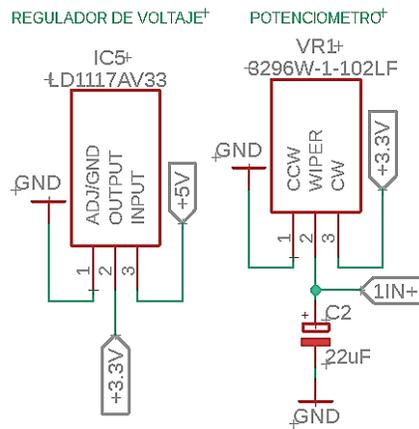


Figura 15. Voltaje y potenciómetro de referencia.

Se utilizó un regulador de voltajes de 3.3V, modelo LD117AV33 con encapsulado TO-220, para alimentar el sensor y la entrada del potenciómetro de 1KΩ modelo 3296 con encapsulado 3/8 " Square Trimpot, con el cual se regula el voltaje de referencia a 1.32V.

Conexiones del sensor:

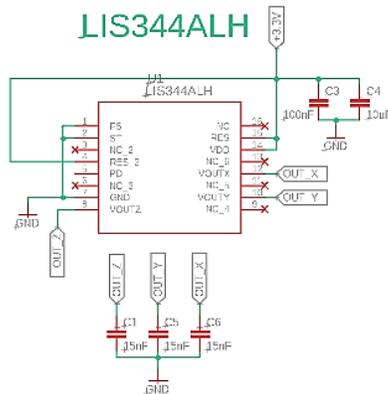


Figura 16. Conexiones del sensor acelerómetro.

La circuitería del sensor siguió las recomendaciones del datasheet para mejorar su funcionamiento. Se agregaron los capacitores C1, C5 y C6 de 15 nF a manera de filtros de corte para limitar el ancho de banda del sensor a 100Hz mejorando así el nivel de ruido y sensibilidad.

Amplificación y offset:

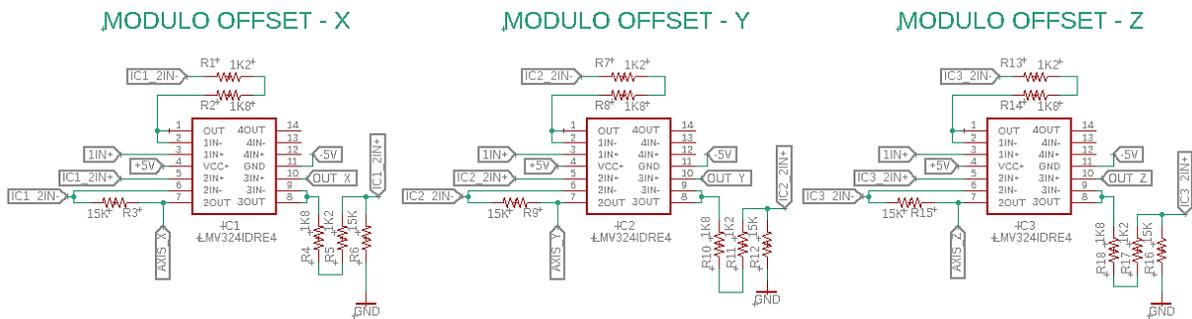


Figura 17. Circuitería completa OPAMPs.

Por cada tarjeta de adquisición de datos se requieren tres amplificadores operacionales (OPAMP) de 4 canales, cada axis del acelerómetro requiere canales del OPAMP, este fue el requerimiento primordial para seleccionar el IC. Se eligió el LMV324ID por 3 razones primordiales:

1. El integrado contiene 4 canales, los suficiente para manejar el pre procesado de un canal del acelerómetro.
2. Es basado en el OPAMP LM741 de propósito general con rendimiento aceptable para las funciones descritas previamente.
3. Encapsulado en SMD para reducir el tamaño del circuito impreso.

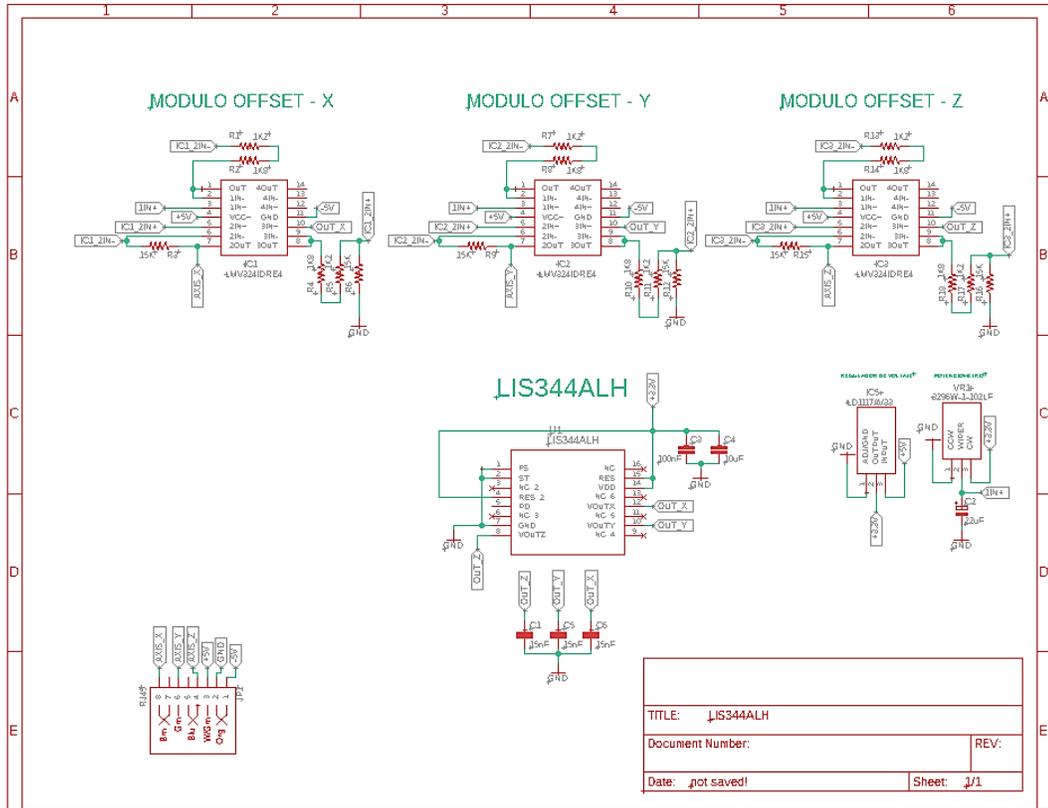


Figura 18. Diagrama completo del sistema de adquisición de datos.

Tarjeta impresa:

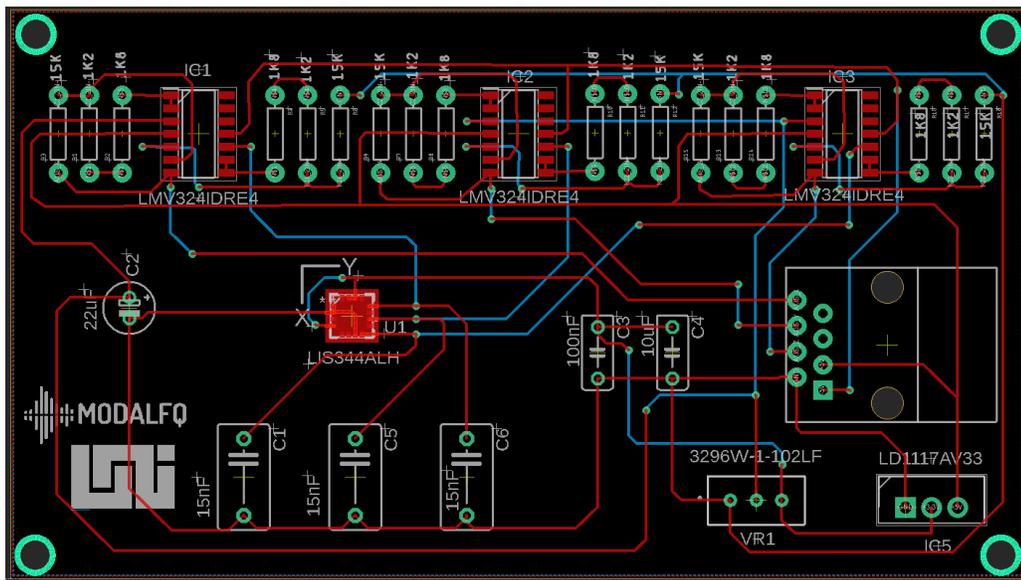


Figura 19. Vista en ambas caras la tarjeta impresa.

Tabla 4. Lista de componentes - 4 tarjetas sensoriales

#	Ítem	Descripción	Cantidad
1	Puertos RJ45 hembra	-	4
2	LIS344ALH	Acelerómetro triaxial	4
3	LM1117	Regulador Lineal de voltaje 3.3V	4
4	Potenciómetro 10K	Potenciómetro de precisión 10Kohms	4
5	Capacitor 15nF	Capacitores cerámicos de 15nF	12
6	Capacitor 100nF	Capacitores cerámicos de 100nF	4
7	Capacitor 10uF	Capacitores cerámicos de 10uF	4
8	Capacitor 22uF	Capacitores cerámicos de 22uF	4
9	Resistor 1.8Kohms	Resistor de 1.8Kohms 1/4watts	24
10	Resistor 15Kohms	Resistor de 15Kohms 1/4watts	24
11	Resistor 1.2Kohms	Resistor de 1.2Kohms 1/4watts	24

Tarjeta ensamblada:

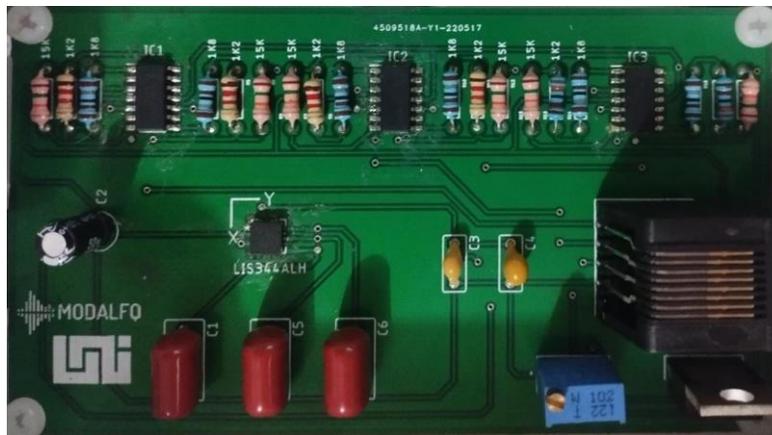


Figura 20. Tarjeta impresa del sistema de adquisición de datos.

2.4. Comunicación de datos.

En esta etapa, se describe el medio de transmisión utilizado para transportar los datos recolectados por las tarjetas de adquisición (COM 1-2) y el tipo de comunicación utilizado para el intercambio de información entre el sistema de procesamiento y la interfaz de presentación de datos (COM 3-4).

La comunicación entre las etapas se diseñó cableada utilizando cable CAT-5E apantallado. La señal a transmitir a través del cable entre las etapas es diferente, en la COM 1-2 se pasan señales análogas crudas, la COM 2-3 se realiza por IEEE 802.3 a 100 Base T – TCP/IP.

Este tipo de cables tiene alta disponibilidad en el mercado nacional, algunas de las razones para su selección son el costo por metro y sus características aceptables con respecto a atenuación e interferencia. Las propiedades del medio

muestran una atenuación estándar de 1.9dB/100m a frecuencia de 1MHz, característica que para este proyecto es de suma importancia para la comunicación entre la COM 1-2. Para la COM 3-4 la comunicación se realiza por ethernet TCP/IP la señal transmitida es codificada digitalmente.

El diagrama de conexiones para las etapas es el siguiente:

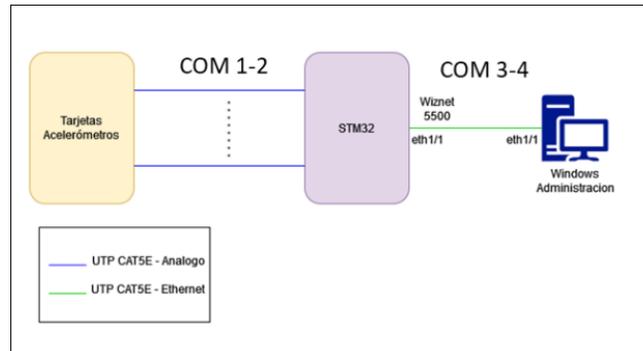


Figura 21. Conexiones físicas entre las distintas etapas.

Entre cada conexión se utiliza el puerto estándar RJ45 conexión directa. Estos puertos contienen 8 pines de los cuales, para el caso de la conexión entre la COM 1-2, se utilizan tanto para la alimentación de las tarjetas acelerómetros como para la transmisión de la señal analógica de los sensores.

La conexión TCP/IP fue establecida utilizando el chip de la marca WIZNET 5500. El WIZNET 5500 es un chip que implementa el stack TCP/IP en su arquitectura liberando de carga de trabajo al microcontrolador. Además, cuenta con un buffer interno de 32Kbytes distribuido entre sus 8 sockets independientes para transmisiones full dúplex a 10 o 100 BaseTX. La manera en la que se comunica con el microcontrolador es a través de su puerto SPI de alta velocidad.

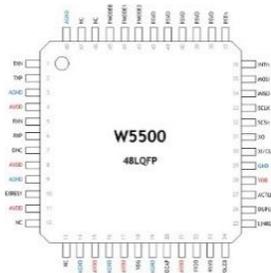


Figura 22. chip Wiznet 5500.

El chip WIZNET 5500 cuenta con un gran respaldo por la comunidad de desarrolladores la cual mantiene actualizado y en constante liberación de versiones su librería. La librería escrita totalmente en C contiene numerosas implementaciones de servicios TCP tales como: DHCP Client, DNS Client, FTP Client, FTP Server, SNMP Agent, SNTP Client, TFTP Client, HTTP Server. Esta librería es capaz de cargarse con cualquier IDE que soporte compiladores en lenguaje C lo que indica su versatilidad al momento del desarrollo.

El chip viene integrado en tarjetas de pruebas donde ya viene acompañado con la circuitería necesaria para su integración con microcontroladores. Estos módulos tienen alta disponibilidad en tiendas nacionales a un bajo costo.



Figura 23. Ejemplo módulo WIZNET 5500.

2.5. Procesamiento inteligente.

Esta etapa fue diseñada tomando en cuenta dos componentes fundamentales, el hardware que está basado en una tarjeta de desarrollo embebido, del fabricante ST, modelo NUCLEO-64-474RE y, el software que fue desarrollado en CUBEMX, donde se configuran los periféricos del controlador y luego genera una estructura de un proyecto en C/C++. En los siguientes subtemas se desprende el desarrollo del sistema de procesamiento inteligente.

2.5.1. Filtrado de la señal.

La señal es recibida desde las tarjetas de sensores a la tarjeta principal por conectores RJ45, cada canal pasa por un filtro anti-aliasing pasa bajos de orden 4, aproximación Butterworth con frecuencia de corte a 50Hz. Como se menciona en la literatura, la componente en frecuencia de la mayoría de edificios se encuentra por debajo de los 50Hz. Como límite arbitrario se seleccionó 50Hz como frecuencia de corte, previendo una frecuencia de muestreo de 200Hz dando un balance de oversampling de 4 veces la frecuencia de Nyquist.

El circuito diseñado es el siguiente:

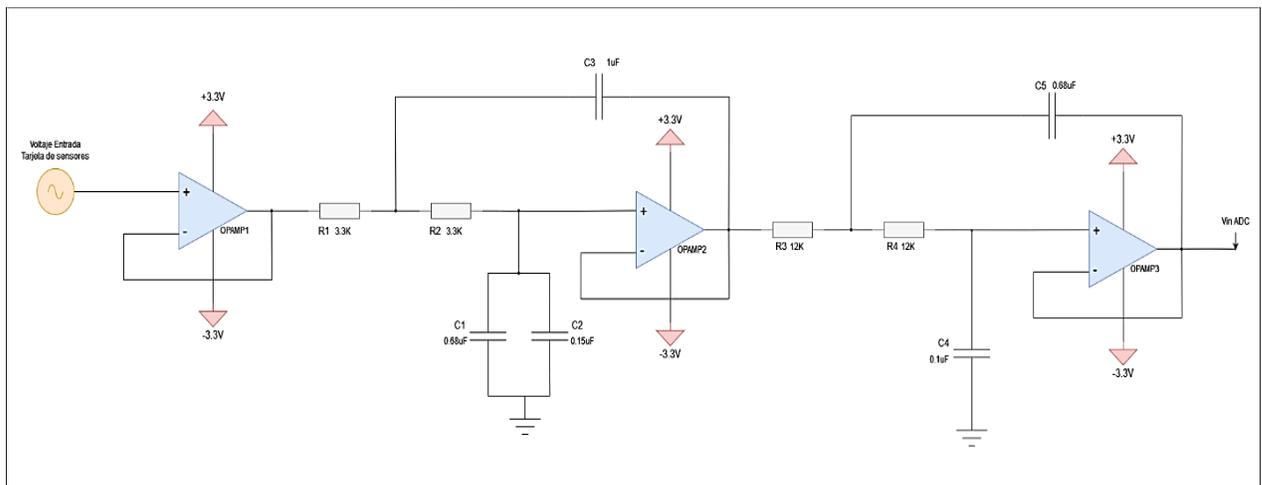


Figura 24. Diagrama de circuito del filtro anti-aliasing pasa bajos de orden 4.

