UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO – CHILE

Desarrollo De Instrumentación Inalámbrica Costo-Eficiente Para El Monitoreo De Vibraciones Ambientales Y La Determinación De Periodos Fundamentales De Estructuras

NICOLÁS FELIPE FLORES JIMÉNEZ

Memoria para optar al Título de

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

GONZALO HERNÁN SUAZO FUENTEALBA

Abril 2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO – CHILE

DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICA COSTO-EFICIENTE PARA EL MONITOREO DE VIBRACIONES AMBIENTALES Y LA DETERMINACIÓN DE PERIODOS FUNDAMENTALES DE ESTRUCTURAS

Memoria de titulación presentada por

NICOLÁS FELIPE FLORES JIMÉNEZ

Como requisito para optar al Título de

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

GONZALO HERNÁN SUAZO FUENTEALBA

Abril 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Ana y Enrique por darme la posibilidad de estudiar, apoyar y comprenderme en todo momento.

A Fernanda por su compañía y ser uno de mis pilares, gracias por darme el último empuje que necesitaba para finalizar.

A mis abuelos Carmen y José quienes siempre me dieron su apoyo a su manera y estuvieron esperando este momento por años.

A todo el grupo de amigos "Ingeniebrios" por las risas, viajes, carretes e innumerables anécdotas que siempre quedarán en el recuerdo, hicieron de esta etapa universitaria una experiencia única y memorable.

RESUMEN

Desde el punto de vista de la ingeniería civil es importante conocer la respuesta dinámica que experimentará la estructura para vibraciones del tipo sísmicas o ambientales de modo de asegurar una respuesta estable y segura. Una de las estrategias para caracterizar esta respuesta es la instrumentación mediante la utilización de acelerógrafos o sismógrafos que permiten medir sus propiedades dinámicas a partir de mediciones de vibraciones ambientales.

En esta tesis se presenta el desarrollo de un equipo de medición de vibración en estructuras de bajo costo e inalámbrico que incluye geófonos y acelerómetros triaxiales del tipo MEMS, con el fin de poder medir parámetros dinámicos de estructuras como las frecuencias fundamentales a partir del análisis modal operacional.

Para validar la fiabilidad del instrumento se realizan mediciones a un modelo a escala en un ambiente controlado y a una estructura real de 4 pisos de altura, ambas con mediciones simultaneas para poder comparar los resultados obtenidos. La comparación se realiza en términos de la frecuencia espectral al aplicar el método Peak Picking a las curvas de la transformada de Fourier

Al analizar los resultados obtenidos se obtiene que los geófonos seleccionados en comparación con sismógrafos profesionales presentan un buen desempeño para la obtención de frecuencias fundamentales a través de vibraciones ambientales, lo que permite validar la aplicación de la instrumentación para la caracterización dinámica de la estructura. Sin embargo, el acelerómetro triaxial tipo MEMS no tiene el nivel de ruido y resolución mínima suficiente para registrar vibraciones menores por lo que su aplicación va más orientada al registro de vibraciones de mediana y mayor magnitud.

Palabras clave: Instrumentación Inalámbrica, Vibraciones Ambientales, Frecuencias Fundamentales, Análisis Modal Operacional, Peak Picking.

ABSTRACT

From a civil engineering point of view, it is important to know the dynamic response of the structure to seismic or ambient vibrations to ensure a stable and safe response. One of the strategies to characterize this response is the instrumentation using accelerographs or seismographs that allow measuring its dynamic properties from environmental vibration measurements.

This thesis presents the development of a low cost and wireless vibration measurement equipment for structures that includes geophones and MEMS type triaxial accelerometers, to measure dynamic parameters of structures such as fundamental frequencies from the operational modal analysis.

To validate the reliability of the instrument, measurements are performed on a scale model in a controlled environment and on a real 4-story structure, both with simultaneous measurements to compare the results obtained. The comparison is made in terms of spectral frequency by applying the Peak Picking method to the Fourier transform curves.

When analyzing the obtained results, it is obtained that the selected geophones in comparison with professional seismographs present a good performance for obtaining fundamental frequencies through ambient vibrations, which allows validating the application of the instrumentation for the dynamic characterization of the structure. However, the MEMS type triaxial accelerometer does not have enough noise level and minimum resolution to record minor vibrations, so its application is more oriented to record medium and higher magnitude vibrations.

Keywords: Wireless Instrumentation, Ambient Vibrations, Fundamental Frequencies, Operational Modal Analysis, Peak Picking.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS ..... **II**

RESUMEN ..... **III**

ABSTRACT ..... **IV**

ÍNDICE DE CONTENIDOS ..... **V**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **VIII**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **XIV**

1. INTRODUCCIÓN **1**

2. OBJETIVOS **3**

2.1 Objetivos Generales 3

2.2 Objetivos Específicos 3

2.3 Metodología 3

3. MARCO TEÓRICO **5**

3.1 Dinámica de Estructuras 5

3.1.1 Frecuencia Natural 6

3.1.2 Modos de vibrar 17

3.2 Análisis modal operacional 21

3.2.1 Peak Picking 22

4. ESTADO DEL ARTE **24**

4.1 Pruebas de vibración ambiental de edificios en Santiago y Viña del Mar, (Midorikawa, 1990) 24

4.2 Parámetros dinámicos de la estructura extraída de la medición de vibraciones ambientales, (Michell, Guéguen, & Bard, 2008) 27

4.3 Medición de Vibraciones Ambientales en Tres Edificios de Concreto Reforzado de 28, 11 y 6 pisos, (Esquivel Salas & Schmidt Diaz, 2016). 30

4.4 Confiabilidad de acelerómetros MEMS para mapeo instrumental de intensidad de terremotos, (Gülüm, Hakan , & Kemal , 2017) 33

5. DESARROLLO INSTRUMENTAL 37

5.1 Geófonos 38

5.2 Acelerómetros 41

5.3 Digitalización señal analógica 43

5.4 Controlador y almacenamiento 45

5.5 Conexiones inalámbricas 46

5.6 Fuente de Alimentación 49

5.7 Equipo Obtenido 49

6. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS 52

6.1 Sincronización 52

6.1.1 Sincronización Bruta 53

6.1.2 Sincronización Fina 53

6.2 Adquisición 55

6.3 Procesamiento 56

7. PRUEBAS DE VALIDACIÓN 63

7.1 Prueba Modelo a Escala 63

7.1.1 Resultados Teóricos 65

7.1.2 Resultados Experimentales 65

7.1.3 Discusión de Resultados 68

7.2 Prueba Edificio 4 Pisos 69

7.2.1 Características estructura y confección modelo estructural 70

7.2.2 Calibración y pruebas geófonos 1 Hz 72

7.2.3 Medición Edificio y Resultados 75

7.2.4 Discusión de Resultados 82

8. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN 83

9. REFERENCIAS 86

10. BIBLIOGRAFÍA 87

A. RESOLUCIÓN TEÓRICA MODELO A ESCALA 89

B. ANÁLISIS MODELO ESTRUCTURAL EDIFICIO P 93

C. MEDICIONES MODELO A ESCALA 101

D. MEDICIONES EDIFICIO P 107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Acción dinámica y propiedades de la estructura 6

Figura 3-2: Esquema simplificado (a)Sistema sin amortiguamiento; (b) Sistema con amortiguamiento.....7

Figura 3-3: Diagrama de cuerpo libre vibraciones libres sin amortiguamiento 7

Figura 3-4: Vibración libre de un sistema sin amortiguamiento 9

Figura 3-5: Diagrama de cuerpo libre vibraciones libres con amortiguamiento 10

Figura 3-6: Amortiguamiento en vibración libre.....13

Figura 3-7: Diagrama de cuerpo libre vibraciones forzadas con amortiguamiento.....14

Figura 3-8: Respuesta Vibración Forzada.....15

Figura 3-9: Factor de amplificación dinámica para distintos niveles de amortiguamiento .17

Figura 3-10: Sistema de dos grados de libertad (a) Estructura de dos pisos; (b) Modelo simplificado sin amortiguamiento; (c) Diagrama de cuerpo libre 18

Figura 3-11: Modos de vibrar para sistema de dos grados de libertad.....20

Figura 3-12: Modos de vibrar en planta con componente rotacional y traslacional 21

Figura 3-13: Peaks de densidad espectral.....23

Figura 4-1: Relación entre el periodo natural y el número de pisos 25

Figura 4-2: Razón de periodos a partir de excitaciones sísmicas y vibraciones ambientales 27

Figura 4-3: Comparación de periodos obtenidos con vibración forzada y ambiental.....27

Figura 4-4: Izquierda: Esquema de posición de instrumentos de medición; Derecha: Aceleración de respuesta en base a las vibraciones ambientales del piso 8.....28

Figura 4-5: Aceleración de respuesta producto de la demolición del puente, Izquierda: dirección longitudinal; Derecha: dirección transversal 29

Figura 4-6: Planta de edificio y posición de instrumentos 31

Figura 4-7: Resultado obtenido de uno de los edificios medidos, Izquierda: Espectros de Fourier; Derecha: Función de Transferencia 32

Figura 4-8: Mesa Vibratoria Uniaxial con sensores en su interior 34

Figura 4-9: Respuesta de instrumentos a señales armónicas de 1, 3 y 10 Hz 35

Figura 4-10: Respuesta frente a grabaciones de terremotos 35

Figura 5-1: Estructura Geófono 39

Figura 5-2: Comparación de PSD de cuatro geófonos y el sismómetro CMG-40T 40

Figura 5-3: Acelerómetro Triaxial Analog ADXL 355 43

Figura 5-4: Esquema distribución ADC 45

Figura 5-5: Esquema distribución ADC 46

Figura 5-6: Conexión inalámbrica: Modulo Wifi (Izquierda), Modulo RF (Derecha) 47

Figura 5-7: Esquema de conexión módulos inalámbricos 48

Figura 5-8: Prototipo sensor, vista delantera 50

Figura 5-9: Prototipo sensor, vista trasera 50

Figura 5-10: Esquema general de componentes seleccionados 51

Figura 6-1: Esquema cualitativo sincronización fina entre la Raspberry de referencia y una segunda Raspberry 54

Figura 6-2: Comparación curva de respuesta real y curva de respuesta corregida: grafico superior medición entre t= 0-60 seg; grafico central medición entre t= 5-15 seg; grafico inferior medición entre t= 8-10 seg 58

Figura 6-3: Comparación de mediciones solo utilizando sincronización bruta 61

Figura 6-4: Comparación de mediciones utilizando sincronización fina 62

Figura 7-1: Modelo a escala de estructura de dos pisos 64

Figura 7-2: Registro de medición: (arriba) resultados acelerómetro; (abajo) resultados geófonos 66

Figura 7-3: Gráficos espectros de frecuencias 67

Figura 7-4: Espectrogramas de frecuencias 68

Figura 7-5: Vista isométrica modelo estructural Edificio P 71

Figura 7-6: Sismómetro Katsujima modelo PMK-110H 72

Figura 7-7: Prueba de calibración geófonos 73

Figura 7-8: Registro mediciones geófono 1 [Hz] vs geófono 4.5 [Hz] 74

Figura 7-9: Ubicación centro de masa piso 4, edificio P 76

Figura 7-10: Despliegue de equipos de medición en edificio P: (izquierda) instrumentación inalámbrica de bajo costo; (derecha) sismógrafos comerciales 76

Figura 7-11: Espectro de frecuencias dirección X 78

Figura 7-12: Espectro de frecuencias dirección Y 78

Figura 7-13: Espectrograma en dirección X 79

Figura 7-14: Espectrograma en dirección Y 79

Figura 7-15: Señal filtrada geófono 1Hz: (izquierda) dirección X; (derecha) dirección Y 81

Figura 7-16: Señal filtrada geófono 4.5Hz: (izquierda) dirección X; (derecha) dirección Y .81

Figura A-1:(izquierda) elevación estructura; (derecha) planta estructura 89

Figura A-2: Deformada modelo simplificado de 2 pisos.....90

Figura B-1: Elementos modelo estructural y ubicación sistema de coordenadas 93

Figura C-1: Registro de medición 1.....101

Figura C-2: Espectro de frecuencia medición 1 101

Figura C-3: Espectrograma medición 1 102

Figura C-4: Registro de medición 2.....102

Figura C-5: Espectro de frecuencia medición 2 103

Figura C-6: Espectrograma medición 2 103

Figura C-7: Registro de medición 3.....104

Figura C-8: Espectro de frecuencia medición 3 104

Figura C-9: Espectrograma medición 3 105

Figura C-10: Registro de medición 4.....105

Figura C-11: Espectro de frecuencia medición 4 106

Figura C-12: Espectrograma medición 4 106

Figura D-1: Espectro edificio medición 1 dirección X 107

Figura D-2: Espectro edificio medición 1 dirección Y 107

Figura D-3: Espectrograma edificio medición 1 dirección X 108

Figura D-4: Espectrograma edificio medición 1 dirección Y 108

Figura D-5: Espectro edificio medición 2 dirección X 109

Figura D-6: Espectro edificio medición 2 dirección Y 109

Figura D-7: Espectrograma edificio medición 2 dirección X 110

Figura D-8: Espectrograma edificio medición 2 dirección Y 110

Figura D-9: Espectro edificio medición 3 dirección X 111

Figura D-10: Espectro edificio medición 3 dirección Y 111

Figura D-11: Espectrograma edificio medición 3 dirección X 112

Figura D-12: Espectrograma edificio medición 3 dirección Y 112

Figura D-13: Espectro edificio medición 4 dirección X 113

Figura D-14: Espectro edificio medición 4 dirección Y 113

Figura D-15: Espectrograma edificio medición 4 dirección X 114

Figura D-16: Espectrograma edificio medición 4 dirección Y 114

Figura D-17: Espectro edificio medición 5 dirección X 115

Figura D-18: Espectro edificio medición 5 dirección Y 115

Figura D-19: Espectrograma edificio medición 5 dirección X 116

Figura D-20: Espectrograma edificio medición 5 dirección Y 116

Figura D-21: Espectro edificio medición 6 dirección X 117

Figura D-22: Espectro edificio medición 6 dirección Y 117

Figura D-23: Espectrograma edificio medición 6 dirección X 118

Figura D-24: Espectrograma edificio medición 6 dirección Y 118

Figura D-25: Espectro edificio medición 7 dirección X 119

Figura D-26: Espectro edificio medición 7 dirección Y 119

Figura D-27: Espectrograma edificio medición 7 dirección X 120

Figura D-28: Espectrograma edificio medición 7 dirección Y 120

Figura D-29: Espectro edificio medición 8 dirección X 121

Figura D-30: Espectro edificio medición 8 dirección Y 121

Figura D-31: Espectrograma edificio medición 8 dirección X 122

Figura D-32: Espectrograma edificio medición 8 dirección Y 122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Comparación de frecuencias para ambas alternativas 29

Tabla 4-2 Especificaciones instrumentos de medición 30

Tabla 4-3 Especificaciones técnicas sensores MEMS 33

Tabla 5-1 Características Geófonos RT Clark 4,5 Hz 40

Tabla 5-2 Características Técnicas Acelerómetro Triaxial Analog ADXL 355 43

Tabla 5-3 Características Técnicas Raspberry Pi 3 Model B+,.....46

Tabla 6-1 Valores de medición para t=8,0 - 8,10seg 59

Tabla 7-1: Frecuencias predominantes en dirección X 71

Tabla 7-2: Frecuencias predominantes en dirección Y 71

Tabla 7-3: Especificaciones técnicas sismómetro PMK-110H 72

Tabla 7-4: Posición centro de masa piso 4.....75

Tabla 7-5: Resultados frecuencias predominantes por dirección.....77

Tabla 7-6: Resultado final de frecuencia natural, Edificio P 81

Tabla B-1: Centro de masa por piso.....93

Tabla B-2: Reacciones en la base 94

Tabla B-3: Centro de masa estructura 94

Tabla B-4: Desplazamiento promedio y máximo por piso 94

Tabla B-5: Drift por piso 95

Tabla B-6: Fuerzas por piso 95

Tabla B-7: Periodos y frecuencias modales 96

Tabla B-8: Participación modal de masas traslacionales.....97

Tabla B-9: Participación modal de masas rotacionales 98

Tabla B-10: Participación modal de fuerzas 99

Tabla B-11: Factores modales por dirección 99

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras se encuentran constantemente vibrando a lo largo de su vida útil. Dichos movimientos son controlados por las propiedades de materiales, tipo de estructuración y por las fuentes de vibración en el entorno de la estructura. Las fuentes de vibración pueden presentar diversa naturaleza con niveles de energía liberada disimiles como ocurre con fuentes sísmicas (ej. terremotos, actividades volcánicas) y las vibraciones ambientales (ej. tránsito vehicular o de personas, viento, entre otras).

Desde el punto de vista de la ingeniería civil es importante conocer la respuesta dinámica que experimentará la estructura para los diversos tipos de vibraciones de modo de asegurar una respuesta estable y segura. Si bien en la actualidad existen diversos modelos numéricos (software) que permiten caracterizar la respuesta de una estructura en etapas de diseño, existen una serie de incertidumbres respecto a la respuesta dinámica de la estructura en etapas de construcción y operación, en consideración además de las vibraciones a las que se verá sometida durante su vida útil.

Una estrategia para caracterizar la respuesta dinámica de una estructura es la instrumentación mediante la utilización de acelerógrafos o sismógrafos que permiten medir sus propiedades dinámicas a partir de mediciones de vibraciones ambientales. Existen varios tipos de instrumentos estandarizados mundialmente entre ellos se encuentran los que miden aceleraciones (Esquivel y Schmidt, 2016) y los que miden velocidades (Boroschek et al., 2005). El problema de este tipo de instrumentos es su alto costo lo que dificulta su instalación masiva. Por otra parte, presentan una compleja instalación ya que requiere el emplazamiento de sensores conectados por cables lo cual hace arduo el proceso de instalación y transporte.

El presente trabajo de título se centrará en el desarrollo de un equipo medición de vibración en estructuras de bajo costo e inalámbrico que incluya geófonos y acelerómetros triaxiales, con el fin de poder medir parámetros dinámicos de estructuras (como periodos y modos naturales) a partir de análisis modal operacional (ej. Peak Picking, Descomposición en el dominio de frecuencia, entre otros). Se busca que los instrumentos presenten además la capacidad de registrar movimientos fuertes generados por sismos. Los equipos serán desarrollados y luego puestos a prueba en el Edificio P de la UTFSM y los resultados obtenidos serán luego comparados con mediciones realizadas con instrumentos comerciales disponibles en el laboratorio LEMCO, así como con ensayos de laboratorio.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general de esta memoria es desarrollar instrumentos inalámbricos costo-eficientes que sean capaces de percibir vibraciones ambientales en estructuras para determinar sus parámetros dinámicos como periodos fundamentales y modos de vibración.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudio y comprensión de los métodos de obtención de características estructurales para su posterior implementación.
- Determinar los componentes costo-eficientes mínimos requeridos para elaborar un instrumento para medición de vibraciones ambientales.
- Generar códigos computacionales que permitan el uso remoto del instrumento.
- Realizar pruebas de laboratorio que corroboren el buen funcionamiento del equipo.
- Realizar pruebas de terreno que permitan validar los resultados obtenidos mediante la comparación con instrumentos comerciales.
- Discutir la aplicación del instrumento desarrollado para la determinación de los periodos fundamentales de una estructura.

2.3 METODOLOGÍA

A continuación, se detalla mediante un punteo los distintos pasos que se desarrollaron a lo largo de este trabajo de título, cabe señalar que para cada punto se realizaron numerosas iteraciones hasta encontrar la mejor solución.

- Estudio de Antecedentes
    - Se comienza con una revisión bibliográfica de los instrumentos y técnicas utilizados para la medición de propiedades dinámicas de estructuras.

- Selección de los componentes que se requieren para poner en funcionamiento el instrumento, tales como: sensores, sistema de adquisición y almacenamiento de datos, alimentación de energía, para luego determinar la disposición física de estos componentes.

- Obtención y Calibración de Primer Prototipo
  - Ensamblaje primera versión de instrumento
  - Verificación de funcionamiento mediante pruebas de laboratorio con datos de entrada y salida conocidos.
  - Corrección de códigos de ejecución hasta obtener mediciones consistentes.
- Implementación en estructura real y validación de resultados
  - Obtención de antecedentes estructurales de la edificación seleccionada
  - Calibración de sismómetros comerciales de alta sensibilidad utilizados para este tipo de medición para comparar los resultados obtenidos.
  - Medición en simultaneo del instrumento desarrollado con el sismómetro de alta sensibilidad.
  - Caracterizar los periodos predominantes de la estructura
  - Conclusiones y recomendación de aplicación del instrumento desarrollado

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los principios de la dinámica de estructuras para dar así una introducción a las propiedades naturales de estructuras tales como periodos y modos de vibrar partiendo desde el análisis de modelos simplificados.

Por otro lado, se presentarán métodos de análisis basados en procesamiento matemático y análisis gráfico de la respuesta de una estructura cuando es sometida a vibraciones ambientales.

3.1 DINÁMICA DE ESTRUCTURAS

La dinámica de estructuras corresponde al área que estudia el efecto de las acciones externas actuando en estructuras y que dan como resultado vibraciones.

Desde el punto de vista del análisis, la respuesta dinámica de una estructura es el resultado de la señal de excitación externa a través de la misma estructura y obtener magnitudes tales como desplazamiento, velocidad, aceleraciones en función del tiempo.

La respuesta dependerá de las características estructurales y las propiedades del suelo, esta respuesta se obtiene del análisis que se realiza a un modelo simplificado que dependerá del tipo de estructura el cual puede resolverse con métodos numéricos

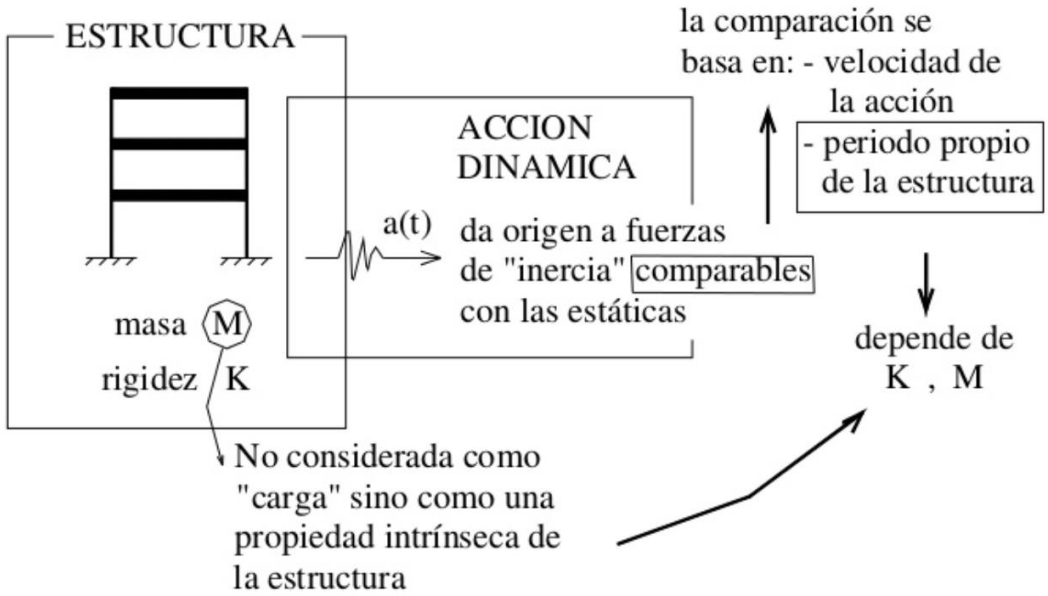

Figura 3-1: Acción dinámica y propiedades de la estructura
Fuente: Cassano, 2009

3.1.1 FRECUENCIA NATURAL

El análisis de la dinámica de estructuras se basa en la comprensión de las vibraciones de una estructura como respuesta a una fuerza aplicada. Este análisis parte desde la simplificación del problema y se inicia con estructuras simplificadas.

La simplificación consiste en modelar el sistema de un grado de libertad como una masa m concentrada soportada por una estructura sin masa, pero con rigidez k en la dirección de análisis. La Figura 3-2 muestra lo descrito anteriormente.

Para determinar cómo es la respuesta de la estructura es necesario conocer el periodo fundamental w_n y para este caso simplificado basta con analizar las vibraciones libres del sistema, es decir, no hay una fuerza externa involucrada.

Para este tipo de vibraciones existen dos casos que dependen de si la estructura posee o no amortiguamiento.

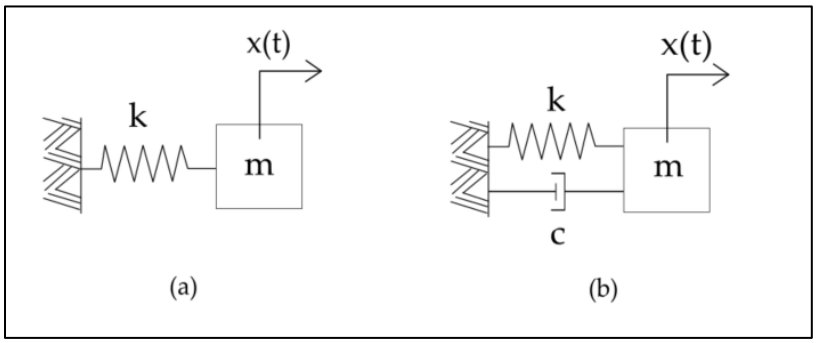

Figura 3-2: Esquema simplificado (a)Sistema sin amortiguamiento; (b) Sistema con amortiguamiento
Fuente: Elaboración Propia

3.1.1.1 Sistemas No Amortiguados

Este tipo de sistema corresponde al mostrado en el esquema (a) de la figura anterior donde no existe un amortiguador que ayude a disipar la respuesta del sistema. El movimiento permitido es solo en la dirección *x(t)* el cual al vibrar libremente se encuentra sometido a las fuerzas mostradas en la siguiente figura.

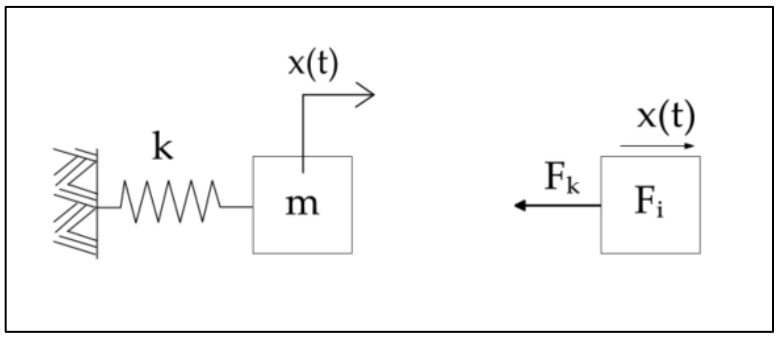

Figura 3-3: Diagrama de cuerpo libre vibraciones libres sin amortiguamiento
Fuente: Elaboración Propia

El modelo mecánico se encuentra sujeto a dos fuerzas de diferente naturaleza. Por un lado, se encuentra la fuerza F_k que es generada por el resorte con rigidez *k*, esta se rige por la ley de Hooke para los resortes la cual aparece al producirse un desplazamiento *x(t)*, esta fuerza se manifiesta en el extremo del resorte, en sentido contrario al desplazamiento.

$$F_k = -k\, x(t) \tag{3-1}$$

Por otro lado, se tiene la fuerza F_i que corresponde la fuerza inercial la cual se basa en la segunda ley de Newton la cual dice que la aceleración a la que se somete el cuerpo para sacarlo de su condición estática es proporcional a la fuerza resultante.

$$F_i = m\,\ddot{x}(t) \tag{3-2}$$

Aplicando equilibrio de fuerzas mostradas en las ecuaciones (3-1) y (3-2) , se obtiene la ecuación diferencial para el modelo de un grado de libertad sin amortiguamiento.

$$m\,\ddot{x} + k\,x = 0 \tag{3-3}$$

La vibración libre se inicia al sacar al sistema de su posición de equilibrio estático, imponiendo a la masa condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad en el tiempo cero definidos como el instante en que se inicia el movimiento.

$$x_0 = x(0) \qquad \dot{x}_0 = \dot{x}(0) \tag{3-4}$$

La solución de la ecuación diferencial homogénea sujeta a estas condiciones se obtiene por los métodos comunes de resolución de este tipo de ecuaciones, donde se obtiene lo siguiente:

$$x(t) = x(0)\,\cos w_n t + \frac{\dot{x}(0)}{w_n}\,\mathrm{sen}\, w_n t \tag{3-5}$$

donde:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3-6}$$

Este tipo movimiento vibratorio es alrededor de su posición de equilibrio estático y que se va repitiendo cada $2\pi/w_n$ segundos. Esta vibración se conoce como movimiento armónico

simple. La Figura 3-4 muestra el comportamiento de este movimiento, los puntos a-b-c-d-e , describen un ciclo de vibración a partir de la posición de equilibrio estático

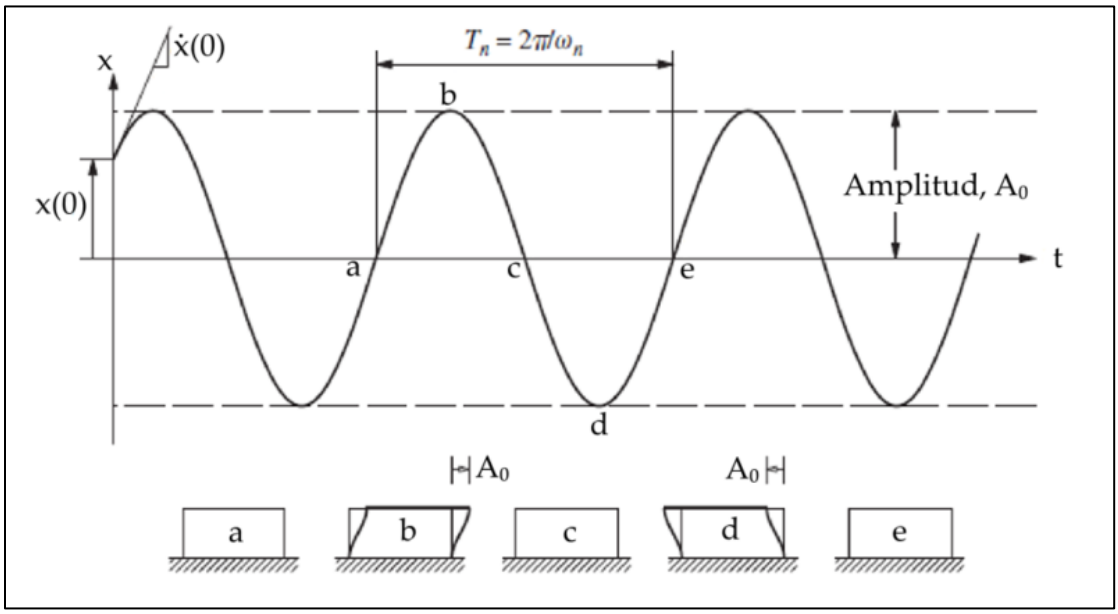

Figura 3-4: Vibración libre de un sistema sin amortiguamiento
Fuente: Chopra , 2012

El tiempo necesario que debe transcurrir para que el sistema no amortiguado complete un ciclo de vibración libre es el periodo natural de vibración del sistema, que se denomina como T_n y que se mide en segundos. Se relaciona con la frecuencia natural de vibración w_n mediante la siguiente ecuación

$$T_n = \frac{2\pi}{w_n} \tag{3-7}$$

Las propiedades de vibración natural solo dependen de la masa y rigidez de las estructuras (ecuación (3-29) y (3-30)). El denominador "natural" se utiliza para recalcar el hecho de que son propiedades naturales del sistema cuando se le permite vibrar sin excitación externa

3.1.1.2 Sistemas Amortiguados

El modelo explicado en el punto 3.1.1.1 resulta extremadamente idealista debido a que todas las estructuras poseen cierto grado de disipación frente a excitaciones. Para este tipo de casos el sistema se modela como el esquema (b) de la Figura 3-2 donde *c* es la constante de amortiguamiento viscoso y la fuerza resultante provocada al sacar el elemento de la condición estática es proporcional a la velocidad y se opone al sentido de la velocidad, se expresa similar a las ecuaciones (3-1) y (3-2).

$$F_c = - c\,\dot{u} \tag{3-8}$$

Al agregar esta ecuación como fuerza, similar a lo que se hizo en la y realizando equilibrio de fuerzas, se obtiene el siguiente diagrama de cuerpo libre.

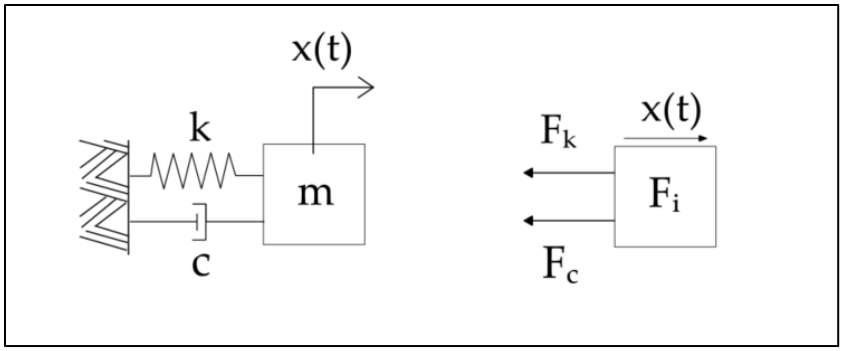

Figura 3-5: Diagrama de cuerpo libre vibraciones libres con amortiguamiento
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, al hacer equilibrio de fuerza se obtiene la ecuación diferencial del sistema con vibraciones libres amortiguado.

$$m\,\ddot{x}(t) + c\,\dot{x}(t) + k\,x(t) = 0 \tag{3-9}$$

La resolución es con los mismos métodos de resolución de la ecuación (3-3), donde la solución del sistema es del tipo:

$$x(t)=a\,e^{\lambda t} \tag{3-10}$$

Donde a y λ son constantes indeterminadas. La inserción de la ecuación (3-10) en (3-9) nos lleva a la ecuación característica.

$$m\,\lambda^2+c\,\lambda+k=0 \tag{3-11}$$

Cuyas raíces son:

$$\lambda_1,\lambda_2=-\frac{c}{2\,m}\pm\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2-\frac{k}{m}} \tag{3-12}$$

Resulta conveniente introducir la definición de amortiguamiento crítico, además de definición de frecuencia natural en la ecuación (3-6), se obtiene una simplificación de los valores característicos.

$$d=\frac{c}{2\sqrt{k\,m}} \tag{3-13}$$

$$\lambda_1,\lambda_2=-d\,w_n\pm w_n\sqrt{d^2-1} \tag{3-14}$$

Para esta solución existe un caso particular que es cuando el amortiguamiento c asume un valor tal que la raíz asociada a los valores característicos adopta valores reales, a este valor se le conoce como amortiguamiento critico c_r.

$$C_r=2\sqrt{k\,m} \tag{3-15}$$

A continuación, ocurren dos casos; el primero es cuando el amortiguamiento es mayor o igual al crítico, esto significa que el valor de c inhibe por completo la oscilación y por otro

lado, se encuentra el caso en que el amortiguamiento es menor al crítico, que son los llamados sistemas sub-amortiguados.

Para el primer caso nombrado en el párrafo anterior, en la actualidad se están aplicando en estructuras sistemas con alto grado de amortiguamiento tales como amortiguadores viscoelásticos o amortiguadores de masa sintonizada que logran disminuir en un gran parte las vibraciones del sistema, sin embargo, este tipo de estructuras con tal respuesta están fuera del alcance de este proyecto de título. Finalmente, esta investigación se enfocará en sistemas sub-amortiguados

La solución para los sistemas sub-amortiguados es la siguiente:

$$x\,(t) = e^{-d\,w_n\,t}\left(A_1\,e^{i\,(w_n\sqrt{1-d^2})\,t} + A_2\,e^{-i\,(w_n\sqrt{1-d^2})\,t}\right) \tag{3-16}$$

En base a la ecuación anterior de introduce la definición de frecuencia natural amortiguada.

$$w_d = w_n\sqrt{1-d^2} \tag{3-17}$$

Considerando la última definición, es posible demostrar que la solución de la ecuación de movimiento puede ser expresada de la siguiente manera.

$$x\,(t) = A\,e^{-d\,w_n\,t}\,\mathrm{sen}\,(w_d + \emptyset) \tag{3-18}$$

Donde:

$$A = \sqrt{A_1^{\,2} + A_2^{\,2}} \tag{3-19}$$

$$\emptyset = \arctan\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \tag{3-20}$$

La solución a este tipo de respuesta es del tipo oscilatoria y converge a la posición de equilibrio estático. La Figura 3-6 muestra gráficamente esta respuesta.

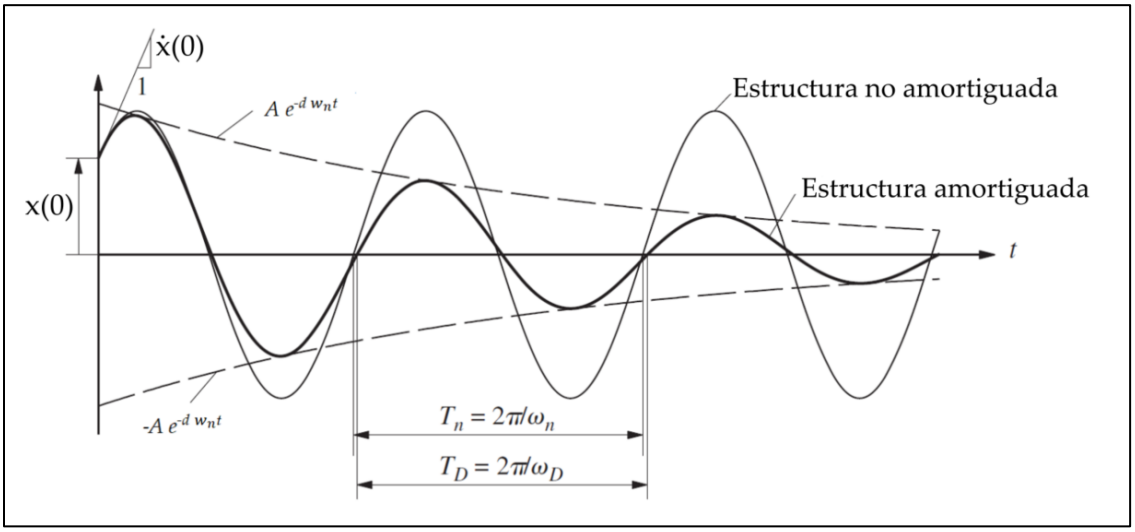

Figura 3-6: Amortiguamiento en vibración libre
Fuente: Chopra , 2012

3.1.1.3 Vibraciones Forzadas

Este punto se incluye en este capítulo para determinar el análisis de la influencia que tiene la frecuencia de excitación de una fuerza de entrada externa por sobre la frecuencia natural de la estructura, para esto se selecciona una fuerza de tipo armónica que debido a su representación trigonométrica ayudará a representar de manera simple y clara el punto que se quiere analizar.

Las fuerzas armónicas pueden ser representadas de forma senoidal o cosenoidal con una amplitud F_0 y una frecuencia de excitación w.

$$f(t) = \begin{cases} F_0 \sin(w\ t) \\ F_0 \cos(w\ t) \end{cases} \tag{3-21}$$

Al realizar el diagrama de cuerpo libre del sistema donde las fuerzas involucradas se muestran en la Figura 3-7, luego del equilibrio de fuerzas se obtiene la ecuación diferencial que controla la vibración forzada armónica del sistema.

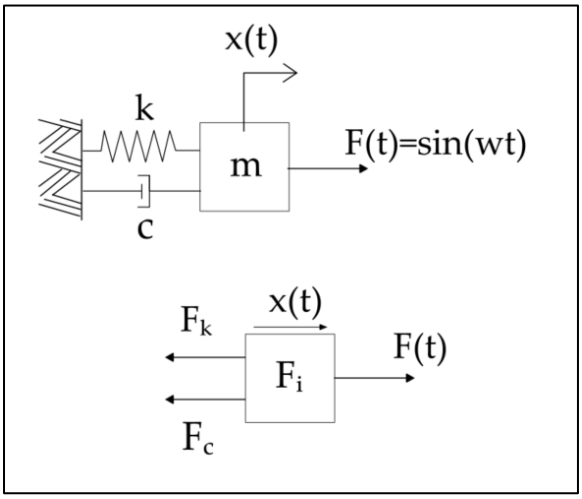

Figura 3-7: Diagrama de cuerpo libre vibraciones forzadas con amortiguamiento.
Fuente: Elaboración Propia.

$$m\ \ddot{x}(t) + c\ \dot{x}(t) + k\,x(t) = F_0 \sin(w\,t) \tag{3-22}$$

Normalizando la ecuación aplicando (3-6) y (3-13) se obtiene lo siguiente:

$$\ddot{x}(t) + 2d\,w_n\,\dot{x}(t) + w_n^2\,x(t) = F_0 \sin(w\,t) \tag{3-23}$$

Para la resolución de la ecuación la respuesta se divide en dos partes, la primera corresponde a la respuesta libre que equivale a resolver el sistema como una ecuación homogénea y encontrar la solución x_H, la segunda corresponde a encontrar la respuesta forzada que es llamada solución particular x_P.

