



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

DISEÑO DE LA INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS ALTOS EN EL NORTE DE CHILE

CARLOS IGNACIO POBLETE PALACIOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUÍA:
SR. RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SR. RENÉ LAGOS CONTRERAS
SR. TOMÁS GUENDELMAN BEDRACK

SANTIAGO DE CHILE
MAYO 2013

RESUMEN DE LA MEMORIA
POR: CARLOS POBLETE PALACIOS
FECHA: 22 DE MAYO DE 2013
PROF. GUÍA: SR. RUBÉN BOROSCHEK K.

DISEÑO DE LA INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS ALTOS EN EL NORTE DE CHILE

Al ser Chile un país sísmico es de suma importancia conocer la física de los terremotos y más aún como afectan a las estructuras. La instrumentación sísmica de una estructura permite obtener información de las aceleraciones, velocidades, desplazamientos y de las propiedades dinámicas. Tener edificios instrumentados en el Norte de Chile permitirá medir las aceleraciones en estructuras ubicadas cerca del epicentro.

Los objetivos de este trabajo fueron diseñar la instrumentación sísmica de edificios altos en la zona norte del país y mejorar el actual sistema de instrumentación del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción.

Las estructuras a instrumentar y sus modelos computacionales fueron proporcionadas por empresas calculistas. Se escogieron tres edificios en la ciudad de Iquique los cuales se estudiaron detalladamente y se analizaron sus propiedades dinámicas teóricas. Luego de tener un conocimiento acabado de cada estructura se estableció la localización y disposición de los equipos de medición y procesamiento, además se establecieron los sistemas y modelos para procesar los datos y para transmitir la información. Se realizó una visita a las tres estructuras donde se tomaron registros de vibraciones ambientales en dos pisos de cada una. Las mediciones permitieron observar de manera adecuada la respuesta de la estructura y determinar en primera instancia, mediante métodos de identificación, las frecuencias, amortiguamientos y formas modales de los edificios, se valida entonces los parámetros del sistema de instrumentación diseñado. Se observaron similitudes en las formas modales medidas con las teóricas y mayores valores en las frecuencias identificadas.

Se realizó el mejoramiento de la instrumentación del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción, con los sensores EpiSensor ES-U2 actuales se agregaron dos sistemas de adquisición, unos para sismos y otro la vibraciones ambientales, que permitirán monitorear de manera continua los parámetros dinámicos de esta estructura.

*“La posibilidad de realizar un sueño
es lo que hace que la vida sea interesante”
Paulo Coelho*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de título es la conclusión de un ciclo de mi vida y de una parte de un gran proceso de aprendizaje que no termina jamás.

Me genera gran orgullo haber estudiado en esta Universidad y me voy con los mejores recuerdos de un gran periodo en mi vida.

A los que colaboraron en este trabajo: mi profesor guía Don Rubén Boroschek por su siempre disposición a enseñar, a mi amigo y compañero Antonio Aguilar por haber sido profesor guía “encubierto”, a Don Pedro Soto por su constante ayuda, a mi amigo Ariel Hernández por su apoyo informático y a mi camarada Ignacio Núñez por su constante apoyo.

A los que fueron parte de este ciclo, mis amigos: Cristóbal, Héctor, Sebastián, Javier, Carlos, Raúl, Jorge, Fernanda, Daniela. . . Como les dije alguna vez son ustedes lo que trasciende de toda esta experiencia.

Finalmente a los que hicieron todo esto posible, mis padres, hermanos y familia, con su apoyo y convicción he logrado cumplir este sueño.

A todos ustedes muchas Gracias.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivos Generales:	4
1.2.2. Objetivos Específicos:	4
1.3. Metodología	4
1.4. Alcances	5
1.5. Antecedentes	6
1.5.1. Instrumentación Sísmica	6
1.5.2. Identificación Estructural	6
1.5.3. Edificios instrumentados y operativos	7
1.5.3.1. Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción	7
1.5.3.2. Torre Central Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Univer- sidad de Chile, Yañéz (2009):	8
2. MEJORAMIENTO INSTRUMENTACIÓN EDIFICIO CCHC	9
2.1. Instrumentación Previa	9
2.2. Descripción de los equipos	11
2.3. Prueba de equipos	12
2.4. Instalación	13

2.5. Sistema de registro	15
3. ESTUDIO DE LAS ESTRUCTURAS	16
3.1. Condominio Mar Egeo Edificio Rodas	17
3.1.1. Materiales	21
3.1.2. Capacidad de soporte del suelo	21
3.1.3. Análisis Sísmico	21
3.1.4. Formas Modales	22
3.2. Edificio Velamar	28
3.2.1. Materiales	32
3.2.2. Capacidad de soporte del suelo	32
3.2.3. Análisis sísmico	32
3.2.4. Formas Modales Edificio Velamar Torre 1	33
3.3. Edificio Diego Portales	39
3.3.1. Materiales	41
3.3.2. Capacidad de soporte del suelo	41
3.3.3. Análisis sísmico	42
3.3.4. Formas Modales Edificio Diego Portales Torre B	43
4. MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES	49
4.1. Edificio Rodas	51
4.2. Edificio Velamar	57
4.3. Edificio Portales	63
5. DISEÑO DE LA INSTRUMENTACIÓN	70
5.1. Sistemas de medición	71
5.1.1. Tratamiento de la señal	72
5.1.2. Vibraciones ambientales	72

5.1.3.	Sismos	72
5.1.4.	Adquisición	72
5.1.5.	Procesamiento y transmisión	73
5.2.	Localización de los equipos	74
5.2.1.	Edificio Rodas	74
5.2.2.	Edificio Velamar Torre 1	84
5.2.3.	Edificio Diego Portales Torre B	93
5.3.	Canales utilizados	97
5.4.	Cubicación y costos	98
5.5.	Recomendaciones de Instrumentación	103
6.	CONCLUSIONES	104
7.	REFERENCIAS	106

Índice de figuras

1.1. Sismicidad Iquique	3
2.1. Localización de sensores CChC	10
2.2. Equipos pre-existentes shaft piso -2 CChC	11
2.3. Esquema sistema de instrumentación CChC	12
2.4. Gabinete de equipos	13
2.5. Ventiladores y monitoreo de la temperatura	13
2.6. Regletas conexión de cables	14
2.7. Instalación de cables	14
2.8. Gabinete nuevo shaft piso -2	15
3.1. Condominio Mar Egeo Rodas - Vista Sur	18
3.2. Edificio Rodas Vista Oeste	19
3.3. Vista Isométrica del Modelo Rodas	23
3.4. Forma Modal 1 – Edificio Rodas	23
3.5. Forma Modal 2 – Edificio Rodas	24
3.6. Forma Modal 3 – Edificio Rodas	24
3.7. Forma Modal 4 – Edificio Rodas	25
3.8. Forma Modal 5 – Edificio Rodas	25
3.9. Forma Modal 6 – Edificio Rodas	26

3.10. Forma Modal 7 – Edificio Rodas	26
3.11. Forma Modal 8 – Edificio Rodas	27
3.12. Forma Modal 9 – Edificio Rodas	27
3.13. Proyecto Velamar	28
3.14. Edificio Velamar Vista SO	29
3.15. Edificio Velamar Vista NO	30
3.16. Vista Isométrica del Modelo Velamar Torre 1	34
3.17. Forma Modal 1 – Edificio Velamar Torre1	34
3.18. Forma Modal 2 – Edificio Velamar Torre1	35
3.19. Forma Modal 3 – Edificio Velamar Torre1	35
3.20. Forma Modal 4 – Edificio Velamar Torre1	36
3.21. Forma Modal 5 – Edificio Velamar Torre1	36
3.22. Forma Modal 6 – Edificio Velamar Torre1	37
3.23. Forma Modal 7 – Edificio Velamar Torre1	37
3.24. Forma Modal 8 – Edificio Velamar Torre1	38
3.25. Forma Modal 9 – Edificio Velamar Torre1	38
3.26. Edificio Portales Torre A	39
3.27. Edificio Portales Torre B	40
3.28. Vista Isométrica del Modelo Portales Torre B	43
3.29. Forma Modal 1 – Edificio Portales TorreB	44
3.30. Forma Modal 2 – Edificio Portales TorreB	44
3.31. Forma Modal 3 – Edificio Portales TorreB	45
3.32. Forma Modal 4 – Edificio Portales TorreB	45
3.33. Forma Modal 5 – Edificio Portales TorreB	46
3.34. Forma Modal 6 – Edificio Portales TorreB	46
3.35. Forma Modal 7 – Edificio Portales TorreB	47

3.36. Forma Modal 8 – Edificio Portales TorreB	47
3.37. Forma Modal 9 – Edificio Portales TorreB	48
4.1. Esquema sistema de medición de vibraciones ambientales	49
4.2. Configuración registros de vibraciones ambientales piso 26 Rodas	51
4.3. Registro MED1 - tres canales - piso 26 - Rodas	52
4.4. Registro MED2 - tres canales - piso 26 - Rodas	52
4.5. Registro MED3 - tres canales - piso 26 - Rodas	53
4.6. Diagrama de estabilización MED1	54
4.7. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED1	54
4.8. Diagrama de estabilización MED2	55
4.9. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED2	55
4.10. Diagrama de estabilización MED3	56
4.11. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED3	56
4.12. Configuración registros de vibraciones ambientales piso 27 y 14 Velamar	58
4.13. Registro MED6 - tres canales - piso 27 - Velamar	58
4.14. Registro MED7 - tres canales - piso 27 - Velamar	59
4.15. Registro MED8 - tres canales - piso 14 - Velamar	59
4.16. Diagrama de estabilización MED6	60
4.17. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED6	60
4.18. Diagrama de estabilización MED7	61
4.19. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED7	61
4.20. Diagrama de estabilización MED8	62
4.21. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED8	62
4.22. Configuración registros de vibraciones ambientales piso 18 y 10 Portales	64
4.23. Registro MED9 - tres canales - piso 18 - Portales	64
4.24. Registro MED10 - tres canales - piso 18 - Portales	65

4.25. Registro MED11 - tres canales - piso 10 - Portales	65
4.26. Diagrama de estabilización MED9	66
4.27. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED9	66
4.28. Diagrama de estabilización MED10	67
4.29. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED10	67
4.30. Diagrama de estabilización MED11	68
4.31. Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED11	68
5.1. EpiSensor ES-U2 Kinematics. <i>Imagen obtenida de “User Guide Model FBA ES-U2”</i> . . .	71
5.2. Esquema Adquisición de datos para 8 sensores	73
5.3. Ubicación Edificios Iquique. <i>Imagen obtenida de Google Earth.</i>	74
5.4. Elevación Principal Edificio Rodas	76
5.5. Planta Piso -1 Edificio Rodas – Sala de medidores eléctricos	77
5.6. Disposición de sensores piso (-1) - Sala de medidores eléctricos	78
5.7. Disposición de sensores planta Piso 11 Edificio Rodas	78
5.8. Disposición de sensores planta Piso 25 Edificio Rodas	79
5.9. Sala Red Seca	79
5.10. Ubicación sensor N-S-2 pisos 11 y 25	80
5.11. Cornisa cañerías de agua - Cielo pisos 11 y 25	80
5.12. Ubicación sensores sala electrica pisos 11 y 25	81
5.13. Sala Eléctrica piso 11 – Sala Eléctrica	81
5.14. Medidores piso 11 – Punto de corriente	82
5.15. Sistema de instrumentación general Edificio Rodas	83
5.16. Elevación Principal Edificio Velamar	85
5.17. Planta Piso -3 Ubicación de sensores	86
5.18. Planta Piso 13 Ubicación de sensores	86
5.19. Ubicación de sensores Planta Piso 26	87

5.20. Planta piso 29 Edificio Velamar	88
5.21. Interior Sala Medidores de Agua	89
5.22. Cornisa transporte de cañerías	89
5.23. Cañerías sin cornisa a lo largo del pasillo	90
5.24. Shaft eléctrico sin puertas vista	90
5.25. Sistema de instrumentación general Edificio Velamar	91
5.26. Vista Isométrica Edificio portales Torre B	93
5.27. Pasillo Subterráneo canal de cables	94
5.28. Planta Subterráneo Edificio Portales Torre B – Shaft Eléctricos	94
5.29. Planta Piso 8 Edificio Portales Torre B – Shaft Eléctricos	95
5.30. Disposición de sensores Piso 18 Portales	95
5.31. Shaft Eléctrico Sur Subterráneo – Ubicación caja de registro Portales	95
5.32. Shaft Eléctrico Sur y Norte Piso Tipo Portales – Lugar instalación de sensores	96
5.33. Red General de Instrumentación Portales	96
5.34. Esquema Sistema de Instrumentación	100

Índice de tablas

3.1. Pesos por piso Edificio Rodas	20
3.2. Análisis Sísmico Edificio Rodas	22
3.3. Peso por piso Velamar Torre 1	31
3.4. Análisis Sísmico Edificio Velamar	33
3.5. Peso por piso Portales Torre B	41
3.6. Análisis Sísmico Edificio Portales Torre B	42
4.1. Criterios de convergencia identificación mediante SSI	50
5.1. Número de sensores y su orientación Edificio Rodas	82
5.2. Número de sensores y su orientación Edificio Velamar	92
5.3. Número de sensores y su orientación Edificio Portales	97
5.4. Identificación de canales y rutas	98
5.5. Cubicación Cables	99
5.6. Diseño de longitudes de cables por rieles de 300 [m]	99
5.7. Cubicación y Costos 1	101
5.8. Cubicación y Costos 2	102

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Chile se encuentra en la zona de subducción de la placa de Nazca y la Sudamericana. Es en esta zona donde se producen los mayores terremotos del planeta, haciendo de Chile un país sísmico por excelencia. Es tal su relevancia en esta materia que se estudian las características de sus terremotos (Chilean Type Earthquake) para asociarlas a los sismos ocurridos en otros países. Es de suma importancia entonces conocer la física de estos eventos y la manera en como afectan las estructuras.

Durante los últimos años se ha desarrollado el concepto de “Monitoreo de Salud Estructural” (en adelante SHM), el cual se refiere a la generación de un diagnóstico del estado y de las características de la respuesta de una estructura ante eventos extremos (sismos, explosiones, etc.) o de uso (condiciones ambientales). La idea es determinar de manera empírica el estado y las propiedades dinámicas asociadas a la “salud” de una edificación, tales como: periodos de vibrar, amortiguamiento natural, formas modales y variables de su respuesta. Estos parámetros son determinados mediante la aplicación de procedimientos de identificación – por ejemplo Espectro de Densidad de Potencia (PSD) y Método de Sub-espacio Estocástico (SSI) – los cuales requieren registros de vibraciones medidas en terreno.

La instrumentación sísmica de una estructura permite captar información de las aceleraciones, velocidades y desplazamientos en un amplio rango, desde micro-vibraciones hasta movimientos sísmicos de gran magnitud según la calibración del instrumento. La capacidad de los sistemas de adquisición y de los computadores actuales permiten captar, procesar y almacenar la gran cantidad de datos entregados por los sensores, y así conocer las características de una estructura en muy

poco tiempo y de manera remota por Internet.

En general el objetivo de una instrumentación es mejorar el entendimiento del comportamiento de una estructura y el potencial daño que puede sufrir ante cargas dinámicas generadas por un sismo.

Una buena instrumentación puede proveer información para reconstruir la respuesta del edificio de forma detallada y así chequear la correlación del modelo dinámico con el comportamiento real. Permite estudiar la importancia del comportamiento no-lineal en la respuesta del edificio y como se relaciona con el daño sufrido por este. Se puede determinar además si los parámetros sísmicos del suelo afectan la respuesta del edificio. De esta manera será posible evaluar la efectividad de la norma sísmica y proponerle futuros cambios basados en datos reales.

Tener edificios instrumentados en caso de terremotos servirá para determinar la cantidad y posible ubicación de los daños, y así saber con precisión cuales de sus partes reforzar si es necesario, siendo esto de gran importancia para los propietarios del edificio. En general aumentar la experiencia del país en instrumentación sísmica logrará desarrollar nuevas y mejores técnicas en el diseño y en los métodos constructivos utilizados.

En respuesta a lo anterior el presente trabajo planea el diseño de la instrumentación de 3 edificios altos en el norte de Chile (región I). Dicha zona no posee edificios con SHM y la idea es generar una red con acceso remoto para determinar en el menor tiempo posible la respuesta de las estructuras ante eventos sísmicos severos. Se agrega además el hecho que se espera un terremoto de gran magnitud en los próximos años en esa región del país. De ser así se podrán medir por primera vez aceleraciones reales de un sismo en estructuras ubicadas prácticamente en el epicentro.

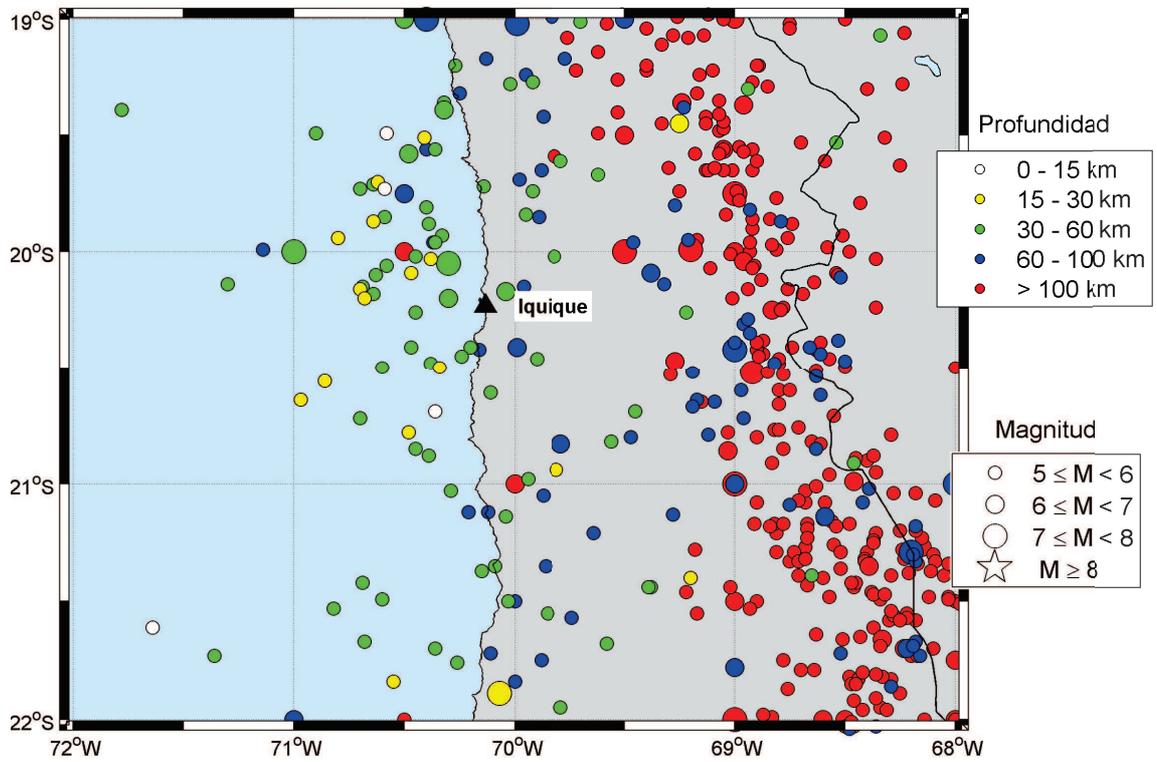


Figura 1.1: Sismicidad Iquique

La figura 1.1 muestra la sismicidad historica de la primera región . Iquique es una zona con un gran número de sismos sin embargo carecen de un evento superior a $M_w=8.0$ al menos desde el año 1878.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales:

- Diseñar la instrumentación sísmica de tres edificios altos en la zona norte del país.
- Mejorar la instrumentación actual del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción (CChC)

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Diseñar la instrumentación sísmica acorde a las propiedades dinámicas teóricas del edificio, proporcionadas por las empresas calculistas. El diseño deberá incluir acceso remoto a la información obtenida y almacenada en terreno.
- Visitar los edificios elegidos en el norte del país y medir vibraciones ambientales de manera de tener un precedente para el posterior diseño.
- Implementar dos sistemas de adquisición independientes, uno para microvibraciones y otro para sismos, dándole robustez al sistema actual de la CChC.

1.3. Metodología

- Revisión Bibliográfica: Recopilación de información y estudio de bibliografía sobre: instrumentaciones anteriores, manuales de instrumentación y estudios sobre la identificación de propiedades dinámicas en estructuras.
- Implementación CChC: Se diseñará e implementará un mejoramiento al sistema de adquisición actual del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción.
- Búsqueda y elección de edificios a instrumentar: Se enviará una carta petitoria a nombre del Departamento de Ingeniería Civil a empresas calculistas, solicitando estructuras para ser instrumentadas y sus modelos computacionales.
- Estudio de las estructuras elegidas: Se estudiarán detalladamente los edificios escogidos, se analizarán sus modelos y se darán a conocer sus propiedades dinámicas teóricas. Una vez analizados los edificios se escogerán los que serán instrumentados de acuerdo a cuales podrán entregar mejores resultados y en cuales será más fácil llevar a cabo la instrumentación.
- Diseño de la instrumentación: Se determinará el lugar específico donde se instalarán los equipos en la estructura, el tipo de acelerómetros a utilizar y su calibración, la ubicación de los

cables y la localización del computador. Se establecerán los sistemas y modelos para procesar los datos y para transmitir la información.

- **Resumen y Conclusiones:** Se establecen conclusiones del trabajo y sugerencias para futuros estudios e instalaciones.

1.4. Alcances

Los alcances por capítulo son los siguientes:

- **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL.** En este capítulo se presenta el tema en forma general, sentando las bases del trabajo a realizar y su alcance. Además, se hacen algunas definiciones necesarias para la adecuada comprensión del mismo, estableciendo así el marco teórico del trabajo.
- **CAPÍTULO 2: MEJORAMIENTO INSTRUMENTACIÓN EDIFICIO CChC.** En este capítulo se diseña e instala un sistema de instrumentación complementario al existente que permitirá monitorear los parámetros dinámicos del edificio de manera remota.
- **CAPÍTULO 3: ESTUDIO DE LAS ESTRUCTURAS.** En este capítulo se describen los edificios a instrumentar considerando sus aspectos arquitectónicos y estructurales. Se presentan tablas con sus geometrías y planos estructurales. Se describen los supuestos para el análisis de los edificios: normas utilizadas, software, criterios de oficina de cálculo, etc. Se describen y se muestran los modelos computacionales y se caracterizan sus propiedades dinámicas teóricas (períodos y formas modales).
- **CAPÍTULO 4: MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES.** Se visitan las estructuras en la ciudad de Iquique. Se buscan posibles lugares para la instalación que tengan la aprobación de los propietarios. Se toman registros de mediciones ambientales de manera de probar los criterios de diseño del sistema de instrumentación.
- **CAPÍTULO 5: DISEÑO DE LA INSTRUMENTACIÓN.** En este capítulo se describe y se argumenta la localización de los instrumentos. Se describen también los equipos que se utilizarán para las mediciones: hardware y software. Se establecen los tiempos de medición y la forma en que se almacenan los datos. Se realiza un análisis de costos. La instalación de los equipos se escapa de los alcances de esta memoria.
- **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.** Se hace una recopilación de los resultados y de las conclusiones obtenidas en los capítulos anteriores.

1.5. Antecedentes

1.5.1. Instrumentación Sísmica

El objetivo principal de los programas de instrumentación es recoger información sobre el movimiento de campo libre y el comportamiento de obras civiles de la mejor forma posible.

Para instrumentar un edificio se deben ubicar sensores en distintos lugares de la estructura para que capten sus movimientos en forma adecuada. Los sensores se pueden clasificar según la información que capten, siendo los de aceleración los más utilizados por su confiabilidad y simplicidad.

En general un estudio de un edificio instrumentado contiene los siguientes aspectos establecidos por Villarroel (1998):

- Descripción estructural del edificio
- Descripción de la ubicación de los acelerómetros
- Descripción de las aceleraciones
- Procedimientos de identificación de las propiedades y la respuesta
- Comparación con conceptos básicos de comportamiento supuesto en el análisis y diseño de la estructura

El aumento de la capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos ha permitido durante los últimos años diseñar sistemas que registren continuamente aceleraciones por el uso cotidiano de una estructura y que además estén configurados con mecanismos de “trigger” para registrar movimientos sísmicos.

Mediante técnicas de identificación estructural es posible realizar un diagnóstico de la estructura determinando sus parámetros dinámicos, la adquisición constante permite analizar la variación de estos en el tiempo.

1.5.2. Identificación Estructural

En general la identificación de un sistema estructural es el proceso que intenta deducir el modelo de un sistema real desde su “output” y posiblemente desde sus “input”. Por modelo se entiende una representación matemática que permite una buena aproximación de la respuesta de la estructura. Los términos “input” y “output” son utilizados para describir la porción observada de la excitación y de la respuesta respectivamente.

La respuesta estructural de un edificio puede ser provocada por distintos medios, naturales o artificiales. La identificación estructural que se incluirá en el diseño de la instrumentación durante el presente trabajo tiene en consideración la respuesta de los edificios generada por vibraciones ambientales.

Las vibraciones ambientales son de muy baja amplitud, inducidas principalmente por el viento, micro-temblores y tráfico vehicular. Las técnicas que utilizan micro-vibraciones generalmente asumen que el sistema es lineal elástico, que la excitación es de tipo aleatorio estacionario con una densidad de potencia plana (ruido-blanco) y que la respuesta es ergódica.

La identificación estructural que se utilizará tiene como objetivo relacionar las características de la respuesta con parámetros fundamentales de los modelos dinámicos: períodos, amortiguamientos, formas modales, etc. Estos parámetros son válidos e invariantes en el tiempo en la medida que las estructuras sean lineales, dicho de otra manera, una variación de las propiedades físicas del edificio generará un comportamiento no-lineal el cual se traduce en un cambio de sus propiedades dinámicas.

Los métodos utilizados para la identificación serán: Espectro de densidad de potencia (PSD) y Sub-Espacio Estocástico (SSI). Dichos métodos están ampliamente validados y sus demostraciones se pueden ver en las memorias de Hernández (2009) y Valdés (2004) respectivamente.

Es importante tener en cuenta que las mediciones realizadas en un sistema están inevitablemente contaminadas por ruido.

1.5.3. Edificios instrumentados y operativos

1.5.3.1. Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción

Es un edificio de oficinas de 22 pisos y cuatros subterráneos destinados a estacionamientos y bodegas. El edificio fue diseñado y construido en la década de los 80.

La instrumentación actual posee un sistema de registro de vibraciones de 12 sensores uniaxiales de aceleración de fuerza balanceada (FBA-11 de Kinemetrics) conectados a una central única de registros. Estos sensores registran la aceleración absoluta del movimiento en forma analógica y permiten realizar mediciones de movimiento fuerte. El equipo de medición es un sistema de adquisición para movimientos fuertes, modelo K2 de la serie Kinemetrics *AltusTM*. La recolección de datos debe realizarse de manera directa en el equipo registrador.

1.5.3.2. Torre Central Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile, Yañéz (2009):

Fue construida en el año 1962, calculada por SAS Ingenieros. Su estructuración es asimétrica de muros sismo resistentes de hormigón armado. Consta de 9 pisos más 2 subterráneos, la azotea se eleva 30.2 metros sobre el nivel del terreno.

A diferencia del edificio de la CChC, posee una red de monitoreo de salud que registra continuamente la aceleración (8 sensores), la humedad del suelo (3 sensores) y parámetros ambientales (humedad, lluvia y viento, entre otros). Éstos se publican de forma remota a través de Internet. Además, las señales de aceleración son procesadas y se informa al usuario sobre los parámetros dinámicos de la estructura y parámetros ambientales cada 15 minutos.

Para determinar sus propiedades modales se realizó una medición de microvibraciones durante 40 minutos. Se utilizaron 9 sensores uniaxiales en sentido horizontal en la periferia de los pisos 3, 5 y 8. Se aplicaron los métodos PSD y SSI para el cálculo de las frecuencias, amortiguamientos y formas modales de la estructura.

A partir de las formas modales se determina donde se instalan los sensores definitivos. Para identificar los tres primeros modos fue necesario instalar sensores en el piso 8 distribuidos en la planta para observar los modos torsionales. El cuarto modo tiene un antinodo en el tercer piso por lo que se instalaron sensores en esa planta. De tal manera se instalan 3 sensores en el octavo piso, 3 en el tercero y 2 en el subterráneo del edificio que cumplen con la función de ser señales de entrada.

Se utilizaron acelerómetros Kinematics EpiSensor ES-U2 configurados en un rango de 0.25g. Los sensores son anclados a la losa o antepecho con pernos de expansión. El cableado de los sensores se realizó con cable de computación AWG 26 de 6 hilos con pantalla de aluminio.