Para este diseño también se implementó el Circuito Integrado LMV324I, aplicando el modelo de filtro pasa bajos de segundo orden, con ganancia uno tipo VCVS (Malvino, 2007). Para obtener un filtro de orden 4 Butterworth se debe modelar 2 etapas utilizando los siguientes puntos Q:

Tabla 5. Puntos Q para las etapas del filtro

	ETAPA 1	ETAPA 2
Q	0.54	1.31

El cálculo de Q se realiza a través de la ecuación

Ecuación 13. Cálculo punto Q filtro pasa bajos

$$Q = 0.5 * \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

Dado que la respuesta combinada de los filtros será un punto $Q = 0.707$, modelamos la primera etapa con un $Q = 0.54$:

$$Q_1 = 0.5 * \sqrt{\frac{C_3}{C_{1||2}}}$$

Se seleccionaron $C_3 = 1\mu F$ y $C_{1||2} = 0.83\mu F$ para obtener un Q_1 de la primera etapa aproximado a:

$$Q_1 \approx 0.54$$

Para la segunda etapa $Q = 1.31$, utilizando valores de capacitores iguales a $C_5 = 0.68\mu F$ y $C_4 = 0.1\mu F$ se obtiene un Q aproximado a:

$$Q_2 \approx 1.30$$

La frecuencia de polo para ambas etapas debe ser la misma a la frecuencia de corte final deseada. Para este cálculo utilizamos la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Frecuencia de corte filtro pasa bajos

$$f_p = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}}$$

Con una frecuencia de corte definida a 50Hz obtenemos que los resistores para la primera etapa son de aproximadamente R

$$R_{1,y 2} \approx 3.3K$$

$$R_3 \text{ y } 4 \approx 12K$$

Definido los valores de las resistencias y los capacitores fue posible encontrar la función de transferencia de los filtros utilizando la siguiente ecuación para cada etapa, extraído de (Paz, 2016):

Ecuación 15. Función de transferencia del filtro pasa bajos

$$\frac{V_o}{V_i}(s) = \frac{1}{S^2 C_1 C_2 R^2 + S C_1 (2R) + 1}$$

Al ser dos etapas podemos obtener la función de transferencia total multiplicando la función de transferencia de la etapa 1 con la etapa 2 de la siguiente forma:

$$tf_{total} = tf_1 * tf_2$$

La función de transferencia fue computada en Matlab obteniendo:

```
H =
      1
-----
1.029e-10 s^4 + 8.361e-08 s^3 + 3.447e-05 s^2 + 0.00825 s + 1
Continuous-time transfer function.
```

Figura 25. Función de transferencia de los filtros.

Diagrama de Bode del filtro:

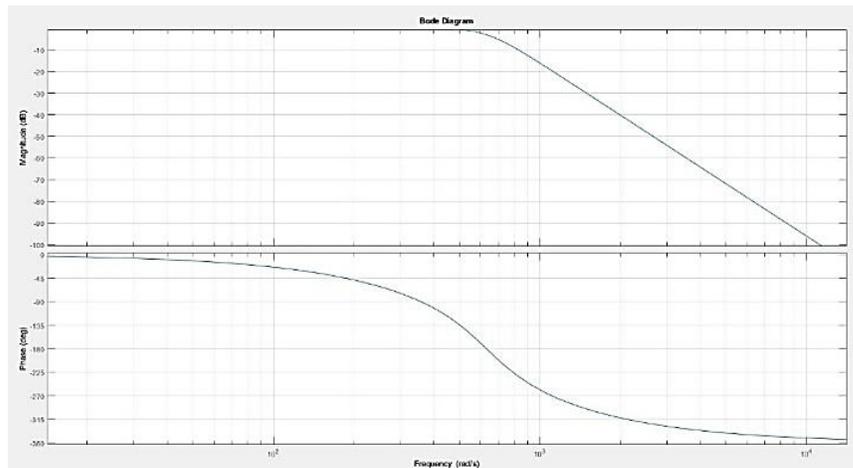


Figura 26. Diagrama de bode del filtro orden 4 Butterworth pasa bajos.

Con esto culmina la etapa de procesamiento analógico de la señal obtenido por los acelerómetros. Como se observó anteriormente se tomó un paradigma “sencillo” en el cual se incluyeron las etapas necesarias de un sistema de adquisición: offset – amplificación – filtrado. Más adelante se observarán técnicas digitales para la reducción de ruido de la señal a través del ADC.

2.5.2. Microcontrolador

El microcontrolador es la pieza clave de todo el prototipo, su selección debe estar basada en todas las funciones que realizará según el diseño planteado. En el presente diseño se plantearon de manera general las siguientes tareas que deberían ser ejecutadas por el microcontrolador:

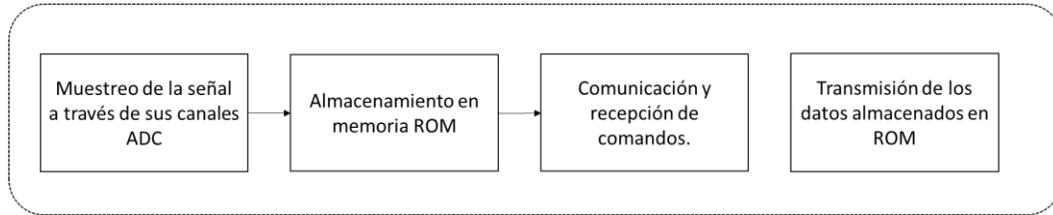


Figura 27. Tareas ejecutadas por el Microcontrolador.

La selección del microcontrolador se realizó en base a las necesidades del muestreo de la señal, siendo esta la tarea con mayor relevancia, fue necesario recopilar los requerimientos de conversión de análogo a digital de la aceleración por micro vibraciones estructurales.

El acelerómetro LIS344ALH con la configuración de ancho de banda a 100Hz posee una resolución de $500\mu g$ (aceleración mínima detectable) posterior a la etapa de offset – amplificación – filtrado la señal posee una sensibilidad $3.3V/g$ lo que significa que para una detección mínima (V_{min}) a la entrada del ADC deberían de llegar:

Ecuación 16. Sensibilidad mínima del sistema:

$$V_{min} = \frac{3.3V}{g} * 500\mu g = 1.65mV$$

Según (Sabato, Niezrecki, & Fortino, 2016) la recomendación para la resolución del ADC debe ser como mínimo 16 bits. Debido a que estamos trabajando con varios canales a la vez (12 canales) y la velocidad de muestreo mínima es alrededor de los 100Hz, se decidió optar por un ADC que ya venga integrado dentro del microcontrolador.

Para este proyecto se decidió optar por el fabricante STMicroelectronics, sus microcontroladores han sido muy populares entre la comunidad estudiantil mostrando sus cualidades fuertes: microprocesadores ARM, entorno de desarrollo intuitivo con librerías HAL, amplia variedad de tarjetas de desarrollo ensambladas con debugger integrado (tarjetas Nucleo), excelente relación calidad – precio.

Dentro de su línea de 32bits se encuentra la familia STM32G4 diseñada para tareas donde se demanda un procesamiento avanzado de señales analógicas. De esta familia se desprenden 4 tarjetas de desarrollo: Nucleo-32-G431KB, Nucleo-64-G431RB, Nucleo-64-474RE, Nucleo-64-491RE todas estas con debugger integrado.

Al ser todos de la misma familia cuentan con características similares en procesador, canales de ADC, periféricos y comunicación serial. Las diferencias se encuentran en la cantidad de memoria RAM y Flash que integra cada placa. En la siguiente tabla se pueden apreciar sus especificaciones:

Tabla 6. Familia de procesadores.

Especificaciones	Nucleo-32-G431KB	Nucleo-64-G431RB	Nucleo-64-474RE	Nucleo-64-491RE
Procesador	ARM Cortex -M4 hasta 170MHz con 213DMIPS			
Flash	128Kbytes	128Kbytes	512Kbytes	512Kbytes
RAM	32Kbytes	32Kbytes	128Kbytes	112Kbytes
ADC	2xADC 12 bits hasta 16 bits con Oversampling por hardware	2xADC 12 bits hasta 16 bits con Oversampling por hardware	5xADC 12 bits hasta 16 bits con Oversampling por hardware	3xADC 12 bits hasta 16 bits con Oversampling por hardware
Samples per second	4MSPS	4MSPS	4MSPS	4MSPS
SPI Bus	3	3	4	3

Nota. Datos extraídos de <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-nucleo-boards.html>

A pesar de que el ADC integrado dentro de la línea G4 sea de 12bits este viene con oversampling por hardware con una resolución final de hasta 16bits. El oversampling es una técnica de muestreo en donde se aumenta la resolución del ADC aumentando 4 veces la frecuencia de muestreo por cada bit adicional de resolución, finalmente se realiza un decimación de la cantidad de muestras tomadas a la cantidad de resolución deseada. La ecuación para el diseño es la siguiente:

Ecuación 17. Cálculo de la frecuencia de oversampling

$$f_{oversampling} = 4^n * f_{nyquist}$$

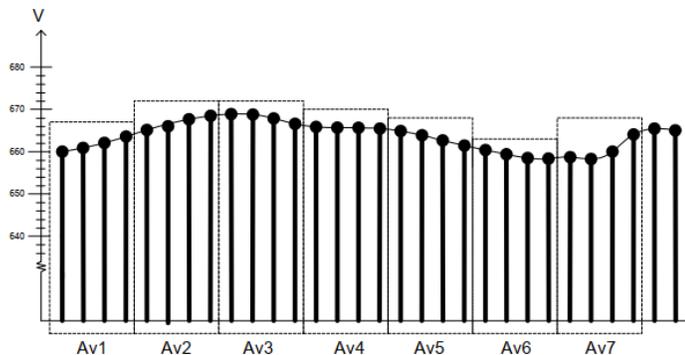


Figura 28. Cada Av es la suma de las muestras y luego decimadas a la cantidad de bits deseadas.

En una implementación de oversampling por hardware, el promedio es realizado con menos intervención del CPU/software lo cual lleva a menos consumo de memoria de programa resultando en una muestra final a la obtenida en una implementación por software.

Las ventajas de esta técnica son las siguientes:

- Aumenta la resolución del ADC a la deseada.
- Reduce el SNR sobre la señal muestreada.
- Útil para reducir picos espurios y suavizar la señal muestreada.

Tomando en consideración la técnica de oversampling sobre el ADC del microcontrolador la variación mínima detectable a la entrada del ADC se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 18. Variación mínima de voltaje detectable por el ADC

$$V_{DD} = 3.3V$$

$$V_{minADC} = \frac{V_{DD}}{2^{16}} = 0.05035 * 10^{-3} V$$

El resultado es del cálculo anterior es lo suficiente como para detectar las variaciones mínimas a la salida del sensor.

Otra de las características que hace ideal el ADC integrado en los STM32G4 es su capacidad de funcionar en 'dual mode'. El 'dual mode' realiza 2 conversiones de 2 canales de ADC simultáneamente, combinado con la capacidad del modo 'scan' se puede convertir la cantidad de 2 ADCs distintos al mismo tiempo (en paralelo) (STMicroelectronics, 2010).

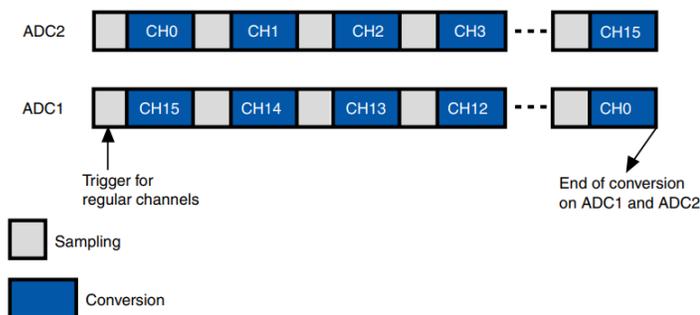


Figura 29. Ejemplo de conversión dual mode scan.

ai17606

Si dejamos de lado las condiciones del ADC; ya que todas las tarjetas lo cumplen, la siguiente característica que definió la selección del microcontrolador fue la memoria Flash y RAM. A primera instancia se seleccionaron 2 tarjetas la **Nucleo-32-G431KB** y **Nucleo-64-474RE** con el objetivo de, mediante el desarrollo del Software del sistema embebido, ir conociendo la memoria RAM consumida por el programa final.

A medida que se integraban todas las funcionalidades del sistema el consumo de memoria iba incrementando a tal punto que la opción final y definitiva fue la tarjeta **Nucleo-64-474RE**, en capítulos próximos se detallará a fondo el desarrollo del sistema embebido y su estructura para llegar a la selección de la tarjeta.

Figure 1. NUCLEO-G474RE top view

Figure 2. NUCLEO-G474RE bottom view

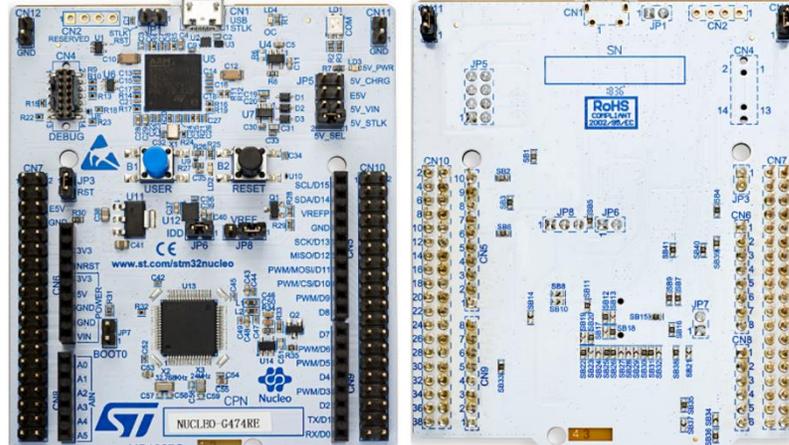


Figura 30. Tarjeta NUCLEO-64-474RE adquirida.

2.5.3. Desarrollo del software embebido.

Desarrollar el código para un sistema embebido es tomar en consideración los alcances que se quieren lograr con el sistema, a la vez de las limitaciones del hardware. La propuesta del proyecto era almacenar la información adquirida por los acelerómetros de manera local, por otro lado, una comunicación fiable con el dispositivo para administrar o dirigir las acciones, por ejemplo: calibrar los sensores, tomar muestras o recuperar los datos de manera remota. Con lo anterior se lograba lo mínimo para cumplir estándares de dispositivos de adquisición de señal similares en el mercado. Un ejemplo de estos dispositivos es el sismómetro Guralp 6TD en cual es analizado en la sección de pruebas y ensayos.

El programa diseñado está basado en el modelo de máquina de estado finito, donde cada estado es la consecuencia de los cambios en las condiciones del estado anterior. Este modelo fue acompañado por un RTOS (Real time Operating System) pre-integrado en el entorno de desarrollo de STM32, con la idea de adquirir más herramientas para la administración de funciones y tareas específicas del programa. En la siguiente imagen podemos apreciar el diseño de la máquina de estado programada, así como los diferentes estados de las tareas de RTOS creadas:

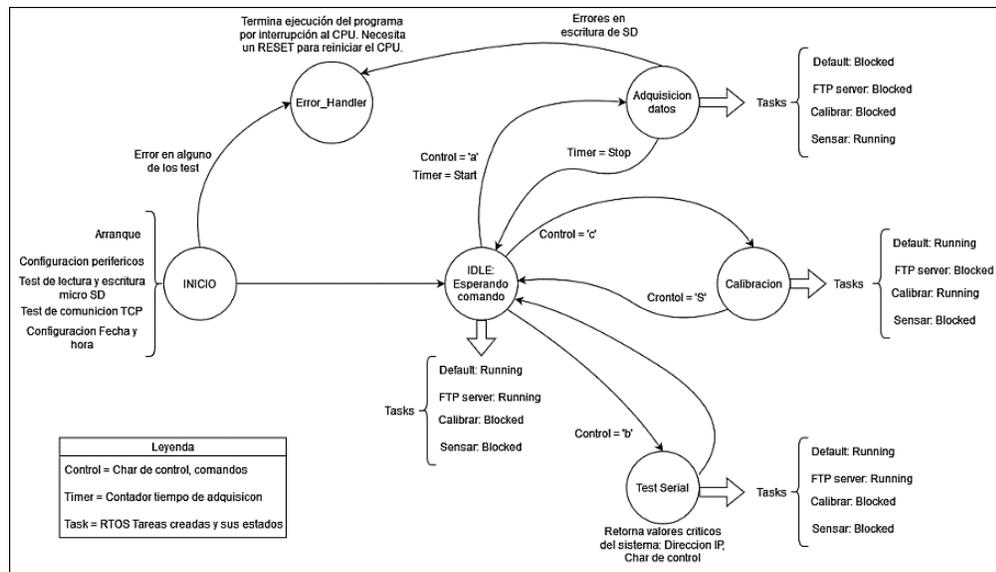


Figura 31. Máquina de estados finitos y estados de las tareas.