La solución homogénea es similar a la mostrada en (3-18) y la solución particular tiene la siguiente forma

$$x_P(t) = A \sin(w\ t - \psi) \tag{3-24}$$

Donde:

$$A = \frac{F_0/k}{\sqrt{\left(1-R^2\right)^2+(2dR)^2}} \tag{3-25}$$

$$\tan(\psi) = \frac{2dR}{1-R^2} \tag{3-26}$$

Notar que *R* corresponde a la razón entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural. En la Figura 3-8 se presenta la respuesta transiente y estacionaria para una vibración forzada, se puede ver claramente el gran efecto inicial transiente y su decaimiento para pasar a un régimen estacionario controlado por la frecuencia de excitación

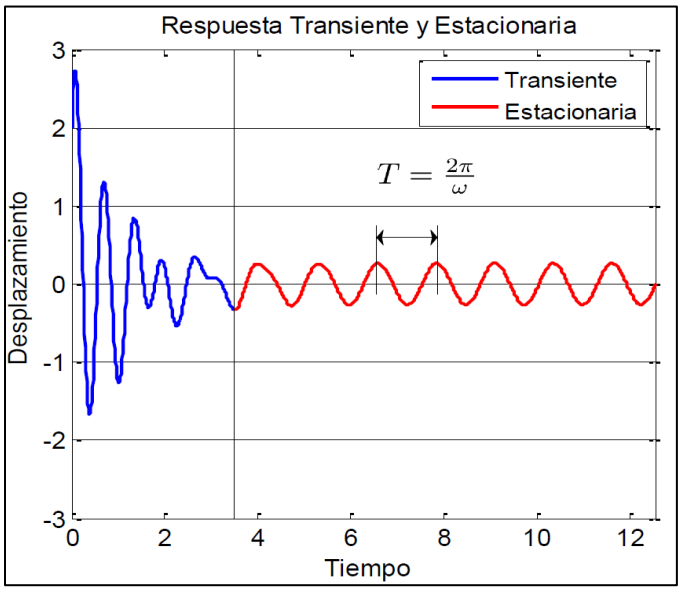

Figura 3-8: Respuesta Vibración Forzada
Fuente: Apunte Dinámica de Estructuras, (Jensen & Valdebenito, 2015)

De la respuesta estacionaria es interesante analizar el comportamiento de la estructura, de ahí es que nace lo que se define como factor de amplificación dinámica *FAD* que

corresponde a la razón entre la amplitud dinámica y la amplitud estática y que finalmente depende de la razón *R* entre frecuencias y la razón de amortiguamiento critico *d.*

$$FAD = \frac{|x_P(t)|}{F_0/k} \tag{3-27}$$

$$FAD = \frac{1}{\sqrt{\left(1-R^2\right)^2+(2dR)^2}} \tag{3-28}$$

Con respecto al FAD se pueden hacer varias acotaciones, para los casos en que la razón entre frecuencias sea pequeña (es decir, la fuerza varía lentamente), el factor de amplificación dinámica es levemente mayor a 1 y la amplitud de la deformación dinámica es en esencia similar a la deformación estática. Por otro lado, si el coeficiente *R* es mayor que $\sqrt{2}$ (Valores de FAD menores a 1), la amplitud de la deformación dinámica es menor a la deformación estática a medida que se va alejando del umbral $\sqrt{2}$ el FAD se vuelve más pequeño y se vuelve cero si *R* tiende a infinito, en otras palabras la fuerza varía rápidamente provocando una vibración pequeña. Finalmente se tiene el caso más importante, que es cuando el coeficiente *R* es cercana a 1 (frecuencia de excitación y natural muy similares), esto implica que el FAD tome valores muy grandes provocando una deformación mucho más grande que la deformación estática.

La frecuencia de resonancia equivale a la frecuencia en la que el FAD es máximo y resulta que ocurre cuando esta frecuencia es igual a la frecuencia natural de la estructura. La amplificación de la respuesta depende a su vez del nivel de amortiguamiento que posea el sistema, esto quiere decir que a mayor amortiguación menor será la respuesta de la estructura a la frecuencia de resonancia. A continuación, se muestra en la Figura 3-9 la respuesta dinámica para diversos amortiguamientos

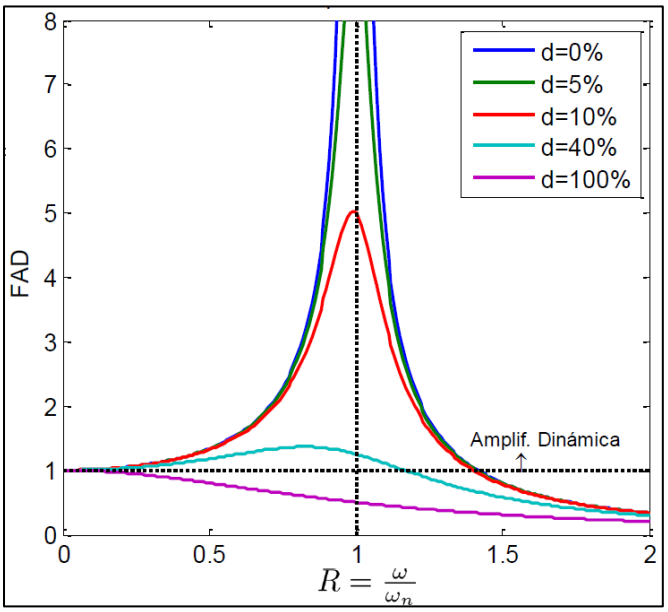

Figura 3-9: Factor de amplificación dinámica para distintos niveles de amortiguamiento
Fuente: Apunte Dinámica de Estructuras, DOOCC UTFSM

Lo explicado anteriormente es de suma importancia en este documento ya que las estructuras presentan sus mayores desplazamientos cuando la frecuencia de excitación se acerca a la frecuencia natural, a mayor desplazamiento implica mayores solicitaciones sobre los elementos y todo esto siempre en torno a las características naturales de la estructura.

3.1.2 MODOS DE VIBRAR

Los sistemas de n grados de libertad tienden a vibrar libremente a las frecuencias naturales, a cada una de estas el sistema vibrará con una deformada determinada a la cual se les denomina modos naturales de vibración. Dependiendo de las condiciones iniciales, el sistema vibra a una u otra frecuencia natural, y por tanto con una u otra deformada. También es el caso en que las condiciones iniciales sean tales que el sistema tienda a vibrar en general con varias frecuencias naturales simultáneamente y con una deformada que sea combinación de los modos naturales de vibración.

Para dar introducción a los modos naturales de vibración se considera como ejemplo un sistema de dos grados de libertad vibrando libremente el cual se muestra en la Figura 3-10,

este sistema se rige bajo una ecuación diferencial por cada grado de libertad y estas se acoplan y se representan de forma matricial.

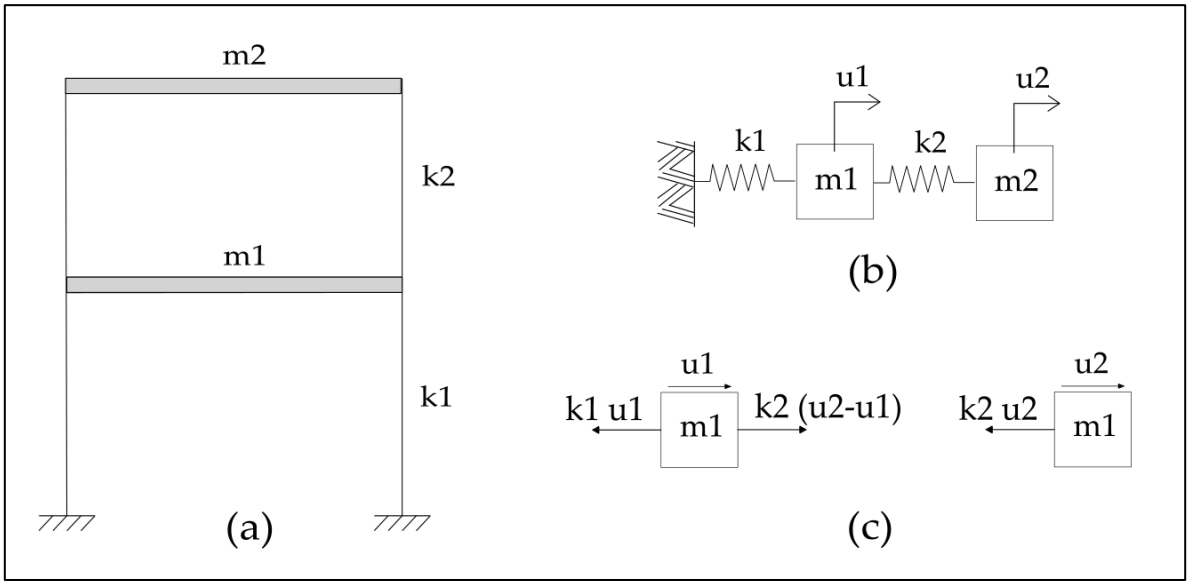

Figura 3-10: Sistema de dos grados de libertad (a) Estructura de dos pisos; (b) Modelo simplificado sin amortiguamiento; (c) Diagrama de cuerpo libre
Fuente: Elaboración Propia

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \{0\} \tag{3-29}$$

De la ecuación anterior se presenta el problema de valor propio cuya solución entrega las propiedades naturales del sistema, para vibración libre la respuesta se escribe como una combinación lineal de funciones q_n y vectores φ_n.

$$u(t) = q(t)_n \, \varphi_n \tag{3-30}$$

Donde q_n corresponde a lo que se conoce como coordenadas normales o principales para *n* grados la que permite desacoplar el sistema de ecuaciones diferenciales, por otro lado, φ_n equivale a la matriz de los modos de vibrar.

Extendiendo del caso de un grado de libertad se describen las coordenadas principales de la forma armónica simple para cada desplazamiento

$$q_n(t) = A_n \cos(w_n t) + B_n \operatorname{sen}(w_n t) \tag{3-31}$$

Al combinar (3-30) y (3-31) y sustituyendo en (3-29) se obtiene la siguiente ecuación en donde φ_n y w_n son incógnitas.

$$\left[-w_n^2 m \ \varphi_n + k \ \varphi_n\right] = q(t)_n \tag{3-32}$$

Esta ecuación se puede resolver de dos formas. Por un lado, cuando $q(t)_n$ es igual a cero implica que el sistema no tiene movimiento, también conocida como solución trivial. Por otro lado, se resuelve el sistema de tal manera que las frecuencias y modos satisfagan la siguiente ecuación algebraica.

$$\left[\mathbf{K} - w_n^2 \mathbf{M}\right] \varphi_n = 0 \tag{3-33}$$

Esta ecuación es la que se denomina problema matricial de valor característico donde la matriz de rigidez y masa son valores conocidos y la ecuación puede representarse como un conjunto de *n* ecuaciones homogéneas que dan como resultado *n* modos, este conjunto para que no tenga soluciones triviales se calcula de la siguiente forma.

$$\det\left[\mathbf{K} - w_n^2 \mathbf{M}\right] = 0 \tag{3-34}$$

Al expandir el determinante se obtiene un polinomio que se conoce como ecuación característica que tendrá tantas soluciones como grados de libertad posea, estas soluciones permiten determinar en primer lugar las frecuencias naturales que para efectos de este punto son los valores propios. Conocidas las raíces de la ecuación característica se puede resolver para cada una la ecuación (3-33) encontrando así su respectivo modo de vibrar que representa la forma en la que vibrara el sistema para una cierta frecuencia.

Utilizando como ejemplo el sistema de dos grados mostrado en la Figura 3-11, se muestran a continuación cualitativamente los modos de vibrar.

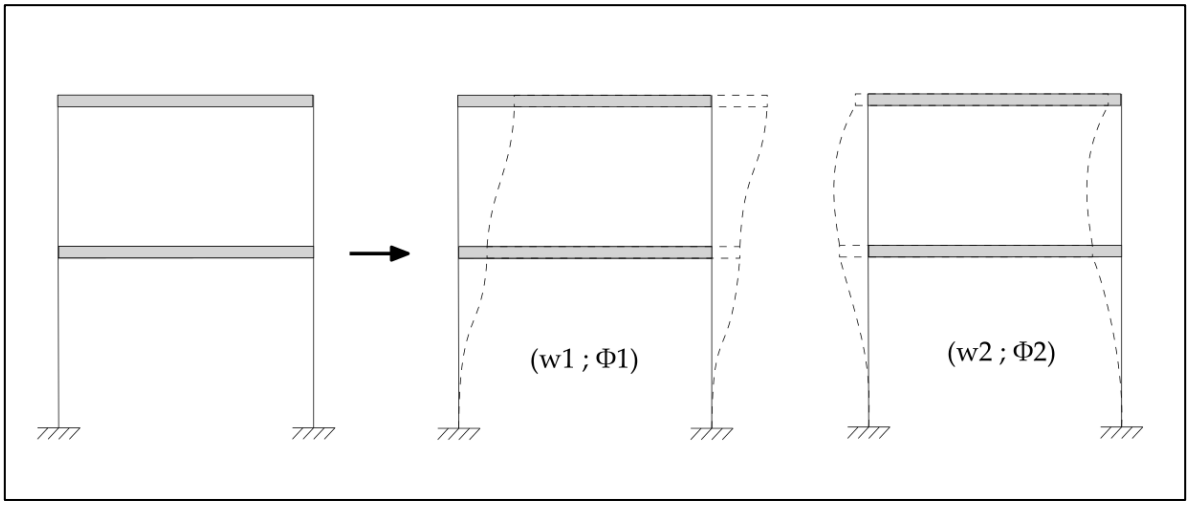

Figura 3-11: Modos de vibrar para sistema de dos grados de libertad
Fuente: Elaboración Propia

Cabe destacar que estos modos no siempre son en una sola dirección, por lo general estos tienen componentes en ambos sentidos generando así lo que se conoce como la deformación torsional. Esta deformación aumenta a medida que el punto de análisis se encuentre más lejano al centro de rigidez de la estructura que se refiere al lugar geométrico donde la estructura solo se desplaza y no rota.

Para efectos de esta investigación son de interés los modos de vibrar que tienen mayor componente traslacional y que por lo general son los modos fundamentales de la estructura.

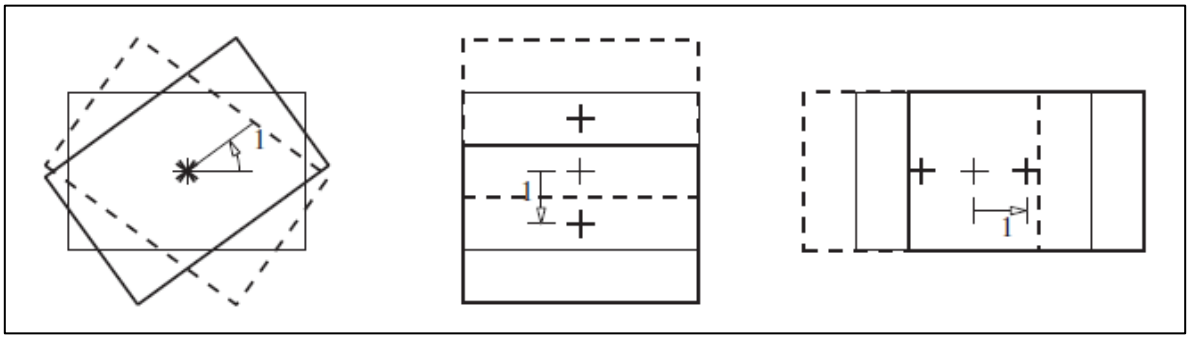

Figura 3-12: Modos de vibrar en planta con componente rotacional y traslacional
Fuente: Chopra , 2012

Estos modos a su vez tienen asociado lo que se conoce como masa equivalente, es decir cada uno tiene un porcentaje diferente de contribución a la respuesta que van asociados a los periodos de mayor masa traslacional por eje.

La masa equivalente para cada modo es igual a la siguiente razón.

$$M_{n\,i} = \frac{L_{n\,i}^2}{M_n} \tag{3-35}$$

Donde:

$$L_{n\,i} = \{\emptyset_n\}^T[M]\{r_i\} \tag{3-36}$$

$$M_n = \{\emptyset_n\}^T[M]\{\emptyset_n\} \tag{3-37}$$

Se observa que para ambos factores se multiplica la matriz de masa del sistema por el modo que se quiere evaluar, la ecuación (3-37) es conocida como la masa modal.

Por otro lado, en la ecuación (3-36) se tiene el subíndice *i* del factor que corresponde a la dirección de análisis que puede ser traslacional o rotacional (x, y, θ), además en el lado derecho de la ecuación se multiplica la matriz de masa por un vector que tiene el número 1 en cada posición correspondiente a los grados de libertad de desplazamiento o rotación en la dirección de análisis, y ceros en todas las otras posiciones. La masa equivalente finalmente entrega cuales son los modos fundamentales.

3.2 ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL

El análisis modal operacional se refiere a la medida de respuesta de la estructura usando el ambiente y las fuerzas de servicio que actúan sobre la misma. Esta se utiliza para encontrar

una descripción modal de la estructura bajo condiciones de operación. En vez de cargar la estructura artificialmente y tratar la excitación ambiental como un ruido no deseado.

Este tipo de análisis sólo mide la respuesta de la estructura debido a las excitaciones ambientales y luego se procesan para obtener la misma información que se puede obtener con el análisis modal tradicional. Se supone que las fuerzas desconocidas se aplican simultáneamente y son tomadas como un ruido blanco, es decir, no es una función de la frecuencia y tiene un espectro con un valor medio constante para cada frecuencia.

Existe una gran cantidad de métodos para realizar este tipo de análisis, pero para efectos de los alcances de esta investigación el de mayor interés corresponde al método Peak Picking.

3.2.1 PEAK PICKING

Este método se desarrolla en el dominio de la frecuencia y debido a su simplicidad y su velocidad de realización corresponde a una de las técnicas más simple y de rápida ejecución conocida para identificar los parámetros modales de estructuras sometidas a vibraciones ambientales.

La teoría tras este método se basa en que la función de respuesta en el dominio de frecuencias alcanza los mayores valores en torno a las frecuencias naturales, donde dichas frecuencias se obtienen simplemente observando la gráfica de la función de densidad espectral promediada y normalizada.

Las frecuencias naturales se determinan como los picos de la función densidad espectral promediada y normalizada, esta función se obtiene básicamente convirtiendo las medidas de aceleraciones al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier discreta. Este hecho ayuda a decidir qué frecuencias se consideran como naturales. En la Figura 3-13 se muestra la gráfica donde se obtienen las frecuencias naturales, que son los picos de dicha

curva. También cabe destacar que hace la suposición de que la respuesta dinámica en los picos de resonancia viene determinada sólo por un modo.

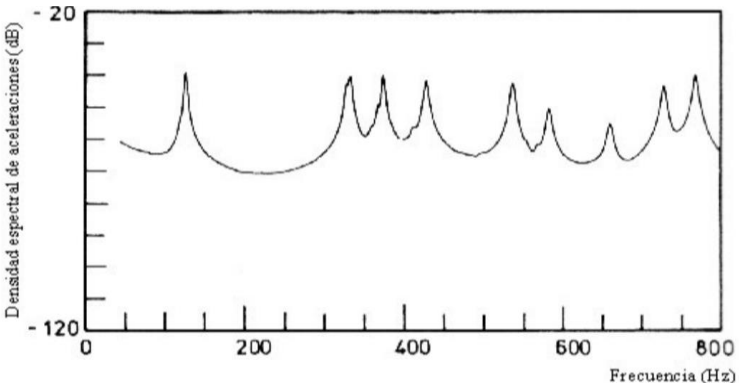

Figura 3-13: Peaks de densidad espectral
Fuente: (Súnico, 2005)

Cabe mencionar que las estimaciones que se realizan por este método son un tanto subjetiva, especialmente si los peaks no se manifiestan de manera contundente por lo que estos resultados siempre tendrán aproximaciones y/o errores. Los errores pueden depender entre otros factores del amortiguamiento de la estructura, de la ventana y el número de mediciones que se emplee para realizar el análisis, del ancho del peak de la frecuencia en relación con la resolución utilizada.

4. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo tiene como finalidad mostrar algunos de los estudios realizados hace unos años que se relacionan al tema principal de esta memoria de título.

El primer estudio que se muestra en este capítulo fue presentado por (Midorikawa, 1990), donde obtuvo una formula empírica para determinar de forma rápida el periodo fundamental de una estructura y además comparó resultados de mediciones de vibraciones ambientales y vibraciones sísmicas.

En segundo lugar, se presenta la investigación de (Michell, Guéguen, & Bard, 2008) donde comparan los periodos fundamentales medidos con el mismo equipo de medición, pero midiendo vibraciones forzadas y vibraciones ambientales.

En tercer lugar, se muestran los resultados de la investigación hecha por (Esquivel Salas & Schmidt Diaz, 2016), donde realizaron mediciones de vibraciones ambientales a edificios de distinta altura con equipo comercial patentado para este tipo de ensayo y obtuvieron parámetros dinámicos mediante la utilización de análisis modal operacional.

Finalmente, se presenta lo realizado por (Gülüm, Hakan , & Kemal , 2017), que en comparación con los otros estudios presentados en este capítulo, este no mide propiedades de estructuras si no que se enfoca en la evaluación del comportamiento de una red de instrumentos de bajo costo utilizando sensores del tipo MEMS para medir vibraciones.

4.1 PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL DE EDIFICIOS EN SANTIAGO Y VIÑA DEL MAR, (MIDORIKAWA, 1990)

(Midorikawa, 1990) utilizó una base de datos de 128 edificios (107 en Santiago y 21 en Viña del Mar) y con esto pudo obtener formulas empíricas para el cálculo del periodo

fundamental de estructuras al relacionarlas con el número de pisos que este tenga. Donde en Chile obtuvo la siguiente expresión

$$P = 0{,}05\ N \tag{4-1}$$

Donde P corresponde a la aproximación del periodo natural de la estructura en segundos y N el número de pisos del edificio. Esta fórmula es de gran utilidad ya que sirve para hacer una aproximación preliminar antes de entrar al detalle del valor exacto del periodo fundamental, la Figura 4-1 presenta los datos medidos de los 128 edificios y de donde se obtuvo la formula mediante regresión lineal.

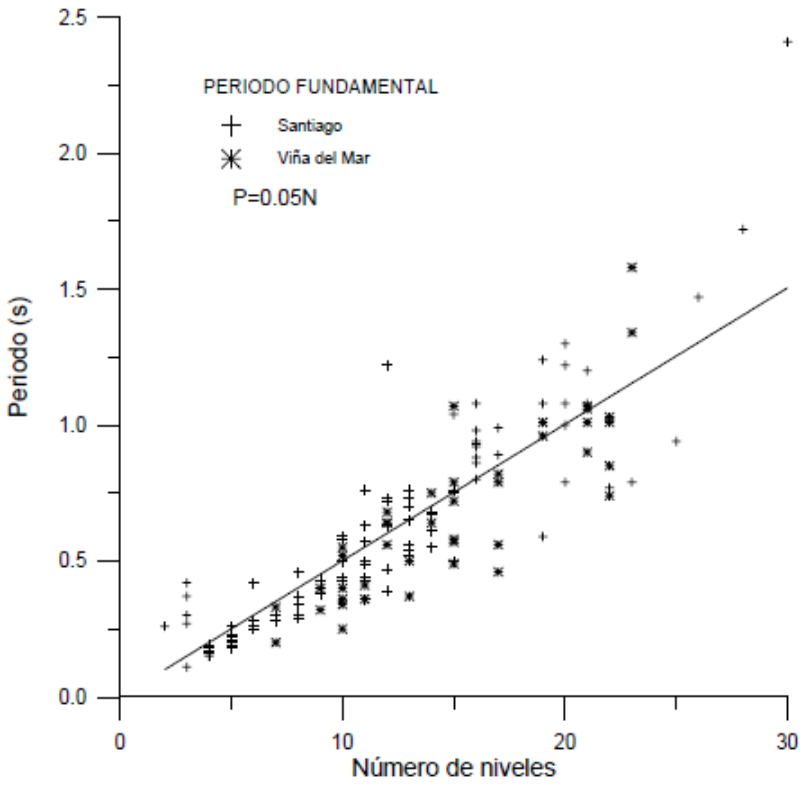

Figura 4-1: Relación entre el periodo natural y el número de pisos
Fuente: Midorikawa (1990)

Además de la obtención de la fórmula para periodos fundamentales, en este estudio se realizó un análisis de periodos para diversas magnitudes de aceleraciones donde se comparó mediante una razón entre periodos obtenidos a partir de vibraciones sísmicas y vibraciones ambientales. Se observa que el periodo durante un terremoto es en promedio 20% mayor cuando la aceleración es de 60 a 200 cm/s^2, y para aceleraciones mayores a las anteriores la razón de periodos se incrementa abruptamente, lo que sugiere que la rigidez de los elementos no estructurales contribuye a la rigidez total del edificio a un nivel de amplitud de vibración ambiental, mientras que estos mismos elementos no interfieren en la rigidez de la estructura a niveles de amplitud mayores.

Por ende, se obtiene que el análisis de vibraciones ambientales da una buena aproximación de la respuesta para aceleraciones menores a 200 cm/s^2.

En base a lo anterior, para el rango de aceleraciones establecidos se obtiene la Figura 4-3, que relaciona los periodos de vibraciones forzadas y ambientales, en el cual se aprecia que las diferencias son mínimas.

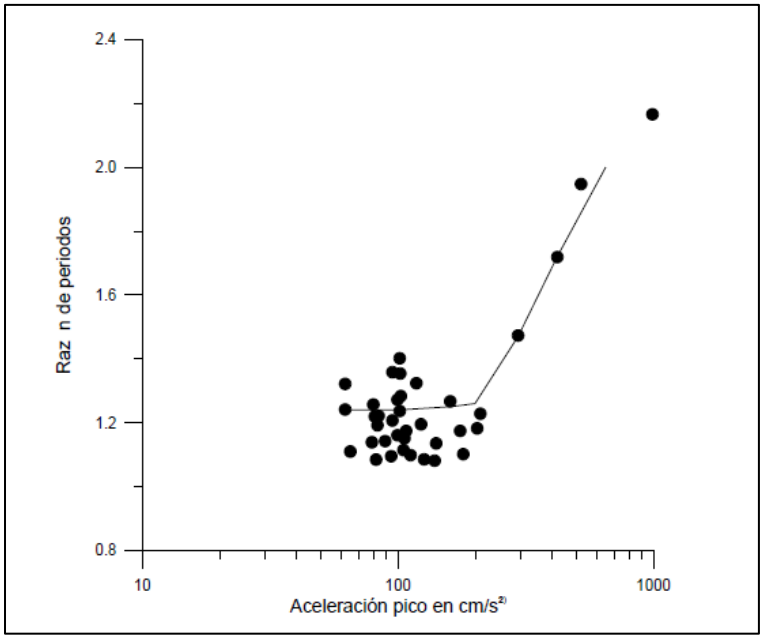

Figura 4-2: Razón de periodos a partir de excitaciones sísmicas y vibraciones ambientales
Fuente: Midorikawa (1990)

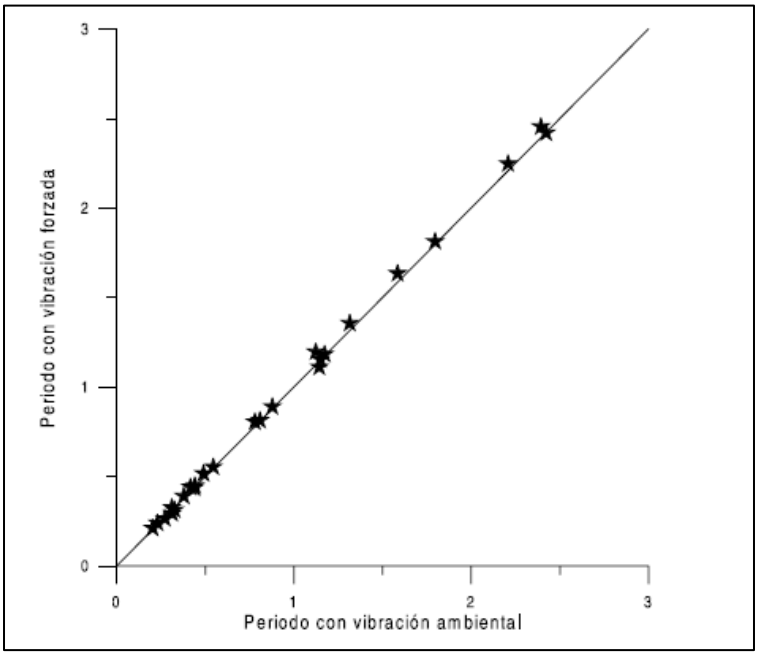

Figura 4-3: Comparación de periodos obtenidos con vibración forzada y ambiental
Fuente: Midorikawa (1990)

4.2 PARÁMETROS DINÁMICOS DE LA ESTRUCTURA EXTRAÍDA DE LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES, (MICHELL, GUÉGUEN, & BARD, 2008)

Esta investigación fue realizada el año 2008 en Francia, y consistió en el estudio de un edificio de hormigón armado de nueve pisos al cual se le pretendía obtener los parámetros dinámicos. La obtención de estos parámetros puede ser útil como por ejemplo para calibrar las propiedades elásticas para el modelado numérico o detectar cambios en su comportamiento debido a envejecimiento de la estructura o calidad de los materiales usados para la construcción.

La identificación se estos parámetros se realizaron midiendo la respuesta de la estructura usando vibraciones ambientales para dos situaciones, la primera corresponde a la medición

de vibraciones generadas por el uso normal del edificio, la segunda situación como forma de comparación que se enfoca en la respuesta de la estructura debida a la demolición de un puente ubicado a 40 metros del edificio que simula un pequeño temblor.

En la Figura 4-4 se muestra la disposición de los instrumentos de medición donde se eligieron dos series de mediciones de 15 minutos cada uno a una frecuencia de muestreo de 200 Hz, además se mantuvieron los sensores de los dos últimos pisos como referencia, que es donde se genera las mayores amplitudes.

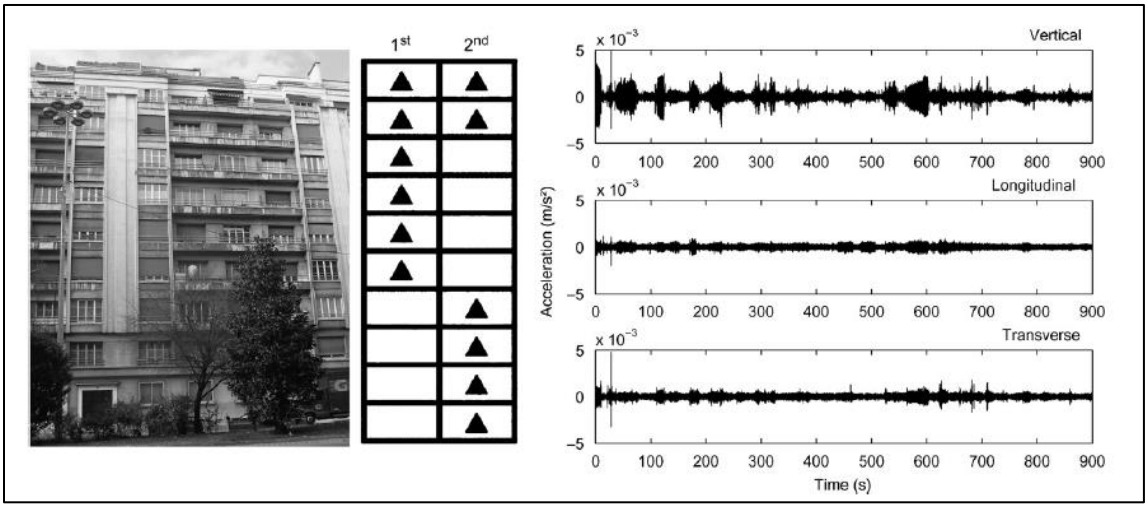

Figura 4-4: Izquierda: Esquema de posición de instrumentos de medición; Derecha: Aceleración de respuesta en base a las vibraciones ambientales del piso 8
Fuente: (Michell, Guéguen, & Bard, 2008)

En cuanto a la segunda alternativa en la Figura 4-5 se muestra la respuesta de la estructura debido a este pequeño temblor provocado por la demolición del puente, en donde se puede ver el peak de aceleración que se provoca al inicio del gráfico.

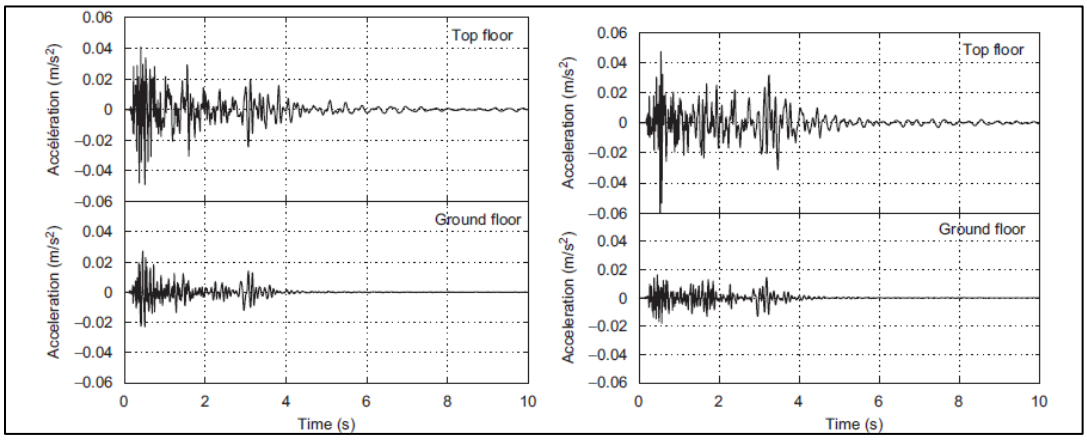

Figura 4-5: Aceleración de respuesta producto de la demolición del puente, Izquierda: dirección longitudinal; Derecha: dirección transversal
Fuente: (Michell, Guéguen, & Bard, 2008)

En base a estas dos alternativas se compararon los resultados obtenidos y que se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 4-1: Comparación de frecuencias para ambas alternativas

Modo	F (Hz)		Variación (%)
	Vibraciones Ambientales	Demolición Puente	
1	2,28	2,27	-0,4
2	2,73	2,75	0,7
3	4,74	4,77	0,6
4	8,69	8,46	-2,6

Fuente: (Michell, Guéguen, & Bard, 2008)

De la tabla anterior se puede rescatar que el análisis de la respuesta en base a vibraciones ambientales que, a pesar de tener una baja magnitud, los resultados de parámetros dinámicos son comparables con la medición a la respuesta de una vibración que en esencia es forzada (demolición puente cercano). Por lo tanto, la medición de este tipo de vibraciones da resultados confiables.

4.3 MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES EN TRES EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO DE 28, 11 Y 6 PISOS, (ESQUIVEL SALAS & SCHMIDT DIAZ, 2016).

El estudio realizado por estos investigadores se centró en la medición de vibraciones ambientales en edificios de diferente altura ubicados en San José de Costa Rica utilizando equipo de alto rendimiento para este tipo de prueba.

La metodología utilizada fue, por un lado, la medición en simultaneo en pisos diferentes (piso superior, intermedio e inferior) y por otro, dos o más aparatos captando la respuesta en el mismo piso.

Los equipos de medición se sincronizaron entre sí mediante un sensor GPS y son del tipo fuerza balanceada y estado sólido, ambos utilizados comúnmente en este tipo de pruebas, las especificaciones técnicas de cada instrumento se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 4-2 Especificaciones instrumentos de medición

Marca	Nanometrics	Reftek
Modelo	Titan SMA	130-SMA
Sensores	Triaxiales Tipo FBA	Triaxiales Tipo Estado Solido
Frecuencia de Muestreo	200 Hz (0,005 s)	200 Hz (0,005 s)
Escala Completa	4g	4g
Componentes adicionales	GPS, batería y cable de red.	GPS, batería, fuente de poder y cable de red.

Fuente: (Esquivel Salas & Schmidt Diaz, 2016)

El resultado del edificio que se muestra a continuación solo se ensayó una sola vez y se obtuvieron los parámetros dinámicos de la estructura mediante software que pueden procesar señales con la trasformada discreta de Fourier.

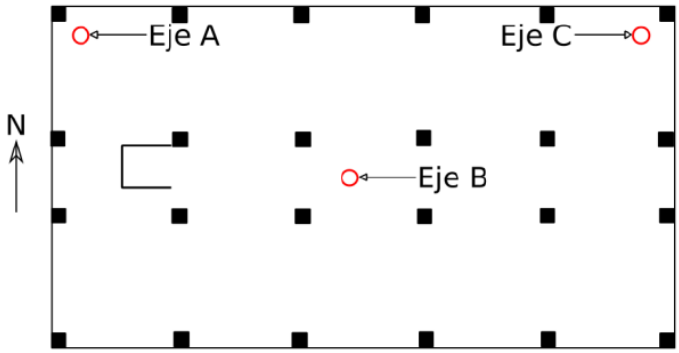

Figura 4-6: Planta de edificio y posición de instrumentos
Fuente: (Esquivel Salas & Schmidt Diaz, 2016)

Para la obtención de los parámetros dinámicos hicieron uso del programa GEOPSY, al cual se le puede insertar la señal y elegir qué tipo de análisis hacer.

El primer análisis que realizaron fue mediante los espectros de Fourier, que consiste en llevar al dominio de frecuencia la señal de respuesta medida, y en este caso solo basta con obtener los espectros de todas las mediciones orientadas en un mismo eje, independiente del piso en el que se encontró.

El segundo análisis realizado fue en base a la función de transferencia, que consiste en relacionar la medición de un piso con respecto a una referencia que en este caso siempre será el primero que es el que tiene una menor respuesta.

De estos dos análisis se obtienen los picos de cada grafico (Peak Picking) donde cada uno corresponde a la manifestación de un periodo fundamental de la estructura. En la Figura 4-7 se muestran los espectros obtenidos, donde se aprecian claramente los periodos que predominan en la estructura.

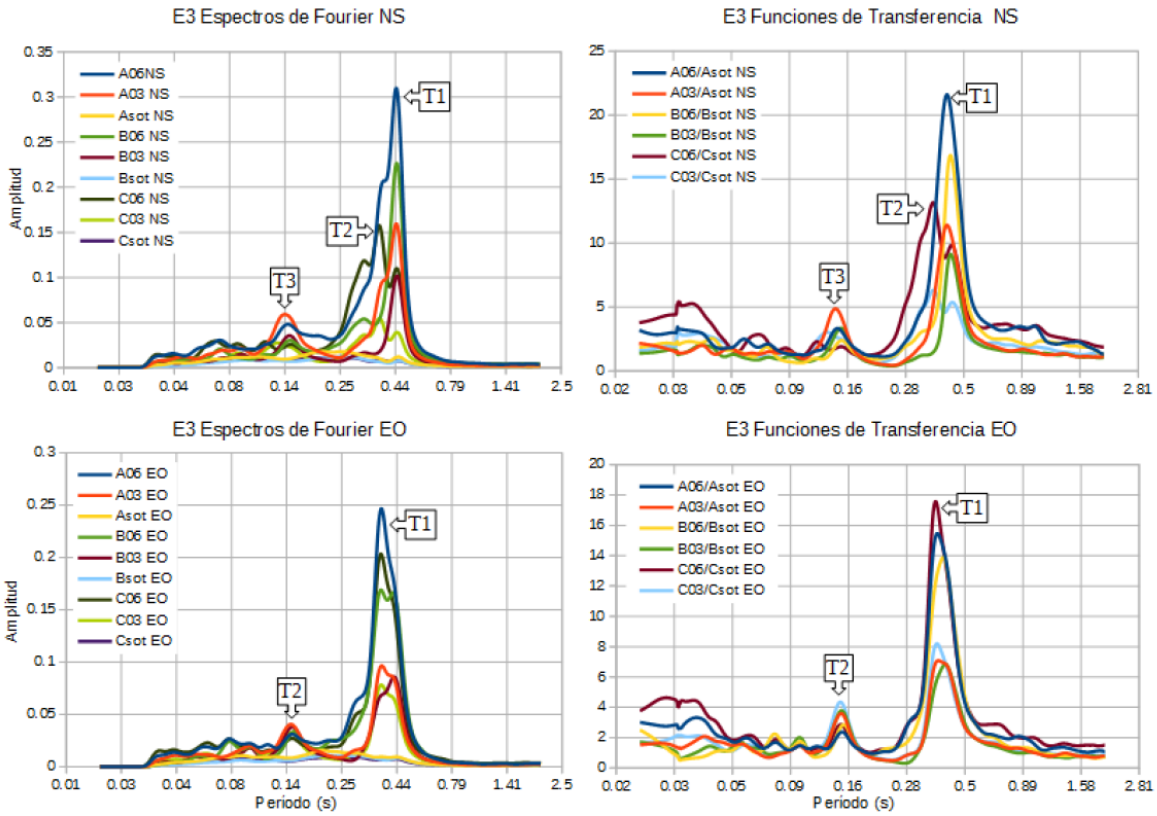

Figura 4-7: Resultado obtenido de uno de los edificios medidos, Izquierda: Espectros de Fourier; Derecha: Función de Transferencia

Fuente: (Esquivel Salas & Schmidt Diaz, 2016)

4.4 CONFIABILIDAD DE ACELERÓMETROS MEMS PARA MAPEO INSTRUMENTAL DE INTENSIDAD DE TERREMOTOS, (GÜLÜM, HAKAN , & KEMAL , 2017)

La investigación a la que se hace referencia estudió el comportamiento de instrumentos de bajo costo para medir vibraciones los cuales utilizan sensores con tecnología MEMS para así aprovechar el avance tecnológico en este ámbito y evaluar su desempeño. Para el análisis hicieron uso de dos modelos de sensores donde sus características se muestran en la Tabla 4-3. Los resultados obtenidos son comparados con un sensor de fuerza balanceada que se caracterizan por tener buenos resultados, pero una de sus grandes desventajas es el alto costo de cada uno.

Tabla 4-3 Especificaciones técnicas sensores MEMS

Nombre Sensor	ST LIS344ALH	SD Modelo 1521
Clasificación ANSS	C	B
Rango Sensor	±2 [g]	±2 [g]
Densidad de Ruido	≤ 50 [μg/(Hz)$^{1/2}$]	≤ 5 [μg/(Hz)$^{1/2}$]
Voltaje (Vdd)	2.4 - 3.6 [V]	4.75 - 5.25 [V]
Sensibilidad	Vdd/5 [V/g]	2000 [mV/g]
No Linealidad	±0.5 [%FS]	0.15
Frecuencia	-	0-400 [Hz]
Temperatura de Trabajo	-40 - +85 [°C]	-55 - +125 [°C]
Digitalizador	ADC 24 Bit, Hasta 200 Hz de frecuencia de muestreo	

Fuente: (Gülüm, Hakan , & Kemal , 2017)

La evaluación de los sensores se realizó bajo excitaciones escaladas dentro de los límites de medición de los sensores de tres grabaciones de terremotos. Los tres sensores son montados en una mesa vibratoria que contiene las grabaciones nombradas anteriormente y se realizan 45 pruebas en total de 35 segundos de duración.

Para comparar resultados se observa el grafico resultante de aceleración de cada sensor y los pseudo-espectros de desplazamiento de cada medición.

En la Figura 4-9 y Figura 4-10 se presentan los resultados de las vibraciones armónicas a las que fueron sometidos los sensores las grabaciones de terremotos, se puede rescatar de la figura la gran similitud tanto en respuesta de aceleración como en espectro de desplazamiento.

