



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL HOSPITAL
NAVAL GENERAL HOSNAG SOMETIDO A VIBRACIÓN AMBIENTAL**

AUTORES: ARCENALES NARANJO, NICOLE ISABEL

CAPT DE E YÉPEZ PROAÑO, VÍCTOR HUGO

DIRECTOR: TCRN DE ICIV MORALES MONCAYO, ENRIQUE ABEL.

PhD.

SANGOLQUÍ

2020



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL HOSPITAL NAVAL GENERAL HOSNAG SOMETIDO A VIBRACIÓN AMBIENTAL”, fue realizado por los señores **Arcentales Naranjo, Nicole Isabel** y **Capt de E Yépez Proaño, Víctor Hugo**, el mismo ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 16 de enero 2020

Firma:

Trn de ICIV Morales Moncayo, Enrique Abel. PhD.

Director del Trabajo de Titulación

C.C: 170889337-3



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Arcentales Naranjo, Nicole Isabel** y **Capt de E Yépez Proaño, Víctor Hugo**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL HOSPITAL NAVAL GENERAL HOSNAG SOMETIDO A VIBRACIÓN AMBIENTAL”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecutivamente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 16 de enero 2020

Firma:

Arcentales Naranjo, Nicole Isabel

CC.: 175264478-9

Firma:

Capt de E Yépez Proaño, Víctor Hugo

CC.: 171426467-6



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Arcentales Naranjo, Nicole Isabel** y **Capt de E Yépez Proaño, Víctor Hugo**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL HOSPITAL NAVAL GENERAL HOSNAG SOMETIDO A VIBRACIÓN AMBIENTAL**”, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 16 de enero 2020

Firma:

Arcentales Naranjo, Nicole Isabel

CC.: 175264478-9

Firma:

Capt de E Yépez Proaño, Víctor Hugo

CC.: 171426467-6

DEDICATORIA

*A Dios,
por ayudarme a cumplir la tan anhelada meta, darme fuerza y sabiduría.*

*A mi mamita Carmen,
por su soporte incondicional y motivación constante desde siempre.
A ella que siempre ha estado a mi lado, mi mejor maestra, amiga y ejemplo a seguir.
Ella, quien me educó y formó, para convertirme en quien soy hoy en día.*

*A mi abuelita Teresa,
por su permanente cariño y apoyo en las buenas y más aún en las malas;
por ser mi motor para salir adelante, y darle esta alegría.
Sus mimos y cuidados, siempre llenarán mi corazón.*

*A mi padre,
que, a su manera,
siempre ha estado presente, esperando este momento.
Un hombre taciturno y de carácter fuerte,
pero que siempre conserva una sonrisa para mí.*

*A mi madrina,
mi amiga de viajes y aventuras,
y que ha estado presente siempre para mí.*

*A mi padrino,
siempre pendiente de mis progresos.
A todos mis compañeros y amigos de carrera,
por tantas aventuras vividas y momentos que no volverán.
En especial a Charli, por siempre sacarme una sonrisa,
aún en las situaciones más estresantes.*

Isabel Arcentales N.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

*CON AMOR INFINITO, a mi hijo Víctor Fabián,
mi más grande alegría y motivación.*

*Para que cuando tome este texto en sus manos
saboree la libertad que siempre será dada por el saber,
y sienta lo que mi padre hizo por mí.*

CON AMOR, a mi esposa Kathya.

*Mi compañera y amiga,
que, con su presencia y cariño impulsó mis anhelos de conocimiento,
ella, el motor que me acoge en su corazón.*

*CON AMOR, a mis padres, a mi hermano y Dominga,
que siempre han estado en las etapas de mi vida,
son mi fuerza y mi respaldo,
jamás me fallarán y a quienes jamás fallaré.*

*CON CARIÑO, a mi Universidad de las Fuerzas Armadas,
Alma mater de la ciencia y el saber MILITAR.
que me brindó la formación profesional
para mi tecnificación al servicio de mi ECUADOR.*

*CON ORGULLO de ser un soldado
perteneciente a las mejores Fuerzas Armadas del Mundo.
Me siento comprometido para contribuir al desarrollo de la Patria.
El presente estudio es mi aporte para que pueda cumplir sus misiones.*

*Pero, ESPECIALMENTE, dedico mi Segundo Trabajo
a mi Padre, Víctor Hugo Yépez Moreira,
quien impregnó en mí el amor por la ciencia y los números,
al guiarme por la ruta hasta llegar a ser un INGENIERO CIVIL.*

Capt. E. Víctor Hugo Yépez Proaño

AGRADECIMIENTO

Ante todo, agradecemos al Gran Comandante del Universo, DIOS, por abrir el camino del conocimiento y guiar nuestros pasos hasta poder concluir este trabajo que cierra el ciclo de nuestra preparación como Ingenieros Civiles del Ecuador.

A nuestras familias, los irremplazables, que han acompañado día a día el sendero del aprendizaje y son testigos del esfuerzo que conlleva el paso por la academia.

A nuestra Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, le agradecemos con cariño, por ser la fuente inagotable de nuestros conocimientos, la que fue el hogar durante nuestro tránsito hacia la profesionalización.

A la University at Buffalo en EE.UU., particularmente a nuestro tutor, Andreas Stavridis, PhD y a Seyedsina Yousefianmoghadam, PhD, quienes compartieron su saber y solventaron las dudas que en este proyecto de tesis surgieron. También el agradecimiento a Shoma Kitayama, PhD, quien nos brindó su amistad y apoyo durante nuestra estancia.

Un agradecimiento especial, a nuestro tutor, el TCRN de ICIV Enrique Morales, PhD, por brindarnos su experiencia y conocimientos, por ser el impulsador de este trabajo de investigación y, sobre todo, por brindarnos su amistad. A nuestro cotutor, el Ing. Marcelo Romo, quien siguió paso a paso el desarrollo de nuestra investigación, quien con su experiencia nos acompañó para obtener un producto de valor.

A las autoridades de la Dirección de Ingeniería Civil y Portuaria de la Armada del Ecuador y del Hospital Naval de Guayaquil, especialmente al CPFGE-IG Javier Arce, por brindar las facilidades para la realización del presente estudio, así como supervisar el desarrollo del mismo en el sitio de evaluación.

A Ana Gabriela Haro, PhD; a la Ing. Maribel Aldás, al Dr. Roberto Aguiar, a Pablo Caiza, PhD; al Ing. Jorge Zúñiga, al Ing. Estuardo Peñaherrera, al Ing. Hugo Bonifaz y al Ing. Juan Haro, quienes contribuyeron con sus aportes científicos para la consecución de este documento y nos orientaron por el camino del INGENIERO CIVIL.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Planteamiento del problema.....	4
1.4. Justificación.....	7
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. Objetivo general.....	8
1.5.2. Objetivos específicos.....	8
CAPÍTULO II.....	9
VISIÓN GENERAL DE LA TEORÍA DINÁMICA.....	9
2.1. Introducción.....	9
2.2. Generalidades de la dinámica estructural.....	9
2.2.1. Excitaciones.....	10
2.2.1.1. Vibración ambiental.....	12
2.2.2. Concepción del problema físico y representación matemática.....	12
2.2.2.1. Modelo matemático.....	14
2.2.2.2. Ecuación del movimiento.....	15

2.2.3.	Respuestas dinámicas.....	18
2.2.3.1.	Análisis modal espectral.....	19
2.2.3.2.	Método de superposición modal.....	19
2.2.3.3.	Problema de valores propios	21
2.2.3.4.	Problema de vectores propios.....	23
2.2.3.5.	Respuesta dinámica frente a un espectro de diseño.....	23
2.2.3.6.	Factor de participación modal	24
2.2.3.7.	Espectro elástico de diseño.....	24
2.2.3.8.	Respuesta Modal	25
2.2.3.9.	Fuerza modal	26
2.2.3.10.	Cortante basal.....	27
2.2.3.11.	Máximas aceleraciones de piso	27
2.2.3.12.	Máxima aceleración basal	27
2.2.3.13.	Criterio de combinación modal	28
2.2.3.14.	Análisis modal operacional	28
2.3.	Resumen	32
CAPÍTULO III		33
PROTOCOLO DEL PROCESO DE INSTRUMENTACIÓN		33
3.1.	Introducción.....	33
3.2.	Instrumentación	33
3.3.	Objetivos de la instrumentación sísmica en edificios.....	34
3.4.	Criterios para la instrumentación de edificios	35
3.5.	Equipos y accesorios utilizados	36
3.6.	Modo de operación	41
3.7.	Protocolo para la instrumentación	42
3.7.1.	Objetivo	42
3.7.2.	Condiciones de evaluación	42
3.7.2.1.	Lugar	42
3.7.2.2.	Condiciones climáticas.....	42
3.7.2.3.	Personal	43
3.7.3.	Materiales.....	43
3.7.4.	Procedimiento	43
3.7.4.1.	Antes- Instalación de equipos y software en el computador	43

3.7.4.2.	Antes- En campo	46
3.7.4.3.	Durante	60
3.7.4.4.	Después	61
3.8.	Recomendaciones	64
3.9.	Resumen	65
CAPÍTULO IV		66
SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN PARA ESTRUCTURAS.....		66
4.1.	Introducción.....	66
4.2.	Ruido	66
4.3.	Señales continuas y discretas.....	67
4.4.	Conversión A/D.....	67
4.5.	Procesamiento digital de señales	69
4.5.1.	Preparación de la señal.....	70
4.5.1.1.	Filtrado	72
4.5.2.	Ventana	74
4.6.	Herramienta de identificación	75
4.6.1.	Transformada de Fourier.....	75
4.6.1.1.	Transformada rápida de Fourier	76
4.6.2.	Funciones de densidad espectral	76
4.6.2.1.	Espectro de potencia.....	77
4.6.2.2.	Espectro cruzado de potencia	78
4.6.3.	Función de transferencia	79
4.7.	Fase	80
4.7.1.	Compás	80
4.8.	Metodología de selección de frecuencias características	81
4.8.1.	Construcción de modos de vibrar	83
4.9.	Criterio de aseguramiento modal (MAC).....	84
4.10.	Resumen	85
CAPÍTULO V		86
VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA		86
5.1.	Introducción.....	86
5.2.	Criterio de selección	86

5.3.	Descripción del caso de estudio.....	86
5.4.	Descripción del modelo computacional	87
5.4.1.	Descripción de secciones	88
5.4.2.	Análisis modal espectral del caso de estudio	91
5.5.	Instrumentación del caso de estudio	93
5.5.1.	Adquisición de datos in- situ.....	93
5.5.2.	Procesamiento de datos.....	98
5.5.3.	Resultados	102
5.5.4.	Comparación del modelo numérico versus la instrumentación	105
5.6.	Resumen	108
CAPÍTULO VI		109
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CASO DE ESTUDIO, HOSPITAL NAVAL DE GUAYAQUIL, MEDIANTE VIBRACIÓN AMBIENTAL		109
6.1.	Introducción.....	109
6.2.	Peligro sísmico del Ecuador	109
6.3.	Descripción del modelo numérico.....	111
6.3.1.	Características de la edificación del caso de estudio	111
6.3.1.1.	Estudios geofísico y geotécnico	115
6.3.1.2.	Análisis de cargas.....	117
6.3.1.2.1.	Hipótesis de cargas.....	117
6.3.1.2.2.	Carga muerta (D).....	117
6.3.1.2.3.	Carga viva (L)	118
6.3.1.2.4.	Carga última (<i>Qu</i>).....	118
6.3.2.	Descripción del modelo computacional.....	118
6.3.3.	Descripción de secciones	121
6.3.3.1.	Losas.....	122
6.3.3.2.	Vigas.....	123
6.3.3.3.	Columnas.....	125
6.3.3.4.	Diafragma de refuerzo.....	126
6.3.4.	Propiedades de los materiales	126
6.3.5.	Esclerometría	127
6.3.5.1.	Hormigón Armado	127
6.3.5.2.	Acero estructural	128

6.3.6.	Mampostería.....	128
6.3.6.1.	Ensayo de compresión del ladrillo de arcilla.....	128
6.3.6.2.	Determinación teórica de la resistencia a compresión de la mampostería	128
6.3.7.	Antepechos de hormigón armado	131
6.3.8.	Definición de cargas y patrones de carga.....	132
6.3.9.	Comparación de modelos matemáticos.....	134
6.4.	Instrumentación por vibración ambiental	135
6.4.1.	Adquisición de datos in-situ.....	135
6.5.	Resultados y comparación	141
6.6.	Resumen	150
CAPÍTULO VII.....		151
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		151
7.1.	Conclusiones.....	151
7.2.	Recomendaciones	154
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		156
ANEXOS		160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Protocolo a seguir para la instalación de los equipos al computador.</i>	44
Tabla 2 <i>Protocolo a seguir en campo previo a la instrumentación</i>	54
Tabla 3 <i>Protocolo a seguir durante la instrumentación.</i>	60
Tabla 4 <i>Protocolo a seguir después de la instrumentación.</i>	61
Tabla 5 <i>Dimensiones de los elementos estructurales del caso del estudio.</i>	89
Tabla 6 <i>Espectro de diseño, período fundamental y cortante basal de la estructura.</i>	90
Tabla 7 <i>Patrones de carga para el modelo computacional del caso de estudio. Obtenido de ETABS®.</i>	91
Tabla 8 <i>Porcentaje de participación de la masa en los tres primeros modos.</i>	92
Tabla 9 <i>Documentación correspondiente al ensayo de instrumentación; bloque A.</i>	96
Tabla 10 <i>Canales medidos por cada configuración realizada, información válida para el análisis inicial.</i>	97
Tabla 11 <i>Duración de los ensayos por cada configuración.</i>	97
Tabla 12 <i>Frecuencias obtenidas mediante la metodología “peak picking” del caso de estudio.</i>	102
Tabla 13 <i>Modos de vibración expresados en frecuencia y periodo, comparación entre el modelo numérico y la instrumentación; bloque A.</i>	105
Tabla 14 <i>Vectores de desplazamiento de las formas modales con ejes corregidos obtenidas del modelo analítico del bloque A.</i>	106
Tabla 15 <i>Vectores adimensionales de las formas modales obtenidas a partir de la instrumentación.</i>	106
Tabla 16 <i>Resumen del Criterio de Aseguramiento Modal MAC del bloque A.</i>	107

Tabla 17 <i>Recientes eventos sísmicos de subducción en el Ecuador</i>	110
Tabla 18 <i>Análisis de carga muerta del Hospital Naval</i>	117
Tabla 19 <i>Análisis de carga viva del Hospital Naval</i>	118
Tabla 20 <i>Factores de agrietamiento en función del momento de inercia y área de la sección transversal permitidos para el análisis</i>	122
Tabla 21 <i>Resultados del ensayo de compresión para ladrillos de arcilla</i>	128
Tabla 22 <i>Resistencia a la compresión, f_m', de la mampostería</i>	130
Tabla 23 <i>Patrones de carga del modelo numérico del caso de estudio, Hospital Naval de Guayaquil. Obtenido de ETABS®</i>	132
Tabla 24 <i>Casos de carga utilizados en el modelo numérico. Obtenido de ETABS®</i>	132
Tabla 25 <i>Periodos de vibración del Hospital Naval de Guayaquil con diferentes configuraciones estructurales</i>	134
Tabla 26 <i>Relación H/T para los diferentes periodos del Hospital Naval de Guayaquil</i>	135
Tabla 27 <i>Documentación del ensayo de instrumentación, Hospital Naval de Guayaquil</i>	139
Tabla 28 <i>Canales medidos por cada configuración realizada, información válida para el análisis inicial del Hospital Naval de Guayaquil</i>	140
Tabla 29 <i>Frecuencias obtenidas mediante la metodología “peak picking” del Hospital Naval de Guayaquil</i>	145
Tabla 30 <i>Modos de vibración expresados en frecuencia y periodo, comparación entre el modelo numérico y la instrumentación; Hospital Naval de Guayaquil</i>	148
Tabla 31 <i>Vectores de desplazamiento de las formas modales obtenidas a partir del modelo numérico del Hospital Naval de Guayaquil</i>	149

Tabla 32 <i>Vectores adimensionales de las formas modales obtenidas por medio de la instrumentación al Hospital Naval de Guayaquil</i>	149
Tabla 33 <i>Criterio de aseguramiento modal MAC del Hospital Naval de Guayaquil; comparación de formas modales</i>	150

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Elementos de la dinámica estructural	9
<i>Figura 2</i> Problema dinámico generalizado.....	10
<i>Figura 3</i> Diagrama de cuerpo libre de un sistema de un grado de libertad	14
<i>Figura 4</i> Sistema discretizado con una masa concentrada, péndulo invertido.	16
<i>Figura 5</i> Movimiento vibratorio armónico.....	17
<i>Figura 6</i> Sistema aporticado con un sistema de un grado de libertad por planta	19
<i>Figura 7</i> Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño	24
<i>Figura 8</i> Representación esquemática del espectro sísmico e instrumentos.	34
<i>Figura 9</i> Dispositivo de adquisición de datos National Instruments cDAQ-9174.	37
<i>Figura 10</i> Módulo de 4 canales, National Instruments ni-9243.	38
<i>Figura 11</i> Acelerómetro piezométrico PCB 393B04	38
<i>Figura 12</i> Cable coaxial, conexión BNC, 50 Ohm, conexión sensor a DAQ.	40
<i>Figura 13</i> Cable coaxial conector de 50 pies, extensión de cable.	40
<i>Figura 14</i> Adaptador BNC hembra-hembra, conector entre cables.	41
<i>Figura 15</i> Colocación general de los equipos en una estructura a instrumentar.	46
<i>Figura 16</i> Entorno de configuración de la adquisición de datos, SignalExpress 2015.	48
<i>Figura 17</i> Entorno de cronometrado de la adquisición de datos.	51
<i>Figura 18</i> Entorno de configuración para guardar los datos.	52
<i>Figura 19</i> Vista general de SignalExpress durante una instrumentación prueba.	53
<i>Figura 20</i> Representación gráfica de una señal analógica siendo transformada a digital.	69
<i>Figura 21</i> Filtro pasa-banda entre 1 y 10 Hz, visualización del orden de filtro.	73

Figura 22 Gráfico de una señal aceleración versus tiempo mostrando el solapamiento.....	78
Figura 23 Espectro de Fourier por ensayos de vibración ambiental	82
Figura 24 Bloque de aulas “A” de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y vista de planta tipo de la estructura.....	87
Figura 25 Estructura evaluada, vista en tres dimensiones por medio de ETABS®.....	88
Figura 26 Resultados de análisis modal con la participación de la masa mediante el modelo en ETABS®.	92
Figura 27 Configuraciones realizadas durante el ensayo.	93
Figura 28 Ubicación de los equipos en las plantas instrumentadas, ubicación del DAQ en el piso 2 y ejes asumidos.	94
Figura 29 Sensores uniaxiales conectados al cubo metálico para realizar el ensayo en dos direcciones.....	95
Figura 30 Gráfica de la configuración 3 en el dominio del tiempo y de la frecuencia del bloque “A” de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.	98
Figura 31 Herramientas de identificación para la configuración 1 del bloque A. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.	100
Figura 32 Herramientas de identificación para la configuración 2 del bloque A. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.	101
Figura 33 Modo 1, frecuencia 2.935 Hz del bloque A de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (a) Forma modal 1 (b) herramienta compass con ángulos de fase. .	103

Figura 34 Modo 2, frecuencia 3.064 Hz del bloque A de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (a) Forma modal 2 (b) herramienta compass con ángulos de fase. .	104
Figura 35 Modo 3, frecuencia 3.463 Hz del bloque A de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (a) Forma modal3 (b) herramienta compass con ángulos de fase. .	104
Figura 36 Distancia en línea de aire entre el epicentro del Sismo de Muisne del 2016 y Guayaquil	111
Figura 37 Ubicación del Hospital Naval de Guayaquil	112
Figura 38 Vista frontal y posterior del Hospital Naval de Guayaquil.....	112
Figura 39 Plano de fachadas del Hospital Naval de Guayaquil	113
Figura 40 Daños observados en la mampostería del Hospital Naval de Guayaquil.	114
Figura 41 Reforzamiento metálico del Hospital Naval de Guayaquil, (a) Vista en planta (b) Vista en elevación.	115
Figura 42 Características de sitio del Hospital Naval de Guayaquil.....	116
Figura 43 Modelo tridimensional de la estructura evaluada, modelamiento en ETABS®.....	119
Figura 44 Vista en planta de la estructura evaluada, modelamiento en ETABS®.	120
Figura 45 Vista lateral en elevación en sentido X (eje H), modelamiento en ETABS®.	120
Figura 46 Vista lateral en elevación en sentido Y (eje 14), modelamiento en ETABS®.....	121
Figura 47 Losa plana alivianada	122
Figura 48 Dimensiones de la losa plana alivianada.	123
Figura 49 Secciones de las vigas metálicas del reforzamiento estructural; (a) Tipo 1, (b) Tipo 2, (c) Tipo3.	123
Figura 50 Disposición de las vigas metálicas del reforzamiento estructural.	124

Figura 51 Secciones de las vigas compuestas del reforzamiento estructural consideradas en el modelo; (a) Tipo 1, (b) Tipo 2, (c) Tipo 3.....	124
Figura 52 Secciones de las columnas consideradas en el modelo estructural; (a) fotografía de la columna del eje D-8, (b) sección transversal de la columna D-8.	125
Figura 53 Diafragma TIPO (35 unidades)	126
Figura 54 Antepechos de hormigón armado en el sentido longitudinal del Hospital Naval.....	131
Figura 55 Resumen de las cargas sísmicas consideradas para el Hospital Naval.	133
Figura 56 Espectro de respuesta considerado para el Hospital Naval	133
Figura 57. Vista en elevación de un pórtico de la estructura analizada, configuraciones realizadas en la instrumentación.....	136
Figura 58. Ubicación de los sensores en planta del caso de estudio, ubicación del DAQ en el cuarto piso y ejes asumidos durante el ensayo.	137
Figura 59. Adquisición de datos en campo; (a) sensores conectados en dos direcciones, cerca de un diafragma, (b) estación de trabajo tipo: DAQ, computador, fuente de poder, cables y conexiones, (c) Software Signal Express para la adquisición de datos.....	138
Figura 60. Herramientas de identificación para la configuración 1 del Hospital Naval. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.	141
Figura 61. Herramientas de identificación para la configuración 2 del Hospital Naval. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.	142

- Figura 62.** Herramientas de identificación para la configuración 3 del Hospital Naval. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y..... 143
- Figura 63.** Herramientas de identificación para la configuración 4 del Hospital Naval. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y..... 144
- Figura 64** Modo 1, frecuencia 1.049 Hz del Hospital Naval de Guayaquil; (a) Forma modal 1 (b) herramienta compass con ángulos de fase. 146
- Figura 65** Modo 2, frecuencia 1.411 Hz del Hospital Naval de Guayaquil; (a) Forma modal 2 (b) herramienta compass con ángulos de fase. 147
- Figura 66** Modo 3, frecuencia 1.728 Hz del Hospital Naval de Guayaquil; (a) Forma modal 3 (b) herramienta compass con ángulos de fase. 147

RESUMEN

El presente trabajo se refiere a la instrumentación y al modelamiento estructural del edificio principal del Hospital Naval de Guayaquil, el mismo que sufrió daños en la mampostería y sus elementos no estructurales en el terremoto de Muisne, 2016; aspecto que afectó su funcionalidad continua, requisito esencial de los centros de salud. El edificio fue reforzado mediante un sistema de vigas metálicas y diafragmas, estos últimos en los ejes paralelos al sentido corto de la estructura. Se compara el modelo computacional, elaborado en ETABS®, y la información procesada de los datos recopilados mediante el uso de acelerómetros. Los registros de aceleraciones son procesados para obtener las frecuencias más representativas, identificadas por medio de herramientas como: filtrado, ventaneo, transformada de Fourier, función de transferencia (TF), espectro cruzado de potencia (CPS) y densidad de potencia espectral (PSD); se discriminan mediante la visualización de las formas modales. Los parámetros modales identificados son comparados con los correspondientes al modelo numérico, empleando el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC), y obteniendo valores que sobrepasan 0.8. Mediante la comparación de los periodos de vibración, registrados en el año 1995 por la Universidad Católica de Guayaquil y los determinados por los diferentes modelos de la estructura, se identifica la pérdida de rigidez de la estructura, por lo que se recomienda su revisión, mediante análisis no lineal.

PALABRAS CLAVE:

- **VIBRACIÓN AMBIENTAL**
- **ANÁLISIS MODAL**
- **RESPUESTA DINÁMICA**
- **FRECUENCIAS FUNDAMENTALES**

ABSTRACT

This work refers to the instrumentation and structural modeling of the main building of the Naval Hospital of Guayaquil, which suffered damage to the masonry and its non-structural elements after the Muisne earthquake of 2016, affecting the criterion of continuous functionality, essential feature of health homes. The building was reinforced by a system of metal beams on its axes and diaphragms of strong stiffness on the axes parallel to the short direction of the structure. The computational model, developed in ETABS®, and the information processed from the data collected through the use of accelerometers are compared. Acceleration records are processed to obtain the most representative frequencies in the graphs using tools such as: filtering, windows, Fourier transformation, transfer function (TF), cross power spectrum (CPS) and power spectral density (PSD) and are discriminate by visualizing the modal forms. The modal parameters identified are compared with those corresponding to the numerical model, using the Modal Assurance Criteria (MAC), obtaining values that exceed 0.8. By comparing the periods of vibration recorded in 1995 by the Catholic University of Guayaquil and those determined with the different models of the structure, the loss of structure rigidity is identified, making it necessary to recommend the revision of the structure by nonlinear analysis.

KEYWORDS:

- **ENVIRONMENTAL VIBRATION**
- **MODAL ANALYSIS**
- **DYNAMIC RESPONSE**
- **FUNDAMENTAL FREQUENCIES**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

El Ecuador, históricamente, se ha visto afectado por terremotos de gran magnitud y una de las áreas más sensibles ha sido la salud. El terremoto en Muisne, sucedido el 16 de abril del 2016, es considerado uno de los más catastróficos por los daños causados a los hospitales y centros de salud en el país. Los hospitales son, entre otras construcciones, estructuras esenciales que no pueden interrumpir su atención cuando se produce un evento telúrico de gran intensidad; su funcionalidad continua garantiza que, en forma adecuada y oportuna, se proporcione la prestación de servicios de salud, para lo que fueron creados.

Por este motivo, es necesario un estudio detallado de las propiedades dinámicas de las estructuras, en todas sus etapas de trabajo, modelación, fases de construcción y una vez construida la edificación. Además, el estudio debe contemplar posibles remodelaciones necesarias, posteriores a movimientos sísmicos u otras causales de deterioro. Para este último caso, se realiza un análisis experimental.