El ecosistema de STMicroelectronics ha sufrido muchos cambios y mejoras en los últimos años. Parte de estos cambios fue el lanzamiento de STM32CubeIDE un entorno de desarrollo basado en el conocido IDE para C/C++ Eclipse, al cual se le integraron el software de configuración y generación de código STM32CUBEMX, el debugger STM32Programming tools, entre otros como vemos en la siguiente imagen:

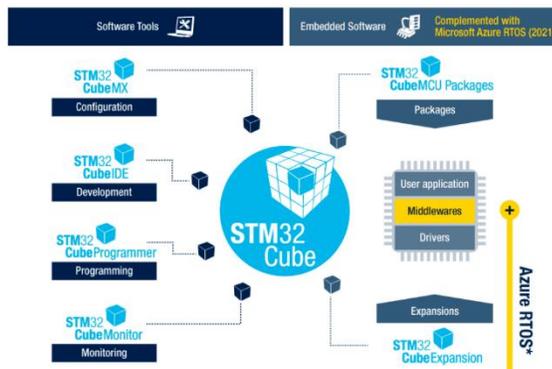


Figura 32. Ecosistema STM32 Cube.

STM32CubeIDE facilita la programación al integrar en CUBEMX los middleware y librerías necesarias para la programación de las placas Nucleo-64. Además, como las tarjetas Nucleo-64 cuentan con un debugger integrado, no es necesario adquirir un STlink para cargar el programa en flash del Microcontrolador.

Con todo el ecosistema integrado, el desarrollo del código quedó como única preocupación. El código se desarrolló por partes, cada parte constituía un periférico o función distinta, por cada parte desarrollada se realizaban pruebas para verificar su funcionalidad, finalmente cada parte se integró en un código

completo del sistema. En la siguiente lista mostramos de forma descendente la división por partes del código y su orden de desarrollo:

- a) Reloj Interno.
- b) ADC, TIMER, OVERSAMPLING, DMA.
- c) FATFS, Tarjeta SD.
- d) FreeRTOS.
- e) WIZNET W5500: FTP Server, MQTT Cliente, TCP.
- f) Entrada y salida de pines digitales.
- g) RTC.
- h) Programa completo en RTOS.

Usando CUBEMX se configuraron los periféricos del microcontrolador, CUBEMX genera la estructura de un proyecto en C/C++ con directorios raíces para compilar a través de GCC. La configuración inicial se realiza de manera gráfica luego este lo importa a código en C. El código generado por CUBEMX implementa la librería de código abierto 'HAL' la que contiene todas las API que utilizan los STM32 para llamar, configurar o utilizar los periféricos. Cada parte del programa es detallada en los siguientes incisos:

2.5.3.1. Reloj interno.

Por fines prácticos el reloj interno fue configurado utilizando el reloj de alta velocidad interno de 16MHz escalado hasta 170Mhz para cada bus de reloj que alimenta a los periféricos. Cada frecuencia de reloj fue verificada para obtener la velocidad de reloj adecuada en cada aplicación de los periféricos. El reloj quedo de la siguiente forma:

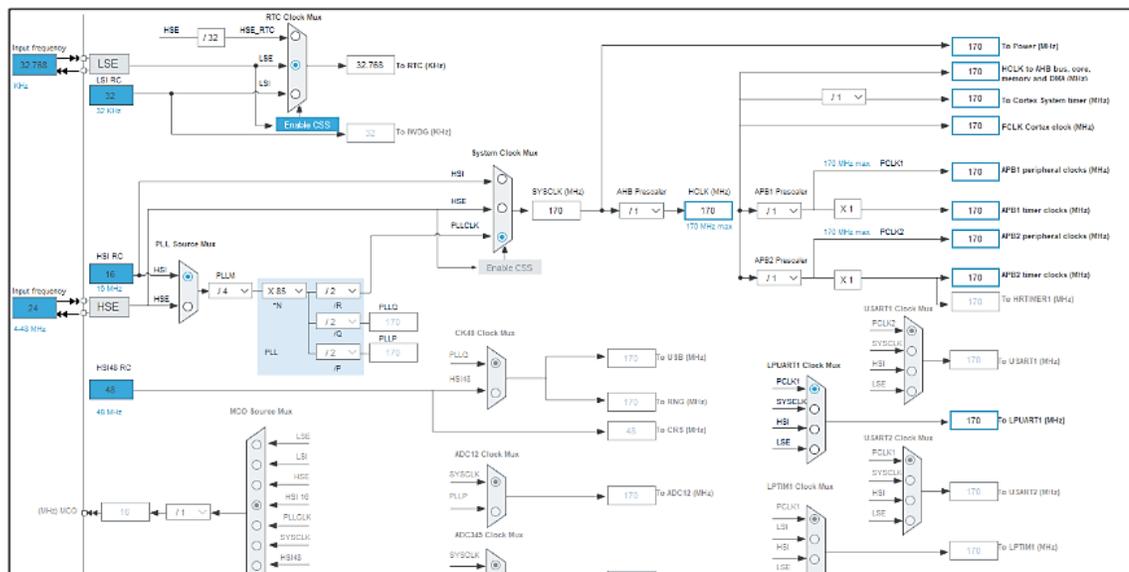


Figura 33. Configuración de señal de reloj para los periféricos.

2.5.3.2. ADC, OVERSAMPLING, DMA, TIMER.

Para usar el 'Dual mode' ADC1 funciona como master de esa forma las configuraciones aplicadas al ADC1 aplican al ADC2:

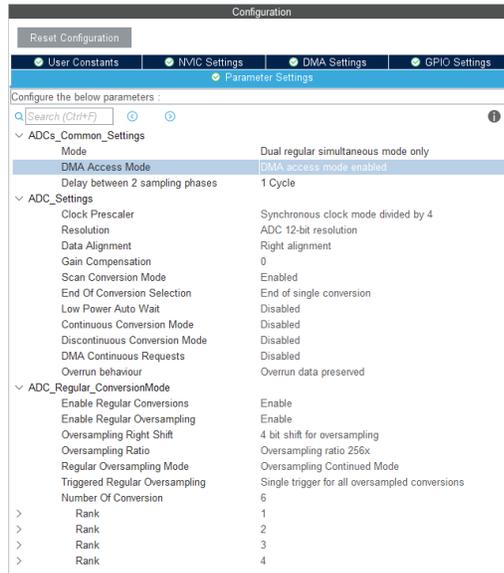


Figura 34. Configuración del ADC.

La configuración utilizada muestra 12 bit de resolución de ADC, 'oversampling' de 256 con decimación de 4 bits a la derecha, modo 'scan' con 6 canales usados por cada ADC. Para el almacenamiento momentáneo en memoria RAM se utilizó un canal DMA para mayor velocidad. Este canal está configurado con un ancho de palabra de 32 bits, 16 bits 1 conversión del ADC1, los restantes 16 bits son la conversión del ADC2, es decir un ciclo de conversión completo se almacenan la muestra de los 2 ADCs a la vez.

El DMA enlaza el espacio en memoria del ADC1 con el espacio en memoria de un buffer ingresado en forma de puntero, al realizar la siguiente muestra (modo scan) el DMA automáticamente aumenta en 1 la dirección de memoria y espera la siguiente conversión de par de canales para almacenar en memoria.

El ADC1 es disparado por software a través de la interrupción del TIMER2 de 32 bits el cual es precargado con el valor de 28334. Este valor fue calculado dividiendo la frecuencia de reloj base de 170Mhz dividido por el pre-scaler cargado a 30, luego dividido por la frecuencia de muestreo (200Hz):

$$\text{Counter Period} \approx \frac{170\text{Mhz}}{\frac{30}{200\text{Hz}}} \approx 28334$$

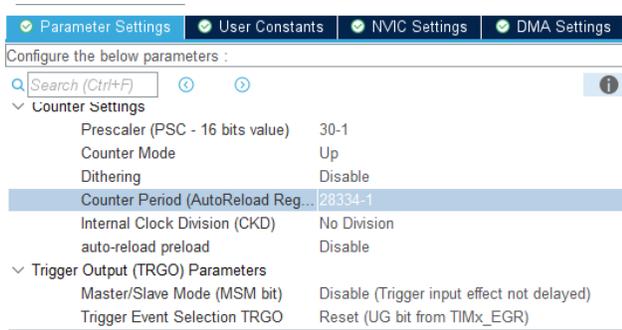


Figura 35. Configuración del Timer.

2.5.3.3. FATFS, Tarjeta SD.

FATFS es un middleware integrado en STM32CUBEMX que consiste en una implementación de FAT/exFAT para sistemas embebidos. El módulo FATFS es de código abierto escrito en ANSI C y completamente separado de la capa de escritura y lectura del dispositivo de almacenamiento. Ver imagen 25.

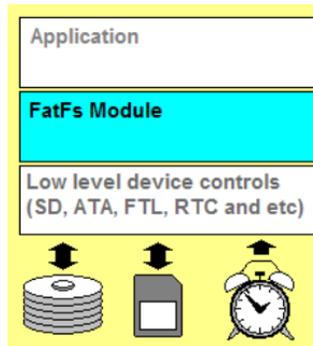


Figura 36. Arquitectura de software con FATFS.

En la figura 31 se observa como FATFS funciona de puente entre la aplicación y el hardware, aunque para su funcionamiento es requerido programar la capa de escritura y lectura del dispositivo de almacenamiento.

Como se mencionó anteriormente, las tarjetas SD pueden comunicarse de 2 formas: puerto SD o puerto SPI. Dentro de la comunidad de STM32 existen varios diseños de la capa de I/O donde se ocupa el puerto SPI por ser el único soportado en los microcontroladores de gama media. De las librerías encontradas la implementada por (Ji-hoon, 2018) es de las más claras y funcionales, permitiendo todos las API ejecutadas por FATFS en las tarjetas SD.

El driver consta de 2 archivos fuente 'C' el archivo '.c' incluye las funciones de I/O para la comunicación entre FATFS y las tarjetas SD por SPI, el archivo '.h' parámetros globales como por ejemplo el puerto SPI. Estas funciones son llamadas luego por FATFS por lo que se tiene que modificar los archivos fuente de FATFS para la integración. El puerto SPI fue configurado de la siguiente forma:

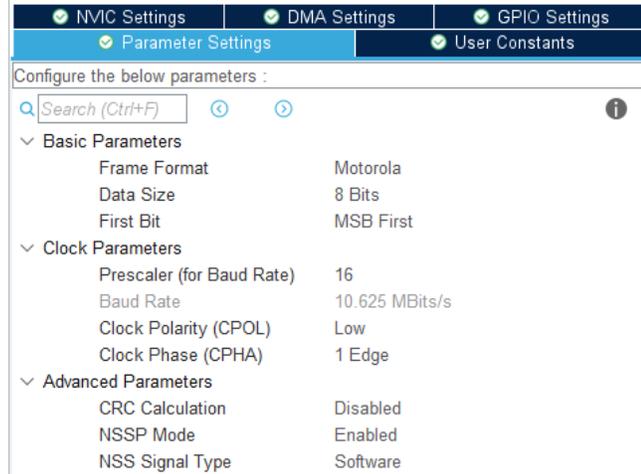


Figura 37. Configuración SPI2 SD.

El middleware FATFS posee la siguiente configuración:

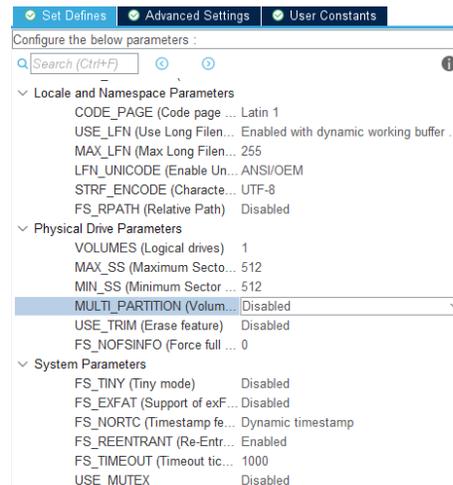


Figura 38. Configuración FATFS.

2.5.3.4. FreeRTOS.

En este punto FreeRTOS es el sistema operativo que cohesiona ambas tareas: la adquisición de los ADC y el almacenamiento en tarjeta SD. La integración se realizó nuevamente usando STM32CUBEMX. El middleware viene con las funciones de un sistema operativo RTOS (Tareas, MUTEX, Semáforos, eventos) lo que significó una ventaja al momento del desarrollo de la aplicación.

Uno de los principales retos del desarrollo fue el almacenamiento en bruto de las muestras tomadas por el ADC en la tarjeta SD. Los datos se transfieren por acceso directo a memoria (DMA, del inglés direct memory access) hacia un buffer en memoria RAM cada vez que se dispara la interrupción del Timer en la frecuencia de muestreo, esto condiciona la extracción de los datos en memoria RAM hacia la tarjeta SD, ya que, mientras el Timer está corriendo este no debe detenerse por la tarea de copiar los datos a tarjeta SD como se supondría, ya que, la frecuencia

en la interrupción del timer (200Hz) 5 milisegundos y el tiempo que toma el microcontrolador en mover los datos a la tarjeta SD ≈ 70 milisegundos, el Timer simplemente sobrescribiría los datos en el Buffer perdiendo muestras en este proceso.

Para evitar la pérdida de información se diseñó un esquema de doble buffer, mientras un buffer era llenado con la información de ambos ADC, el otro era ocupado para leer los datos y escribirlos en la tarjeta SD. Para lograr lo anterior se creó una tarea exclusiva en almacenar la información en la tarjeta SD mientras la interrupción de los ADC estaba operando. El scheduler del sistema operativo en esta etapa funciona de la siguiente manera:

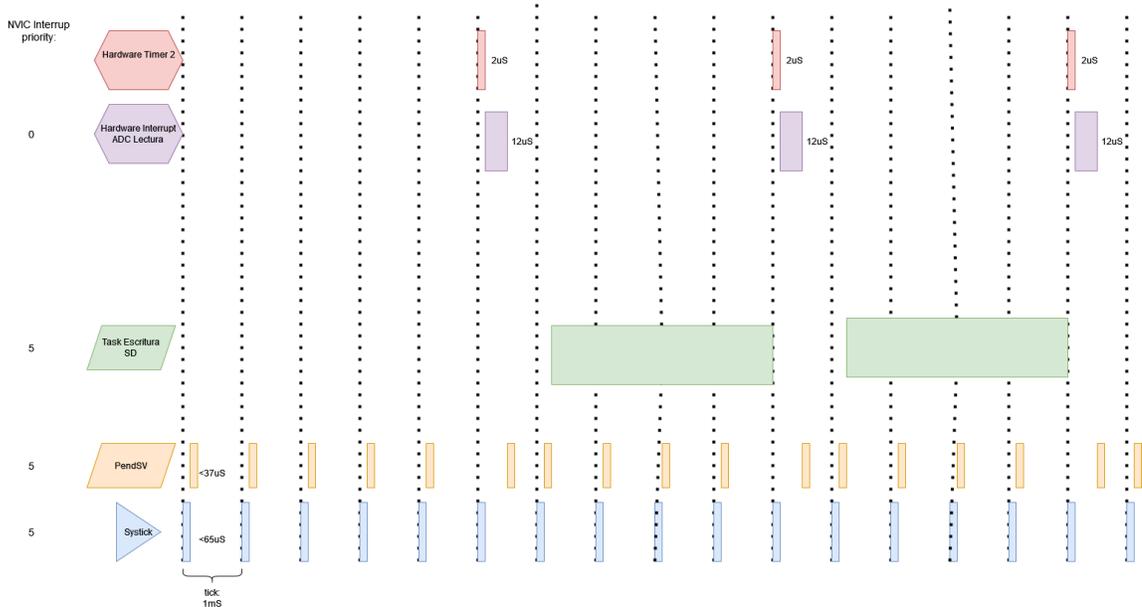


Figura 39. Prioridad de las tareas e interrupción.