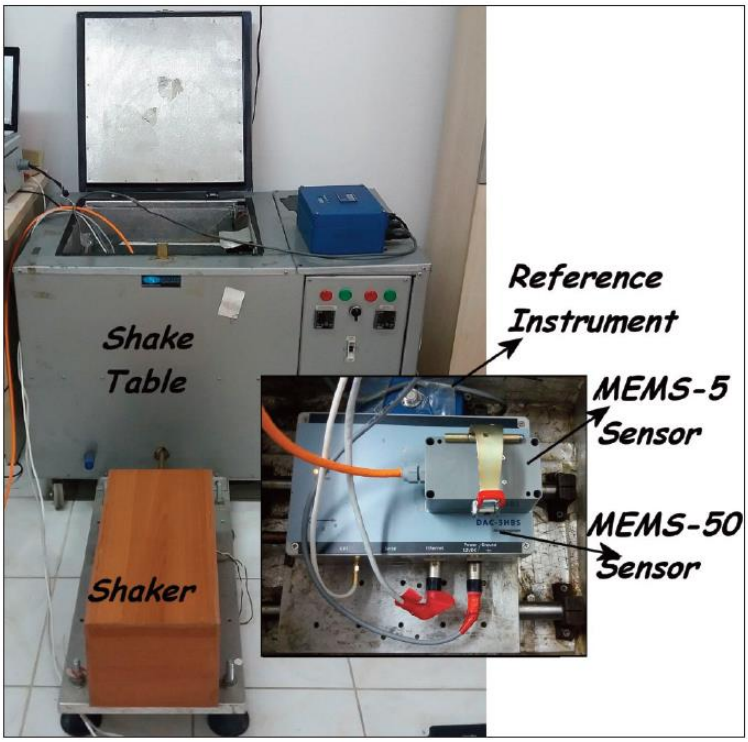

Figura 4-8: Mesa Vibratoria Uniaxial con sensores en su interior
Fuente: (Gülüm, Hakan , & Kemal , 2017)

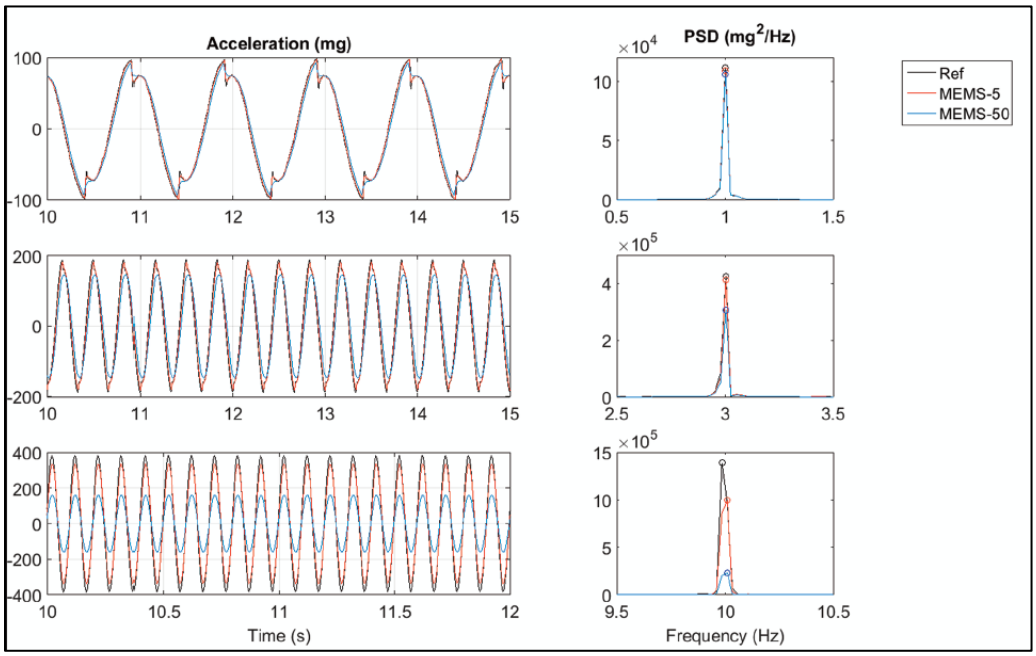

Figura 4-9: Respuesta de instrumentos a señales armónicas de 1, 3 y 10 Hz
Fuente: (Gülüm, Hakan , & Kemal , 2017)

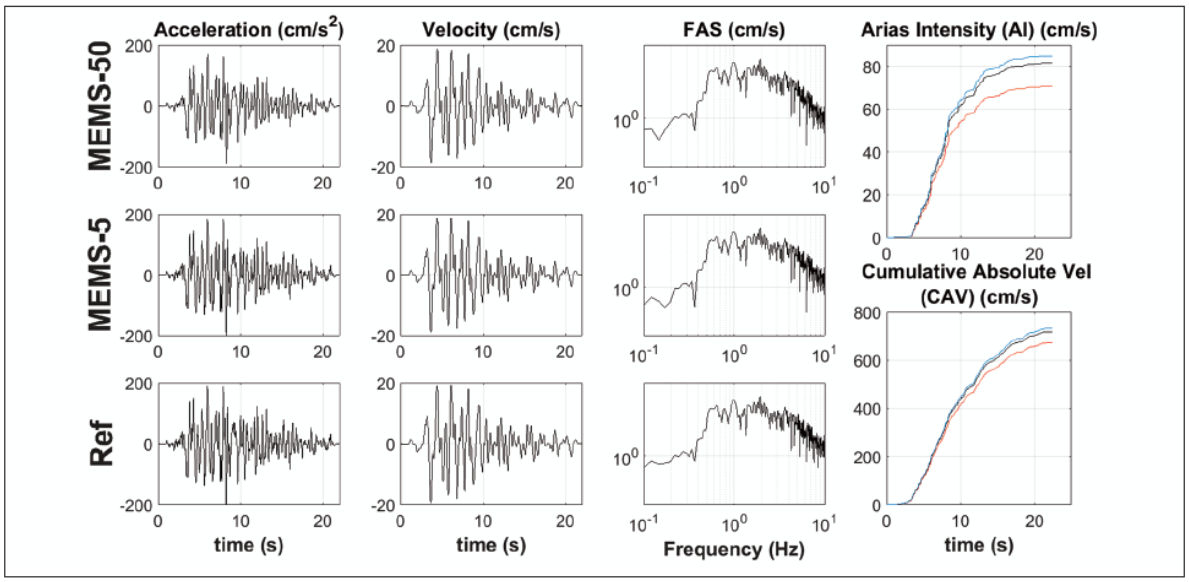

Figura 4-10: Respuesta frente a grabaciones de terremotos
Fuente: (Gülüm, Hakan , & Kemal , 2017)

En este estudio, la funcionalidad de los dos tipos de sensores MEMS fue relativamente exitosa ya que ambos presentan resultados bastante coherentes tanto en los barridos de

frecuencia como en las mediciones de movimientos fuertes. Alguno de los problemas que se obtuvieron es que comparado con el sensor de fuerza balanceada los sensores de bajo costo subestimaron la respuesta a medida que la frecuencia iba en aumento, esto de cierta manera no es tan problemático ya que, si presenta una forma similar, pero en menor magnitud, se pueden obtener datos de calibración.

Finalmente se puede concluir que a pesar de que esta nueva tecnología MEMS anda alrededor de un 70% más barato que los sensores de fuerza balanceada presentan buenos resultados comparados frente a frente, de todas formas, se debe determinar el rango de funcionamiento para la aplicación que se quiera dar.

5. DESARROLLO INSTRUMENTAL

El propósito de este capítulo es explicar la selección de cada componente necesario para generar un equipo robusto de medición de vibraciones en terreno que posea las siguientes ventajas competitivas en comparación a un equipo estándar comercial:

- Bajo costo, mediante la utilización de componente convencionales económicos, de fácil adquisición, ya sea en empresas nacionales o internacionales.
- El sensor tiene que detectar y registrar las vibraciones de las estructuras dentro un rango de 0,1 Hz a 100 Hz.
- Debe poder capturar señales triaxialmente.
- Los datos deben ser accesibles a través de una conexión inalámbrica después de las pruebas realizadas. Además, los datos registrados tienen que ser almacenados en el propio artefacto
- Todos los sensores en caso de utilizar más de uno deben estar sincronizados. Por lo tanto, dicha sincronización debe poder hacerse remotamente mediante el mismo sistema inalámbrico de conexión
- Autonomía suficiente para realizar una cantidad razonable de mediciones

Las características nombradas en los puntos anteriores son relevantes ya que en primer lugar poder prescindir del cableado necesario para la conexión de cada instrumento es una gran ventaja debido a que la instalación sería casi inmediata y obstaculizaría en menor medida la zona en donde se esté midiendo. En segundo lugar, al tener autonomía eléctrica y conexión remota se pueden manejar dichos instrumentos desde un servidor remoto pudiendo así procesar al instante los resultados obtenidos.

A continuación, se presentan y se definen los distintos elementos electrónicos que componen el equipo desarrollado.

5.1 GEÓFONOS

Elemento utilizado generalmente para la prospección del suelo, son elementos que toman la señal de entrada que puede ser desplazamiento, velocidad o aceleración y los convierte en una señal de energía eléctrica proporcional a la señal de excitación mecánica y que puede ser medida con artefactos electrónicos. El funcionamiento de este tipo de aparato es en base a diferenciales eléctricos los cuales se generan al por el movimiento de una masa al interior este.

A pesar de que este tipo de equipo como se dijo en el párrafo anterior son usados generalmente para prospección de suelos, estos se presentan en un amplio espectro de frecuencias y magnitudes con características técnicas adecuadas para la medición de micro vibraciones en general.

Existen 3 tipos de geófonos, los capacitivos, piezoeléctricos y electromagnéticos. El nombre de cada geófono deriva de su función: los capacitivos entregan una señal proporcional al desplazamiento de la masa, los piezoeléctricos trabajan con la aceleración al detectar un cambio de posición de la masa creando así un diferencial de potencial y finalmente los geófonos electromagnéticos, que detectan la velocidad a través del movimiento de una bobina suspendida por resortes en un campo magnéticos que es producido por un imán, la cual genera un diferencial de voltaje que será proporcional al fenómeno físico estudiado. De estos tres de seleccionan los geófonos del tipo electromagnéticos. En la Figura 5-1 se muestra el esquema y funcionamiento de este tipo.

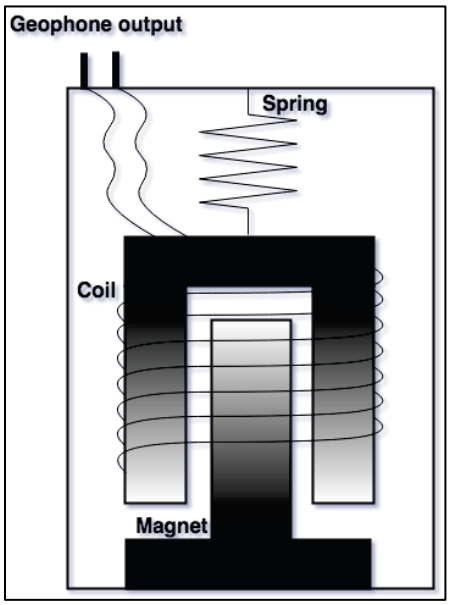

Figura 5-1: Estructura Geófono
Fuente: Internet

Para la selección del tipo de geófono se utiliza un estudio realizado por (Dai, y otros, 2015) donde realizan la comparación de ruido natural de geófonos de diferentes frecuencias al analizar los PSD (Power Spectrum Density) obtenidos para mediciones de ruido ambiental, en la figura de abajo se muestran dichos resultados que además incluyen las curvas NLNM y NHNM que corresponden al ruido sísmico para niveles bajos y altos respectivamente, por otra parte, también se incluyen registros estadísticos de ruido sísmico del Centro de Redes de Terremotos de China (CENC).

De la figura, se puede rescatar que para el rango de frecuencias de interés, un geófono de 2 Hz posee niveles de ruido por debajo de la curva NLNM pero como el foco de este desarrollo instrumental es bajar los costos de construcción, se opta por un geófono de 4,5 Hz el cual tiene una menor dimensión y menor costo en comparación a uno de versión 2 Hz y además posee niveles de ruido aceptable, que en primera instancia su interferencia con las mediciones serán en menor magnitud.

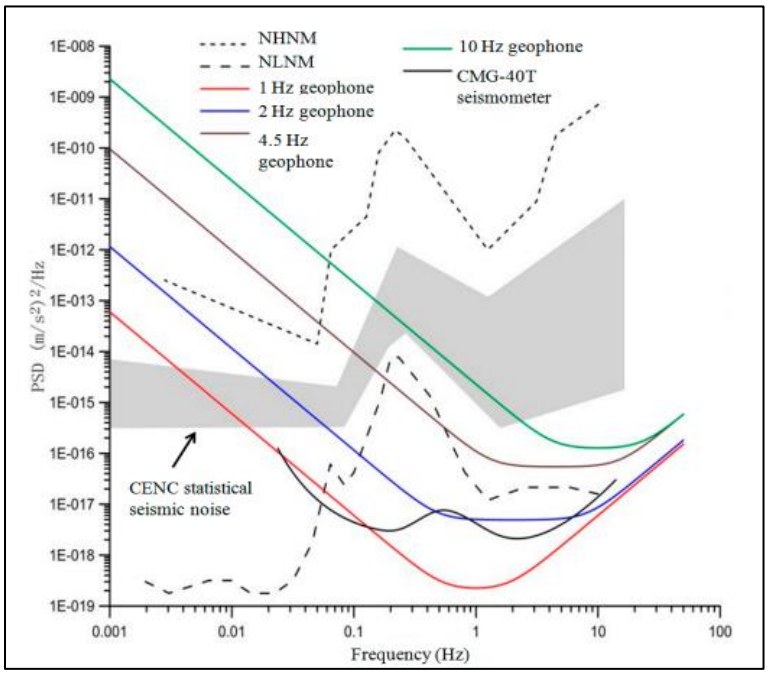

Figura 5-2: Comparación de PSD de cuatro geófonos y el sismómetro CMG-40T

Fuente: (Dai, y otros, 2015)

Finalmente se optan por geófonos de la marca RT Clark modelo 4,5 Hz donde sus características se ven resumidas en la Tabla 5-1, esto aplica tanto para los geófonos verticales y horizontales.

Tabla 5-1 Características Geófonos RT Clark 4,5 Hz

Frecuencia natural [Hz]	4.5 ± 0.5
Sensibilidad [V/m/s]	23,4 ± 10%
Resistencia de bobina [Ω]	395 ± 5%
Coeficiente de amortiguación	0.7 ± 10%
Distorsión armónica	≤ 0.3%
Masa inercial [g]	11
Temperatura de operación [°C]	-40 ~ 100
Peso [g]	89
Diámetro [mm]	25.4
Altura [*mm*]	33.3

Fuente: Catálogo RT Clarck

5.2 ACELERÓMETROS

Elemento utilizado para la medición de aceleraciones. Estos dispositivos electromecánicos detectan las fuerzas de aceleración, ya sean estáticas (gravedad) o dinámicas (vibraciones y movimientos) y son capaces de medir en los tres ejes en unidades de metro por segundo al cuadrado [m/s^2].

Entre los tipos de acelerómetros que existen se encuentra en primer lugar el tipo mecánico el cual es el más simple y que consta en una masa inerte y resortes elásticos. En este tipo de acelerómetro los cambios se miden con galgas extensiométricas e incluyendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación. En este tipo, una o más galgas extensométricas hacen de puente entre la carcasa del instrumento y la masa inercial, la aceleración produce una deformación de la galga que se traduce en una variación en la corriente, la deformación es directamente proporcional a la aceleración aplicada al acelerómetro.

En segundo lugar, están los sensores del tipo capacitivos los cuales modifican la posición relativa de las placas de un micro condensador cuando se somete a aceleración, este movimiento genera una variación en su capacidad. Este tipo de acelerómetro basa su funcionamiento en la variación de la capacidad entre dos o más conductores entre los que se encuentra un dieléctrico. Este tipo de acelerómetros son extremadamente resistentes, pueden soportar aceleraciones de 30000g lo cual permite usarlo en mediciones de aceleración en pruebas de impacto.

En tercer lugar, se encuentran los de tipo piezoeléctrico el cual se basa como su nombre lo dice en el efecto piezoeléctrico y son probablemente de los más usados en la medida de vibraciones. Su principal inconveniente radica en su frecuencia máxima de trabajo y en la incapacidad de mantener un nivel permanente de salida ante una entrada continua. El funcionamiento de este tipo de acelerómetros se basa en las propiedades de los cristales

piezoeléctricos. Estos cristales cuando son sometidos a alguna fuerza producen una corriente eléctrica, a causa de la variación de su estructura cristalina.

Finalmente están los sensores microelectromecánicos, los cuales son compactos, eficientes y se fabrican mediante técnicas de circuitos integrados que contienen unas estructuras muy finas de silicio que se desplazan una fracción de milésima de milímetro, en función del movimiento de la carcasa, provocando una alteración de sus propiedades eléctricas que pueden medirse y convertirse en flujo de datos.

Actualmente los instrumentos que se utilizan y de alta confiabilidad ya que entregan información certera son basados en el tipo piezoeléctrico, ya que estos tienen una respuesta de salida muy similar a la señal de entrada para las frecuencias de interés en el caso de vibraciones ambientales, además la señal de salida del artefacto se puede digitalizar para su procesamiento inmediato. Por otro lado, las desventajas de este tipo de sensor es que capturan la vibración en una sola dirección por lo que, si se quiere realizar una medición en las tres direcciones, necesitaremos tres de ellos. Otro de los puntos en contra para estos sensores es el tamaño y la cantidad de energía que necesitan para su funcionamiento lo que dificulta su portabilidad y manejo, finalmente cabe destacar que los sensores piezoeléctricos tienen el precio más alto en el mercado.

Dicho lo anterior, este proyecto de título nace en busca de una alternativa a los problemas de los sensores piezoeléctricos, por lo tanto, como solución se decide por utilizar los acelerómetros tipo MEMS debido a su gran versatilidad y fácil adquisición, el modelo seleccionado es de la marca Analog modelo ADXL 355 donde alguna de las ventajas que pueden destacarse de este sensor son las siguientes:

- se puede programar el amplificador y convertidor analógicos a digitales para así ayudar a la reducción de ruido global del sistema.
- Gracias a la nanotecnología implementada en ellos resultan sensores de tamaño pequeño

- Capacidad de captar señales en 3 direcciones y
- Costo de adquisición es muy bajo con respecto a los sensores de alta gama.

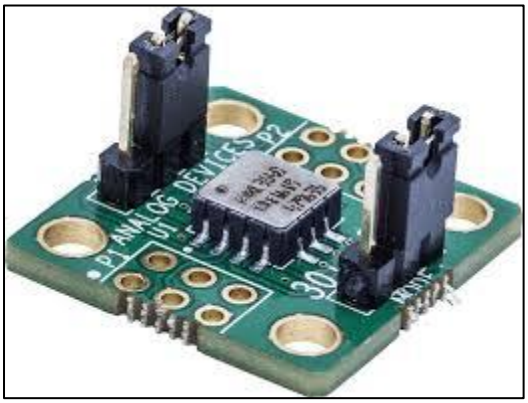

Figura 5-3: Acelerómetro Triaxial Analog ADXL 355
Fuente: Pagina web Analog Devices

En la siguiente tabla se presentan las características técnicas del modelo de acelerómetro seleccionado.

Tabla 5-2 Características Técnicas Acelerómetro Triaxial Analog ADXL 355

Escala de Aceleración	± 2g
Resolución	3.9 μg/LSB
Ancho de Banda	395 ± 5%
Ruido	25 μg/√Hz
Voltaje	2.5 V
Ancho de Banda	1500 Hz
Sensibilidad	400 mV/g

Fuente: Catálogo ADXL 355

5.3 DIGITALIZACIÓN SEÑAL ANALÓGICA

Para hacer posible el procesamiento de las señales registradas, se utiliza un dispositivo electrónico llamado conversor analógico-digital o ADC que convierte una señal analógica en una señal digital mediante la discretización de la señal original. Esta conversión se realiza debido a que el mecanismo del geófono transforma las ondas mecánicas en ondas eléctricas, lo cual se traduce en un voltaje en el tiempo que no puede ser procesado directamente sin

el paso a lenguaje binario. Para el caso del acelerómetro este incluye dentro de sus características técnicas esta digitalización por lo que solo basta programar y calibrar correctamente el sensor.

El proceso de digitalización de señal analógica posee los siguientes pasos:

1) Muestreo: consiste en realizar de forma periódica medidas de la amplitud de la señal captada a una razón de muestro definida.
2) Cuantización: Proceso de convertir los valores continuos en valores discretos. La resolución es medida en bit. De esta manera, a mayores bits, mejor será la resolución de la señal discreta en comparación con la señal original
3) Codificación: Representación numérica de la cuantización, donde generalmente se utiliza código binario.

El ADC elegido para este propósito corresponde a un ADS1115 de 16 bits de resolución y una razón de muestreo de hasta 860Hz. La ventaja de este dispositivo es que tiene un amplificador de ganancia programable (Programmable Gain Amplifier o PGA) hasta x16 integrado al chip, permitiendo que las salidas proporcionadas por los geófonos sean manejables.

La razón de muestreo que se le asigna al ADC queda determinada por el Teorema de Nyquist el que dice que, para reconstruir una señal analógica a partir de datos digitales, se debe digitalizar una señal analógica de "x" Hz con una frecuencia de muestreo mínima de "2x" Hz. Considerando las características de nuestra aplicación estaremos en un rango de trabajo entre 0.1 y 100 Hz, con señales de bajas amplitudes (microtremores) donde será de gran importancia los peaks que se generen a lo largo de la medición por lo que al digitalizar la señal captada se establece una frecuencia de muestreo de 250Hz lo cual nos da una resolución razonable de la señal y suficiente para no perder estos peaks de energía, además para efectos prácticos esta frecuencia de muestreo no genera una elevada carga al momento de procesar y almacenar información.

En la Figura 5-4 se muestra el esquema de conexión de los sensores y ADC elegidos.

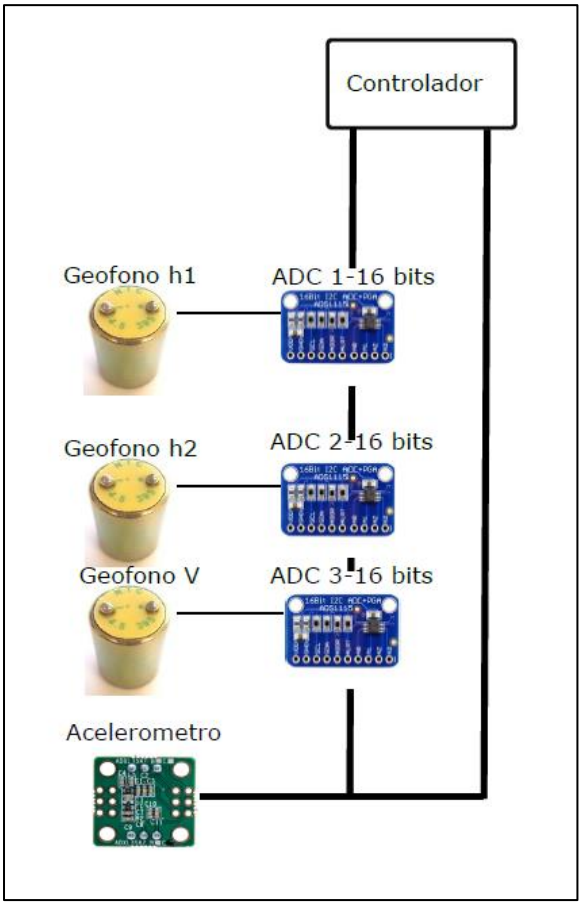

Figura 5-4: Esquema distribución ADC

Fuente: Elaboración propia

5.4 CONTROLADOR Y ALMACENAMIENTO

Los componentes de hardware incorporados al instrumento son controlados por un ordenador de placa reducida Raspberry Pi 3 Model B+, el que posee como ventaja su tamaño compacto y capacidad de conectar variados y numerosos tipos de elementos. Además, posee la característica de que es muy versátil y puede programarse para prácticamente cualquier propósito.

Para el almacenamiento de datos se utiliza una tarjeta de memoria microSD de 16 GB que se incorpora al computador Raspberry.

Tabla 5-3 Características Técnicas Raspberry Pi 3 Model B+,

CPU + GPU	Broadcom BCM2837B0
Ram	1 GB
Wifi	2.4GHz y 5.0 GHz
Ethernet	Gigabite Ethernet
USB	4 puertos
Almacenamiento	Micro SD
Voltaje	5 V

Fuente: Especificaciones proveedor

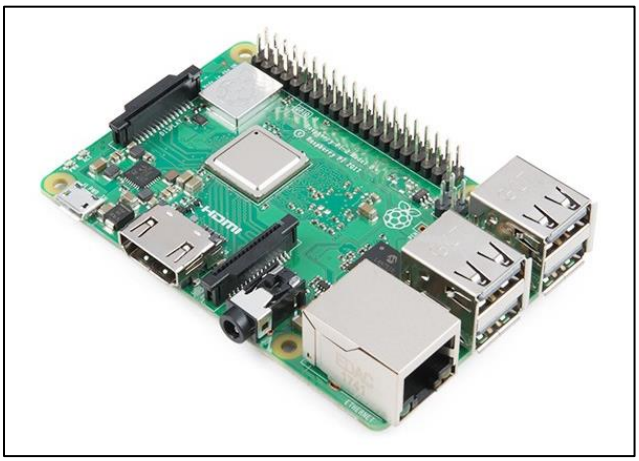

Figura 5-5: Esquema distribución ADC
Fuente: Internet

5.5 CONEXIONES INALÁMBRICAS

Para la conexión y manejo del equipo de manera inalámbrica se opta por dos tipos de comunicaciones, la primera consta de un módulo wifi que posee una antena inalámbrica conectada por puerto USB, la cual permite controlar el equipo mediante red wifi a través de la creación de una red local. De esta forma cualquier dispositivo que posea acceso por wifi podrá ser utilizado para el manejo del sensor (computadores, Tablet, smartphones).

Por otro lado, se implementa un segundo tipo de comunicación alternativo en caso de que la conexión por Wifi falle, esta comunicación es por radio frecuencia mediante módulos RF, con este tipo de comunicación solo se puede realizar la conexión por computador.

Para el control del sensor, en el caso de los computadores se utilizará el software Putty y para el caso de utilizar dispositivos móviles la aplicación JuiceSSH ambos de libre acceso. Desde estas dos aplicaciones se pueden ejecutar los códigos computacionales presentes en la memoria interna del dispositivo.

Para la recolección de las mediciones se puede utilizar la misma conexión inalámbrica o también se puede conectar físicamente el dispositivo por medio de conexión ethernet.

La Figura 5-6se muestran los dispositivos seleccionados para la conexión inalámbrica y en la Figura 5-7se muestra el esquema de conexión de estos módulos.

Figura 5-6: Conexión inalámbrica: Modulo Wifi (Izquierda), Modulo RF (Derecha)
Fuente: Internet

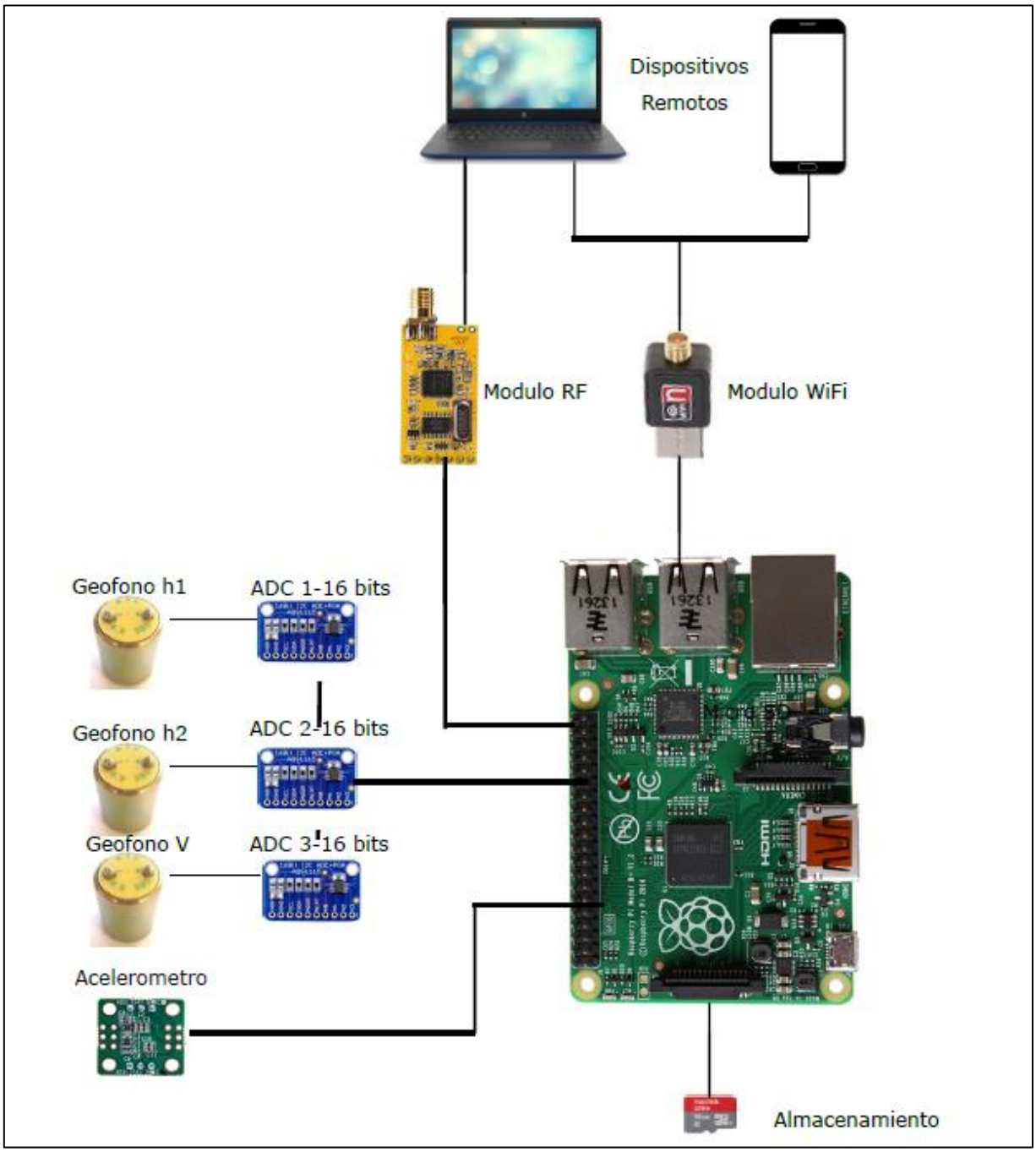

Figura 5-7: Esquema de conexión módulos inalámbricos
Fuente: Internet

5.6 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Con el propósito de generar un instrumento autónomo y que pueda prescindir de una fuente de energía externa se opta por el uso de baterías recargables. La batería seleccionada corresponde a las utilizadas en las baterías externas comerciales, el motivo de esta selección es porque estas incluyen el módulo de carga dentro de su ensamblaje y solo basta con desmontar la estructura de estos e incorporarlo al equipo desarrollado.

Se utiliza una batería de polímero Li-Ion con una capacidad de 10.000 mAh y 5 V que alimenta al sistema a través del mismo controlador de energía mencionado anteriormente, esta batería permite el uso continuo del equipo por un tiempo de 4 horas aproximadamente, lo cual da una ventana de tiempo razonable para realizar mediciones. Cabe destacar que, si por algún motivo las baterías no estén cargadas, el módulo de carga incluido permite que el equipo funcione con una fuente de energía externa ya sea un cargador de teléfono tradicional o una batería externa.

5.7 EQUIPO OBTENIDO

Para finalizar este capítulo en la Figura 5-8 y Figura 5-9 se presenta el resultado final de la construcción del prototipo de sensor para este trabajo de título.

Figura 5-8: Prototipo sensor, vista delantera
Fuente: Elaboración propia

Figura 5-9: Prototipo sensor, vista trasera
Fuente: Elaboración propia

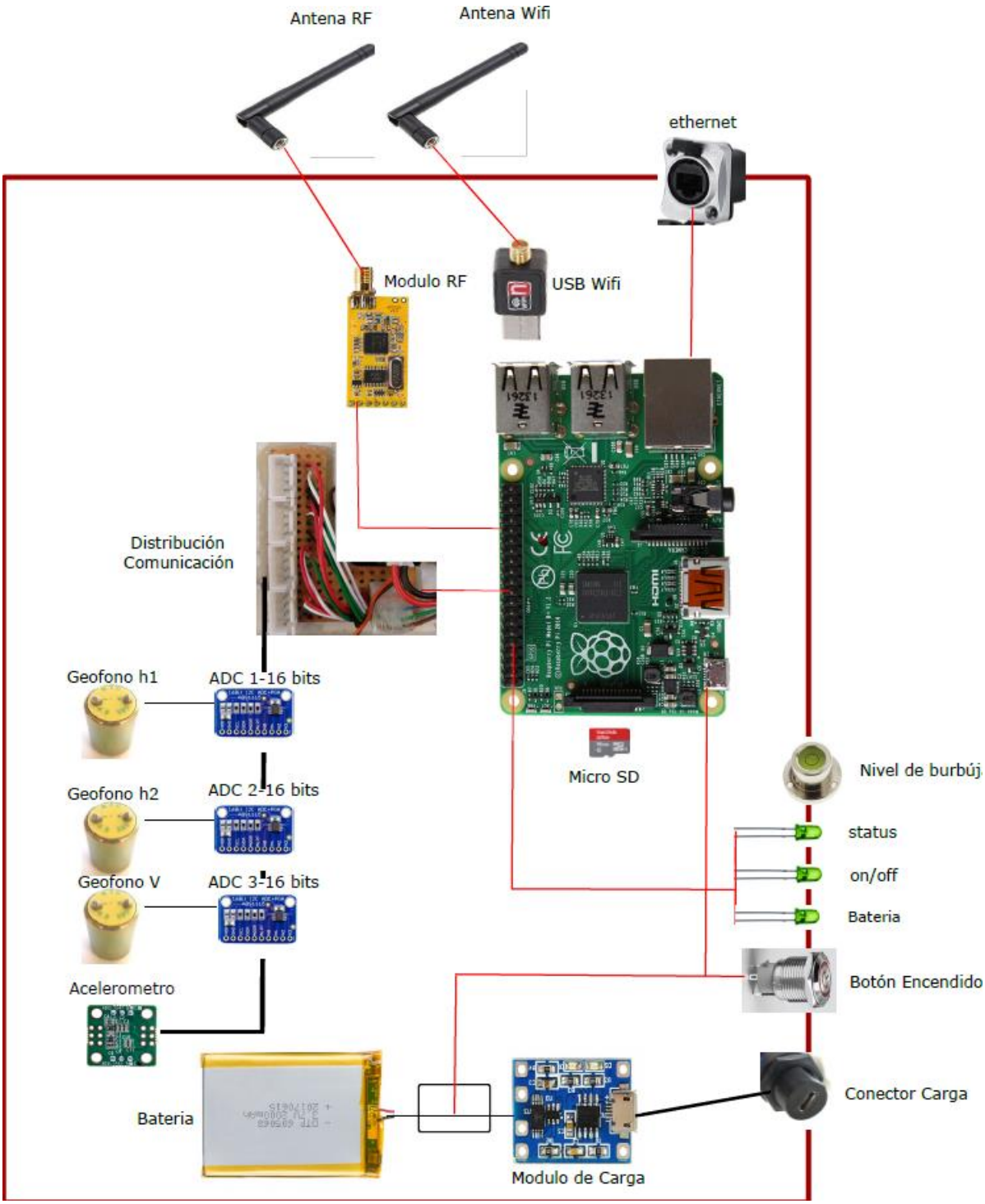

Figura 5-10: Esquema general de componentes seleccionados
Fuente: Elaboración propia

6. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En este capítulo se detallará en primer lugar la etapa de sincronización de los instrumentos donde se explica la importancia de que todos los instrumentos estén en el mismo tiempo relativo para poder comparar mediciones simultaneas, en segundo lugar, se detallará todo lo que conlleva la adquisición de datos al momento de la medición y en tercer lugar se mostrara el procesamiento posterior a la medición de datos para así obtener el resultado final de la prueba.

6.1 SINCRONIZACIÓN

Debido a la deriva temporal que experimentan los osciladores de los relojes de cada instrumento, se realiza un ajuste de sincronización que permite trabajar las señales medidas bajo un mismo tiempo relativo. Este ajuste se puede se realizar por cable (ethernet) o por vía inalámbrica y tiene un enfoque de inicio de los N-instrumentos al mismo tiempo o de la medición de los desfases entre sus relojes que luego es considerado en el post procesamiento de las señales.

Para entender el proceso de sincronización primero se debe comprender el funcionamiento básico del equipo. Como se detalló en el capítulo anterior, cada equipo cuenta con un raspberry Pi3 que tiene la función de controlar todos los sensores del instrumento y este a la vez es controlado por algún dispositivo móvil. Todo esto se realiza mediante una red local creada por un router que dará el alcance de conexión inalámbrica de los N-instrumentos.

Dado que cada raspberry posee un reloj interno, cada uno posee un tiempo local inicial distinto a los demás, sumado a que sufre retardos variables debido a las variaciones de voltaje o variaciones de la frecuencia del oscilador del reloj. Es por lo que el desfase o deriva se debe medir de acuerdo a un reloj absoluto para todos los equipos que realizan las mediciones, este reloj absoluto es asignado a uno de los instrumentos el cual será la

referencia para la sincronización del resto. Para esto se generaron dos rutinas de sincronización llamadas de ahora en adelante sincronización bruta y sincronización fina las cuales corresponde a códigos Python que deberán ser ejecutados al inicio y durante la medición.

6.1.1 SINCRONIZACIÓN BRUTA

Esta sincronización se realiza al inicio de cada medición, consiste en llevar a la misma escala de tiempo todos los instrumentos ya que al momento de encenderlos pueden tener varios segundos de diferencia o hasta un par de horas entre cada uno.

El código de sincronización bruta consiste en tomar el tiempo del instrumento de referencia, sumarle 10 segundos e imponerlo en el resto, cabe destacar que el código hace un barrido de todas las IP's conectadas a la red local para asegurar la correcta conexión con cada instrumento. Finalmente se obtiene una sincronización inicial que sirve para tener una diferencia temporal de referencia o gruesa, la cual es refinada posteriormente.

6.1.2 SINCRONIZACIÓN FINA

Dicho lo anterior, para lograr tener una idea más certera de los tiempos de medición se realiza una segunda sincronización llamada de ahora en adelante sincronización fina, la cual consiste en enviar una señal desde el dispositivo de referencia hacia el resto de los instrumentos dejando registro del tiempo de respuesta de ellos luego este desfase registrado se utiliza para la corrección de los datos muestreados.

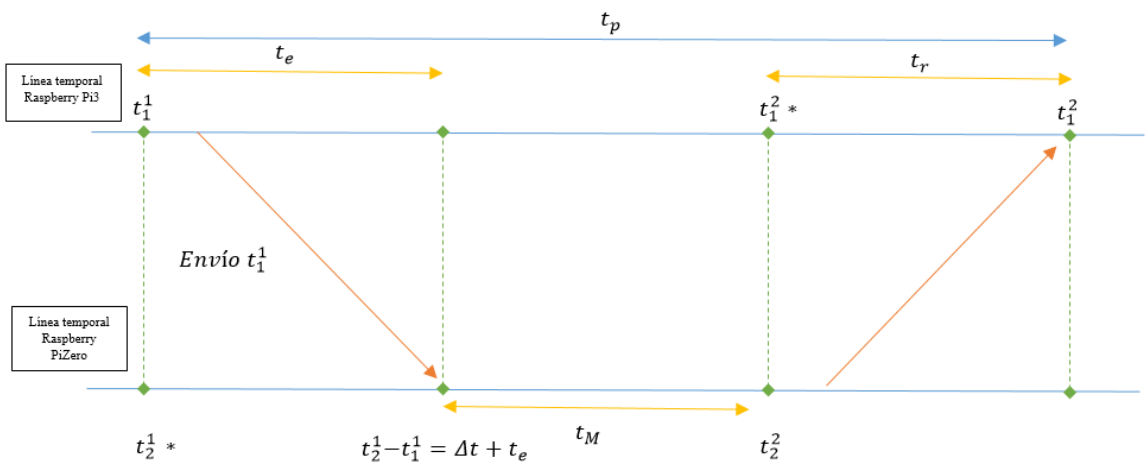

Figura 6-1: Esquema cualitativo sincronización fina entre la Raspberry de referencia y una segunda Raspberry
Fuente: Elaboración propia

Donde

t_p:tiempo de duración del ping [seg].

t_e:tiempo envío de señal desde Pi3 a PiZero[seg].

t_r:tiempo de respuesta del PiZero a Pi3 [seg]

t_M:tiempo medio espera [seg].

t_n^m:tiempo en el raspberry "n" en el instante "m".

El tiempo en la línea del raspberry que recibe la señal de sincronización es desconocido en un comienzo $t_2^1 *$, en el segundo instante se convierte $t_2^1 = t_2^1 * + t_e$ (1). La diferencia de tiempo en el primer instante entre los dos equipos viene dada por $t_2^1 * - t_1^1 = \Delta t$ (2). La suma de (1) y (2) se obtiene $t_2^1 - t_1^1 = \Delta t + t_e$ (3). Lo mismo ocurre para los tiempos de respuesta $t_2^2 - t_1^2 = \Delta t - t_r$ (4).

Si realizamos el cambio de variable para las diferencias de tiempos en cada instante para (3) y (4) se tiene:

$$d_{f1} = \Delta t + t_e \ (3^*)$$

$$d_{f2} = \Delta t - t_r \ (4^*)$$

Sumando (3^*) y (4^*) y despejando la variable de interés Δt de desfase inicial se tiene:

$$\frac{d_{f1} + d_{f2}}{2} + \frac{t_e - t_r}{2} = \Delta t \ (5)$$

$$t_p = t_e + t_M + t_r \ (6)$$

Las ecuaciones explicadas anteriormente se ejecutan mediante un código Python donde se puede sincronizar uno por uno cada instrumento conectado a la red local, dejando registro del Δt exacto para cada uno. Este desfase es lineal en el tiempo, por lo tanto, se recomienda realizar sincronizaciones finas, como mínimo al inicio y fin de la puesta en terreno para lograr interpolar correctamente el desfase a un tiempo de medición dado.

En las siguientes secciones se muestran gráficos experimentales de los resultados de sincronizar dos instrumentos.

6.2 ADQUISICIÓN

La etapa de adquisición de datos consiste en el despliegue de los n sensores ubicados en puntos estratégicos de la estructura para así lograr obtener resultados más fidedignos de la situación real de estructura en estudio.

Esta etapa se puede realizar de manera puntual con solo un instrumento midiendo en puntos específicos, pero sí que quiere tener resultados más completos lo ideal es para n pisos instalar n instrumentos de medición para poder así contrastar la información piso por piso.

Al realizar una medición puntual con solo un instrumento, se pueden obtener las frecuencias naturales de oscilación predominantes de la estructura en cuestión. Para que este resultado sea más confiable lo ideal es instalar el equipo en el eje vertical cercano al centro de masa del edificio para poder así eliminar la componente de rotación en los resultados. Mientras que, para el caso de la medición con un instrumento por piso, además

de poder encontrar las frecuencias naturales de vibración, se pueden estimar los modos de vibrar asociados a cada frecuencia.

Finalmente, antes de ejecutar los códigos se debe determinar el tiempo que tendrá cada medición, es recomendable realizar las mediciones en momentos que la estructura tenga baja demanda de uso para así evitar que se distorsionen las mediciones y captar datos no representativos.

6.3 PROCESAMIENTO

Para finalizar con el proceso de medición, se debe realizar la etapa de procesamiento de datos, donde se rescatan todas las mediciones realizadas y correcciones pertinente con tal de obtener las propiedades estructurales requeridas.

