



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELO SIMPLIFICADO DEL EDIFICIO ANTÍGONA CALIBRADO DE VIBRACIONES AMBIENTALES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

SAMANTHA SILVANA SALAZAR FUENTES

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
RODRIGO ASTROZA EULUFÍ

SANTIAGO DE CHILE
2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil
ESTUDIANTE: Samantha Silvana Salazar Fuentes
FECHA: 27 de Agosto de 2020
PROFESOR GUÍA: Francisco Hernández Prado

MODELO SIMPLIFICADO DE EDIFICIO ANTÍGONA CALIBRADO DE VIBRACIONES AMBIENTALES

El presente trabajo de título tiene como objetivo generar un modelo simplificado del edificio Antígona. Este modelo simplificado corresponde a la construcción de una matriz de masa y una matriz de rigidez basado en un modelo 3D del edificio que tenga propiedades dinámicas consecuentes con la que la estructura posee en la realidad. Es decir, se supone que cada nivel es modelado a través de una columna equivalente posicionada en su centro de rigidez y se considera que las masas se ubican en sus respectivos centros de gravedad (modelando efectos de excentricidad torsional). Se construyen dos modelos simplificados, uno que considera deformación sólo por corte (2 GDL horizontales y un giro torsional por piso), y otro que es más realista al considerar la deformación del edificio por corte y flexión. En otras palabras, se construye un modelo simplificado que consta de 5 Grados de Libertad (GDL) por piso (i.e., se obvia el GDL vertical), teniendo un total de 95 GDL dado que la estructura posee 19 niveles. De esta forma, se genera un modelo simplificado que reproduce correctamente las propiedades dinámicas obtenidas del modelo realizado en ETABS por Betzabeth Suquillo (2017) (y posteriormente modificado por Matías Costa (2019)) respetando los valores de masa (posición y valores) incluidos en el modelo ETABS, y considerando rigideces infinitesimales para las columnas de cada nivel que son determinadas a partir del modelo ETABS utilizando un procedimiento que es aplicado individualmente a cada nivel.

Adicionalmente, se efectúan campañas de mediciones de vibraciones ambientales del edificio Antígona. En primera instancia, se realizaron mediciones empleando sismómetros TROMINO, que son luego descartados debido a que estos no garantizan la obtención de formas modales sin realizar un complejo proceso de calibración. Por ello, se decide realizar una nueva campaña de mediciones de microvibraciones empleando acelerómetros EpiSensor, realizando siete mediciones secuenciales en el edificio que permiten cubrir la totalidad de los niveles de la estructura, obteniéndose las frecuencias naturales y formas modales de la estructura a partir de técnicas de identificación de propiedades dinámicas (método SSI y análisis en frecuencia). En concordancia, se genera un proceso que permite integrar los resultados de las diversas mediciones en una visualización 3D de sus formas modales.

Finalmente, se utilizan técnicas de ajuste que varían el modelo simplificado original (que se ajustaba al modelo ETABS) de manera que el modelo simplificado se calibre a las frecuencias y formas modales identificadas de las campañas de mediciones.

*Este trabajo se lo dedico con amor y cariño
a mis padres Emma y Juan,
mi hermana Maite y mi sobrina Amanda*

Agradecimientos

Aprovecho este espacio para agradecer en primer lugar a mis padres, Emma y Juan, quienes siempre han estado para apoyarme en cada paso que he dado y haciendo lo posible para que logre lo que me he propuesto, también a mi hermana Maite por siempre apoyarme, escucharme y alentarme a seguir, a mi sobrina Amanda que siempre ha estado dándome cariño y alegrándome los días. Agradecer a mi familia, la que ha confiado en mí y en mis habilidades para formarme profesionalmente.

Quisiera agradecer a Pablo, mi pareja y compañero, quien ha estado siempre conmigo y siendo un apoyo incondicional en este proceso, en el que enfrenté muchas dificultades en las que siempre estuvo dispuesto a ayudar y apoyarme. Le agradezco sus palabras de aliento, su disposición a escucharme y ayudarme a buscar soluciones en momentos que estas no eran evidentes para mí. Mucho amor para él.

Especialmente quiero agradecer a mi profesor guía Francisco Hernández, por su dedicación y ayuda en este trabajo. Por su infinita disponibilidad y paciencia para ayudarme en el avance del trabajo y en las dudas que siempre me surgían, también por su apoyo en los momentos que enfrente dificultades con este trabajo, en los que me hizo ver que no todo estaba perdido y que era posible solucionar todo para realizar el trabajo de la mejor forma posible. Por supuesto también agradecer su participación y apoyo en muchas las mediciones realizadas para este trabajo. También agradecer a los profesores de mi comisión: Rodrigo Astroza y Fabián Rojas por su disposición a participar en este trabajo de título y también por sus comentarios y correcciones, las que fueron de mucha ayuda para mejorar esta memoria.

No puedo dejar de agradecer a las personas que fueron de gran ayuda en las campañas de mediciones que se presentan en este trabajo. Primero agradecer al profesor Pedro Soto por su disposición a ayudarme a realizar las mediciones y por todo lo que me enseñó sobre instrumentación de estructuras, tanto en las mediciones en el Laboratorio de Dinámica de Estructuras como en el Edificio Antígona, también a Víctor que ayudo a realizar las mediciones y a Patricio que nos transportó a Viña del Mar en reiteradas ocasiones, para llevarlas a cabo. También agradezco a Pablo y Alonso, muy buenos compañeros, que me ayudaron con las mediciones en varias ocasiones, y que estuvieron presentes en todo el proceso de este trabajo acompañando y ayudando. A todos ellos les entrego el crédito correspondiente por su aporte esencial a esta memoria.

En este camino y paso por Beauchef quiero agradecer a mis amigas y amigos de la sección 6, quienes me acompañaron en los estudios, en los carretes y en la vida en general, ya no les veo con la misma frecuencia a todas y todos pero los recuerdos que forjamos permanecerán.

Quiero agradecer a mis amigos y compañeros de ingeniería civil que estuvieron presente en los grupos de trabajo y estudios, en especial al Octavio y Masihy que son grandes amigos, compañeros de clases y grupos.

Por último y no menos importantes, quiero agradecer al Nacho Horta y al Mati Costa buenos amigos que siempre estuvieron dispuestos a ayudar en todos los ramos de Estructuras, y también me ayudaron en el proceso de la memoria, sobre todo el Mati ya que al ser esta memoria la continuación de su trabajo de título pudo enseñarme su memoria, brindarme toda la información que requería y estar siempre dispuesto a ayudarme en este proceso. También agradecer a Betzabeth Suquillo quien me otorgó información relevante y material para trabajar con el edificio Antígona.

A todas las personas que estuvieron presentes en todo este proceso, tanto en la memoria directamente como en la carrera, les agradezco mucho su apoyo y colaboración.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Metodología.....	3
1.3.1. Recopilación Bibliográfica	3
1.3.2. Validación Metodología de Medición con Sismómetros TROMINO	4
1.3.3. Medición de Vibraciones Ambientales del Edificio Antígona.....	4
1.3.4. Determinación de Propiedades Dinámicas de Edificio	4
1.3.5. Modelación Simplificada del Edificio.....	5
1.3.6. Calibración del Modelo Simplificado con Mediciones.....	5
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Métodos de Identificación en el Espacio de la Frecuencia	6
2.1.1. Espectro de Densidad de Potencia.....	6
2.1.2. Función de Transferencia.....	7
2.1.3. Ventanas de Datos	8
2.2. Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas.....	10
2.2.1. Método de Identificación del Subespacio Determinístico	12
2.2.2. Método de Identificación del Subespacio Estocástico	14
2.2.3. Criterios de Estabilidad en la Identificación de Propiedades Dinámicas	16
2.3. Análisis Estructural.....	17
2.3.1. Método de Rigidez.....	17
2.3.1.1. Método Matricial para Edificio de Corte	18
2.3.1.2. Método Matricial para Edificio de Corte incluyendo Flexión y Corte	22
2.3.2. Análisis Modal.....	26
CAPÍTULO 3 ANTECEDENTES GENERALES.....	30

3.1. Antecedentes Edificio Antígona	30
3.1.1. Descripción y ubicación de la estructura.....	30
3.1.2. Antecedentes geotécnicos de la zona.....	37
3.1.3. Daños estructurales por terremoto del 27 de Febrero de 2010.....	40
3.1.3.1. Daños en muros estructurales	43
3.1.3.2. Agrietamientos en losas.....	45
3.1.3.3. Daños en dinteles y machones.....	46
3.1.4. Rehabilitación estructural.....	48
3.1.5. Instrumentación permanente.....	49
3.2. Antecedentes Modelo Estructural	53
3.3. Antecedentes Plataforma	54
CAPÍTULO 4 CAMPAÑAS DE MEDICIÓN	57
4.1. Equipos de Medición	57
4.1.1. Sismómetro TROMINO	57
4.1.2. Acelerómetros EpiSensor	58
4.2. Mediciones de Prueba.....	59
4.2.1. Medición Prueba 1	60
4.2.2. Medición Prueba 2	60
4.2.3. Medición Prueba 3	61
4.2.4. Medición Prueba 4	61
4.2.5. Medición de Prueba en Edificio Antígona.....	63
4.3. Campañas de Mediciones en Edificio Antígona	65
4.3.1. Primera Campaña de Medición.....	66
4.3.2. Segunda Campaña de Medición	69
CAPÍTULO 5 RESULTADOS DE MEDICIONES.....	71
5.1. Resultados de Mediciones de Prueba con Sismómetros	71
5.1.1. Resultados de Medición 1 de Prueba	71
5.1.2. Resultados de Medición 2 de Prueba	74
5.1.3. Resultados de Medición 3 de Prueba	77

5.1.4.	Resultados de Medición 4 de Prueba	78
5.1.5.	Resultado de Medición de Edificio Antígona con Sismómetros	79
5.2.	Resultados de Mediciones de Edificio Antígona con Acelerómetros	86
5.2.1.	Resultados de Primera Campaña de Mediciones	86
5.2.1.1.	Resultados Calibración Antígona 0	86
5.2.1.2.	Resultados Medición Antígona 1	87
5.2.1.3.	Resultados Medición Antígona 2	90
5.2.1.4.	Resultados Medición Antígona 3	93
5.2.1.5.	Resultados Medición Antígona 4	95
5.2.2.	Resultados de Segunda Campaña de Mediciones	98
5.2.2.1.	Resultados Calibración Antígona 5	98
5.2.2.2.	Resultados Medición Antígona 6	99
5.2.2.3.	Resultados Medición Antígona 7	102
5.2.2.4.	Resultados Medición Antígona 8	105
5.2.3.	Resultados Finales de Campañas Mediciones	108
5.3.	Ajuste de Formas Modales	110
5.4.	Propiedades Dinámicas Identificadas en Campañas de Medición	114
CAPÍTULO 6 MODELO SIMPLIFICADO DE EDIFICIO ANTÍGONA		117
6.1.	Modificaciones al Modelo de Elementos Finitos	117
6.2.	Modelamiento Simplificado de Edificio de Corte	119
6.2.1.	Obtención de Parámetros de Modelo ETABS	119
6.2.2.	Construcción de Modelo Simplificado de Edificio	122
6.3.	Modelamiento Simplificado de Edificio de Corte incluyendo Flexión	122
6.3.1.	Obtención de Parámetros de Modelo ETABS	122
6.3.2.	Construcción de Modelo Simplificado de Edificio	126
6.4.	Resultados de Modelos Simplificados	127
CAPÍTULO 7 CALIBRACIÓN MODELO DE EDIFICIO ANTÍGONA		130
7.1.	Proceso de Calibración de Modelo Simplificado	130
7.2.	Resultados de Calibración de Modelo Simplificado	134

CAPÍTULO 8 ANÁLISIS DE RESULTADOS	138
8.1. Análisis de Resultados de las Campañas de Medición	138
8.1.1. Análisis de Mediciones de Prueba con Sismómetros	138
8.1.2. Análisis de Mediciones de Edificio Antígona	140
8.2. Análisis de Modelos Simplificados de Edificio Antígona.....	140
8.2.1. Análisis de Modelos Simplificados Construidos.....	141
8.2.2. Comparación de Resultados de Modelos.....	141
8.3. Análisis del Modelo Simplificado Calibrado con Mediciones.....	142
CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	144
CAPÍTULO 10 BIBLIOGRAFÍA.....	146
ANEXOS.....	148

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Características de acelerómetros EpiSensor instalados.....	50
Tabla 4.1: Descripción general de mediciones de prueba con TROMINO.....	60
Tabla 4.2: Configuración de TROMINO para mediciones de prueba.....	62
Tabla 4.3: Descripción de cada medición en la primera campaña de medición al edificio Antígona con sismómetros.	63
Tabla 4.4: Configuración de sensores TROMINO para primera campaña de mediciones del edificio Antígona.	63
Tabla 4.5: Datos de primera campaña de medición con acelerómetros en edificio Antígona.	66
Tabla 4.6: Datos de segunda campaña de medición con acelerómetros en edificio Antígona.	69
Tabla 5.1: Frecuencias identificadas en medición Antígona 0 en dirección N-S.....	87
Tabla 5.2: Frecuencias identificadas en medición Antígona 1.	88
Tabla 5.3: Frecuencias identificadas en medición Antígona 2.	90
Tabla 5.4: Frecuencias identificadas en medición Antígona 3.	93
Tabla 5.5: Frecuencias identificadas en medición Antígona 4.	96
Tabla 5.6: Frecuencias identificadas en medición Antígona 5 en dirección N-S.....	99
Tabla 5.7: Frecuencias identificadas en medición Antígona 6.	100
Tabla 5.8: Frecuencias identificadas en medición Antígona 7.	103
Tabla 5.9: Frecuencias identificadas en medición Antígona 8.	105
Tabla 5.10: Frecuencias identificadas por SSI en las mediciones con sismómetros.....	114
Tabla 5.11: Promedio y desviación estándar de frecuencias identificadas con SSI de mediciones con sismómetros.....	114
Tabla 5.12: Frecuencia y razón de amortiguamiento de modos de diagrama integrado de mediciones con sismómetros.....	115
Tabla 5.13: Frecuencias identificadas PSD en todas las mediciones con acelerómetros...	115
Tabla 5.14: Frecuencias identificadas SSI en todas las mediciones con acelerómetros.	116
Tabla 5.15: Promedio y desviación estándar de frecuencias identificadas PSD y SSI.	116
Tabla 5.16: Frecuencia y razón de amortiguamiento de modos de diagrama integrado...	116

Tabla 6.1: Resumen de cargas distribuidas por área (Modificado de Suquillo (2017)).....	118
Tabla 6.2: Peso propio y peso sísmico por unidad de área del modelo.....	119
Tabla 6.3: Datos obtenidos de modelo ETABS de edificio Antígona.	120
Tabla 6.4: Rigideces de entrepiso y centros de rigidez obtenidos de modelos ETABS.....	121
Tabla 6.5: Datos obtenidos de modelo ETABS de edificio Antígona.	123
Tabla 6.6: Rigideces infinitesimales de entrepiso y centros de rigidez obtenidos de modelos ETABS.....	126
Tabla 6.7: Frecuencias, períodos y participación de masas modales para modelo de edificio de corte.....	127
Tabla 6.8: Frecuencias, períodos y participación de masas modales para modelo de edificio de corte incluyendo flexión.....	128
Tabla 6.9: Frecuencias, períodos y participación de masas modales de modelo modificado de ETABS.....	128
Tabla 7.1: Coeficientes de calibración para el parámetro X_{CM} (coordenada X de u de centro de masa).....	131
Tabla 7.2: Coeficientes de calibración para el parámetro Y_{CM} (coordenada Y de centro de masa).....	131
Tabla 7.3: Coeficientes de calibración para los parámetros M_X y M_Y (masas en X e Y). 131	
Tabla 7.4: Coeficientes de calibración para los parámetros GA_Z y EI_Y (Rigideces infinitesimales).	131
Tabla 7.5: Coeficientes de calibración para los parámetros GA_Y y EI_Z (Rigideces infinitesimales).	131
Tabla 7.6: Coeficientes de calibración para el parámetro GJ (Rigidez infinitesimal).	132
Tabla 7.7: Parámetros de masa de modelo simplificado calibrado de edificio Antígona. .	132
Tabla 7.8: Rigideces infinitesimales de entrepiso y centros de rigidez de modelo simplificado calibrado de edificio Antígona.....	133
Tabla 7.9: Frecuencias, períodos y participación de masas modales para modelo simplificado calibrado con mediciones.....	134
Tabla 7.10: Períodos del modelo calibrado y las mediciones del edificio para cada modo.134	
Tabla 7.11: Matriz MAC para modos obtenidos de mediciones y del modelo simplificado.	136

Tabla 7.12: Matriz MAC para modos obtenidos de mediciones y del modelo simplificado calibrado.....	137
Tabla 8.1: Comparación de frecuencias naturales de modelo simplificado con flexión y modelo ETABS.....	141
Tabla 8.2: Comparación de frecuencias naturales de modelo ETABS y mediciones de edificio.	142
Tabla 8.3: Comparación de frecuencias naturales de modelo simplificado con flexión y mediciones del edificio.....	142
Tabla 8.4: Comparación de períodos naturales de modelo simplificado con flexión calibrado y mediciones del edificio.....	143
Tabla 8.5: Comparación de diagonales de MAC de modelo simplificado y modelo calibrado con mediciones.	143

Índice de Figuras

Figura 1.1: Marco tectónico de Chile. Los colores indican la profundidad alcanzada por la Placa de Nazca bajo la Sudamericana. (Izq.) Los puntos de color blanco son sismos que permiten determinar la profundidad y geometría de la zona de subducción. (Der.) Se muestran las placas que interactúan con la Placa Sudamericana, indicando la dirección y velocidad de convergencia (Centro Sismológico Nacional, 2013).	1
Figura 2.1: Funciones de ventana más comunes en la estimación de espectros de potencia (Press et al., 1986).	9
Figura 2.2: Esquema del sistema dinámico que resuelve los métodos DSI y SSI (Van Overschee & De Moor, 1996).	10
Figura 2.3: Esquema de un sistema lineal determinístico invariante en el tiempo con entradas u_k , salidas y_k y estados x_k^d (donde la d del superíndice denota determinístico) descrito por matrices A, B, C y D (Van Overschee & De Moor, 1996).	12
Figura 2.4: Esquema de un sistema lineal estocástico invariante en el tiempo con salidas y_k y estados x_k^s (donde la s del superíndice denota estocástico) descrito por matrices A, C y las matrices de covarianza Q, S, R (Van Overschee & De Moor, 1996).	14
Figura 2.5: Representación de los pisos superior j e inferior i de un edificio, en donde los puntos representan sus centros de masa y de rigidez, y las flechas representan los grados de libertad de cada piso en cada centro.	19
Figura 2.6: Representación de los pisos superior j e inferior i de un edificio, en donde los puntos representan sus centros de masa y de rigidez en coordenadas globales, y las flechas representan los grados de libertad de cada piso en coordenadas locales de cada centro.	22
Figura 3.1: Vista frontal de Edificio Antígona por calle 5 Oriente (Fuente: Google Maps).	31
Figura 3.2: Adaptación de plano estructural de planta del subterráneo -2.	31
Figura 3.3: Adaptación de plano estructural de planta del subterráneo -1.	32
Figura 3.4: Adaptación de plano estructural de planta del piso 1.	32
Figura 3.5: Adaptación de plano estructural de planta del piso 2.	33
Figura 3.6: Adaptación de plano estructural de plantas de los pisos 3 al 5.	33
Figura 3.7: Adaptación de plano estructural de planta del piso 6.	34
Figura 3.8: Adaptación de plano estructural de plantas de los pisos 7 al 15.	34
Figura 3.9: Adaptación de plano estructural de planta del piso 16.	35

Figura 3.10: Adaptación de plano estructural de planta del piso 17.	35
Figura 3.11: Vista satelital de ubicación de edificio Antígona con marcador en Viña del Mar (Fuente: Google Earth).....	36
Figura 3.12: Vista satelital cercana de edificio Antígona con nombres de calles rotulados (Fuente: Google Earth).....	36
Figura 3.13: Ubicación de traza de la falla Marga-Marga en línea punteada roja, y lineamientos paralelos en color azul, que corresponderían a los límites de una zona de falla según Muñoz et al.(2015).....	37
Figura 3.14: Mapa de curvas de isoperíodos en cuenca de estero Marga-Marga (Serafini, 2017).....	38
Figura 3.15: Mapa de curvas de isofrecuencias en cuenca de estero Marga-Marga (Serafini, 2017).....	39
Figura 3.16: Mapa de amplificación sísmica según método Nakamura en cuenca de estero Marga-Marga (Serafini, 2017).	39
Figura 3.17: Ubicación de la estación VINA en campo libre de RENADIC de donde se obtuvieron los registros en Viña del Mar del 27F.....	40
Figura 3.18: Intensidades sísmicas e isosistas producto del terremoto del 27 de Febrero del 2010 por región (M. Astroza et al., 2010).....	41
Figura 3.19: Registro de aceleraciones del terremoto del 27 de Febrero del 2010 registrado por la estación de campo libre VINA de RENADIC ubicada en Viña del Mar.....	42
Figura 3.20: Espectro de respuesta de aceleraciones en la dirección EO y NS obtenidos a partir de los registros de aceleraciones del terremoto del 27F en estación VINA de RENADIC en Viña del Mar.	42
Figura 3.21: Ubicación del muro dañado en la fachada oriente del primer piso.....	43
Figura 3.22: Muro estructural dañado de la fachada oriente del primer piso (Leiva et al., 2010).....	43
Figura 3.23: Ubicación del muro estructural dañado en el subterráneo -1.	44
Figura 3.24: Muro estructural dañado en el subterráneo -1 (Leiva et al., 2010)	44
Figura 3.25: Ubicación general en planta de daño por acción de acoplamiento en losas.	45
Figura 3.26: Losa agrietada por acoplamiento de estas sobre dinteles de las puertas de acceso a departamentos (Leiva et al., 2010).	45
Figura 3.27: Desprendimiento de revestimiento exterior de dinteles en fachada oriente (Leiva et al., 2010).	46

Figura 3.28: Desprendimiento de revestimiento exterior de machones en fachada norte (Leiva et al., 2010).	47
Figura 3.29: Falla de machón por corte vista desde el interior de un departamento (Leiva et al., 2010).	47
Figura 3.30: Acelerómetro uniaxial EpiSensor Modelo ES-U2, marca Kinematics.	49
Figura 3.31: Instrumentación permanente en las plantas del subterráneo -2 y los pisos 1, 8 y 15. En donde las flechas indican su ubicación y orientación.	50
Figura 3.32: Fotografía de EpiSensor ubicados en subterráneo -2 en la fundación del edificio, considerados como campo libre del edificio, todos con diferente orientación N-S, E-O y uno vertical.	51
Figura 3.33: Fotografías de EpiSensor ubicados en la zona húmeda del Piso 1, a la izquierda se encuentra uno en dirección N-S, a la derecha se encuentran en dirección N-S y E-O.	51
Figura 3.34: Fotografías de EpiSensor ubicados en la zona húmeda del Piso 8, a la izquierda se encuentra uno en dirección N-S, a la derecha se encuentran en dirección N-S y E-O.	52
Figura 3.35: Fotografías de EpiSensor ubicados en la zona húmeda del Piso 15, a la izquierda se encuentra uno en dirección N-S, a la derecha se encuentran en dirección N-S y E-O.	52
Figura 3.36: Modelo original utilizado en el trabajo de tesis de Betzabeth Suquillo (2017). La dirección N-S se corresponde con el eje Y.	53
Figura 3.37: Esquema de organización de carpetas donde se trabaja y genera la información (Costa, 2019).	55
Figura 4.1: Sismómetro TROMINO.	57
Figura 4.2: Programas de configuración de grabación de registros con sismómetros TROMINO (Micromed s.p.a., 2012).	58
Figura 4.3: Sistema de adquisición de datos DaqBook/2000.	59
Figura 4.4: Planta piso tipo edificio Justicia Espada Acuña Mena con ubicación de sensores (Adaptado de Bilbao (2014)).	61
Figura 4.5: Fotografías de medición de prueba 3 (análogo con medición de prueba 4): a) Medición de microvibraciones en dirección N-S, b) Medición de microvibraciones en dirección E-O, c) Vista de estructura de baja frecuencia en medición, d) Vista de estructura con pesos para modificar período de la estructura.	62
Figura 4.6: Planta de piso tipo de edificio Antígona con corte en eje A-A donde se posicionan los instrumentos de medición.	64

Figura 4.7: Disposición de sensores por piso en medición de prueba en edificio Antígona, en vista en elevación del corte A-A (Figura 4.6).	64
Figura 4.8: Medición de suelo con sismómetros TROMINO.	65
Figura 4.9: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 1.	67
Figura 4.10: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 2.	67
Figura 4.11: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 3.	68
Figura 4.12: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 4.	68
Figura 4.13: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 6.	69
Figura 4.14: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 7.	70
Figura 4.15: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 8.	70
Figura 5.1: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición 1 de prueba en la dirección N-S.	72
Figura 5.2: Función de transferencia entre dos señales para las combinaciones de la señales de las DFG1, DFG2, DFG3, DFG4 en dirección N-S.	72
Figura 5.3: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición 1 de prueba en la dirección E-O.	73
Figura 5.4: Función de transferencia entre dos señales para las combinaciones de la señales de las DFG1, DFG2, DFG3, DFG4 en dirección E-O.	73
Figura 5.5: Diagrama de estabilidad de la medición M1 en el edificio Justicia Espada Acuña Mena.	74
Figura 5.6: Diagrama de estabilidad de la medición M2 en el edificio Justicia Espada Acuña Mena.	74
Figura 5.7: Diagrama de estabilidad de la medición M3 en el edificio Justicia Espada Acuña Mena.	75
Figura 5.8: Diagrama de estabilidad de la medición M4 en el edificio Justicia Espada Acuña Mena.	75

Figura 5.9: Diagramas de formas modales en planta del piso 6 en todas las mediciones del edificio Justicia Espada Acuña Mena.....	76
Figura 5.10: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos medidos del edificio Justicia Espada Acuña Mena, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	76
Figura 5.11: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos del edificio Justicia Espada Acuña Mena, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	77
Figura 5.12: Ajustes de función de transferencia con puntos de cada una de las mediciones realizadas en medición 3 de prueba, por sismómetro y dirección (Dir=1, dirección N-S y Dir=2, dirección E-O).....	78
Figura 5.13: Ajustes de función de transferencia con puntos de cada una de las mediciones realizadas en medición 4 de prueba, por sismómetro y dirección (Dir=1, dirección N-S y Dir=2, dirección E-O).....	79
Figura 5.14: Ajustes de función de transferencia con puntos de cada una de las mediciones realizadas en mediciones 3 y 4 de prueba y medición en edificio Antígona, por sismómetro y dirección (Dir=1, dirección N-S y Dir=2, dirección E-O).....	80
Figura 5.15: Diagrama de estabilidad de la medición M1 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento....	81
Figura 5.16: Diagrama de estabilidad de la medición M2 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento....	81
Figura 5.17: Diagrama de estabilidad de la medición M3 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento....	82
Figura 5.18 Diagrama de estabilidad de la medición M4 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento....	82
Figura 5.19: Diagrama de estabilidad de la medición M5 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento....	83
Figura 5.20: Diagramas de formas modales en planta del piso 16 en todas las mediciones realizadas con sismómetros en el edificio Antígona.....	83
Figura 5.21: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos medidos con sismómetros del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	84

Figura 5.22: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos con sismómetros del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	84
Figura 5.23: Curva de H/V para el suelo en las cercanías del edificio Antígona.....	85
Figura 5.24: Espectrograma de curva H/V de la Figura 5.23.....	85
Figura 5.25: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 0, en la dirección N-S.	87
Figura 5.26: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 1, en direcciones mostradas en Figura 4.9.....	88
Figura 5.27: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 1, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.9.	89
Figura 5.28: .Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 1, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	89
Figura 5.29: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 1, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	90
Figura 5.30: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente a la medición Antígona 2, en direcciones mostradas en Figura 4.10.....	91
Figura 5.31: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 2, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.10.	91
Figura 5.32: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 2, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	92
Figura 5.33: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 2, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	92
Figura 5.34: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 3, en direcciones mostradas en Figura 4.11.....	93
Figura 5.35: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 3, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.11.	94
Figura 5.36: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 3, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	94
Figura 5.37: . Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 3, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	95
Figura 5.38: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 4, en direcciones mostradas en Figura 4.12.....	96

Figura 5.39: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 4, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.12.	97
Figura 5.40: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 4, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	97
Figura 5.41: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 4, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	98
Figura 5.42: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 5, en la dirección N-S.	99
Figura 5.43: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 6, en direcciones mostradas en Figura 4.13.....	100
Figura 5.44: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 6, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.13.	101
Figura 5.45: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 6, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	101
Figura 5.46: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 6, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	102
Figura 5.47: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 7, en direcciones mostradas en Figura 4.14.....	103
Figura 5.48: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 7, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.14	104
Figura 5.49: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 7, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	104
Figura 5.50: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 7, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	105
Figura 5.51: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 8, en direcciones mostradas en Figura 4.15.....	106
Figura 5.52: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 8, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.15.	106
Figura 5.53: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 8, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	107

Figura 5.54: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 8, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	107
Figura 5.55: Diagramas de formas modales en planta del piso 16 en todas las mediciones del edificio Antígona.	109
Figura 5.56: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales...	109
Figura 5.57: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	110
Figura 5.58: Ajuste polinomial de desplazamientos de los centros geométricos de cada piso en el eje X de las mediciones realizadas para los primeros 6 modos del edificio Antígona.	111
Figura 5.59: Ajuste polinomial de desplazamientos de los centros geométricos de cada piso en el eje Y de las mediciones realizadas para los primeros 6 modos del edificio Antígona.	111
Figura 5.60: Ajuste polinomial de giros en torno al eje Z de los centros geométricos de cada piso de las mediciones realizadas para los primeros 6 modos del edificio Antígona.....	112
Figura 5.61: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos del edificio Antígona con ajuste polinomial de desplazamientos de centros geométricos, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	113
Figura 5.62: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del edificio Antígona con ajuste polinomial de desplazamientos de centros geométricos, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.	113
Figura 6.1: Modelo de elementos finitos modificado.	118
Figura 6.2: Modelo por piso en ETABS de piso tipo, para obtención de rigidez.....	121
Figura 6.3: Modelo por piso de edificio con 19 pisos tipos iguales para obtención de parámetros de rigidez.....	125
Figura 6.4: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del modelo de corte del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del modelo con sus respectivas frecuencias modales.	128
Figura 6.5: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del modelo de corte incluyendo flexión del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del modelo con sus respectivas frecuencias.....	129

Figura 6.6: Formas modales de modelo modificado de ETABS del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del modelo	129
Figura 7.1: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos del modelo simplificado calibrado del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.....	135
Figura 7.2: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del modelo simplificado calibrado del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del modelo con sus respectivas frecuencias modales.....	135
Figura 7.3: Gráfico MAC entre modos obtenidos de mediciones y del modelo simplificado ETABS.....	136
Figura 7.4: Gráfico MAC entre modos obtenidos de mediciones y del modelo simplificado calibrado.....	137

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Chile es considerado un país sísmico debido a que se encuentra ubicado en una zona de subducción de placas tectónicas, principalmente entre las placas de Nazca y Sudamericana (Figura 1.1), que han sido las causantes de los mayores sismos en su historia. Los desastres naturales generados por los movimientos geotectónicos amenazan a la población e infraestructura que los rodea, por lo que es un desafío construir estructuras que posean un buen desempeño frente a sismos para disminuir los riesgos que estos representan.

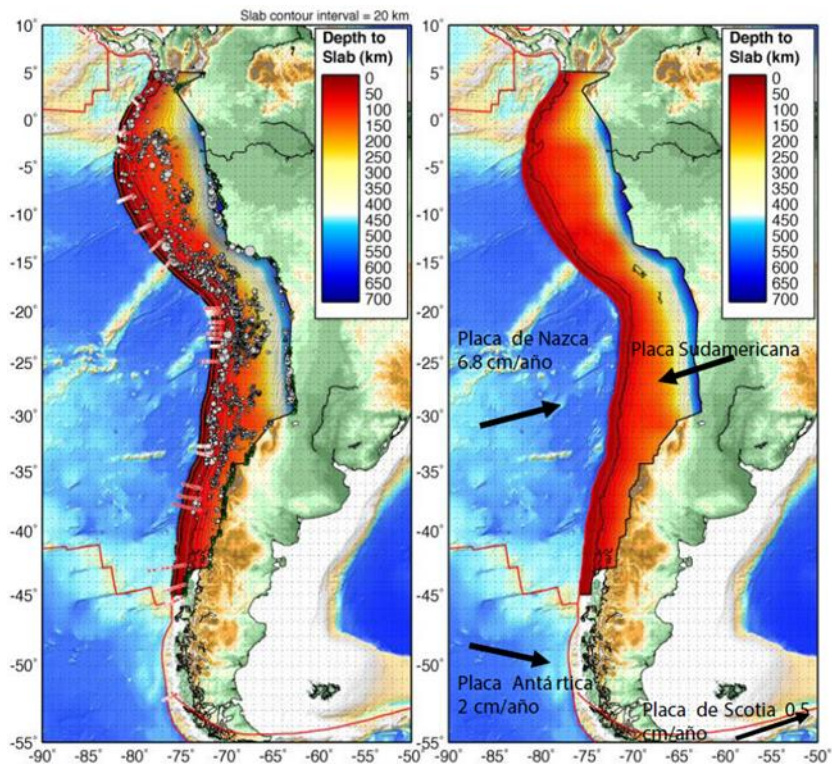


Figura 1.1: Marco tectónico de Chile. Los colores indican la profundidad alcanzada por la Placa de Nazca bajo la Sudamericana. (Izq.) Los puntos de color blanco son sismos que permiten determinar la profundidad y geometría de la zona de subducción. (Der.) Se muestran las placas que interactúan con la Placa Sudamericana, indicando la dirección y velocidad de convergencia (Centro Sismológico Nacional, 2013).

Una de las formas de estudiar y comprender el desempeño de las estructuras es a través del monitoreo permanente, con lo cual se puede obtener información relevante para describir su comportamiento y potencial daño de las estructuras bajo cargas sísmicas, y como resultado de este entendimiento, poder modificar las prácticas de diseño y construcción para que en el futuro se minimice el daño (Çelebi, 2000).

Actualmente, la división Estructuras-Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, a través de la Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC) monitorea instrumentos en campo libre e instrumentación permanente en estructuras. Dentro de las estructuras monitoreadas se encuentran 6 edificios instrumentados permanentemente, que se enumeran a continuación:

- Edificio Cámara Chilena de la Construcción, ubicado en la comuna de Providencia, Región Metropolitana (instrumentado desde 1989).
- Edificios Comunidad Villa Andalucía, ubicado en la comuna de Santiago, Región Metropolitana (instrumentado desde 1995).
- Edificio Justicia Espada Acuña Mena (ex Torre Central), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, ubicado en comuna de Santiago, Región Metropolitana (instrumentado desde 2008).
- Edificio Velamar, ubicado en la comuna de Iquique, Región de Tarapacá (instrumentado desde 2014).
- Edificio Antígona, ubicado en comuna de Viña del Mar, Región de Valparaíso (instrumentado desde 2017).

En base a los datos obtenidos de la instrumentación permanente del edificio Antígona, se han desarrollado herramientas para estudiar su comportamiento, como lo describe Matias Costa en su memoria (Costa, 2019) que se encuentra dentro de una línea investigativa del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, en la que se desarrolló un sistema de generación de informes automatizados con la respuesta sísmica del edificio Antígona utilizando un modelo de elementos finitos del edificio en el programa ETABS elaborado por Betzabeth Suquillo en su tesis (Suquillo, 2017), tema que se seguirá estudiando en esta memoria, calibrando un modelo simplificado construido a partir de los modelos de elementos finitos existentes, para optimizar la generación automática de informe con su respuesta sísmica, herramienta útil para conocer el comportamiento sísmico del edificio.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Crear un modelo simplificado del edificio Antígona calibrado con las propiedades dinámicas identificadas en las mediciones de vibraciones ambientales del edificio, permitiendo posteriormente la generación automática del informe de su respuesta sísmica para estimar la respuesta de cada piso, cortes basales, deformaciones relativas de entrepiso y las demandas de algunos elementos principales.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar mediciones con sismómetros TROMINO, estudiando la validación de una metodología de su uso en estructuras como edificios para la obtención de propiedades modales.
- Realizar mediciones exhaustivas de vibraciones ambientales del edificio Antígona, para determinar sus propiedades dinámicas utilizando el método de identificación del subespacio estocástico (SSI) y análisis en frecuencias.
- Crear un modelo simplificado del edificio Antígona en Matlab a partir de un modelo de elementos finitos de ETABS.
- Calibrar el modelo simplificado del edificio Antígona con las propiedades dinámicas identificadas en las mediciones de vibraciones ambientales realizadas al edificio.

1.3. Metodología

1.3.1. Recopilación Bibliográfica

Para empezar, se busca información relevante para el desarrollo del trabajo de título. La recopilación bibliográfica incluye:

- Memorias de pregrado y tesis de magister que hayan trabajado con el edificio Antígona ubicado en Viña del Mar.
- Artículos en revistas científicas en los cuales se haya trabajado con sismómetros TROMINO para la medición de vibraciones ambientales de estructuras, más específicamente edificios.
- Artículos y libros con antecedentes geotécnicos de la zona en donde se encuentra el edificio Antígona en Viña del Mar.

1.3.2. Validación Metodología de Medición con Sismómetros TROMINO

El monitoreo de vibraciones es posible realizarlo con equipos TROMINO, que es un instrumento utilizado para la caracterización dinámica del subsuelo y estructuras. Este instrumento ha sido ampliamente utilizado para estudios de suelos, sin embargo, para estructuras es menor la incursión en la caracterización dinámica, por lo que se plantea realizar la validación de una metodología para la medición de vibraciones ambientales en edificios. Entendiéndose que los sismómetros TROMINO ofrecerían la versatilidad de que al ser instrumentos inalámbricos no requieren de una instrumentación compleja y su uso podría facilitar el proceso de mediciones de microvibraciones de estructuras.

La validación de una metodología de medición consiste principalmente en definir una campaña de mediciones para diferentes estructuras, luego procesar los datos obtenidos a través de análisis en frecuencia y método SSI para verificar que las propiedades dinámicas de la estructura se encuentren dentro de un rango esperado.

1.3.3. Medición de Vibraciones Ambientales del Edificio Antígona

Se realiza una campaña de medición de vibraciones ambientales con sismómetros en el edificio Antígona, en la que se incluye una medición de vibraciones de suelo en las cercanías del edificio. Con esta medición se debe determinar si se valida la metodología con TROMINO y tomar la decisión de si se utilizarán sismómetros TROMINO o acelerómetros EpiSensor (equipos ampliamente utilizados en el monitoreo y caracterización dinámica de estructuras) para las mediciones del edificio completo.

Se planifican las campañas de mediciones definitivas al edificio Antígona con los sensores escogidos, en la que se abarcan todos los pisos. Se realizan las mediciones en el edificio y se toma nota de todos los procedimientos y la ubicación de los instrumentos.

1.3.4. Determinación de Propiedades Dinámicas de Edificio

Para determinar las propiedades dinámicas de la estructura se utiliza el programa Matlab, en donde se emplean rutinas en las cuales se utiliza el análisis en frecuencia, obteniéndose las frecuencias naturales del edificio.

Luego se utiliza el método SSI para obtener las formas modales de los seis primeros modos de vibración del edificio, esto a través de una rutina disponible en Matlab, con la cual también se puede generar figuras de planta y tridimensional con las formas modales de todos los pisos del edificio.

1.3.5. Modelación Simplificada del Edificio

A partir de los datos entregados por el modelo de elementos finitos de ETABS del edificio Antígona realizado por Betzabeth para su tesis (Suquillo, 2017) y modificado por Matias para su memoria (Costa, 2019), se generan los datos de entrada para un modelo simplificado. Al modelo se le realizan modificaciones con el fin de optimizar la recopilación de datos necesarios. Se desarrollan dos modelos simplificados, el primero se basa en el comportamiento de un edificio considerando rigideces de entrepiso de corte y en el segundo se incluye la flexibilidad a flexión del edificio. Los datos de entrada necesarios son la matriz de masa y los datos necesarios para obtener la matriz de rigidez. Esta última se obtiene a través del método matricial del método de rigidez.

Para la obtención de propiedades modales se utiliza el análisis modal, que se realiza a través de una rutina de Matlab en la que se tiene como input los datos del modelo simplificado. Esta se debe ajustar a los resultados obtenidos en el modelo de ETABS hasta obtener una herramienta de análisis similar al programa de origen, pero a partir de rutinas de Matlab.

1.3.6. Calibración del Modelo Simplificado con Mediciones

Se escoge el modelo simplificado con mayor similitud al modelo de elementos finitos de ETABS y se calibra con las propiedades modales identificadas del edificio Antígona. Esto se realiza en el programa Matlab modificando los parámetros a partir de los cuales se genera el modelo simplificado, hasta que los períodos y formas modales del modelo simplificado tengan mayor consistencia con las propiedades modales identificadas en las mediciones, generándose un modelo simplificado calibrado.

Capítulo 2

Marco teórico

En el presente capítulo se muestran los fundamentos teóricos y matemáticos del trabajo de título para su comprensión y entendimiento, estos incluyen métodos de análisis de datos para identificar las propiedades dinámicas de una estructura, así como también la teoría para crear un modelo estructural.

En primer lugar, se describen los métodos con los cuales es posible identificar frecuencias fundamentales dentro de registros de vibraciones ambientales de estructuras, pudiendo relacionarse con sus formas modales, y métodos con los cuales es posible identificar propiedades dinámicas como frecuencias fundamentales, razones de amortiguamiento y formas modales. Finalmente se muestra parte de la teoría de análisis estructural, método de rigidez y análisis modal de estructuras.

2.1. Métodos de Identificación en el Espacio de la Frecuencia

El análisis a partir de registros de velocidades o aceleraciones de una estructura se realiza con métodos que trabajan dentro del espacio de la frecuencia, los que son capaces de determinar frecuencias fundamentales de la estructura y relacionarlas con las componentes modales de vibración del edificio.

2.1.1. Espectro de Densidad de Potencia

El método de espectro de densidad de potencia, también conocido como PSD (del inglés *Power Spectral Density*), permite obtener las frecuencias fundamentales de una estructura a partir del registro de vibraciones de esta, mediante el uso de la transformada discreta de Fourier (ecuación (2.1)) la que permite pasar del sistema que se tiene a un dominio de frecuencia, en cual es posible asociar las frecuencias con la cantidad de energía de cada una y con esto identificar frecuencias características de una estructura al detectar mayores energías en dichas frecuencias.

$$X(f, t_0^i) = \int_0^T x(t + t_0^i) \cdot w(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

Donde: $X(f, t)$: Transformada de Fourier en función de la frecuencia y tiempo de la señal $x(t)$.
 f : Frecuencia de la señal.
 t_0^i : Tiempo inicial de la ventana i -ésima
 T : Tamaño de la ventana de tiempo.
 $x(t)$: Señal de un registro de entrada.
 $w(t)$: Ventana de tiempo.
 j : Número imaginario ($\sqrt{-1}$)
 ω : Frecuencia angular de la señal.

El espectro de densidad de potencia es una medida de la potencia contenida en una señal versus la frecuencia (ecuación (2.2)) que se obtiene a través del método de Welch (Welch, 1967) con ventanas de Hanning utilizando segmentos del registro y promediando los espectros de potencias de N ventanas de tiempo.

$$PSD_{xx}(f) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N \left(|X(f, t_0^i)|^2 \right) \quad (2.2)$$

Donde: $PSD_{xx}(f)$: Espectro de densidad de potencia de la señal $x(t)$ en función de su frecuencia.
 N : Número de ventanas de Hanning.

El espectro de densidad de potencia cruzada (CSD del inglés *Cross Power Spectrum*) (ecuación (2.3)) se diferencia del PSD en que se utilizan dos señales distintas: una de entrada y otra de salida, con lo cual es posible obtener el cambio de fase relativo de la señal.

$$CSD_{xy}(f) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N \left[X(f, t_0^i) \cdot Y(f, t_0^i) \right] \quad (2.3)$$

Donde: $CSD_{xy}(f)$: Espectro de densidad de potencia cruzada de las señales $x(t)$ e $y(t)$ en función de la frecuencia.
 $y(t)$: Señal de un registro de salida.

2.1.2. Función de Transferencia

La función de transferencia es la relación entre la señal de salida y la señal de entrada, que también puede ser representado por la normalización del espectro de densidad cruzada por el espectro de densidad de potencia (ecuación (2.4)) lo cual es útil para conocer la amplificación de una señal de salida con la señal de entrada que se tiene.

$$T_{xy}(f) = \frac{CSD_{xy}(f)}{PSD_{xx}(f)} \quad (2.4)$$

Donde: $T_{xy}(f)$: Función de transferencia entre señales $x(t)$ e $y(t)$.

La fase de una función de transferencia (ecuación (2.5)) representa la relación entre el sentido de las señales de entrada y de salida, por lo que si la fase es negativa las frecuencias están asociadas a movimientos contrarios.

$$\theta_{xy}(f) = \arctan \left(\frac{\text{Im}\{T_{xy}(f)\}}{\text{Re}\{T_{xy}(f)\}} \right) \quad (2.5)$$

Donde: $\theta_{xy}(f)$: Ángulo de fase entre señales $x(t)$ e $y(t)$.

La función de coherencia representa la semejanza entre las señales de entrada y de salida (ecuación (2.6)) entregando valores entre 0 y 1, en donde 1 significa que los valores de frecuencias son iguales.

$$C_{xy}(f) = \frac{|CSD_{xy}(f)|^2}{PSD_{xx}(f) \cdot PSD_{yy}(f)} \quad (2.6)$$

Donde: $C_{xy}(f)$: Coherencia entre señales $x(t)$ e $y(t)$.

2.1.3. Ventanas de Datos

Las ventanas de datos se utilizan para minimizar el efecto de dispersión (o *leakage*) y de manera que se reduzca el error en la estimación del espectro de potencia o del espectro de potencia cruzado, ya que con una ventana única en el resultado existe mucha incertidumbre sobre su verosimilitud, por lo que al promediar los resultados de las ventanas de datos esta disminuye la incertidumbre de la estimación del espectro (método de Welch). Algunas de las funciones de ventana más comunes son: ventana cuadrada, ventana Barlett (ecuación (2.7)), ventana de Welch (ecuación (2.9)) y ventana Hanning (ecuación (2.8)) (Press et al., 1986).

$$w_j = 1 - \left| \frac{j - \frac{1}{2}N}{\frac{1}{2}N} \right| \quad (2.7)$$

$$w_j = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi j}{N} \right) \right] \quad (2.8)$$

$$w_j = 1 - \left(\frac{j - \frac{1}{2}N}{\frac{1}{2}N} \right)^2 \quad (2.9)$$

Donde: w_j : Función de ventana.
 j : Número de ventana.
 N : Cantidad total de ventanas.

En la Figura 2.4 se observa la representación de las ventanas de datos nombradas anteriormente. Al escoger una ventana se busca evitar el fenómeno denominado *leakage*, que se refiere a que el espectro no se localice en una frecuencia, sino que se distribuye en todo el espectro de frecuencias. Este fenómeno se disminuye con la ventana de Hanning, tal como se observa en la figura.

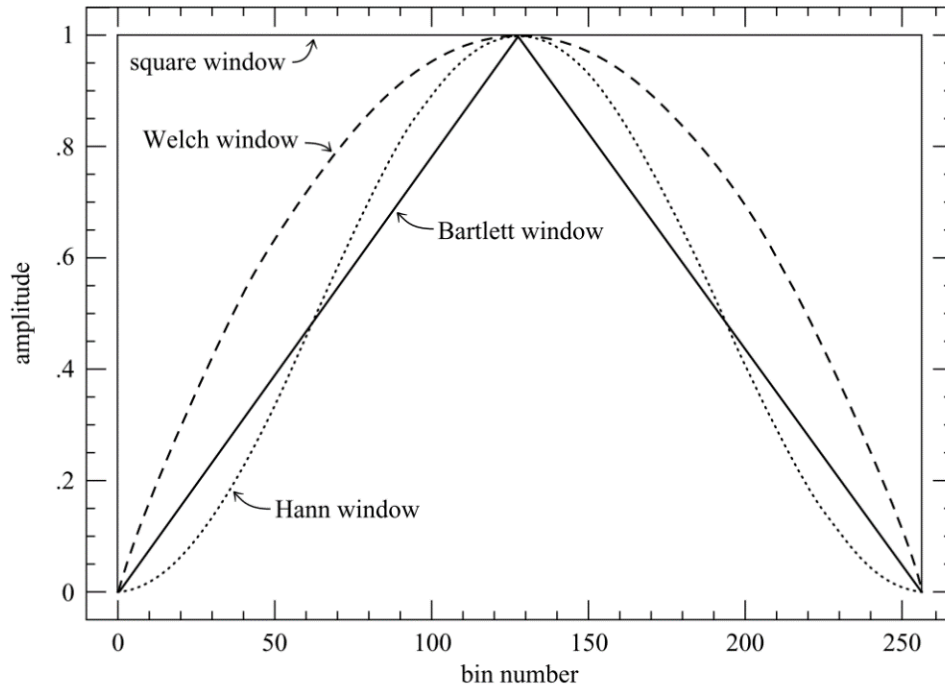


Figura 2.1: Funciones de ventana más comunes en la estimación de espectros de potencia (Press et al., 1986).

2.2. Métodos de Identificación de Propiedades Dinámicas

Los métodos para identificar propiedades dinámicas utilizados son los métodos de identificación del subespacio determinístico y estocástico, DSI y SSI, (del inglés *Deterministic Subspace Identification* y *Stochastic Subspace Identification*, respectivamente). Ambos métodos y algoritmos son extensivamente descritos por Peter Van Overschee y Bart De Moor (1996) para resolver un sistema desconocido como se esquematiza en la Figura 2.2, en donde el sistema dinámico, que es cuadro central, modifica las entradas u_k para generar salidas y_k , teniendo en cuenta que en todo sistema de monitoreo existe ruido de las medición v_k , por lo que todas las flechas representan señales vectoriales y k es el índice de tiempo discreto.

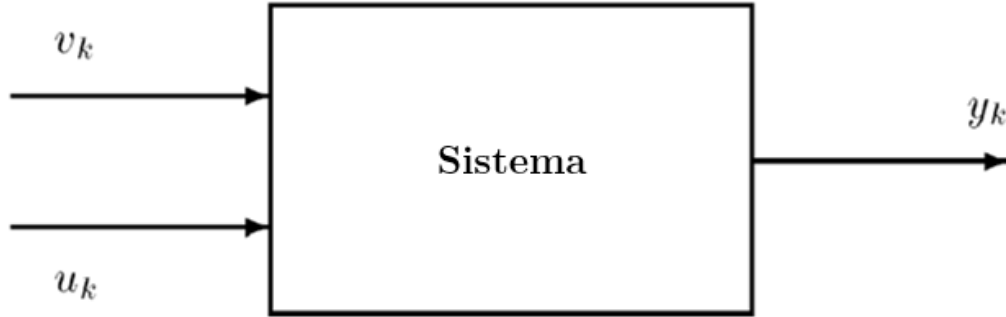


Figura 2.2.: Esquema del sistema dinámico que resuelve los métodos DSI y SSI (Van Overschee & De Moor, 1996).

Para el sistema anterior se definen algoritmos de resolución, en donde ambos métodos se diferencian en la información disponible para resolverlo, por lo que en algunas aplicaciones puede faltar u_k o v_k , sin embargo las señales medidas (de entrada y) de salida proporcionan información útil sobre el sistema.

Para la resolución del sistema, se presenta un modelo de espacio de estado lineal invariante en el tiempo discreto que se puede escribir matemáticamente como:

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + B \cdot u_k + w_k \quad (2.10)$$

$$y_k = C \cdot x_k + D \cdot u_k + v_k \quad (2.11)$$

Con:

$$E \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \geq 0 \quad (2.12)$$

- Donde:
- u_k : Vector de entradas (inputs) para el instante de tiempo discreto k .
 $u_k \in \mathbb{R}^m$, con m entradas.
 - y_k : Vector de salidas (outputs) para el instante de tiempo discreto k .
 $y_k \in \mathbb{R}^l$, con l salidas.
 - x_k : Vector de estado del proceso para el instante de tiempo discreto k .
 $x_k \in \mathbb{R}^n$, con n estados.
 - w_k : Vector de ruido que excita el sistema para el instante de tiempo discreto k . $w_k \in \mathbb{R}^n$.
 - v_k : Vector de ruido presente en las mediciones para el instante de tiempo discreto k . $v_k \in \mathbb{R}^l$.
 - E : Operador del valor esperado.
 - δ_{pq} : Delta de Kronecker.
 - A_d : Matriz de estado. $A_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$.
 - B_d : Matriz de entrada (input). $B_d \in \mathbb{R}^{n \times m}$.
 - C_d : Matriz de salida (output). $C_d \in \mathbb{R}^{l \times n}$.
 - D_d : Matriz de transmisión directa. $D_d \in \mathbb{R}^{l \times m}$.
 - Q, R, S : Matrices de covarianza asociadas a w_k y v_k . $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $R \in \mathbb{R}^{l \times l}$,
 $S \in \mathbb{R}^{n \times l}$.

El objetivo de un método de identificación de sistema es encontrar el orden n y las matrices del sistema (A_d, B_d, C_d, D_d, Q, R y S) dadas s muestras de mediciones tanto de entrada (u_0, u_1, \dots, u_{s-1}) y de salida (y_0, y_1, \dots, y_{s-1}) del sistema. Usando la relación entre las matrices de estado discreta y continuas, las propiedades modales del sistema pueden ser obtenidos con (R. Astroza et al., 2018):

$$f_r = \frac{\sqrt{\lambda_r \lambda_r^*}}{2\pi} \quad r = 1, \dots, \frac{n}{2} \quad (2.13)$$

$$\beta_r = \frac{-\text{Re}(\lambda_r)}{|\lambda_r|} \quad r = 1, \dots, \frac{n}{2} \quad (2.14)$$

$$\Phi = C \cdot \Psi = \left[\phi_1, \dots, \phi_{n/2} \right] \quad (2.15)$$

- Donde:
- f_r : Frecuencias modales.
 - λ_r : Valores propios de la matriz de tiempo continuo, definida como:
 $\lambda_r = \ln(\mu_r) / \Delta t$, con μ_r valores propios de A y Δt el tiempo de muestreo.
 - λ_r^* : Complejo conjugado de λ_r .
 - β_r : Razones de amortiguamiento modal.
 - Φ : Matriz de formas modales.

- Ψ : Vectores propios de la matriz A_d .
- ϕ_r : Formas modales.

En el método del subespacio determinístico, el problema planteado en las ecuaciones (2.10) y (2.11) se resuelve tomando los valores del ruido de proceso w_k y el ruido de medición v_k iguales a cero, es decir:

$$w_k \equiv 0, v_k \equiv 0.$$

Mientras que en el caso que se suponga que la acción que afecta la estructura es aleatoria del tipo ruido blanco (generado por diversas fuentes que afectan la estructura) se aplica el método del subespacio estocástico, las mismas ecuaciones se resuelven sin señal externa de entrada, es decir:

$$u_k \equiv 0.$$

En resumen, en el método DSI se toman los datos de señales de entrada y salida medidos, mientras que en el método SSI solo se tienen los datos de señales de salida medidos, por lo que los algoritmos de resolución difieren. A continuación, se explican ambos métodos.

2.2.1. Método de Identificación del Subespacio Determinístico

El algoritmo de identificación de subespacio determinístico calcula modelos estado espacio a partir de datos de entrada-salida (input-output). En la Figura 2.3 se representa el sistema determinístico desconocido, del cual es posible obtener información a través del método DSI.

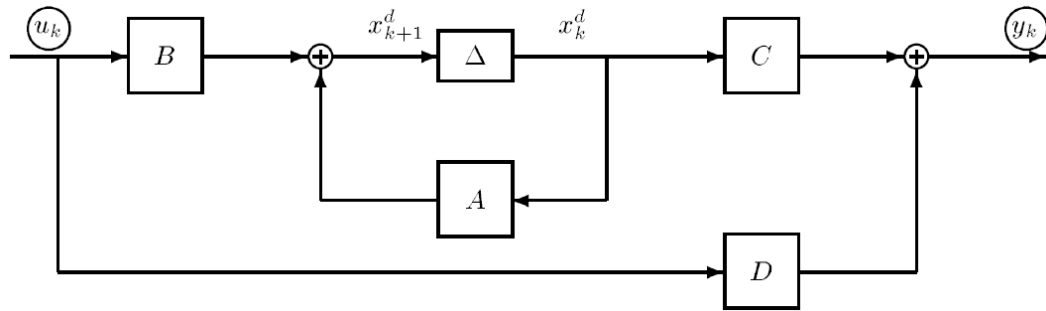


Figura 2.3: Esquema de un sistema lineal determinístico invariante en el tiempo con entradas u_k , salidas y_k y estados x_k^d (donde la d del superíndice denota determinístico) descrito por matrices A, B, C y D (Van Overschee & De Moor, 1996).

Las matrices de Hankel poseen una gran importancia dentro del algoritmo de identificación del subespacio, estas pueden ser construidas a partir de los datos de entrada-salida como se muestra en la ecuación (2.16) que representa la matriz de Henkel de datos de entrada.

$$U_{0|2i-1} = \begin{pmatrix} u_0 & u_1 & u_2 & \cdots & u_{j-1} \\ u_1 & u_2 & u_3 & \cdots & u_j \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_{i-1} & u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-2} \\ u_i & u_{i+1} & u_{i+2} & \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} & u_{i+3} & \cdots & u_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} & u_{2i+1} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{0|i-1} \\ U_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_p \\ U_f \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Para la matriz de Hankel el valor i es el número de bloques de filas, este debe ser mayor que orden n del sistema que se desea identificar, mientras que j es el número de columnas, que usualmente es $j = s - 2i + 1$. Los subíndices p y f denotan pasado y futuro dentro de la matriz, respectivamente.

El algoritmo DSI para obtener propiedades dinámicas de una estructura puede ser descrito en los siguientes pasos:

1. Definir las matrices de Hankel para datos de entrada y de salida:

$$U_{0|2i-1} = \begin{pmatrix} U_{0|i-1} \\ U_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_p \\ U_f \end{pmatrix}, \quad Y_{0|2i-1} = \begin{pmatrix} Y_{0|i-1} \\ Y_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

2. Calcular las proyecciones oblicuas:

$$O_i = Y_f /_{U_f} \begin{pmatrix} U_p \\ Y_p \end{pmatrix}, \quad O_{i-1} = Y_f^- /_{U_f^-} \begin{pmatrix} U_p^+ \\ Y_p^+ \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

3. Determinar el orden del sistema usando la descomposición de un valor singular:

$$W_1 O_i W_2 = (U_1 \quad U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 S_1 V_1^T \quad (2.19)$$

Donde W_1 y W_2 son matrices de peso.

4. Calcular las matrices de observabilidad extendida Γ_i y Γ_{i-1} :

$$\Gamma_i = W_1^{-1} U_1 S_1^{1/2}, \quad \Gamma_{i-1} = \underline{\Gamma}_i \quad (2.20)$$

Donde $\underline{\Gamma}_i$ se obtiene removiendo l (número de salidas) últimas filas de la matriz Γ_i .

5. Determinar las secuencias de estado X_i^d y X_{i+1}^d :

$$X_i^d = \Gamma_i^\dagger O_i, \quad X_{i+1}^d = \Gamma_{i-1}^\dagger O_{i-1} \quad (2.21)$$

Donde \bullet^\dagger denota el pseudo-inverso de Moore-Penrose de la matriz \bullet .

6. Resolver el conjunto de ecuaciones lineales para A, B, C y D :

$$\begin{pmatrix} X_{i+1}^d \\ Y_{i+1}^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i^d \\ U_{i+1}^d \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

7. Calcular los valores μ y vectores propios Ψ de la matriz de estado A , para luego determinar las propiedades modales del sistema con las ecuaciones (2.13),(2.14) y (2.15).

2.2.2. Método de Identificación del Subespacio Estocástico

El algoritmo de identificación de subespacio estocástico, a diferencia del determinístico, calcula modelos estado espacio a partir de solo datos de salida (output). En la Figura 2.4 se representa el sistema estocástico desconocido del cual es posible obtener información a través del método SSI.

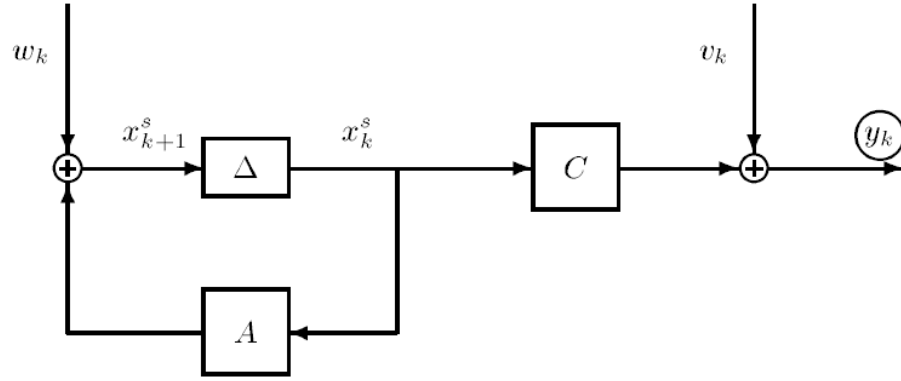


Figura 2.4: Esquema de un sistema lineal estocástico invariante en el tiempo con salidas y_k y estados x_k^s (donde la s del superíndice denota estocástico) descrito por matrices A , C y las matrices de covarianza Q , S , R (Van Overschee & De Moor, 1996).

En la ecuación (2.23) se representa la matriz de Hankel de datos de salida que serán utilizados para desarrollar el algoritmo SSI.

$$Y_{0|2i-1} = \begin{pmatrix} y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_j \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & y_{2i+1} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{0|i-1} \\ Y_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Al igual que para la matriz de Hankel de entrada (ecuación (2.16)) el valor i es el número de bloques de filas, este debe ser mayor que orden n del sistema que se desea identificar,

mientras que j es el número de columnas, que usualmente es $j = s - 2i + 1$. Los subíndices p y f denotan pasado y futuro dentro de la matriz, respectivamente.

El algoritmo SSI para obtener propiedades dinámicas de una estructura puede ser descrito en los siguientes pasos:

1. Definir la matriz de Hankel para datos de salida:

$$Y_{0|2i-1} = \begin{pmatrix} Y_{0|i-1} \\ Y_{i|2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

2. Calcular las proyecciones oblicuas:

$$O_i = Y_f / Y_p \quad , \quad O_{i-1} = Y_f^- / Y_p^+ \quad (2.25)$$

Determinar el orden del sistema usando la descomposición de un valor singular:

$$W_1 O_i W_2 = (U_1 \quad U_2) \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 S_1 V_1^T \quad (2.26)$$

3. Calcular las matrices de observabilidad extendida Γ_i y Γ_{i-1} :

$$\Gamma_i = W_1^{-1} U_1 S_1^{1/2} \quad , \quad \Gamma_{i-1} = \underline{\Gamma}_i \quad (2.27)$$

Donde $\underline{\Gamma}_i$ se obtiene removiendo l (número de salidas) últimas filas de la matriz Γ_i .

4. Determinar las secuencias de estado X_i y X_{i+1} :

$$X_i = \Gamma_i^\dagger O_i \quad , \quad X_{i+1} = \Gamma_{i-1}^\dagger O_{i-1} \quad (2.28)$$

Donde \bullet^\dagger denota el pseudo-inverso de Moore-Penrose de la matriz \bullet .