En la imagen anterior se observa como el scheduler (PendSV) trabaja con una prioridad de interrupción menor a las interrupciones del microcontrolador, este comportamiento es definido por defecto y no puede ser modificado. Al momento que existe una interrupción del timer y el ADC, el scheduler (PendSV) se detiene para dar paso a la interrupción, cuando la interrupción termina verifica por orden de prioridad que tarea debe ejecutarse en ese momento. La idea es que solo la tarea de escritura en SD se ejecute para evitar perdida de información, de esa forma se le da continuidad al almacenamiento en la tarjeta SD del buffer de lectura, mientras la interrupción trabaja almacenando nuevos datos en el buffer de escritura.

Más adelante se detalla la integración de las demás tareas y su espacio de memoria final ocupado en el sistema operativo.

2.5.3.5. WIZNET W5500: FTP Server, MQTT Cliente.

La comunicación TCP se logró en gran parte por el chip seleccionado. El W5500 es un integrado que viene embebido con el stack TCP/IP lo que significa que libera de procesamiento al microcontrolador en este ámbito. Además, por su fuerte cuota de mercado en el desarrollo de sistemas embebidos IoT y módulos para tarjetas de desarrollo en especial Arduino, el fabricante ha impulsado el desarrollo de APIs que logren conectar sus chips rápidamente con microcontroladores de diversas gamas.

La librería del fabricante IoLibrary (Wiznet, 2018) en su version 4 contiene muchos ejemplos de aplicaciones como DHCP, DNS, FTP, SNMP, HTTP, MQTT. En este caso se ocuparon 2 servicios: servidor FTP, cliente MQTT.

Para ambos casos el driver contiene una base de archivos raíz que constituyen la implementación de las capas de la 1 – 4 del modelo OSI, es decir la creación de mac-address, direccionamiento IP y socket es realizado por los archivos fuentes para el chip utilizado. La diferencia radica en los archivos fuente para la capa de aplicación los que deben ser incluidos en la carpeta raíz del proyecto.

Otra ventaja importante fue la compatibilidad de la aplicación del FTP server con el sistema de archivos FATFS utilizado para la tarjeta SD. Para diferenciar ambas tareas, la comunicación TCP se realizó en un puerto SPI distinto al utilizado por la tarjeta SD. La configuración del segundo puerto SPI utilizado es el siguiente:

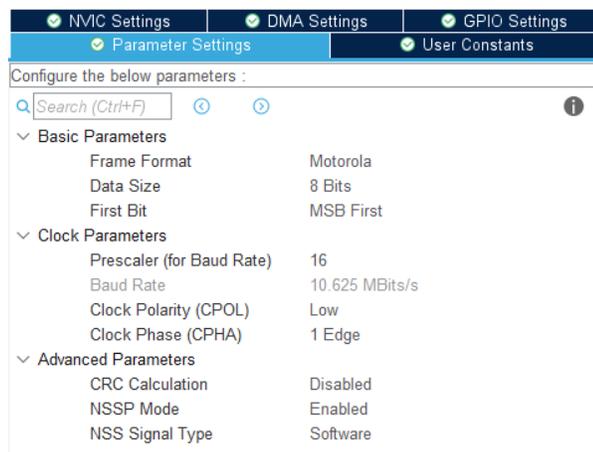


Figura 40. Configuración SPI3 Wiznet w5500.

La aplicación de FTP server está contenida en una tarea de FreeRTOS, por otro lado, la implementación del cliente MQTT se basa en la creación de un socket TCP mientras el cliente se mantiene en modo IDLE esperando la recepción de un mensaje del bróker. El cliente MQTT se utiliza en las tareas en donde se tiene que recibir comandos de control del sistema embebido por ejemplo en las tareas default y la tarea de calibración. En la sección de RTOS final se abordarán todas las tareas.

2.5.3.6. Entrada y salida de pines digitales.

Los puertos SPI requieren configurar un puerto 'chip select' para indicarle al dispositivo que se requiere iniciar una comunicación. En este caso el 'chip select' se configuro manual, con salida normalmente en alto, ejemplo:

Pin Name	Sig...	GPIO out...	GPIO mode	GPIO Pull...	Maximum ...	Fa...	User Label	Modified
PC13	n/a	n/a	External Int...	No pull-up...	n/a	n/a	B1 [blue push...	<input checked="" type="checkbox"/>
PD2	n/a	High	Output Pus...	No pull-up...	Low	n/a	CS_ETH	<input checked="" type="checkbox"/>
PC9	n/a	n/a	Input mode	Pull-down	n/a	n/a	IP_0	<input checked="" type="checkbox"/>
PC8	n/a	n/a	Input mode	Pull-down	n/a	n/a	IP_1	<input checked="" type="checkbox"/>
PC6	n/a	n/a	Input mode	Pull-down	n/a	n/a	IP_2	<input checked="" type="checkbox"/>
PB9	n/a	n/a	Input mode	Pull-down	n/a	n/a	IP_3	<input checked="" type="checkbox"/>
PA5	n/a	Low	Output Pus...	No pull-up...	Low	n/a	LD2 [green led]	<input checked="" type="checkbox"/>
PA4	n/a	High	Output Pus...	No pull-up...	Low	n/a	SD_CS	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 41. Pines GPIO configurados en el MCU.

Otros puertos configurados fueron los 4 puertos de entrada 'IP_X' puestos a 'Pull Down' estos están conectados a Switches DIP para la configuración manual de una dirección IP asignada por el usuario del prototipo. Para estos puertos no fue necesario una circuitería externa ya que el microcontrolador posee resistencias Pull-down conectadas directamente a los pines.

2.5.3.7. Real Time Clock (RTC).

La adquisición de la hora exacta a la que se realizan las mediciones es importante para llevar el registro de eventos en el sistema de monitoreo. Se hace uso del RTC integrado en el microcontrolador que ya viene conectado a un clock interno de baja frecuencia, lo único que tenemos que hacer es configurar los parámetros del mismo:

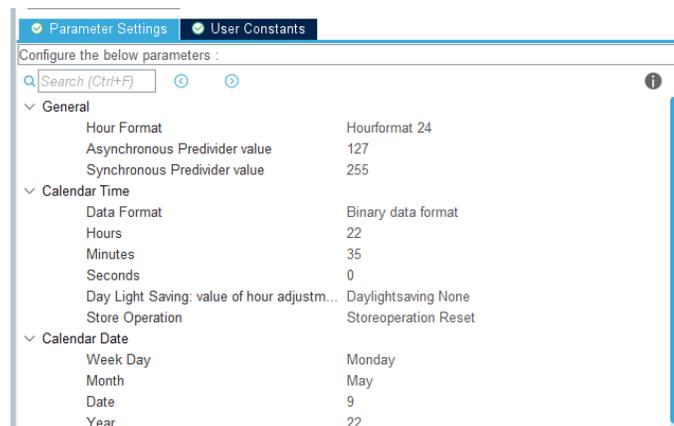


Figura 42. Configuración RTC interno.

La fecha y hora precargada es modificada al momento del arranque del dispositivo, la manera en la que se actualiza la hora es abriendo una comunicación TCP por el puerto 5555 hacia la computadora de administración para adquirir la nueva fecha y hora actualizada. Se desarrollaron funciones específicas para esta tarea reutilizando la API del chip WIZNET asignando un nuevo socket a este.

2.5.3.8. Programa completo en RTOS.

El programa completo consta de las siguientes partes antes mencionadas:

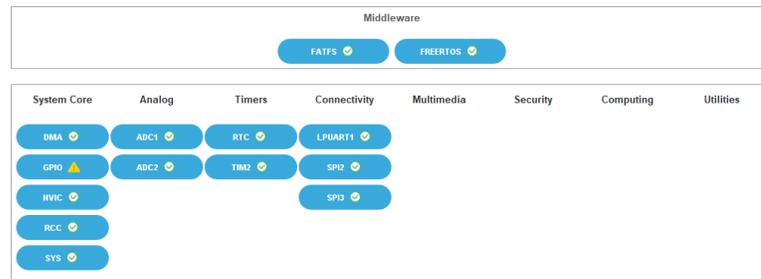


Figura 43. Partes completas del código embebido.

Tabla 7. Tareas creadas en FreeRTOS.

Tarea	Prioridad	Tamaño de stack (*32bits)	Función
defaultTask	Normal	4352	Tarea default, espera los comandos para ejecutar cambiar de estado.
myTask04	Baja	1024	Calibración, Envía por MQTT los datos de los sensores a los topics configurados.
myTask05	Alta	512	Escribir en SD, recibe el buffer de lectura y almacena los datos en la tarjeta SD.
myTask06	Por debajo de Normal	4096	Servidor FTP, establece comunicaciones y transfiere los archivos en la tarjeta SD hacia la computadora de administración.

La administración de memoria del RTOS ocupa un esquema dinámico de heap4, el tamaño total del heap es de 30,000 Bytes y su tickrate es de 1000Hz. A parte, se crearon 2 mutex y 2 semáforos binarios para administrar el acceso a los recursos en memoria por parte de las tareas. El uso total de la memoria por parte de todo el código es el siguiente:

Summary	
HEAP STILL AVAILABLE	12120 Bytes
TOTAL HEAP USED	17880 Bytes
Total amount for tasks	17528 Bytes
Total amount for queues	0 Bytes
Total amount for timers	0 Bytes
Total amount for mutexes and semaphores	352 Bytes
Total amount for events	0 Bytes
FreeRTOS tasks	
Idle task (FreeRTOS internal)	0 Bytes
Timer service task (FreeRTOS internal)	0 Bytes
defaultTask	17528 Bytes
FreeRTOS mutexes ans semaphores	
myMutex01	88 Bytes
myMutex02	88 Bytes
myBinarySem01	88 Bytes
myBinarySem02	88 Bytes

Figura 44. FreeRTOS uso de memoria.

El heap disponible es de 12120 Bytes es decir 40% de la memoria asignada a FreeRTOS está libre, lo que considerando el uso y la locación de memoria, da un buen espacio para evitar 'buffer-overflow'. Las tareas ocupan la mayoría del espacio en heap alcanzando un total de 17528 Bytes, mientras que los semáforos y mutex alcanzan un total de 352 Bytes.

Cabe señalar que los 30,000 Bytes asignados a FreeRTOS no están aislados, si no que se comparten con los demás bloques del programa que incluyen: función main, librerías, archivos fuentes, APIs, declaraciones globales, funciones globales. Por lo que el tamaño total de la memoria RAM y ROM al momento de compilar todo el sistema es de:

Memory Regions		Memory Details				
Region	Start address	End address	Size	Free	Used	Usage (%)
RAM	0x20000000	0x20020000	128 KB	65.59 KB	62.41 KB	48.76%
FLASH	0x08000000	0x08080000	512 KB	398.2 KB	113.8 KB	22.23%

Figura 45. Uso de memoria del sistema completo

48.76% para la memoria RAM y 22.23% para la memoria Flash. Con estos valores nos aseguramos un funcionamiento estable del sistema sin las preocupaciones de errores por 'buffer-overflow'. La estructura de los archivos es la siguiente:

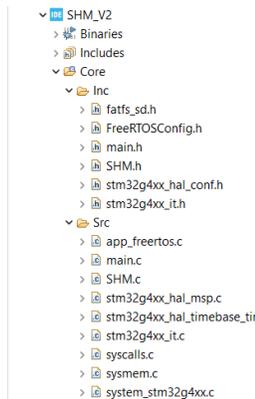


Figura 46. Directorio Core del código.

Como detalle a resaltar, se crearon archivos fuentes SHM.c y SHM.h para organizar las funciones implementadas en el programa de una manera clara y entendible para el usuario.

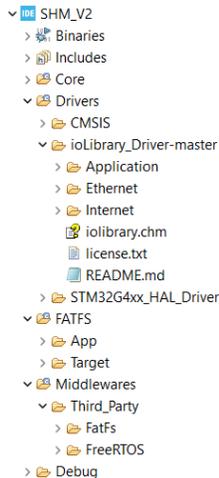


Figura 47. Archivos de librerías HAL, Drivers y middlewares.

2.5.3.9. Diseño en PCB tarjeta principal.

El diseño de la tarjeta para la etapa 2 utiliza los pines de enclave de la tarjeta de desarrollo Nucleo-64, véase la ilustración 15, para ensamblar la tarjeta principal al microcontrolador. Estos pines tienen conexión directa al microcontrolador, a parte que ofrecen una ventaja de robustez y fácil retiro en caso de problemas en el software o el hardware del propio microcontrolador.

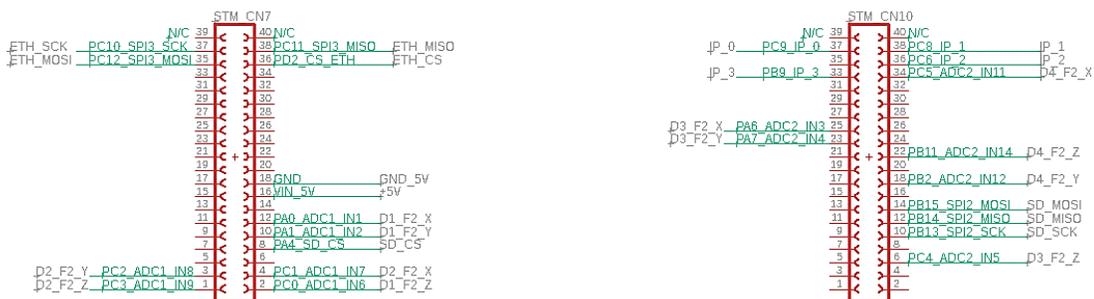


Figura 48. Enclaves de la tarjeta Nucleo-64 con la asignación de pines.

Con la misma idea de la tarjeta Nucleo-64, los módulos de Ethernet WIZNET W5500 y el módulo de la tarjeta SD fueron ensamblados con la tarjeta principal usando pines hembras compatibles con los pines de cada módulo.

En esta tarjeta se encuentran los filtros pasa bajos discutidos en secciones anteriores. La tarjeta se desarrolló usando componentes SMD, con el objetivo de administrar mejor el tamaño de la tarjeta principal. Además, se utilizaron los mismos integrados LMV324IDR como opamp's, cada puerto lleva una continuidad con los opamp's y los pines de entrada del microcontrolador. En las siguientes imágenes se observa el esquemático utilizado para la tarjeta:

Puertos de I/O de la señal y alimentación de las tarjetas de adquisición:

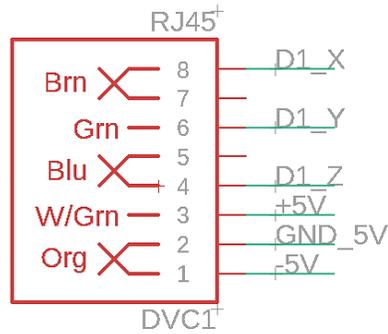


Figura 49. Puerto RJ45 I/O de señal analógica a Tarjeta principal.

Primer etapa filtro pasa bajos:

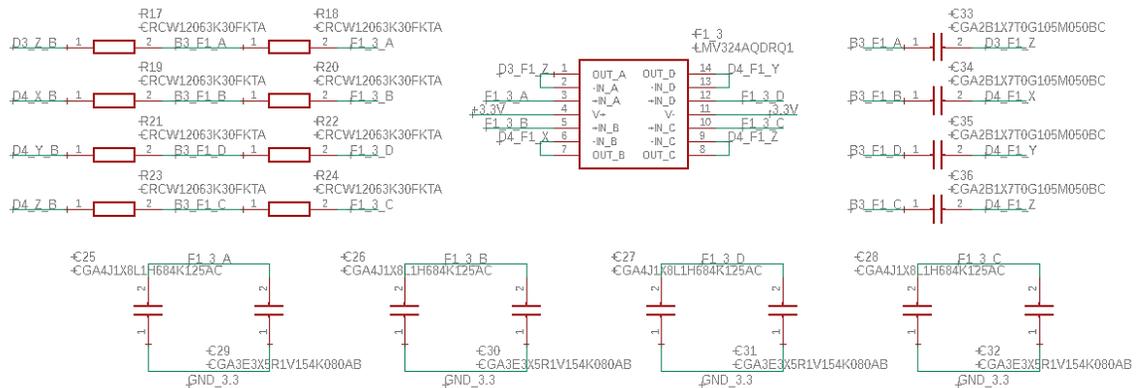


Figura 50. Diagrama de esquemático de componentes para la primera etapa del filtro.