El algoritmo general de procesamiento es el siguiente:

- Rescatar datos de cada instrumento
- Aplicar sincronización según archivo de sincronización fina (ver punto 6.1)
- Corrección intervalo de tiempo mediciones
- Generar la transformada Fourier y espectrogramas de aceleración

El punto de corrección de intervalo de tiempo se debe a que las mediciones a pesar de estar configuradas con una frecuencia de muestreo regular existen pequeñas diferencias en los Δt entre una medición y otra. Dicho lo anterior, para corregir este problema se establece un conjunto de datos con una diferencia de tiempo constante y se interpolan los datos para replicar la curva de respuesta. En base a numerosas pruebas se decidió que interpolar las mediciones con un intervalo de tiempo igual a 0,004 (s) resulta una curva de respuesta corregida similar a la original sin prácticamente alguna perdida de información relevante.

A continuación, se muestra un ejemplo de los puntos explicados anteriormente con una medición en un modelo a escala de una estructura simple donde se puede apreciar los

resultados de la interpolación que se realiza y las diferencias de tiempo entre mediciones simultaneas

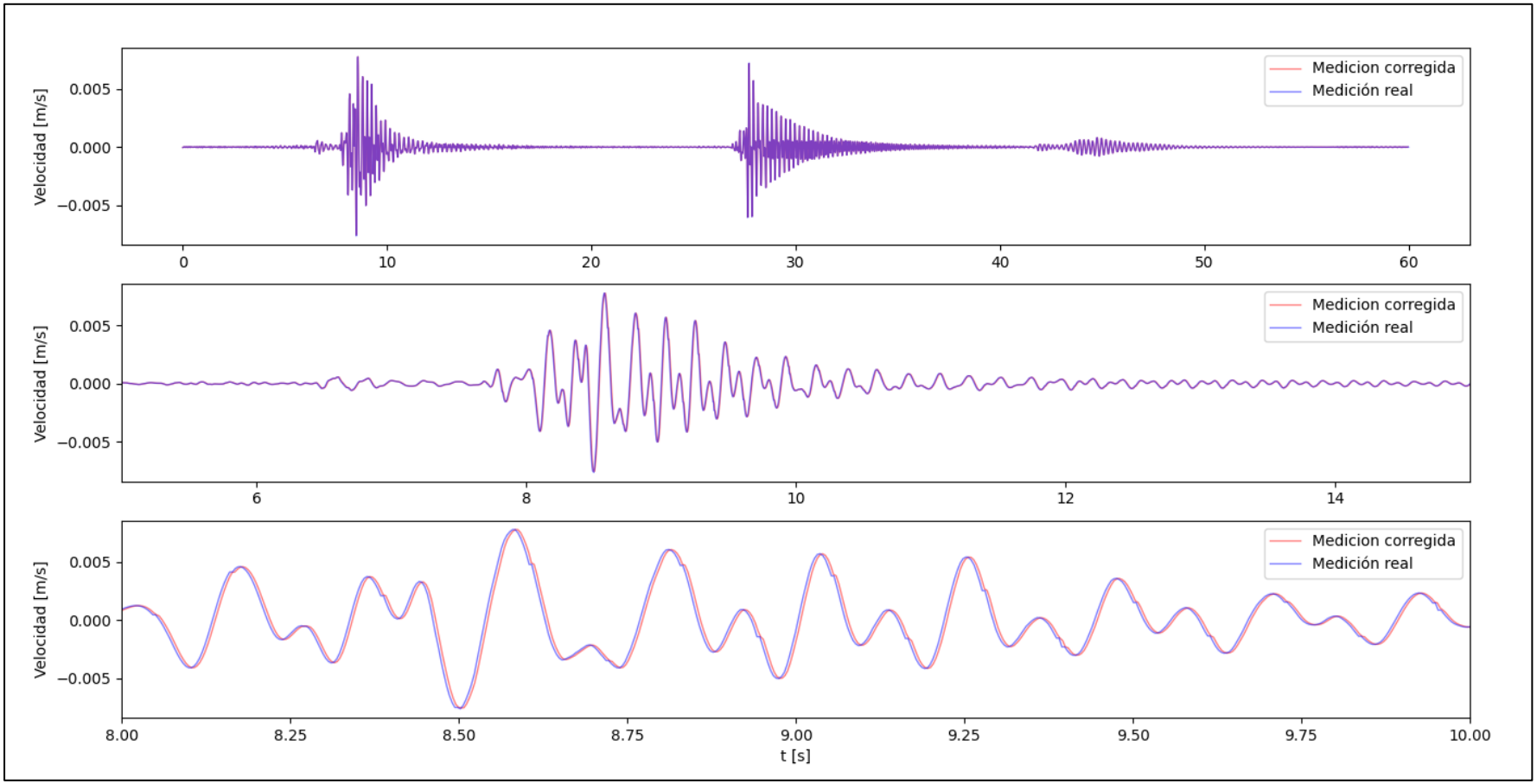

Figura 6-2: Comparación curva de respuesta real y curva de respuesta corregida: grafico superior medición entre t= 0-60 seg; grafico central medición entre t= 5-15 seg; grafico inferior medición entre t= 8-10 seg

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-1 Valores de medición para t=8,0 - 8,10seg

Medición Real		Medición Corregida	
t (s)	Velocidad (10^{-5} m/s)	t (s)	Velocidad (10^{-5} m/s)
7,9975	-7,58023	8,0000	-8,17912
8,0016	-8,5513	8,0040	-9,14307
8,0056	-9,5385	8,0080	-10,06777
8,0097	-10,44501	8,0120	-10,86339
8,0138	-11,18474	8,0160	-11,5107
8,0179	-11,79267	8,0200	-12,00789
8,0219	-12,20691	8,0240	-12,27661
8,0260	-12,3441	8,0280	-12,22677
8,0301	-12,1047	8,0320	-11,81821
8,0341	-11,50215	8,0360	-11,02872
8,0382	-10,46653	8,0400	-9,7996
8,0424	-8,91713	8,0440	-8,15099
8,0467	-6,89968	8,0480	-6,02309
8,0504	-4,42225	8,0520	-4,42225
8,0545	-4,42225	8,0560	-3,34824
8,0586	-1,45525	8,0600	-0,26177
8,0627	2,04704	8,0640	3,3543
8,0667	6,012	8,0680	7,34889
8,0709	10,40466	8,0720	11,69361
8,0749	15,09052	8,0760	16,43244
8,0789	19,96737	8,0800	21,22571
8,0830	24,8496	8,0840	25,96243
8,0871	29,49511	8,0880	30,40857
8,0912	33,65375	8,0920	34,33584
8,0952	37,11031	8,0960	37,58355
8,0993	39,64423	8,1000	39,87786
8,1034	41,0403	-	-

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 6-2 la curva corregida adopta una forma bastante cercana a la curva original, asimismo, al inspeccionar las curvas, no se aprecia alguna omisión de información relevante. En la Tabla 6-1 se muestran los resultados de la interpolación donde

se puede ver como resultado un conjunto de datos con un Δt constante, el cual es ideal para ser procesados y obtener la transformada de Fourier y espectrogramas.

Por otro lado, para mostrar los efectos de la sincronización fina, en la Figura 6-3 se muestra los resultados de medición en simultaneo de dos instrumentos sobre el mismo piso de un edificio de prueba, donde se puede apreciar el gran desfase temporal entre las señales, a pesar de haber comenzado a medir al mismo tiempo. Mientras que en la Figura 6-4 se presentan las mismas señales, posterior a la aplicación de la sincronización fina.

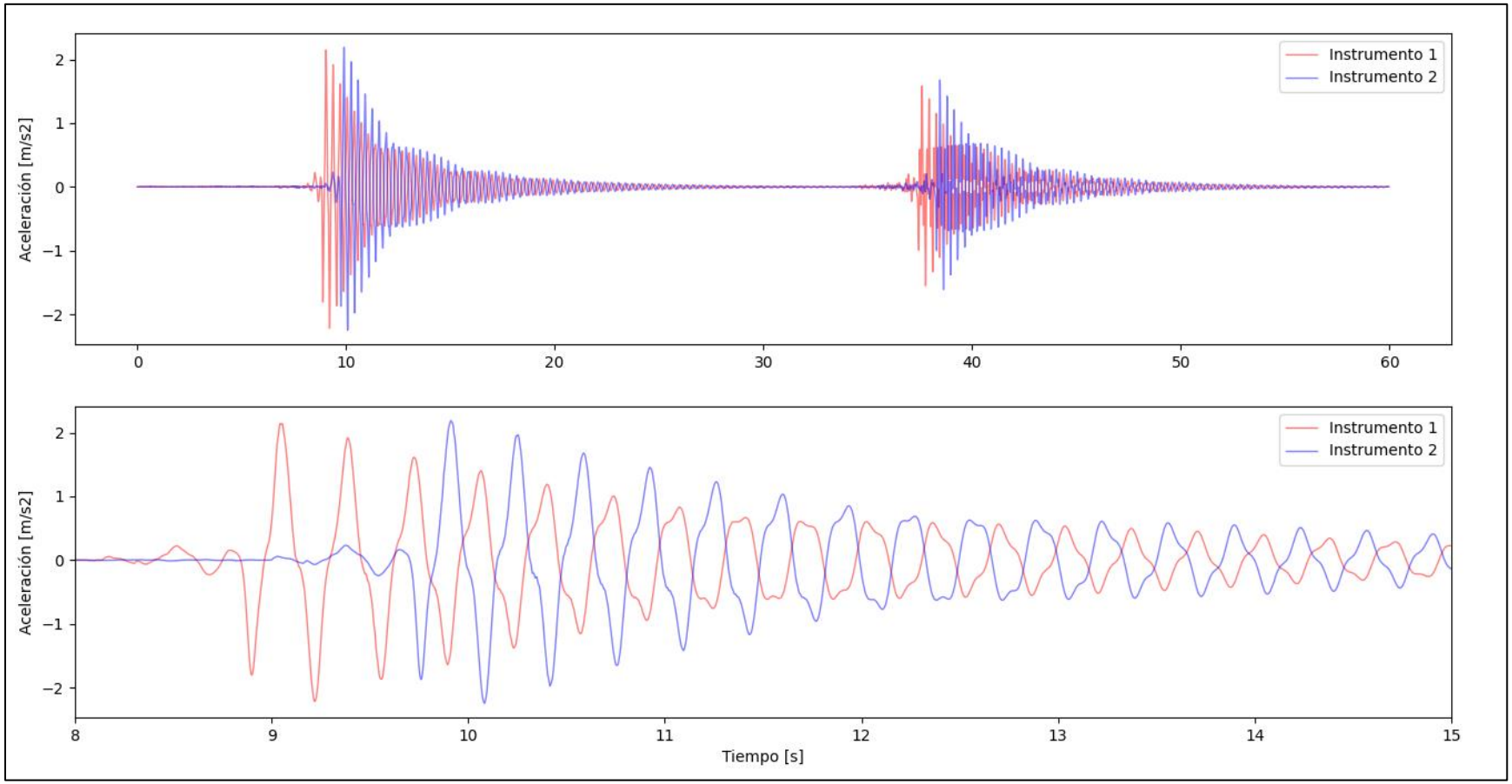

Figura 6-3: Comparación de mediciones solo utilizando sincronización bruta
Fuente: Elaboración propia

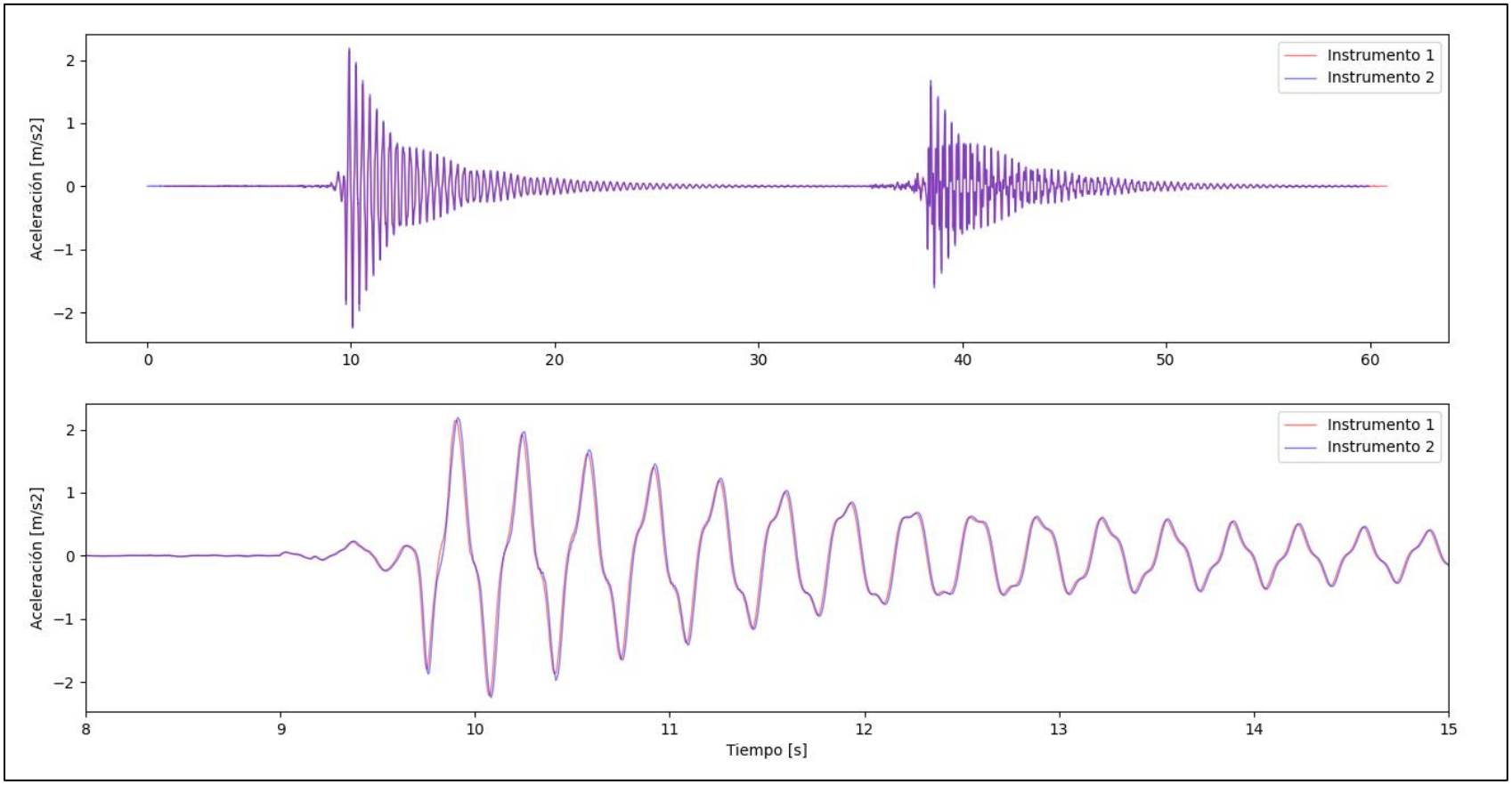

Figura 6-4: Comparación de mediciones utilizando sincronización fina
Fuente: Elaboración propia

7. PRUEBAS DE VALIDACIÓN

El presente capitulo muestra la validación de los instrumentos desarrollados en este trabajo de título donde se verifica la fiabilidad de estos para la medición de la frecuencia natural de una estructura, para lograr esto se realizan dos pruebas de diferente magnitud, la primera con un modelo a escala de una estructura simple de dos pisos con propiedades estructurales conocidas y controladas, y la segunda una medición a gran escala en una estructura real, específicamente en el edificio P de la Universidad Federico Santa María.

7.1 PRUEBA MODELO A ESCALA

Para la ejecución de esta prueba se ensambla una estructura a escala de un edificio de dos pisos; esta estructura consta de un bloque de madera que actúa como diafragma de cada piso. En la base de la estructura se incluyen masas de un total de 20 kg, con lo cual se logra dar un empotramiento a la fundación. Por otro lado, la rigidez del sistema es aportada por cuatro pletinas de aceros ubicadas en los extremos de cada piso.

Cabe destacar que además del peso propio de los elementos, en el piso 1 se ubican dos masas de 1,16 kg correctamente centradas. Por otra parte, en el piso dos que es donde se ubican los instrumentos para realizar la medición no se ubican estas masas, pero si se considera el peso de los aparatos que es de aproximadamente 1,06 kg cada uno.

A continuación, se presentan las características físicas de los elementos estructurales comentados:

- Base de madera:
  - Dimensiones : 23x49,8x2cm
  - Peso : 1,1 kg
- Pletinas de acero:
  - Dimensiones Sección : 3x15mm

- Acero : A42-27ES

- Masa adicional piso 1
  - Dos discos para pesas de 1,16 kg cada uno
- Masa adicional piso 2
  - Sensor 1 y 2 de 1,06 kg cada uno

En la Figura 7-1 se muestra la estructura a escala ensamblada con todos los elementos descritos anteriormente y con los sensores ubicados en su posición de medición. Adicionalmente se presenta el modelo computacional de la estructura.

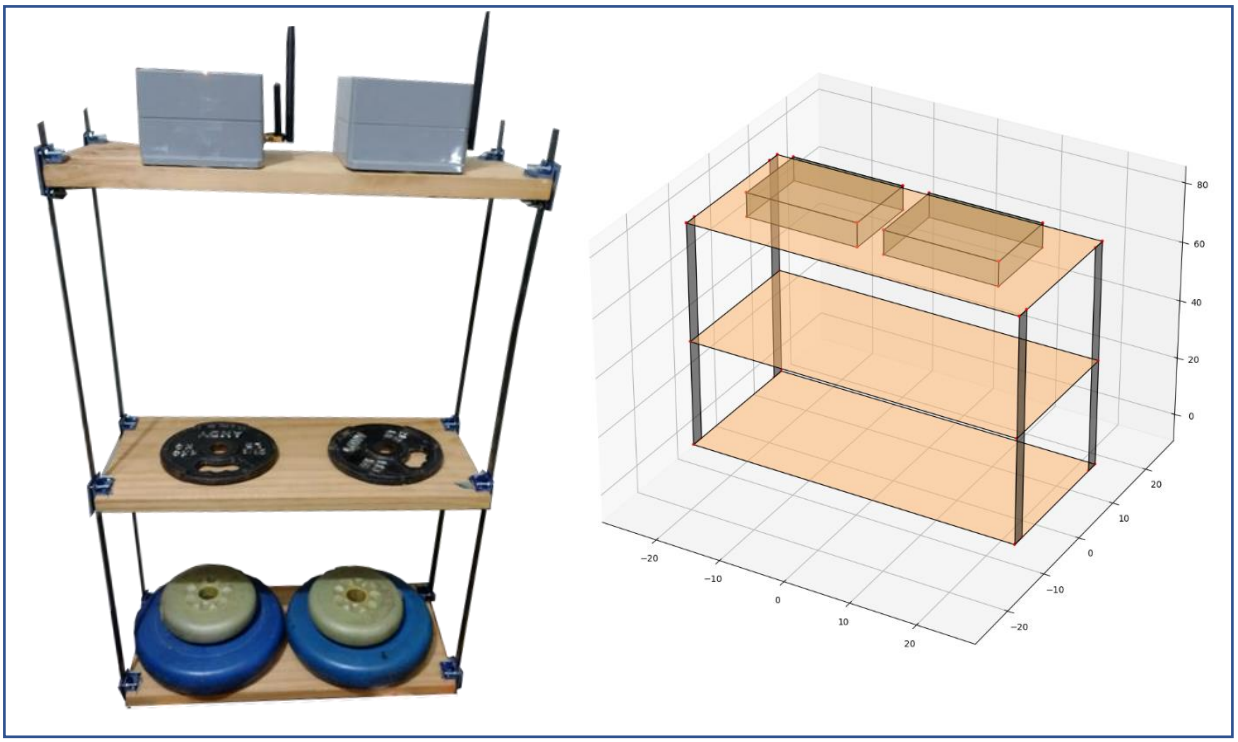

Figura 7-1: Modelo a escala de estructura de dos pisos
Fuente: Elaboración propia

Para realizar las pruebas se comenzará a medir con la estructura en reposo para luego dar paso a la primera solicitación que consiste en llevar el sistema a un desplazamiento determinado, para luego dejarlo vibrar libremente. Esta solicitación se repite una vez más hasta y se procede a medir las vibraciones hasta el reposo.

7.1.1 RESULTADOS TEÓRICOS

A modo de validar los resultados, y dado que conocemos las propiedades de cada elemento proyectado en la estructura, se pueden obtener las frecuencias naturales teóricas según el método explicado en el punto 3.1 de este documento, pero antes que eso se necesitan realizar algunas aproximaciones para poder llegar al modelo teórico de dos grados de libertad

Primero que todo al ser un modelo a escala armado de manera rustica los largos de las pletinas por piso tienen leves diferencias entre sí por lo que a modo de aproximación se calcula un valor promedio por piso. Por otra parte, al ser una estructura a escala la unión entre los elementos es mucho más sensible por lo que el valor de frecuencia real se considera dentro de un rango entre un modelo de unión empotrado y un modelo de unión rotulada.

En segundo lugar, se opta por una masa global por piso la cual considera la masa de la base, la masa de los pesos adicionales y el aporte de las pletinas de acero, las cuales al ser un modelo tan pequeño este aporte es relevante en lo resultados.

En base a las consideraciones nombradas en los párrafos previos, en Anexo A se deja el desarrollo completo para la obtención de las frecuencias naturales, a continuación, se presentan los rangos de frecuencias para cada tipo de modelo considerado:

$$w_{1,empotrado} = 4{,}78\ (Hz) \qquad w_{1,rotulado} = 2{,}39(Hz) \tag{7-1}$$

$$w_{2,empotrado} = 11{,}72\ (Hz) \qquad w_{2,rotulado} = 5{,}86\ (Hz) \tag{7-2}$$

7.1.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como fue nombrado anteriormente, las mediciones de los sensores se realizan con dos pulsos de excitación partiendo con la estructura en reposo, considerando una ventana de medición de 60 segundos. A pesar de que los instrumentos captan la señal en tres direcciones, solo se toma en cuenta una de estas ya que el modelo teórico fue evaluado en una sola dirección.

La medición es con dos instrumentos en simultaneo midiendo a la vez tanto los geófonos como el acelerómetro para poder así comparar resultados entre sí y a la vez comparar con los resultados del punto 7.1.1.

Las tablas de resultados de estas mediciones se encuentran en, a continuación, en Figura 7-2 se muestran las señales que fueron captadas por ambos instrumentos, donde se puede apreciar claramente los instantes donde se le aplica el pulso a la estructura.

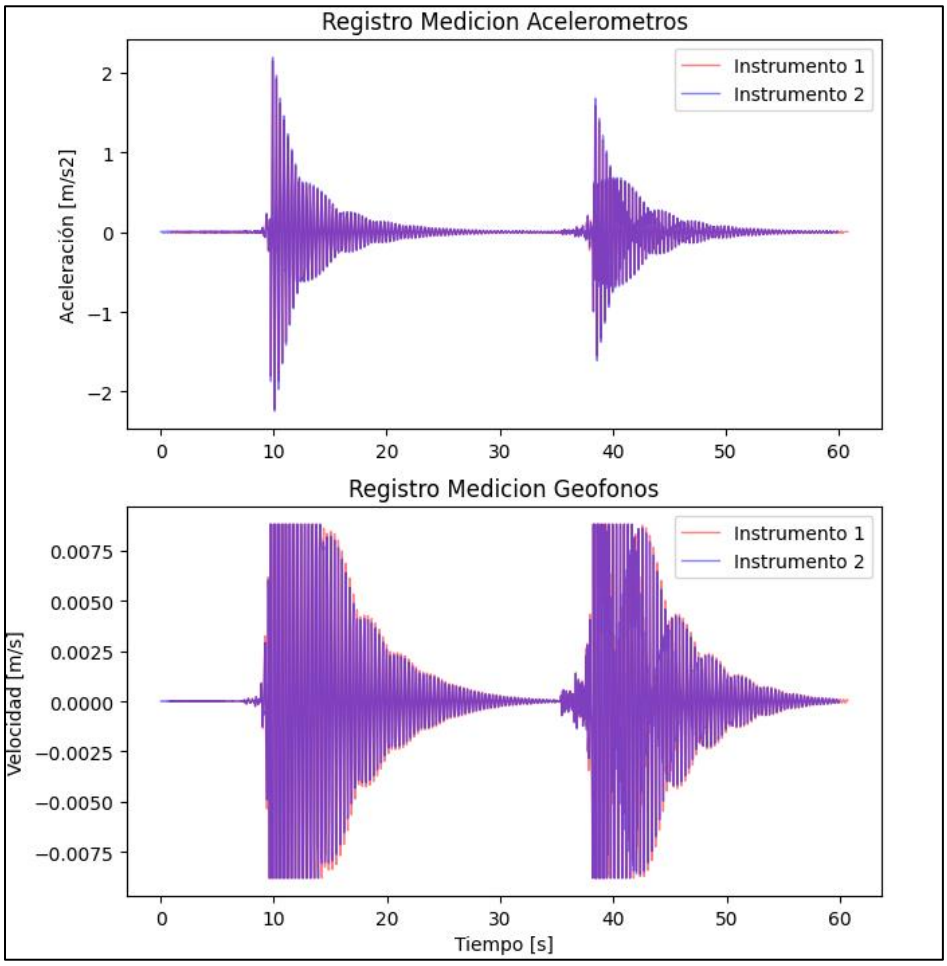

Figura 7-2: Registro de medición: (arriba) resultados acelerómetro; (abajo) resultados geófonos

Fuente: Elaboración propia

De la figura anterior se aprecia que la señal de los geófonos al comienzo de cada pulso se satura, es decir alcanza el nivel máximo de resolución en su rango de salida (Scale Output),

pero a medida que disminuye la amplitud de movimiento estos comienzan a medir correctamente, por otro lado, los acelerómetros captan perfectamente ambos pulsos aplicados. Estas diferencias se deben a la escala de salida de cada sensor, los geófonos implementados están destinados a vibraciones menores (microvibraciones) y los acelerómetros pueden captar movimientos más fuertes.

Los resultados obtenidos luego de procesadas estas señales se muestran en la Figura 7-3, aquí se presenta el resultado al aplicar la Transformada de Fourier, donde primero y por medio de la metodología Peak Picking se seleccionan los picos de cada grafico, los cuales corresponden a las frecuencias predominantes del modelo

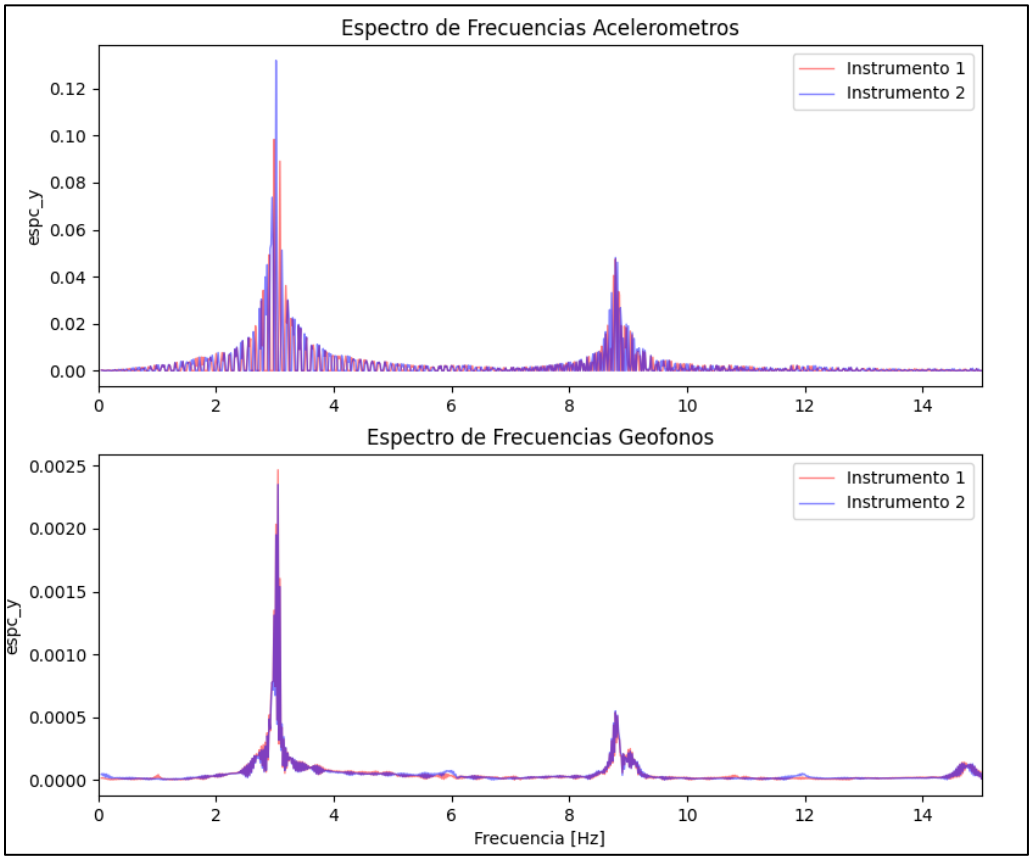

Figura 7-3: Gráficos espectros de frecuencias
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la Figura 7-4 muestra los mismos resultados, pero presentados en forma de espectrogramas de frecuencias donde se visualiza los instantes de tiempo en el que es aplicado el pulso y se manifiesta las frecuencias predominantes que para este caso experimental son las siguientes:

$$w_{1,exp} = 3{,}00 \text{ (Hz)} \tag{7-3}$$

$$w_{2,exp} = 8{,}80 \text{ (Hz)} \tag{7-4}$$

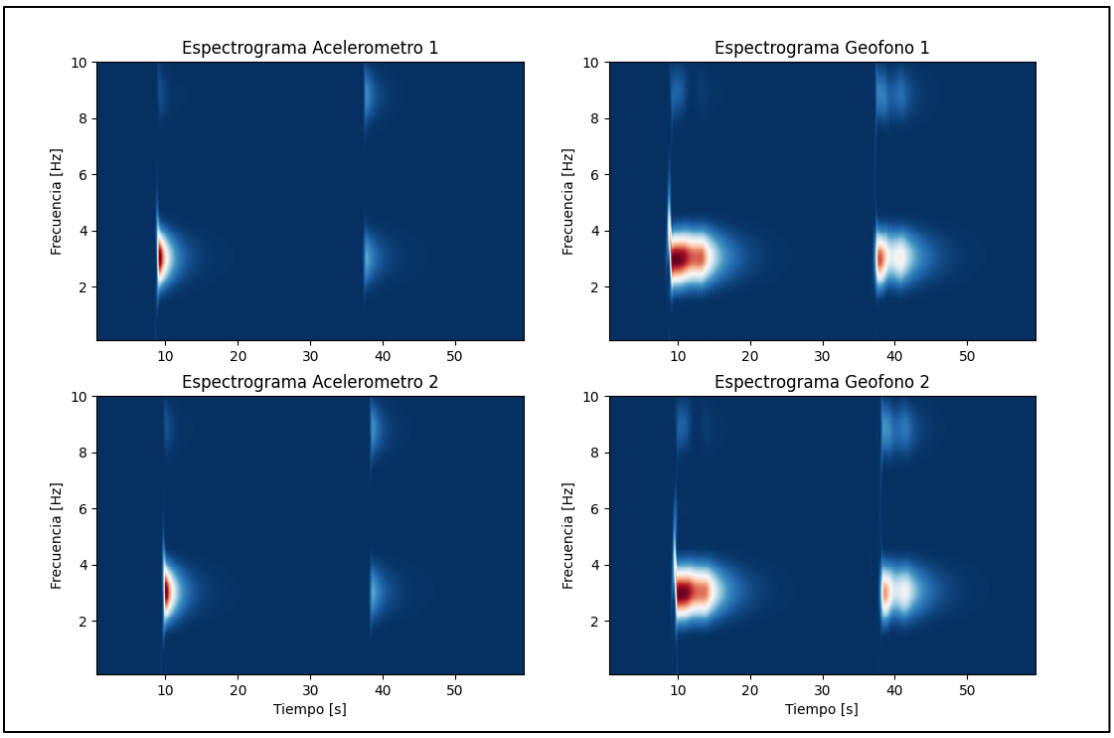

Figura 7-4: Espectrogramas de frecuencias
Fuente: Elaboración propia

7.1.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En relación con la expuesto anteriormente, se puede apreciar que las frecuencias obtenidas se encuentran dentro del rango establecido en (7-1) y (7-2) lo cual confirma que la unión entre las pletinas de acero y base de madera no se encuentran completamente empotradas.

Como comentario a los resultados obtenidos por cada sensor, se puede concluir que los geófonos al tener una resolución más baja y funcionar en rangos de vibraciones menores, al comienzo de cada pulso captan una señal saturada, pero estos al final del ciclo de vibración igual logran captar de manera clara y limpia los peak de frecuencia que se manifestaron en la estructura. Por otro lado, los acelerómetros, que al contrario de los geófonos captaron claramente las vibraciones al tener estos una escala de salida mayor para los movimientos fuertes, al momento de procesar la señal y obtener los espectros resultan gráficos con un mayor nivel de ruido pero que de todas formas denotan peak de frecuencias claramente definidos.

A modo de conclusión, los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango esperado para estructura construida y se rescata la similitud de frecuencias obtenidas en geófonos y acelerómetros por separado, los cuales tuvieron valores de frecuencia prácticamente iguales. En las dos pruebas realizadas, los resultados se encuentran en Anexo C. Por lo que se considera que las frecuencias reales de la estructura ensamblada corresponden a los valores obtenidos por los instrumentos.

7.2 PRUEBA EDIFICIO 4 PISOS

Como segunda prueba de validación se ejecutarán mediciones de vibraciones ambientales en el edificio P de la universidad el cual posee 4 pisos de alturas y 1 piso subterráneo. La metodología de medición para esta prueba consiste en ubicar los sensores en el último piso. Para poder validar y comparar en primer lugar se confeccionará un modelo computacional de la estructura basado en elementos finitos donde se obtendrán las características estructurales teóricas del edificio. En segundo lugar, para obtener un valor más real se emplearán sismógrafos comerciales destinados para este tipo de estudios, estos medirán en simultaneo con los instrumentos de este trabajo de título.

7.2.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURA Y CONFECCIÓN MODELO ESTRUCTURAL

El edificio en estudio corresponde a una estructura de dos etapas, la primera corresponde al frontis de la estructura de tres pisos de altura mientras que la etapa dos abarca toda la parte trasera del lugar, pero a diferencia de la anterior posee cuatro pisos de altura. Como estas etapas fueron construidas de forma separada la interacción entre ambas se realiza mediante juntas de dilatación, todo esto se puede ver en los planos de construcción que fueron facilitados por la misma universidad.

Con la información estructural de los planos de construcción se logró obtener un modelo computacional que simula el comportamiento dinámico de la estructura, este modelo es realizado con el software ETABS.

Cabe destacar que este estudio al ser de vibraciones ambientales, el modelo solo fue ejecutado con los pesos propios de los elementos sin ninguna carga adicional sobre losas o muros ya que solo nos interesa las frecuencias naturales de vibración, en la Figura 7-5 se muestra una vista isométrica del modelo estructural elaborado.

Para esta estructura se obtuvieron 25 frecuencias naturales y cada una con su respectivo modo de vibrar, De todas estas frecuencias a continuación se presentan en la Tabla 7-1 y Tabla 7-2 las de mayor aporte por cada dirección de estudio.

En Anexo B se encuentra el reporte completo del modelo estructural elaborado.

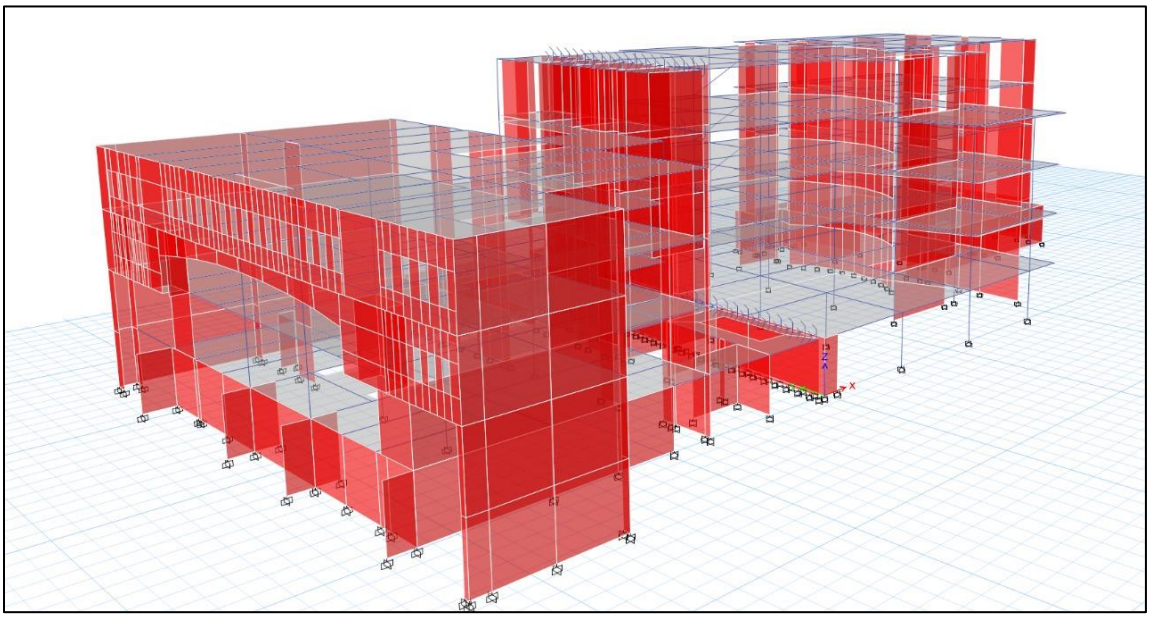

Figura 7-5: Vista isométrica modelo estructural Edificio P
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-1: Frecuencias predominantes en dirección X

Modo	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	Razón Participación Modal Dirección X
1	0,215	4,651	0,517
2	0,183	5,464	0,074
6	0,075	13,333	0,073

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-2: Frecuencias predominantes en dirección Y

Modo	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	Razón Participación Modal Dirección X
3	0,128	7,813	0,4633
2	0,183	5,464	0,208
11	0,055	18,182	0,0818

Fuente: Elaboración propia

De las frecuencias mostradas en las tablas anteriores, las marcadas en rojo correspondes a los primeros modos principalmente traslacionales por cada dirección y estás serán tomadas como referencia para comparar con los resultados experimentales.

7.2.2 CALIBRACIÓN Y PRUEBAS GEÓFONOS 1 HZ

Para tener otro valor de comparación en las mediciones realizadas al edificio se utilizan transductores de velocidad de alta sensibilidad marca Katsushima modelo PMK-110 los cuales fueron facilitados por el laboratorio LEMCO; estos sensores son utilizados para la observación de vibraciones ambientales tanto en suelos como edificios.

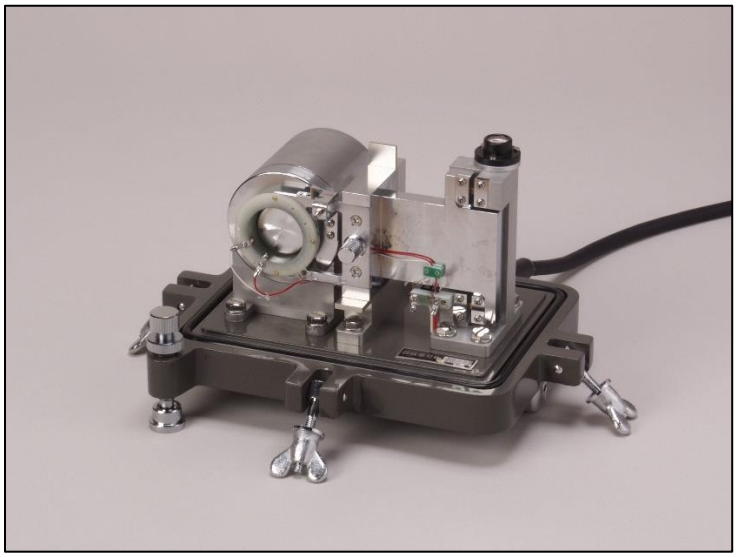

Figura 7-6: Sismómetro Katsujima modelo PMK-110H
Fuente: Internet

Tabla 7-3: Especificaciones técnicas sismómetro PMK-110H

Frecuencia natural [Hz]	1
Sensibilidad Entrada [V/m/s]	300
Sensibilidad Salida [V/m/s]	257
Coeficiente de amortiguación	0,65
Rango de medición [mm]	±2
Peso [kg]	17

Fuente: Katsushima Manufacturing Co.

En principio para poder utilizar este instrumento se deben calibrar algunos parámetros ya que al ser un producto comercial tiene su propio sistema operativo para ejecutar las mediciones, por ende, se ejecutan algunas pruebas previas para adaptar los códigos creados a estos sensores y poder medir en simultaneo con la instrumentación inalámbrica creada.

Para calibrar los códigos con el equipo comercial se realizan unas mediciones de vibraciones ambientales en conjunto con los geófonos de 4,5Hz, estás mediciones son simples y se realizan en ventanas de tiempo de 30 segundos, la Figura 7-7 muestra la ubicación de las mediciones tomadas y los resultados obtenidos de 3 mediciones en la Figura 7-8, cabe destacar que en las gráficas solo se muestra un ventana de tiempo de 5 segundos para poder visualizar la forma de las curvas.