5. Resolver el conjunto de ecuaciones lineales para A y C :

$$\begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{pmatrix} \cdot X_i^\dagger \quad (2.29)$$

6. Calcular los valores μ y vectores propios Ψ de la matriz de estado A , para luego determinar las propiedades modales del sistema con las ecuaciones (2.13),(2.14) y (2.15).

2.2.3. Criterios de Estabilidad en la Identificación de Propiedades Dinámicas

Los métodos expuestos anteriormente identifican propiedades dinámicas de una estructura a través de una función que tiene como parámetros de entrada, los datos medidos de entrada y salida (DSI) o solo los datos medidos de salida (SSI), a los cuales se le agregan parámetros de fijados por el usuario como: el índice i , las matrices de peso (W_1 y W_2) y el orden del sistema (n) que influyen en las propiedades obtenidas.

El índice i determina el número de bloques filas que se utiliza para la construcción de la matriz de respuesta expandida, para un alto número de retardos (i grande) las propiedades dinámicas tienden a estabilizarse generando resultados con pocas variaciones al modificar el índice (Hernández, 2009). El orden del sistema que debe ser mayor al número de bloques filas para que no se produzca variabilidad en los resultados y se obtengan las propiedades dinámicas. Las matrices de peso utilizadas para ponderar la proyección ortogonal permiten filtrar la base del sistema con lo que se obtiene una solución más balanceada, un efecto similar al que se obtiene al incrementar i .

En los diagramas de estabilidad, en los que se presentan los resultados del método SSI o DSI, se estudia la estabilidad de los parámetros dinámicos al variar el orden del sistema ($n = i - 1$) o al variar equivalentemente el número de retardos (i). La estabilidad de las propiedades entre un orden y el siguiente se estudia con criterios de similitud, que se muestran a continuación y que varían dependiendo del caso estudiado (Díaz, 2018):

$$\frac{f_p - f_{p-1}}{f_p} \cdot 100\% \leq CF\% \quad (2.30)$$

$$\frac{\beta_p - \beta_{p-1}}{\beta_p} \cdot 100\% \leq CAM\% \quad (2.31)$$

$$(1 - MAC(\{\phi_p\}, \{\phi_{p+1}\})) \cdot 100\% \leq CM\% \quad (2.32)$$

Donde p corresponde al orden estudiado, con $p \in [1, Q]$ donde Q es el orden mayor del sistema empleado para las identificaciones.

En los gráficos de estabilidad que se utilizan para este trabajo, se definen dos tipos de marcadores con coincidencias de propiedades dinámicas:

- Coincidencia en frecuencia y forma modal (MAC) (Δ)
- Coincidencia en frecuencia, razón de amortiguamiento y forma modal (\oplus).

En la medida que se repita sucesivamente la triple coincidencia (\oplus), mientras aumenta el orden del modelo, se asume que se han identificado parámetros dinámicos estables (Núñez, 2009).

El Criterio de Aseguramiento Modal o MAC (del inglés *Modal Assurance Criterion*) es una constante escalar que vincula la relación causal entre dos vectores modales. La constante tomará valores desde cero a uno, donde cero representa una correspondencia no consistente y uno representa una correspondencia consistente (Allemang & Brown, 1982), por lo que valores de MAC cercanos a uno se trata de formas modales semejantes. En el diagrama de estabilidad el MAC se utiliza para discernir la similitud entre dos formas modales para órdenes de sistema consecutivos, no para determinar si las formas modales son las correctas. Esta constante se determina como se muestra a continuación:

$$MAC(\{\phi_p\}, \{\phi_{p+1}\}) = \frac{\left| \{\phi_p\}^H \cdot \{\phi_{p+1}\} \right|^2}{\left(\{\phi_p\}^H \cdot \{\phi_p\} \right) \cdot \left(\{\phi_{p+1}\}^H \cdot \{\phi_{p+1}\} \right)} \quad (2.33)$$

Adicionalmente, dentro del diagrama de estabilidad se observa el histograma y el espectro de potencia: el primero indica la cantidad de coincidencias en torno a una frecuencia, mientras que el segundo se utiliza para su contraste en el dominio de las frecuencias.

2.3. Análisis Estructural

El análisis estructural se refiere al uso de las ecuaciones de la resistencia de materiales para encontrar los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre una estructura, y es utilizada para diseñar estructuras que soporten las cargas solicitantes. Dentro de las estructuras que se analizan están las isostáticas y las hiperestáticas, las primeras son estructuras que a través de los principios de estática pueden ser estudiadas, mientras que las segundas pueden ser examinadas a partir de principios de estática, resistencia de materiales y compatibilidad de deformaciones. Existen varios métodos para poder determinar los esfuerzos de una estructura hiperestática, pero para este trabajo se utilizará el método de rigidez y, más específicamente, el método matricial para el análisis del edificio Antígona.

2.3.1. Método de Rigidez

El método de rigidez permite determinar los esfuerzos de una estructura utilizando como incógnitas desplazamientos o giros en sus grados de libertad, para una estructura de N grados de libertad se utiliza la ecuación:

$$(F) = [K] \cdot (u) \quad (2.34)$$

Donde: F : Vector de fuerzas aplicadas a los grados de libertad.
 K : Matriz de rigidez de la estructura.
 u : Vector de desplazamientos de los grados de libertad.

En la ecuación (2.34) es conocido el vector de fuerzas aplicadas, mientras que el vector de desplazamientos es la incógnita de la ecuación, por lo que falta conocer la matriz de rigidez de las estructura. La matriz de rigidez de una estructura se puede obtener aplicando desplazamientos unitarios a cada grado de libertad, con lo que es posible obtener los coeficientes de rigidez. Estos coeficientes de rigidez se pueden obtener a partir de distintos modos, uno de estos es una tabla de rigideces, en donde se muestran cual es la fuerza de reacción a un desplazamiento o giro unitario en una viga, con unidades de rigidez al ser un movimiento unitario.

Para efectos de este trabajo la matriz de rigidez del edificio Antígona se obtiene utilizando este método, a partir del modelo ETABS que entrega los datos necesarios para el cálculo de los coeficientes de rigidez, por lo que no es necesario el uso de ecuaciones ni tabla de rigideces.

2.3.1.1. Método Matricial para Edificio de Corte

El método matricial del método de rigidez es utilizado particularmente para poder realizar cambios en la matriz de rigidez de un sistema de referencia local a uno global. Para efectos de este trabajo, se utiliza el método matricial para obtener la matriz de rigidez por piso del edificio Antígona en el centro de masa de cada piso, es decir, se trasladan las rigideces de piso (que se posicionan en sus centros de rigideces) a los centros de masas, considerando la estructura como un edificio de corte (despreciando deformaciones por flexión y giros fuera del plano de los diafragmas de los pisos). En la Figura 2.5 se muestra la adaptación del método para un edificio de corte, con el fin de obtener la matriz de rigidez en el sistema de referencia con origen en el centro de masa de cada piso, para un edificio de N grados de libertad, basado en el método matricial para una barra arbitraria (Guendelman, 2014).

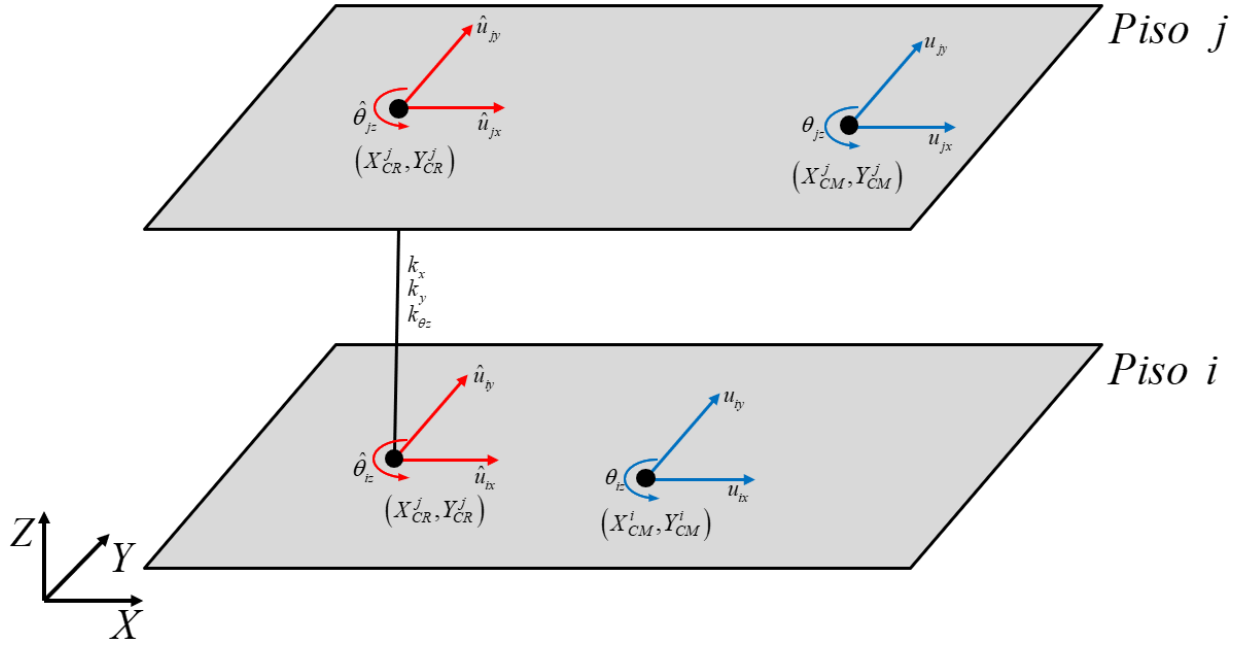


Figura 2.5: Representación de los pisos superior j e inferior i de un edificio, en donde los puntos representan sus centros de masa y de rigidez, y las flechas representan los grados de libertad de cada piso en cada centro.

Entre las plantas de los pisos i y j se obtiene la rigidez de entre piso denominada $k_p^{(i-j)}$ para los tres grados de libertad en el centro de rigidez. Como se observa en la Figura 2.5 en color rojo, en las ecuaciones (2.35) y (2.36) es posible conocer los desplazamientos del entrepiso.

$$\begin{pmatrix} F_p \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_p^{(i-j)} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_p^{(i-j)} \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

$$\begin{pmatrix} F_{px} \\ F_{py} \\ M_{pz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_{px} & 0 & 0 \\ 0 & k_{py} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\theta_{pz}} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{px} \\ u_{py} \\ \theta_{pz} \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

Los desplazamientos de los grados de libertad en los centros de rigidez de cada nivel (que se muestran en la Figura 2.5) y que se expresan como el vector \hat{u} se relacionan con las deformaciones relativas de entre piso conforme detalla la ecuación (2.37). Es decir, los desplazamientos de entrepiso se obtienen como una relación geométrica (i.e., la resta entre los desplazamientos de los grados de libertad del piso superior menos los del piso inferior en el centro de rigidez), para lo que se define una matriz de transformación a_p , para obtener $u_p^{(i-j)}$ a partir de $\hat{u}^{(i-j)}$.

$$\left(\hat{\mathbf{u}}^{(i-j)}\right) = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{u}}_i \\ \hat{\mathbf{u}}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{u}}_{ix} \\ \hat{\mathbf{u}}_{iy} \\ \frac{\hat{\theta}_{iz}}{\hat{\mathbf{u}}_{jx}} \\ \hat{\mathbf{u}}_{jy} \\ \hat{\theta}_{jz} \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

$$\left(\mathbf{u}_p^{(i-j)}\right) = \left[\mathbf{a}_p\right] \cdot \left(\hat{\mathbf{u}}^{(i-j)}\right) \quad (2.38)$$

$$\left[\mathbf{a}_p\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

La matriz de transformación \mathbf{a}_p se usa para obtener la matriz de rigidez de cada piso $\mathbf{k}_{ap}^{(i-j)}$ que se muestra en la ecuación (2.40), que al multiplicarse con el vector de desplazamiento de cada piso se obtiene el vector de fuerza en el piso superior e inferior como en la ecuación (2.41) y (2.42).

$$\left[\mathbf{k}_{ap}^{(i-j)}\right] = \left[\mathbf{a}_p\right]^T \cdot \left[\mathbf{k}_p^{(i-j)}\right] \cdot \left[\mathbf{a}_p\right] \quad (2.40)$$

$$\left(\hat{\mathbf{F}}^{(i-j)}\right) = \left[\mathbf{k}_{ap}^{(i-j)}\right] \cdot \left(\hat{\mathbf{u}}^{(i-j)}\right) \quad (2.41)$$

$$\left(\hat{\mathbf{F}}^{(i-j)}\right) = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{F}}_i \\ \hat{\mathbf{F}}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{F}}_{ix} \\ \hat{\mathbf{F}}_{iy} \\ \frac{\hat{\mathbf{M}}_{iz}}{\hat{\mathbf{F}}_{jx}} \\ \hat{\mathbf{F}}_{jy} \\ \hat{\mathbf{M}}_{jz} \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

Para poder obtener la rigidez por piso en el centro de masa, se utiliza una matriz de transformación $\mathbf{T}^{(i-j)}$ (considerando pequeñas deformaciones) como se muestra en la ecuación (2.43). La ecuación (2.45) se compone de matrices \mathbf{T}_m que se muestran en la ecuación (2.46) utilizando las coordenadas del centro de rigidez y de los centros de masa de piso superior o inferior (a partir de un sistema de referencia que se ubica convenientemente en la esquina inferior izquierda). La matriz de rigidez por piso en el centro de masa es $\mathbf{K}_p^{(i-j)}$ que se obtiene como se muestra en la ecuación (2.47).

$$\left(\mathbf{u}^{(i-j)} \right) = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{u}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{ix} \\ \mathbf{u}_{iy} \\ \theta_{iz} \\ \mathbf{u}_{jx} \\ \mathbf{u}_{jy} \\ \theta_{jz} \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

$$\left(\hat{\mathbf{u}}^{(i-j)} \right) = \left[\mathbf{T}^{(i-j)} \right] \cdot \left(\mathbf{u}^{(i-j)} \right) \quad (2.44)$$

$$\left[\mathbf{T}^{(i-j)} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{T}_i & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \hline \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_j \end{array} \right] \quad (2.45)$$

$$\left[\mathbf{T}_m \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & (Y_{CM}^m - Y_{CR}^j) \\ 0 & 1 & -(X_{CM}^m - X_{CR}^j) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$\left[\mathbf{K}_p^{(i-j)} \right] = \left[\mathbf{T}^{(i-j)} \right]^T \cdot \left[\mathbf{k}_{ap}^{(i-j)} \right] \cdot \left[\mathbf{T}^{(i-j)} \right] \quad (2.47)$$

Luego, se debe incluir la matriz de rigidez en los centros de masas según la enumeración de GDL de la estructura. Por tanto, se debe considerar una última transformación correspondiente a una matriz booleana que identifica los GDL del sistema de entrepiso con los GDL de la estructura. Por ejemplo en caso que se analice la transformación de un piso $i-j$ intermedio, la matriz de transformación $\mathbf{T}_2^{(i-j)}$ será como se muestra en la ecuación (2.48) de dimensiones $6 \times N$.

$$\left[\mathbf{T}_2^{(i-j)} \right] = \left[\mathbf{0}_{6 \times (3i-1)} \mid \mathbf{I}_{6 \times 6} \mid \mathbf{0}_{6 \times (N-3j)} \right] \quad (2.48)$$

Esta matriz de transformación es utilizada para que la matriz de rigidez $\mathbf{K}_p^{(i-j)}$ de los pisos de dimensiones 6×6 pase a una matriz de rigidez $\mathbf{K}_s^{(i-j)}$ de dimensiones $N \times N$, con información en los grados de libertad correspondientes a los pisos $i-j$.

$$\left[\mathbf{K}_s^{(i-j)} \right] = \left[\mathbf{T}_2^{(i-j)} \right]^T \cdot \left[\mathbf{K}_p^{(i-j)} \right] \cdot \left[\mathbf{T}_2^{(i-j)} \right] \quad (2.49)$$

Finalmente se obtiene la matriz de rigidez \mathbf{K} de la estructura de N grados de libertad como la sumatoria de las matrices $\mathbf{K}_s^{(i-j)}$, como se muestra en la ecuación (2.50).

$$\left[\mathbf{K} \right] = \sum_{j=1}^N \left[\mathbf{K}_s^{(i-j)} \right] \quad (2.50)$$

2.3.1.2. Método Matricial para Edificio de Corte incluyendo Flexión y Corte

El método matricial del método de rigidez para edificio de corte incluyendo flexión y corte, sigue los mismos principios del mostrado en la sección anterior, pero con cinco grados de libertad por piso y basándose en el método matricial para una barra 3D (Blanco et al., 2012), pero al adaptarse al modelo de un edificio, las características de rigidez se concentran en una barra tridimensional como se muestra en la representación del método en la Figura 2.6, para un edificio de N grados de libertad.

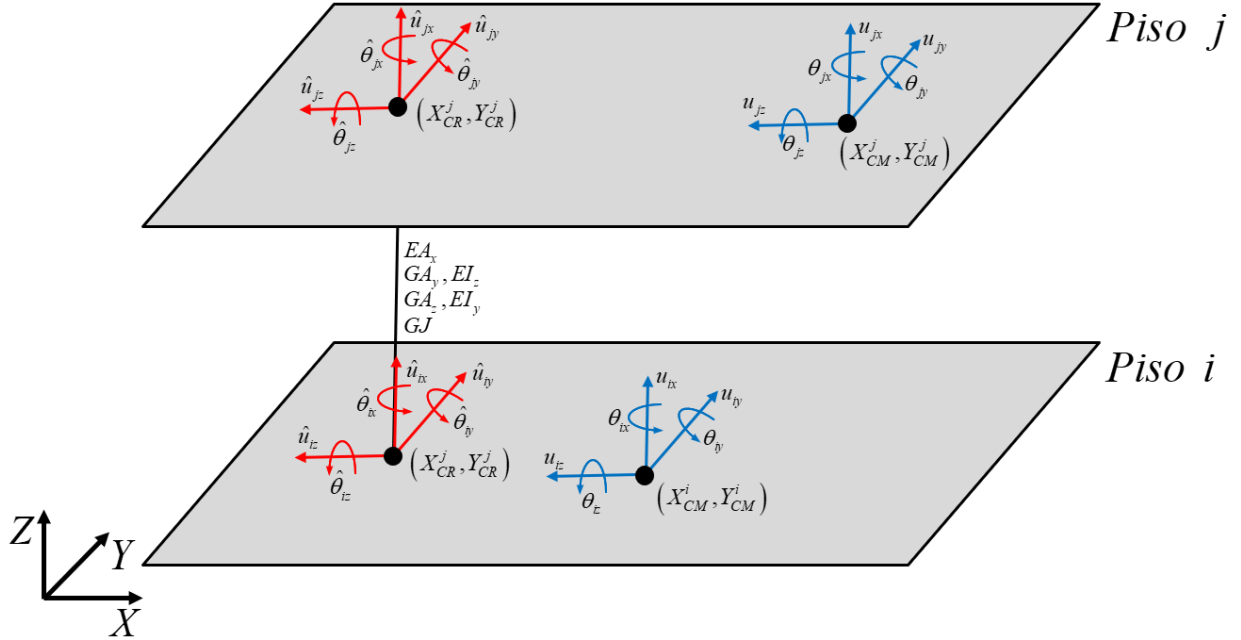


Figura 2.6: Representación de los pisos superior j e inferior i de un edificio, en donde los puntos representan sus centros de masa y de rigidez en coordenadas globales, y las flechas representan los grados de libertad de cada piso en coordenadas locales de cada centro.

Entre las plantas de los pisos i y j se obtienen rigideces de entre piso para los grados de libertad que se muestran en las ecuaciones (2.51), (2.52), (2.53), (2.54), (2.55), (2.56), en donde L es la altura del entrepiso, con las que se obtienen los parámetros de resistencia del elemento barra de entrepiso, como se muestran en la Figura 2.6.

$$k_{axialZ}^{(i-j)} = \frac{EA_x}{L} \quad (2.51)$$

$$k_{corteX}^{(i-j)} = \frac{GA_z}{L} \quad (2.52)$$

$$k_{corteY}^{(i-j)} = \frac{GA_y}{L} \quad (2.53)$$

$$k_{flexionX}^{(i-j)} = \frac{3EI_z}{L^3} \quad (2.54)$$

$$k_{flexionY}^{(i-j)} = \frac{3EI_y}{L^3} \quad (2.55)$$

$$k_{torsiónZ}^{(i-j)} = \frac{GJ}{L} \quad (2.56)$$

Con los parámetros obtenidos es posible construir la matriz de rigidez del elemento en el centro de rigidez, en donde los desplazamientos y fuerzas aplicadas en los grados de libertad están dados por los vectores que se muestran en la ecuación (2.57). En las ecuaciones (2.58) y (2.59) se observa la relación con de los vectores de fuerza y desplazamiento con la matriz de rigidez local dividida en cuatro submatrices.

$$\left(\hat{u}^{(i-j)} \right) = \begin{pmatrix} \hat{u}_{ix} \\ \hat{u}_{iy} \\ \hat{u}_{iz} \\ \hat{\theta}_{ix} \\ \hat{\theta}_{iy} \\ \hat{\theta}_{iz} \\ \hat{u}_{jx} \\ \hat{u}_{jy} \\ \hat{u}_{jz} \\ \hat{\theta}_{jx} \\ \hat{\theta}_{jy} \\ \hat{\theta}_{jz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{u}_i \\ \hat{u}_j \end{pmatrix} \quad \left(\hat{F}^{(i-j)} \right) = \begin{pmatrix} \hat{F}_i \\ \hat{F}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{F}_{ix} \\ \hat{F}_{iy} \\ \hat{F}_{iz} \\ \hat{M}_{ix} \\ \hat{M}_{iy} \\ \hat{M}_{iz} \\ \hat{F}_{jx} \\ \hat{F}_{jy} \\ \hat{F}_{jz} \\ \hat{M}_{jx} \\ \hat{M}_{jy} \\ \hat{M}_{jz} \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

$$\left(\hat{F}^{(i-j)} \right) = \left[\hat{k}^{(i-j)} \right] \cdot \left(\hat{u}^{(i-j)} \right) \quad (2.58)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{F}_i \\ \hat{F}_j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{k}_{ii} & \hat{k}_{ij} \\ \hat{k}_{ji} & \hat{k}_{jj} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{u}_i \\ \hat{u}_j \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

En las siguientes ecuaciones se muestran cómo están conformadas las submatrices de rigidez, con la inclusión de la deformación por corte a través de los factores de la ecuación (2.60).

$$\varphi_y = \frac{12EI_z}{GA_y L^2} \quad \varphi_z = \frac{12EI_y}{GA_z L^2} \quad (2.60)$$

$$[\hat{k}_{ii}] = \begin{bmatrix} \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3(1+\varphi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\varphi_y)} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3(1+\varphi_z)} & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2(1+\varphi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2(1+\varphi_z)} & 0 & \left(\frac{4+\varphi_z}{1+\varphi_z}\right)\frac{EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\varphi_y)} & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{4+\varphi_y}{1+\varphi_y}\right)\frac{EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

$$[\hat{k}_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{-EA_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI_z}{L^3(1+\varphi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\varphi_y)} \\ 0 & 0 & \frac{-12EI_y}{L^3(1+\varphi_z)} & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2(1+\varphi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\varphi_z)} & 0 & \left(\frac{2-\varphi_z}{1+\varphi_z}\right)\frac{EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{-6EI_z}{L^2(1+\varphi_y)} & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{2-\varphi_y}{1+\varphi_y}\right)\frac{EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$[\hat{k}_{jj}] = \begin{bmatrix} \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3(1+\varphi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2(1+\varphi_y)} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3(1+\varphi_z)} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\varphi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\varphi_z)} & 0 & \left(\frac{4+\varphi_z}{1+\varphi_z}\right)\frac{EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{-6EI_z}{L^2(1+\varphi_y)} & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{4+\varphi_y}{1+\varphi_y}\right)\frac{EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Para obtener la matriz de rigidez en el centro de masa, se utiliza la matriz de transformación $T^{(i-j)}$ que se obtiene de los vectores de desplazamiento en el centro de rigidez y en el centro de masa. Esta matriz se divide en submatrices que se ven en las ecuaciones (2.66) y (2.67).

$$\left(\mathbf{u}^{(i-j)} \right) = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{u}_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{ix} \\ \mathbf{u}_{iy} \\ \mathbf{u}_{iz} \\ \theta_{ix} \\ \theta_{iy} \\ \theta_{iz} \\ \mathbf{u}_{jx} \\ \mathbf{u}_{jy} \\ \mathbf{u}_{jz} \\ \theta_{jx} \\ \theta_{jy} \\ \theta_{jz} \end{pmatrix} \quad (2.64)$$

$$\left(\hat{\mathbf{u}}^{(i-j)} \right) = [T^{(i-j)}] \cdot \left(\mathbf{u}^{(i-j)} \right) \quad (2.65)$$

$$[T^{(i-j)}] = \left[\begin{array}{c|c} T_i & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \hline \mathbf{0}_{6 \times 6} & T_j \end{array} \right] \quad (2.66)$$

$$[T_m] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (X_{CM}^m - X_{CR}^j) & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -(Y_{CM}^m - Y_{CR}^j) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Finalmente se crea una matriz de transformación para pasar a tener los coeficientes de rigidez en una matriz de $N \times N$ y luego sumarlas a los coeficientes de los demás pisos.

$$[T_2^{(i-j)}] = \left[\mathbf{0}_{12 \times (6i-1)} \mid I_{12 \times 12} \mid \mathbf{0}_{12 \times (N-6j)} \right] \quad (2.68)$$

$$[K_s^{(i-j)}] = [T_2^{(i-j)}]^T \cdot [\hat{k}^{(i-j)}] \cdot [T_2^{(i-j)}] \quad (2.69)$$

$$[K] = \sum_{j=1}^N [K_s^{(i-j)}] \quad (2.70)$$

2.3.2. Análisis Modal

El análisis modal de una estructura consiste en describir el comportamiento dinámico de una estructura de N grados de libertad, a través de la determinación de sus frecuencias naturales y modos de vibrar durante vibración libre. La respuesta dinámica de un sistema de múltiples grados de libertad a fuerzas externas $P(t)$ se calcula a través de los pasos descritos por Chopra (2012).

La ecuación de equilibrio dinámico para un sistema de N GDL está dada por:

$$[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = (P(t)) \quad (2.71)$$

- Donde:
- M : Matriz de masa.
 - \ddot{u} : Vector de aceleraciones (segunda derivada del desplazamiento).
 - C : Matriz de amortiguación.
 - \dot{u} : Vector de velocidades (primera derivada del desplazamiento).
 - K : Matriz de rigidez.
 - u : Vector de desplazamientos.
 - $P(t)$: Forzante externa que varía en función del tiempo.

El primer paso del análisis modal es definir las propiedades estructurales como lo son la masa y rigidez del sistema, que para efectos de este trabajo se obtienen a través del programa ETABS y del método de rigidez. También es estimar las razones de amortiguación de los modos, lo cual se puede hacer a través de métodos de cálculo o experimentalmente a través de mediciones.

El segundo paso es determinar las frecuencias naturales y los modos de vibración de la estructura, para esto se parte de la ecuación (2.72) que representa N ecuaciones diferenciales homogéneas acopladas por la matriz de masa y rigidez.

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (2.72)$$

Para la ecuación (2.72) se desea conocer la solución $u(t)$ que satisfaga las condiciones iniciales que se muestran en la ecuación

$$u = u(0) \quad \dot{u} = \dot{u}(0) \quad (2.73)$$

La ecuación diferencial tiene dos soluciones que componen la solución homogénea. Asumiendo que se conocen las frecuencias naturales y los modos de vibración, ω_n y ϕ_n , por lo que la solución está dada por la superposición de la respuesta individual de los modos, obteniéndose:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n (A_n \cos(C_n t) + B_n \sin(D_n t)) \quad (2.74)$$

$$u_1(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n A_n \cos(C_n t) \quad u_2(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n B_n \sin(D_n t) \quad (2.75)$$

Reemplazando $u_1(t)$ y $u_2(t)$ en la ecuación (2.72) se despejan las constantes C_n y D_n , que tienen el valor $\omega_n = \sqrt{K_n/M_n}$ que es la frecuencia angular natural con unidades de $[rad/s]$, quedando la solución homogénea en la ecuación (2.76) y su derivada en la ecuación (2.77)

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n (A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)) \quad (2.76)$$

$$\dot{u}(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n \omega_n (-A_n \sin(\omega_n t) + B_n \cos(\omega_n t)) \quad (2.77)$$

Considerando las condiciones iniciales de la ecuación (2.73) reemplazando $t=0$ en las ecuaciones (2.76) y (2.77) se tiene:

$$u(0) = \sum_{n=1}^N \phi_n A_n \quad \dot{u}(0) = \sum_{n=1}^N \phi_n \omega_n B_n \quad (2.78)$$

Las cuales también se pueden escribir como:

$$u(0) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(0) \quad \dot{u}(0) = \sum_{n=1}^N \phi_n \dot{q}_n(0) \quad (2.79)$$

En donde los valores $q_n(0)$ y $\dot{q}_n(0)$ están dados por:

$$q_n(0) = \frac{\phi_n^T M u(0)}{M_n} \quad \dot{q}_n(0) = \frac{\phi_n^T M \dot{u}(0)}{M_n} \quad (2.80)$$

Al reemplazar en (2.76) las constantes $A_n = q_n(0)$ y $B_n = \dot{q}_n(0)/\omega_n$, se obtiene finalmente la solución:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n \left[q_n(0) \cos(\omega_n t) + \frac{\dot{q}_n(0)}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \right] \quad (2.81)$$

O alternativamente como:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad (2.82)$$

Sin embargo, no se conocen los valores de las frecuencias naturales y modos, por lo que reemplazando la solución en la ecuación (2.72) se obtiene:

$$\left[-\omega_n^2 M \phi_n + K \phi_n \right] q_n(t) = 0 \quad (2.83)$$

En donde $q_n(t) \neq 0$, lo que implica que $u(t) = 0$ y en ese caso no existiría movimiento en el sistema (siendo una solución trivial), o que se satisface $K \phi_n = \omega_n^2 M \phi_n$, conociéndose esta ecuación como problema de matriz de valores propios, por lo que se debe conocer el escalar ω_n^2 y el vector ϕ_n .

Para indicar la solución formal de la ecuación (2.83) se reescribe como:

$$\left[K - \omega_n^2 M \right] \phi_n = 0 \quad (2.84)$$

La cual puede ser interpretada como un conjunto de N ecuaciones homogéneas algebraicas para N elementos ϕ_{jn} ($j=1,2,\dots,N$). Este conjunto siempre tiene una solución trivial $\phi_n = 0$ la cual no es útil porque implica que no hay movimiento. Esta tiene una solución no trivial si:

$$\det \left[K - \omega_n^2 M \right] = 0 \quad (2.85)$$

De donde se puede obtener ω_n^2 con los valores conocidos de M y K . De este problema se obtienen los valores y vectores propios los cuales pueden ensamblarse y formar matrices para N vectores propios y N frecuencias.

$$\Phi = \left[\phi_{jn} \right] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \cdots & \phi_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

$$\Omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \omega_N^2 \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

Para obtener la frecuencia natural de un modo se utiliza la ecuación (2.88) y para obtener el período la ecuación (2.89)

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2.88)$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} \quad (2.89)$$

Para conocer la masa que se mueve en cada dirección por modo, se calcula la masa modal efectiva M_n^* , que se calcula con la matriz de masa modal M_m y el factor de participación modal L_m .

$$M_m = \phi^T M \phi \quad (2.90)$$

$$L_n = \phi^T M r \quad (2.91)$$

$$M_t = r^T M r \quad (2.92)$$

El vector r representa el vector de influencia conformado por ceros y unos, cuando el grado de libertad mueve masa en la dirección de estudio marca un 1 y un 0 en caso contrario. Este vector también sirve para calcular la masa total M_t en la dirección de estudio, la que posteriormente es útil para determinar la razón de masa participante por modo PM_n .

$$M_n^* = \frac{L_n^2}{M_{mm}} \quad (2.93)$$

$$PM_n = \frac{M_n^*}{M_t} \quad (2.94)$$

Capítulo 3

Antecedentes generales

En el presente capítulo se muestran los antecedentes de la estructura en estudio, dentro de los que encontramos su ubicación y estructuración, ambos relevantes para este trabajo. También se presentan como antecedentes los trabajos de investigación realizados sobre el edificio Antígona, de gran utilidad e importancia para este.

3.1. Antecedentes Edificio Antígona

El edificio Antígona es de gran interés en el estudio de estructuras sometidas a sismos de mediana y gran intensidad, ya que fue uno de los edificios que presentaron daño estructural luego del terremoto del Maule del 2010. A continuación, se presenta información sobre el edificio y daño estructural sufrido.

3.1.1. Descripción y ubicación de la estructura

El edificio Antígona fue construido en el año 2004 con propósito de uso habitacional, diseñado por la consultora RDZI Ingeniería Estructural y construido por la empresa constructora TECSA. Esta estructura tiene 17 pisos, 16 de estos habitables y el último piso utilizado como lavandería y uso de calderas, también tiene 2 subterráneos destinado a estacionamientos y bodegas. El sistema estructural que lo conforma es en base a muros de hormigón armado en sus direcciones longitudinal y transversal.

Las dimensiones de las plantas de los pisos del edificio son de aproximadamente 21[m] en la dirección transversal (E-O) y de 32[m] en la dirección longitudinal (N-S) por lo que cada planta tiene 672[m²] de superficie aproximadamente. La distribución y grosores de los muros varían en los pisos, siendo los pisos 1 y 2 estructuralmente distintos a los demás pisos, mientras que entre los pisos 3 al 15 de plantas similares, y los pisos 16 y 17 son distintos a los demás pisos por ser los últimos en la estructura (ver plantas de los pisos en la Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9 y Figura 3.10). La estructura posee una altura de 43.85[m] en su punto más alto, mientras que la fundación subterránea se encuentra a una profundidad de 5.85[m] bajo el nivel del terreno.



Figura 3.1: Vista frontal de Edificio Antígona por calle 5 Oriente (Fuente: Google Maps).

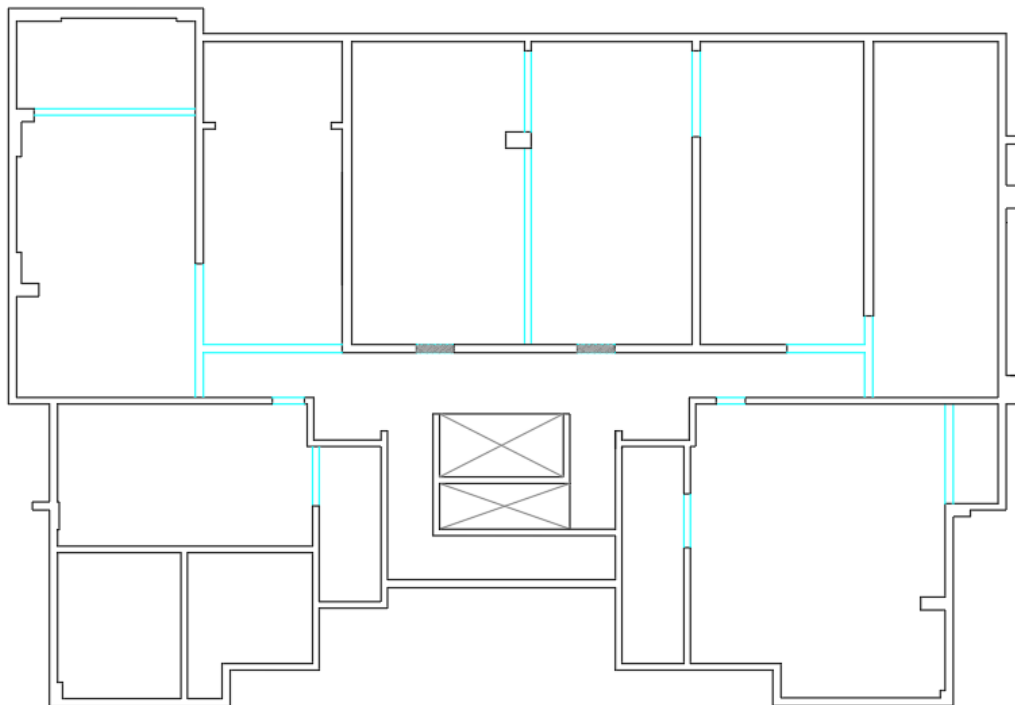


Figura 3.2: Adaptación de plano estructural de planta del subterráneo -2.

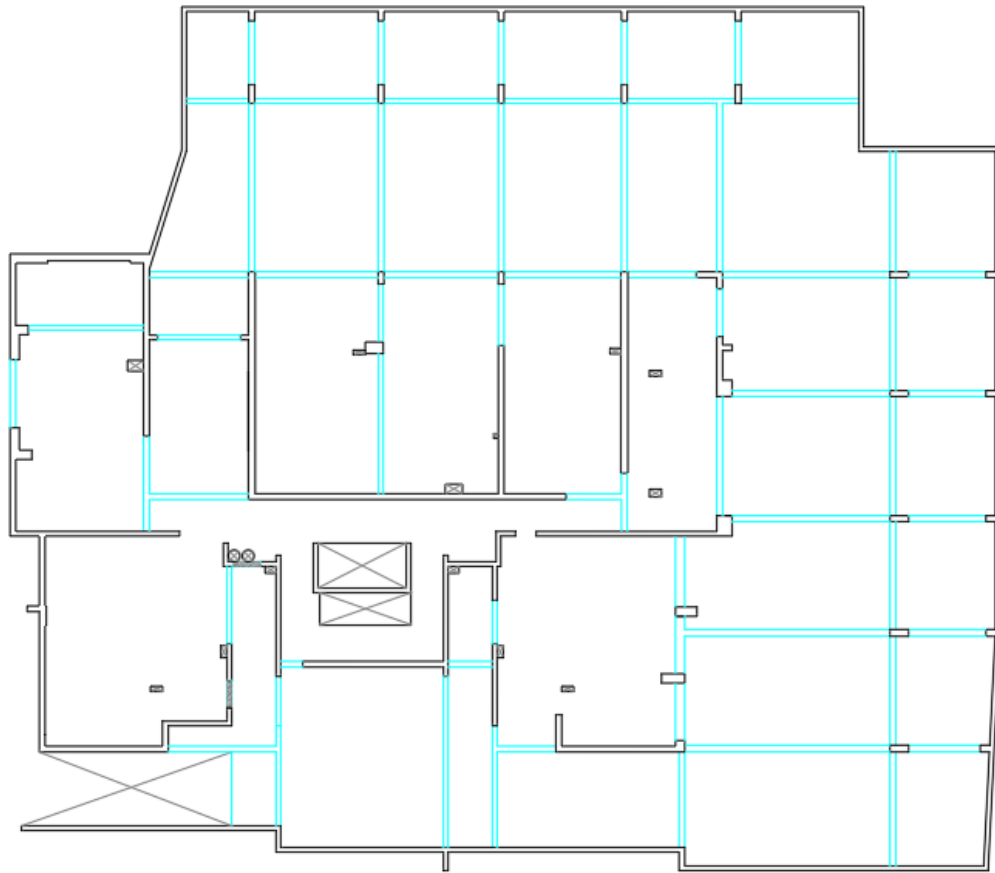


Figura 3.3: Adaptación de plano estructural de planta del subterráneo -1.

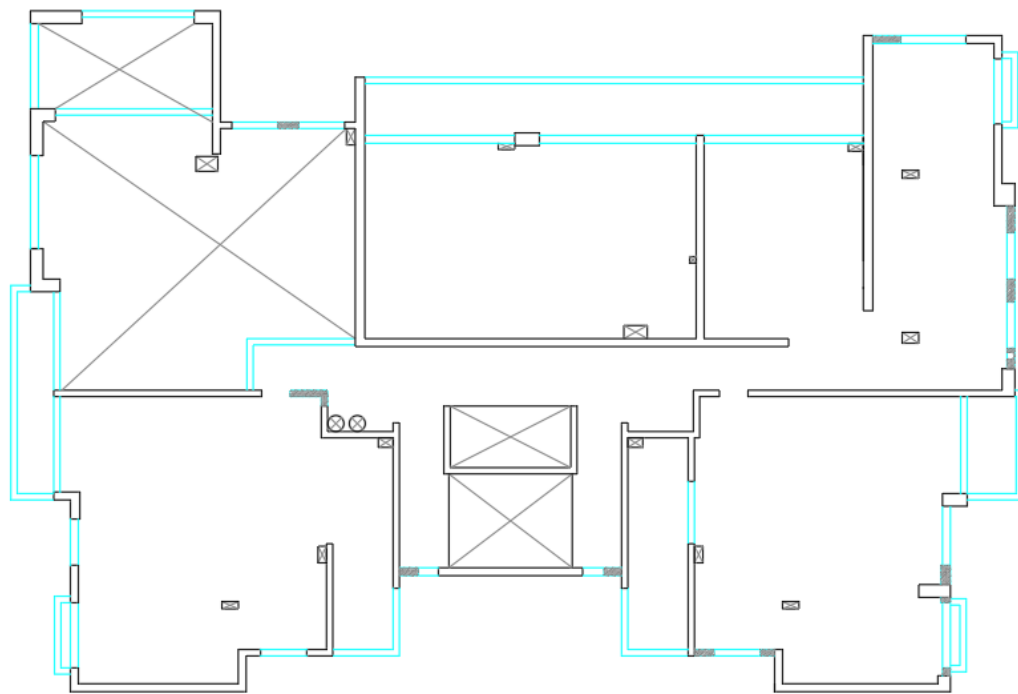


Figura 3.4: Adaptación de plano estructural de planta del piso 1.

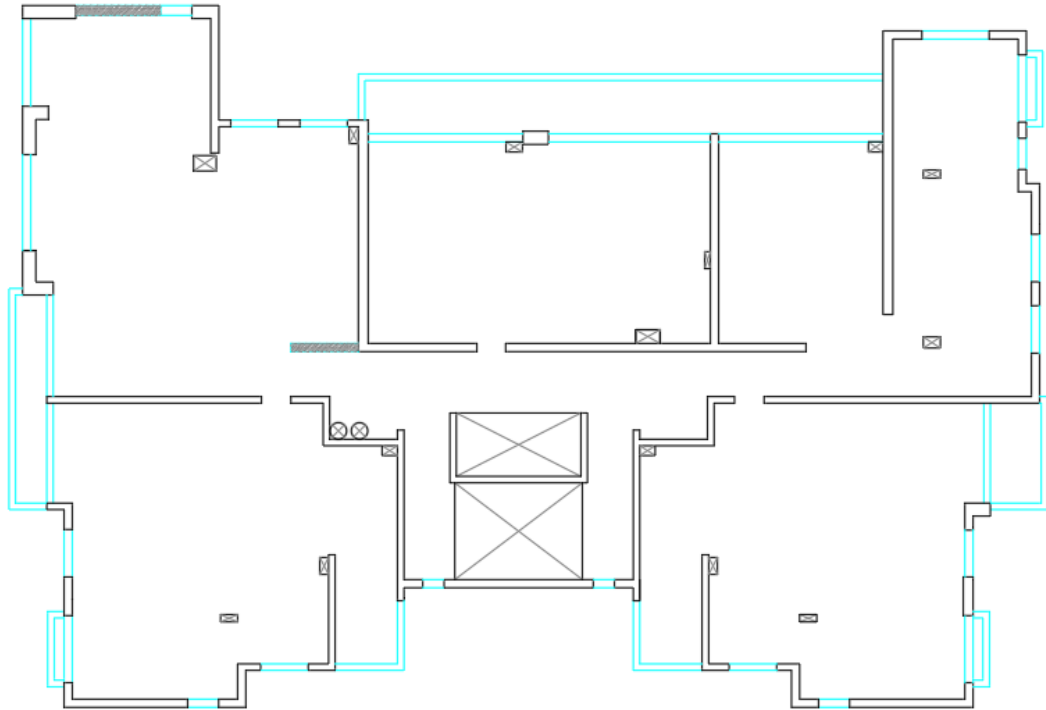


Figura 3.5.: Adaptación de plano estructural de planta del piso 2.

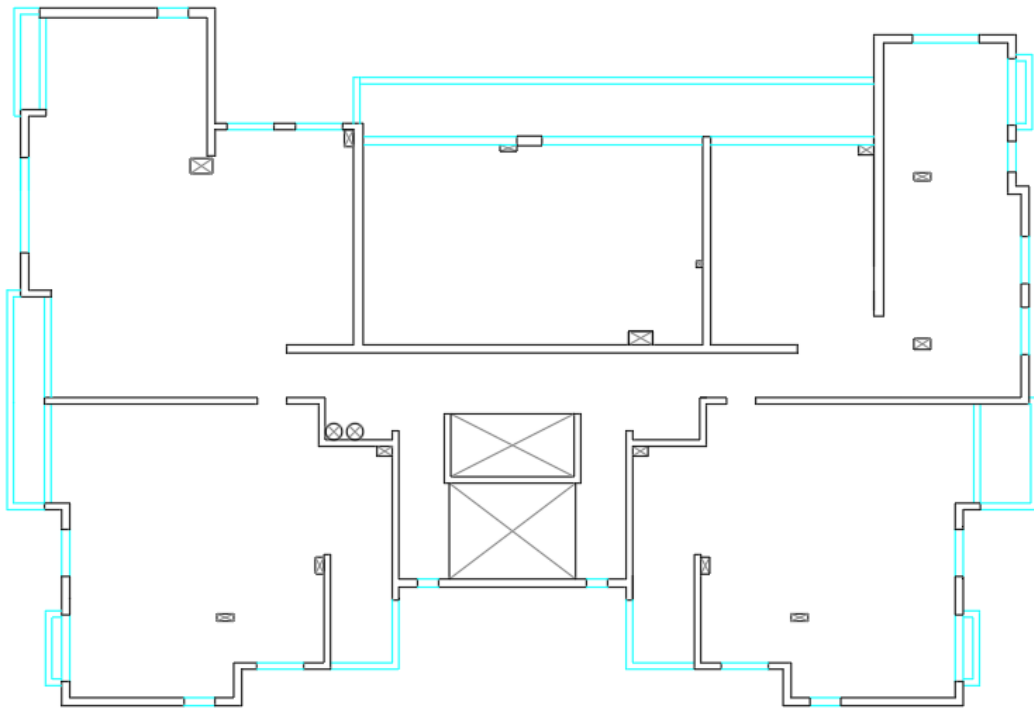


Figura 3.6.: Adaptación de plano estructural de plantas de los pisos 3 al 5.

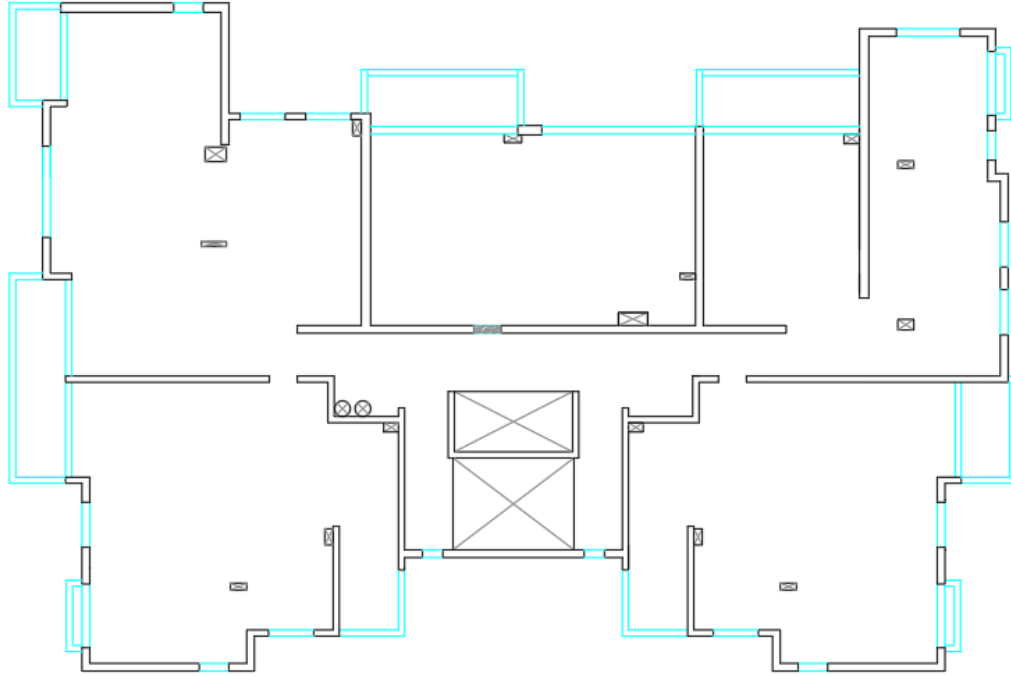


Figura 3.7: Adaptación de plano estructural de planta del piso 6.

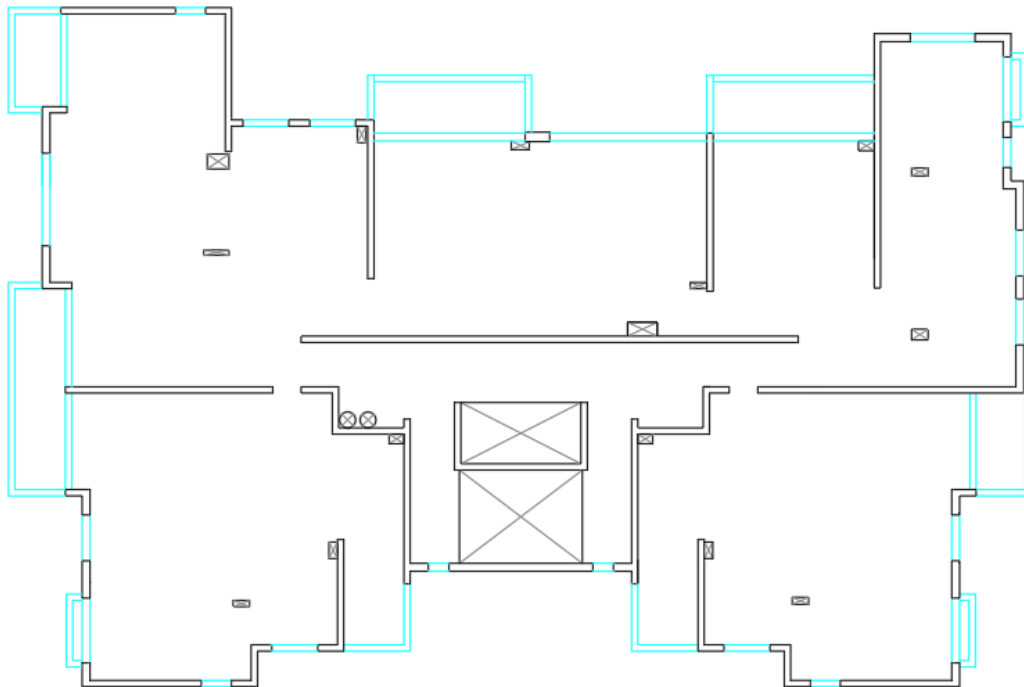


Figura 3.8: Adaptación de plano estructural de plantas de los pisos 7 al 15.

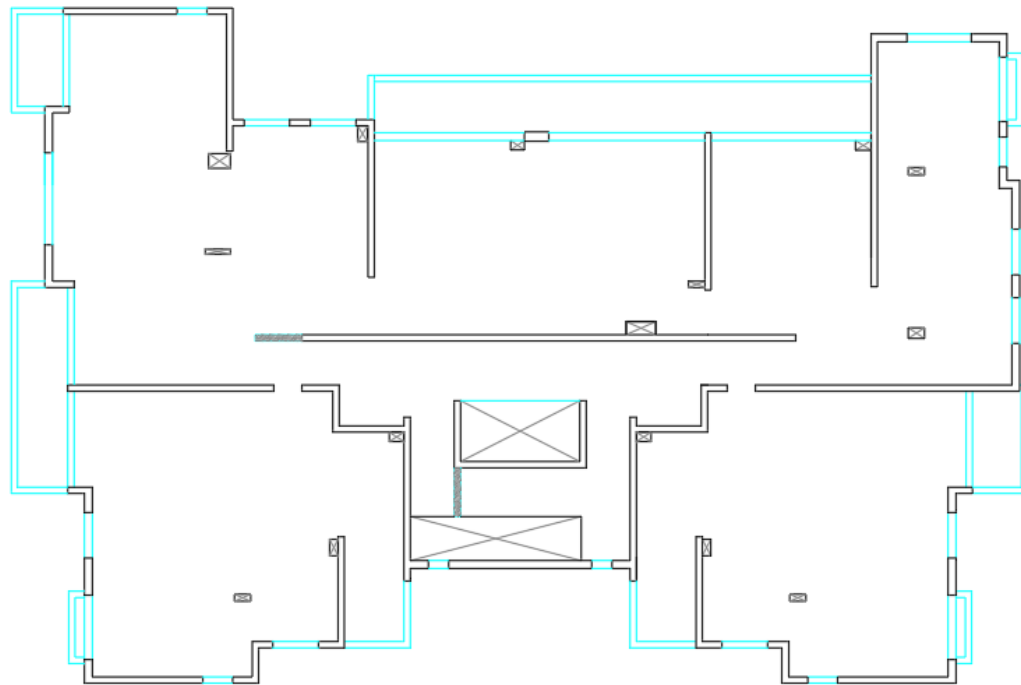


Figura 3.9: Adaptación de plano estructural de planta del piso 16.

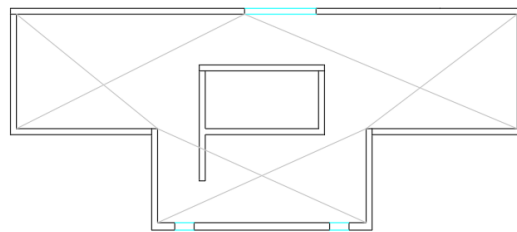


Figura 3.10: Adaptación de plano estructural de planta del piso 17.

El edificio se encuentra ubicado en la región de Valparaíso, Chile, su dirección es calle 5 Oriente 260, como referencia entre las calles 3 y 4 Norte (Lat -33.021, Long -71.545). En la Figura 3.11 se muestra una vista satelital de Viña del Mar y se puede observar de lejos el edificio Antígona con un marcador amarillo, en la Figura 3.12 se observa más cerca el edificio con el mismo marcador y los rótulos de las calles a su alrededor.

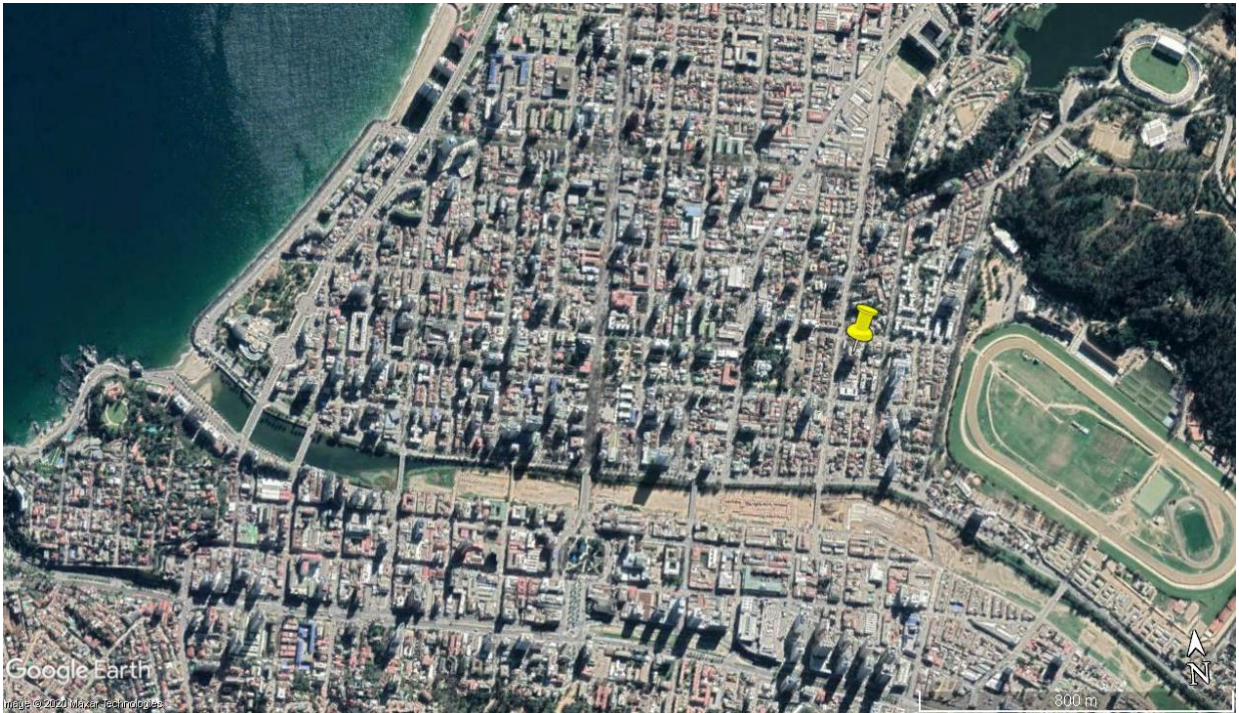


Figura 3.11: Vista satelital de ubicación de edificio Antígona con marcador en Viña del Mar (Fuente: Google Earth).

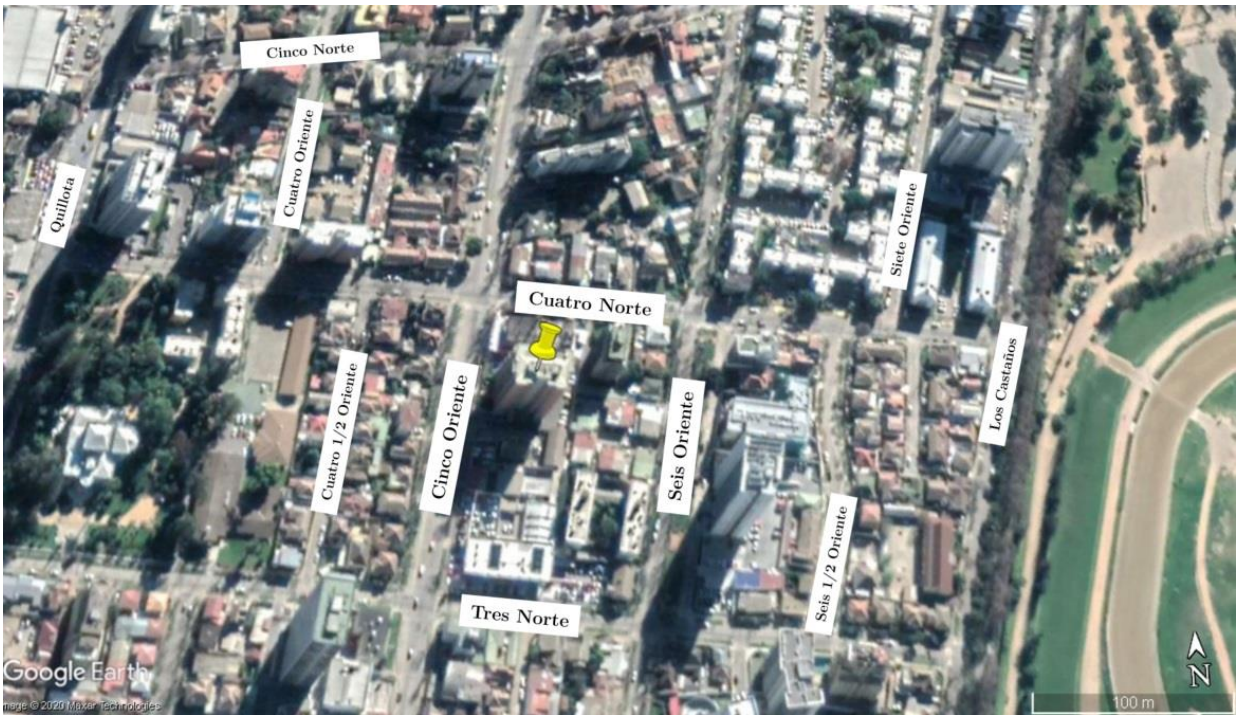


Figura 3.12: Vista satelital cercana de edificio Antígona con nombres de calles rotulados (Fuente: Google Earth).

3.1.2. Antecedentes geotécnicos de la zona

La zona donde se encuentra el edificio Antígona es conocida como cuenca del Marga-Marga en Viña del Mar, en los terremotos ocurridos en el último tiempo se han registrado daños severos en edificios. Es por la razón anterior que se han realizado diversos estudios del suelo de esta ciudad, específicamente en la cuenca del Marga-Marga.

El suelo de las superficies planas de la ciudad de Viña del Mar es el resultado de depósitos sedimentarios de la cuenca del estero Marga-Marga. Como consecuencia, los movimientos sísmicos registrados en estas áreas son normalmente más severos que los registrados en las colinas de la ciudad donde el lecho rocoso está cerca de la superficie del terreno (Aguirre & Perez, 2004). En la cuenca del estero se reconocen principalmente sedimentos fluviales en toda la superficie, alternados con depósitos marinos y algunos lacustres (Múñoz, 2013).

En diversos estudios se ha identificado la falla del Marga-Marga, la que se encontraría ubicada al norte de la estación sismológica Viña del Mar centro. Luego del terremoto de 2010 se presentan nuevos antecedentes y se presentan nuevas trazas de falla Marga-Marga y lineamientos paralelos a la falla (Muñoz et al., 2015) como se muestra en la Figura 3.13. Esta falla presenta una orientación N 50°W con manteo sub-vertical hacia SW y una extensión aproximada de cinco kilómetros de ancho por 48 kilómetro de largo (Toledo, 2017).



Figura 3.13: Ubicación de traza de la falla Marga-Marga en línea punteada roja, y lineamientos paralelos en color azul, que corresponderían a los límites de una zona de falla según Muñoz et al.(2015).

En la memoria de pregrado hecha por Serafini (2017) obtiene curvas de isoperíodos, isofrecuencias y de amplificación sísmica a partir de mediciones de H/V con sismógrafos en diferentes sitios de la cuenca del estero Marga-Marga. En las siguientes figuras se muestran estas curvas en donde los puntos rojos representan las mediciones realizadas.

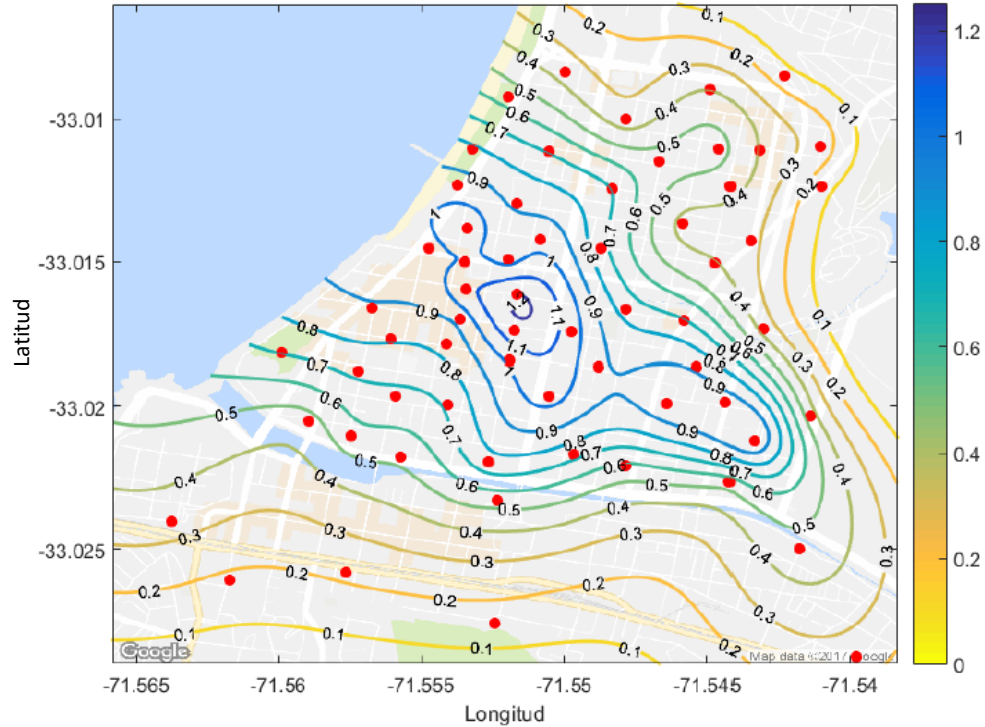


Figura 3.14: Mapa de curvas de isoperíodos en cuenca de estero Marga-Marga (Serafini, 2017).