Segunda etapa del filtro pasa bajos:

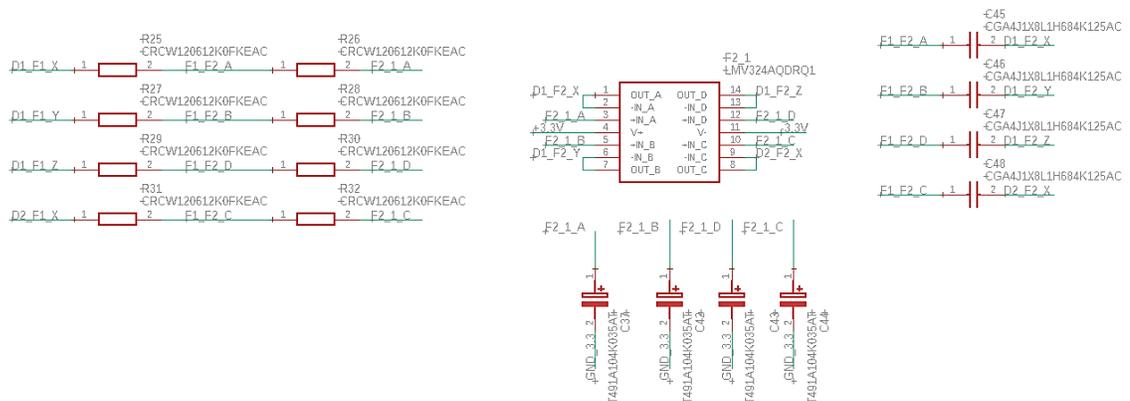


Figura 51. Diagrama de esquemático de componentes para la segunda etapa del filtro.

Switch DIP para configuración manual de dirección IP y los jumpers de entrada para alimentación de ambas tarjetas:

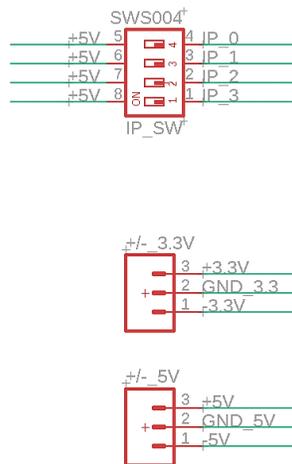


Figura 52. Switch de direccionamiento IP y jumpers de alimentación.

El resultado final fue una tarjeta de 12x12CM doble capa con anclaje en sus extremos:

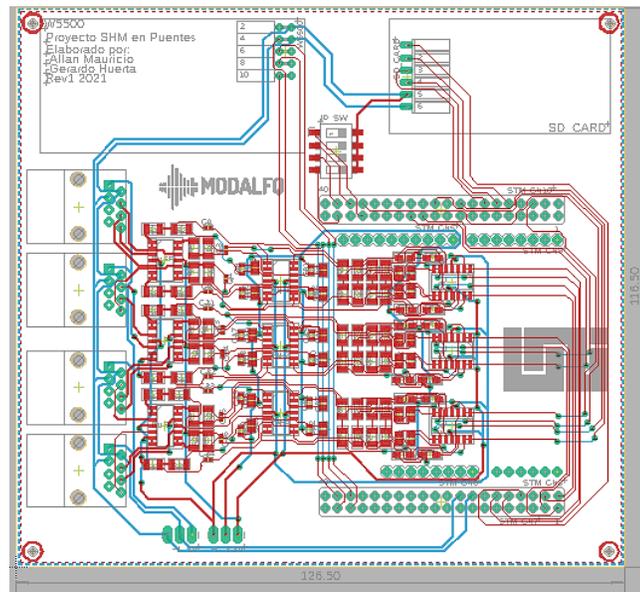


Figura 53. Diseño de la Tarjeta principal.

Para ambas tarjetas tanto en la etapa 1 y 2 fueron exportadas a formato GERBER con el propósito de enviar estos archivos a fabricación por JLCPCB. JLCPCB es una empresa que ofrece servicios de fabricación de tarjetas PCB a un precio considerablemente bajo y con la calidad de certificación.

Tabla 8. Lista de componentes tarjeta de procesamiento

#	Ítem	Descripción	Cantidad
1	Puertos RJ45 hembra	-	4
2	Pin headers machos	Tiras de headers machos 20 pines dobles	2
3	Pin headers machos	Tiras de headers machos 20 pines sencillos	4
4	DIP Switch 4 pines	DIP Switch de 4 pines	1
5	LMV324IDR	Opamps de propósito general de 4 canales SMD	9
6	Resistor 1206 3.3Kohms	-	24
7	Resistor 1206 12Kohms	-	24
8	Capacitor 0.68uF	Capacitor ceramico SMD 0805 10% 50VDC	24
9	Capacitor 0.15uF	Capacitor ceramico SMD 0603 10% 35VDC	12
10	Capacitor 1uF	Capacitor ceramico SMD 0402 20% 4VDC	12
11	Capacitor 0.1uF	Capacitor tantalum SMD 1206 10% 35VDC	12

2.6. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación fue diseñada para alimentar el circuito principal y los circuitos de sensores al mismo tiempo. Para la fuente se diseñaron 2 tipos de voltajes de referencia a niveles de $\pm 5V$ y $\pm 3.3V$ según requerimiento de los distintos componentes. El diseño se basó en reguladores lineales bajo el siguiente diagrama:

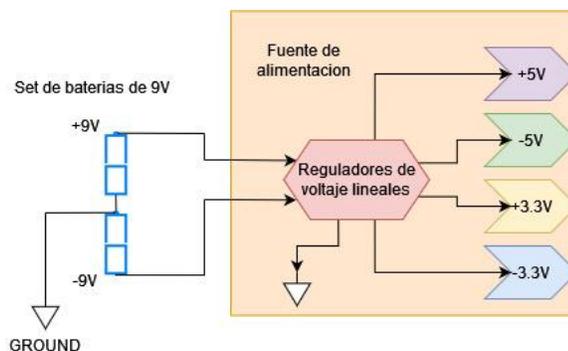


Figura 54. Diseño de fuentes de alimentación.

Para seleccionar los reguladores de voltaje se investigaron los consumos de corriente de cada dispositivo utilizado en el sistema, en la siguiente tabla se especifica el censo de carga del sistema completo:

Tabla 9. Tabla de censo de carga del sistema.

Componente	Unidades	Voltaje de alimentación	*Corriente de alimentación	Potencia consumida (x1 unidad)	Total del sistema (Aprox):
Etapa 1					
LIS344ALH	4	3.3V	680uA	2.24mW	8.96mW
LMV324IDR	12	3.3V	410uA	1.35mW	16mW
Etapa 2					
LMV324IDR	9	3.3V	410uA	1.35mW	12.15mW
Nucleo-64	1	3.3V	500mA	1.65W	1.65W
W5500	1	5V	132mA	0.66W	0.66W
Tarjeta SD	1	5V	200mA	1W	1W

*Valores máximos

En base a la tabla 3, la potencia consumida total del sistema es de aproximadamente: 3.34Watts, lo que con reguladores lineales tales como: 78xx, 79xx, lm317 y lm337 es fácilmente manejable (la mayoría manejan potencias de alrededor de 4.95Watts a mas).

2.6.1. Diseño del circuito.

Voltajes de referencia $\pm 5V$:

Circuito regulador de voltaje 7805 (+5V de salida, 1.5A):

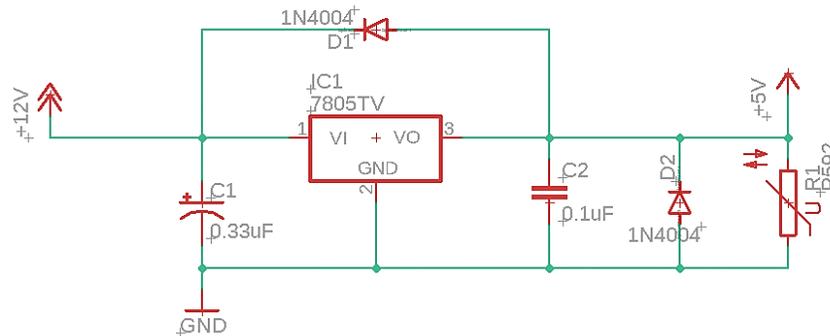


Figura 55. Circuito 7805 salida +5V.

Circuito regulador de voltaje 7905 (-5V de salida, 1.5A):

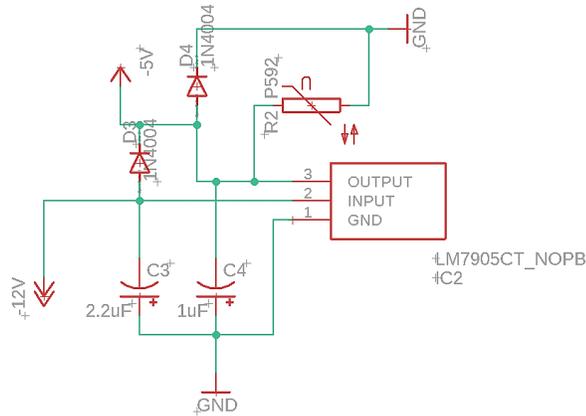


Figura 56. Circuito 7905 salida -5V.

Voltajes de referencia $\pm 3.3V$:

Circuito regulador de voltaje LM317 (Salida +3.3V, 1.5A), el voltaje de salida se diseñó utilizando la ecuación característica del circuito integrado:

Ecuación 19 Cálculo de resistencias para regulador LM317 +3.3V

$$V_o = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{adj} * R_2$$

$$V_{ref} = 1.25V$$

$$I_{adj} = 100\mu A$$

Los valores de los resistores seleccionados son:

$$R_1 = 120\Omega$$

$$R_2 = 200\Omega$$

$$V_o = 1.25V \left(1 + \frac{200}{120} \right) + 100\mu A * 200 \approx 3.34V$$

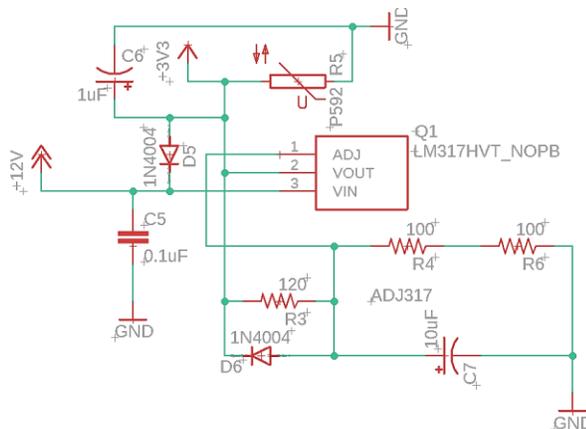


Figura 57. Circuito LM317 salida +3.3V..

Circuito regulador de voltaje LM337 (Salida -3.3V, 1.5A), el voltaje de salida se diseñó utilizando la ecuación característica del circuito integrado, similar al caso del circuito LM317 pero esta vez utilizando voltajes negativos obtenemos que el voltaje de salida para el circuito es el siguiente:

Ecuación 20 Cálculo de resistencias para regulador de voltaje LM337 -3.3v

$$-V_o = -V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + (-I_{adj} * R_2)$$

$$V_{ref} = 1.25V$$

$$I_{adj} = 100\mu A$$

$$-V_o = -1.25V \left(1 + \frac{200}{120} \right) + (-100\mu A * 200) \approx -3.34V$$

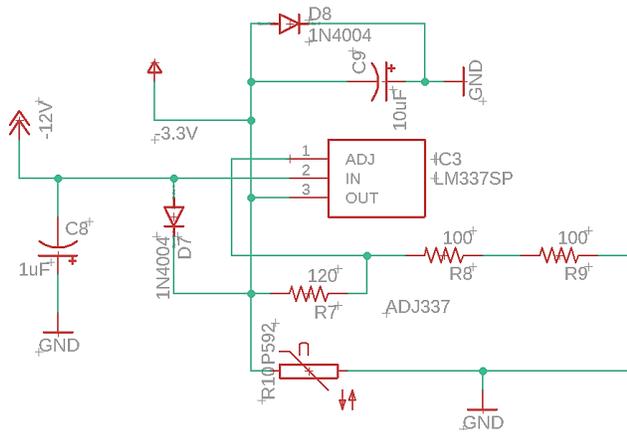


Figura 58. Circuito LM337 salida -3.3V.

2.6.2. Diseño en PCB.

Las pistas fueron diseñadas en el software EagleCAD, utilizando componentes Through Hole disponibles en las tiendas de electrónica locales.

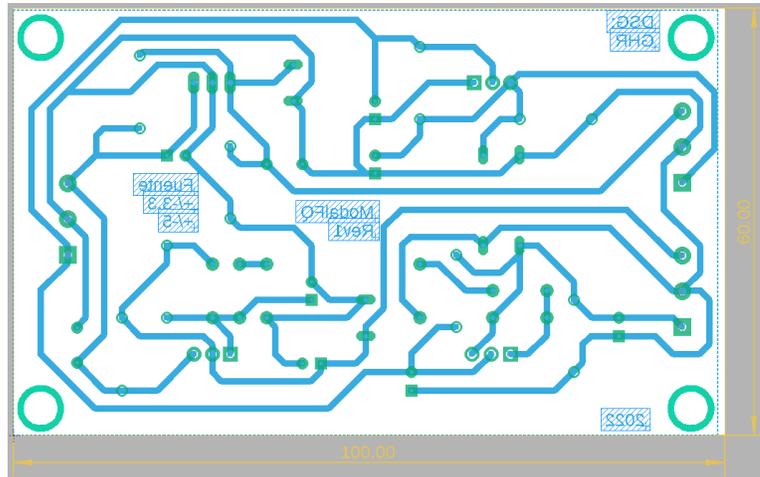


Figura 59. Pistas de la tarjeta de alimentación de voltaje.

2.7. Almacenamiento de datos procesados.

Uno de los más grandes retos fue encontrar un almacenamiento masivo para la cantidad de datos obtenidos por el arreglo de acelerómetros propuesto. El hecho de aumentar la cantidad de canales a censar, implica que hay más datos a almacenar. Bajo esta situación, considerando la salida del ADC y frecuencia de muestreo se puede obtener un aproximado de los datos a almacenar en un periodo de tiempo de 1 segundo:

Los Bytes obtenidos en una muestra por 12 canales, tomando en cuenta que los datos son almacenados en ASCII, cada dígito representa un byte, suponiendo una muestra máxima de 65536 y el tiempo de 65536, son ambos términos representados con 5 bytes, por lo tanto, se demuestra que:

Ecuación 21 Cantidad de bytes en una muestra del sistema

$$(Tiempo + Canales) * 5 \approx 65Bytes$$

$$(1 + 12) * 5 \approx 65Bytes$$

Almacenados en .CSV

$$65Bytes + 13Bytes \approx 78Bytes$$

El string almacenado en una lectura de 12 canales es de 78Bytes a una frecuencia de 200Hz significa que en un segundo se almacenaran:

Ecuación 22 Cantidad de bytes en un segundo de medición

$$200 * 78Bytes \approx \frac{15.6Kbytes}{segundo} \text{ (peor de los casos)}$$

Suponiendo lecturas en campo de hasta alrededor de 5 minutos, los datos recolectados serian de aproximadamente:

Ecuación 23 Cantidad de bytes en 10 minutos

$$15.6Kbytes * 300Segundos \approx 4.680Mbytes$$

Aparte de la cantidad de datos a almacenar existen muchas otras consideraciones como el formato, la estructura del administrador de archivos y la comunicación entre el microcontrolador y el almacenamiento.

Considerando la cantidad de espacio físico a utilizar, el almacenamiento de los datos, el formato de estos archivos, compatibilidad con formato FAT para su facilidad de acceso, la opción más atractiva para estos casos son las tarjetas micro SD.

Las tarjetas micro SD son memorias de tamaño 15x11 milímetros con alta capacidad de almacenamiento (en el orden de los GigaBytes), comunicación SPI y sistemas de paginación. Estas memorias son ampliamente usadas por

dispositivos móviles y computadoras, una ventaja al momento de formatear o manipular los datos.

Otro punto relevante es que debido a su amplio uso se han desarrollado librerías en casi la mayoría de lenguajes y entornos de desarrollo para sistemas embebidos, lo que disminuye la complejidad del código y el tiempo de desarrollo de los proyectos.

Las tarjetas micro SD en el mercado ocupan 2 tipos de comunicaciones: a través del puerto nativo SD o por SPI, en cualquiera de los casos el único requisito es que el microcontrolador sea compatible con alguno de estos puertos. A manera de buenas prácticas es necesario colocar buffer en los pines de entrada y salidas SPI de la tarjeta micro SD para evitar deteriorarla por sobre voltajes, es por esta razón que es preferible encontrar módulos de tarjetas micro SD en donde ya venga incorporado un buffer de protección. Como por ejemplo el siguiente módulo de Catalex:



Figura 60. Ejemplo Catalex módulo microSD.

Este módulo incorpora un regulador de voltaje de 3.3V para la alimentación de la tarjeta SD y el buffer de protección para los pines de SPI. El voltaje lógico para los pines SPI es de 3.3V compatible con el voltaje lógico del microcontrolador utilizado.

2.8. Diagnostico.

La información obtenida de las etapas anteriores tiene que ser procesada para dar el valor al sistema de monitoreo estructural. Los datos procesados son el objetivo final del sistema de monitoreo ya que con estos se dará conclusión de alguna anomalía en la estructura o algún desvío de las características propias de la edificación. El objetivo central de esta etapa es el desarrollo del algoritmo para la extracción de los parámetros modales.