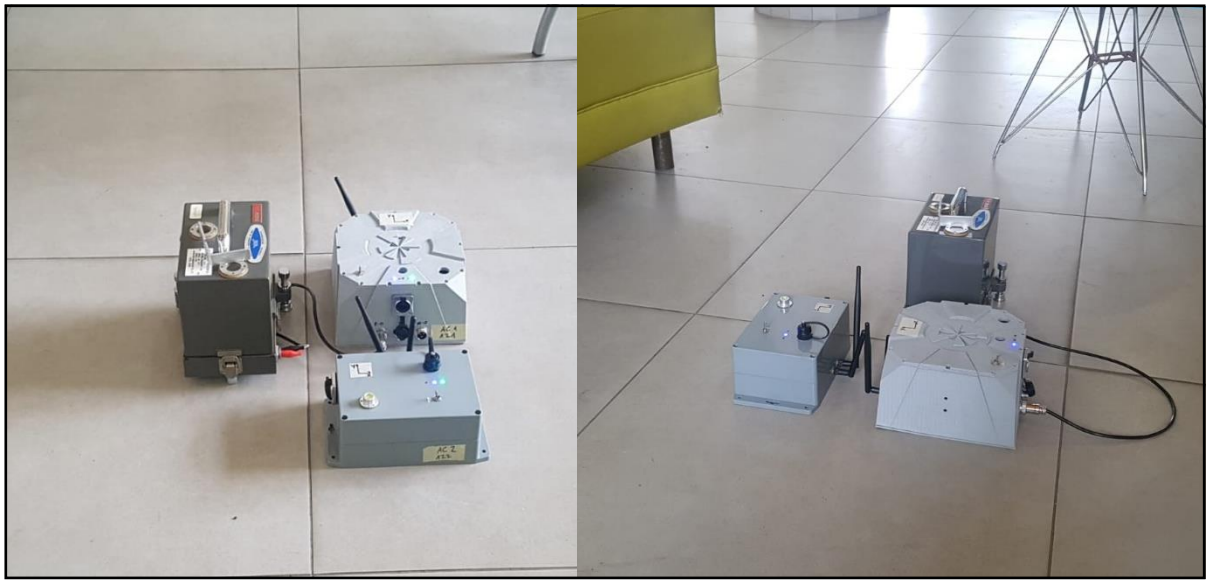

Figura 7-7: Prueba de calibración geófonos
Fuente: Elaboración propia

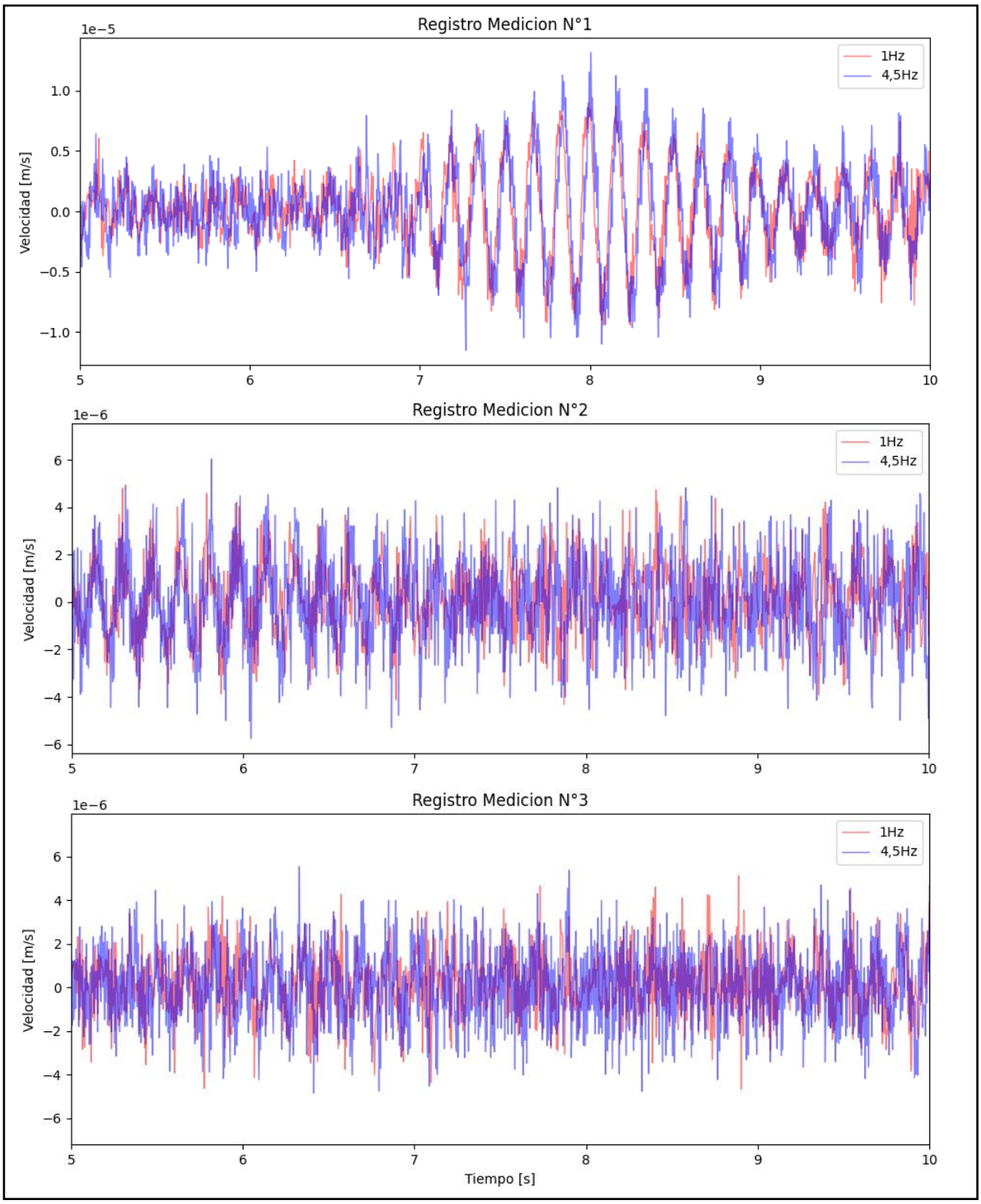

Figura 7-8: Registro mediciones geófono 1 [Hz] vs geófono 4.5 [Hz]
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la Figura 7-8, la señal de velocidad captada en ambos instrumentos es similar, a pesar de que existen algunas diferencias de valores entre cada geófono. Por otro lado, al momento de ser procesada y aplicarle la Transformada de Fourier las diferencias disminuyen (ver punto 7.2.3). Por lo tanto, se corrobora que los geófonos de 1Hz funcionan correctamente con los códigos creados y los resultados que entreguen serán tomados como un valor de comparación de las propiedades estructurales actuales del edificio P.

7.2.3 MEDICIÓN EDIFICIO Y RESULTADOS

Con todos los equipos puestos a prueba y calibrados se procede con la ejecución de las mediciones finales en el edificio P, para esto se elige un día no laboral para así tener el menor tránsito peatonal posible dentro del edificio y las mediciones de vibraciones ambientales no se vean alteradas por algún afecto puntual. Otro punto a considerar es que la ubicación exacta donde se toman las mediciones es el centro de masas del piso 4 del edificio logrando así disminuir las componentes rotacionales en los resultados que se obtengan. En la Figura 7-9 se muestra la ubicación aproximada en planta del centro de masas del piso el cual físicamente se encuentra dentro de una de las salas de clases, la Tabla 7-4 contiene la posición exacta del centro de masas obtenida del modelo estructural, esta posición está con respecto al sistema de referencia que se aprecia en la Figura 7-9

Tabla 7-4: Posición centro de masa piso 4

Ubicación en dirección X	7,03 [m]
Ubicación en dirección Y	17,48 [m]

Fuente: Elaboración propia

Como se introdujo al principio de esta sección, las mediciones se realizaron en simultaneo con los sismógrafos comerciales en las tres direcciones y será evaluada la confiabilidad de los geófonos y acelerómetro seleccionados para la instrumentación inalámbrica de bajo costo. La Figura 7-10 muestra el despliegue de equipos al momento de la medición.

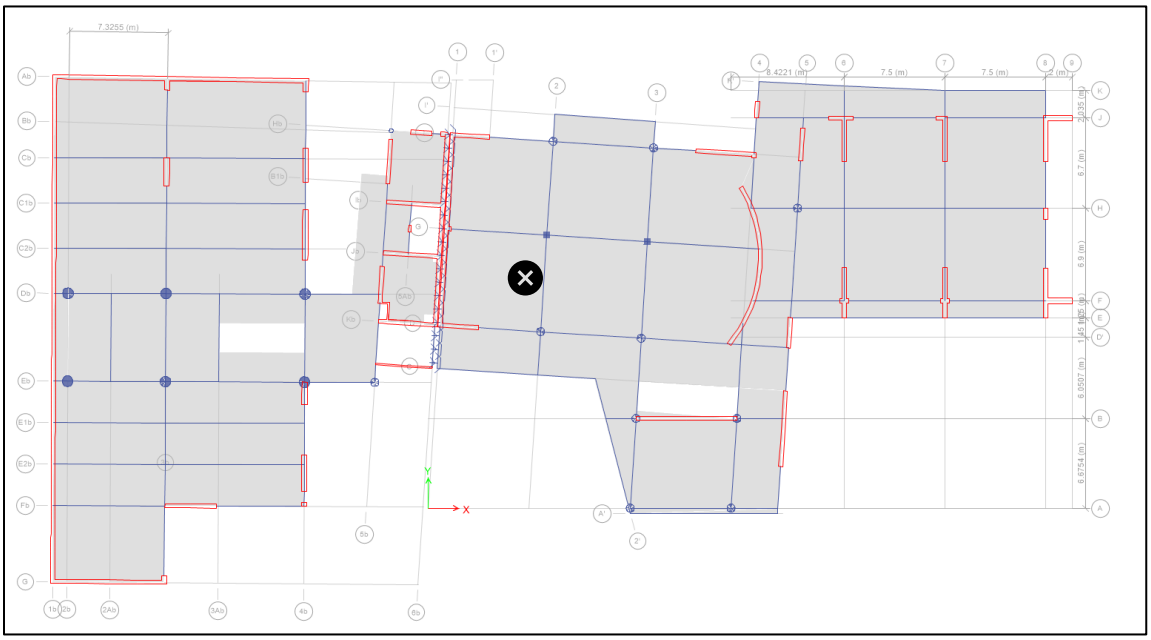

Figura 7-9: Ubicación centro de masa piso 4, edificio P
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-10: Despliegue de equipos de medición en edificio P: (izquierda) instrumentación inalámbrica de bajo costo; (derecha) sismógrafos comerciales
Fuente: Elaboración propia

A pesar de que se está midiendo en las 3 direcciones de la estructura solo se presentan los resultados de las direcciones en planta (plano X-Y) ya que para efectos de este trabajo de investigación se consideran que son las direcciones relevantes para este tipo de estudios.

Cabe destacar que todas estas mediciones fueron realizadas durante el mismo día y la duración total de la campaña de medición entre tomar datos y chequear que estuvieran correctos tomó aproximadamente 1.5hr, dentro de ese tiempo se capturaron 8 mediciones correctamente ejecutadas y de las cuales al analizar los peak de potencia espectral de obtienen los resultados presentados en la Tabla 7-5. En Anexo D se encuentra el registro de cada una de estas mediciones.

Tabla 7-5: Resultados frecuencias predominantes por dirección

N° de Medición	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [Hz]
	Dirección X	Dirección Y
1	4,67	6,07
2	4,80	6,04
3	4,68	6,10
4	4,50	6,02
5	4,61	6,02
6	4,86	5,95
7	4,51	6,05
8	4,66	5,95

Fuente: Elaboración propia

A modo de resumen, se presentan los resultados de manera grafica de una de estas mediciones donde se puede observar en la Figura 7-11 y Figura 7-12 los espectros de frecuencia tanto de acelerómetros como de geófonos en cada dirección, cabe indicar que de las curvas mostradas en las figuras, “acelerómetro 1” y “acelerómetro 2” corresponden al sensor ADXL 355; “geófono 1” es el sensor de alta sensibilidad de 1Hz, y “geófono 2” corresponde al sensor de bajo costo de 4,5Hz.

La Figura 7-13 y Figura 7-14 muestra los espectrogramas de cada sensor donde se refleja de manera aún más clara estos peak de potencia espectral.

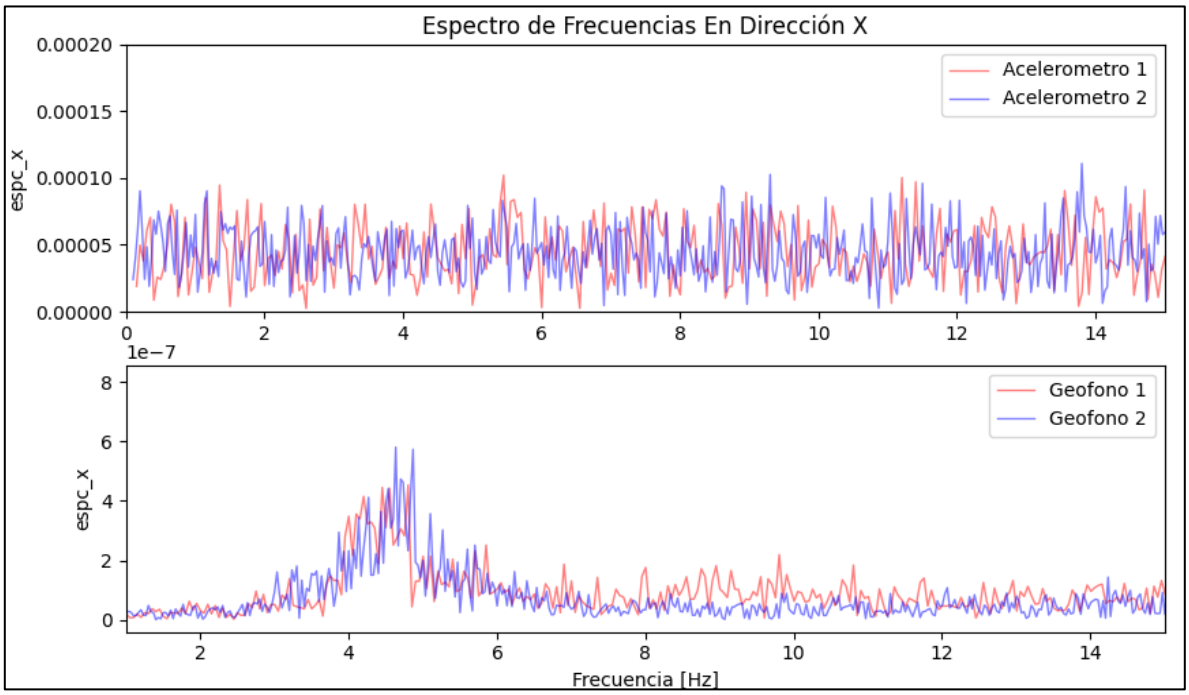

Figura 7-11: Espectro de frecuencias dirección X

Fuente: Elaboración propia

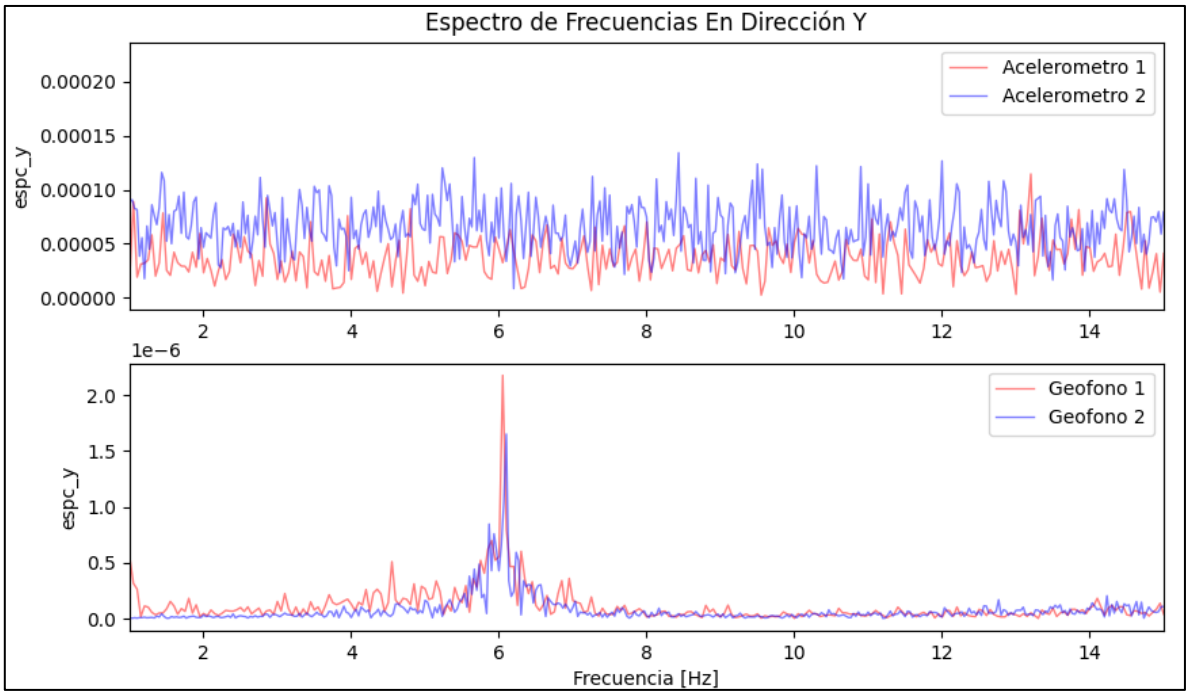

Figura 7-12: Espectro de frecuencias dirección Y

Fuente: Elaboración propia

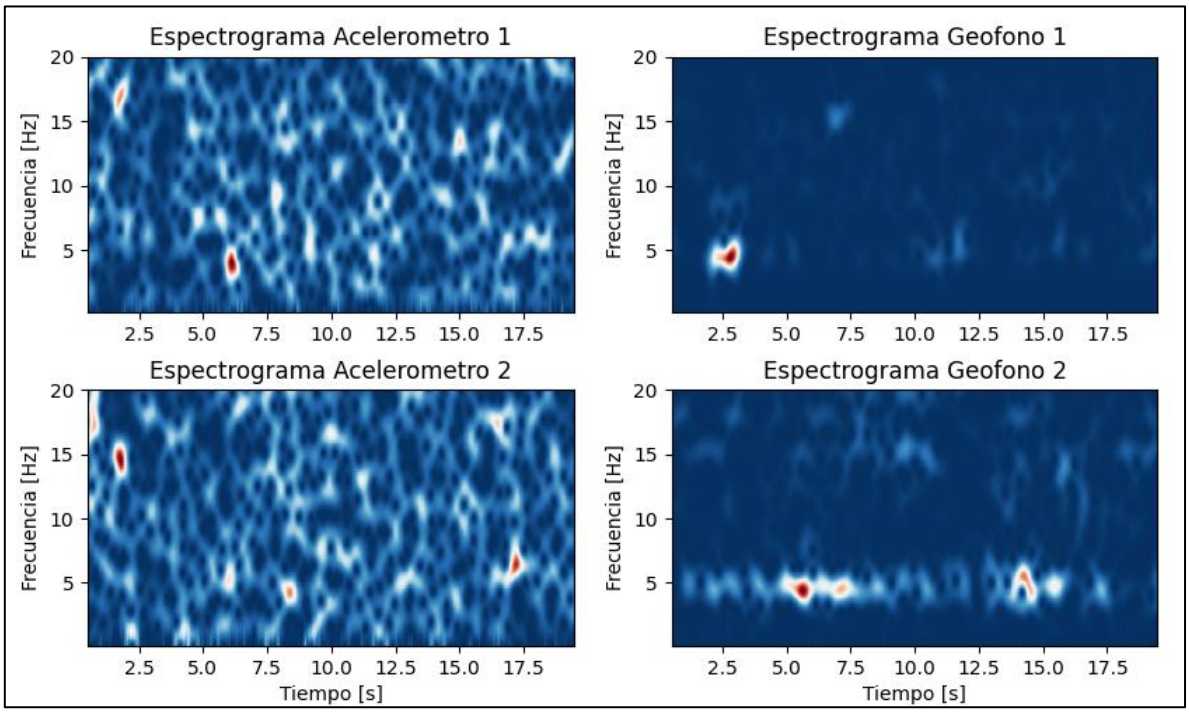

Figura 7-13: Espectrograma en dirección X

Fuente: Elaboración propia

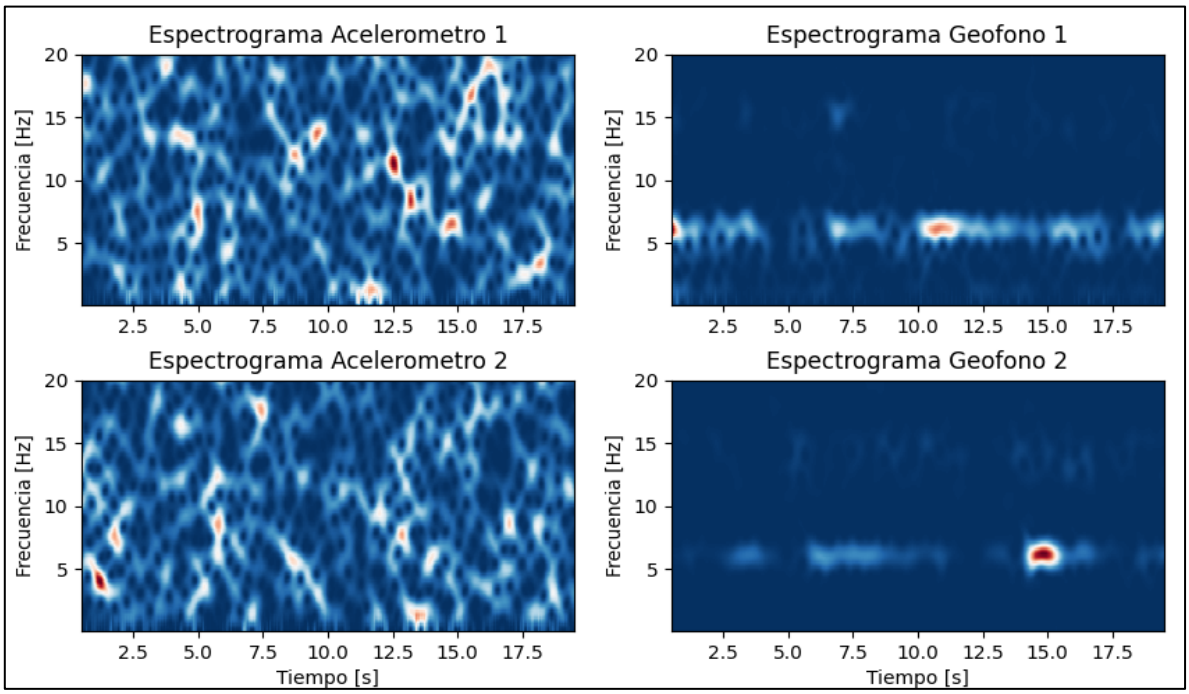

Figura 7-14: Espectrograma en dirección Y

Fuente: Elaboración propia

De los resultados presentados anteriormente se puede apreciar que la resolución mínima de los acelerómetros no es suficiente para poder detectar las vibraciones ambientales, lo cual es verificado al ver los espectros de frecuencias y espectrogramas, por otro lado, los geófonos logran encontrar valores de frecuencia relativamente consistentes entre ellos, pero de igual manera se puede detectar niveles de ruido en los resultados.

Dicho lo anterior para filtrar las señales de respuesta se utiliza el software de código abierto Geopsy (v3.0), desarrollado en el marco del proyecto europeo SESAME. El software posee un complemento con el cual se puede graficar la transformada rápida de Fourier de varias señales en simultaneo y da la posibilidad de la aplicación de filtros antes de este procesamiento.

En los registros de ruido ambiental se aplicó un filtro pasa-banda en un rango de 1–10 Hz, con el método Butterworth de orden 1. Luego se eligieron ventanas de duración variable de 10 segundos y en la aplicación del método antitrigger se usaron los siguientes valores:

- Promedio a corto plazo STA: 1 segundo
- Promedio a largo plazo LTA: 30 segundos
- Umbral mínimo STA/LTA: 0.2
- Umbral mínimo STA/LTA: 2.5

Para el suavizado de las amplitudes espectrales se usó el filtro de Konno y Ohmachi, con un valor de 40 para la constante de suavizado.

Con esto se logran graficar los resultados de geófonos con la señal filtrada para las 8 mediciones en simultaneo donde se promedia y se logra obtener un valor de frecuencia general para cada dirección de análisis.

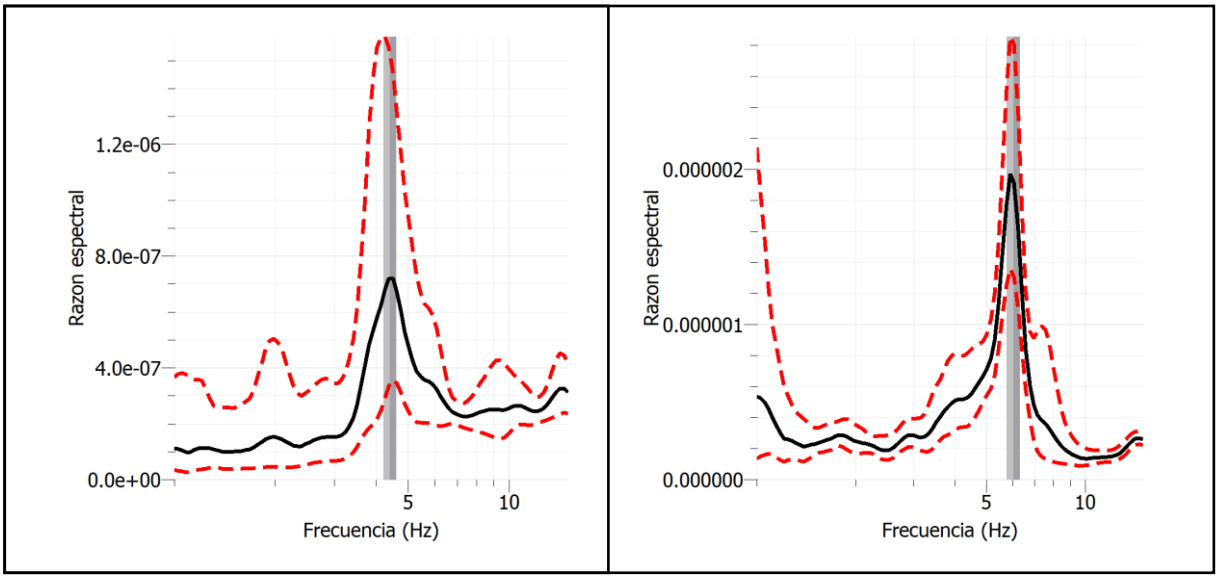

Figura 7-15: Señal filtrada geófono 1Hz: (izquierda) dirección X; (derecha) dirección Y
Fuente: Elaboración propia

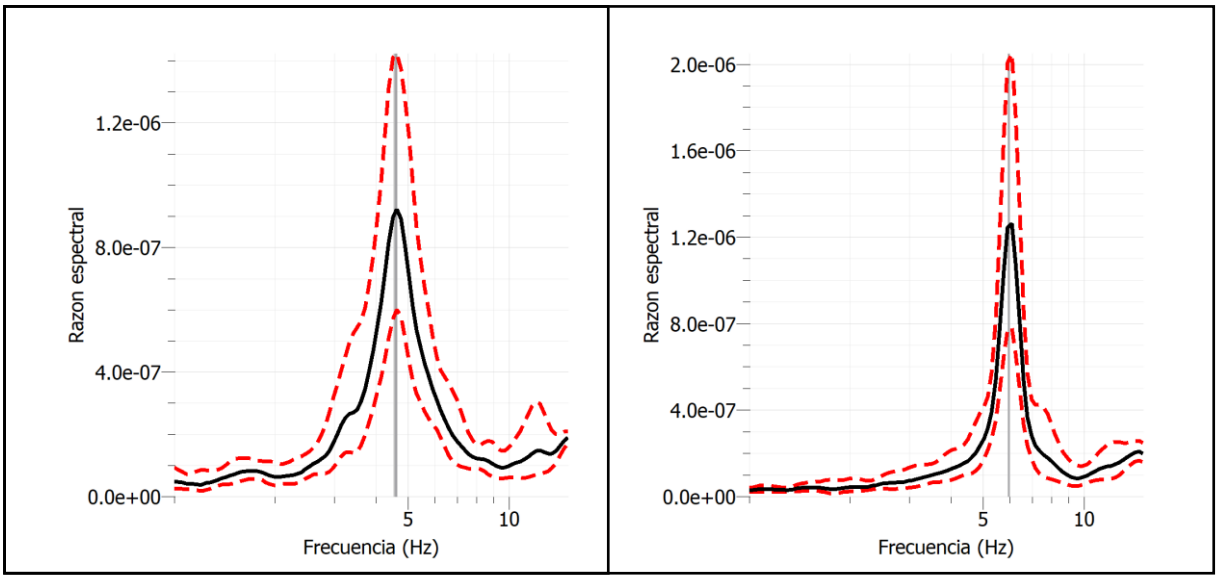

Figura 7-16: Señal filtrada geófono 4.5Hz: (izquierda) dirección X; (derecha) dirección Y
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7-15 y Figura 7-16 se puede ver la envolvente máxima y mínima de todas las mediciones tomades y en negro el promedio de todas estas, con la cual en la Tabla 7-5 se dejan los resultados finales de las frecuencias naturales predominantes del edificio P

Tabla 7-6: Resultado final de frecuencia natural, Edificio P

Tipo de Geófono	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [Hz]
	Dirección X	Dirección Y
1 Hz	4,50	6,05
4,5 Hz	4,63	5,97

Fuente: Elaboración propia

7.2.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de evaluados los resultados obtenidos se puede comentar lo siguiente con respecto al funcionamiento de cada sensor. El desempeño de los acelerómetros para esta prueba fue insuficiente ya que el nivel de ruido natural del sensor está por sobre el rango de la señal de entrada por lo que los resultados no entregan lo esperado. Por otro lado, los geófonos seleccionados logran captar perfectamente las vibraciones y comparado con los gráficos entregados por el sismógrafo, los resultados son similares en todas las pruebas.

En cuanto a la comparación con las frecuencias entregadas por el modelo estructural (Tabla 7-1 y Tabla 7-2) se puede ver que en dirección X la diferencias son del 3,23% y 0,43% para los geófonos de 1Hz y 4,5Hz lo cual se encuentra dentro de un margen aceptable, por otra parte, en la dirección Y hay diferencias considerables con respecto a lo obtenido experimentalmente llegando a una diferencia del 23,56% para el geófono de 4,5Hz. Esta gran diferencia se puede deber a una mala implementación en el software estructural, específicamente en la representación de la unión de cada estructura del edificio que al ser construido en dos etapas estas interactúan por medio de juntas de expansión. Dicho lo anterior, a pesar de que en dirección X la frecuencia es similar a lo obtenido por los instrumentos, se descartan las frecuencias del modelo estructural y se toma como frecuencias reales del edificio las entregadas por el sismógrafo entregado por el LEMCO el cual actualmente se utiliza para la medición de vibraciones ambientales.

Tras el análisis, se corrobora que la aplicación de los acelerómetros de bajo costo está más vinculada con la medición de movimientos fuertes, como los mostrados en el punto 7.1 donde captan perfectamente las señales de entrada, por otra parte, los geófonos de 4,5 Hz son los más aptos para la medición de vibraciones ambientales.

8. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La importancia de conocer la respuesta dinámica que experimentará una estructura para los diversos tipos de vibraciones de modo de asegurar una respuesta estable y segura ha llevado a que la instrumentación mediante la utilización de acelerógrafos o sismógrafos sea más común, el problema de este tipo de instrumentos es su alto costo y compleja instalación. En este contexto nace la necesidad de desarrollar instrumentación costo-eficiente que permita estimar el periodo fundamental de una estructura en base a vibraciones ambientales, para esto se confecciona un equipo triaxial que posee geófonos con frecuencia natural de 4,5 Hz, y un acelerómetro del tipo piezoeléctrico de tecnología MEMS.

Para la validación de los instrumentos desarrollados en primer lugar se realizan pruebas en un modelo a escala, donde las lecturas de estas muestran que los acelerómetros permiten captar la totalidad del registro al tener una resolución de hasta 2g, por otro lado, los geófonos de 4,5 Hz son capaces de registrar ondas pero debido a las características de esta primera prueba, la señal captada se satura al inicio de cada pulso ya que los sensores seleccionados tienen un nivel de resolución máxima bastante menor que los acelerómetros pero luego de unos instantes el sensor se estabiliza y logra medir correctamente. Dicho lo anterior, para la primera prueba ambos sensores entregan los mismos valores de frecuencias de la estructura dando como resultado una frecuencia natural predominante de 3,00 Hz.

Cabe Mencionar que las frecuencias que se obtienen del modelo a escala son mucho más sensibles al tipo de conexión entre los elementos, por lo que el modelo permite analizar los efectos de saturación y de sincronización al comparar las mediciones en un ambiente controlado. Para realizar comparaciones directas de frecuencias se debe continuar con el modelo en laboratorio, para lograr medir en más detalles las propiedades de materiales y de conexión.

Como segunda prueba de validación se realizan mediciones de vibraciones ambientales en el edificio P de la universidad mediante lecturas simultaneas con el equipo desarrollado y un sismógrafo comercial marca Katsushima modelo PMK-110. Los resultados obtenidos de los acelerómetros muestran un bajo desempeño frente vibraciones ambientales ya que al ser un tipo de vibración de amplitud muy baja el nivel de ruido natural del sensor es determinante a la hora de captar la señal y para esta prueba los acelerómetros no logran entregar ningún resultado. Por otra parte, los geófonos de 4,5 Hz presentan mejores resultados e indican una buena correlación con las frecuencias predominantes entregadas por el sismógrafo comercial dando una diferencia de 2,89% y 1,34% en dirección X y dirección Y respectivamente.

En base a los resultados obtenidos se permite validar los sensores seleccionados, pero cada uno para diferentes aplicaciones, donde el acelerómetro MEMS es aplicable para el registro de movimientos de mayor magnitud y los geófonos de 4,5 Hz para la medición de movimientos menores. Desde el punto de vista técnico-económico los sensores escogidos conforman aproximadamente el 65% del costo asociado a los principales componentes electrónicos, el tener estos dos tipos de sensores aumenta el costo total del instrumento, pero con esto se logra obtener un equipo de medición viable tanto para mediciones de vibraciones ambientales como para mediciones de movimientos fuertes.

El equipo desarrollado tiene la ventaja de ser compacto, autónomo y remoto lo cual permite su fácil transporte y que pueda ser instalado y operado sin problemas por una persona. Además, permite la verificación en el momento del registro captado logrando así identificar alguna anomalía en las mediciones y optimizar la cantidad total de registros necesarios.

Las características finales del instrumento son la base para el desarrollo de un mayor número de artefactos similares y lograr así generar una red de equipos para una medición en simultaneo global en todos los pisos de una estructura lo que eventualmente permitiría la obtención de más características estructurales como por ejemplo la determinación de los

modos de vibrar asociados a cada frecuencia. Este tipo de aplicación permitiría sacar un mayor provecho de las capacidades del equipo logrando así ser capaz de competir con los equipos comerciales de instrumentación sísmica.

9. REFERENCIAS

Dai, K., Li, X., Lu , C., You, Q., Huang, Z., & Wu, H. (2015). A Low-Cost Energy-Efficient Cableless Geophone Unit for Passive Surface Wave Surveys. *Sensors, Vol. 15*, 24699 - 24715.

Esquivel Salas, L. C., & Schmidt Diaz, V. (2016). Mediciones de vibraciones ambientales en tres edificios de concreto reforzado de 28, 11 y 6 pisos. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 95*, 81-103.

Gülüm, T., Hakan , A., & Kemal , B. (2017). Reliability of MEMS accelerometers for instrumental intensity mapping of earthquakes. *Annals of Geophysics, Vol. 60, Supplement to 6, SE673*, 1-10.

Jensen, H., & Valdebenito, M. (2015). *Solución de la Ecuación de Equilibrio – Sistemas de 1 Grado de Libertad.* Viña del Mar: Departamento de Obras Civiles UTFSM.

Michell, C., Guéguen, P., & Bard, P.-Y. (2008). Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: An aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28*, 593-604.

Midorikawa, S. (1990). *Ambient Vibration Tests of Buildings in Santiago and Viña del Mar.* Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.

Súnico, M. R. (2005). *Analisis Modal Operacional: Teoria y Práctica.* Sevilla.

10. BIBLIOGRAFÍA

D'Alessandro, A., D'Anna, R., Greco, L., Passafiume, G., Scudero, S., Speciale, S., & Vitale, G. (2018). Monitoring earthquake trough MEMS sensors (MEMS project) in the town of Acireale (Italy). *2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL).* Moltrasio.

Boroschek, R., Baesler, H., Valdés, P., & Vega, C. (2005). Determinación Experimental de Propiedades Modales del Puerto de Ventanas. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas.* Concepción.

Brownjohn, J. (2003). Ambient vibration studies for system identification. En A. Chopra, M. Fardis, & M. Nakashima, *Earthquake Engineering Structural Dynamics* (págs. 71-95).

Cassano, A. (2009). *Analisis de Estructuras Bajo Acciones Dinámicas.* Paraná: Universidad Tecnológica Nacional.

Castillo, A., & Boroschek, R. (2005). Uso del Método de Frecuencia No Parametrica y SSI para la Identificación de Propiedades Modales de Edificios. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas.* Concepción.

Chopra , A. (2012). *Dynamics of structures.* United States of America: Prentice Hall.

Enríquez Zárate, J., Godínez Domínguez, E. A., & Silva Navarro, G. (2017). Esquemas de control de vibraciones aplicados a un modelo de marco cortante. *Quehacer científico en Chiapas*, Sec 1: 69-82.

Evans, J., Allen, R., Chung, A., Cochran, E., Guy, R., Hellweg, M., & Lawrence, F. (2014). Performance of Several Low-Cost Accelerometers. *Seismological Research Letters*, 147-158.

Massari, A., Kohler, M., Clayton, R., Guy, R., Heaton, T., Bunn, J., . . . Demetri, D. (2017). Dense Building Instrumentation Aplication For City-Wide Structural Health Monitoring And Resilience. *16th World Conference on Earthquake Paper N°3735*, (págs. 1-12). Santiago.

Rao, S. (2011). *Mechanical Vibrations.* Miami: Prentice Hall.

Ren, W.-X., & Zong, Z.-H. (2004). Output-only modal parameter identification of civil engineering structures. *Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, No. 3-4*, 1-16.

A. RESOLUCIÓN TEÓRICA MODELO A ESCALA

Para la validación de los instrumentos desarrollados se ensambló un modelo a escala de una estructura de dos pisos con los elementos de la siguiente lista. La Figura A-1 muestra la disposición de cada uno de los elementos utilizados para el ensamblaje de la estructura.

- Base de madera:
  - Dimensiones : 23x49,8x2cm
  - Peso : 1,1 kg
- Pletinas de acero:
  - Dimensiones Sección : 3x15mm
  - Acero : A42-27ES
- Masa adicional piso 1
  - Dos discos para pesas de 1,16 kg cada uno
- Masa adicional piso 2
  - Sensor 1 y 2 de 1,06 kg cada uno

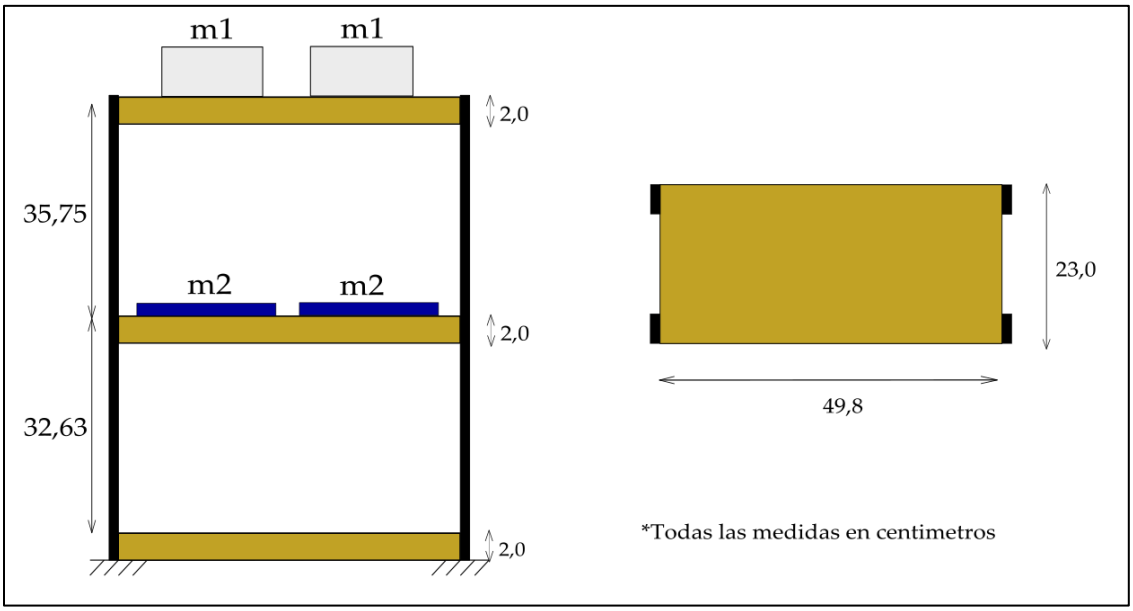

Figura A-1:(izquierda) elevación estructura; (derecha) planta estructura
Fuente: Elaboración propia

Para la obtención de las frecuencias naturales de este modelo simplificado se utiliza la ecuación diferencial de dos grados de libertad mostrada en la Ecuación (3-29), para eso primero se debe desplegar dicha ecuación y llevarla al caso particular de esta estructura, dicho lo anterior, en la Figura A-2 se muestra cada componente individualizada para resolver la ecuación diferencial.

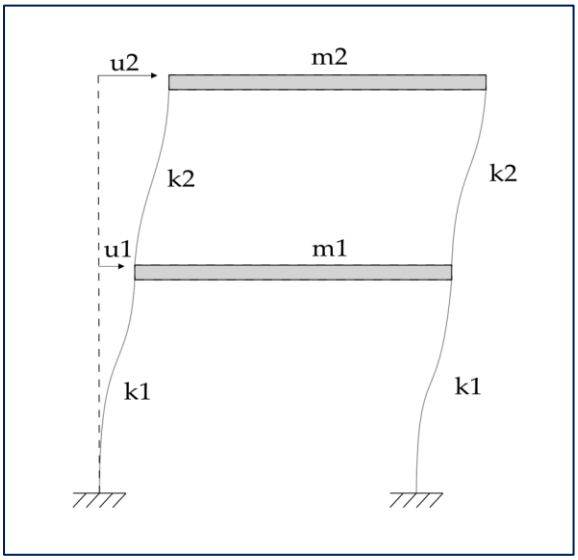

Figura A-2: Deformada modelo simplificado de 2 pisos
Fuente: Elaboración propia

Con la figura anterior se realiza un equilibrio de fuerzas para cada piso dando como resultado las ecuaciones (A-1) y (A-2). Estas dos ecuaciones al operarlas mediante sistema de dos ecuaciones se obtiene la ecuación diferencial de la estructura la cual se presenta de manera matricial en la ecuación (A-3).

$$-4k_1\, u_1 + 4k_2(\, u_2 - u_1) = m_1\, \ddot{u}_1 \qquad \text{(A-1)}$$

$$-4k_2\, (\, u_2 - u_1) = m_2\, \ddot{u}_2 \qquad \text{(A-2)}$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 4k_1+4k_2 & -4k_2 \\ -4k_2 & 4k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \{0\} \qquad \text{(A-3)}$$

Par la resolución del problema diferencial, a continuación, se definen todos los parámetros que se muestran en la ecuación (A-3).

- Valores de Masa

Para definir los valores de m1 y m2 presentados en la ecuación se considera por piso la masa propia de la base de madera, las masas adicionales ubicadas en cada piso y el aporte de cada pletina de acero en cada piso, todos estos elementos son detallados al inicio de este anexo y se muestran en la Figura A-1.

