



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación Estudios de Posgrado

**IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA
ESTRUCTURA REHABILITADA**

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN INGENIERÍA OPCIÓN TERMINAL EN
ESTRUCTURAS**

Presenta:

Ing. Ana María López Sánchez

Director de tesis: Dr. José Camargo Pérez

Codirector de tesis: Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui

Puebla, Pue.

Abril 2023



BUAP

Oficio No. SIEP/0052/2023

C. Ana María López Sánchez

Matrícula 221470183

Pasante de la Maestría en Ingeniería

con opción terminal en Estructuras

Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Identificación de propiedades dinámicas de una estructura rehabilitada.** Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Director de tesis al Dr. José Camargo Pérez y Codirector al Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, Enero 16 de 2023.

M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



C.c.p. Dr. José Camargo Pérez y Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui, Director y Codirector del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

AEPS/JPHT/sco*

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

Asunto: Carta de liberación del proyecto de tesis

M.I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la FIBUAP
ING4-101, CU BUAP
Presente.

Por medio de la presente me permito enviarle un cordial saludo y al mismo tiempo hacer de su conocimiento la siguiente carta de liberación de proyecto de tesis.

El que suscribe, asesor del tema de tesis titulado: "Identificación de propiedades dinámicas de una estructura rehabilitada" le informo que, después de revisar el contenido del documento, no tengo inconveniente alguno en autorizar la impresión del documento completo para que la alumna de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Estructuras, Matrícula: 221470183, Ana María López Sánchez, pueda continuar su proceso de titulación.

Agradezco su amable atención y espero no tenga inconveniente en proporcionar todas las facilidades que le puedan brindar copia la estudiante, quedo a sus órdenes para cualquier información adicional.

Atentamente
H. Puebla de Z. 17 de abril de 2023



Dr. José Camargo Pérez
Director de la Tesis
Facultad de Ingeniería de la B.U.A.P.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la accesoria, guía y retroalimentación del Dr. José Camargo Pérez; por todo su tiempo, paciencia y conocimiento compartido no solo en el desarrollo de este trabajo, de igual manera en sus clases impartidas.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios y por todos los conocimientos adquiridos durante mi estancia.

A mis padres por su cariño y apoyo; a mi madre por haberme transmitido los conocimientos básicos para continuar con mis estudios y a mi padre por darme bases solidadas.

Agradezco los conocimientos y apoyo del Arq. Emilio Rubio Gaona.

Expreso mi gratitud al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico durante mis estudios.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
I.- ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	6
I.1.-LOCALIZACIÓN DEL EDIFICIO	6
I.2.-CLASIFICACIÓN DE ZONA SÍSMICA.....	7
I.3.-CLASIFICACION DE SUELO	8
I.4.-CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES	10
I.5.- DAÑOS CAUSADOS POR EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017	12
II.- DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	14
II.1 PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL.....	15
II.2 PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN EDIFICIO ING-4 EN 2017.....	16
II.3 PUNTOS INSTRUMENTADOS	17
III.-METODOLOGIA DE ANÁLISIS.....	24
III.1.- MÉTODOS PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES DINÁMICAS	24
III.2.- ESTIMACIÓN NO PARAMÉTRICA.....	25
III.2.1.- COCIENTE ESPECTRAL	28
III.2.2.- FUNCIONES DE COHERENCIA	29
III.2.3.- ÁNGULO DE FASE	31
III.2.4.- PORCENTAJE DE AMORTIGUAMIENTO	32
III.2.5.- PROCESAMIENTO DE DATOS.....	33
III.3.- ESTIMACIÓN PARAMETRICA	35
IV.- ANÁLISIS DE SEÑALES E IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS	39
IV.1.- ESPECTROS DE POTENCIA Y COCIENTES ESPECTRAL.....	39
IV.2.- AMORTIGUAMIENTO	53
IV.3.- FORMAS MODALES.....	53
IV.4.- DIAGRAMAS DE ESTABILIZACIÓN	60
V.- RESULTADOS ANTES Y DESPUÉS DE LA REHABILITACIÓN.....	66
CONCLUSIONES	67

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA	68
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXO A.....	71

RESUMEN

Este trabajo presenta la identificación de las propiedades dinámicas del edificio ING-4 de la facultad de ingeniería civil ubicado en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, posterior a la rehabilitación del edificio a causa del sismo del 19 de septiembre del 2017.

La identificación de las propiedades dinámicas se determina de manera experimental a partir de pruebas de vibración ambiental. Para el análisis de las señales la metodología seguida es la estimación no paramétrica en el dominio de la frecuencia y la estimación paramétrica en el dominio del tiempo. Para ambas estimaciones se analiza las señales en los componentes ortogonales transversal y longitudinal.

Las propiedades dinámicas que se identifican son: frecuencias, factores de amplificación, amortiguamientos y formas modales.

Se identifica las propiedades dinámicas de la estructura después de su rehabilitación y se compara con las obtenidas por el Ing. José Paulo Polanco Galván en su tesis "Identificación de las características dinámicas de un edificio de tres niveles", datos previos a la rehabilitación de edificio.

ABSTRACT

This work identifies the dynamic properties for the ING-4 building of the Faculty of Civil Engineering located at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, after the rehabilitation of the building due to the damages taken during the earthquake of September 19, 2017.

The identification of the dynamic properties is determined experimentally from environmental vibration tests. For signal analysis, the methodology followed is non-parametric estimation in the frequency domain and parametric estimation in the time domain. For both estimates, the signals are analyzed in the transverse and longitudinal orthogonal components.

The dynamic properties that are identified are: frequencies, amplification factors, damping and mode shapes.

The dynamic properties of the structure after its rehabilitation are identified and compared with those obtained by engineer José Paulo Polanco Galván in his thesis "Identification of the dynamic characteristics of a three-story building", data prior to the rehabilitation of the building.

INTRODUCCIÓN

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) cuenta con edificios construidos que datan de los años 60's, parte del inmueble es el edificio ING-4 ubicado en la facultad de ingeniería (FI). El sismo del 19 de septiembre de 2017 causo daños en el edificio ING-4, después del evento sísmico el edificio tuvo que ser rehabilitado para continuar con su uso y no poner en riesgo a la comunidad estudiantil.

Mediante pruebas de vibración ambiental (VA) se identifica las propiedades dinámicas del edificio después de su rehabilitación.

Las pruebas de VA son pruebas no invasivas, que identifican las propiedades dinámicas de una estructura, y permite apreciar la respuesta estructural ante las diferentes acciones a las que puede estar sometida la estructura.

Para conocer mejor el comportamiento de la estructura se analiza señales ubicadas en diferentes puntos de la estructura, así como en los diferentes niveles. Las formas modales nos darán una representación gráfica del comportamiento de la estructura.

El análisis de las señales de las pruebas de VA puede ser con estimaciones no paramétricas en el dominio de la frecuencia y paramétricas en el dominio del tiempo, a través de estas estimaciones se identifica; frecuencias, factores de amplificación, amortiguamientos, y formas modales. Al realizar las dos estimaciones se puede disipar mayores incertidumbres en el comportamiento de la estructura, ya que se estaría ratificando su comportamiento.

Se cuenta con un estudio realizado por el Ing. Paulo Polanco donde se identifica las características dinámicas del edificio ING-4 después del sismo y antes de su rehabilitación, teniendo como antecedentes sus resultados se puede comparar las propiedades dinámicas del edificio antes y después de su rehabilitación.

I.- ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se abordará los antecedentes, las características estructurales del edificio ING-4 de la Facultad de Ingeniería (FI), que integra a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), y el tipo de instrumentación que se utilizó en la metodología experimental.

I.1.-LOCALIZACIÓN DEL EDIFICIO

El edificio ING-4 se localiza en Blvd. Capitán Carlos Camacho Espíritu S/N, Cd. Universitaria, 72592 Puebla, Puebla, dentro de Ciudad Universitaria (CU) en la FI, esta obra en conjunto con otras se entregó a la comunidad universitaria en 1969. La figura I.1 muestra su localización.



Figura I.1.- Ubicación del edificio ING-4
Fuente: BUAP/DAE

I.2.-CLASIFICACIÓN DE ZONA SÍSMICA

De acuerdo con la clasificación del manual de obras civiles, el edificio se encuentra clasificado en zona sísmica “C”, el cual, ha sido afectado por varios eventos sísmicos. Dentro de los más importantes se encuentran el sismo del 15 de junio de 1999 con magnitud 7.0 en escala de momento (M_w) y el sismo del 19 de septiembre de 2017 con magnitud 7.1 M_w .

El sismo del 15 de junio se localizó a 29 km al suroeste de San Gabriel Chilac, a pocos kilómetros de la ciudad de Tehuacán Pue., ocurrió como consecuencia del proceso de tectonismo de la placa de Cocos, la cual es subducida por la placa Norteamericana en la dirección noroeste. La aceleración máxima registrada en parque Habana de la colonia América del Norte de la Ciudad de Puebla fue de $a_0 = 279 \text{ gal}$ en dirección NS y $a_0 = 104.5 \text{ gal}$ en dirección EO, para la Ciudad de México (CDMX) a 234 km aprox. de Puebla La aceleración máxima registrada en la estación “RICC”, ubicada en Chilpancingo en la fue de $a_0 = 101.7 \text{ gal}$.

El sismo del 19 de septiembre se ubicó al sureste de Axochiapan Morelos. El mecanismo focal del sismo muestra una falla de tipo normal (rumbo=112, echado=46, desplazamiento=-93) (Servicio Sismológico Nacional, 2017), la cual es característica de un sismo intraplaca. En esta región, la Placa de Cocos subduce por debajo de la placa de Norteamérica. La red acelerografica de la CDMX en su estación “RACM” que se localiza en Culhuacán a 120 km aprox. de Puebla, registro una aceleración máxima del terreno de $a_0 = 226 \text{ gal}$. La estación “PHPU” ubicada en el estado de Puebla registro una aceleración máxima de $a_0 = 141.73 \text{ gal}$.

Los dos sismos afectaron la estructura del edificio, con el sismo del 2017 fue necesario realizar reparaciones importantes para continuar con su ocupación.

Ortiz-Silva (2016) propone un mapa de riesgo sísmico en CU, el edificio ING-4 se menciona como edificación de riesgo sísmico medio, de acuerdo con su clasificación.

I.3.-CLASIFICACION DE SUELO

Por el año de construcción del edificio ING-4, no se cuenta con información detallada del tipo de suelo sobre el cual se desplanta. Ontiveros (2017) determina el comportamiento dinámico de los suelos en CU con enfoque Geotécnico, realizando estudios geotécnicos en diferentes puntos (figura I.2), se encuentra que el punto más cercano al edificio ING-4 es el No. 3, en la zona “Nuevo edificio Facultad de Ingeniería”.



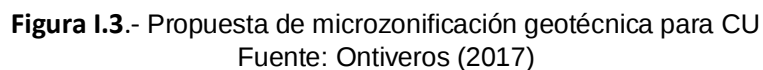
Figura I.2.- Distribución de las zonas de ubicación de estudios geotécnicos
Fuente: Ontiveros (2017)

El punto No.3 tiene una estratigrafía de 0.00 - 0.60 m capa vegetal y de 0.60 – 15.00 m arcilla limosa con arena.

A partir de estos estudios se clasifica los suelos en zona I, II, III y IV, como lo muestra la figura I.3, donde se localiza a la facultad de Ingeniería en la zona II:

Zona II: zona compuesta por arcillas de baja compresibilidad, con un contenido de humedad entre 25% y 60%, un peso volumétrico promedio de

De acuerdo con los estudios de mecánica de suelos realizados en CU y analizados por Ontiveros; la FI se encuentra en un depósito de arcilla limosa con arena que llega a una profundidad aproximada de 14 metros.



A partir de los diferentes modelos realizados por el Polanco (2020); modelos con variación de módulo de elasticidad de concreto sin considerar participación de escaleras, modelos con variación del parámetro de unión viga-columna y modelos considerando muros, se obtuvieron periodos en un rango de 0.683- 0.792 s para el

I.4.-CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES

10

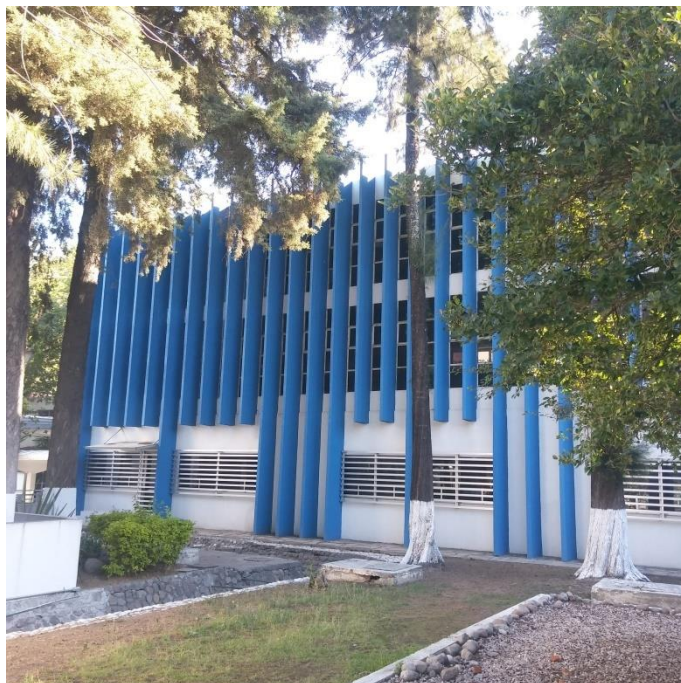


Figura I.5.- Fachada Suroeste Edificio ING-4
Fuente: Autoría propia

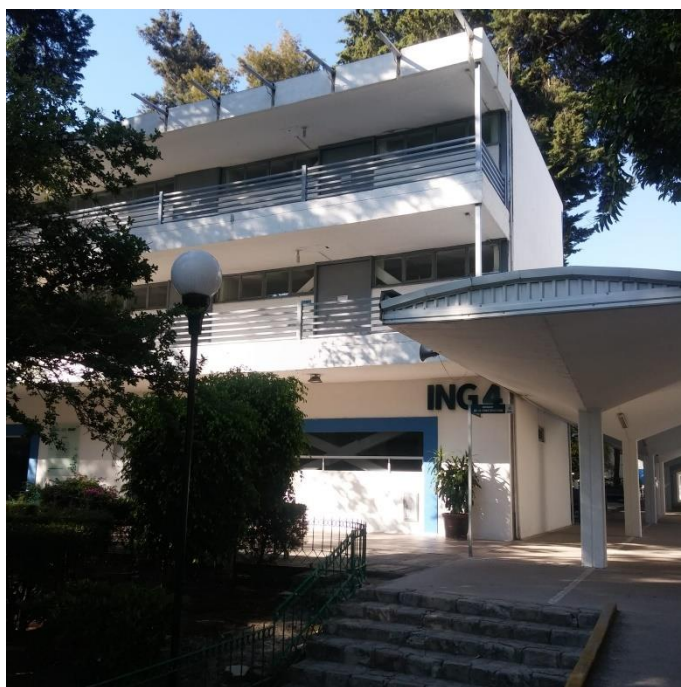


Figura I.6.- Fachada Noroeste Edificio ING-4
Fuente: Autoría propia



Figura I.7.- Fachada Noreste Edificio ING-4
Fuente: Autoría propia

I.5.- DAÑOS CAUSADOS POR EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017

Se observaron daños en la estructura provocados por el sismo del 19 de septiembre del 2017, las fuerzas horizontales provocaron que las columnas se desviaran ligeramente hacia el norte, se generaron grietas en los muros que confinaban la escalera, agrietamiento en junta de muros, y daños en elementos no estructurales (cancelería y plafones).

Con el sismo de septiembre del 2017, fue necesario reforzar el edificio ING-4 para continuar con su uso. Para reforzar los muros dañados de fachada oeste se retiró el aplanado para colocar malla electrosoldada que confinara el muro, y se aplicó mortero nuevamente para dar el acabado y mayor rigidez a los muros, el refuerzo de la estructura del edificio consistió en colocar contraventeos con perfiles de acero HSS en forma de cruz en planta baja suroeste y contraventeos en forma de V en aulas. La figura I.8 y I.9 muestran las plantas del edificio, indicando en color rojo los

ejes donde se reforzo estructuralmente con perfiles de acero, la figura I.10, I.11 y I.12 muestran cortes.

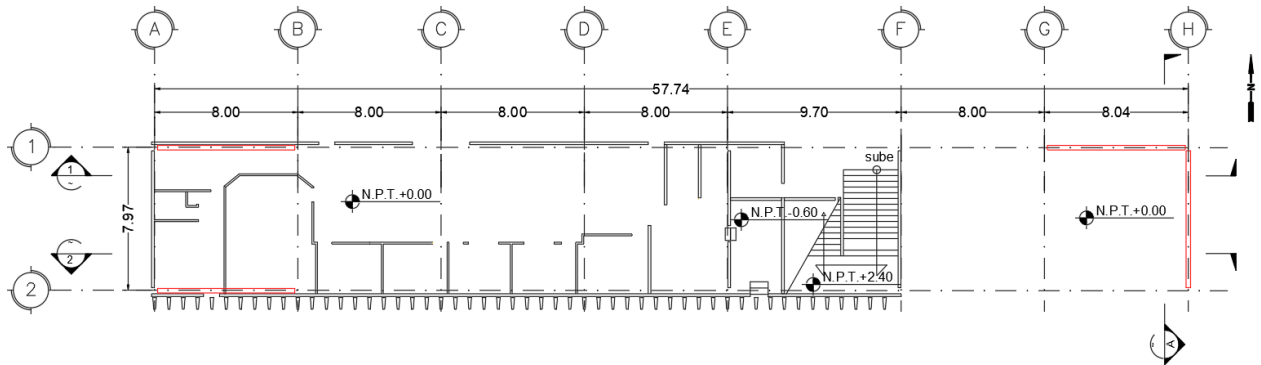


Figura I.8.- Planta baja Edificio ING-4
Fuente: Autoría propia

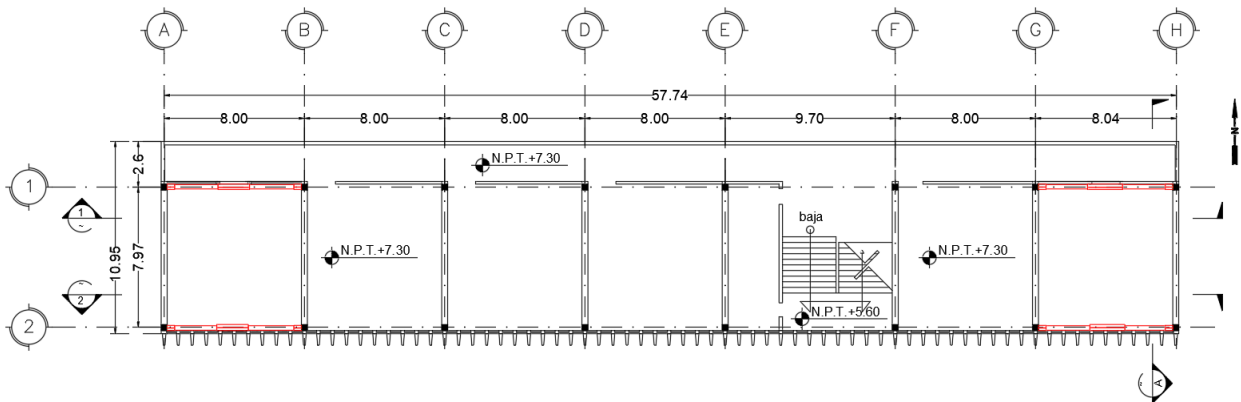


Figura I.9.- Planta primer y segundo nivel Edificio ING-4
Fuente: Autoría propia

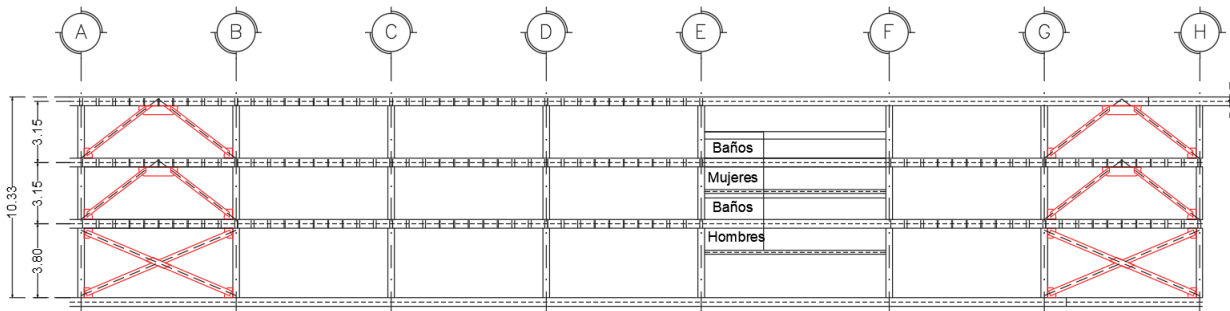


Figura I.10.- Corte "1-1" Edificio ING-4
Fuente: Autoría propia

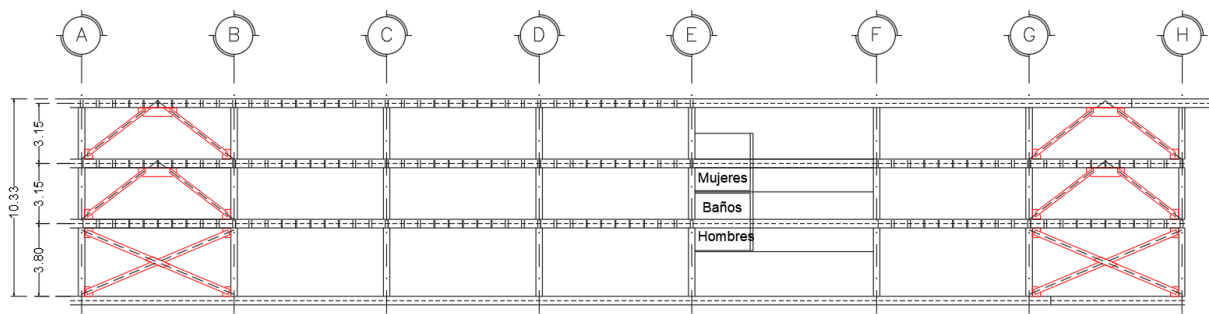


Figura I.11.- Corte "2-2" Edificio ING-4
Fuente: Autoría propia

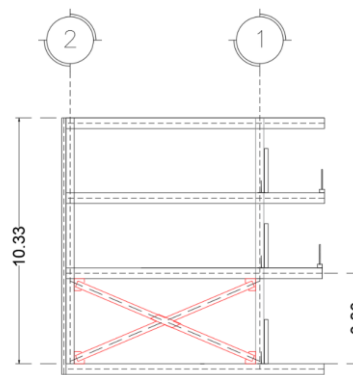


Figura I.12.- Corte "A-A" Edificio ING-4
Fuente: Autoría propia

II.- DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

El estudio de las propiedades dinámicas en estructuras no es un tema reciente, los primeros estudios datan de los años treinta, y aunque México tiene un retraso notorio, en las últimas décadas se ha implementado su estudio.

Existen diferentes tipos de pruebas experimentales para determinar las propiedades dinámicas de una estructura, a partir de registrar la respuesta dinámica de la estructura mediante aparatos y sensores ubicados en distintas partes de la

estructura, estos tipos de instrumentación pueden ser sísmica, pruebas de vibración forzada o de vibración ambiental (VA), entre otras.

II.1 PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

Las pruebas de VA son pruebas no invasivas, que identifican las propiedades dinámicas de una estructura, para conocer su respuesta estructural ante las diferentes acciones a las que puede estar sometida la estructura, la VA se genera principalmente por la actividad humana y ocupación de la estructura.

Este tipo de pruebas consiste en medir las vibraciones de las estructuras producidas por excitaciones de carácter ambiental (Murià Vila & González Alcorta, 1995). A través de instrumentos conocidos como acelerómetros se realiza la medición de diferentes puntos seleccionados previamente de la estructura.

Las pruebas de VA en edificios son aceptadas para determinar las propiedades dinámicas de estructuras existentes (Brownjohn, 2002, Murià, 2007; Arce et al., 2019), a través de ellas se puede conocer frecuencias, formas modales y amortiguamientos entre otras, con estos datos se puede realizar modelos que precisen más al comportamiento dinámico de estructuras.

Se ha observado que los periodos de vibrar obtenidos durante las pruebas experimentales muestran similitud con las obtenidas en forma analítica. Los estudios de VA pueden aplicarse a calibración de modelos analíticos.

En el artículo *“Ambient and forced vibration testing”* (Soyoz, et al., 2013) se da a conocer las variaciones que se tiene en las características modales antes, durante y después de la rehabilitación un edificio de concreto de 6 niveles ubicado en Estambul, Turquía, empleando pruebas de VA, y pruebas de vibración forzada.