Todo el código para el sistema de administración y análisis de datos fue desarrollado en Python3, que en la actualidad es uno de los lenguajes de programación más usados y versátiles para uso en diferentes áreas. En particular, sus librerías de análisis de datos tales como Numpy, Scipy, Matplotlib han visto un desarrollo enorme en los últimos años en gran medida por los avances del campo de las ciencias de datos.

En esta parte se explicará la arquitectura del sistema de administración remota y el desarrollo del script de análisis de datos para la extracción de parámetros modales.

2.8.1. Modelo general del programa.

La interfaz gráfica fue creada usando la librería tkinter de python. Se crearon 3 módulos que cubren las funciones de administración remota, análisis de datos y calibración:

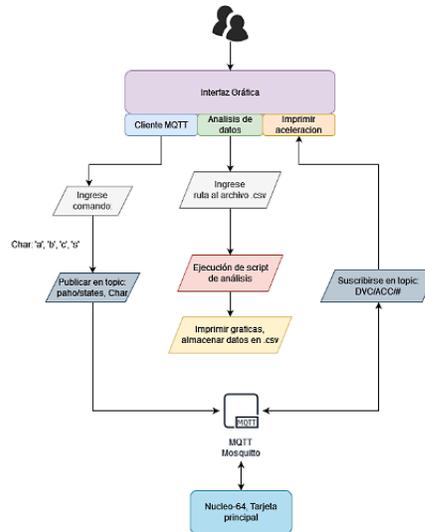


Figura 61. Diagrama de flujo interfaz de administración.

2.8.2. Administración remota.

En esta sección se cubren 2 módulos del programa: administración remota, calibración. Ambos módulos requieren de la comunicación MQTT con el bróker Mosquitto.

Para el módulo de administración remota podemos apreciar la ventana llamada MQTT en figura 57, este solicita el comando a enviar a la tarjeta principal (etapa 2), los comandos disponibles son:

- Char 'a': inicio de adquisición de datos por un tiempo determinado (default 5 minutos)
- Char 'b': imprime por puerto serie variables de control de la tarjeta (dirección IP, estado del dispositivo).
- Char 'c': modo de calibración



Figura 62. Ventana principal GUI.

Estas variables son ingresadas en un text box el cual esta enlazado con la función que publica la variable al topic de MQTT: 'paho/states'. Luego el bróker MQTT mosquitto transfiere estos datos a todos los equipos suscritos a este topic.

En el caso del módulo de calibración, véase figura 58, este no solicita ningún dato, previamente el dispositivo debe estar en modo calibración para poder visualizar los datos de los acelerómetros en el módulo de calibración. El objetivo aquí es suscribirse al topic de 'DVC/Acc/#' el cual contiene la información de todos los acelerómetros conectados en ese momento. Nuevamente el bróker MQTT mosquitto recibe los datos de la tarjeta principal y luego lo reenvía hacia el cliente de la interfaz gráfica.



Figura 63. Ventana principal módulo de Calibración.

2.8.3. Análisis de datos.

En este módulo de la interfaz gráfica, como se observa en la ilustración 48, requerimos ingresar la dirección donde se encuentra el archivo .csv adquirido por la tarjeta principal y la frecuencia de muestreo de los datos.



Figura 64. Ventana de Análisis de datos.

Tkinter llama a la API enlazada para disparar la ejecución del código de análisis. El script de análisis está implementado en Numpy, sus graficas son hechas con matplotlib y la creación del dataset es a través de Pandas. Para una idea esquemática del script de análisis se puede referir a la siguiente imagen:

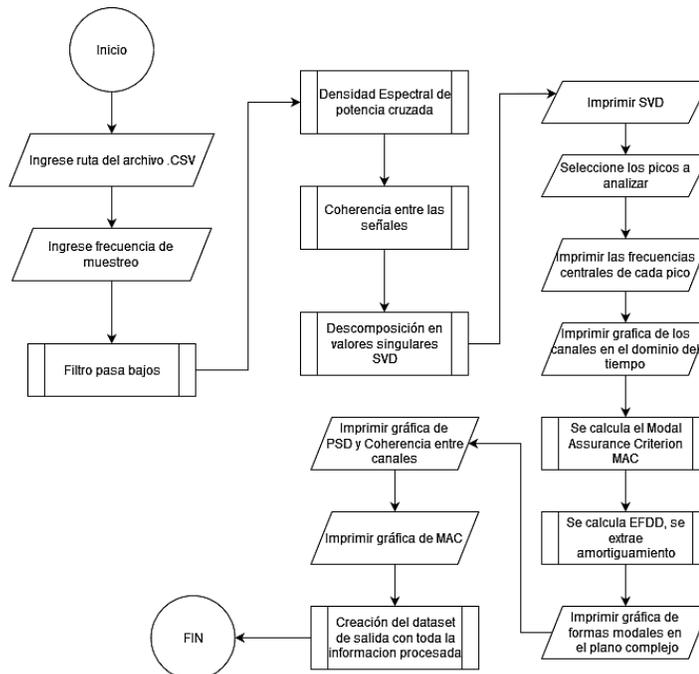


Figura 65. Flujograma de script de análisis.

El script arranca construyendo el dataset a partir del archivo .csv. En este paso la librería Pandas abre el archivo .csv y lo convierte en un objeto dataset, este es dividido en 2 vectores: la matriz de canales, el vector de tiempo. Ambos vectores son creados como Numpy arrays, el tipo de objeto requerido para el procesamiento con Numpy.

De ser requerido los datos se pasan por un filtro digital IIR con aproximación Butterworth pasa banda orden 10, con frecuencias de corte en 0.01Hz y 50Hz. El filtro es creado usando scipy para aplicarlo a los datos es recomendado a través

de la API 'scipy.sosfiltfilt' esto asegura que no haya un desfase en la señal al momento de aplicar el filtro.

Luego del filtro se calcula la densidad espectral de potencia utilizando el algoritmo welch. Para este algoritmo se especificaron los siguientes parámetros: tipo de ventana hanning, overlapping de 50%, precisión fft igual a la longitud de los datos. La ventaja de esta aproximación radica en suavizar los picos de frecuencia espurias.

La coherencia entre las señales es una estadística que se utiliza para examinar la relación entre 2 señales, su medida es de 0 a 1 en donde 1 indica que las señales son relacionadas y 0 cuando no conservan alguna relación. Su cálculo se realiza utilizando la densidad espectral de potencia de las señales a través de la siguiente relación (J. S. Bendat, 1986):

Ecuación 24 Coherencia de magnitud cuadrada de 2 señales

$$C_{xy}(f) = \frac{|G_{xy}|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(y)}$$

Este cálculo nos permite identificar cuando existe una relación entre las frecuencias para canales ubicados a través del eje vertical, horizontal o torsional de la estructura. Por ejemplo, las frecuencias modales que coinciden entre canales verticales provocan modos de vibración verticales, en cambio frecuencias modales que aparecen tanto en canales verticales como horizontales provocan modos de vibración torsionales en la estructura.

Posterior al análisis en frecuencia, la matriz densidad espectral de potencia entre los canales pasa por el cálculo de descomposición en valores singulares. El SVD es aplicada a cada punto de la Fast Fourier Transform (FFT) obtenido por la PSD. Como se observa en la figura 61:

```
def SVD_F(CPSD_CH):
    S1 = np.empty([CPSD_CH.shape[0], CPSD_CH.shape[2]], dtype=float)
    U1 = np.empty([CPSD_CH.shape[2], CPSD_CH.shape[0]], dtype=complex)
    for j in range(CPSD_CH.shape[2]):
        U, s, Vh = linalg.svd(CPSD_CH[:, :, j])
        U1[j, :] = U[:, 0]
        S1[:, j] = s
```

Figura 66. Función que calcula la SVD entre los canales.

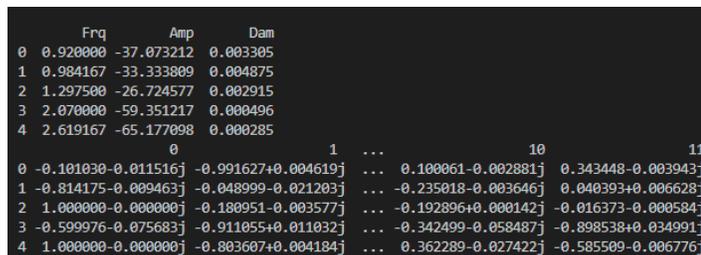
La información hasta esta parte es sobre las frecuencias modales de la estructura, sin embargo, se requiere especificar que picos de frecuencia de desean analizar a fondos. Por lo general se seleccionan los primeros picos, es por ellos que se imprimen a primera instancia la gráfica de los SVD para que el usuario haciendo uso del teclado y mouse pueda seleccionar los picos que desea analizar a fondo.

Después de seleccionar cada pico de interés el script almacena la frecuencia con más amplitud de dicho pico. Seguido imprime los canales en el dominio del tiempo, la coherencia de los canales en frecuencia y la SVD en el plano complejo.

El siguiente proceso consiste en el cálculo de Modal Assurance Criterion con respecto a modos de vibración previamente calculados y almacenados. La finalidad de este proceso es la creación de un historial en un dataset para observar el desplazamiento de estos valores con respecto al tiempo. De esta forma el monitoreo de la estructura se puede extender a los registros históricos almacenados y ubicar el sitio donde más cambios existen el cual probablemente tenga algún tipo de afectación.

Adicional al cálculo de la frecuencia y modo de vibración, por cada pico seleccionado se le aplica el algoritmo Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD). El EFDD es una extensión del FDD utilizado previamente, pero en este caso el objetivo es la obtención del ratio de amortiguamiento en ese modo. Para tal tarea los picos seleccionados son nuevamente transformados al dominio del tiempo utilizando la transformada de Fourier inversa, la gráfica en el tiempo para estos picos es un decaimiento logarítmico a esta función se le aplica la transformada de Hilbert para obtener la componente envolvente de la señal y finalmente se le aplica una aproximación logarítmica a la envolvente para obtener el ratio amortiguamiento.

El último proceso del script es la creación del dataset en formato .csv, nuevamente se emplea Pandas para crear un dataset que contiene: las frecuencias de los modos seleccionados a analizar, los modos de vibración de cada pico, el amortiguamiento calculado para cada modo. Puede verse en la figura 62 el dataset creado (Frq = frecuencia, Amp = amplitud, Dam = amortiguamiento).



	Frq	Amp	Dam
0	0.920000	-37.073212	0.003305
1	0.984167	-33.333809	0.004875
2	1.297500	-26.724577	0.002915
3	2.070000	-59.351217	0.000496
4	2.619167	-65.177098	0.000285

	0	1	...	10	11
0	-0.101030-0.011516j	-0.991627+0.004619j	...	0.100061-0.002881j	0.343448-0.003943j
1	-0.814175-0.009463j	-0.048999-0.021203j	...	-0.235018-0.003646j	0.040393+0.006628j
2	1.000000-0.000000j	-0.180951-0.003577j	...	-0.192896+0.000142j	-0.016373-0.000584j
3	-0.599976-0.075683j	-0.911055+0.011032j	...	-0.342499-0.058487j	-0.898538+0.034991j
4	1.000000-0.000000j	-0.803607+0.004184j	...	0.362289-0.027422j	-0.585509-0.006776j

Figura 67. Salida del dataset creado.

2.9. Recuperación de datos.

La acción de recuperar los datos almacenados se puede realizar a través de dos métodos, el primero es de forma manual, extrayendo la memoria microSD de la tarjeta principal e insertándola a una computadora para copiar los datos en una carpeta específica.

El segundo método radica en realizar la extracción de los datos de forma remota, para ello se ocupa el cliente WinSCP para conectarse a la IP del servidor FTP que

corre en el software de la tarjeta de adquisición. Este servicio es suficiente para recuperar los datos una vez generados, sin la necesidad de estar en sitio. Tomando en cuenta las características del software no es posible extraer datos en los modos de medición o calibración del equipo.

2.10. Ensamble del sistema.

El ensamble del sistema fue realizado en cajas Plexo Legrand de polipropileno con hermeticidad IP55, que ofrecen niveles de protección de ingreso de sustancias solidas como el polvo y liquidas, por lo cual fueron una opción factible en el desarrollo del proyecto. Para la etapa de adquisición de datos y preprocesamiento se seleccionó el modelo LG92022 de dimensiones 105x105x55mm, ver figura 63.



Figura 68. Caja Plexo LG92022 105x105x55mm.

En el caso de la etapa central de procesamiento, almacenamiento y alimentación fue seleccionado el modelo LG92062 de dimensiones 220x170x86mm, ver figura 64.



Figura 69. Caja Plexo LG92062 220x170x86mm.

En la siguiente imagen se presenta el dispositivo ensamblado con todas sus etapas:



Figura 70. Etapas del sistema ensambladas.

CAPITULO 3: PRUEBAS Y ENSAYOS EN LABORATORIOS

3.1. Calibración de sensores.

La calibración de los sensores se hace en referencia a la tabla 1, donde encontramos los niveles de salida (con signos de orientación) para cada posición con referencia al plano horizontal local el cual es perpendicular a plano de tierra.

Tabla 10. Parámetros y calibración de acelerómetros.

POSICIÓN ESTACIONARIA	ACELERÓMETRO (ENTERO CON SIGNO)		
	A_x	A_y	A_z
Z_b down	0	0	+ 1g
Z_b up	0	0	- 1g
Y_b down	0	+ 1g	0
Y_b up	0	- 1g	0
X_b down	+ 1g	0	0
X_b up	- 1g	0	0

Nota. Información obtenida del Datasheet del sensor LIS344ALH

Durante este proceso se realizaron correcciones en la posición del sensor con respecto a la PCB y la carcasa, a fin de reducir el error originado por la posición.

Se calculó el Error Cuadrático Medio (MSE, por sus siglas en inglés) con respecto a cada posición en la tabla 1 tomando N cantidad de muestras:

Tabla 11. Matriz de canales del equipo.

MATRIZ DE CANALES DEL EQUIPO		
1X	3X	1Y
3Y	1Z	3Z
2X	4X	2Y
4Y	2Z	4Z

3.2. Ensayo con sensores en viga simplemente soportada.

A manera de simplificar el análisis y valorar el desempeño del equipo en un ambiente más controlado con factores conocidos, se elaboraron ensayos en vigas simplemente soportadas de perfiles comunes en el mercado con propiedades conocidas.

Para los ensayos con vigas simplemente soportadas seleccionamos la viga de perfil "C" con las siguientes dimensiones (pulgadas):

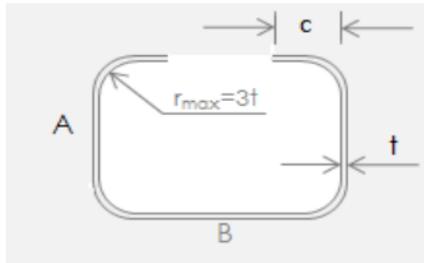


Figura 71. Dimensiones del perfil "C".

$$A = 3"; B = 6"; t = 1/4"$$

$$large = 91.73"$$

Fabricado bajo la normativa ASTM A36, esta viga posee las siguientes características mecánicas:

Tabla 12. Características físicas y mecánicas de la viga

Propiedades mecánicas	
Resistencia a la tracción:	400MPa (unidad: Mega pascales)
Límite de fluencia:	250MPa (unidad: Mega pascales)
Propiedades físicas	
Densidad:	7.85 g/cm ³ (unidad: gramos por centímetros cúbicos)
Módulo de elasticidad:	200MPa (unidad: Mega pascales)

Los ensayos en la viga tienen el propósito de obtener las frecuencias modales de la misma utilizando dos métodos para adquisición de datos en sitio y un método de simulación por computadora para comparativa entre los resultados.

3.2.1. Mediciones con el sistema ModalFQ desarrollado.

En base a la teoría, colocamos los acelerómetros a lo largo de la viga tomando 2 minutos de medición en 2 rondas distintas desplazando la posición de cada acelerómetro en cada medición y excitando la viga con golpes de martillo de distintas maneras.



Figura 72. Colocación de sensores sobre la viga.

3.2.2. Simulación por computadora.

Para modelar la viga simplemente apoyada recurrimos al software de análisis estructural ANSYS Mechanical 2022 R2. Este software simula el modelo CAD creado de una estructura para posterior analizarlo con datos como: material, soportes, fuerzas aplicadas, geometría de la estructura; para el análisis utiliza el método de elemento finito.

Las facilidades en el modelado de la viga y la licencia para estudiantes hicieron de ANSYS la opción adecuada para el análisis.