El sistema de monitoreo continuo hace uso de un PC dedicado a la adquisición y procesamiento de datos y un servidor que respalda los datos y la información que son publicados. El computador tiene un procesador de 2.0 Ghz de doble núcleo y 2Gb de RAM. Está instalado en el subterráneo del edificio junto al Daqbook 2005 y se conecta por Internet con el servidor del Departamento de Ingeniería Civil.

Capítulo 2

MEJORAMIENTO INSTRUMENTACIÓN EDIFICIO CCHC

2.1. Instrumentación Previa

Es un edificio de oficinas de 22 pisos y cuatros subterráneos destinados a estacionamientos y bodegas. El edificio fue diseñado y construido en la década de los 80. El sistema resistente a cargas verticales consiste en columnas y muros. El sistema resistente a cargas laterales es esencialmente a base de muros estructurales localizados en el núcleo de escaleras y ascensores. Su material de construcción es hormigón armado, posee una planta trapezoidal y la altura de piso típica es de 3.30 [m]. La fundación consiste en una losa en el núcleo central de muros y columnas, y zapatas en los elementos estructurales de su perímetro, el cual está rodeado de muros en todos los subterráneos. A partir del cuarto piso hay una reducción del área de planta y de pilares, en el quinto piso disminuyen los espesores de muros perimetrales y a partir del piso diecisiete disminuyen los muros del núcleo central.

Este edificio se instrumentó para la medición de sismos por primera vez el año 1989 con una red de tres instrumentos analógicos triaxiales ubicados en el tercer sótano, piso 10 y piso 20, el disparador era vertical y se ubicaba en el tercer sótano. Esta instrumentación era bastante limitada y el sistema permitía determinar parcialmente las propiedades dinámicas de la estructura. La ausencia de sismos en la ciudad de Santiago no permitió obtener registros.

Yañez (1995) realizó un estudio que tuvo como objetivo la determinación experimental de las propiedades dinámicas básicas de edificios chilenos a partir de sus microvibraciones ambientales,

entre ellos el edificio de la CChC. Sumado a lo anterior De la Fuente (1999) realizó una modelación del edificio usando el programa ETABS.

Con el objetivo de mejorar la limitada instrumentación existente, tanto en capacidad de registro como en procesamiento de la información, Villarroel (1998) realizó un cambio de los equipos y del sistema de registro el año 1998 el cual todavía está operativo.

La instrumentación actual posee un sistema de registro de vibraciones de 12 sensores uniaxiales de aceleración de fuerza balanceada (FBA-11 de Kinemetrics) conectados a una central única de registros. Estos sensores registran la aceleración absoluta del movimiento en forma analógica y permiten realizar mediciones de movimiento fuerte. El equipo de medición es un sistema de adquisición modelo K2 de la serie Kinemetrics *AltusTM*. La ubicación de los sensores se muestra en la figura 2.1.

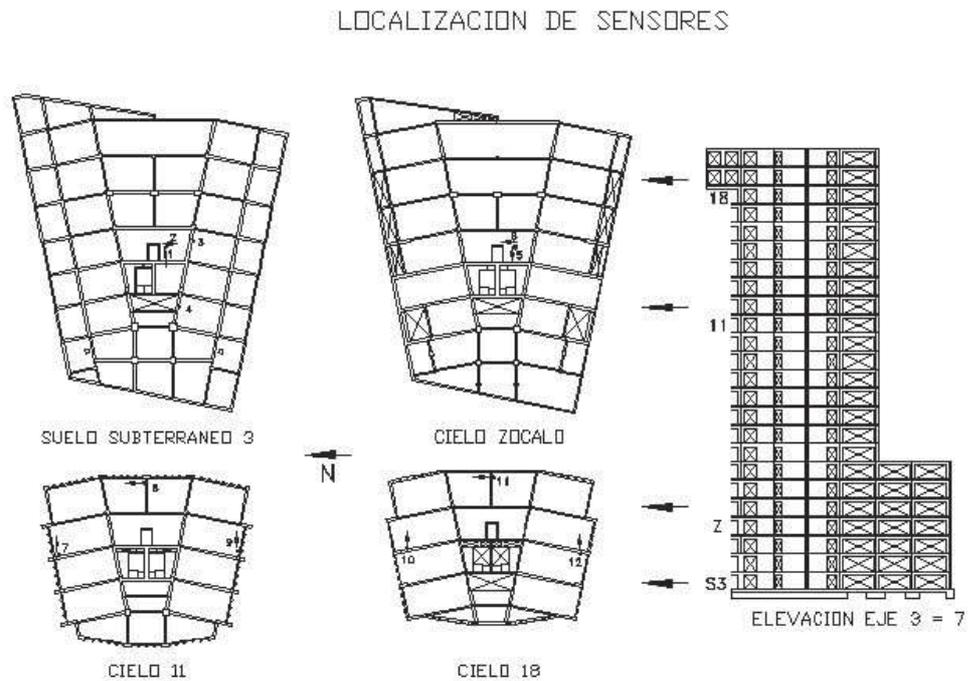


Figura 2.1: Localización de sensores CChC

Con el objetivo de lograr una mejor adquisición de datos que le proporcione robustez al sistema junto con actualizar los sistemas de adquisición, se agregan a la instrumentación actual los equipos que se describen en este capítulo.

2.2. Descripción de los equipos

El sistema de registro y procesamiento de datos se encuentra en el shaft eléctrico del segundo subterráneo, en dicho lugar llegan los cables de los doce sensores a una caja de acople, cuyo propósito es separar los cables que entregan energía a los sensores de los que traen la señal analógica, para luego transmitirla al gabinete donde está el equipo Altus K2.

El nuevo sistema obtiene la señal en paralelo de cada canal desde la caja de acople, para luego volver a dividirla y enviarla hacia dos tarjetas DBK18, una sin ganancia y otra con amplificación x100, donde además son filtrados con un filtro pasa bajos de 40[Hz]. En consecuencia se tienen 24 canales adquiridos por 6 tarjetas conectadas a un equipo IO Tech Daqbook2005 el cual digitaliza las señales y las envía al ordenador. El detalle de los instrumentos utilizados se explicará en la sección 5.1 y el sistema de adquisición es el mostrado en la figura 5.2 ya que el circuito eléctrico utilizado por los sensores FBA-11 es análogo al del EpiSensor ES-U2.

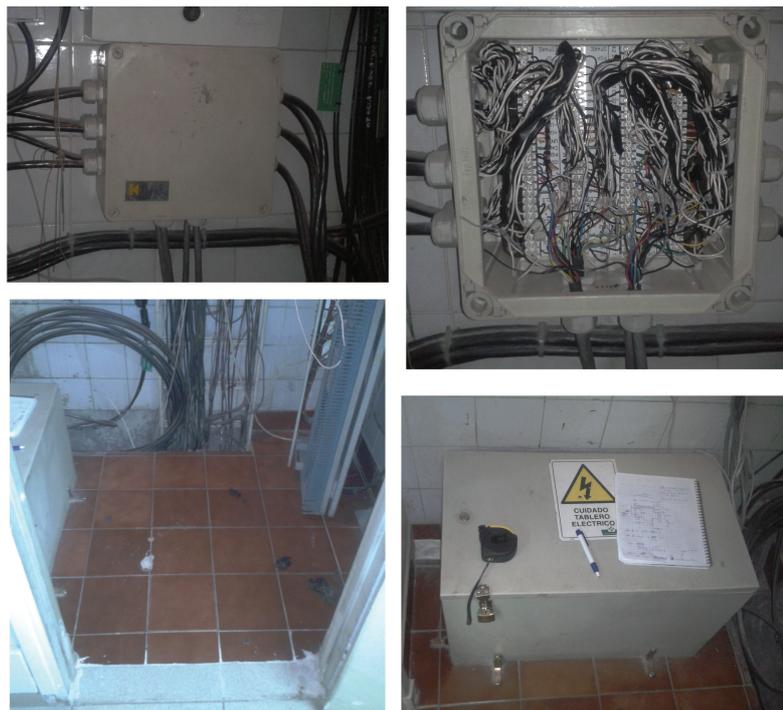


Figura 2.2: Equipos pre-existentes shaft piso -2 CChC

En resumen para el nuevo sistema de medición se incorporan los siguientes equipos:

- PC: Computador con procesador Intel Core i5 2400 Quad Core 3.4 GHz, 2GB RAM DDR3 1333MHz, HD 500 MB SATA II, con Windows 7 Professional de 64 bits. Este ordenador reem-

plazará al modem existente, se le conectará el registrador Altus K2 y el nuevo Daqbook2005

- UPS: Un sistema de alimentación ininterrumpida APC Smart-UPS RT 1000VA 230V On-Line Part # SURT1000XLI, que reemplazará a la existente y le dará independencia energética al sistema de 60 minutos para una potencia conectada de 170W aproximadamente.
- Sistema de Adquisición: Se agrega un sistema de adquisición de datos Daqbook2005 acoplado a 6 tarjetas DBK18 instaladas en dos soportes DBK10
- Monitor LED de 15 pulgadas
- Cables: Para transmitir la nueva señal se utiliza un cable coaxial RG58 con centro multifilar con conectores BNC. Se utilizarán al rededor de 24 [m] de cables para la conexión del nuevo sistema.
- Gabinete: Se reemplaza el gabinete existente por uno con nuevas dimensiones y con tres ventiladores para disminuir la temperatura interna.

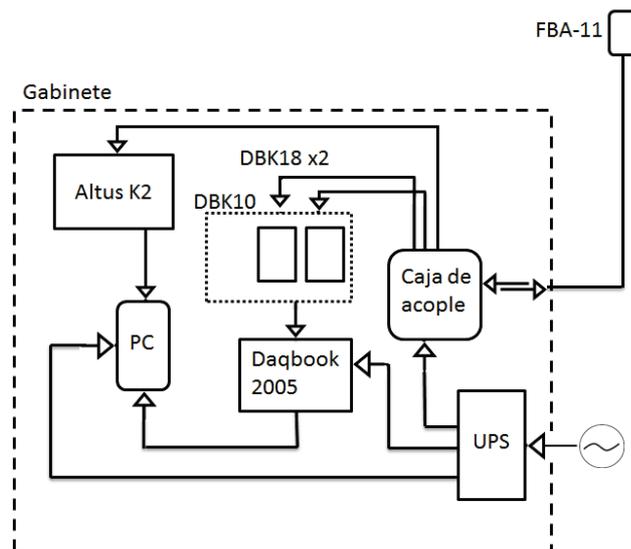


Figura 2.3: Esquema sistema de instrumentación CChC

2.3. Prueba de equipos

Se armó el gabinete en el laboratorio y se probaron los sistemas de comunicación via Ethernet entre el ordenador y el equipo Daqbook2005, se configura el pc para que inicie automaticamente el registro y procesamiento de datos cada vez que se inicie su sistema operativo, se observa el funcionamiento continuo durante una semana donde se monitorea además la variación de la tempratura

del equipo registrador y el funcionamiento de los ventiladores. Luego de funcionar cinco días sin problemas se procede a planificar la instalación.



Figura 2.4: Gabinete de equipos



Figura 2.5: Ventiladores y monitoreo de la temperatura

2.4. Instalación

Se trasladan los equipos al edificio de la CChC. Se empotra el gabinete y se realiza la conexión de cables a la caja de acople existente la cual posee cuatro regletas. A cada regleta llegan tres sensores por su costado izquierdo, por la salida derecha se conectan tres cables en paralelo a cada una de las señales positivas y negativas de cada canal. De estos tres cables, uno corresponde al

registrador K2 ya existente y dos para el Daqbook2005 (canal de microvibraciones y canal sismo).

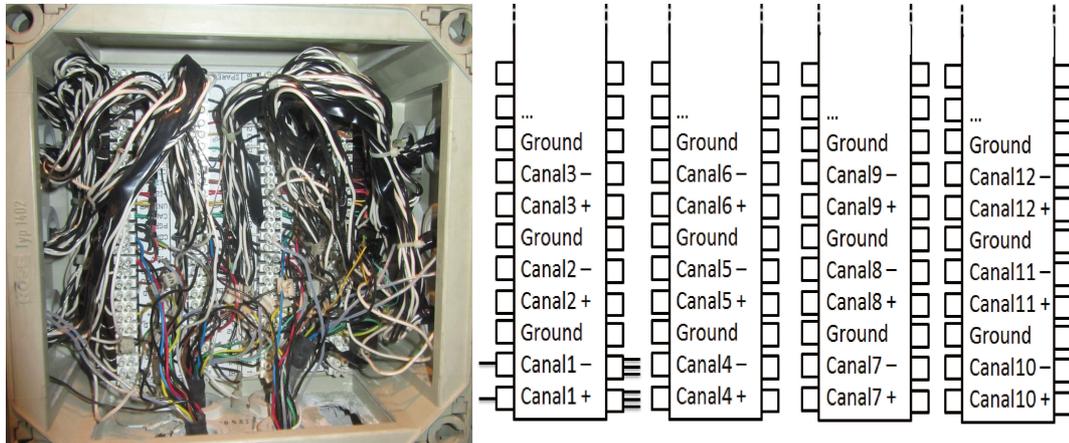


Figura 2.6: Regletas conexión de cables

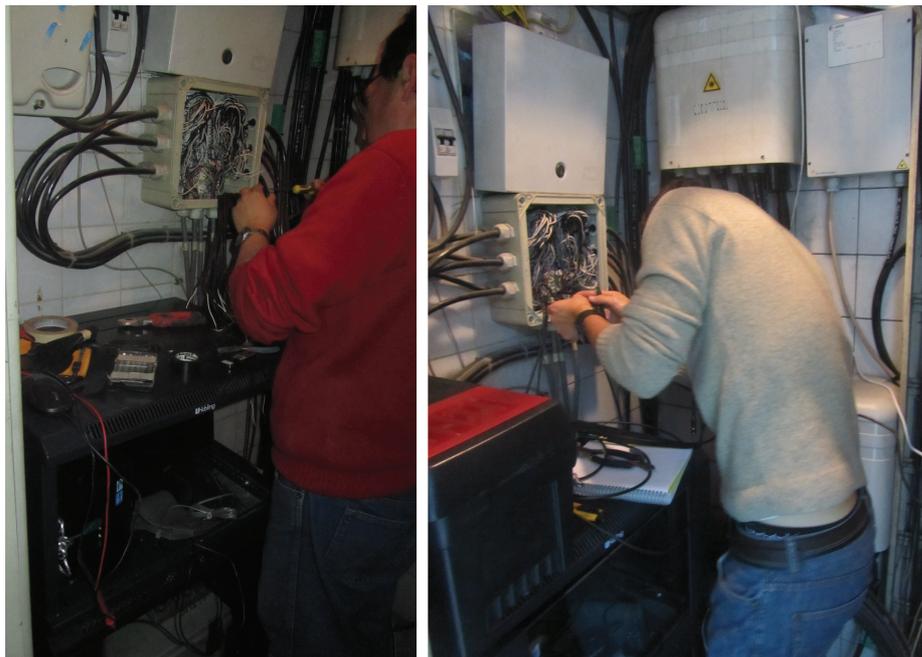


Figura 2.7: Instalación de cables

En definitiva el primer nivel del gabinete alberga: cables, registrador Altus K2, fuente de poder K2, UPS , alargadores y dos ventiladores ubicados en la pared lateral. El segundo nivel alberga el ordenador, monitor LED, Daqbook2005, teclado plegable, cables y un ventilador en la cara superior.



Figura 2.8: Gabinete nuevo shaft piso -2

2.5. Sistema de registro

El sistema queda instalado y listo para su marcha blanca, se diseñó una rutina en Matlab para analizar los registros de microvibraciones cada 15 minutos, estos serán procesados con PSD para la identificación de las frecuencias naturales de vibrar. El algoritmo considera también un sistema de “trigger” de los sensores horizontales ubicados en el subterráneo -3, de haber un evento sísmico se generan figuras con los registros de los canales 12 sin amplificación. El sistema pre-existente del registrador Altus K2 seguirá operativo pero ocupando el nuevo ordenador y su conexión a internet para generar reportes.

Se instala un servidor con IP estática en el ordenador para compilar una página web donde se publiquen los resultados del PSD y las figuras generadas, el acceso a esta información será limitado por el momento, sólo será para el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y para la sala de control del edificio de la CChC.

Capítulo 3

ESTUDIO DE LAS ESTRUCTURAS

Se describen las estructuras elegidas para instrumentar considerando sus criterios de diseño, geometría y materiales. Se analizan sus propiedades dinámicas entregadas por sus modelos ETABS y se comparan con las obtenidas del registro de vibraciones ambientales medidas en terreno. Los edificios que se instrumentarán son de hormigón armado y están estructurados en base a muros resistentes al corte y flexión en dos direcciones perpendiculares entre sí. Los elementos resistentes verticales están unidos en cada nivel por losas que frente a sollicitaciones horizontales actúan como diafragma rígido en su plano.

La filosofía de diseño sísmico adoptada en los tres edificios es la indicada en la norma NCh433.Of96 (Diseño Sísmico) modificada 2009 y el Decreto de Emergencia NCh433 cuyo objetivo es que la estructura:

- Resista sin daños movimientos sísmicos de intensidad moderada.
- Limiten los daños en elementos no estructurales durante sismos de mediana intensidad.
- Aunque presenten daños, eviten colapso durante sismos de intensidad excepcionalmente severa.

En el diseño de los elementos de hormigón armado de los tres edificios se utilizó el método de los factores de carga y resistencia establecido en la norma A.C.I. 318-05, considerándose las siguientes resistencias básicas de cálculo:

Hormigón:

Resistencia especificada:

$$f_c' = 35[\text{MPa}] \text{ (H40)}$$

$$f_c' = 30[\text{MPa}] \text{ (H35)}$$

$$f_c' = 25[\text{MPa}] \text{ (H30)}$$

Resistencia de diseño a la compresión:

$$\phi P_n \leq \phi 0.85 f_c' A_c$$

Donde,

$\phi = 0.65$ a 0.9 en términos del tipo de esfuerzo que controla la sección, tracción o a compresión. A_c = área de la sección transversal que resiste la compresión.

Resistencia de diseño al corte:

$$\phi V_c \leq \phi \sqrt{f_c'} A_c / 6$$

Donde,

$$\phi = 0.75$$

A_c = área de la sección transversal que resiste el corte

Acero:

Tracción por flexión: $T_{\text{flex}} = \phi f_y$

Donde,

$$\phi = 0.9$$

El análisis modal se realiza acorde a la norma NCh 433.Of96 Mod.2009 donde se deben incluir todos los modos que sean necesario para que la suma de sus masas equivalentes para cada una de las dos acciones sísmicas sea mayor o igual al 90 % de la masa total.

3.1. Condominio Mar Egeo Edificio Rodas

Es un edificio de uso habitacional ubicado en la ciudad de Iquique, I Región. Posee 26 pisos de altura y 2 subterráneos, tiene una altura máxima de 69 metros sobre el nivel del terreno y una distancia de 7.8 metros hasta el sello de fundación.



Figura 3.1: Condominio Mar Egeo Rodas - Vista Sur

Existe una placa de estacionamiento común para los 4 edificios del condominio sin embargo todas las torres se encuentran dilatadas de ella. El edificio está empotrado en losa de fundación y las fundaciones de la placa de estacionamiento son del tipo zapata corrida para los muros aislados y muros de contención, y fundación aislada para las columnas. En los subterráneos hay muros perimetrales para contener el empuje del suelo que tienen espesores entre 25 [cm] y 40 [cm], donde los de mayores muros se encuentran la dirección N-S.

La estructura de hormigón armado fue diseñada de acuerdo a las disposiciones del Decreto de Emergencia NCh430 y del código A.C.I.318-08. Para análisis y diseño de la estructura se fisuraron vigas de ejes 14, 15 y C, de acuerdo a las consideraciones indicadas en ACI 318-08 10.10.4.1.



Figura 3.2: Edificio Rodas Vista Oeste

El edificio no presenta grandes cambios de geometría a lo largo de su altura. En el segundo subterráneo tiene una altura mayor a los otros pisos, pues este nivel sólo se utilizó como espacio de transición para alcanzar el sello de fundación en roca, el nivel quedará sellado y por lo tanto es un piso perdido.

Los espesores de los muros disminuyen con la altura. Los espesores de las losas son constantes en todos los pisos (14 [cm]) exceptuando la sala de máquinas donde aumentan a 20 [cm]. Presenta cambios en el tipo de hormigón en todos sus elementos de H.A. en los pisos ocho (de H40 a H35) y doce (de H35 a un H30).

Como se ve en la tabla 3.1 la relación peso sísmico v/s área del piso disminuye con la altura del edificio.

Piso	Peso Muerto [ton]	Sobrecarga [ton]	Peso Sísmico [ton]	Área Piso [m ²]	Peso Sísmico/Área [ton/m ²]
S.M.	32.2	2.3	32.7	11.7	2.8
26	296.5	128.9	328.8	506.9	0.6
25	296.5	128.9	328.8	506.9	0.6
24	296.5	128.9	328.8	506.9	0.6
23	296.5	128.9	328.8	506.9	0.6
22	296.5	128.9	328.8	506.9	0.6
21	296.5	128.9	328.8	506.9	0.6
20	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
19	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
18	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
17	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
16	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
15	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
14	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
13	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
12	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
11	309.5	128.9	341.8	506.9	0.7
10	334.7	128.9	367.0	506.9	0.7
9	334.7	128.9	367.0	506.9	0.7
8	334.7	128.9	367.0	506.9	0.7
7	334.7	128.9	367.0	506.9	0.7
6	334.7	128.9	367.0	506.9	0.7
5	345.4	128.9	377.7	506.9	0.7
4	345.4	128.9	377.7	506.9	0.7
3	345.4	128.9	377.7	506.9	0.7
2	345.4	128.9	377.7	506.9	0.7
1	447.3	160.8	487.5	450.8	1.1
-1	358.9	271.8	426.9	477.2	0.9
-2	824.0	253.4	887.3	451.5	2.0
Total	9,592	3,911	10,570	14,065	0.8

Tabla 3.1: Pesos por piso Edificio Rodas

3.1.1. Materiales

Hormigón:

Tipo H 40 (90 % N.C.) INN. (Desde fundaciones a piso 8°)

Tipo H 35 (90 % N.C.) INN. (Desde piso 9° a piso 16°)

Tipo H 30 (90 % N.C.) INN. (Desde piso 17° a sala de máquinas)

Acero:

A630-420H (refuerzo estructural en hormigón)

3.1.2. Capacidad de soporte del suelo

Presiones admisibles:

a) Para cargas normales: $\sigma_{adm} = 5.0$ [kg/cm²]

b) Para cargas normales más sismo: $\sigma_{adm} = 7.5$ [kg/cm²]

Coefficiente de Balasto:

a) Caso estático: $K_s = 30$ [Kg/cm³]

b) Caso sísmico: $K_s = 60$ [Kg/cm³]

Donde B: ancho de zapata en metros.

3.1.3. Análisis Sísmico¹

Según NCh433 Of96 Modifica 2009 y Decreto de Emergencia NCh 433.

- Zona sísmica : 3
- Tipo de suelo : I
- Coeficiente de importancia : 1.0
- Masa sísmica : Peso propio + 25 % sobrecarga
- Módulo de Elasticidad (ESTATICO): $E_c = 4700 f_c'$ [MPa]
- Modelo de análisis: Modelo tridimensional de elementos finitos.
- Análisis de vigas: Los esfuerzos sísmicos se obtienen del modelo ETABS, los esfuerzos estáticos se obtienen mediante descarga manual.

¹Realizado por René Lagos Ingenieros

- Corte Basal: $Q_x = 6.7\%P$ a nivel basal; $Q_y = 6.7\%P$ a nivel basal. En que P es el peso sísmico

El análisis modal del modelo ETABS² entrega los siguientes parámetros:

Modo	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	% de masa por modo			% de masa acumulada		
			UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRX
1	1.263	0.792	35.33	0.90	31.53	35.33	0.90	31.53
2	1.066	0.938	0.01	63.95	2.22	35.34	64.85	33.76
3	0.793	1.262	31.50	1.60	31.03	66.84	66.45	64.79
4	0.365	2.743	7.82	0.02	7.15	74.66	66.47	71.93
5	0.280	3.576	0.13	16.57	0.29	74.79	83.04	72.22
6	0.227	4.400	8.28	0.32	6.57	83.06	83.36	78.80
7	0.179	5.601	1.93	0.00	3.78	85.00	83.36	82.58
8	0.135	7.426	0.06	6.34	0.05	85.05	89.70	82.63
9	0.116	8.634	4.34	0.05	0.86	89.39	89.75	83.49
10	0.109	9.136	0.08	0.00	3.70	89.47	89.75	87.19
11	0.084	11.937	0.04	3.33	0.02	89.51	93.08	87.21
12	0.078	12.819	1.46	0.01	0.50	90.97	93.09	87.70
13	0.072	13.937	1.28	0.01	2.47	92.25	93.09	90.17
14	0.059	16.863	0.01	1.76	0.03	92.26	94.86	90.20
15	0.059	17.028	0.69	0.01	0.60	92.95	94.86	90.80
16	0.052	19.190	1.42	0.01	1.47	94.37	94.87	92.27
17	0.047	21.373	0.30	0.01	0.72	94.66	94.88	92.99
18	0.045	22.151	0.02	1.10	0.00	94.68	95.98	92.99
19	0.041	24.624	1.19	0.01	0.63	95.87	95.98	93.63
20	0.039	25.629	0.00	0.04	0.00	95.87	96.02	93.63

Tabla 3.2: Análisis Sísmico Edificio Rodas

El edificio presenta un modo fundamental traslacional en la dirección E-O y rotacional, su segundo modo es traslacional en dirección N-S y se encuentra prácticamente desacoplado. El tercer modo es similar al primero.

3.1.4. Formas Modales

Las formas modales son graficadas en 3D de manera de poder determinar en qué niveles se generarán los máximos desplazamientos debido a traslación y rotación. En sus figuras se representan esquemáticamente la losa del cielo de cada piso, a las cuales se le asigna una degradación de colores según el desplazamiento normalizado de cada modo.

Se muestran los porcentajes de masa equivalente donde la dirección “X” corresponde a E-O e “Y” corresponde a N-S.