El análisis experimental se realiza por medio de la instrumentación de los edificios que permite comprender, de mejor manera, el comportamiento de la estructura, sus frecuencias naturales, formas modales; es una herramienta de evaluación de daño, ante un sismo.

Sin embargo, la sollicitación sísmica no es un escenario predecible; por esta razón, no es práctico esperar que suceda este tipo de fenómenos para estudiar la respuesta dinámica de la estructura, sino

que se utilizan los pequeños niveles de movimiento generados por las vibraciones ambientales. Los registros de vibración ambiental se han usado con éxito desde hace varios años atrás para el estudio e identificación de las características dinámicas de la estructura dentro del rango elástico (Chango, 2016).

Los resultados experimentales obtenidos pueden ser validados con modelos numéricos de la edificación; también, se puede observar el efecto del reforzamiento sismo-resistente y el aporte de los componentes no estructurales, en la respuesta dinámica de la estructura.

El presente trabajo de investigación propone la instrumentación, de forma temporal, de un hospital, por medio de acelerómetros ubicados en algunos pisos del edificio; procesar y analizar la información recaudada, determinar el período fundamental de la estructura y el comportamiento modal de la misma; comparar esta información con un modelo matemático y validarla, esperando obtener una respuesta dinámica similar. Finalmente, analizar este comportamiento y verificar si es el adecuado para una estructura hospitalaria, ubicada en un país con gran riesgo sísmico.

1.2. Antecedentes

Una de las formas de evaluar el rendimiento estructural y la vulnerabilidad sísmica de una edificación es por medio del análisis del período de vibración. (Gualoto & Querembas, 2019) Al respecto, estos dos autores señalan: “La relación entre el período de vibración de las ondas sísmicas y el período de vibración de la estructura, genera la respuesta dinámica de la edificación durante el sismo”. A partir de los modos de vibración, que dependen de cada estructura, se determina el período fundamental de la edificación, siendo éste el mayor de todos los períodos encontrados, y al que se le atribuyen mayores deformaciones y esfuerzos. Para este propósito, se realiza la

instrumentación usando diferentes fuentes de movimiento; sismos, vibración forzada y ambiental, siendo esta última la más frecuente.

Los primeros registros de vibración ambiental en edificios de los Estados Unidos se realizaron alrededor de 1930. Mientras que en Japón, a inicios del siglo XX (Chango, 2016).

Con excepción de países como Japón y Estados Unidos, que cuentan con cientos de estructuras instrumentadas, la instrumentación sísmica de estructuras, a escala mundial, aún es limitada (Galiote, 2006).

En el Ecuador, los casos de estudio más importante son en los Hospitales José María Velasco Ibarra y Miguel H. Alcívar (E. Morales et al., 2017), los cuales pertenecen al Ministerio de Salud Pública; poseen características similares en su configuración estructural y tuvieron tipología de daño semejantes entre sí, provocada por sismos.

Para el primer caso, la solicitación sísmica ocurrió el 3 de octubre de 1995, de magnitud $M_w=7.0$ que se localizó cerca de la ciudad de Macas, en la cordillera subandina de Cutucú (Legrand et al., n.d.) ;mientras que el segundo ocurrió el 4 de agosto de 1998, evento de magnitud $M_w=7.1$ con epicentro frente a la ciudad de Bahía de Caráquez (IGEPN, 2011).

Con el propósito de obtener los períodos característicos del suelo y de la estructura, se realizaron mediciones de vibración ambiental en los edificios. A consecuencia del análisis, los períodos del suelo del Hospital José María Velasco Ibarra, de la ciudad del Tena, se ubicaron entre 0.25 segundos y 0.5 segundos; y los obtenidos de la estructura fueron entre 0.35 segundos y 0.5 segundos (Chango, 2016).

Los períodos de vibración del en el caso del Hospital Miguel H. Alcívar, de la ciudad de Bahía, el mismo fue reforzado posterior al termófono del 4 de agosto de 1998, fueron obtenidos mediante modelos matemáticos e instrumentación de la estructura. Los resultaron experimentales fueron de 0.46 segundos en la dirección norte-sur y 0.38 segundos en la dirección este-oeste; a su vez, estos fueron comparados con los esperados por el modelo numérico, obteniendo diferencia de entre el 3% y 4%. (Enrique Morales et al., 2018)

En el Distrito Metropolitano de Quito se han realizado algunos estudios de instrumentación que han arrojado resultados interesantes; uno de ellos en el edificio Alicante, ubicado al norte de Quito; se concluyó que la mampostería influye directamente en la variación del período fundamental de la estructura, ya que aporta rigidez y masa a la estructura (Paredes, 2015). El segundo estudio fue realizado en 152 edificaciones de variada configuración estructural (Parra & Sarango, 2016). La conclusión fue algo similar, referente a la relación entre el período de vibración y la mampostería de la estructura; además, se señala que, ésta aporta con rigidez hasta que deja de resistir la carga sísmica, para la cual no está diseñada (Chango, 2016).

1.3. Planteamiento del problema

En países como Japón y Estados Unidos se han desarrollado procesos de instrumentación de edificios, por lo tanto, cuentan con gran información sobre este tipo de estudios; sin embargo, esto no cubre las necesidades de la mayoría de países de Latinoamérica, entre ellos de Ecuador, que son zonas de gran peligrosidad sísmica y tipología de construcción diferente.

Ecuador se encuentra ubicado en el “Cinturón de Fuego del Pacífico”. Esta zona está considerada como una de las de mayor riesgo sísmico del mundo, con el 90% de los sismos registrados anualmente en el planeta, (Gualoto & Querembas, 2019).

El 16 de abril de 2016 se produjo un evento sísmico que azotó las costas ecuatorianas, con una magnitud de 7.8, en la escala sísmica de Richter, provocando grandes pérdidas humanas y económicas; a su vez, puso en evidencia la vulnerabilidad del país.

La Organización Panamericana de la Salud en su informe “Lecciones Aprendidas en América Latina de Mitigación de Desastres en Instalaciones de la Salud” manifiesta que el impacto provocado por desastres naturales en países en vías de desarrollo representa un elevado costo; las pérdidas en el producto interno bruto, debidas a desastres superan en 20 veces al que experimentan los países industrializados

Los daños ocasionados sobre la infraestructura de salud en América Latina y el Caribe son particularmente severos, acotando que, aproximadamente un 50% de los 150000 hospitales existentes en la región están ubicados en zonas de alto riesgo. En los últimos 15 años, un total de 93 hospitales y 538 centros de salud han sido dañados sensiblemente, a consecuencia de desastres naturales, ya sea por haber colapsado o quedado en condiciones vulnerables, que obligaron a su desalojo (Mosquera Andrade, 2015).

Los edificios destinados a la salud tienen la connotación de estructuras esenciales, debido a la funcionalidad continua que se espera de éstos, en toda emergencia climática o sanitaria que se presente, siendo los sismos los eventos más recurrentes. Cuando un hospital colapsa, se convierte en un problema de gran magnitud que puede causar la pérdida de vidas humanas por la falta de

asistencia médica oportuna. (Mosquera Andrade, 2015). Este mismo autor señala que, en la década pasada, al menos 200 000 personas se quedaron sin servicios de salud, por no contar con centros de salud operables.

El Hospital Naval General HOSNAG es una institución de salud que viene funcionando desde el 1968; sin embargo, por la alta demanda se decide adosar un edificio de 7 pisos al policlínico naval, fue construido por la compañía “Smith Garden & Erickson” y se inauguró el 11 de noviembre de 1983, distribuido en 4 áreas de hospitalización y 3 pisos destinados al área administrativa y docencia.

El Hospital Naval se construyó con un sistema estructural de losas planas con vigas contenidas en las losas, cuya ductilidad global depende de la limitada capacidad de las columnas para desarrollar ductilidad (Geocimientos S.A., 2017).

El edificio principal de esta casa de salud resultó afectado por el sismo del 16 de abril del 2016, obligando al desalojo total de la edificación y a la ejecución de estudios de: suelos, estructurales e instalaciones eléctricas, hidráulicas y mecánicas.

A partir de estos estudios se realizó el reforzamiento estructural del edificio adoptando una de las alternativas propuestas por el Consultor, que en su informe técnico “Evaluación Estructural Sismo-Resistente del Hospital Naval de Guayaquil” recomienda: Aumento de la rigidez lateral, mediante diafragmas metálicos en las columnas de la fachada posterior y reforzando las losas planas con vigas de acero en todos los ejes (Ati, 2017). El Consultor sustenta esta alternativa mediante ETABS®, software para la modelación de edificios, y comparando las derivas calculadas con aquellas permitidas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 que indica que la

deriva máxima para cualquier piso, en estructuras de hormigón armado, estructuras metálicas y de madera no debe exceder el 0.02 (NEC-SE-DS, 2015).

El presente trabajo propone: la instrumentación mediante vibraciones ambientales del edificio principal del Hospital Naval General HOSNAG, los criterios para la colocación de los equipos, herramientas para el análisis de datos y filtrado de información, con el fin de determinar los períodos naturales de vibración de la estructura y compararlos con su correspondiente modelo numérico, analizar su comportamiento modal y, finalmente, su respuesta dinámica.

1.4. Justificación

La instrumentación de estructuras permite evaluar su respuesta dinámica, contribuyendo a la comprensión de su comportamiento ante cargas de servicio, así como también, de solicitaciones extremas como es el caso del sismo.

Para edificaciones que presentan daños por eventos climáticos, sea cual fueren estos, o fallas de diseño, la instrumentación es útil para detectar las afectaciones que se presentan en la estructura; su comportamiento modal puede proporcionar una idea más clara de la patología que ésta sufre, ya sea torsión o excesivos desplazamientos; de esta manera permite un reforzamiento que corrija dicho comportamiento y mejore su respuesta dinámica.

En el caso de una estructura reforzada, como es el caso de estudio, un análisis de su comportamiento, mediante instrumentación, proporciona datos importantes para analizar si se logró un desempeño apropiado del edificio, posterior a su reforzamiento y si tendrá la respuesta esperada, ante solicitaciones sísmicas.

Por las razones mencionadas, es importante incorporar nuevas tecnologías e introducir herramientas que mejoren el conocimiento que se tiene del comportamiento de las estructuras ante eventos sísmicos, y evaluar su respuesta dinámica, favoreciendo de esta manera la calidad de la construcción y garantizando la vida útil del edificio; además, de la atención continua que se espera en construcciones como las hospitalarias.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Obtener la respuesta dinámica del edificio principal del Hospital Naval General HOSNAG, mediante la comparación de los períodos fundamentales, proporcionados por la instrumentación por vibración ambiental, y el modelamiento de la edificación; a fin de comprobar que su comportamiento estructural es adecuado, después de su reforzamiento.

1.5.2. Objetivos específicos

Definir el sustento teórico de la dinámica de estructuras, referido al caso de estudio.

Realizar la instrumentación por vibración ambiental del edificio, por medio de acelerómetros y determinar sus períodos fundamentales y formas modales.

Elaborar el modelamiento estructural con la información existente del reforzamiento y estudios previos, con el fin de analizar su respuesta dinámica teórica.

Comparar los periodos experimentales obtenidos mediante la instrumentación, con los calculados por el modelo.

Analizar el comportamiento de la estructura y determinar si es el adecuado.

CAPÍTULO II

VISIÓN GENERAL DE LA TEORÍA DINÁMICA

2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales de dinámica estructural, tomando en consideración tres elementos sustanciales: las excitaciones, las propiedades de la estructura y las respuestas dinámicas. Inicialmente, se describen las excitaciones, sus principales características y tipos, como se observa en el esquema de la Figura 1. Posteriormente, se describe las formas de representar una estructura para, finalmente, establecer las respuestas dinámicas de sistemas de múltiples grados de libertad.

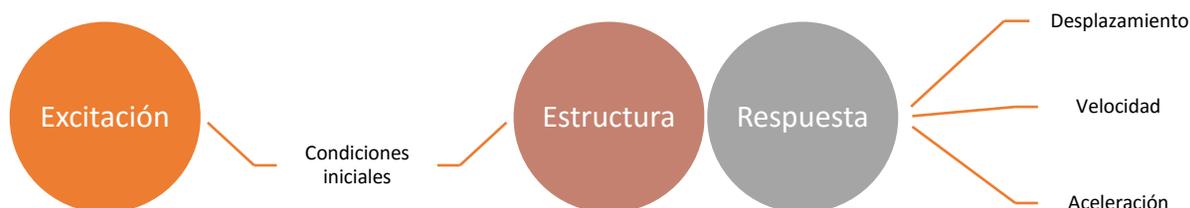


Figura 1 Elementos de la dinámica estructural

2.2. Generalidades de la dinámica estructural

Un problema dinámico se visualiza en la Figura 1; se puede identificar, en forma esquemática, las partes constitutivas de los tres elementos básicos excitación, estructura y respuesta.

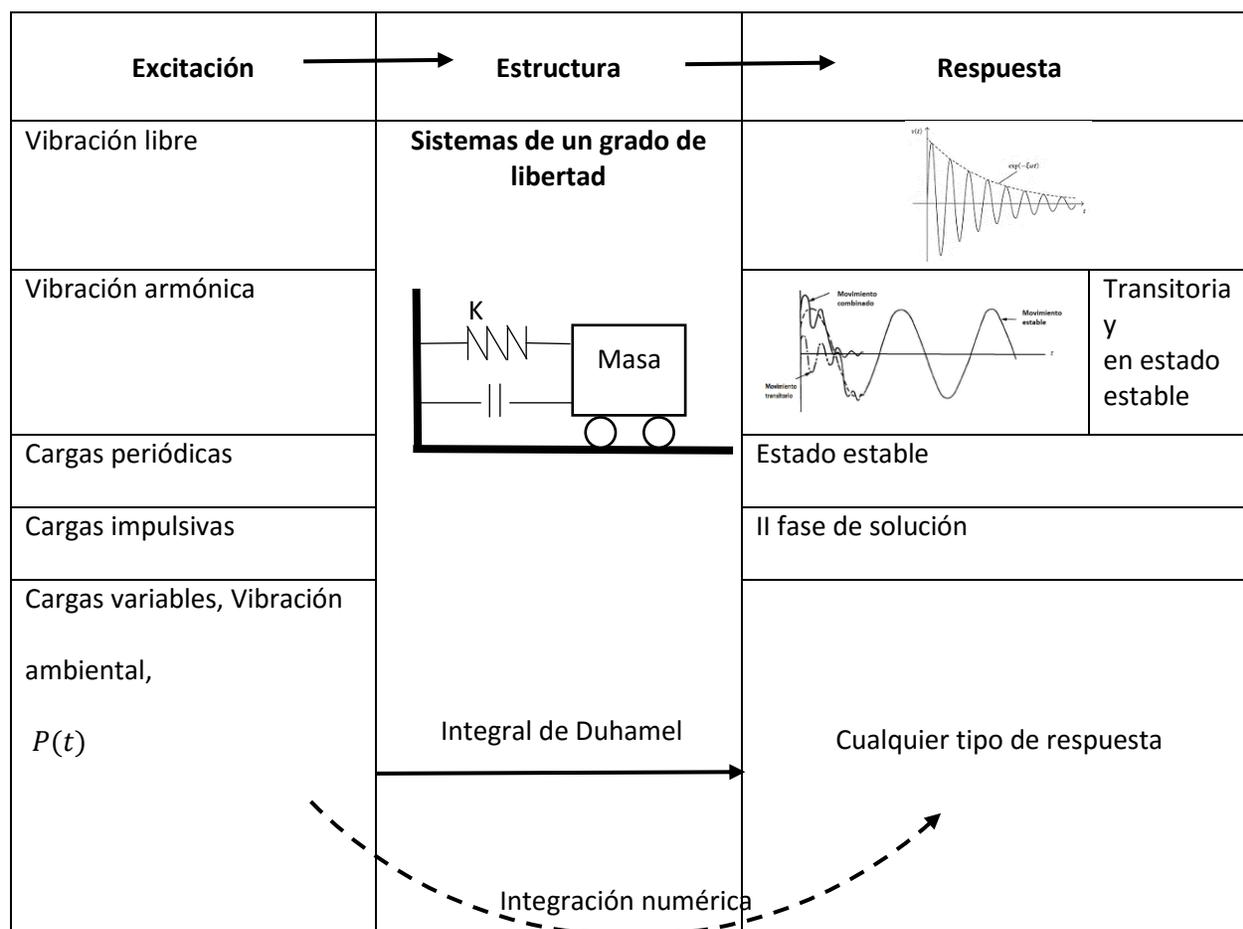


Figura 2 Problema dinámico generalizado

2.2.1. Excitaciones

Se consideran cargas a las acciones externas por las cuales un sistema sufre cambios en sus condiciones iniciales, entre las que se pueden citar: cargas muertas, cargas vivas, dinámicas, de viento, de nieve, térmicas, sísmicas y asentamientos. Las cargas dinámicas son las que varían con respecto al tiempo y las cargas sísmicas se producen cuando existe un movimiento en el suelo de la edificación, transmitido por su cimentación a la superestructura, en forma de vibraciones. En la columna izquierda de la Figura 2 se describen las excitaciones que pueden ser clasificadas en: vibraciones libres (periódicas o sinusoidales), vibraciones no periódicas (choques) y vibraciones aleatorias (fuerzas externas). Cada una de ellas obedece al tipo de excitación proporcionada. Las

estructuras están sujetas a múltiples tipos de cargas, desde fuerzas proporcionadas por el uso al que están sometidas (equipos y máquinas de oficina), fuerzas externas proporcionadas por factores urbanos (maquinaria, vehículos, explosiones, entre otros) hasta fuerzas accidentales (sismos, viento, entre otros).

La vibración libre constituye el movimiento de la estructura partiendo del equilibrio estático, con condiciones iniciales de desplazamiento o velocidad, que hace que la estructura se mueva sin la presencia de una fuerza externa. La vibración forzada, en contraste con la vibración libre, continúa bajo condiciones de "estado estacionario" porque la energía se suministra al sistema continuamente, para compensar la disipación mediante la amortiguación en el sistema. En general, la frecuencia a la que se suministra energía (es decir, la frecuencia de forzamiento) aparece en la vibración del sistema. La vibración forzada puede ser determinista o aleatoria. (Harris & Piersol, 1962). El estudio de las vibraciones armónicas permite generar criterios generales acerca de las propiedades físicas de las excitaciones y de las respuestas de las estructuras ante estas cargas.

Las características más importantes de un terremoto son: la aceleración máxima del suelo, la duración y la frecuencia. Cuanto mayor sea el valor de la excitación, mayor será la magnitud de la fuerza lateral que se imparte en la estructura. Del mismo modo, si un sismo tiene una larga duración, se impartirá más energía en la estructura, en lugar de un sismo de corta duración de magnitud similar. La duración del terremoto es un factor determinante, más aún cuando la excitación es fuerte, debido a la limitación de la cantidad de energía de deformación elástica que una estructura puede absorber de manera segura. La frecuencia también tiene un impacto significativo, si la frecuencia de la estructura es similar a la frecuencia del terremoto o coinciden, se puede producir un efecto de resonancia, es decir, una amplificación de la magnitud.

2.2.1.1. Vibración ambiental

Las fuerzas mencionadas generan vibraciones en las estructuras, las mismas que son consideradas como vibraciones forzadas. Las vibraciones ambientales son de baja amplitud, se recomiendan registros de larga duración de la respuesta estructural a este tipo de vibraciones, para obtener gráficos de valores singulares de alta calidad, como resultado de espectros caracterizados por un gran número de promedios y una resolución de frecuencia fina (del orden de 0,1 Hz) (Rainieri & Fabbrocino, 2014).

Cuando se realizan pruebas de vibración ambiental, la distribución espectral (desconocida) de la entrada, el ruido en la señal y, eventualmente, los errores causados por la ventana en el análisis espectral son responsables de la gran variabilidad de las estimaciones de amortiguamiento. Es por ello que precisan de herramientas para discriminar las frecuencias propias de la estructura y aquellas que son ruido solamente. En lo que respecta al tema de identificación de señales, sus correcciones y mejoras para la interpretación, son abordados en el capítulo correspondiente.

2.2.2. Concepción del problema físico y representación matemática

Los eventos físicos pueden representarse mediante un modelo matemático con base en asunciones sobre: la geometría, los movimientos, leyes de los materiales, cargas o fuerzas, condiciones de borde y condiciones iniciales consideradas. Estas asunciones parten de una concepción mental y se generan mediante un proceso de descripción de los parámetros, en referencia a su masa, rigidez y amortiguamiento. En general, el proceso de modelamiento permite describir el movimiento mediante la cinemática, y la dinámica donde ya se incluye las fuerzas que producen el movimiento. Con la finalidad de generar modelos dinámicos que representen los

fenómenos físicos, se debe considerar principalmente la segunda ley de Newton. Se mencionan, a continuación, las tres leyes fundamentales, como referencia.

La primera ley o también llamada *ley de la inercia* indica que, si un cuerpo no es sometido a alguna excitación, éste permanecerá moviéndose en línea recta, a velocidad constante y de forma indefinida. También se aplica al estado de reposo, equivalente a velocidad nula.

La segunda ley señala que para que un cuerpo cambie su movimiento es necesaria una excitación; lo que produce la excitación se llama *fuerza*. Para cuantificar la fuerza se emplea como constante de proporcionalidad a la masa (m), ya que Newton encontró que la fuerza es proporcional a la aceleración. La fuerza se determina con la *cantidad de movimiento* (p) en función de la velocidad (\dot{u}).

$$p(t) = \frac{d}{dt} \left(m * \left(\frac{du}{dt} \right) \right) = m * \frac{d^2u}{dt^2} = m * \ddot{u} \quad (1)$$

La segunda ley o *principio de conservación de la cantidad de movimiento*, también expone que ante una fuerza de magnitud cero, la cantidad de movimiento permanece constante en el tiempo.

La tercera ley o *principio de acción y reacción*, indica que, si un cuerpo ejerce una acción sobre otro cuerpo, éste realiza sobre el primero otra acción igual y de sentido contrario.

Otra de las alternativas para generar estas ecuaciones es el principio de D'Alembert que plantea el *equilibrio dinámico*, fundamentado en las leyes newtonianas y establece que existe un equilibrio entre las *fuerzas externas* que actúan sobre un cuerpo y *las fuerzas de inercia* del sistema.

2.2.2.1. Modelo matemático

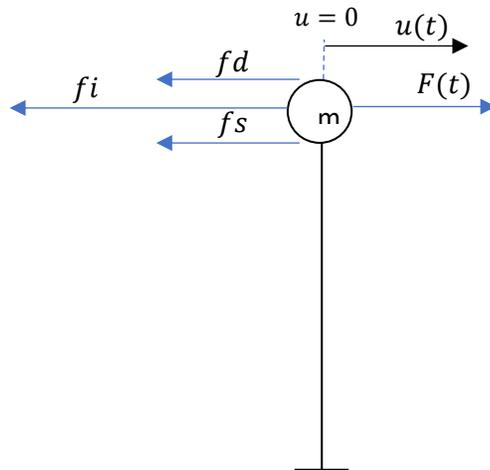


Figura 3 Diagrama de cuerpo libre de un sistema de un grado de libertad

En el diagrama de cuerpo libre de la Figura 3 se observa que ante la excitación producida por la fuerza $F(t)$, existen fuerzas opuestas comprendidas por: *fuerzas de restitución* ($fs = k * u$), *fuerzas de amortiguamiento* ($fd = c * \dot{u}$) y *fuerzas de inercia* ($fi = m * \ddot{u}$) que producen un desplazamiento $u(t)$ (Chopra, 2014).

Desarrollando el equilibrio de fuerzas se llega a la ecuación diferencial del movimiento detallado a continuación:

$$\sum F_x = 0$$

$$F(t) - fs - fd - fi = 0 \quad (2)$$

$$F(t) - k * u - c * \dot{u} - m * \ddot{u} = 0$$

$$F(t) = m * \ddot{u} + c * \dot{u} + k * u$$

Se puede representar de la siguiente forma la expresión:

$$m * \ddot{u} + c * \dot{u} + k * u = \begin{cases} 0 \\ F(t) \end{cases} \quad (5)$$

2.2.2.2. Ecuación del movimiento

Las ecuaciones de movimiento son expresiones que definen las propiedades de los sistemas, en función de las respuestas dinámicas. Existen tres maneras de formular estas ecuaciones de movimiento: Equilibrio Dinámico, principio de trabajo virtual y el principio de Hamilton. La respuesta dinámica de estructuras obedece a la siguiente ecuación fundamental del movimiento (Chopra, 2014):

$$M * \ddot{u} + C * \dot{u} + K * u = F(t) \quad (6)$$

Donde:

M es la matriz de masas de la estructura.

C es la matriz de amortiguamiento de la estructura.

K es la matriz de rigidez de la estructura.

\ddot{u} es el vector de aceleración de la estructura.

\dot{u} es el vector de velocidad de la estructura.

u es el vector de desplazamientos de la estructura.

$F(t)$ es el vector de fuerzas aplicadas a la estructura.

Las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de un problema dinámico, pueden ser resueltas mediante métodos clásicos, la integral de Duhamel, métodos numéricos y las Transformadas de Fourier y Laplace.

Con el objeto de facilitar los cálculos y de discretizar los datos, se puede despreciar el efecto del amortiguamiento de la ecuación y se descarta las fuerzas externas de la ecuación (7).

$$M * \ddot{u} + K * u = 0 \quad (7)$$

Dada una señal en el dominio del tiempo, producida por la traslación de una masa (m) en un péndulo invertido, como se representa en la Figura 4, se describe la respuesta del sistema de un grado de libertad. Partiendo de los fundamentos del Movimiento Armónico Simple (M.A.S) se identifican los elementos de un movimiento vibratorio, como se presenta en la Figura 5. Los ciclos completos son: a-b, c-d y e-f, por definición el tiempo que pasa entre un ciclo completo se denomina *Periodo* (T). Además, se describen sus componentes.

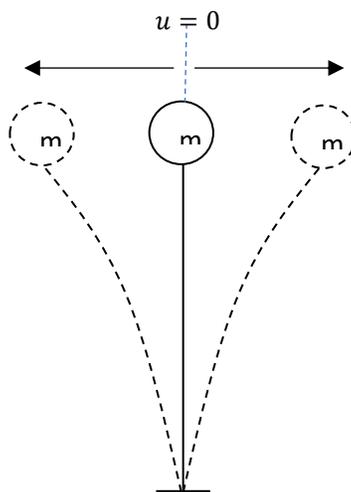


Figura 4 Sistema discretizado con una masa concentrada, péndulo invertido.