Resumen de los pasos para el análisis de la viga en ANSYS Mechanical:

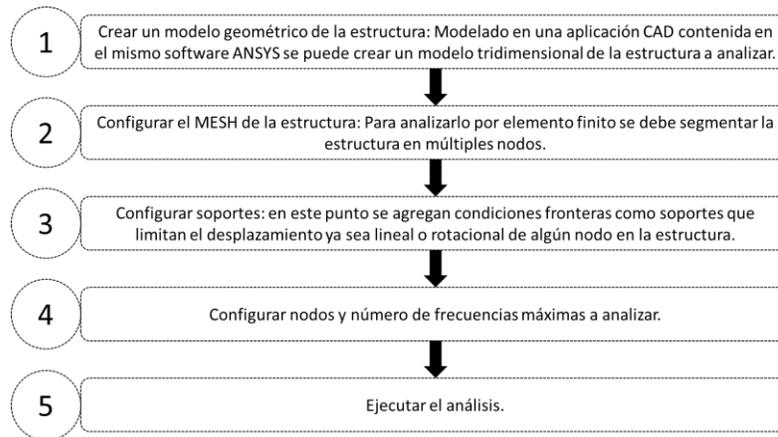


Figura 73. Estructura de análisis dinámico en ANSYS MECHANICAL.

3.2.3. Análisis de Resultados con datos obtenidos por sistema ModalFQ.

El primer ensayo se realizó sin aplicar fuerza a la viga durante 2 minutos, solo se obtuvieron sus vibraciones naturales.

FDD:

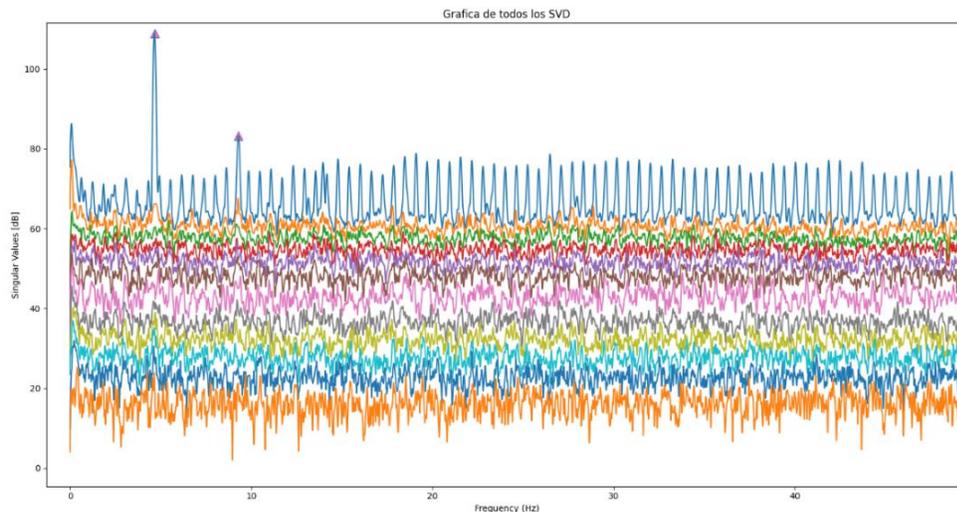


Figura 74. Valores singulares y frecuencias sobresalientes.

PSD:

En todos los canales se identifican los mismos picos:

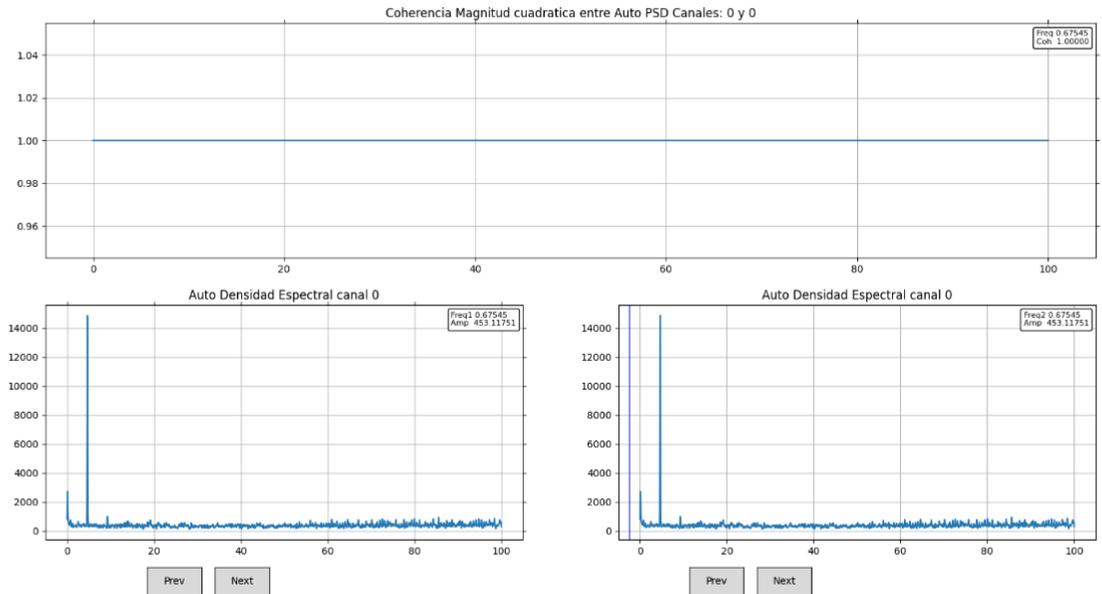


Figura 75. Densidad espectral de potencia canal 0.

Parámetros modales obtenidos:

En el primer ensayo sin fuerza aplicada se encontraron 2 picos relevantes en las frecuencias de: 4.65Hz y 9.28Hz, luego el espectro restante se pierde en el piso de ruido.

	Frq	Amp	Dam
0	4.653102	109.007819	124068.497191
1	9.289526	83.230647	10489.211715

Figura 76. Parámetros obtenidos sin ejercer fuerza sobre la viga.

Esta medición fue tomada a manera de referencia.

El segundo ensayo se realizó aplicando fuerza en el centro de la viga durante 2 minutos. Esto se realizó a través de golpes intermitentes, cada 10 segundos, con un martillo, con el objetivo de facilitar la vibración libre de la estructura después del pico de excitación. Como analogía se presenta la obtención de la función de transferencia de un filtro mediante una función delta dirac, donde el golpe puede representar un pico de energía.

FDD:

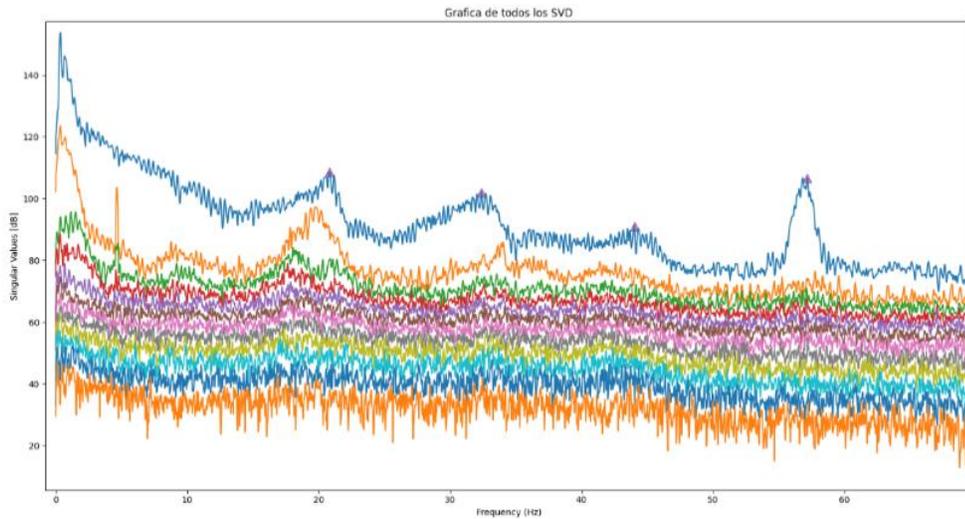


Figura 77. Frecuencias modales encontradas durante el segundo ensayo.

Ejemplo de PSD de Canales del Acelerómetro 1:

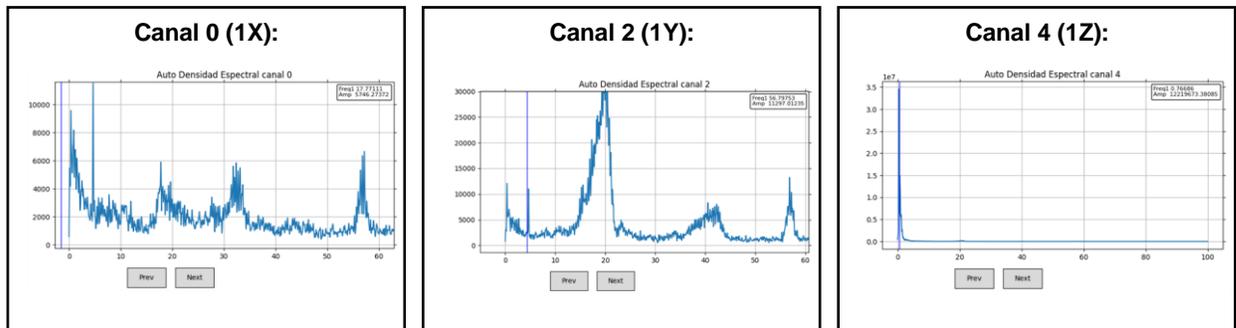


Figura 78. PSD de acelerómetro 1, canales X, Y y Z ensayo 2.

En la siguiente tabla se observan las primeras 5 frecuencias encontradas en cada canal, obtenidos mediante selección de picos entre los canales y canal 0 de referencia:

Tabla 13. Frecuencias encontradas en las mediciones.

Modo	1X	3X	1Y	3Y	1Z	3Z	2X	4X	2Y	4Y	2Z	4Z
1	17.60	17.77	19.55	19.00	-	57.12	17.60	57.12	19.39	19.22	56.79	56.79
2	19.72	32.46	42.00	32.56	-	-	32.40	-	32.47	32.73	-	-
3	33.05	57.25	56.79	42.81	-	-	56.96	-	44.19	43.79	-	-
4	57.28	-	-	56.96	-	-	-	-	57.13	56.87	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Parámetros modales obtenidos:

	Frq	Amp	Dam
0	20.830208	108.669067	167617.789322
1	32.391431	101.984674	77975.618769
2	44.027674	91.087246	24155.237693
3	57.197633	106.648128	85951.790306

Figura 79. Parámetros encontrados aplicando fuerza en el centro de la viga.

El tercer ensayo se realizó aplicando fuerza en cualquier punto de la viga durante 2 minutos. Esto se realizó de la misma forma que en el segundo ensayo, a través de golpes intermitentes, cada 10 segundos, con un martillo, con el objetivo de facilitar la vibración libre de la estructura después de cada pico de excitación.

FDD:

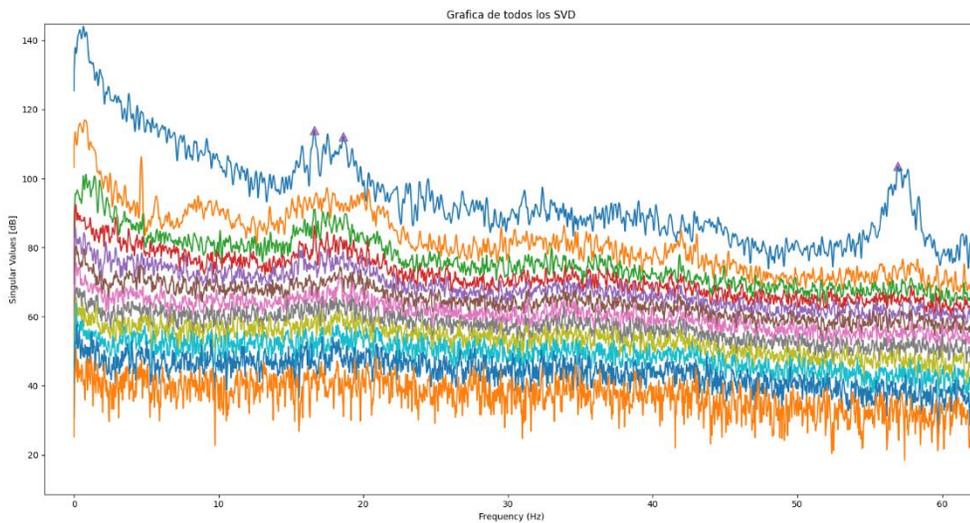


Figura 80. Frecuencias modales encontradas durante el tercer ensayo.

Ejemplo de PSD de Canales del Acelerómetro 1:

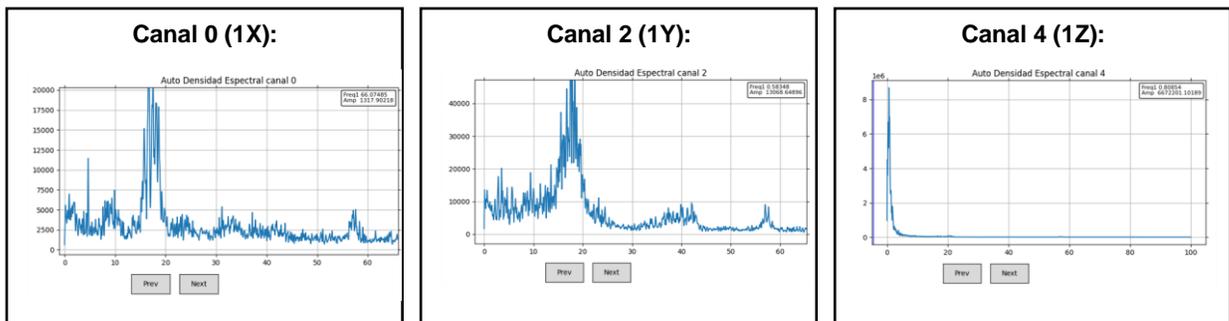


Figura 81. PSD de acelerómetro 1, canales X, Y y Z ensayo 3.

Primeros 5 frecuencias encontradas en los canales obtenidos mediante coherencia magnitud cuadrática entre los canales y canal 0 de referencia:

Tabla 14. Frecuencias obtenidas de las mediciones 2.

Modo	1X	3X	1Y	3Y	1Z	3Z	2X	4X	2Y	4Y	2Z	4Z
1	17.60	17.54	17.60	18.50	-	17.02	16.66	17.60	18.42	18.74	16.72	16.62
2	19.72	33.80	42.16	-	-	-	33.80	57.12	57.44	57.44	57.03	57.12
3	57.20	57.38	57.02	-	-	56.96	56.35	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Parámetros modales obtenidos:

	Frq	Amp	Dam
0	16.604151	114.053169	311465.453077
1	18.612987	112.253264	244211.617448
2	56.947570	103.642508	61516.929031

Figura 82. Parámetros encontrados aplicando fuerza en cualquier parte de la viga.

3.2.4. Análisis de viga tipo “C” mediante ANSYS Mechanical 2022.

Aplicando los pasos establecidos para el modelado y análisis en ANSYS Mechanical, se realizó el modelo geométrico tridimensional de la estructura, tomando en cuenta las características físicas de la viga tipo C.

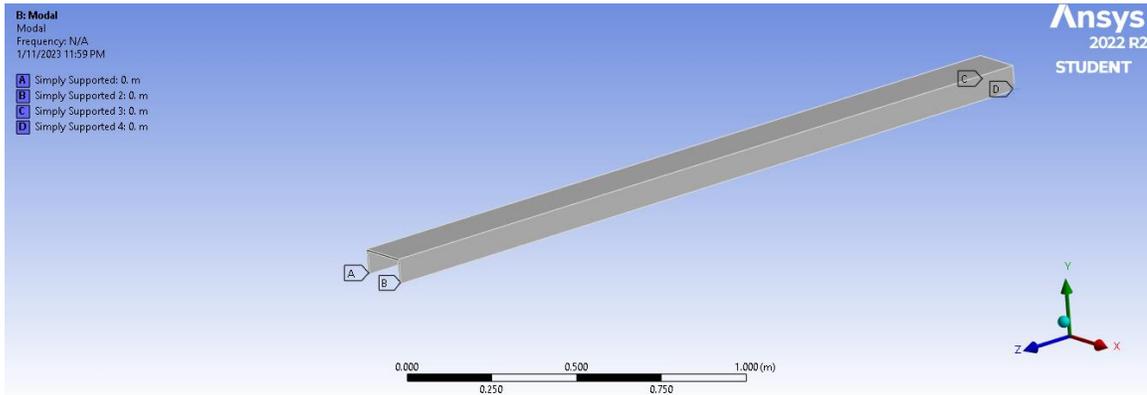


Figura 83. Viga tipo “C” simplemente soportada en sus extremos.