De la Figura 3.14 se puede tener un valor aproximado del período del suelo de fundación del edificio Antígona que sería aproximadamente 0.95[s], mientras que de la Figura 3.15 se extrapola el valor de la frecuencia del suelo que sería aproximadamente 1.1[Hz]. A partir de la Figura 3.16 se observa una relación H/V peak que se asocia a la amplificación sísmica en la ubicación del edificio es de 3.5 aproximadamente, lo cual indicaría una amplificación sísmica debido a la respuesta de sitio en torno a la frecuencia fundamental del suelo.

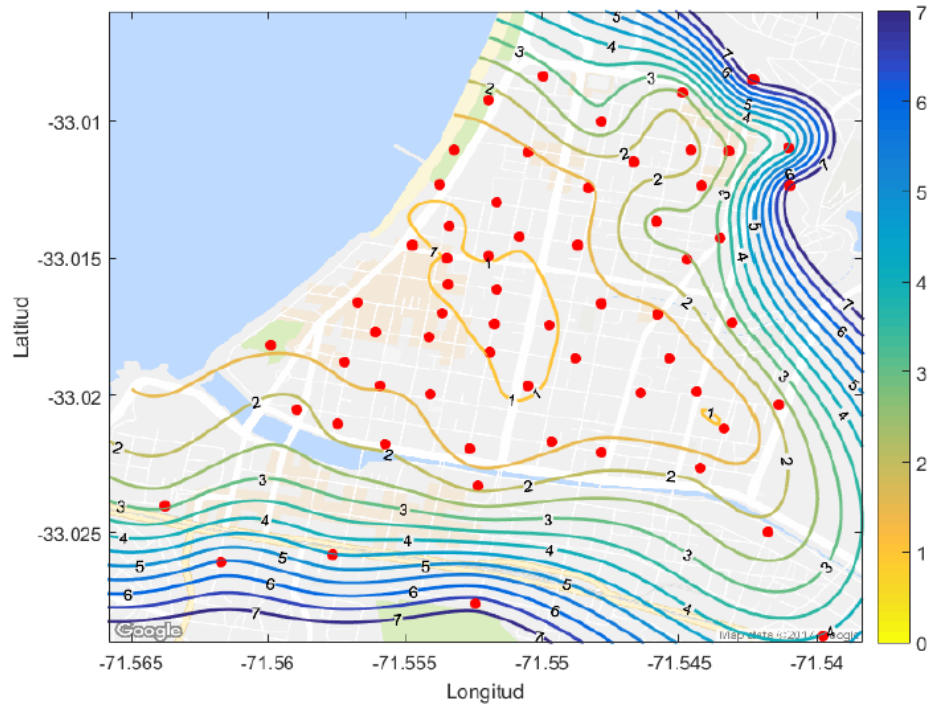


Figura 3.15: Mapa de curvas de isofrecuencias en cuenca de estero Marga-Marga (Serafini, 2017).

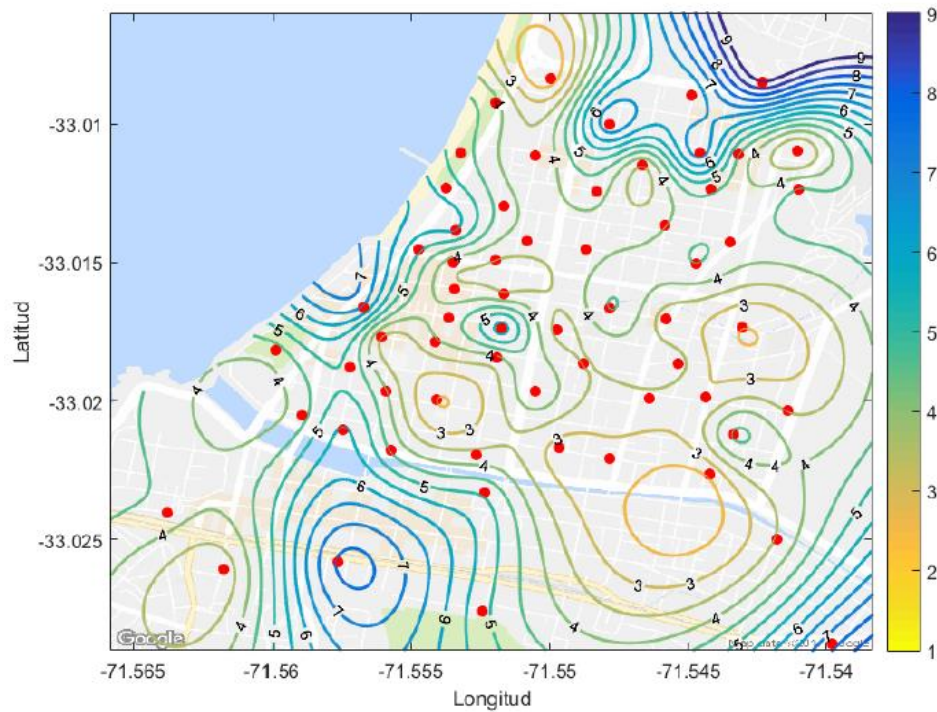


Figura 3.16: Mapa de amplificación sísmica según método Nakamura en cuenca de estero Marga-Marga (Serafini, 2017).

3.1.3. Daños estructurales por terremoto del 27 de Febrero de 2010

El 27 de Febrero de 2010, la zona centro-sur de Chile es azotada por un terremoto que alcanzó una magnitud de 8.8 M_w , convirtiéndose en el segundo de mayor magnitud registrado que ha afectado al territorio chileno. El epicentro del terremoto fue aproximadamente a 44[km] al Oeste de la comuna de Cobquecura (Lat. -36.41, Long -73.18) y una profundidad de 26[km], este se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en un área que se extiende aproximadamente desde la Península de Arauco por el sur hasta el norte de Pichilemu, cubriendo unos 450 [km] de longitud en dirección prácticamente N-S por un ancho de unos 150 [km]. Esta zona de contacto entre las placas, cuya expresión superficial es la fosa marina que se ubica unos 130 [km] de la costa hacia el Oeste, se localiza a lo largo del plano inclinado que define el área de fallamiento causante del terremoto (Barrientos, 2010). Como se muestra en el estudio realizado por M. Astroza et al.(2010) el terremoto afectó a estructuras de más regiones que las involucradas en la zona de ruptura, como se presenta en un esquema del estudio de daños realizado (Figura 3.18) en donde se muestran las intensidades sísmicas y las isosistas del área de estudio.

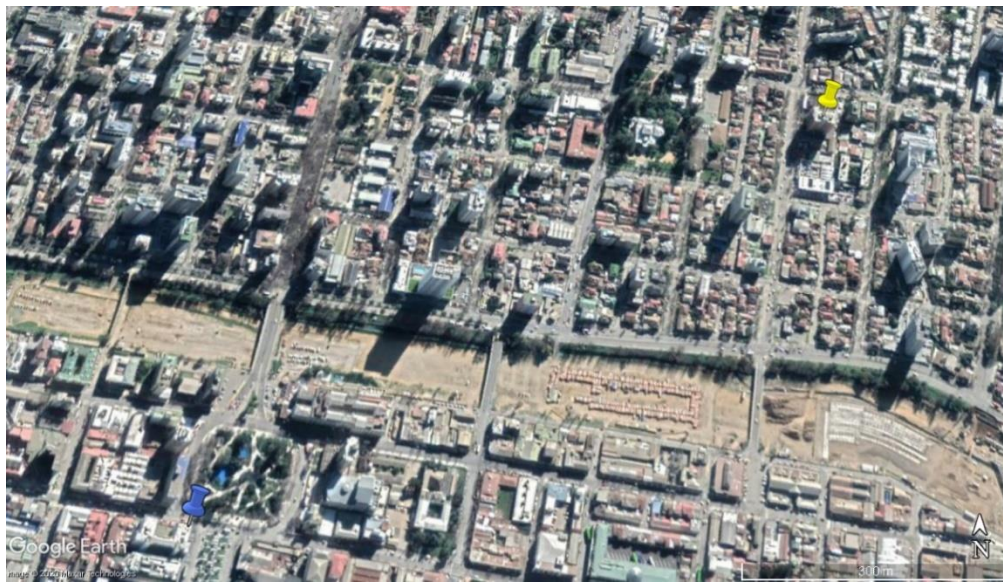


Figura 3.17: Ubicación de la estación VINA en campo libre de RENADIC de donde se obtuvieron los registros en Viña del Mar del 27F.

La comuna de Viña del Mar no se encuentra dentro del área en la que se produjo la ruptura del terremoto 27F, sin embargo en esta zona se alcanzó una intensidad sísmica I_{MKS-64} de VI (M. Astroza et al., 2012). El terremoto pudo ser percibido por la red de acelerógrafos de RENADIC (estación VINA) que se encuentra en las cercanías del edificio Antígona, es decir, a 926 [m] de este aproximadamente (Figura 3.17) , que registro un $PGA = 0.34g$ en la dirección E-O y un $PGA = 0.22g$ en la dirección N-S (Figura 3.19), cabe destacar que las

aceleraciones registradas pueden no tener relación con las experimentadas por el edificio debido a que se encuentra en la cuenca del estero Marga-Marga produciéndose efecto de sitio tal como se describió anteriormente. A partir de los registros de la estación VINA se generan espectros de respuesta en las direcciones N-S y E-O como se muestra en la Figura 3.20.

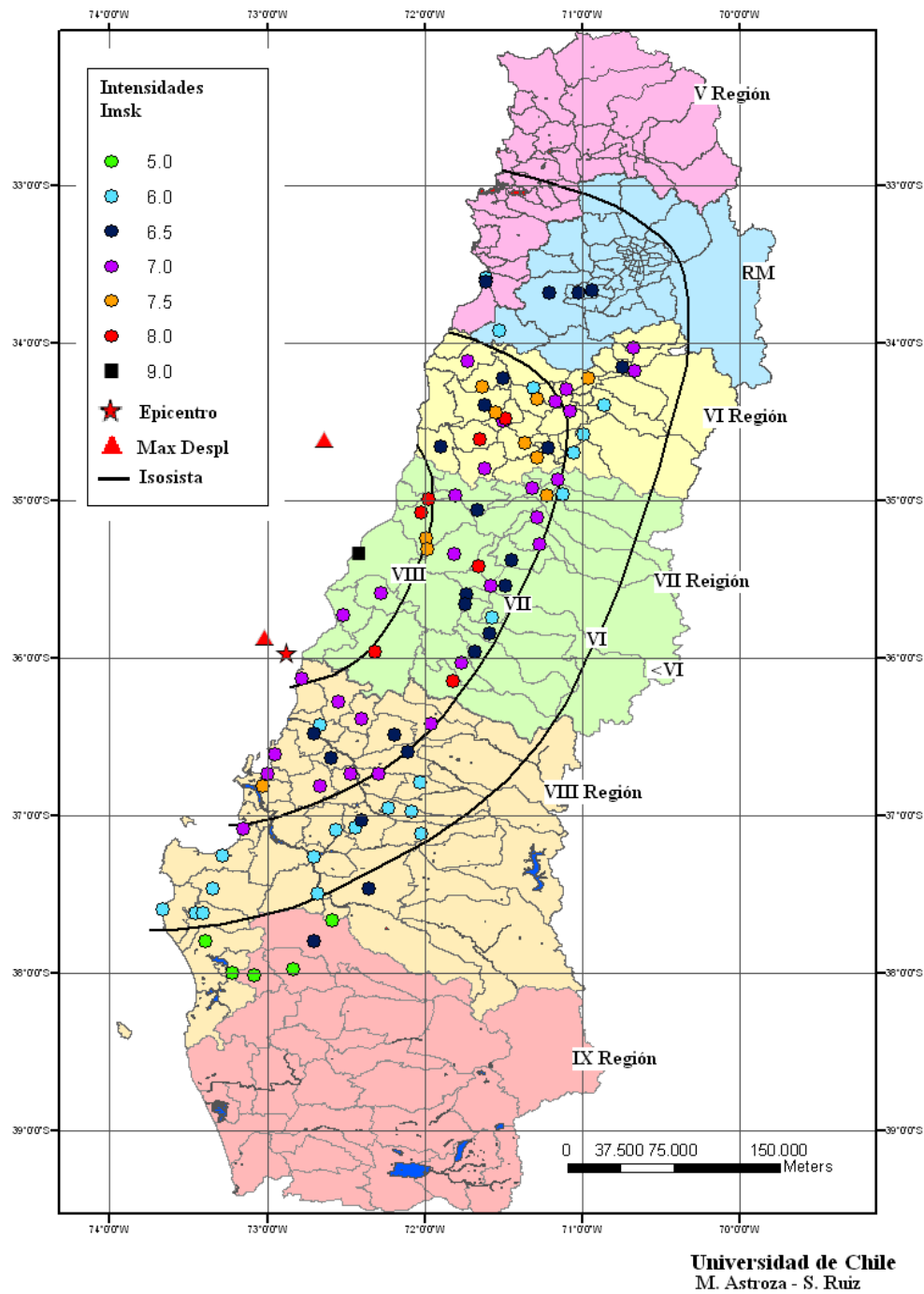


Figura 3.18: Intensidades sísmicas e isosistas producto del terremoto del 27 de Febrero del 2010 por región (M. Astroza et al., 2010).

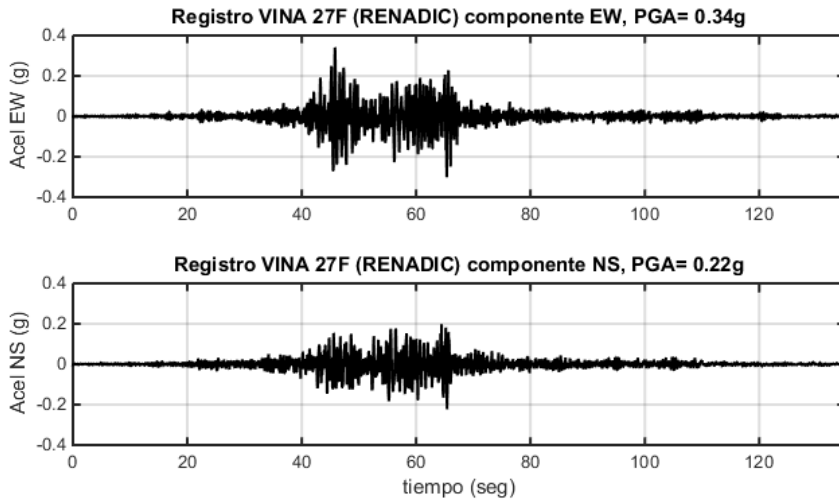


Figura 3.19: Registro de aceleraciones del terremoto del 27 de Febrero del 2010 registrado por la estación de campo libre VINA de RENADIC ubicada en Viña del Mar.

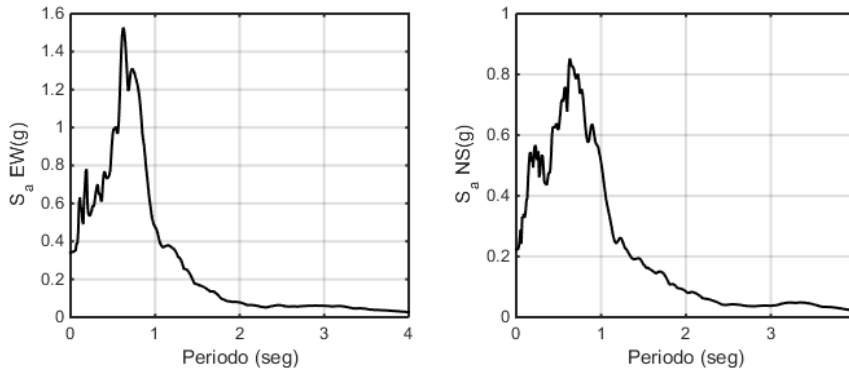


Figura 3.20: Espectro de respuesta de aceleraciones en la dirección EO y NS obtenidos a partir de los registros de aceleraciones del terremoto del 27F en estación VINA de RENADIC en Viña del Mar.

Producto del terremoto del 27F, el edificio Antígona sufrió severos daños en elementos estructurales, principalmente en el nivel del subterráneo -1 y en el primer piso, por lo que se tuvo que desalojar la estructura para poder analizar los daños y luego determinar si se repararía o demolería.

En el estudio realizado por Massone & Rojas (2012) se muestran los patrones de daños que se repiten en edificios de hormigón armado luego del 27F, los daños que sufrió el edificio Antígona, se apegan a estos patrones. A continuación, se presentan los principales daños que se observaron en el edificio Antígona.

3.1.3.1. Daños en muros estructurales

Los muros estructurales que presentaron mayores daños estaban en el primer piso y en el subterráneo -1 del edificio. En el primer piso se vio afectada la base del muro de la fachada oriente, cuya ubicación en planta se muestra en la Figura 3.21, en donde se observa una falta de confinamiento ocasionando el pandeo de las barras longitudinales del muro por flexo-compresión y la apertura lateral de armadura transversal (Figura 3.22).

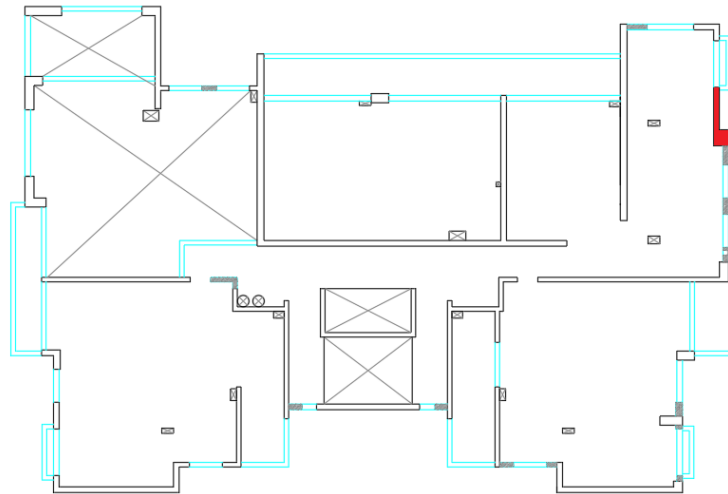


Figura 3.21: Ubicación del muro dañado en la fachada oriente del primer piso.



Figura 3.22: Muro estructural dañado de la fachada oriente del primer piso (Leiva et al., 2010)

En el subterráneo -1 se vio afectada la parte superior del muro interior, cuya ubicación en planta se muestra en la Figura 3.23, en donde se observa desprendimiento total del hormigón por falla por compresión, apertura hacia los lados del refuerzo transversal y pandeo del refuerzo longitudinal (Figura 3.24)

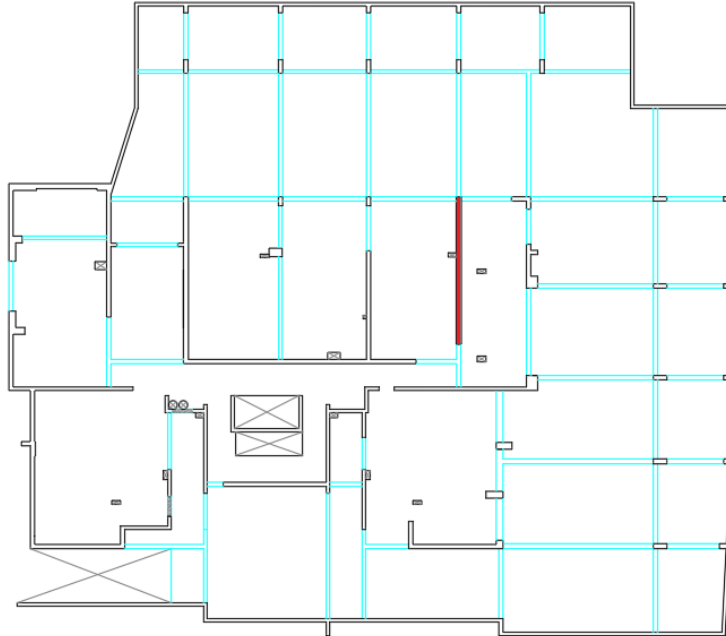


Figura 3.23: Ubicación del muro estructural dañado en el subterráneo -1.

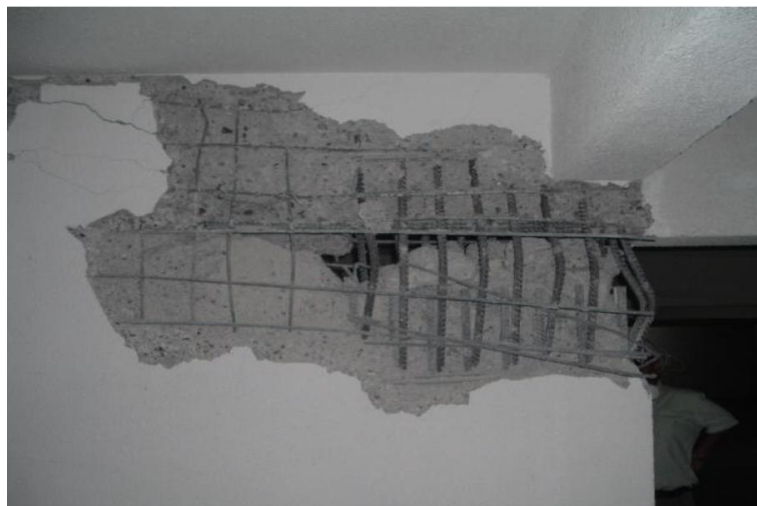


Figura 3.24: Muro estructural dañado en el subterráneo -1 (Leiva et al., 2010)

3.1.3.2. Agrietamientos en losas

Las losas que sufrieron daños tuvieron agrietamientos puntuales en varias localizaciones pudiéndose observar a simple vista. Las grietas más significativas se observaron en el pasillo de acceso a los departamentos (Figura 3.25), en donde se aprecia un desprendimiento del hormigón, por lo que la armadura de la losa y las tuberías quedan a la vista (Figura 3.26). Estos agrietamientos se atribuyen al acoplamiento de las losas sobre los dinteles de las puertas.

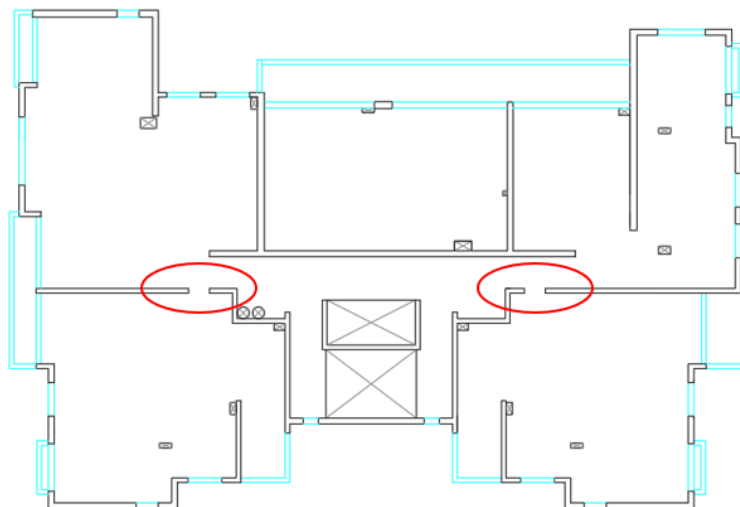


Figura 3.25: Ubicación general en planta de daño por acción de acoplamiento en losas.



Figura 3.26: Losa agrietada por acoplamiento de estas sobre dinteles de las puertas de acceso a departamentos (Leiva et al., 2010).

3.1.3.3. Daños en dinteles y machones

Los daños en dinteles y machones fueron producto de fallas por corte en el hormigón armado, los que principalmente se deben al efecto de columna baja con daños asociado a efectos de corte. En dinteles se observó desprendimiento del revestimiento exterior principalmente en la fachada oriente como se observa en la Figura 3.27.



Figura 3.27: Desprendimiento de revestimiento exterior de dinteles en fachada oriente (Leiva et al., 2010).

Las fallas de machones se tradujeron en desprendimientos del recubrimiento exterior, como se muestra ocurrió en la fachada norte del edificio (Figura 3.28) así como también en fallas del elemento estructural como se ve en la Figura 3.29 desde el interior del edificio.



Figura 3.28: Desprendimiento de revestimiento exterior de machones en fachada norte (Leiva et al., 2010).



Figura 3.29: Falla de machón por corte vista desde el interior de un departamento (Leiva et al., 2010).

3.1.4. Rehabilitación estructural

Debido a los daños estructurales del edificio se solicita un estudio de diagnóstico estructural en el cual se reportan los daños estructurales del edificio (Leiva et al., 2010), en tal informe se recomienda reparar la estructura (y no su demolición) de acuerdo a las propuestas de modificaciones de la norma sísmica disponibles a la fecha. Para la rehabilitación estructural del edificio, se solicita a la empresa RCP Ingeniería Ltda. realizar una inspección de daños, para luego proceder con la rehabilitación del edificio. En el informe técnico desarrollado, se presentan las reparaciones que se efectuaron a cada elemento estructural dañado (Concha, 2011).

Para la reparación del muro estructural dañado del primer piso mostrado en la Figura 3.22 se realiza un procedimiento de reparación de 6 etapas:

- Etapa 1: Alzaprimado
- Etapa 2: Demolición
- Etapa 3: Reforzamiento armaduras pandeadas
- Etapa 4: Colocación de armaduras de refuerzo
- Etapa 5: Hormigonado
- Etapa 6: Reparación de hormigón de recubrimiento

Para el muro estructural dañado del subterráneo -1 (Figura 3.23) se siguen etapas también, pero se modifica la etapa 6: Reparación zona de armadura distribuida.

Con respecto a los machones: se reparan dependiendo de si el daño es estructural o superficial, para el daño estructural se realiza en etapas similares a las de los muros en donde se contempla alzaprimado, demolición, verificación de cuantía de armadura horizontal, reemplazar armadura horizontal dañada y hormigonado. Para daño superficial se retira totalmente el revestimiento, sellamiento de grietas e inyección de resina.

En cuanto a los dinteles dañados se realiza un montaje de mantas de fibra de carbono para rehabilitarlos, este procedimiento se debe hacer por personal especializado.

Las losas agrietadas se reparan siguiendo los siguientes pasos: alzaprimado, demolición, retiro de residuos y limpieza de armadura, finalmente se hormigona.

En el informe técnico se encuentran los detalles de estas etapas de reparación de todas las estructuras dañadas para la rehabilitación y posterior ocupación del edificio.

3.1.5. Instrumentación permanente

El edificio Antígona se encuentra instrumentado permanentemente por RENADIC desde el año 2017, siendo uno de los últimos edificios instrumentados por esta red. Su instrumentación se hizo con el objetivo de obtener registros de aceleración para determinar propiedades dinámicas de la estructura y entender su comportamiento sísmico.

En el edificio se encuentran instalados 12 acelerómetros EpiSensor ES-U2 (Figura 3.30) de Kinematics con un rango dinámico de 155[dB]+ y un ancho de banda DC a 200[Hz], configurados a un rango medible de ± 2 [g], configurados para que el sistema registre las aceleraciones cuando alguno de los sensores sobrepase el umbral de 0.01[g]. Los acelerómetros se encuentran conectados a una central de registro sísmico de 12 canales del tipo Dolomite+ de Kinematics de 24[bit] configurada para registrar a una tasa de muestreo de 200[Hz] (DC a 80[Hz]).



Figura 3.30: Acelerómetro uniaxial EpiSensor Modelo ES-U2, marca Kinematics.

Los acelerómetros se distribuyen en las plantas del edificio como se muestra en la Figura 3.31, en el piso 1, 8 y 15 se encuentran en la losa mientras que en el subterráneo -2 se ubican en la fundación del edificio para encontrarse en campo libre. En la Figura 3.32, Figura 3.33, Figura 3.34 y Figura 3.35 se muestran fotografías de los EpiSensor instalados en las ubicaciones designadas.

En el piso 17, en la zona de calderas, se localiza la central Dolomite+, esta se encuentra conectada a los acelerómetros por 12 cables a través de tuberías Conduit de PVC y molduras Legrand que van desde el piso 17 hasta los pisos 15, 8 ,1 y subterráneo -2.

En la Tabla 3.1 se muestran las características de cada uno de los acelerómetros con la enumeración correspondiente al de la Figura 3.31, siendo cada canal el número de acelerómetro en la tabla.

Tabla 3.1: Características de acelerómetros EpiSensor instalados.

Canal	f_n [Hz]	β	Sensibilidad [VDC/g]
1	210	0.7	9.982
2	212	0.7	9.981
3	200	0.7	9.995
4	204	0.7	9.994
5	206	0.7	9.957
6	204	0.7	10.008
7	200	0.7	9.991
8	210	0.7	9.982
9	208	0.7	9.983
10	206	0.7	9.993
11	206	0.7	9.977
12	202	0.7	9.997

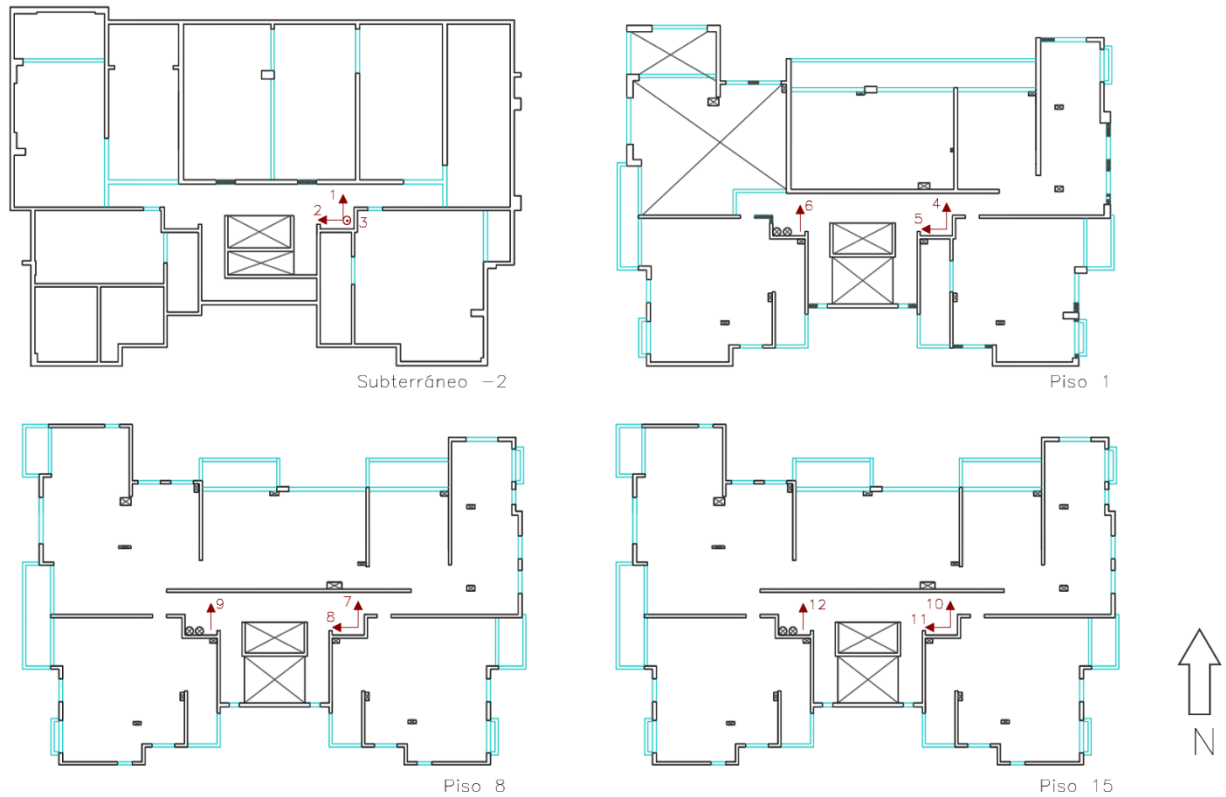


Figura 3.31: Instrumentación permanente en las plantas del subterráneo -2 y los pisos 1, 8 y 15. En donde las flechas indican su ubicación y orientación.



Figura 3.32: Fotografía de EpiSensor ubicados en subterráneo -2 en la fundación del edificio, considerados como campo libre del edificio, todos con diferente orientación N-S, E-O y uno vertical.

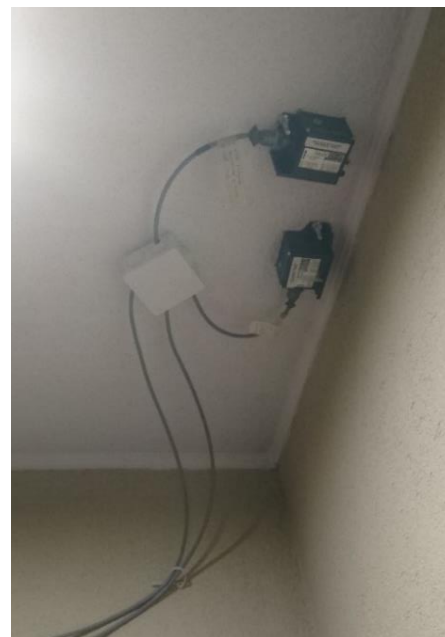


Figura 3.33: Fotografías de EpiSensor ubicados en la zona húmeda del Piso 1, a la izquierda se encuentra uno en dirección N-S, a la derecha se encuentran en dirección N-S y E-O.

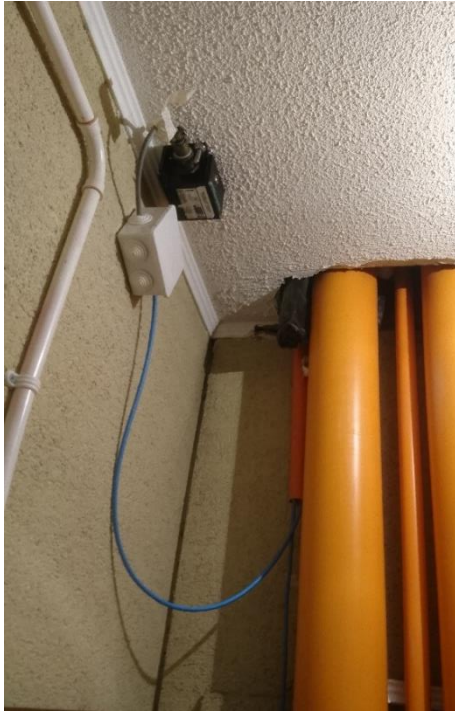


Figura 3.34: Fotografías de EpiSensor ubicados en la zona húmeda del Piso 8, a la izquierda se encuentra uno en dirección N-S, a la derecha se encuentran en dirección N-S y E-O.

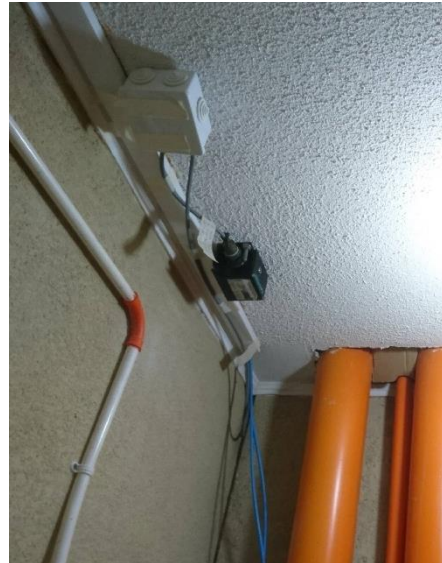


Figura 3.35: Fotografías de EpiSensor ubicados en la zona húmeda del Piso 15, a la izquierda se encuentra uno en dirección N-S, a la derecha se encuentran en dirección N-S y E-O.

3.2. Antecedentes Modelo Estructural

Para este trabajo se utiliza un modelo de elementos finitos del edificio Antígona que es originalmente elaborado por Betzabeth Suquillo (2017) para su tesis de magister y modificado por Matías Costa (2019) para su trabajo de título.



Figura 3.36: Modelo original utilizado en el trabajo de tesis de Betzabeth Suquillo (2017). La dirección N-S se corresponde con el eje Y.

El modelo original es confeccionado por Betzabeth en el programa ETABS v.16.2 (Figura 7.3) a partir de los planos estructurales. El material usado en el modelo es un hormigón de resistencia H30, es decir, una resistencia a compresión de $f'_c = 25[MPa]$ y un módulo de elasticidad $E = 21400[MPa]$, con elementos tipo *frame* (marcos) para vigas y columnas y elementos tipo *shell* (placas) para losas y muros. Los muros poseen diferentes espesores que varían entre 20 y 40 [cm] que se distribuyen en los 19 niveles considerando 16 pisos, 2 subterráneos y techumbre. La losa cuenta con un espesor de 18 [cm] en todos los niveles y también se encuentran con *stiffness modifiers* de $m_{11} = m_{22} = m_{21} = 0.5$ reduciendo la rigidez a flexión de la losa en un 50%.

El modelo utilizado por Matías es modificado para flexibilizarse y ajustarse a las propiedades dinámicas identificadas por el método DSI aplicado a los registros de la instrumentación permanente del edificio. Las modificaciones realizadas fueron aplicar *stiffness modifiers* a la losa de $m_{11} = m_{22} = m_{21} = 0.25$ reduciendo la rigidez a flexión de la losa en un 75%, también modificó el módulo de elasticidad a $E_c = 10700[MPa]$ reduciéndolo en un 50%. Finalmente presenta un modelo con períodos naturales que se asemejan a los resultados que obtuvo con el método DSI.

3.3. Antecedentes Plataforma

El trabajo de Matías Costa (2019) se centra en la creación de una plataforma que permite la generación de informes de la respuesta sísmica del edificio Antígona, procesándose datos obtenidos de su instrumentación permanente de manera eficiente y acabada, posibilitando que la información pueda ser rápidamente procesada por RENADIC y/o para generar informes de varios eventos sísmicos en forma automatizada. Esta herramienta permite el procesamiento casi automático de la respuesta sísmica de la estructura, luego de la percepción de un evento sísmico, información relevante para conocer el estado de la estructura luego de un sismo.

La plataforma de generación de informe del edificio Antígona trabaja con un esquema de carpetas (Figura 7.3) en las que se almacenan los archivos que conforman el programa. Las carpetas son:

- **ANTIGONAS:** Carpeta en la que se guardan los registros sísmicos disponibles del edificio.
- **Carpeta_de_resultados:** Carpeta de almacenamiento de los gráficos de los resultados y datos generados por las subrutinas de Matlab.
- **Funciones Matlab:** Carpeta en donde se encuentran las funciones de Matlab que conforman la rutina de la plataforma.
- **Informe_N°:** Carpeta de se reúnen los gráficos, datos obtenidos y código de LATEX que se generaron por las subrutinas de Matlab y conforman cada informe.
- **Informe_Base:** Carpeta en la que se encuentra el código de la plantilla de LATEX en la que se plasman los datos de cada informe, también se encuentran los archivos anexos (imágenes) de la plantilla.

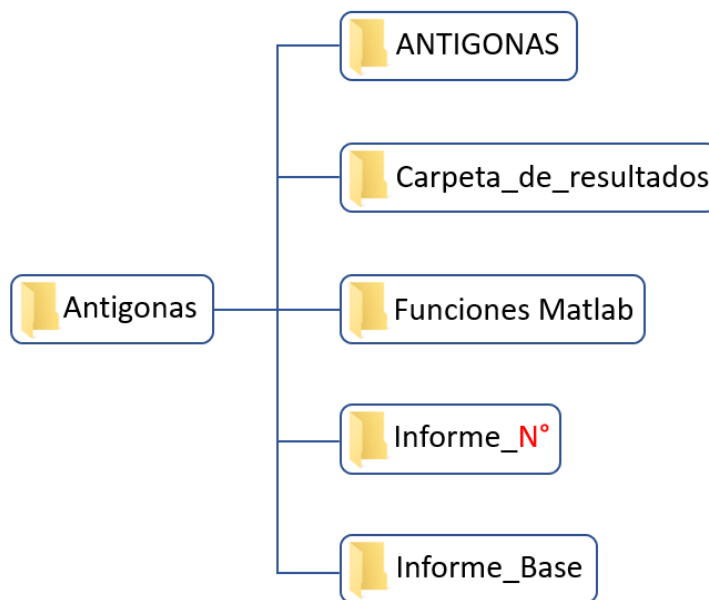


Figura 3.37:Esquema de organización de carpetas donde se trabaja y genera la información (Costa, 2019).

En la carpeta **Funciones Matlab** se encuentra el código de la interfaz principal, que es el encargado de generar los informes de respuesta sísmica. La metodología de este código se basa en considerar dos elementos, los registros sísmicos y el informe base realizado en LATEX, para procesar los registros y generar los resultados estructurales del edificio, y luego genera un código LATEX que se plasme sobre el informe base completando la información de la respuesta estructural.

En una primera instancia, el código de la plataforma se encarga de identificar los registros sísmicos y procesarlos generando una matriz en la que cada columna contiene las aceleraciones registradas por los sensores de la estructura, con el propósito de crear archivos con la siguiente información:

- Gráfico del o los registros sísmicos.
- Tabla resumen de o los eventos sísmicos (entrega información como magnitud del sismo, distancia al epicentro, intensidad de Arias, potencial destructivo, entre otros).
- Tabla con la aceleración, velocidad y desplazamiento máximo registrado por los diferentes sensores por evento sísmico.
- Gráfico del espectro elástico del o los registros sísmicos, computados según el método de Newmark.
- Gráfico con los espectros de potencia y funciones de transferencia, calculados mediante el método de Welch.
- Grafico del método DSI empleando matrices de peso.
- Formas modales asociadas a las frecuencias identificadas por el método DSI.

Una parte de la plataforma trabaja con el modelo de elementos finitos de ETABS (Figura 3.36) con las modificaciones mencionadas en la sección anterior, el cual se ocupa en conjunto con las rutinas de Matlab, agregando al informe resultados importantes entregados por el modelo, dentro de los que se seleccionan:

- Corte por piso.
- Deformaciones relativas entre pisos.

Cabe destacar que los resultados obtenidos del modelo de ETABS son rescatados desde la plataforma una vez que el modelo ya se corrió, proceso que se debe hacer manualmente, previo a la compilación del informe final del evento sísmico. En este sentido se menciona que los archivos *.e2k no han podido ser ejecutados desde una plataforma externa como MATLAB y por tanto no se puede realizar el análisis automático de los resultados. Teniendo en cuenta que el puente Marga-Marga posee un proceso automático del modelo a partir de archivos *.s2k realizados en SAP2000.

Capítulo 4

Campañas de Medición

En este capítulo se describen las campañas de mediciones de vibraciones ambientales realizadas con diferentes equipos. Estas campañas consisten en mediciones de prueba y mediciones en el edificio, con el fin de comprobar en primera instancia si los instrumentos otorgan los resultados esperados, que serían la obtención de formas modales y frecuencias naturales, y luego realizar las mediciones definitivas al edificio Antígona para todos sus niveles.

4.1. Equipos de Medición

Para las campañas de medición se utilizaron dos instrumentos diferentes para las pruebas y una primera medición del edificio se emplearon TROMINO, pero luego se optó por el uso definitivo de EpiSensor en la medición de microvibraciones ambientales del edificio. A continuación, se describen los instrumentos utilizados.

4.1.1. Sismómetro TROMINO

En primera instancia se utilizan sismómetros TROMINO (Figura 4.1) para la medición de microvibraciones. Instrumentos pertenecientes al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.



Figura 4.1: Sismómetro TROMINO.

Los sismómetros TROMINO son instrumentos denominados all-in-one ya que están equipados con 3 canales de velocímetros, 3 canales de acelerómetros y un canal análogo,

también posee GPS, un transmisor/receptor de radio y sistema de activación por radio, también cabe mencionar que son instrumentos inalámbricos alimentados energéticamente por 2 baterías AA (1.5V) y funcionan en el rango [0.1,1024]Hz.

Para la grabación de registros el equipo debe ser configurado con la frecuencia de muestreo, tiempo de grabación y programa. Los programas son 5 configuraciones en las se define si habrá uso de GPS, uso de marcador de tiempo y si la grabación comienza manual o automáticamente, de los 5 programas se utilizan los programas 1 y 5 (Figura 4.2).

Estos sismómetros requieren de un software llamado GRILLA para poder descargar los datos registrados al conectarlo por cable USB a un computador. El programa GRILLA sirve para archivar, organizar, visualizar y analizar los registros del TROMINO y su licencia viene con el instrumento.

El sensor TROMINO ha sido ampliamente utilizado para caracterización dinámica del subsuelo, sin embargo, para estructuras y monitoreo de vibraciones no se han encontrado muchos autores que hayan obtenido los resultados esperados realizando mediciones de este tipo, por lo que se propone generar una metodología de medición y de procesamiento de datos para la conseguir el objetivo de las mediciones.

PROGRAM 1		PROGRAM 5	
CHANNELS	#	CHANNELS	#
GPS DATA	NO	GPS DATA	YES
START	MANUAL	START	ONLY MANUAL/AT 10 MIN/AT 15 MIN/AT 20 MIN/AT 30 MIN
MARKER	NO	MARKER	YES

Figura 4.2: Programas de configuración de grabación de registros con sismómetros TROMINO (Micromed s.p.a., 2012).

4.1.2. Acelerómetros EpiSensor

Para las mediciones de microvibraciones del edificio Antígona se utilizaron acelerómetros EpiSensor ES-U2 de Kinometrics (Figura 3.30), junto con un sistema de adquisición de datos y filtrador de señales DaqBook/2000 multicanal conversión analógica digital, y un computador portátil. Todo lo anterior perteneciente al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

El sistema de adquisición de datos DaqBook/2000 (Figura 4.3) es un sistema con interfaz Ethernet convertidor análogo-digital de 16 bits a 200[kHz], posee 16 entradas de terminal común u 8 diferenciales, que se pueden expandir hasta 256 con módulos DBK, 40 entradas/salidas digitales, 4 salidas analógicas de 100[kHz] de frecuencia a 16 bits.

El sistema de adquisición fue configurado con una ganancia $\times 10$ durante las mediciones realizadas y con un filtro pasa bajos analógico conectado a través de una tarjeta de expansión a 100[Hz]. Este sistema requiere de un software llamado DaqView para la extracción de los datos en el computador portátil, y a través de este obtener los datos registrados en formato ASCII o *.mat (archivo de texto o para ser leído por MATLAB). Para las mediciones el sistema es alimentado energéticamente con baterías, sin requerir electricidad.



Figura 4.3: Sistema de adquisición de datos DaqBook/2000.

4.2. Mediciones de Prueba

Para trabajar con sismómetro TROMINO en la medición de microvibraciones ambientales de una estructura se debe validar una metodología de su uso, por lo que se realizan las pruebas de estos equipos. Las mediciones de prueba también incluyen el procesamiento de los datos para analizar los resultados obtenidos y determinar si estos son los esperados o si deben realizar más pruebas para mayor certeza.

Las mediciones de prueba fueron realizadas en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile con 4 equipos TROMINO, exceptuando la última prueba hecha en el Edificio Antígona, en la Tabla 4.1 se muestra una breve descripción de las mediciones realizadas en la facultad. Cada equipo TROMINO posee una denominación que permite distinguir cada uno en las mediciones, esta denominación es: DGF1, DGF2, DGF3 y DGF4.

Para cada una de las mediciones hechas con TROMINO se sigue el procedimiento de configuración utilizado por Li et al. (2016) en el que no se utilizan GPS ni la radio porque la señal se bloquea dentro de estructuras cerradas, en donde también se deben sincronizar manualmente los instrumentos antes de cada medición para que tengan el mismo tiempo en sus relojes internos, lo que se hace en algún lugar que reciban la señal satelital, para lo cual se requiere utilizar el programa 5 del TROMINO que usa sintoniza el tiempo una vez que el sismómetro se conecta con la red GPS, luego de esto se puede movilizar el sensor en algún lugar sin señal GPS y comenzar la medición con el tiempo UTC, que sería el mismo para diversos sismómetros si es que todos tienen el proceso de sintonización (permitiendo generar registros con un tiempo común).

A continuación, se realiza una descripción de cada una de las mediciones realizadas y su objetivo.

Tabla 4.1: Descripción general de mediciones de prueba con TROMINO.

Medición	Fecha	Ubicación	Descripción
Medición Prueba 1	02/08/2019	Edificio Geofísica – Ingeniería Civil	Prueba de 4 TROMINO en el mismo piso y dirección.
Medición Prueba 2	05/08/2019	Edificio Justicia Espada Acuña Mena (ex Torre Central)	Medición por piso, 2 TROMINO en piso 6 fijo y descendiendo con 2 TROMINO
Medición Prueba 3	23/08/2019	Laboratorio Dinámica de Estructuras	Medición de estructura pequeña con TROMINO 1 y 2 EpiSensor para calibración.
Medición Prueba 4	30/08/2019	Laboratorio Dinámica de Estructuras	Medición de estructura pequeña con TROMINO 3 y 4 EpiSensor para calibración.

4.2.1. Medición Prueba 1

La primera medición de prueba tuvo como objetivo familiarizarse con los instrumentos y probar la configuración para medir dentro de un edificio, así como también calibrar los sismómetros.

Esta medición se realizó en el tercer piso del edificio de Geofísica - Ingeniería Civil en área de Hidráulica, Ambiental y Sanitaria. Para la sincronización de los equipos se colocaron en la terraza de Geofísica del edificio, luego se movieron y ordenaron los 4 en dirección N-S con la configuración de la Tabla 4.2 para comenzar a medir.

4.2.2. Medición Prueba 2

La segunda medición de prueba tuvo como objetivo obtener registros de microvibraciones ambientales de diferentes pisos de un edificio y con estos obtener características dinámicas como las formas modales del edificio a través del método SSI.

Esta prueba se realizó en el edificio Justicia Espada Acuña Mena y constó de 4 mediciones, en todas estas, dos instrumentos estuvieron en el piso 6 mientras que los otros dos sensores bajaron piso por piso desde el piso 5 al 2. En esta prueba se orientan los sensores en la dirección N-S y por piso se separan por una distancia considerada constante para todos los pisos (Figura 4.4). Se utiliza la configuración de la Tabla 4.2, y para cada medición de deben sincronizar los sensores en el exterior del edificio.

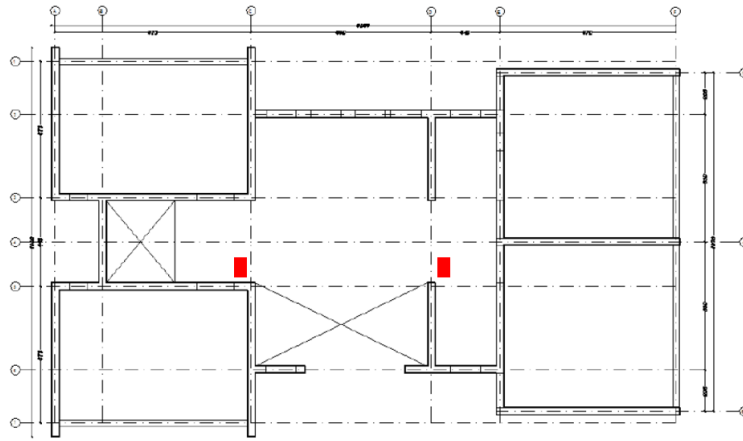


Figura 4.4: Planta piso tipo edificio Justicia Espada Acuña Mena con ubicación de sensores (Adaptado de Bilbao (2014)).

4.2.3. Medición Prueba 3

La tercera medición de prueba tuvo como objetivo calibrar los sensores DGF1 y DGF2, a través de la vibración del instrumento en un espectro de bajas frecuencias ($<1[\text{Hz}]$) en conjunto con acelerómetro EpiSensor y así comparar las señales de ambos sensores.

Esta prueba se realizó en el laboratorio de dinámica de estructuras en el primer piso del edificio Geofísica – Ingeniería Civil, sobre una estructura pequeña con movimiento en una sola dirección (Figura 4.5 c)), es por esto que para calibrar en dirección N-S y E-O (Figura 4.5 a) y b)) se deben realizar una medición por dirección del sensor, colocando perpendicular el acelerómetro en cada medición, adicionalmente se le agregan masas a la estructura para modificar su período fundamental (Figura 4.5 d)), siendo 3 estados de carga de pesos distintos el primero sin peso adicional, el segundo con la mitad de los pesos y el último con el peso, por lo que son 3 mediciones por dirección de sensores dando un total de 12 mediciones. Para la sincronización de ambos instrumentos se golpea 3 veces con un combo la plataforma sobre la que se encuentra la estructura. La configuración de los sensores utilizada se muestra en la Tabla 4.2.

4.2.4. Medición Prueba 4

La cuarta medición posee el mismo objetivo que la tercera medición, pero para los sensores DGF3 y DGF4. Por lo que se realiza en el mismo lugar y con el mismo procedimiento mostrado en la Figura 4.5, con la configuración mostrada en la Tabla 4.2.

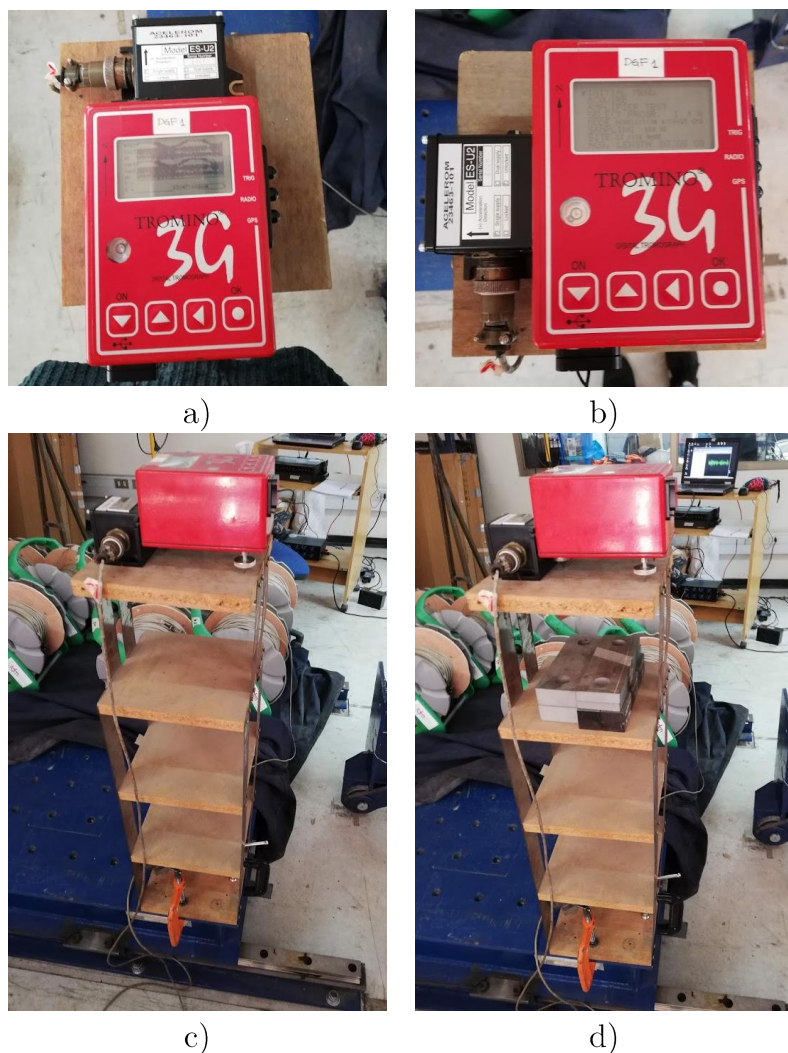


Figura 4.5: Fotografías de medición de prueba 3 (análogo con medición de prueba 4): a) Medición de microvibraciones en dirección N-S, b) Medición de microvibraciones en dirección E-O, c) Vista de estructura de baja frecuencia en medición, d) Vista de estructura con pesos para modificar período de la estructura.

Tabla 4.2: Configuración de TROMINO para mediciones de prueba.

Medición	Duración [min]	f_s [Hz]	Programa
Medición Prueba 1	10	512	5
Medición Prueba 2	10	512	5
Medición Prueba 3	8	512	1
Medición Prueba 4	8	512	1

4.2.5. Medición de Prueba en Edificio Antígona

La quinta medición tuvo como objetivo comenzar las mediciones definitivas del edificio Antígona y calibrar los sensores, para esta se utilizaron 4 sismómetros TROMINO y 2 acelerómetros EpiSensor. Esta campaña se realizó el día 4 de septiembre del 2019 y constó de 7 mediciones, la primera fue una calibración en el piso 16 con todos los instrumentos, 5 de estas mediciones fueron del piso 16 con otros pisos y la última medición fue una medición de suelo con sismómetros (Tabla 4.3). La ubicación de los sensores se puede observar en la vista en elevación del edificio (Figura 4.7) del corte en la planta del eje A-A de la Figura 4.6.

Tabla 4.3: Descripción de cada medición en la primera campaña de medición al edificio Antígona con sismómetros.

Medición	Descripción
M0	Calibración de sensores TROMINO en piso 16 con uso de 2 EpiSensor.
M1	Medición de piso 12 con 2 sensores y piso fijo 16 con 2 sensores.
M2	Medición de piso 8 con 2 sensores y piso fijo 16 con 2 sensores.
M3	Medición de piso 4 con 2 sensores y piso fijo 16 con 2 sensores.
M4	Medición de piso 2 con 2 sensores y piso fijo 16 con 2 sensores.
M5	Medición de piso 17 con 2 sensores y piso fijo 16 con 2 sensores.
MEDHV	Medición de suelo en las cercanías del edificio.

En la Tabla 4.4 se muestra la configuración utilizada en sensores TROMINO para cada una de las mediciones efectuadas dentro de la primera campaña de mediciones en el edificio Antígona.

Tabla 4.4: Configuración de sensores TROMINO para primera campaña de mediciones del edificio Antígona.

Medición	Duración[min]	f_s [Hz]	Programa
M0	8	512	5
M1	30	512	5
M2	30	512	5
M3	30	512	5
M4	30	512	5
M5	30	512	5
MEDHV	20	512	5

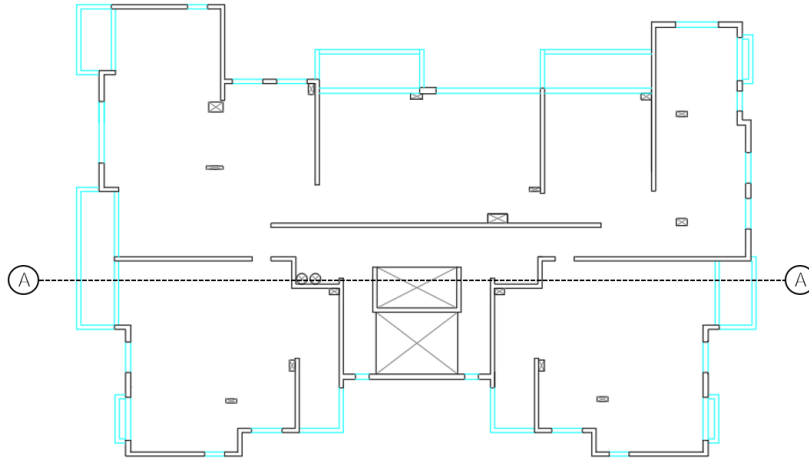


Figura 4.6.: Planta de piso tipo de edificio Antígona con corte en eje A-A donde se posicionan los instrumentos de medición.

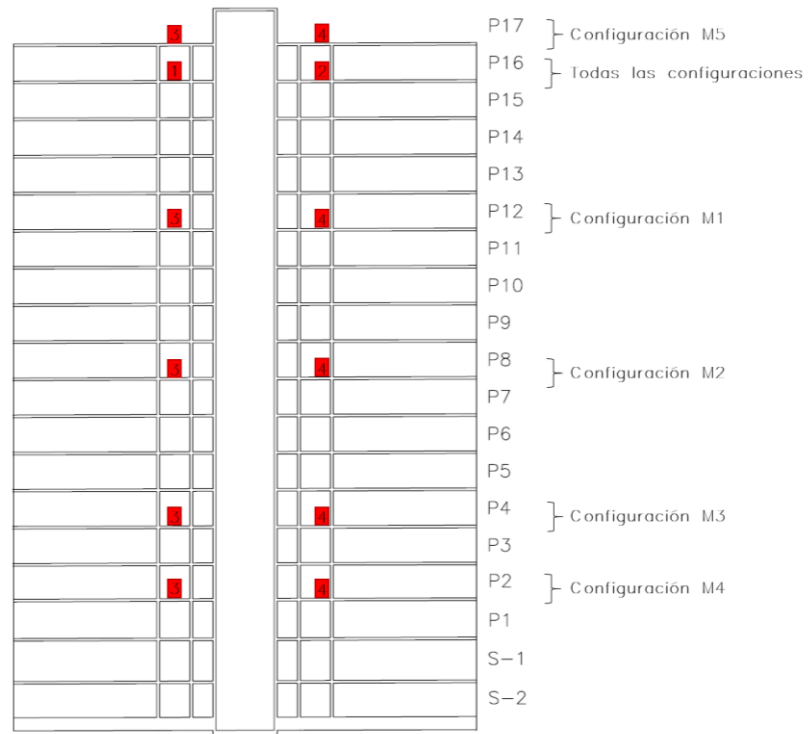


Figura 4.7.: Disposición de sensores por piso en medición de prueba en edificio Antígona, en vista en elevación del corte A-A (Figura 4.6).

La medición de suelo es realizada en la vereda del frente del edificio como se muestra en la Figura 7.3, con dos de los equipos DGF1 y DGF2 ambos situados en la misma dirección que las demás mediciones realizadas en el edificio Antígona.



Figura 4.8: Medición de suelo con sismómetros TROMINO.

4.3. Campañas de Mediciones en Edificio Antígona

Las mediciones de microvibraciones ambientales del edificio Antígona fueron hechas con el objetivo de obtener información sobre su comportamiento sísmico de todos sus pisos, ya que la instrumentación permanente solo entrega información de 3 pisos diferentes. Se realizaron 2 campañas de mediciones con acelerómetros EpiSensor en el edificio Antígona.

4.3.1. Primera Campaña de Medición

La primera medición tuvo como objetivo realizar las mediciones de microvibraciones definitivas del edificio Antígona con acelerómetros EpiSensor, para determinar las propiedades dinámicas de todos los pisos del edificio. Esta campaña se realizó el día 6 de enero de 2020 y constó de 5 mediciones, la primera fue una calibración en el piso 16 con todos los instrumentos y las otras 4 mediciones fueron del piso 16 con otros pisos. Los datos se detallan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Datos de primera campaña de medición con acelerómetros en edificio Antígona.