²Modelado por René Lagos Ingenieros

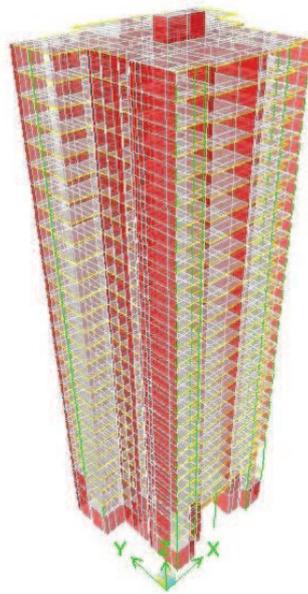


Figura 3.3: Vista Isométrica del Modelo Rodas

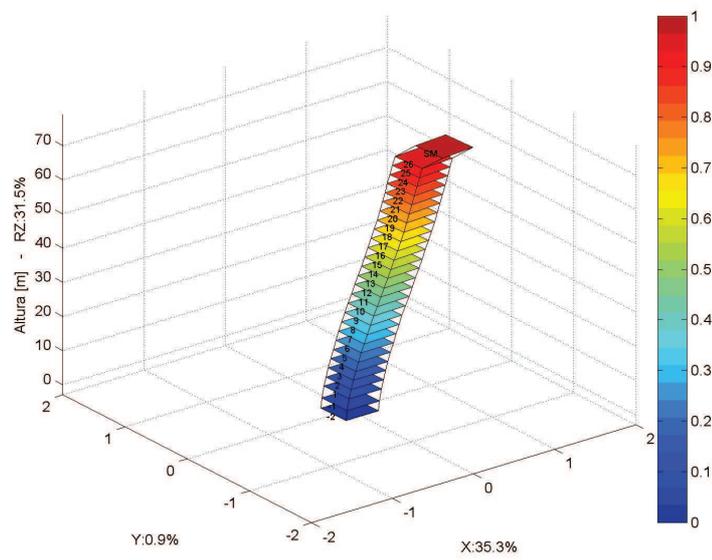


Figura 3.4: Forma Modal 1 – Edificio Rodas

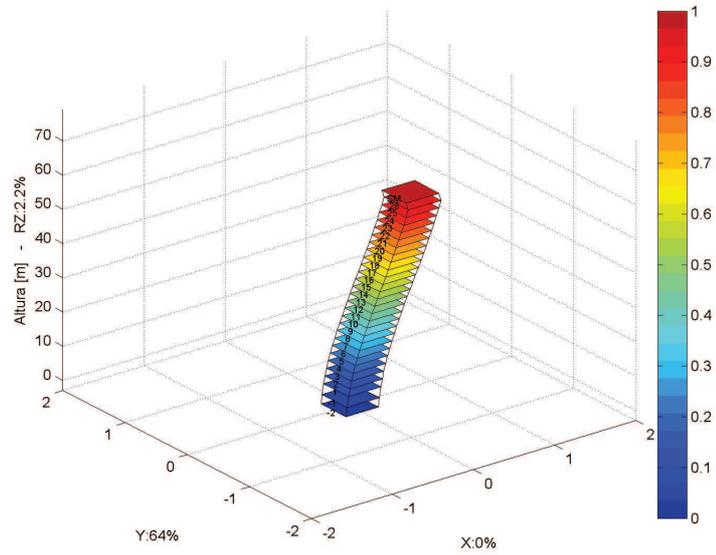


Figura 3.5: Forma Modal 2 – Edificio Rodas

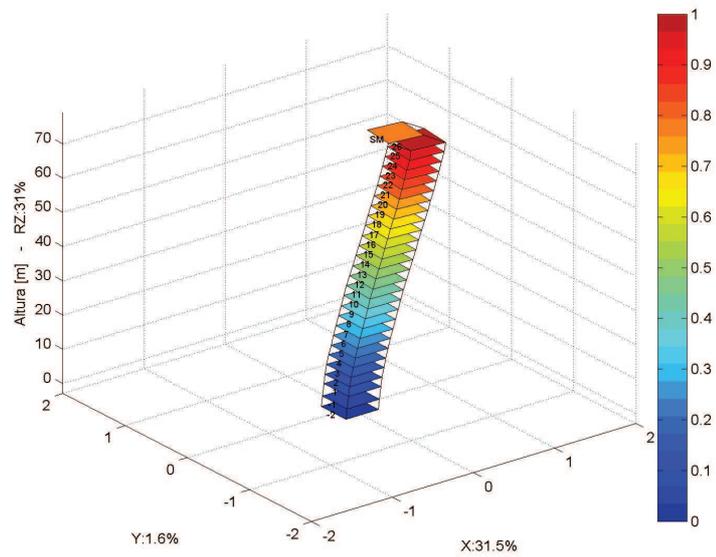


Figura 3.6: Forma Modal 3 – Edificio Rodas

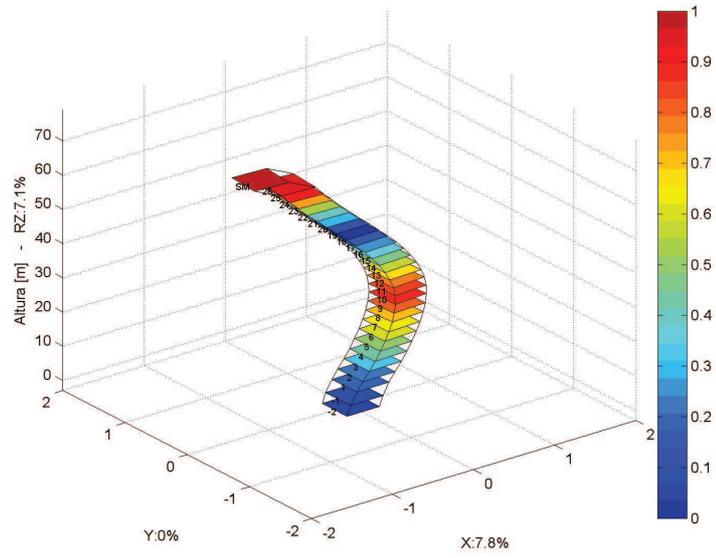


Figura 3.7: Forma Modal 4 – Edificio Rodas

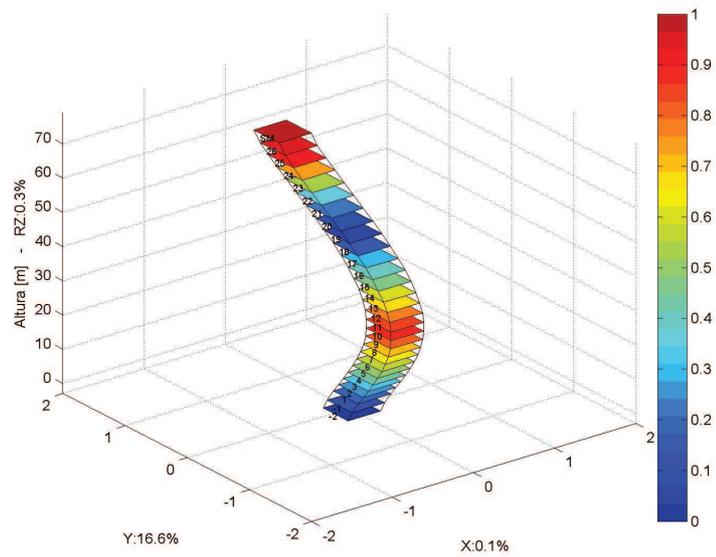


Figura 3.8: Forma Modal 5 – Edificio Rodas

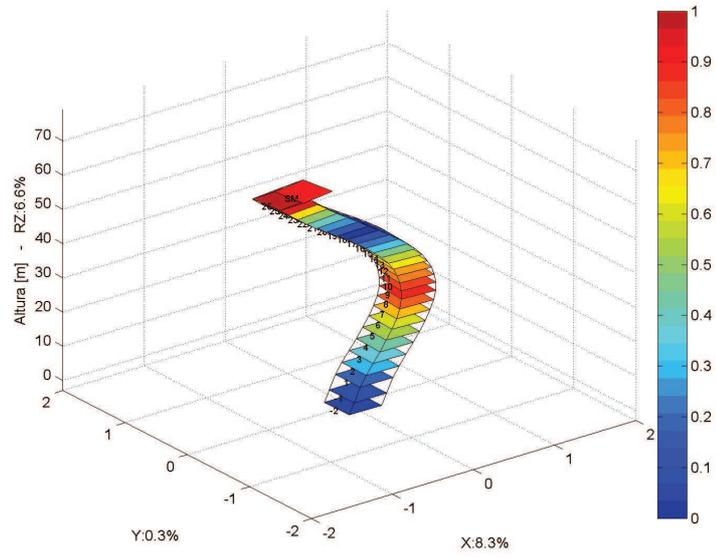


Figura 3.9: Forma Modal 6 – Edificio Rodas

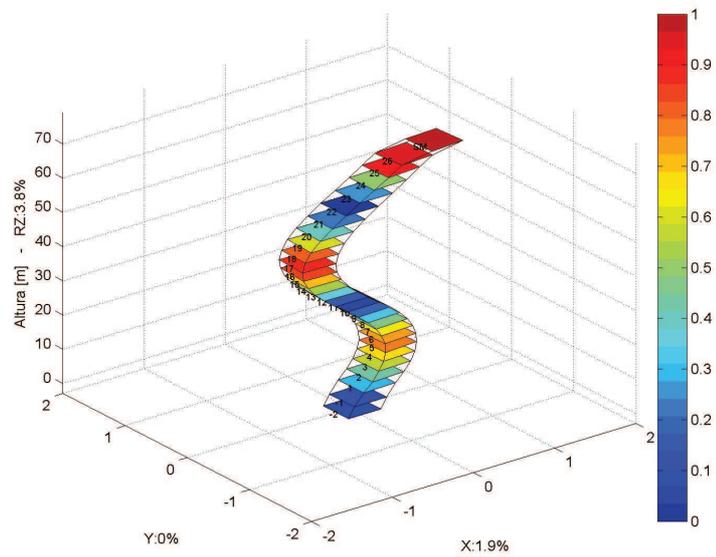


Figura 3.10: Forma Modal 7 – Edificio Rodas

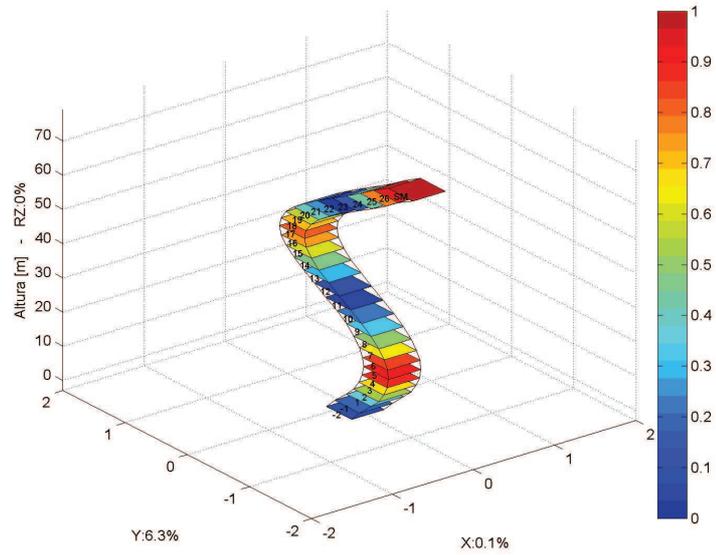


Figura 3.11: Forma Modal 8 – Edificio Rodas

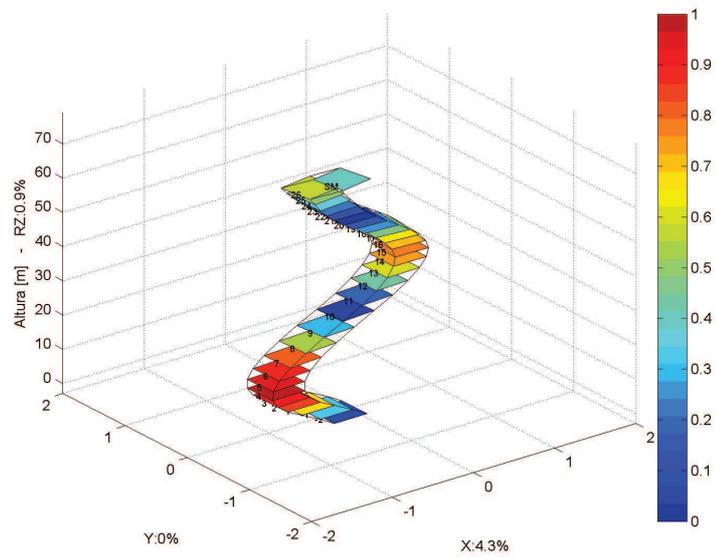


Figura 3.12: Forma Modal 9 – Edificio Rodas

Se observa una pequeña irregularidad en las formas modales en el último piso pues se consideró en el análisis sísmico la sala de máquinas que tiene un área casi 50 veces menor a los demás pisos.

3.2. Edificio Velamar

El proyecto de uso habitacional, de aproximadamente 35.000 m² de superficie, consta de dos edificios de 30 niveles sobre cota cero cada uno y una placa común de dos niveles de subterráneo. Ambas torres presentan una altura máxima de 82.54 [m] y una cota de -7.9 [m] en su sello de fundación.



Figura 3.13: Proyecto Velamar

El sector de placa de estacionamientos se encuentra dilatado del edificio. Este se estructura con muros en su perímetro y pilares que resisten cargas verticales. Las losas se apoyan en estos elementos y sobre consolas en el perímetro de la torre. Las torres están fundadas en losa de fundación, independientes para cada edificio, y las fundaciones de la placa de estacionamiento son del tipo zapata corrida para los muros aislados y muros de contención, y fundación aislada para las columnas.

La estructura de hormigón armado fue diseñada de acuerdo a las disposiciones del código A.C.I. 318-05. Según esta norma, el hormigón en su condición de servicio se encuentra fisurado (capítulo 10.6).

La estructuración del edificio presenta cambios de geometría importantes en los pisos 28 y 31, donde se reduce el área en planta drásticamente. En el piso 1 presenta cambios en la dimensión de la losa pues desaparece la placa de estacionamientos.

En general los muros cambian de espesor en los pisos 1, 3, 5 y 6; y varían el tipo de hormigón del cual están constituidos de H40 a H30 en el piso 16. Las losas cambian de espesor de 16 [cm] en los subterráneos a 14 [cm] en los demás pisos. Desde el piso 16 baja la resistencia del hormigón de H40 a H30.

Los pesos de ambas torres varían según los cambio de geometría del edificio y de la misma manera varia la relación “Peso Sísmico/Área”, en las tabla 3.3 se presenta el detalle de pesos y área de la torre 1.



Figura 3.14: Edificio Velamar Vista SO



Figura 3.15: Edificio Velamar Vista NO

Piso	Peso Muerto [ton]	Sobrecarga [ton]	Peso Sísmico [ton]	Área Piso [m ²]	Peso Sísmico/Área [ton/m ²]
32	198	8	200	79	2.6
31	107	2	108	18	6.1
30	274	65	290	274	1.1
29	274	65	290	274	1.1
28	271	64	287	270	1.1
27	403	96	427	415	1.0
26	403	96	427	415	1.0
25	403	96	427	415	1.0
24	403	96	427	415	1.0
23	403	96	427	415	1.0
22	403	96	427	415	1.0
21	403	96	427	415	1.0
20	403	96	427	415	1.0
19	403	96	427	415	1.0
18	403	96	427	415	1.0
17	403	96	427	415	1.0
16	403	96	427	415	1.0
15	403	96	427	415	1.0
14	403	96	427	415	1.0
13	403	96	427	415	1.0
12	403	96	427	415	1.0
11	403	96	427	415	1.0
10	403	96	427	415	1.0
9	403	96	427	415	1.0
8	403	96	427	415	1.0
7	403	96	427	415	1.0
6	413	96	437	415	1.1
5	424	96	448	415	1.1
4	430	96	454	415	1.1
3	430	96	454	415	1.1
2	459	96	483	415	1.2
1	490	96	514	415	1.2
-1	590	328	672	528	1.3
-2	505	279	574	528	1.1
-3	523	220	578	411	1.4
Total	13,853	3,615	14,757	13,597	1.1

Tabla 3.3: Peso por piso Velamar Torre 1

3.2.1. Materiales

Hormigón:

Tipo H30 (90 % N.C.): Para fundaciones y pisos 16° a SM torres
Para Placas de estacionamiento

Tipo H40 (90 % N.C.) en pisos -3° al 15° torres

Acero:

A630-420H para barras de refuerzo en hormigón armado

A42-27ES para estructuras metálicas

3.2.2. Capacidad de soporte del suelo

Presiones admisibles del suelo:

Caso normal: 3.5 [kg/cm²]

Caso eventual: 5.2 [kg/cm²]

3.2.3. Análisis sísmico³

Según NCh433 Of96 Modifica 2009 y A.C.I. 318-05

- Zona sísmica : 3
- Tipo de suelo : III
- Masa sísmica : Peso propio + 25 % sobrecarga
- Modulo de Elasticidad (SISMICO) : $E_c = 4700\sqrt{f_c}$ [MPa]; $E_{cH30} = 23.500$ [MPa]; $E_{cH40} = 27.800$ [MPa]
- Modelo de análisis : Modelos 3D elementos finitos
- Corte Basal: $Q_x = 6.7\%P$ a nivel basal; $Q_y = 6.7\%P$ a nivel basal. En que P es el peso sísmico

Si bien en el informe de mecánica de suelos se señala un suelo tipo II, posterior al terremoto del 27 de febrero del 2010 se revisó la clasificación del suelo y se acordó con el ingeniero mecánico de suelos cambiarla a suelo tipo III.

El análisis modal del modelo ETABS⁴ entrega los siguientes parámetros:

³Realizado por René Lagos Ingenieros

⁴Modelado por René Lagos Ingenieros

Modo	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	% de masa por modo			% de masa acumulada		
			UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRX
1	1.723	0.580	1.21	54.51	2.90	1.21	54.51	2.90
2	1.419	0.705	38.36	3.01	20.15	39.57	57.52	23.05
3	0.695	1.440	26.10	0.22	34.61	65.67	57.74	57.65
4	0.412	2.427	3.74	9.34	3.74	69.41	67.08	61.40
5	0.374	2.671	5.68	8.47	2.50	75.09	75.54	63.90
6	0.203	4.926	8.15	0.11	6.20	83.25	75.66	70.10
7	0.191	5.240	1.10	0.98	5.26	84.35	76.64	75.36
8	0.176	5.678	0.25	5.99	0.82	84.60	82.63	76.18
9	0.122	8.204	3.11	0.13	0.57	87.70	82.76	76.75
10	0.115	8.718	0.02	2.78	1.62	87.73	85.54	78.37
11	0.102	9.812	1.60	1.32	3.25	89.33	86.86	81.63
12	0.088	11.402	1.71	0.85	0.41	91.04	87.71	82.04
13	0.081	12.337	0.00	1.60	2.22	91.04	89.30	84.26
14	0.070	14.234	1.95	0.63	0.83	92.99	89.94	85.08
15	0.065	15.320	0.38	1.40	1.20	93.36	91.34	86.28
16	0.060	16.745	0.04	1.07	2.18	93.41	92.41	88.47
17	0.055	18.299	1.53	0.16	0.14	94.93	92.57	88.60
18	0.050	20.022	0.00	1.34	1.68	94.94	93.91	90.29
19	0.048	20.626	0.00	0.00	0.03	94.94	93.91	90.32
20	0.046	21.506	0.00	0.71	0.97	94.94	94.62	91.28

Tabla 3.4: Análisis Sísmico Edificio Velamar

El edificio presenta un modo fundamental traslacional en la dirección NO muy desacoplado, no así sus modos dos y tres que poseen grandes porcentajes en la dirección NE y en rotación.

3.2.4. Formas Modales Edificio Velamar Torre 1

Las formas modales son graficadas en 3D de manera de poder determinar en qué niveles se generarán los máximos desplazamientos debido a traslación y rotación. En sus figuras se representan esquemáticamente la losa del cielo de cada piso, a las cuales se le asigna una degradación de colores según el desplazamiento normalizado de cada modo.

Se muestran los porcentajes de masa equivalente donde la dirección “X” corresponde a NE e “Y” corresponde a NO.

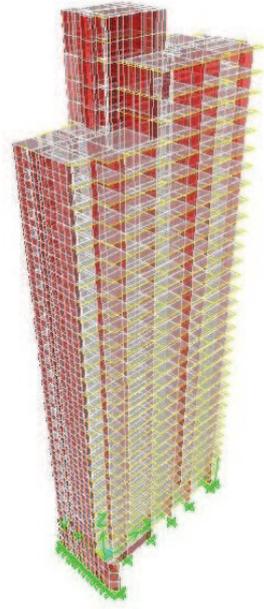


Figura 3.16: Vista Isométrica del Modelo Velamar Torre 1

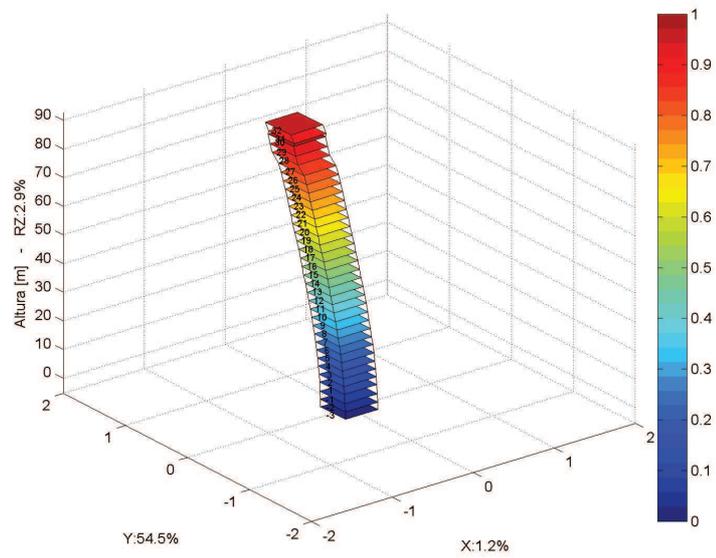


Figura 3.17: Forma Modal 1 – Edificio Velamar Torre1

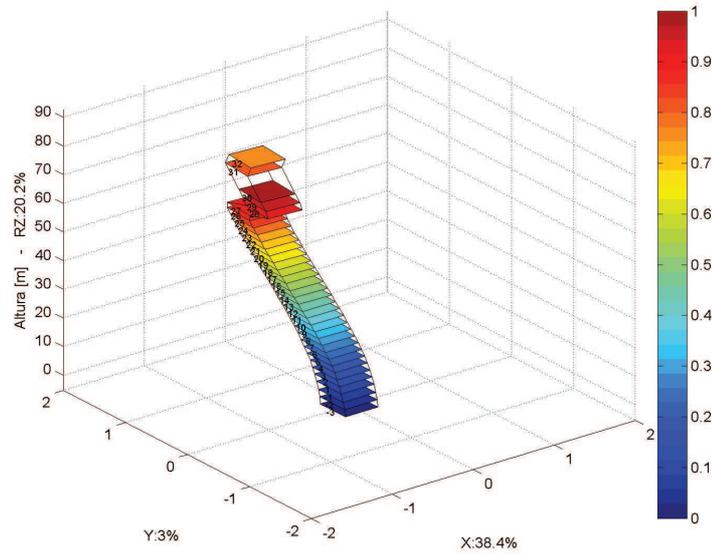


Figura 3.18: Forma Modal 2 – Edificio Velamar Torre1

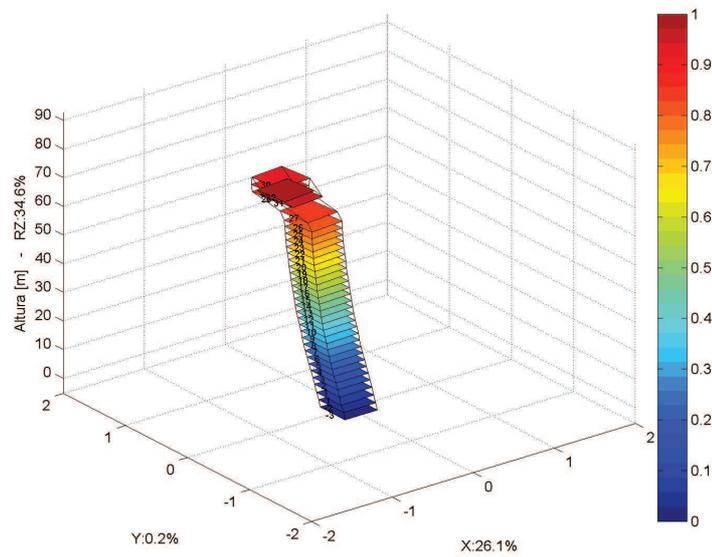


Figura 3.19: Forma Modal 3 – Edificio Velamar Torre1

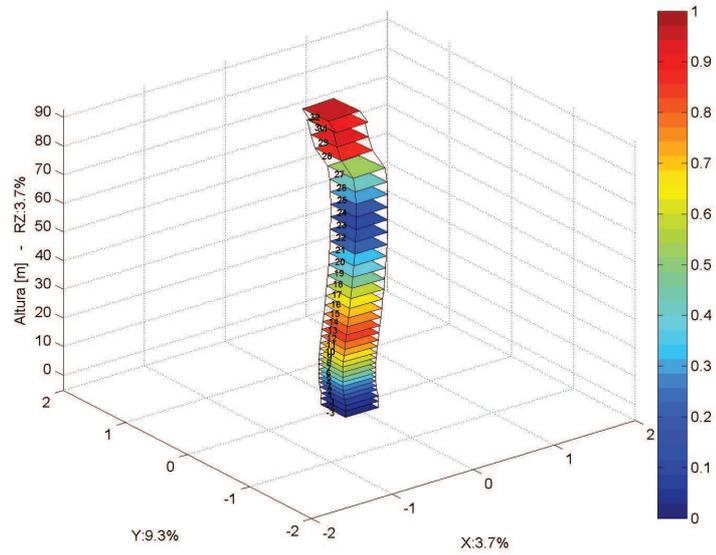


Figura 3.20: Forma Modal 4 – Edificio Velamar Torre1

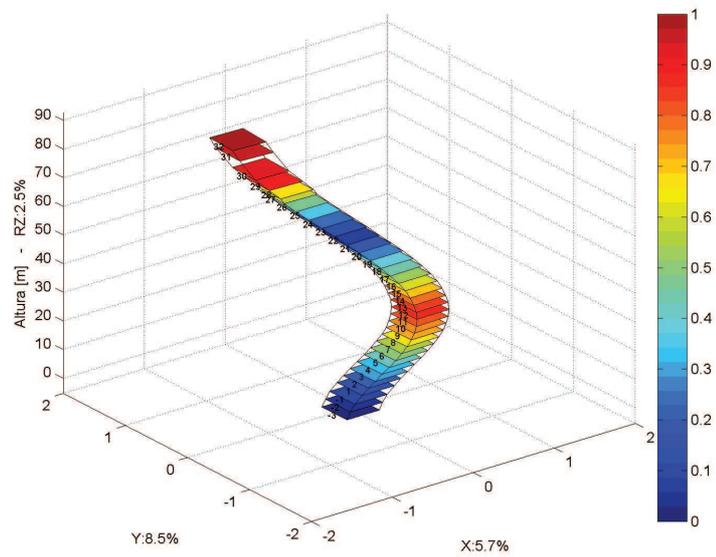


Figura 3.21: Forma Modal 5 – Edificio Velamar Torre1

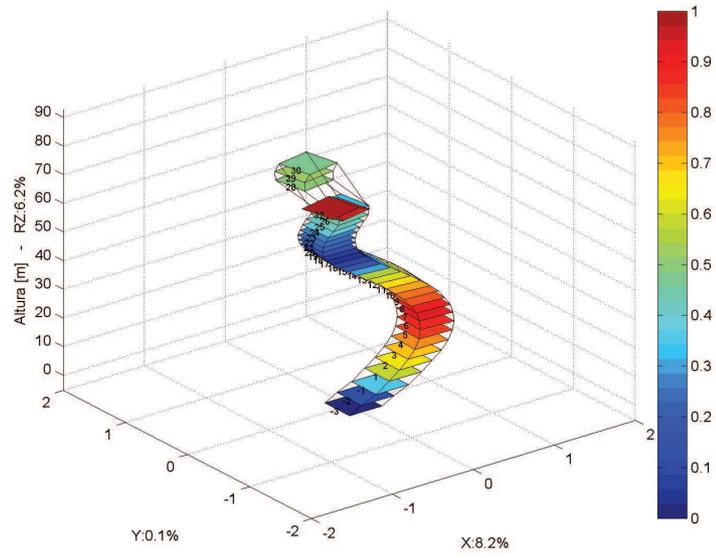


Figura 3.22: Forma Modal 6 – Edificio Velamar Torre1

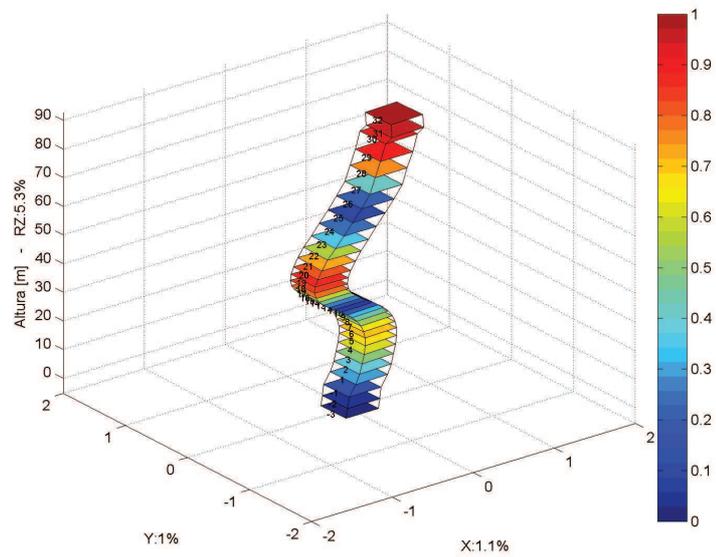


Figura 3.23: Forma Modal 7 – Edificio Velamar Torre1

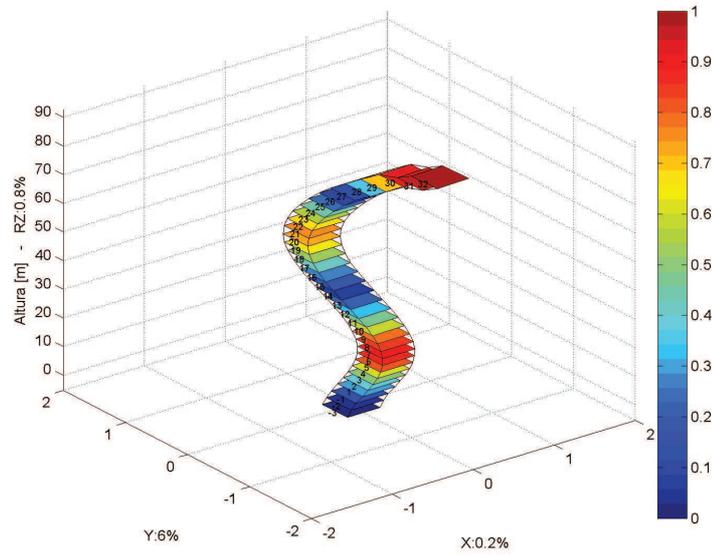


Figura 3.24: Forma Modal 8 – Edificio Velamar Torre1

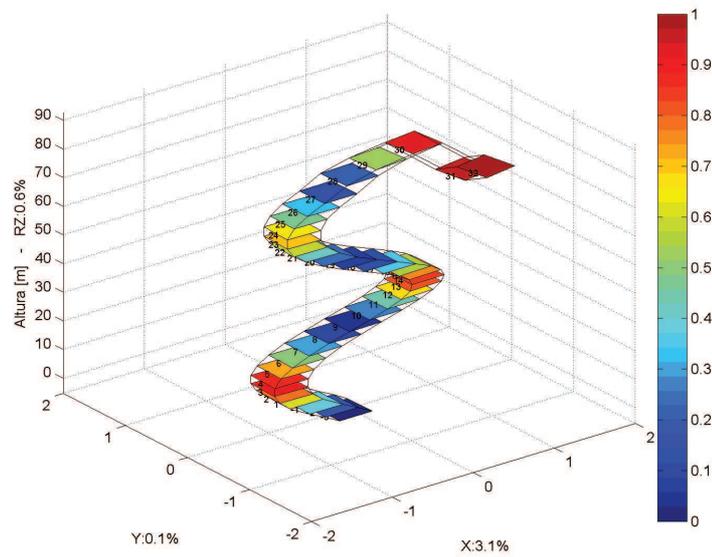


Figura 3.25: Forma Modal 9 – Edificio Velamar Torre1

Se observa variaciones en las formas modales ocasionadas por los cambios de geometría en los pisos 28, 31 y 32, niveles a tener en consideración para el diseño de la instrumentación.