Cabe señalar que el aporte en masa de las pletinas de acero para el piso 1 se considera en larga la mitad inferior y superior de la estructura a nivel de piso 1, por otra parte, en el piso 2 solo se considera el largo de la mitad inferior a nivel de piso 2.

$$m_1 = P_{base} + 2\,P_{disco} + 4\,P_{Pletinas} = 3{,}97\ [kg] \tag{A-4}$$

$$m_2 = P_{base} + 2\,P_{instrumento} + 4\,P_{pletinas} = 3{,}76\ [kg] \tag{A-5}$$

- Valores de Rigidez

Dada la dirección de análisis el modelo corresponde a un modelo de corte donde la rigidez aportante por cada barra viene dada por las siguientes expresiones obtenidas de la matriz de rigidez:

$$k_1 = \frac{12\,E\,I}{l_1^{\,3}} \tag{A-6}$$

$$k_2 = \frac{12\,E\,I}{l_2^{\,3}} \tag{A-7}$$

El valor de inercia de la pletina de acero viene dado para su sección de 3x15mm, calculada desde su eje principal da un valor de $3{,}38\times10^{-11}\ m^4$, por otra parte, para el módulo de elasticidad del acero se utiliza el valor tipo igual a $2.1\times10^{11}\ \frac{kg}{m^2}$. Reemplazando estos parámetros se obtiene la siguiente rigidez aportante por piso para cada pletina.

$$k_1 = 2448{,}07\ \frac{N}{m} \tag{A-8}$$

$$k_2 = 1861{,}43\ \frac{N}{m} \tag{A-9}$$

Con todos los parámetros ya definidos se procede a reemplazar cada uno de estos en la ecuación (A-3) dando el siguiente problema matricial:

$$\begin{bmatrix} 3{,}97 & 0 \\ 0 & 3{,}76 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 17238{,}00 & -7445{,}71 \\ -7445{,}71 & 7445{,}71 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \{0\} \tag{A-10}$$

Para la aplicación que necesitamos de esta ecuación no necesitamos el resultado como tal de la ecuación diferencial si no que solo basta con encontrar los vectores y valores propios de la ecuación, para ello utilizamos la siguiente ecuación característica

$$\det \left[[\mathbf{M}]^{-1} [\mathbf{K}] \right] = 0 \tag{A-11}$$

Donde al resolver el determinante se obtienen los valores propios de la ecuación los cuales equivalen al cuadrado de la frecuencia natural en rad/s, por lo que las frecuencias naturales del modelo a escala ensamblado son igual a:

$$w_{1,teo} = 4{,}78\ (Hz)$$

$$w_{2,teo} = 11{,}72\ (Hz)$$

B. ANÁLISIS MODELO ESTRUCTURAL EDIFICIO P

- Resultados Estructura

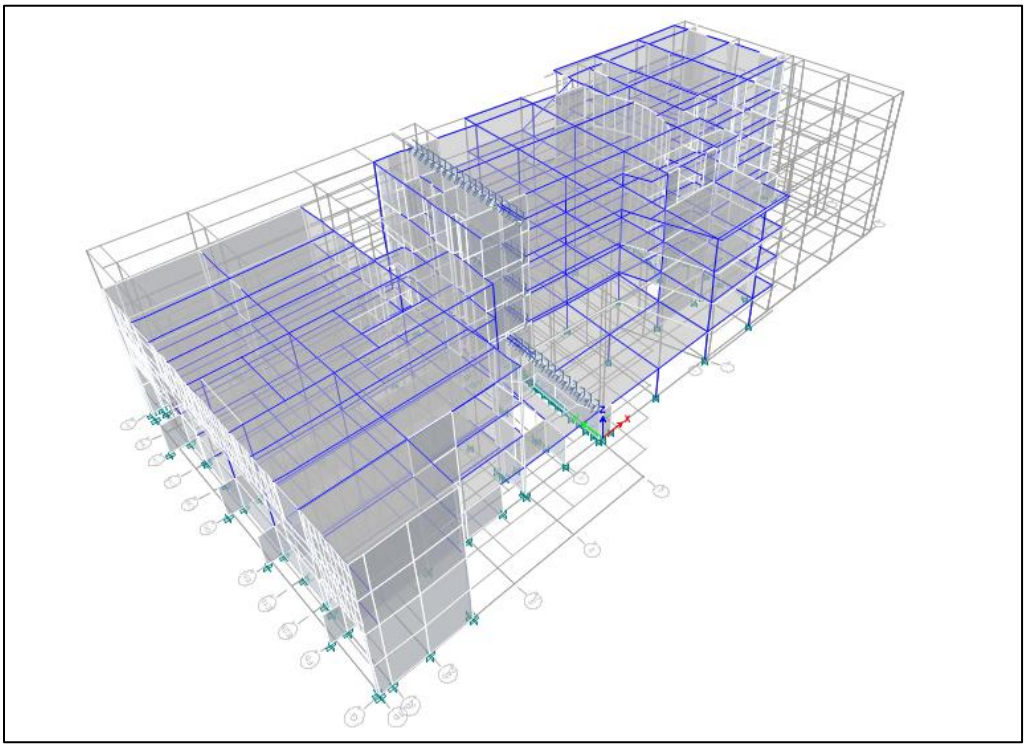

Figura B-1: Elementos modelo estructural y ubicación sistema de coordenadas
Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-1: Centro de masa por piso

Story	Diaphragm	XCM	YCM
		m	m
Story1	D1	6.3175	16.9007
Story2	D2	5.3541	17.3035
Story3	D3	4.3953	17.1862
Story4	D4	7.0302	17.4784
Story5	D5	20.5085	19.9786

Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-2: Reacciones en la base

Output Case	Case Type	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
		kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m
Dead	LinStatic	6.34E-07	1.94E-06	7.97E+04	1.39E+06	-5.67E+05	-4.12E-05

Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-3: Centro de masa estructura

Story	Diaphragm	Output Case	Case Type	UX	UY	RZ	Point	X	Y	Z
				mm	mm	rad		m	m	m
Story5	D5	Dead	LinStatic	-0.266	0.031	1.30E-05	1759	20.5085	19.9786	18.59
Story4	D4	Dead	LinStatic	-0.145	-0.017	3.00E-06	1760	7.0302	17.4784	14.61
Story3	D3	Dead	LinStatic	-0.083	-0.029	1.00E-07	1761	4.3953	17.1862	10.85
Story2	D2	Dead	LinStatic	-0.042	-0.022	1.00E-06	1762	5.3541	17.3035	7.24
Story1	D1	Dead	LinStatic	-0.005	-0.005	1.81E-07	1763	6.3175	16.9007	3.5

Fuente: Reporte modelo estructural

- Resultados por piso

Tabla B-4: Desplazamiento promedio y máximo por piso

Story	Output Case	Case Type	Direction	Maximum	Average	Ratio
				mm	mm	
Story5	Dead	LinStatic	X	0.465	0.293	1.587
Story5	Dead	LinStatic	Y	0.505	0.206	2.448
Story4	Dead	LinStatic	X	0.301	0.179	1.68
Story4	Dead	LinStatic	Y	0.325	0.101	3.22
Story3	Dead	LinStatic	X	0.156	0.094	1.66
Story3	Dead	LinStatic	Y	0.174	0.062	2.816
Story2	Dead	LinStatic	X	0.089	0.033	2.679
Story2	Dead	LinStatic	Y	0.101	0.015	6.735
Story1	Dead	LinStatic	X	0.055	0.004	12.308
Story1	Dead	LinStatic	Y	0.066	0.012	5.58

Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-5: Drift por piso

Story	Output Case	Case Type	Direction	Drift	Label	X	Y	Z
						m	m	m
Story5	Dead	LinStatic	X	6.90E-05	99	24.3847	28.2374	18.59
Story5	Dead	LinStatic	Y	4.80E-05	80	47.9697	15.4261	18.59
Story4	Dead	LinStatic	X	6.40E-05	99	24.3847	28.2374	14.61
Story4	Dead	LinStatic	Y	4.10E-05	80	47.9697	15.4261	14.61
Story3	Dead	LinStatic	X	5.30E-05	99	24.3847	28.2374	10.85
Story3	Dead	LinStatic	Y	3.10E-05	50	47.9697	29.0261	10.85
Story2	Dead	LinStatic	X	4.60E-05	96	9.422	29.2976	7.24
Story2	Dead	LinStatic	Y	1.80E-05	80	47.9697	15.4261	7.24
Story1	Dead	LinStatic	X	1.60E-05	138	-26.7871	26.0661	3.5
Story1	Dead	LinStatic	Y	2.30E-05	231	-26.9185	-5.4453	3.5

Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-6: Fuerzas por piso

Story	Output Case	Location	P	VX	VY	T	MX	MY
			kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m
Story5	Dead	Top	5.85E+03	0	0	1.28E-06	1.17E+05	-1.28E+05
Story5	Dead	Bottom	9.58E+03	0	0	1.28E-06	1.92E+05	-1.89E+05
Story4	Dead	Top	1.99E+04	0	0	4.27E-06	3.67E+05	-2.62E+05
Story4	Dead	Bottom	2.63E+04	0	0	4.27E-06	4.80E+05	-2.73E+05
Story3	Dead	Top	3.69E+04	5.14E-07	2.85E-06	-1.00E-04	6.60E+05	-3.38E+05
Story3	Dead	Bottom	4.31E+04	5.14E-07	2.85E-06	-1.00E-04	7.68E+05	-3.48E+05
Story2	Dead	Top	5.35E+04	6.34E-07	2.72E-06	-1.00E-04	9.47E+05	-4.18E+05
Story2	Dead	Bottom	5.93E+04	6.34E-07	2.72E-06	-1.00E-04	1.05E+06	-4.39E+05
Story1	Dead	Top	6.95E+04	6.34E-07	1.94E-06	-4.12E-05	1.21E+06	-5.05E+05
Story1	Dead	Bottom	7.97E+04	6.34E-07	1.94E-06	-4.12E-05	1.39E+06	-5.67E+05

Fuente: Reporte modelo estructural

- Resultados modales

Tabla B-7: Periodos y frecuencias modales

Case	Mode	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
		sec	cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
Modal	1	0.215	4.649	29.2079	853.099
Modal	2	0.183	5.476	34.4059	1183.7677
Modal	3	0.128	7.829	49.1881	2419.4699
Modal	4	0.109	9.147	57.4718	3303.0103
Modal	5	0.083	12.098	76.0132	5778.0074
Modal	6	0.075	13.313	83.6463	6996.711
Modal	7	0.069	14.441	90.7385	8233.4756
Modal	8	0.062	16.086	101.0729	10215.726
Modal	9	0.06	16.55	103.9846	10812.8066
Modal	10	0.056	17.866	112.2577	12601.7813
Modal	11	0.055	18.181	114.2333	13049.2564
Modal	12	0.051	19.42	122.0194	14888.733
Modal	13	0.05	19.871	124.8518	15587.971
Modal	14	0.044	22.517	141.4792	20016.3718
Modal	15	0.043	23.337	146.6316	21500.822
Modal	16	0.042	23.756	149.2615	22278.9939
Modal	17	0.042	23.843	149.8082	22442.4918
Modal	18	0.041	24.103	151.4413	22934.479
Modal	19	0.04	24.692	155.144	24069.6507
Modal	20	0.04	25.111	157.7784	24894.0165
Modal	21	0.039	25.607	160.8916	25886.0956
Modal	22	0.038	26.042	163.629	26774.448
Modal	23	0.038	26.622	167.274	27980.5868
Modal	24	0.037	27.227	171.075	29266.652
Modal	25	0.036	27.53	172.9791	29921.7731

Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-8: Participación modal de masas traslacionales

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
		sec						
Modal	1	0.215	0.5173	0.0345	0	0.5173	0.0345	0
Modal	2	0.183	0.074	0.208	0	0.5913	0.2425	0
Modal	3	0.128	0.0003	0.4633	0	0.5916	0.7058	0
Modal	4	0.109	0.0025	0.0016	0	0.5941	0.7075	0
Modal	5	0.083	0.0664	0.0017	0	0.6605	0.7091	0
Modal	6	0.075	0.0729	0.0056	0	0.7333	0.7148	0
Modal	7	0.069	0.0352	0.0001	0	0.7685	0.7148	0
Modal	8	0.062	0.0045	0.0001	0	0.773	0.7149	0
Modal	9	0.06	0.0003	0.0013	0	0.7734	0.7162	0
Modal	10	0.056	0.0098	0.0002	0	0.7832	0.7164	0
Modal	11	0.055	0.0019	0.0818	0	0.7851	0.7982	0
Modal	12	0.051	0.0151	0.0001	0	0.8002	0.7983	0
Modal	13	0.05	0.0076	0.0097	0	0.8078	0.808	0
Modal	14	0.044	0.0041	0.0015	0	0.8119	0.8095	0
Modal	15	0.043	2.89E-06	0.0001	0	0.8119	0.8096	0
Modal	16	0.042	0.0304	0.0065	0	0.8422	0.816	0
Modal	17	0.042	0.0065	0.0265	0	0.8487	0.8425	0
Modal	18	0.041	0.0017	0.0003	0	0.8504	0.8428	0
Modal	19	0.04	0.0003	0.0073	0	0.8507	0.8501	0
Modal	20	0.04	0.0021	0.0002	0	0.8528	0.8503	0
Modal	21	0.039	0.0184	2.74E-05	0	0.8711	0.8503	0
Modal	22	0.038	0.0002	0.0019	0	0.8713	0.8522	0
Modal	23	0.038	0.0001	0.0001	0	0.8714	0.8523	0
Modal	24	0.037	0.0012	0.0093	0	0.8727	0.8616	0
Modal	25	0.036	0.002	0.0166	0	0.8747	0.8781	0

Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-9: Participación modal de masas rotacionales

Case	Mode	Period	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
		sec						
Modal	1	0.215	0.034	0.4384	0.0392	0.034	0.4384	0.0392
Modal	2	0.183	0.2176	0.049	0.3181	0.2517	0.4874	0.3573
Modal	3	0.128	0.1398	0.001	0.2691	0.3914	0.4885	0.6264
Modal	4	0.109	0.0305	0.0001	0.0652	0.4219	0.4885	0.6916
Modal	5	0.083	4.33E-05	0.0111	9.74E-06	0.422	0.4996	0.6916
Modal	6	0.075	0.0057	0.0399	0.0077	0.4276	0.5395	0.6993
Modal	7	0.069	0.0078	0.0927	0.001	0.4354	0.6322	0.7003
Modal	8	0.062	0.0001	0.0019	0.0202	0.4355	0.6341	0.7205
Modal	9	0.06	0.0047	0.0001	0.0003	0.4402	0.6342	0.7208
Modal	10	0.056	0.0154	0.0102	0.012	0.4555	0.6444	0.7328
Modal	11	0.055	0.1327	0.0046	0.0692	0.5882	0.649	0.802
Modal	12	0.051	0.0028	0.0187	0.0002	0.5911	0.6677	0.8022
Modal	13	0.05	0.0032	0.0213	0.0023	0.5943	0.689	0.8045
Modal	14	0.044	0.0032	0.0085	0.0006	0.5975	0.6974	0.8051
Modal	15	0.043	0.0001	0.0009	0.0011	0.5976	0.6984	0.8062
Modal	16	0.042	0.0247	0.0353	0.0048	0.6223	0.7337	0.811
Modal	17	0.042	0.0865	0.0039	0.0242	0.7089	0.7376	0.8352
Modal	18	0.041	0.0012	0.0008	0.0001	0.7101	0.7383	0.8354
Modal	19	0.04	0.0147	1.30E-05	0.0016	0.7248	0.7383	0.8369
Modal	20	0.04	0.0006	0.0032	0.0001	0.7253	0.7415	0.837
Modal	21	0.039	0.0001	0.0251	0.0001	0.7254	0.7666	0.8372
Modal	22	0.038	0.0012	0.0002	0.0005	0.7265	0.7668	0.8377
Modal	23	0.038	8.54E-06	1.49E-05	0.0001	0.7265	0.7668	0.8378
Modal	24	0.037	0.0187	0.0024	0.0085	0.7452	0.7692	0.8463
Modal	25	0.036	0.0325	0.0057	0	0.7778	0.7749	0.8463

Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-10: Participación modal de fuerzas

Case	ItemType	Item	Static	Dynamic
			%	%
Modal	Acceleration	UX	99.67	87.47
Modal	Acceleration	UY	99.62	87.81
Modal	Acceleration	UZ	0	0

Fuente: Reporte modelo estructural

Tabla B-11: Factores modales por dirección

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	RZ
		sec				
Modal	1	0.215	0.909	0.068	0	0.023
Modal	2	0.183	0.114	0.421	0	0.465
Modal	3	0.128	0.003	0.637	0	0.361
Modal	4	0.109	0.012	0.121	0	0.868
Modal	5	0.083	0.302	0.005	0	0.693
Modal	6	0.075	0.208	0.007	0	0.785
Modal	7	0.069	0.766	0.044	0	0.191
Modal	8	0.062	0.008	0.004	0	0.988
Modal	9	0.06	0.002	0.036	0	0.962
Modal	10	0.056	0.015	0.015	0	0.97
Modal	11	0.055	0.012	0.487	0	0.501
Modal	12	0.051	0.114	0.008	0	0.878
Modal	13	0.05	0.331	0.065	0	0.604
Modal	14	0.044	0.092	0.27	0	0.637
Modal	15	0.043	0.156	0.024	0	0.821
Modal	16	0.042	0.519	0.114	0	0.367
Modal	17	0.042	0.073	0.411	0	0.516
Modal	18	0.041	0.141	0.144	0	0.715
Modal	19	0.04	0.01	0.327	0	0.663

Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	RZ
		sec				
Modal	20	0.04	0.045	0.011	0	0.944
Modal	21	0.039	0.801	0.018	0	0.181
Modal	22	0.038	0	0	0	1
Modal	23	0.038	0.001	0.003	0	0.996
Modal	24	0.037	0.001	0.021	0	0.978
Modal	25	0.036	0.008	0.038	0	0.954