Medición	Duración[<i>min</i>]	f_s [Hz]
Antígona 0	5	200
Antígona 1	20	200
Antígona 2	20	200
Antígona 3	20	200
Antígona 4	10	200

Para cada medición se cuenta con 12 acelerómetros y se destinan 3 de estos sensores para cada piso que se debe medir. El computador portátil y el sistema de adquisición de datos para todas las mediciones se encuentran en el piso 16, por lo que también los sensores de los canales 1, 2 y 3 se encuentran fijos en este piso. Los sensores se conectan por cable y estos se llevan a cada piso por las escaleras de emergencia del edificio. En las siguientes figuras se esquematiza la ubicación, direcciones de los sensores y organización de los canales de los sensores.

En la medición Antígona 2 se produce un error de conexión con los sensores del piso 10, por lo que no se obtienen registros de microvibraciones, y se obtienen registros solo de los pisos 16, 14 y 6.

Para abarcar el piso 10, que no se pudo medir en Antígona 2 se realiza una medición con la misma configuración de Antígona 3, pero cambiando los sensores del piso 9 al 10 y dejando los otros en los mismos pisos por temas de tiempo. Dada la razón anterior, es que esta medición solo tiene una duración de 10 min.

Medición Antígona 1

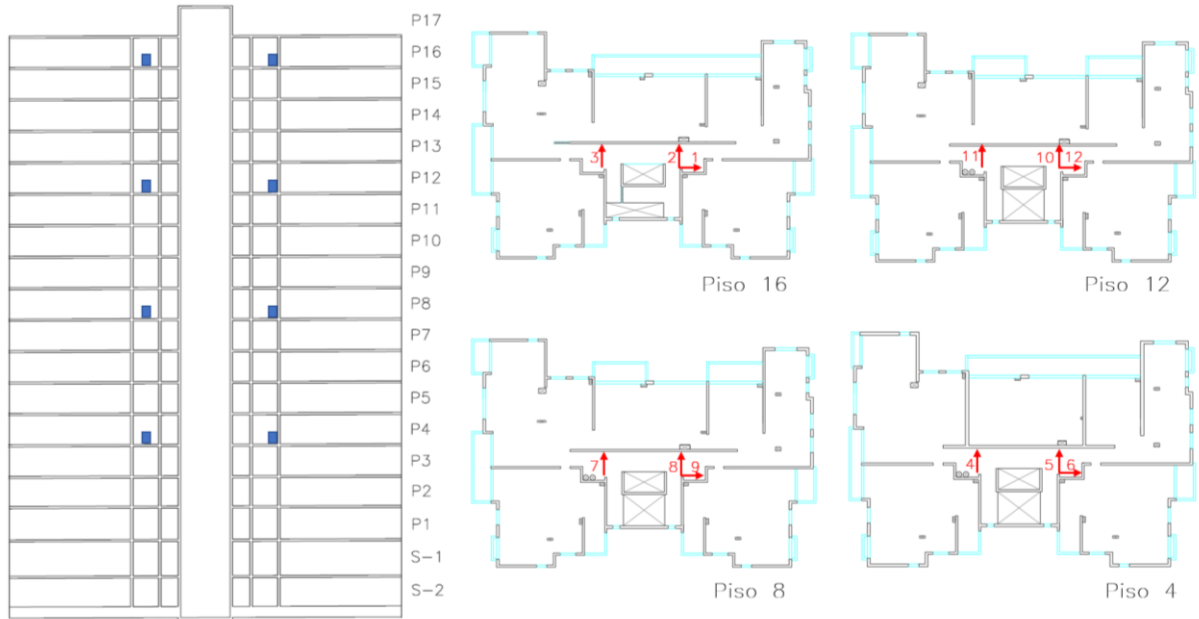


Figura 4.9: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 1.

Medición Antígona 2

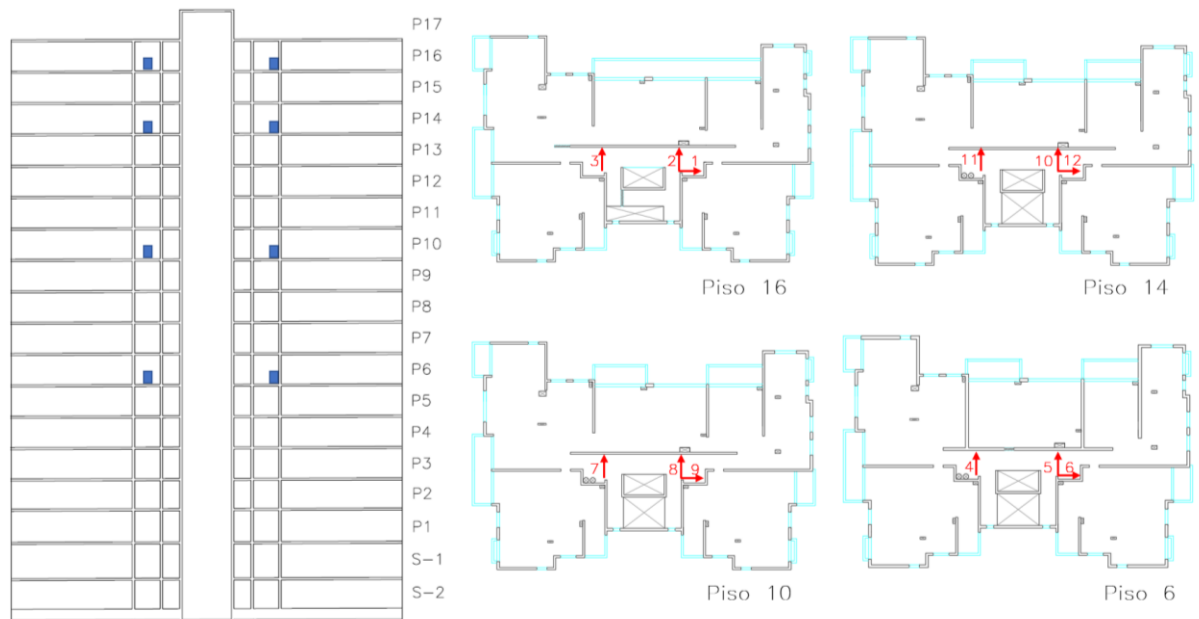


Figura 4.10: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 2.

Medición Antígona 3

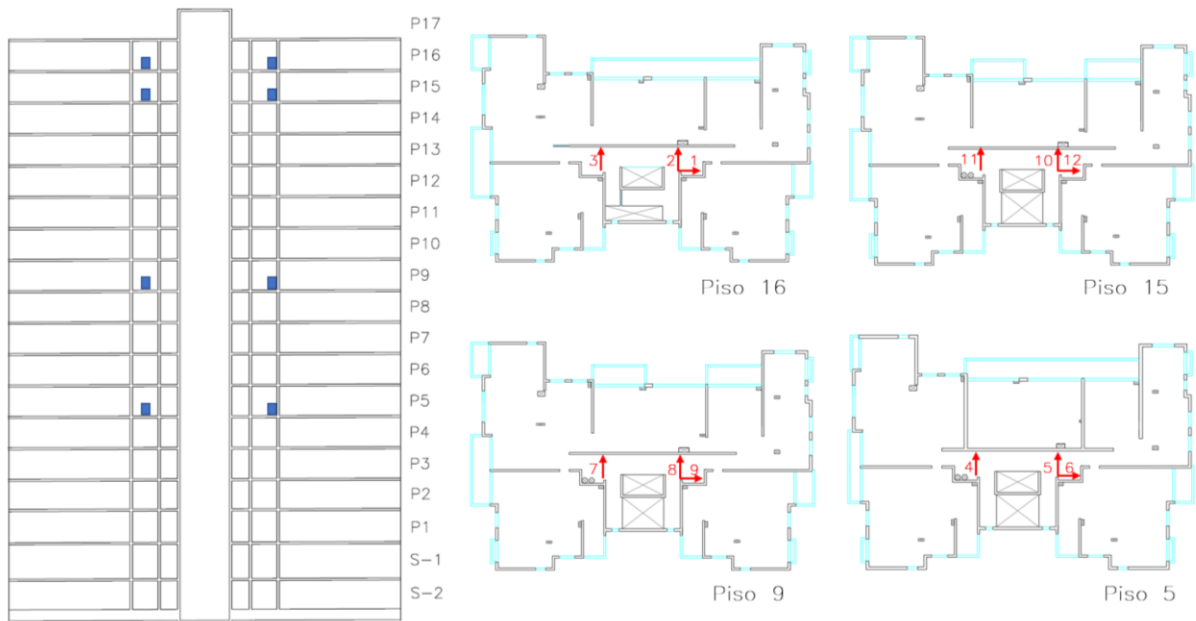


Figura 4.11: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 3.

Medición Antígona 4

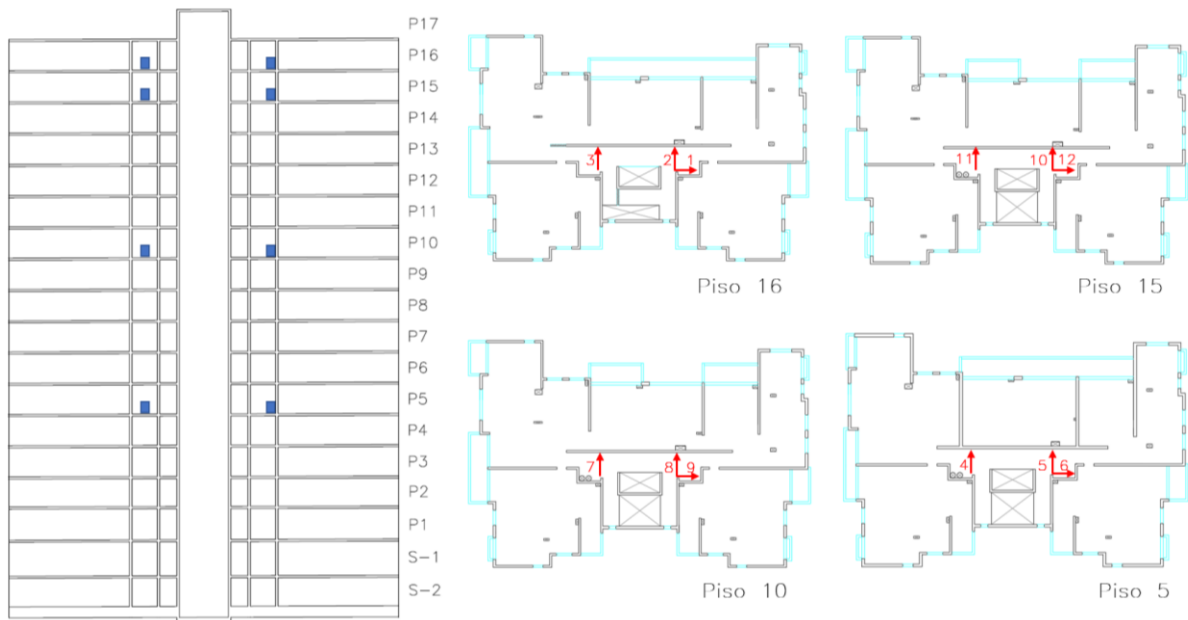


Figura 4.12: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 4.

4.3.2. Segunda Campaña de Medición

La segunda campaña de medición tuvo como objetivo completar las mediciones de microvibraciones definitivas del edificio Antígona con acelerómetros EpiSensor, para determinar las propiedades dinámicas de todos los pisos del edificio. Esta campaña se realizó el día 8 de enero de 2020 y constó de 4 mediciones, la primera fue una calibración en el piso 16 con todos los instrumentos y las otras 3 mediciones fueron del piso 16 con otros pisos, los datos de estas mediciones se detallan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Datos de segunda campaña de medición con acelerómetros en edificio Antígona.

Medición	Duración[<i>min</i>]	f_s [Hz]
Antígona 5	5	200
Antígona 6	20	200
Antígona 7	20	200
Antígona 8	20	200

Se utiliza la misma metodología de medición que para la medición 2, en donde todos los equipos se encuentran en el piso 16 y así como también se mantienen fijos 3 sensores en este piso. Esta campaña se organiza de tal forma que se alcancen a abarcar todos los pisos (sin incluir los subterráneos) del edificio en las mediciones, en las siguientes figuras se esquematiza la organización de las mediciones por piso.

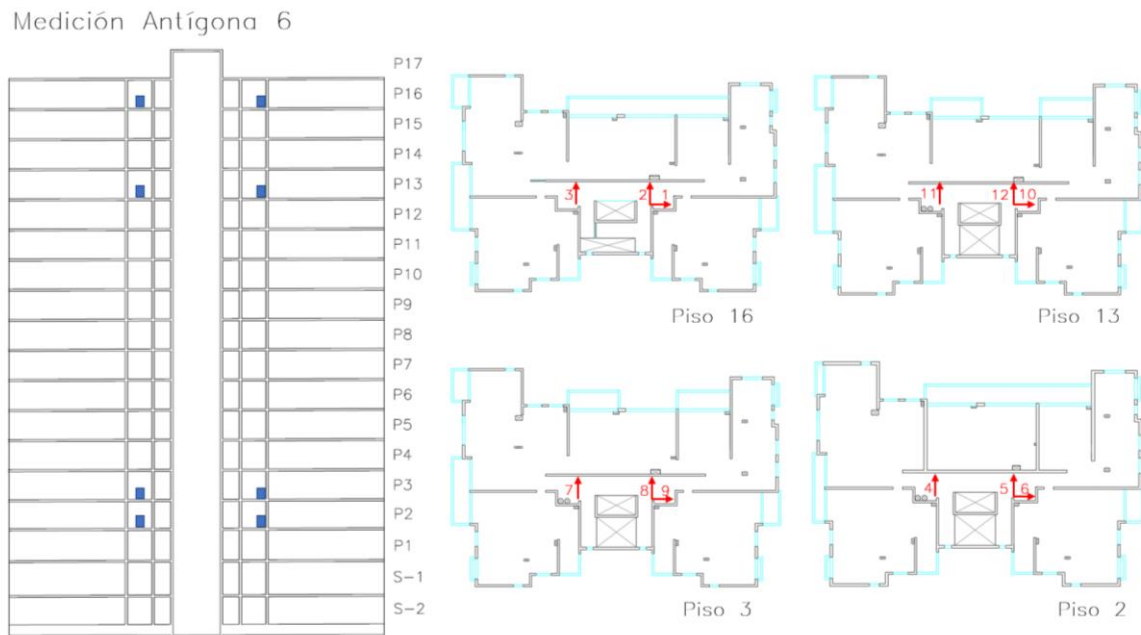


Figura 4.13: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 6.

Medición Antígona 7

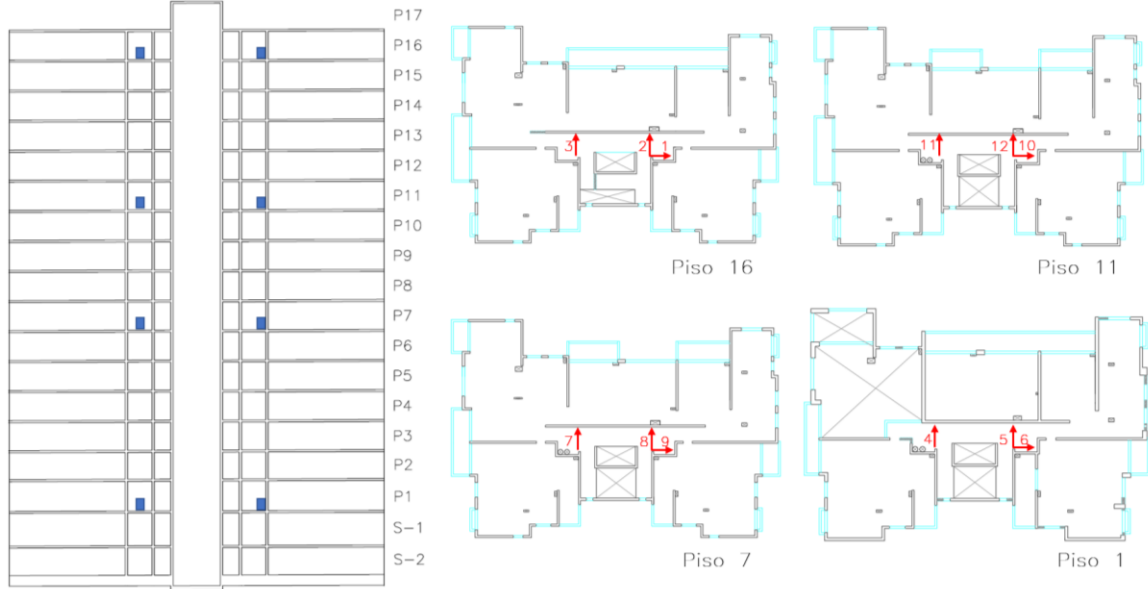


Figura 4.14: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 7.

En la Figura 4.15 en donde se esquematizan la medición Antígona 8 el piso 17 aparece con la planta del piso 16, ya que es la losa de techo del edificio utilizada como sala de máquinas y calderas, también como lavandería y es por eso que se muestran los sensores ahí.

Medición Antígona 8

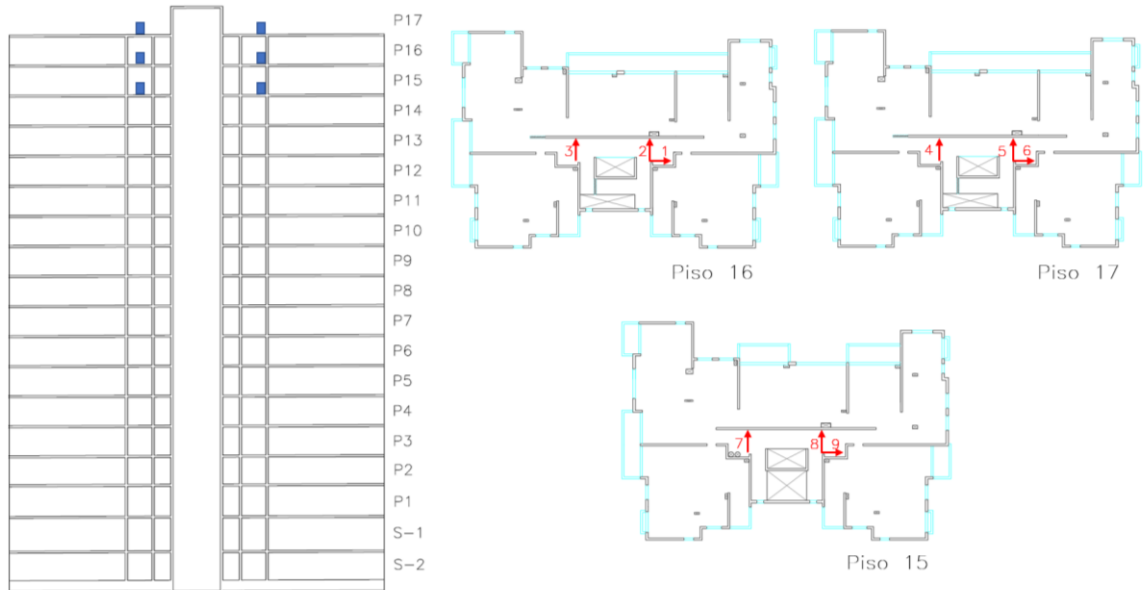


Figura 4.15: Esquema de ubicación de sensores en el elevación y plantas de estos pisos con la dirección de sensores y su canal correspondiente para medición Antígona 8.

Capítulo 5

Resultados de Mediciones

En este capítulo se muestran los resultados de las mediciones descritas en el capítulo anterior. Primero se muestran los resultados relevantes de las mediciones realizadas con sismómetros TROMINO, tanto en pruebas como en el edificio Antígona. Luego, se muestran los resultados de las campañas de medición con acelerómetros EpiSensor, llevadas a cabo en el edificio Antígona para cada medición realizada y, finalmente, se presentan las propiedades dinámicas identificadas en las campañas de medición.

5.1. Resultados de Mediciones de Prueba con Sismómetros

De los registros obtenidos con las diversas pruebas, se muestran los principales resultados adquiridos a través del programa Matlab, en los que se pueda evidenciar como se trabaja con estos equipos y si es posible validar una metodología de trabajo con TROMINO.

5.1.1. Resultados de Medición 1 de Prueba

En la primera medición realizada con sismómetros se registran las vibraciones ambientales del tercer piso del edificio Geofísica-Ingeniería Civil y se analizan las velocidades registradas en la dirección N-S y E-O del sensor para verificar que las señales son las mismas en los 4 sismómetros. El análisis comienza sincronizando las mediciones con la hora del reloj interno de los sensores al configurarlos con el GPS, ya que el comienzo de la medición fue manual y, por lo tanto, no empezaron a registrar al mismo tiempo. A pesar de la sincronización al graficar la correlación cruzada de las señales se observa un desfase de las señales del DGF3 de 3[s] (exacto) con respecto a las demás.

Se realiza un análisis en frecuencia de las señales, en la Figura 5.1 se muestra el espectro de potencia y función de coherencia en la dirección N-S en donde se observa claramente 3 frecuencias naturales del edificio con alta coherencia, también se obtiene la función de transferencia entre las distintas señales en la dirección N-S (Figura 5.3), para observar la diferencia en la adquisición de frecuencias de los sensores. Para la dirección E-O se muestra su espectro de potencia y función de coherencia en la Figura 5.2, observando 3 frecuencias naturales de alta coherencia y las funciones de transferencia en la Figura 5.4.

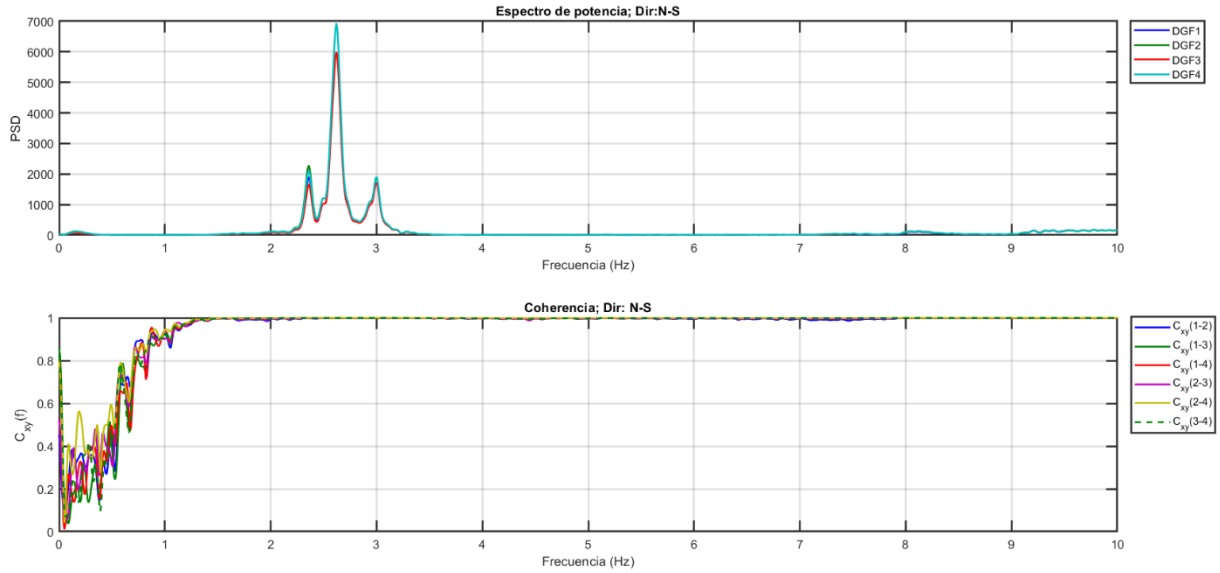


Figura 5.1: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición 1 de prueba en la dirección N-S.

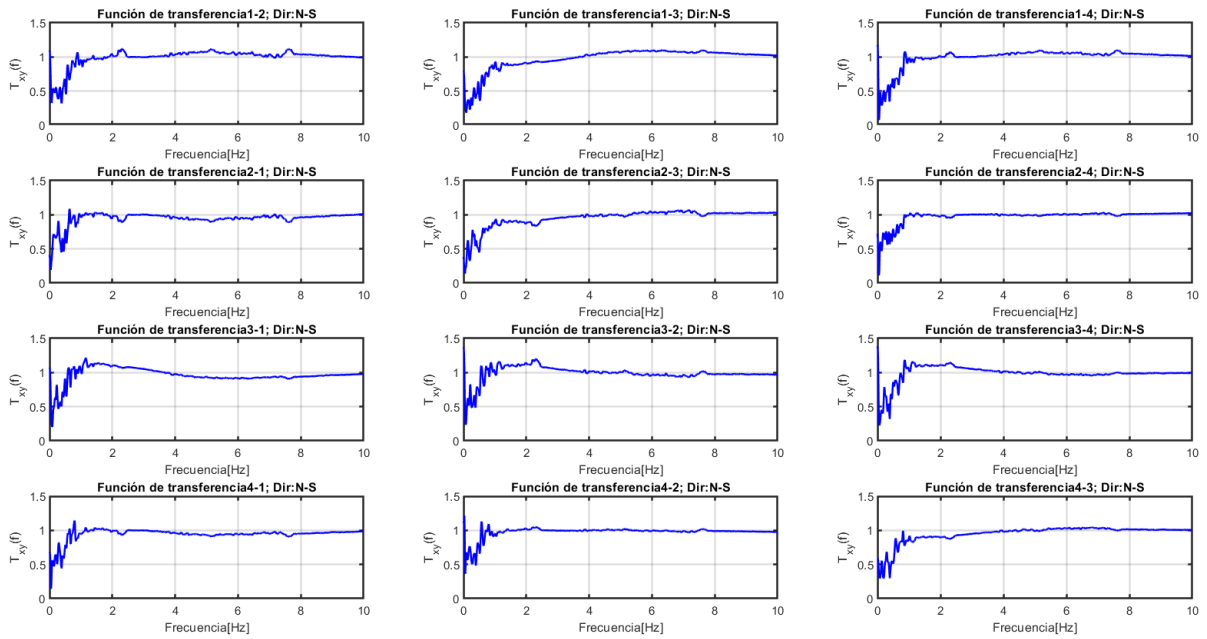


Figura 5.2: Función de transferencia entre dos señales para las combinaciones de la señales de las DFG1, DFG2, DFG3, DFG4 en dirección N-S.

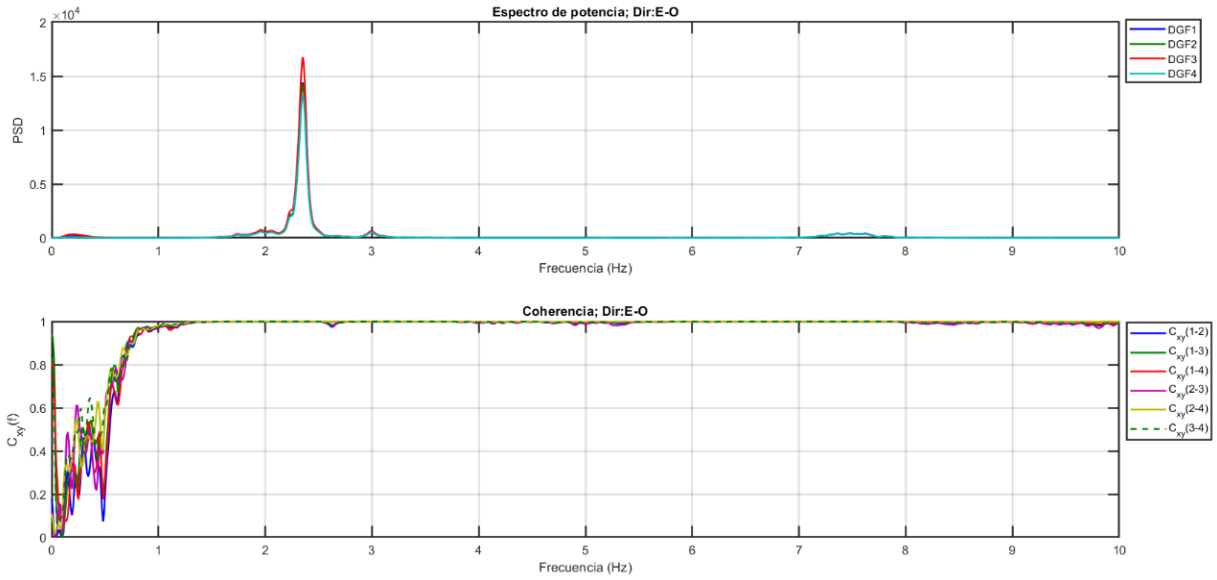


Figura 5.3: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición 1 de prueba en la dirección E-O.

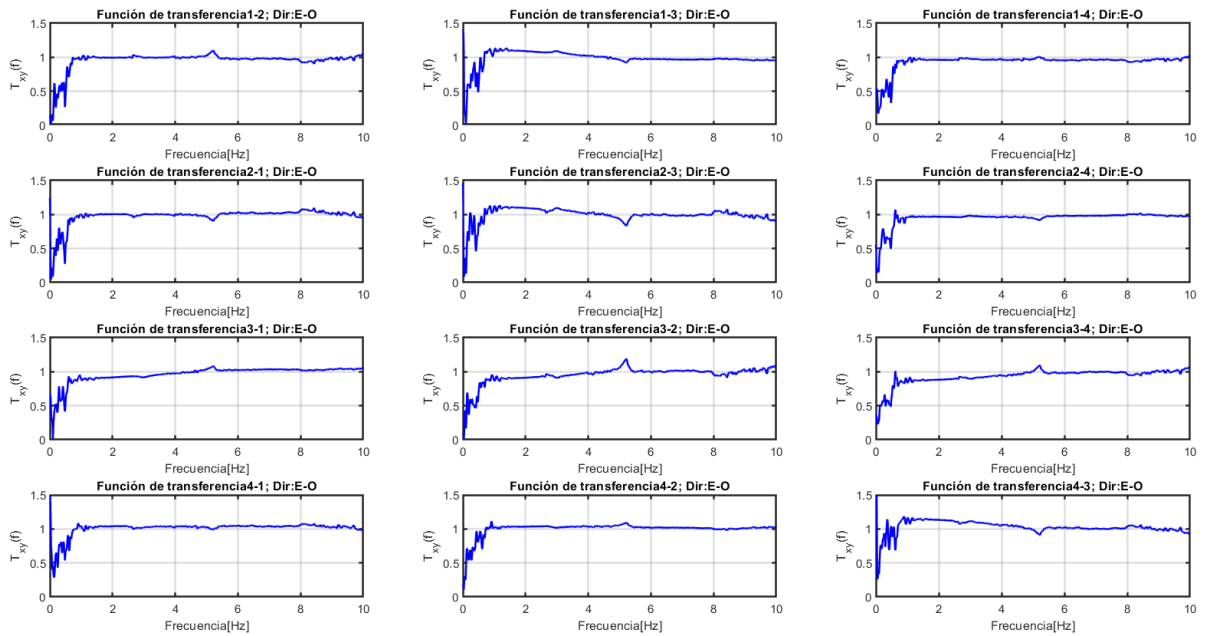


Figura 5.4: Función de transferencia entre dos señales para las combinaciones de la señales de las DFG1, DFG2, DFG3, DFG4 en dirección E-O.

5.1.2. Resultados de Medición 2 de Prueba

En la segunda medición de prueba se registran las vibraciones ambientales de los pisos 2, 3, 4, 5 y 6 del edificio Justicia Espada Acuña Mena (ex Torre Central), estas mediciones se analizan a través del método SSI obteniéndose los diagramas de estabilidad para las cuatro mediciones que se observan en la Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 y Figura 5.8, en donde también se contemplan, en la tabla a la derecha, las frecuencias naturales identificadas y el amortiguamiento de cada modo.

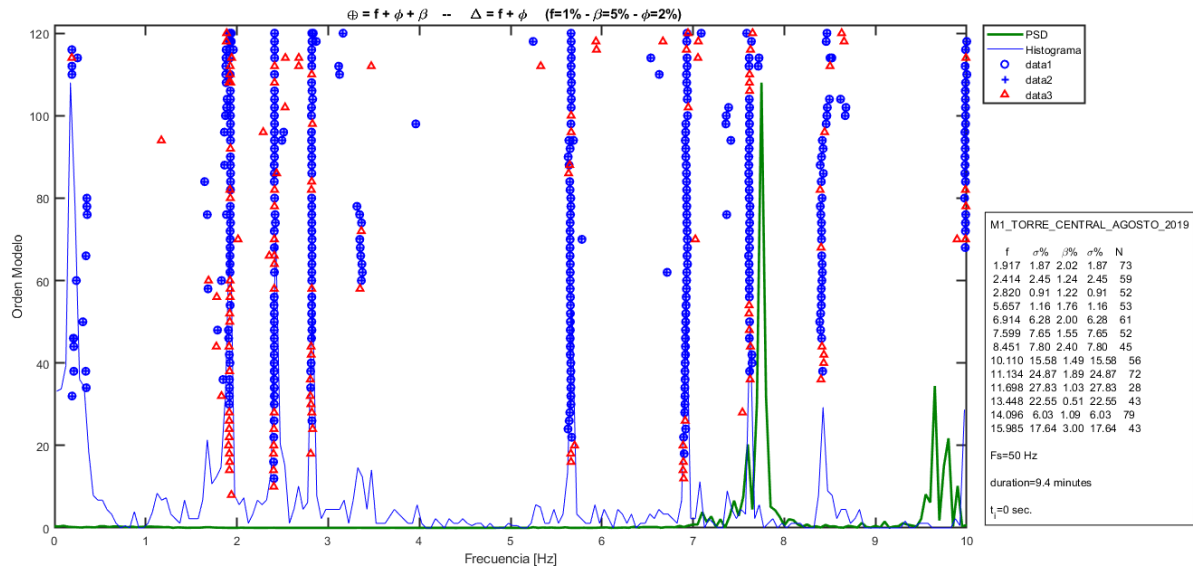


Figura 5.5: Diagrama de estabilidad de la medición M1 en el edificio Justicia Espada Acuña Mena.

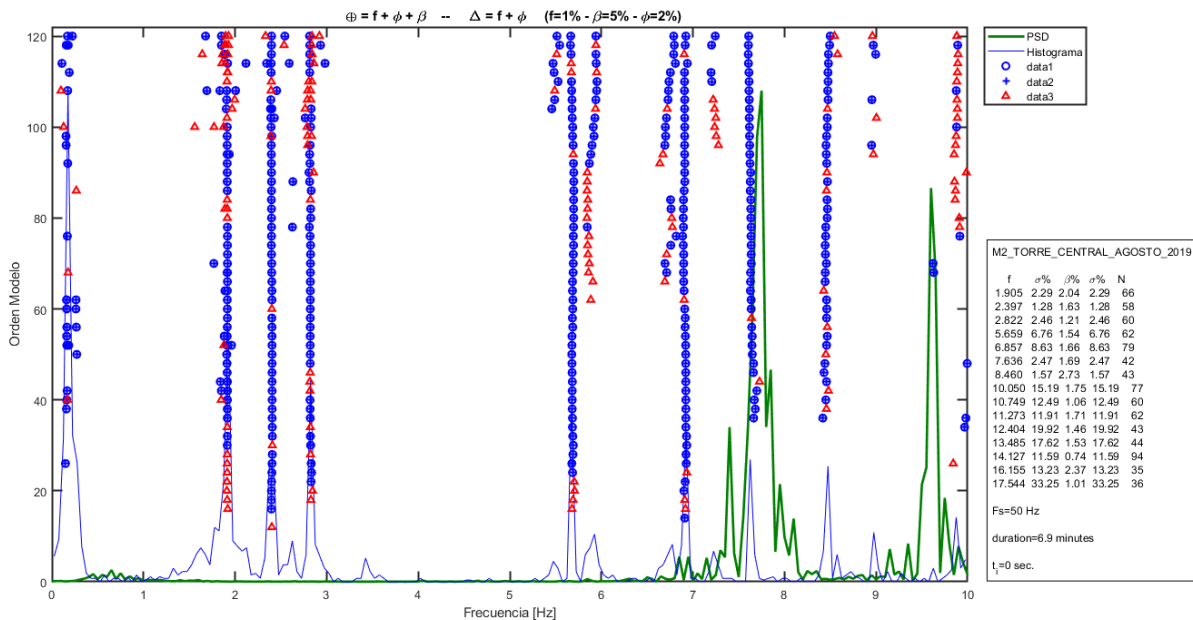


Figura 5.6: Diagrama de estabilidad de la medición M2 en el edificio Justicia Espada Acuña Mena.

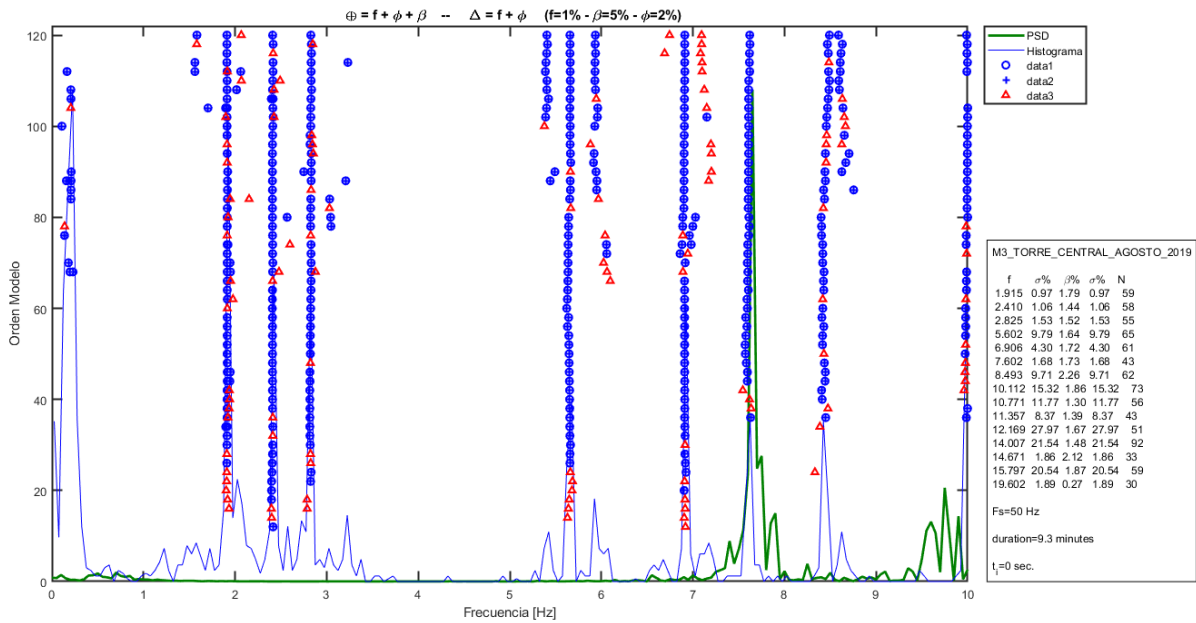


Figura 5.7: Diagrama de estabilidad de la medición M3 en el edificio Justicia Espada Acuña Mena.

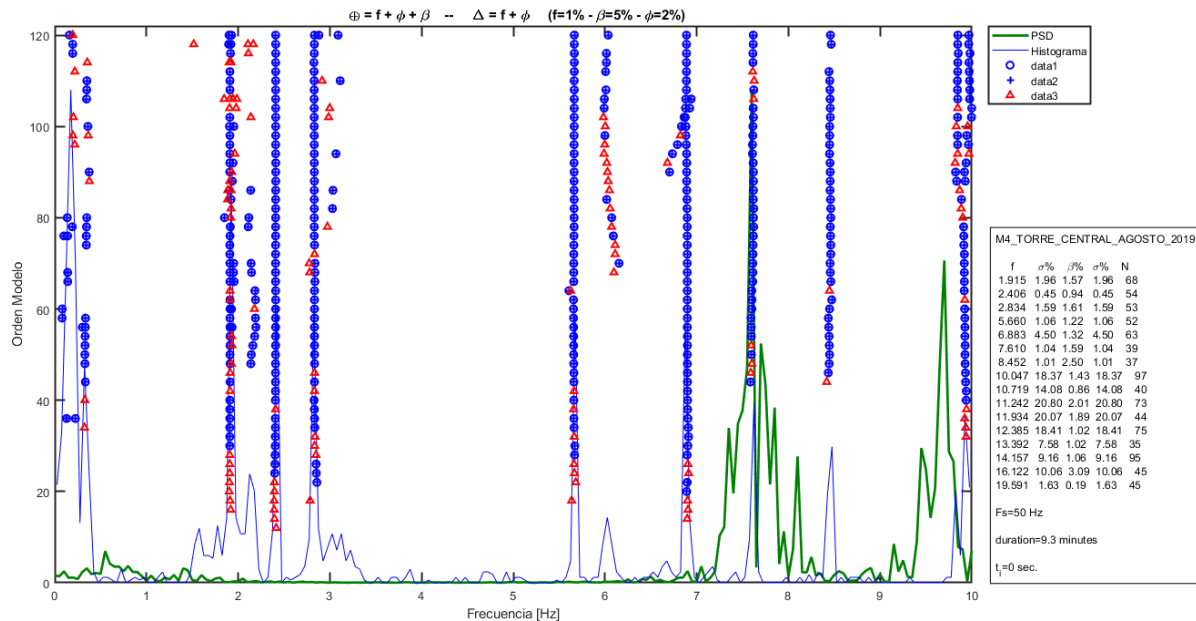


Figura 5.8: Diagrama de estabilidad de la medición M4 en el edificio Justicia Espada Acuña Mena.

Con los datos obtenidos del análisis con el método SSI para cada medición se realiza una rutina que permita observar las primeras 6 formas modales de los pisos, superponiendo las formas modales encontradas en cada medición y tomando el piso 6 del edificio como referencia, por lo que en la Figura 5.9 se muestran las plantas del piso 6 de cada medición superpuestas, en donde deberían calzar para lograr los resultados deseados, sin embargo para el modo 2 y 5 no se consigue.

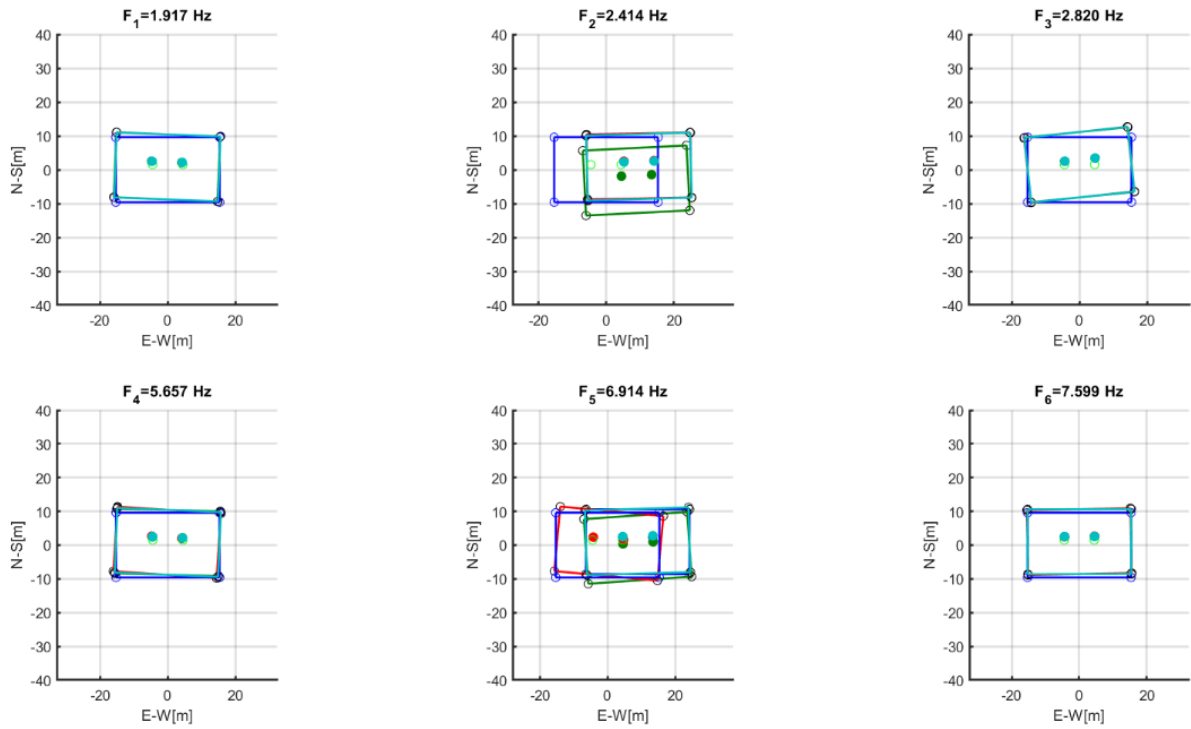


Figura 5.9: Diagramas de formas modales en planta del piso 6 en todas las mediciones del edificio Justicia Espada Acuña Mena.

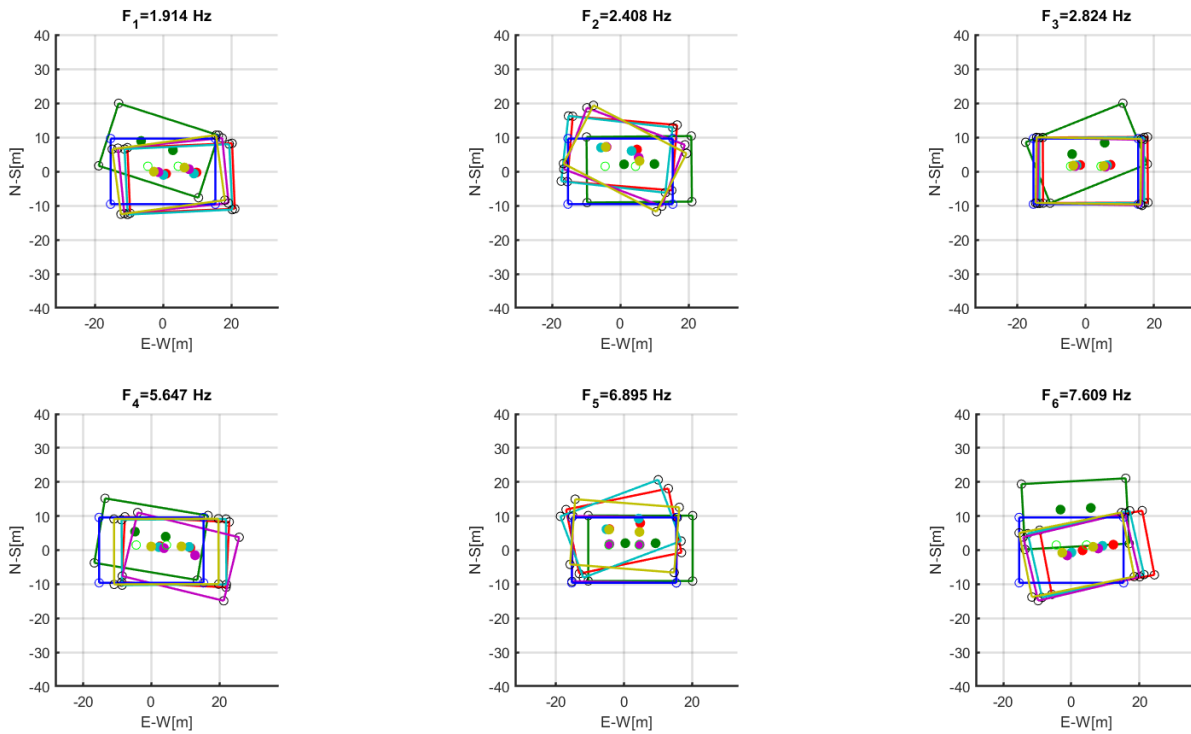


Figura 5.10: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos medidos del edificio Justicia Espada Acuña Mena, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

En la Figura 5.10, en donde se muestran los diagramas de las formas modales del edificio para los primeros 6 modos, no se pueden apreciar tendencias definidas del movimiento del edificio para cada modo. Como se esperaba de lo observado en la figura anterior solo se deberían ver afectados la visualización del modo 2 y 5, sin embargo, en ninguno es posible observarse. Al pasar las formas modales a un diagrama tridimensional (Figura 5.11) se hace más evidente el desajuste de las plantas para determinar las formas modales del edificio con la medición realizada con sismómetros, esto se atribuye a la falta de una calibración de los sensores utilizados.

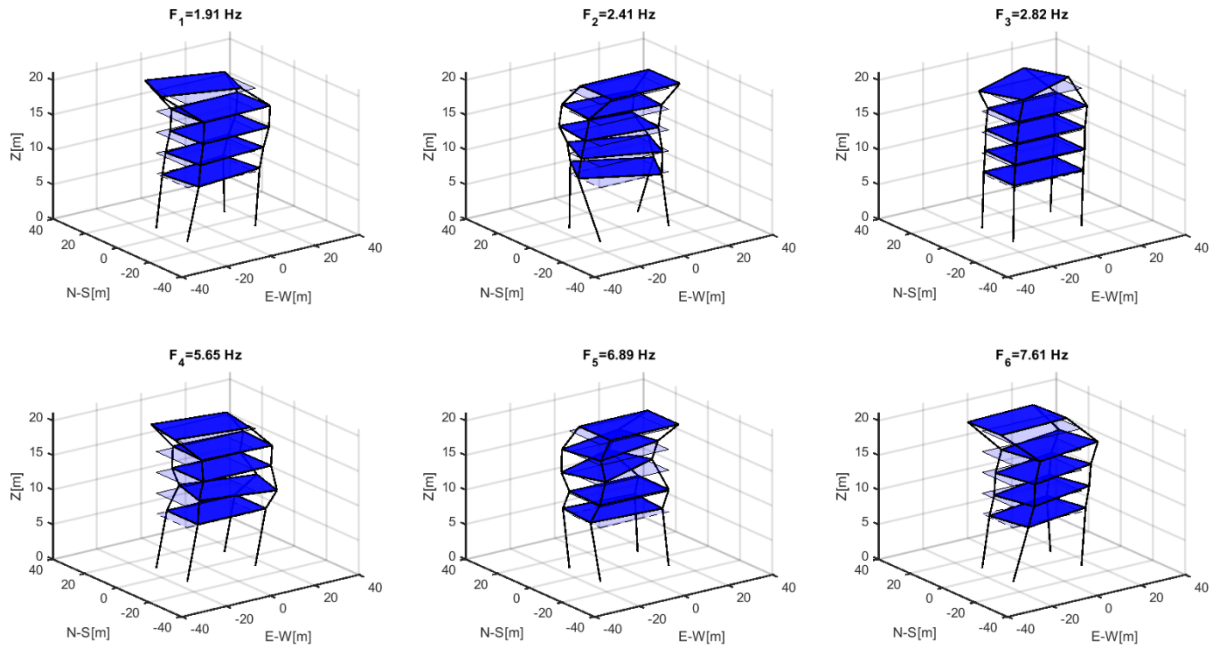


Figura 5.11.: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos del edificio Justicia Espada Acuña Mena, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.1.3. Resultados de Medición 3 de Prueba

En la tercera medición de prueba se realizan mediciones con los sismómetros TROMINO DGF1 y DGF2, más un acelerómetro EpiSensor, sobre una estructura pequeña de frecuencia natural inferior a 1[Hz]. Para cada conjunto de mediciones realizadas por dirección para cada sismómetro, se ejecuta el mismo procedimiento de análisis que consiste en: inicialmente sincronizar las mediciones de ambos instrumentos, lo que se hace reconociendo los 3 golpes realizados a la plataforma sobre la que se encontraba la estructura, luego se filtran las señales mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo Butterworth, se continua comparando las señales de ambos instrumentos, en las que se observan diferencias. Para calibrar los sismómetros se realizan análisis en frecuencia, donde a partir del espectro de potencia y función de coherencia se obtienen frecuencias naturales de la estructura de alta coherencia, estas frecuencias se ubican en la función de transferencia entre el sismómetro y

acelerómetro, con esto se obtiene un punto de frecuencia y la magnitud dentro de la función de transferencia, lo cual se realiza para cada medición y luego, a través de un algoritmo de optimización se genera una curva de aproximación a la función de transferencia. En la Figura 5.12 se observan los ajustes de función de transferencia para los sismómetros DGF1 y DGF2, en donde dir indica la dirección del sensor, siendo 1: N-S y 2: E-O, cada marcador observado corresponde a una frecuencia encontrada en las mediciones.

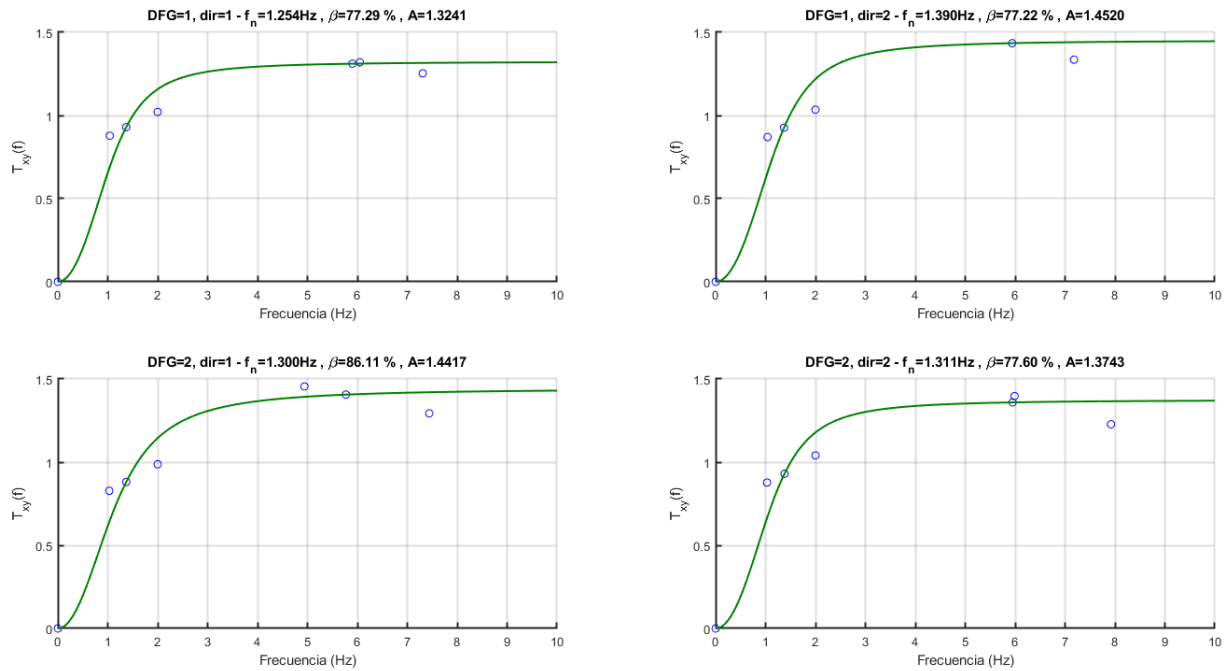


Figura 5.12: Ajustes de función de transferencia con puntos de cada una de las mediciones realizadas en medición 3 de prueba, por sismómetro y dirección (Dir=1, dirección N-S y Dir=2, dirección E-O).

5.1.4. Resultados de Medición 4 de Prueba

En la cuarta medición de prueba se realizan mediciones con los sismómetros TROMINO DGF3 y DGF4, más un acelerómetro EpiSensor, sobre una estructura pequeña de frecuencia natural inferior a 1[Hz], al igual que la medición 3 de prueba. El procedimiento de análisis es el mismo utilizado para la medición 3, por lo que se obtienen ajustes de funciones de transferencia también como se muestran en la Figura 5.13.

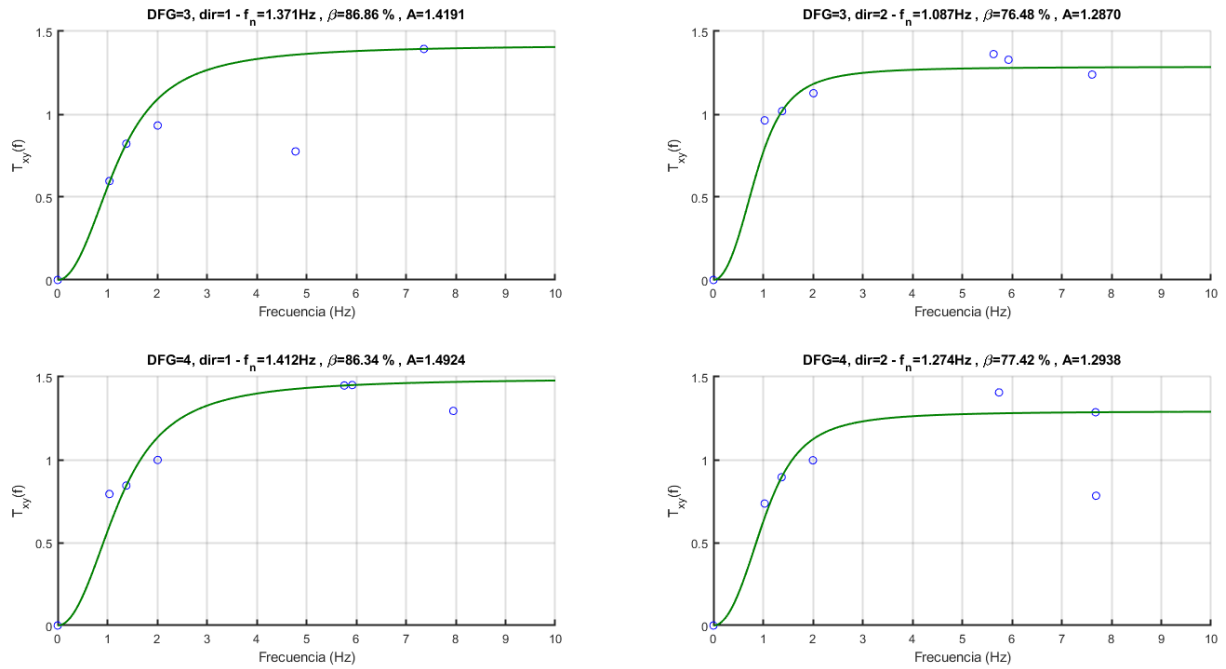


Figura 5.13: Ajustes de función de transferencia con puntos de cada una de las mediciones realizadas en medición 4 de prueba, por sismómetro y dirección (Dir=1, dirección N-S y Dir=2, dirección E-O).

5.1.5. Resultado de Medición de Edificio Antígona con Sismómetros

La primera medición del edificio Antígona es realizada con sismómetros TROMINO acompañada de dos sensores EpiSensor, esta medición abarca una calibración inicial y mediciones de los pisos 17, 16, 12, 8, 4 y 2, en el orden que se muestra en la Tabla 4.3.

Los datos obtenidos de M0, la calibración de los sensores es procesada al igual que las mediciones de 3 y 4 de prueba, obteniéndose nuevos puntos para incluirlos en el ajuste realizado para las mediciones anteriores, obteniéndose los gráficos que se muestran en la Figura 5.14. Sin resultados concluyentes para la calibración de los equipos, se analizan los datos obtenidos para los demás pisos sin haberlos ajustado.

Las mediciones M1, M2, M3, M4 y M5 se analizan a través del método SSI pudiendo observarse a través de los diagramas de estabilidad mostrados para cada medición las frecuencias naturales y el amortiguamiento de cada modo, como se muestra en la Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18 y Figura 5.19. De estos resultados es posible visibilizar los primeros 6 modos de vibración del edificio similares en todas las mediciones. A partir de estos datos y los resultados del método SSI, se generan diagramas de planta de sus desplazamientos por modo, para lo que inicialmente se deben compatibilizar los desplazamientos del piso 16, que es la referencia, para poder ensamblar los resultados de cada piso en sus modos. En la Figura 5.20 se observan las plantas del piso 16 para su compatibilización y se advierte que en el modo 6 hay discrepancia de las plantas.

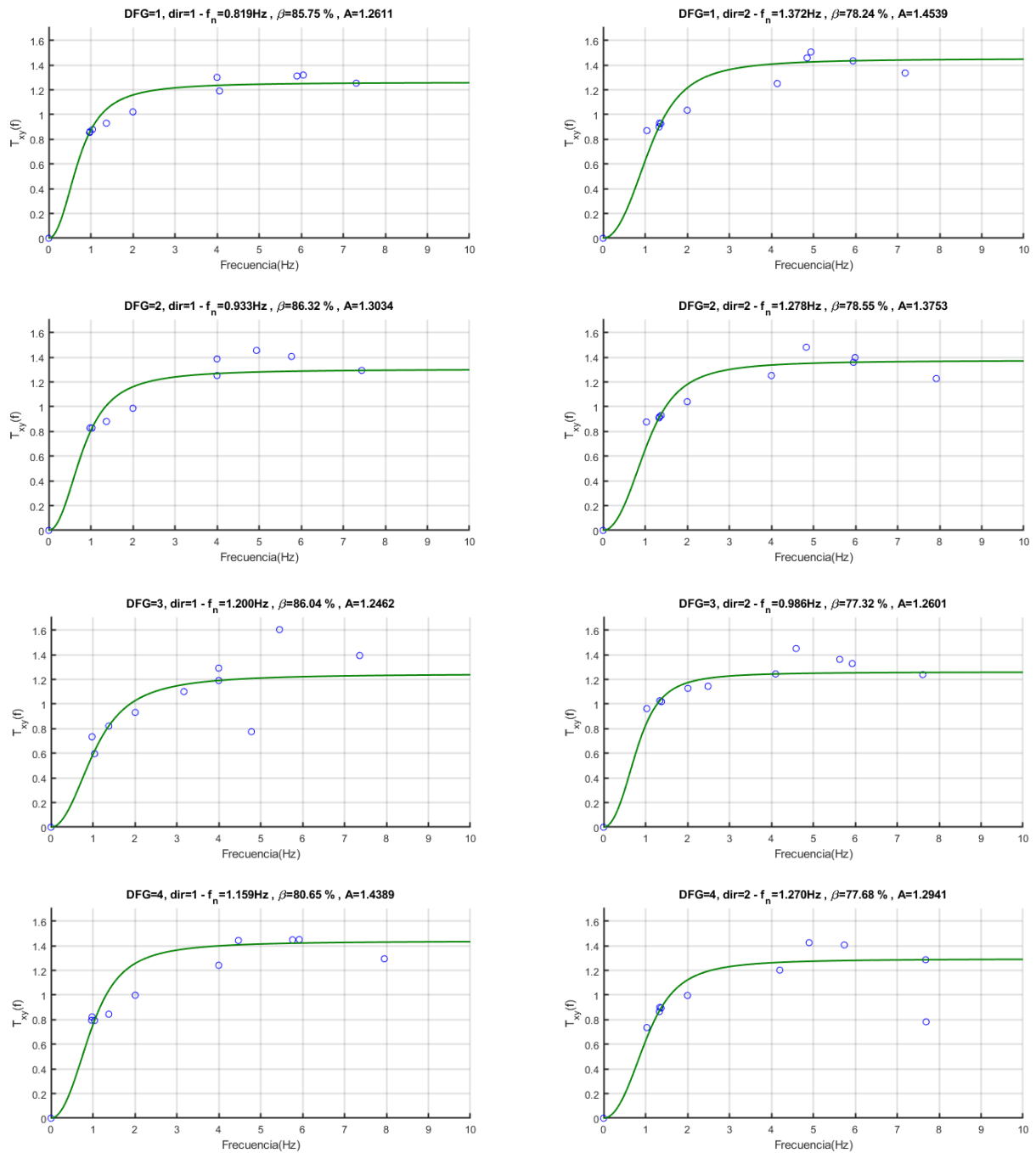


Figura 5.14: Ajustes de función de transferencia con puntos de cada una de las mediciones realizadas en mediciones 3 y 4 de prueba y medición en edificio Antígona, por sismómetro y dirección (Dir=1, dirección N-S y Dir=2, dirección E-O).

En la Figura 5.21 se muestran los resultados de los diagramas de los modos por planta de los pisos medidos del edificio Antígona, donde no solo en el modo 6 se muestran incongruencias, sino que en todos los modos es poco comprensible o deducible la dirección de desplazamiento de las plantas por modo. Al elevar la vista esta representación en un diagrama tridimensional (Figura 5.22) no existe una tendencia clara tampoco.