3.3. Edificio Diego Portales

El proyecto considera dos edificios totalmente independientes ambos de 19 pisos de altura. La torre A no posee subterráneo pues la roca está a nivel de terreno, en cambio la torre B tiene el sello de fundación a -2.81 [m] y por lo tanto tiene un subterráneo. El primer nivel tiene una altura de 2.16 [m] mientras que el piso tipo tiene 2.46 [m].



Figura 3.26: Edificio Portales Torre A

La estructura de hormigón armado fue diseñada de acuerdo a las disposiciones de la norma chilena NCh430 Of. 2008 y del código A.C.I.318-05.

Los edificios no presentan grandes cambios de geometría a lo largo de su altura. Sin embargo por su forma alargada posee una mayor cantidad de muros en la dirección “X” (N-S) los cuales están dispuestos en el interior de la planta pues el perímetro corresponde a balcones delimitados por vigas.

En la dirección “Y” (E-O) posee muros perimetrales los cuales disminuyen su espesor de 30 [cm] a 20 [cm] en el piso ocho, además en dicho nivel todos los elementos de hormigón armado disminuyen su calidad de H30 a H25. En los primeros dos pisos existen losas de 16 [cm] y 14 [cm], desde el piso

tres los espesores de las losas son constantes e iguales 14[cm].



Figura 3.27: Edificio Portales Torre B

Piso	Peso Muerto [ton]	Sobrecarga [ton]	Peso Sísmico [ton]	Área Piso [m ²]	Peso Sísmico/Área [ton/m ²]
S.M.	30.6	2.4	31.193	8.5	3.7
19	294.0	135.3	327.861	513.5	0.6
18	294.0	135.3	327.861	513.5	0.6
17	294.0	135.3	327.86	513.5	0.6
16	294.0	135.3	327.861	513.5	0.6
15	294.0	135.3	327.861	513.5	0.6
14	294.0	135.3	327.861	513.5	0.6
13	294.0	135.3	327.861	513.5	0.6
12	294.0	135.3	327.861	513.5	0.6
11	294.0	135.3	327.861	513.5	0.6
10	318.0	135.3	351.801	513.5	0.7
9	318.0	135.3	351.801	513.5	0.7
8	318.0	135.3	351.801	513.5	0.7
7	318.0	135.3	351.801	513.5	0.7
6	318.0	135.3	351.801	513.5	0.7
5	328.1	135.3	361.966	513.5	0.7
4	328.1	135.3	361.966	513.5	0.7
3	328.1	135.3	361.966	513.5	0.7
2	328.1	135.3	361.966	513.5	0.7
1	424.9	168.8	467.145	513.5	0.9
-1	341.0	285.4	412.302	503.5	0.8
Total	6,345	2,893	7,068	10,268	0.7

Tabla 3.5: Peso por piso Portales Torre B

3.3.1. Materiales

Hormigón:

Tipo H 30 (90 % N.C.) INN (De piso 1 a piso 7)

Tipo H 25 (90 % N.C.) INN (De piso 8 a piso 19)

Acero:

A630-420H (refuerzo estructural en hormigón)

3.3.2. Capacidad de soporte del suelo

Presiones admisibles:

a) Para cargas normales: $\sigma_{adm} = 5.0$ [kg/cm²]

b) Para cargas normales más sismo: $\sigma_{adm} = 8.0$ [kg/cm²]

Coefficiente de Balasto:

a) Caso estático: $K_s = 20$ [Kg/cm³]

b) Caso sísmico: $K_s = 40 \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$

Donde B: ancho de zapata en metros.

3.3.3. Análisis sísmico⁵

Según NCh433 Of96 Modifica 2009 y Decreto de Emergencia NCh 433.

- Zona sísmica : 3
- Tipo de suelo : I
- Coeficiente de importancia : 1.0
- Masa sísmica : Peso propio + 25 % sobrecarga
- Modulo de Elasticidad (ESTATICO): $E_c = 4700 f_c'$ [Mpa]
- Modelo de análisis: Modelo tridimensional de elementos finitos
- Análisis de vigas: Los esfuerzos sísmicos se obtienen del modelo ETABS, los esfuerzos estáticos se obtienen mediante descarga manual
- Corte Basal: $Q_x = 6.7\%P$ a nivel basal; $Q_y = 6.7\%P$ a nivel basal. En que P es el peso sísmico

El análisis modal del modelo ETABS⁶ entrega los siguientes parámetros:

Modo	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	% de masa por modo			% de masa acumulada		
			UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRX
1	0.963	1.039	0.00	65.39	0.54	0.00	65.39	0.54
2	0.838	1.193	0.07	0.54	66.28	0.08	65.94	66.82
3	0.564	1.774	70.62	0.00	0.12	70.70	65.94	66.94
4	0.242	4.140	0.00	16.61	0.66	70.70	82.55	67.60
5	0.222	4.498	0.01	0.71	14.83	70.71	83.26	82.43
6	0.161	6.201	13.90	0.00	0.00	84.62	83.26	82.43
7	0.108	9.282	0.00	5.75	0.78	84.62	89.02	83.20
8	0.102	9.781	0.00	0.77	5.58	84.62	89.79	88.79
9	0.081	12.387	5.44	0.00	0.01	90.07	89.79	88.80
10	0.064	15.585	0.00	3.19	0.38	90.07	92.97	89.18
11	0.061	16.406	0.00	0.37	3.17	90.07	93.34	92.35
12	0.051	19.494	2.80	0.00	0.01	92.87	93.34	92.35
13	0.044	22.758	0.00	2.01	0.17	92.87	95.34	92.52
14	0.042	24.088	0.00	0.15	2.04	92.87	95.50	94.56
15	0.037	27.201	1.67	0.00	0.00	94.54	95.50	94.56

Tabla 3.6: Análisis Sísmico Edificio Portales Torre B

⁵Realizado por René Lagos Ingenieros

⁶Modelado por René Lagos Ingenieros

3.3.4. Formas Modales Edificio Diego Portales Torre B

Las formas modales son graficadas en 3D de manera de poder determinar en qué niveles se generarán los máximos desplazamientos debido a traslación y rotación. En sus figuras se representan esquemáticamente la losa del cielo de cada piso, a las cuales se le asigna una degradación de colores según el desplazamiento normalizado de cada modo.

Se muestran los porcentajes de masa equivalente donde la dirección “X” corresponde a N-S e “Y” corresponde a E-O.

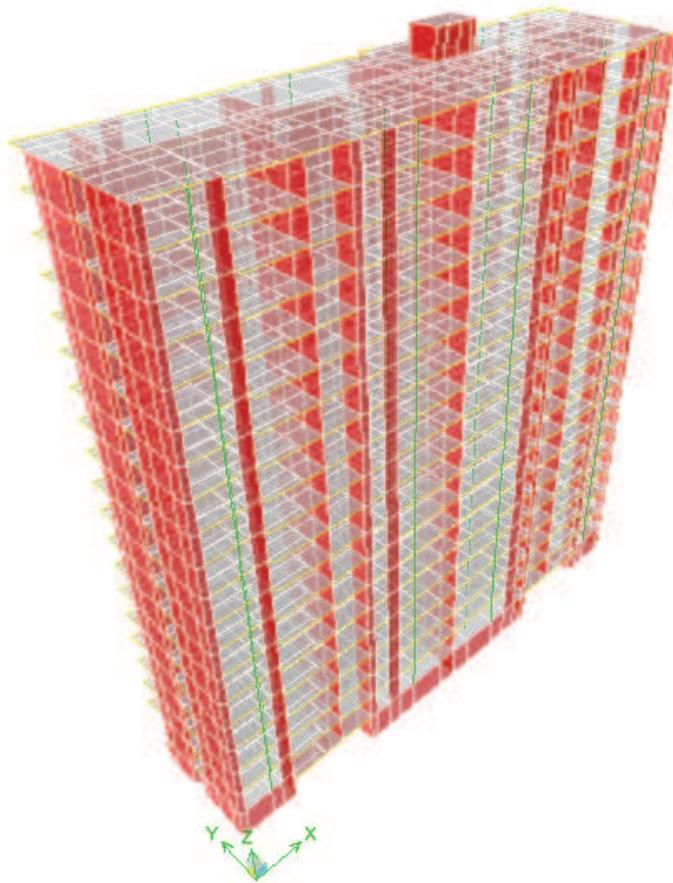


Figura 3.28: Vista Isométrica del Modelo Portales Torre B

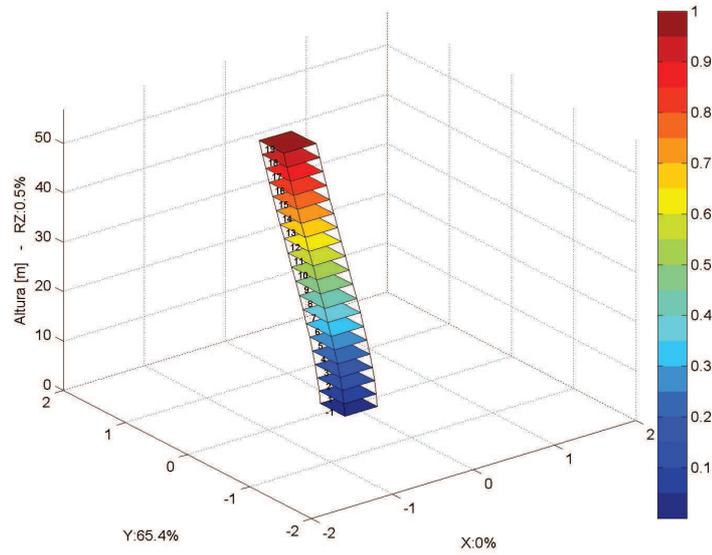


Figura 3.29: Forma Modal 1 – Edificio Portales TorreB

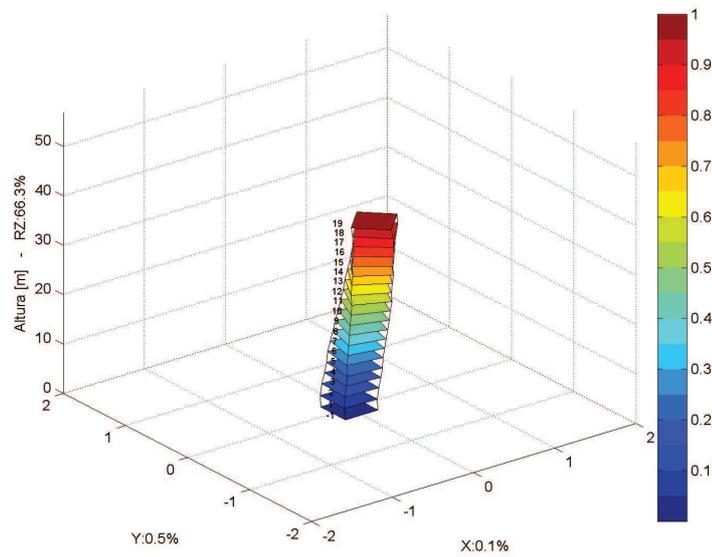


Figura 3.30: Forma Modal 2 – Edificio Portales TorreB

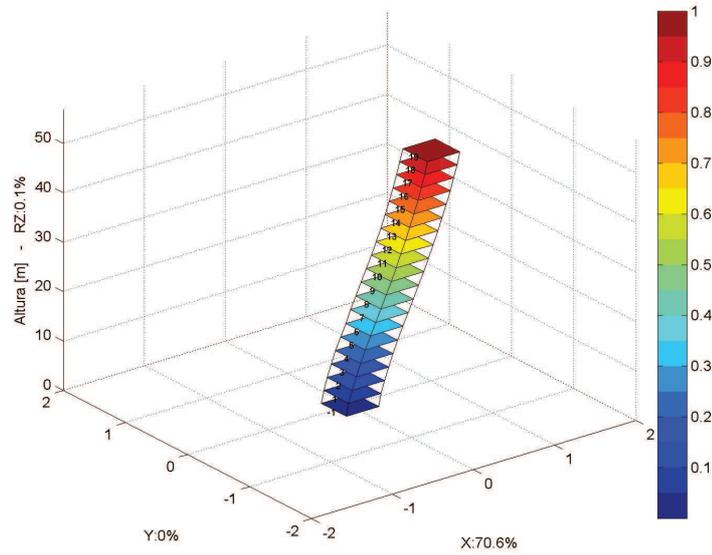


Figura 3.31: Forma Modal 3 – Edificio Portales TorreB

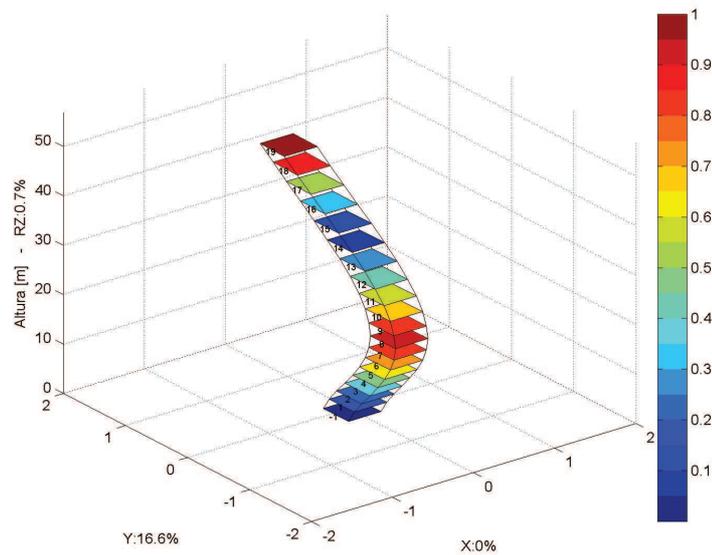


Figura 3.32: Forma Modal 4 – Edificio Portales TorreB

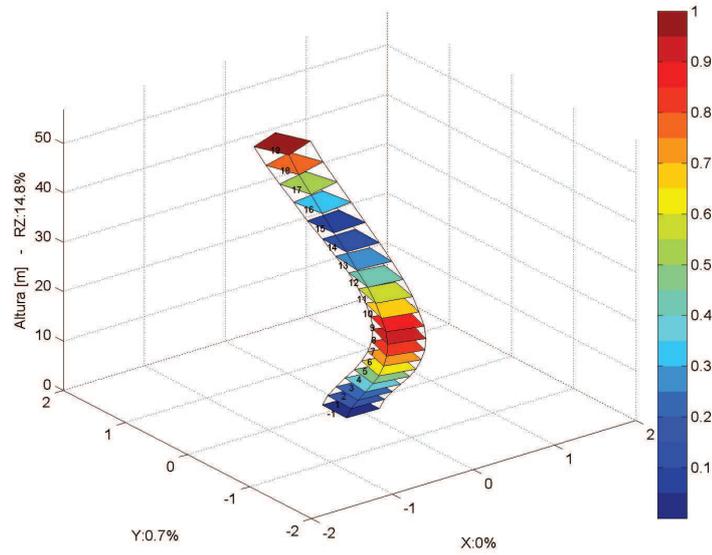


Figura 3.33: Forma Modal 5 – Edificio Portales TorreB

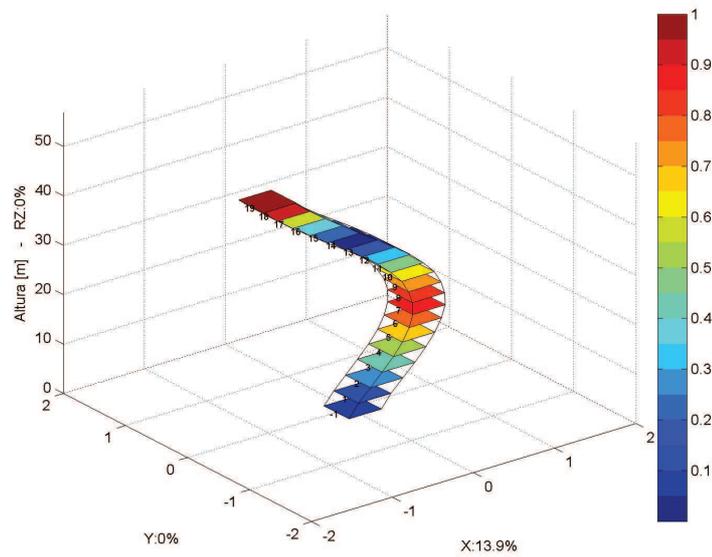


Figura 3.34: Forma Modal 6 – Edificio Portales TorreB

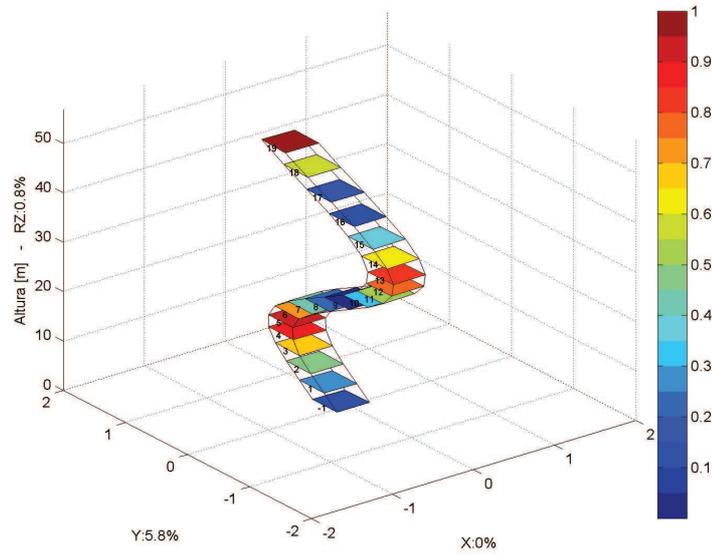


Figura 3.35: Forma Modal 7 – Edificio Portales TorreB

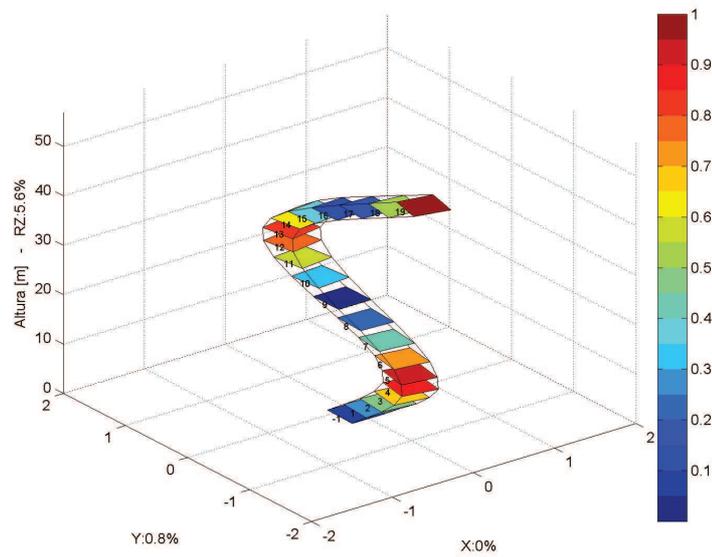


Figura 3.36: Forma Modal 8 – Edificio Portales TorreB

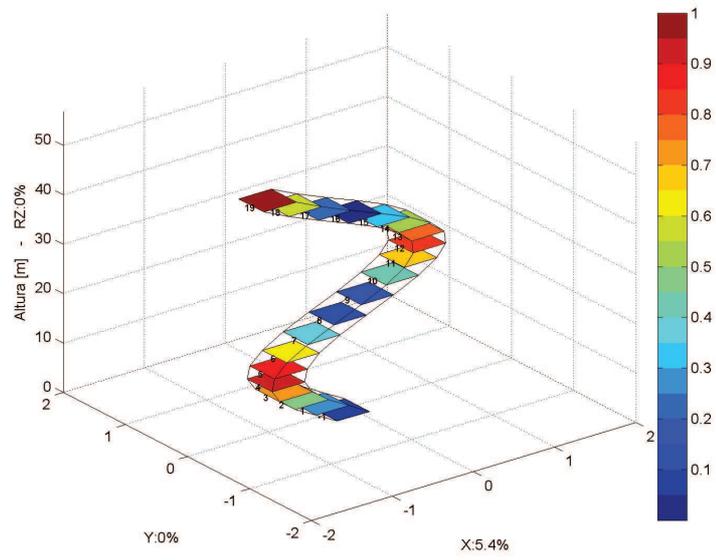


Figura 3.37: Forma Modal 9 – Edificio Portales TorreB

Capítulo 4

MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES

Se realizó una visita a terreno de los edificios, donde se tomaron registros de vibraciones ambientales en cada estructura, de manera de comparar modales con el diseño y evaluar la capacidad de los equipos para registrar aceleraciones en los edificios seleccionados.

Se tomaron mediciones con tres canales, dos en direcciones paralelas y distribuidos en planta de manera de captar torsión, y un sensor ortogonal a los anteriores. Las mediciones se realizaron en dos niveles y el sistema de registro se detalla en la figura 4.1.

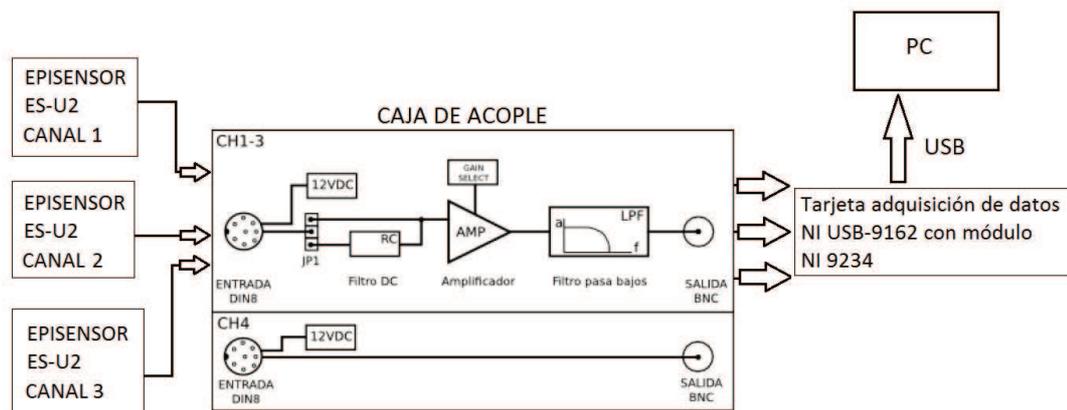


Figura 4.1: Esquema sistema de medición de vibraciones ambientales

El sistema está compuesto por tres sensores EPI ES-U2 (ver capítulo 5.1) los cuales envían señales de voltaje a una caja de acople. Esta caja provee cuatro entradas para adquisición de datos

analógicos a través de un conector circular DIN de 8 pines, dos para la señal mientras que otro provee una alimentación de 12VDC. Su objetivo principal es suministrar energía eléctrica al sensor y a la vez rescatar las señales provenientes de él. Tres de sus canales poseen filtros pasabajos de 50[Hz] además de una etapa de amplificación de ganancia configurable (x1, x10, x100, x500). Las señales se obtienen a través de conectores BNC. Adicionalmente se cuenta con un cuarto canal que posee una conexión directa sin filtro ni amplificación, se utiliza para acoplar un sensor que requiere alimentación a un sistema de adquisición de datos. En la configuración utilizada sólo se conectan 3 canales filtrados y amplificados x10. Cada sensor necesita 4 cables para interactuar con la caja de acople, dos de ellos transmiten la señal de registro, un tercero alimenta el sensor con 12VDC y el último es cable GND.

Las señales obtenidas son acondicionadas mediante un filtro pasa banda de tipo Butterworth, bidireccional, en el intervalo de frecuencias de 0.5 Hz a 20 Hz, de orden 4, de manera de eliminar el ruido y peaks de aceleraciones de alta frecuencia, es re-sampleada de 2048[Hz] a 32[Hz] para disminuir el tamaño de los archivos y el tiempo de procesamiento.

Para la identificación de parámetros dinámicos se utilizan los métodos de PSD y SSI. Los resultados del análisis se muestran en diagramas de estabilización, donde según el orden de la identificación se grafica el número de triple aciertos para cada frecuencia identificada. Por triple acierto se entiende aquellos casos en que, para un orden determinado, tanto las frecuencias características, como las razones de amortiguamiento y valores MAC cumplen con los criterios de convergencia establecidos en la tabla 4.1. Una frecuencia predominante se identifica cuando esta se hace estable a medida que aumenta el orden del modelo.

En todos los casos la matriz MAC fue calculada entre la matriz de formas modales con respecto a sí misma.

El orden de análisis corresponde a los grados de libertad considerados en la identificación. En las mediciones realizadas por Lazcano (2008) se obtuvieron buenos resultados considerando al menos 30 GDL, en este caso se ocupó un orden de 40, con un valor mayor aumenta considerablemente el tiempo de procesamiento.

Criterio de Convergencia de Polos	Valor (%)
Frecuencia	1
Razon de Amortiguamiento	5
MAC	30

Tabla 4.1: Criterios de convergencia identificación mediante SSI

Por la cantidad limitada de instrumentos no fue posible tomar mediciones simultáneas en más de un piso sobre la estructura, por lo tanto no se podrán encontrar las relaciones de amplitud en altura para cada modo, pero sí dentro del mismo nivel.

4.1. Edificio Rodas

Se tomaron registros en el piso 26. Los sensores siempre fueron localizados en las losas y apegados a los muros que les proporcionaban una dirección establecida.

Se realizaron 5 mediciones consecutivas de 15 minutos, en los dos primeras se saturaron los canales por condiciones de los sensores, para los tres últimos se arreglo esta situación y se obtuvieron registros adecuados, denominados MED1, MED2 y MED3. La ubicación y dirección de los sensores se muestra en la figura 4.2.

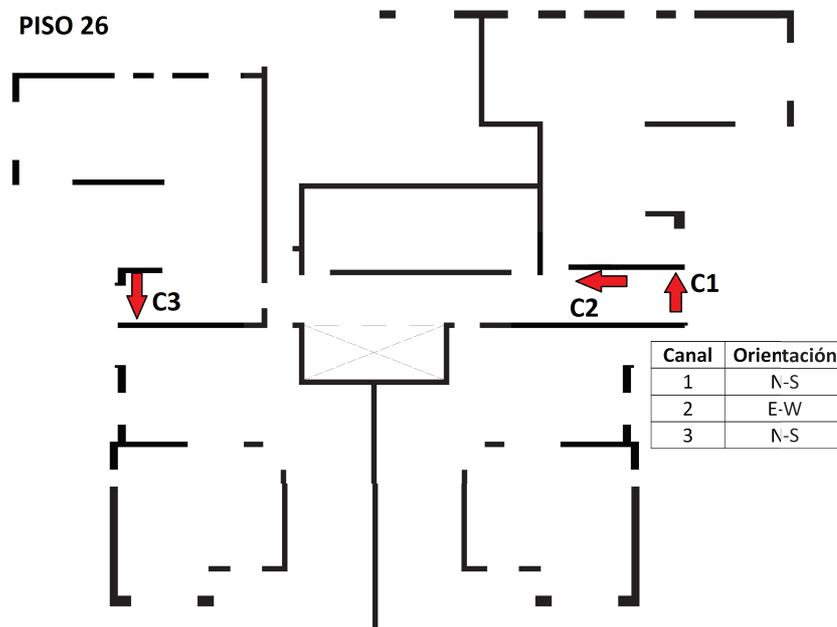


Figura 4.2: Configuración registros de vibraciones ambientales piso 26 Rodas

Las figuras 4.3 a la 4.5 muestran las series de tiempo de los tres registros de aceleraciones, en cada figura se muestran los tres canales de manera independiente durante aproximadamente 900 segundos.