Durante la rehabilitación, se realizaron demoliciones de muros; como resultado, la primera frecuencia modal del edificio disminuyó en un 11% de 2,98 a 2,64 Hz. Estos estudios sugieren que los muros de mampostería confinada dan mayor rigidez en estructuras de concreto, especialmente las no dúctiles, lo cual puede ser

significativo. Los muros de mampostería no suelen tomarse en cuenta en análisis de elementos finitos, y este error en el modelado puede afectar negativamente la demanda sísmica en estructuras

El estudio también mostró que las frecuencias modales después de la rehabilitación sísmica aumentaron aproximadamente el 96%.

II.2 PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN EDIFICIO ING-4 EN 2017

Con la finalidad de conocer los daños posteriores al sismo ocurrido en septiembre del 2017, Castillo Román realiza pruebas de vibración ambiental en noviembre, los puntos instrumentados son a campo libre y en tres puntos en la azotea, en el centro geométrico (AZ-C), Al sureste (AZ-SE) y al noroeste (AZ-NW). El registro CL cuenta con una frecuencia de muestreo de 50 datos por segundo y 1183 s, los registros AZ-C, AZ-SE y AZ-NW comparten la frecuencia de muestreo de 100 datos por segundo con tiempos de grabación de 1070, 922 y 364 s respectivamente.

Con estos datos se estimó la respuesta estructural en términos de frecuencias para el edificio ING-4 por Polanco, la tabla I.13 muestra el rango de las frecuencias máximas para los espectros de potencia de las pruebas AZ-C, AZ-NW y AZ-SE, y la tabla I.14 indica las frecuencias máximas de los cocientes.

AZ-C, AZ-NW y AZ-SE		
Modos	Inicial (Hz)	Final (Hz)
1 T	3.00	3.4
2 T	5.80	6.80
1 R	3.50	3.90
1 L	2.80	3.15
2 L	-	-

Tabla I.1 Frecuencias en espectros de potencia
Fuente: Polanco (2020)

Modos	AZ-C / CL		AZ-SE / CL	
	AZ-NW / CL			
	Inicial (Hz)	Final (Hz)	Inicial (Hz)	Final (Hz)
1 T	3.00	3.4	3.78	4.22
2 T	5.80	6.80	5.85	6.50
1 R	3.50	3.90	3.29	3.40
1 L	2.80	3.15	2.88	6.80
2 L	-	-	5.80	6.80

Tabla I.2 Frecuencias en cocientes espectrales
Fuente: Polanco (2020)

II.3 PUNTOS INSTRUMENTADOS

Después de la restructuración del edificio ING-4 a causa del evento sísmico del 2017, con la finalidad de conocer las propiedades dinámicas de la estructura se realizaron pruebas de VA.

Las pruebas se efectuaron con dos acelerómetros que se ubicaron en diferentes partes de la estructura, las señales que son captadas por los sensores se transmiten, amplifican y filtran para obtener los registros. Los puntos instrumentados se midieron con una frecuencia de muestreo de 100 datos por segundo, con tiempos de grabación de 900 a 1200 s. La figura I.13, I.14 y I.15 muestra los dispositivos (acelerómetro, PC portable, pila, memoria, antena GPS) que se utilizaron para realizar las pruebas.



Figura I.13.- Dispositivos; acelerómetro y pila
Fuente: Autoría propia



Figura I.14.- Dispositivos; pc portable y memoria
Fuente: Autoría propia

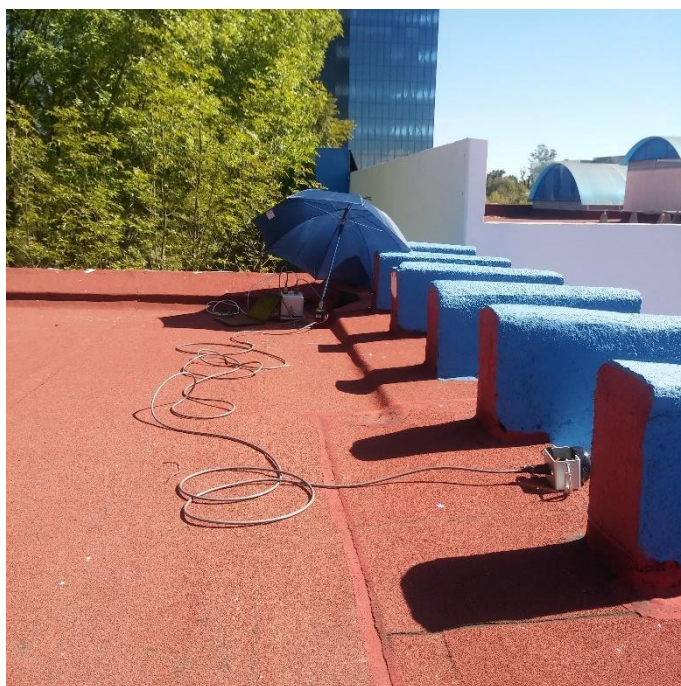


Figura I.15.- Dispositivo; Antena GPS
Fuente: Autoría propia

Como parte del procedimiento lo primero fue localizar los puntos de instrumentación, ajustar la nivelación del equipo, ubicar la antena del GPS hacia el cielo, programar que los disparos en ambos equipos se realicen al mismo tiempo, programar la duración de la prueba, al concluir la prueba se realizó el volcado de datos rectificando que los datos se grabaran.

Las pruebas se realizaron el 15 de diciembre, 23 y 24 de febrero de 2022 (registro fotográfico en anexo A), en cada prueba se instrumentan dos puntos, midiendo las aceleraciones en tres direcciones ortogonales, los dos componentes horizontales y un componente vertical. Se requiere realizar las pruebas en pares para interpretar las funciones que relacionan las dos señales, estas funciones son la densidad espectral, la función de transferencia, coherencia y el ángulo de fase, funciones que se abordan en capítulo III.

La prueba 1 se instrumentó en la azotea cercano al centro geométrico de la planta (Figura I.17) y en el terreno cercano al edificio en lado norte de la explanada (Figura I.16), mismo punto instrumentado para prueba 2 y 3, el segundo punto de instrumentación para la prueba 2 se localiza en la esquina oeste de la azotea hacia el norte (Figura I.17), el segundo punto de la prueba 3 se instrumentó en la esquina sur hacia el este (Figura I.1).

Los puntos instrumentados de las pruebas 1, 2 y 3 corresponden aproximadamente con la misma ubicación de los registros en las pruebas de VA realizadas después del evento sísmico del 17 de septiembre del 2017 y antes de la rehabilitación del edificio, esto con la finalidad de que en capítulo 5 se comparen las propiedades dinámicas de edificio, antes y después de su rehabilitación.

Los puntos instrumentados para las pruebas restantes (Figuras I.18 – I.22) tienen el propósito de medir las propiedades de traslación en los componentes ortogonales (transversal y longitudinal), medir las propiedades de torsión y obtener las formas modales.

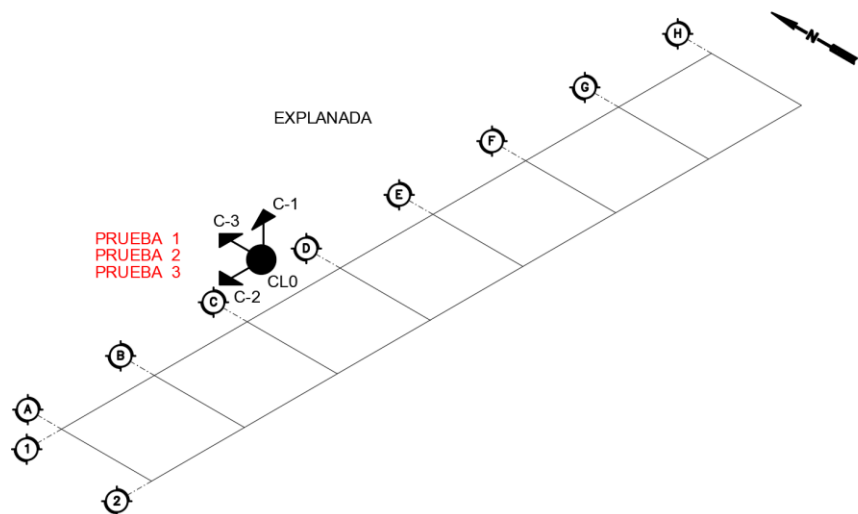


Figura I.16 Instrumentación en terreno. Primer punto instrumentado para prueba 1, 2 y 3
Fuente: Autoría propia

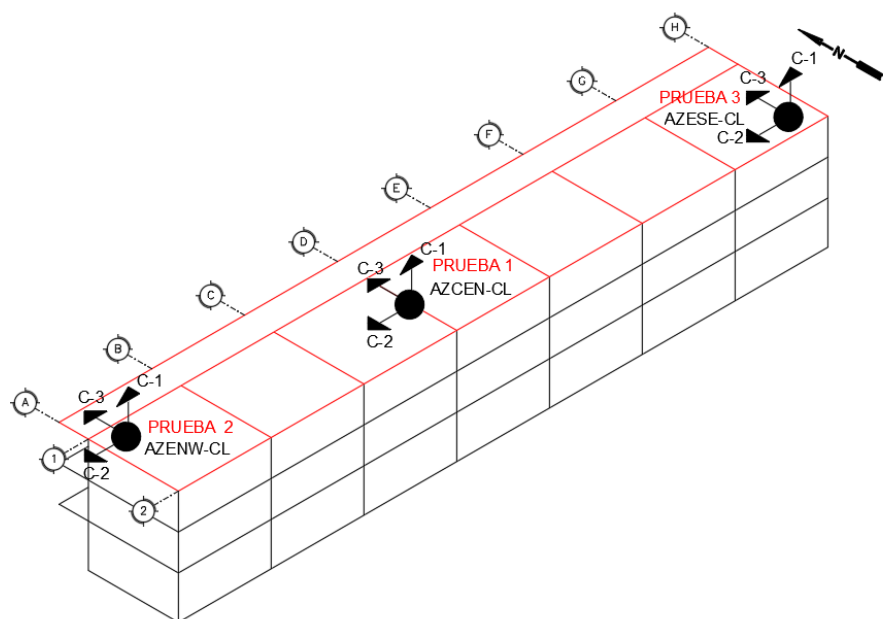


Figura I.17 Segundo punto instrumentado para prueba 1, 2 y 3 en azotea.
Fuente: Autoría propia

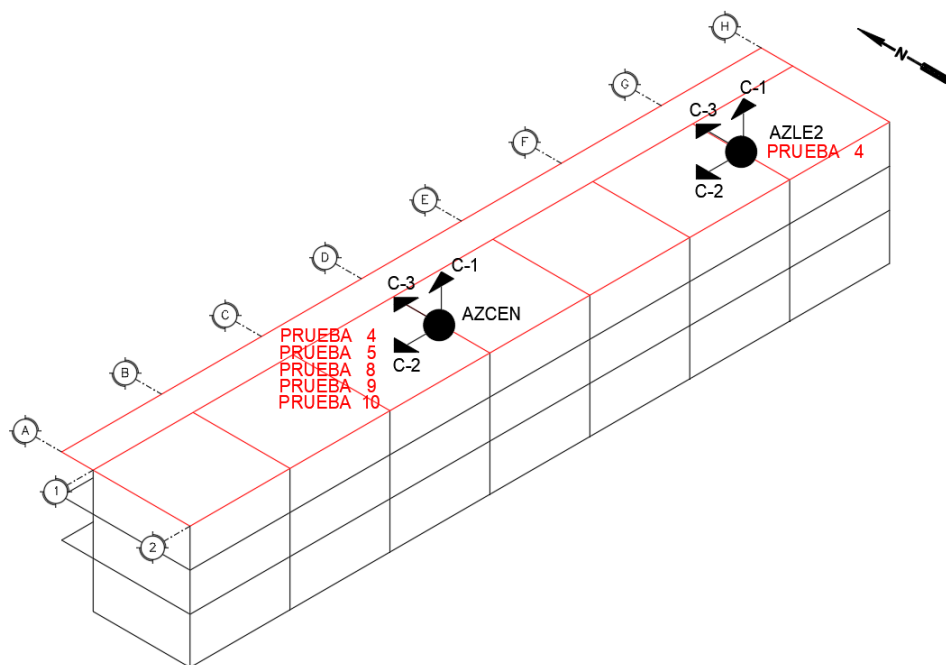


Figura I.18 Puntos instrumentados para pruebas 4,5,8,9 y 10 en azotea.
Fuente: Autoría propia

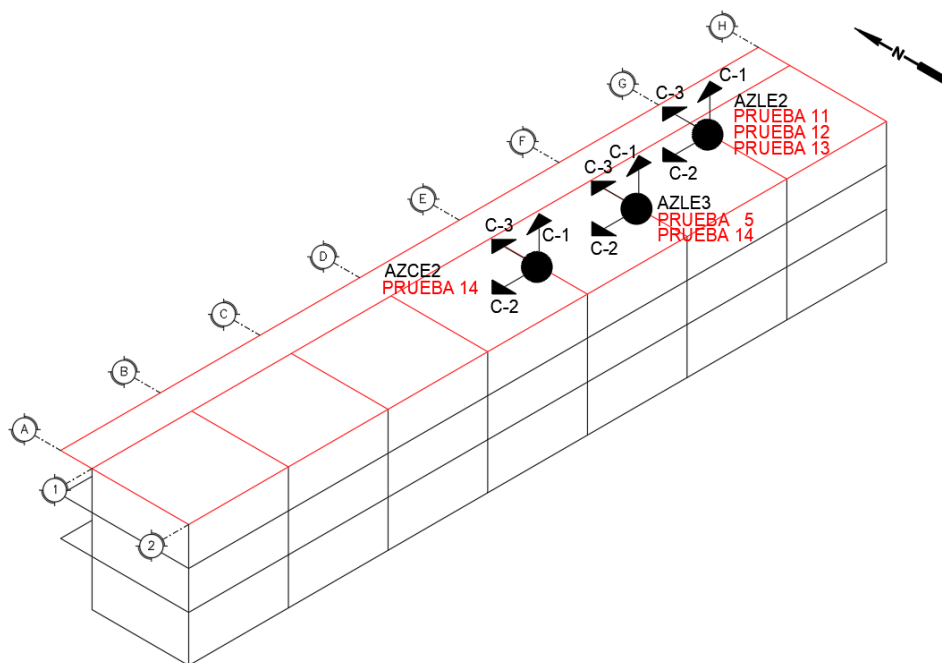


Figura I.19 Puntos instrumentados para pruebas 5,11,12,13 y 14 en azotea.
Fuente: Autoría propia

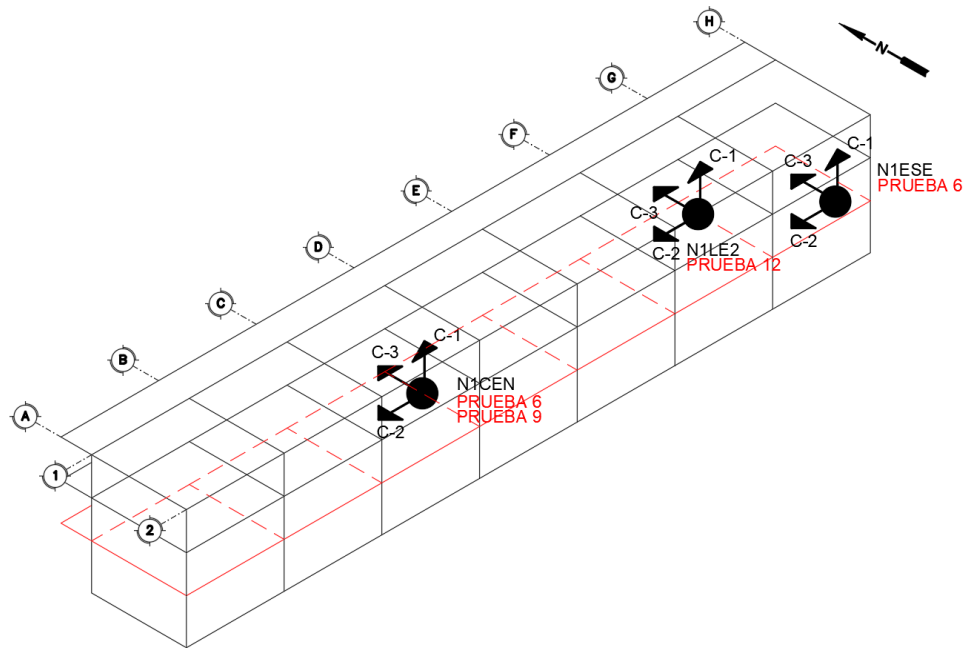


Figura I.20 Puntos instrumentados para pruebas 6,9 y 12 en primer nivel.
Fuente: Autoría propia

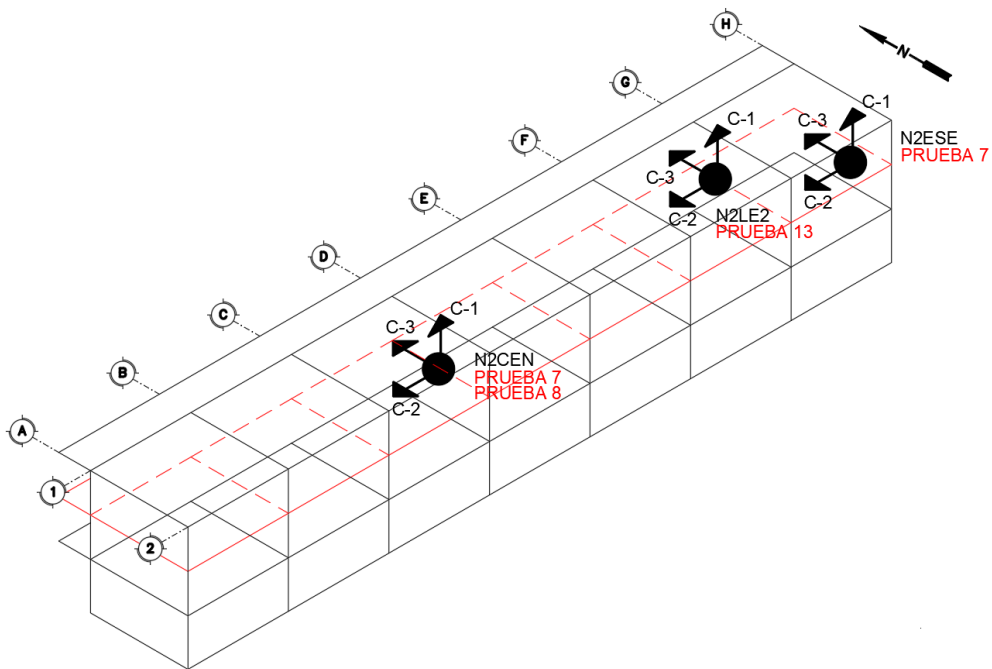


Figura I.21 Puntos instrumentados para pruebas 7,8 y 13 en segundo nivel.
Fuente: Autoría propia

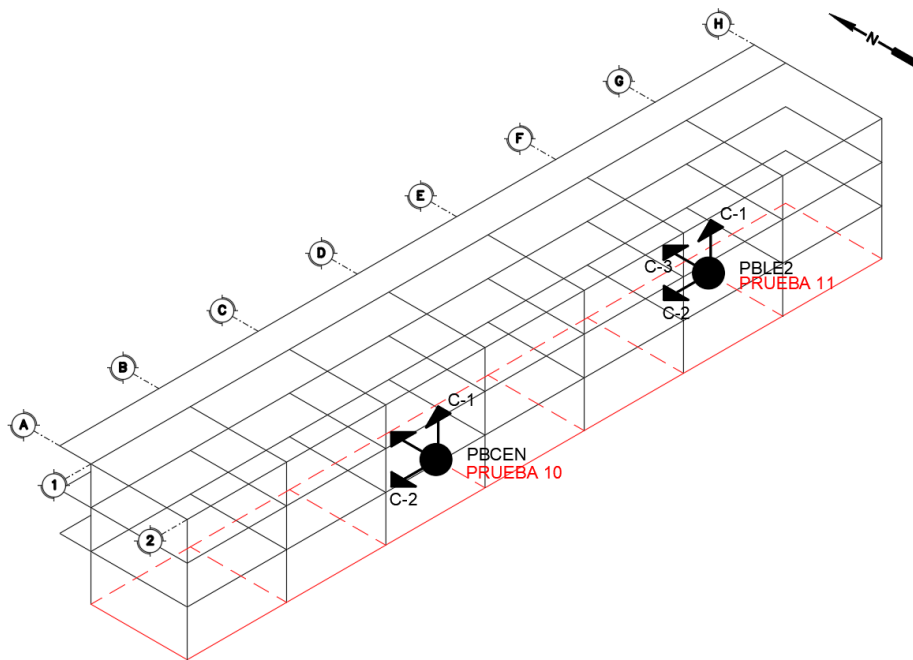


Figura I.22 Puntos instrumentados para prueba 10 y 11 en planta baja.
Fuente: Autoría propia

Con estas pruebas se determinará las propiedades dinámicas de la estructura; frecuencias, amortiguamientos, formas modales y factores de amplificación, utilizando técnicas de análisis de señales y programas de cómputo para realizar estimaciones paramétricas y no paramétricas, estudio que se abordará en capítulos subsecuentes.

III.-METODOLOGIA DE ANÁLISIS

Para encontrar las propiedades dinámicas del edificio ING-4 se puede elegir un análisis con técnicas paramétricas o no paramétricas, para este estudio se consideran las dos.

III.1.- MÉTODOS PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES DINÁMICAS

Las técnicas no paramétricas consisten en determinar las características del sistema estructural a partir del análisis de los datos en los dominios del tiempo y la frecuencia (Bendat et Piersol, 1989).

Para la estimación no paramétrica se parte de las aceleraciones obtenidas de las pruebas de VA que se realizaron al edificio ING-4.

Con el par de aceleraciones obtenidas para cada prueba de VA, se realiza el análisis de los datos con técnicas no paramétricas en el dominio de la frecuencia, para obtener las frecuencias naturales de la estructura se realiza el análisis mediante la transformada de Fourier, complementándose el análisis con las funciones de coherencia y ángulo de fase.

Para realizar la estimación paramétrica se usa funciones de Matlab del toolbox; *System Identification Toolbox*, se importan las señales de entrada y salida que se obtienen de las pruebas de VA trabajando en el dominio del tiempo, para elaborar modelos de diferente orden utilizando el algoritmo N4SID.

En las técnicas paramétricas se establece un modelo matemático simplificado y se estiman los valores de los parámetros estructurales necesarios para producir una óptima correlación entre las respuestas medidas y la calculadas (Beck et Jennings, 1980; Ljung, 1987).

Para el estudio de estructuras, se usa estimaciones no paramétricas y paramétricas para identificar las frecuencias naturales de la estructura, se busca identificar estas frecuencias para que a partir de ellas se identifiquen los amortiguamientos y las formas modales.

La mayoría de estos estudios buscan las frecuencias naturales, y casi todos ellos tienen en cuenta la dependencia de amplitud observada de frecuencias naturales y amortiguamientos (Soyoz, et al., 2013)

III.2.- ESTIMACIÓN NO PARAMÉTRICA

Realizado un modelo analítico de la estructura se puede identificar las propiedades dinámicas de cualquier sistema, ya que se conoce la excitación y la respuesta del sistema. Para estimar las propiedades dinámicas de la estructura en la estimación no paramétrica no se necesita conocer las características de la excitación, se realiza el análisis conociendo la respuesta del sistema.

Con los datos experimentales obtenidos de las pruebas de VA, se determina las propiedades dinámicas con técnicas no paramétricas. Cabe mencionar que el análisis se puede realizar en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo, para este estudio se realiza la estimación en el dominio de la frecuencia.

Una vez que se han obtenido los registros de vibración ambiental se hace necesario su procesamiento mediante un análisis espectral convencional (Bendat y Piersol, 1989).

Por medio de la transformada de Fourier se puede transformar señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, obteniendo los espectros de potencia, a través de ellos se identifican las frecuencias de las señales que corresponden a amplitudes máximas.

También se hace uso de relaciones matemáticas adicionales como la función de coherencia, el ángulo de fase y el espectro cruzado (Bendat y Piersol, 1989).

Para trabajar en el dominio de la frecuencia con las aceleraciones obtenidas a partir de las pruebas de VA, se aplica la transformada de Fourier, donde se define a la señal de aceleración del registro de VA como $\ddot{x}(t)$, expresando la transformada de Fourier:

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (\text{Ec. 3.0})$$

Donde:

$\ddot{x}(t)$ es la aceleración absoluta

$\ddot{X}(f)$ es la transformada de Fourier de la aceleración absoluta

Al ser una función compleja se aplica la identidad de Euler a la ecuación 3.0, se tiene:

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) \cos(2\pi f t) dt + i \int_0^T \ddot{x}(t) \sin(2\pi f t) dt \quad (\text{Ec. 3.1})$$

La Ec 3.1 está compuesta por una parte real y una parte imaginaria, la amplitud está dada por:

$$|\ddot{X}(f)| = \sqrt{(\ddot{X}_R(f))^2 + (\ddot{X}_i(f))^2} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

$\ddot{X}_R(f)$ es la parte real de la transformada de Fourier de la aceleración

$\ddot{X}_i(f)$ es la parte imaginaria de la transformada de Fourier de la aceleración

Expresando una señal en el dominio de la frecuencia a través de su autoespectro también conocido como espectro de potencia que es la función que representa el estudio equivalente en el dominio de la frecuencia al realizado en el dominio del tiempo:

Se debe obtener los espectros de potencia de cada señal y espectros cruzados de potencia entre pares de las señales, para esto se expresa la señal $\ddot{x}(t)$ en el dominio de la frecuencia y se calcula el espectro de potencia.