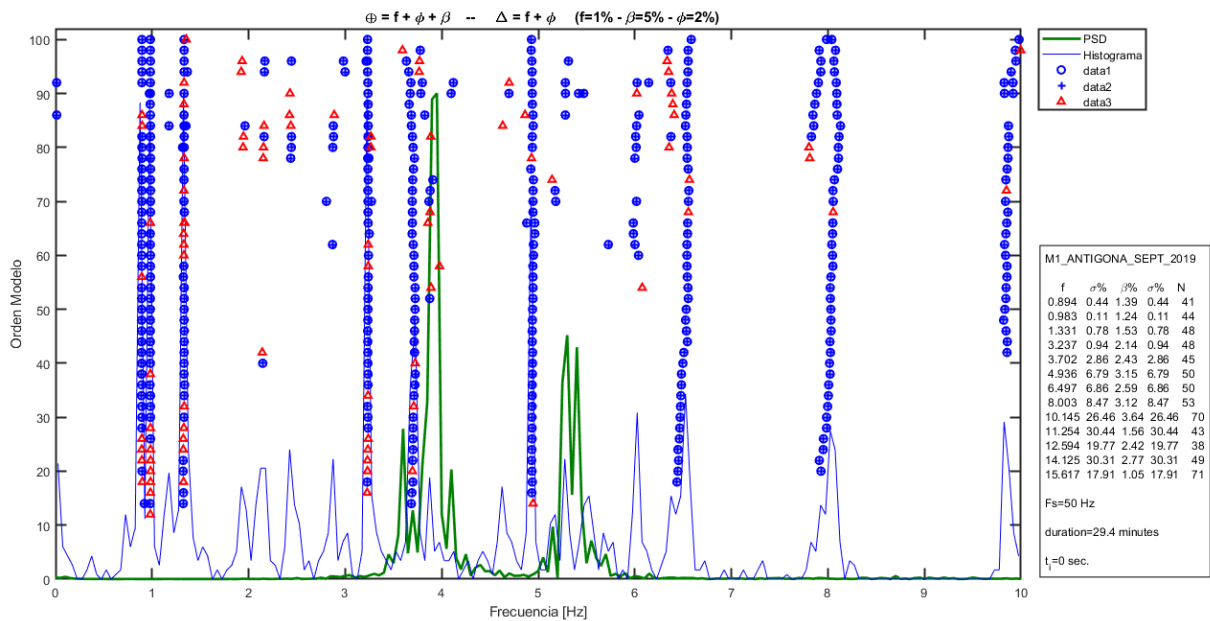


Figura 5.15: Diagrama de estabilidad de la medición M1 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento.

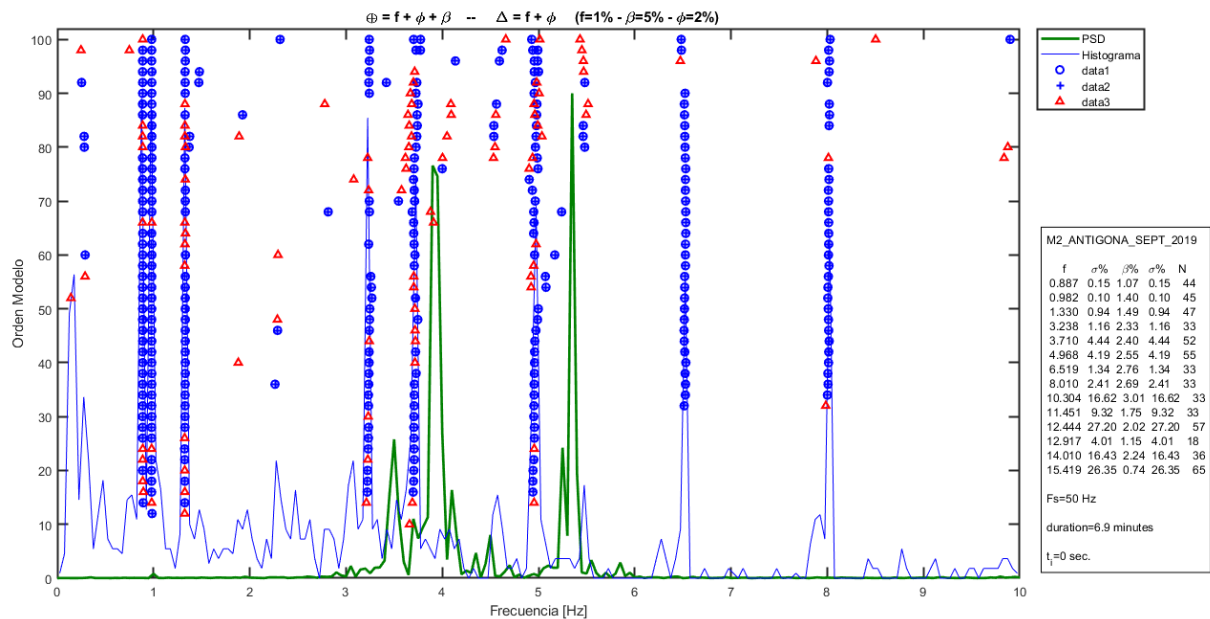


Figura 5.16: Diagrama de estabilidad de la medición M2 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento.

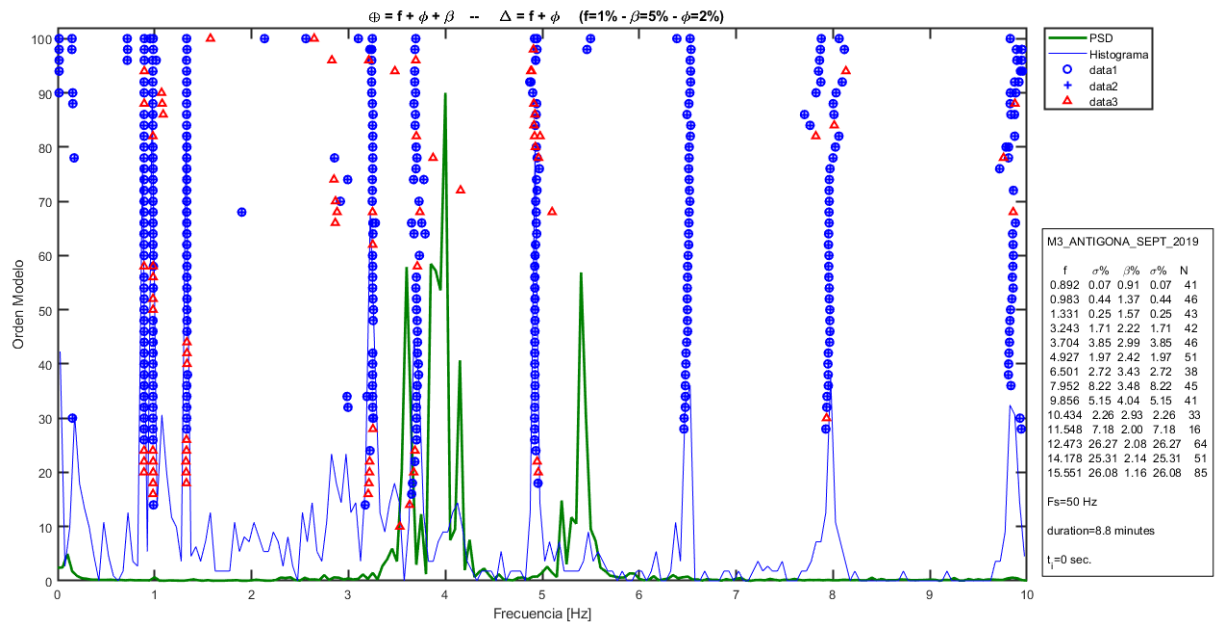


Figura 5.17: Diagrama de estabilidad de la medición M3 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento.

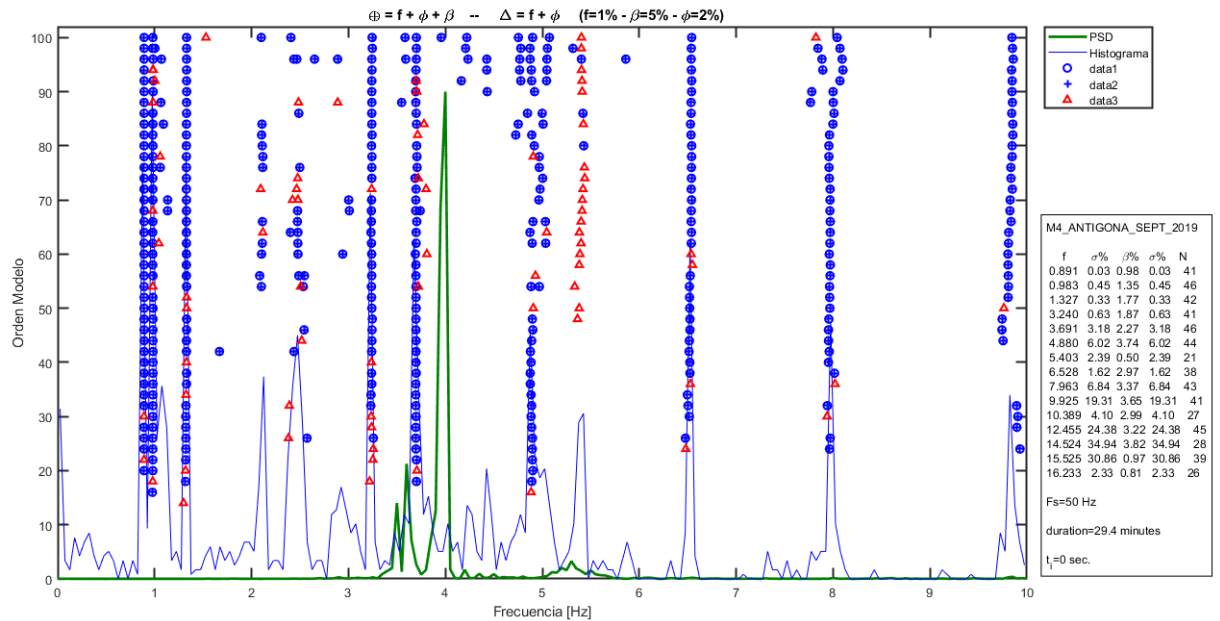


Figura 5.18 Diagrama de estabilidad de la medición M4 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento.

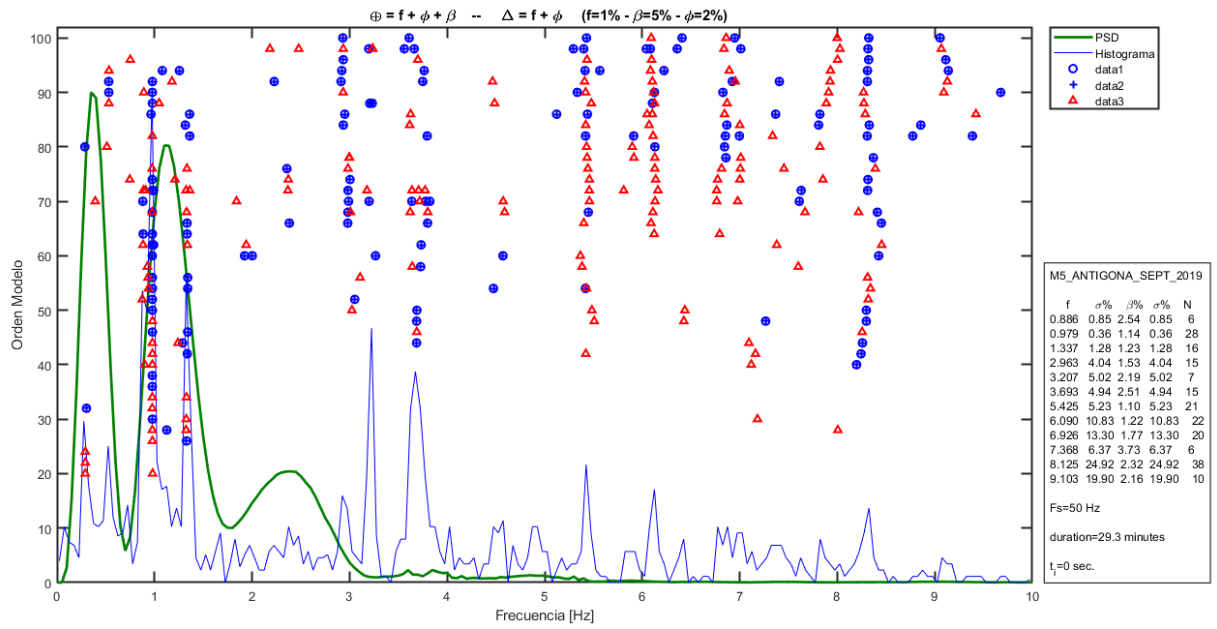


Figura 5.19: Diagrama de estabilidad de la medición M5 en el edificio Antígona, a la derecha una tabla de datos de frecuencias identificadas para cada modo y su amortiguamiento.

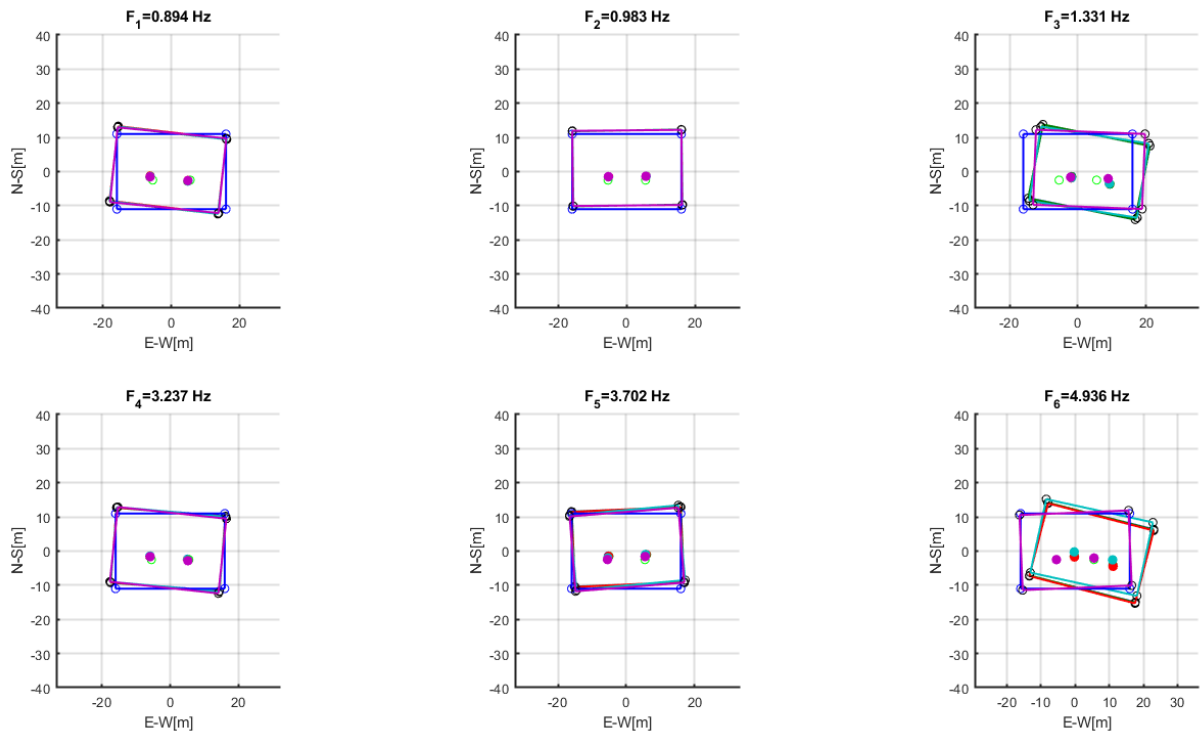


Figura 5.20: Diagramas de formas modales en planta del piso 16 en todas las mediciones realizadas con sismómetros en el edificio Antígona.

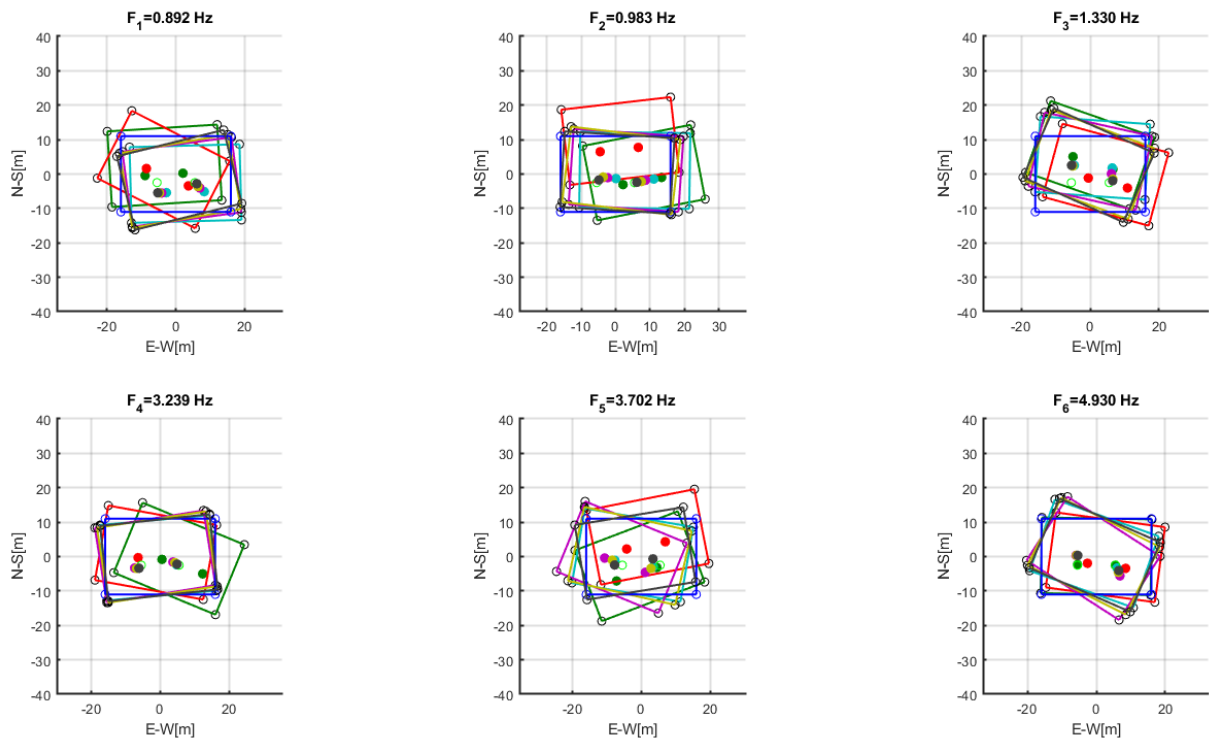


Figura 5.21: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos medidos con sismómetros del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales..

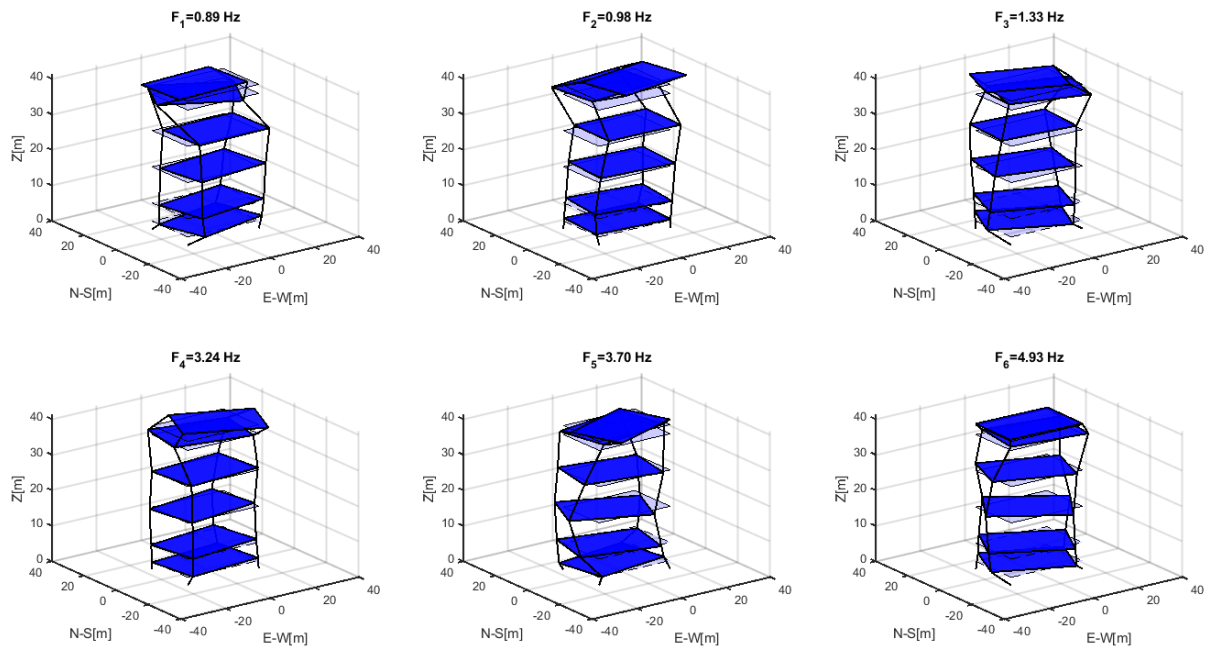


Figura 5.22: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos con sismómetros del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales..

De las mediciones de suelo realizadas con DGF1 y DGF2 se obtiene la curva de H/V de DGF1 (Figura 5.25), así como también el espectrograma de esta curva (Figura 7.3), ambos resultados entregados por el programa Grilla de TROMINO.

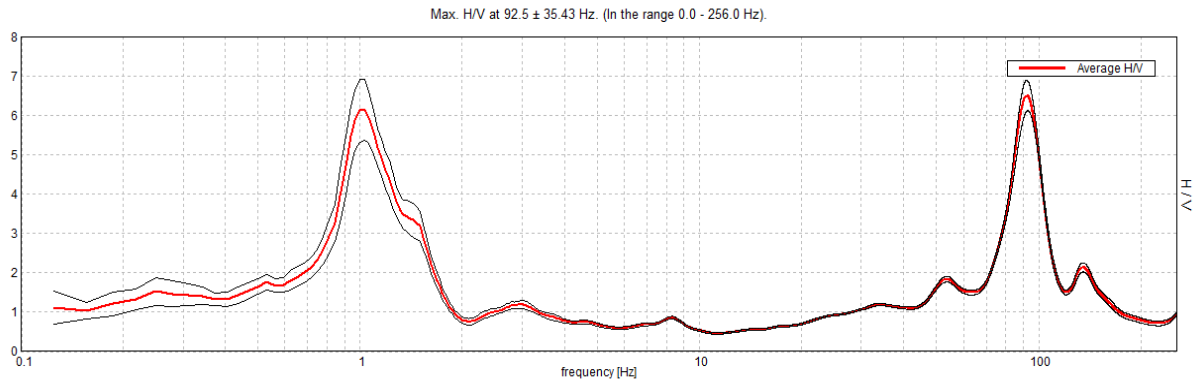


Figura 5.23: Curva de H/V para el suelo en las cercanías del edificio Antígona.

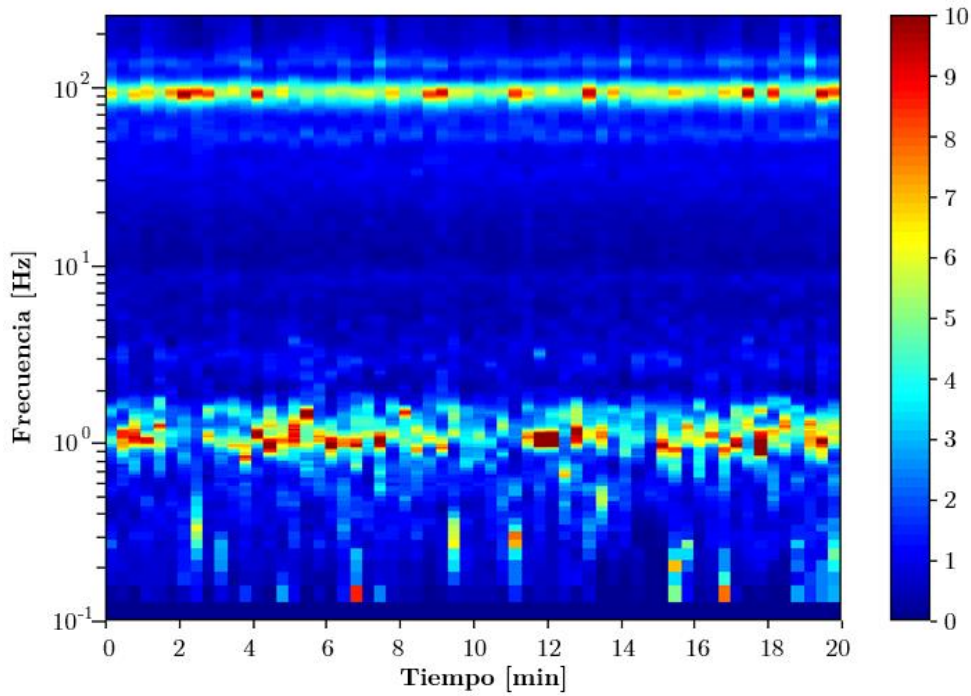


Figura 5.24: Espectrograma de curva H/V de la Figura 5.23.

5.2. Resultados de Mediciones de Edificio Antígona con Acelerómetros

De los registros de microvibraciones ambientales obtenidos con acelerómetros EpiSensor, en el edificio Antígona, se procesa la información a través de rutinas programadas en Matlab para el análisis en frecuencia y, a través del método de identificación del subespacio estocástico (SSI), la obtención de propiedades dinámicas.

Antes de analizar cada registro, estos se editan para extraer los trazos que contengan perturbaciones de mayor amplitud, correspondientes a ruidos producidos por personas caminando cerca de los sensores, portazos u otras intervenciones que produzcan alteraciones del registro de microvibraciones. Una vez editado el registro se le agregan filtros Butterworth pasa bajo y pasa alto, para luego obtener el espectro de potencia y coherencia de las señales con ventanas del tipo Hanning. Luego se aplica el método SSI para obtener diagramas de estabilidad y las formas modales de pisos del edificio.

5.2.1. Resultados de Primera Campaña de Mediciones

La primera campaña de mediciones abarca la medición de microvibraciones de 10 de los 17 pisos del edificio Antígona, más la calibración inicial con todos los sensores en el piso 16. A partir de los registros de las mediciones se obtienen los resultados que se muestran a continuación.

5.2.1.1. Resultados Calibración Antígona 0

La calibración es realizada con todos los sensores en dirección N-S en el piso 16 del edificio, a los registros se les aplica un filtro entre las frecuencias 0.1 y 50 [Hz] mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo Butterworth de orden 8 y se observan si las señales son iguales o si se les debe aplicar un factor de calibración aparte del factor que se incluye en las especificaciones de cada EpiSensor. Luego, se realiza un análisis de frecuencias con lo que se obtiene el espectro de potencia y la función de coherencia que se observa en la Figura 5.25, en donde los marcadores muestran las frecuencias identificadas con alta coherencia, en la Tabla 5.1 se muestran estos valores.

Tabla 5.1: Frecuencias identificadas en medición Antígona 0 en dirección N-S.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]
0.88
0.97
1.31
3.21
3.65
4.78

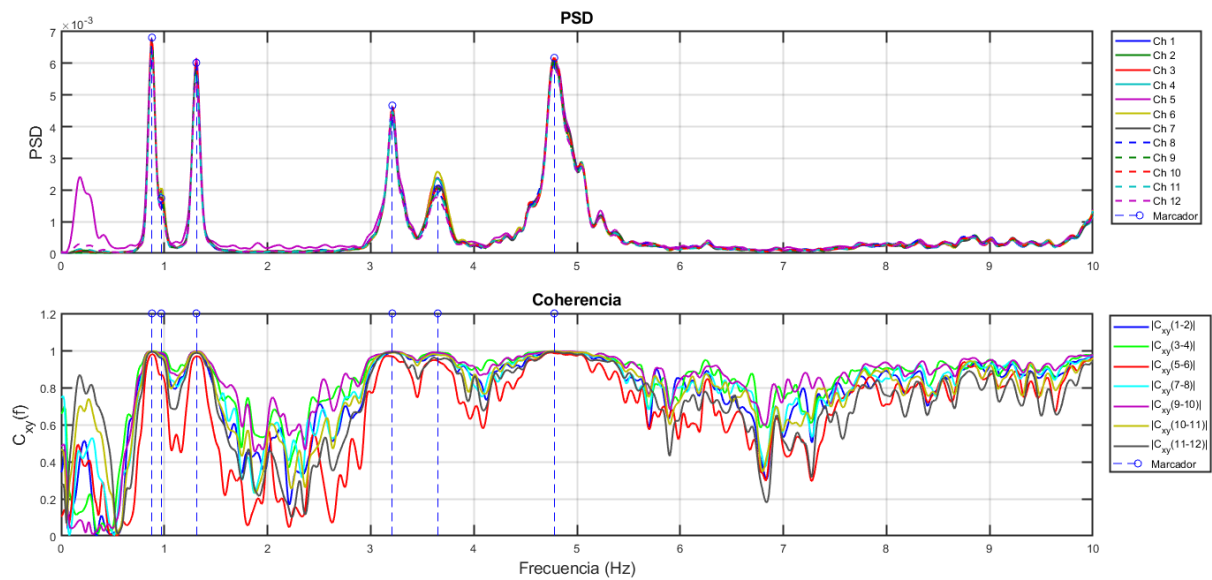


Figura 5.25: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 0, en la dirección N-S.

5.2.1.2. Resultados Medición Antígona 1

En la medición Antígona 1 se registran microvibraciones ambientales de los pisos 16, 12, 8 y 4 con los canales de los sensores dispuestos como se muestra en la Figura 4.9, estos registros se le aplica un análisis en frecuencia, obteniendo espectros de potencia y coherencia (Figura 5.26). Luego, son analizados con el método de identificación del subespacio estocástico a través del cual se obtiene el diagrama de estabilidad (Figura 5.27), en donde también se identifican frecuencias que son contrastadas con las obtenidas con PSD en la Tabla 5.2. Dentro de las frecuencias identificadas por el método SSI se observan más datos, pero entre estos valores hay frecuencias con cifras similares. Sin embargo, poseen menor número de coincidencias por lo que solo se consideran las con mayor coincidencia y similitud con las obtenidas en PSD.

Tabla 5.2: Frecuencias identificadas en medición Antígona 1.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]	Frecuencias identificadas SSI [Hz]
0.89	0.912
0.98	0.980
1.31	1.310
3.16	3.157
3.66	3.652
4.87	4.803
6.45	6.315
7.85	7.859
9.61	9.623

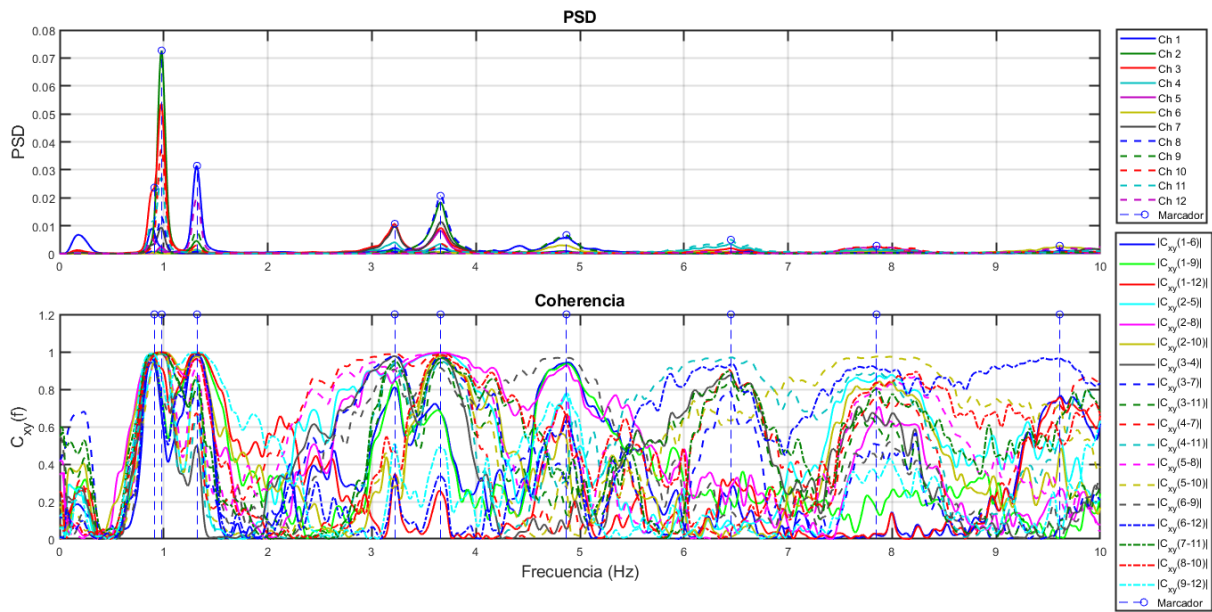


Figura 5.26: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 1, en direcciones mostradas en Figura 4.9.

A través del método SSI se obtienen también otras propiedades modales a partir de los registros de microvibraciones, como las formas modales para cada frecuencia modal identificada, con esta información es posible elaborar una representación gráfica de los modos de los pisos medidos tanto en planta (Figura 5.28) como tridimensional (Figura 5.29).

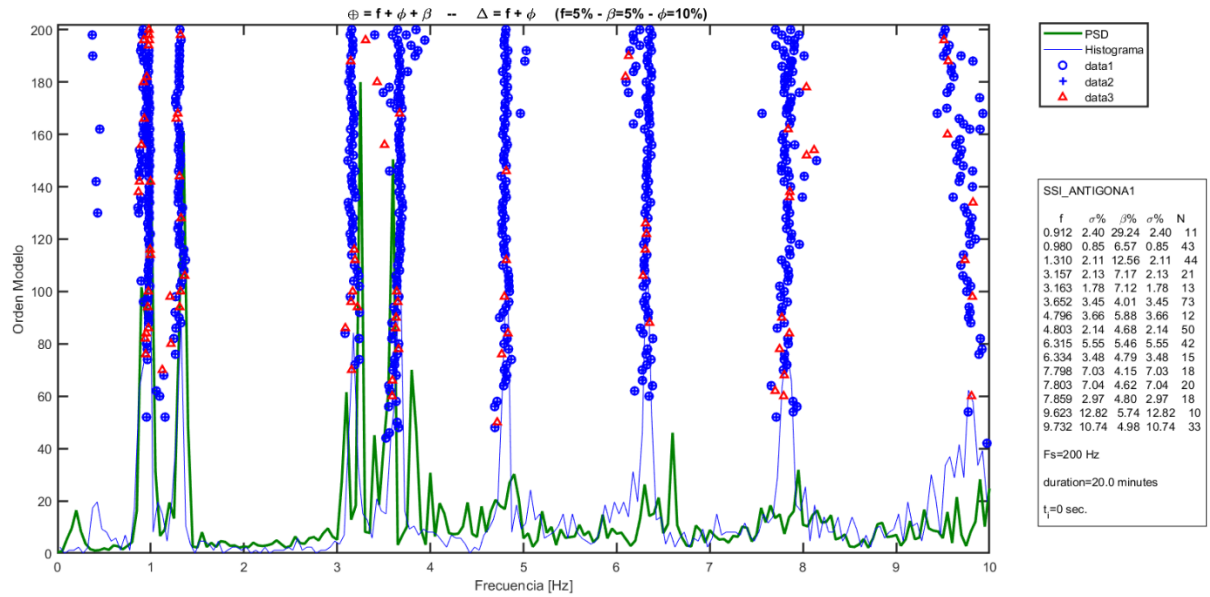


Figura 5.27: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 1, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.9.

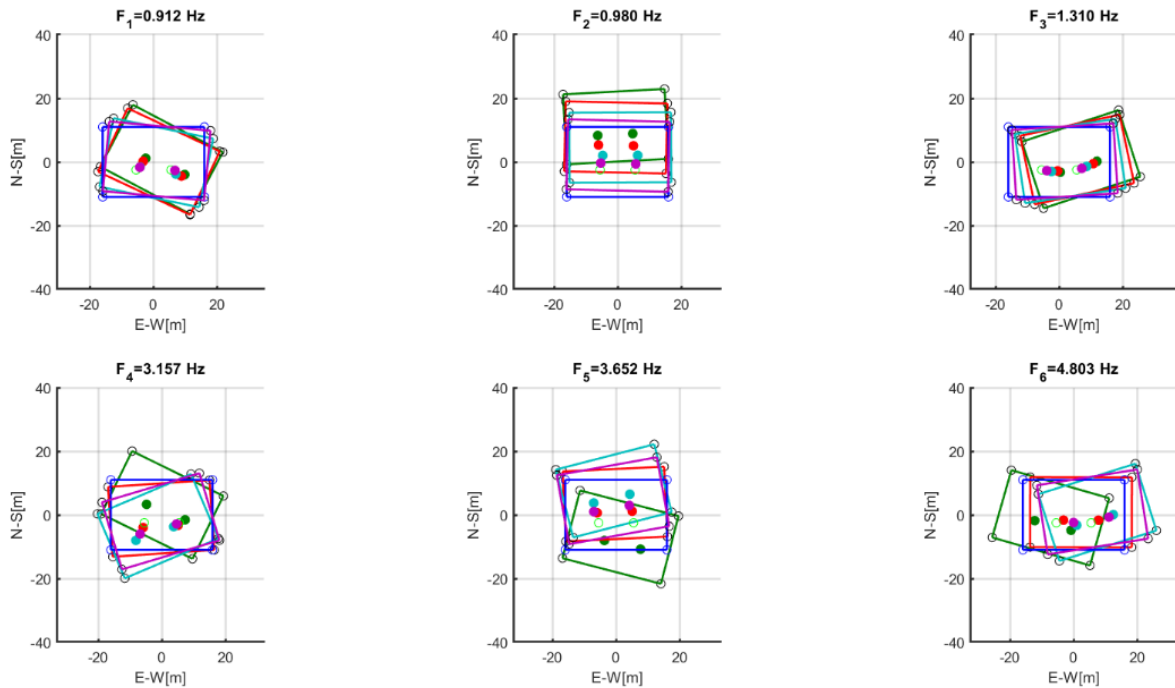


Figura 5.28: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 1, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

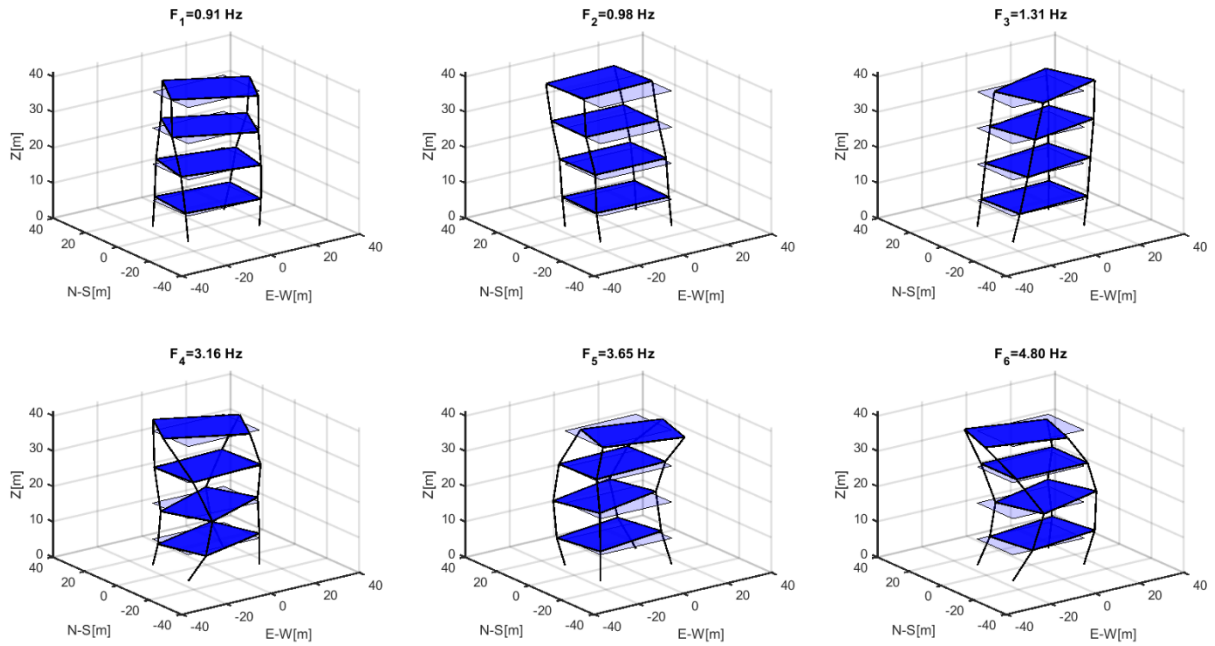


Figura 5.29: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 1, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.2.1.3. Resultados Medición Antígona 2

En la medición Antígona 2 se registran microvibraciones ambientales de los pisos 16, 14 y 6 con los canales de los sensores dispuestos como se muestra en la Figura 4.10, pero para los resultados que se presentan se modificó la enumeración de los canales. Como no se registraron las microvibraciones del piso 10, entonces los canales 7, 8 y 9 sin señales registradas pasan a ser los canales del piso 14 quedando el registro del canal 10 en el 7, el del canal 11 en el 8 y el del canal 12 en el 9. A estos registros se les aplica un análisis en frecuencia y se obtienen los espectros de potencia y coherencia (Figura 5.30), en donde se observan con marcadores las frecuencias identificadas con alta coherencia.

Tabla 5.3: Frecuencias identificadas en medición Antígona 2.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]	Frecuencias identificadas SSI [Hz]
0.89	0.877
0.97	0.977
1.32	1.316
3.21	3.180
3.62	3.627
4.87	4.859
6.42	6.379
7.85	7.886

Las frecuencias identificadas con el análisis en frecuencia se comparan con las obtenidas por el método SSI en el diagrama de estabilidad (Figura 5.31) en la Tabla 5.3.

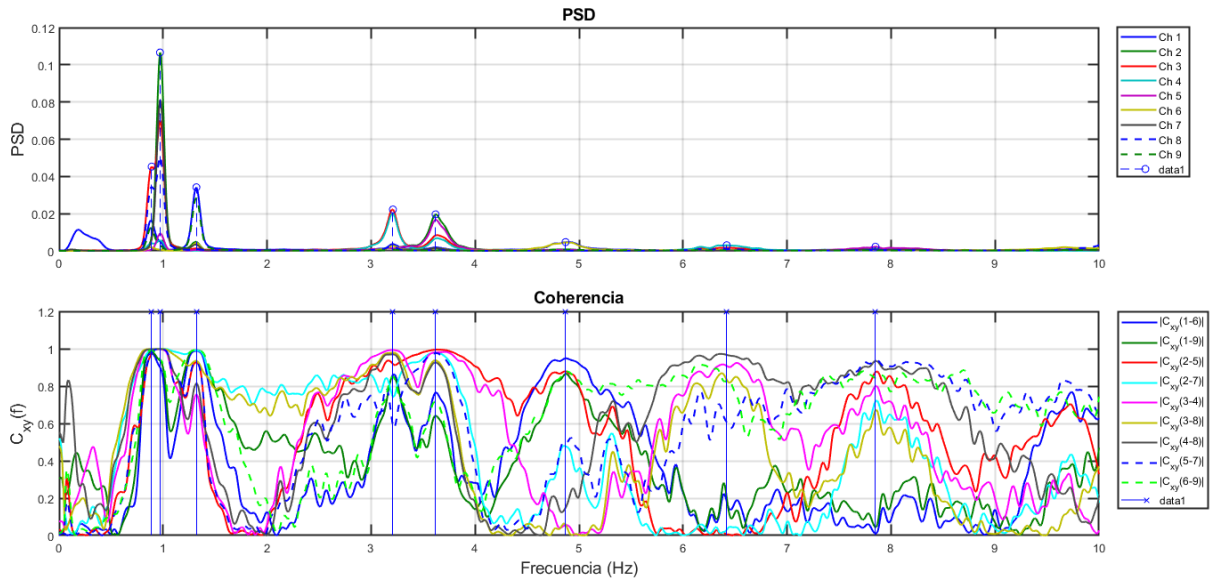


Figura 5.30: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente a la medición Antígona 2, en direcciones mostradas en Figura 4.10.

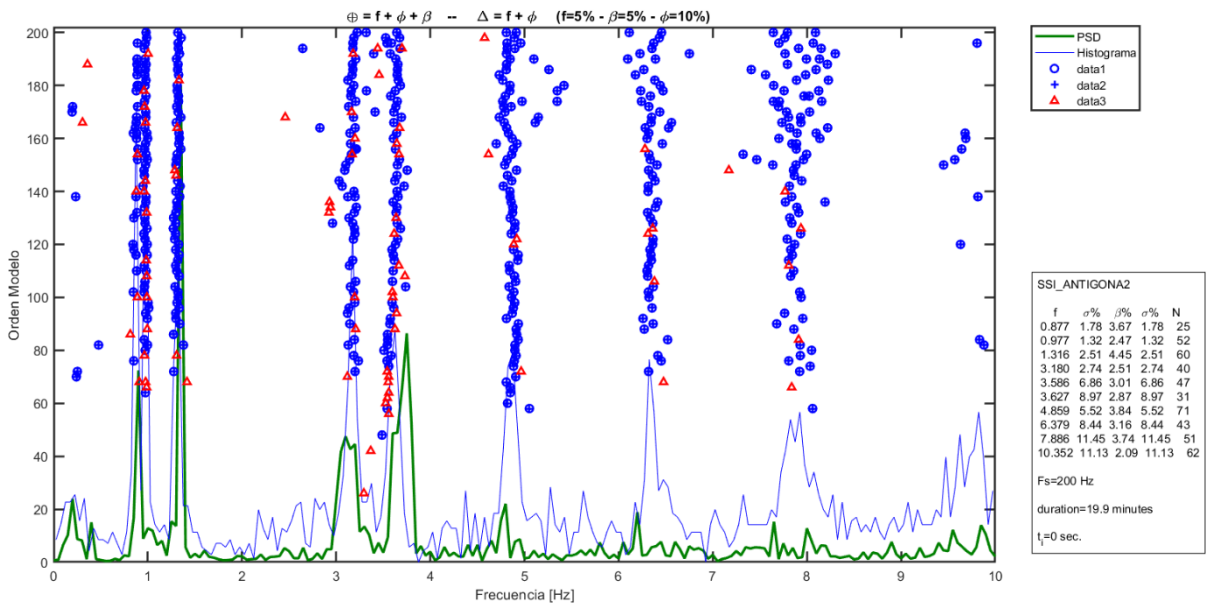


Figura 5.31: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 2, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.10.

De los datos obtenidos con el método SSI, se generan las representaciones gráficas de las formas modales en planta (Figura 5.32) y en elevación tridimensional (Figura 5.33).

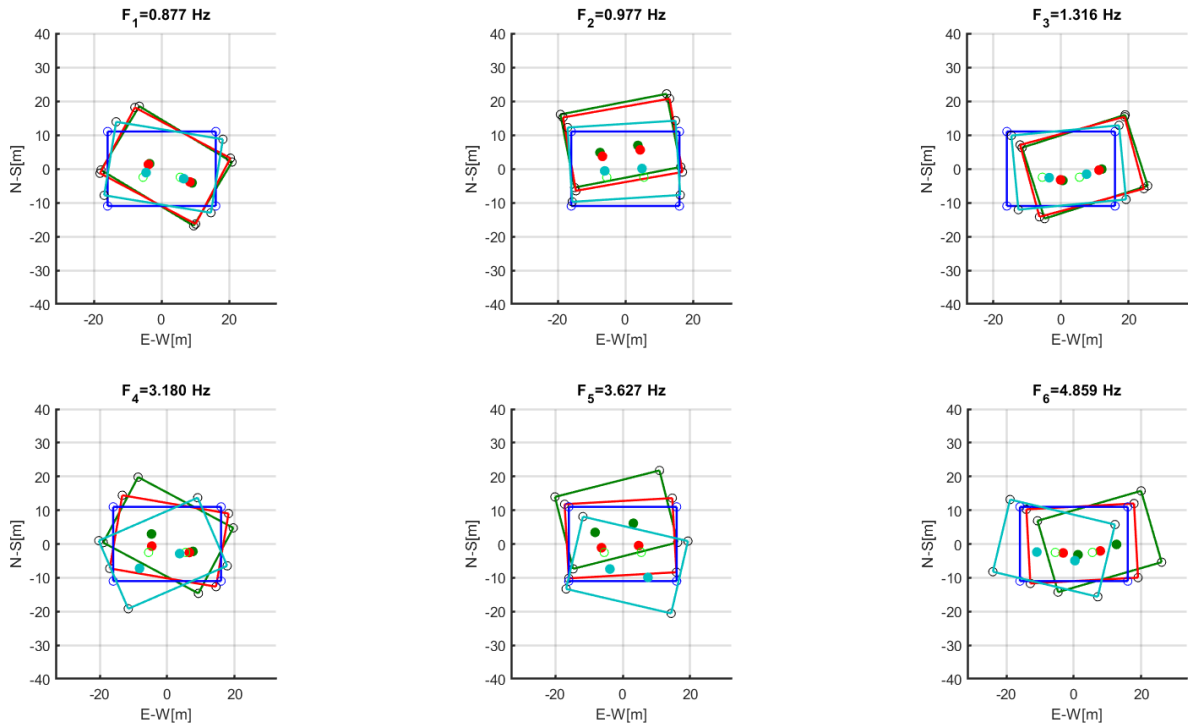


Figura 5.32: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 2, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales

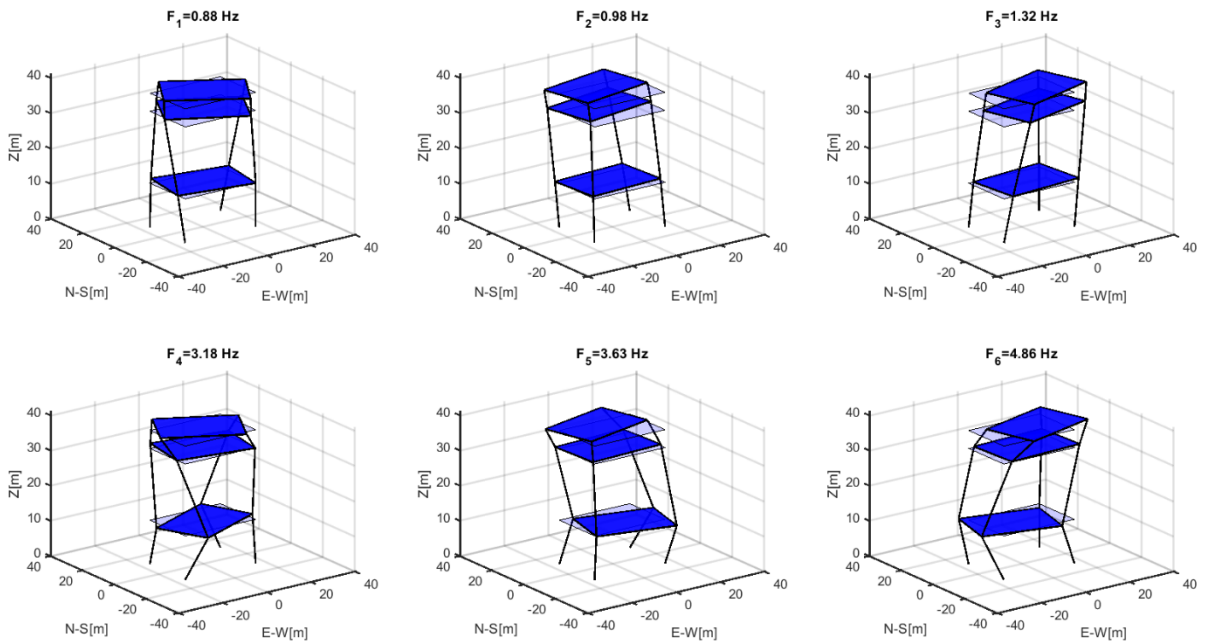


Figura 5.33: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 2, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.2.1.4. Resultados Medición Antígona 3

En la medición Antígona 3 se registran microvibraciones ambientales de los pisos 16, 15, 9 y 5 con los canales de los sensores como se muestra en la Figura 4.11. A estos registros se les aplica análisis en frecuencia, obteniendo los espectros de potencia y coherencia (Figura 5.34). Se identifican frecuencias modales y se comparan con las que se obtienen del método SSI en el diagrama de estabilidad (Figura 5.35), como se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Frecuencias identificadas en medición Antígona 3.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]	Frecuencias identificadas SSI [Hz]
0.89	0.872
0.97	0.982
1.31	1.303
3.2	3.154
3.66	3.637
4.89	4.822
6.35	6.346
7.81	7.798
8	7.945
9.6	9.579

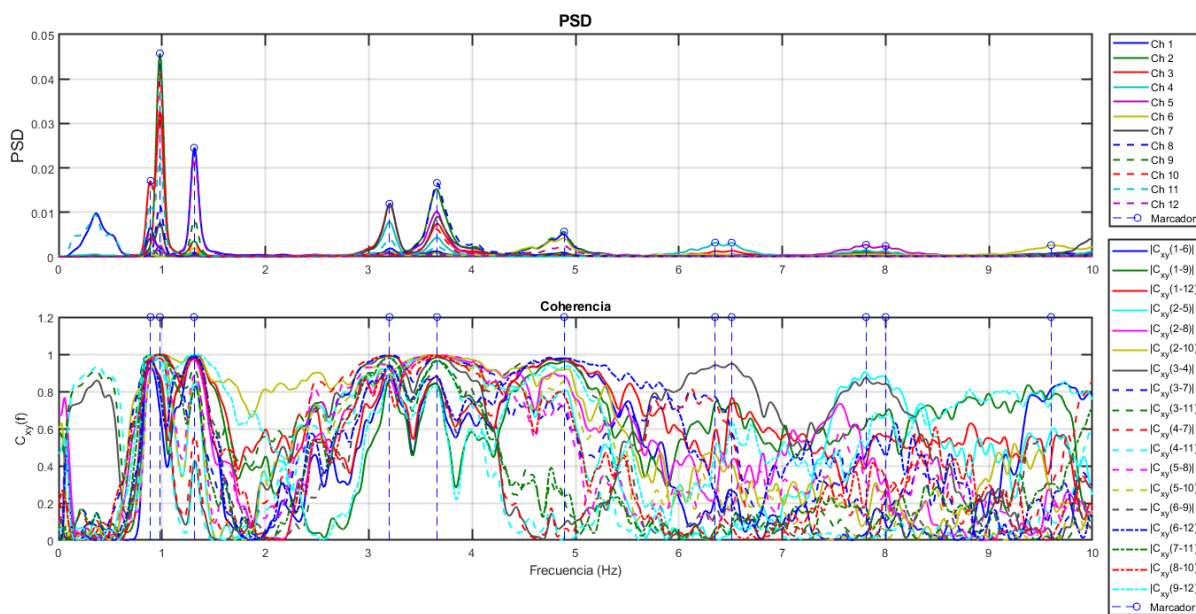


Figura 5.34: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 3, en direcciones mostradas en Figura 4.11.

En las Figura 5.36 y Figura 5.37 se muestran las representaciones gráficas de las formas modales en planta y en elevación tridimensional obtenidas a través del método SSI.

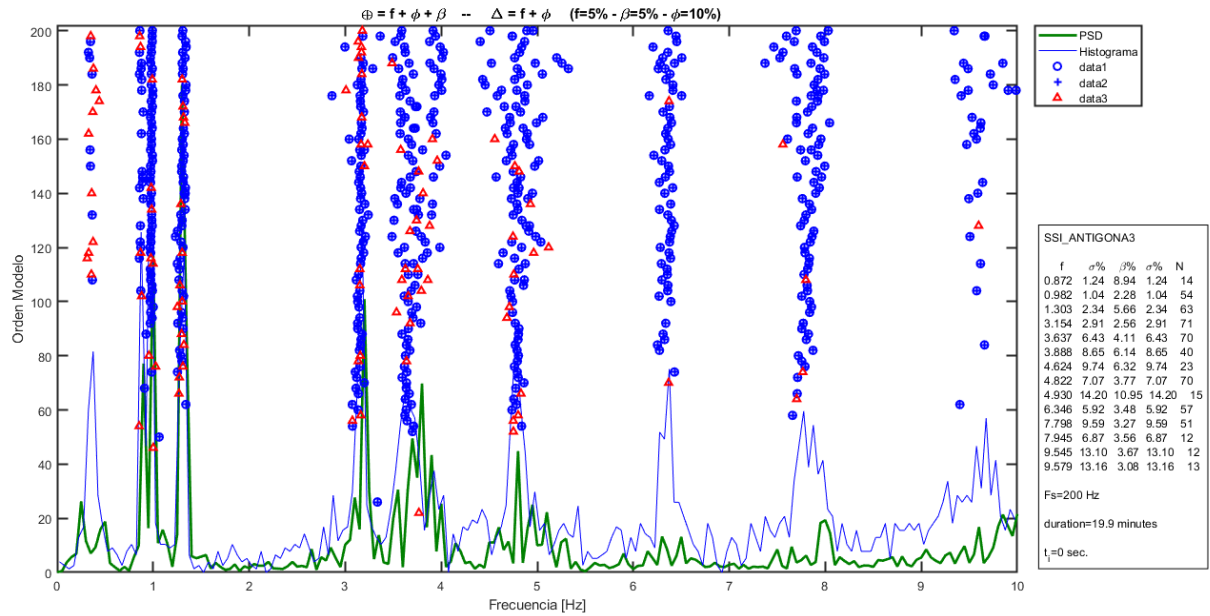


Figura 5.35: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 3, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.11.

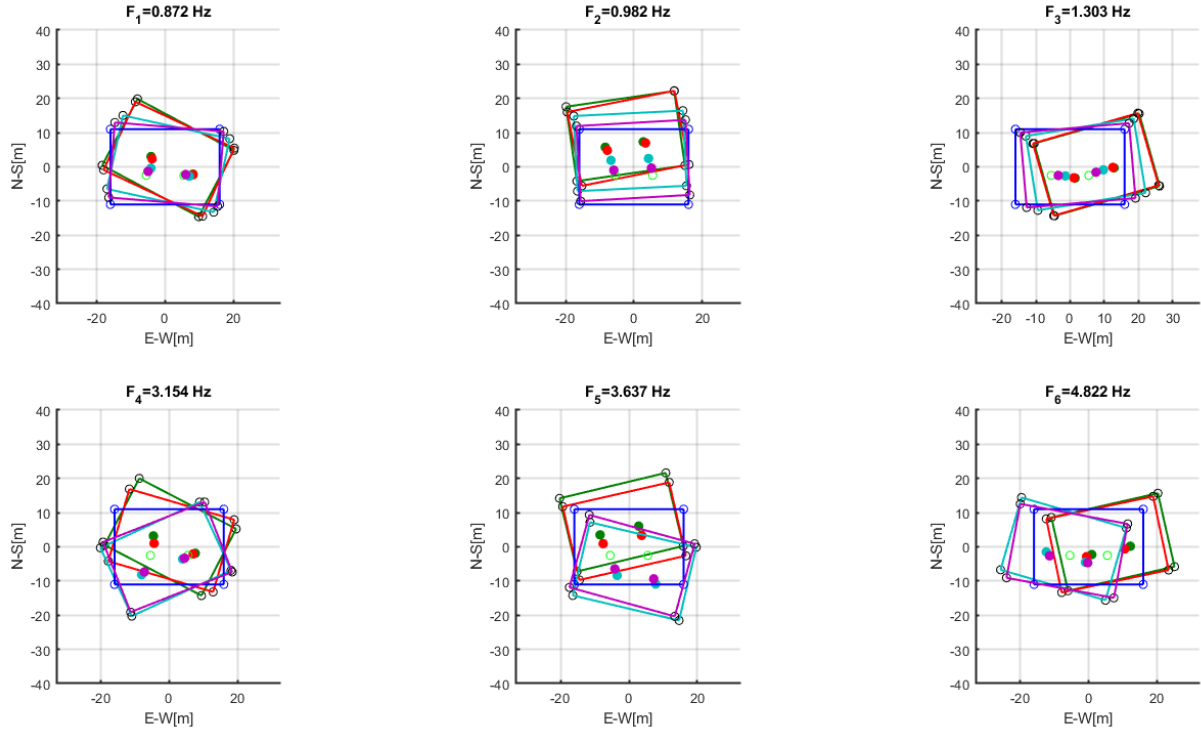


Figura 5.36: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 3, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales

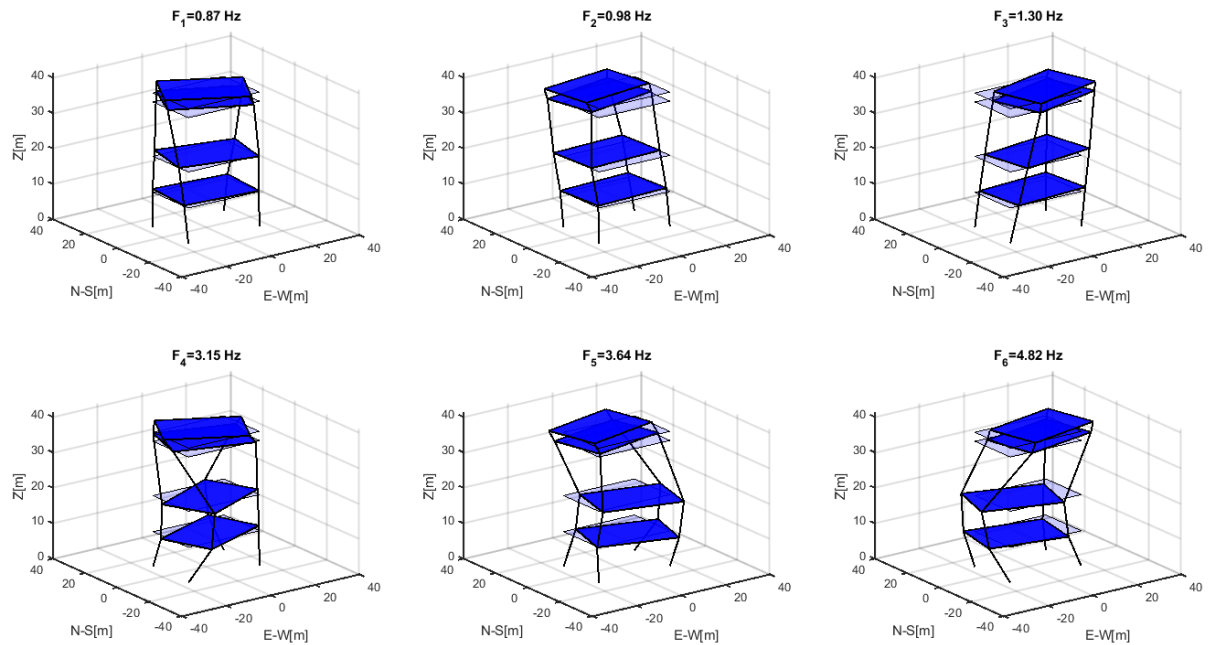


Figura 5.37.: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 3, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.2.1.5. Resultados Medición Antígona 4

En la medición Antígona 4 se registran microvibraciones ambientales de los pisos 16, 15, 10 y 5 con los canales de los sensores dispuestos como se muestra en la Figura 4.12. Esta medición se hace para registrar exclusivamente el piso 10, pero se mantiene la configuración de la medición 3 para los demás pisos y la duración es menor que la de las demás mediciones. A los registros se les realiza un análisis en frecuencia, obteniendo los espectros de potencia y coherencia (Figura 5.38), identificando frecuencias modales que son comparadas con las observadas en el diagrama de estabilidad (Figura 5.39), obtenido con el método SSI. Estas son comparadas en la Tabla 5.5.