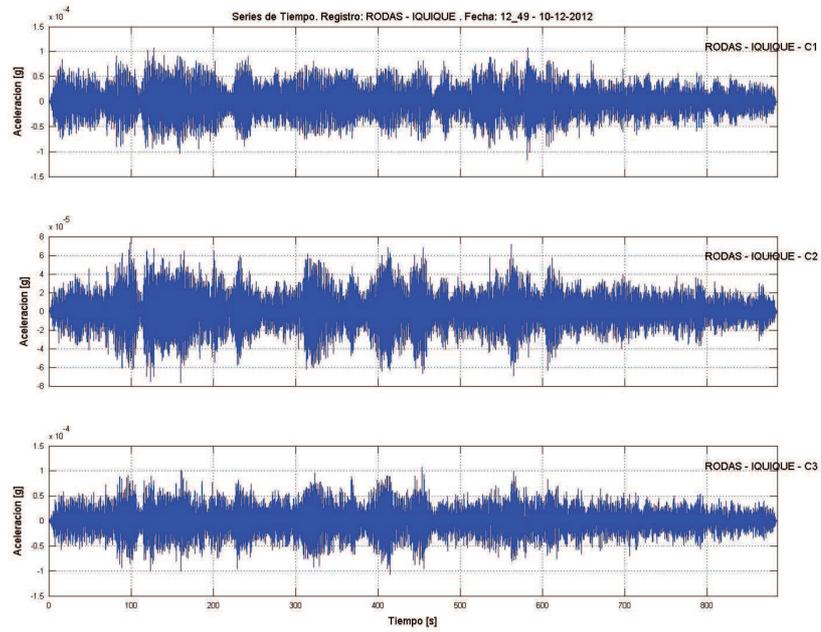


Figura 4.3: Registro MED1 - tres canales - piso 26 - Rodas

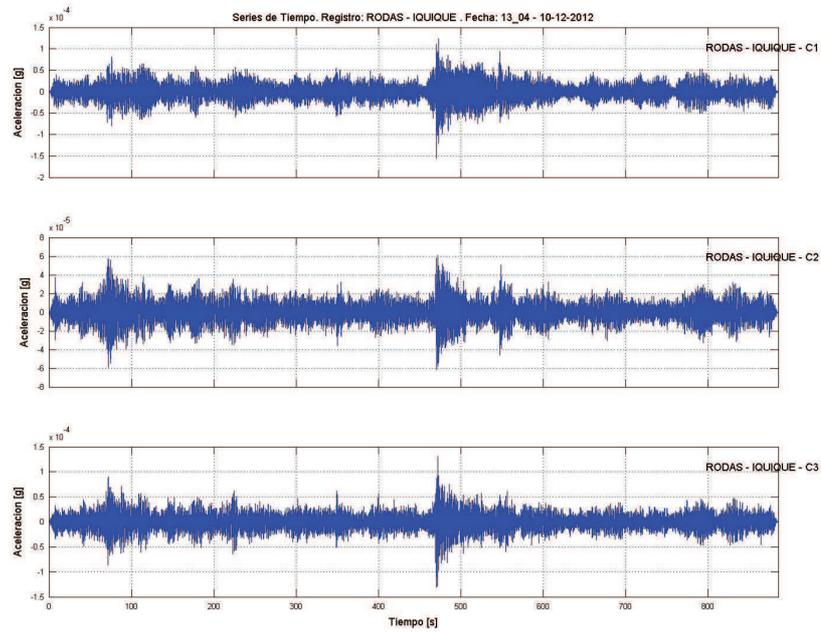


Figura 4.4: Registro MED2 - tres canales - piso 26 - Rodas

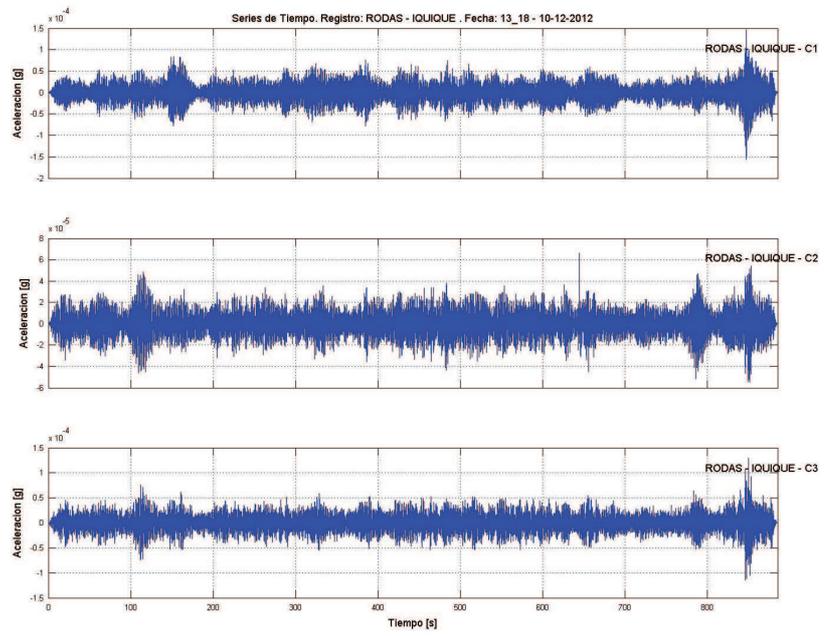


Figura 4.5: Registro MED3 - tres canales - piso 26 - Rodas

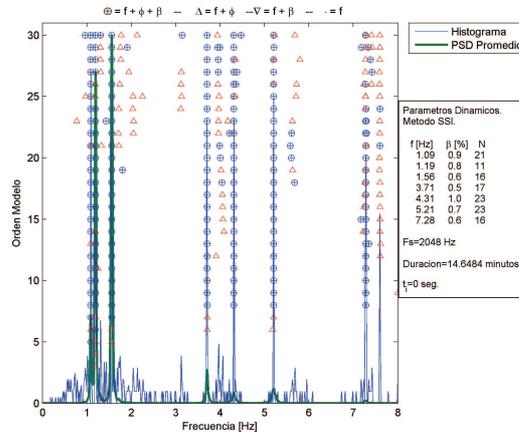


Figura 4.6: Diagrama de estabilización MED1

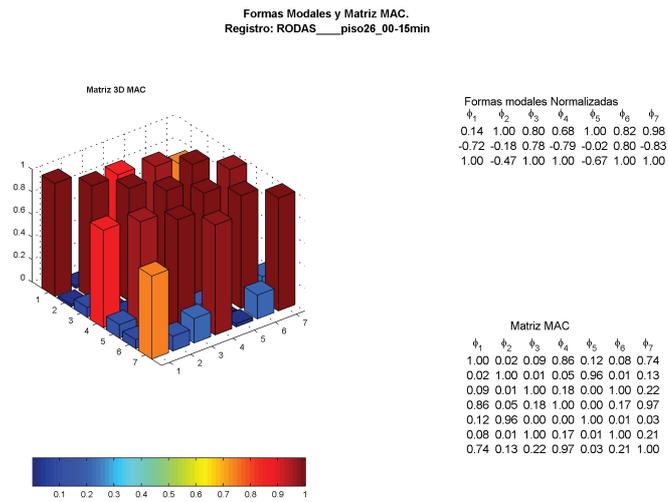


Figura 4.7: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED1

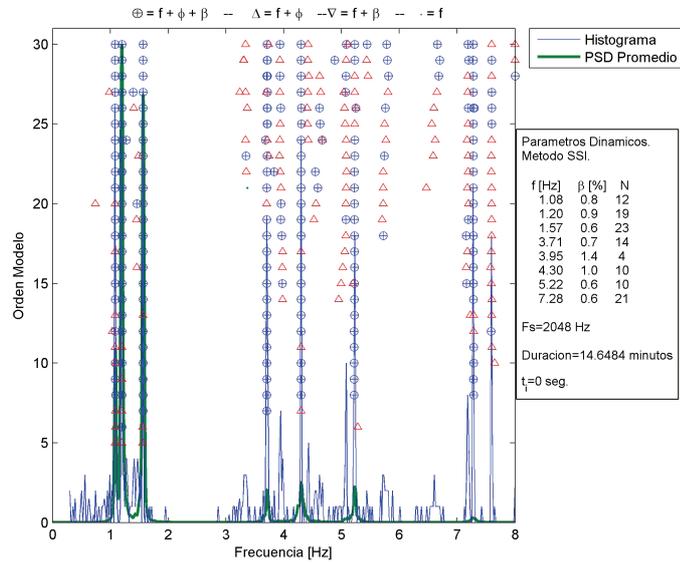


Figura 4.8: Diagrama de estabilización MED2

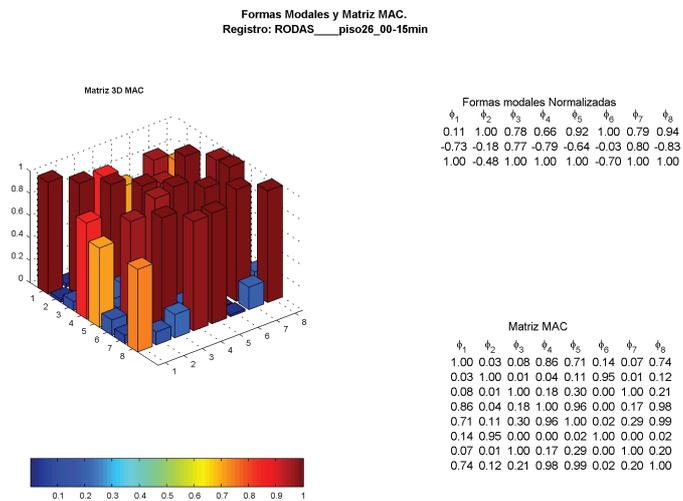


Figura 4.9: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED2

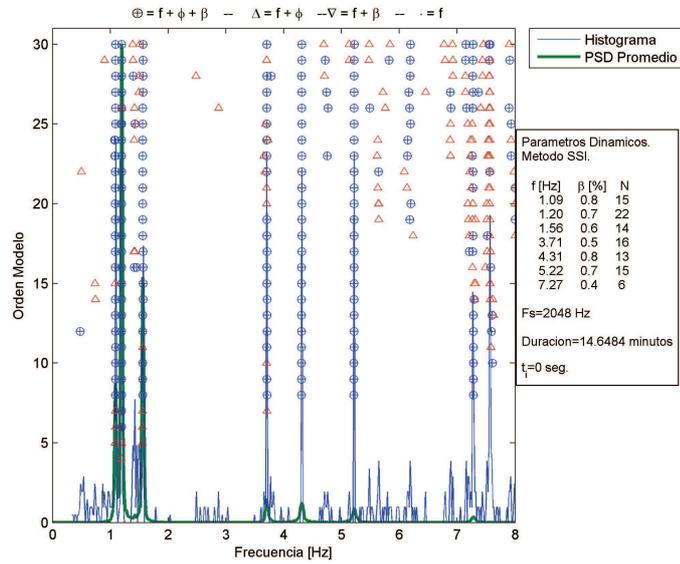


Figura 4.10: Diagrama de estabilización MED3

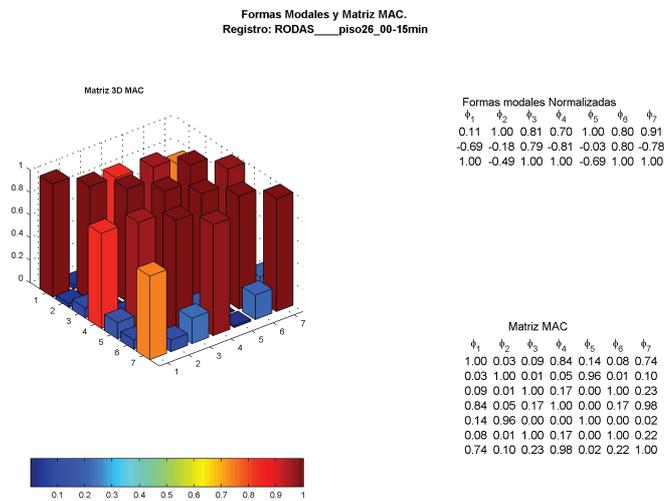


Figura 4.11: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED3

En los diagramas de estabilidad observados anteriormente, se puede apreciar las 7 primeras frecuencias naturales. También se observa la cercanía en las figuras entre las tres primeras frecuencias (entre 1.0Hz y 2.0Hz), la matriz MAC permite distinguir que los vectores asociados a estas tres

primeras frecuencias son independientes.

Para la medición MED2 se identifica una frecuencia en 3.96[Hz] sin embargo tiene un valor de 0.96 en su matriz MAC con respecto al modo anterior y por lo tanto es probable que ambas sean un sólo modo.

De las formas modales obtenidas se observa:

- Primer modo traslacional dirección E-W, con rotación en planta y frecuencia de 1.09[Hz].
- Segundo modo traslacional dirección N-S, con poca rotación en planta y frecuencia de 1.20[Hz].
- Tercer modo traslacional E-W, con una considerable rotación en planta y frecuencia de 1.56[Hz].
- Cuarto modo traslacional E-W, con una considerable rotación en planta y frecuencia de 3.71[Hz].
- Quinto modo traslacional N-S y frecuencia de 4.31[Hz].
- Sexto y séptimo modos traslacionales E-W, con una considerable rotación en planta, con frecuencias de 5.22[Hz] y 7.28[Hz] respectivamente.

En comparación con los parámetros dinámicos de la tabla 3.2 se observa:

- Similitudes entre las formas modales teóricas y medidas.
- Frecuencias identificadas alrededor de un 21 % mayor a las teóricas.

4.2. Edificio Velamar

Se realizaron tres mediciones en el piso 27 y dos en el piso 14, de las cuales se rescatan tres: MED6 y MED7, en el piso 27, MED8 en el piso 14. Los sensores siempre fueron localizados en las losas y apegados a los muros que les proporcionaban una dirección establecida. La distribución de los sensores en planta se observa en la figura 4.12 y es la misma para los dos pisos.

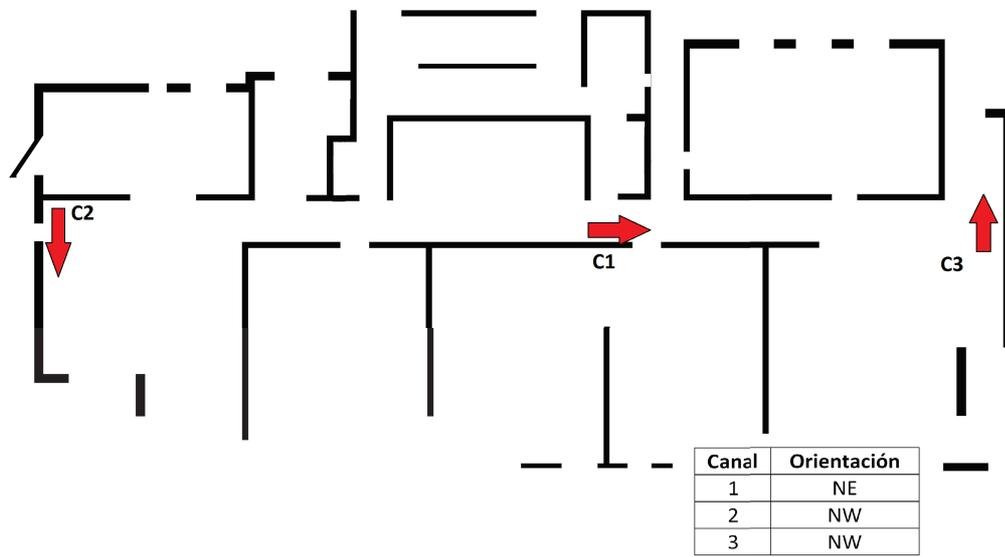


Figura 4.12: Configuración registros de vibraciones ambientales piso 27 y 14 Velamar

Las figuras 4.13 a la 4.15 muestran las series de tiempo de los tres registros de aceleraciones, en cada figura se muestran los tres canales de manera independiente durante aproximadamente 900 segundos.

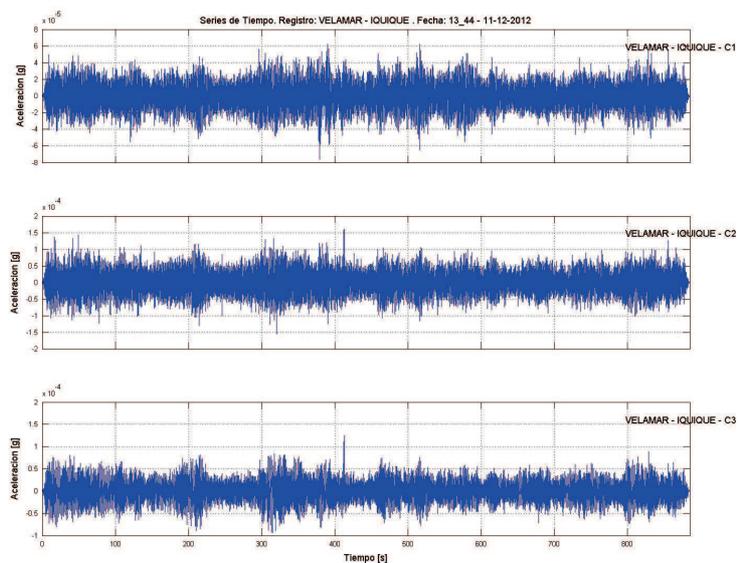


Figura 4.13: Registro MED6 - tres canales - piso 27 - Velamar

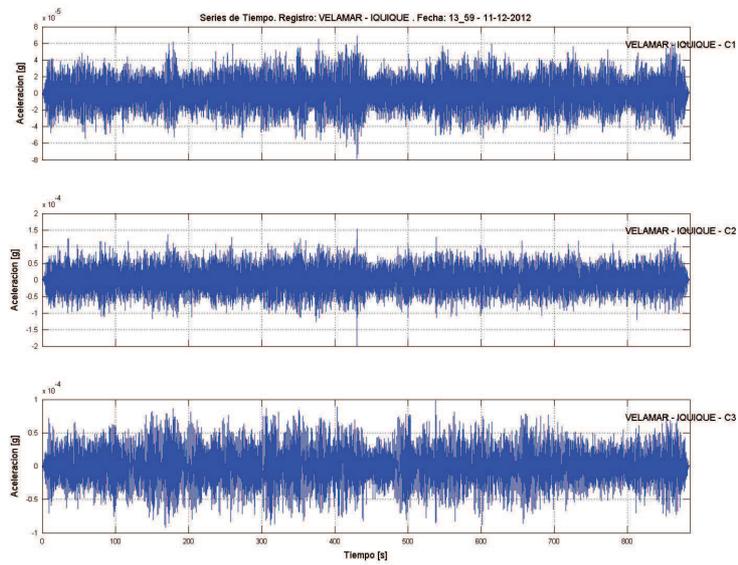


Figura 4.14: Registro MED7 - tres canales - piso 27 - Velamar

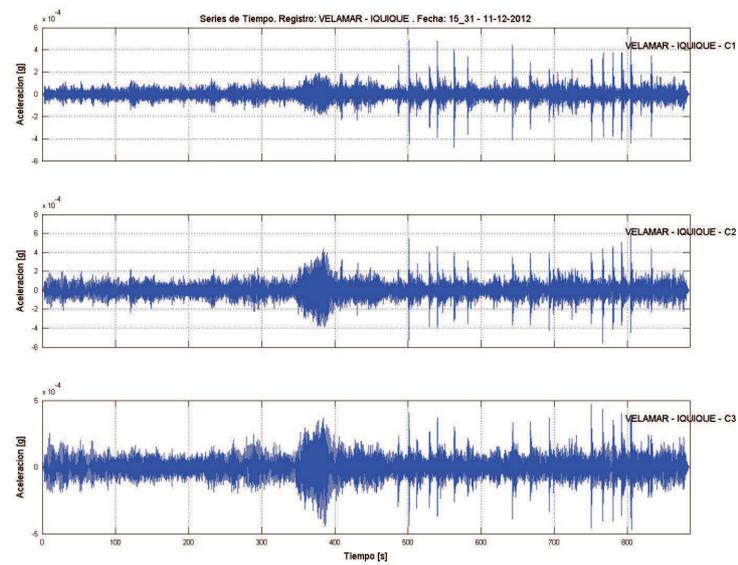


Figura 4.15: Registro MED8 - tres canales - piso 14 - Velamar

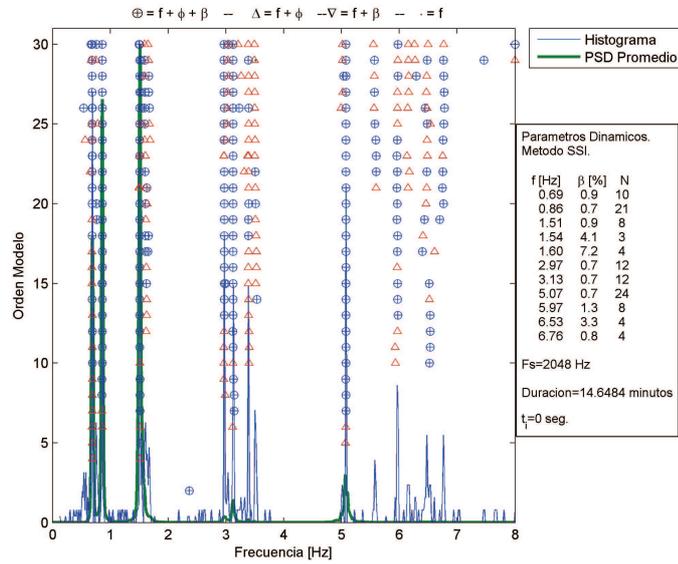


Figura 4.16: Diagrama de estabilización MED6

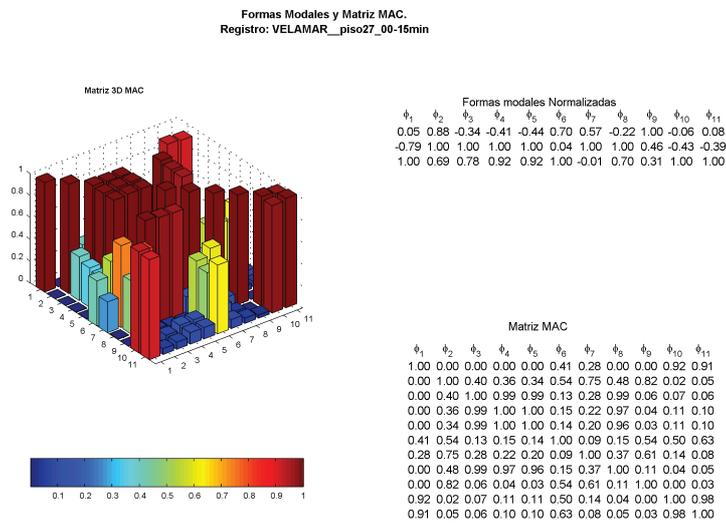


Figura 4.17: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED6

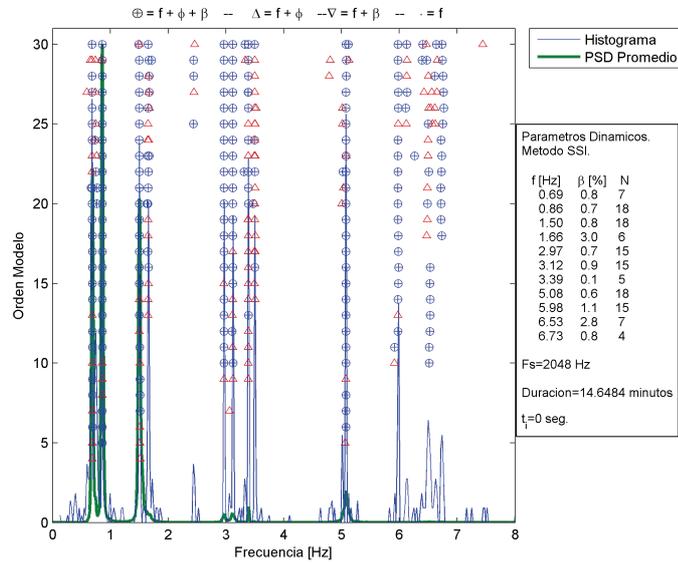


Figura 4.18: Diagrama de estabilización MED7

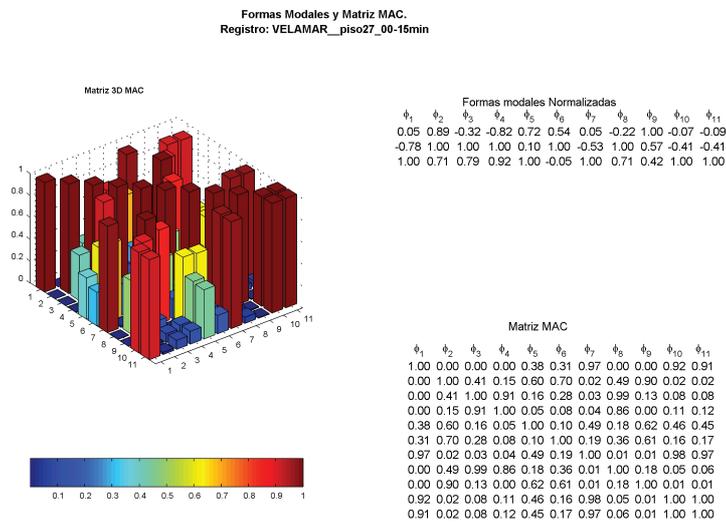


Figura 4.19: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED7

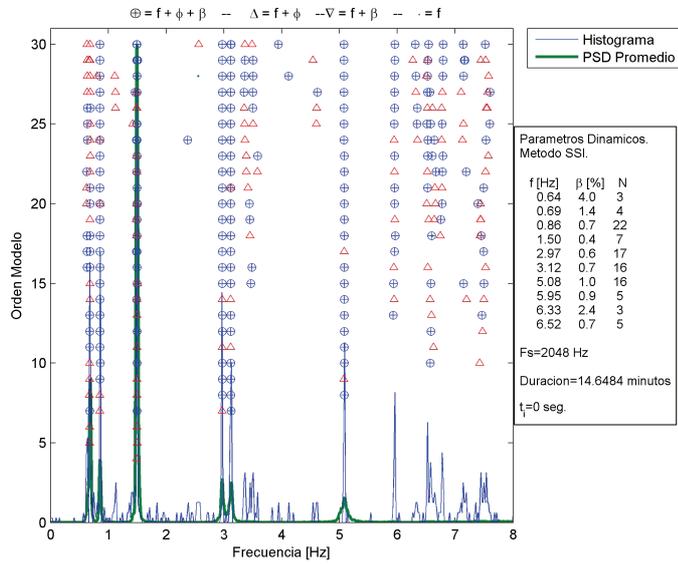


Figura 4.20: Diagrama de estabilización MED8

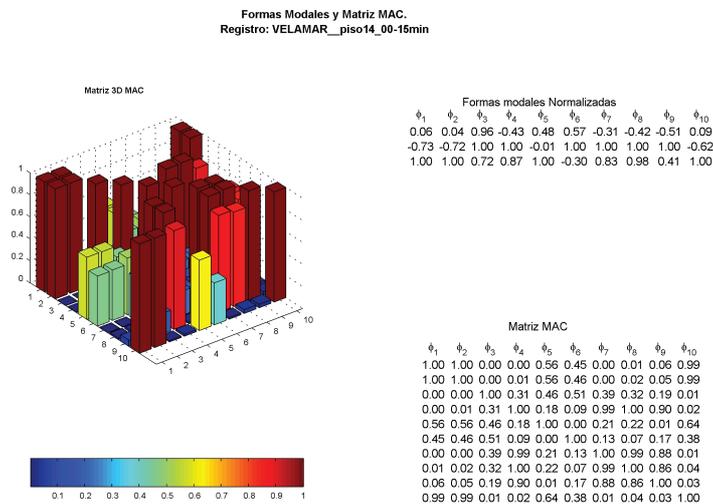


Figura 4.21: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED8

En los diagramas de estabilidad observados anteriormente, se puede apreciar las 8 primeras frecuencias naturales.

Para la medición MED6, analizando su matriz MAC, se observa que las frecuencias 3,4 y 5 corresponden al mismo set de parámetros.

Para la medición MED7, analizando su matriz MAC, se observa que las frecuencias 3 y 4 corresponden al mismo set de parámetros.

Para la medición MED8, analizando su matriz MAC, se observa que las frecuencias 1 y 2 corresponden al mismo set de parámetros.

En general se descartan modos en que el número N de triple aciertos sea muy bajo.

De las formas modales obtenidas se observa:

- Primer modo traslacional dirección NW con frecuencia de 0.69[Hz].
- Segundo modo traslacional dirección NE, con considerable rotación en planta y frecuencia de 0.86[Hz].
- Tercer modo traslacional dirección NE, con considerable rotación en planta y frecuencia de 1.50[Hz].
- Cuarto modo traslacional NE, con rotación en planta y frecuencia de 2.97[Hz].
- Quinto modo traslacional NE, con rotación en planta y frecuencia de 3.12[Hz].
- Modos sexto, séptimo y octavo con frecuencias de 5.08[Hz], 5.97 y 6.53[Hz] respectivamente.