La función que representa la distribución de potencia de la señal con respecto a la frecuencia es la siguiente:

$$S_{xx}(f) = \ddot{X}^*(f) \cdot \ddot{X}(f) \quad (\text{Ec 3.3})$$

Donde

$\ddot{X}^*(f)$ es la transformada de Fourier de la señal de aceleración.

$\ddot{X}(f)$ es el espectro conjugado de la transformada de Fourier de la señal de aceleración

La transformada de Fourier tiene la propiedad de ser simétrica (las frecuencias negativas y positivas son las mismas), con esta propiedad se puede realizar el análisis de un solo lado del espectro Ec. 3.4

$$G_{xx}(f) = 2S_{xx}(f) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Se define el espectro de potencia $G_{xx}(f)$ como:

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2 S_{xx}(f) & \text{si } f > 0 \\ S_{xx}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (\text{Ec 3.5})$$

Cuando se tiene dos señales de aceleración correspondiente a dos puntos de la estructura; $\ddot{x}(t)$ y $\ddot{y}(t)$, las transformadas de Fourier están dadas en la Ec. 3.6 y 3.7

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) e^{-i 2 \pi f t} dt \quad (\text{Ec 3.6})$$

$$\ddot{Y}(f) = \int_0^T \ddot{y}(t) e^{-i 2 \pi f t} dt \quad (\text{Ec 3.7})$$

Para relacionar dos señales de aceleración, se debe conocer la manera en que se vinculan a partir del espectro de potencia cruzado entre las dos señales $\ddot{x}(t)$ y $\ddot{y}(t)$, definido como:

$$S_{XY} = \ddot{X}^*(f) \cdot \ddot{Y}(f) \quad (\text{Ec. 3.8})$$

La función de la Ec. 3.8 cuenta con la propiedad de ser simétrica, por lo cual se realiza el análisis de un solo lado del espectro:

$$G_{XY}(f) = 2S_{XY}(f) \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Obtenido los espectros de potencia y espectros cruzados, se obtiene las frecuencias naturales.

Continuando con el análisis se calcula las funciones de transferencia (FT) o también llamado cociente espectral, función que de acuerdo con la ubicación de las pruebas amplificara las frecuencias una respecto de otra. La función de coherencia y ángulo de fase que se estiman en función de la frecuencia complementan a las formas modales dándoles mayor confiabilidad.

III.2.1.- COCIENTE ESPECTRAL

El cociente espectral, relaciona las amplitudes de dos señales y se define como la respuesta de un sistema ante una entrada dada.

En cada prueba de VA se trabajó con dos señales ubicadas con criterio en distintos puntos (depende de su ubicación para conocer las propiedades dinámicas), el cociente espectral relaciona las dos señales para identificar un espectro con frecuencias más definidas, esto debido a que se amplifican las frecuencias del numerador (señales de salida) con respecto al denominador (señales de entrada).

Para evaluar las frecuencias correspondientes al sistema se realizaron un total de 14 pruebas, los cocientes espectrales que darán mejores resultados son los que por su ubicación tienen mayor amplificación dinámica que las pruebas restantes.

Al ser un cociente se puede obtener como las respectivas transformadas de Fourier $\ddot{X}(t)$ y $\ddot{Y}(t)$ de dos señales de aceleración $\ddot{x}(t)$ y $\ddot{y}(t)$, ver Ec. 3.10.

$$FT = \frac{\ddot{X}(f)}{\ddot{Y}(f)} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

III.2.2.- FUNCIONES DE COHERENCIA

Con el par de aceleraciones obtenidas para cada prueba realizada en el edificio ING-4, a través de la función de coherencia se estima que tan lineales son las dos señales de aceleración, su escala varía de 0 a 1, como respuesta se tiene una gráfica que oscila en estos valores.

Los valores que se encuentren en este rango nos indican que tan lineales son las dos señales, cuando más se acerque al valor a 1 nos indica que son señales relacionadas linealmente, si el valor es 1 indica que la relación entre las dos señales es completamente lineal, los valores que estén por abajo de 1 no necesariamente indican que las señales no son lineales, por la amplificación dinámica y ruido que se tenga en cada prueba, las de menor amplificación pueden dar valores más alejados de 1.

También puede ser que los valores que están muy abajo de 1, pueden indicar que la relación es completamente nula, errores de resolución numérica o ruido en las señales.

La función requiere de un número de puntos por ventana, cada registro de VA se divide en tramos iguales llamados ventanas. La selección del tamaño de estas ventanas se hace de acuerdo con el número total de puntos que posee el registro, es decir, con el número de ventanas que resultan de la división de la señal en tramos (un número adecuado de ventanas puede ser alrededor de diez), y de acuerdo con el grado de resolución que se desee obtener en frecuencia, teniendo en cuenta que a menor número de puntos, menor es la precisión y por lo tanto se puede incurrir en errores numéricos en el análisis (Bendat y Piersol, 1989; Murià-Vila y González, 1995). Para este estudio el número de ventanas es 2048.

Esta función complementa el análisis, ya que se verifica que en las frecuencias del sistema las señales de aceleración, obtenidas experimentalmente a través de las pruebas de VA sean relacionadas linealmente.

Se determina la relación que existen entre la función del espectro cruzado y el producto de los espectros de potencia de cada señal:

$$|G_{XY}(f)|^2 \leq G_{XX}(f) \cdot G_{YY}(f) \quad (\text{Ec. 3.12})$$

A partir de la relación de la Ec. 3.12 se define la función de coherencia como:

$$\gamma_{XY}^2 = \frac{|S_{XY}(f)|^2}{S_{XX}(f)S_{YY}(f)} = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)} \quad (\text{Ec 3.13})$$

La función puede variar de 0 a 1:

$$0 \leq \gamma_{XY}^2 \leq 1 \quad (\text{Ec 3.14})$$

III.2.3.- ÁNGULO DE FASE

Para obtener la configuración de las formas modales de la estructura, se hace uso de la función ángulo de fase, la cual nos determina si las señales para las frecuencias identificadas están en fase o desfase.

Con la finalidad de conocer las formas modales de la estructura se instrumentó puntos en todos los niveles respecto a Azotea, sobre el eje D (cercano al centro de la estructura) y eje G (cercano a la esquina este).

Respecto al ángulo de fase entre las dos señales, se obtiene con el cociente de la parte real y la parte imaginaria de la función del espectro cruzado de potencia (Murià Vila, 2007).

El espectro cruzado de potencia es resultado de la multiplicación de dos números complejos, $G_{XY}(f) \in \mathbb{C}$ puede ser expresado en forma polar:

$$G_{XY}(f) = |G_{XY}(f)| e^{-i \theta_{XY}(f)} \quad (\text{Ec 3.15})$$

El valor absoluto y el ángulo de fase están determinados por las relaciones:

$$|G_{XY}(f)| = \sqrt{C_{XY}^2 + Q_{XY}^2} \quad \text{Valor absoluto (Ec 3.16)}$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \frac{Q_{XY}(f)}{C_{XY}(f)} \quad \text{ángulo de fase, } 0^\circ \leq |\theta(f)| \leq 180^\circ \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Donde:

C_{XY} parte real del espectro cruzado de potencia $G_{XY}(f)$

Q_{XY} parte imaginaria del espectro cruzado de potencia $G_{XY}(f)$

La grafica de la función de ángulo de fase oscila de 0° a 180° , entre valores positivos y negativos, cuando el valor absoluto del ángulo de fase oscila de 0° a 90° indica que las señales se encuentran en fase, de 90° a 180° se dice que las señales se encuentran desfasadas, si la masas se encuentran en fase se le designa un signo positivo o negativo cuando el resultado da que se está en desfase se le asigna un signo contrario. En la figura II.1 se ilustra las formas modales a partir de masas que están en fase o desfase, para el caso a) las masas m_1 y m_2 están desfasadas, caso b) la masa m_1 está en fase y la masa m_2 se encuentra desfasada.

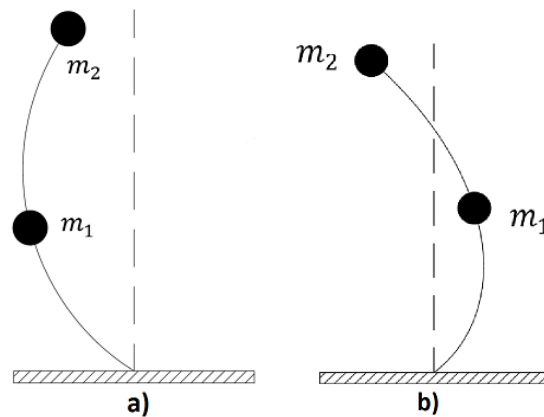


Figura II.1. Formas modales
Fuente: Autoría propia

III.2.4.- PORCENTAJE DE AMORTIGUAMIENTO

El amortiguamiento es el proceso mediante el cual la amplitud de vibraciones disminuye de manera constante, Chopra (2014).

El método del factor de ampliación dinámico (FAD) nos ayuda a comprender el comportamiento de la estructura ante cargas dinámicas, ya que nos da la relación de la respuesta dinámica entre la estática, indicando que tan grande va a ser una respuesta respecto a otra, este método calcula el porcentaje de amortiguamiento.

$$FAD = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Donde

ξ es el porcentaje de amortiguamiento crítico

Cuando la frecuencia de la excitación es igual a la frecuencia del sistema se reduce la ecuación siendo:

$$\beta = 1$$

$$FAD = \frac{1}{2\xi} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Despejando el porcentaje de amortiguamiento crítico:

$$\xi = \frac{1}{2 FAD_{\text{máx}}} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

Las pruebas que representan mejor el amortiguamiento de la estructura son AZCEN-CL, AZENW-CL y AZESE-CL, que se ubican al centro y extremos de azotea respecto al terreno, en estas pruebas se tiene mayor amplificación dinámica con lo cual se puede calcular el amortiguamiento mediante la función de transferencia o también llamado cociente espectral para un sistema de estructura empotrada, (se sabe que el edificio ING- 4 cuenta con cimentación empotrada).

III.2.5.- PROCESAMIENTO DE DATOS

Con el desarrollo de sistemas de cómputo numérico, en la actualidad se puede realizar análisis matemáticos complejos con ayuda de rutinas en diversos programas.

Para identificar las propiedades dinámicas del edificio ING-4, se requiere un análisis espectral, lo que conlleva a trabajar con funciones que son complejas, Matlab cuenta con rutinas para su cálculo.

La metodología para obtener las propiedades dinámicas, frecuencias fundamentales y formas modales del edificio en la dirección longitudinal (L) y dirección transversal (T), requiere el análisis de los autoespectros, funciones de transferencia, coherencia, y ángulo de fase. Para el procesamiento del análisis espectral de señales se ha implementado programas de cómputo (Ordaz, 1993: Pérez y Murià Vila, 1994: Murià Vila et al., 1999; Ordaz y Montoya, 2002; Camargo, 2007; Camargo, 2013).

Para realizar el análisis espectral, se trabaja con las pruebas experimentales de VA, para cada prueba se trabaja con el par de aceleraciones, se calcula el espectro de potencia de cada prueba en sentido longitudinal y transversal, con el cual se identifica las frecuencias a las que corresponde las ordenadas máximas. Una vez teniendo los espectros de potencia, se procede a calcular los cocientes espectrales, cabe mencionar que con los espectros y el cociente espectral se identifica las frecuencias para cada prueba, cuando se tiene una mayor amplificación dinámica el cociente espectral es de más utilidad al definir mejor la gráfica.

Una vez obtenidas las frecuencias que tentativamente se asumen como fundamentales, se complementa el análisis calculando las formas modales correspondientes a dichas frecuencias, para ello con los registros de aceleraciones de las pruebas de VA, se identifica las amplitudes correspondientes a las frecuencias encontradas y se realiza su cociente para conocer la amplitud de la forma modal. Con la función de ángulo de fase se determina si las masas están en fase o desfase obteniendo así la polaridad respecto al punto instrumentado. Finalmente, con la función de coherencia se determina si los pares de señales son parecidos linealmente.

III.3.- ESTIMACIÓN PARAMETRICA

Con la estimación paramétrica también se puede identificar las propiedades dinámicas de una estructura, la principal diferencia respecto a la estimación no paramétrica es que se trabaja en el dominio del tiempo y no en el dominio de frecuencia.

Trabajar en el dominio del tiempo es más complejo, por lo que se requiere la elaboración de un modelo para obtener los parámetros dinámicos de la estructura.

En las técnicas paramétricas se establece un modelo matemático simplificado y se estiman los valores de los parámetros estructurales necesarios para producir una óptima correlación entre las respuestas medidas y la calculadas (Beck et Jennings, 1980; Ljung, 1987).

Para realizar el modelo se importan las señales que fueron tomadas en el dominio del tiempo de las pruebas de VA, cuando se tiene que el orden del modelo es desconocido, existen dos enfoques: métodos de subespacios y métodos directos, conociendo que las pruebas de VA cuentan con datos de entrada y salida se puede obtener una representación equivalente, de tal manera que el método de trabajo es de subespacios.

Para la identificación de propiedades dinámicas en estructuras instrumentadas, se encuentra el algoritmo de espacio de estados N4SID, donde las ecuaciones diferenciales de movimiento se representan por una ecuación diferencial discreta de primer orden (Van Overschee et De Moor, 1994)

Los métodos de subespacio se basan en el uso de propiedades algebraicas que permiten estimar el orden de una realización mínima y los parámetros de una representación equivalente, el algoritmo *N4SID Numerics for (4) Subspace Identification* nos permite trabajar en subespacio.

En el algoritmo N4SID las ecuaciones diferenciales de movimiento se representan por una ecuación diferencial discreta de primer orden por medio de un cambio de

variable (estados del sistema), las propiedades dinámicas se extraen de la matriz de estado. (Camargo Pérez, 2013).

Se parte de las ecuaciones diferenciales de primer orden Ec. 3.21.

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = -M\ddot{Y}_g \quad (\text{Ec. 3.21})$$

Los vectores de estado se definen:

$$\begin{aligned} X_1 &= Y \\ X_2 &= \dot{X}_1 = \dot{Y} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

Empleando los vectores de estado en la Ec. 3.21:

$$\dot{X}_2 = -M^{-1}KX_1 - M^{-1}CX_2 - \ddot{Y}_g \quad (\text{Ec. 3.23})$$

Representando de manera matricial:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + B\ddot{Y}_g \\ Y &= CX + D\ddot{Y}_g \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3.24})$$

Donde:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}; \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.25})$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ M^{-1}K & M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.26})$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -I \end{bmatrix} \quad (\text{Ec.3.27})$$

$$C=I; \quad D=0 \quad (\text{Ec. 3.28})$$

La Ec. 3.24 en tiempo discreto:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= AX_k + BYg_k \\ Y_k &= CX_k + DYg_k \end{aligned} \quad (\text{Ec.3.29})$$

Los parámetros dinámicos se calculan a partir de los valores característicos (λ) y los vectores característicos (ψ) de la matriz de estado A.

$$f = \frac{|\lambda|}{2\pi} \quad (\text{Ec. 3.30})$$

$$\xi = \frac{\text{Re}(\lambda)}{2\pi f} \quad (\text{Ec. 3.31})$$

$$\phi = |C\psi| \text{sig}(\text{Re}(C\psi)) \quad (\text{Ec. 3.32})$$

La relación entre los polos de Laplace (Ec. 3.30 y Ec. 3.31), y los polos (ρ) de la transformada discreta Z se establecen con la Ec. 3.33.

$$\rho(z) = e^{\lambda(s)dt} \quad (\text{Ec. 3.33})$$

Donde

dt es el intervalo de muestreo

Matlab es una plataforma de cálculo numérico que cuenta con *System Identification Toolbox*, y estima modelos de subespacio N4SID. Para crear el modelo se usan datos de entrada y salida del dominio del tiempo (señales obtenidas de las pruebas de VA), se pueden identificar funciones de transferencia del tiempo continuo o tiempo discreto, los modelos realizados se identifican con tiempo discreto. El orden del modelo puede variar, a mayor orden será mayor el porcentaje de estimación para el modelo. Para rectificar el comportamiento del modelo se sugiere hacer varios modelos de diferente orden, esto ayuda a visualizar de mejor manera su comportamiento.

Una vez que se obtienen las matrices de cada modelo se requiere calcular sus eigenvectores para obtener las frecuencias angulares, ya obtenidas las frecuencias angulares se despeja para obtener las frecuencias en Hz. Como el resultado contiene frecuencias repetidas, se excluyen las repetidas y se ordena de menor a mayor los datos obtenidos.

Para visualizar los resultados se trabaja con diagramas de estabilización. Una vez obtenido los resultados de la estimación paramétrica se puede comparar las propiedades dinámicas obtenidas con las de la estimación no paramétrica.

IV.- ANÁLISIS DE SEÑALES E IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS

Con las mediciones de aceleración de las pruebas de VA, se realizó el análisis de señales de acuerdo con la metodología del capítulo anterior, en este capítulo se muestra los resultados. El análisis de las señales para cada prueba se realizó en sentido longitudinal (L) y sentido transversal (T).

IV.1.- ESPECTROS DE POTENCIA Y COCIENTES ESPECTRAL

El cociente espectral ayudo a identificar mejor las frecuencias de traslación y rotación para las pruebas AZCEN-CL, AZENW-CL y AZESE-CL debido a la amplificación de frecuencias que se tiene, por ser pruebas que se ubican en azotea respecto a terreno, los espectros de potencia de estas pruebas se ubican en anexos. Estas pruebas se ubicadas de manera similar con las pruebas que presenta el Ing. Paulo, para poder comparar las propiedades dinámicas del edificio antes y después de su rehabilitación, datos que se aborda en conclusiones.

En las pruebas AZCEN-CL, AZENW-CL y AZESE-CL se identifica el primer modo de traslación para el sentido L (se usa el color rojo para resaltar) en un rango de 3.46 – 4.93 Hz, el segundo modo en 6.93 – 7.91 Hz en prueba AZCEN-CL no se visualizar (se usa el color verde), el tercer modo se visualiza en 9.96 – 10.74 Hz (se usa el color azul), como se muestra en las sig. figuras.

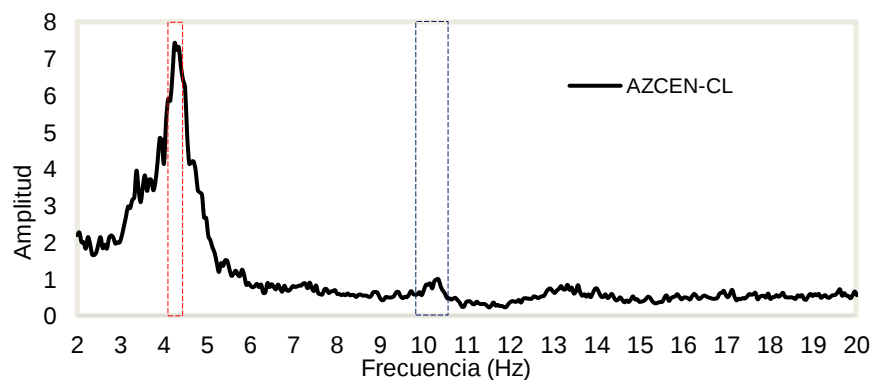


Figura IV.1. Cociente espectral longitudinal
Fuente: Autoría propia

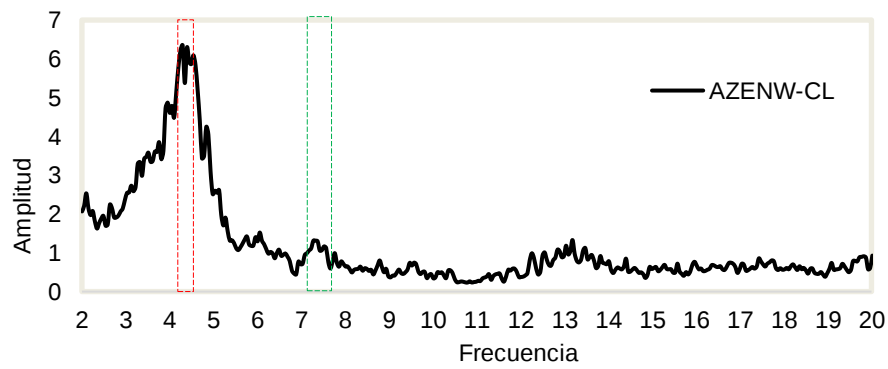


Figura IV.2. Cociente espectral longitudinal
Fuente: Autoría propia

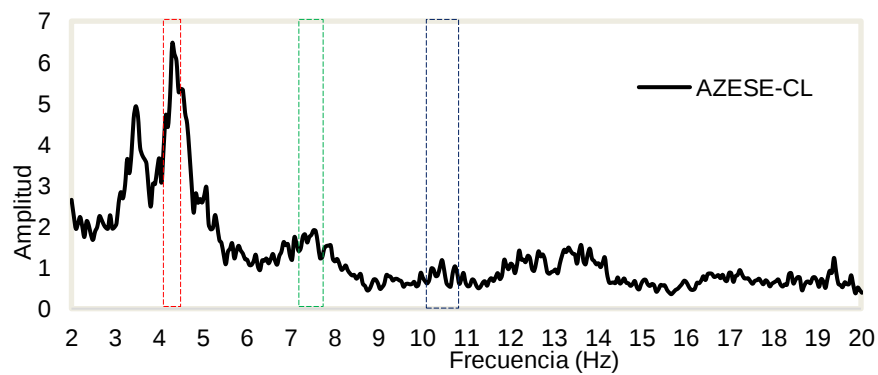


Figura IV.3. Cociente espectral longitudinal
Fuente: Autoría propia

Para las mismas pruebas en sentido T el rango de primer modo es 3.66 – 4.79 Hz, segundo modo 6.64 – 7.61 Hz, tercer modo 9.81 – 10.15, no todos los modos se aprecian en las pruebas. En este sentido se visualiza el primer modo de rotación (se usa el color magenta para resaltar), en un rango de 4.39 – 5.61, figuras IV.4 - IV.6.

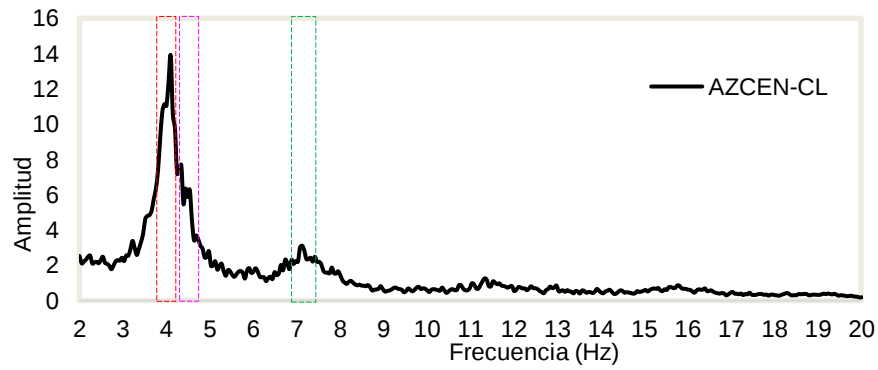


Figura IV.4. Cociente espectral transversal
Fuente: Autoría propia

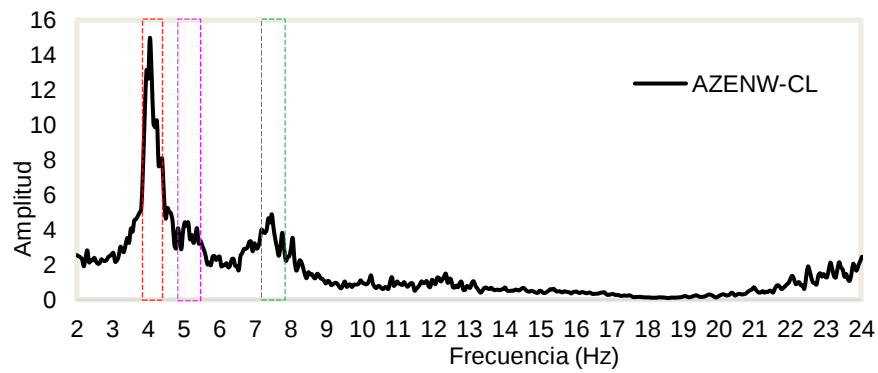


Figura IV.5. Cociente espectral transversal
Fuente: Autoría propia

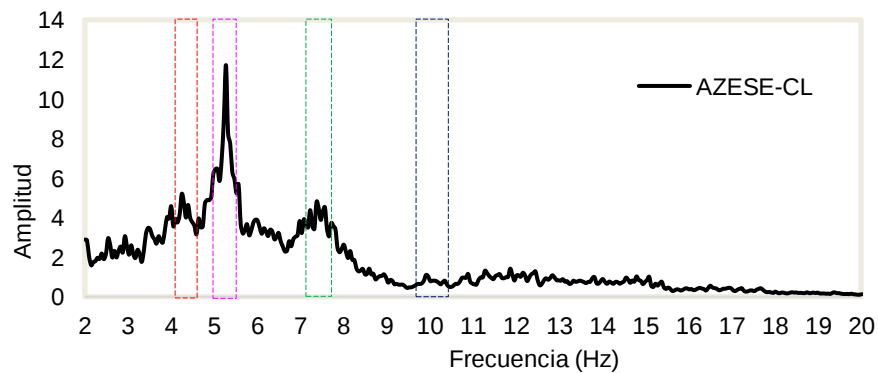


Figura IV.6. Cociente espectral transversal
Fuente: Autoría propia

Al empalmar las pruebas en una sola grafica se observa que para el sentido L (Fig. IV.7), la prueba AZESE-CL tiene una amplitud mayor de 3 a 4 Hz, esto puede indicar que la forma de traslación es diferente a la de la estructura y que se comporta de una manera no lineal. Para el sentido T (Fig. IV.8) la misma prueba muestra mayor amplitud en el rango de torsión de 4.5 – 5.5 Hz.