A través del método SSI, con el que se obtienen las formas modales a partir del registro, se representan gráficamente como se muestra en la Figura 5.40 y Figura 5.41. Como se observa son similares a los diagramas obtenidos en la medición Antígona 3 debido a que solo se diferencian en solo un piso y este es el inmediatamente superior en la medición.

Tabla 5.5: Frecuencias identificadas en medición Antígona 4.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]	Frecuencias identificadas SSI [Hz]
0.89	0.884
0.98	0.985
1.31	1.315
3.21	3.166
3.65	3.636
4.86	4.816
4.98	5.011
6.54	6.306
7.78	7.813
9.66	9.628

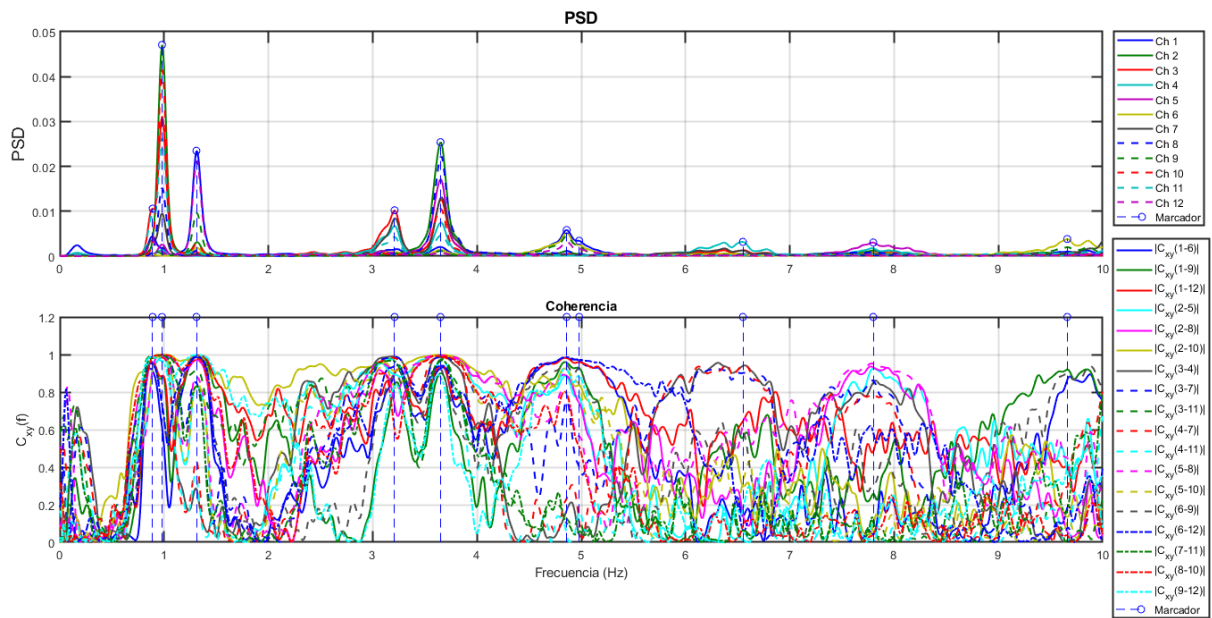


Figura 5.38: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 4, en direcciones mostradas en Figura 4.12.

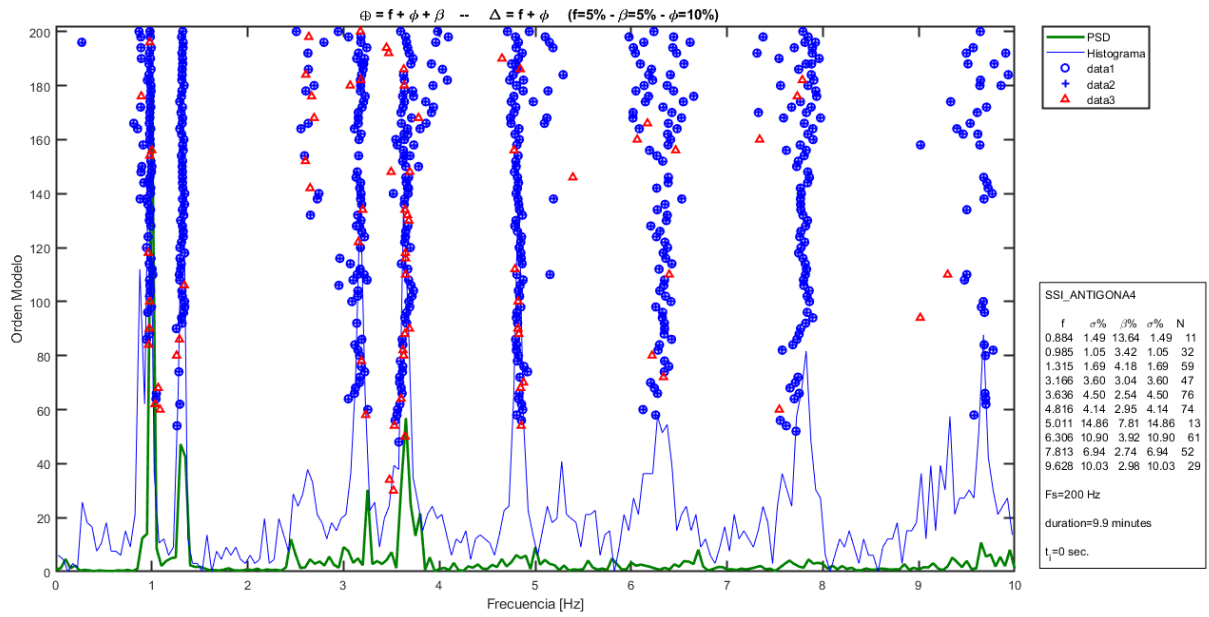


Figura 5.39: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 4, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.12.

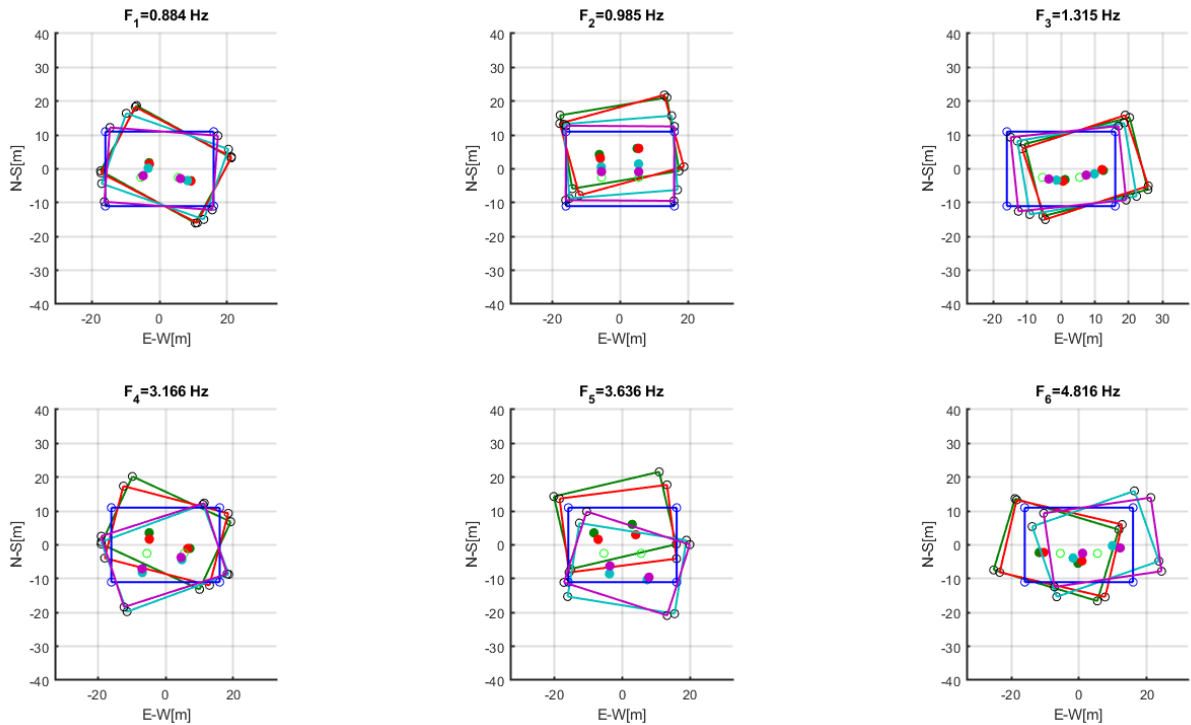


Figura 5.40: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 4, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

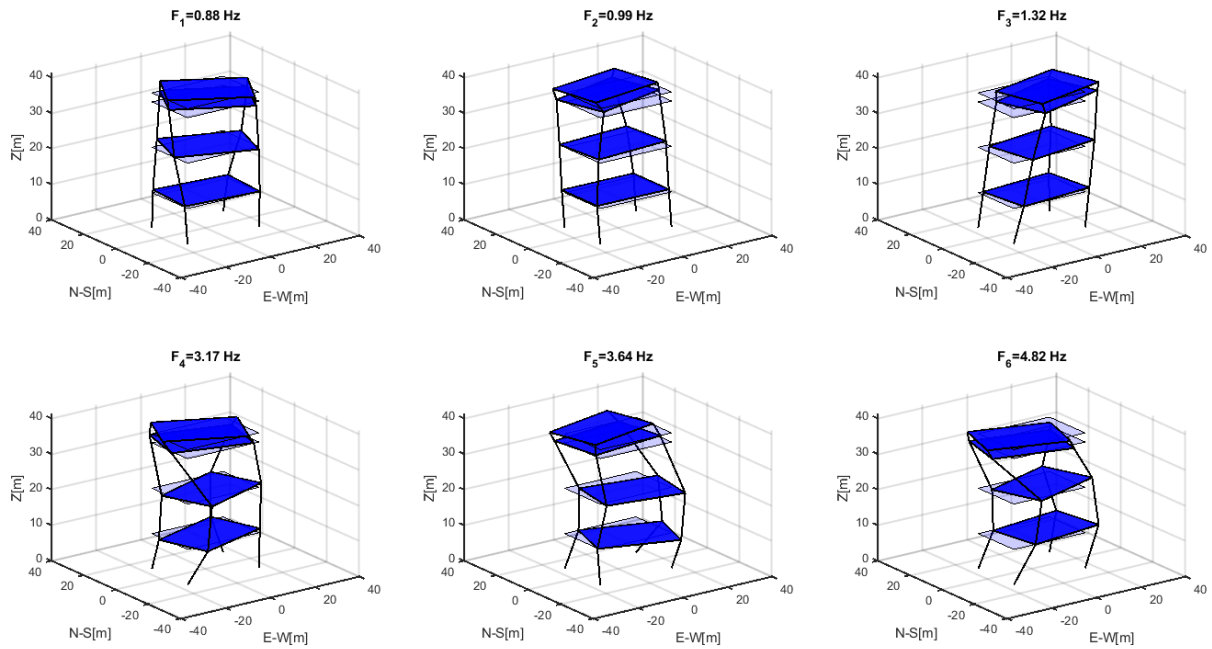


Figura 5.41: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 4, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.2.2. Resultados de Segunda Campaña de Mediciones

La segunda campaña de mediciones abarca la medición de microvibraciones de 9 de los 17 pisos del edificio Antígona, que incluyen los pisos que no se alcanzaron a abarcar en la primera campaña y también 2 pisos que se repiten, los pisos 15 y 16, a lo que se le agrega la calibración inicial con todos los sensores en el piso 16. A partir de los registros de las mediciones se obtienen los resultados que se muestran a continuación.

5.2.2.1. Resultados Calibración Antígona 5

La calibración es realizada con todos los sensores en dirección N-S en el piso 16 del edificio. A los registros se les aplica un filtro entre las frecuencias 0.1 y 50 [Hz] mediante un filtro pasa bajo y un filtro pasa alto del tipo Butterworth de orden 8, al igual que en la calibración Antígona 0, en donde también se observa si las señales son iguales o si se les debe aplicar un factor de calibración aparte del factor que se incluye en las especificaciones de cada EpiSensor. Luego, se realiza un análisis en frecuencia con lo que se obtiene el espectro de potencia y la función de coherencia que se observa en la Figura 5.42, en donde se identifican frecuencias que se muestran en la Tabla 5.6.

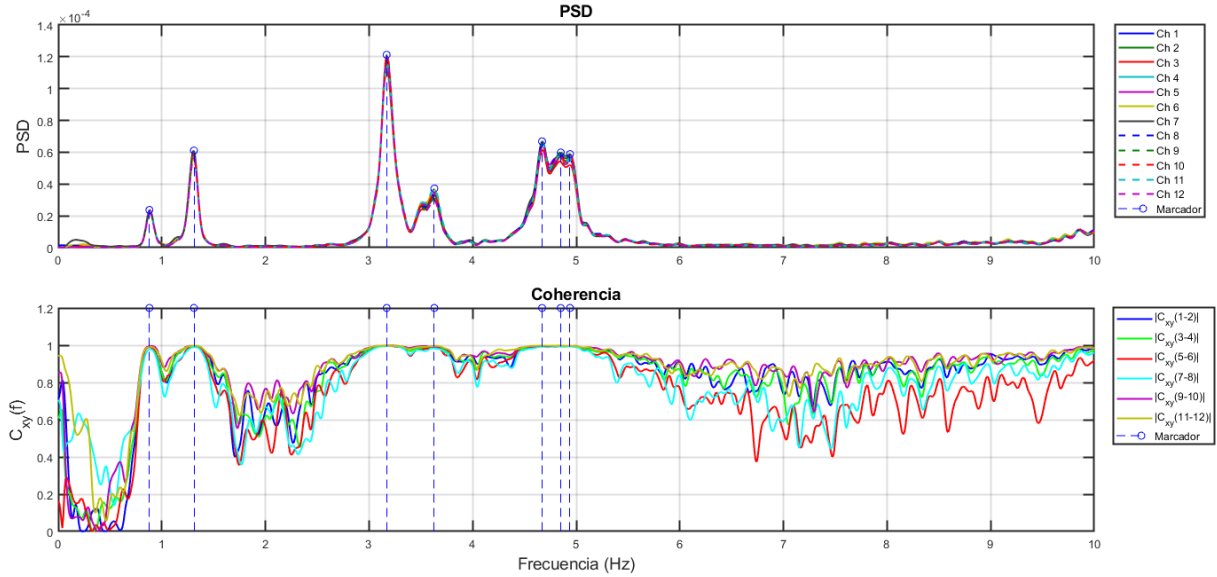


Figura 5.42: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 5, en la dirección N-S.

Tabla 5.6: Frecuencias identificadas en medición Antígona 5 en dirección N-S.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]
0.88
1.31
3.17
3.63
4.67

5.2.2.2. Resultados Medición Antígona 6

En la medición Antígona 6 se registran microvibraciones ambientales de los pisos 16, 13, 3 y 2 con los canales de los sensores dispuestos como se muestra en la Figura 4.13, estos registros al igual que a los de la primera campaña, se les aplica un análisis en frecuencia y se obtiene el espectros de potencia y coherencia (Figura 5.43), en donde se identifican frecuencias que son contrastadas con las obtenidas del diagrama de estabilidad (Figura 5.44), como se muestra en la Tabla 5.7.

Como se observa en las frecuencias identificadas en la medición Antígona 6, aparece la primera frecuencia que no es identificada en el diagrama de estabilidad, sin embargo, se incluye por aparecer en las representaciones modales de la Figura 5.45 y la Figura 5.46.

Tabla 5.7: Frecuencias identificadas en medición Antígona 6.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]	Frecuencias identificadas SSI [Hz]
0.88	0.872
0.97	0.976
1.31	1.312
3.17	3.088
3.62	3.584
4.85	4.755
6.27	6.253
7.69	7.683
7.83	7.740
9.55	9.460

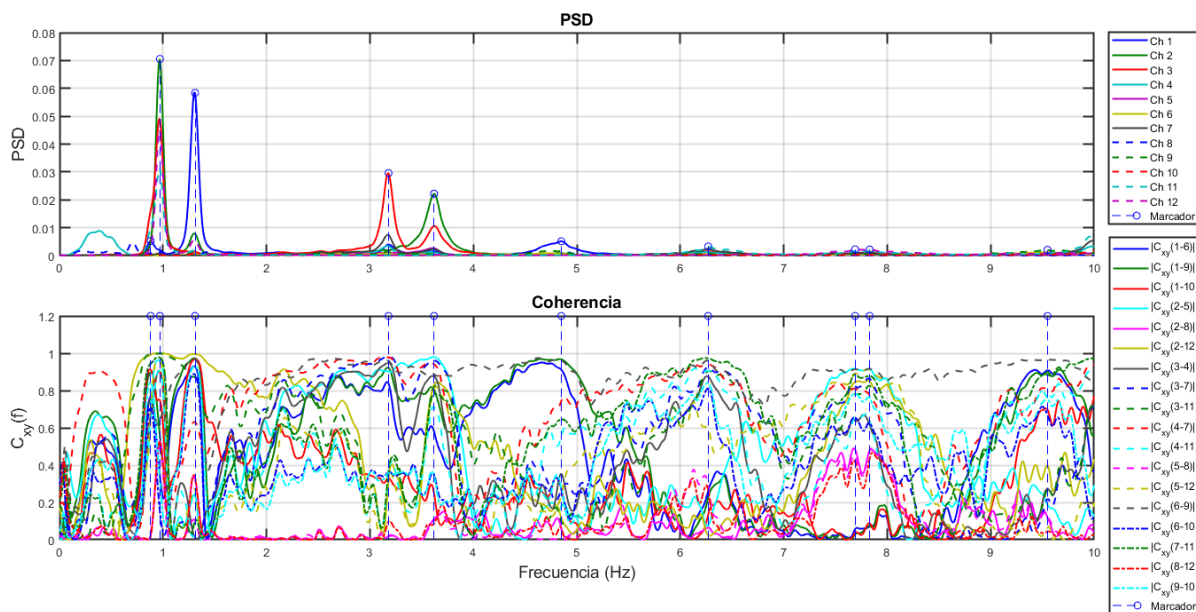


Figura 5.43: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 6, en direcciones mostradas en Figura 4.13.

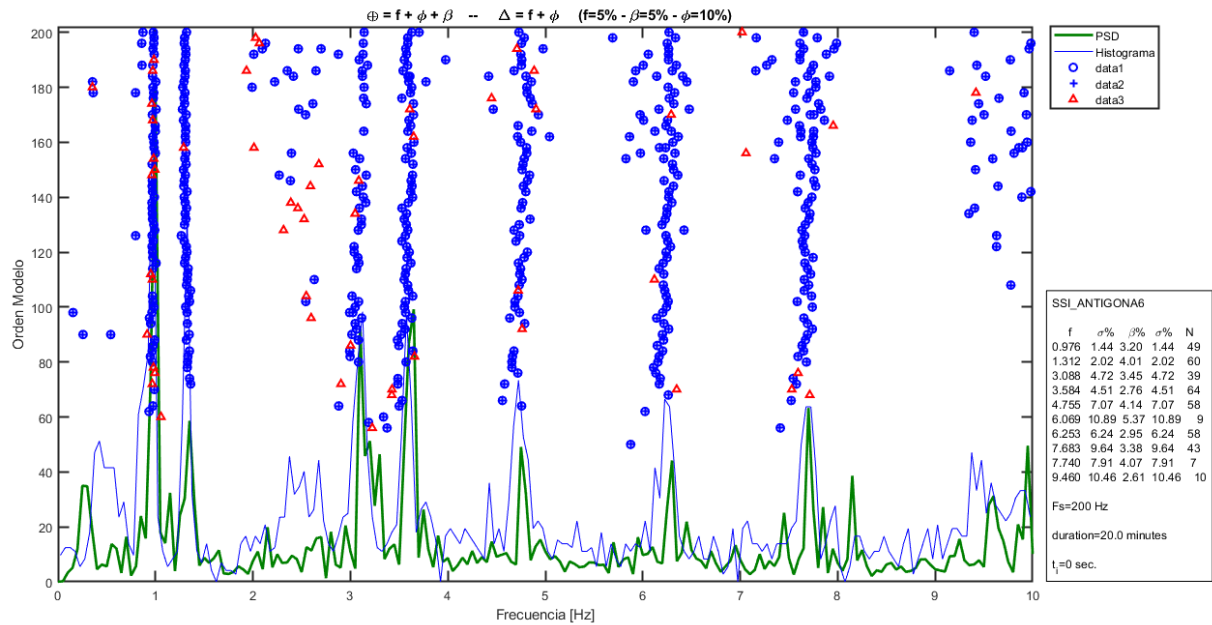


Figura 5.44: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 6, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.13.

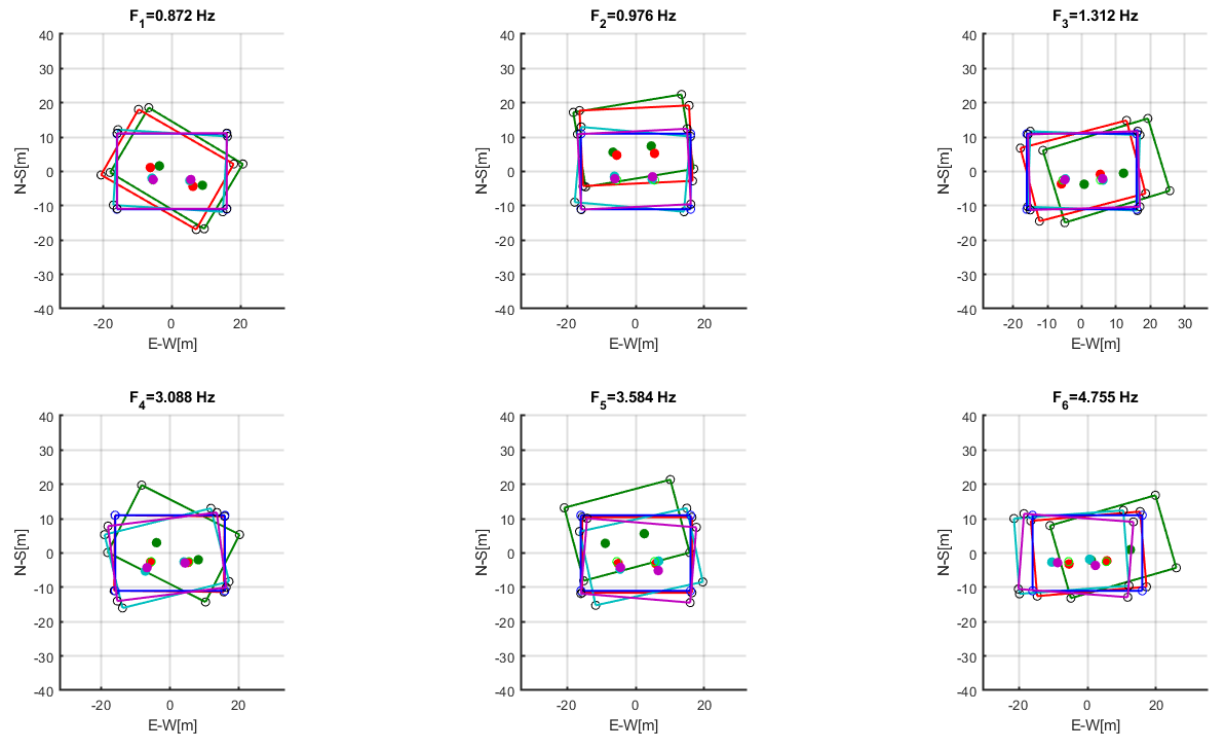


Figura 5.45: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 6, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

En la Figura 5.45 y Figura 5.46 que son representaciones gráficas de las formas modales obtenidas a través del método SSI, se observa que si aparece la primera frecuencia

($F_1 = 0.872[Hz]$), esto se debe a que esta medición posee baja energía, tal como se observa en el espectro de potencia y en el diagrama de estabilidad, pero al disminuir las coincidencias con esta frecuencia dentro de los resultados obtenidos del método SSI, esta frecuencia aparece con su información modal.

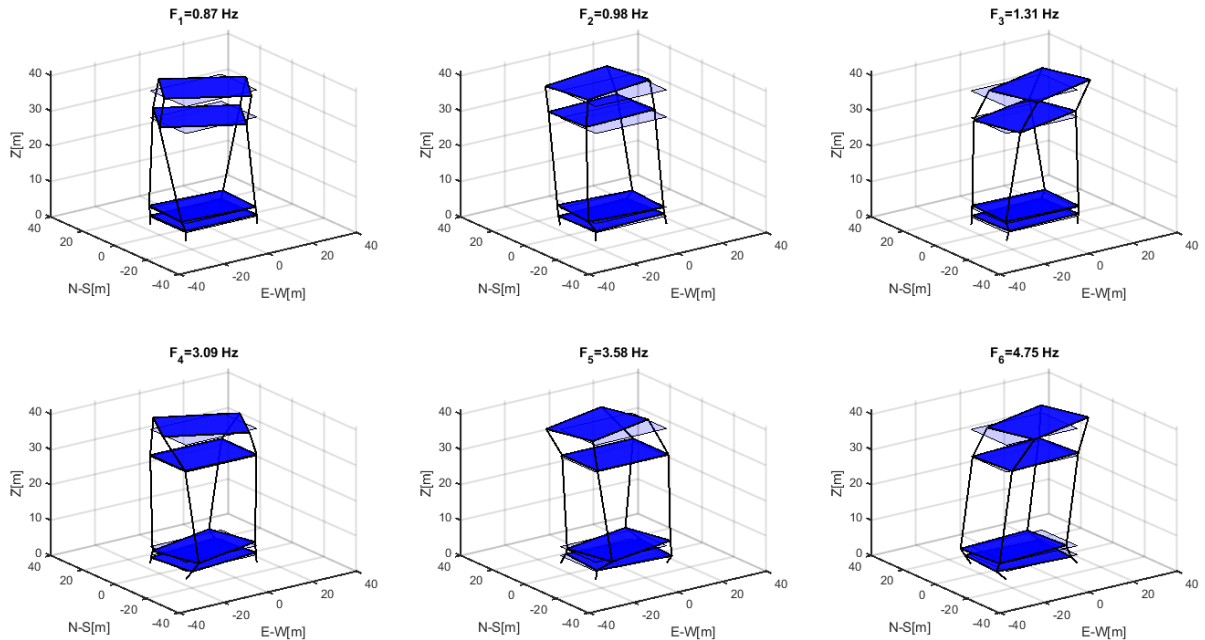


Figura 5.46: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 6, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.2.2.3. Resultados Medición Antígona 7

En la medición Antígona 7 se registran microvibraciones ambientales de los pisos 16, 11, 7 y 1 con los canales de los sensores dispuestos como se muestra en la Figura 4.14. A estos registros se les aplica un análisis en frecuencia obteniendo el espectro de potencia y coherencia (Figura 5.47), en donde se identifican frecuencias que son contrastadas con las obtenidas del diagrama de estabilidad (Figura 5.48), como se muestra en la Tabla 5.8.

Como se observa en Tabla 5.8, aparece la primera frecuencia que no es identificada en el diagrama de estabilidad, sin embargo, se incluye por aparecer en las representaciones modales de la Figura 5.49 y la Figura 5.50, al igual que en la medición Antígona 6.

Tabla 5.8: Frecuencias identificadas en medición Antígona 7.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]	Frecuencias identificadas SSI [Hz]
0.88	0.913
0.96	0.966
1.30	1.309
3.20	3.145
3.65	3.594
4.75	4.773
6.35	6.324
7.78	7.760
9.53	9.451

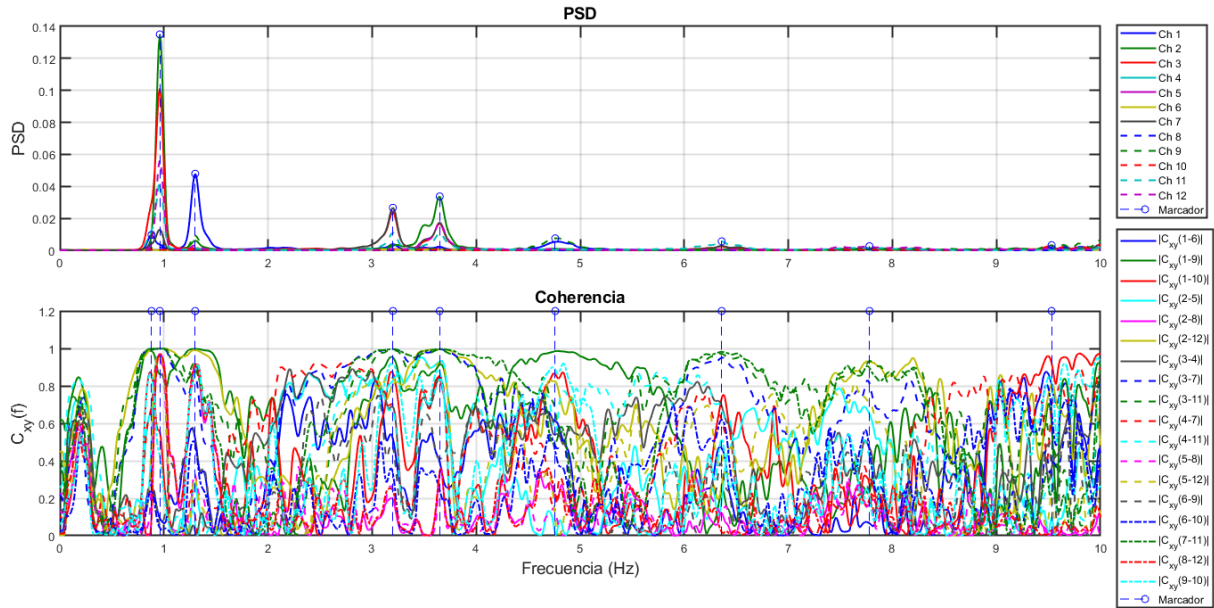


Figura 5.47: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 7, en direcciones mostradas en Figura 4.14.

En la Figura 5.49 y Figura 5.50, que son representaciones gráficas de las formas modales obtenidas a través del método SSI, se observa que si aparece la primera frecuencia ($F_1 = 0.913[Hz]$), esto se debe a que en esta medición posee baja energía al igual que en la medición Antígona 6, y al disminuir las coincidencias con esta frecuencia dentro de los resultados obtenidos del método SSI, esta frecuencia aparece con su información modal.

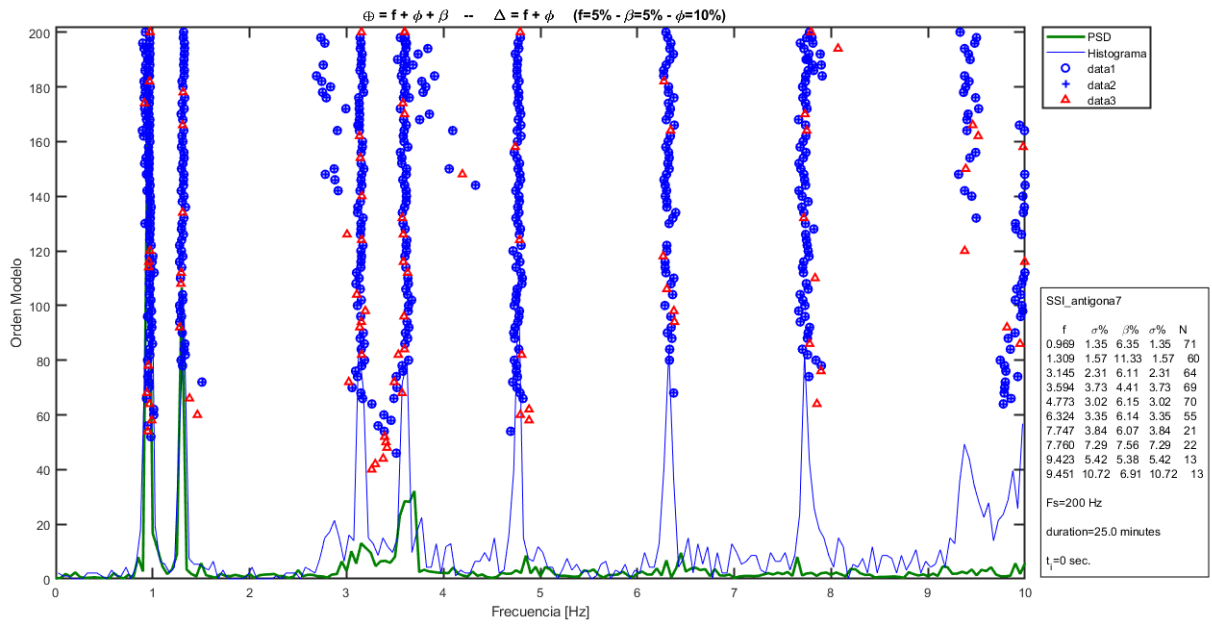


Figura 5.48: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 7, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.14

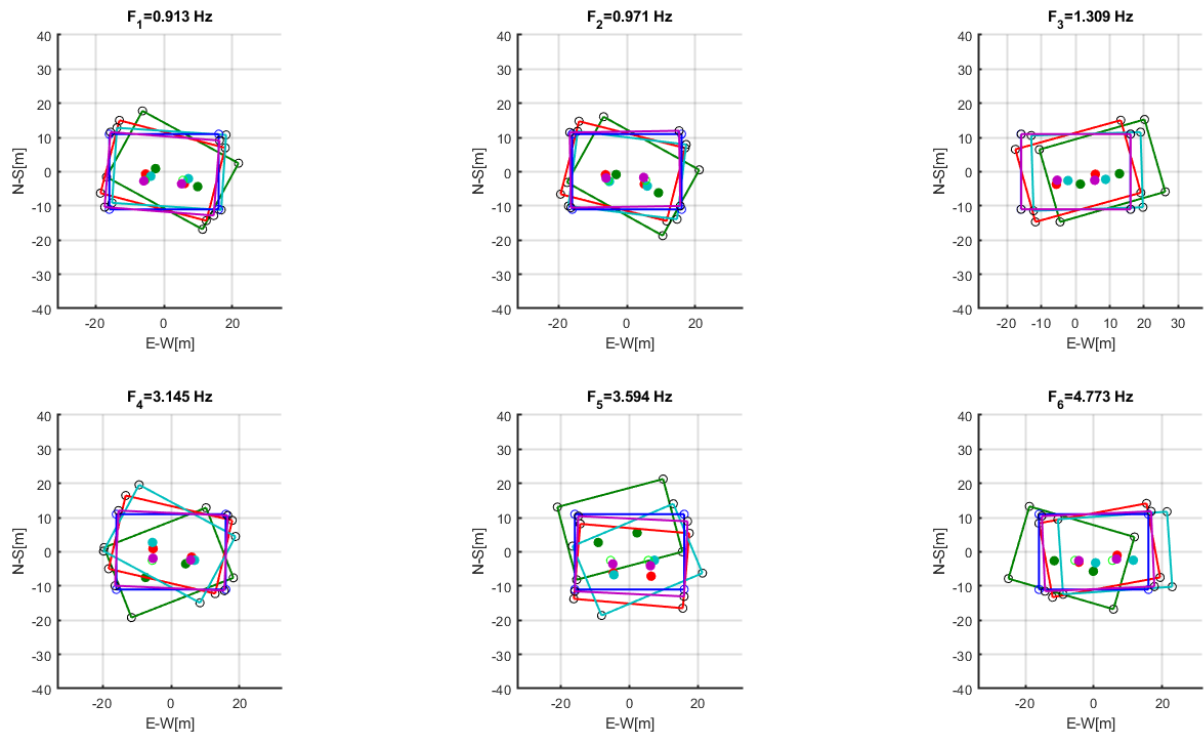


Figura 5.49: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 7, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales..

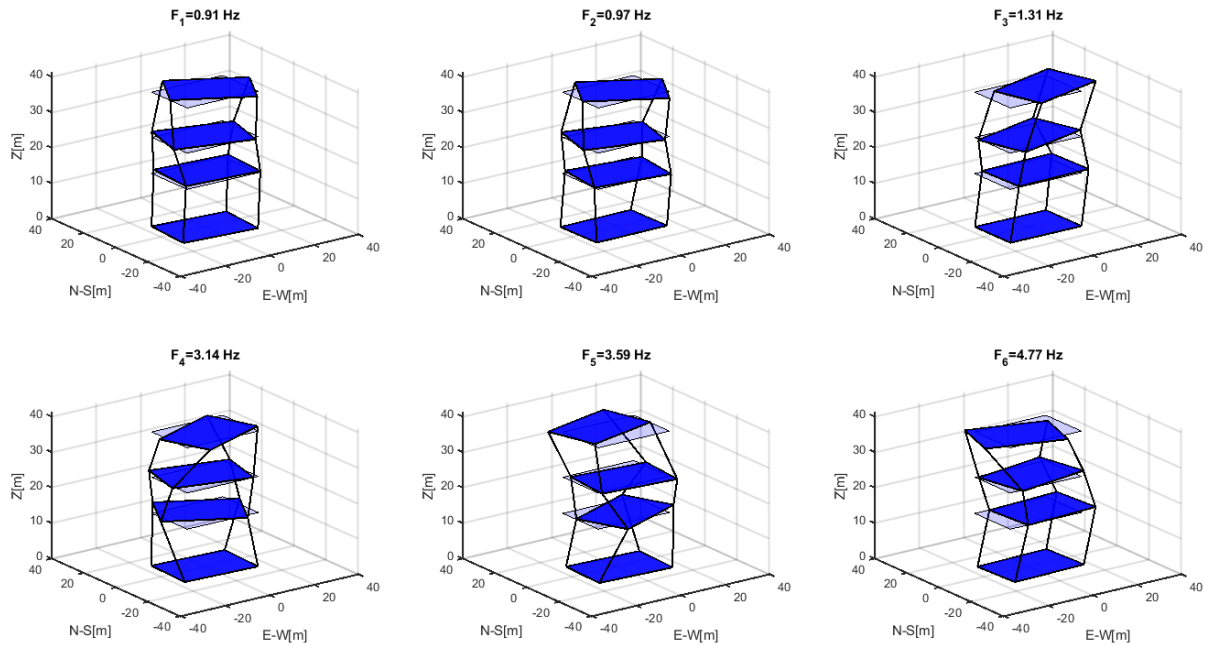


Figura 5.50: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 7, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.2.2.4. Resultados Medición Antígona 8

En la medición Antígona 8 se registran microvibraciones ambientales de los pisos 17,16 y 15 con los canales de los sensores dispuestos como se muestra en la Figura 4.15, estos registros se les aplica un análisis en frecuencia obteniendo el espectro de potencia y coherencia (Figura 5.51), en donde se identifican frecuencias que son contrastadas con las obtenidas del diagrama de estabilidad (Figura 5.52), como se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Frecuencias identificadas en medición Antígona 8.

Frecuencias identificadas PSD [Hz]	Frecuencias identificadas SSI [Hz]
0.88	0.875
0.97	0.974
1.31	1.318
3.18	3.125
3.65	3.639
4.85	4.770
6.38	6.366
7.77	7.743
9.68	9.689

Como se observa en la Tabla 5.9, aparece la primera frecuencia $F_1 = 0.875[Hz]$ que no es identificada en el diagrama de estabilidad, sin embargo, se incluye por aparecer en las representaciones modales de la Figura 5.53 y la Figura 5.54, al igual que en la medición Antígona 6 y Antígona 7.

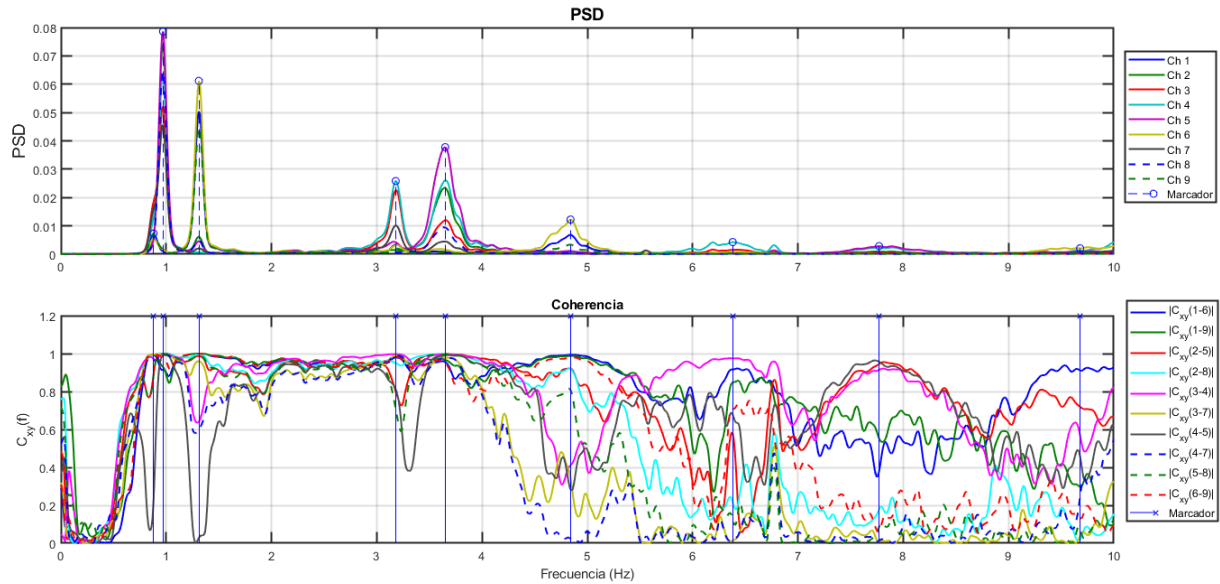


Figura 5.51: Espectro de potencia y función de coherencia correspondiente en la medición Antígona 8, en direcciones mostradas en Figura 4.15.

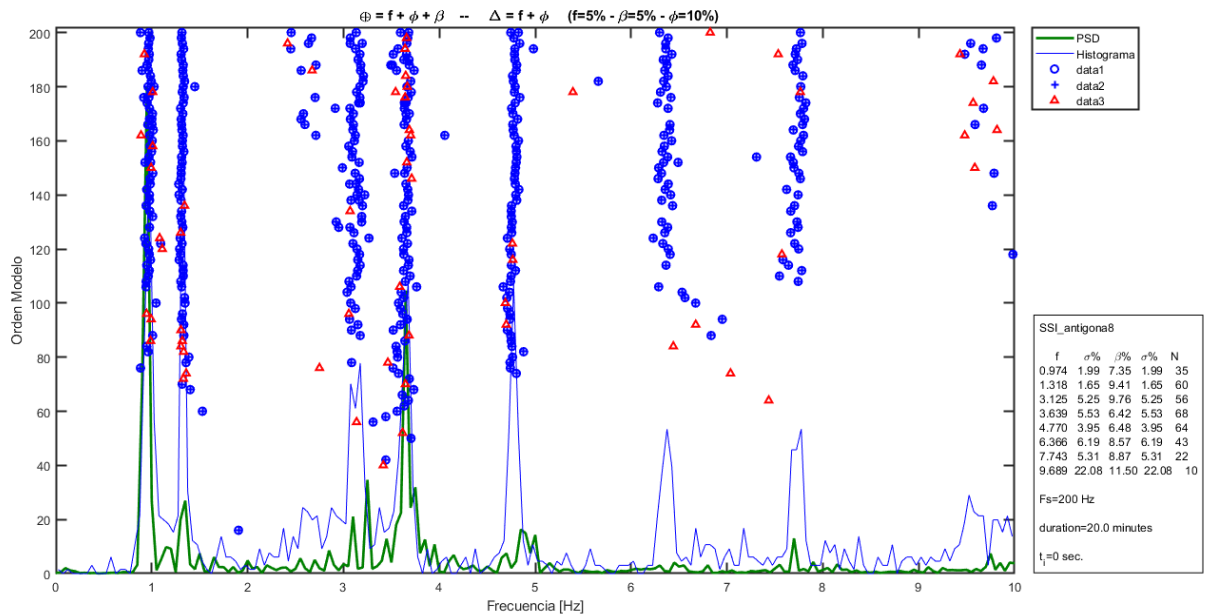


Figura 5.52: Diagrama de estabilidad de la medición Antígona 8, en las direcciones de los canales mostrados en la Figura 4.15.

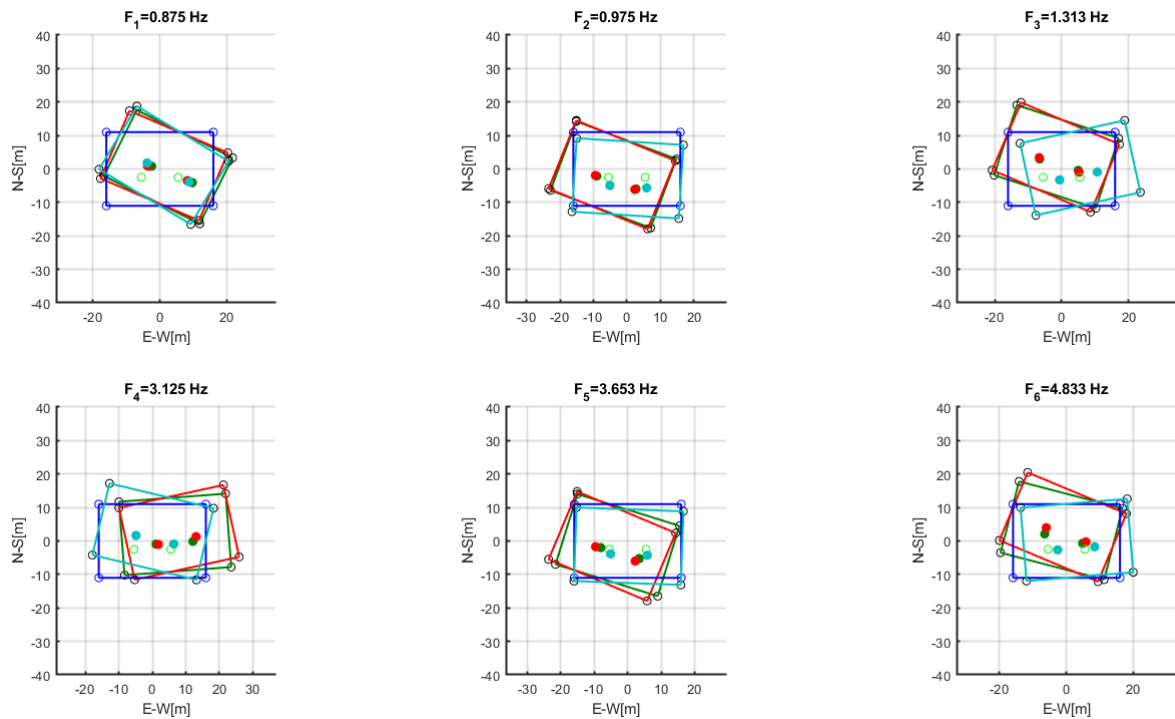


Figura 5.53: Diagramas de formas modales en planta de pisos medidos en Antígona 8, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales..

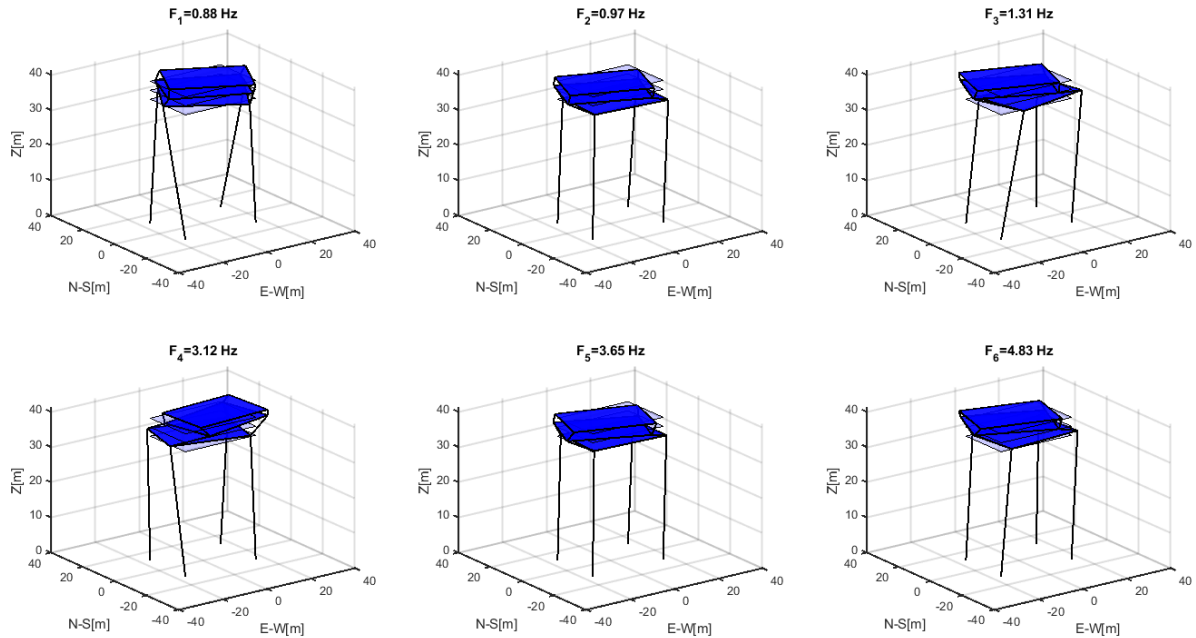


Figura 5.54: Diagramas de formas modales tridimensional de los pisos medidos en Antígona 8, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.2.3. Resultados Finales de Campañas Mediciones

En las campañas de mediciones en el edificio Antígona con acelerómetros EpiSensor, se registran las vibraciones ambientales de todos los pisos del edificio con el fin de integrar los resultados de todas las plantas y obtener el comportamiento dinámico del edificio por piso.

La integración de las mediciones se realiza con los resultados del método SSI de las 8 mediciones, en donde se unen todos los canales para generar una sola representación de los 6 primeros modos de vibración del edificio. Para la integración de todos los canales es necesario compatibilizar las mediciones de todos los pisos teniendo como referencia los registros en la planta 16 de todas las mediciones, a través de los resultados arrojados por el método SSI, y ajustar las deformaciones para poder graficarlas. En todos estos procedimientos se consideraron grandes deformaciones de las plantas para una mejor visualización.

Para la compatibilización de las mediciones se considera que los resultados de cada medición son los desplazamientos de los 3 acelerómetros de cada piso para los 6 primeros modos, datos con los que se calculan factores del desplazamiento del piso 16 como la razón entre el desplazamiento de este piso en la medición 1 y cada una de las mediciones, es decir, 3 factores por modo de cada medición, a partir de esos factores se estima un factor para cada medición por modo, el cual se utiliza como valor inicial para encontrar solución a un problema no lineal de minimización, el que busca encontrar la mínima distancia entre las esquinas de las plantas del piso 16 de todas las mediciones, en donde la planta rectangular es de 32[m] de largo por 22[m] de ancho. Los factores óptimos encontrados se multiplican por modo a cada uno de los resultados de las mediciones y se verifica que las plantas del piso 16 coincidan, de no hacerlo, se ajustan los límites superior e inferior del problema de optimización hasta obtener la compatibilidad de las plantas.

En la Figura 5.55, se muestra la compatibilización de los movimientos en planta del piso 16 para cada modo, al obtener este resultado no todos los pisos se ajustan perfectamente a la forma modal y para esto se realizan pequeños ajustes gráficos para que sigan la tendencia del movimiento. Una vez terminado, se obtiene la Figura 5.56, en donde se muestran las formas modales con todos los pisos compatibilizados. Al ser muchos pisos no se aprecia cada uno de ellos, pero si es posible observar cada modo.

En la Figura 5.57 se obtiene el resultado final de las mediciones, que son las formas modales de todos los pisos integrados en una representación gráfica tridimensional, pudiendo observar claramente cómo se comporta cada piso por modo, en el ANEXO A se pueden observar los desplazamientos de su centro geométrico para todos los modos.

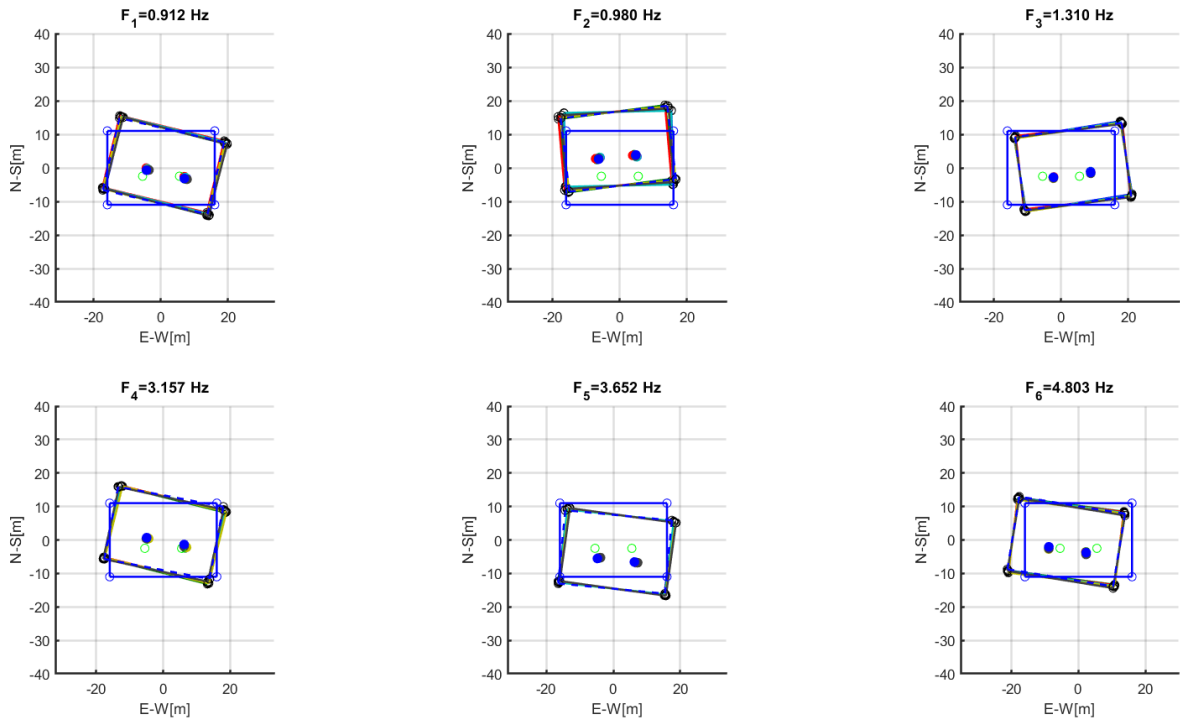


Figura 5.55: Diagramas de formas modales en planta del piso 16 en todas las mediciones del edificio Antígona.

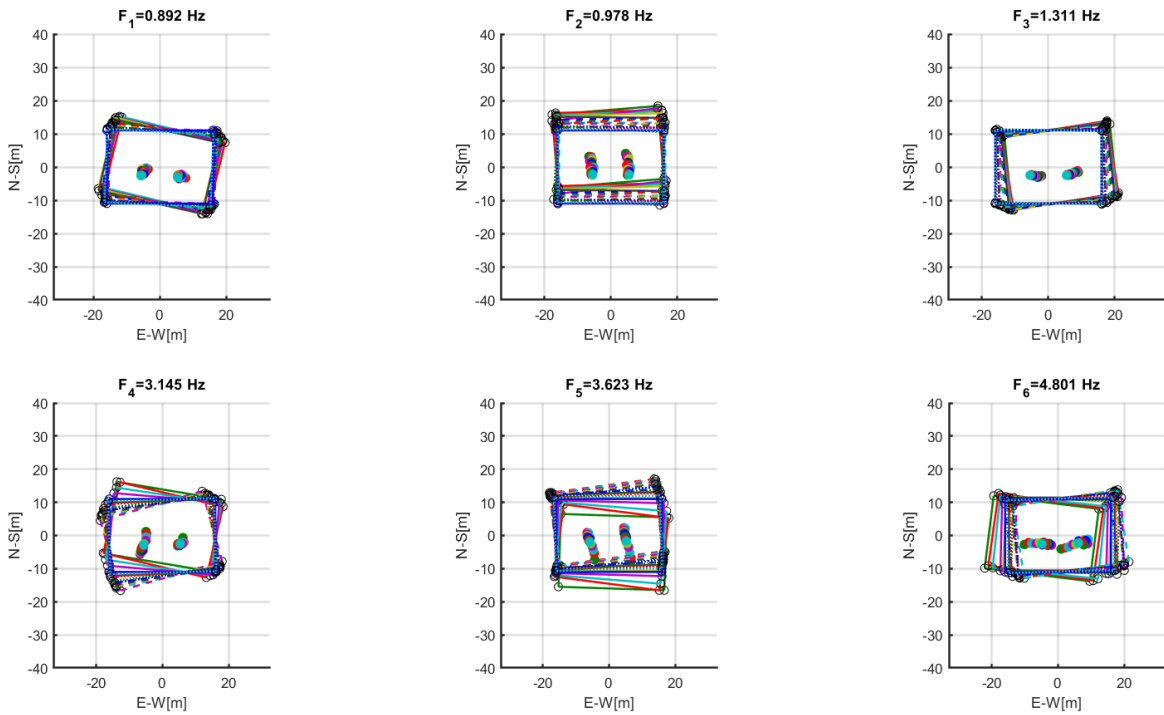


Figura 5.56: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

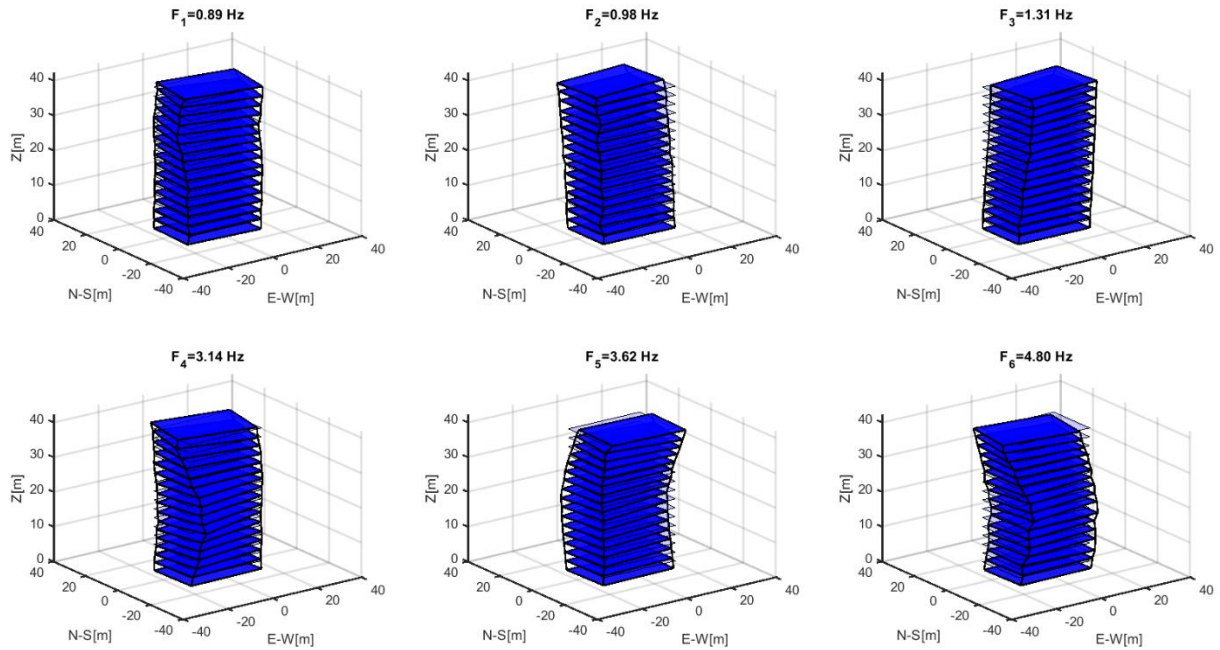


Figura 5.57: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del edificio Antigona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.3. Ajuste de Formas Modales

Al integrar las mediciones de todos los pisos del edificio, como se muestra en el diagrama de la Figura 5.57, se observa la tendencia de los modos con discontinuidades entre los desplazamientos de los pisos, por lo que se realiza un ajuste de las formas modales para mejorar la visualización del diagrama y también para que se facilite la calibración de modelos al haber mayor continuidad en los desplazamientos de los pisos.

Para el ajuste de las formas modales se consideran los desplazamientos en los ejes globales X e Y (E-W y N-S) y el giro en torno al eje Z de elevación en el centro geométrico de cada planta del edificio, estos se grafican para cada grado de libertad por modo y se realiza un ajuste polinomial para cada uno de estos gráficos, generando funciones que describen movimiento del edificio por grado de libertad y modo. En la Figura 5.58 se muestran los desplazamientos en el eje X de los pisos para cada modo en azul y en rojo se observa el ajuste polinomial, de igual forma se muestran para el eje Y (Figura 5.59) y para el giro en torno a Z (Figura 5.60). Cabe destacar que para todos los ajustes polinomiales se excluyó el piso 17, debido al comportamiento anómalo que se observa en algunos modos y grados de libertad, por lo que el último piso se muestra se adhiere a la tendencia del resto del edificio.

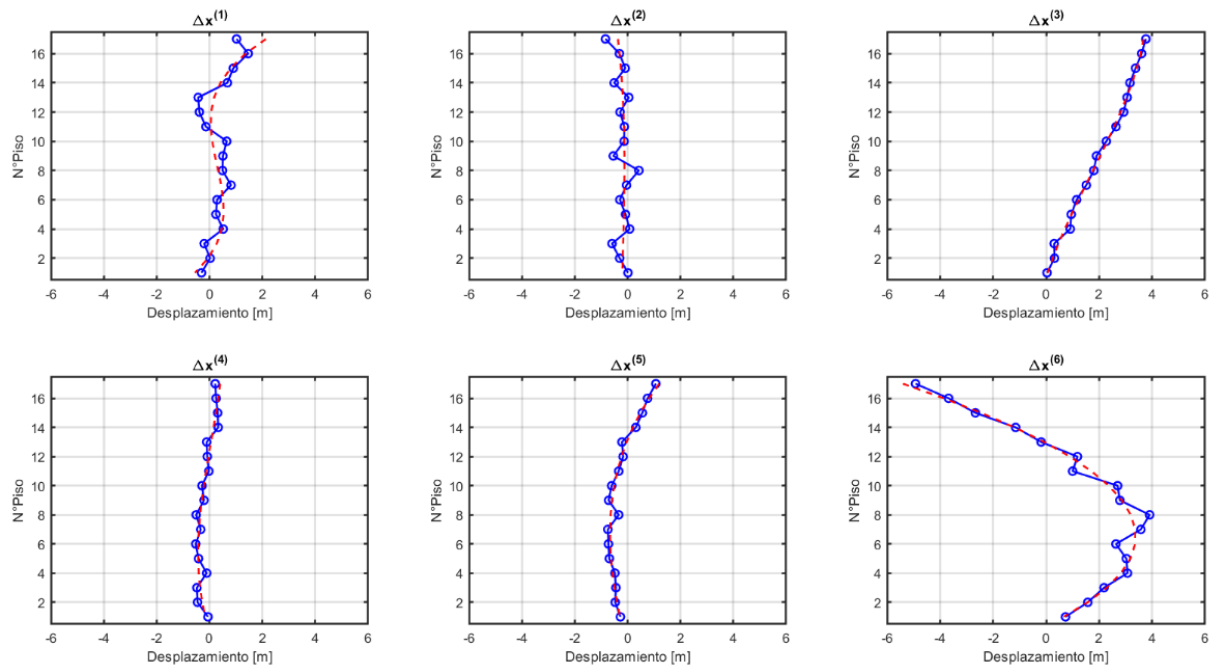


Figura 5.58: Ajuste polinomial de desplazamientos de los centros geométricos de cada piso en el eje X de las mediciones realizadas para los primeros 6 modos del edificio Antígona.