En comparación con los parámetros dinámicos de la tabla 3.4 se observa:

- Evidentes similitudes entre las formas modales teóricas y medidas de los primeros 5 modos.
- Frecuencias identificadas alrededor de un 12 % mayor a las teóricas.

4.3. Edificio Portales

Se realizaron dos mediciones en el piso 18 y una en el piso 10, de ellas se rescatan las mediciones: MED9 y MED10 en el piso 18, MED11 en el piso 10. Los sensores siempre fueron localizados en las losas y apegados a los muros que les proporcionaban una dirección establecida. La distribución de los sensores en planta se observa en la figura 4.22 y es la misma para los dos pisos.

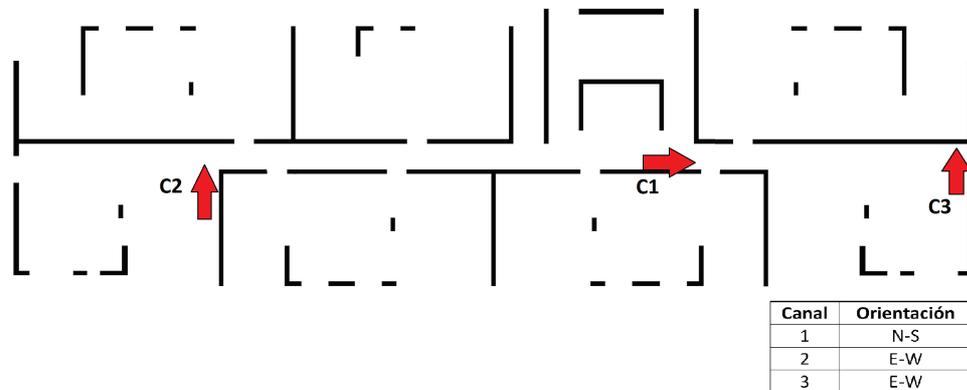


Figura 4.22: Configuración registros de vibraciones ambientales piso 18 y 10 Portales

Las figuras 4.23 a la 4.25 muestran las series de tiempo de los tres registros de aceleraciones, en cada figura se muestran los tres canales de manera independiente durante aproximadamente 900 segundos.

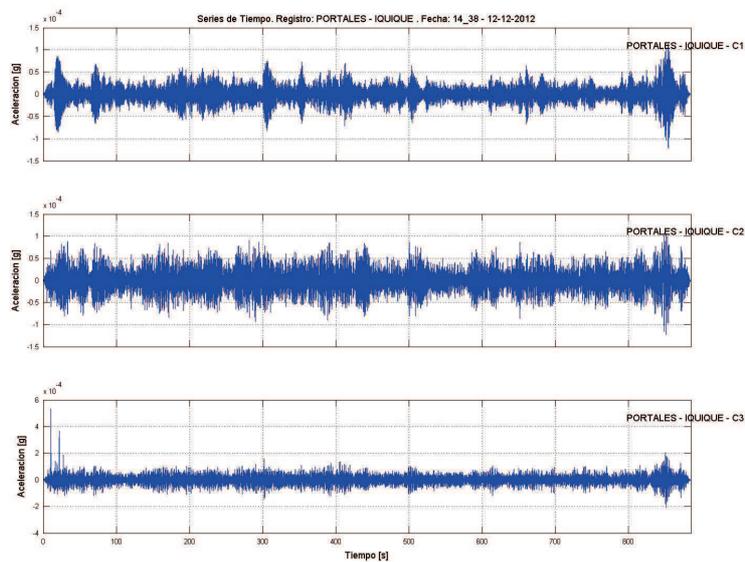


Figura 4.23: Registro MED9 - tres canales - piso 18 - Portales

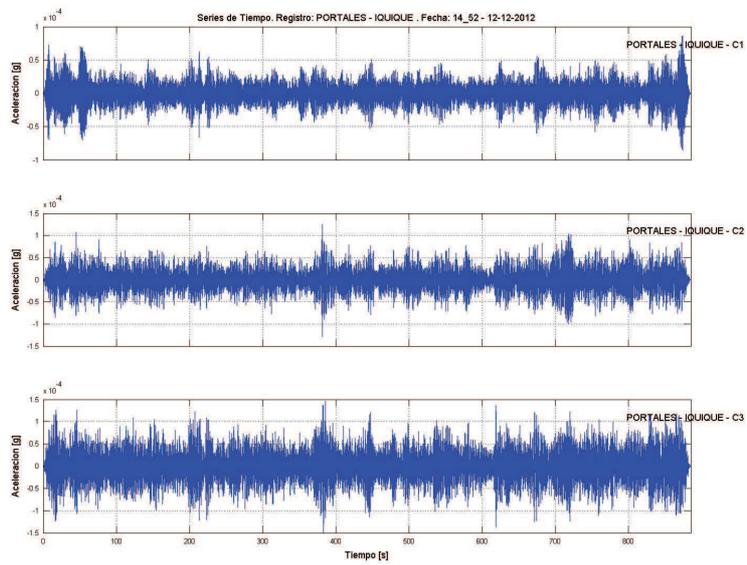


Figura 4.24: Registro MED10 - tres canales - piso 18 - Portales

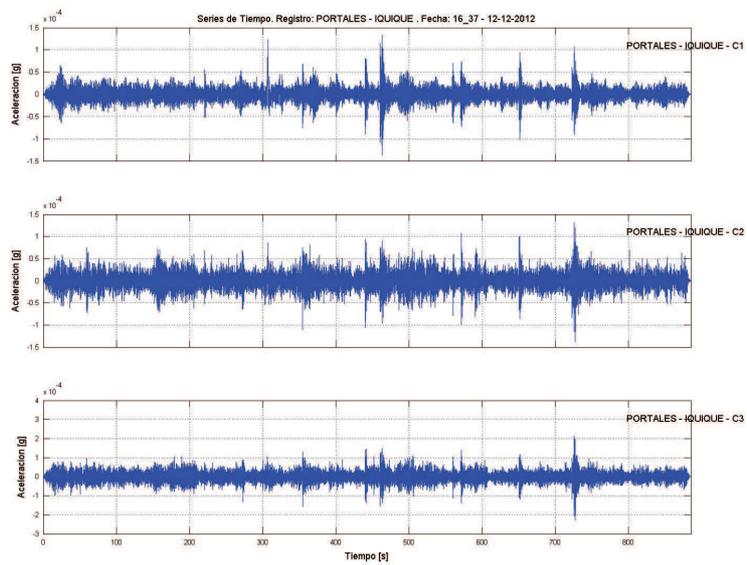


Figura 4.25: Registro MED11 - tres canales - piso 10 - Portales

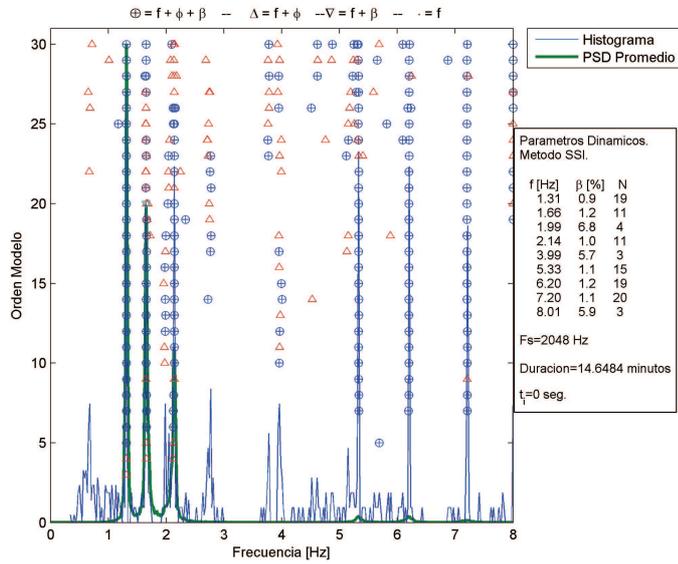


Figura 4.26: Diagrama de estabilización MED9

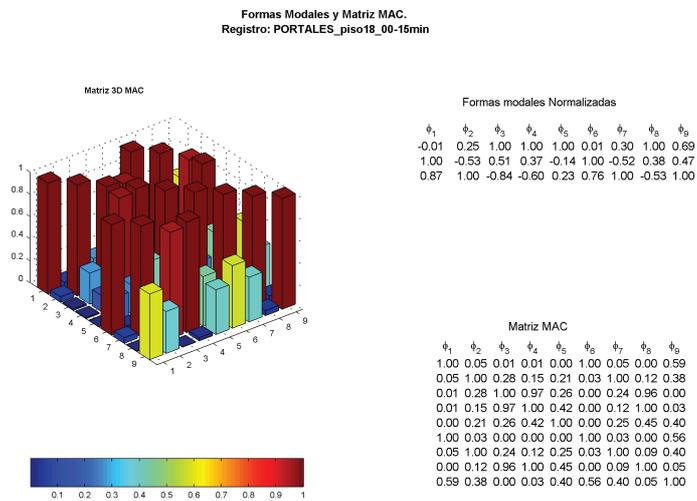


Figura 4.27: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED9

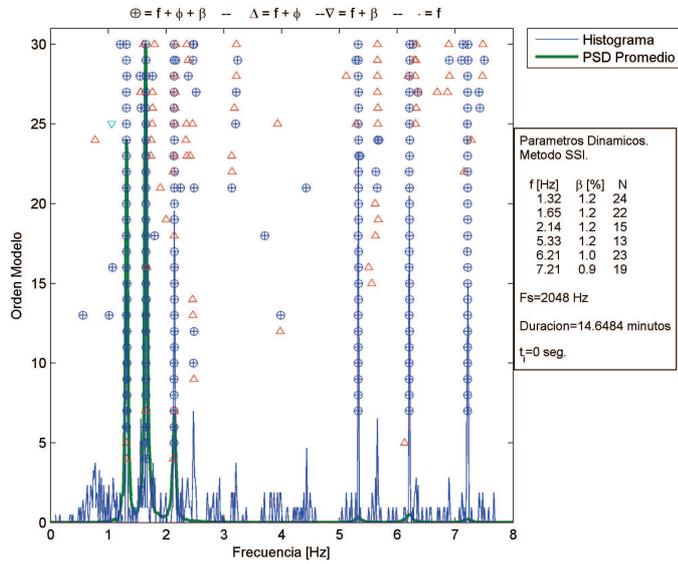


Figura 4.28: Diagrama de estabilización MED10

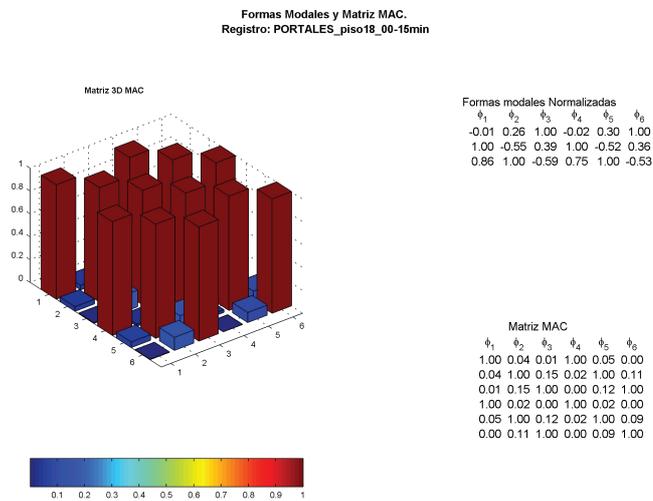


Figura 4.29: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED10

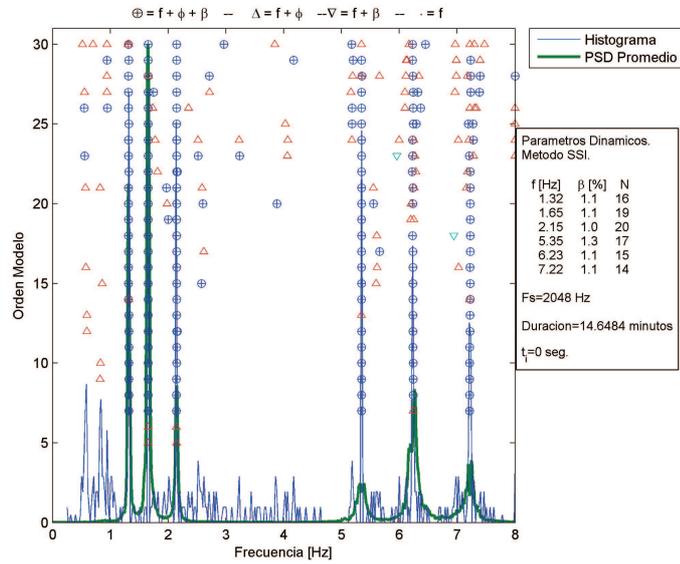


Figura 4.30: Diagrama de estabilización MED11

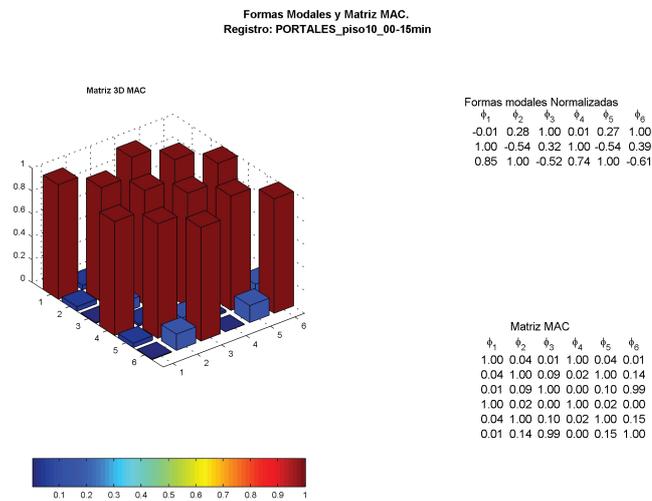


Figura 4.31: Matriz MAC de las formas modales identificadas en MED11

En los diagramas de estabilidad observados anteriormente, se puede apreciar las 6 primeras frecuencias naturales.

Para la medición MED9, analizando su matriz MAC, se observa que las frecuencias 3 y 4 corresponden al mismo set de parámetros. De esta medición se descarta además la frecuencia 3.99[hz] por tener un número N de triple aciertos muy bajo.

De las formas modales obtenidas se observa:

- Primer modo traslacional dirección E-W con frecuencia de 1.32[Hz].
- Segundo modo rotacional en planta con traslación N-S y frecuencia de 1.65[Hz].
- Tercer modo traslacional dirección N-S, con rotación en planta y frecuencia de 2.15[Hz].
- Cuarto modo traslacional dirección E-W, con rotación en planta y frecuencia de 5.33[Hz].
- Quinto modo rotacional en planta con traslación N-S y frecuencia de 6.21[Hz].
- Sexto modo traslacional dirección N-S, con rotación en planta y frecuencia de 7.21[Hz].

En comparación con los parámetros dinámicos de la tabla 3.6 se observa:

- Evidentes similitudes entre las formas modales teóricas y medidas de los primeros 6 modos.
- Frecuencias identificadas alrededor de un 22 % mayor a las teóricas.

Capítulo 5

DISEÑO DE LA INSTRUMENTACIÓN

Se describe a continuación el sistema de instrumentación a instalar en cada edificio. Se detalla el sistema de adquisición, procesamiento y transferencia de datos junto con la localización de sus componentes en cada una de las estructuras analizadas.

El sistema de instrumentación consta de una parte analógica y una parte digital. En la primera etapa un sensor registra datos de aceleraciones, enviando una señal analógica, la cual es modificada por un circuito eléctrico de manera de adaptarse a las necesidades requeridas por los demás componentes del sistema. La señal es digitalizada y transmitida a un ordenador donde se realiza su procesamiento mediante modelos matemáticos para luego exportar los resultados y archivos generados a una base de datos o servidor.

Las vibraciones a la cual se ve sometida una estructura pueden generarse por distintas circunstancias, que en general se agrupan en dos causas, vibraciones ambientales y eventos sísmicos. Las primeras son generadas por las condiciones de operatividad cotidianas del edificio, y por lo tanto son continuas, mientras que las segundas se deben a movimientos telúricos y necesitan que se establezca un umbral de gatillamiento que activa un algoritmo de “trigger”.

Los sensores quedarán instalados dentro de una caja estanca metálica de dimensiones similares la cual es empotrada a la losa o muro correspondiente. Por otro lado los equipos de adquisición, procesamiento y transmisión son ubicados dentro de un gabinete metálico con control de temperatura. Los equipos instalados poseen una potencia aproximada de 145W.

El sistema considera además la instalación de una UPS como respaldo ante un posible corte del suministro eléctrico y poder enviar registros completos hasta algunos minutos después del evento sísmico. La UPS deberá entregar una onda sinusoidal real y que no poseer tiempo de demora entre

su activación y el corte de la energía.

5.1. Sistemas de medición

Para medir las aceleraciones se utilizarán sensores EpiSensor ES-U2 de Kinemetrics, es un acelerómetro uniaxial de fuerza balanceada para superficie el cual puede ser usado en una gran variedad de aceleraciones, desde vibraciones ambientales hasta movimientos fuertes de $\pm 4g$. Sus dimensiones máximas son 5.5x6.5x9.7 cm y tiene un peso de 0.35 [kg].

Puede detectar movimientos de vibración en campo abierto o en estructuras desde 1Hz a 200Hz. El circuito del sensor permite cuatro tipos de salida: $\pm 2.5V$ sencilla, $\pm 10V$ sencilla, $\pm 5V$ diferencial o $\pm 20V$ diferencial. En este caso se utilizará la salida de $\pm 5V$ diferencial. Además posee un simple acceso para el ajuste de la señal a cero “Adjustment Access Hole” (ver figura 5.1). Normalmente es alimentado por una fuente externa de $\pm 12V$ DC.

El sensor mide aceleraciones en una dirección específica la cual se detalla por una flecha en uno de sus lados (ver figura 5.1). Según la orientación en que se instale este medirá aceleraciones en planta o en el eje vertical. El cambio posición le produce un “offset” a la señal entregada por el instrumento y por lo tanto es necesario re-ajustar la señal a cero al cambiar su disposición.

La instalación debe dejar espacio suficiente para taladrar agujeros y apretar las tuercas de montaje.

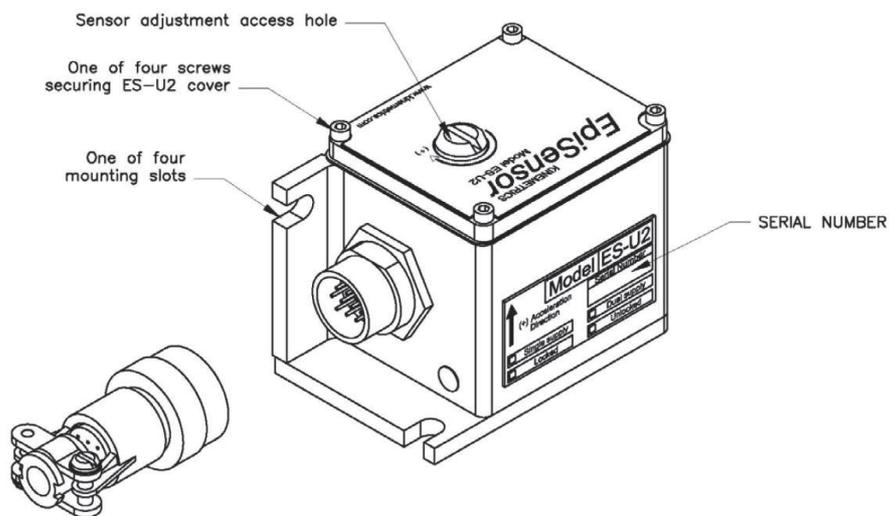


Figura 5.1: EpiSensor ES-U2 Kinemetrics. Imagen obtenida de “User Guide Model FBA ES-U2”

5.1.1. Tratamiento de la señal

La señal proporcionada por los sensores debe ser acondicionada para su posterior análisis. Se utilizarán tarjetas “DBK 18 - Measurement Computing”. Cada DBK 18 proporciona 4 canales de entrada, con filtro pasa-bajo y un amplificador de instrumentación independiente, a un “Logbook” u otro dispositivo de adquisición de datos “Daq”. Cada uno de los 16 canales puede aceptar cuatro tarjetas DBK18 logrando así un número máximo de 256 entradas analógicas.

5.1.2. Vibraciones ambientales

La señal proveniente de micro-vibraciones debe ser amplificada para diferenciarla del ruido eléctrico, pues este será perjudicial en la medida que su amplitud sea comparable a la amplitud de la señal principal. Conjuntamente la señal será pasada por un filtro pasa-bajo de 40Hz para manera eliminar las frecuencias altas asociadas al ruido y de asegurar que la frecuencia de muestreo sea al menos de 2.6 veces la mayor frecuencia que se quiera identificar en la señal.

5.1.3. Sismos

Para la adquisición de registros sísmicos se utilizará el mismo circuito que para vibraciones ambientales. La señal entregada por cada sensor será dividida en dos, la nueva señal está en paralelo con la original y es dirigida a un set distinto de tarjetas DBK 18 cuya configuración está diseñada para vibraciones de mayor orden, tienen ganancia cero. Las aceleraciones medidas durante un sismo son de gran magnitud y se diferencian fácilmente del ruido eléctrico, además si la vibración es muy grande podría generar un voltaje que dañe los equipos y por lo tanto no se amplificará la señal en ningún caso.

5.1.4. Adquisición

La adquisición de datos será realizada por un equipo IO-Tech Daqbook\2005 es un sistema de adquisición de datos basado en Ethernet de 16 bit de resolución que posee una frecuencia de muestreo de hasta 200 kHz, sin embargo esta se ve limitada por la capacidad de transmisión de datos al computador en relación a la cantidad de canales conectados. Su función principal será digitalizar los datos de los registros. Este dispositivo será controlado desde un ordenador mediante el Software LabView, el que generará archivos de texto con el registro de aceleraciones (voltajes), ubicando en distintas columnas cada uno de los canales conectados al sistema. Desde Labview se controlará la frecuencia de muestreo del Daq la cual será de 125 Hz.

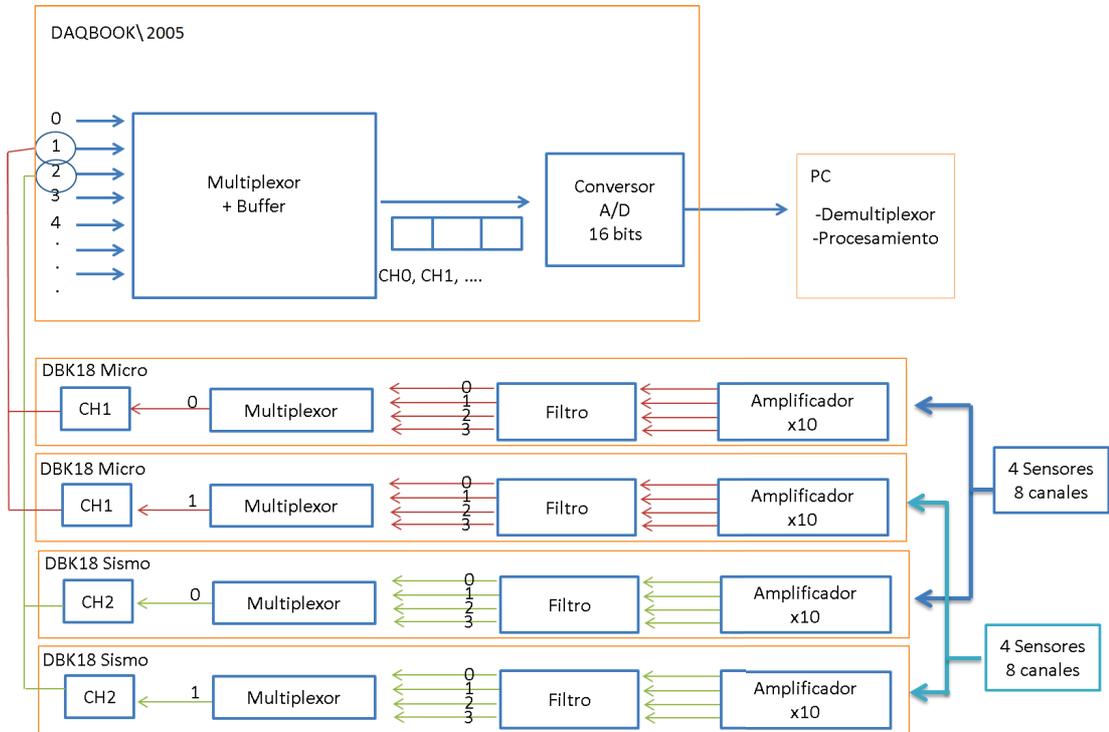


Figura 5.2: Esquema Adquisición de datos para 8 sensores

El sistema de instrumentación descrito poseerá multiplexores y en general transmitirá las señales en serie, en consecuencia el Daq asigna a cada canal una dirección que corresponde a la ruta específica por la cual la señal es transmitida desde el sensor al ordenador. Cada canal tiene una ruta única con la cual es identificado para el posterior procesamiento de la señal.

5.1.5. Procesamiento y transmisión

En Matlab se diseñará rutina de monitoreo estructural, la cual estará constantemente verificando la creación de nuevos registros, en este caso se procesan los datos con las rutinas de PSD y SSI para vibraciones ambientales. La rutina genera figuras, archivos “.mat” y “.txt” con los resultados del proceso. La información será respaldada en el disco duro del ordenador y a la vez transmitida por Internet hacia el servidor de la Universidad.

5.2. Localización de los equipos

Se realizó una visita a la ciudad de Iquique la semana del lunes 10 al viernes 14 de diciembre del 2012. Se visitaron todos los edificios con el fin de ver las condiciones para la instrumentación, sus ubicaciones se ven en la figura 5.3.

La localización de todos los equipos y sus respectivos cables se realizará en áreas comunes de los edificios, dentro de salas o shaft ya construidos. Estos instrumentos estarán registrando vibraciones constantemente y se pronostica una mantención al menos una vez al año realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

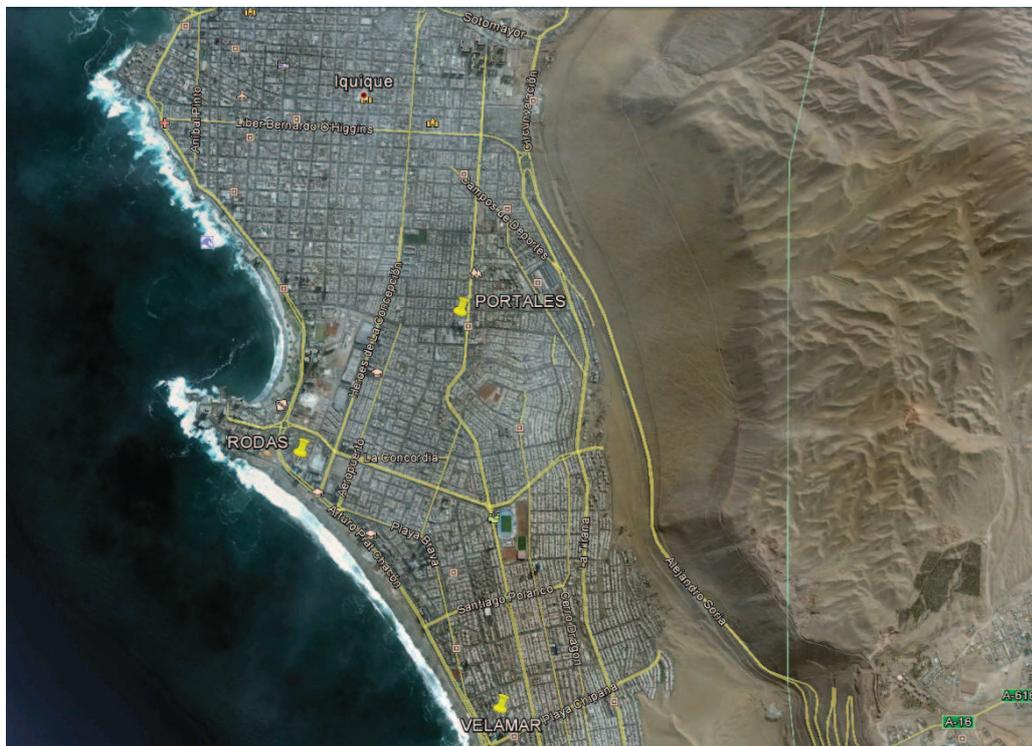


Figura 5.3: Ubicación Edificios Iquique. *Imagen obtenida de Google Earth.*

5.2.1. Edificio Rodas

Se visitó los días lunes 10 y jueves 13 de diciembre, se realizó un recorrido general por el edificio con un profesional de terreno quien explicaba los detalles y aspectos importantes de la construcción.