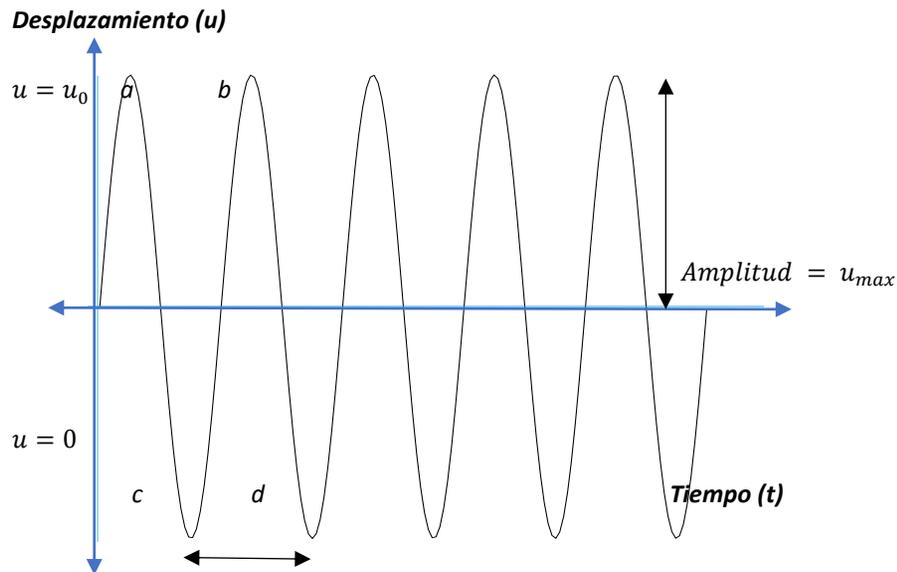


Figura 5 Movimiento vibratorio armónico.

Amplitud es el máximo desplazamiento recorrido, se expresa en unidades de longitud, en el SI en metros [m].

Desplazamiento es la distancia recorrida por la masa analizada desde su punto de equilibrio, se expresa en unidades de longitud, en el SI en metros [m].

Frecuencia (f) es el número de veces que tiene lugar el movimiento cíclico completo en una unidad de tiempo, su unidad son los Hertz [Hz]. Es equivalente al inverso del periodo.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Frecuencias naturales (W_n) son aquellas propias del sistema estructural, independientemente de cuál sea la excitación impuesta. Dado que cada ciclo completo recorre 2π , expresado en

coordenadas polares, se define también como velocidad angular o frecuencia angular y tiene por unidades a los radianes por segundo $[\frac{rad}{s}]$.

$$W_n = 2 * \pi * f \quad (4)$$

Periodo (T) es el tiempo total para el movimiento combinado, atrás y adelante, del sistema. El periodo es el número de segundos por ciclo, se expresa en segundos [s].

2.2.3. Respuestas dinámicas

Las respuestas dinámicas son el resultado de resolver, en términos generales, las ecuaciones de movimiento a través de ecuaciones diferenciales con la finalidad de obtener las variables de; desplazamientos (u), velocidades (\dot{u}) o aceleraciones (\ddot{u}). Las respuestas dinámicas de una estructura que vibra, debido a una excitación, están en función del tiempo y mediante la derivación o integración se obtiene una variable de la otra.

Las respuestas dinámicas de una estructura, están en función de las características de la excitación y de las propiedades de la estructura (masa, rigidez y amortiguamiento). Cuando existe alguna modificación en las propiedades de la estructura, las respuestas dinámicas cambian, consecuentemente, esta es la principal hipótesis que regirá el presente trabajo. Muchas veces se producen vibraciones no deseadas, las mismas que son denominadas ruido, ya que las fuerzas aplicadas generan perturbaciones sobre todo el objeto. Es muy común que pequeñas vibraciones puedan transformarse en fuentes de ruidos, debido a la transmisión por resonancia, entre las partes de la estructura.

Se describe un ejemplo analítico del método modal espectral, con la finalidad de exponer cómo se obtienen las máximas respuestas, mediante la utilización de un espectro de respuesta que permita

establecer la base teórica, para estimar la respuesta de una estructura y compararla con la respuesta experimental, obtenida mediante la instrumentación.

2.2.3.1. Análisis modal espectral

El *análisis modal experimental tradicional* o el análisis modal de entrada-salida se realiza midiendo las respuestas de entrada y salida, para un sistema lineal invariable en el tiempo. Un conjunto de funciones de respuesta de frecuencia relaciona la fuerza aplicada y la respuesta correspondiente, en varios pares de puntos a lo largo de la estructura. Los parámetros modales (frecuencias naturales, relaciones de amortiguamiento modal y formas modales) se encuentran ajustando un modelo a las funciones de respuesta de frecuencia (Damgaard, 2011).

2.2.3.2. Método de superposición modal

Un sistema aporticado de múltiples grados de libertad, se puede condensar adoptando un modelo matemático de un grado de libertad en cada piso, considerando que las vigas no se deforman axialmente, se muestra un caso de 3 pisos regulares en elevación, en la Figura 6:

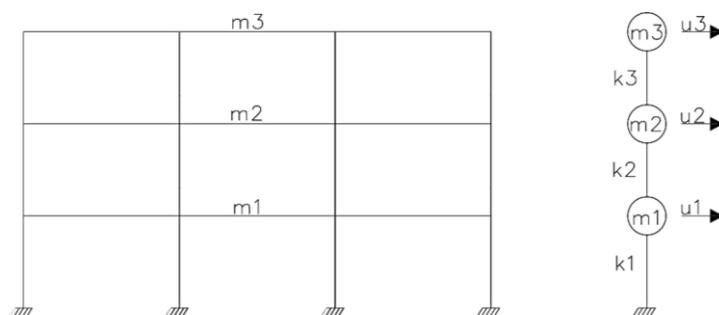


Figura 6 Sistema aporticado con un sistema de un grado de libertad por planta

Las ecuaciones de movimiento de cada piso son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 m_1 * \ddot{u}_1 + k_1 * u_1 + k_2 * (u_1 - u_2) &= 0 \\
 m_2 * \ddot{u}_2 + k_2 * (u_2 - u_1) + k_3 * (u_2 - u_3) &= 0 \\
 m_3 * \ddot{u}_3 + k_3 * (u_3 - u_2) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Con ellas se forma la ecuación matricial de movimiento de la estructura:

$$M \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix} + K \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = 0
 \tag{10}$$

Donde, para este caso:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}
 \tag{11}$$

Partiendo de la ecuación del movimiento, se convierte en un problema de valores y vectores propios, con lo cual se obtienen las frecuencias (f), frecuencias naturales (Wn) y periodos de la estructura (T). Se plantea un cambio de variable de los desplazamientos en función del tiempo:

$$u = \emptyset * f(t)
 \tag{12}$$

$$\ddot{u} = \emptyset * \ddot{f}(t)
 \tag{13}$$

Donde:

\emptyset es una constante.

$f(t)$ es una variable en función del tiempo.

Se deduce la ecuación de movimiento de la siguiente expresión:

$$M * \emptyset * \ddot{f}(t) + K * \emptyset * f(t) = 0 \quad (14)$$

Se tiene que:

$$-\lambda = \frac{\ddot{f}(t)}{f(t)} \quad (15)$$

Donde:

λ son valores propios.

Se formulan dos problemas:

$$\ddot{f}(t) + \lambda * f(t) = 0 \quad (16)$$

$$\emptyset * (K - \lambda * M) = 0 \quad (17)$$

Donde:

$\emptyset \neq 0$, son vectores propios.

Resolviendo los dos problemas se obtiene la respuesta modal.

2.2.3.3. Problema de valores propios

En la ecuación siguiente se observa, de forma analítica, el problema de vectores propios:

$$|K - \lambda * M| = 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} - \{\lambda\} * \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \right| = \{0\} \quad (18)$$

Se obtiene el determinante:

$$\begin{aligned}
 & k_1 * k_2 * k_3 - \left(k_1 * (k_2 * m_3 + k_3 * (m_2 + m_3)) + k_2 * k_3 \right. \\
 & \quad \left. * (m_1 + m_2 + m_3) \right) * \lambda \\
 & + (k_1 * m_2 * m_3 + k_2 * (m_3 * (m_1 + m_2)) + k_3 * (m_1 \\
 & \quad * (m_2 + m_3))) * \lambda^2 - m_1 * m_2 * m_3 * \lambda^3 = 0
 \end{aligned} \tag{19}$$

Se observa que, en este caso, la variable es de tercer grado; con la resolución de la ecuación se obtienen 3 raíces, con la siguiente consideración:

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_n$$

Con los valores propios se obtienen la frecuencia fundamental, la frecuencia natural y el periodo de la estructura:

$$Wn_n = \sqrt{\lambda_n} \tag{20}$$

$$T_n = \frac{2 * \pi}{Wn_n} \tag{21}$$

$$f_n = \frac{1}{T_n} \tag{22}$$

Donde:

Wn_n son las frecuencias naturales de la estructura.

T_n son los periodos de la estructura.

f_n son las frecuencias fundamentales de la estructura.

La respuesta dinámica del sistema se obtiene con la información derivada del proceso anterior.

2.2.3.4. Problema de vectores propios

Para cada valor propio se obtienen los vectores propios, los que se constituyen en los modos de vibración:

$$\{\Phi\} * (K - \lambda * M) = 0 \quad (23)$$

$$\Phi = \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{Bmatrix}$$

Una forma intuitiva para visualizar el comportamiento de los modos de vibración es mediante la normalización, la misma que tiene múltiples métodos, sin embargo, se plantea la siguiente como la más sencilla:

$$\{\Phi_{normalizado}\} = \{\Phi\} * \frac{1}{\Phi_1} \quad (24)$$

2.2.3.5. Respuesta dinámica frente a un espectro de diseño

A fin de realizar el análisis sísmico, se emplea un vector de cargas Q equivalente a la siguiente expresión:

$$Q = -M * b * \ddot{U}_g \quad (25)$$

Donde:

b es un vector unitario que relaciona el movimiento del suelo con los grados de libertad en coordenadas absolutas.

\ddot{U}_g es la aceleración del suelo, que viene definida por el espectro de respuesta o de diseño.

La ecuación del movimiento queda expresada de la siguiente forma:

$$M * \ddot{u} + K * u = -M * b * \ddot{U}_g \quad (26)$$

2.2.3.6. Factor de participación modal

El factor de participación modal identifica que tan importante es el modo en la respuesta de la estructura, está definido por la siguiente ecuación:

$$\Gamma_i = \frac{\phi_i^t * M * b}{\phi_i^t * M * \phi_i} \quad (27)$$

2.2.3.7. Espectro elástico de diseño

La Norma Ecuatoriana de la Construcción del año 2015 explica los componentes horizontales de la carga sísmica: espectros elásticos de diseño, en el capítulo referente a peligro sísmico (NEC-SE-DS, 2015), como grafica la Figura 7.

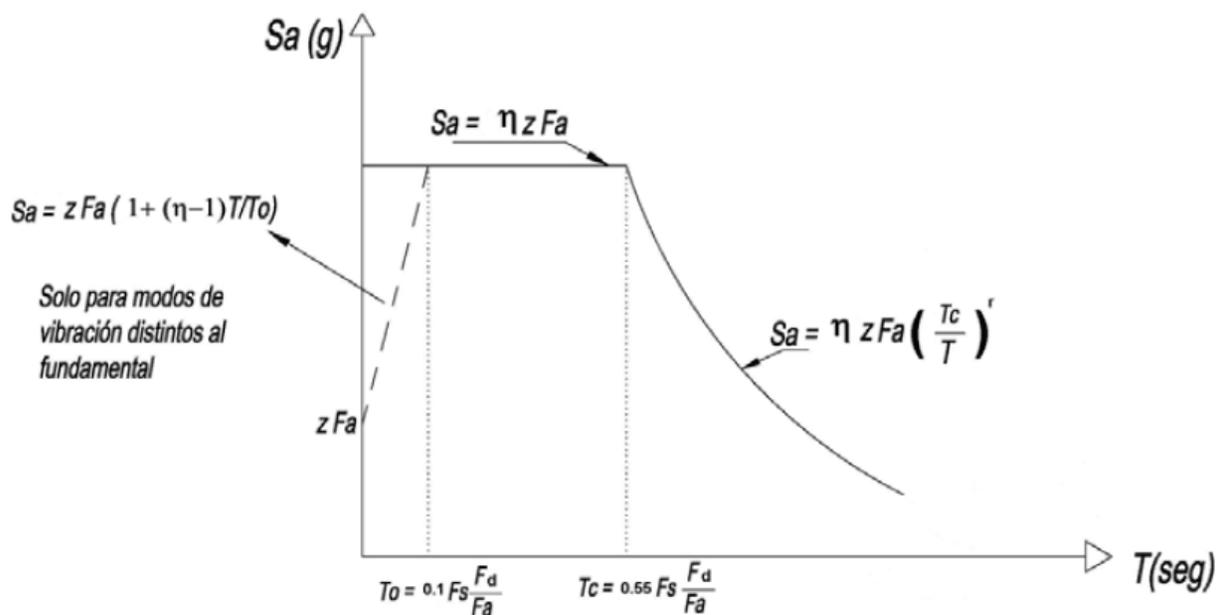


Figura 7 Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño

Donde:

η Razón entre la aceleración espectral Sa ($T = 0.1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado.

Fa Coeficiente de amplificación de aceleraciones en sitio.

Fd Coeficiente de amplificación desplazamientos en sitio.

Fs Coeficiente de amplificación inelástica del suelo.

Sa Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad (g)). Depende del período o modo de vibración de la estructura.

T Período fundamental de vibración de la estructura.

T_0 Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

T_c Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

Z Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g .

2.2.3.8. Respuesta Modal

Con base en los periodos (T_i) obtenidos mediante el análisis realizado se determina las aceleraciones relativas (Sa_i) correspondientes al espectro de diseño evaluado.

$$\{u\} = \{\emptyset\} * \Gamma_i * \frac{Sa_i}{\lambda_i} \quad (28)$$

Donde:

$\{u\}$ es el vector de desplazamiento en el modo analizado.

$\{\emptyset\}$ es el vector de los modos de vibración.

Γ_i es el factor de participación modal del modo analizado.

Sa_i es la aceleración obtenida del espectro.

λ_i es el valor propio en el modo analizado.

i es el modo analizado.

Del análisis de los desplazamientos se puede obtener las derivas de piso en cada modo.

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_n \end{Bmatrix} \therefore \{\Delta\} = \begin{Bmatrix} u_1 - u_n \\ u_2 - u_n \\ u_3 - u_n \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (29)$$

Donde:

$\{u\}$ es el vector de derivas en el modo analizado.

2.2.3.9. Fuerza modal

$$\{fs\} = M * \{\emptyset\} * \Gamma_i * Sa_i \quad (30)$$

Donde:

$\{fs\}$ es el vector de fuerzas modales en el modo de análisis.

M es la matriz de masas de la estructura.

$\{\emptyset\}$ es el vector de los modos de vibración.

Γ_i es el factor de participación modal del modo analizado.

Sa_i es la aceleración obtenida del espectro.

2.2.3.10. Cortante basal

$$V = \sum_{i=1}^n f s_i \quad (31)$$

Donde:

$f s_i$ es la fuerza modal del piso en el modo de análisis.

2.2.3.11. Máximas aceleraciones de piso

$$\ddot{u}_i = \frac{f s_i}{m_i} \quad (32)$$

Donde:

\ddot{u}_i es la máxima aceleración del piso en el modo de análisis.

$f s_i$ es la fuerza modal del piso en el modo de análisis.

m_i es la masa correspondiente al piso analizado.

2.2.3.12. Máxima aceleración basal

$$\ddot{U}_g = \frac{V}{\sum m} \quad (5)$$

Donde:

\ddot{U}_g es la máxima aceleración en la base.

V es el cortante basal.

$\sum m$ es la sumatoria de las masas.

2.2.3.13. Criterio de combinación modal

Disponiendo de la respuesta dinámica de cada modo de vibración, se encuentra la respuesta resultante con herramientas de combinación modal. El criterio más usado por su sencillez es el *criterio del máximo valor probable (SRSS)*.

Sea r un cierto valor de respuesta que se desea obtener, puede ser un desplazamiento, un momento, una fuerza, etc. El criterio del valor máximo probable, es:

$$r = \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (6)$$

Donde:

n es el número de modos considerados en la respuesta.

i es el modo de vibración.

Para no subestimar la respuesta es conveniente que las frecuencias naturales de vibración tengan una diferencia menor al 10% entre ellas, de lo contrario se empleará otro criterio de combinación modal. (Aguilar, 2012, p. 331).

2.2.3.14. Análisis modal operacional

El *análisis modal operacional* se aplica para extraer los parámetros modales basados en la medición, solo de la respuesta, de una estructura bajo excitación ambiental u operativa. El método se basa en el supuesto de que las fuerzas de entrada se derivan del ruido blanco gaussiano y se

excitan en múltiples puntos. La gran ventaja de la identificación modal operativa es que proporciona el modelo dinámico de la estructura en condiciones operativas reales y condiciones límite reales (Damgaard, 2011).

Un ensayo modal de una estructura se realiza midiendo las fuerzas de entrada y las respuestas de salida, para un sistema mecánico lineal e invariante en el tiempo. La excitación es transitoria (prueba de martillo de impacto), aleatoria, aleatoria de ráfaga o sinusoidal (prueba de agitador). Las herramientas avanzadas de procesamiento de señales utilizadas en las técnicas de análisis modal operacional permiten determinar las propiedades inherentes de una estructura mecánica (frecuencias de resonancia, relaciones de amortiguamiento, patrones de modo), midiendo solo la respuesta de la estructura sin utilizar una excitación artificial. Esta técnica se ha utilizado con éxito en estructuras de ingeniería civil (edificios, puentes, plataformas, torres) en las que se utiliza la excitación natural del viento para extraer parámetros modales. Actualmente, su incidencia es hacia aplicaciones de ingeniería mecánica y aeroespacial (maquinaria rotativa, pruebas en carretera, pruebas en vuelo) (Batel, 2002). Para esta investigación, se remite exclusivamente a excitaciones producidas por vibración ambiental.

En el caso de las estructuras, están compuestas por múltiples elementos cuyas características independientes proporcionan características globales al sistema, de ahí la importancia del estudio de la resonancia. *Resonancia* significa amplificación; comparada con una carga estática de la misma magnitud, una carga oscilatoria puede producir respuestas uno o dos órdenes de magnitud mayor.

Como se mencionó en secciones anteriores, las frecuencias evaluadas revelan diversos estados de la estructura, así como comportamientos externos. El tipo de análisis modal operacional busca

encontrar la respuesta real del objeto de análisis, por lo cual se considera como ruido a los comportamientos que influyen externamente. De ahí que se interpreta como *ruido* a las vibraciones en frecuencias que no son útiles para el análisis.

Este tipo de análisis identifica las señales que producen excitación en la estructura y mediante la descomposición en el dominio de las frecuencias se determina su comportamiento modal. Una vez que se disponen las frecuencias fundamentales, se realiza un procedimiento similar al del análisis modal a fin de disponer de las propiedades dinámicas, los modos de vibración y compararlos con la respuesta obtenida mediante el modelo matemático correspondiente.

Los diferentes usos de esta metodología permiten el estudio de las estructuras creando bases de datos de la respuesta dinámica, fundamentadas inicialmente en el diseño y modelo matemático, monitoreo e instrumentación de las obras civiles en el tiempo y cuando ocurren eventos importantes como: remodelaciones, daños por fuerzas accidentales o simplemente se desea conocer su estado actual. Esta información proporciona referencias de gran importancia, especialmente en estructuras esenciales (hospitales, cuarteles, estructuras estratégicas), y con ella se puede mantener informes estadísticos que faciliten la toma de decisiones en la protección de los mismos. En la tesis “Determinación de características dinámicas de estructuras” (Espinoza, 1999) se mencionan las siguientes consideraciones de empleo:

- Control de calidad de una obra,
- Control de daños causados por un sismo,
- Verificación de reparaciones o modificaciones,
- Control de una estructura durante su vida útil,

- Calibración de modelos de identificación estructural y modelos analíticos.

En el libro de “Análisis Modal Operacional: Teoría Y Practica” (Sunico, 2005), se presentan algunas técnicas para desarrollar el análisis, de ellas se enuncian las siguientes:

Peak-Peaking (PP), es la técnica más común para identificación de frecuencias y se basa en observar las gráficas en el dominio de la frecuencia. La principal limitación es debido al ruido existente en las señales producidas por vibración ambiental debido a la diversidad de frecuencias que se confunden con las fundamentales de la estructura.

Descomposición en el Dominio de la Frecuencia, es una técnica similar a la anterior, con una mejora representativa, pues emplea la densidad espectral y la descomposición de valores singulares a fin de encontrar los modos fundamentales.

NExT (Natural Excitation Technique) o Técnica de Excitación Natural, tienen como principal característica la planificación de la ubicación de los sensores, de tal manera que no se coloquen en nodos cercanos al modo buscado. De esta forma se obtienen los modos naturales, interpretando vibraciones forzadas como vibraciones libres.

ERA (Eigensystem Realization Algorithm), con esta técnica se busca determinar las matrices de la estructura con base en la instrumentación realizada. Se emplea junto a la técnica de excitación natural e incluso se pueden identificar dos modos cercanos.

Identificación de Subespacios Estocásticos (SSI), es una técnica bastante avanzada, aunque no muy eficaz. Su análisis parte del dominio del tiempo, a diferencia de las demás técnicas, directamente con los datos temporales medios, sin convertirlos en espectros o correlaciones matemáticas.

2.3. Resumen

La importancia del conocimiento de la dinámica estructural radica en los criterios empleados para traducir el fenómeno físico del movimiento en un modelo matemático que lo represente de tal manera que su análisis sea lo más cercano a la realidad. La comprensión de los elementos de la dinámica estructural (excitación, estructura y respuesta) junto con las leyes del movimiento constituyen herramientas fundamentales para interpretar fuerzas de gran impacto, como las producidas por los sismos. Existen varios métodos para obtener la respuesta dinámica; en el presente trabajo de investigación se enfoca al análisis modal espectral (descrito de una forma algebraica en un modelo de un grado de libertad por planta) y al análisis modal operacional (empleando la técnica de PEAK PEAKING, que será descrito en el capítulo 4) y se los plantea con el objetivo de lograr la respuesta dinámica propuesta por cada método y poder compararlos en los siguientes capítulos, es así que en el capítulo 5 y capítulo 6 se desarrollará el modelo matemático y la instrumentación de un edificio para la validación de la metodología y el caso de estudio del Hospital Naval de Guayaquil, cuyo producto serán los periodos de vibración, las frecuencias fundamentales, las formas modales y los modos de vibración.

CAPÍTULO III

PROTOCOLO DEL PROCESO DE INSTRUMENTACIÓN

3.1. Introducción

Previo a la ejecución de los ensayos experimentales utilizando vibración ambiental, en la validación y en el caso de estudio en el presente capítulo se define el protocolo del proceso de instrumentación. Los criterios a tomar en consideración son las características de los equipos utilizados para este propósito, y el procedimiento de instalación y adquisición de datos en la estructura a analizar, todo enmarcado en un protocolo que facilite la comprensión del ensayo para el usuario.

3.2. Instrumentación

La instrumentación consiste en establecer el protocolo mediante el cual se determina la secuencia de pasos a seguir en los ensayos experimentales, con la finalidad de que se registren datos, ya sea de movimiento o deformaciones, de una estructura de la que se desea obtener información. Esta información puede ser desplazamientos, velocidades, aceleraciones, entre otros y permiten la caracterización de la estructura y la identificación de sus propiedades dinámicas (Henaó, 2013).

La elección de aparatos o equipos a utilizar requiere un conocimiento previo del espectro de frecuencias que se busca registrar, si se desea realizar una instrumentación temporal o permanente y tipo de señal que se va a analizar.

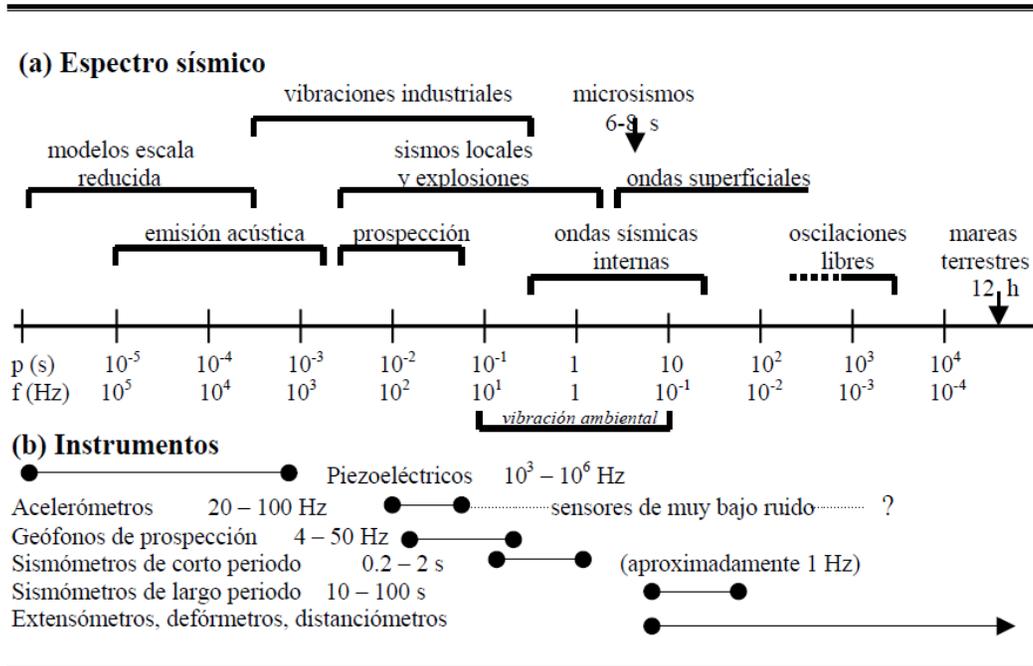


Figura 8 Representación esquemática del espectro sísmico e instrumentos.

Fuente: (Espinoza, 1999)

En la Figura 8 está representado el espectro sísmico, entendido como los rangos de período y frecuencia correspondientes a determinada la fuente de vibración y los instrumentos de medición en cada intervalo.

Para la instrumentación de edificaciones por medio de vibraciones ambientales, los sensores más utilizados son los acelerómetros, que registran los valores de aceleración de la estructura.

3.3. Objetivos de la instrumentación sísmica en edificios

El objetivo principal de la instrumentación es contribuir a la mejor comprensión de la respuesta dinámica de una estructura, ante sismos de gran intensidad y estimar su potencial de daño.

La información resultante del proceso de instrumentar y monitorear una estructura es fundamental en el proceso de calibración de los modelos analíticos, se busca determinar con mayor aproximación a la realidad, la respuesta dinámica y comportamiento modal.