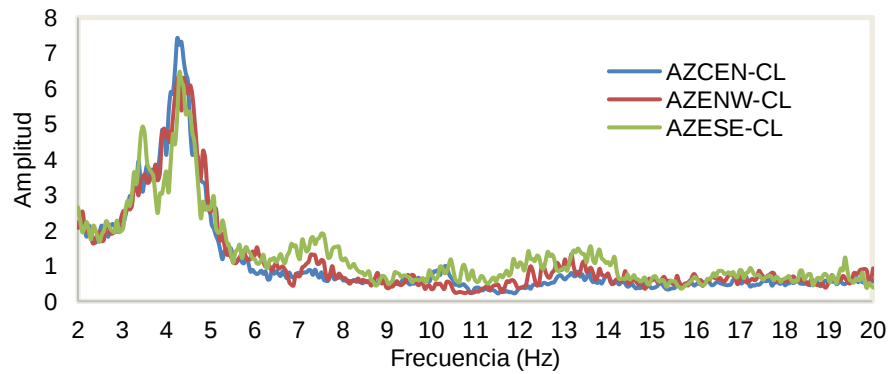


Figura IV.7. Cociente espectral longitudinal
Fuente: Autoría propia

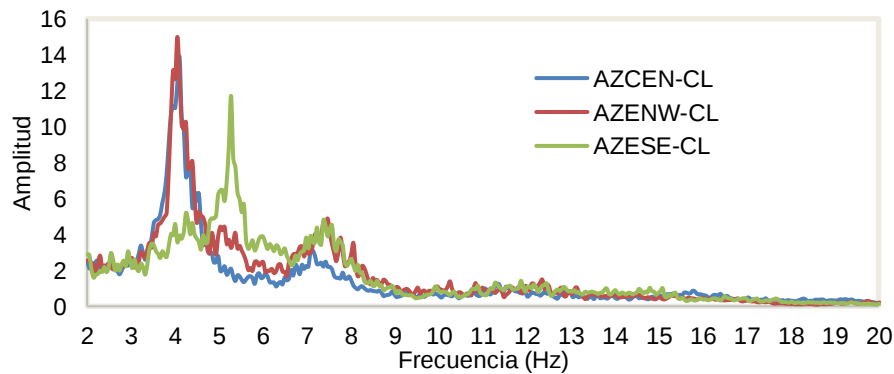


Figura IV.8. Cociente espectral transversal
Fuente: Autoría propia

Para el resto de las pruebas, se identifica las frecuencias fundamentales de traslación y rotación con los espectros de potencia, debido a la poca amplificación que se tiene en pruebas que se localizan en el mismo nivel y entre niveles, en algunas pruebas se identifica mejor las frecuencias con cocientes espectrales.

Las pruebas AZLE2-CEN, AZLE3-CEN y AZLE3-CE2 se localizan en el eje E, F y G en centro de azotea, estas pruebas tienen la finalidad de corroborar el comportamiento que se tiene en la prueba AZESE-CL. En sentido L el primer modo se localiza en 3.85 – 4.58 Hz, segundo modo en 6.83 – 7.86 Hz y tercer modo en 10 – 11 Hz (ver Fig. IV.9 IV.11).

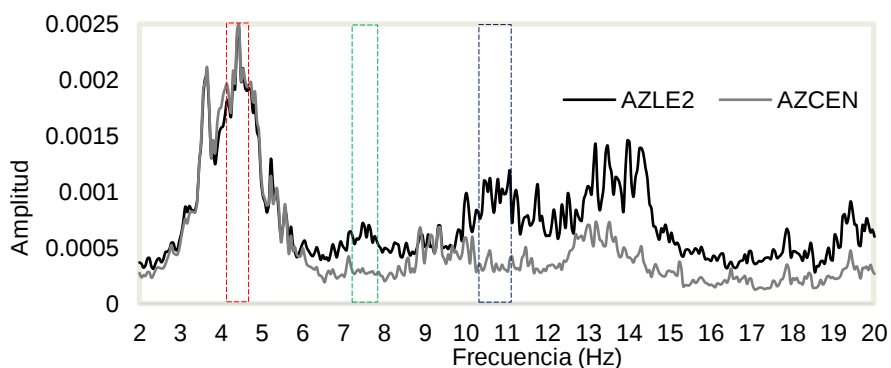


Figura IV.9. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

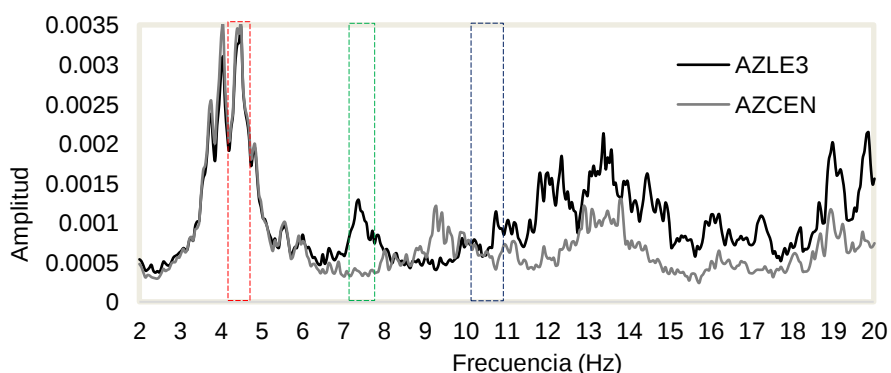


Figura IV.10. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

Estas dos pruebas en sentido L que se localizan mas cercano el punto instrumentado en prueba AZESE-CL, corroboran el comportamiento de la estructura en sentido este.

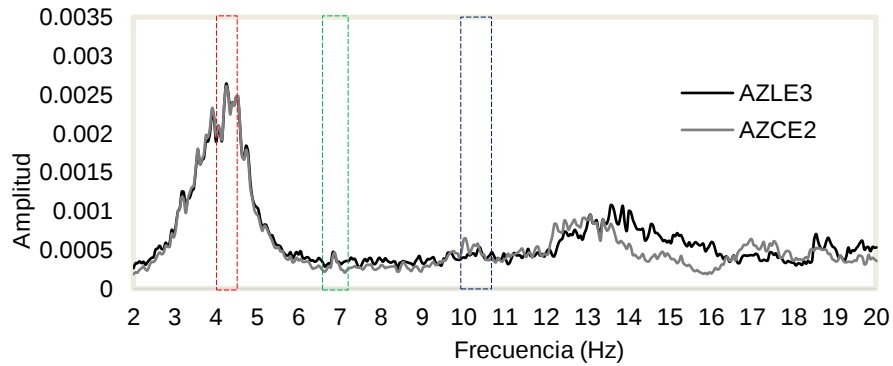


Figura IV.11. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

En el sentido T también se corrobora el mismo comportamiento en la estructura en sentido este, el primer modo se encuentra en un rango de 3.51 – 4.29, segundo modo 6.64 – 7.66, tercer modo 9.96 – 10.54 y primer modo de rotación de 4.93 – 6.10 (Fig. IV.12 – IV. 14).

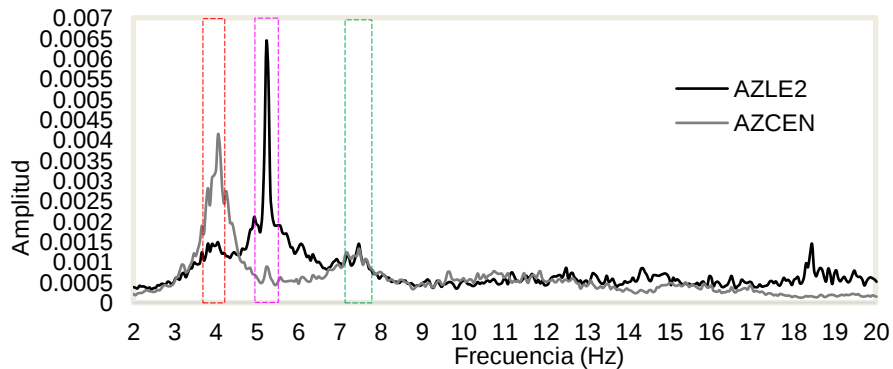


Figura IV.12. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

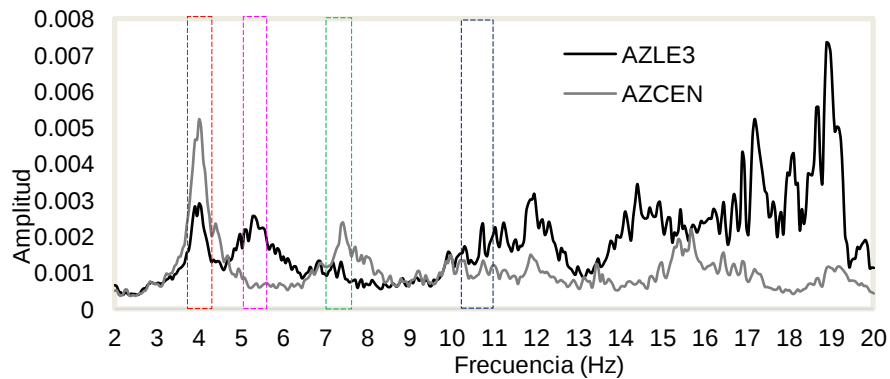


Figura IV.13. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

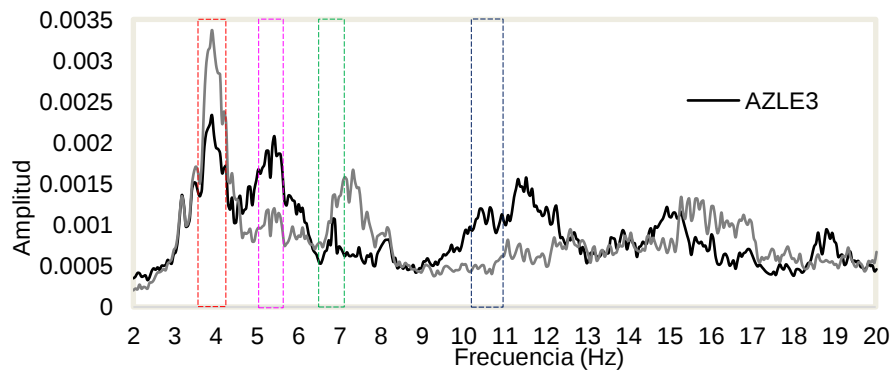


Figura IV.14. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

En la prueba N1ESE-CEN, localizada en primer nivel, y prueba N2ESE-CEN localizada en segundo nivel para el sentido L se encuentra el primer modo de traslación en un rango de 4.05 – 4.54 Hz, segundo modo en 7.12 -7.86 Hz, y tercer modo 9.86 – 10.1 Hz, graficas IV.15 – IV.16.

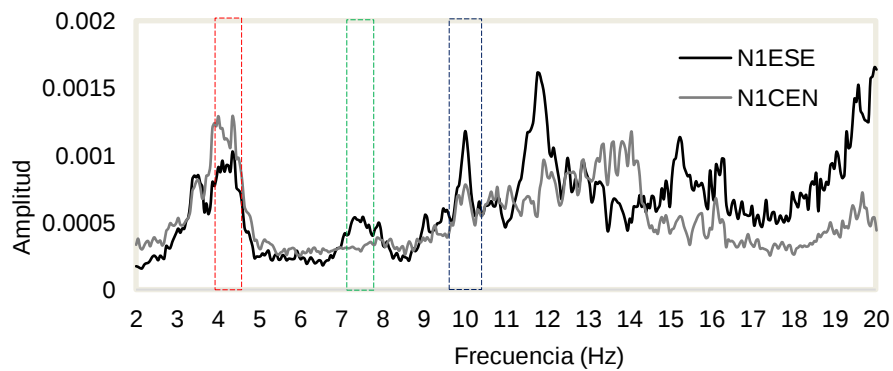


Figura IV.15. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

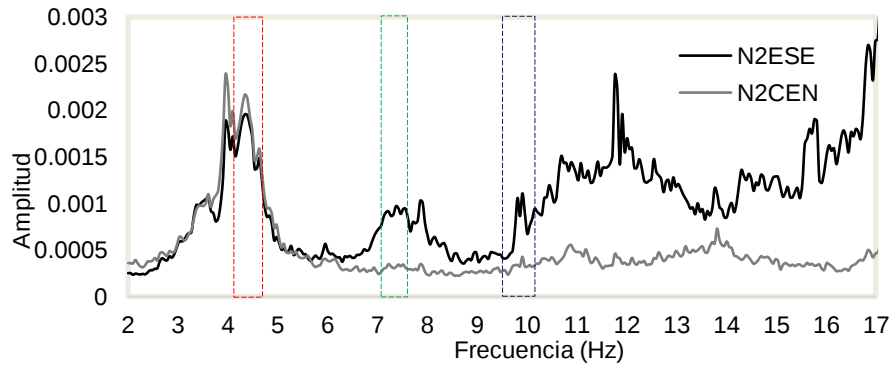


Figura IV.16. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

Para el sentido transversal; primer modo 4.54 - 5.46 Hz, segundo 6.98 – 7.76, tercer modo 10.25 – 10.98 Hz y modo de rotación 5.02 – 6.10 Hz, figuras IV.17 – IV.18.

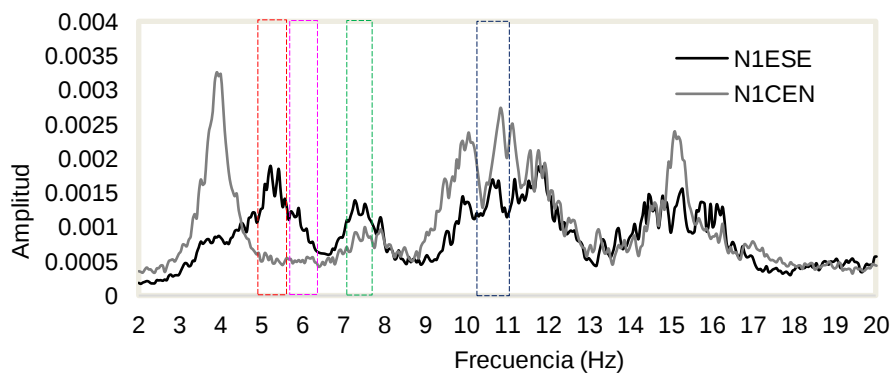


Figura IV.17. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

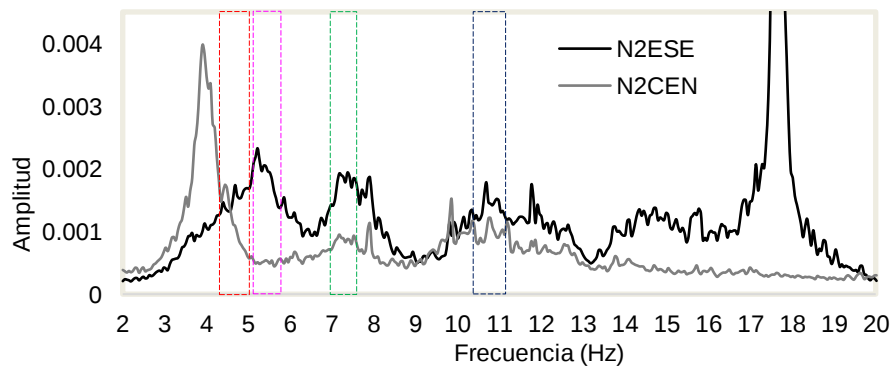


Figura IV.18. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

Se instrumenta pruebas en el eje D y G, en los diferentes niveles respecto a la azotea, con la ubicación de estas pruebas y a través de las mediciones de las señales se puede obtener las formas modales, análisis que se vera más adelante.

Para verificar el comportamiento de la estructura se obtienen los espectros de potencia y cocientes espectrales de las pruebas localizadas en eje D y G.

Para las señales del eje D, en sentido L se identifican los modos de traslación con espectros y cocientes, se identifica el primer modo de traslación en un rango de 4.10 – 5.17 Hz, el segundo modo solo se identifica en prueba AZCEN-N1CEN en un rango de 6.68 – 7.27 Hz, tercer modo en 8.35 – 10.35 Hz. Ver figuras IV.19 - IV.21.

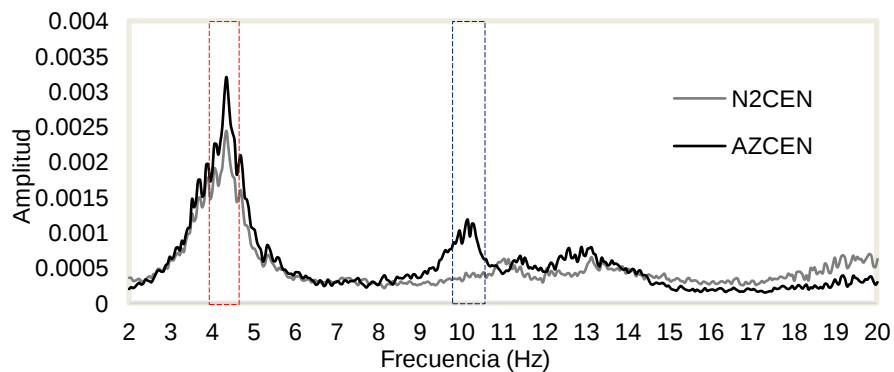


Figura IV.19. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

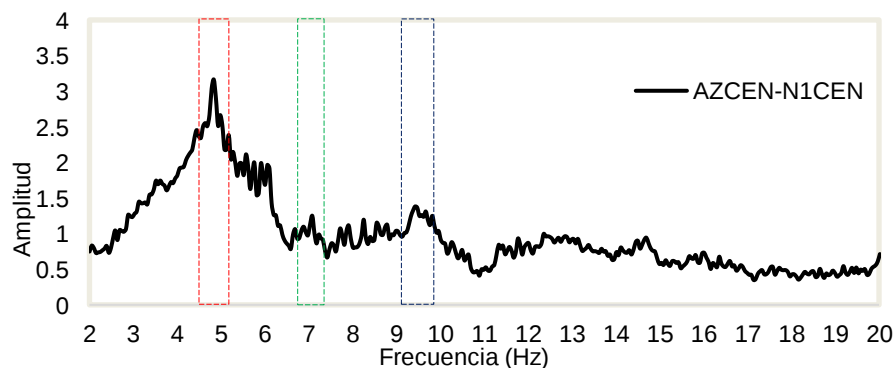


Figura IV.20. Cociente espectral longitudinal
Fuente: Autoría propia

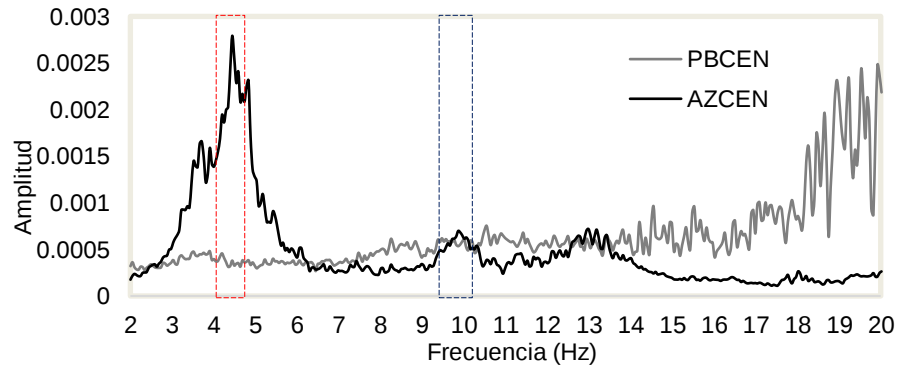


Figura IV.19. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

Para el sentido T, se identifican el primer modo de en un rango de 3.51 – 4.23 Hz, segundo modo 6.88 – 7.51 Hz, el tercer modo solo se identifica en la prueba AZCEN-PBCEN en un rango de 10.49 – 10.83 Hz, y el primer modo de torsión en 5.32 -6.20 Hz. Ver figuras IV.20 – IV.22.

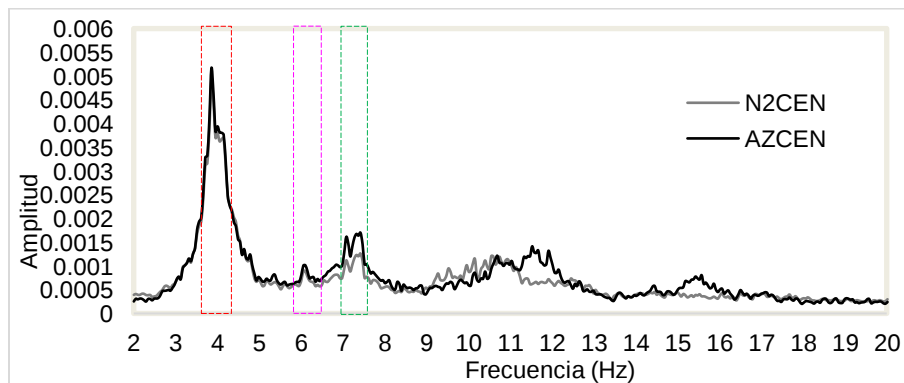


Figura IV.20. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

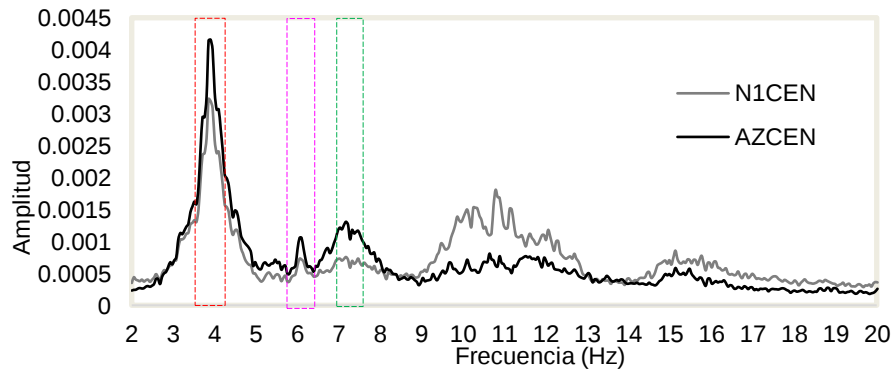


Figura IV.21. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

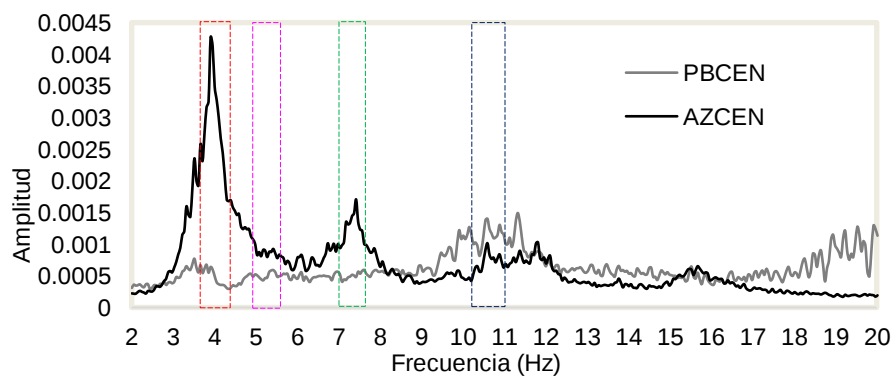


Figura IV.22. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

Para corroborar las propiedades dinámicas de la estructura en el eje D respecto al eje G, se analizó señales en el eje D. En sentido L, se encontró el primer modo de traslación en un rango de 3.8 – 4.88 Hz, el segundo modo no se logro visualizar, el tercer modo se identifica en un rango de 10.10 – 11.03 Hz. Ver figuras IV.23 – IV.25.