El edificio está ubicado en la costanera de Iquique muy próximo al mar y por lo tanto en la zona inundable por tsunami (figura 5.3), es parte de un conjunto habitacional de 4 torres, 3 de las

cuales ya están construidas. Actualmente está en las terminaciones y se pronostica su término para el mes de marzo y la entrega definitiva al comité de propietarios para el mes de junio del 2013.

Según los planos estructurales y el modelo ETABS existe un nivel -2, sin embargo este piso quedará sellado pues no es contemplado por la arquitectura del proyecto y sólo fue utilizado para alcanzar la profundidad de la roca. Las fundaciones y muros perimetrales en el subterráneo están impermeabilizadas pues la napa de agua llega prácticamente a nivel de terreno.

El primer subterráneo corresponde a espacio para bodegas, sala eléctrica, sala de basura y sala bombas sistema de ventilación caja de escaleras, este nivel tiene salida a la placa de estacionamiento. Los pisos uno y dos son completamente de áreas comunes: salones, gimnasio, acceso a piscina, acceso a estacionamientos y terrazas. Desde el piso tres en adelante las plantas son iguales sólo con variaciones en los espesores de los muros y poseen cinco departamentos por piso.

Al ser un edificio de uso privado los lugares donde es factible posicionar instrumentos y equipos de mediciones corresponden a espacios comunes. En este caso la sala del shaft eléctrico, la caja de escaleras y el pasillo son lugares disponibles en todos los pisos superiores al nivel 2.

A pesar que el subterráneo posee espacios y condiciones ideales para la instalación del gabinete con los equipos no se utilizará con dicho fin pues es un lugar con riesgo de inundación ante un posible tsunami. Se buscará un lugar en los pisos superiores de manera que el sistema pueda seguir funcionando en condiciones extremas.

Las formas modales de los primeros nueve modos (Figuras 3.4 a la 3.12) muestran los tres primeros modos de vibrar de la estructura en las tres direcciones de análisis, dos direcciones traslacionales perpendiculares y una rotacional en planta, los sensores de aceleración deben ubicarse en zonas donde se registrarán mayores desplazamientos. Las figuras muestran en color rojo los antinodos de cada forma modal y entrega una notable referencia para ubicar los instrumentos en elevación.

Las primeras ocho formas modales muestran un antinodo en el piso superior, por lo tanto se ubicarán sensores en el piso 25 de manera de registrar estos desplazamientos y evitar las posibles singularidades generadas en el piso 26 por ser el último nivel.

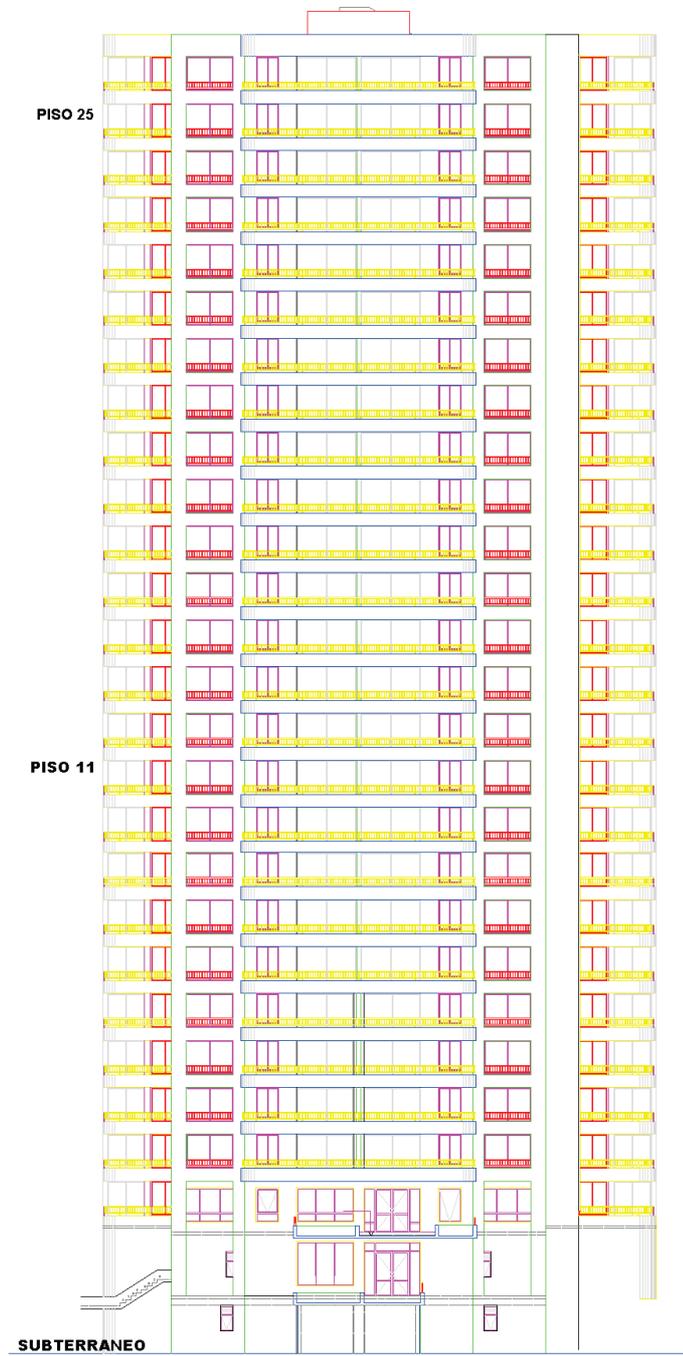


Figura 5.4: Elevación Principal Edificio Rodas

El segundo modo de vibrar agrega una zona de grandes desplazamientos en pisos cercanos

a la mitad del edificio, para ello se instalarán sensores en el piso 11. El tercer modo de vibrar posee antinodos en los pisos 5 y 17, sin embargo la cantidad de masa equivalente de este modo es aproximadamente un 5% y por lo tanto no se considera en esta etapa la instalación de sensores en esos pisos.

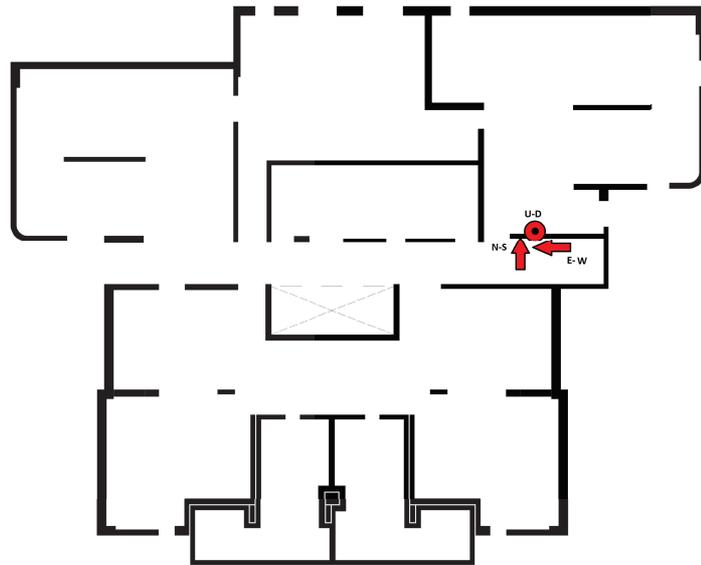


Figura 5.5: Planta Piso -1 Edificio Rodas – Sala de medidores eléctricos

En el subterráneo se consideran tres sensores, dos de ellos midiendo en direcciones ortogonales en planta y un tercero en dirección vertical. Irán ubicados en la sala eléctrica y sus cables subirán por el ducto de corrientes débiles como se ve en la Figura 5.6.

La Sala Eléctrica posee medidores eléctricos, el ducto de corrientes débiles y los tubos de basura, estos últimos cambian su posición en altura.



Figura 5.6: Disposición de sensores piso (-1) - Sala de medidores eléctricos

Para la disposición de acelerómetros en planta en los niveles 11 y 25 se consideran dos sensores midiendo en direcciones paralelas distribuidos a la largo del piso, de manera de capturar la torsión en cada nivel, y un sensor en dirección perpendicular. Se agrega además un sensor vertical en el piso 25.

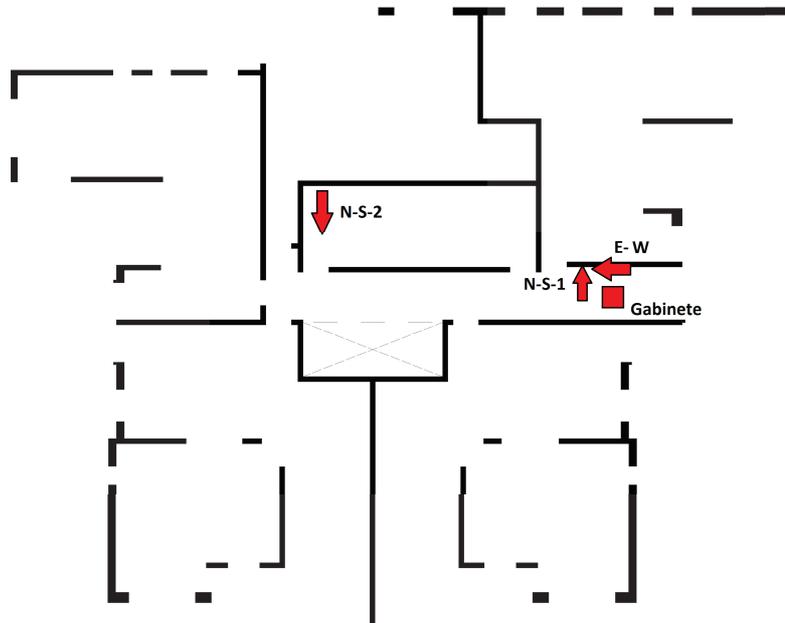


Figura 5.7: Disposición de sensores planta Piso 11 Edificio Rodas

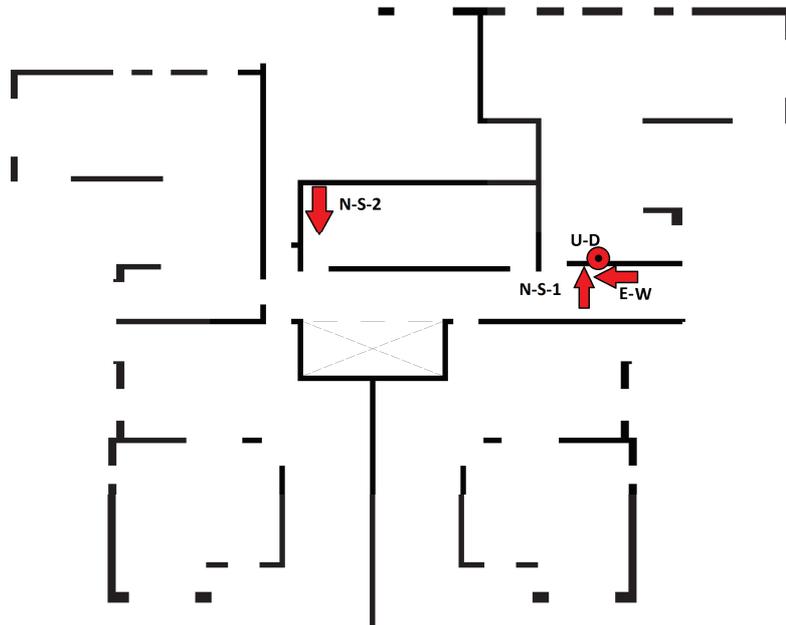


Figura 5.8: Disposición de sensores planta Piso 25 Edificio Rodas

En ambos pisos el sensor N-S-2 se ubicará a un costado de la caja de escalera en la sala correspondiente la red seca como se ve en las imágenes 5.9 y 5.10.

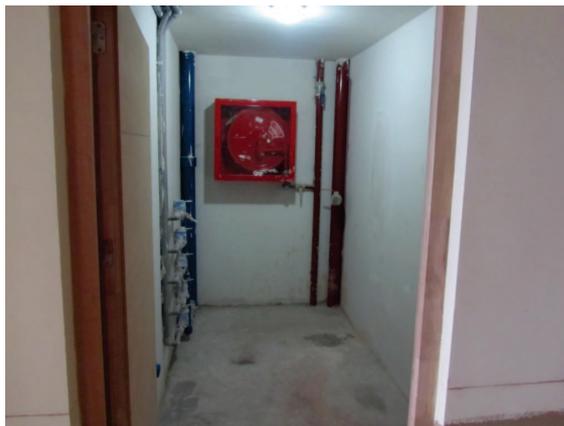


Figura 5.9: Sala Red Seca



Figura 5.10: Ubicación sensor N-S-2 pisos 11 y 25

Los cables desde los sensores N-S-2 se llevarán a la sala eléctrica en cada piso por medio de una cornisa existente la cual cumple el objetivo de ocultar las cañerías de agua potable.



Figura 5.11: Cornisa cañerías de agua - Cielo pisos 11 y 25

En la sala eléctrica los sensores se ubicarán en el muro a un costado del ducto de corrientes débiles.



Figura 5.12: Ubicación sensores sala electrica pisos 11 y 25

Por arquitectura se contempla un Closet ecológico entre los ductos de basura y el conducto de corrientes débiles, este espacio será utilizado en el piso 25 para la ubicación de un gabinete al cual llegan los cables de los sensores y que contiene el sistema de adquisición y procesamiento de los datos.

Frente a los ductos de basura están los medidores eléctricos y una salida de corriente de 220V-AC desde donde se alimentará todo el sistema de registros.



Figura 5.13: Sala Eléctrica piso 11 – Sala Eléctrica



Figura 5.14: Medidores piso 11 – Punto de corriente

En definitiva el sistema general se aprecia en la figura 5.15. El resumen se muestra en la tabla 5.1.

Piso	N°	Orientación	ID Sensor
Subterráneo	3	N-S	R1
		E-O	R2
		Vertical	R3
11	3	N-S-1	R4
		N-S-2	R5
		E-O	R6
25	4	N-S-1	R7
		N-S-2	R8
		E-O	R9
		Vertical	R10
TOTAL	10		

Tabla 5.1: Número de sensores y su orientación Edificio Rodas

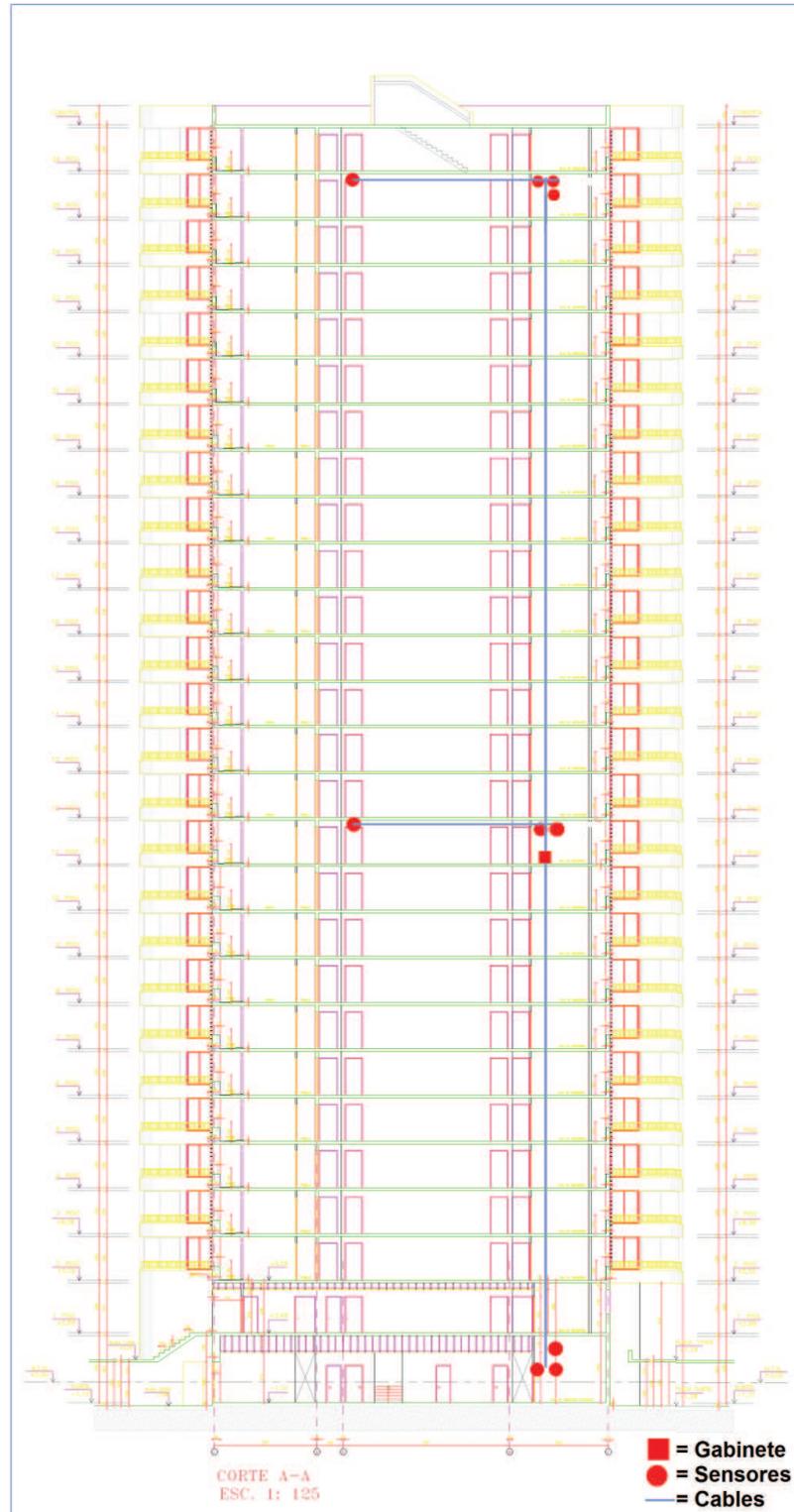


Figura 5.15: Sistema de instrumentación general Edificio Rodas

5.2.2. Edificio Velamar Torre 1

Se visitó el día martes 11 de diciembre del 2012, se realizó un recorrido general por el edificio con un profesional de terreno quien explicaba los detalles y aspectos importantes de la construcción.

El edificio está ubicado en el sector de Playa Brava a 150 metros de la costa y dentro del área inundable por tsunami (figura 5.3). Actualmente está en las terminaciones y se pronostica su término y entrega definitiva a propietarios para el primer semestre del 2013.

Ambas torres poseen cambios de geometría importantes que pueden cambiar o amplificar las vibraciones tal como se aprecia en sus formas modales (figuras 3.17 a la 3.25). Debido a las variaciones de la planta en altura se considera la instalación de sensores en cuatro niveles de la estructura. Para las primeras 8 formas modales el piso 26 posee los máximos desplazamientos unitarios y por lo tanto es un punto de interés para instrumentar, sin embargo se instalará sensores en el piso 25 para evitar singularidades generadas por el término del edificio en altura. El piso 27 posee un notable cambio de geometría donde su área en planta disminuye de $415[m^2]$ a $270[m^2]$, de esta manera se escoge el piso 26 para la colocación de sensores. El segundo modo de vibrar representado en las figuras 3.20 a la 3.22 tiene un antinodo en el piso 13 y por lo tanto se instrumentará. Por último habrán sensores en el tercer subterráneo de manera de conocer las vibraciones a nivel del suelo.



Figura 5.16: Elevación Principal Edificio Velamar

En el 3° subterráneo se consideran 4 sensores, distribuidos en la planta como se ve en la figura 5.17, los cables se trasladan por el cielo del nivel hasta el ducto de corriente débil del shaft eléctrico que se muestra en la figura 5.17. Se consideran dos sensores verticales por un posible efecto buckling al ser suelo tipo III.

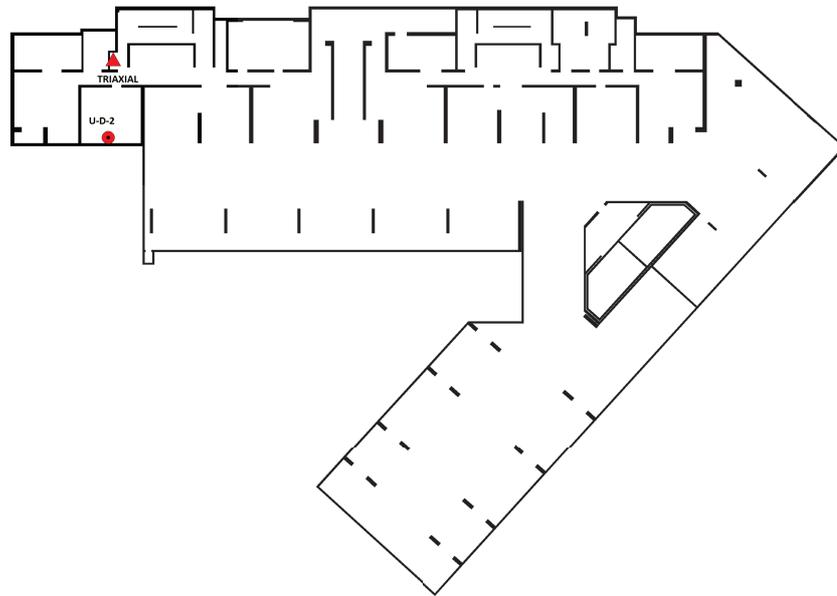


Figura 5.17: Planta Piso -3 Ubicación de sensores

En el piso 13 se consideran dos sensores paralelos para medir rotación en planta, estos se ubicarán en el shaft eléctrico y shaft de agua potable tal como se ve en la figura 5.18. Además se instalará un sensor en dirección Nor-Oriente ortogonal a los anteriores. En este piso intermedio se medirán desplazamientos asociados al segundo modo de vibrar observado en las formas modales 4,5 y 6.

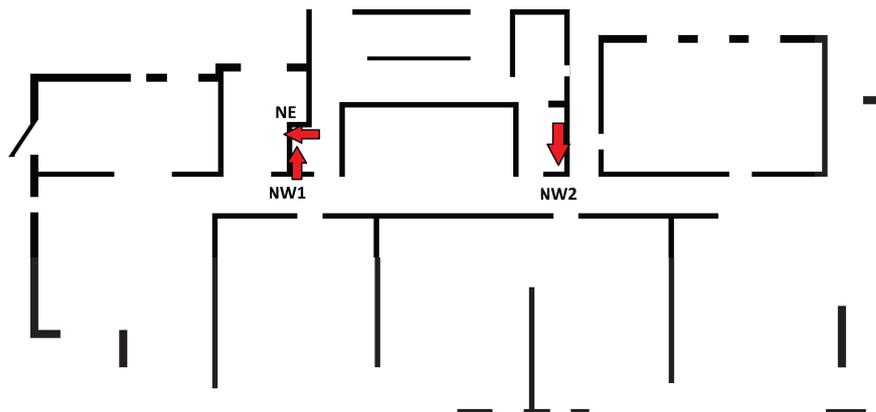


Figura 5.18: Planta Piso 13 Ubicación de sensores

En el piso 26 La distribución de los sensores es análoga al piso trece. La ubicación de sus sensores se ve el figura 5.19.

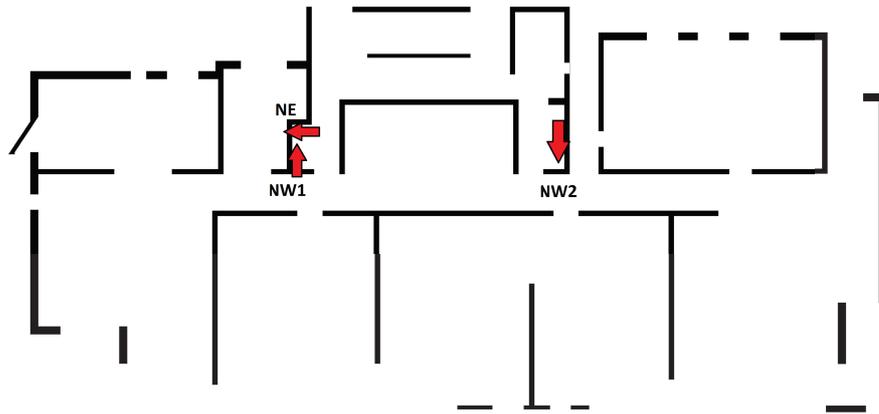


Figura 5.19: Ubicación de sensores Planta Piso 26

En los pisos 26 y 29 se miden desplazamientos asociados al primer modo de vibrar que posee un antinodo en la parte superior del edificio, sin embargo el cambio de geometría en el piso 28 hace necesario medir en niveles anteriores y posteriores a él. Se agrega además un sensor en posición vertical para comparar con las vibraciones registradas en la base. Ver figura 5.20.

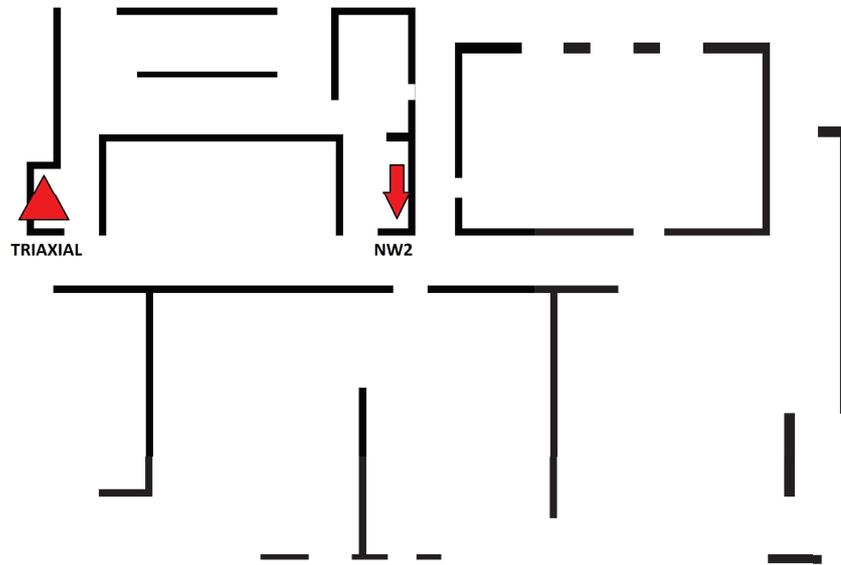


Figura 5.20: Planta piso 29 Edificio Velamar

En cada nivel los cables de los sensores ubicados en el shaft de medidores de agua serán trasladados por la cornisa que encierra las cañerías de agua potable hasta el shaft eléctrico ubicado al otro extremo de la caja de ascensores, donde subirán hasta el último piso por el ducto de corrientes débiles.



Figura 5.21: Interior Sala Medidores de Agua



Figura 5.22: Cornisa transporte de cañerías



Figura 5.23: Cañerías sin cornisa a lo largo del pasillo



Figura 5.24: Shaft eléctrico sin puertas vista

El ducto de corrientes débiles llega hasta la sala de máquinas, este lugar tiene acceso restringido, posee conexión a red eléctrica (220V AC) además de posibilidad de conexión a punto de red y por lo tanto es donde se ubicará el gabinete con los sistemas de adquisición y procesamiento. El sistema general de instrumentación vista en elevación se muestra en la figura 5.25.

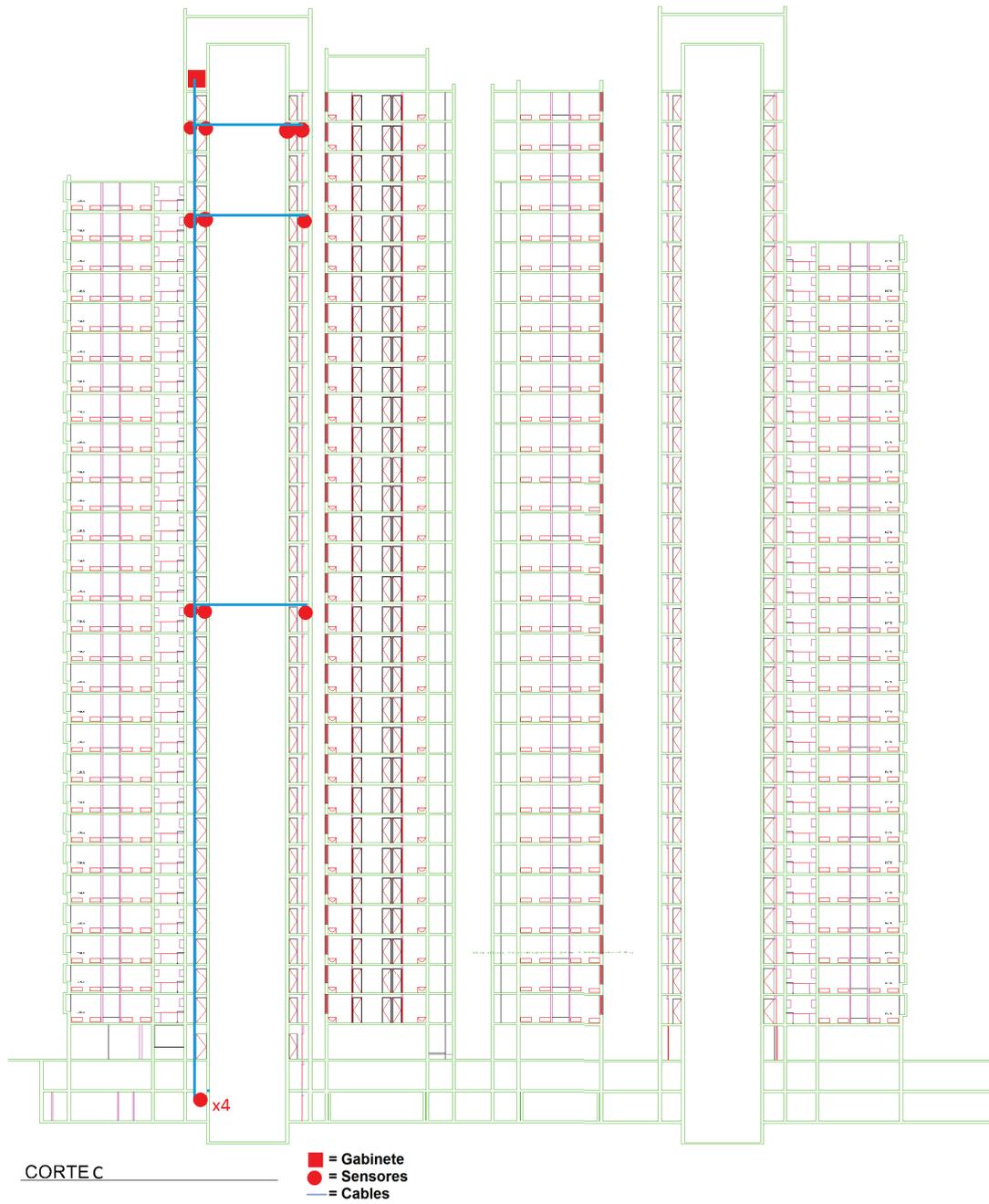


Figura 5.25: Sistema de instrumentación general Edificio Velamar

El resumen se muestra en la tabla 5.2.