En nuestro medio, los registros de instrumentación de edificios son escasos, razón por la cual estudios de este tipo obedecen a los siguientes objetivos primordiales (Galiote, 2006):

- a) Control de la respuesta dinámica de la estructura durante su vida útil.
- b) Calibración de modelos estructurales. Para estimar el estado de daño con técnicas de localización y estimación de la magnitud del daño.
- c) Desarrollo de modelos analíticos refinados que dan como resultado una respuesta dinámica más certera y acorde con la realidad constructiva de la edificación.
- d) Análisis comparativo de las respuestas dinámicas de edificios.
- e) Validación de los procesos de diseño de edificios, generar recomendaciones que mejoren las prácticas de análisis dinámico y diseño actual de estructuras de este tipo.

Si una estructura está instrumentada de forma permanente, y sufre daño, los registros obtenidos mostrarán evidencia de las respuestas dinámicas que los provocaron.

3.4. Criterios para la instrumentación de edificios

Es necesario considerar criterios de selección de una estructura que debe ser instrumentada, los que se mencionan, principalmente, en lo relacionado con la parte sísmica, el riesgo en función de la amenaza y vulnerabilidad sísmica de los edificios. El tipo de suelo sobre el que está cimentado y la probabilidad de incidencia de movimientos sísmicos de alta intensidad. Otros factores a considerar es la importancia de las estructuras a instrumentar, su relevancia para el país y el número de beneficiarios que un estudio de este tipo alcanzaría.

Una vez seleccionada la edificación a instrumentar se debe detallar tanto en planta como en elevación: el número de pisos, geometría en planta y elevación, y demás aspectos que describan a la estructura en estudio; de estos criterios dependerá la ubicación de los equipos, número de corridas o configuraciones, y la disposición de accesorios para el proceso de adquisición de datos.

3.5. Equipos y accesorios utilizados

Para la elección de equipos, su sensibilidad es un factor importante que se debe tomar en cuenta y depende de la fuente de vibración a registrar y del rango de frecuencias que se espera de la edificación a instrumentar; es decir, del espectro sísmico (Figura 8) y del número de pisos que tenga la estructura.

Los acelerómetros están diseñados para registrar la aceleración del piso en el que están colocados; algunos de ellos son capaces de obtener registros en tres direcciones ortogonales (acelerómetros triaxiales), mientras que otros solamente en una (acelerómetros uniaxiales). Se encuentran conectados a un dispositivo que registra la respuesta de la estructura; pueden captar señales de pequeña amplitud, por lo que son ideales para la instrumentación mediante vibraciones ambientales. Estos equipos amplifican las señales, y las frecuencias mayores a 30 Hz, se filtran para eliminar ruidos de alta frecuencia dando como resultado un registro más claro. Este filtrado depende de las características de la estructura instrumentada, y el valor mencionado es usual en edificios altos, ubicados sobre suelos blandos (Galiote, 2006).

El equipo necesario para la instrumentación consta de siete componentes principales:

- a) Fuente de poder
- b) Dispositivo de adquisición de datos (DAQ)
- c) Sensores
- d) Software para registro y procesamiento de datos
- e) Computadora
- f) Cables, alambres y conectores
- g) Documentación

La fuente de poder se refiere a la corriente eléctrica necesaria para el funcionamiento de los equipos. El dispositivo de adquisición de datos, o DAQ por sus siglas en inglés, también llamado chasis, se usa para conectar los sensores al computador por medio de un puerto USB; está compuesto por módulos de entrada y salida de vibraciones y se encarga de registrar y almacenar datos; para el estudio, el chasis utilizado es el NI cDAQ-9174 mostrado en la Figura 9; mientras que los módulos son los NI 9234, que cuentan con cuatro canales cada uno, son de entrada análoga AC/DC y una frecuencia de muestro máxima de 51.2 kS/s por canal, se los muestra en la Figura 10.



Figura 9 Dispositivo de adquisición de datos National Instruments cDAQ-9174.

Fuente:(National Instruments, 2019b)



Figura 10 Módulo de 4 canales, National Instruments ni-9243.

Fuente: (National Instruments, 2019a)

Los sensores son acelerómetros de alta sensibilidad y bajo ruido sísmico, modelo PCB 393B04, se muestran en la Figura 11, y cuyo rango de frecuencia de adquisición de datos es de 0.06 a 450 Hz, haciéndolos ideales para la instrumentación por vibración ambiental debido al bajo rango de medición y alta resolución. Están calibrados de fábrica y exigen revisiones técnicas periódicas para evitar alteraciones en los datos recaudados; los sensores están dispuestos dentro de cajas que evitan golpes o caídas, además de brindar la identificación básica de cada uno de los acelerómetros como son: fabricante, número de serie, fecha de calibración y factor de calibración, este último viene dado en función de su sensibilidad (mV/g), y es de mucha importancia para el posterior análisis de datos.



Figura 11 Acelerómetro piezométrico PCB 393B04

Fuente: (Stavridis, 2019)

El software Signal Express™ es el programa de National Instruments que permite la adquisición, análisis y presentación de datos correspondientes a varios tipos de dispositivos, entre ellos el dispositivo DAQ, sin que sea necesario un algoritmo creado por el usuario; es el recomendado para la adquisición de datos.

Sin embargo, a pesar de que el software también permite el análisis de los datos registrados, los resultados que presenta son automáticos, es decir, no se cuenta con suficiente información del proceso de análisis, ni los criterios utilizados para la presentación de resultados, afectando la credibilidad del estudio; por lo tanto, es necesario el desarrollo de un código computacional propio en el que se analice los datos de forma casi manual, a saber de un proceso en el que, si bien se utilicen herramientas automatizadas de un programa, el análisis esté sujeto casi por completo al criterio ingenieril del usuario. Con este objetivo se utilizó el sistema de cómputo numérico MATrix LABoratory, MATLAB®, el cual cuenta con lenguaje de programación C++ y tiene una extensa variedad de herramientas matemáticas y estadísticas para este propósito.

Es fundamental un computador portátil compatible con el software Signal Express™, debe contar con al menos un puerto USB, batería de larga duración preferentemente, y un procesador Core i3 o superior.

Los cables son coaxiales con conexiones BNC de 50 Ohm y son utilizados como conexión entre los sensores y el DAQ, mientras que, los cables de modelo RG58 también de 50 Ohm son utilizados para incrementar la longitud de conexión, en caso de ser necesario. No está recomendado el uso de cables de video (75 Ohm) y otros modelos de cable pueden no ser los ideales para la tarea. Los conectores utilizados entre cables son adaptadores BNC hembra-hembra.

La documentación se refiere a los planos en planta de la estructura a instrumentar, con el fin de graficar la localización de los sensores en cada piso; además su respectiva conexión completa: sensor, cables, canal y módulo, correctamente identificados con nombres escritos en etiquetas o cualquier medio que permita ser colocado en el equipo, así como también el factor de calibración de los acelerómetros antes mencionados.

Para el proceso de análisis, esta documentación será de mucha utilidad para separar las señales por dirección, sentido o piso, según se necesite. Un formato de los datos que deben ser recaudados a lo largo del proceso se encuentran en los anexos (Anexo A1).



Figura 12 Cable coaxial, conexión BNC, 50 Ohm, conexión sensor a DAQ.



Figura 13 Cable coaxial conector de 50 pies, extensión de cable.



Figura 14 Adaptador BNC hembra-hembra, conector entre cables.
Fuente:(Cables Direct, 2019)

3.6. Modo de operación

En la presente sección se describirá, de manera breve, el funcionamiento de los equipos y sus accesorios en el proceso de instrumentación y posterior procesamiento de señales; sin embargo, se retomará con más detalle en el protocolo y en el capítulo siguiente.

Se requiere registrar las aceleraciones de la estructura en sentido X y sentido Y, al trabajar con acelerómetros uniaxiales, se necesita conectar dos sensores por punto de medida, con este fin se crearon unos elementos cúbicos y de metal, con orificios centrados y ortogonales entre sí en sus cuatro caras, o al menos dos de ellas; estos orificios son roscados y del tamaño justo para albergar a los equipos durante la adquisición de datos. Por medio de los cables se conectan los acelerómetros a los módulos que a su vez van acoplados al dispositivo de adquisición de datos o DAQ y, finalmente, al computador con el software ya especificado.

Durante el ensayo se registrarán señales de aceleración de cada uno de los equipos, cuyo orden y correspondiente ubicación debe estar detallada en la documentación, pues será el mismo orden en el que se guardarán los datos, posteriormente, en archivos de texto; los datos comprenden señales discretas de aceleración tomadas sincrónicamente a lo largo del tiempo que, por medio de herramientas matemáticas como la transformada de Fourier, trabajarán en el dominio de tiempo y

de la frecuencia; se debe considerar la relación señal-ruido, reduciendo este último por medio del filtrado de las señales, usando por ejemplo la ventana de Hanning, u otras como la densidad de potencia espectral y el espectro cruzado de potencia.

Los archivos de texto son matrices que almacenan los datos recaudados, en donde el número de columnas corresponderá al número de sensores conectados al DAQ correctamente y que hayan registrado información, más una columna correspondiente al tiempo, es decir, los datos del segundo al que fue registrada cada aceleración; respecto a las filas, estas contendrán tantos datos como el usuario haya especificado previamente en la configuración.

3.7. Protocolo para la instrumentación

3.7.1. Objetivo

Establecer el procedimiento recomendado para la instrumentación de edificaciones, por medio de equipos de alta sensibilidad, con el fin de que los datos adquiridos tengan la mayor confiabilidad.

3.7.2. Condiciones de evaluación

3.7.2.1. Lugar

La edificación a instrumentar podría estar abandonada o en pleno funcionamiento, se recomienda, en lo posible, la menor presencia de entes externos, evitar el funcionamiento no continuo de maquinaria, golpes o tránsito excesivo de personas durante el procedimiento.

3.7.2.2. Condiciones climáticas

Se busca tener condiciones meteorológicas que no afecten a los sensores y al equipo en general, así como también al personal operador; por lo tanto, la lluvia, o excesivo viento no son favorables para la medición.

3.7.2.3. Personal

Para el procedimiento se necesita al menos una persona por punto a medir, medianamente entrenadas en el uso de los equipos y sus accesorios; la comunicación entre el personal es de vital importancia previo y durante la adquisición de datos, medios de comunicación como teléfonos celulares, walkies-talkies u otros, son de gran ayuda.

3.7.3. Materiales

Los materiales utilizados para la instrumentación de estructuras son: fuente de poder, dispositivo de adquisición de datos (DAQ), sensores, software para registro y procesamiento de datos, sensores, computadora, cables, alambres, conectores, elementos de conexión para sensores (cubos metálicos), abrazaderas, documentación, cinta masking (o etiquetadora), epóxico, cinta métrica o flexómetro.

3.7.4. Procedimiento

3.7.4.1. Antes- Instalación de equipos y software en el computador

En la Tabla 1 se muestra el protocolo a seguir para la correcta instalación y funcionamiento de los equipos.

Tabla 1

Protocolo a seguir para la instalación de los equipos al computador.

ACTIVIDAD	EXIGENCIA	RESULTADO	ASPECTOS A CONTROLAR	OBSERVACIONES
Crear cuenta en National Instruments	De preferencia hacerlo como estudiante, con el correo institucional	Permitirá el acceso a todos los softwares de manera más directa, permite registrar licencias temporales, etc.	La creación exitosa de la cuenta	Acceso directo: (National Instruments, 2019c)
Descargar e instalar SignalExpress™	Comprobar la versión que se desea descargar, y si es posible su instalación en el computador	Se instalará el programa necesario para la adquisición de datos	Versión a descargar y localización del programa en el computador. En el proceso de instalación y comprobación de licencia, ingrese su usuario y contraseña ya creados, así como el número de serie que dependerá de la versión instalada	Acceso al instalador: (National Instruments, 2019g) Vea el número de serie, así como el proceso de registro de licencia en: (National Instruments, 2019f)
Descargar e instalar NI DAQmx	Para su correcta instalación, el computador debe contener SignalExpress™ correctamente instalado	Una vez instalado este paquete de programas, el computador será capaz de detectar el DAQ correctamente y permitirá su uso adecuado.	Instalar todo el paquete recomendado. El paquete de programas a instalar ocupa un gran espacio de memoria, por lo que es posible que solicite cambiar de carpeta de destino a una con mayor espacio.	Acceso al instalador: (National Instruments, 2019e)

CONTINÚA ...

<p>Conectar el DAQ al computador para comprobar que todo haya sido instalado correctamente</p>	<p>El primer cable irá conectado a la fuente de poder, mientras que el segundo, con puerto USB, al computador. Conectar al menos uno de módulos al DAQ o chasis y, a su vez conectar por medio de un cable, uno de los sensores al módulo</p>	<p>En caso de que todo haya sido instalado correctamente, el computador detectará inmediatamente el DAQ, mostrando en pantalla, en el programa NI Device monitor, el modelo conectado y algunas opciones de configuración para el aparato; se minimiza la esta pantalla para continuar.</p>	<p>El DAQ tiene 3 luces LED, al conectar el equipo al computador, verifique que el LED Ready esté iluminado, esto significa que el dispositivo fue reconocido, mientras que el color del LED dependerá de la conexión; Full-Speed (verde), Hi-Speed (ámbar). En algunas ocasiones al conectar el dispositivo, y tener acceso a internet, se recomendará la instalación del NI DAQmx otra vez; omitir este proceso.</p>	<p>En caso de dudas acceder a: (National Instruments, 2019d)</p>
<p>Efectuar una prueba de funcionamiento antes de hacer la medición en campo. Para ello, una vez conectado el equipo, abra el programa NI MAX (Measurement & Automation Explorer)</p>	<p>Conecte todo el equipo a utilizar en la medición, módulos y sensores; o al menos uno para comprobar la conexión.</p>	<p>Se comprobará que el equipo está registrando datos de aceleración en directo, y que es posible la adquisición de datos.</p>	<p>Durante la prueba, las luces LED deben estar encendidas. En la pantalla del NI MAX, en la zona izquierda se tienen algunas opciones, observar que en My system, Devices and Interfaces, aparezca el nombre del DAQ conectado, en este caso, NI cDAQ-9174, además aparecerán los módulos conectados y su estado actual. Una vez comprobado este punto, de clic izquierdo sobre el módulo, y corra la opción Self-Test, cuando la evaluación haya finalizado, un mensaje del resultado aparecerá en la parte superior de la pantalla, ya sea que haya tenido éxito o no.</p>	<p>En caso de dudas acceder a:(National Instruments, 2019d)</p>

3.7.4.2. Antes- En campo

Una vez instalados los programas necesarios, se puede realizar el ensayo. Sin embargo, es preciso realizar algunas actividades previas; así como también definir ciertos criterios que van a ser comunes en el protocolo.

Para la instrumentación de toda estructura se recomienda fijar dos puntos de medida por planta, estarán en esquinas opuestas de la planta, con el objetivo de percibir si existe un comportamiento torsional en la misma; no obstante, pueden estar en el centro de masas para obtener sólo desplazamientos. Como se mencionó anteriormente, los sensores a utilizar son uniaxiales, por lo tanto, se tendrá dos sensores por punto, cuatro en total por cada planta. La manera de identificar cada punto en una misma planta es por orientación, serán norte y sur (N y S), sin que interfiera realmente la orientación verdadera de la estructura geográficamente, estos nombres ayudarán a diferenciar los puntos, dicho esto, por cada punto norte y sur se tendrá sensores en los puntos 1, 2, 3 y 4, en las direcciones X y Y respectivamente, como se puede observar en la siguiente Figura.

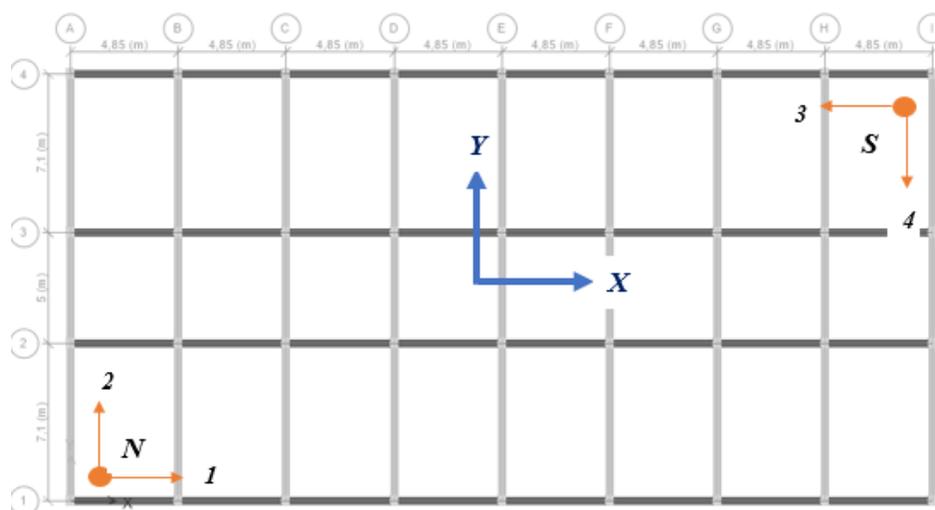


Figura 15 Colocación general de los equipos en una estructura a instrumentar.

Un término muy común a encontrar en la instrumentación, será el de configuración, definido como el conjunto de pisos que serán instrumentados a la vez, esto depende del número de sensores que se tenga y el número total de pisos de la estructura. Para este caso se cuenta con ocho sensores, usando cuatro por planta, se podrá instrumentar en configuraciones de dos plantas a la vez. El número de configuraciones será igual al número de veces que se repita el proceso de instrumentar un par de pisos. Se recomienda tener una planta en común en todas las configuraciones a realizar por facilidad en el procesamiento de datos.

Por otro lado, es necesaria una configuración previa del programa de adquisición de datos para definir algunas características de los datos a guardar y procesarlos a posterior. Con este fin, se creó un proyecto en SignalExpress™, tomando en cuenta que, para hacerlo correctamente, el equipo debe estar conectado al menos parcialmente, se recomienda realizar este proceso después de la prueba de conexión descrita en la Tabla 1.

Se partirá de un proyecto en blanco, y se agregarán los pasos para la adquisición de datos y su adecuado almacenamiento. Para la adquisición de datos, se seleccionan “Add step”, “Acquire Signals”, “DAQmx Acquire”, “Analog Input”, “Acceleration” y, finalmente, “IEPE”. En la Figura 16 se muestra el entorno a configurar de esta opción, en ella se especifica el tipo de señal a registrar, la sensibilidad que se requiere del equipo, así como un contador de tiempo, el cual significa que, en un determinado número de segundos, el proceso de adquisición se detiene y vuela a empezar.

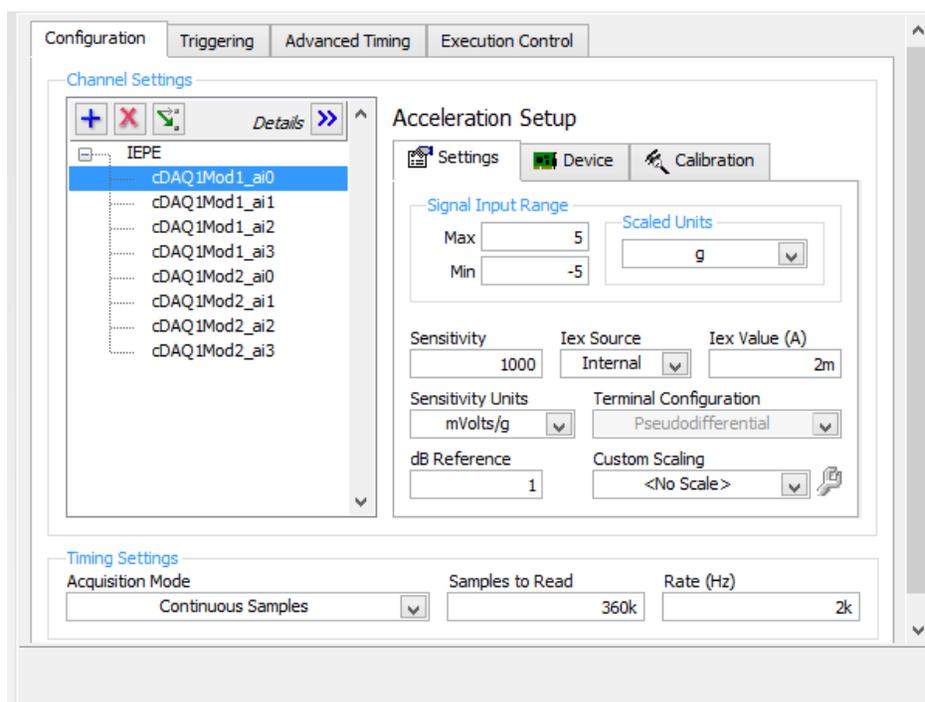


Figura 16 Entorno de configuración de la adquisición de datos, SignalExpress 2015.

En la parte izquierda de la Figura 16 se muestran los canales conectados en el momento de la creación del proyecto y por lo tanto aquellos canales que registrarán datos; para el momento de la instrumentación de una edificación, es posible abrir un proyecto ya configurado; sin embargo, será necesario que se añadan los canales que trabajarán en dicho caso, para ello se selecciona el signo de más de la parte superior izquierda de la pantalla, seleccionamos el tipo de señal que se desea capturar con dicho sensor y el canal de interés, mientras que si se pretende eliminar algún canal, se procede a seleccionarlo y pulsar la cruz roja. Las variables de interés a verificar en la configuración de este paso, serán las unidades de sensibilidad (Sensitivity Units) en mVolts/g; la configuración de tiempo para el registro de datos (Timing Settings), en donde se encuentra el tipo de señal a registrar (Acquisition Mode) que deberá permanecer en muestreo continuo (Continuous Samples), así como también las muestras a leer (Samples to read) que obedece a los requerimientos del

personal, sin embargo, para que sea un archivo de datos manejable, se recomienda ingresar un valor de trescientos sesenta mil datos (360k), mientras que el rango de frecuencia (Rate) será siempre de dos mil (2k), entendiéndose como la frecuencia de muestreo aquella a la que se grabará cada dato de vibración, dando como resultado archivos de datos de más o menos tres minutos cada uno.

Para entender, de mejor manera estos valores, se opera la ecuación 10, primero se definen las variables que tendremos:

$$\text{Muestras a leer (Samples to read)} = N \quad (7)$$

$$\text{Rango de frecuencia (Rate)} = Fs \quad (8)$$

$$\text{Tiempo de ensayo (Time)} = Ti \quad (9)$$

Siendo:

$$N = 360 \text{ k} = 360 \text{ 000}$$

$$Fs = 2 \text{ k} = 2000$$

Tenemos que:

$$Ti = \frac{N}{Fs} \quad (10)$$

Entonces, para calcular el tiempo real que tomará el equipo en crear un archivo de datos, a partir de estos los valores definidos, operamos:

$$Ti = \frac{360 \text{ 000}}{2000} = 180 \text{ segundos} = 3 \text{ minutos}$$

Ahora bien, generalmente, el parámetro más sencillo de fijar es en realidad el tiempo, pues se tiene una mejor noción del mismo frente a los otros parámetros; siendo F_s el parámetro que con menos probabilidad será manipulado por el operador, N será la variable a operar y el resultado del criterio del personal por medio de T_i , el cual debe ser suficiente para visualizar algún tipo de tendencia en el comportamiento, pero que no genere archivos demasiado pesados.

Por lo tanto, trescientos sesenta mil es en realidad el resultado de despejar N de la Ecuación 10 una vez analizado la cantidad de tiempo y datos que se desean guardar en el archivo de datos; esto no quiere decir que el ensayo solo durará tres minutos, sino que se generarán archivos de datos cada tres minutos hasta que el operador decida que se han tomado suficientes datos de la edificación.

Posteriormente, en el análisis de datos, se denotará que la frecuencia de muestreo real del equipo difiere de dos mil, sino que será de dos mil cuarenta y ocho, dando como resultado archivos que no alcanzan los tres minutos exactos, sino segundos menos.

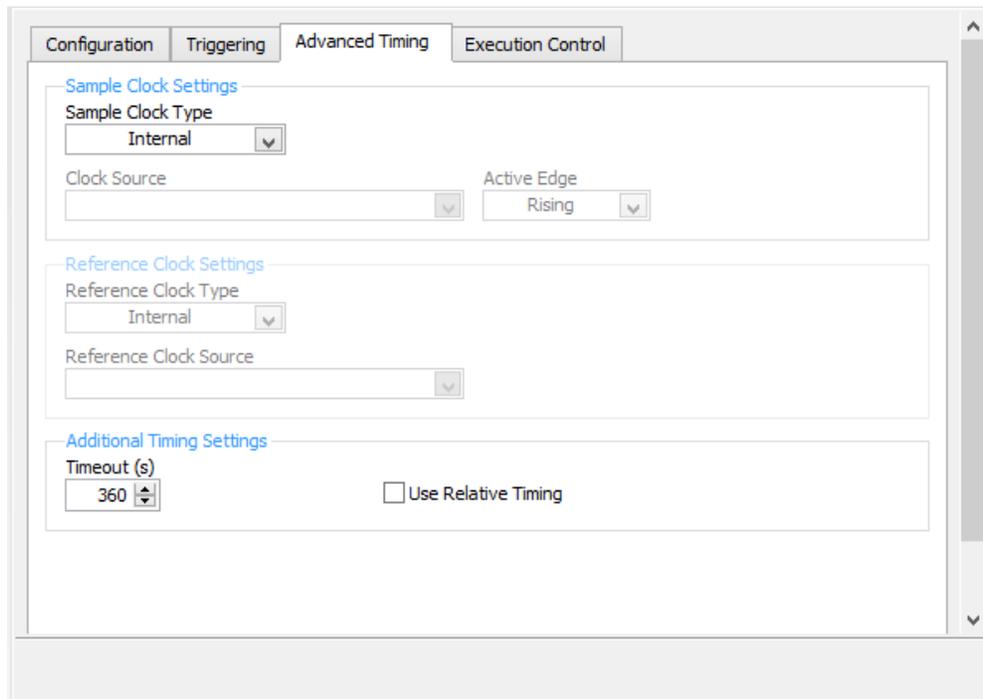


Figura 17 Entorno de cronometrado de la adquisición de datos.

Para completar la configuración de la adquisición de datos, se debe avanzar hacia la pestaña “Advanced Timing”, y en la opción “Timeout (s)” ingresar el mismo valor de N dividido para mil; estos deben coincidir obligatoriamente, de lo contrario, cuando se corra el programa, se desplegará un mensaje de error; en la Figura 17 se muestra el entorno de la pestaña.

Para guardar los datos adquiridos, se añade un paso; se selecciona “Add step”, “Load/Save Signals”, “Save to ASCII/LVM”; en la Figura 18 se muestra el entorno que se desplegará al añadir este paso.