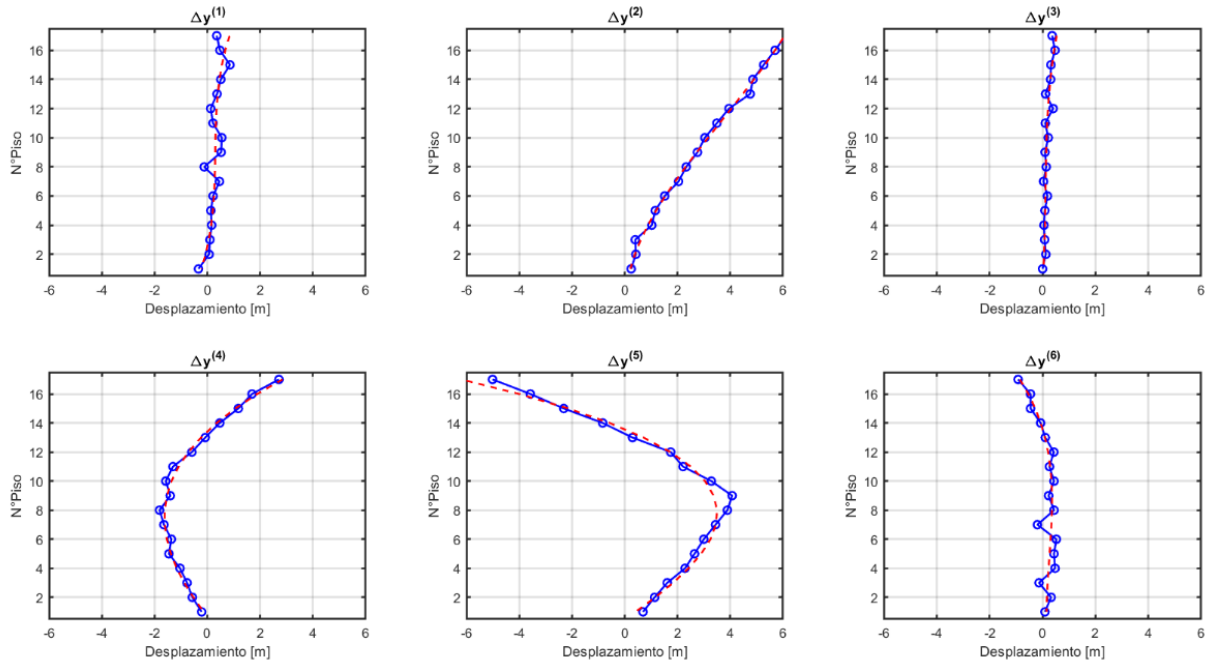


Figura 5.59: Ajuste polinomial de desplazamientos de los centros geométricos de cada piso en el eje Y de las mediciones realizadas para los primeros 6 modos del edificio Antígona.

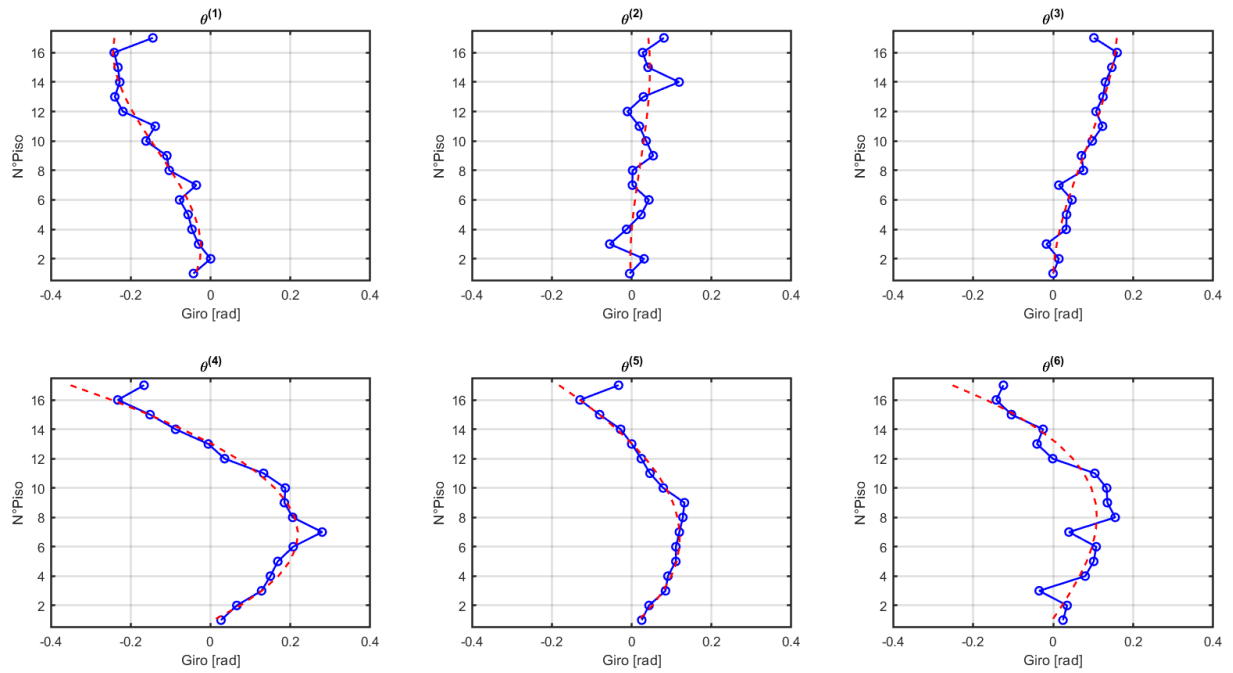


Figura 5.60: Ajuste polinomial de giros en torno al eje Z de los centros geométricos de cada piso de las mediciones realizadas para los primeros 6 modos del edificio Antígona.

De los ajustes polinomiales realizados, se recopilan los valores de los desplazamientos en los centros geométricos, y se grafican las formas modales obteniéndose el diagrama en planta de las formas modales (Figura 5.61) y diagrama tridimensional de las formas modales (Figura 5.62) con ajustes, los desplazamientos de los centros geométricos se muestran en el ANEXO A junto con los de las formas modales obtenidas de las mediciones.

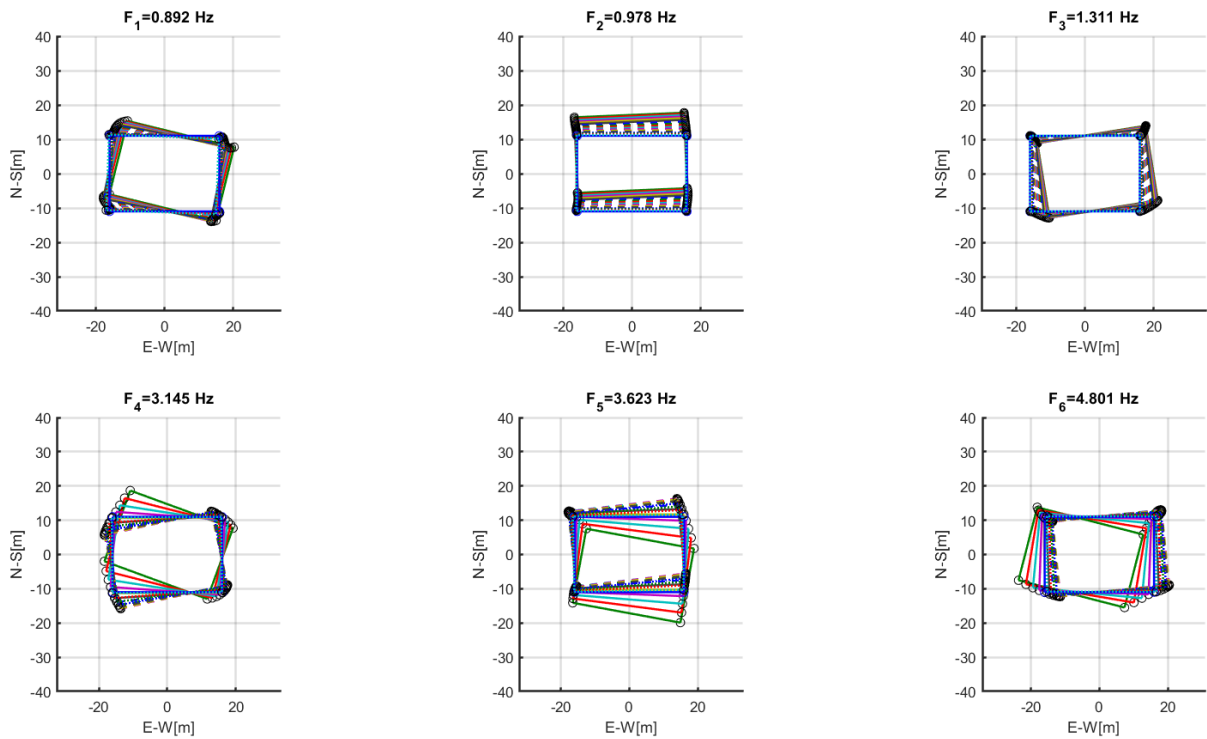


Figura 5.61: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos del edificio Antígona con ajuste polinomial de desplazamientos de centros geométricos, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

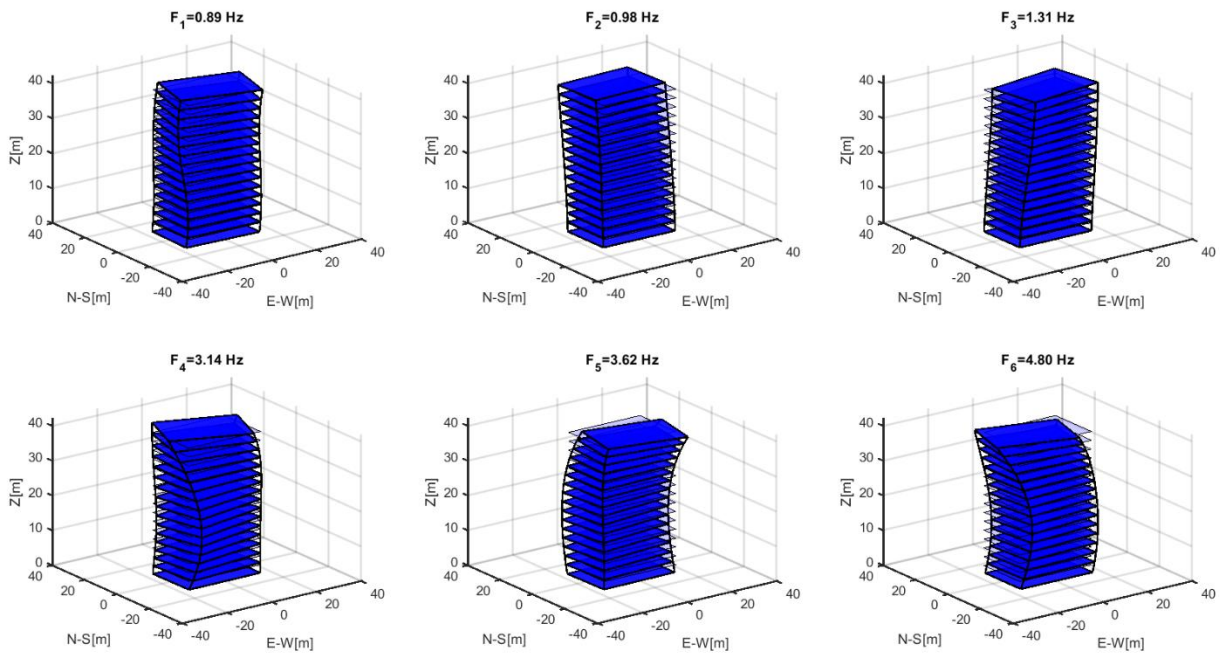


Figura 5.62: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del edificio Antígona con ajuste polinomial de desplazamientos de centros geométricos, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

5.4. Propiedades Dinámicas Identificadas en Campañas de Medición

En cada medición se reconocen distintas propiedades dinámicas, tanto a partir de los espectros de frecuencia como los resultados obtenidos por el método de identificación del subespacio estocástico. Por lo que se presentan todas las propiedades identificadas, en las campañas de medición del edificio Antígona, para los 6 primeros modos de vibración.

En la Tabla 5.10 se muestran las frecuencias identificadas, a través del método SSI, de las mediciones realizadas al edificio con sismómetros TROMINO. De estos datos se puede apreciar el promedio de las frecuencias identificadas y la desviación estándar porcentual de estos (Tabla 5.11), valores que se diferencian de los mostrados en los diagramas de modos, ya que estos están ponderados por los pisos que aportan al diagrama y el dato de la medición M5 no se incluye en el promedio en para el modo 6 (Tabla 5.12), se utiliza el mismo criterio para la razón de amortiguamiento modal.

Tabla 5.10: Frecuencias identificadas por SSI en las mediciones con sismómetros.

Modo	Frecuencias identificadas SSI [Hz]				
	M1	M2	M3	M4	M5
1	0.894	0.887	0.892	0.891	0.886
2	0.983	0.982	0.983	0.983	0.979
3	1.331	1.330	1.331	1.327	1.337
4	3.237	3.238	3.243	3.240	3.207
5	3.702	3.710	3.704	3.691	3.693
6	4.936	4.968	4.927	4.880	5.425

Tabla 5.11: Promedio y desviación estándar de frecuencias identificadas con SSI de mediciones con sismómetros.

Modo	Promedio frecuencias SSI [Hz]	Desviación estándar frec. SSI
1	0.890	0.003
2	0.982	0.002
3	1.331	0.004
4	3.233	0.015
5	3.700	0.008
6	5.027	0.225

En la Tabla 5.10 se observa que la frecuencia identificada del modo 6 para la medición M5 está fuera del rango de las frecuencias que se identificaron en las otras mediciones para el mismo modo, esta desviación del promedio de las otras 4 mediciones se hace visible en la Tabla 5.11. Este valor y desviación se atribuyen a que en el diagrama de estabilidad (Figura 5.19) de esta medición no se encuentran coincidencias triples (\oplus) en la frecuencia del modo 6, por lo que toma la coincidencia más cercana de frecuencia para ese modo sin este ser un valor estabilizado para una frecuencia, por lo que para esa medición no se identificó ese modo y se descarta su resultado, siendo el promedio de frecuencia 4.928[Hz] y la desviación estándar 0.036.

Tabla 5.12: Frecuencia y razón de amortiguamiento de modos de diagrama integrado de mediciones con sismómetros.

Modo	Frecuencia diagrama integrado [Hz]	Razón de amortiguamiento (β)[%]
1	0.894	1.148
2	0.983	1.320
3	1.331	1.578
4	3.237	2.140
5	3.702	2.504
6	4.936	3.002

En la Tabla 5.13 se muestran las frecuencias identificadas en los espectros de potencia de cada medición, mientras que en la Tabla 5.14 se muestran las frecuencias identificadas por el método SSI. Los promedios y desviaciones estándar para cada método de identificación empleado para cada modo se exponen en la Tabla 5.15.

Tabla 5.13: Frecuencias identificadas PSD en todas las mediciones con acelerómetros.

Modo	Frecuencias identificadas PSD [Hz]						
	Antígona 1	Antígona 2	Antígona 3	Antígona 4	Antígona 6	Antígona 7	Antígona 8
1	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88
2	0.98	0.97	0.97	0.98	0.97	0.96	0.97
3	1.31	1.32	1.31	1.31	1.31	1.30	1.31
4	3.16	3.21	3.2	3.21	3.17	3.20	3.18
5	3.66	3.62	3.66	3.65	3.62	3.65	3.65
6	4.87	4.87	4.89	4.86	4.85	4.75	4.85

Tabla 5.14: Frecuencias identificadas SSI en todas las mediciones con acelerómetros.

Modo	Frecuencias identificadas SSI [Hz]						
	Antígona 1	Antígona 2	Antígona 3	Antígona 4	Antígona 6	Antígona 7	Antígona 8
1	0.912	0.877	0.872	0.884	0.872	0.913	0.875
2	0.980	0.977	0.982	0.985	0.976	0.966	0.974
3	1.310	1.316	1.303	1.315	1.312	1.309	1.318
4	3.157	3.180	3.154	3.166	3.088	3.145	3.125
5	3.652	3.627	3.637	3.636	3.584	3.594	3.639
6	4.803	4.859	4.822	4.816	4.755	4.773	4.770

Tabla 5.15: Promedio y desviación estándar de frecuencias identificadas PSD y SSI.

Modo	Promedio frecuencias PSD [Hz]	Desviación estándar freq. PSD	Promedio frecuencias SSI [Hz]	Desviación estándar freq. SSI
1	0.886	0.005	0.886	0.018
2	0.971	0.007	0.977	0.006
3	1.310	0.006	1.312	0.005
4	3.190	0.020	3.145	0.030
5	3.644	0.017	3.624	0.025
6	4.849	0.046	4.800	0.036

Los datos de las formas modales que se observan en la Figura 5.56 se obtienen realizando un promedio de datos entregados por el método SSI de todas las mediciones, pero ponderándolo por la cantidad de datos que otorga cada medición, por lo que en la Tabla 5.16 solo se muestran los resultados finales para cada forma modal.

Tabla 5.16: Frecuencia y razón de amortiguamiento de modos de diagrama integrado.

Modo	Frecuencia diagrama integrado [Hz]	Razón de amortiguamiento (β)[%]
1	0.892	18.19
2	0.978	4.41
3	1.311	7.44
4	3.145	4.54
5	3.623	3.40
6	4.801	4.29

Capítulo 6

Modelo Simplificado de Edificio Antígona

En el presente capítulo se expone el desarrollo y obtención de un modelo simplificado del edificio Antígona, a partir de modelos de elementos finitos de ETABS. Este modelamiento simplificado consiste en la obtención de parámetros del modelo de elementos finitos y, con estos parámetros, describir el comportamiento dinámico de la estructura a través de una rutina en el programa Matlab. Se realizan dos tipos de modelamientos simplificados, variando la inclusión de esfuerzos sobre el edificio, en el primero solo se considera el corte de entresijos y en segundo se incluye la flexión del edificio.

6.1. Modificaciones al Modelo de Elementos Finitos

Para comenzar el modelamiento simplificado se necesita conocer información del edificio Antígona, que debe ser otorgada por un modelo de elementos finitos. Se toma como base el modelo que fue confeccionado por Betzabeth Suquillo (2017) y modificado por Matias Costa (2019). El modelo utilizado es una versión modificada, ya que el *mesh* de los muros del modelo base dificultaba el proceso de obtención de parámetros y ralentizaba la ejecución del modelo.

La modificación de los muros se realiza cambiando muro por muro para eliminar el *mesh* manual que tenía cada elemento, debido a que la herramienta *merge* para unir elementos tipo *shell* no era útil en este caso. Lo anterior, se tuvo que hacer recopilando las características de los muros existentes, creando nuevos tipos de elementos *shell* con el mismo material y espesor, para luego eliminar los muros eje por eje y dibujar los muros con las mismas características del modelo base.

Otra modificación realizada fue la eliminación del *story* 19 del modelo, que correspondía a un piso sin losa conformado solo por los muros perimetrales de la azotea, que no alcanzaban la altura del *story* 20 (piso 17), correspondiente a la losa de techo de la caja de ascensores también ubicado en la azotea.

En la Figura 6.1 se muestra una imagen en vista 3D del modelo de elementos finitos en ETABS, donde se observan los muros sin *mesh*, a diferencia del modelo que se muestra en la Figura 3.36.



Figura 6.1: Modelo de elementos finitos modificado.

Las solicitaciones gravitacionales del modelo (Tabla 6.1) son las mismas consideradas por Suquillo (2017) en el modelo original, es decir, se considera el peso propio y las sobrecargas de uso de acuerdo a la norma NCh 1537 y a los informes de rehabilitación estructural. El peso sísmico del modelo está dado por la carga permanente y el 25% de la sobrecarga.

Tabla 6.1: Resumen de cargas distribuidas por área (Modificado de Suquillo (2017)).

Resumen de cargas vivas distribuidas para el modelo		
Zona estacionamientos	SC_{est}	500 [kgf/m ²]
Departamentos y pasillos	SC_{dep}	200 [kgf/m ²]
Balcones	SC_{balc}	250 [kgf/m ²]
Resumen de carga muerta distribuida para el modelo		
Tabiquería	CM_{tab}	100 [kgf/m ²]
Sobrelosa	CM_{sobre}	100 [kgf/m ²]

En la Tabla 6.2 se muestra el peso sísmico del modelo y el peso propio de la estructura siendo el peso sísmico esperado de 1000-1200[kgf/m²], en donde el área total de losas es de 10232.95[m²].

Tabla 6.2: Peso propio y peso sísmico por unidad de área del modelo.

	Peso Total [N]	Peso por unidad de Área [kgf/m ²]
Peso Propio	109516149.28	1091.33
Peso Sísmico	113147202.68	1127.52

6.2. Modelamiento Simplificado de Edificio de Corte

El modelamiento simplificado del edificio se basa en el supuesto de que el edificio es una columna empotrada donde cada piso es una masa concentrada en su centro de gravedad, en donde la barra que une las masas posee propiedades de rigidez k_x, k_y, k_{θ_z} de cada piso como en un edificio de corte, así como se muestra en el esquema de la Figura 2.5. Para esto se trabaja bajo los supuestos de que las losas de piso son elementos infinitamente rígidos, y que el giro entre losas y muros en torno al eje X y eje Y es nulo, es decir, que no hay flexión de la estructura. Se desarrolla el modelo bajo la teoría del método de rigidez y el análisis modal de una estructura, por lo que se necesitan de parámetros de entrada para la construcción de este modelo.

6.2.1. Obtención de Parámetros de Modelo ETABS

Los parámetros de entrada que se deben obtener del modelo ETABS son los datos que se necesitan para desarrollar el análisis modal del edificio, estos datos son la masa y la rigidez de cada piso del edificio. La masa de cada piso se obtiene directamente de la información que entrega el modelo al ser ejecutado, esta aparece en las tablas de resultados y corresponde a la masa en el centro de masa ubicado en el diafragma rígido, mientras el momento de inercia en el eje Z que se obtiene del archivo *.OUT del modelo modificado con todos los pisos. De la misma tabla que se obtienen las masas, se pueden encontrar el centro masa y de rigidez por piso (Tabla 6.3). La rigidez, que es el otro dato que se obtiene del modelo ETABS, no es directo como el caso de la masa, ya que no es un valor que entregue el modelo, pero si es posible obtenerlo a partir de este.

Del modelo ETABS es posible obtener las rigideces de entrepiso en los ejes X e Y, también la rigidez torsional en el eje Z en el centro de rigidez. Esto es posible a partir del método de rigidez, pero no directamente, ya que no se aplica un desplazamiento en el centro de rigidez, sino que se aplica una fuerza en el centro de rigidez obteniéndose el desplazamiento en ese punto, siendo la rigidez de piso la fuerza aplicada dividida en el desplazamiento. El procedimiento se realiza de esta forma porque al aplicar desplazamientos en un apoyo situado previamente en el centro de rigidez del piso, se observa que las deformaciones no generan desplazamiento en todos los elementos unidos al diafragma rígido, creándose un

comportamiento anómalo de algunos elementos del modelo, por lo que se descarta el uso de este método.

Tabla 6.3: Datos obtenidos de modelo ETABS de edificio Antígona.

Piso	$M_x \left[\frac{N \cdot s^2}{mm} \right]$	$M_y \left[\frac{N \cdot s^2}{mm} \right]$	$I_z \left[\frac{N \cdot mm \cdot s^2}{\times 10^{10}} \right]$	$X_{CM} [mm]$	$Y_{CM} [mm]$
-2	697.2097	697.2097	8.8550	14689.67	16193.49
-1	1456.2957	1456.2957	35.2633	21711.80	17929.21
1	498.2972	498.2972	5.3252	17417.33	14497.37
2	587.5734	587.5734	7.1655	15278.39	15581.13
3	588.7488	588.7488	7.1439	15269.20	15598.12
4	590.0609	590.0609	7.1538	15275.21	15615.19
5	589.3486	589.3486	7.1557	15274.13	15614.51
6	585.5993	585.5993	7.1940	15140.16	15612.33
7	565.5771	565.5771	6.9864	15101.33	15460.38
8	560.1771	560.1771	6.9369	15081.77	15424.01
9	559.7589	559.7589	6.9341	15086.64	15425.27
10	559.4414	559.4414	6.9329	15089.99	15424.97
11	559.4414	559.4414	6.9329	15089.99	15424.97
12	559.4414	559.4414	6.9329	15089.99	15424.97
13	559.4414	559.4414	6.9329	15089.99	15424.97
14	559.4414	559.4414	6.9329	15089.99	15424.97
15	559.4414	559.4414	6.9329	15089.99	15424.97
16	520.9113	520.9113	6.4180	15166.07	15391.50
17	11.3329	11.3329	0.0052	14916.89	12776.82

En términos generales se realiza un modelo suponiendo un edificio de corte (despreciando deformaciones por flexión) de columna equivalente como el definido en la sección 2.3.1.1, para lo cual se obtienen las rigideces de entrepiso a través del siguiente procedimiento: Se eliminan todos los pisos del modelo, excepto el piso por analizar, luego teniendo solo la estructura de ese piso se le agregan apoyos empotrados en la base. Este modelo obtenido se le denomina modelo de piso (Figura 6.2). Se corre el modelo de piso para conocer el centro de rigidez y poder ubicarlo en la losa, a este punto se le agrega un *joint* al que se le deben aplicar fuerzas en los ejes X e Y y momento en eje Z, se corre nuevamente el modelo y se obtienen los desplazamientos para cada fuerza en el centro de rigidez. Finalmente se calcula la rigidez de entrepiso, considerándose como piso superior el analizado (Tabla 6.4).

Tabla 6.4: Rigideces de entrepiso y centros de rigidez obtenidos de modelos ETABS.

Piso Inferior	Piso Superior	$k_x \left[\frac{N}{mm} \right]$	$k_y \left[\frac{N}{mm} \right]$	$k_{\theta z} \left[\frac{N \cdot mm}{rad} \right] \times 10^{11}$	$X_{CR} [mm]$	$Y_{CR} [mm]$
Base	-2	38610038.60	43478260.90	81699.30	14223.80	15845.84
-2	-1	38461538.46	37313432.84	176366.84	19669.55	16683.50
-1	1	18115942.03	18348623.85	13858.09	17783.79	12199.41
-1	2	30153.81	115207.37	2.17	49.90	25160.66
1	2	15748031.50	17064846.42	18168.60	18179.31	11839.80
2	3	19193857.97	19493177.39	12845.22	16562.02	13513.27
3	4	19542700.80	19512195.12	19474.20	16557.90	13513.41
4	5	19193857.97	19493177.39	19372.34	16561.85	13513.60
5	6	18050541.52	19493177.39	19290.12	16563.94	13349.26
6	7	18382352.94	15948963.32	16809.55	16820.58	13582.06
7	8	17035775.13	14814814.81	15693.66	16537.68	13306.21
8	9	17035775.13	14814814.81	15683.81	16539.72	13310.50
9	10	16920473.77	14792899.41	15673.98	16541.89	13292.88
10	11	16920473.77	14792899.41	15673.98	16542.10	13293.35
11	12	16920473.77	14792899.41	15673.98	16542.46	13293.76
12	13	16920473.77	14792899.41	15673.98	16542.47	13293.77
13	14	16920473.77	14792899.41	15673.98	16542.47	13293.77
14	15	16920473.77	14792899.41	15673.98	16542.47	13293.77
15	16	17064846.42	14727540.50	15415.45	16531.98	13320.46
16	17	1110124.33	1235788.43	50.00	14297.38	11651.92

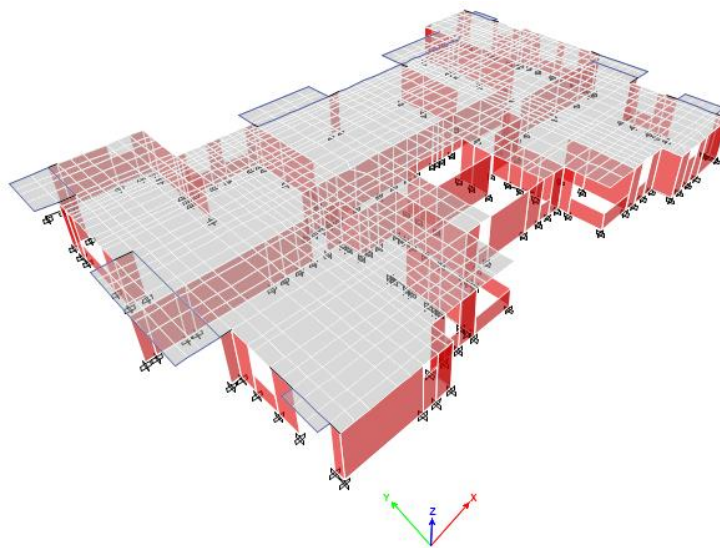


Figura 6.2: Modelo por piso en ETABS de piso tipo, para obtención de rigidez.

6.2.2. Construcción de Modelo Simplificado de Edificio

Con los parámetros obtenidos del modelo modificado de ETABS se genera una matriz de rigidez que sea compatible con una matriz de masa en su centro de masa, es decir, encontrar la rigidez por piso en el centro de masa a partir de la rigidez de entrepiso en el centro de rigidez, para lograr esto se construye una rutina en Matlab que realice tal transformación con base teórica en el Método Matricial para Edificio de Corte. Para lo anterior se consideran 3 grados de libertad (GDL) por piso, por lo tanto, un total de 57 GDL para este modelo.

Se construye una función en Matlab que posee como elementos de entrada el nivel superior e inferior del entrepiso, las rigideces en los ejes longitudinal y transversal, la rigidez torsional en el eje vertical, las coordenadas del centro de rigidez y del centro de masa, entregando la matriz de rigidez de los niveles ingresados en el centro de masa.

Finalmente, se determinan las propiedades modales de la estructura a través del problema de valores propios asociados a la matriz de masa y rigidez.

6.3. Modelamiento Simplificado de Edificio de Corte incluyendo Flexión

El modelamiento de un edificio que incluye deformación por corte y flexión se determina en forma similar que el realizado para el edificio de corte, ya que se basa en el supuesto de que el edificio es un viga empotrada en voladizo en la que cada piso es una masa concentrada en su centro de gravedad, en donde el elemento que une las masas posee propiedades de rigidez infinitesimal: $GA_y, GA_z, EI_y, EI_z, GJ$ en cada piso como se muestra en el esquema de Figura 2.6. El modelamiento se basa en la teoría del método de rigidez y el análisis modal de una estructura, sin embargo, se requieren de diferentes parámetros de entrada para la construcción de este modelo.

6.3.1. Obtención de Parámetros de Modelo ETABS

Los parámetros de entrada que se deben obtener del modelo ETABS son los mismos, la masa y la rigidez de cada piso del edificio. La matriz de masa está compuesta por las masas en X e Y de cada piso y los momentos de inercia de X, Y, Z, las primeras se obtienen directamente de la información que entrega el modelo al ser ejecutado, mientras que las inercias para X e Y se calculan con las dimensiones por piso (ecuación (6.1)) y la masa en esos ejes, mientras que el momento de inercia en el eje Z se obtiene del archivo *.OUT del modelo modificado con todos los pisos (Tabla 6.5).

$$I_x = \frac{M_y \cdot L_y^2}{12} \quad I_y = \frac{M_x \cdot L_x^2}{12} \quad (6.1)$$

Tabla 6.5: Datos obtenidos de modelo ETABS de edificio Antígona.

Piso	M_x $\left[\frac{N \cdot s^2}{mm} \right]$	M_y $\left[\frac{N \cdot s^2}{mm} \right]$	X_{CM} [mm]	Y_{CM} [mm]	I_x $\left[N \cdot mm \cdot s^2 \right]$ $\times 10^{10}$	I_y $\left[N \cdot mm \cdot s^2 \right]$ $\times 10^{10}$	I_z $\left[N \cdot mm \cdot s^2 \right]$ $\times 10^{10}$
-2	697.21	697.21	14689.67	16193.49	2.6137	5.5081	8.8550
-1	1456.30	1456.30	21711.80	17929.21	16.5780	21.7453	35.2633
1	498.30	498.30	17417.33	14497.37	1.7298	3.9366	5.3252
2	587.57	587.57	15278.39	15581.13	2.2027	4.7939	7.1655
3	588.75	588.75	15269.20	15598.12	2.2071	4.8035	7.1439
4	590.06	590.06	15275.21	15615.19	2.2121	4.8142	7.1538
5	589.35	589.35	15274.13	15614.51	2.2094	4.8084	7.1557
6	585.60	585.60	15140.16	15612.33	2.1953	4.9317	7.1940
7	565.58	565.58	15101.33	15460.38	2.1203	4.7631	6.9864
8	560.18	560.18	15081.77	15424.01	2.1000	4.7176	6.9369
9	559.76	559.76	15086.64	15425.27	2.0985	4.7141	6.9341
10	559.44	559.44	15089.99	15424.97	2.0973	4.7114	6.9329
11	559.44	559.44	15089.99	15424.97	2.0973	4.7114	6.9329
12	559.44	559.44	15089.99	15424.97	2.0973	4.7114	6.9329
13	559.44	559.44	15089.99	15424.97	2.0973	4.7114	6.9329
14	559.44	559.44	15089.99	15424.97	2.0973	4.7114	6.9329
15	559.44	559.44	15089.99	15424.97	2.0973	4.7114	6.9329
16	520.91	520.91	15166.07	15391.50	1.9528	4.3870	6.4180
17	11.33	11.33	14916.89	12776.82	0.0014	0.0015	0.0052

La rigidez que se obtiene del modelo ETABS, no es directo como el caso anterior de modelamiento, ya que no es un valor que entregue el modelo. Sin embargo, se define una metodología para determinar las rigideces infinitesimales equivalentes de cada piso asociado a corte, a flexión y torsión, en el centro de rigidez: $GA_y, GA_z, EI_y, EI_z, GJ$.

El procedimiento instaurado para la obtención de las rigideces infinitesimales equivalentes a torsión de entrepiso es el siguiente: Primero se ubican los centros de rigidez por piso del modelo ETABS que se muestran en la Tabla 6.4, en estos centros se agrega un *joint* al diafragma rígido (al cual se le apoya en vertical y en giros en torno al eje X e Y con resortes de bajísima rigidez para que el modelo no se vuelva inestable) a cada uno de estos se le aplica un momento en Z de igual magnitud, al analizar el modelo se obtienen los giros en cada *joint*, con lo que es posible obtener el giro relativo de entrepiso. Con la información entregada por ETABS se obtiene la rigidez a torsión de entrepiso con la ecuación (6.2) y

con esta se obtiene la rigidez infinitesimal a torsión de la viga equivalente multiplicándola por la altura de entrepiso (ecuación (6.3)).

$$k_{torsiónZ}^{(i-j)} = \frac{\sum_{j=1}^{N^{\circ} \text{ pisos}} M_{jz} - M_{iz}}{\theta_{jz} - \theta_{iz}} \quad (6.2)$$

$$GJ = k_{torsiónZ}^{(i-j)} \cdot L \quad (6.3)$$

Mientras que para la obtención de las otras rigideces infinitesimales equivalentes de entrepiso el procedimiento es el siguiente: Primero se eliminan todos los pisos del modelo, excepto el piso a analizar, luego teniendo solo la estructura de ese piso se replica 19 veces en altura, quedando un edificio de 19 plantas con el mismo piso, además al piso inferior se le agregan los apoyos empotrados en la base (Figura 6.3), quedando un modelo de edificio asociado al piso analizado. Se lleva a cabo el análisis del modelo para conocer el centro de rigidez y con ello poder definir la ubicación del centro de rigidez agregando de esta forma un *joint* al diafragma rígido del piso superior (al cual se le apoya en vertical y en giros en torno al eje X e Y con resortes de bajísima rigidez para que el modelo no se vuelva inestable), al cual posteriormente se le aplican fuerzas en los ejes X e Y, de esta forma a partir de los desplazamientos obtenidos para cada fuerza en el centro de rigidez se obtienen las rigideces equivalentes haciendo un símil a una viga en voladizo. Luego, en el modelo de edificio por piso, se seleccionan todos los muros y se le asigna un factor de modificación de rigidez en *stiffness modifiers* \rightarrow *Membrane f12 direction* $f_{12} = 100000$. Lo anterior, con el fin de generar mayor rigidez en los muros al corte y obtener solo la rigidez a flexión, se guarda como un nuevo modelo modificado, se corre y se obtienen los desplazamientos necesarios. Luego se obtiene la rigidez infinitesimal a flexión haciendo un símil con una viga en voladizo reconociendo que la rigidez sería la mostrada en la ecuación(6.4), desde donde se obtiene EI (ecuación (6.5)), el análisis se realiza aplicando fuerzas en ambas direcciones del edificio del piso lo que permite obtener las rigideces a flexión en ambas direcciones.

$$k_{flexionX} = \frac{F_z}{u_z} = \frac{3EI_z}{L^3} \quad k_{flexionY} = \frac{F_y}{u_y} = \frac{3EI_y}{L^3} \quad (6.4)$$

$$EI_z = \frac{L^3}{3} \cdot \frac{F_z}{u_z} \quad EI_y = \frac{L^3}{3} \cdot \frac{F_y}{u_y} \quad (6.5)$$

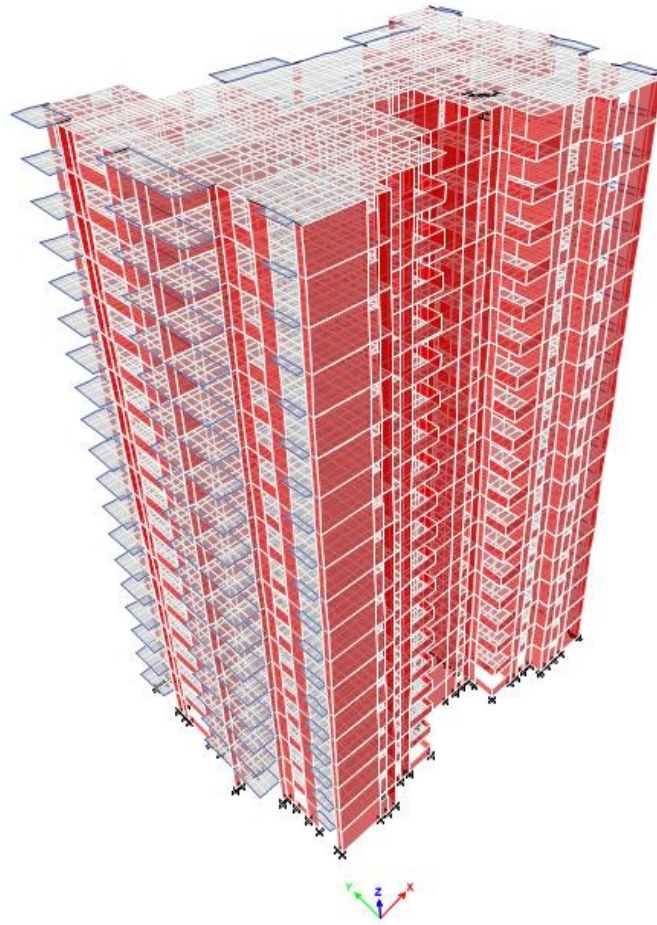


Figura 6.3: Modelo por piso de edificio con 19 pisos iguales para obtención de parámetros de rigidez.

Del mismo modo, para obtener las rigideces infinitesimales de la viga equivalente a corte se aplica un factor de modificación al mismo modelo de edificio por piso, pero esta vez en *stiffness modifiers* \rightarrow *Membrane f22 direction* $f_{22} = 100000$, para generar mayor rigidez a flexión en los muros y obtener solo la respuesta del modelo debido solo a la deformación por corte. De esta forma la rigidez infinitesimal al corte se obtiene considerando una viga de corte equivalente como se observa en la ecuación (6.6) .

$$GA_z = \frac{F_z}{u_z} \cdot L \quad GA_y = \frac{F_y}{u_y} \cdot L \quad (6.6)$$

Habiendo realizado los procedimientos anteriores, se obtienen los desplazamientos necesarios para calcular las rigideces (Tabla 6.6) y, posteriormente, los parámetros necesarios para la construcción del modelo.

Tabla 6.6: Rigideces infinitesimales de entrepiso y centros de rigidez obtenidos de modelos ETABS.

Piso Inferior	Piso Superior	GA_z [N] $\times 10^{10}$	GA_y [N] $\times 10^{10}$	GJ [N · mm ²] $\times 10^{17}$	EI_z [N] $\times 10^{18}$	EI_y [N] $\times 10^{18}$	X_{CR} [mm]	Y_{CR} [mm]
Base	-2	12.9781	13.9052	2261.9048	63.0942	29.1958	13332.85	16907.81
-2	-1	13.6908	14.2693	325.7669	87.1372	71.2844	26085.20	23511.98
-1	1	5.8911	4.9623	24.1961	3.9178	1.7157	15690.93	12847.12
-1	2	0.4950	0.9656	0.0000	0.0452	0.1181	3610.39	26522.63
1	2	6.4877	7.1714	16.6701	8.0192	3.0924	19260.14	8702.12
2	3	7.7794	7.8487	13.2010	12.4415	4.6058	18746.61	10731.90
3	4	7.7794	7.8487	10.8461	12.4415	4.6058	18746.61	10731.90
4	5	7.7794	7.8487	9.3459	12.4415	4.6058	18746.61	10731.90
5	6	7.2422	7.2422	8.2535	9.2386	4.4627	18367.38	9566.10
6	7	7.2508	6.9522	7.4118	9.0225	3.1508	18761.87	10311.21
7	8	6.8714	6.5305	6.7096	8.8628	3.0609	18660.36	10133.94
8	9	6.8714	6.5305	6.1053	8.8628	3.0609	18660.36	10133.94
9	10	6.8714	6.5305	5.5548	8.8628	3.0609	18660.36	10133.94
10	11	6.8714	6.5305	5.0190	8.8628	3.0609	18660.36	10133.94
11	12	6.8714	6.5305	4.4802	8.8628	3.0609	18660.36	10133.94
12	13	6.8714	6.5305	3.9039	8.8628	3.0609	18660.36	10133.94
13	14	6.8714	6.5305	3.2871	8.8628	3.0609	18660.36	10133.94
14	15	6.8714	6.5305	2.5840	8.8628	3.0609	18660.36	10133.94
15	16	6.9056	6.6470	1.8266	7.8821	2.6478	17734.97	10550.98
16	17	0.3716	0.5555	0.0599	0.0607	0.0200	14164.47	11568.82

6.3.2. Construcción de Modelo Simplificado de Edificio

Con los parámetros obtenidos de los modelos de edificio por piso de ETABS, se debe generar una matriz de rigidez que sea compatible con una matriz de masa en su centro de masa, es decir, encontrar la rigidez por piso en el centro de masa a partir de la rigidez de entrepiso en el centro de rigidez. Para lograr esto se construye una rutina en Matlab que realice tal transformación con base teórica en el Método Matricial para Edificio de Corte incluyendo Flexión.

Se construye una función en Matlab que posee como elementos de entrada el nivel superior e inferior del entrepiso, los parámetros $GA_y, GA_z, EI_y, EI_z, GJ$, las coordenadas del centro de rigidez y del centro de masa, las masas en ejes X e Y, momentos de inercia en los ejes X, Y, Z y entrega matriz de rigidez de los niveles ingresados en el centro de masa, la matriz de masa, los períodos fundamentales, formas modales y porcentajes de masas participativas.

Finalmente, se genera una rutina que ingrese los datos necesarios a la función de Matlab para obtener todos los resultados que esta entrega, con lo que el modelo simplificado queda completo.

6.4. Resultados de Modelos Simplificados

El modelo simplificado de edificio de corte da como resultado los valores que se muestran en la Tabla 6.7, en donde se observan períodos muy bajos para la estructura analizada, en comparación con los períodos que dan para el modelo que incluye la flexión del edificio en la Tabla 6.8 y comparativamente bajos en relación a lo que predicen ecuaciones simplificadas $T_n = N/20 = 0.8[s]$ o a lo medido experimentalmente. Cabe mencionar que se pudo comprobar que el usar un modelo simplificado de modelo de corte en cual se emplee la rigidez de piso y las masas se obtienen períodos similares (en torno a 0.4[s]) indicando que el modelo está correcto, al mismo tiempo se concluye que para edificios de muros de hormigón armado de varios niveles se debe considerar la deformación por flexión. En el modelo del edificio de corte, el primer modo es principalmente torsional con traslación longitudinal (X), el segundo modo se muestra como traslacional transversal (Y) y también longitudinal, el tercer modo es traslacional longitudinal y transversal y también torsional. Para el modelo que incluye flexión: el primer modo, al igual que en el otro modelo, es principalmente torsional, el segundo modo varía un poco, pero en este modelo es mayormente traslacional transversal, mientras que el tercer modo es principalmente traslacional longitudinal y torsional. En la Tabla 6.9 se muestran los valores entregados por el modelo modificado de ETABS, se observan valores similares al modelo que incluye flexión en los períodos, sin embargo, hay variaciones en la participación de masas modales.

En la Figura 6.4 y la Figura 6.5 se pueden observar los diagramas de las formas modales de los modelos simplificados, que pueden ser comparados con las formas modales de ETABS que se muestran en la Figura 6.6. En el ANEXO B se muestran los desplazamientos del centro geométrico de modelo simplificado que incluye flexión.

Tabla 6.7: Frecuencias, períodos y participación de masas modales para modelo de edificio de corte.

Modo	f_n [Hz]	T_n [s]	M_x [%]	M_y [%]	M_{RZ} [%]	$\sum M_x$ [%]	$\sum M_y$ [%]	$\sum M_{RZ}$ [%]
1	2.099	0.476	17.395	10.701	38.538	17.395	10.701	38.538
2	2.541	0.393	25.223	47.337	0.083	42.618	58.038	38.621
3	2.783	0.359	31.217	14.287	24.425	73.835	72.325	63.046
4	6.093	0.164	2.050	1.195	4.896	75.885	73.520	67.942
5	7.208	0.139	2.357	9.006	0.184	78.242	82.526	68.125
6	7.997	0.125	6.067	1.571	3.647	84.309	84.097	71.772

Tabla 6.8: Frecuencias, períodos y participación de masas modales para modelo de edificio de corte incluyendo flexión.

Modo	f_n [Hz]	T_n [s]	M_x [%]	M_y [%]	M_{RZ} [%]	$\sum M_x$ [%]	$\sum M_y$ [%]	$\sum M_{RZ}$ [%]
1	0.838	1.194	11.167	19.664	22.501	11.167	19.664	22.501
2	1.109	0.902	10.840	32.548	8.933	22.007	52.213	31.434
3	1.676	0.597	30.819	0.406	19.069	52.826	52.618	50.504
4	2.299	0.435	3.023	1.643	5.577	55.849	54.261	56.081
5	3.693	0.271	0.946	0.623	2.695	56.794	54.884	58.776
6	4.437	0.225	2.393	18.787	0.542	59.187	73.670	59.318

Tabla 6.9: Frecuencias, períodos y participación de masas modales de modelo modificado de ETABS.

Modo	f_n [Hz]	T_n [s]	M_x [%]	M_y [%]	M_{RZ} [%]	$\sum M_x$ [%]	$\sum M_y$ [%]	$\sum M_{RZ}$ [%]
1	0.829	1.207	10.140	27.400	19.570	10.140	27.400	19.570
2	1.084	0.922	10.930	30.220	11.220	21.070	57.620	30.790
3	1.619	0.618	40.120	0.060	20.430	61.200	57.680	51.220
4	3.303	0.303	2.410	7.400	5.170	63.610	65.080	56.390
5	4.030	0.248	3.960	9.110	1.920	67.570	74.180	58.320
6	5.662	0.177	9.460	0.210	4.200	77.030	74.390	62.520

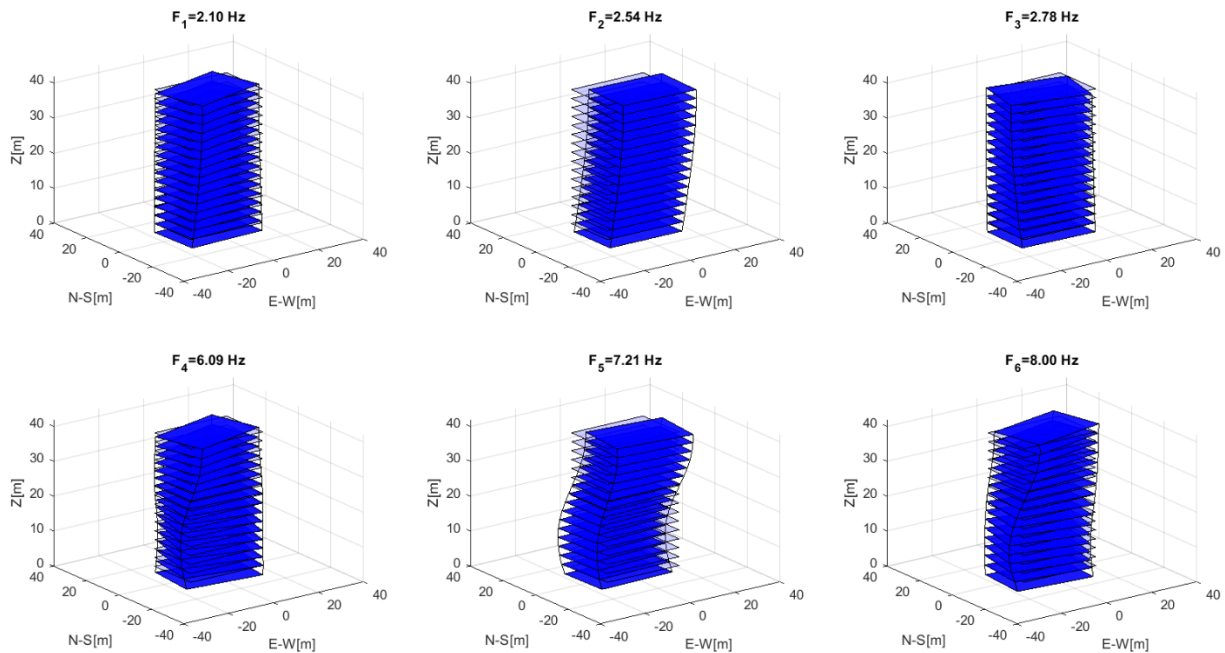


Figura 6.4: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del modelo de corte del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del modelo con sus respectivas frecuencias modales.

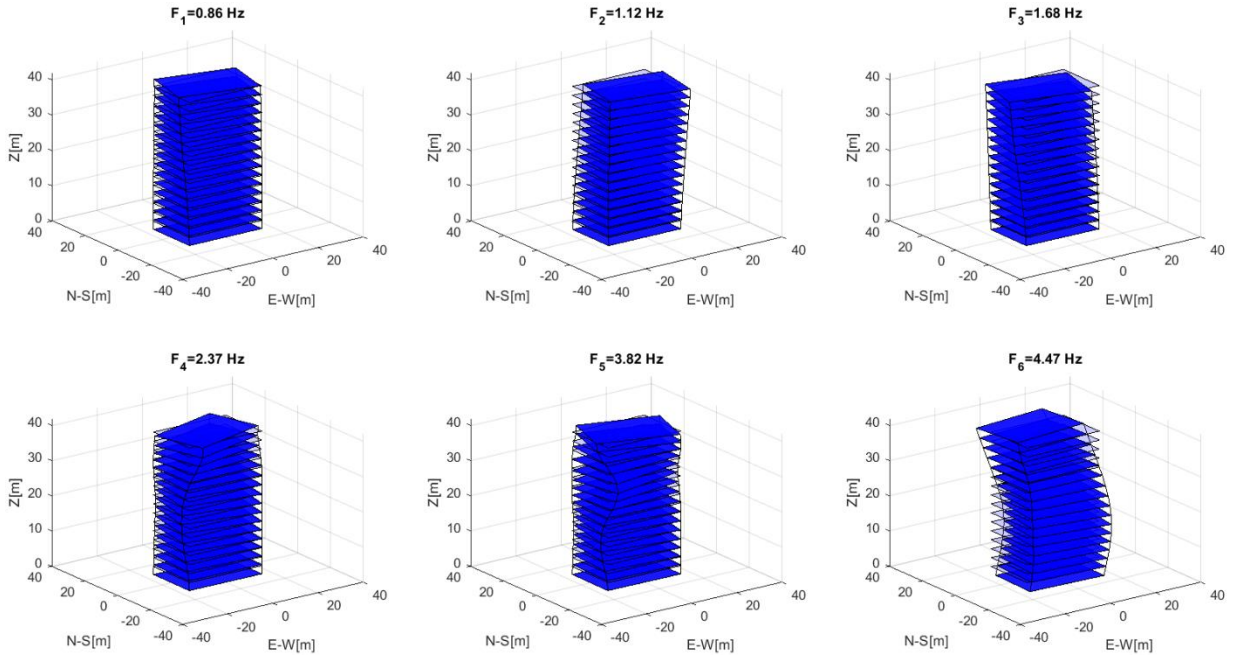


Figura 6.5: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del modelo de corte incluyendo flexión del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del modelo con sus respectivas frecuencias.

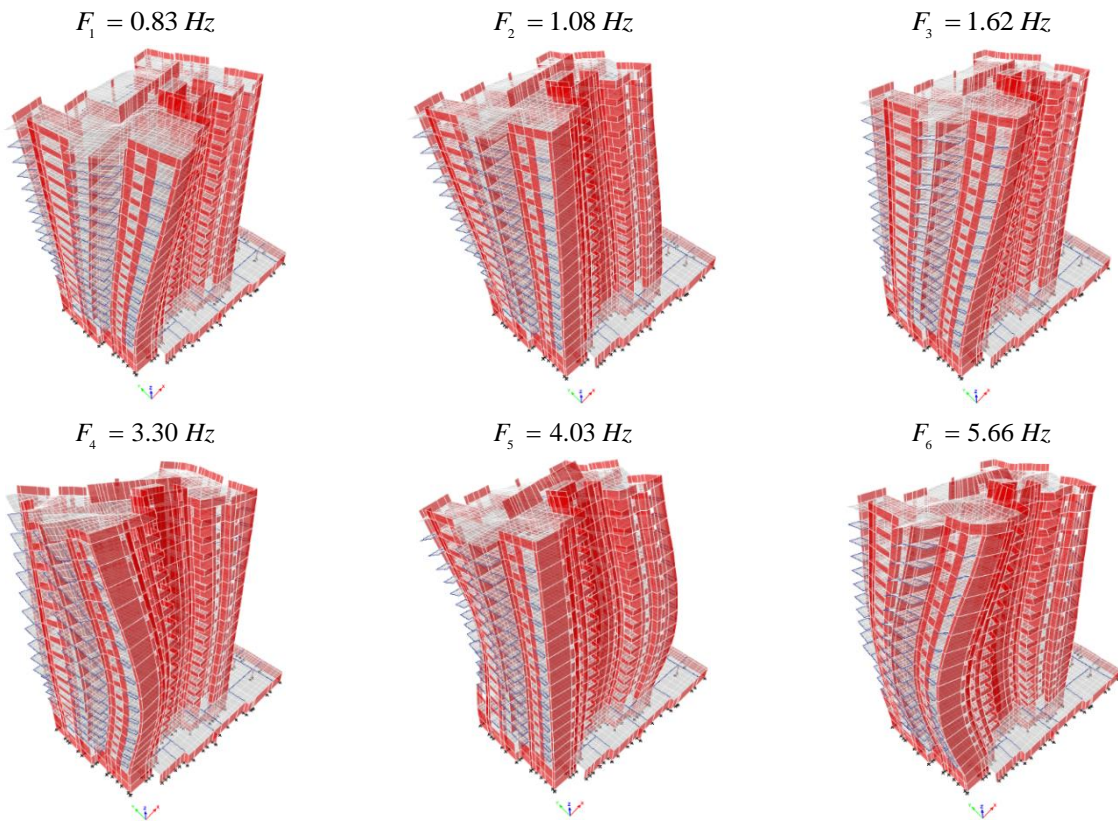


Figura 6.6: Formas modales de modelo modificado de ETABS del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del modelo

Capítulo 7

Calibración Modelo de Edificio Antígona

En este capítulo se presenta el procedimiento de calibración del modelo simplificado de edificio de corte incluyendo flexión con los resultados de las mediciones obtenidas con los ajustes realizados a las formas modales, también se muestran los resultados de esta calibración.

7.1. Proceso de Calibración de Modelo Simplificado

Para calibrar el modelo simplificado, elaborado a partir del modelo de ETABS del edificio Antígona, se ajustan parámetros de masa y rigidez con factores que permitan que los períodos y formas modales del modelo se ajusten a las de las mediciones.

El proceso de calibración comienza determinando los parámetros del modelo que serán modificados multiplicándose por un factor, los parámetros que se calibran son: $X_{CM}, Y_{CM}, GA_Z, GA_Y, GJ, EI_Z, EI_Y$ para los pisos del 1 al 16 y M_X, M_Y, X_{CM}, Y_{CM} para el piso 17. Se definen 23 coeficientes de calibración para modificar los parámetros, para cada grupo de plantas iguales o similares se asigna un factor por parámetro, los grupos son: pisos 1 y 2, pisos del 3 al 5, pisos 6 y 7, pisos del 8 al 16 y el piso 17; también se agrupan los parámetros GA_Z con EI_Y , GA_Y con EI_Z y M_X con M_Y para tener un factor común. A estos coeficientes inicialmente se les asigna un valor de 1 para comenzar el proceso de optimización en el programa Matlab (usando técnicas de optimización del tipo *fminsearch*), que consiste en una función que minimiza una función objetivo que establece un error definido como las diferencias entre los períodos por modo y también las diferencias entre las formas modales esperando llegar a un MAC cercano a 1, a través de iteraciones en las que se van modificando los coeficientes. Las iteraciones se continúan hasta que la función objetivo se minimiza obteniéndose períodos naturales y formas modales similares a las medidas experimentalmente.

Los coeficientes de calibración obtenidos se muestran a continuación, estos se encuentran separados en tablas según el parámetro que modifican en la calibración. Estos factores transforman los parámetros del modelo simplificado ETABS en diferente medida, por lo que se muestra la diferencia porcentual que significa cada factor al multiplicarse por los parámetros obtenidos originalmente.

Tabla 7.1: Coeficientes de calibración para el parámetro X_{CM} (coordenada X de u de centro de masa).

Pisos	Coefficiente calibración	Diferencia porcentual [%]
1 y 2	0.8324	-16.758
3 al 5	1.0650	6.502
6 y 7	0.7958	-20.417
8 a 16	1.2159	21.588
17	0.2638	-73.621

Tabla 7.2: Coeficientes de calibración para el parámetro Y_{CM} (coordenada Y de centro de masa).

Pisos	Coefficiente calibración	Diferencia porcentual [%]
1 y 2	1.2372	23.717
3 al 5	0.8576	-14.244
6 y 7	0.5919	-40.806
8 a 16	0.9120	-8.804
17	0.5082	-49.176

Tabla 7.3: Coeficientes de calibración para los parámetros M_X y M_Y (masas en X e Y).

Pisos	Coefficiente calibración	Diferencia porcentual [%]
17	0.6252	-37.478

Tabla 7.4: Coeficientes de calibración para los parámetros GA_Z y EI_Y (Rigideces infinitesimales).

Pisos	Coefficiente calibración	Diferencia porcentual [%]
1 y 2	0.5450	-45.503
3 al 5	1.0055	0.548
6 y 7	0.8225	-17.746
8 a 16	1.2237	22.368

Tabla 7.5: Coeficientes de calibración para los parámetros GA_Y y EI_Z (Rigideces infinitesimales).

Pisos	Coefficiente calibración	Diferencia porcentual [%]
1 y 2	0.9319	-6.806
3 al 5	0.9481	-5.195
6 y 7	2.0090	100.898
8 a 16	0.4170	-58.300

Tabla 7.6: Coeficientes de calibración para el parámetro GJ (Rigidez infinitesimal).

Pisos	Coefficiente calibración	Diferencia porcentual [%]
1 y 2	1.7017	70.165
3 al 5	0.4138	-58.617
6 y 7	0.6084	-39.156
8 a 16	2.5255	152.551

En la Tabla 7.7 se muestran los valores de parámetros de masa multiplicados por los coeficientes obtenidos de la calibración, así mismo en la Tabla 7.8 se muestran los parámetros de rigidez calibrados, con estos valores es posible obtener la matriz de masa y rigidez del modelo simplificado calibrado.

Tabla 7.7: Parámetros de masa de modelo simplificado calibrado de edificio Antígona.

Piso	M_x $\left[\frac{N \cdot s^2}{mm}\right]$	M_y $\left[\frac{N \cdot s^2}{mm}\right]$	X_{CM} [mm]	Y_{CM} [mm]	I_x $\left[N \cdot mm \cdot s^2\right]$ $\times 10^{10}$	I_y $\left[N \cdot mm \cdot s^2\right]$ $\times 10^{10}$	I_z $\left[N \cdot mm \cdot s^2\right]$ $\times 10^{10}$
-2	697.21	697.21	14689.67	16193.49	2.6137	5.5081	8.8550
-1	1456.30	1456.30	21711.80	17929.21	16.5780	21.7453	35.2633
1	498.30	498.30	14498.52	17935.73	1.7298	3.9366	5.3252
2	587.57	587.57	12718.03	19276.53	2.2027	4.7939	7.1655
3	588.75	588.75	16262.04	13376.26	2.2071	4.8035	7.1439
4	590.06	590.06	16268.44	13390.90	2.2121	4.8142	7.1538
5	589.35	589.35	16267.29	13390.32	2.2094	4.8084	7.1557
6	585.60	585.60	12048.94	9241.61	2.1953	4.9317	7.1940
7	565.58	565.58	12018.04	9151.66	2.1203	4.7631	6.9864
8	560.18	560.18	18337.69	14066.15	2.1000	4.7176	6.9369
9	559.76	559.76	18343.61	14067.30	2.0985	4.7141	6.9341
10	559.44	559.44	18347.69	14067.03	2.0973	4.7114	6.9329
11	559.44	559.44	18347.69	14067.03	2.0973	4.7114	6.9329
12	559.44	559.44	18347.69	14067.03	2.0973	4.7114	6.9329
13	559.44	559.44	18347.69	14067.03	2.0973	4.7114	6.9329
14	559.44	559.44	18347.69	14067.03	2.0973	4.7114	6.9329
15	559.44	559.44	18347.69	14067.03	2.0973	4.7114	6.9329
16	520.91	520.91	18440.19	14036.50	1.9528	4.3870	6.4180
17	7.09	7.09	3934.98	3370.45	0.0009	0.0009	0.0052

Tabla 7.8: Rigideces infinitesimales de entrepiso y centros de rigidez de modelo simplificado calibrado de edificio Antígona.