Fuente: Reporte modelo estructural

C. Mediciones Modelo a Escala

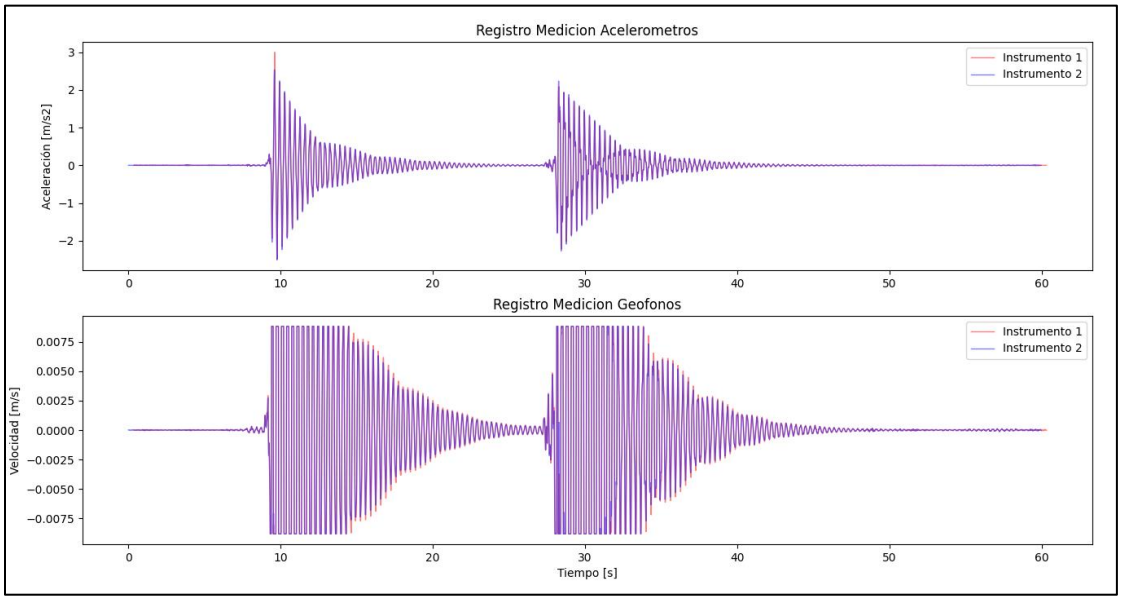

Figura C-1: Registro de medición 1
Fuente: Elaboración propia

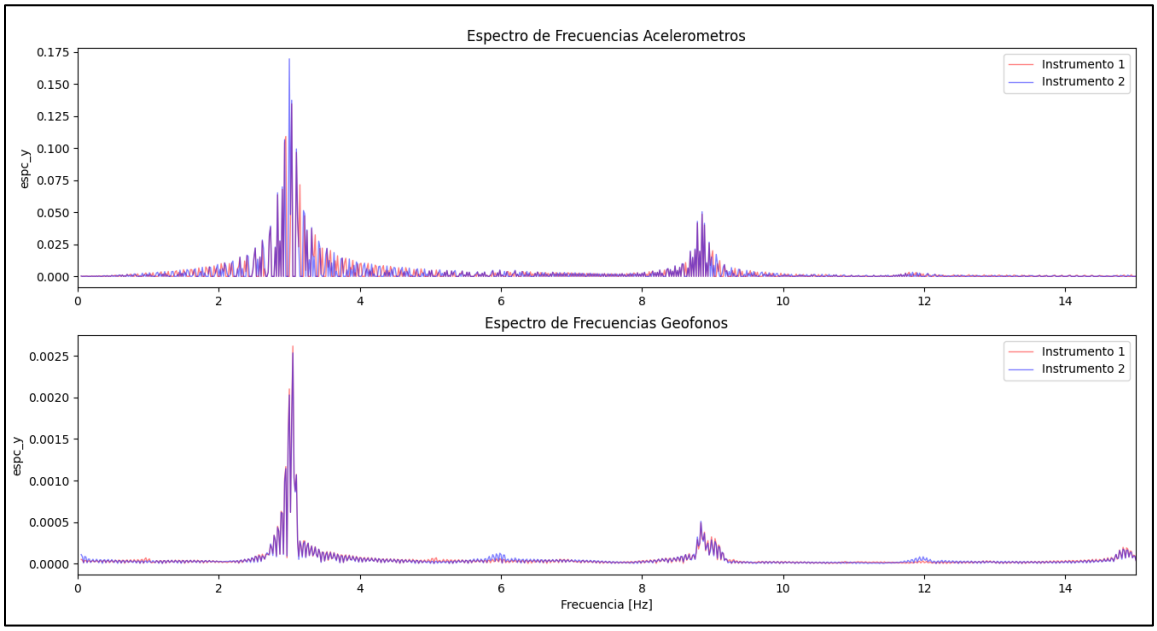

Figura C-2: Espectro de frecuencia medición 1
Fuente: Elaboración propia

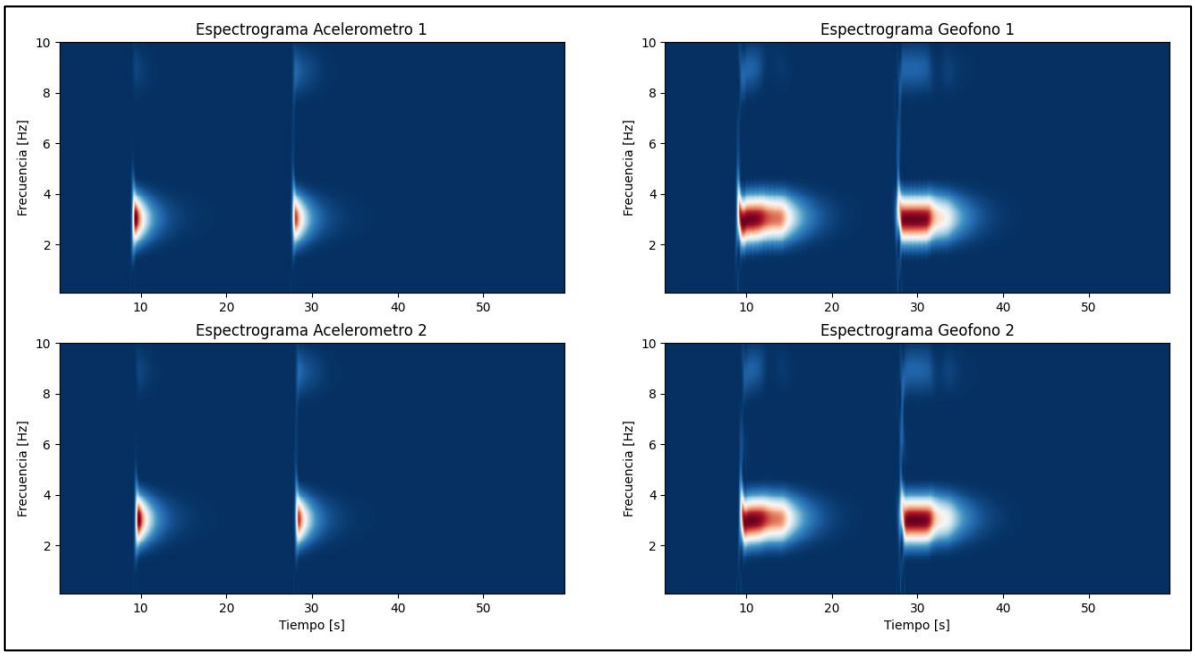

Figura C-3: Espectrograma medición 1
Fuente: Elaboración propia

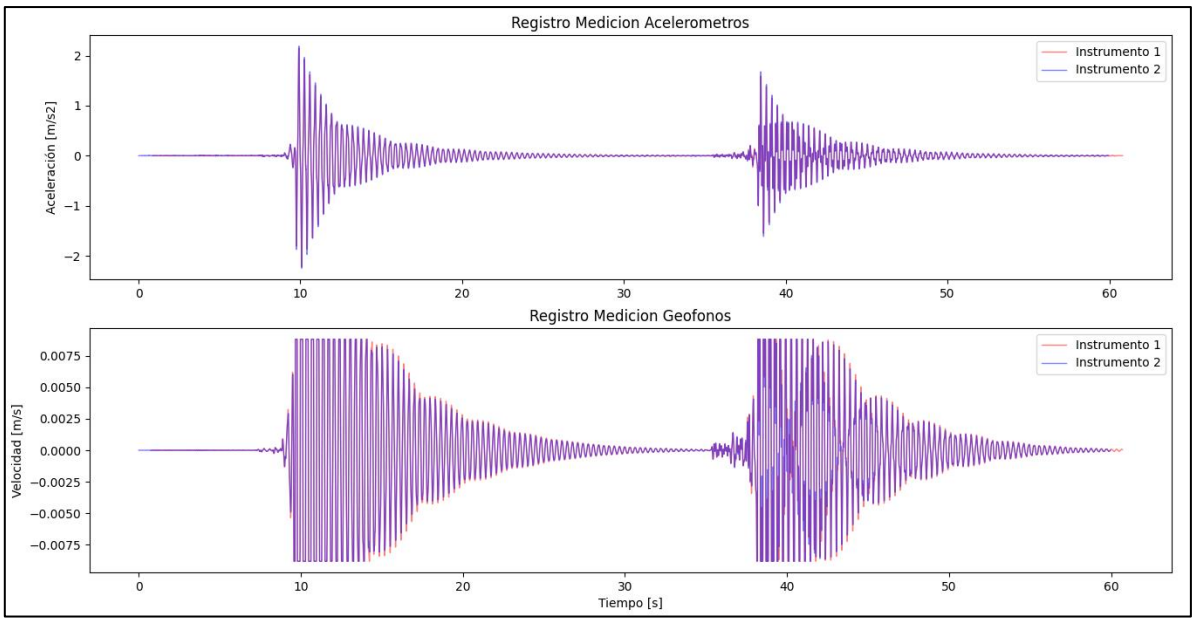

Figura C-4: Registro de medición 2
Fuente: Elaboración propia

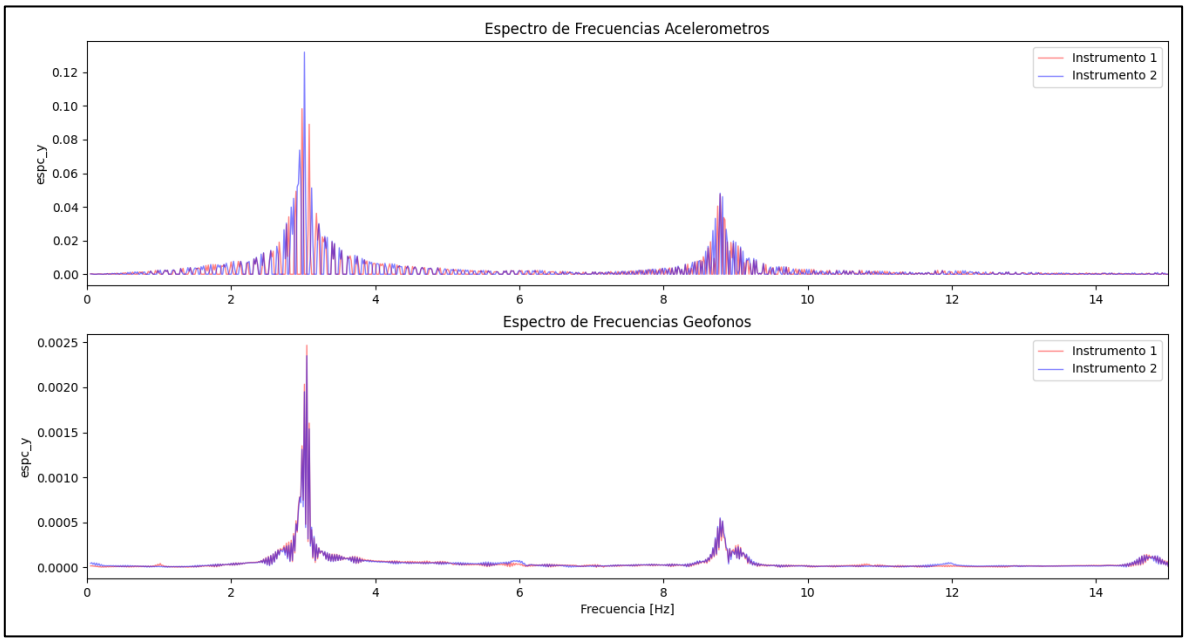

Figura C-5: Espectro de frecuencia medición 2
Fuente: Elaboración propia

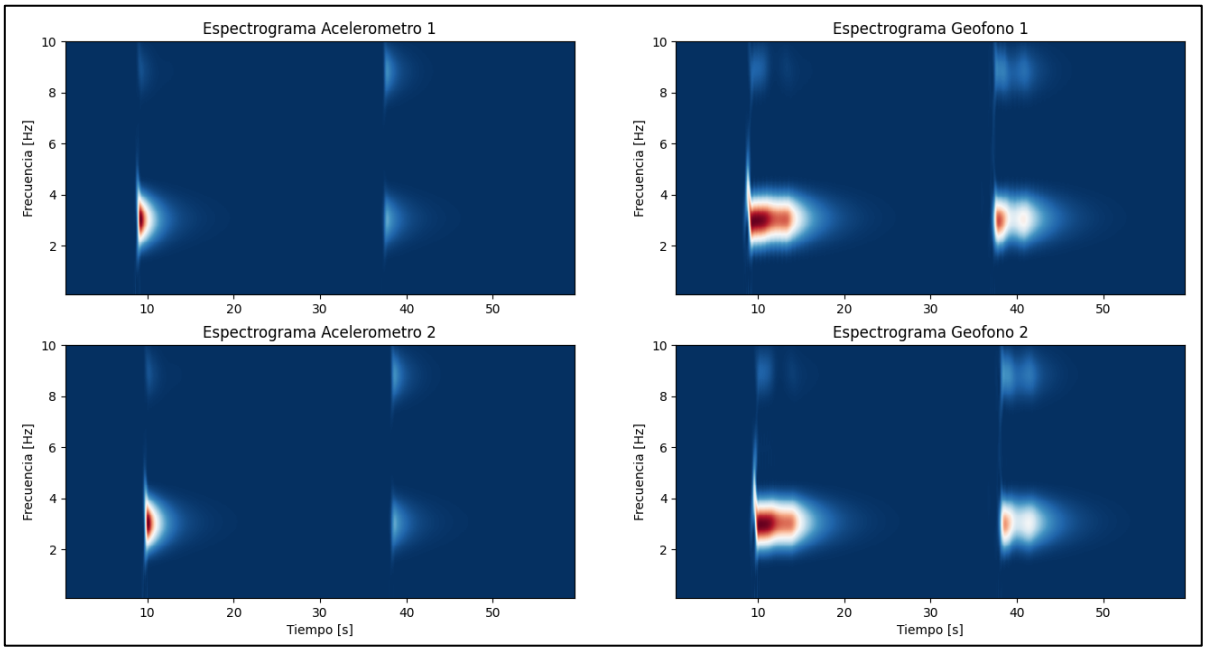

Figura C-6: Espectrograma medición 2
Fuente: Elaboración propia

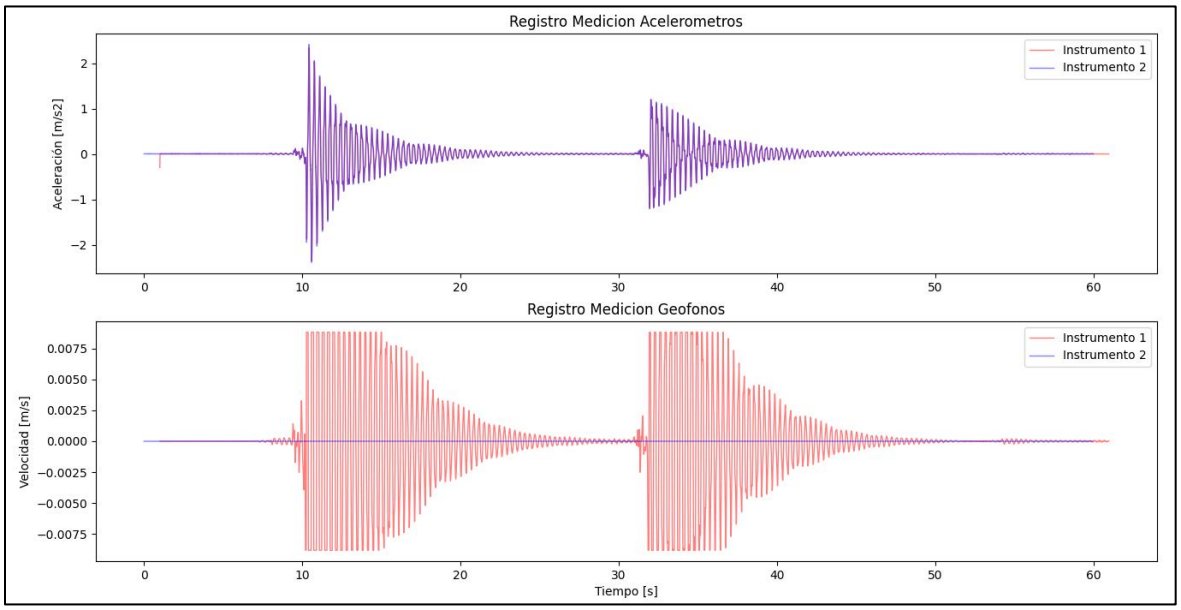

Figura C-7: Registro de medición 3
Fuente: Elaboración propia

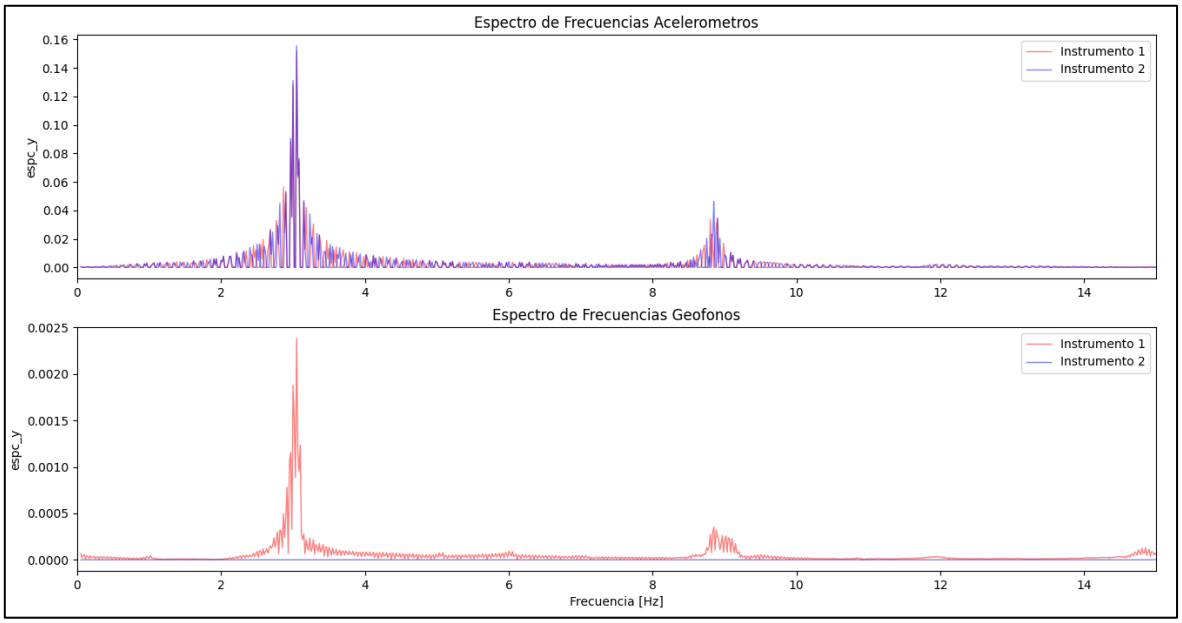

Figura C-8: Espectro de frecuencia medición 3
Fuente: Elaboración propia

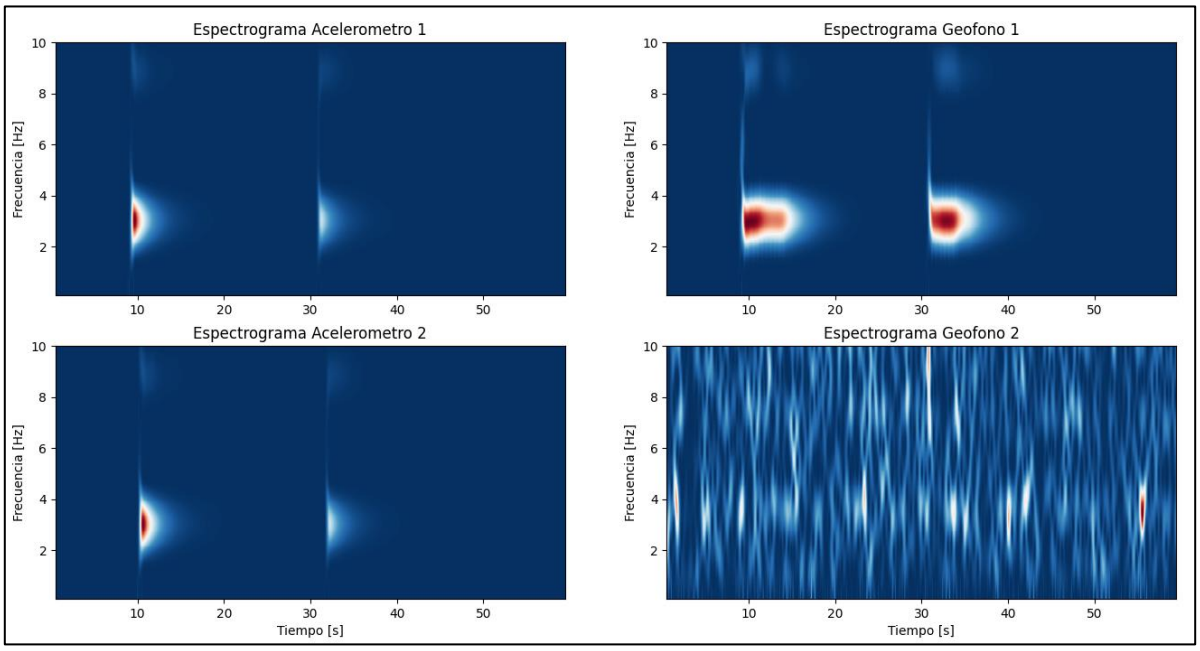

Figura C-9: Espectrograma medición 3
Fuente: Elaboración propia

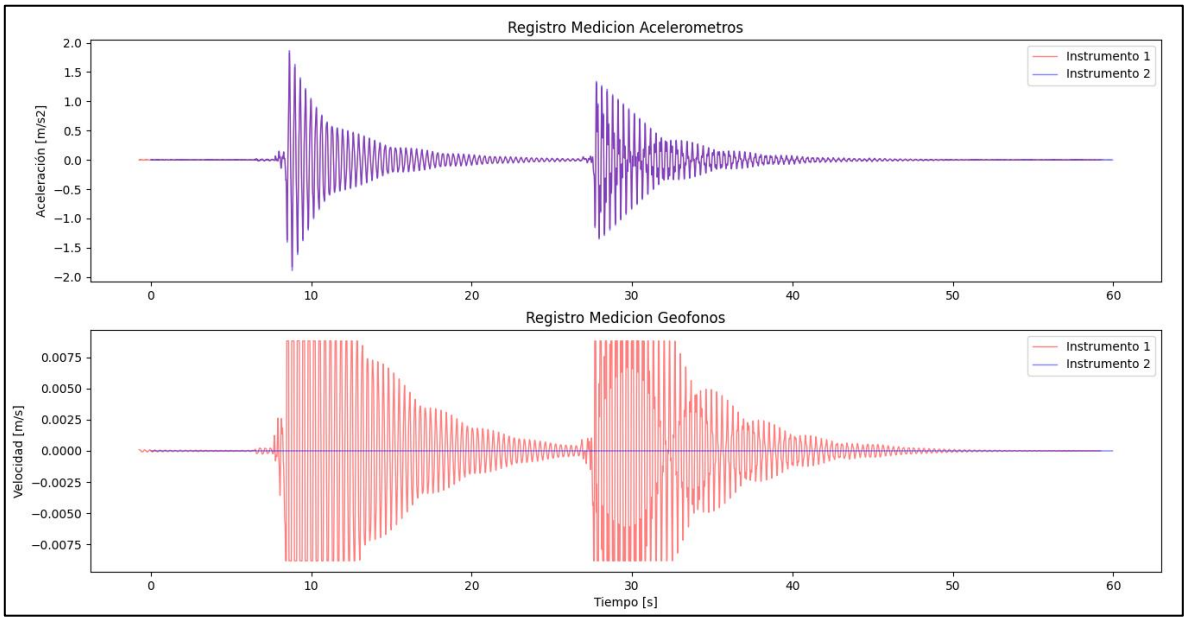

Figura C-10: Registro de medición 4
Fuente: Elaboración propia

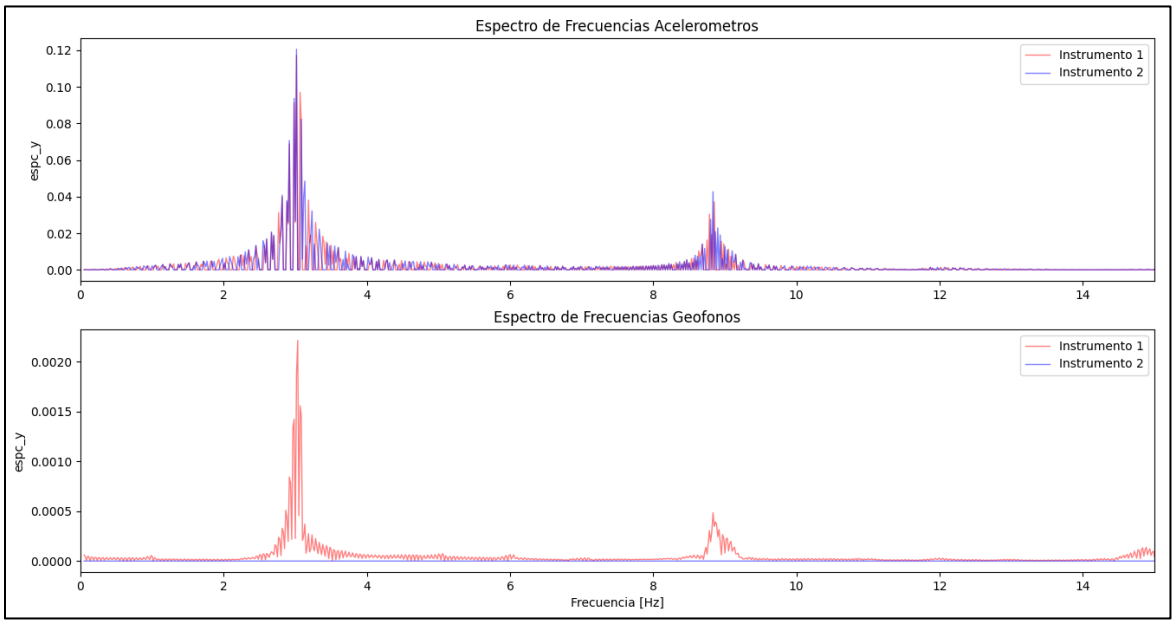

Figura C-11: Espectro de frecuencia medición 4
Fuente: Elaboración propia

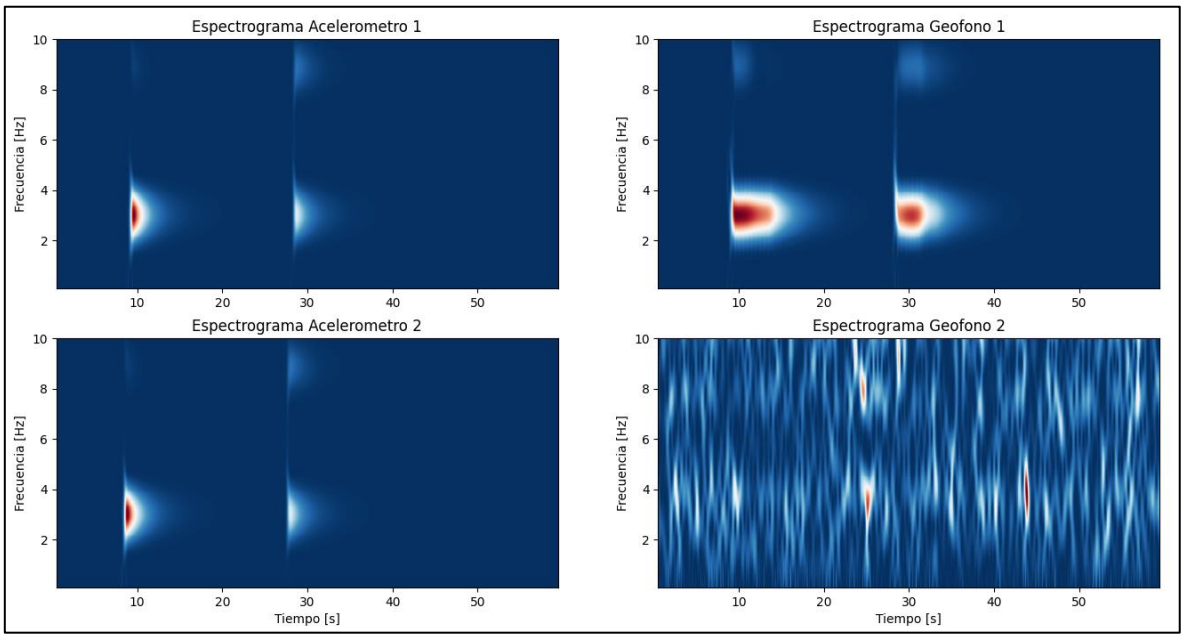

Figura C-12: Espectrograma medición 4
Fuente: Elaboración propia

D. MEDICIONES EDIFICIO P

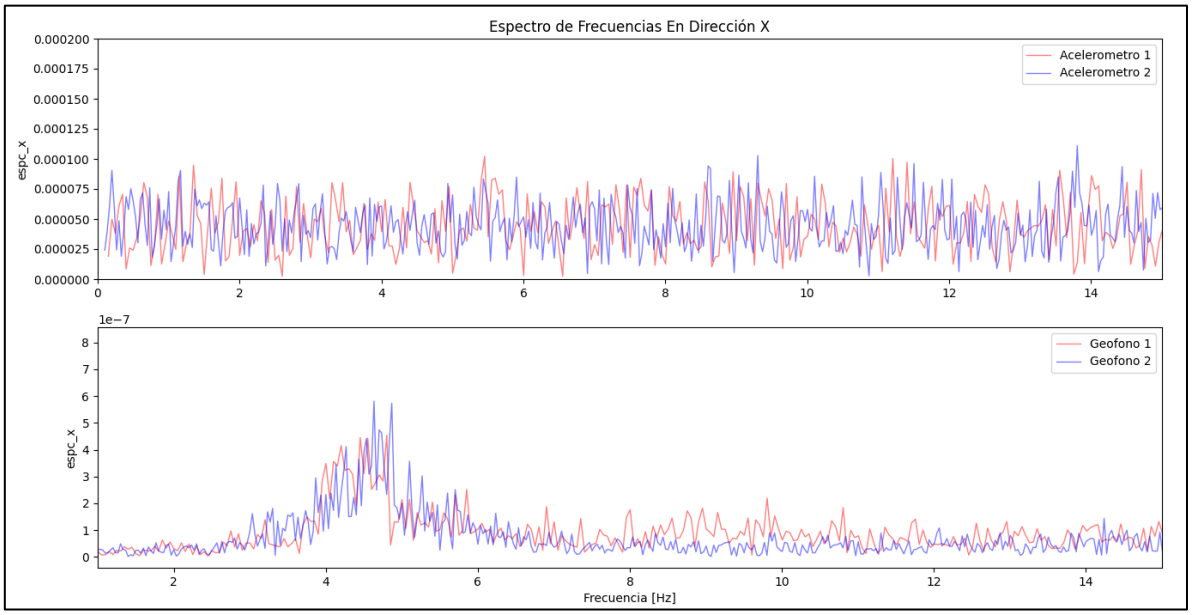

Figura D-1: Espectro edificio medición 1 dirección X
Fuente: Elaboración propia

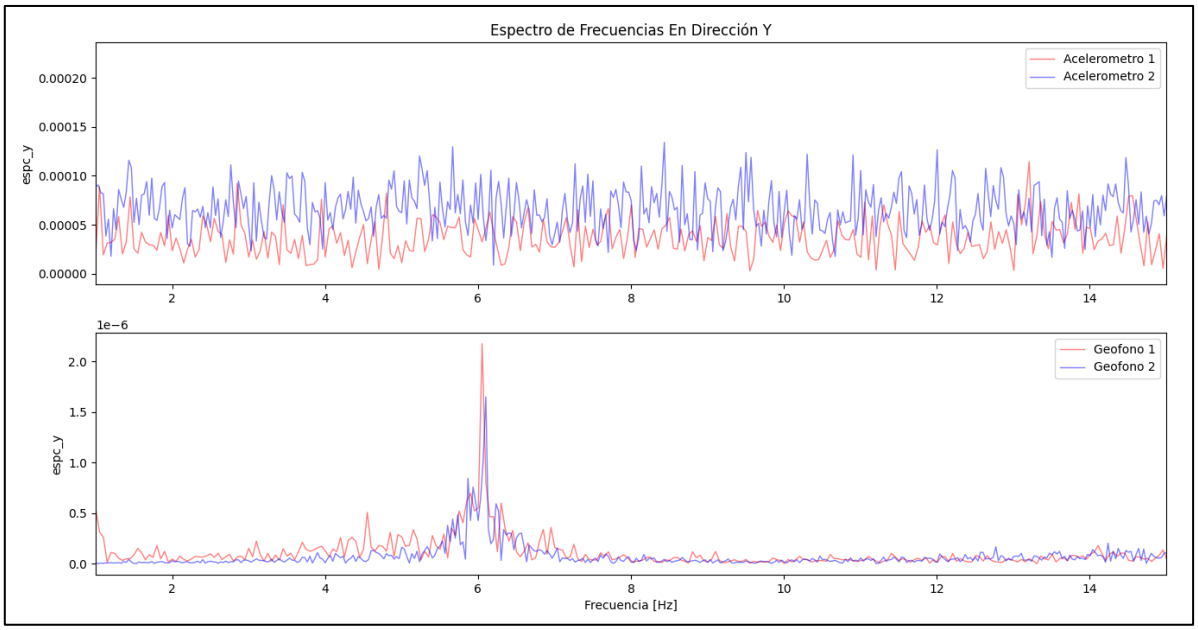

Figura D-2: Espectro edificio medición 1 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

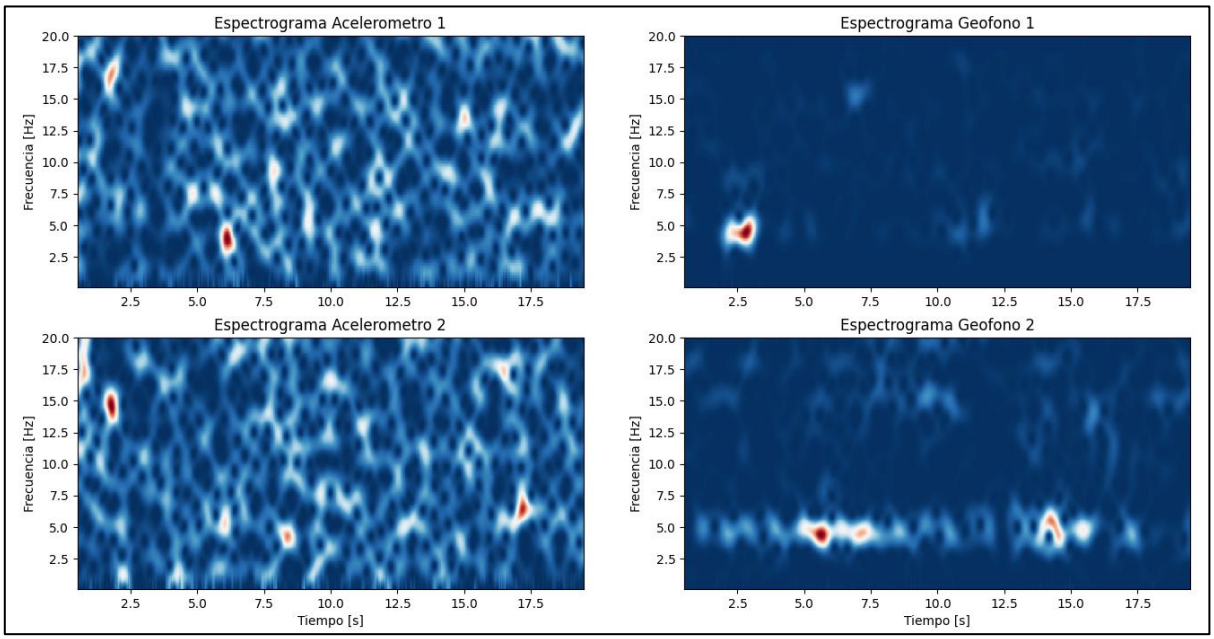

Figura D-3: Espectrograma edificio medición 1 dirección X
Fuente: Elaboración propia

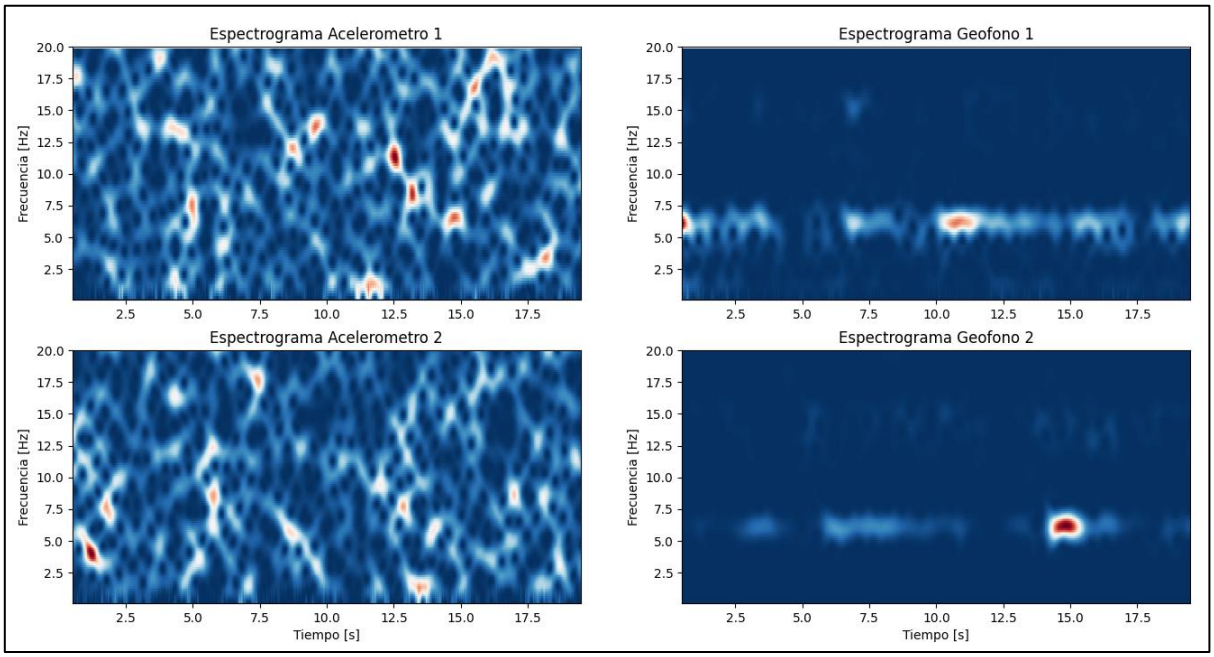

Figura D-4: Espectrograma edificio medición 1 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

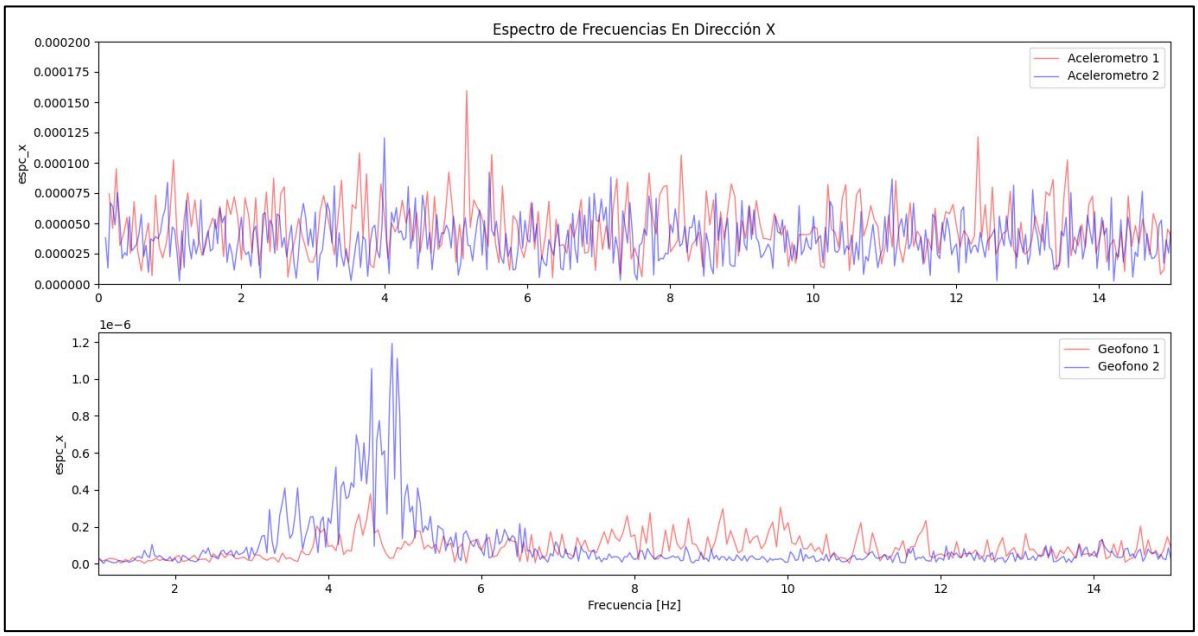

Figura D-5: Espectro edificio medición 2 dirección X
Fuente: Elaboración propia

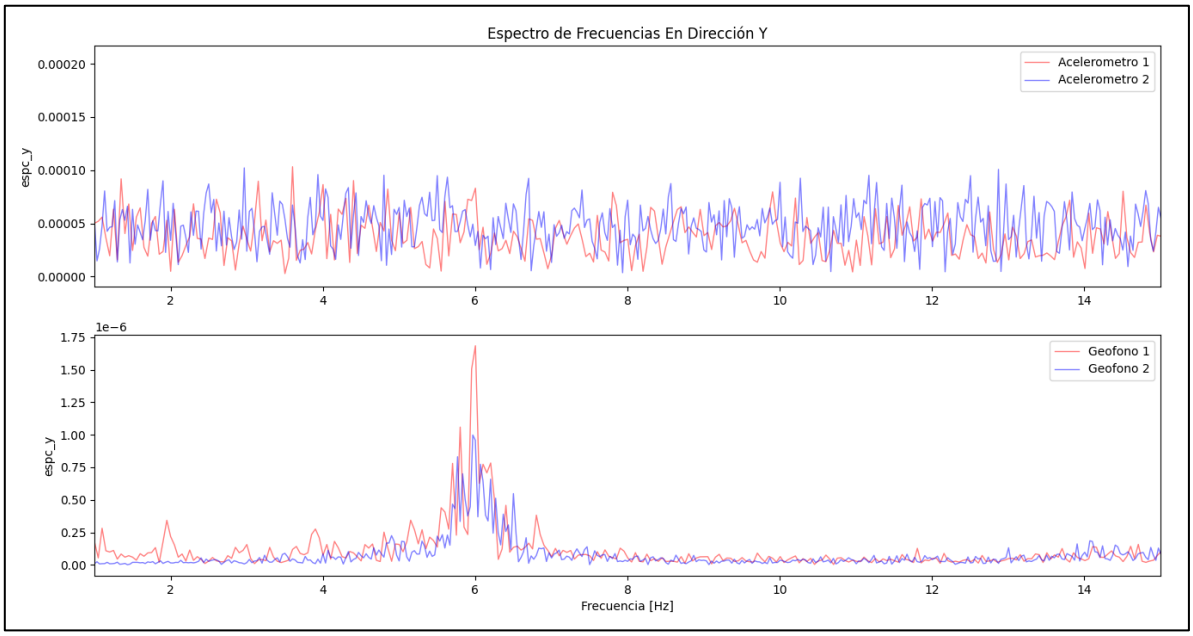

Figura D-6: Espectro edificio medición 2 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

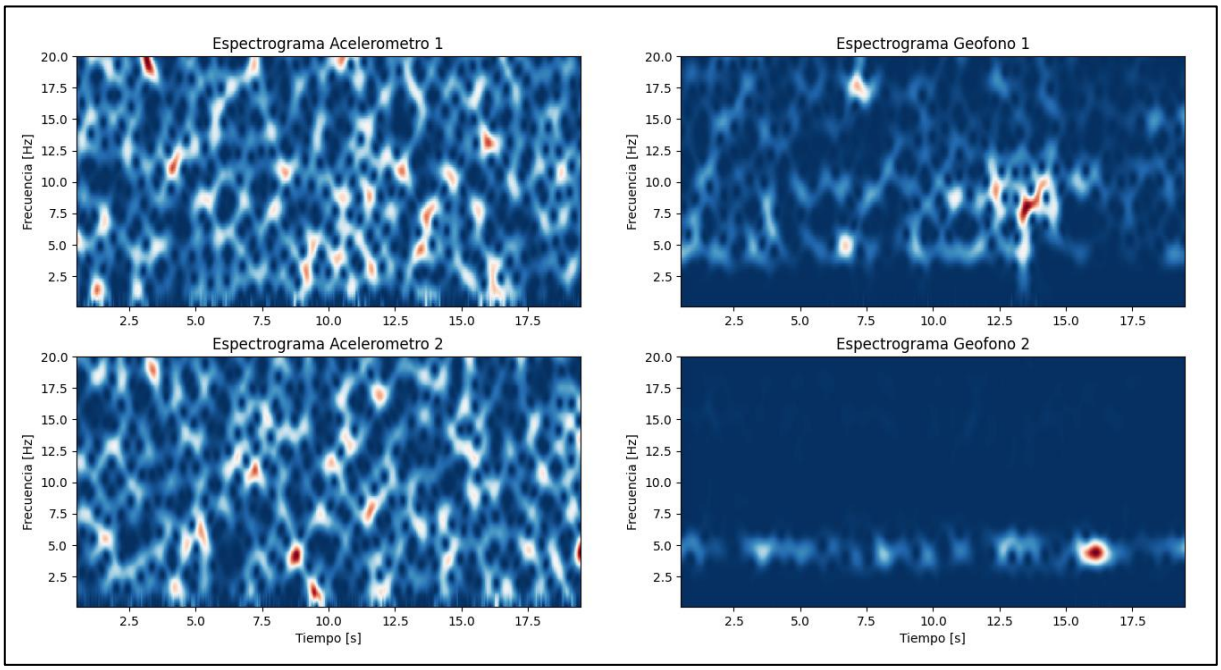

Figura D-7: Espectrograma edificio medición 2 dirección X
Fuente: Elaboración propia

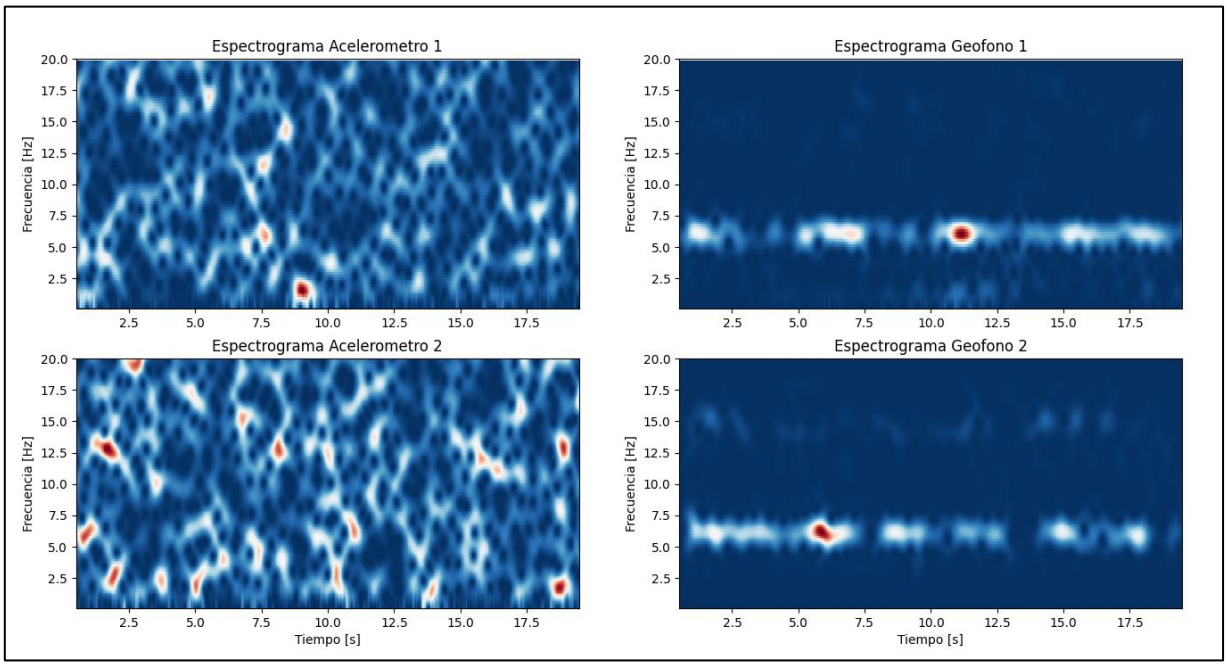

Figura D-8: Espectrograma edificio medición 2 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

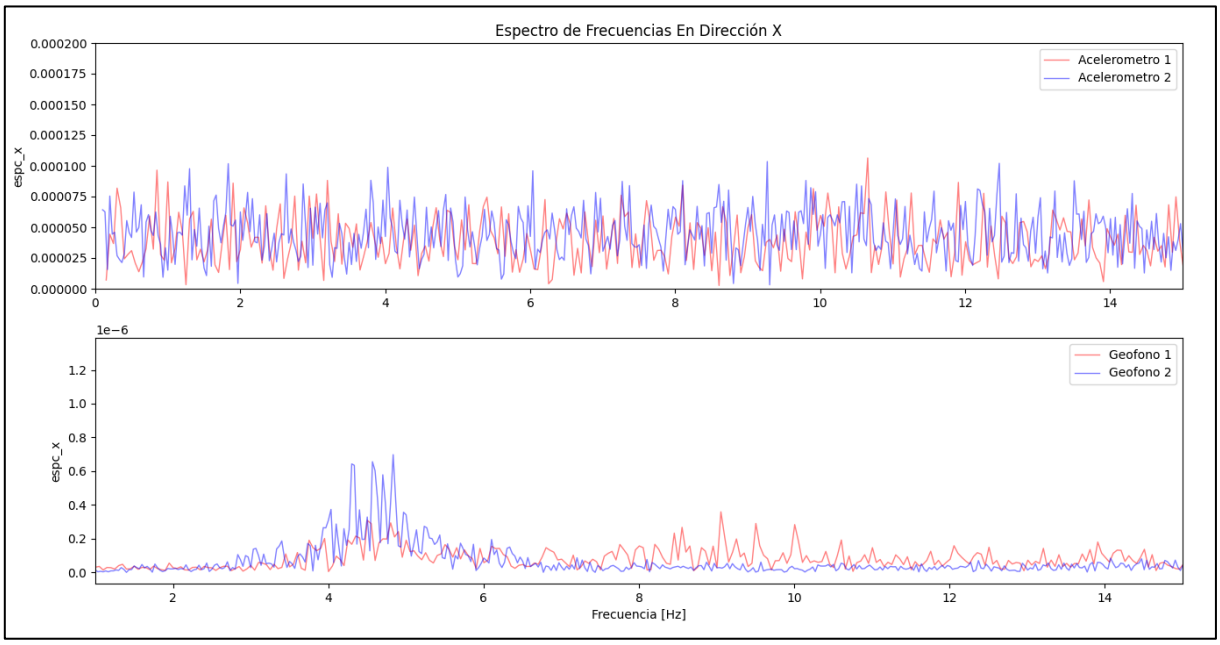

Figura D-9: Espectro edificio medición 3 dirección X
Fuente: Elaboración propia

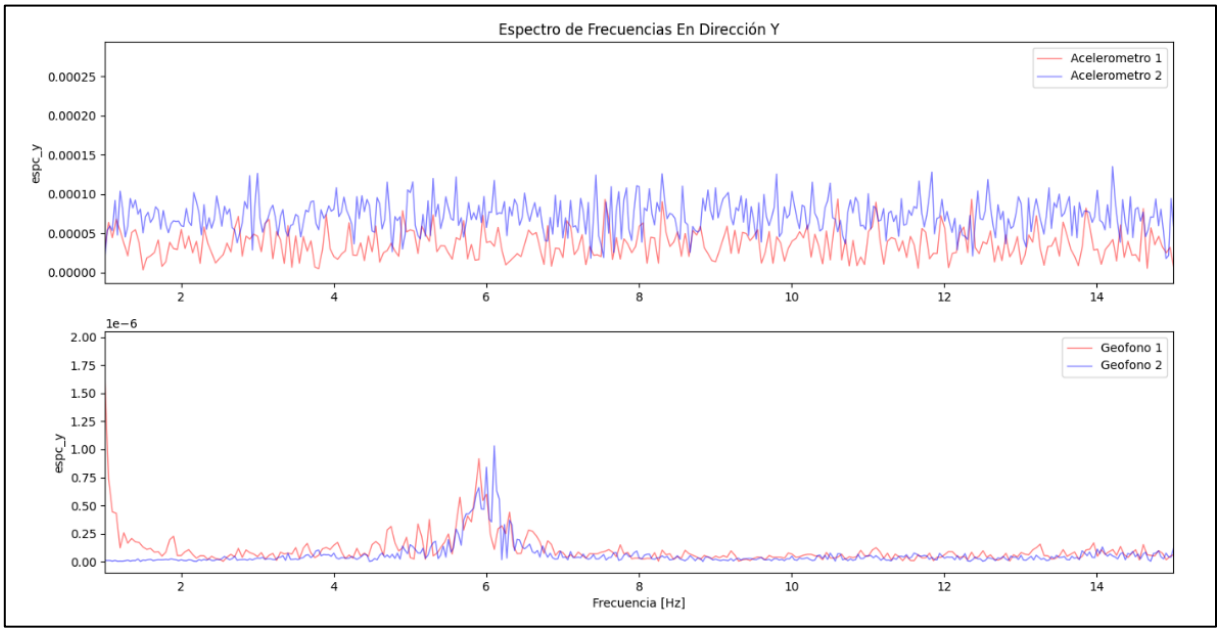

Figura D-10: Espectro edificio medición 3 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

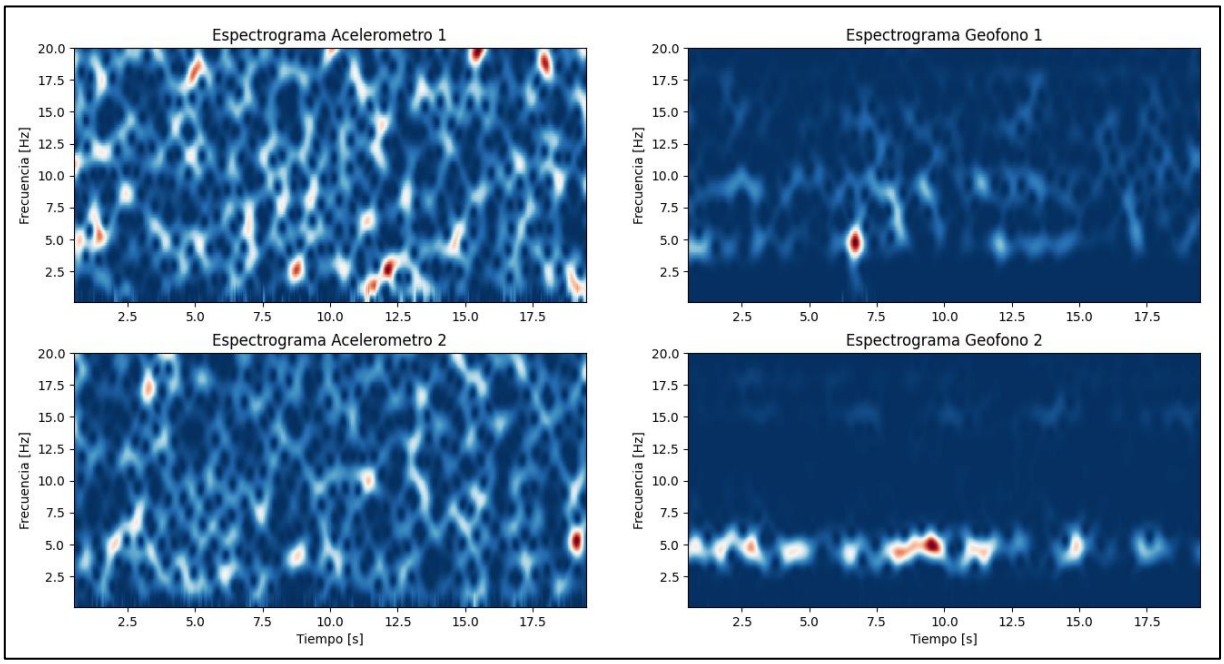

Figura D-11: Espectrograma edificio medición 3 dirección X
Fuente: Elaboración propia

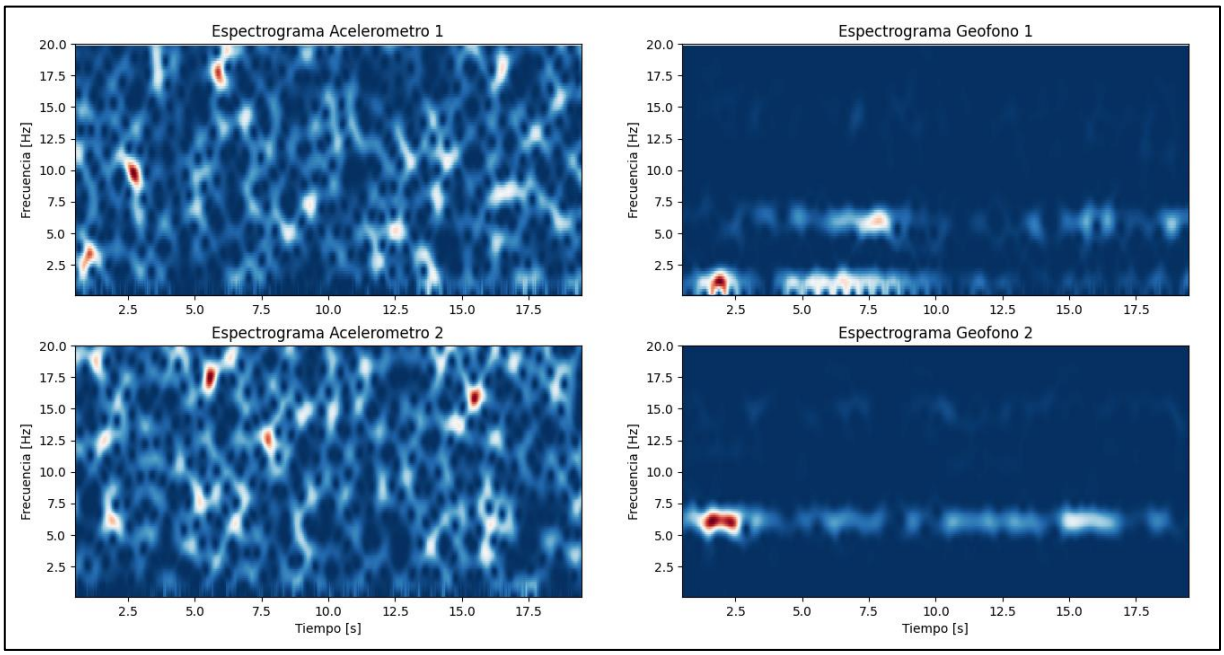

Figura D-12: Espectrograma edificio medición 3 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

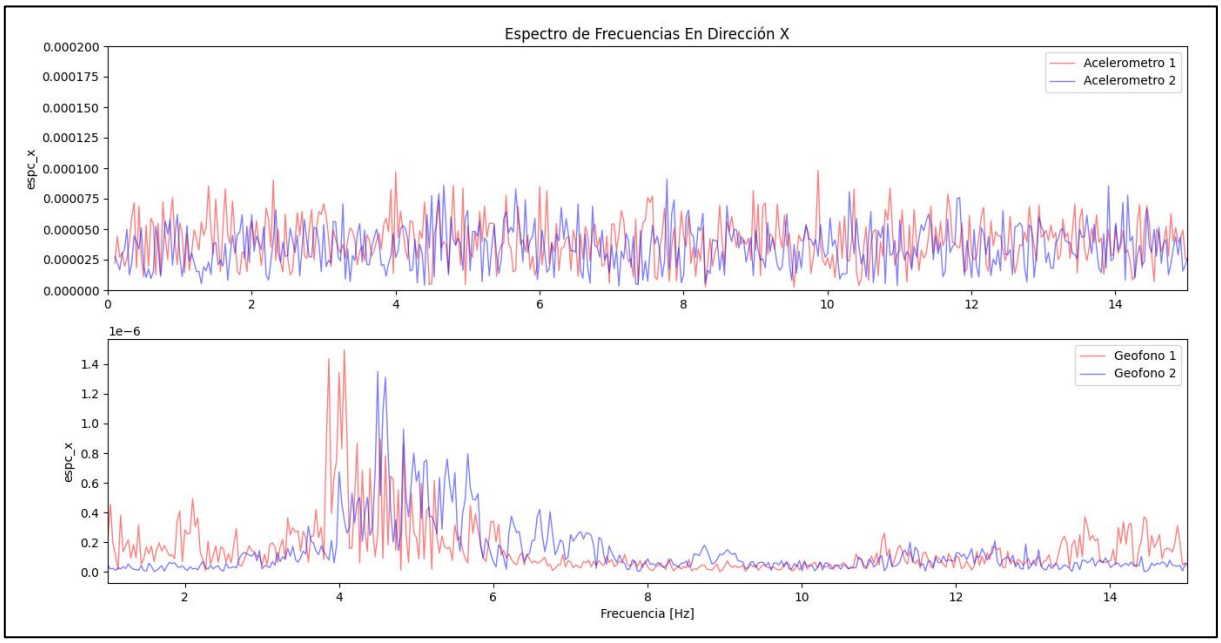

Figura D-13: Espectro edificio medición 4 dirección X
Fuente: Elaboración propia

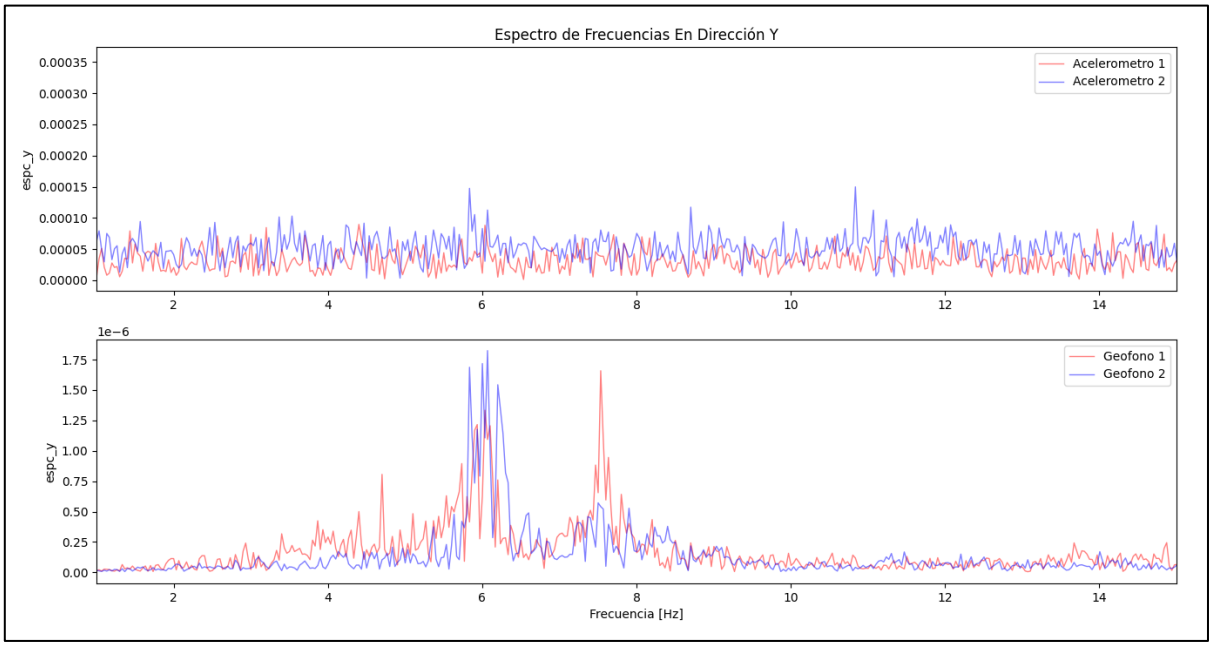

Figura D-14: Espectro edificio medición 4 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

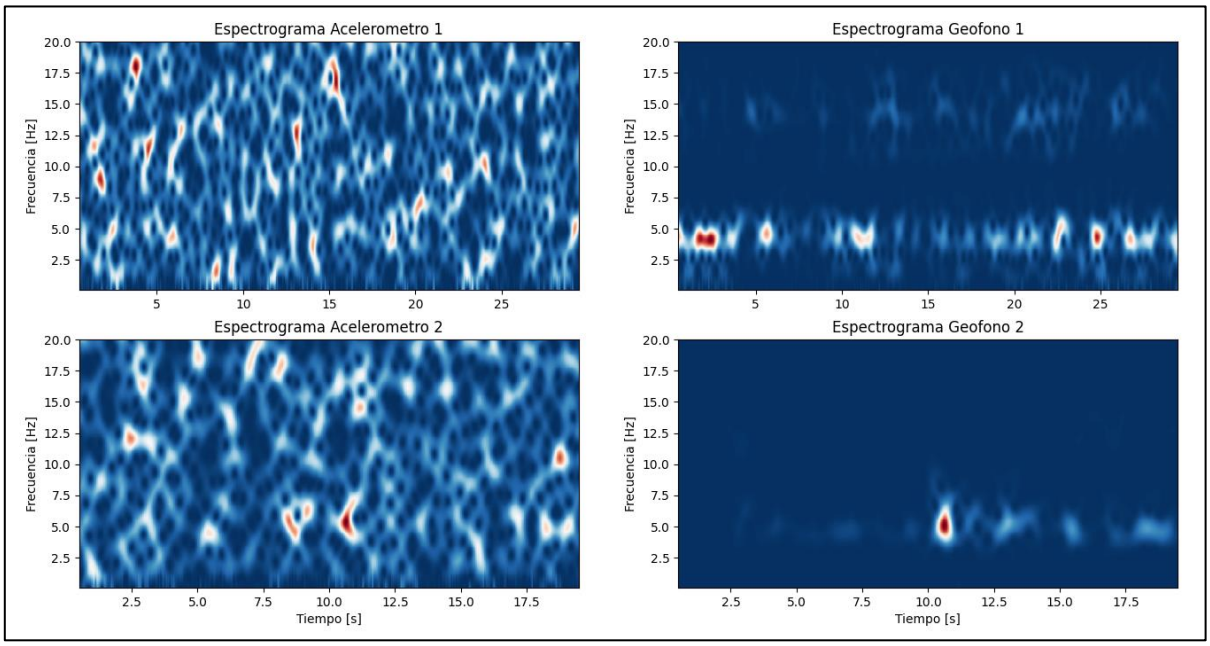

Figura D-15: Espectrograma edificio medición 4 dirección X
Fuente: Elaboración propia