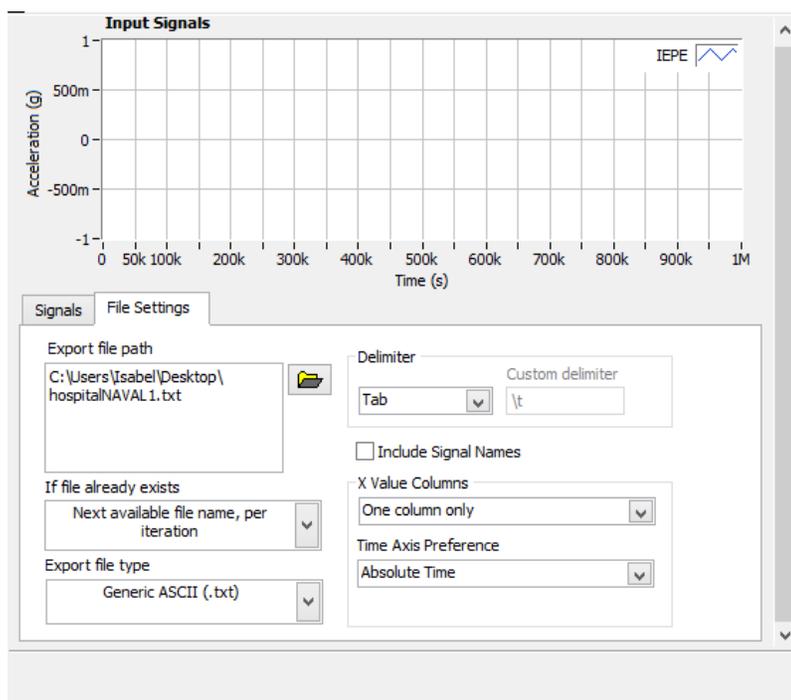


Figura 18 Entorno de configuración para guardar los datos.

El primer paso a configurar es el tipo de archivo en el que se desea almacenar y exportar los datos adquiridos, se selecciona el formato de texto para facilitar su compatibilidad con otros programas y poder visualizarlos mejor. Posteriormente, es necesario seleccionar la ubicación o destino de los archivos a generar, y proporcionarles un nombre; conforme el ensayo avance y creen más archivos, a estos se asignará automáticamente el nombre base ingresado por el usuario más los dígitos en orden creciente. Durante la instrumentación se recomienda mantener en la pantalla el paso mostrado en la Figura 18, pues una vez culminado el paso de adquisición de datos que antes se describieron, y sea momento de guardar las aceleraciones medidas, se podrán visualizar las vibraciones registradas a lo largo del tiempo en la ventana “Input Signal” (Figura 19) y así detectar novedades; una finalizada la configuración, solo es cuestión de correr el proyecto creado seleccionando la opción “Run”.

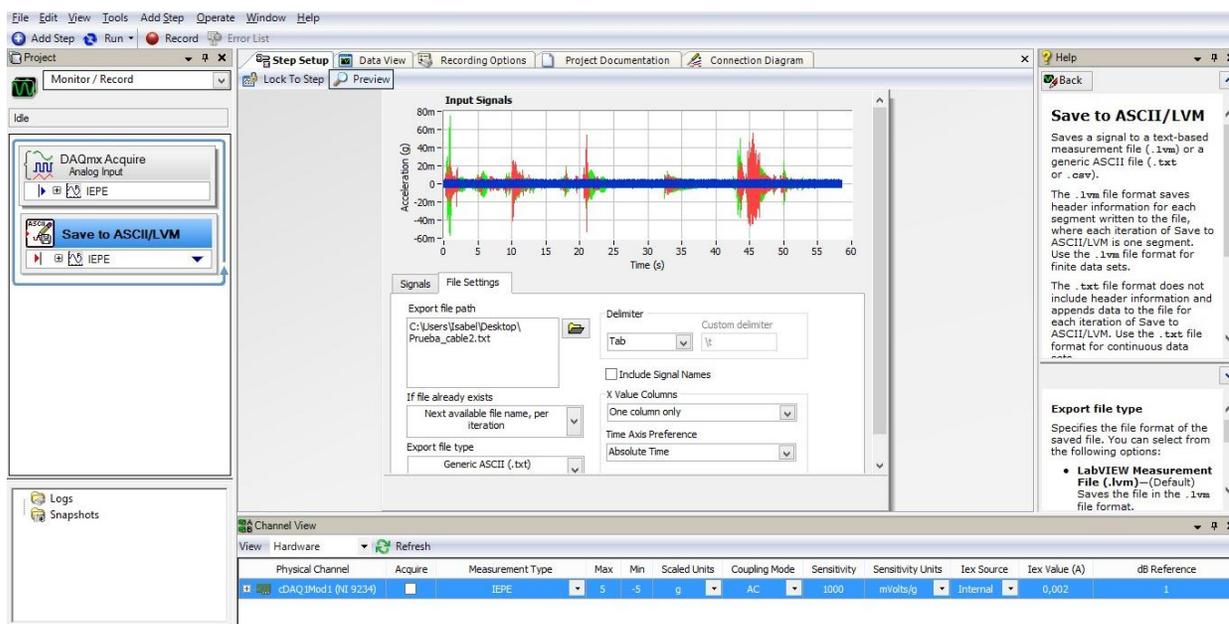


Figura 19 Vista general de SignalExpress™ durante una instrumentación prueba.

En la Figura 19 se muestra una captura de pantalla de una prueba de conexión con un proyecto creado en SignalExpress™; en la parte izquierda podemos visualizar los dos pasos añadidos como se indicó anteriormente, mientras que en el centro está el entorno para guardar datos, con las vibraciones captadas y guardadas en el archivo de texto; para esta prueba no se utilizaron todos los cuatro canales del módulo a vez, por lo que en la parte central inferior de la Figura, en la sección “Acquire” el recuadro aparece en blanco, si por lo contrario, en el ensayo real se tienen todos los canales ocupados y leyendo datos, este recuadro estará lleno con un visto; es importante mencionar que si no se utiliza todos los canales del módulo y se selecciona este recuadro para que se marque, automáticamente todos los canales del módulo conectado trabajarán a la vez, si no están conectados a un acelerómetro, captarán datos de voltaje, lo cual no es recomendable.

A continuación, en la Tabla 2 se detalla el protocolo a seguir en la edificación a instrumentar previo al ensayo; mientras que, en las Tablas 3 y 4 se encuentra el protocolo durante y después.

Tabla 2*Protocolo a seguir en campo previo a la instrumentación*

ACTIVIDAD	EXIGENCIA	RESULTADO	ASPECTOS A CONTROLAR	OBSERVACIONES
Recolectar la mayor cantidad de información posible del edificio a instrumentar (planos, memorias de cálculo, etc.)	Seleccionar la edificación de interés	Visualizar de manera más clara la edificación, especialmente en planta, y de esta manera saber los posibles puntos de ubicación de los sensores. Conocer sus características estructurales.	Verificar el tipo de estructura a instrumentar, elementos y posibles irregularidades en planta y elevación. Ubicar la localización de los sensores para el proceso de instrumentación, tomando en consideración que deben estar colocados en esquinas opuestas, de esta manera se puede distinguir torsión en caso de que exista en la edificación.	
Realizar una inspección previa de la edificación	Observar la disponibilidad de espacios y distribución en cada planta.	Advertir al personal de alguna consideración especial a tomar en cuenta durante la medición, espacios no accesibles, reforzamientos o daños preexistentes. Ubicar el ducto de escaleras, elevador o cualquiera que sea de utilidad para transportar los cables entre pisos.	Observar si alguna de las plantas de la edificación en especial presenta algún tipo de irregularidad, en la que sea mandatorio hacer la instrumentación; o que, por el contrario, la accesibilidad sea limitada, haciendo imposible su instrumentación. Verificar en que plantas se tiene una fuente de poder permanente (luz eléctrica en al menos un tomacorriente), pues en estas se podría colocar el DAQ.	En caso de que sea una edificación nueva, tomar en cuenta que posiblemente no se pueda usar epóxico para pegar los cubos metálicos directamente a la losa; en dicho caso se deben tomar precauciones (idear otra forma de adherir los cubos) o cuidados especiales.

CONTINÚA ...

<p>Determinar las plantas en las que se vaya a realizar la instrumentación; es decir, número de configuraciones necesarias, además de la posible localización de los sensores.</p>	<p>Conocimiento previo de la estructura a instrumentar.</p>	<p>De esta manera tenemos un conocimiento sólido de la duración del trabajo a realizar, así como de la ubicación de los sensores.</p>	<p>Los puntos donde se ubicarán los sensores deben estar libres de muebles o elementos que puedan interferir en la medición. La superficie donde se fijarán los cubos metálicos debe estar limpia y lo más cercano a un elemento estructural (evitar pegar los cubos a alfombras o baldosas pues se comportan como elementos amortiguadores de las aceleraciones reales de la estructura.)</p>	
<p>Identificar y marcar la localización exacta de los lugares donde irán colocados los sensores (en todos los pisos en los que se vaya a realizar la medición), así como el lugar preciso de la ubicación de la estación de trabajo (computador y DAQ)</p>	<p>Es recomendable dejar una marca distintiva en cada punto identificado, ya sea con marcador permanente, cinta masking o cualquier método que prefiera el operador.</p>	<p>El personal tendrá una idea precisa de los lugares a colocar los sensores, así como de la dirección que deben tomar los cables y conexiones.</p>	<p>Las marcas deben poder ser removidas luego de la medición sin causar daños en la edificación, sin embargo, deben ser visibles para todo el personal.</p>	<p>La estación de trabajo preferentemente estará ubicada cerca al ducto de escaleras o elevador identificado anteriormente, ya que de esta manera se facilita el transporte de los cables a través de los pisos a instrumentar, además se obtienen distancias entre puntos más cortas lo que es beneficioso, pues se evita al máximo el uso de extensiones de cable.</p>

CONTINÚA ...

<p>Medir la distancia desde los puntos antes marcados y el Dispositivo de Adquisición de Datos (DAQ) de toda la configuración.</p>	<p>Tomando en consideración la disponibilidad de equipos y accesorios con los que se cuenta, la distancia entre los sensores y el DAQ no puede exceder los cien pies (cable principal y extensión).</p>	<p>En caso de que los puntos ubicados excedan la distancia cubierta por los cables, será necesario mover los puntos de medición o la estación de trabajo, hasta que la configuración este completa y cubierta por los cables.</p>	<p>La distancia medida no debe ser con la cinta tensada, ya que los cables tampoco deben estarlo; si la longitud de un punto a la estación se acerca a los 50 ft, entonces es seguro que se necesitará otro cable para la tarea. La cinta debe simular el camino que recorrerán lo cables. Es necesario tener especial cuidado con los cables que irán colocados en un piso diferente de donde está ubicado el DAQ.</p>	<p>La distancia mencionada de cien pies hace referencia al cable principal unido mediante una conexión a su respectiva extensión, ambos cables de cincuenta pies cada uno; sin embargo, el límite no viene dado por la distancia, sino por el número de cables disponibles. Se cuenta con diez cables de extensión de cincuenta pies cada uno a usar como se considere necesario en campo.</p>
<p>Colocar etiquetas de identificación en ambos extremos de los cables a utilizar, tanto extensiones como conectores. Para este fin se puede usar una etiquetadora o cinta masking</p>	<p>Tener identificado el recorrido de los cables y su exacta ubicación, así como el número de cables que es necesario para realizar la conexión.</p>	<p>Extender los cables ordenadamente, hacer siempre posible identificar los cables que están conectados a cada sensor y su recorrido completo, desde el canal al que están conectados en cada módulo, hasta el sensor.</p>	<p>Ambos extremos del cable deben tener la misma identificación. Si para determinado punto se necesita más de un cable, identifique todas las conexiones. Se puede identificar los cables con nombres propios que el personal desee (A, B, C, etc.); sin embargo, es recomendable nombrar el cable por su ubicación, es decir, número de piso, dirección y sentido al que va estar conectado (4-S-X) y repetir el nombre en todas sus extensiones de conexión si es necesario.</p>	<p>Si se tiene más de una configuración, el operador puede cambiar la identificación del cable si se desea, o mantener el nombre, así como su dirección y sentido, solo cambiando el piso, de la manera que sea oportuno en cada configuración.</p>

CONTINÚA ...

<p>Adherir los cubos metálicos con epóxico a los puntos identificados previamente</p>	<p>Tener presente las marcas de identificación de los puntos donde estarán los sensores.</p>	<p>Tener los cubos metálicos completamente adheridos a la estructura, de tal manera que transmitan las vibraciones a los sensores, y estos a su vez al DAQ.</p>	<p>Colocar una cantidad generosa de epóxico, y asegurarse que sea suficiente para una óptima adherencia. Deben estar colocados paralelamente a la estructura (ejes), pues se colocará un sensor paralelo a este, y otro perpendicular, siendo estos los sentidos de análisis de la estructura (X y Y). Antes de colocar los sensores, el epóxico debe estar completamente seco.</p>	<p>El epóxico puede ser reemplazado por cualquier otro elemento adhesivo que se considere oportuno, mientras garantice la completa adherencia de los cubos a la superficie, es recomendable evitar aquellos elementos adhesivos que formen una película gruesa entre los cubos y la superficie de la estructura, pues por la sensibilidad de los equipos, este tipo de películas trabajan como aislantes, y no permiten que las aceleraciones reales de la estructura sean transmitidas al sensor.</p>
<p>Colocar las cajas que contienen los sensores cerca los puntos a medir.</p>	<p>Tener fijos los cubos metálicos a los que serán acoplados los sensores.</p>	<p>Ubicar los sensores y tenerlos listos para el ensayo.</p>	<p>Deben permanecer en su caja hasta el último momento para evitar su descalibración. Deben colocarse dos por punto a medir, cuatro por planta.</p>	<p>Para evitar confusiones entre los sensores, ya que cada uno es único por su factor de calibración, se recomienda etiquetarlos con nombres propios o su número de serie, el cual consta en su tarjeta de identificación.</p>

CONTINÚA ...

<p>Establecer la estación de trabajo. Conectar el DAQ a la fuente de poder, así como el computador y hacer las conexiones entre ellos.</p>	<p>Tener marcado y fijo el punto donde se colocará la estación de trabajo. Tener cerca la fuente de poder.</p>	<p>Se establecerá la estación de trabajo exitosamente.</p>	<p>En caso de no tener cerca una fuente de poder, usar extensiones de luz o cualquier medio posible para asegurar al menos un tomacorriente para esta ubicación. Colocar los módulos en el DAQ. El computador debe detectar el DAQ y los módulos que estén conectados.</p>
<p>Extender los cables ya identificados hacia los puntos correspondientes.</p>	<p>Tener todos los elementos correctamente identificados con la etiquetadora o cinta masking; así como fijos los cubos metálicos y la estación de trabajo.</p>	<p>Los cables estarán extendidos, además de sus conexiones según corresponda por la ruta prevista anteriormente.</p>	<p>Evitar que los cables estén completamente tensados. Asegurarse que estén desenredados y sin dobleces para evitar daños en los mismos. Fijarlos con ayuda de cinta masking a la superficie tantas veces como se considere necesario con el fin de que no se corra el riesgo de que el personal los maltrate, jale o desequilibre de su camino y dañe la señal transmitida. Tener especial cuidado con las conexiones entre cables, así como entre el cable y el sensor, estas son en particular sensibles, por lo que se recomienda tomar las precauciones del caso para que no se muevan durante el ensayo.</p>

CONTINÚA ...

<p>Culminar la conexión atornillando los sensores a los cubos metálicos y los cables a los sensores.</p>	<p>Tener el resto de la conexión lista. Tener el formato de Metadata impreso y listo para registrar todo.</p>	<p>La conexión entre los sensores y el computador estará completa, y se puede dar inicio al ensayo.</p>	<p>Mientras los sensores son conectados, se debe registrar la ubicación completa del sensor, su identificación y factor de calibración; así como el canal al que está conectado del otro lado, y la ubicación del dicho módulo al DAQ. Complétese toda la información requerida en el formato anexo.</p>	<p>Es de vital importancia llenar toda la información de la Metadata, pues será la guía para el procesamiento de datos. En una de las columnas de este formato dice "COL. ARCHIVO" esto hace referencia a en que columna del archivo de texto estará la información de tal sensor, siempre empezará desde dos, pues la primera corresponde a tiempo. La conexión será en orden creciente, número de módulo y canales de cada uno. Véase ejemplo de Metadata en el capítulo 5.</p>
<p>Realizar la prueba de conexión que se describe en la Tabla 1</p>	<p>Tener todos los elementos conectados y listos para el ensayo.</p>	<p>Comprobar que todos los elementos estén conectados correctamente y que los sensores estén registrando vibraciones.</p>	<p>El mensaje, una vez realizado el "Self Test", sea de conexión exitosa.</p>	<p>Una completo este paso, se puede iniciar la instrumentación.</p>

3.7.4.3. Durante

Tabla 3

Protocolo a seguir durante la instrumentación.

ACTIVIDAD	EXIGENCIA	RESULTADO	ASPECTOS A CONTROLAR	OBSERVACIONES
Comunicarse con el personal e informar el inicio de la instrumentación	Todos los equipos estén conectados y probados.	Alertar al personal con el propósito de que mantengan silencio o eviten movimientos bruscos cerca de los equipos.	El mensaje sea recibido por todo el personal. El personal este ubicado en un lugar que no interfiera en el ensayo durante toda la medición.	
Revisar que las lecturas de vibraciones estén siendo almacenadas correctamente	El operador a cargo del computador debe estar cerca de la estación de trabajo.	Comprobar que todo el circuito de equipos este trabajando correctamente, y que el proyecto en SignalExpress™ esté compilando como se desea.	En la pantalla deben aparecer tantos colores de señal como canales conectados. El intervalo de tiempo entre archivos debe ser el acordado en la configuración del proyecto. Los archivos, deben estar nombrándose automáticamente en orden.	Si todo está funcionando correctamente, el operador puede quedarse en la estación de trabajo o salir, siempre y cuando no contribuya al ruido ambiental mayormente.
Realizar el ensayo por lo menos treinta minutos por configuración	Tener disponibilidad de tiempo y acceso libre a la estructura.	Evitar que no haya suficiente información para el análisis de datos.	En caso de presentarse mucho ruido ambiental, el tiempo del ensayo debe aumentar, pues hay la posibilidad de que muchos de los archivos guardados no sean de utilidad para el análisis.	Repetir estos pasos por cada configuración a realizar. Modificar en cada configuración el nombre base para guardar los archivos de texto, con el fin de tener mejor organizada la información para el análisis.

3.7.4.4. Después

Tabla 4

Protocolo a seguir después de la instrumentación.

ACTIVIDAD	EXIGENCIA	RESULTADO	ASPECTOS A CONTROLAR	OBSERVACIONES
Detener el proyecto de SignalExpress™	Tener la información suficiente para el posterior análisis.	El programa dejará de almacenar datos y será posible desconectar los equipos.	Al seleccionar "Stop" en el proyecto de SignalExpress™, sigue compilando hasta terminar el bucle, por lo tanto, es necesario esperar hasta que en pantalla aparezca detenido el programa.	Como se mencionó anteriormente se debe detener la medición una vez obtenida gran cantidad de información en caso de que sea necesario.
Comunicar al personal que el ensayo ha terminado	Asegurarse que el bucle haya terminado con éxito.	El personal se dirigirá a cada uno de los puntos de medida y procederá a desconectar los equipos.	El mensaje haya sido recibido por todo el personal.	
Desconectar los sensores y guardarlos en sus respectivas cajas	Desconectar el cable que va sujeto a ellos durante el ensayo	Salvaguardar los equipos de posibles malos manejos, golpes o caídas.	Cada sensor debe ser guardado en su respectiva caja, pues cada uno tiene su factor de calibración único.	
Enrollar los cables lo mejor posible.	Haber guardado los sensores	Cables más fáciles de extender en el próximo uso y un manejo más organizado de los equipos.	Debe evitarse jalar muy fuerza o doblarlos durante el proceso.	Los cables de conexión entre el sensor y el DAQ (no la extensión) son muy frágiles y fáciles de enredar, tener cuidado especial con ellos.

CONTINÚA ...

Redirigir los cables para la siguiente configuración. (según sea el caso)	Tener presente cuál es la siguiente configuración, piso y cuantos cables serán necesarios	Se puede realizar la siguiente configuración con mayor rapidez de instalación de equipos.	Deben cumplir con los mismos parámetros descritos en la Tabla 2, es decir, no interrumpir el libre paso, no estar tensados y sobre todo no deben estar doblados.	Este paso solo aplica para cuando se necesiten realizar más configuraciones; posterior a esto se continua con lo descrito en la Tabla 2
Marcar la información oportuna en el formato de Metadata. (mientras haya más configuraciones)	Tener a mano el documento de Metadata.	Recopilar toda la información necesaria para organizar la información y tener claro el proceso en el análisis de datos posterior.	El número de configuración debe coincidir con el planteado en la planificación. El formato de Metadata debe estar completo.	Este paso también es solo aplicable si se trata de más configuraciones.
Desconectar los cables del módulo.	Haber culminado con todas las configuraciones planificadas.	Empezar con el proceso de guardado de los equipos.	Los cables deben estar lo mejor organizado posibles para facilitar su almacenamiento.	Es válido para el momento en que ya no se tiene más configuraciones, es decir, se da por terminado el ensayo.
Enrollar los cables y asegurarlos con abrazaderas plásticas	Evitar mezclar los cables, pues se podrían enredar.	Al enrollarlos cuidadosamente y asegurarlos, se evita maltratar a los cables o que se enreden demasiado.	El cable debe estar enrollado ordenadamente y asegurado con al menos dos abrazaderas que eviten mezclarlos.	A partir de este punto los pasos son para cuando el ensayo total haya terminado.

CONTINÚA ...

Desmontar la estación de trabajo	Haber terminado completamente en ensayo.	Continuar con el proceso de guardado de los equipos.	Desconectar los módulos del DAQ, así como este último de la fuente de poder y del computador	Mientras se va desconectando todo, guardar sus elementos con cuidado.
Sacar los cubos metálicos del piso (si es posible)	No haber usado epóxico, de lo contrario es imposible.	Dejar la estructura limpia de los equipos.	La goma o adhesivo utilizado no deben manchar la superficie en las que estuvieron colocados.	
Guardar todos los equipos haciendo un recuento de todos sus componentes	Haber recogido todos los elementos del equipo.	Guardar ordenadamente los equipos.	Los elementos del equipo deben estar completos y listos para un próximo uso.	

3.8. Recomendaciones

- a) La manipulación de los equipos debe hacerse con cuidado, en especial al tratar con los sensores, pues son muy sensibles y corren el riesgo de descalibrarse fácilmente; por lo tanto, se recomienda colocarlos siempre hasta el último momento previo a dar inicio al ensayo.
- b) Los cables de conexión entre los sensores y los módulos (cables blancos) son bastante delgados y frágiles, por lo que se debe tener especial cuidado al manipularlos, también sería posible recubrirlos cinta taipe o algún material que los vuelva más resistentes.
- c) Los puertos de conexión a cada extremo de los cables están recubiertos por capuchones, se debe cuidar para que no se pierdan, pues son de gran utilidad para evitar que entre suciedad.
- d) Respecto a la localización de los equipos, siempre es necesaria una planificación que permita cumplir con los protocolos, de forma más organizada y ahorrar tiempo. Medir la distancia entre puntos al lugar de la estación de trabajo probó ser una buena forma de actuar, pues da una idea casi inmediata de los cables que serán necesarios en toda la configuración y sobre medidas correctivas que se deban tomar.
- e) En caso de que se desee hacer el ensayo en terrazas o lugares a la intemperie, se recomienda tener mayor cuidado con las conexiones, así como con los sensores; factores como el viento pueden hacer difícil la adquisición de datos. Sujetar bien los cables a la superficie con ayuda de masking y cubrir los sensores puede ayudar, pero no siempre funciona a la perfección.
- f) Los sensores deben estar ubicados lo más cerca que sea posible a un elemento estructural, tal vez esto se podría limitar a la losa; sin embargo, también es posible adherirlos a columnas y vigas descubiertas o que permitan un mejor acceso a la estructura como tal.

3.9. Resumen

La instrumentación de estructuras es un ensayo experimental que se realiza con diversos objetivos, entre los que se destaca la obtención de la respuesta dinámica de la estructura; para ello se utilizan equipos de gran sensibilidad, como los descritos en el presente capítulo.

Por otro lado, se hace necesaria la implementación de un protocolo para la instalación de los equipos y adquisición de datos de forma ordenada y exitosa. Se espera que este protocolo desarrollado sea de gran utilidad y un recurso bibliográfico para el correcto uso de los equipos.

Ahora bien, el proceso de instrumentación no solo comprende la adquisición de datos en campo; sino que comprende el procesamiento y análisis de éstos. En el capítulo siguiente, se introducen algunos conceptos importantes para el procesamiento de datos, también se describen las herramientas matemáticas utilizadas comúnmente para obtener los resultados del ensayo, se establece la metodología para el procesamiento y la interpretación de resultados.

CAPÍTULO IV

SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN PARA ESTRUCTURAS

4.1. Introducción

Los sistemas de identificación son aquellos procesos y herramientas utilizadas para analizar las señales adquiridas durante la instrumentación de cualquier estructura; en el presente capítulo se explican algunos conceptos con el fin de entender mejor el análisis de datos, se expone las herramientas matemáticas utilizadas y el proceso a seguir para su tratamiento; también se hacen pequeñas referencias sobre la aplicación de estas herramientas en los códigos de MATLAB®, desarrollados.

4.2. Ruido

Se denomina ruido ambiental a movimientos de baja amplitud y de altas frecuencias que, si bien pueden ser imperceptibles para el ser humano, pueden producir una respuesta en las estructuras. Este tipo de vibraciones son causadas por agentes externos como el tránsito vehicular, personas, maquinaria e incluso factores climáticos como el viento.

El ruido es generalmente considerado como algo negativo y que debe ser eliminado, lo cual es en parte cierto si este sobrepasa ciertos rangos de frecuencia, como explicaremos posteriormente; sin embargo, también es una herramienta de gran utilidad para obtener las propiedades dinámicas de una estructura, ya que este tipo de vibraciones producen una respuesta en la edificación que puede ser medida mediante el proceso de instrumentación detallado en el capítulo anterior, para este caso el ruido toma el nombre de vibración ambiental.

Ahora bien, cuando el ruido o las vibraciones son de frecuencias elevadas y no constantes (no es estrictamente ambiental), éstas no generan realmente un reflejo del comportamiento de la edificación, sino que producen vibraciones exageradas, ajenas a la respuesta real dinámica, por lo que deben ser eliminadas mediante filtrado u otras herramientas matemáticas.

4.3. Señales continuas y discretas

Una señal continua $f(t)$ tiene un valor numérico en cualquier tiempo t , un ejemplo de este tipo de señal es la aceleración en la punta de una viga en cantiléver.