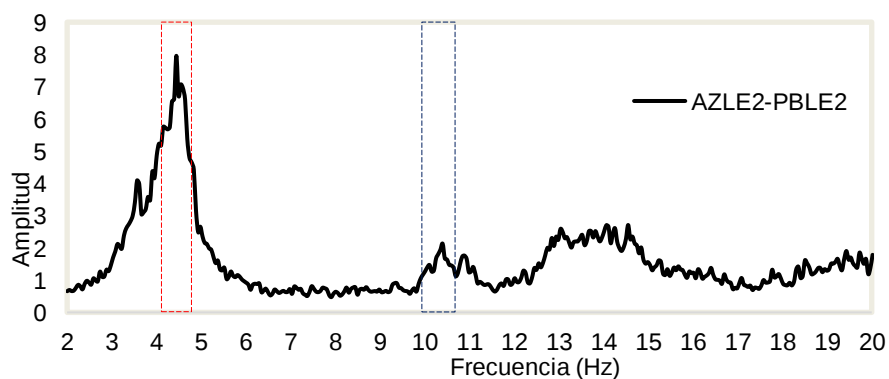


Figura IV.23. Cociente espectral longitudinal
Fuente: Autoría propia

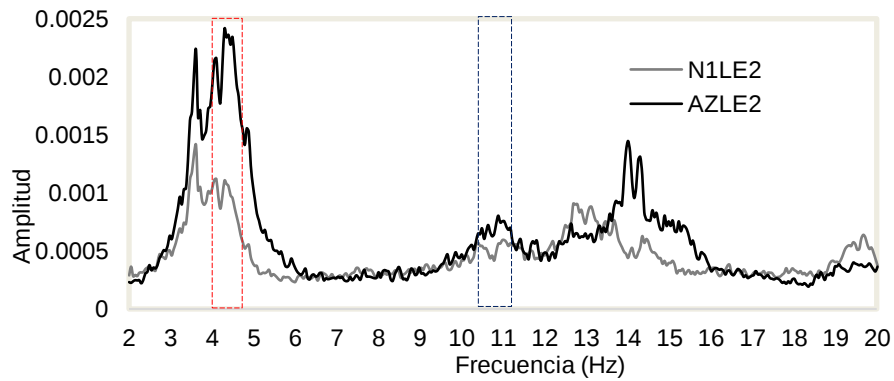


Figura IV.24. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

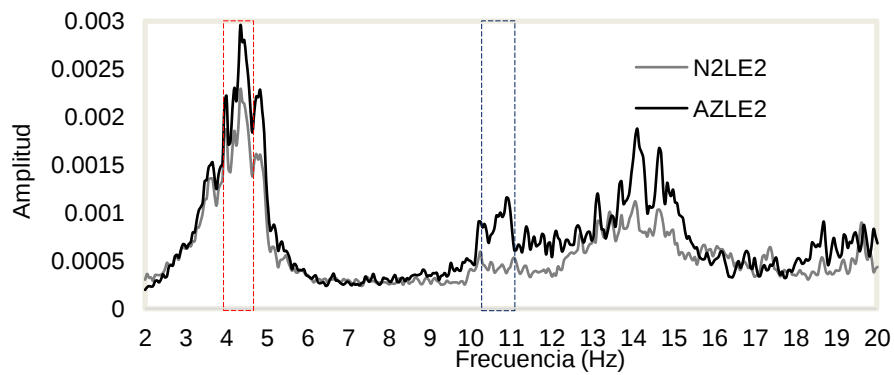


Figura IV.25. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

En sentido T, se visualizó el primer modo en un rango de 3.36 – 4.34 Hz, segundo modo 6.98 – 7.66 Hz, por la poca amplificación que se tiene para el tercer modo no fue posible identificarlo, el primer modo de rotación se identifica en 5.02 - 6.05 Hz. Ver figuras IV.26 – IV. 28.

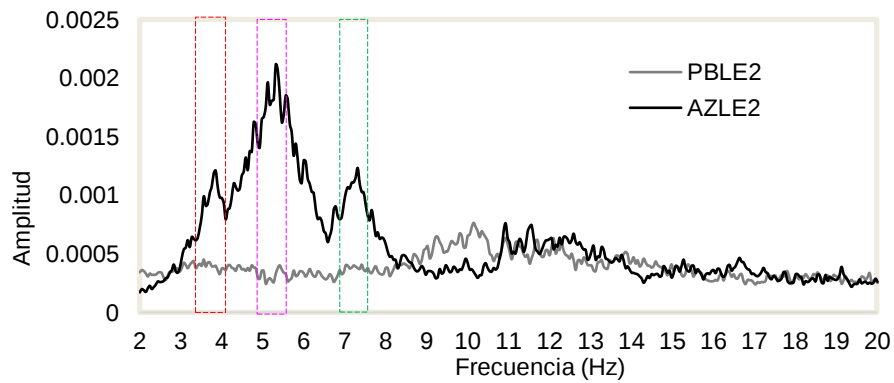


Figura IV.26. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

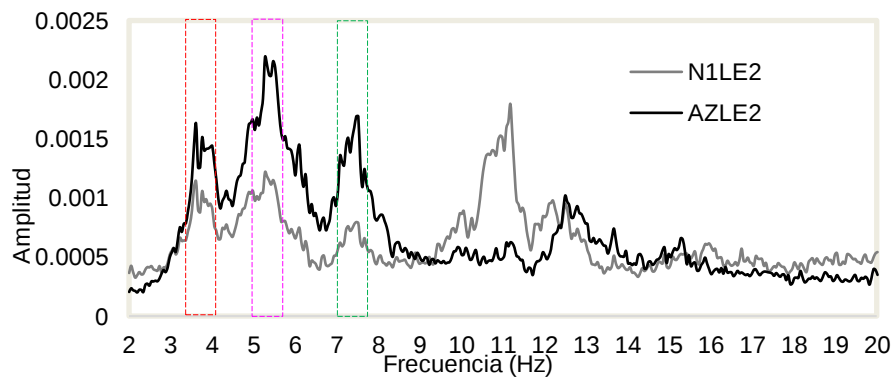


Figura IV.28. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

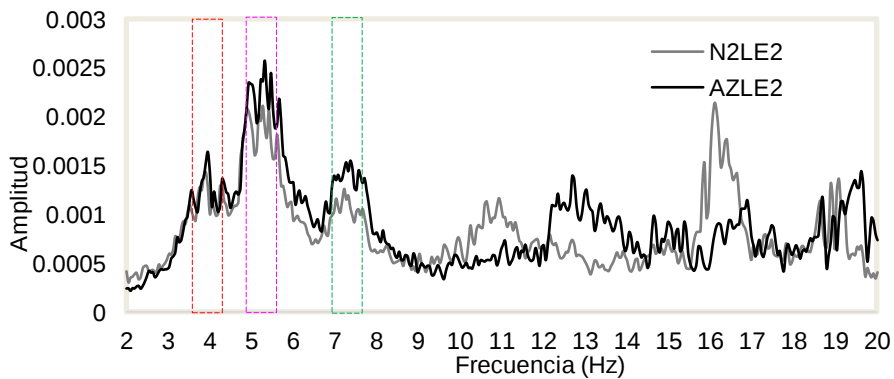


Figura IV.29. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

Al comparar las frecuencias de los modos obtenidos para el sentido L y T en las señales de eje D y G, se observa que el primer modo para el sentido L es consistente fluctuando en 4 Hz, para el sentido T tiene mayor variación de 3 a 4 Hz, los dos modos de traslación restantes son consistentes al igual que el primer modo de rotación.

Con el análisis de las señales de todas las pruebas se identifican los modos de traslación y el modo de rotación a través de los espectros de potencia o cocientes, no en todas las pruebas se puede identificar los tres modos de traslación, en algunas pruebas solo se identifican dos, recopilando información de todas las pruebas se obtiene los rangos de frecuencias para los siguientes modos:

Modos	Inicial (Hz)	Final (Hz)
1 L	3.46	5.17
2 L	6.68	7.91
3 L	8.35	11.13
1 T	3.51	4.88
2 T	6.64	7.71
3 T	9.81	10.98
1 R	4.39	6.20

Tabla IV.1. Resumen de Frecuencias
Fuente: Autoría propia

Al comparar las frecuencias obtenidas de los espectros de potencia y/o cocientes espectrales de todas las pruebas, se observa que independientemente de su ubicación, las frecuencias son muy parecidas para los diferentes modos. Con las figuras en anexos se corrobora al superponer las gráficas de las diferentes pruebas. Las pruebas AZLE2 y AZLE3 respecto AZCEN, al comprar con la prueba AZLE3 respecto AZCE2, se observa que son parecidamente lineales una respecto a otra, se observa esta similitud en el resto de las pruebas, ver anexos figuras A.35 – A.42.

IV.2.- AMORTIGUAMIENTO

Con el factor de amplificación dinámica FAD de los cocientes espectrales se realizó el cálculo de amortiguamiento, obteniendo los siguientes resultados:

AZCEN-CL (%)		AZENW-CL (%)		AZESE-CL (%)	
L	T	L	T	L	T
6.83 – 7.65	3.60 – 4.52	7.94 – 8.65	3.33 – 3.91	7.76 – 8.62	4.26 – 5.57

Tabla IV.2 Amortiguamiento critico
Fuente: Autoría propia

IV.3.- FORMAS MODALES

Con la identificación de las frecuencias correspondientes a los modos de traslación y modo de rotación, se estiman las formas modales para cada modo en las dos direcciones.

Se calcula los cocientes espectrales de la frecuencia identificada para los diferentes niveles y se complementa la configuración de las formas modales con el uso de la función de ángulo de fase y coherencia.

Las figuras IV.30 – IV.35 corresponden a las funciones ángulo de fase y coherencia para las pruebas realizadas en AZCEN.

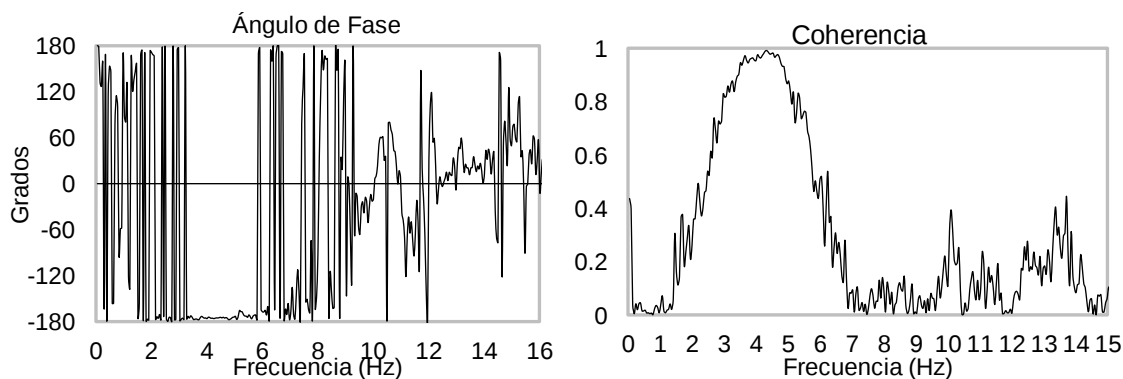


Figura IV.30. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZCEN-N2CEN longitudinal
Fuente: Autoría propia

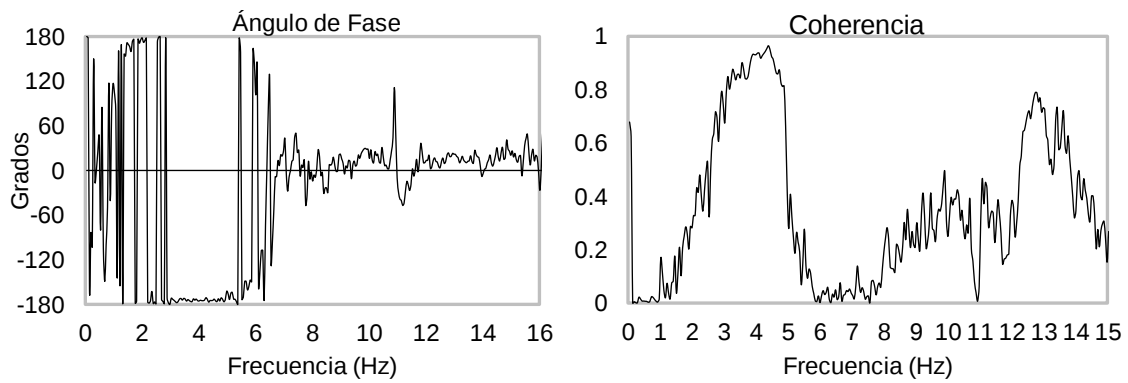


Figura IV.31. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZCEN-N1CEN longitudinal
Fuente: Autoría propia

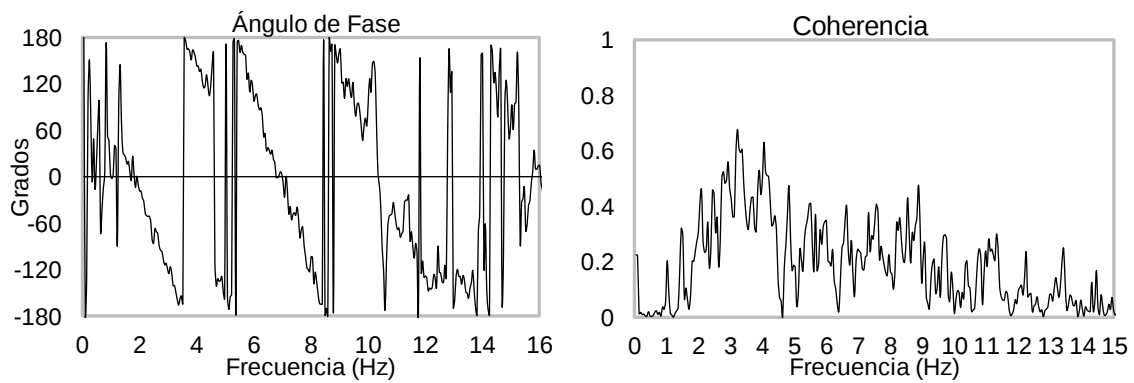


Figura IV.32. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZCEN-PBCEN longitudinal
Fuente: Autoría propia

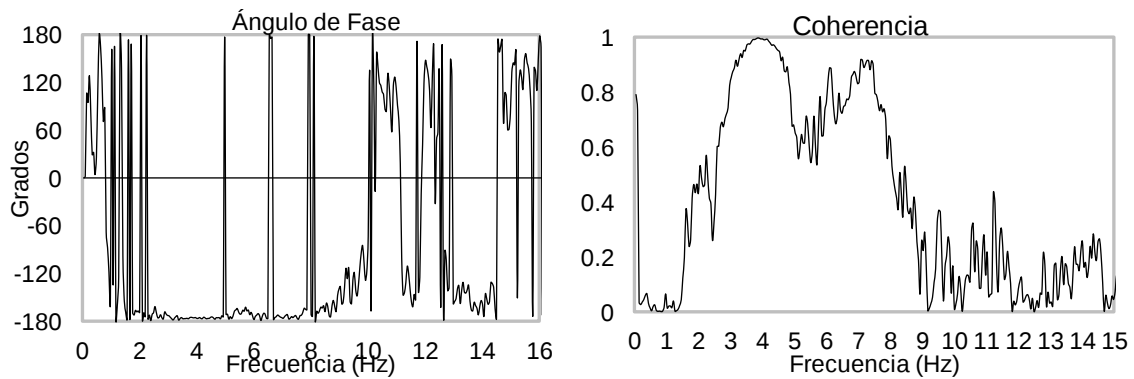


Figura IV.33. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZCEN-N2CEN transversal
Fuente: Autoría propia

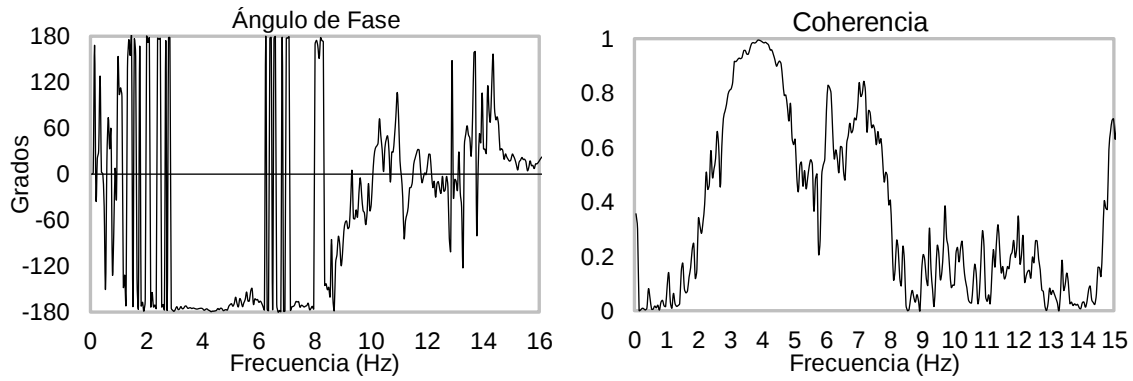


Figura IV.34. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZCEN-N1CEN transversal
Fuente: Autoría propia

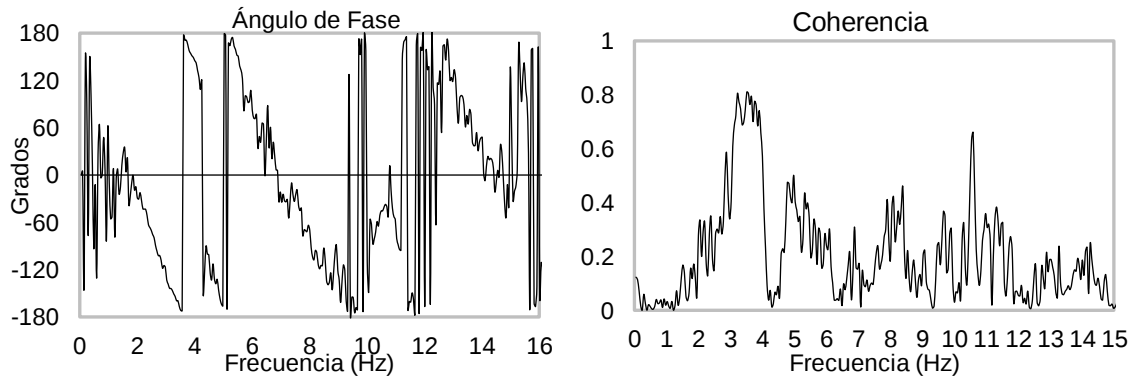


Figura IV.35. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZCEN-PBCEN transversal
Fuente: Autoría propia

La figura IV.36, IV.37 y IV.38 muestra las configuraciones modales de las pruebas PBCEN, N1CEN y N2CEN respecto a AZCEN.

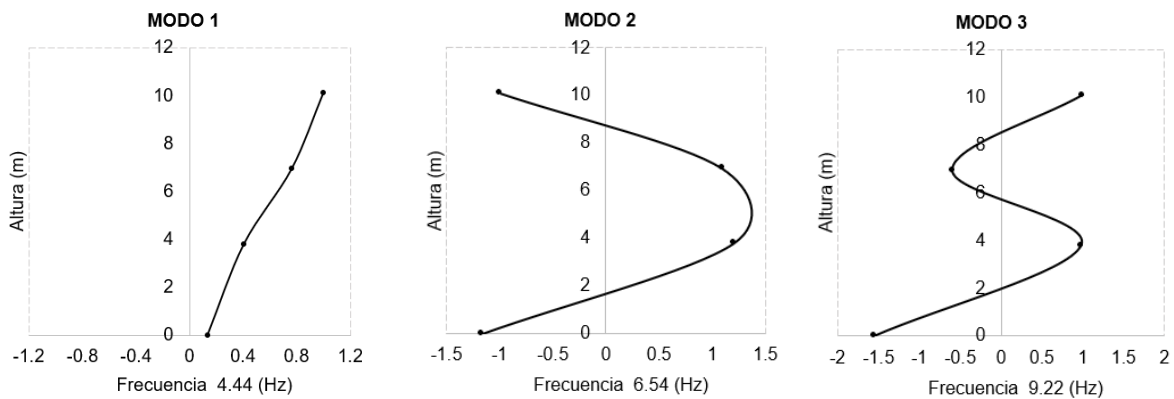


Figura IV.36 Configuraciones modales de traslación en puntos CEN en dirección longitudinal
Fuente: Autoría propia

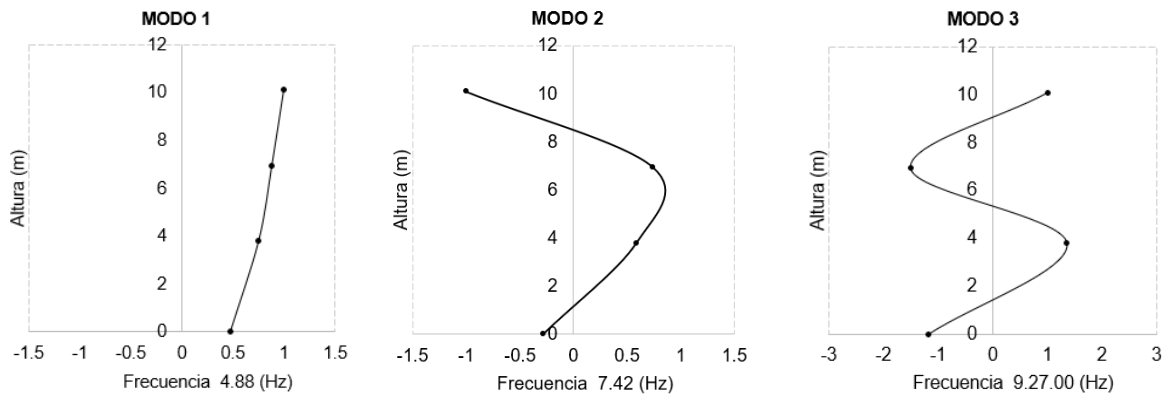


Figura IV.37 Configuraciones modales de traslación en puntos CEN en dirección transversal
Fuente: Autoría propia

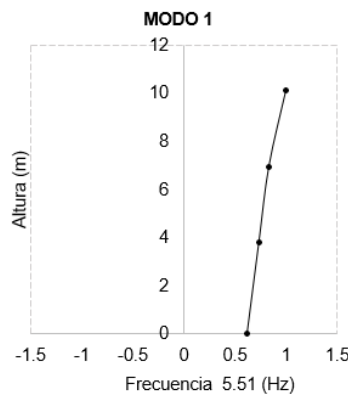


Figura IV.38 Configuración modal de torsión en CEN
Fuente: Autoría propia

Las figuras IV.39 – IV.44 corresponden a las funciones ángulo de fase y coherencia para las pruebas realizadas en AZLE2.