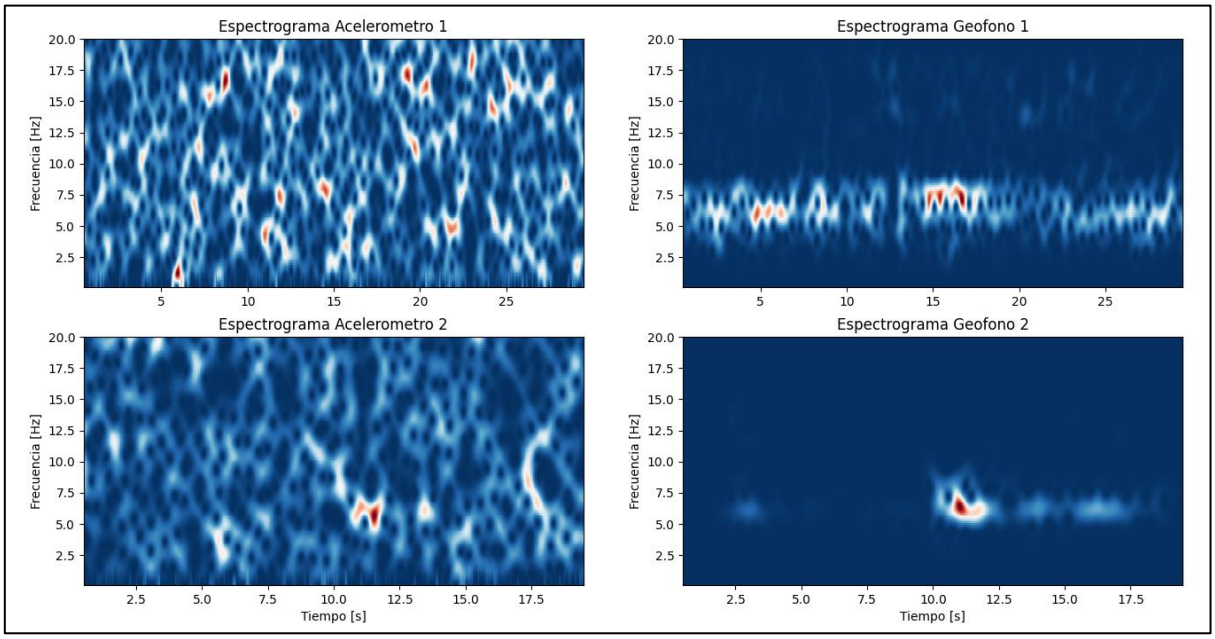

Figura D-16: Espectrograma edificio medición 4 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

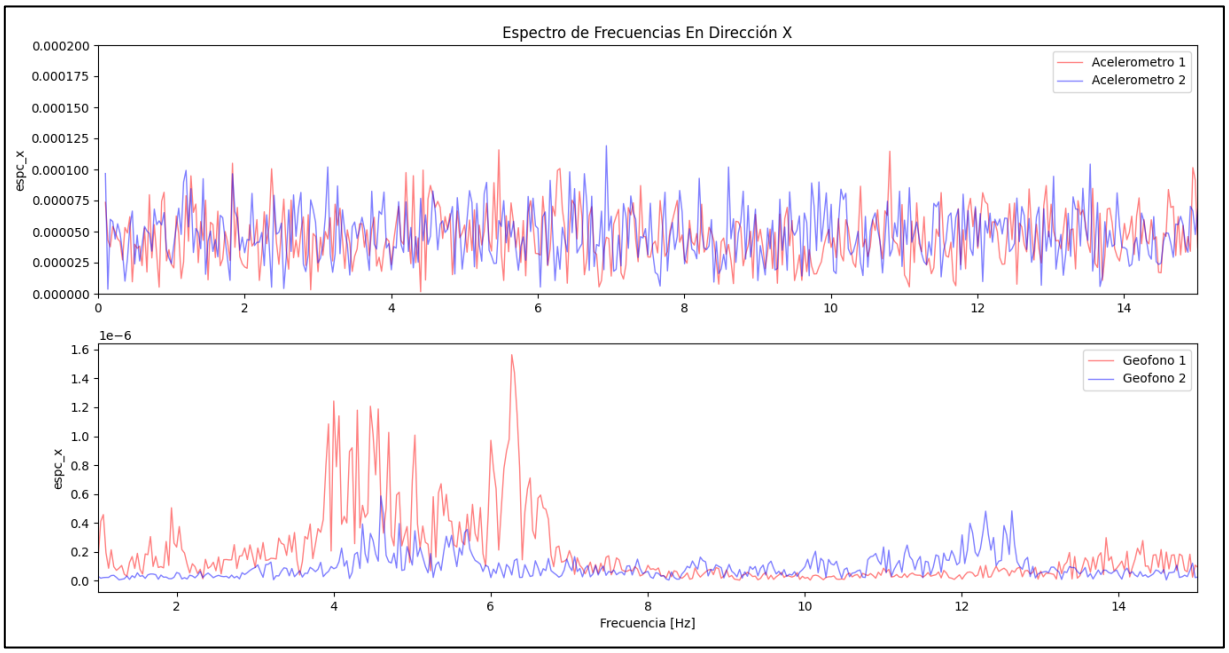

Figura D-17: Espectro edificio medición 5 dirección X
Fuente: Elaboración propia

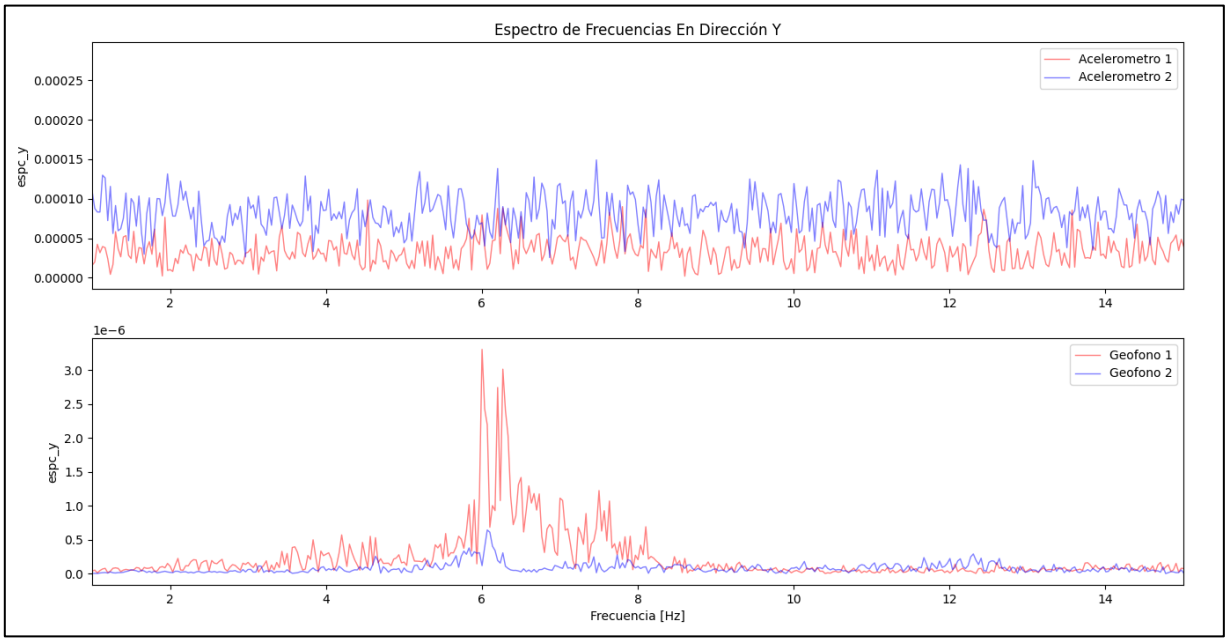

Figura D-18: Espectro edificio medición 5 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

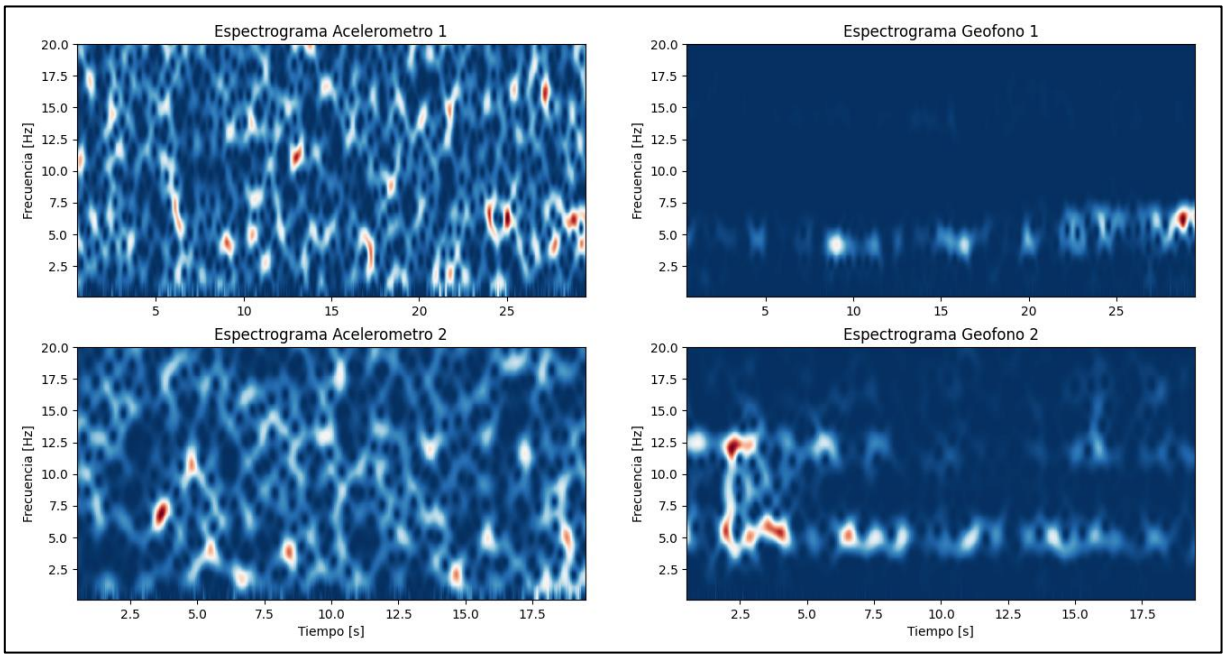

Figura D-19: Espectrograma edificio medición 5 dirección X
Fuente: Elaboración propia

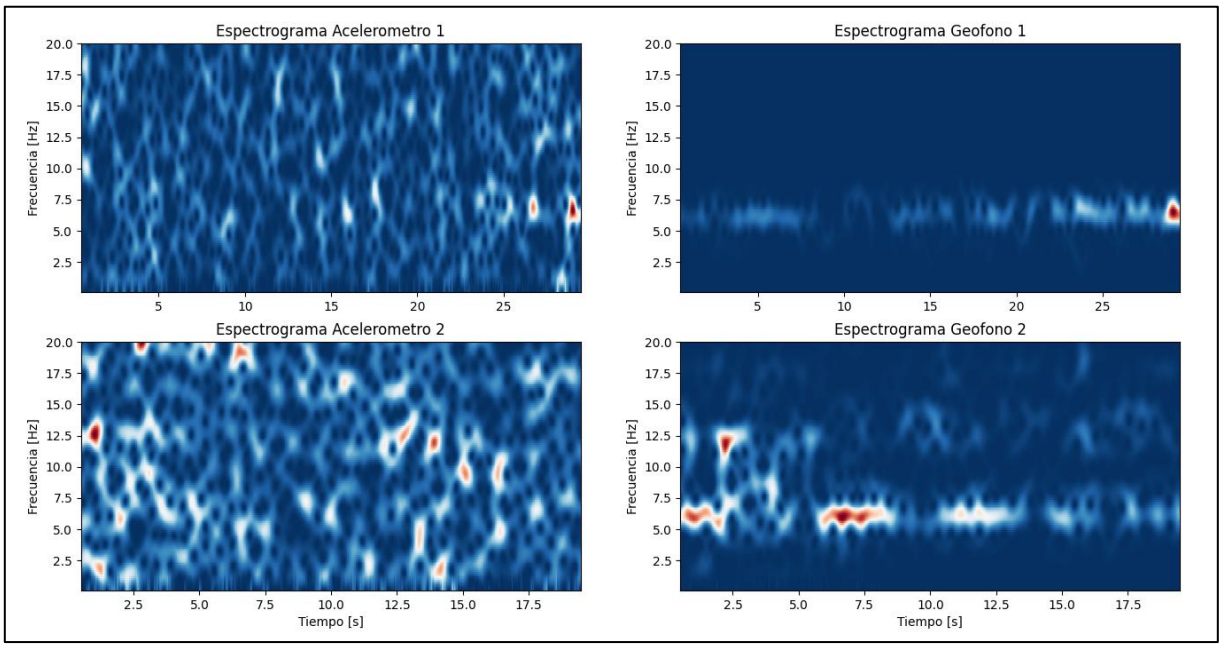

Figura D-20: Espectrograma edificio medición 5 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

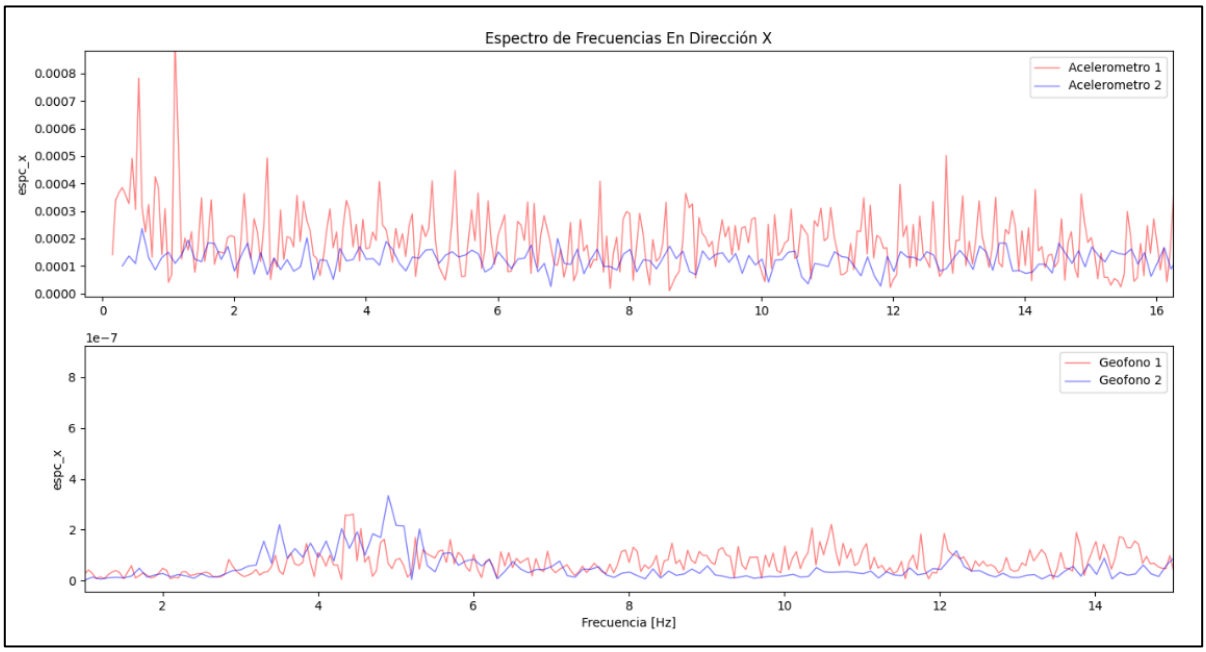

Figura D-21: Espectro edificio medición 6 dirección X
Fuente: Elaboración propia

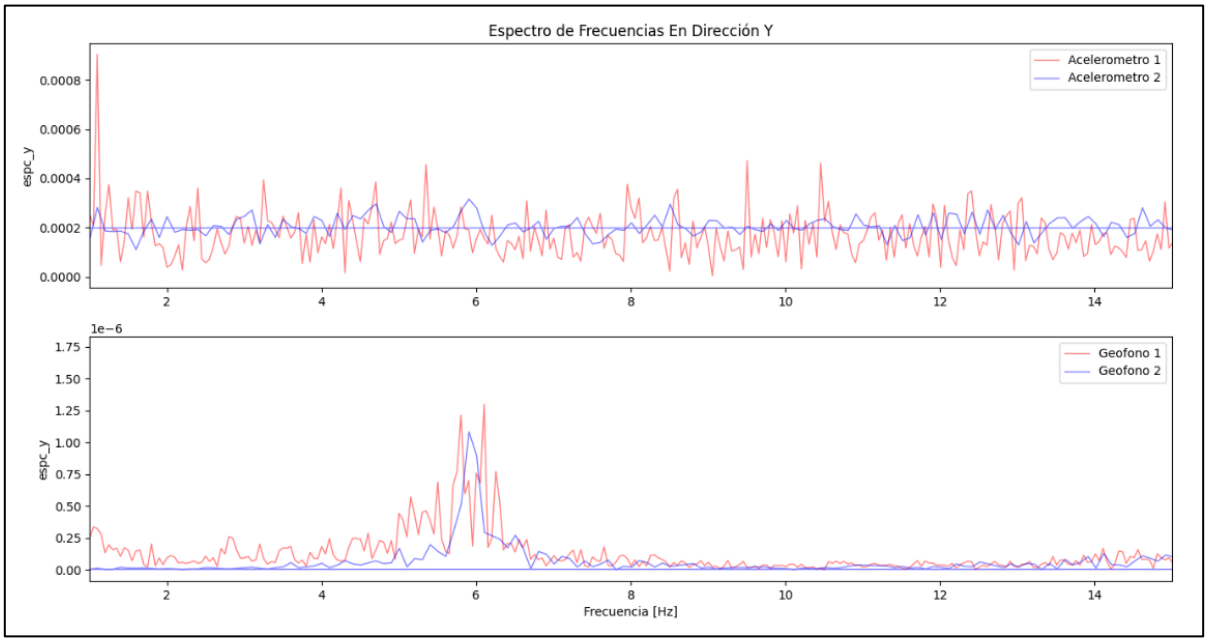

Figura D-22: Espectro edificio medición 6 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

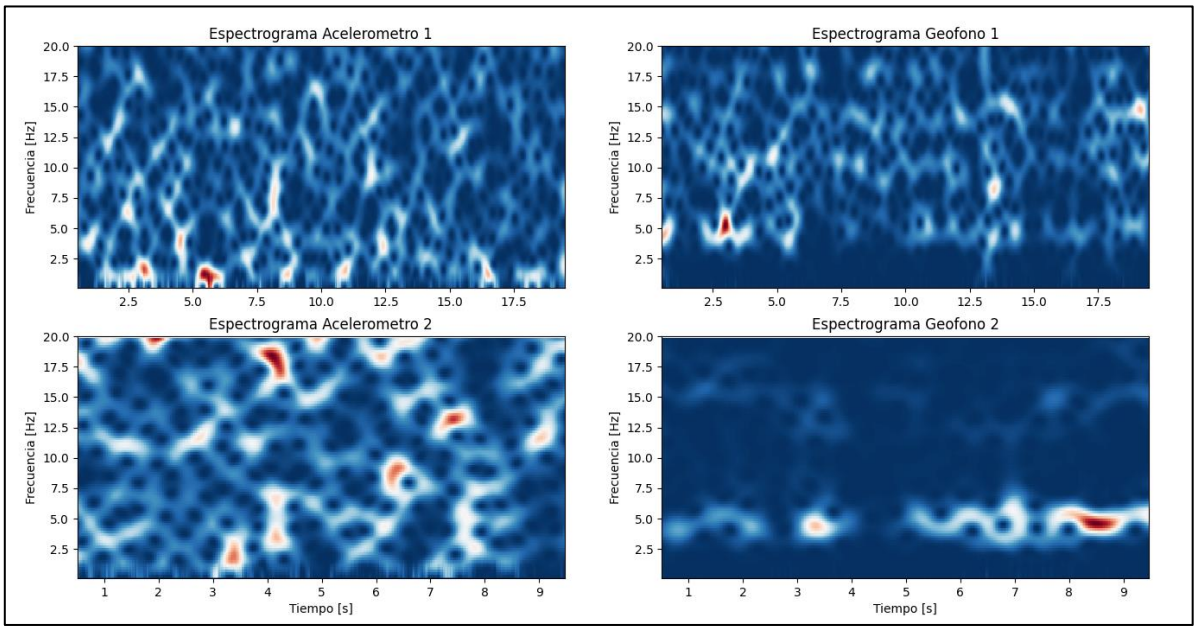

Figura D-23: Espectrograma edificio medición 6 dirección X
Fuente: Elaboración propia

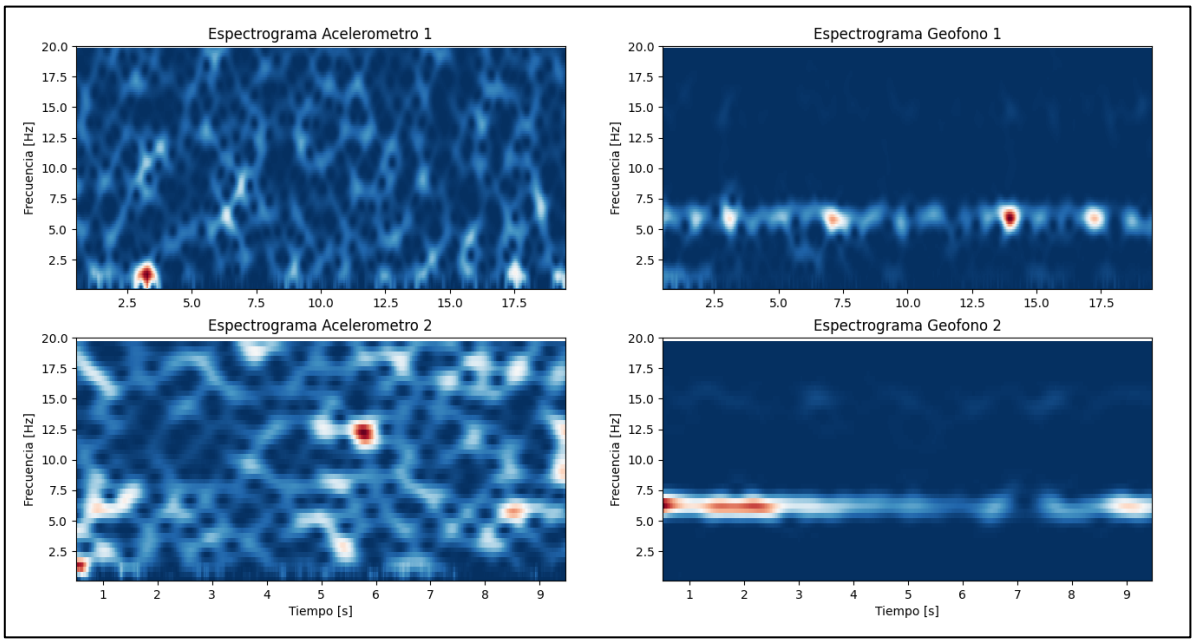

Figura D-24: Espectrograma edificio medición 6 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

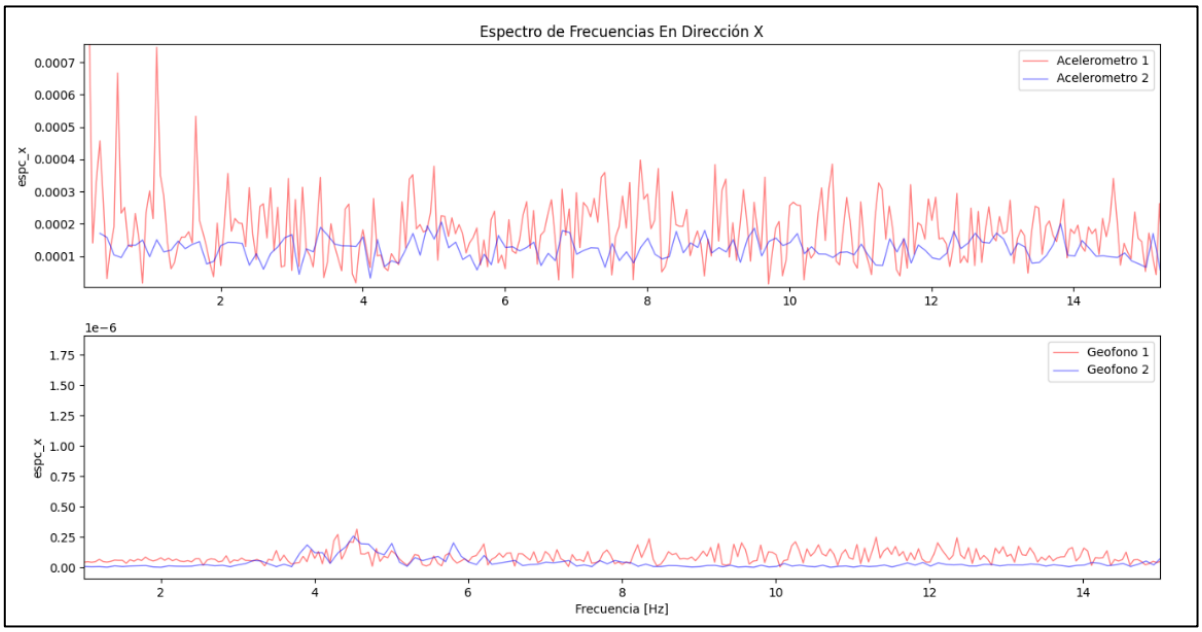

Figura D-25: Espectro edificio medición 7 dirección X
Fuente: Elaboración propia

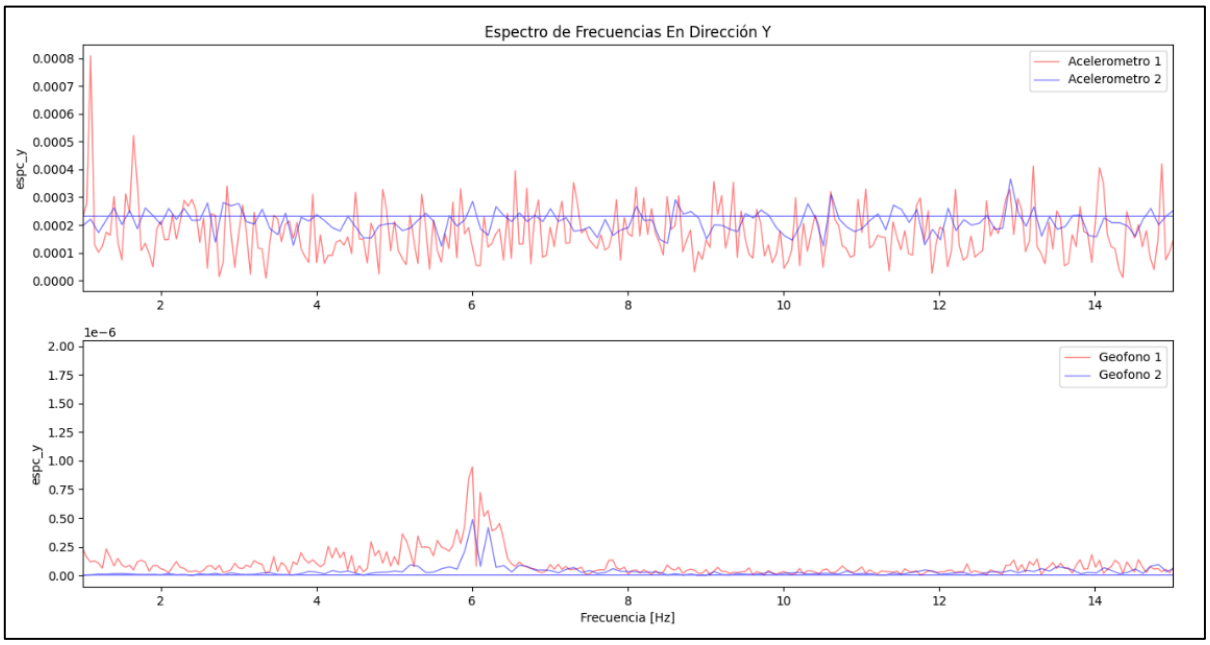

Figura D-26: Espectro edificio medición 7 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

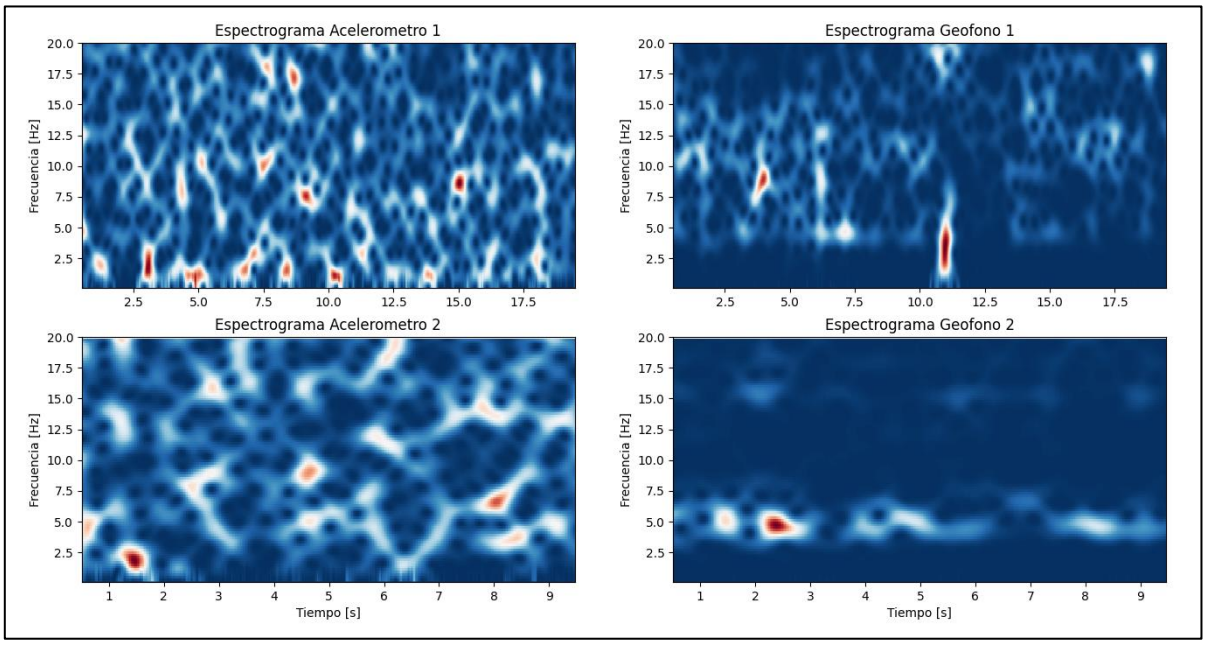

Figura D-27: Espectrograma edificio medición 7 dirección X
Fuente: Elaboración propia

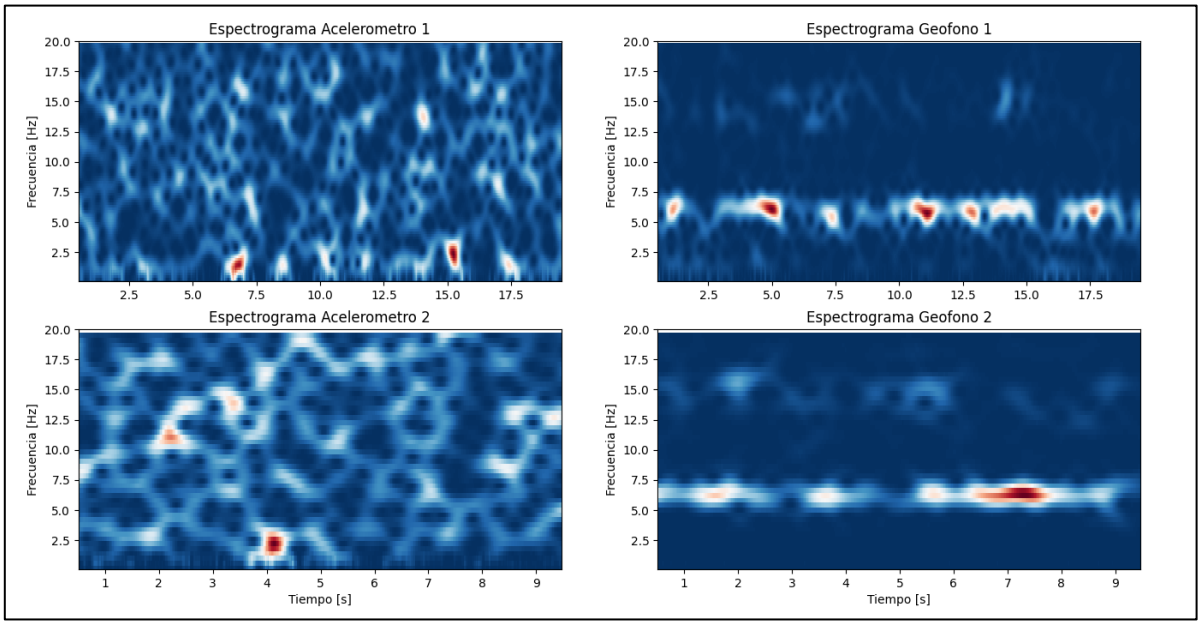

Figura D-28: Espectrograma edificio medición 7 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

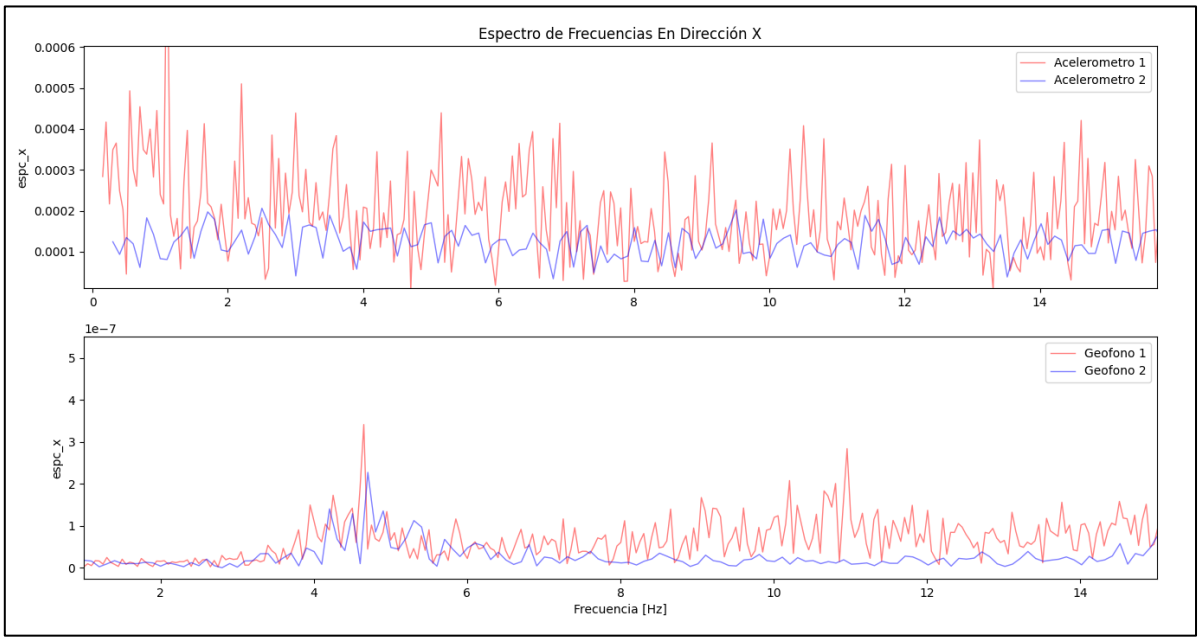

Figura D-29: Espectro edificio medición 8 dirección X
Fuente: Elaboración propia

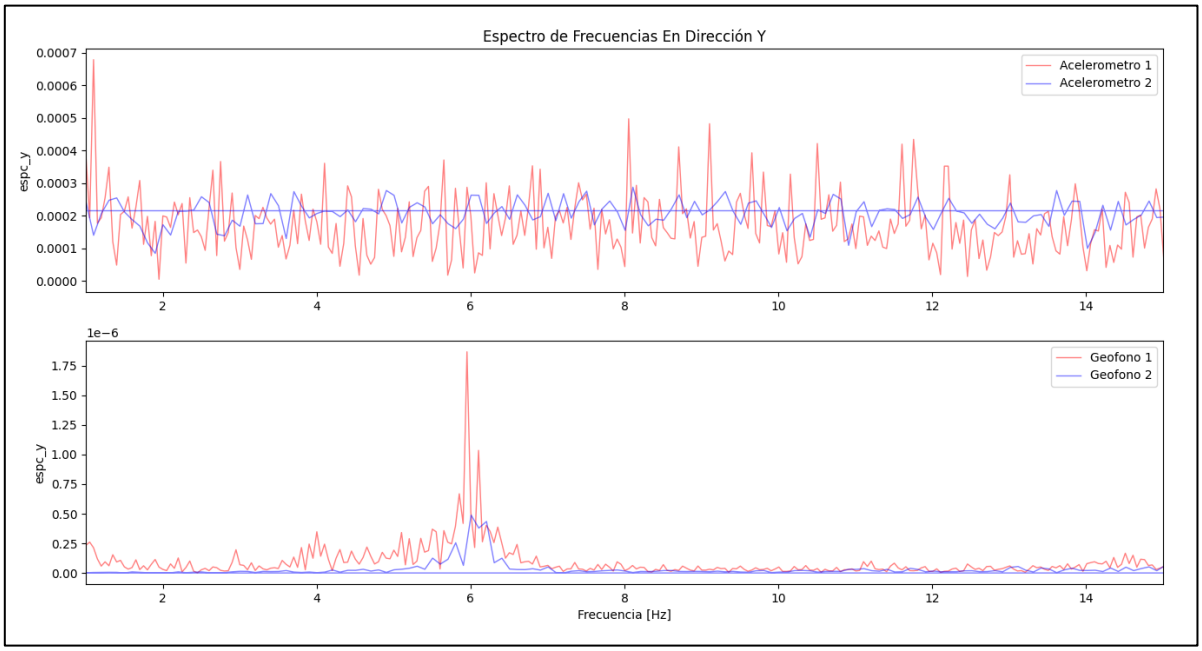

Figura D-30: Espectro edificio medición 8 dirección Y
Fuente: Elaboración propia

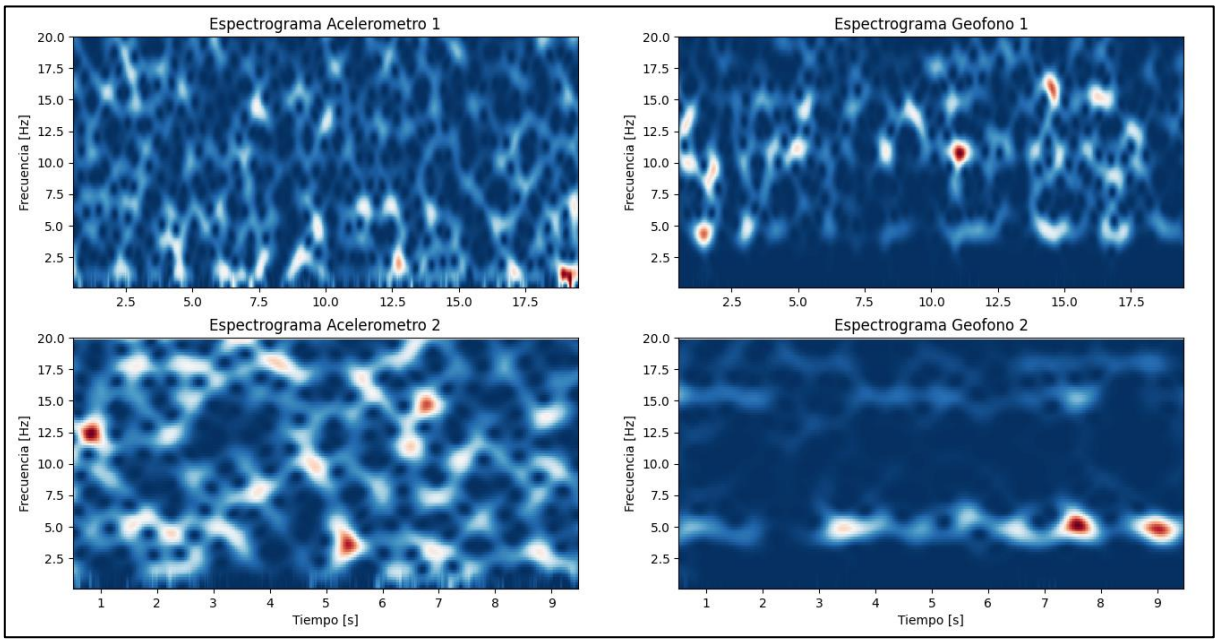

Figura D-31: Espectrograma edificio medición 8 dirección X
Fuente: Elaboración propia

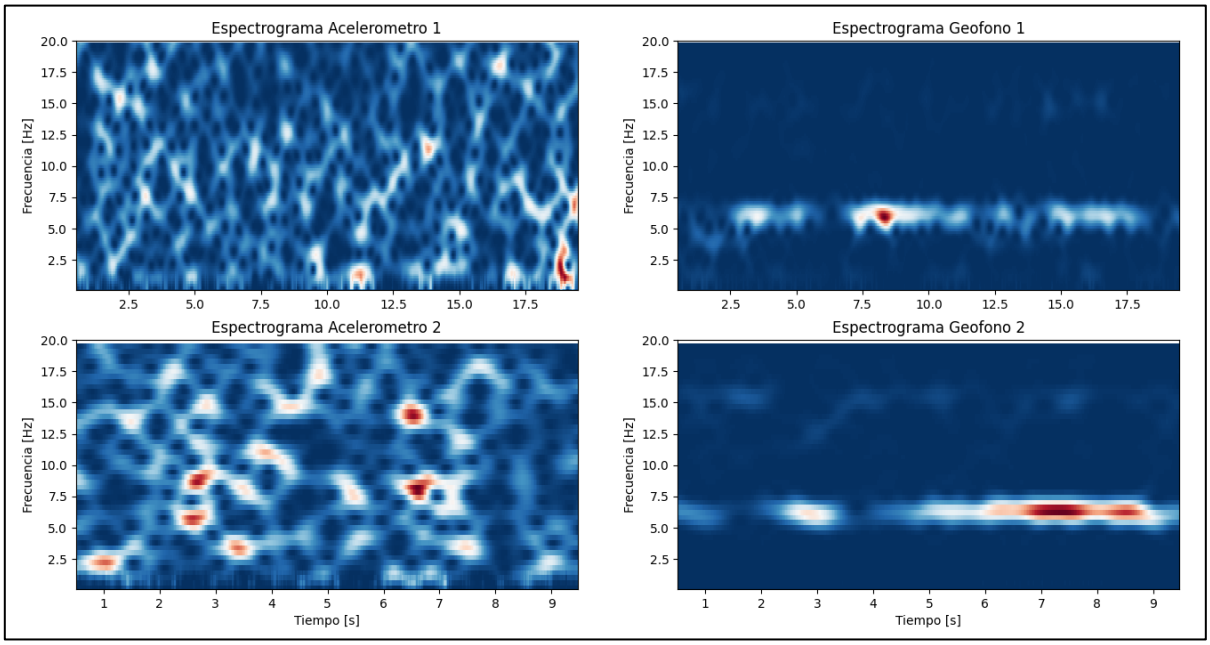

Figura D-32: Espectrograma edificio medición 8 dirección Y
Fuente: Elaboración propia