Mientras que una señal discreta sólo tiene valores en una cantidad discreta de puntos, similar a la señal digital (Ezequiel, 2014). Si se tiene una función sinusoidal $f(t_i)$, discreta o muestreada se tendrá valores de tiempo $t_i = nD_t$, siendo $n = \{0,1,2, \dots\}$ a los que corresponderá un valor numérico en cualquier índice entero i . (Yousefian & Stavridis, n.d.)

Por otro lado, en la naturaleza encontramos señales analógicas, pero para ser manipuladas por computador hay que convertirlas en digitales mediante la denominada conversión A/D.

4.4. Conversión A/D

El proceso de conversión analógica-digital se denomina conversión A/D; y también es útil para transformar una señal del dominio continuo al dominio discreto.

El convertidor A/D muestrea una señal $x(t)$ para obtener una señal $x[n]$. Este muestreo consiste en tomar muestras regularmente, cada T_m segundos, de la señal $x(t)$.

Este intervalo regular es definido por la frecuencia de muestreo o bien por el periodo de muestreo $T_m = \frac{1}{F_m}$, que es el intervalo de tiempo que pasa entre la selección de muestras (Ruiz Costa-Jussà Helena & Barrobés, n.d.).

La frecuencia de muestreo (F_s) queda a criterio del usuario, teniendo presente que cuanto mayor es la frecuencia de muestreo, mejor representada queda la señal; pero que, por otro lado, el hecho de tener más muestras de la señal implica más datos, memoria de almacenamiento y tiempo de procesado. Por lo tanto, se recurre al teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, que expone un criterio claro de cómo seleccionar la frecuencia de muestreo, para una correcta representación de la señal análoga, sin que se generen más datos de los necesarios, y dice:

“La frecuencia mínima de muestreo de una señal que no distorsionará su información subyacente, debe ser el doble de la frecuencia de su componente de frecuencia más alta.” (Prof. C. E. Efstathiou, n.d.)

Se resume en la afirmación de que una señal analógica puede ser reconstruida, sin tener errores de consideración, a partir de muestras tomadas en iguales intervalos de tiempo. Respecto a la razón de muestreo, esta debe ser igual o mayor al doble del ancho de banda de la señal analógica, y define el número de muestras por unidad de tiempo (usualmente segundos) entonces:

$$F_s > 2 * F_{analógica} \quad (11)$$

Para el caso de la instrumentación de estructuras, las vibraciones ambientales son señales analógicas y continuas a lo largo del tiempo, que necesitan ser transformadas a discretas, para analizarlas por medio del computador; la frecuencia de muestreo F_s de los sensores es de 2000 Hz,

sin embargo, para el análisis es posible ajustar este valor un poco más a la realidad, obteniendo un valor de 2048 Hz, lo que quiere decir un dato de aceleración cada $4.8828 \cdot 10^{-4}$ segundos.

En la Figura 20 se representa una señal continua a lo largo del tiempo y como el proceso de muestreo, con una frecuencia F_s adecuada, puede representarla correctamente de forma discreta.

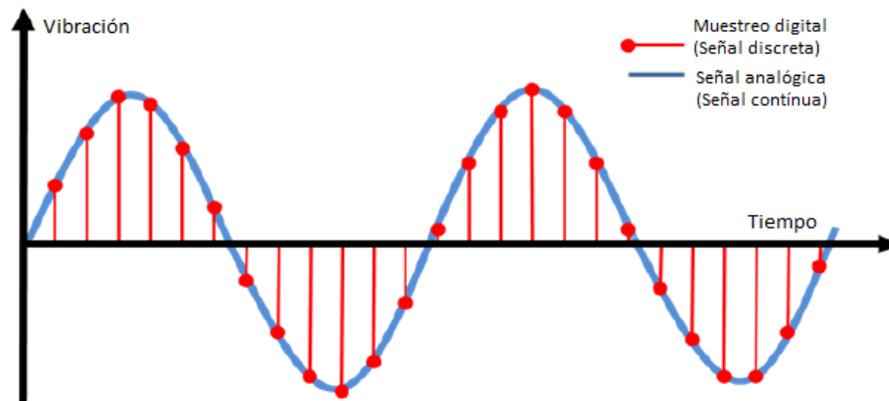


Figura 20 Representación gráfica de una señal analógica siendo transformada a digital. (Yousefian & Stavridis, n.d.)

4.5. Procesamiento digital de señales

El procesamiento de señales es utilizado para extraer la información más importante de las señales obtenidas, a partir de la instrumentación de una estructura; no significa que crea nueva información, sino que permite observar la información inicial de forma diferente.

En la actualidad este procesamiento de señales se realiza en el computador, consecuentemente se lo denomina procesamiento digital de señales. Para lo cual, como se mencionó anteriormente, se trabaja con señales discretas.

4.5.1. Preparación de la señal

Previo al análisis de las señales es conveniente la adecuación de los registros, de manera que permitan una identificación más certera de las propiedades del sistema, eliminando posibles alteraciones en los datos, ruido ambiental excesivo u otros parámetros que afecten al resultado esperado; razón por la cual se describen los pasos de preparación de las señales.

Posterior a la finalización de la instrumentación, el usuario debe completar la documentación correspondiente, de manera que quede clara para la persona que vaya a realizar el análisis de los datos adquiridos, aun cuando la persona no haya estado presente en el ensayo de campo. La meta-data, como es también llamada la documentación, consta de la ubicación de los sensores, configuraciones y los factores de calibración de cada sensor.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el archivo de datos constará de tantas columnas como canales hayan sido conectados, más una columna de tiempo; el análisis se realizará por medio del software MATLAB® en su versión del 2017, es importante notar que el punto (.) Figura como separador decimal, en caso de detectar coma (,) en vez de punto, el programa lo asimilará como separador de columnas, lo que puede causar serios problemas al usuario; dicho esto, es necesaria una verificación previa de los archivos de texto almacenados y reemplazar coma por punto, según corresponda.

Se manipularán archivos de texto de trescientos sesenta mil datos, que al cargarlos al programa pueden tomar varios minutos, dificultando el procesamiento, por lo que se opta por crear estructuras de datos propias de MATLAB® (archivos con formato .mat), guardando su contenido en variables; de esta manera, el manejo de los archivos es mucho más rápido y ordenado. También, es importante notar que, si bien cada archivo cuenta con un gran número de datos, es recomendable crear matrices

de entre nueve y doce minutos, es decir, unir tres o cuatro archivos, de tal manera que se forman estructuras de más de un millón de datos.

Una vez creada la matriz de datos que se pretende analizar es importante aplicar los factores de calibración de los equipos, estos vienen dados en la documentación y solo resta crear un archivo de texto con estos valores encolumnados en el orden que corresponda y cargarlo al programa para su operación. El resultado serán las aceleraciones escaladas, sin que esto se traduzca en ningún filtrado.

Hay que mencionar un tratamiento especial que se hace a las señales antes de ser analizadas, se trata de la corrección de línea base y eliminación de tendencia, problema común si se obtienen velocidades o desplazamientos pero que, en el caso de aceleraciones no es aplicable, pues desde la adquisición de datos, su tendencia por lo general ya es horizontal a lo largo del tiempo; para comprobarlo basta con plotear los datos y observar el comportamiento de la gráfica. De todas formas, en MATLAB® es posible realizar esta operación de forma automática con el comando “detrend”.

Si bien ya se definió como obtener la variable aceleración a partir de los archivos de datos, también es importante obtener el vector tiempo, definido como la primera columna de cada archivo de datos; es necesario acotar que su valor inicial no será cero sino un valor aleatorio y, a partir de ahí, mostrará valores crecientes con el intervalo de los segundos transcurridos entre una muestra y otra, por lo que es necesario trabajar con estos valores para formar un vector creciente de esta variable, que inicie efectivamente en cero; éste y otros procedimientos se pueden visualizar en los códigos computacionales en la sección de anexos.

El siguiente es un procedimiento no obligatorio, pero si recomendado pues permitirá ahorrar tiempo y tener más seguridad de los datos a analizar: se trata de un análisis previo sobre la confiabilidad de los datos adquiridos en campo, sin tener que aplicar las herramientas matemáticas que se describirán posteriormente; se plotea los datos que se espera analizar y por medio del criterio del usuario decidir si son válidos o no; si es que existen picos excesivos, lecturas dudosas, canales en escalas muy diferentes a otros, o cualquier factor que pueda poner en duda la confiabilidad de ese archivo de datos o matriz, se lo descarta. Al final del proceso se tendrá un panorama más claro de cuáles son los archivos que se pueden usar en el análisis y que darán resultados coherentes.

Finalmente se procede a filtrar las señales de la matriz de datos ya definida bajo los criterios antes mencionados.

4.5.1.1.Filtrado

El filtrado digital es el proceso mediante el cual se remueven ciertas frecuencias contenidas en una señal, dando como resultado una reducción en el ruido y permitiendo al usuario concentrar el análisis en el rango de frecuencias de interés.

El filtro que se utiliza dependerá del tipo de frecuencia que se desea aislar o eliminar. El filtro de pasa-baja atenúa las frecuencias altas y permite el paso de las bajas; el pasa-alta permite el paso de las frecuencias altas, atenuando las bajas; mientras que el filtro de pasa-banda elimina las frecuencias altas y bajas dejando un rango determinado. Los filtros lineales digitales son funciones de transferencia que actúan en la señal, se los puede representar a través de polinomios:

$$H(\omega) = \frac{b_1 + b_2\omega + b_2\omega^2 + \dots + b_n\omega^n}{a_1 + a_2\omega + a_2\omega^2 + \dots + a_n\omega^n} \quad (12)$$

En la ecuación (12), $H(\omega)$ es la función de filtro que se aplicará a la señal, a_i y b_i con los coeficientes del filtro, mientras que n es el orden del filtro.

El orden de filtro es el factor clave para lograr obtener una correcta función filtrada, como se puede observar en la Figura 21, mientras mayor sea el valor de n , más precisión se tendrá al filtrar una señal; sin embargo, computacionalmente, el tiempo de procesamiento aumenta significativamente al incrementar el orden. El valor de orden recomendado es ocho, pues genera una señal filtrada con buena precisión y su procesamiento tiene una duración media.

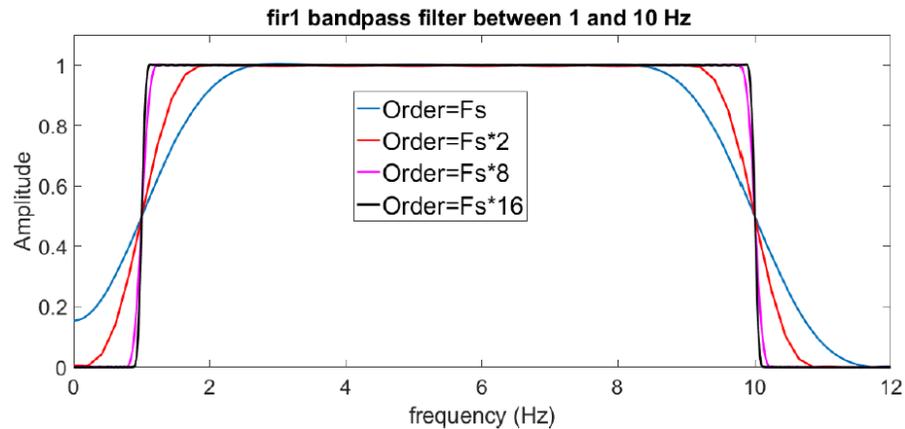


Figura 21 Filtro pasa-banda entre 1 y 10 Hz, visualización del orden de filtro.
(Yousefian & Stavridis, n.d.)

En MATLAB® existen varias funciones de filtro disponibles, para este caso se utilizó el comando “fir1”, a fin de crear los coeficientes polinomiales, y un filtro de tipo pasa-banda entre las frecuencias de interés, de acuerdo con lo esperado por el tipo de vibraciones.

$$b = \text{fir1}\left(n, \left[\frac{f_{cutin}}{Fnyq}, \frac{f_{cutoff}}{Fnyq}\right], 'bandpass'\right) \quad (13)$$

En la ecuación (13) se detalla el código utilizado para crear los coeficientes de filtro, siendo el valor de $a = 1$, $Fnyq$ como la frecuencia de Nyquist, antes mencionada ($Fnyq = Fs/2$),

mientras que el valor de n , definido anteriormente, será $n = Fs * 8$, el intervalo de frecuencias de interés está expresado por medio de f_{cutin} , límite inferior y f_{cutoff} límite superior, mientras que el tipo de filtro, como se mencionó antes, es de tipo pasa-banda ('*bandpass*'). De esta manera queda creada la función $H(\omega)$ para que sea aplicada a la función original; en el entorno de MATLAB® se realiza mediante la ecuación (14).

$$X = \text{filtfilt}(b, a, x) \quad (14)$$

Una vez terminado el filtro de la matriz de datos, es momento de empezar con el análisis por medio de herramientas matemáticas, que en primera instancia convertirán la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

4.5.2. Ventana

La respuesta de la estructura hacia vibraciones ambientales es asumida como estacionaria o tiempo lineal invariante (LTI); sin embargo, esta idea es invalidada por efectos del ruido, vibraciones secundarias e incluso imperfecciones estructurales, dando como resultado que las características obtenidas por las señales ambientales varíen con el tiempo.

Realizar una ventana de la señal, es en realidad promediarla, ayudando a atenuar las características temporales de la misma; aplicado en el dominio del tiempo, elimina el inconveniente de tener fuga de potencias en frecuencias lo que causa una distorsión significativa del espectro estimado.

Existe gran cantidad de ventanas, la más sencilla y aplicada es la Ventana de Hanning o también denominada como la del coseno cuadrado, se basa en una combinación de dos ventanas más simples; una rectangular y un coseno, como se define en la siguiente ecuación:

$$Wh(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T} \right) = 1 - \cos^2 \left(\frac{\pi t}{T} \right) \quad 0 \leq t \leq T \quad (15)$$

$$Wh(t) = 0 \quad \text{Otros caso}$$

4.6. Herramienta de identificación

El procesamiento como tal conlleva el uso de algunas herramientas matemáticas que permiten visualizar características de las señales de forma diferente, y que no serían reconocibles en la señal original; también permiten determinar las frecuencias características de las señales, es decir, de la estructura instrumentada, y se las denomina herramientas de identificación.

4.6.1. Transformada de Fourier

Las historias de aceleración en cada piso y en el suelo (cuando están disponibles) se transforman primero al dominio de frecuencia, a través de un método denominado la Transformada de Fourier. Convirtiendo las ecuaciones de movimiento al dominio de frecuencia. La transformada de Fourier de una función $x(t)$ está dada por (Henao, 2013):

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (16)$$

4.6.1.1. Transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier es un algoritmo desarrollado para su cálculo computacional, el cual reduce significativamente la cantidad de operaciones a realizarse en el cálculo de la transformada de Fourier.

El resultado de la aplicación de la transformada rápida de Fourier es una serie de datos complejos con componentes reales e imaginarios, los primeros ayudan a extraer información de magnitud o amplitud, mientras que la parte imaginaria ayuda a visualizar la fase o dirección del vector complejo; en muchos casos las amplitudes relativas o ángulos de fase entre dos señales adquiridas simultáneamente son de suma importancia para el análisis, pues indicará un pico característico. Al graficar la frecuencia con sus respectivos valores de amplitud se obtiene el espectro de Fourier.

El espectro de Fourier muestra picos en las frecuencias presentes en la señal, con diferentes amplitudes dependiendo de qué tan dominante sea esta frecuencia en la señal. Los espectros de Fourier y, en general, el análisis en el dominio de la frecuencia son metodologías útiles que permiten identificar características que no son evidentes en el dominio del tiempo, en el caso de la dinámica estructural las frecuencias dominantes de una señal como la excitación sísmica o la respuesta estructural del sistema (Henaó, 2013).

El comando utilizado para realizar esta operación en MATLAB® es “*fft*”.

4.6.2. Funciones de densidad espectral

Son representaciones en el dominio de la frecuencia de la transformada de Fourier; el espectro de potencia de una señal permite visualizar, de manera más limpia o clara, las frecuencias dominantes de la misma, ya que los picos se vuelven más pronunciados por la periodicidad de dicha

frecuencia. Mientras que el espectro cruzado de potencia entre dos señales, una de entrada y otra de salida, amplifica los picos para la frecuencia que se repite en ambas señales y atenúa aquellas frecuencias que están presente en una señal, pero no en la otra.

4.6.2.1. Espectro de potencia

El espectro de potencia (PS) se define como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación, y se expresado como:

$$PS(f) = \sum_{n=0}^{N-1} r_{xx}(n)e^{-i2\pi ft} \quad (17)$$

Donde r_{xx} , la función de autocorrelación, se define mediante la ecuación siguiente:

$$r_{xx}(n) = \sum_{k=0}^N x(k)x(k+n) \quad (18)$$

El espectro de potencia permite determinar la distribución de la potencia de una señal a lo largo de un intervalo de frecuencias (Echeverry, Julián David;Guarnizo Lemus, Cristian;Orozco, 2007).

Ahora bien, la densidad espectral de potencia permite suavizar el espectro de una señal, en la medida que permite disminuir la varianza entre estimaciones; para este efecto, existen varias metodologías; para este caso, se utiliza el método de Welch.

El método de Welch se diferencia de otros métodos al permitir el solapamiento de segmentos de datos, este efecto se conoce como “overlap” o solapamiento. Por lo general, se utiliza un 50% de solape entre las secuencias, como se puede observar en la siguiente Figura.

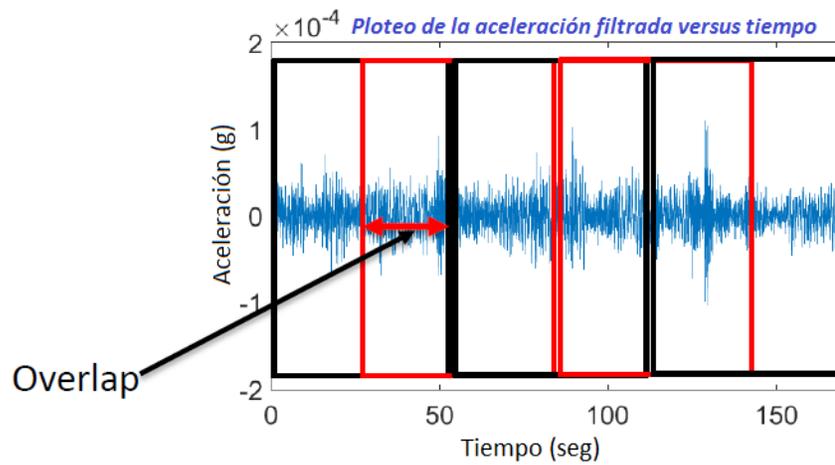


Figura 22 Gráfico de una señal aceleración versus tiempo mostrando el solapamiento (Yousefian & Stavridis, n.d.)

En el programa usado para el análisis, se puede implementar esta herramienta, valiéndose de la función “*pwelch*”, que da como resultado un ventaneo del espectro de densidad de potencia y cuyo gráfico mostrará una representación de la señal con menos frecuencias de ruido. En la ecuación (19) se muestra su configuración. Su resultado son vectores escalares.

$$[P_{xx}, W] = \text{pwelch}(B, \text{hanning}(wl), \text{overlap}, \text{fftp}, Fs) \quad (19)$$

4.6.2.2. Espectro cruzado de potencia

El espectro cruzado de potencia es una herramienta muy útil para determinar la diferencia de fase entre dos señales, en frecuencias diferentes (Yousefian & Stavridis, n.d.).

El espectro cruzado de potencia de dos señales A y B puede ser calculado como se muestra en la ecuación (20):

$$S_{AB}(f) = \frac{FFT(B) * \overline{FFT(A)}}{N^2} \quad (20)$$

Donde N es el número de muestras o datos de la señal y $\overline{FFT(A)}$ es la conjugada de la transformada de Fourier de la señal A.

Para efectos prácticos en el código desarrollado, el programa solicitará al usuario seleccionar una señal base para realizar esta operación, y se la tratará como señal A.

4.6.3. Función de transferencia

La función de transferencia es una representación de la relación entre una señal de entrada y una de salida, en un sistema lineal. En términos simples es el cociente espectral entre los espectros de salida y, de entrada, usualmente estimada en el dominio de la frecuencia.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (21)$$

En la ecuación (21) se observa la manera de operar la función, donde $X(s)$ es la señal de entrada, $Y(s)$ es la señal de salida y $H(s)$ es la función de transferencia resultante.

Como se muestra en la ecuación (22), el resultado provee información de la amplitud relativa y fase entre la señal de referencia y el resto de canales.

$$G(w) = \frac{|Y|}{|X|} = |H(jw)| \quad (22)$$

$$\phi(w) = \arg(Y) - \arg(X) = \arg(H(jw))$$

Para el análisis de las señales se tomarán como canales de entrada una señal por sentido, teniendo como resultado dos funciones de transferencia, una con base X y otra con base Y; posteriormente, queda a criterio del usuario seleccionar cual es más conveniente para las frecuencias características.

Con ayuda de todas las herramientas de identificación descritas es posible determinar, con mayor seguridad, las frecuencias características de la estructura, y su respuesta dinámica.

4.7. Fase

Se denomina fase o ángulo de fase a la dirección relativa del movimiento entre dos puntos de monitoreo, de dos señales adquiridas de manera simultánea, su valor varía entre $\pm\pi$. Si el ángulo de fase es cercano o igual a cero entre dos o más puntos de una misma frecuencia, se dice que están en fase e indica correspondencia en el sentido del movimiento. Por el contrario, si el ángulo de fase tiene un valor de $\pm\frac{\pi}{2}$, se dice que los puntos están en desfase.

La fase es una herramienta útil para determinar las frecuencias características, de forma más clara, y construir las formas modales de la estructura analizada, ya que indica el movimiento de la misma en cada uno de las plantas instrumentadas.

4.7.1. Compás

Para efectos prácticos, el programa MATLAB® visualiza el ángulo de fase mediante el comando “compass”, utilizado para graficar la función de transferencia de una frecuencia dada, son números complejos que formarán tantos vectores como canales se analicen.

En el código desarrollado se grafica de esta forma las funciones de transferencia con sus diferentes bases, permitiendo al usuario dar un mejor criterio de si, efectivamente, se trata de una frecuencia característica, o simplemente de un pico producto del ruido.

4.8. Metodología de selección de frecuencias características

La metodología utilizada para la determinación de las frecuencias características de la estructura instrumentada es la denominada “peak picking”, y asume que cada pico significativo de la función frecuencia-respuesta corresponde a un modo natural.

En la Figura 23 se muestra la transformada de Fourier, de un grupo de señales producidas por vibraciones ambientales, en ella se pueden identificar varias crestas con mayor amplitud que el resto; cada uno de estos picos podría representar una forma modal de la estructura, sin embargo, está sujeto al criterio del usuario, su correcta determinación.

Mientras más señales se tienen, los picos se representan con mayor número de datos, dentro de los cuales se encuentra la frecuencia característica real. La complejidad aumenta proporcionalmente al número de canales, y corresponde al usuario buscar aquel pico donde todos los canales converjan, o aquella frecuencia de mayor tendencia en el pico.

Ahora bien, particularmente en la transformada de Fourier la identificación de picos se dificulta en el análisis de una estructura real, ya que contiene gran cantidad de datos y la nube de puntos posibles de frecuencias características es bastante amplia; por este motivo se utilizan las herramientas de identificación antes descritas, de esta manera se busca limpiar en gran medida las señales, disminuir ruido y posibles errores de apreciación.

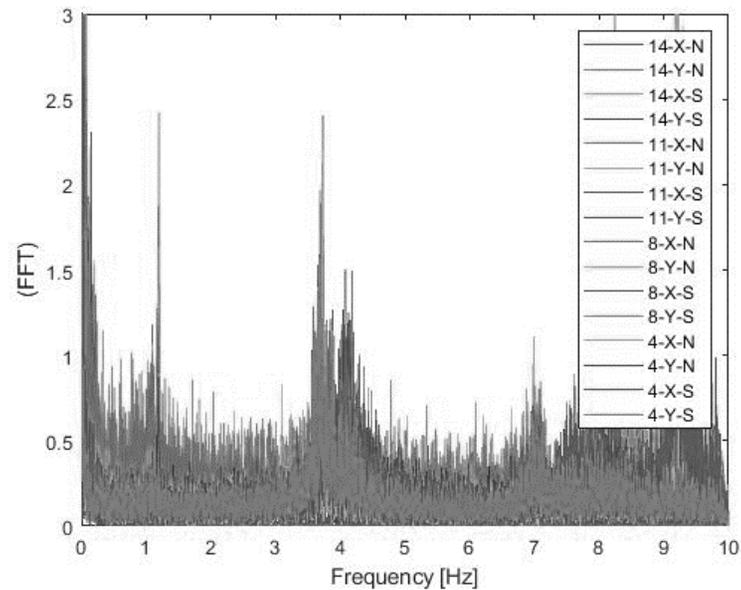


Figura 23 Espectro de Fourier por ensayos de vibración ambiental

Una vez aplicadas las herramientas de identificación, se plotean los resultados y se implementa el método de “peak picking”, identificando los picos en común en las herramientas de identificación; si las frecuencias coinciden entre ellas, hay más probabilidad de que se trate de una respuesta dinámica real de la estructura, es decir, de un modo de vibración; se identificará de esta manera tantos modos como sea posible en los gráficos.

En términos prácticos, una vez identificadas las posibles frecuencias características, se las enlista y se verifica su fase, ploteando su función de transferencia, como se describió en la sección anterior; de esta manera se descartan opciones de resultados y, finalmente, se construyen las formas modales.

4.8.1. Construcción de modos de vibrar

Una vez identificadas las frecuencias características de tantos modos como haya sido posible, es necesario crear las formas modales de la estructura, que son las representaciones adimensionales del movimiento de la estructura, en un periodo de vibración.

A partir de la magnitud de la función de transferencia, se debe determinar la magnitud relativa de cada uno de sus componentes en la frecuencia de interés, de la misma manera se trabaja con el ángulo de fase, el que también viene dado por la función de transferencia; es importante recordar que el resultado de esta última es una matriz de números complejos que bien pueden convertirse en vectores con magnitud y ángulo.

En el código desarrollado para el análisis se construye las formas modales automáticamente, obteniendo la magnitud relativa, ángulos de fase y realiza la normalización.

La normalización de los modos de vibración hace referencia a relacionar los resultados de la función de transferencia en los diferentes canales, con el fin de formar un vector que comprenda a toda la estructura. En el programa utilizado para el análisis la normalización de puede hacer automáticamente con el comando “*norm*”; sin embargo, también es posible normalizar los vectores manualmente, desarrollando un código para este propósito, y operando los componentes del vector por medio del método de la raíz de la suma de los cuadrados o SRSS, por sus siglas en inglés.