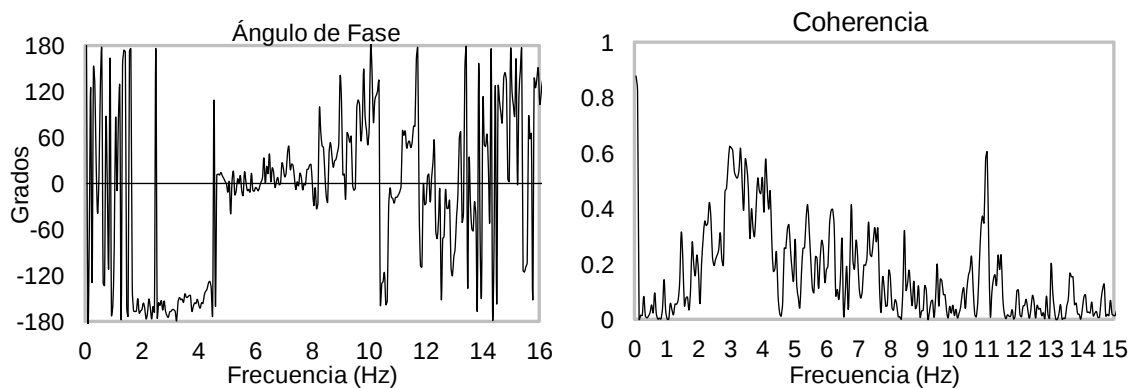


Figura IV.39. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZLE2-PBLE2 longitudinal
Fuente: Autoría propia

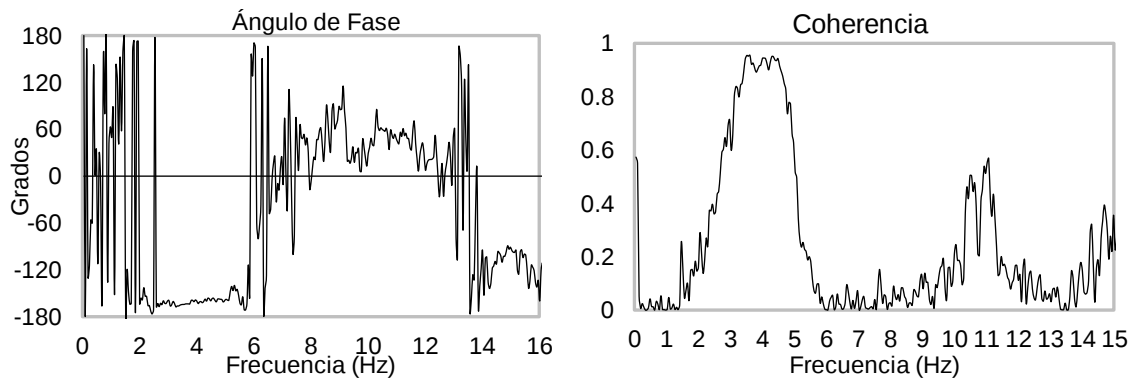


Figura IV.40. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZLE2-N1LE2 longitudinal
Fuente: Autoría propia

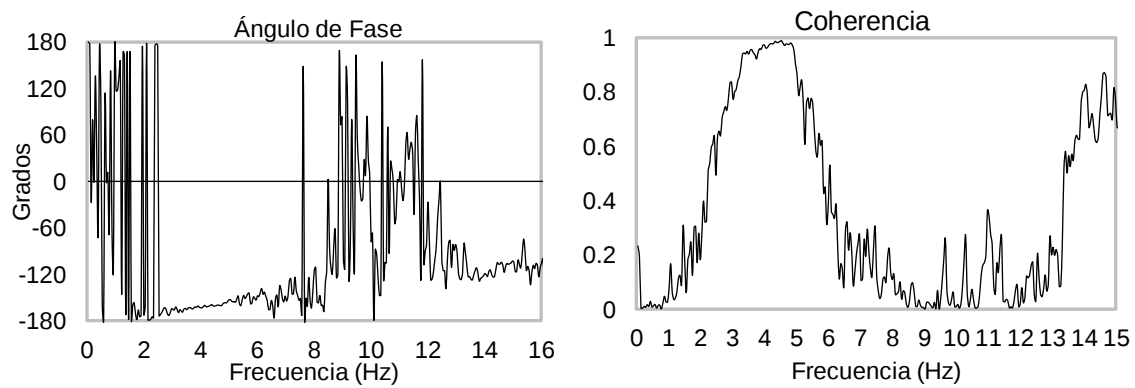


Figura IV.41. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZLE2-N2LE2 longitudinal
Fuente: Autoría propia

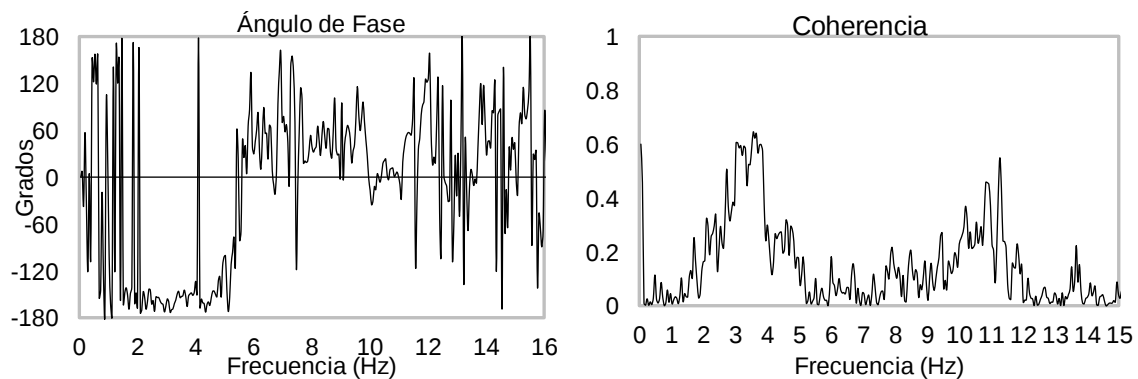


Figura IV.42. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZLE2-PBLE2 transversal
Fuente: Autoría propia

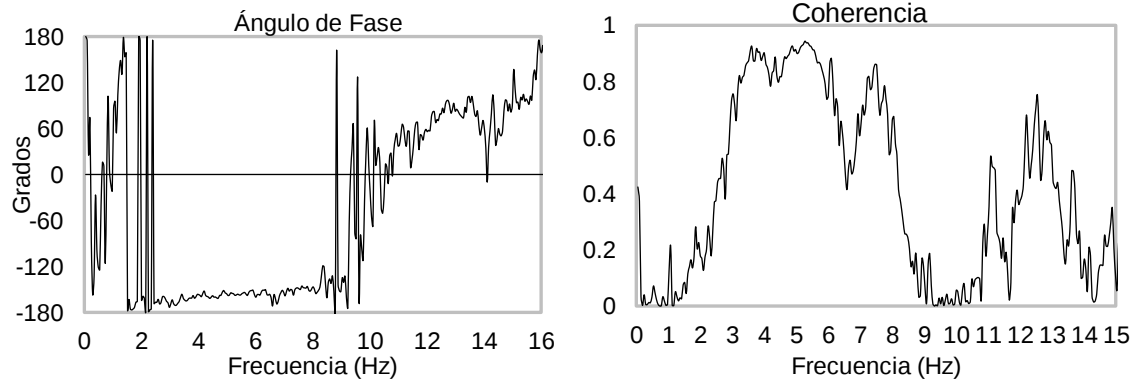


Figura IV.43. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZLE2-N1LE2 transversal
Fuente: Autoría propia

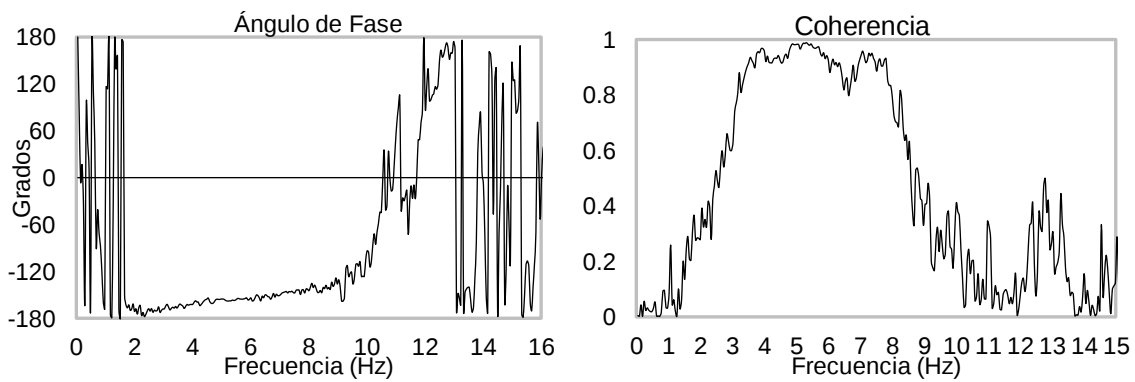


Figura IV.44. Ángulo de fase y coherencia de la señal AZLE2-N2LE2 longitudinal
Fuente: Autoría propia

La figura IV.45, IV.46 y IV.47 muestra las configuraciones modales de las pruebas PBLE2, N1LE2 y N2LE2 respecto a AZLE2.

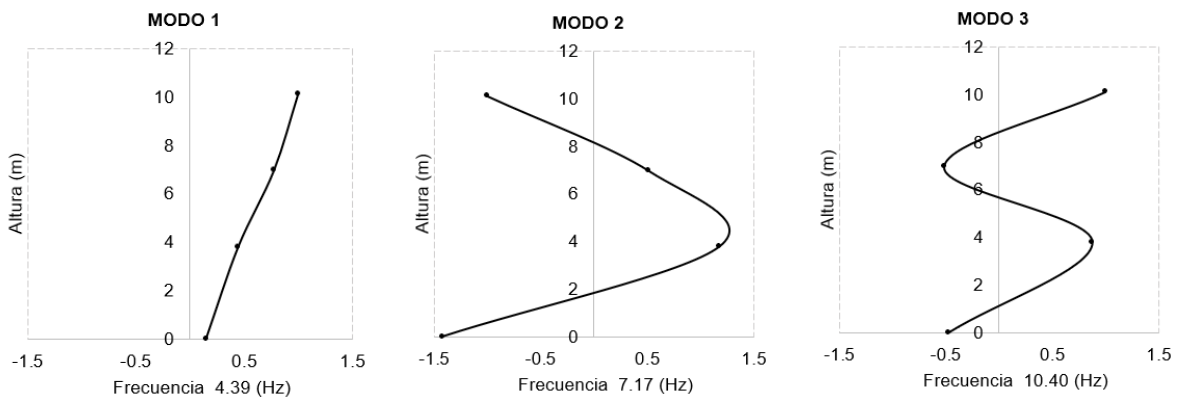


Figura IV.45 Configuraciones modales de traslación en puntos LE2 en dirección longitudinal
Fuente: Autoría propia

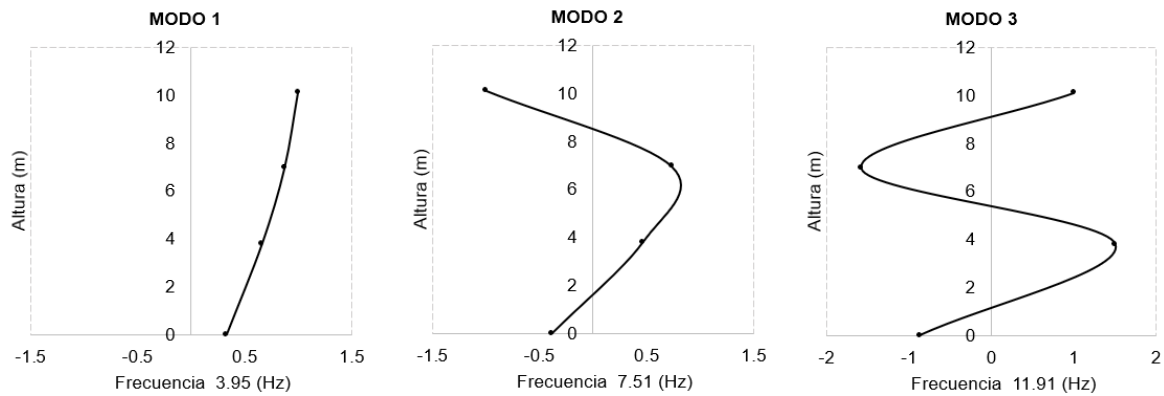


Figura IV.46 Configuraciones modales de traslación en puntos LE2 en dirección transversal
Fuente: Autoría propia

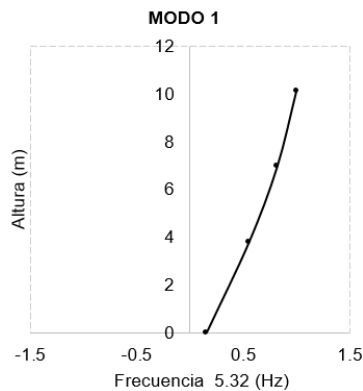


Figura IV.47 Configuración modal de torsión en LE2
Fuente: Autoría propia

Se observa que las configuraciones modales son parecidas siguiendo o la misma configuración, aunque las pruebas se realizaron en diferentes puntos (al centro del edificio “AZCEN” y al norte con sentido este “AZLE2”). Para el modo de torsión su configuración sigue la del primer modo de traslación esto se debe a la ubicación de las pruebas, al ubicarse las pruebas en la parte central del edificio la torsión es menor que si las pruebas se ubicaran en las esquinas del edificio.

IV.4.- DIAGRAMAS DE ESTABILIZACIÓN

El resultado de la estimación paramétrica se ve reflejado en los diagramas de estabilización, donde se identifican las frecuencias en Hz. Se realizaron 30 modelos de diferente orden para cada prueba en sentido L y T.

La estimación paramétrica se realizó en pruebas representativas del sistema; AZCEN-CL, AZENW-CL y AZESE-CL, los modelos de estas pruebas se realizaron en 2 dimensiones (bidimensionalmente).

A manera de visualizar los resultados con la estimación no paramétrica, en la parte baja del diagrama de estabilización se muestra la gráfica obtenida en la estimación no paramétrica, figuras IV.48 – IV.53.

En la prueba AZCEN-CL para el sentido L, se observa que la frecuencia para el primer modo de traslación es consistente en los modelos de diferente orden encontrándose en un rango de 4.30 -4.34 Hz, el segundo modo no se logra visualizar bien, el tercer modo se encuentra en un rango de 9.94 Hz - 10.30. Estos modos son consistentes con los obtenidos en el cociente espectral, figura IV.48.

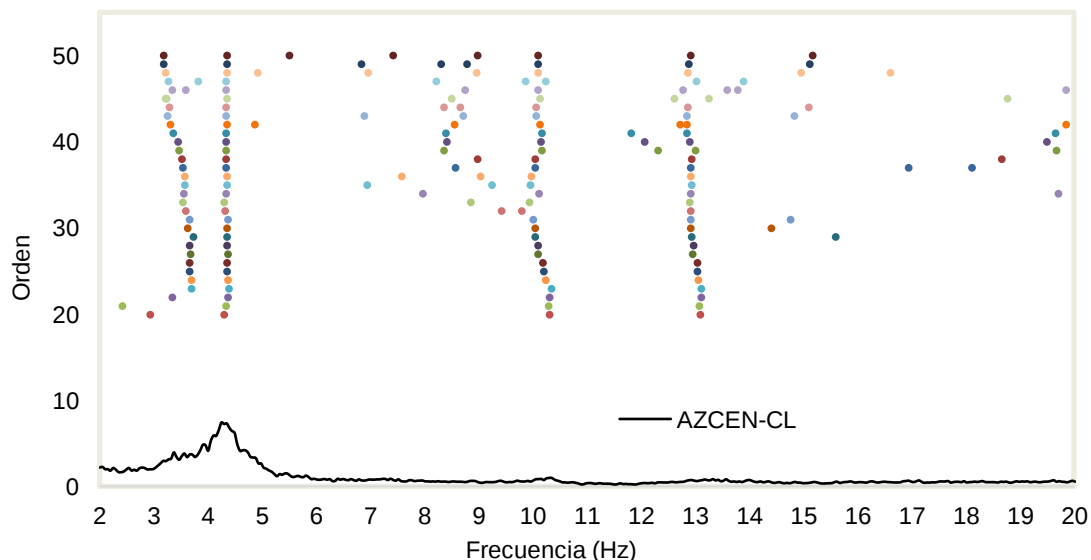


Figura IV.48. Diagrama de estabilización longitudinal
Fuente: Autoría propia

En sentido T, es consistente el primer modo en un rango de 4.01 – 4.08 Hz, y segundo modo 7.43 -7.62 Hz de traslación. Estas frecuencias son similares a las obtenidas en el cociente espectral. Aunque en algunos modelos de orden mayor aparece el modo de rotación, este es muy disperso por lo cual no se visualiza correctamente, figura IV.49.

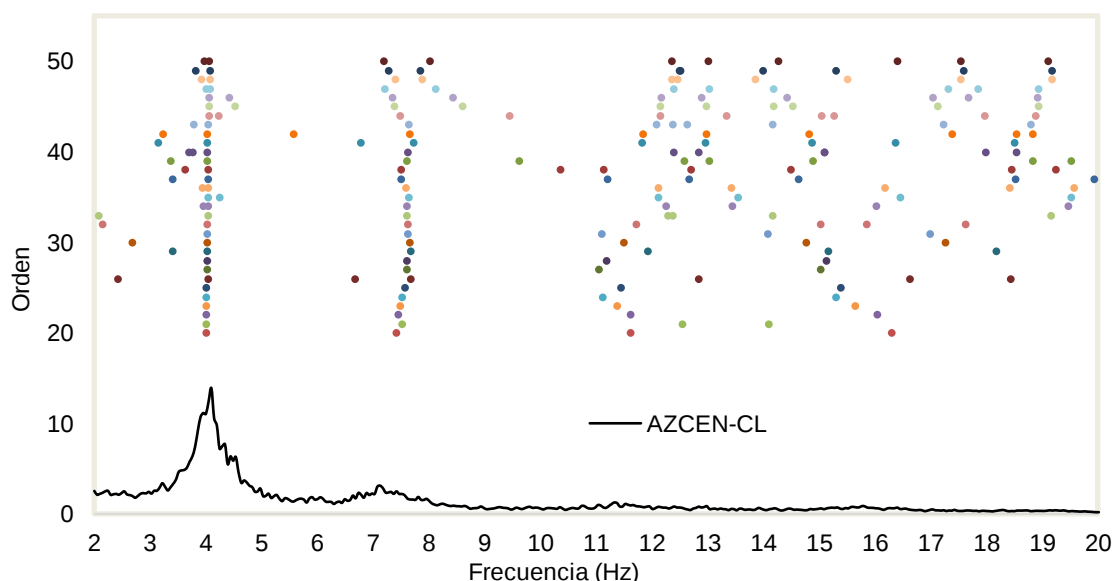


Figura IV.49. Diagrama de estabilización transversal
Fuente: Autoría propia

En la prueba AZENW-CL sentido L, se identifica tres modos de traslación; 1er. Modo 4.22 – 4.26 Hz, 2do. Modo a partir del orden 27 con cierta dispersión en 6.62 – 7.61 Hz, 3er. modo 12.65 – 12.80 Hz, figura IV.50.

Para el sentido T se identifican tres modos de traslación; primero 3.98 – 4.00 Hz, segundo 7.17 – 7.39 Hz y tercero 12.25 – 12.47 Hz. Aunque se muestra cierta dispersión para el primer modo de rotación, a partir de orden 33 se muestra consistente en un rango de 4.94 – 5.59 Hz, figura IV.51.

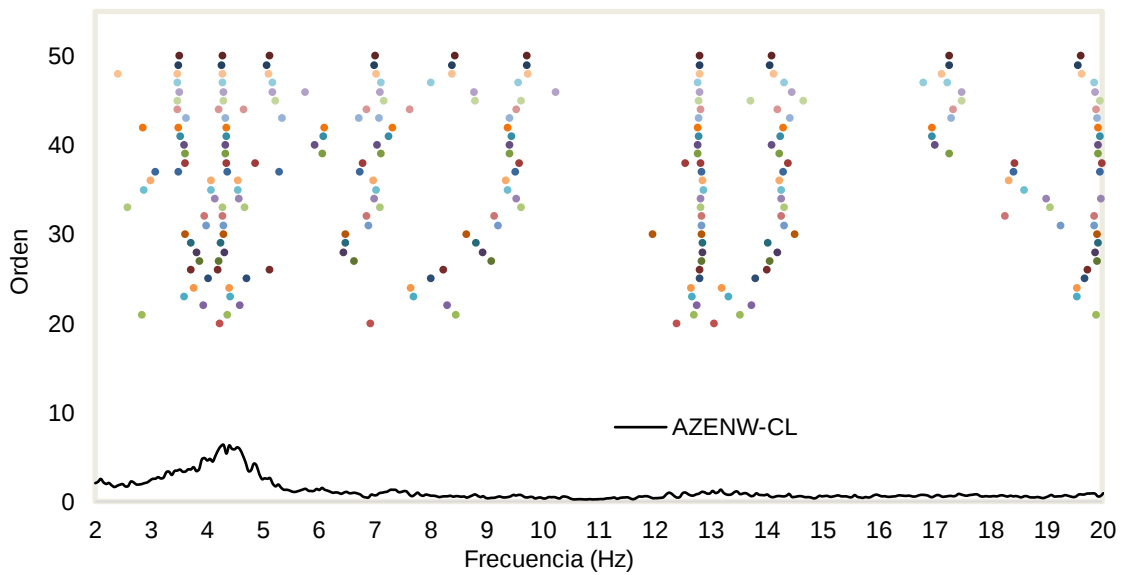


Figura IV.50. Diagrama de estabilización longitudinal
Fuente: Autoría propia

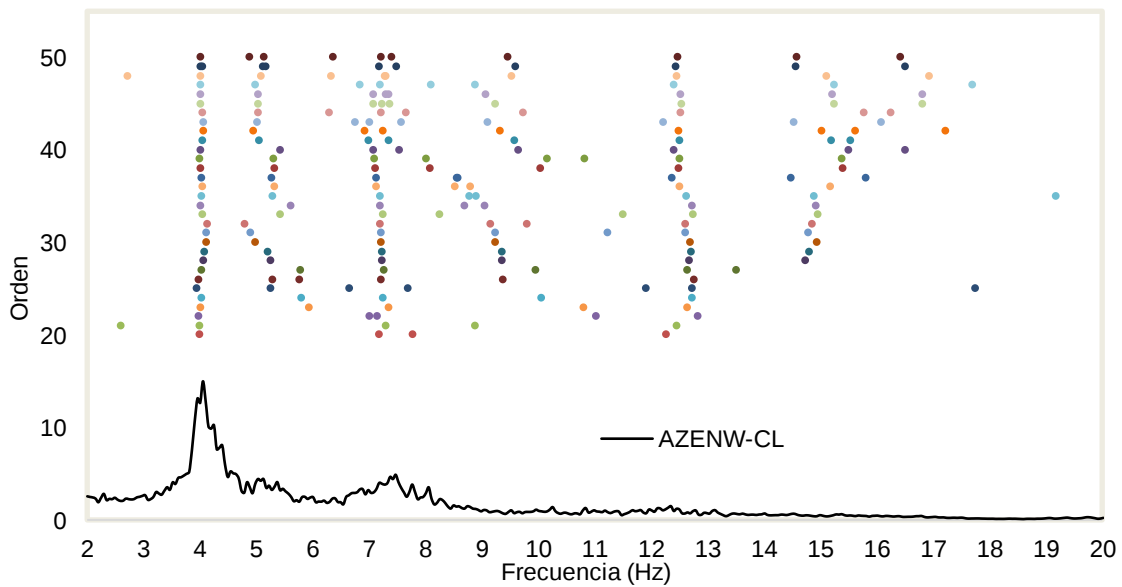


Figura IV.51. Diagrama de estabilización transversal
Fuente: Autoría propia

En el cociente espectral no se identificó el tercer modo de traslación para las dos direcciones, con los modelos de la estimación paramétrica se identifican de manera consistente.

Prueba AZESE-CL, se identifica tres modos de traslación; 1er. Modo 4.32 – 4.42 Hz, 2do. Modo en 7.22 – 7.65 Hz, 3er. modo a partir del orden 27 en un rango de 10.33 – 10.85 Hz, figura IV.52.

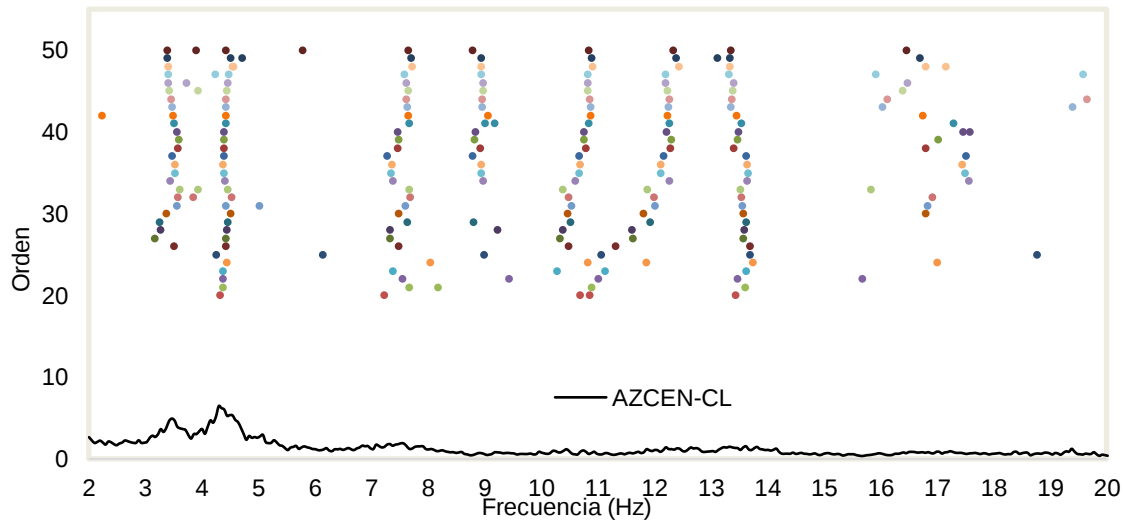


Figura IV.52. Diagrama de estabilización longitudinal
Fuente: Autoría propia

Para sentido T, el primer modo de traslación aparece hasta el orden 25 en un rango de 3.50 – 4.03 Hz, segundo en 7.45 - 7.53, tercero en 10.77 – 10.91 Hz y el primer modo de traslación en un rango de 5.48 – 5.72 Hz, figura IV.53.

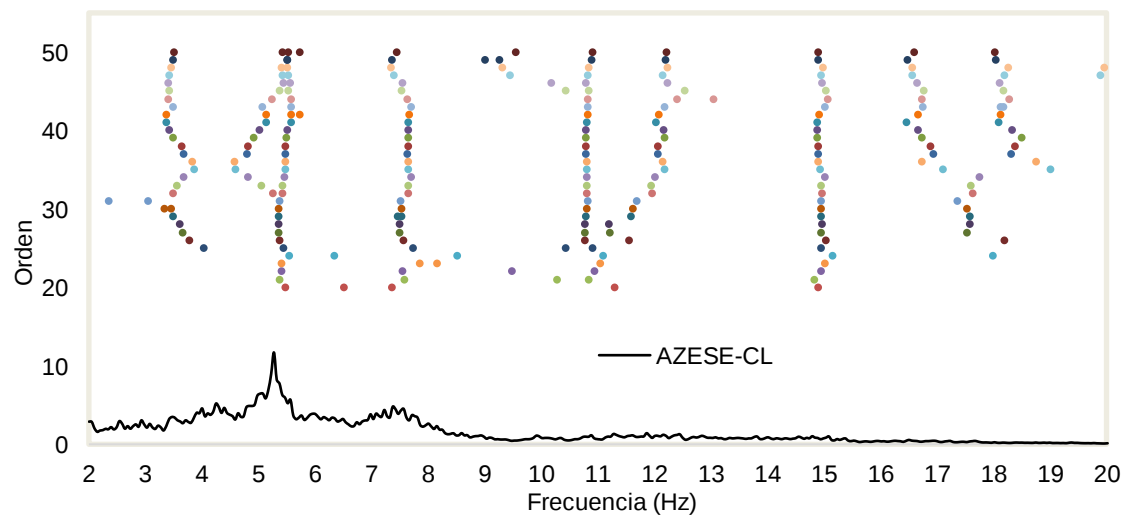


Figura IV.53. Diagrama de estabilización transversal
Fuente: Autoría propia

Para ambos sentidos las frecuencias encontradas corresponden similares a las encontradas en los cocientes espectrales.