Luego de aplicar el análisis, se obtuvieron los primeros 5 modos de vibración con su masa efectiva en las direcciones: X, Y, Z:

***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****

MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE	X-DIR	RATIO%	EFFECTIVE MASS			
						Y-DIR	RATIO%	Z-DIR	RATIO%
1	44.92	9.628	0.3835E+06	16.88	49.64	0.1061E-04	0.00	0.000	0.00
2	58.68	15.02	0.1021E+07	0.6957E-05	0.00	25.67	75.52	0.000	0.00
3	131.4	1.940	0.6608E+06	0.000	0.00	0.000	0.00	1.470	4.32
4	138.6	0.3994	0.1514E+06	14.47	42.57	0.2954E-05	0.00	0.000	0.00
5	139.5	3.969	0.1524E+07	0.000	0.00	0.000	0.00	0.9696E-05	0.00

Figura 84. Resultados obtenidos por simulación.

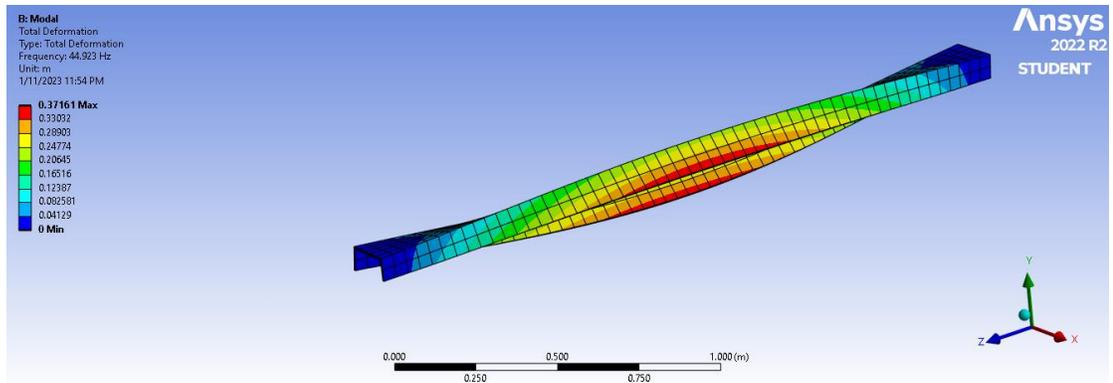


Figura 85. Modo de vibración 1 (44.92Hz), masa modal 9.62 Kg en dirección X.

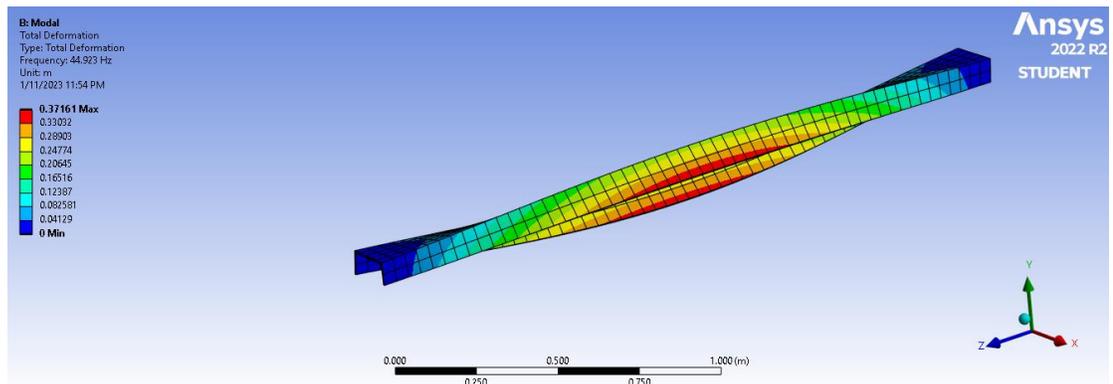


Figura 86. Modo de vibración 2 (58.67Hz), masa modal 15.02 en dirección Y

3.2.5. Comparación de resultados.

Tabla 15. Comparación de resultados: Pruebas vs simulación.

Modo vibración (Hz)	Sin aplicar fuerza	Fuerza aplicada en el centro	Fuerza aplicada en cualquier punto	Simulación por ANSYS Mechanical
1	4.65	20.83	16.6	44.92
2	9.28	32.39	18.61	58.68
3		44.02	56.94	131.4
4		57.19		138.6
5				139.5

Las primeras 2 frecuencias obtenidas por simulación ANSYS Mechanical se encuentran presentes en los análisis con el sistema de medición ModalFQ. Posiblemente los modos de vibración 1 y 2 de las mediciones con ModalFQ sean causados por ruido ambiental o imprecisiones con la aproximación de soportes fijos en los extremos de la viga.

Además, las frecuencias encontradas 44.02 y 57.19 son constantes en los canales del sistema ModalFQ para los ejes X y Y lo que concuerda con la simulación ANSYS y el índice de participación de masas para dichas frecuencias en las coordenadas X y Y.

CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se desarrolló un prototipo capaz de monitorear la condición estructural de puentes, basado en el análisis modal operacional, sensores acelerómetros MEMS de bajo costo y algoritmos de identificación de parámetros dinámicos, el cual sirve como una referencia para la implementación de instrumentación en las pruebas realizadas en los sistemas constructivos de Nicaragua.

El primer paso del trabajo investigativo fue recolectar la información necesaria para establecer los criterios de diseño del prototipo, basados en las características dinámicas de los puentes, lo que permitió identificar los requerimientos técnicos para el correcto funcionamiento del sistema SHM. Específicamente podemos resaltar: Los sensores, el microcontrolador, tipo de comunicación, la interfaz de preprocesamiento y procesamiento de señales, la adquisición y presentación de datos, entre otros.

Posteriormente, se procedió a diseñar e implementar el prototipo, en lo que se destacan procedimientos como validar el funcionamiento individual de las distintas etapas del sistema SHM a través de ensayos en laboratorio, el desarrollo del algoritmo embebido de procesamiento digital de señales y adquisición de datos, el diseño de la interfaz de administración y gestión de datos empleando lenguajes de programación Python y la configuración de todos los complementos de hardware y software incluidos en los requerimientos.

Finalmente, con el apoyo de la empresa constructora MECO se realizaron pruebas mecánicas a perfiles estructurales de acero tipo C ASTM 36, previamente modelados en el software Ansys Mechanical, obteniendo resultados coherentes entre la simulación y el ensayo físico, demostrados por las gráficas de los valores singulares que hacen referencia a los modos de vibración y frecuencias modales del elemento.

Podemos concluir que el proyecto monográfico ha sido exitoso, ya que se logró el desarrollo de un sistema con componentes de bajo costo, capaz de generar reportes de los modos de vibración de las estructuras, auxiliar el proceso de análisis del estado de puentes y la generación de data para el historial de monitoreo. Se puede decir que, el prototipo ha proporcionado una guía para continuar con el desarrollo e investigación de sistemas de este tipo en el país, bajo el marco de una nueva normativa de construcción nacional que motive a la implementación de instrumentación en las estructuras.

4.2. Recomendaciones

El prototipo de monitoreo estructural fue capaz de capturar los primeros modos de vibración de una estructura simple. Sin embargo, se recomienda tomar a consideración los siguientes aspectos para el desarrollo de investigaciones futuras en base a este trabajo:

- Contemplar la posibilidad de mediciones bajo ambientes más reales, esto implica el poder realizar ensayos en estructuras de mayor envergadura y tomando de referencia equipos de mediciones certificados.
- Rediseñar una fuente de alimentación con capacidad de alimentar el prototipo durante periodos de tiempo más prolongados (semanas, meses).
- Ampliar la red de monitoreo (construcción de más prototipos) para cubrir áreas más extensas a lo largo de las estructuras a monitorear. De esta forma se pueden realizar estudios más detallados de las estructuras y su impacto en la identificación de parámetros dinámicos que esto supone.
- Diseñar una siguiente versión utilizando medios de transmisión inalámbricos a fin de garantizar la medición incluso en zonas de difícil acceso en la estructura.
- Publicar los servicios IP como MQTT, FTP para brindar conectividad remota a los equipos.
- Creación de una base de datos para el almacenamiento de resultados y mediciones del prototipo, lo que permite una administración más sencilla de los datos facilitando la creación de Datasets.
- El prototipo puede tener diferentes aplicaciones en el campo de la dinámica estructural. El hecho de realizar mediciones de variables de aceleración hace posible obtener información del comportamiento dinámico de estructuras como: torres de telecomunicaciones y edificios.

5. Bibliografía.

- Altamirano, B. (2007). *Apuntes de puentes*. Managua: UNAN.
- Arenas, M. (2008). *Diseño e implementación de un sistema de adquisición de aceleraciones con procesamiento mediante microcontrolador*. Sevilla: Universidad de Sevilla .
- Atmel Corporation. (2016). *AVR127: Understanding ADC Parameters - APPLICATION NOTE*. San Jose CA: Atmel.
- Bao, M.-H. (2000). *Micro Mechanical Transducers Pressure Sensors, Accelerometers and Gyroscopes*. Shanghai: Elsevier B.V. .
- Barba, M. A., & J., M. M. (2012). *PROPUESTA DE GUÍA DE INSPECCIÓN CUALITATIVA PARA PUENTES EN NICARAGUA*. Managua: UNAN Managua.
- Brincker, R., & Ventura, C. E. (2015). *INTRODUCTION TO OPERATIONAL MODAL ANALYSIS*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Brincker, R., Lingmi, Z., & Andersen. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Mater. Struct.* 10 (pág. 441). INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING.
- Castro Triguero, R. (2016). Introducción al análisis modal operacional. *Jornada sobre Comportamiento Estructural y Monitorización de Estructuras* (pág. 92). Malaga: Universidad de malaga.
- Chen, H., & Ni, Y. (2018). *Structural health monitoring of large civil engineering structures*. Hoboken , NJ : John Wiley & Sons.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R., & Prime, M. B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*, 30(2), 91-105.
- Elsevier Science & Technology. (2002). *Microcontroller Based Temperature Monitoring and Control*. Elsevier Science & Technology Books.
- Gabriel, J. A. (2018). *Desarrollo de un prototipo de estación sísmica para monitoreo de eventos telúricos de periodo corto en tiempo real, para el instituto nicaraguense de estudios territoriales (INETER)*. Managua : Universidad Nacional de Ingeniería .
- Garita Duran, H., Aguero Barrantes, P., & Liu Kuan, Y. C. (2018). *Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales superestructura del puente sobre la quebrada salitral ruta nacional No 27*. San pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- Garita, H., & Aguero, P. (2018). *Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones superestructura de los puentes sobre el río virillo ruta nacional No 3*. San pedro: Universidad de Costa Rica.

- Girolami, A., Brunelli, D., & Luca, B. (2017). *Low-cost and distributed health monitoring system for critical buildings*. Bologna: IEEE.
- He, J., & Fu, Z.-F. (2001). *Modal Analysis*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Herrera Perez, E. (2004). *Comunicaciones I, Señales y transmision*. Mexico D.F.: LIMUSA SA.
- Hui, L., Shunlong, L., Jinping, O., & Hongwei, L. (2010). Modal identification of bridges under varying environmental conditions: Temperature and wind effects. *STRUCTURAL CONTROL AND HEALTH MONITORING*, 17:495–512.
- Hurtado Centeno, R. C., & Ubeda Obregon, J. J. (2019). *Análisis dinámico modal de un edificio de acero de 10 niveles y diseño de los sistemas laterales Steel Plate Shear Wall (SPSW) y Special Concentrically Braced Frame (SCBF)*. Managua: Facultad Tecnologia de la construccion UNI.
- ISIS Canada Corporation. (2001). *Guidelines for Structural Health Monitoring*. Manitoba: ISIS Canada Corporation.
- Kurose, J. F., & Ross, K. W. (2010). *REDES DE COMPUTADORAS: UN ENFOQUE DESCENDENTE*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S. A.
- LanammeUCR. (2017). Introduccion al monitoreo de la condicion estructural de puentes. *Boletin Estructuras* , 14.
- Liu Kuan, Y. C. (2013). *Evaluacion y monitoreo de salud estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentacion analambrico*. San Pedro de Montes de Oca: Laboratorio Nacional de materiales y modelos estructurales.
- Liu Kuan, Y. c., & Aguero Barrantes, P. (2017). Introduccion al monitoreo de la condicion estructural de puentes. *Boletin Estructuras* , 1-14.
- Lynch, J., & Loh, K. (2006). A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 38-91.
- Moore, H. (2007). *MATLAB® para ingenieros*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.
- Moughy, J. J., & R., C. J. (2017). A state of the art review of modal-based damage detection in bridges: Development, Challenges, and Solutions. *Applied Sciences*, 510.
- MTI, Ministerio de Transporte e Infraestructura, Division de administracion Vial. (2019). *Informe anuario de puente de la red vial nacional de Nicaragua - 2018*. Managua: MTI .
- Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures An Introduction and Guide for Applications*. New York : Springer Science+Business Media .
- Rodríguez Súnico, M. (2005). *ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL: TEORÍA Y PRÁCTICA*. Sevilla: ETSI de la Universidad de Sevilla.

- Ruzza, G., Guerriero, L., Revellino, P., & M. Guadagno, F. (2018). Thermal Compensation of Low-Cost MEMS Accelerometers for Tilt Measurements. *Sensors*, 18, 2536.
- Salawu, O. S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering structures*, 19(9), 718-723.
- Salawu, O. S., & Clive, W. (1995). Bridge Assessment Using Forced-Vibration Testing. *Journal of Structural Engineering*, 161-173.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodologia de la investigacion*. Mexico : McGRAW-HILL / INTERAMERICANA.
- STMicroelectronics. (13 de Mayo de 2020). *Accelerometers*. Obtenido de ST Microelectronics: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/accelerometers.html#2>
- Wenzel, H. (2009). *Health Monitoring of Bridges*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- World Meteorological Organization. (2018). *Guide to Instruments and Methods of Observation*. Geneva : Chair, Publications Board World Meteorological Organization (WMO).

6. Anexos.

Tabla general de costos del equipo:

Item	Descripción de bien y/o servicio	Unidad	Cantidad	Costo Unitario C\$	Costo Total C\$
1	Núcleo G474RE	-	3	C\$5,000.00	C\$15,000.00
2	LIS344ALH - Modulo	-	8	C\$850.00	C\$6,800.00
3	ST Link V2 Programador STM8 STM32	-	1	C\$225.00	C\$225.00
4	Raspberry Pi 4 Model B Starter Kit (4 RAM)	-	2	C\$5,385.00	C\$10,770.00
5	Módulo de red Ethernet W5500	-	3	C\$260.00	C\$780.00
6	Fuente de alimentación LRS-200-12 / 12V	-	1	C\$1,500.00	C\$1,500.00
7	LM7803	-	10	C\$40.00	C\$400.00
8	Capacitor cerámico 22uF	-	10	C\$6.00	C\$60.00
9	Capacitor cerámico 10uF	-	10	C\$6.00	C\$60.00
10	Diodo rectificador 1N4007	-	10	C\$4.00	C\$40.00
11	OPAMP LM358	-	20	C\$35.00	C\$700.00
12	OPAMP LM741	-	10	C\$25.00	C\$250.00
13	Potenciómetro de precisión 5KΩ	-	10	C\$10.00	C\$100.00
14	Capacitores de 100pF	-	20	C\$6.00	C\$120.00
15	Resistor de 2K 1/4W	-	20	C\$5.00	C\$100.00
16	Conector hembra / RJ45 Ethernet	-	20	C\$20.00	C\$400.00
18	Conector macho / RJ49 + Capucha	-	30	C\$20.00	C\$600.00
19	Cable ethernet RJ45 Cat 6a blindado para exteriores	m	60	C\$20.00	C\$1,200.00
20	Modulo microSD Adafruit	-	2	C\$570.00	C\$1,140.00
21	Memoria microSD 32GB	-	2	C\$600.00	C\$1,200.00
22	Resistor de 15 K ¼ Watt	-	35	C\$5.00	C\$175.00
23	Resistor de 1.8 K Watt	-	35	C\$5.00	C\$175.00
24	Resistor de 1.2 K Watt	-	35	C\$5.00	C\$175.00
25	Capacitores cerámicos 700 nF / 25V	-	20	C\$10.00	C\$200.00
26	Capacitores cerámicos 600 nF / 25V	-	20	C\$10.00	C\$200.00
27	Capacitores cerámicos 0.82 uF / 25V	-	20	C\$10.00	C\$200.00
28	Capacitores cerámicos 0.12 uF / 25 V	-	20	C\$10.00	C\$200.00
29	Capacitores cerámicos 2.7 K / 25 V	-	35	C\$10.00	C\$350.00
30	Resistor 2.2 K ¼ Watt	-	35	C\$5.00	C\$175.00
31	Resistor 10 K ¼ Watt	-	35	C\$5.00	C\$175.00
32	Resistor 100 ¼ Watt	-	35	C\$5.00	C\$175.00
33	PCB Fibra de vidrio 30X30 CM	-	2	C\$1,500.00	C\$3,000.00
34	Papel fotográfico Klip Xtreme Glossy 4"x6"	-	1	C\$500.00	C\$500.00
35	PosterAo	-	1	C\$500.00	C\$500.00
Total					C\$47,645.00