4.9. Criterio de aseguramiento modal (MAC)

Ahora bien, una vez obtenidos las frecuencias naturales de la estructura y sus modos de vibración, estos deben ser comparados de alguna manera, por medio de un modelo numérico u otros ensayos. La comparación de las formas modales no se puede realizar a simple vista, sino que se necesita un método objetivo que compare los vectores modales.

El criterio de aseguramiento modal o MAC, por sus siglas en inglés, es un indicador estadístico muy utilizado para la comparación cuantitativa de los vectores modales.

El MAC es calculado como el producto normalizado escalar de dos vectores $\{\varphi_A\}$ y $\{\varphi_x\}$. Los resultados se expresarán de manera escalar, formando al final una matriz; la operación a realizar se muestra en la ecuación siguiente:

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_x\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_x\}_q^T \{\varphi_x\}_q)} \quad (23)$$

Entendiéndose a $\{\varphi_x\}_q$ como el vector experimental modal del modo q , y $\{\varphi_A\}_r$ como el vector analítico modal compatible del modo r .

Como resultado, se obtiene un valor escalar entre 0 y 1, si este es cercano o igual a 1, los modos son idénticos, representando una correspondencia consistente; mientras que, si el valor resultante es cercano o igual a 0 los modos son ortogonales y representa una correspondencia no consistente.

El valor aceptable mínimo es de 0.80, sin embargo, el valor recomendado para validar el ensayo es 0.90.

4.10. Resumen

Los sistemas de identificación de estructuras son el conjunto de herramientas matemáticas útiles para el procesamiento de datos, se encargan de limpiar la señal que posibles ruidos ambientales presenten durante el ensayo, y permiten el manejo de la información adquirida, transformándola del dominio del tiempo al de la frecuencia.

Los conceptos expuestos a lo largo de este capítulo aportan a la mejor comprensión del procesamiento y análisis de datos; las herramientas matemáticas descritas están presentes en los códigos de MATLAB® desarrollados por los autores y se encuentran en la sección de anexos.

El capítulo también menciona la metodología utilizada para seleccionar las frecuencias características de la estructura, los criterios de selección para el análisis y la interpretación de resultados; como parte de esto último se menciona el procedimiento para la construcción de las formas modales y finalmente el criterio de aseguramiento modal.

En el capítulo siguiente se pone en práctica la teoría descrita en los dos anteriores, respecto al proceso de adquisición de datos, y su respectivo análisis; se busca validar la metodología desarrollada por medio de un caso de estudio, es decir, una edificación real de configuración estructural simple, a la que se instrumentará y determinará su comportamiento modal; mientras que, por otro lado, se realizará el modelo analítico, para finalmente comparar resultados.

CAPÍTULO V

VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

5.1. Introducción

Una vez establecidos los conceptos teóricos alrededor de la instrumentación de estructuras es conveniente implementarlos en un caso de estudio, el objetivo es validar la metodología desarrollada para el manejo de los equipos durante el ensayo; así como también poner en práctica las herramientas de identificación descritas y obtener las frecuencias, periodos y las formas modales características de la estructura.

Por otro lado, se realiza el modelo analítico del caso de estudio determinando la respuesta modal de la estructura, de tal manera que se compare con el comportamiento estructural real de la misma, por medio del criterio de aseguramiento modal MAC.

5.2. Criterio de selección

Bajo la premisa de que se trata de una validación de la metodología desarrollada, existen criterios a considerar, para la selección de la edificación a analizar. Estos son: una configuración estructural simple, número de pisos reducido, regularidad en planta y elevación, sistema constructivo de pórticos de hormigón armado con losa alivianada o maciza, por ser el sistema más común en nuestro medio, y localización del edificio que facilite el proceso.

5.3. Descripción del caso de estudio

La edificación seleccionada está ubicada en el campus matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en la ciudad de Sangolquí, cantón Rumiñahui. Se trata de una estructura destinada

a aulas de clase, de cuatro pisos de altura, completamente regular en planta y elevación, y cimentada sobre suelo tipo C.

El sistema constructivo es aporticado con mampostería de bloque y losa alivianada. Respecto a los materiales utilizados en la edificación, el hormigón tiene una resistencia de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, mientras que el acero de refuerzo es de $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$; con respecto a la mampostería, la resistencia a compresión asumida es de $f'm = 24 \text{ kg/cm}^2$.

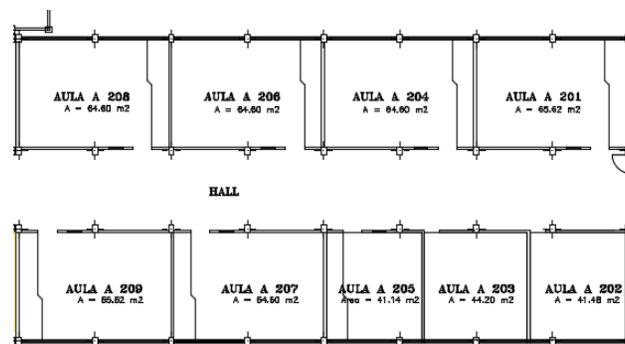


Figura 24 Bloque de aulas “A” de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y vista de planta tipo de la estructura.

En la Figura 24 se puede observar una imagen de la fachada lateral del caso de estudio, así como una vista en planta de la estructura.

5.4. Descripción del modelo computacional

Para el análisis y diseño de la estructura se utilizó el programa ETABS® 2016 que está basado en el método matricial de los desplazamientos, para encontrar las acciones internas de la estructura; utiliza la teoría de elementos finitos para una mayor exactitud en el cálculo de los mismos. (Peñaherrera, 2018)

En la Figura 25 se muestra una vista general de la estructura en tres dimensiones, se visualiza los pórticos extruidos y todos los elementos estructurales, vigas, columnas, losa y mampostería.

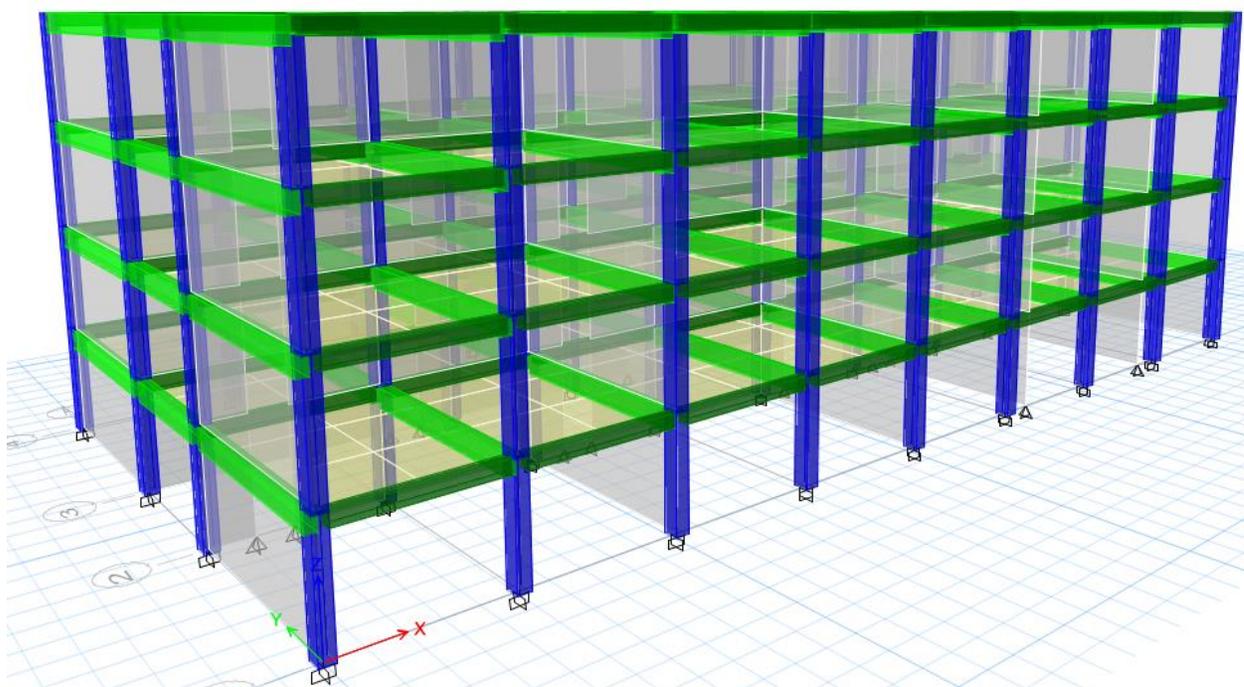


Figura 25 Estructura evaluada, vista en tres dimensiones por medio de ETABS®.

5.4.1. Descripción de secciones

Los detalles de las secciones de todos los elementos estructurales que están considerados en el modelo numérico fueron obtenidos mediante levantamiento en campo, debido a la falta de información o planos estructurales del caso de estudio; las secciones resultantes se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5*Dimensiones de los elementos estructurales del caso del estudio.*

ELEMENTO	DIMENSIONES		
Columnas	b(cm)	h(cm)	e (cm)
	35	50	-
Vigas	30	40	-
	30	60	-
Losa	-	-	30
Mampostería	-	-	15

Respecto a la losa, ésta es alivianada de hormigón armado, y la mampostería adicionada es de bloque de concreto de 15 cm, fue modelada con elementos tipo wall, de un espesor macizo equivalente de 13,4 cm, de acuerdo a lo recomendado por Paredes, 2015.

Para la estimación de las cargas por acción sísmica, el cálculo fue realizado según se indica en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC; de acuerdo al sitio se determinó que la parroquia Sangolquí se encuentra en la Zona V, es decir, se espera una aceleración máxima probable del suelo de 0,4 g, al tratarse de una estructura de ocupación especial el factor de importancia es $I=1,3$.

De acuerdo a la Norma, se calcula el cortante basal, espectro de diseño y periodo fundamental de la estructura, esto último mediante una fórmula empírica cuyas variables son el tipo de estructura y la altura total de la misma; los resultados de este análisis figuran en la Tabla 6.

La masa de la estructura por peso propio se calcula automáticamente; sin embargo, se le adicionó sobrecarga por acabados de 250 kg/m^2 ; mientras que la carga viva se determinó de acuerdo a lo sugerido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción en su capítulo de cargas no sísmicas, para unidades educativas se tiene 2 kN/m^2 para las aulas, y 4 kN/m^2 para las áreas de corredores.

Tabla 6*Espectro de diseño, período fundamental y cortante basal de la estructura.*

Parámetros para espectro de diseño	
Zona Sísmica	V
Valor del factor Z	0.4
Característica de la amenaza sísmica	Alta
Tipo de perfil del suelo	C
Factor de sitio Fa	1.2
Factor del comportamiento Fs	1.11
Factor de sitio Fd	1.11
Región	Sierra
N	2.48
Período de vibración fundamental	
Coefficiente Ct=	0.055
Altura máxima del edificio h=	13.6
Coefficiente α=	0.9
Periodo de vibración Tf=	0.10
Periodo límite de vibración Tc=	0.56
Contarte Basal de diseño	
Factor de importancia I=	1.3
Irregularidad en planta ϕ_p=	1
Irregularidad en elevación ϕ_e=	1
Coefficiente de reducción sísmica R=	8
Periodo fundamental (s)	
	0.58
Sa elástico	
	1.1904
Coefficiente basal %	
	0.19344

Los patrones de carga utilizados en el análisis caracterizan las cargas asignándoles un multiplicador de peso propio, éste será cero para todas las cargas con excepción de la muerta; en términos prácticos, aquellas cargas con el multiplicador en cero no se calcularán de forma

automática, sino que deben ser definidas por el usuario; en la Tabla 7 se detallan aquellas usadas en el modelo del caso de estudio.

Tabla 7

Patrones de carga para el modelo computacional del caso de estudio. Obtenido de ETABS®.

Carga	Tipo	Multiplicador peso propio	Carga lateral	Valor (T/m²)
D	Dead	1	-	-
L	Live	0	-	0.2/0.4
PP	Super dead	0	-	0.25
EX	Seismic	0	User Coefficient	-
EY	Seismic	0	User Coefficient	-

5.4.2. Análisis modal espectral del caso de estudio

Como parte del procedimiento dinámico de cálculo de las fuerzas sísmicas, descrito en la Norma Ecuatoriana de la Construcción, se menciona el análisis espectral, el cual comprende la respuesta elástica de la estructura tomando en consideración todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta de la estructura mediante los períodos de vibración; se toman los modos que involucren la participación de la masa modal acumulada de al menos 90% de la masa total de la estructura, en cada una de las direcciones horizontales principales consideradas (NEC-SE-DS, 2015).

En la Figura 26 se presentan los resultados del análisis modal de la estructura con la participación de la masa, esta información se complementa realizando un pequeño análisis del movimiento que representan los tres primeros modos de vibración como se observa en la Tabla 8.

Modal Participating Mass Ratios										
Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RX	
Modal	1	0,338	0,038	0,7703	0	0,038	0,7703	0	0,1614	
Modal	2	0,333	0,8416	0,0274	0	0,8796	0,7977	0	0,0055	
Modal	3	0,312	0,0063	0,0653	0	0,8859	0,863	0	0,0134	
Modal	4	0,115	0,0777	0,0114	0	0,9636	0,8745	0	0,0764	
Modal	5	0,114	0,009	0,0837	0	0,9727	0,9581	0	0,58	
Modal	6	0,106	0,0003	0,0083	0	0,9729	0,9665	0	0,058	
Modal	7	0,073	0,0225	2,749E-06	0	0,9954	0,9665	0	1,06E-05	
Modal	8	0,069	0	0,0242	0	0,9954	0,9906	0	0,0636	
Modal	9	0,064	1,68E-05	0,0024	0	0,9954	0,9931	0	0,0063	
Modal	10	0,059	0,0046	0	0	1	0,9931	0	0	
Modal	11	0,054	6,3E-07	0,0062	0	1	0,9993	0	0,0318	
Modal	12	0,051	9,347E-07	0,0007	0	1	1	0	0,0037	

Figura 26 Resultados de análisis modal con la participación de la masa mediante el modelo en ETABS®.

En la Figura anterior se muestran los periodos fundamentales de la estructura, correspondientes a los primeros doce modos de vibración, con los cuales queda representada la respuesta dinámica de la estructura; para comprobarlo se obtiene el porcentaje participación de la masa, valor que se puede obtener de las columnas Sum UX, Sum UY; en el quinto modo la participación de la masa ya cumple el porcentaje establecido por la norma.

Tabla 8

Porcentaje de participación de la masa en los tres primeros modos.

MODO	X	Y	R	OBSERVACIÓN
1	4.29	89.26	5.55	Desplazamiento y torsión
2	95.00	3.17	1.61	Desplazamiento y torsión
3	0.71	7.57	79.24	Torsión pura

La Tabla 8 muestra el porcentaje de participación de masa en las dos direcciones de la estructura y la rotación, de esta manera se puede predecir la forma modal que se obtendrá. La información será comparada con los períodos y formas modales encontradas por medio de la instrumentación

de la estructura, contraponiendo los criterios de diseño del proyecto y la realidad de la edificación ya construida y en funcionamiento.

Un factor a ser controlado, es el criterio de aseguramiento modal o MAC, el cual debe ser calculado para verificar que las frecuencias encontradas, si bien pueden no ser las mismas numéricamente, determinan formas modales idénticas.

5.5. Instrumentación del caso de estudio

5.5.1. Adquisición de datos in- situ

La instrumentación se realizó en tres configuraciones teniendo como piso en común en todas ellas la segunda planta, lugar donde se ubicó el dispositivo de adquisición de datos durante todo el ensayo; en la Figura 27 se puede observar un pórtico de la estructura, en el cual se indican las configuraciones realizadas en la instrumentación.

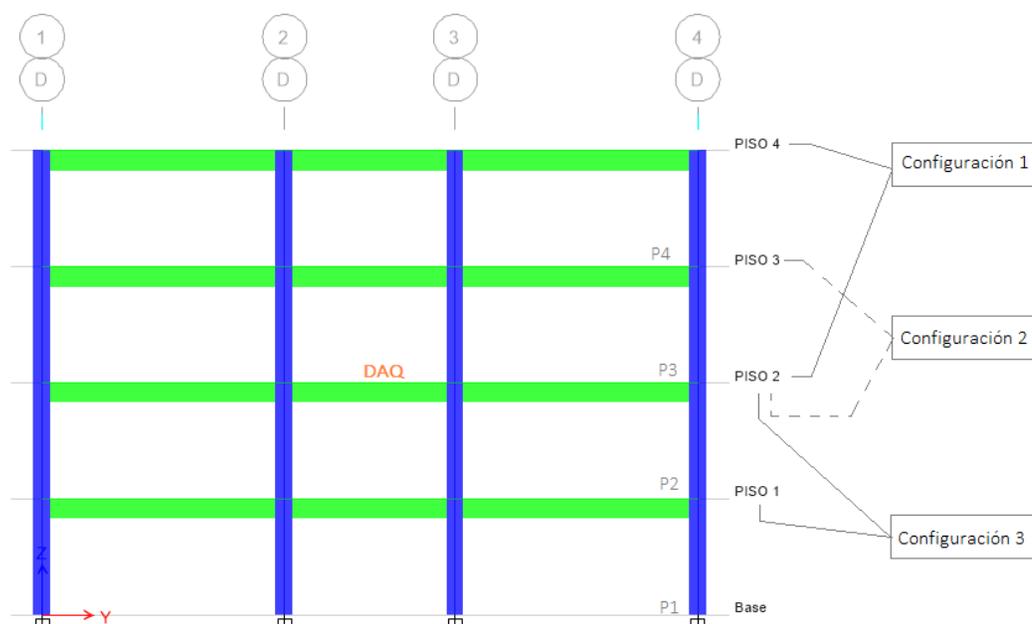


Figura 27 Configuraciones realizadas durante el ensayo.

Respecto a la ubicación de los sensores en planta, en la Figura 28 se puede observar la ubicación de los equipos en todas las plantas, así como la ubicación del DAQ y la dirección de los ejes asumida para el proceso.

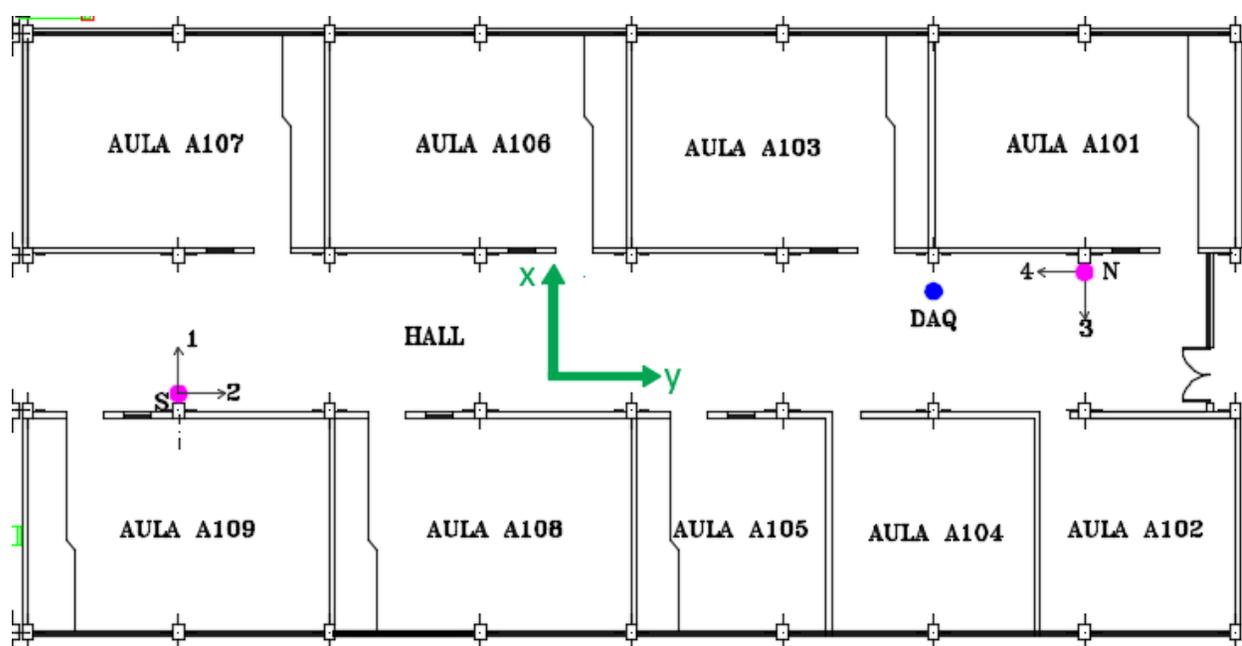


Figura 28 Ubicación de los equipos en las plantas instrumentadas, ubicación del DAQ en el piso 2 y ejes asumidos.

En la Figura anterior se muestran los puntos S y N correspondientes a cada planta instrumentada, se colocaron los sensores cerca de elementos estructurales fuertes como son las columnas, con el fin de evitar señales con ruido excesivo o que no correspondan a la respuesta dinámica de la estructura. Los puntos 1 y 3 corresponden a la dirección X de análisis, mientras que los puntos 2 y 4 a la dirección Y; estos representan a los sensores conectados en cada punto de medición. El dispositivo de adquisición de datos o DAQ se ubicó, como se mencionó anteriormente, en la segunda planta en la ubicación especificada en la Figura.

En la Figura 29 se puede apreciar a los sensores conectados en un punto de medición, listos para la adquisición de datos.



Figura 29 Sensores uniaxiales conectados al cubo metálico para realizar el ensayo en dos direcciones.

Es importante recalcar que los ejes asumidos X y Y en la instrumentación son opuestos a los utilizados en el modelo analítico; razón por la cual, se necesitará corregir los ejes para comparar las formas modales.

En la Tabla 9 se muestra la documentación del ensayo, en ella consta la ubicación de los sensores por cada planta, su respectivo factor de calibración, y el orden en el que está conectado al computador, mismo orden en que se almacenaron los datos en los archivos de texto.

El formato de documentación contiene toda la información a ser completada en campo y se encuentra en la sección de anexos.

Tabla 9*Documentación correspondiente al ensayo de instrumentación; bloque A.*

SET UP	CANAL NO.	PISO	LOC.	SENTIDO	ID SENSOR	F. CAL (mV/g)	F. CAL (V/g)	DAQ. CH		COL. ARC.
								M	C	
1	1	2	N	X	50482	996	0.996	1	0	2
	2	2	N	Y	50480	1032	1.032	1	1	3
	3	2	S	X	50352	999	0.999	1	2	4
	out	2	S	Y	50479	967	0.967	1	3	out
	4	4	N	X	50350	995	0.995	2	0	5
	5	4	N	Y	50353	1000	1	2	1	6
	6	4	S	X	50481	1018	1.018	2	2	7
2	7	4	S	Y	50351	992	0.992	2	3	8
	1	2	N	X	50482	996	0.996	1	0	2
	2	2	N	Y	50480	1032	1.032	1	1	3
	3	2	S	X	50352	999	0.999	1	2	4
	out	2	S	Y	50479	967	0.967	1	3	Out
	4	3	N	X	50350	995	0.995	2	0	5
	5	3	N	Y	50353	1000	1	2	1	6
3	6	3	S	X	50351	992	0.992	2	2	7
	7	3	S	Y	50481	1018	1.018	2	3	8
	1	2	N	X	50482	996	0.996	1	0	2
	2	2	N	Y	50480	1032	1.032	1	1	3
	3	2	S	X	50352	999	0.999	1	2	Out
	out	2	S	Y	50479	967	0.967	1	3	4
	4	1	N	X	50350	995	0.995	2	0	5
3	5	1	N	Y	50353	1000	1	2	1	6
	6	1	S	X	50481	1018	1.018	2	2	7
	7	1	S	Y	50351	992	0.992	2	3	8

En cada configuración realizada se tuvo un canal menos (out) por una avería con uno de los cables coaxiales, se solucionó en la configuración 3, se adquirieron los datos del canal faltante; en la Tabla 10 se muestran las direcciones medidas por piso en cada configuración realizada, marcadas con guion medio se encuentran aquellos canales de los que no se tuvo información.

Tabla 10

Canales medidos por cada configuración realizada, información válida para el análisis inicial.

DIRECCIONES MEDIDAS POR CONFIGURACIÓN

SET UP	PISOS	N-W	S-E	N-W	S-E
		X	X	Y	Y
1	2	•	•	•	-
	4	•	•	•	•
2	2	•	•	•	-
	3	•	•	•	•
3	2	•	•	-	•
	1	•	•	•	•

Los datos de aceleración de la estructura fueron almacenados a través de un dispositivo de adquisición de datos, con una frecuencia de muestreo de 2048 Hz. La siguiente Tabla muestra el tiempo total de adquisición de datos por cada configuración, tiempo que es traducido en archivos de datos de tres minutos cada uno.

Tabla 11

Duración de los ensayos por cada configuración.

SET UP	PISOS	TIEMPO
		TOTAL (min)
1	2	21
	4	
2	2	21
	3	
3	2	24
	1	

5.5.2. Procesamiento de datos

En primera instancia se plotea los datos en el dominio del tiempo, con el propósito de visualizar aquellas matrices de datos que podrían dar mejores resultados en el análisis; se realiza este proceso en todas las configuraciones y se arma las matrices de datos de nueve minutos como se describió en el capítulo anterior.

Se aplicaron las herramientas de identificación en las tres configuraciones, en primera instancia la transformada de Fourier pasa las señales del dominio del tiempo al de la frecuencia; en la configuración tres, los canales correspondientes al primer piso en el punto S o sur tuvieron un comportamiento diferente al del resto de canales, se lo atribuye a que este punto estaba poco protegido de factores climáticos como el viento y que por ende la señal contiene demasiado ruido; en la Figura 30 se puede observar el ploteo de las señales en el dominio del tiempo así como de la frecuencia de esta configuración.