Para el sentido L en las tres pruebas, se visualiza frecuencias que oscilan en 3.17 - 3.60 Hz, esto nos puede indicar que el modo de traslación en esta dirección es diferente al de la estructura o que estas frecuencias pueden ser de un modo local y no principal.

Por la ubicación de la prueba AZENW-CL es la más representativa, con las señales de esta prueba en sentido L y T se realizó el modelo tridimensional. Calculando 30 modelos de orden 50 hasta 80.

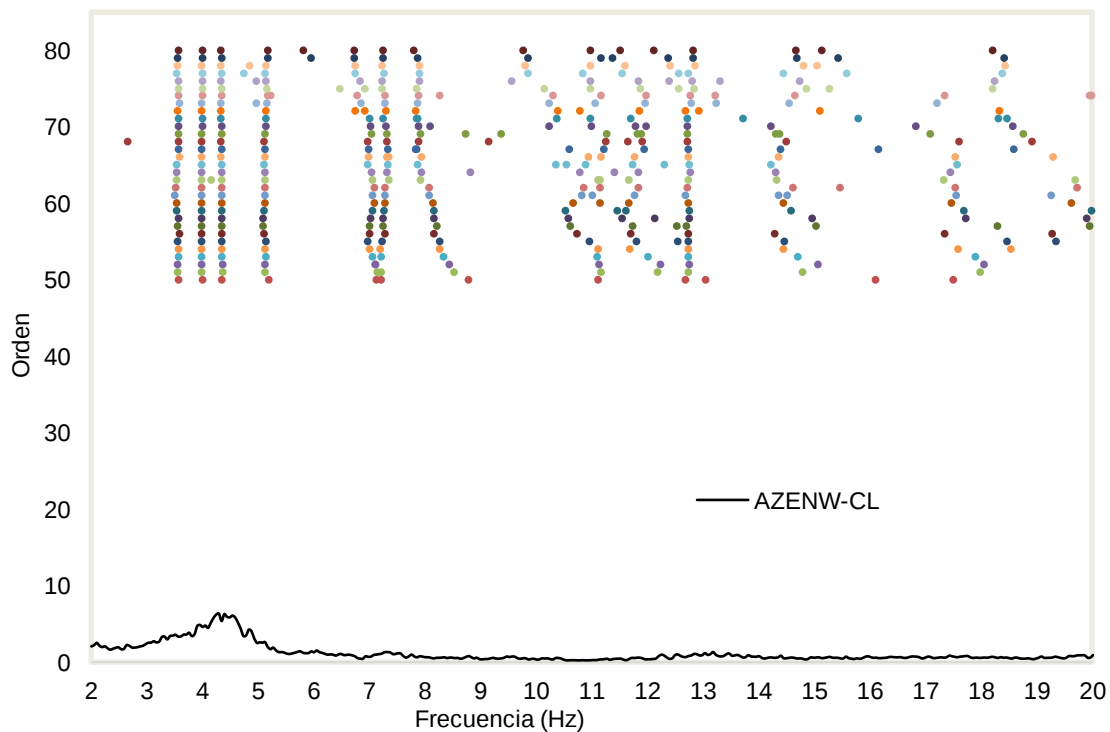


Figura IV.54. Diagrama de estabilización tridimensional
Fuente: Autoría propia

En la figura IV.54 se visualiza claramente el primer modo de traslación que oscila en un rango de 4.33 - 4.35 Hz, segundo modo 6.75 – 7.32 Hz, para el tercer modo 12.68 – 12.82 Hz y primer modo de traslación siendo muy constante en 5.15 - 5.20 Hz. Estas frecuencias son muy parecidas a las encontradas en los cocientes espectrales, excepto el tercer modo de traslación. Para la estimación no paramétrica con los espectros de potencia o cocientes espectrales se visualizó para el tercer modo de traslación frecuencias en un rango de 9.96 – 11.03 Hz, en la estimación paramétrica bidimensional se visualizó el tercer modo en un rango de 9.94 – 12.47 Hz pero presentando dispersiones.

En el modelo tridimensional también se visualizan frecuencias que oscilan en 3.52 – 4.00 Hz, como se mencionó anteriormente esto puede indicarnos que es un modo local.

V.- RESULTADOS ANTES Y DESPUÉS DE LA REHABILITACIÓN

Se identificaron las propiedades dinámicas del edificio ING- 4 después del sismo del 2017, antes de ser rehabilitada la estructura por los daños ocasionados. Se instrumentaron tres puntos AZ-C, AZ-NW y AZ-SE respecto a CL, las frecuencias obtenidas por Polanco a través de los cocientes espectrales se identifican en la Tabla I.2. Cabe mencionar que solo se identifico el primer y segundo modo de traslación en dirección L y T, también el primer modo de rotación.

Con la finalidad de conocer el comportamiento de las propiedades dinámicas de la estructura posterior a su rehabilitación se instrumentó las señales AZCEN, AZENW y AZESE respecto a CL, la localización de estos puntos es semejante a los puntos instrumentados por Polanco. Las frecuencias obtenidas a través de cocientes para dirección L se identifican en las figuras IV.1 – IV.3 y para la dirección T en figuras IV.4 – IV.6.

Después de la rehabilitación para el sentido L el primer modo de traslación aumento 23% y para el segundo 16%. En sentido T para el primer modo incremento 13%, para el segundo 11%, y el primer modo de rotación aumento 33%.

Esto nos indica que la estructura posterior a la rehabilitación incremento su rigidez en ambas direcciones, aumentando más en la dirección L.

Como consecuencia en el aumento en las frecuencias después de la rehabilitación, también hay incremento en el porcentaje de amortiguamiento.

CONCLUSIONES

Con el análisis de las señales para las pruebas de VA, se identificó las frecuencias fundamentales, los resultados muestran que para el primer modo en ambos sentidos L y T, las frecuencias oscilan alrededor de 3.46 – 5.17 Hz, para el segundo en 6.64 – 7.91 Hz, para el tercero 8.35 – 11.13 Hz y el modo de rotación oscila en 4.39 – 6.20 Hz. Se nota un incremento en las frecuencias con respecto a las obtenidas antes de la rehabilitación.

De los resultados obtenidos se observa, que se tiene frecuencias más altas para el sentido longitudinal, comparadas con el sentido transversal, caso contrario en las frecuencias obtenidas por el Ing. Paulo, donde se identifica frecuencias más altas en el sentido transversal comparadas con el longitudinal. Se puede atribuir a que el refuerzo en el sentido longitudinal fue mayor (se reforzaron todos los niveles con contraventeo en las esquinas) que el refuerzo en sentido transversal donde solo se ubica el refuerzo en planta baja.

El porcentaje de amortiguamiento para la estructura sin rehabilitar para el sentido longitudinal se encuentra en un rango de 3.13 % a 3.43% y para sentido transversal 1.99% a 3.04%, al rehabilitarse el edificio ING-4 se observa un incremento de más del doble, para el sentido longitudinal el amortiguamiento se encuentra en un rango de 7.94 a 8.65 y para el sentido transversal en 3.33% a 3.91%. Para obtener el porcentaje de amortiguamiento se idealizó como un modelo de 1 GDL, con lo cual se puede tener ciertas incertidumbres en los resultados.

El haber realizado pruebas en distintos puntos del edificio, ayudó a disipar incertidumbres, para la prueba AZESE-CL en el cociente espectral se ubica la frecuencia respecto a la ordenada máxima en los 5.27 Hz, comparada con la frecuencia de 4.05 Hz de las otras dos pruebas que se realizaron en azotea respecto a terreno, parecía que se estaba comportando el edificio en esa zona de manera diferentes al resto, esta duda se disipó cuando se analizaron las pruebas de los diferentes niveles respecto a la AZLE2, donde se idéntica la combinación de torsión y traslación, indicando que la torsión se encuentra oscilando cerca de 5.27 Hz.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

- Arce, L, H Hernández, L Hernández y D Dueñas (2019), "Propiedades dinámicas experimentales en edificaciones esbeltas", XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Monterrey, Nuevo León, México.
- Beck, J. L. y Jennings P. C. (1980), Structural identification using lineal models and earthquake records, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.8
- Bendat J. S. y Piersol A. G. (1989), *Random data - Analysis and measurement procedure*, Wiley Interscience, New York.
- Brownjohn, J (2002), "Ambient vibration studies for system identification of tall buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 2003; 32:71-95. DOI: 10.1002/eqe.215
- Camargo Pérez, José. (2007). *Análisis de registros sísmicos en un edificio alto cercano a la estación SCT. Repositorio UNAM.*
- Camargo Pérez, José. (2013). *Procedimiento para automatización de metodologías de identificación de sistemas en el análisis de edificios instrumentados. Repositorio UNAM.*
- Chopra, Anil K. (2014). Dinámica de Estructuras 4Ed.
- Ljung, Lennart. (1987), System Identification - Theory for the User, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Murià Vila, David. (2007). Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados. Publicaciones de la Academia de Ingeniería de México.
- Murià Vila, D. & González Alcorta, R. (1995). Propiedades dinámicas de edificios de la Ciudad de México. Revista de Ingeniería Sísmica.
- Ontiveros Castro, Miguel Alejandro (2017) *Comportamiento dinámico de los suelos de Ciudad Universitaria Puebla, Pue*

- Ortiz Silva, Fernando Hebert. (2016). *Determinación de las propiedades dinámicas del suelo en CU para fines de diseño sísmico. Repositorio BUAP.*
- Polanco Galván, José Paulo. (2020). *Identificación de las características dinámicas de un edificio de tres niveles. Repositorio BUAP.*
- Serdar Soyoz, Ertugrul Taciroglu, M. ASCE, Jutay Orakcal, Robert Nigbor, Derek Skolnik, Hilmi Lus, Erdal Safak. (2013). Ambient and Forced Vibration Testing of a Reinforced Concrete Building before and after Its Seismic Retrofitting. *American Society of Civil Engineers 2013.*
- Van Overschee P. y De Moor B. (1994), N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems, *Automatica*, vol.30.

BIBLIOGRAFÍA

Camargo Pérez, Cruz Noguez. (2004). *Determinación experimental de propiedades dinámicas y efectos interacción suelo-estructura en un edificio de 18 niveles desplantado en la zona lacustre de la ciudad de México. Repositorio UNAM.*