Piso	N°	Orientación	ID Sensor
Subterráneo 3°	4	NW	V1
		NE	V2
		Vertical 1	V3
		Vertical 2	V4
13	3	NW-1	V5
		NW-2	V6
		NE	V7
26	3	NW-1	V8
		NW-2	V9
		NE	V10
29	4	NW1	V11
		NW2	V12
		NE	V13
		Vertical	V14
TOTAL	14		

Tabla 5.2: Número de sensores y su orientación Edificio Velamar

5.2.3. Edificio Diego Portales Torre B

Se visitó el día miércoles 12 de diciembre del 2012, la torre A ya se encuentra terminada por lo tanto sólo se recorrió la torre B la cual está en sus terminaciones. El edificio se encuentra en avenida Diego Portales 2040 Iquique a unos 1200[m] de la costa y por lo tanto queda fuera del área inundable por tsunamis, su ubicación se ve en la figura 5.3.

El edificio es regular en su elevación, el subterráneo está destinado a bodegas, sala de basura y transporte de cables. El primer piso posee un gimnasio, sala múltiple y hall de acceso, desde el nivel 2 en adelante las plantas se mantienen iguales sólo con variaciones en los espesores de muros. Posee una estructuración esbelta, sin embargo por condiciones del edificio no es posible distribuir sensores verticales en la distancia menor de la planta del subterráneo para medir un posible efecto Bucling.

Para sus primeras seis formas modales el edificio presenta antinodos en los pisos 8 y 19, sin embargo se evita el último piso pues se generan singularidades por el cambio de geometría. En consecuencia se consideran instrumentos en tres niveles pisos como se muestra en la figura 5.26.

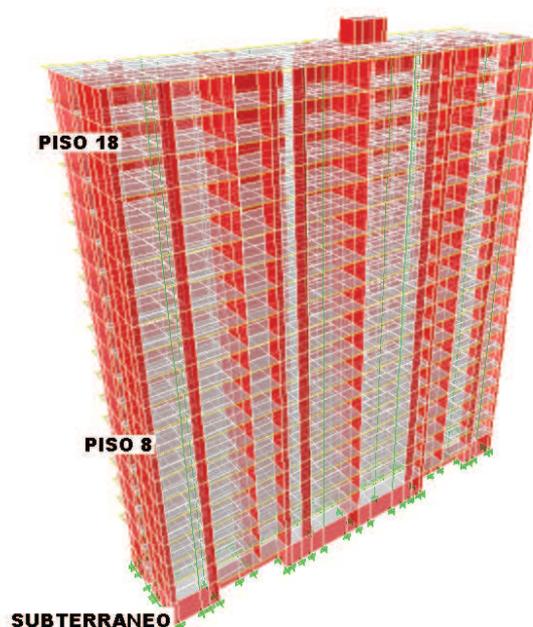


Figura 5.26: Vista Isométrica Edificio portales Torre B

El edificio posee dos shaft eléctricos los cuales se distribuyen en planta a 21 [m] de separación

y sus respectivos ductos de corrientes débiles recorren toda la altura del edificio. En el subterráneo ambos están conectados por la red de cables que recorre el cielo de este nivel y por lo tanto es factible conectar ambos shaft en este piso. (Figura 5.27).



Figura 5.27: Pasillo Subterráneo canal de cables

El edificio está fuera de la zona de inundación de tsunami por lo que es posible la instalación de equipos de registro en niveles inferiores.

En el subterráneo se consideran tres sensores, dos en direcciones ortogonales, Norte y Oeste, y un tercero vertical, ubicados en un arreglo tri-axial en el shaft eléctrico Sur. El shaft norte sólo recibe los cables provenientes de niveles superiores.

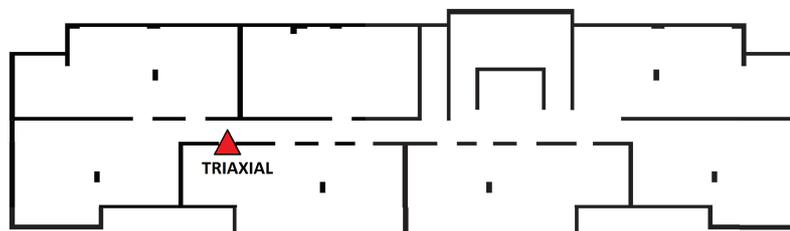


Figura 5.28: Planta Subterráneo Edificio Portales Torre B – Shaft Eléctricos

En el piso 8 se consideran tres sensores, dos paralelos en dirección Oeste que registran la rotación en planta y un tercero ortogonal en dirección Norte. (Figura 5.29).

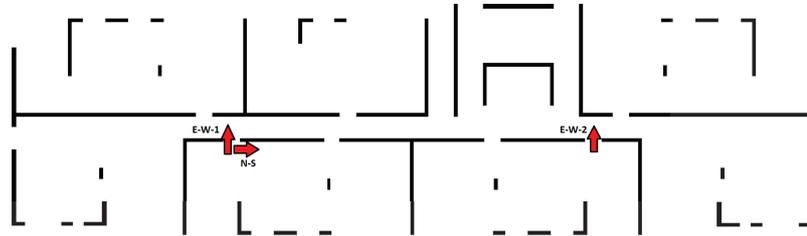


Figura 5.29: Planta Piso 8 Edificio Portales Torre B – Shaft Eléctricos

En el piso 18 la disposición de los sensores es análoga a la del piso 8 pero se suma un sensor vertical para comparar con las vibraciones del subterráneo, nuevamente se genera un arreglo tri-axial en el shaft eléctrico Sur. (Figura 5.30).

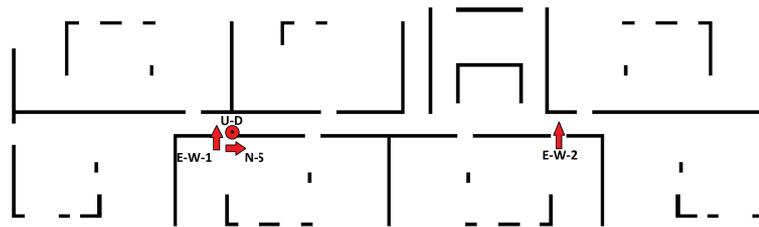


Figura 5.30: Disposición de sensores Piso 18 Portales

Todos los shaft poseen conexión a la red eléctrica 220V AC y la posibilidad de conectarse a punto de red. (ver Figuras 5.31 y 5.32).



Figura 5.31: Shaft Eléctrico Sur Subterráneo – Ubicación caja de registro Portales



Figura 5.32: Shaft Eléctrico Sur y Norte Piso Tipo Portales – Lugar instalación de sensores

El sistema general de instrumentación vista en elevación se muestra en la figura 5.33 y el resumen de equipos en la tabla 5.3.

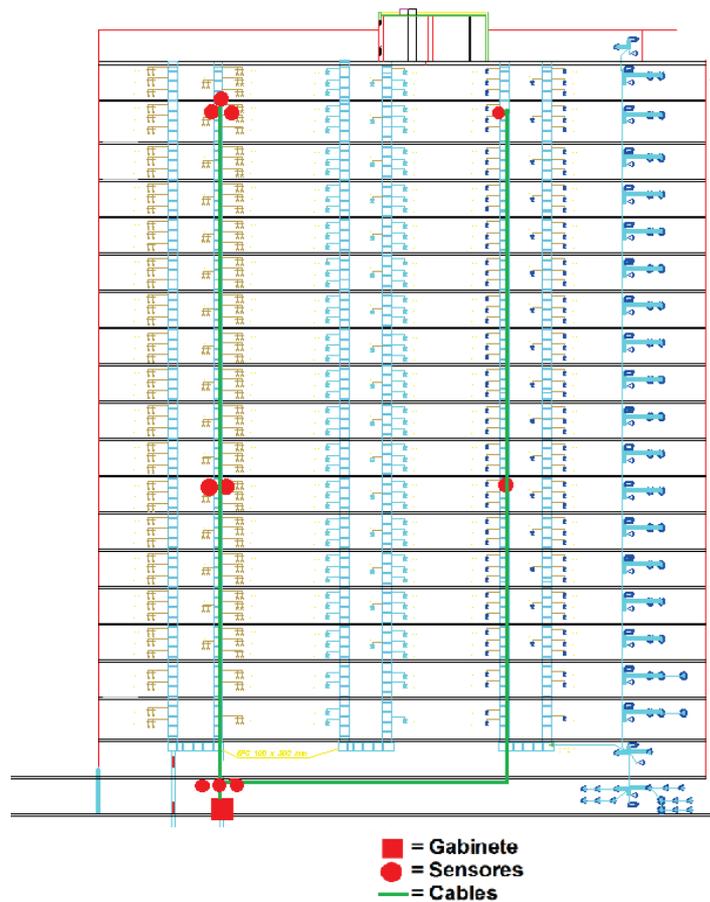


Figura 5.33: Red General de Instrumentación Portales

Piso	N°	Orientación	ID Sensor
Subterráneo	3	N	P1
		E	P2
		Vertical	P3
8	3	E-1	P4
		E-2	P5
		N	P6
18	4	E-1	P7
		E-2	P8
		N	P9
		Vertical	P10
TOTAL	10		

Tabla 5.3: Número de sensores y su orientación Edificio Portales

5.3. Canales utilizados

La ruta de los canales para los tres edificios se muestra en la tabla 5.4. El “ID Canal” corresponde al “ID Sensor” de las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 agregándole “_M” si corresponde al canal para vibraciones ambientales (micro-vibraciones) y “_S” si corresponde al canal de sismo. El primer número de la ruta corresponde al “CH” de cada DBK18 (Output), en general el CH1 corresponde a microvibraciones y CH2 a sismo, sin embargo los últimos dos canales de cada edificio fueron ruteados al CH3 para no tener que utilizar una tarjeta extra. El segundo número corresponde a la identificación de la tarjeta DBK18 agregada a cada CH, en los edificios Rodas y Portales existen sólo 2 tarjetas conectadas a cada canal (0 y 1), el edificio Velamar posee tres tarjetas a cada CH (0, 1 y 2). El tercer número corresponde a la identificación de cada uno de los cuatro canales que llegan a las tarjetas (Imput).

Edificio	ID Canal	Ruta	Edificio	ID Canal	Ruta	Edificio	ID Canal	Ruta
Rodas	R1_M	1-0-0	Velamar	V1_M	1-0-0	Portales	P1_M	1-0-0
	R1_S	2-0-0		V1_S	2-0-0		P1_S	2-0-0
	R2_M	1-0-1		V2_M	1-0-1		P2_M	1-0-1
	R2_S	2-0-1		V2_S	2-0-1		P2_S	2-0-1
	R3_M	1-0-2		V3_M	1-0-2		P3_M	1-0-2
	R3_S	2-0-2		V3_S	2-0-2		P3_S	2-0-2
	R4_M	1-0-3		V4_M	1-0-3		P4_M	1-0-3
	R4_S	2-0-3		V4_S	2-0-3		P4_S	2-0-3
	R5_M	1-1-0		V5_M	1-1-0		P5_M	1-1-0
	R5_S	2-1-0		V5_S	2-1-0		P5_S	2-1-0
	R6_M	1-1-1		V6_M	1-1-1	P6_M	1-1-1	
	R6_S	2-1-1		V6_S	2-1-1	P6_S	2-1-1	
	R7_M	1-1-2		V7_M	1-1-2	P7_M	1-1-2	
	R7_S	2-1-2		V7_S	2-1-2	P7_S	2-1-2	
	R8_M	1-1-3	V8_M	1-1-3	P8_M	1-1-3		
	R9_S	2-1-3	V9_S	2-1-3	P9_S	2-1-3		
R10_M	3-0-0	V10_M	1-2-0	P10_M	3-0-0			
R10_S	3-0-1	V10_S	2-2-0	P10_S	3-0-1			
		V11_M	1-2-1					
		V11_S	2-2-1					
		V12_M	1-2-2					
		V12_S	2-2-2					
		V13_M	1-2-3					
		V13_S	2-2-3					
		V14_M	3-0-0					
		V14_S	3-0-1					

Tabla 5.4: Identificación de canales y rutas

5.4. Cubicación y costos

La cantidad y tipo de instrumentos utilizados deriva del sistema de medición explicado en la sección 5.1, según el cual se utilizarán dos canales para cada sensor y cada tarjeta DBK18 puede recibir un máximo de cuatro canales. Además cada una de estas tarjetas necesita de un soporte de acople DBK10 cuya función es almacenar y proteger hasta de tres de ellas. La figura 5.2 detalla el sistema de instrumentación para una situación hipotética de 8 sensores y 16 canales, para los edificios estudiados que poseen 10 y 14 sensores el sistema es análogo agregando la cantidad de tarjetas DBK10 y sopertes DBK10 según corresponda.

Para las dimensiones específicas de los cables utilizados en cada estructura se tuvieron en consideración las condiciones arquitectónicas y estructurales, de igual manera se considera un 20 % extra en su cubicación por imponderables. El resumen de cables se muestra en la tabla 5.5.

Rodas		Velamar		Portales	
Cantidad	Longitud[m]	Cantidad	Longitud[m]	Cantidad	Longitud[m]
3	33	3	90	3	52
1	18	1	106	1	71
2	2	2	51	2	27
1	55	1	64	1	46
3	39	2	18	2	2
		1	31	2	21
		3	10		
		1	23		

Tabla 5.5: Cubicación Cables

Los cables seleccionados poseen tres pares blindados individualmente, se ocuparán 2 pares para la transmisión de la señal y alimentación del sensor, mientras que quedará un par libre en cada cable como respaldo. Estos se comercializan en rieles de 300[m] por lo tanto no basta con sumar de manera lineal las longitudes de todos los cables sino que se debe estudiar las distancias y acomodarlas en grupos de tal manera de reducir la cantidad de rieles a ocupar, el diseño de las longitudes se ve en la tabla 5.6.

Riel 1		Riel 2		Riel 3	
Longitud [m]	Amplificada [m]	Longitud [m]	Amplificada [m]	Longitud [m]	Amplificada [m]
52	62.4	27	32.4	33	39.6
52	62.4	27	32.4	18	21.6
52	62.4	46	55.2	2	2.4
71	85.2	2	2.4	2	2.4
TOTAL	272.4	2	2.4	55	66
		21	25.2	39	46.8
		21	25.2	39	46.8
		33	39.6	39	46.8
		33	39.6	TOTAL	272.4
		TOTAL	254.4		

Riel 4		Riel 5		Riel 6	
Longitud [m]	Amplificada [m]	Longitud [m]	Amplificada [m]	Longitud [m]	Amplificada [m]
90	108	51	61.2	90	108
106	127.2	64	76.8	90	108
51	61.2	18	21.6	10	12
TOTAL	296.4	18	21.6	23	27.6
		31	37.2	TOTAL	255.6
		10	12		
		10	12		
		TOTAL	242.4		

Tabla 5.6: Diseño de longitudes de cables por rieles de 300 [m]

El sistema de instrumentación y sus componentes para un sensor se muestra en la figura 5.34. Por cada acelerometro existe un cable que lo conecta a la caja de acople, esta caja se encarga de separar las señales de voltajes provenientes del sensor, enviandolas a las tarjetas DBK18 mediante dos cables co-axiales, uno dirigido a la DBK18 de vibraciones ambientales (sin aplicación) y otro a la DBK18 de sismos (amplificación 10). Las tarjetas se conectan entre ellas hacia el Daqbook con cable Bus y este a su vez al ordenador por cable Ethernet. El PC, la caja de acople y el Daq van conectados por transformadores AC-DC a la UPS que a su vez esta conectada al suministro eléctrico de 220VAC.

En consecuencia la ubicación y costo de todos los componentes se muestra en las tablas 5.7 y 5.8.

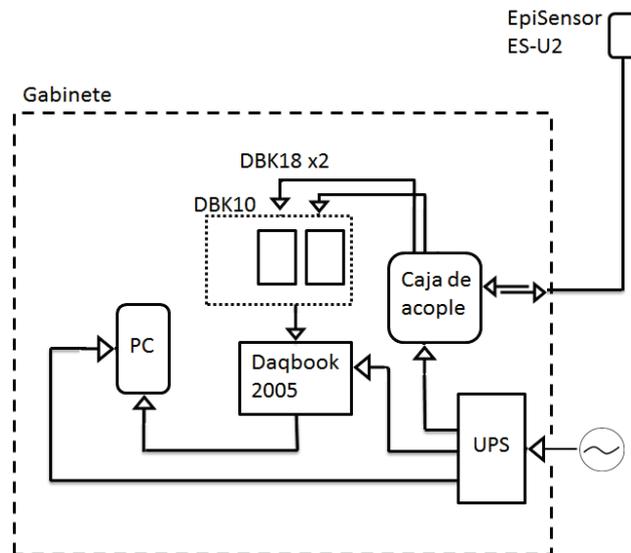


Figura 5.34: Esquema Sistema de Instrumentación

Edificio	N° Sensores ⁷	Costo [US\$]	Total [US\$]
Rodas	10	2,000.0	20,000.0
Velamar	14		28,000.0
Portales	10		20,000.0
Total			68,000.0

Edificio	DBK 18	Costo [US\$]	Total [US\$]
Rodas	5	629.0	3,145.0
Velamar	7		4,403.0
Portales	5		3,145.0
Total			15,291.0

Edificio	DBK 10	Costo [US\$]	Total [US\$]
Rodas	2	209.0	418.0
Velamar	3		627.0
Portales	2		418.0
Total			2,092.1

Edificio	Daqbook2005	Costo [US\$]	Total [US\$]
Rodas	1	2,749.0	2,749.0
Velamar	1		2,749.0
Portales	1		2,749.0
Total			11,793.2

Edificio	UPS ⁸	Costo [US\$]	Total [US\$]
Rodas	1	523.0	523.0
Velamar	1		523.0
Portales	1		523.0
Total			1,569.0

Tabla 5.7: Cubicación y Costos 1

⁷EpiSensor ES-U2

⁸APC Smart-UPS RT 1000VA 230V On-Line

Edificio	Cables ⁹ [m]	Costo [CLP\$/300m]	Total [CLP\$]	Total [US\$]
Rodas	6 rieles de 300[m]	382,921.8	2,297,530.6	4,595.1
Velamar				
Portales				
			Total	4,595.1

Edificio	Caja Estanca	Costo [CLP\$]	Total [CLP\$]	Total [US\$]
Rodas	10	9,349.8	93,498.3	187.0
Velamar	14		130,897.6	261.8
Portales	10		93,498.3	187.0
			Total	448.8

Edificio	Gabinete	Costo [CLP\$]	Total [CLP\$]	Total [US\$]
Rodas	1	50,303.7	50,303.7	100.6
Velamar	1		50,303.7	100.6
Portales	1		50,303.7	100.6
			Total	201.2

Edificio	Cable Coaxial [m]	Costo [CLP\$/m]	Total [CLP\$]	Total [US\$]
Rodas	20	584.0	11,680.0	23.4
Velamar	28		16,352.0	32.7
Portales	20		11,680.0	23.4
			Total	56.1

Edificio	Conector BNC	Costo [CLP\$]	Total [CLP\$]	Total [US\$]
Rodas	40	1,606.5	64,260.0	128.5
Velamar	56		89,964.0	179.9
Portales	40		64,260.0	128.5
			Total	308.4

Edificio	Horas Hombre ¹⁰	Costo [CLP\$]	Total [CLP\$]	Total [US\$]
Rodas	48	3.000,0	144,000.0	288.0
Velamar	48		144,000.0	288.0
Portales	48		144,000.0	288.0
			Total	576.0

SUBTOTAL [US\$]	104,930.9
Imponderables	20 %
TOTAL [US\$]	125,917.0

Tabla 5.8: Cubicación y Costos 2

⁹3 pair individually shielded

¹⁰3 días por edificio, 8 horas diarias, 2 hombres

5.5. Recomendaciones de Instrumentación

En primera instancia debe realizarse la instalación de los cables entre todos los lugares seleccionados. En general los cables van en ductos de corrientes débiles o cercanos a cañerías y por lo tanto es recomendable que su instalación sea realizada por el mismo personal de obra si el edificio está en construcción o por alguna empresa especializada si este ya está terminado.

Es necesario realizar una prueba de los sensores, cables y equipos antes de llevarlos a terreno y asegurarse de que todo funcione correctamente, así se pueden minimizar problemas durante la posterior instalación.

Con los cables en su lugar la instalación de sensores y equipos de registros es más simple en términos de acceso, sin embargo al ser equipos sensibles su instalación debe ser realizada o supervisada por el ingeniero a cargo de la instrumentación.

Es necesario chequear el estado de todos los sensores antes y después de la instalación. Al tomarse los primeros registros en terreno debe asegurarse que los sistemas de procesamiento y transmisión de datos funcionan correctamente, ya que en los próximos meses el sistema será controlado de manera remota. Si ocurriera un evento sísmico de magnitud considerable es necesario revisar el estado de los equipos.

Para los sensores ubicados en subterráneos que poseen desplazamientos de menor amplitud se puede aumentar la amplificación de sus canales de ser necesario.

Es necesario una mantención mínima una vez al año en la cual se debe revisar el estado físico de cables, sensores y tarjetas, repararlos o cambiarlos en caso de ser necesario. Es recomendable reemplazar cada tres años la batería de la UPS, tomando en cuenta que esta se encuentra totalmente cargada antes de su instalación.

Un buen cumplimiento de las recomendaciones permitirá asegurar el buen funcionamiento del sistema de instrumentación diseñado.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

El diseño de la instrumentación sísmica realizado consta de dos etapas:

1. La primera etapa consiste en la selección de la ubicación de los sensores tanto en planta como en altura:

Para esto se analizaron las formas modales teóricas, en general los edificios actuales son diseñados mediante modelos de elementos finitos, ETABS en este caso.

El diseño de la ubicación de sensores horizontales en altura se realizó en pisos en los cuales se esperan desplazamientos considerables, es decir, donde sus formas modales presenten anti-nodos. Como la cantidad de sensores a colocar es limitada, se intentaron recuperar los movimientos asociados por lo menos a los dos primeros modos de vibrar en cada dirección. Además se consideró la instalación de sensores en subterráneos de manera de captar las frecuencias del suelo y poder utilizar esta información para mejorar el análisis de vibraciones en pisos superiores.

Se evita siempre la instrumentación en el último piso ya que existe un cambio de geometría importante. Los equipos deben quedar alejados de fuentes de interferencia, como: grupos electrógenos, equipos de radio, cables de alto voltaje, etc, los cuales causaron problemas en algunos registros durante la visita a terreno.

La ubicación de sensores horizontales en planta busca caracterizar movimientos torsionales de cada nivel, asumiendo que la losa se comporta como diafragma rígido en su plano, de esta manera se ubicarán sensores paralelos en lados opuestos de la planta.

La ubicación de sensores verticales no se diseñó en todos los pisos pues no se esperan grandes diferencias entre desplazamientos verticales, en general se colocó uno en el subterráneo y otro en el último piso instrumentado. Cuando el edificio es muy esbelto pueden ocurrir fenómenos de rotación sobre algún eje horizontal en la base del edificio y por lo tanto es recomendable instalar al menos dos sensores verticales distribuidos en la dirección más corta del nivel inferior.

Luego se definió el tipo de sistema de identificación que se utilizará, es decir, equipos que podrán registrar movimientos fuertes y movimientos asociados a vibraciones ambientales. Con lo cual se eligió el tipo de sensores, tarjetas de adquisición, capacidad del procesador, tipo de cables, etc.

Como es importante que estos sistemas sean capaces de registrar en condiciones adversas se incluyó un sistema ininterrumpido de alimentación de energía eléctrica (UPS) que entrega autonomía a la red de instrumentación, incluso en caso de no ser suficiente los equipos quedan diseñados para ser capaces de reiniciar sus procesos de manera automática cuando las condiciones vuelvan a la normalidad. De esta manera se logra un sistema robusto y que puede ser contralado en su totalidad de manera remota.

2. La segunda etapa consistió en una calibración y validación de los equipos utilizados en la instrumentación:

Un estudio de microvibraciones realizado en distintos pisos de la estructura, escogidos en base a los criterios descritos anteriormente, permitió ver si los sistemas escogidos miden efectivamente la respuesta del edificio y si logran extraer de ella los parámetros dinámicos necesarios para un monitoreo estructural. Se logró apreciar que los sistemas de amplificación, filtros y resolución de los sistemas de adquisición logran diferenciar el comportamiento del edificio del ruido.

Los registros de microvibraciones tomados en Iquique permiten observar efectivamente las propiedades modales de las estructuras y por lo tanto validan los parámetros del diseño de la instrumentación.

Estas mediciones previas permiten saber en primera instancia la relación existente entre los parámetros dinámicos del diseño del edificio y los reales.

Las formas modales obtenidas al aplicar el método de SSI a los registros muestran que las direcciones en que vibra la estructura son similares a las descritas por los factores de participación de masa modal de los modelos ETABS. En cuanto a las frecuencias identificadas, para todos los registros de los tres edificios se observan mayores valores, y por lo tanto los edificios son más rígidos que los modelos teóricos.

Para el edificio de la Cámara Chilena de la construcción se realizó un mejoramiento de su sistema de instrumentación, para ello se instalaron equipos de registro complementarios al existente que tienen la capacidad de medir tanto movimientos fuertes como microvibraciones y de enviar los datos a un servidor local, de esta manera es posible realizar un monitoreo remoto de la salud estructural de este edificio.

Capítulo 7

REFERENCIAS

1. Aguilar, A. 2012, “Estudio Experimental del Comportamiento Dinámico de un Edificio de Viña del Mar dañado durante el Terremoto de febrero de 2010”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
2. Beck, J. 1979, “Determining Models of Structures from Earthquake Records”, Thesis in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor in Philosophy, California Institute of Technology, Pasadena, California.
3. Boroschek, R., Núñez, T., Carreño, R., Larraín, A. 2010, “Diagnostico e identificación de daño estructural”, Revista BIT, N°73, 70-74.
4. Boroschek, R., Yáñez, F., Yáñez, A. 1995, “Evaluación del comportamiento dinámico de edificios que presentan muros estructurales”, XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural 18 – 22 Septiembre de 1995., Tucumán-Argentina.
5. Carreño, R. 2009, “Variación de las Propiedades Dinámicas del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
6. De la Fuente, L. 1999, “Verificación Experimental de Modelos Analíticos en el edificio de la Cámara Chilena de la Construcción”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
7. Hernández, F. 2009, “Análisis de métodos de identificación de variación de propiedades dinámicas”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención sísmica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

8. Lazcano, P. 2008, “Variación de los Parámetros Modales del Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción a partir de registros Ambientales y Sísmicos”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
9. Valdés, P. 2004, “Identificación paramétrica en sistemas estructurales utilizando el método del subespacio estocástico”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
10. Villarroel, L. 1998, “Instrumentación Sísmica del Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
11. Yáñez, A. 1995 “Evaluación experimental de las características dinámicas de edificios chilenos”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
12. Yáñez, J. 2009 “Implementación de un Sistema de Monitoreo Continuo de Parámetros Dinámicos de un edificio de muros”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.