Piso Inferior	Piso Superior	GA_z [N] $\times 10^{10}$	GA_y [N] $\times 10^{10}$	GJ [N · mm ²] $\times 10^{17}$	EI_z [N] $\times 10^{18}$	EI_y [N] $\times 10^{18}$	X_{CR} [mm]	Y_{CR} [mm]
Base	-2	12.9781	13.9052	2261.9048	63.0942	29.1958	13332.85	16907.81
-2	-1	13.6908	14.2693	325.7669	87.1372	71.2844	26085.20	23511.98
-1	1	3.2105	4.6246	41.1733	2.1351	1.5989	15690.93	12847.12
-1	2	0.2697	0.8999	0.0000	0.0246	0.1100	3610.39	26522.63
1	2	3.5356	6.6833	28.3667	4.3702	2.8819	19260.14	8702.12
2	3	7.8220	7.4410	5.4630	12.5096	4.3666	18746.61	10731.90
3	4	7.8220	7.4410	4.4884	12.5096	4.3666	18746.61	10731.90
4	5	7.8220	7.4410	3.8676	12.5096	4.3666	18746.61	10731.90
5	6	5.9569	14.5494	5.0217	7.5991	8.9656	18367.38	9566.10
6	7	5.9641	13.9669	4.5096	7.4213	6.3300	18761.87	10311.21
7	8	8.4084	2.7232	16.9452	10.8452	1.2764	18660.36	10133.94
8	9	8.4084	2.7232	15.4191	10.8452	1.2764	18660.36	10133.94
9	10	8.4084	2.7232	14.0287	10.8452	1.2764	18660.36	10133.94
10	11	8.4084	2.7232	12.6755	10.8452	1.2764	18660.36	10133.94
11	12	8.4084	2.7232	11.3149	10.8452	1.2764	18660.36	10133.94
12	13	8.4084	2.7232	9.8592	10.8452	1.2764	18660.36	10133.94
13	14	8.4084	2.7232	8.3017	10.8452	1.2764	18660.36	10133.94
14	15	8.4084	2.7232	6.5260	10.8452	1.2764	18660.36	10133.94
15	16	8.4503	2.7718	4.6132	9.6452	1.1041	17734.97	10550.98
16	17	0.3716	0.5555	0.0599	0.0607	0.0200	14164.47	11568.82

Cabe destacar, que de los parámetros modificados por los coeficientes de calibración, se aprecian diferencias significativas en la rigidez torsional (Tabla 7.6) por lo que el modelo ETABS es más flexible para los pisos 1, 2 y del 8 al 16, mientras que es más rígido del piso 3 al 7 en comparación con las mediciones realizadas. En cuanto a las rigideces infinitesimales en torno a Y (Tabla 7.5) se observa que el edificio es más rígido en los pisos 6 y 7, pero más flexible del piso 8 al 16 en comparación con el modelo ETABS.

7.2. Resultados de Calibración de Modelo Simplificado

El modelo simplificado calibrado da como resultado los valores que se muestran en la Tabla 7.9 en la que aparecen las frecuencias y participación de masa modales, y en la Tabla 7.10 se muestran las frecuencias del modelo simplificado y de las mediciones con las que se calibró el modelo para poder contrastarlos con los valores obtenidos.

Tabla 7.9: Frecuencias, períodos y participación de masas modales para modelo simplificado calibrado con mediciones.

Modo	f_n [Hz]	T_n [s]	M_x [%]	M_y [%]	M_{RZ} [%]	$\sum M_x$ [%]	$\sum M_y$ [%]	$\sum M_{RZ}$ [%]
1	0.891	1.122	11.445	6.527	38.148	11.445	6.527	38.148
2	0.978	1.023	1.659	43.570	3.208	13.104	50.097	41.356
3	1.311	0.763	40.841	0.008	12.897	53.946	50.104	54.253
4	3.146	0.318	0.826	7.195	0.403	54.771	57.299	54.656
5	3.617	0.277	0.730	11.770	1.415	55.501	69.070	56.072
6	4.723	0.212	13.274	0.045	1.979	68.775	69.115	58.051

Tabla 7.10: Períodos del modelo calibrado y las mediciones del edificio para cada modo.

Modo	T_n Modelo simplificado ETABS [s]	T_n Mediciones edificio [s]	T_n Modelo simplificado calibrado [s]
1	1.165	1.122	1.122
2	0.889	1.023	1.023
3	0.594	0.763	0.763
4	0.421	0.318	0.318
5	0.262	0.276	0.277
6	0.224	0.208	0.212

En la Figura 7.1 se muestran los diagramas en planta de los modos del modelo simplificado calibrado con las mediciones realizadas al edificio Antígona, mientras que en la Figura 7.2 se muestran los diagramas de las formas modales tridimensionales, los que se pueden comparar con los diagramas de las mediciones en la Figura 5.61 y la Figura 5.62. En el ANEXO B se muestran los desplazamientos de los centros geométricos por modo del modelo calibrado.

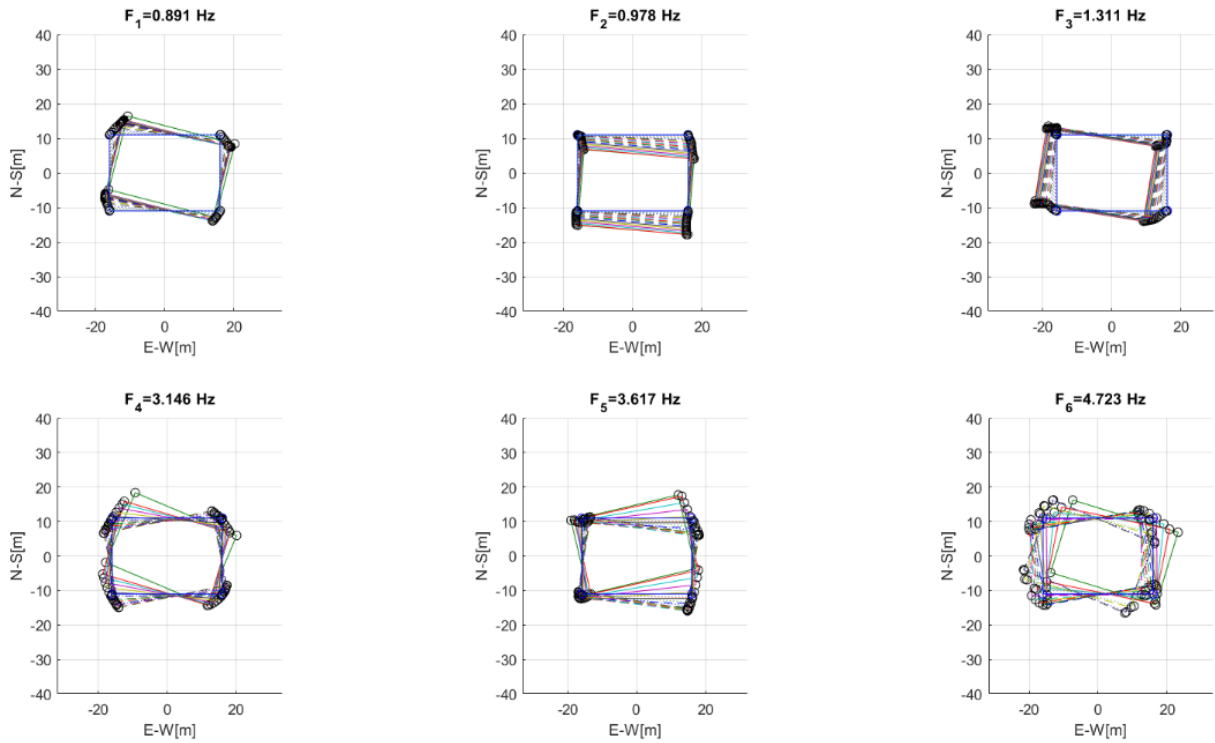


Figura 7.1: Diagramas de formas modales en planta de todos los pisos del modelo simplificado calibrado del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del edificio con sus respectivas frecuencias modales.

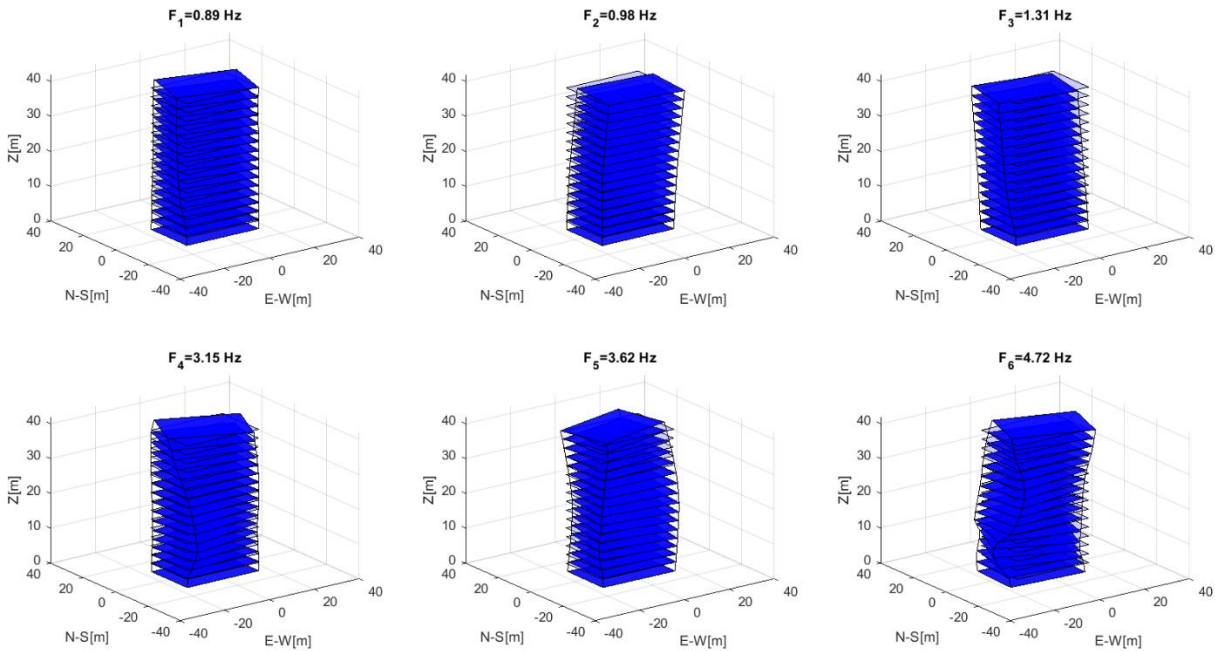


Figura 7.2: Diagramas de formas modales tridimensional de todos los pisos del modelo simplificado calibrado del edificio Antígona, se muestran los 6 primeros modos del modelo con sus respectivas frecuencias modales.

Para la calibración se esperaba que los valores en la diagonal de MAC entre los modos de las mediciones del edificio y el modelo calibrado fueran cercanos o igual a 1, es decir, que existiera semejanza entre las formas modales. En la Tabla 7.11 se muestra la matriz de MAC entre las formas modales de las mediciones del edificio y el modelo simplificado previo a la calibración y en la Figura 7.3 se grafican estos valores para poder visualizar estos resultados, en donde se observa que no hay semejanza entre todos los modos.

Tabla 7.11: Matriz MAC para modos obtenidos de mediciones y del modelo simplificado.

MAC		Modelo simplificado ETABS					
		Modos	1	2	3	4	5
Mediciones edificio	1	0.528	0.589	0.433	0.001	0.000	0.002
	2	0.011	0.817	0.139	0.010	0.008	0.000
	3	0.571	0.017	0.973	0.006	0.001	0.021
	4	0.030	0.000	0.000	0.442	0.118	0.646
	5	0.179	0.000	0.005	0.027	0.0124	0.003
	6	0.000	0.006	0.001	0.709	0.9486	0.030

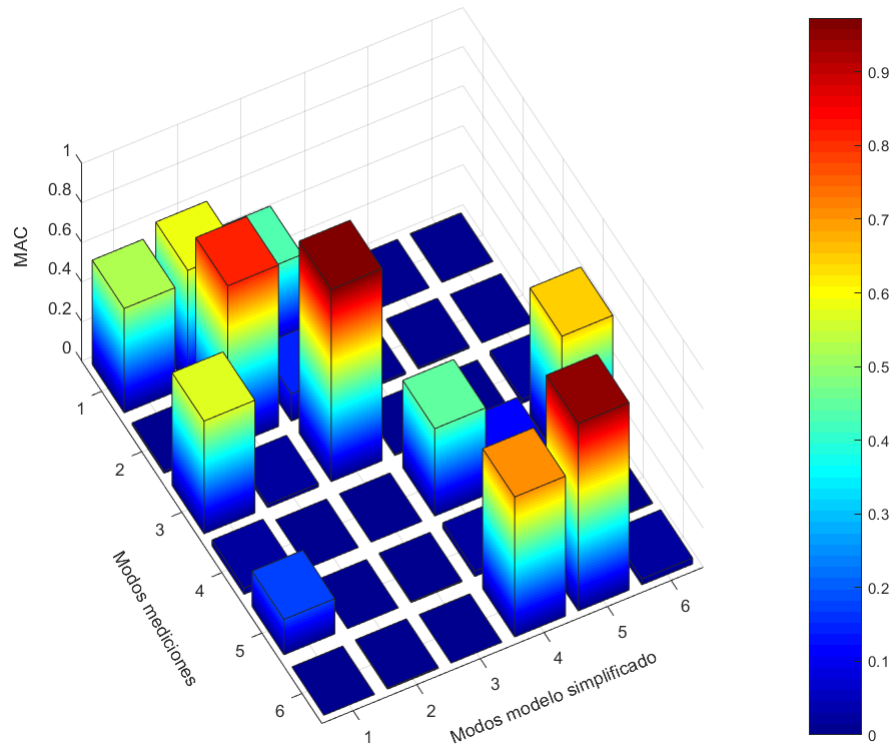


Figura 7.3: Gráfico MAC entre modos obtenidos de mediciones y del modelo simplificado ETABS.

Los resultados de MAC entre los modos de las mediciones y el modelo simplificado calibrado se muestran en la Tabla 7.12 y gráficamente en la Figura 7.4, en las que se observa mayor semejanza entre las formas modales, según este criterio.

Tabla 7.12: Matriz MAC para modos obtenidos de mediciones y del modelo simplificado calibrado.

MAC	Modelo simplificado calibrado						
	Modos	1	2	3	4	5	6
Mediciones edificio	1	0.773	0.226	0.642	0.031	0.023	0.017
	2	0.127	0.992	0.000	0.015	0.010	0.000
	3	0.457	0.003	0.994	0.000	0.001	0.005
	4	0.007	0.003	0.023	0.848	0.577	0.209
	5	0.000	0.000	0.002	0.785	0.962	0.003
	6	0.060	0.000	0.000	0.104	0.006	0.964

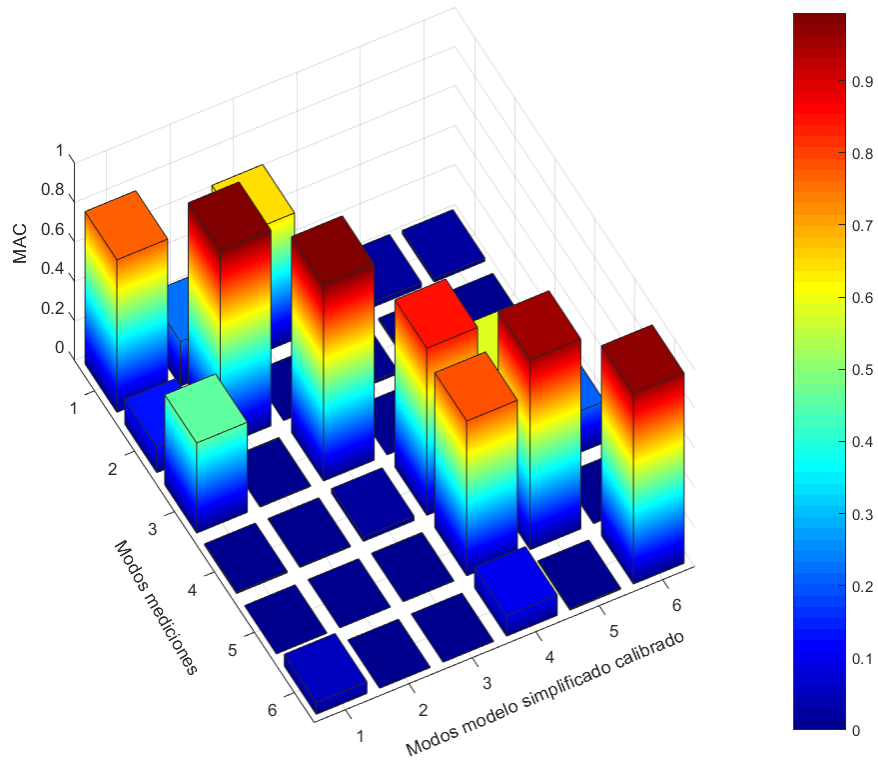


Figura 7.4: Gráfico MAC entre modos obtenidos de mediciones y del modelo simplificado calibrado.

Capítulo 8

Análisis de Resultados

En el presente capítulo se presenta el análisis realizado a los resultados obtenidos en los Capítulo 5, Capítulo 6 y Capítulo 7, estos incluyen los resultados de las mediciones de vibraciones ambientales realizadas en todos los niveles del edificio Antígona, los modelos simplificados construidos y la calibración del modelo simplificado. El análisis consiste en comparar resultados, determinar cuáles son los datos más relevantes y útiles obtenidos de los modelos del edificio Antígona.

8.1. Análisis de Resultados de las Campañas de Medición

La primera parte de las mediciones consiste en probar y validar el uso de sismómetros TROMINO en la caracterización dinámica de estructuras, por lo que se analizan los resultados obtenidos en estructuras y se determina si se aprueba la metodología utilizada. Para el análisis de mediciones del Edificio Antígona, se comparan los resultados de las distintas mediciones a través de estadística básica. Finalmente, se analizan las propiedades dinámicas identificadas del edificio Antígona con los diferentes instrumentos empleados.

8.1.1. Análisis de Mediciones de Prueba con Sismómetros

De la primera medición realizada, se observan los espectros de potencia y función de coherencia para todos los canales en la misma dirección (Figura 5.1 y Figura 5.3), en donde se aprecia que las frecuencias con mayor energía coinciden para todos los sensores, con pequeñas variaciones en la magnitud del PSD, pero que tienen relevancia en la medida que se quisieran determinar formas modales. También se observa una alta coherencia para las frecuencias fundamentales del edificio como era de esperarse.

Los registros de la segunda medición, realizada al edificio Justicia Espada Acuña Mena, son principalmente analizados con el método SSI, a través de los diagramas de estabilidad para cada una de las mediciones. En estos se pueden observar claramente las primeras 8 frecuencias naturales identificadas, mientras que al graficar las formas modales con los datos entregados por el método SSI no hay consistencias; como en la Figura 5.9 en la que se muestra un correcto acoplamiento del piso de referencia para 4 modos, sin embargo, en ninguno de los modos se observa una clara tendencia de desplazamiento de los modos (Figura 5.10). En este contexto, se observó que las diferencias de amplitudes que presentan los diversos equipos TROMINO en las frecuencias de interés, puede generar errores significativos

en la estimación de las formas modales si es que no se corrige la amplitud de los sensores. También se observa que el factor de corrección de los sismómetros no es un factor constante y depende de la frecuencia, observándose que las frecuencias fundamentales de estos esta entre los 4 a 5 Hz (pero variables).

En base a la observación realizada en la medición de la Torre Central se realiza la tercera y cuarta medición de manera si se podía generar un factor de corrección genérico para cada sensor en función de la frecuencia (e.g., suponer una frecuencia fundamental y tasa de amortiguamiento del equipo y/o establecer un factor de corrección en función de la frecuencia, teniendo en cuenta además que también podrían haber errores en la fase en caso que los sensores tengan propiedades dinámicas variadas), se observan los ajustes de la función de transferencia con los puntos de frecuencias naturales de todos los registros tomados, sin embargo, no se muestra una tendencia clara y tampoco se abarca todo el espectro de frecuencias para poder generar una curva con la que se calibren los instrumentos. Al realizar las mediciones en el edificio Antígona se les añaden datos a los ajustes, no obstante, sigue sin existir una correlación en la función de transferencia para calibrar los instrumentos. Por tanto, se concluye que para realizar una medición de un edificio se puede hacer con sismómetros TROMINO, pero previo a ello se debe hacer un proceso de calibración de sensores en las frecuencias de interés, colocando todos los sensores juntos en la misma orientación y luego rotando en 90° uno de ellos (para ver la relación entre horizontales y transversales) para evaluar el factor de ajuste para las frecuencias fundamentales de la estructura que se estudiará. Por otra parte, en la práctica se observó que al tener 4 instrumentos TROMINO se debía hacer un largo proceso antes de cada medición de tomar la señal GPS para sincronizar el tiempo de los sensores, lo cual podía requerir un tiempo considerable independiente que se debían mover los sensores a un campo abierto (antes de la medición). Además, el bajo número de sensores hacía que solo se puedan medir dos pisos en forma consecutiva lo cual reducía las ventajas de versatilidad que ofrece el sistema. Otro aspecto a considerar es que los sensores muestran un desfase de 3 segundos justos que es en términos prácticos de un carácter aleatorio, independiente de si se usa el programa 5 y un tiempo común (lo cual puede comprobarse de las funciones de correlación cruzada de los sensores). En vista de esto, es que se concluye que es mejor emplear los acelerómetros EpiSensor que no tienen errores de amplitudes ni de desfase de tiempo (aunque requieren de una instalación algo más tediosa al usar cables que se deben prolongar por todo el edificio).

Las mediciones del edificio Antígona se analizan con el método SSI, por lo que se obtienen diagramas de estabilidad en los que se distinguen claramente las 6 primeras frecuencias naturales. Las razones de amortiguación modales, que entrega el análisis, se encuentran dentro de un rango esperado y para cada modo poseen valores similares. Al igual que en la medición del edificio Justicia Espada Acuña Mena, en las representaciones gráficas de los

modos en planta no se observan tendencias claras de desplazamiento, debido a la falta de una calibración entre los sensores.

De la medición del suelo en las cercanías del edificio se observa que el suelo posee una frecuencia cercana a 1[Hz], o sea un período cercano a 1[s], lo que se condice con los antecedentes geotécnicos recopilados, a pesar de ello, se observa que el valor peak del HVSR que es igual 6 que es levemente mayor al obtenido en mediciones realizadas por Serafini (2017) que indican un valor cercano a 4, pero asociado a una frecuencia similar. Un valor HVSR de 6 indicaría que el edificio se ubica en una zona en cual ocurriría una alta amplificación por efecto de sitio en la frecuencia fundamental del depósito, que a la vez es muy cercana a las tres frecuencias fundamentales del edificio (torsional, longitudinal y transversal) pudiéndose concluir que el edificio debió estar sujeto al efecto de doble resonancia y debió haber sido sujeto a demandas sísmicas amplificadas notoriamente durante el terremoto de 2010, que explicarían los daños observados.

8.1.2. Análisis de Mediciones de Edificio Antígona

De las mediciones de microvibraciones realizadas al edificio Antígona con acelerómetros EpiSensor se obtienen, a través de análisis en frecuencia y el método SSI, las frecuencias naturales y formas modales para cada conjunto de pisos por medición. Las frecuencias naturales que se consiguen por ambos métodos son similares, por otro lado, las razones de amortiguamiento que se adquieren con el método SSI son muy altas para considerarlas como un dato verosímil dado que se empleó una nueva técnica por pequeñas ventanas que elimina los efectos de ruido debido a impactos locales al interior de la estructura (ejemplo portazos o personas caminando cercana a los sensores durante las mediciones).

Las representaciones gráficas de las formas modales, tanto en planta como tridimensional, muestran una clara tendencia de movimiento en cada modo y para cada piso. En los gráficos de cada medición se puede verificar la tendencia de desplazamiento de las plantas por piso, por lo que se unen todas las plantas de las mediciones, compatibilizando las plantas del piso 16 (Figura 5.55). En la Figura 5.57, se aprecian las formas modales para todos los pisos de donde se puede extraer la dirección de cada modo: Modo 1 torsional y transversal, Modo 2 principalmente transversal, Modo 3 longitudinal y torsional, Modo 4 torsional y transversal, Modo 5 transversal y torsional, Modo 6 longitudinal y torsional.

8.2. Análisis de Modelos Simplificados de Edificio Antígona

Se analizan los modelos simplificados elaborados y los resultados que entregan a partir de los datos de entrada, obtenidos del modelo de elementos finitos del edificio Antígona. Se

comparan los resultados de ambos modelos simplificados con los resultados obtenidos del modelo de elementos finitos.

8.2.1. Análisis de Modelos Simplificados Construidos

El modelo simplificado del edificio de corte corresponde a la forma más simple de modelamiento y no contempla el efecto de flexión de los muros por la altura del edificio, solo contempla su rigidez al corte por planta, al obtener los parámetros de rigidez de un entrepiso con su altura que es significativa menor. Para incluir el efecto de flexión del edificio por la relación de aspecto de los muros, se genera el segundo modelo simplificado.

El primer modelo posee mayor rigidez al no contemplar la flexión del edificio, por lo que los períodos naturales, obtenidos como resultado del modelo, son muy bajos para una estructura como un edificio de 16 pisos. Al agregar la flexión al modelo disminuye la rigidez del edificio y aumentan los períodos naturales obtenidos, por lo que este modelo tiene mayor similitud con el modelo de ETABS.

8.2.2. Comparación de Resultados de Modelos

Al comparar los modelos simplificados con el modelo de ETABS, se observa mayor similitud en los períodos obtenidos con los del modelo simplificado que incluye flexión, por lo que este es el modelo que se calibra con las mediciones realizadas. En las siguientes tablas se comparan las frecuencias modales entre el modelo simplificado, el modelo ETABS y las mediciones del edificio, en donde se calcula la diferencia porcentual entre los valores de las frecuencias. Se observa mayor semejanza entre los 3 primeros modos del modelo simplificado y el modelo ETABS, mientras que el cuarto y sexto modo difieren en mayor medida del modelo de elementos finitos.

Tabla 8.1: Comparación de frecuencias naturales de modelo simplificado con flexión y modelo ETABS

Modo	T_n Modelo simplificado ETABS [s]	T_n Modelo ETABS [s]	Diferencia porcentual de T_n [%]
1	1.194	1.207	1.101
2	0.902	0.922	2.192
3	0.597	0.618	3.439
4	0.435	0.303	30.336
5	0.271	0.248	8.414
6	0.225	0.177	21.473

Tabla 8.2: Comparación de frecuencias naturales de modelo ETABS y mediciones de edificio.

Modo	T_n Modelo ETABS [s]	T_n Mediciones edificio [s]	Diferencia porcentual de T_n [%]
1	1.207	1.122	7.067
2	0.922	1.023	9.846
3	0.618	0.763	18.951
4	0.303	0.318	4.717
5	0.248	0.276	10.145
6	0.177	0.208	15.026

Tabla 8.3: Comparación de frecuencias naturales de modelo simplificado con flexión y mediciones del edificio.

Modo	T_n Modelo simplificado ETABS [s]	T_n Mediciones edificio[s]	Diferencia porcentual de T_n [%]
1	1.194	1.122	6.032
2	0.902	1.023	11.823
3	0.597	0.763	21.738
4	0.435	0.318	26.887
5	0.271	0.276	1.890
6	0.225	0.208	7.587

Al compararse la participación de masas modales del modelo ETABS (Tabla 6.9) con las del modelo simplificado (Tabla 6.8) se observan similitudes en las tendencias, sin embargo, no presentan iguales porcentajes de masas modales por modo. Por otra parte, al observar las formas modales del modelo simplificado (Figura 6.5) estas poseen similitud con las del modelo ETABS (Figura 6.6) en las direcciones de movimientos por modos.

8.3. Análisis del Modelo Simplificado Calibrado con Mediciones

Se analizan los resultados obtenidos a partir del modelo simplificado calibrado con las mediciones de vibraciones ambientales realizadas al edificio Antígona, esto con el fin de determinar si los resultados del modelo calibrado son consistentes con las mediciones con las que se calibró el modelo. En la Tabla 8.4 se comparan los períodos del modelo calibrado y de las mediciones, con lo que se observa una diferencia porcentual despreciable, por lo que se determina que la calibración fue efectiva al disminuir las diferencias entre los períodos.

Tabla 8.4: Comparación de períodos naturales de modelo simplificado con flexión calibrado y mediciones del edificio.

Modo	T_n Modelo simplificado calibrado [s]	T_n Mediciones edificio[s]	Diferencia porcentual de T_n [%]
1	1.122	1.122	0.009
2	1.023	1.023	0.020
3	0.763	0.763	0.000
4	0.318	0.318	0.063
5	0.277	0.276	0.181
6	0.212	0.208	1.606

En la Tabla 8.5 se comparan los valores de la diagonal de MAC para el modelo simplificado y el modelo calibrado versus los resultados de las mediciones, esto para poder observar en qué medida la calibración sirvió para aumentar la semejanza de las formas modales con las de las obtenidas experimentalmente. Efectivamente, los valores de MAC se acercan a 1 entre el modelo calibrado y las mediciones, así como también se observa un aumento del MAC con respecto al modelo simplificado. En los gráficos mostrados en la Figura 7.3 y Figura 7.4 se presentan los valores de MAC entre todos los modos, al compararlos es también visible el acercamiento de los valores a 1 al realizar la calibración.

Tabla 8.5: Comparación de diagonales de MAC de modelo simplificado y modelo calibrado con mediciones.

Modo	MAC Modelo simplificado ETABS vs. Mediciones	MAC Modelo simplificado calibrado vs. Mediciones	Diferencia porcentual de MAC [%]
1	0.598	0.773	22.639
2	0.817	0.992	17.641
3	0.973	0.994	2.113
4	0.442	0.848	47.877
5	0.012	0.962	98.753
6	0.030	0.964	96.888

Al observar los diagramas de las formas modales del modelo calibrado (Figura 7.2) y compararlos con las de las identificadas en las mediciones (Figura 5.62) se aprecia que de los modos 1 al 5 son prácticamente iguales las formas modales y las frecuencias naturales, sin embargo, se muestra una leve discrepancia entre las formas del modo 6 a pesar que el MAC es igual a 0.964, lo cual es bastante cercano 1 como para considerarlos modos semejantes.

Capítulo 9

Conclusiones y Comentarios

En el presente trabajo se cumplen los objetivos planteados al inicio del trabajo, ya que se realizaron las mediciones con sismómetros TROMINO, estudiando la validación de una metodología de uso en estructuras para la obtención de propiedades modales, también se realizaron mediciones exhaustivas del edificio Antígona con las que se identificaron propiedades dinámicas y obtuvieron las formas modales para todos sus niveles. A su vez, se creó un modelo simplificado del edificio Antígona calibrado con las propiedades identificadas de las mediciones realizadas.

Del estudio de la validación del uso de sismómetros TROMINO en estructuras para obtener propiedades modales, se concluye que estos instrumentos son de gran utilidad en la identificación de frecuencias naturales de una estructura, sin embargo, para la obtención de formas modales precisas a través del método SSI no es útil sin una calibración previa. Esto se atribuye a que los instrumentos no perciben las mismas señales midiendo exactamente en el mismo lugar y por tanto requieren de un proceso de calibración en caso de requerir determinar formas modales con exactitud, la única forma de calibrarlos es generar una metodología efectiva para este fin. Se realizan varias mediciones de prueba para lograr calibrar los equipos, observándose una gran variabilidad para cada sensor, por lo que se optó por descartar el uso de TROMINOS para las mediciones del edificio Antígona.

A partir de la única medición realizada del suelo en la cercanía del edificio Antígona con sismómetros TROMINO, se obtuvo que el período del suelo es cercano a 1[s] coincidiendo con los antecedentes presentados, esto quiere decir que el edificio se encuentra fundado sobre un suelo de período similar a la estructura, por lo que influye bastante en el comportamiento sísmico del edificio. Por lo anterior, se sugiere realizar prospecciones geotécnicas en las cercanías del edificio y estudiar la interacción suelo-estructura para tener una visión más acabada de la relación del suelo con el comportamiento dinámico estructural.

A partir de las mediciones de microvibraciones realizadas al edificio Antígona en todos sus pisos con acelerómetros EpiSensor, se reconocen las frecuencias naturales y formas modales del edificio, a través del análisis en frecuencia y el método SSI. Con este último se obtienen los datos necesarios para generar diagramas de las formas modales en planta y tridimensional para todos los pisos obteniéndose resultados consistentes entre las diversas mediciones, cabe destacar que la compatibilización de las diferentes mediciones para obtener las formas modales de todo el edificio es un proceso tedioso, en el que lleva mucho tiempo lograr acoplar

las plantas del piso común y luego obtener formas modales deseadas. Estos últimos diagramas mencionados son una gran herramienta de visualización de los desplazamientos por piso para cada modo. Dentro de los datos obtenidos del método SSI se encuentran las razones de amortiguamiento modal, al observar estos resultados se consideran que están fuera del rango de una estructura como esta ya que se empleó una nueva técnica que usa el método SSI por pequeñas ventanas de tiempo (excluyendo zonas de impactos), de esto se concluye que estos resultados no deben ser considerados, sin embargo es reconocido que la determinación de tasas de amortiguamiento asociadas a vibraciones ambientales son en general muy bajas y poco representativas para su uso durante análisis sísmicos, por lo que estos resultados son en general obviados. Por otra parte, la metodología permite obtener frecuencias fundamentales y formas modales eliminando zonas de los registros en cual ocurren ruidos excesivos, siendo los resultados más relevantes de una identificación de propiedades dinámicas a partir de vibraciones ambientales.

Al generar un modelo simplificado de un edificio de corte y otro en el que se incluye la flexión del edificio, se concluye que para un edificio relativamente alto (de 44[m] de altura), no se ajusta el modelo de un edificio de corte. Se concluye que la flexión es importante en el modelamiento de edificios de alturas similares, ya que es un factor que aporta flexibilidad al edificio, disminuyendo la frecuencia natural de la estructura.

De los resultados obtenidos del modelo simplificado con flexión, se observan pequeñas diferencias de las propiedades dinámicas que entrega el modelo del edificio en el programa ETABS, las que se atribuyen a los acoples de elementos estructurales del modelo de elementos finitos del edificio y que no se implementan en el modelo en Matlab por ser un modelo simplificado.

El modelo simplificado calibrado obtenido se ajusta a los períodos de los primeros 6 modos identificados en las mediciones. En cuanto a las formas modales estas son semejantes a las identificadas en mediciones, sin embargo, para el modo 6 se observan discrepancias a pesar de tener un MAC de 0.964, por lo que la calibración no permitió una mejor forma ya que se basa en este criterio. Este modelo se considera una herramienta útil, ya que se ajusta a los primeros 5 modos identificados en las mediciones, lo cual es suficiente para obtener una respuesta sísmica verosímil a la del edificio frente a un sismo al aplicarle un registro de aceleraciones que perciba el edificio a través de su instrumentación permanente.

Finalmente, se concluye que el modelo simplificado calibrado con los resultados de las mediciones, podrá ser utilizado para automatizar completamente la generación de informes con la respuesta sísmica del edificio, complementando la plataforma creada por Matias Costa (2019).

Capítulo 10

Bibliografía

- Aguirre, C., & Perez, P. (2004). Seismic microzoning based on earthquake records amplification. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.38.1.41-49>
- Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1982). A correlation coefficient for modal vector analysis. *Proceedings of the International Modal Analysis Conference & Exhibit*, 110–116.
- Astroza, M., Cabezas, F., Moroni, M. O., Massone, L., Ruiz, S., Parra, E., Cordero, F., & Mottadelli, S. (2010). *Intensidades sísmicas en el área de daños del terremoto del 27 de Febrero de 2010*.
- Astroza, M., Ruiz, S., Astroza, R., & Molina, J. (2012). Intensidades sísmicas. In *Mw=8.8 Terremoto en Chile* (pp. 107–126).
- Astroza, R., Gutiérrez, G., Repenning, C., & Hernández, F. (2018). Time-variant modal parameters and response behavior of a base-isolated building tested on a shake table. *Earthquake Spectra*, *34*(1), 121–143. <https://doi.org/10.1193/032817EQS054M>
- Barrientos, S. (2010). Informe técnico: Terremoto Cauquenes 27 Febrero 2010. In *Servicio Sismológico*.
- Bilbao, J. A. (2014). *Interpretación automática de diagramas de estabilidad*. Universidad de Chile.
- Blanco, J. L., González, A., & García-Manrique, J. M. (2012). *Análisis estático de estructuras por el método matricial*. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga.
- Celebi, M. (2000). Seismic Instrumentation of Buildings. In *United States Geological Survey* (Vol. 157, Issue 00). [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90311-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90311-9)
- Centro Sismológico Nacional. (2013). Sismicidad y Terremotos en Chile. In *CSN Universidad de Chile*. http://www.sismologia.cl/pdf/difusion/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (Fourth Ed.). Pearson.
- Concha, R. (2011). *Informe técnico RC AE 225-IFT-02: Rehabilitación estructural edificio Antígona*.
- Costa, M. (2019). *Estudio del comportamiento de edificio Antígona sometido a sismos de mediana intensidad* [Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170885>
- Díaz, P. A. (2018). *Análisis de estructuras aisladas con el método de múltiples subestructuras*. Universidad de Chile.

- Guendelman, T. (2014). *Análisis estático y dinámico de estructuras* (Segunda Ed). Editorial Universidad de La Serena.
- Hernández, F. J. (2009). *Análisis de métodos de identificación de variación de propiedades dinámicas*. Universidad de Chile.
- Leiva, G., Bravo, M., Matus, F., & Riquelme, J. (2010). *Informe técnico edificio Antígona: Estudio de diagnóstico estructural. Análisis Causas del Daño*.
- Li, X., Ventura, C. E., Feng, Y., Pan, Y., Kaya, Y., Xiong, H., Zhang, F., Cao, J., & Zhou, M. (2016). Ambient vibration testing of two highly irregular tall buildings in Shanghai. *Dynamics of Civil Structures, Volume 2, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 2*(July 2017), 87–94. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29751-4>
- Massone, L., & Rojas, F. (2012). Comportamiento de edificios de hormigón armado. In *Mw = 8.8: Terremoto en Chile, 27 de Febrero 2010* (Vol. 1996, pp. 167–185).
- Micromed s.p.a. (2012). *TROMINO User's manual*. https://doi.org/10.1057/9780230584488_6
- Muñoz, E. (2013). *Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V región* [Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114667>
- Muñoz, E., Sepulveda, S., & Rebolledo, S. (2015). Nuevos antecedentes sobre la falla Marga-Marga y sus implicancias en el peligro sísmico. *Congreso Geológico Chileno*, 857–859.
- Núñez, T. (2009). *Variación debido a cambios de masa y rigidez de las propiedades dinámicas de una estructura en proceso constructivo*. Universidad de Chile.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (1986). Numerical recipes in Fortran: The art of scientific computing. In *Numerical Methods for Fortran 77: The art of scientific computing* (Second Ed). The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Serafini, F. J. (2017). *Aportes para una nueva zonificación geotécnica de Viña del Mar: Estimación de la profundidad del basamiento rocoso en la cuenca del Marga-Marga a partir de mediciones espectrales H/V* [Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/21676>
- Suquillo, B. (2017). *Validación de los límites para distintos niveles de desempeño en edificios con muros de hormigón armado (Typical Chilean RC Building)* [Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147398>
- Toledo, G. U. (2017). *Aportes para una nueva zonificación geotécnica de Viña del Mar: Estimación de la amplificación sísmica en la cuenca del Marga-Marga* [Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/23417>
- Van Overschee, P., & De Moor, B. (1996). *Subspace identification for linear systems. Theory-Implementation-Applications*. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4650193>
- Welch, P. D. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans. Audio and Electroacoustic*, 15, 70–73.

ANEXOS

ANEXO A

Desplazamientos de centros geométricos en mediciones

En este anexo se adjuntan las tablas con los desplazamientos de los centros geométricos para cada modo del edificio Antígona según las mediciones realizadas. Estos desplazamientos se muestran por modo para los 17 pisos medidos y consideran tres grados de libertad, el desplazamiento en X, en Y y el giro en torno a Z. Las primeras 6 tablas muestran los desplazamientos según los Resultados Finales de Campañas Mediciones (ver sección 5.2.3), mientras que las siguientes 6 tablas muestran los desplazamientos con los Ajuste de Formas Modales (ver sección 5.3). El centro geométrico (CG) se define como el centro del rectángulo de 32[m] por 21[m] dibujados en los diagramas de las formas modales.

Tabla A.1: Desplazamientos de CG por piso de modo 1 de edificio Antígona en mediciones.

Piso	ΔX^1 [m]	ΔY^1 [m]	θZ^1 [rad]
1	-0.30305	-0.33867	-0.04287
2	0.02418	0.06621	0.00036
3	-0.20143	0.10009	-0.02993
4	0.51817	0.16237	-0.04660
5	0.24275	0.13299	-0.05615
6	0.28374	0.21818	-0.07759
7	0.81633	0.45706	-0.03556
8	0.49000	-0.11913	-0.10338
9	0.50379	0.52042	-0.10934
10	0.65116	0.54559	-0.16157
11	-0.13487	0.21469	-0.13847
12	-0.38388	0.12741	-0.21935
13	-0.43006	0.36573	-0.23971
14	0.67583	0.50807	-0.22737
15	0.90019	0.85620	-0.23186
16	1.46205	0.47651	-0.24125
17	1.02312	0.35417	-0.14436

Tabla A.2: Desplazamientos de CG por piso de modo 2 de edificio Antígona en mediciones.

Piso	ΔX^2 [m]	ΔY^2 [m]	θZ^2 [rad]
1	0.01370	0.24526	-0.00497
2	-0.30171	0.42161	0.03122
3	-0.58909	0.39905	-0.05486
4	0.07829	1.02550	-0.01261
5	-0.07778	1.15777	0.02348
6	-0.29375	1.51278	0.04322
7	-0.04095	2.03841	0.00185
8	0.42752	2.33141	0.00236
9	-0.54000	2.75456	0.05402
10	-0.13455	3.03593	0.03632
11	-0.12373	3.49259	0.01938
12	-0.28592	3.94857	-0.01053
13	0.04568	4.75291	0.02955
14	-0.50878	4.85773	0.11883
15	-0.08889	5.26450	0.04111
16	-0.31146	5.69687	0.02749
17	-0.83607	6.10127	0.08096

Tabla A.3: Desplazamientos de CG por piso de modo 3 de edificio Antígona en mediciones.

Piso	ΔX^3 [m]	ΔY^3 [m]	θZ^3 [rad]
1	0.03477	0.00397	-0.00018
2	0.31850	0.12704	0.01450
3	0.30593	0.08267	-0.01665
4	0.91288	0.05606	0.03282
5	0.94906	0.09038	0.03348
6	1.15091	0.18706	0.04724
7	1.51757	0.04018	0.01426
8	1.80163	0.14221	0.07573
9	1.90395	0.09723	0.07077
10	2.27276	0.22014	0.09782
11	2.63869	0.10609	0.12333
12	2.92661	0.40272	0.10706
13	3.05646	0.11586	0.12460
14	3.16462	0.30940	0.13063
15	3.37524	0.32047	0.14662
16	3.60571	0.47406	0.15983
17	3.76643	0.36588	0.10194

Tabla A.4: Desplazamientos de CG por piso de modo 4 de edificio Antígona en mediciones.

Piso	ΔX^4 [m]	ΔY^4 [m]	θZ^4 [rad]
1	-0.05831	-0.21674	0.02630
2	-0.45458	-0.57145	0.06600
3	-0.47811	-0.77252	0.12815
4	-0.10556	-1.03566	0.14978
5	-0.41732	-1.45777	0.16841
6	-0.52277	-1.36385	0.20687
7	-0.33321	-1.65259	0.28044
8	-0.50648	-1.81142	0.20560
9	-0.20658	-1.40469	0.18490
10	-0.28521	-1.57758	0.18719
11	-0.02426	-1.30723	0.13331
12	-0.08475	-0.58803	0.03520
13	-0.10529	-0.07980	-0.00563
14	0.32840	0.46875	-0.08740
15	0.30697	1.17389	-0.15145
16	0.24908	1.69050	-0.23214
17	0.21603	2.72724	-0.16739

Tabla A.5: Desplazamientos de CG por piso de modo 5 de edificio Antígona en mediciones.

Piso	ΔX^5 [m]	ΔY^5 [m]	θZ^5 [rad]
1	-0.27214	0.69080	0.02527
2	-0.46945	1.13302	0.04344
3	-0.44288	1.61002	0.08484
4	-0.48187	2.28705	0.09078
5	-0.69025	2.64368	0.11068
6	-0.72536	2.99461	0.11082
7	-0.74644	3.44160	0.11953
8	-0.33787	3.88841	0.12825
9	-0.71690	4.06809	0.13220
10	-0.60315	3.28286	0.07921
11	-0.33648	2.20898	0.04589
12	-0.17076	1.74161	0.02431
13	-0.21352	0.29553	0.00014
14	0.31151	-0.83459	-0.02755
15	0.55687	-2.31149	-0.08018
16	0.75500	-3.57587	-0.12927
17	1.06888	-5.00994	-0.03265

Tabla A.6: Desplazamientos de CG por piso de modo 6 de edificio Antígona en mediciones.

Piso	ΔX^6 [m]	ΔY^6 [m]	θZ^6 [rad]
1	0.73352	0.09348	0.02455
2	1.57394	0.32737	0.03504
3	2.18682	-0.13232	-0.03488
4	3.06950	0.47398	0.08013
5	3.02843	0.43396	0.10140
6	2.63608	0.52387	0.10764
7	3.57757	-0.19226	0.03961
8	3.90877	0.43752	0.15506
9	2.78361	0.23162	0.13541
10	2.70056	0.43523	0.13376
11	1.00100	0.26377	0.10406
12	1.18203	0.42847	-0.00105
13	-0.18643	0.10563	-0.04022
14	-1.14867	-0.06941	-0.02497
15	-2.66612	-0.45191	-0.10409
16	-3.67740	-0.45566	-0.14196
17	-4.92588	-0.92045	-0.12415

Tabla A.7: Desplazamientos de CG por piso de modo 1 de edificio Antígona en mediciones con ajustes.

Piso	ΔX^1 [m]	ΔY^1 [m]	θZ^1 [rad]
1	-0.54944	-0.22768	-0.03644
2	-0.05418	-0.06655	-0.02614
3	0.27343	0.05638	-0.02417
4	0.45997	0.14660	-0.02938
5	0.53199	0.20960	-0.04066
6	0.51608	0.25088	-0.05689
7	0.43881	0.27592	-0.07695
8	0.32673	0.29021	-0.09970
9	0.20643	0.29925	-0.12403
10	0.10447	0.30852	-0.14882
11	0.04742	0.32352	-0.17294
12	0.06185	0.34972	-0.19527
13	0.17434	0.39263	-0.21468
14	0.41144	0.45773	-0.23006
15	0.79974	0.55052	-0.24027
16	1.36581	0.67648	-0.24421
17	2.13620	0.84110	-0.24073

Tabla A.8: Desplazamientos de CG por piso de modo 2 de edificio Antígona en mediciones con ajustes.

Piso	ΔX^2 [m]	ΔY^2 [m]	θZ^2 [rad]
1	-0.19929	0.21465	-0.00281
2	-0.18444	0.38612	-0.00339
3	-0.16963	0.60953	-0.00229
4	-0.15558	0.87932	0.00022
5	-0.14300	1.18988	0.00389
6	-0.13260	1.53563	0.00844
7	-0.12511	1.91099	0.01362
8	-0.12123	2.31037	0.01916
9	-0.12169	2.72818	0.02480
10	-0.12719	3.15883	0.03027
11	-0.13846	3.59674	0.03531
12	-0.15621	4.03632	0.03966
13	-0.18116	4.47198	0.04305
14	-0.21401	4.89813	0.04521
15	-0.25549	5.30920	0.04589
16	-0.30631	5.69958	0.04483
17	-0.36720	6.06370	0.04175

Tabla A.9: Desplazamientos de CG por piso de modo 3 de edificio Antígona en mediciones con ajustes.

Piso	ΔX^3 [m]	ΔY^3 [m]	θZ^3 [rad]
1	0.05892	0.03818	0.00059
2	0.25273	0.06321	0.00354
3	0.47028	0.08150	0.00906
4	0.70742	0.09467	0.01680
5	0.96000	0.10433	0.02639
6	1.22385	0.11210	0.03751
7	1.49483	0.11957	0.04978
8	1.76879	0.12836	0.06286
9	2.04156	0.14009	0.07641
10	2.30900	0.15636	0.09006
11	2.56694	0.17878	0.10347
12	2.81125	0.20897	0.11628
13	3.03775	0.24853	0.12815
14	3.24230	0.29909	0.13872
15	3.42075	0.36224	0.14765
16	3.56893	0.43960	0.15457
17	3.68270	0.53277	0.15915

Tabla A.10: Desplazamientos de CG por piso de modo 4 de edificio Antígona en mediciones con ajustes.

Piso	ΔX^4 [m]	ΔY^4 [m]	θZ^4 [rad]
1	-0.15302	-0.13880	0.00752
2	-0.27349	-0.53265	0.07467
3	-0.35789	-0.87484	0.12873
4	-0.40951	-1.15984	0.16993
5	-0.43165	-1.38214	0.19853
6	-0.42759	-1.53621	0.21478
7	-0.40063	-1.61655	0.21892
8	-0.35407	-1.61762	0.21121
9	-0.29119	-1.53392	0.19189
10	-0.21529	-1.35992	0.16121
11	-0.12966	-1.09011	0.11941
12	-0.03760	-0.71896	0.06676
13	0.05760	-0.24097	0.00349
14	0.15265	0.34939	-0.07014
15	0.24425	1.05764	-0.15389
16	0.32912	1.88930	-0.24751
17	0.40395	2.84988	-0.35074

Tabla A.11: Desplazamientos de CG por piso de modo 5 de edificio Antígona en mediciones con ajustes.

Piso	ΔX^5 [m]	ΔY^5 [m]	θZ^5 [rad]
1	-0.28829	0.40863	0.01792
2	-0.39852	1.15871	0.05197
3	-0.49282	1.83500	0.07900
4	-0.56880	2.42011	0.09917
5	-0.62410	2.89664	0.11267
6	-0.65631	3.24720	0.11967
7	-0.66307	3.45438	0.12034
8	-0.64198	3.50079	0.11488
9	-0.59067	3.36903	0.10344
10	-0.50676	3.04169	0.08620
11	-0.38786	2.50140	0.06335
12	-0.23159	1.73073	0.03506
13	-0.03557	0.71230	0.00151
14	0.20258	-0.57129	-0.03714
15	0.48525	-2.13744	-0.08070
16	0.81482	-4.00355	-0.12899
17	1.19366	-6.18701	-0.18184

Tabla A.12: Desplazamientos de CG por piso de modo 6 de edificio Antígona en mediciones con ajustes.

Piso	ΔX^6 [m]	ΔY^6 [m]	θZ^6 [rad]
1	0.66588	0.15588	-0.00237
2	1.57181	0.16862	0.02224
3	2.29057	0.19533	0.04533
4	2.82553	0.23087	0.06609
5	3.18008	0.27005	0.08370
6	3.35760	0.30772	0.09732
7	3.36148	0.33872	0.10614
8	3.19509	0.35788	0.10932
9	2.86182	0.36004	0.10606
10	2.36505	0.34004	0.09551
11	1.70816	0.29270	0.07686
12	0.89454	0.21287	0.04929
13	-0.07244	0.09539	0.01196
14	-1.18939	-0.06492	-0.03594
15	-2.45293	-0.27321	-0.09524
16	-3.85967	-0.53465	-0.16677
17	-5.40624	-0.85440	-0.25134

ANEXO B

Desplazamientos de centros geométricos en modelos simplificados

En este anexo se adjuntan las tablas con los desplazamientos de los centros geométricos para cada modo del edificio Antígona en modelos simplificados. Estos desplazamientos se muestran por modo para los 17 pisos medidos y consideran tres grados de libertad, el desplazamiento en X, en Y y el giro en torno a Z. Las primeras 6 tablas muestran los desplazamientos del modelo simplificado de edificio de corte que incluye flexión según los Resultados de Modelos Simplificados(ver sección 6.4), mientras que las siguientes 6 tablas muestran los desplazamientos del modelo calibrado según los Resultados de Calibración de Modelo Simplificado (ver sección 7.2). El centro geométrico (CG) se define como el centro del rectángulo de 32[m] por 21[m] dibujados en los diagramas de las formas modales, mientras que para los resultados del modelo provenientes de ETABS el centro geométrico se ubica en (14985[mm],15735[mm]) de acuerdo con el sistema de referencias de este.

Tabla B.1: Desplazamientos de CG por piso de modo 1 de edificio Antígona en modelo simplificado.

Piso	ΔX^1 [m]	ΔY^1 [m]	θZ^1 [rad]
1	0.01632	0.03967	-0.00189
2	0.06420	0.10444	-0.00539
3	0.13419	0.19984	-0.01546
4	0.21611	0.31105	-0.02759
5	0.30765	0.43549	-0.04140
6	0.43551	0.57496	-0.05700
7	0.54486	0.71760	-0.07355
8	0.66838	0.87390	-0.09095
9	0.79651	1.03845	-0.10884
10	0.92613	1.20784	-0.12690
11	1.05580	1.38037	-0.14480
12	1.18295	1.55333	-0.16219
13	1.30549	1.72460	-0.17874
14	1.42041	1.89158	-0.19390
15	1.52389	2.05130	-0.20700
16	1.57568	2.16359	-0.21553
17	1.09802	1.76203	-0.21559

Tabla B.2: Desplazamientos de CG por piso de modo 2 de edificio Antígona en modelo simplificado.

Piso	ΔX^2 [m]	ΔY^2 [m]	θZ^2 [rad]
1	0.05133	-0.14326	-0.00317
2	0.12217	-0.25357	-0.00631
3	0.20307	-0.39068	-0.01335
4	0.29542	-0.54576	-0.02184
5	0.39720	-0.71721	-0.03151
6	0.53881	-0.89695	-0.04426
7	0.65985	-1.10482	-0.05611
8	0.79607	-1.32700	-0.06897
9	0.93713	-1.56304	-0.08216
10	1.08014	-1.81113	-0.09541
11	1.22352	-2.06847	-0.10849
12	1.36488	-2.33329	-0.12111
13	1.50225	-2.60376	-0.13302
14	1.63311	-2.87884	-0.14385
15	1.75446	-3.15816	-0.15308
16	1.84316	-3.46583	-0.16031
17	1.53198	-4.13681	-0.16152

Tabla B.3: Desplazamientos de CG por piso de modo 3 de edificio Antígona en modelo simplificado.

Piso	ΔX^3 [m]	ΔY^3 [m]	θZ^3 [rad]
1	-0.23427	-0.05690	-0.01159
2	-0.36198	-0.06047	-0.01279
3	-0.49838	-0.06971	-0.02465
4	-0.64230	-0.07764	-0.03902
5	-0.79377	-0.08540	-0.05546
6	-0.95493	-0.10574	-0.06884
7	-1.13903	-0.13012	-0.08628
8	-1.33064	-0.15712	-0.10372
9	-1.53082	-0.18765	-0.12147
10	-1.73987	-0.22317	-0.13912
11	-1.95641	-0.26338	-0.15628
12	-2.18037	-0.30912	-0.17253
13	-2.41128	-0.36074	-0.18750
14	-2.64958	-0.41909	-0.20067
15	-2.89636	-0.48534	-0.21143
16	-3.17725	-0.59055	-0.21987
17	-3.97652	-1.19862	-0.21814

Tabla B.4: Desplazamientos de CG por piso de modo 4 de edificio Antígona en modelo simplificado.

Piso	ΔX^4 [m]	ΔY^4 [m]	θZ^4 [rad]
1	0.03551	0.02416	-0.00719
2	0.15760	0.10794	-0.01843
3	0.32946	0.24387	-0.04916
4	0.51872	0.39266	-0.08395
5	0.70645	0.53918	-0.11923
6	0.93795	0.68081	-0.15221
7	1.05705	0.76103	-0.17651
8	1.12446	0.80267	-0.18892
9	1.10344	0.78268	-0.18564
10	0.97696	0.68951	-0.16380
11	0.73830	0.51966	-0.12180
12	0.38943	0.27500	-0.05985
13	-0.05578	-0.03448	0.01983
14	-0.56553	-0.38733	0.11164
15	-1.08618	-0.74835	0.20587
16	-1.42275	-0.93512	0.27708
17	-0.79028	-0.32025	0.27843

Tabla B.5: Desplazamientos de CG por piso de modo 5 de edificio Antígona en modelo simplificado.

Piso	ΔX^5 [m]	ΔY^5 [m]	θZ^5 [rad]
1	0.03777	0.03635	-0.01287
2	0.22626	0.16779	-0.03098
3	0.48360	0.37212	-0.07937
4	0.73386	0.56992	-0.12758
5	0.91770	0.71578	-0.16382
6	1.01727	0.78696	-0.17643
7	0.88006	0.68866	-0.15560
8	0.55916	0.47591	-0.09953
9	0.08311	0.15793	-0.01481
10	-0.45958	-0.20765	0.08254
11	-0.93492	-0.53380	0.16813
12	-1.18453	-0.71817	0.21277
13	-1.06359	-0.66774	0.18923
14	-0.49270	-0.33191	0.08192
15	0.46943	0.25183	-0.09933
16	1.31375	0.63138	-0.27917
17	0.66337	-0.05719	-0.28306

Tabla B.6: Desplazamientos de CG por piso de modo 6 de edificio Antígona en modelo simplificado.

Piso	ΔX^6 [m]	ΔY^6 [m]	θZ^6 [rad]
1	0.58204	-1.95105	-0.03339
2	0.94766	-2.63700	-0.04606
3	1.17673	-3.40216	-0.06080
4	1.38413	-4.07691	-0.07723
5	1.55325	-4.61175	-0.09362
6	1.80539	-4.92254	-0.12552
7	1.81807	-5.07889	-0.13273
8	1.73030	-4.93671	-0.12994
9	1.50462	-4.49421	-0.11250
10	1.14827	-3.76006	-0.08114
11	0.69224	-2.74872	-0.04006
12	0.18724	-1.48118	0.00314
13	-0.30524	0.01365	0.03921
14	-0.72856	1.69386	0.05983
15	-1.05940	3.49231	0.06292
16	-1.46199	5.24545	0.08574
17	-1.56940	7.21701	0.11288

Tabla B.7: Desplazamientos de CG por piso de modo 1 de edificio Antígona en modelo calibrado.

Piso	ΔX^1 [m]	ΔY^1 [m]	θZ^1 [rad]
1	0.05544	0.04075	-0.00271
2	0.16170	0.11917	-0.00666
3	0.19092	0.10346	-0.03918
4	0.29555	0.15784	-0.07814
5	0.40922	0.21752	-0.12196
6	0.56306	0.27396	-0.15514
7	0.67660	0.32578	-0.18861
8	0.47808	0.12066	-0.19666
9	0.54471	0.18772	-0.20467
10	0.61201	0.26131	-0.21250
11	0.68040	0.34080	-0.22004
12	0.74861	0.42393	-0.22719
13	0.81629	0.50943	-0.23383
14	0.88309	0.59633	-0.23980
15	0.94868	0.68391	-0.24488
16	0.98049	0.73885	-0.24823
17	2.00559	1.76750	-0.25345

Tabla B.8: Desplazamientos de CG por piso de modo 2 de edificio Antígona en modelo calibrado.

Piso	ΔX^2 [m]	ΔY^2 [m]	θZ^2 [rad]
1	0.04230	-0.13912	-0.00232
2	0.09921	-0.26655	-0.00420
3	0.09981	-0.49415	-0.01438
4	0.14481	-0.70865	-0.02666
5	0.19345	-0.94703	-0.04060
6	0.26124	-1.19071	-0.05306
7	0.31352	-1.44751	-0.06474
8	0.25851	-1.87953	-0.06795
9	0.29476	-2.26404	-0.07114
10	0.33141	-2.68231	-0.07425
11	0.36854	-3.12516	-0.07724
12	0.40563	-3.58464	-0.08006
13	0.44247	-4.05323	-0.08267
14	0.47891	-4.52429	-0.08500
15	0.51475	-4.99219	-0.08696
16	0.53837	-5.46552	-0.08878
17	0.89721	-5.53790	-0.08395

Tabla B.9: Desplazamientos de CG por piso de modo 3 de edificio Antígona en modelo calibrado.

Piso	ΔX^3 [m]	ΔY^3 [m]	θZ^3 [rad]
1	-0.23511	0.03710	-0.00726
2	-0.44941	0.06834	-0.00914
3	-0.74822	-0.02269	-0.03569
4	-0.96906	-0.02811	-0.06741
5	-1.19925	-0.03534	-0.10260
6	-1.45203	-0.04499	-0.12055
7	-1.74551	-0.06416	-0.14071
8	-2.26148	-0.29081	-0.14432
9	-2.58808	-0.32490	-0.14761
10	-2.92023	-0.36239	-0.15052
11	-3.25536	-0.40170	-0.15306
12	-3.59228	-0.44256	-0.15520
13	-3.92930	-0.48413	-0.15695
14	-4.26490	-0.52565	-0.15834
15	-4.59775	-0.56649	-0.15938
16	-4.94674	-0.62747	-0.16051
17	-4.59659	-0.07742	-0.17520

Tabla B.10: Desplazamientos de CG por piso de modo 4 de edificio Antígona en modelo calibrado.

Piso	ΔX^4 [m]	ΔY^4 [m]	θZ^4 [rad]
1	-0.09442	-0.27122	0.00333
2	-0.28858	-0.51094	0.01218
3	-0.32324	-0.56414	0.08388
4	-0.46953	-0.72877	0.15388
5	-0.57730	-0.87496	0.19995
6	-0.62912	-0.98831	0.19941
7	-0.56369	-1.04877	0.14924
8	-0.37161	-0.92222	0.12525
9	-0.37610	-0.91869	0.09201
10	-0.36904	-0.83045	0.04974
11	-0.35202	-0.66421	-0.00080
12	-0.32700	-0.43083	-0.05816
13	-0.29704	-0.14523	-0.12026
14	-0.26613	0.17645	-0.18370
15	-0.23909	0.51883	-0.24366
16	-0.27862	0.80285	-0.28712
17	1.12393	2.05133	-0.39967

Tabla B.11: Desplazamientos de CG por piso de modo 5 de edificio Antígona en modelo calibrado.

Piso	ΔX^5 [m]	ΔY^5 [m]	θZ^5 [rad]
1	0.23028	-0.54541	-0.01161
2	0.46250	-0.75502	-0.02115
3	0.37768	-1.30375	-0.07320
4	0.48560	-1.64842	-0.12391
5	0.55826	-1.97482	-0.15590
6	0.60425	-2.21790	-0.16172
7	0.56759	-2.45960	-0.14022
8	0.36632	-2.92178	-0.13189
9	0.34353	-2.92587	-0.11381
10	0.30351	-2.65275	-0.08550
11	0.24821	-2.10898	-0.04711
12	0.17999	-1.32320	0.00033
13	0.10277	-0.34204	0.05495
14	0.02173	0.77272	0.11338
15	-0.05682	1.94941	0.17045
16	-0.07842	3.18206	0.21771
17	-0.98284	3.35895	0.23176

Tabla B.12: Desplazamientos de CG por piso de modo 6 de edificio Antígona en modelo calibrado.

Piso	ΔX^6 [m]	ΔY^6 [m]	θZ^6 [rad]
1	-1.39110	0.37306	-0.05400
2	-1.88135	0.57893	-0.06173
3	-2.49944	-0.01277	-0.24010
4	-2.50528	-0.04317	-0.38440
5	-2.60463	-0.11753	-0.40324
6	-3.03731	-0.14792	-0.25924
7	-3.43312	-0.30692	0.00910
8	-3.15116	-0.39526	0.08139
9	-2.74508	-0.45676	0.14149
10	-2.20277	-0.46734	0.18030
11	-1.53260	-0.42491	0.18991
12	-0.74868	-0.33406	0.16481
13	0.12644	-0.20671	0.10320
14	1.06224	-0.05721	0.00918
15	2.02039	0.10368	-0.10484
16	2.88269	0.18543	-0.19992
17	4.71170	1.05320	-0.29678