ANEXO A

REPORTE FOTOGRAFICO DE PRUEBAS REALIZADAS DE VA

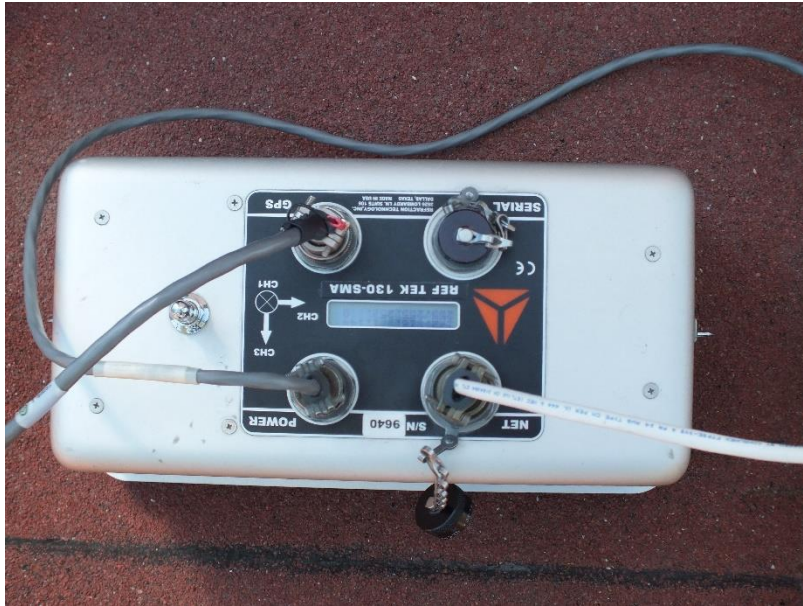


Figura A.1 Prueba 1
Fuente: Autoría propia



Figura A.2 Prueba 1
Fuente: Autoría propia

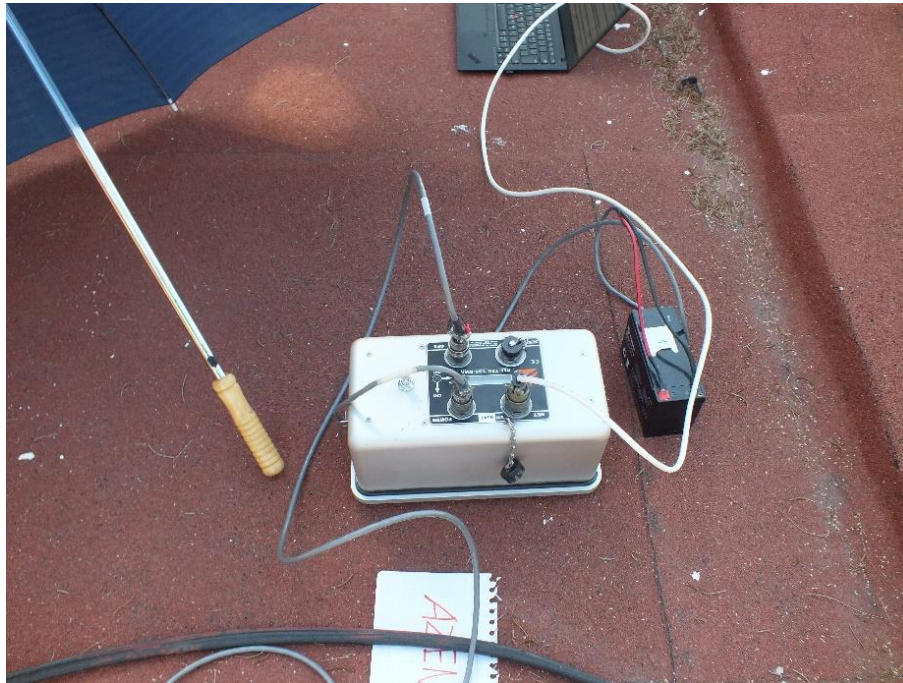


Figura A.3 Prueba 2
Fuente: Autoría propia



Figura A.4 Prueba 2
Fuente: Autoría propia

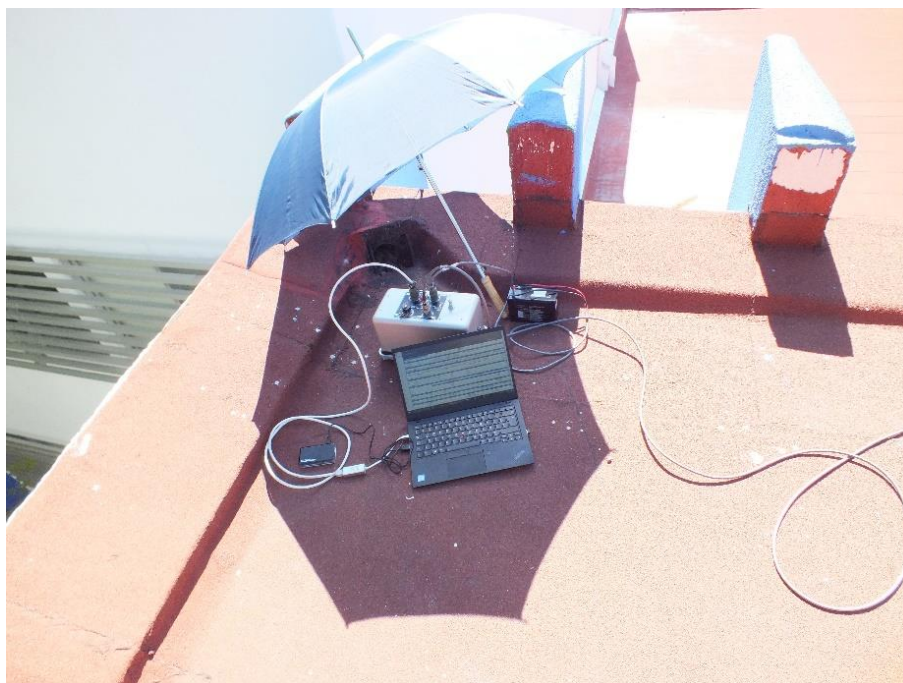


Figura A.5 Prueba 3
Fuente: Autoría propia

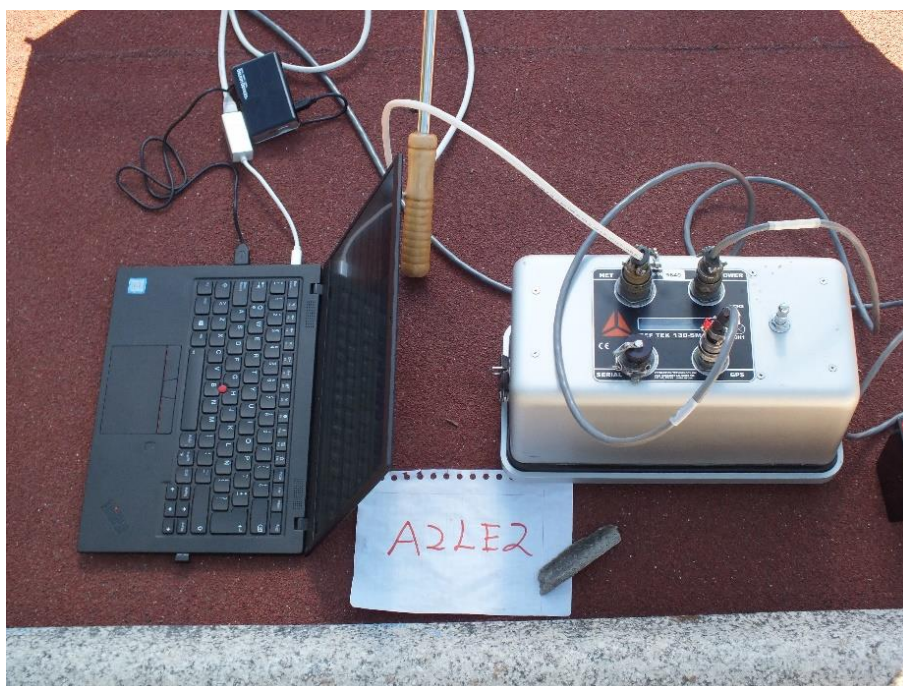


Figura A.6 Prueba 4
Fuente: Autoría propia



Figura A.7 Prueba 4
Fuente: Autoría propia



Figura A.8 Prueba 4
Fuente: Autoría propia



Figura A.9 Prueba 5
Fuente: Autoría propia



Figura A.10 Prueba 5
Fuente: Autoría propia



Figura A.11 Prueba 6
Fuente: Autoría propia

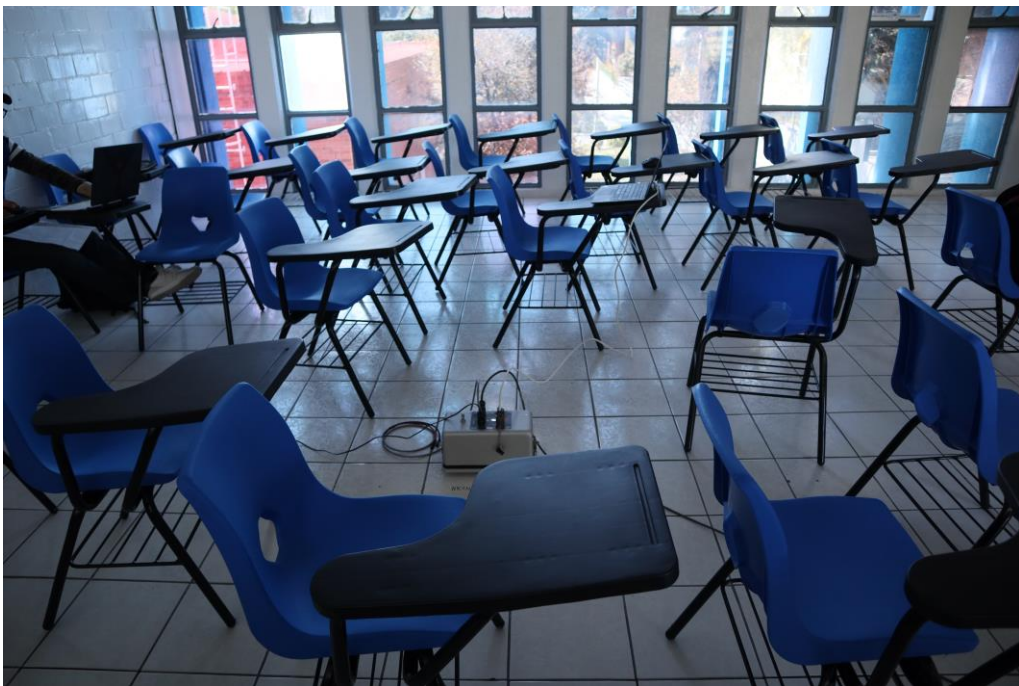


Figura A.12 Prueba 6
Fuente: Autoría propia

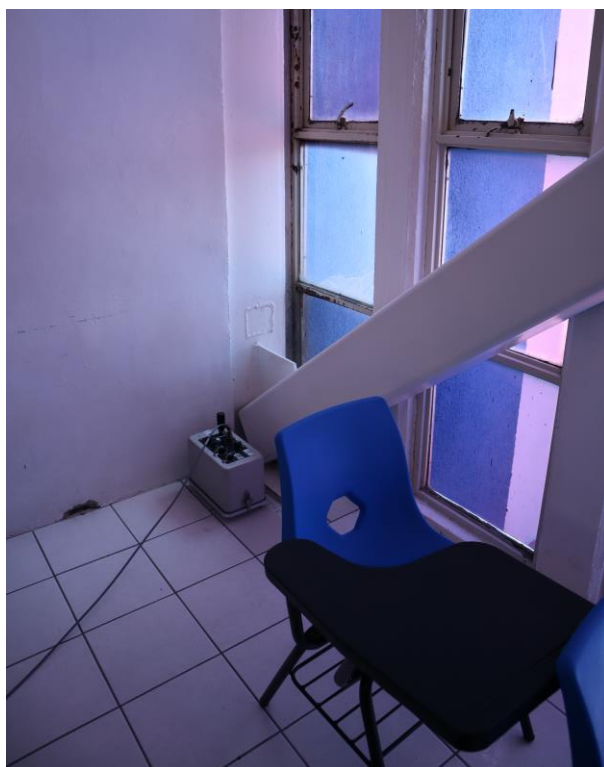


Figura A.13 Prueba 7
Fuente: Autoría propia

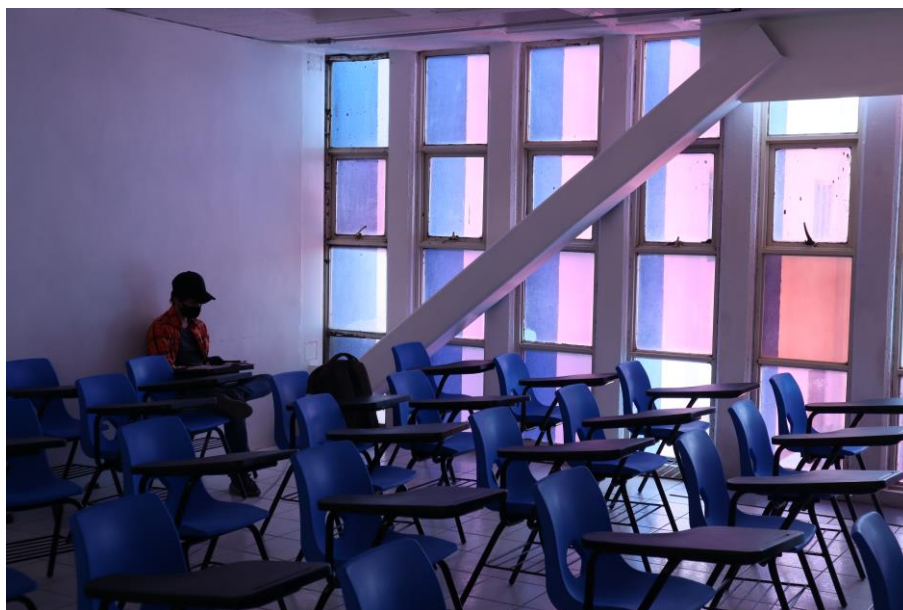


Figura A.14 Prueba 7
Fuente: Autoría propia



Figura A.15 Prueba 8
Fuente: Autoría propia



Figura A.16 Prueba 8
Fuente: Autoría propia

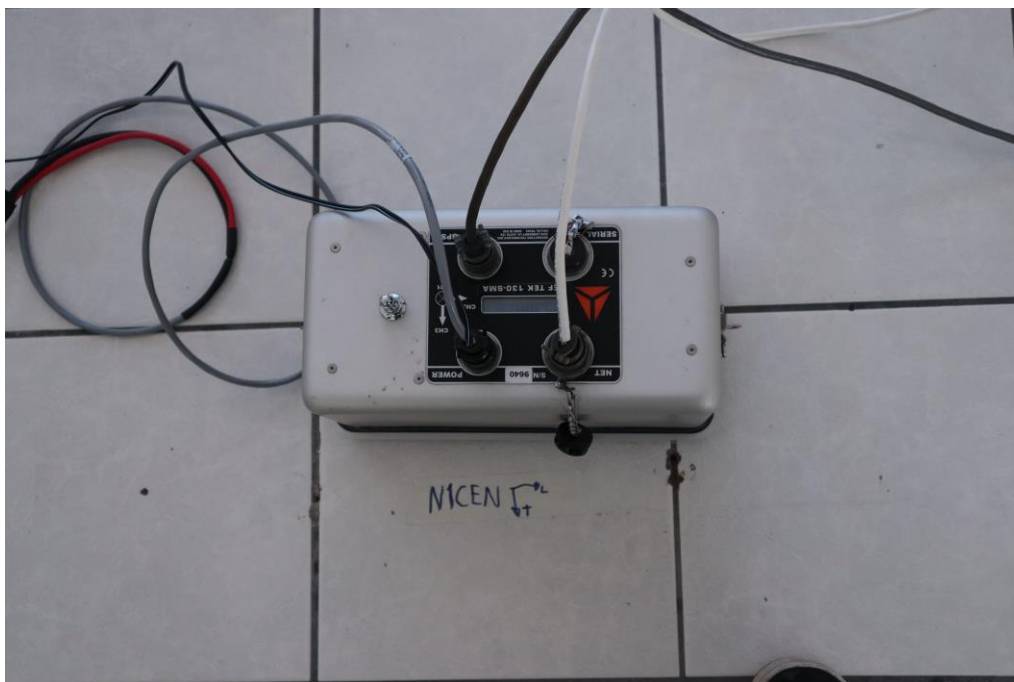


Figura A.17 Prueba 9
Fuente: Autoría propia

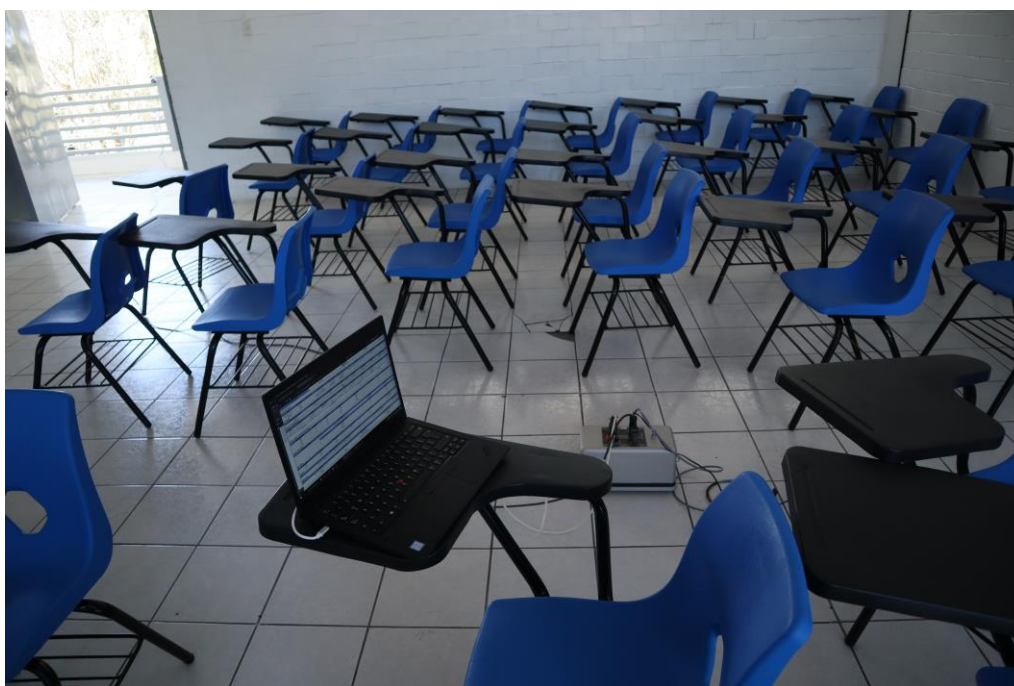


Figura A.18 Prueba 9
Fuente: Autoría propia



Figura A.19 Prueba 10
Fuente: Autoría propia



Figura A.20 Prueba 10
Fuente: Autoría propia



Figura A.21 Prueba 11
Fuente: Autoría propia



Figura A.22 Prueba 11
Fuente: Autoría propia



Figura A.23 Prueba 12
Fuente: Autoría propia

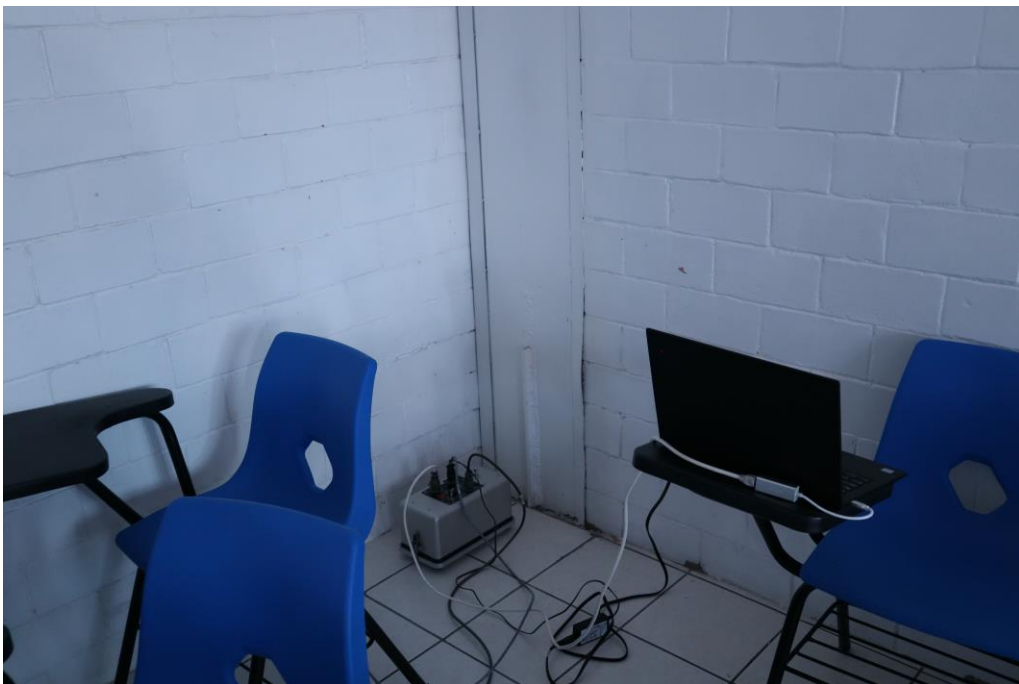


Figura A.24 Prueba 12
Fuente: Autoría propia



Figura A.25 Prueba 13
Fuente: Autoría propia



Figura A.26 Prueba 13
Fuente: Autoría propia



Figura A.27 Prueba 14
Fuente: Autoría propia

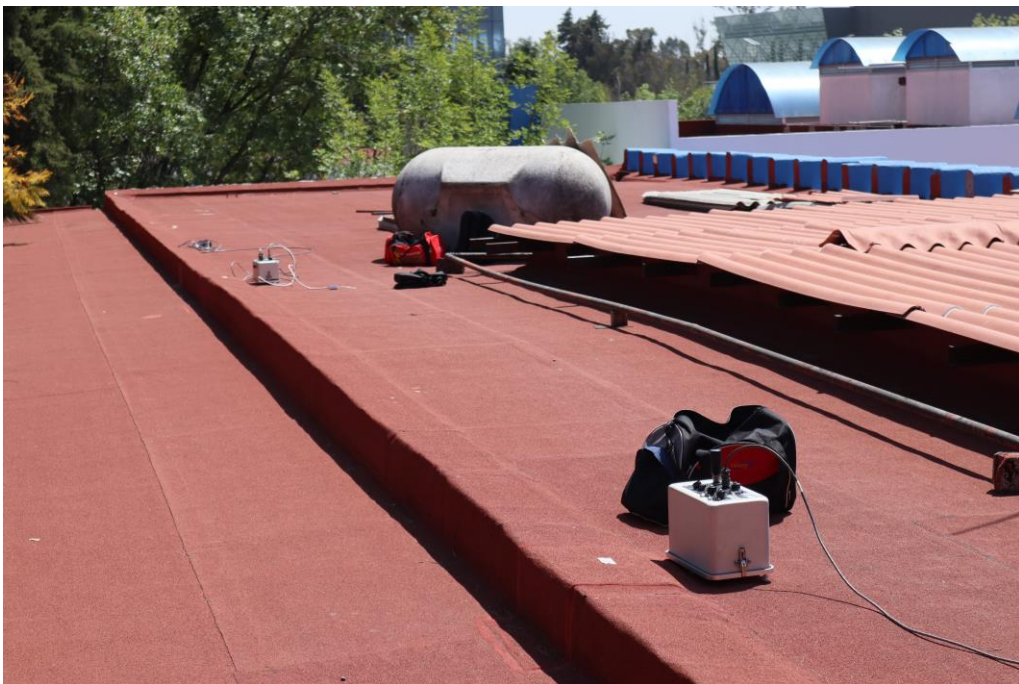


Figura A.28 Prueba 14
Fuente: Autoría propia

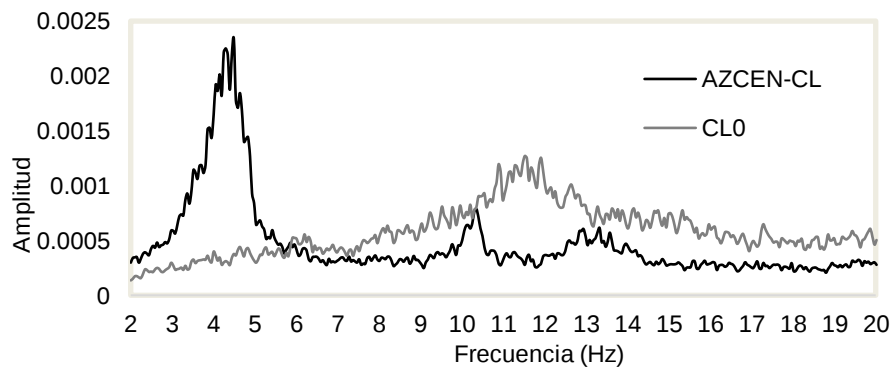


Figura A.29. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

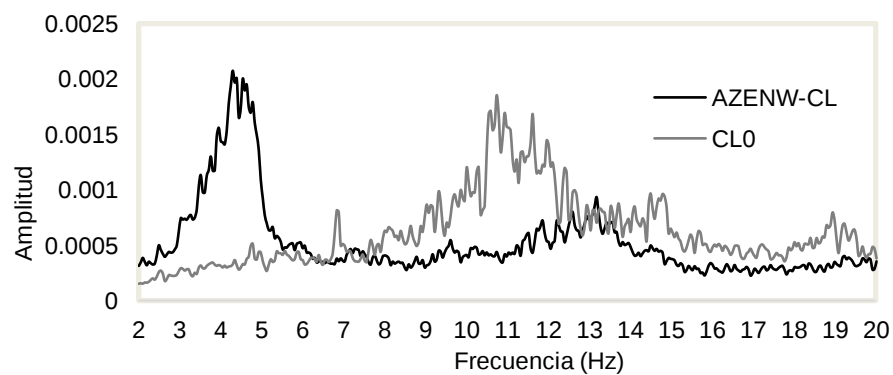


Figura A.30. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

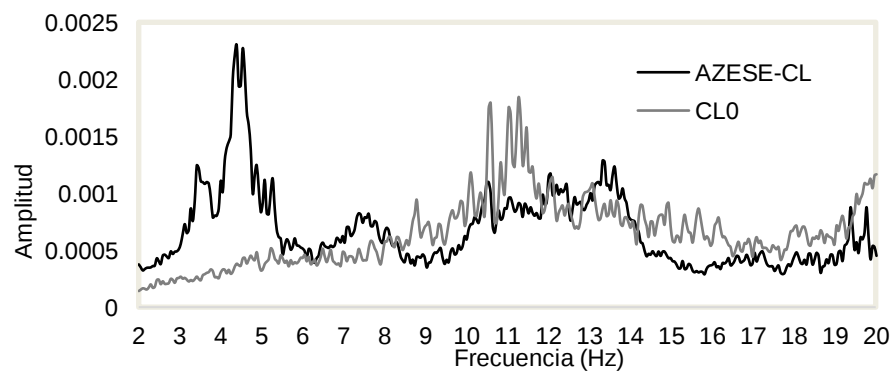


Figura A.31. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

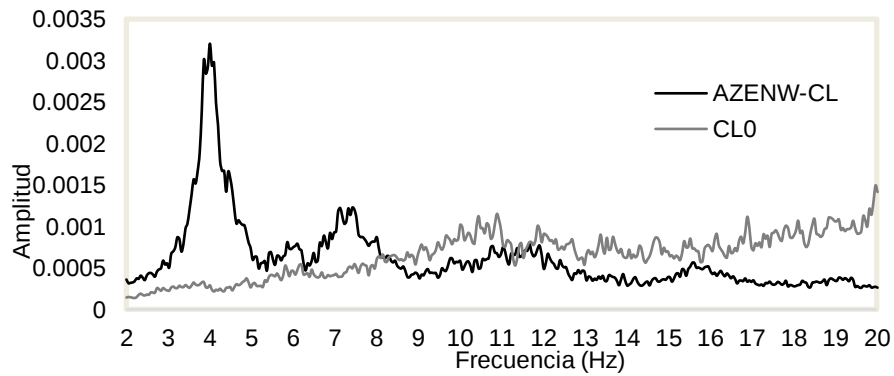


Figura A.32. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

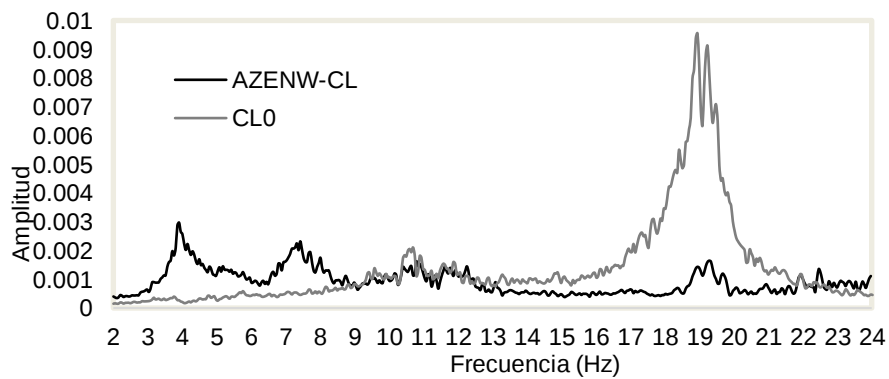


Figura A.33. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

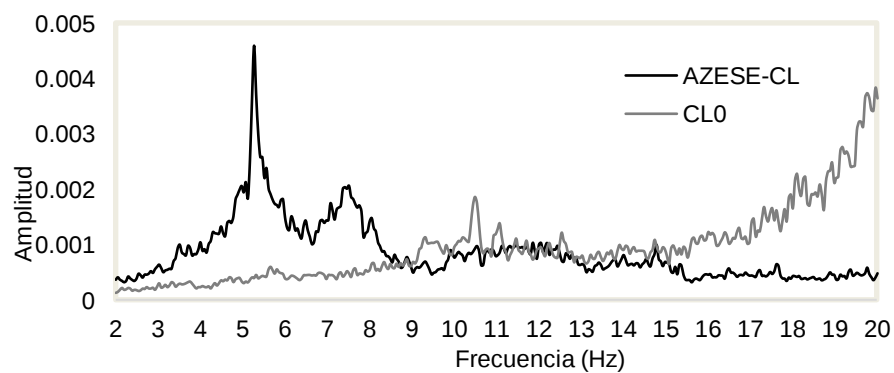


Figura A.34. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

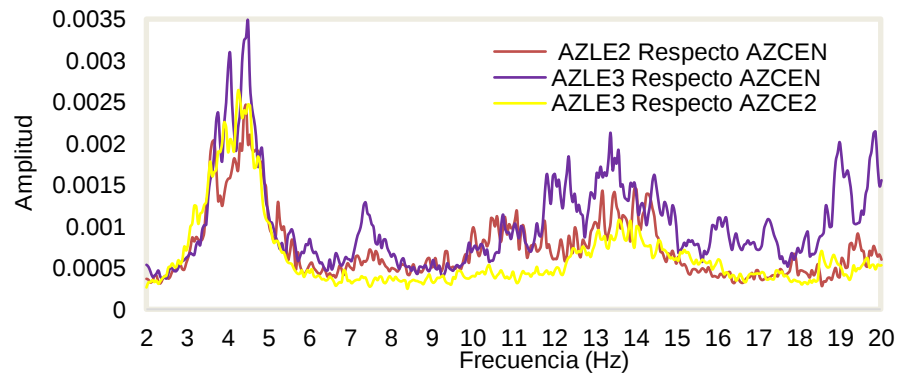


Figura A.35. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

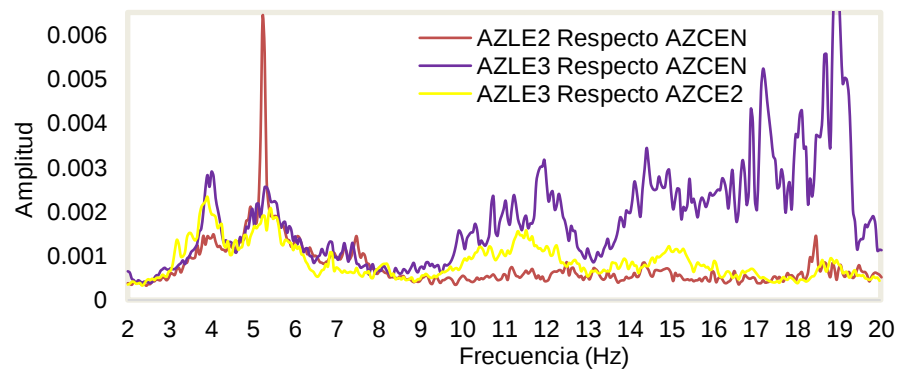


Figura A.36. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

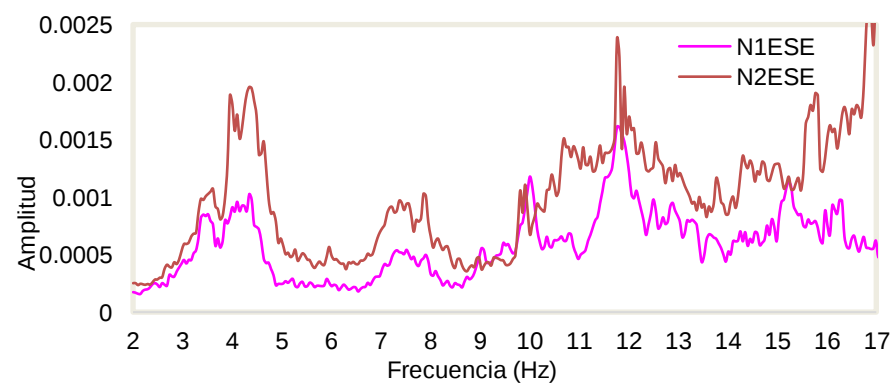


Figura A.37. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

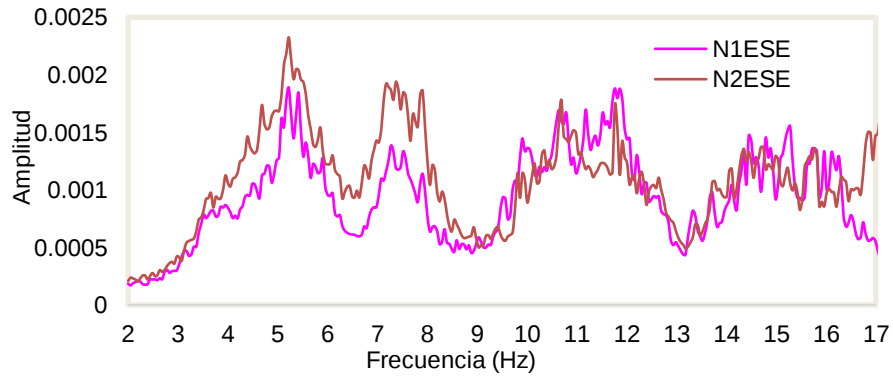


Figura A.38. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

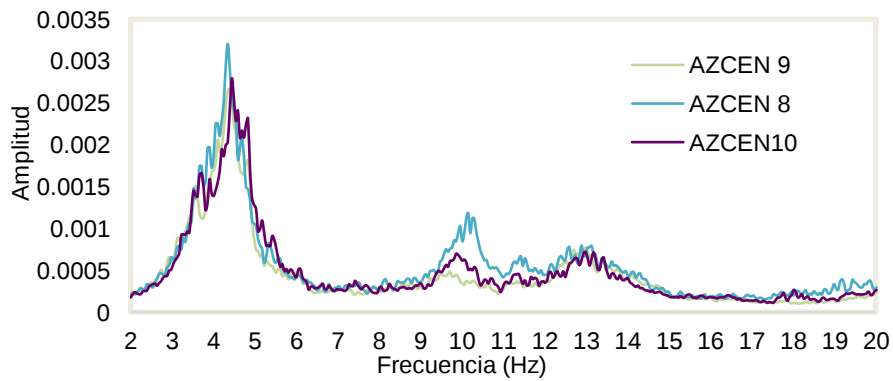


Figura A.39. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

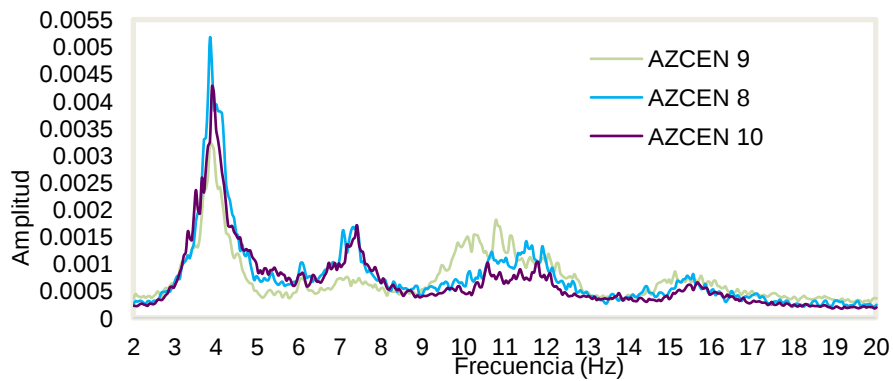


Figura A.40. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia

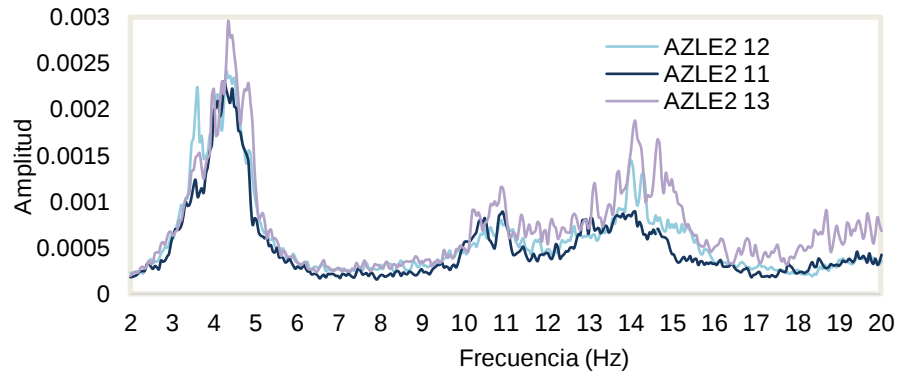


Figura A.41. Espectro de potencia longitudinal
Fuente: Autoría propia

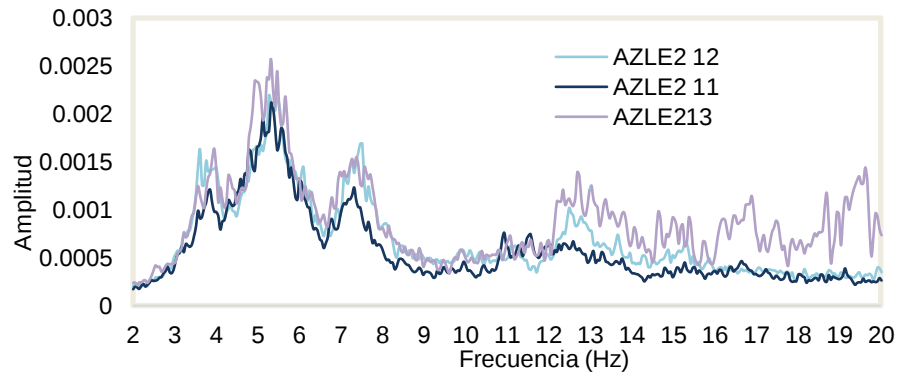


Figura A.42. Espectro de potencia transversal
Fuente: Autoría propia