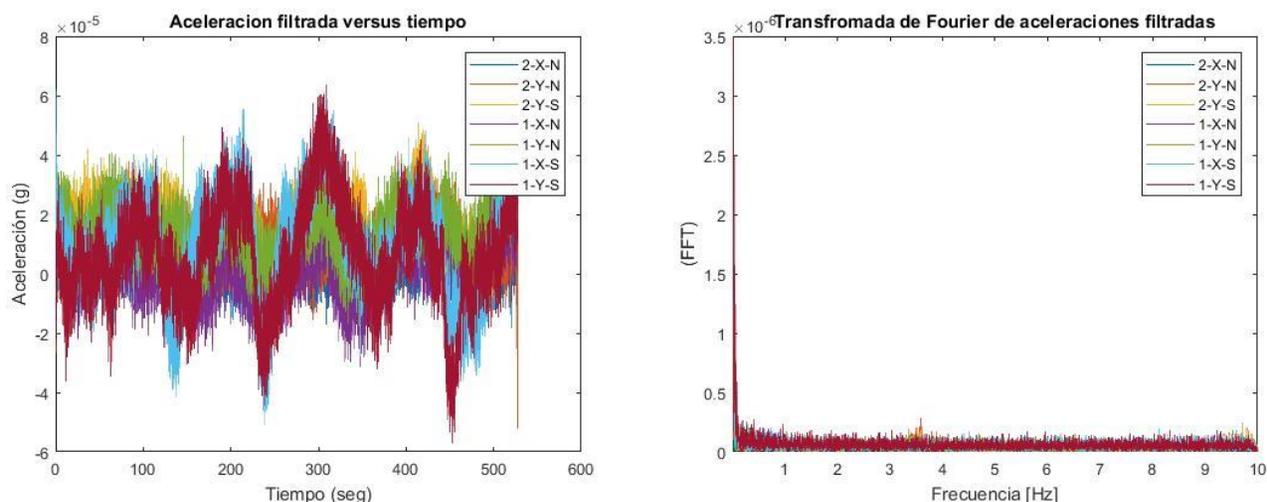


Figura 30 Gráfica de la configuración 3 en el dominio del tiempo y de la frecuencia del bloque "A" de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Para realizar el análisis de la estructura y obtener los modos de vibración de la misma se optó por descartar toda la configuración, rescatando al punto sur del piso 2 en la dirección Y, siendo este canal el omitido en las otras configuraciones. Para efectos prácticos se tendrá datos de los pisos 2, 3 y 4.

Comprobada la confiabilidad de las otras configuraciones se aplican las demás herramientas de identificación, para la función de transferencia y el espectro cruzado de potencia es necesario seleccionar una señal de entrada; generalmente, se seleccionan aquellos canales en común, en todas las configuraciones; en este caso se utilizaron los canales 2NX y 2NY, teniendo como resultado una función de transferencia por dirección de análisis; mientras que, para la transformada de Fourier y espectro de potencia, se graficarán los resultados directamente, separados por direcciones.

Con el propósito de facilitar la identificación de los picos característicos de la estructura, las herramientas de identificación son comparadas entre ellas, bajo el criterio de que, si determinada frecuencia es encontrada como pico en la mayoría de las herramientas, la probabilidad de que se trate de una respuesta de la estructura, aumenta.

La metodología de “peak picking” es aplicada en todas las configuraciones de la estructura, para después unir todas las configuraciones en un análisis completo en el dominio de la frecuencia; en la Figura 31 se muestran las herramientas de identificación para la configuración 1, y en la Figura 32 lo correspondiente a la configuración 2; como se mencionó anteriormente, se debe enlistar las frecuencias que se consideren como posibles principales del ensayo, compararlas y descartar aquellas que no reflejen buenos resultados.

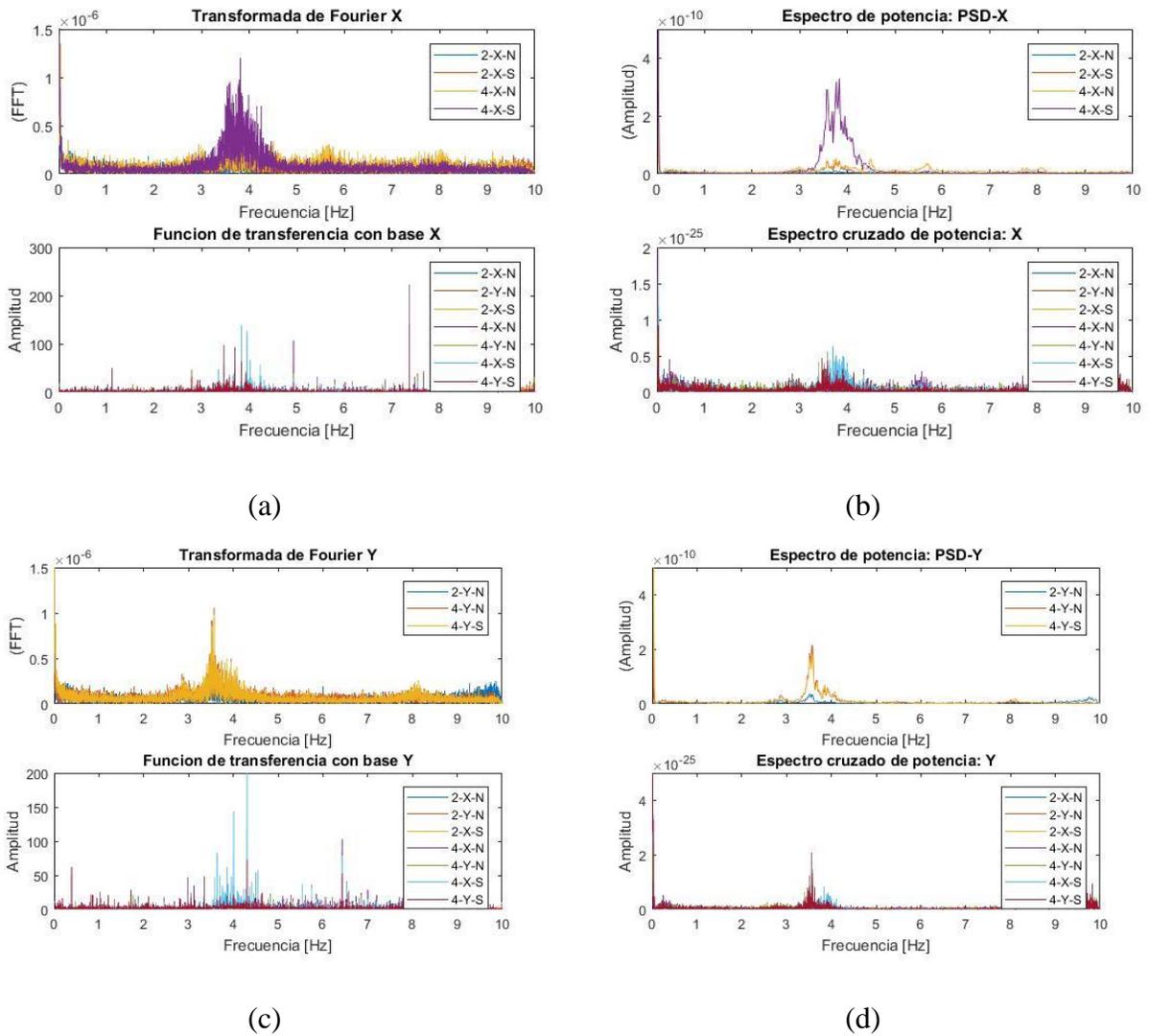


Figura 31 Herramientas de identificación para la configuración 1 del bloque A. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.

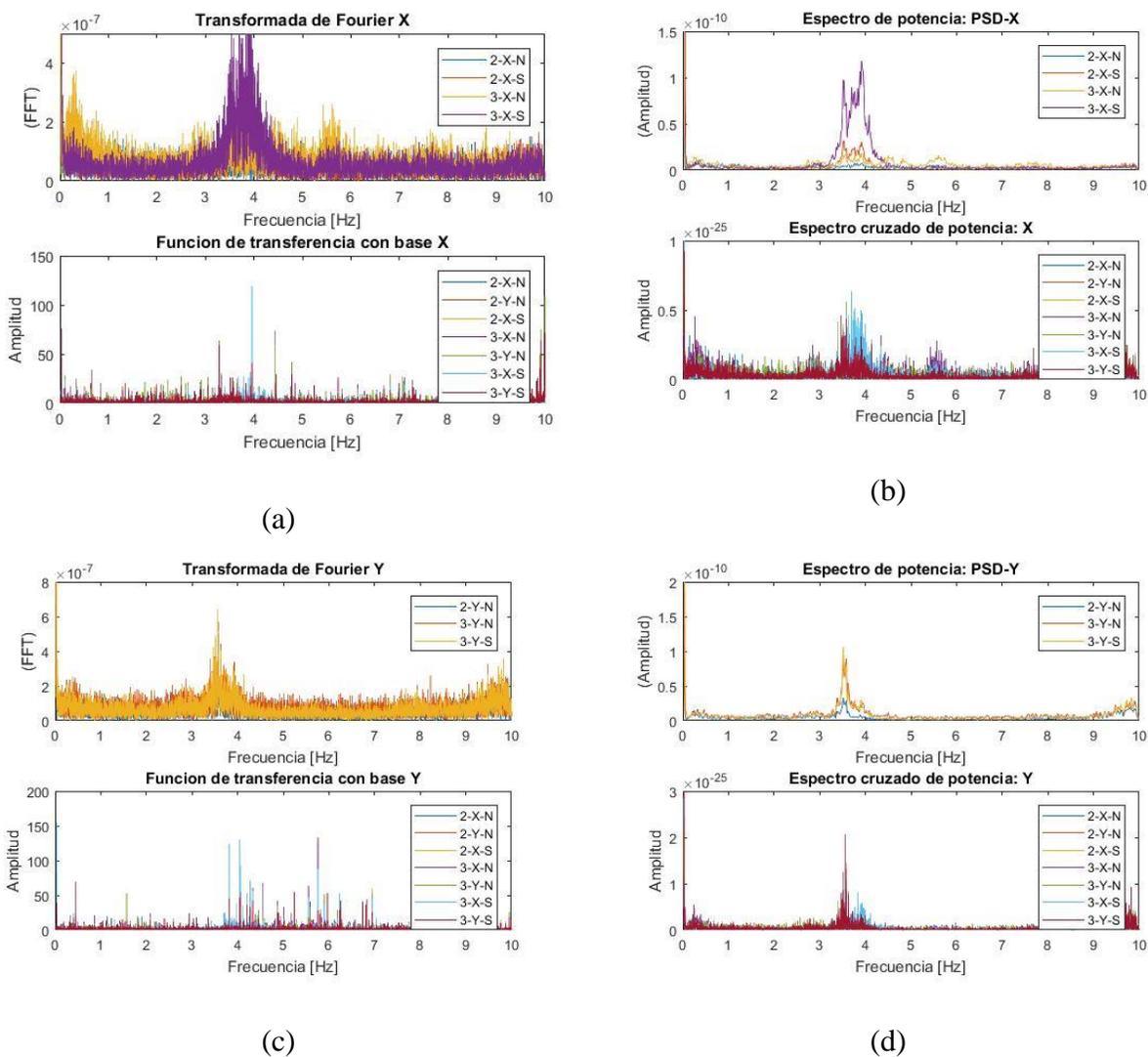


Figura 32 Herramientas de identificación para la configuración 2 del bloque A. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.

5.5.3. Resultados

En la Tabla 12 se muestran algunas de las frecuencias identificadas en las diferentes herramientas, para localizar la frecuencia característica real de la estructura es necesario descartar algunas de ellas; una de las maneras de hacerlo es planteando la función de transferencia de cada posible respuesta con la herramienta “compass”; como se explicó anteriormente, se buscarán aquellas frecuencias cuyos ángulos estén en fase.

Tabla 12

Frecuencias obtenidas mediante la metodología “peak picking” del caso de estudio.

Modo 1	Modo 2	Modo 3
2.924	3.064	3.385
2.890	3.017	3.410
2.901	3.023	3.440
2.912	3.068	3.463
2.933	3.070	3.482
2.935	3.095	3.518
2.953	3.110	3.600

Para la creación de las formas modales se obtendrá la información de la función de transferencia de dos pisos por cada configuración realizada, es necesario unir esta información en un vector de toda la estructura, sabiendo que, uno de sus canales, el canal de entrada, siempre tendrá valor unitario producto de la división para sí mismo al operar la función de transferencia; posteriormente, se grafica el vector total de la frecuencia característica encontrada, no sin antes normalizar el resultado; si bien existen muchas maneras de hacerlo, la utilizada es la SRSS, “square root of the sum of the squares”.

En las Figuras siguientes se muestran los gráficos de las formas modales correspondientes a los primeros tres modos de vibración encontrados en la estructura; si bien el análisis se hace tomando

en cuenta la función de transferencia con base en X y Y de cada frecuencia, corresponde al usuario decidir cuál de las dos funciones es la más conveniente para el modo, es decir, en cuál de las dos relaciones se obtiene vectores con ángulos en fase.

La escala a la que se grafican las formas modales, en el eje de las abscisas, obedece a la mejor visualización del modo, sin que se exagere la tendencia del mismo.

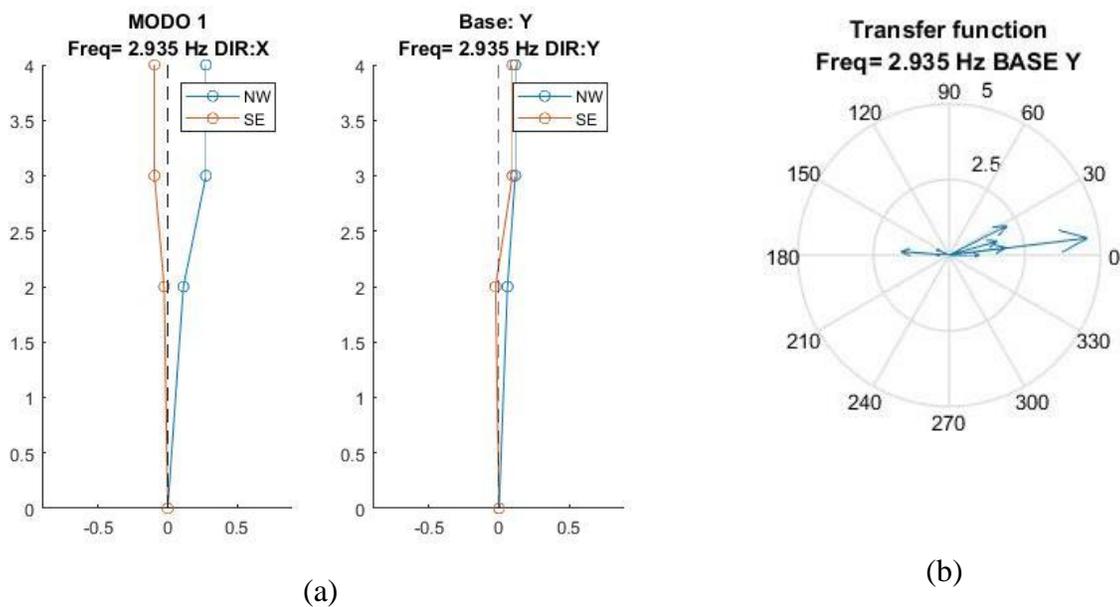


Figura 33 Modo 1, frecuencia 2.935 Hz del bloque A de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (a) Forma modal 1 (b) herramienta compass con ángulos de fase.

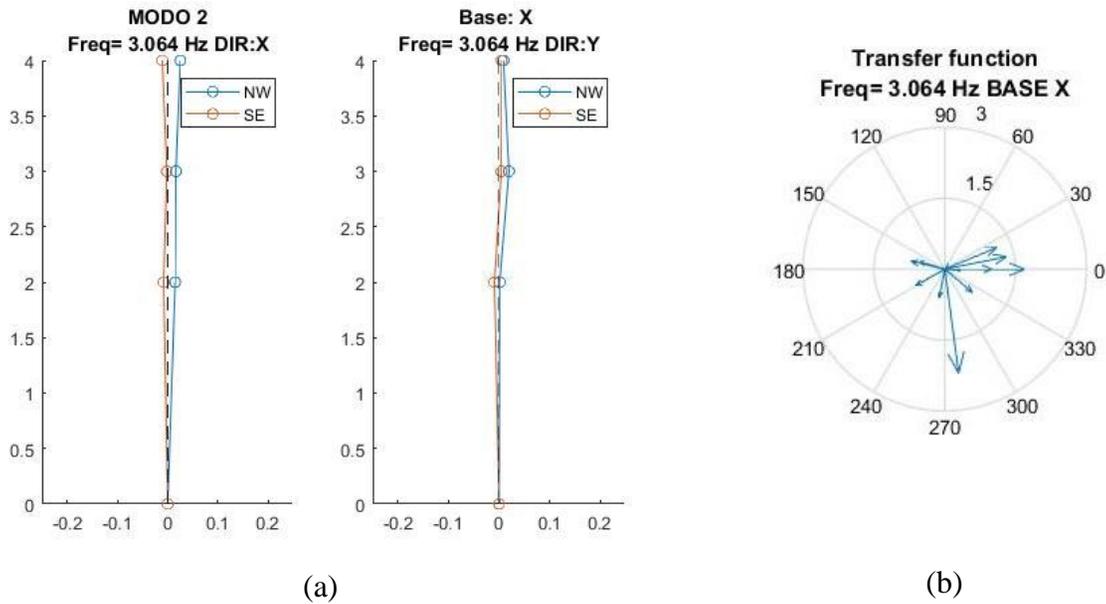


Figura 34 Modo 2, frecuencia 3.064 Hz del bloque A de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (a) Forma modal 2 (b) herramienta compass con ángulos de fase.

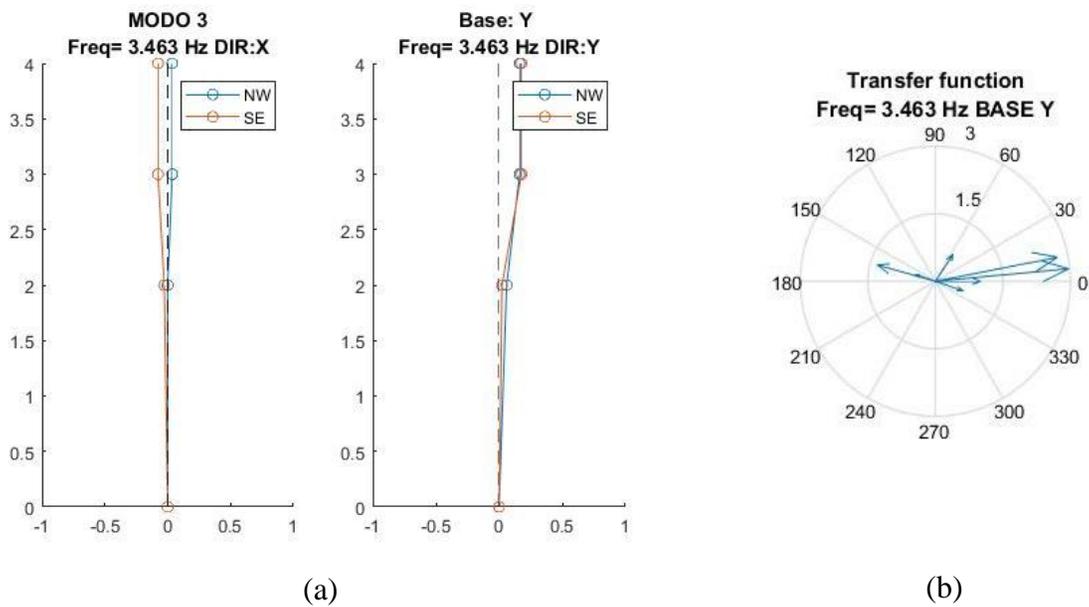


Figura 35 Modo 3, frecuencia 3.463 Hz del bloque A de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (a) Forma modal3 (b) herramienta compass con ángulos de fase.

Las formas modales obtenidas por medio de la instrumentación de la estructura muestran similitud al comportamiento predicho por la participación de la masa en el modelo analítico descrito en la Tabla 8.

5.5.4. Comparación del modelo numérico versus la instrumentación

La comparación se realiza mediante el criterio de aseguramiento modal (MAC) entre los vectores de cada forma modal obtenida por la instrumentación, y el modelo analítico; de este último se obtiene las formas modales, a partir del desplazamiento de los centros de masa o diafragmas de piso creados; en un modelo en ETABS®, los resultados se muestran por medio de la Tabla “Diaphragm Center Mass Displacements”.

En la Tabla 13 se muestran, en resumen, los modos encontrados en función de periodo y frecuencia, tanto en la instrumentación como en el modelo analítico.

Tabla 13

Modos de vibración expresados en frecuencia y periodo, comparación entre el modelo numérico y la instrumentación; bloque A.

Frecuencias y periodos- Instrumentación			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Frecuencia (Hz)	2.935	3.064	3.463
Periodo (s)	0.341	0.326	0.289
Frecuencias y periodos- Modelo numérico			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Frecuencia (Hz)	2.96	3.005	3.21
Periodo (s)	0.338	0.333	0.312

Como se mencionó anteriormente, antes de calcular el MAC es necesario corregir los ejes analizados para que estos coincidan entre ellos; por facilidad se optó por cambiar los del modelo analítico.

Tabla 14

Vectores de desplazamiento de las formas modales con ejes corregidos obtenidas del modelo analítico del bloque A.

Formas modales- modelo numérico				
Dirección	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3
X	2	-3.00E-06	-1.60E-05	-1.00E-06
	3	-5.00E-06	-2.20E-05	-2.00E-06
	4	-5.00E-06	-2.50E-05	-2.00E-06
Y	2	-1.50E-05	3.00E-06	4.00E-06
	3	-2.10E-05	4.00E-06	6.00E-06
	4	-2.50E-05	5.00E-06	7.00E-06

En la Tabla14 se muestran los vectores de desplazamiento, en milímetros, del centro de masa de cada piso, instrumentado de la estructura de acuerdo al modelo analítico. Por otro lado, a partir de la instrumentación se obtienen vectores adimensionales de las formas modales encontradas, en la siguiente Tabla se muestran los resultados.

Tabla 15

Vectores adimensionales de las formas modales obtenidas a partir de la instrumentación.

Formas modales- instrumentación			
Punto	Modo1	Modo2	Modo3
NX	0.113	-0.265	-0.001
	0.274	-0.449	0.036
	0.274	-0.449	0.036
NY	0.060	0.060	0.060
	0.115	-0.150	0.162
	0.115	-0.150	0.162
SX	-0.025	0.164	-0.027
	-0.095	0.188	-0.077
	-0.095	0.188	-0.077
SY	-0.025	-0.019	0.023
	0.095	-0.087	0.177
	0.095	-0.087	0.177

Es importante destacar que, en el cálculo del MAC no es de importancia la magnitud de los vectores comparados, sino la dirección que estos tienen entre ellos; por lo que, si bien no es lo ideal, no existe un conflicto de unidades si se comparan los desplazamientos del modelo analítico con las formas modales de la instrumentación; de manera general, se dice que inclusive la normalización de estos vectores es irrelevante para el cálculo.

Puesto que se tienen dos puntos de medición por planta en la instrumentación versus un punto en el centro de masas del modelo; se optó por calcular el MAC por sentidos, los puntos N y S (Norte y Sur) del proceso experimental serán comparados en la dirección X con su correspondiente en el modelo analítico en la misma dirección, y de la misma manera con la dirección Y.

Finalmente, se promedian los resultados del MAC en sus dos direcciones de cada modo de vibración, esperando obtener un valor mayor a 0,8 y validar de esta manera el proceso. La Tabla 16 muestra un cuadro de resumen de los MAC, calculados y promediados.

Tabla 16

Resumen del Criterio de Aseguramiento Modal MAC del bloque A

Criterio de aseguramiento modal (MAC)							
Freq (Hz)	Modo	MAC NX	MAC SX	MAC NY	MAC SY	MAC X Prom	MAC Y Prom
2.935	1	0.97	1.00	0.94	0.69	0.98	0.81
3.064	2	0.99	0.56	0.98	0.91	0.77	0.94
3.463	3	0.83	0.99	0.97	0.94	0.91	0.95

Los MAC, de los modos de vibración encontrados en el caso de estudio actual, superan el límite mínimo establecido para la validación del proceso; apenas en una dirección se tiene un valor de 0.77, que fue admitido por estar muy cercano al límite; un resultado favorable se traduce en modos

de correspondencia consistente cuyo movimiento es similar, apenas diferenciado por un valor escalar.

5.6. Resumen

El proceso de instrumentación y procesamiento de datos se llevó a cabo en un caso de estudio de configuración estructural simple, con el objetivo de validar la metodología planteada en los capítulos anteriores; por otro lado, se realizó un modelo numérico en ETABS®, que simule la estructura lo más cercano a la realidad; para finalmente obtener los periodos y frecuencias fundamentales de ambos procesos y compararlos mediante el criterio de aseguramiento modal o MAC. Como resultados se obtuvieron formas modales consistentes entre el modelo matemático y la instrumentación, que a su vez se traduce en la validación de la metodología planteada.

En el capítulo siguiente se describen características generales del caso de estudio definitivo, el Hospital Naval General, ubicado en la ciudad de Guayaquil; donde se realizó la instrumentación de la estructura recientemente reforzada, y se formuló un modelo matemático para su correspondiente comparación.

CAPÍTULO VI

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CASO DE ESTUDIO, HOSPITAL NAVAL DE GUAYAQUIL, MEDIANTE VIBRACIÓN AMBIENTAL

6.1. Introducción

Los ensayos de vibración ambiental fueron conducidos con el objetivo de validar el modelo numérico realizado en este capítulo. El caso de estudio fue instrumentado con ocho acelerómetros y su vibración ambiental fue registrada en cuatro niveles, los registros de aceleraciones de piso han sido utilizados para identificar las propiedades modales de la estructura. Las frecuencias modales obtenidas y modos de vibración son comparados con los del modelo lineal que representa la estructura. Este capítulo presenta la comparación de los parámetros modales estimados en el modelo, con aquellos obtenidos a partir de los datos adquiridos en la instrumentación.

6.2. Peligro sísmico del Ecuador

El Ecuador se localiza geográficamente en un área especial del globo terrestre, situada en una zona vulnerable de la corteza de la tierra, cuenta con sistemas volcánicos que incrementan los riesgos por ser parte del cinturón de fuego del pacífico. El país está atravesado por varias amenazas geológicas con grandes valores de energía como: el proceso de subducción entre las Placas de Nazca, la Placa Continental del Caribe y la Placa Continental Sudamericana, también es importante considerar la Mega Falla de Guayaquil – Caracas, que atraviesa principalmente las ciudades de Guayaquil, Ambato y Quito. Estas características denotan una alta complejidad sismo - tectónica en el Ecuador. La Tabla 17 expone los eventos de subducción del siglo XX, ocurridos en el territorio del Ecuador (Gallegos & Saragoni, 2017).

Tabla 17*Recientes eventos sísmicos de subducción en el Ecuador*

Año	Magnitud	Latitud	Longitud	Profundidad [km]	Longitud de ruptura [km]
1906	8.8	1.00 ⁰ N	81.50 ⁰ W	-	500
1942	7.8	0.01 ⁰ N	79.90 ⁰ W	35	200
1958	7.7	0.99 ⁰ N	79.49 ⁰ W	19	50
1979	8.1	1.60 ⁰ N	79.36 ⁰ W	24	240
1998	7.2	0.60 ⁰ S	80.31 ⁰ W	26	-
2016	7.8	0.37 ⁰ N	79.39 ⁰ W	20	-

El caso de estudio de la presente investigación se encuentra localizado en el área del puerto marítimo de la ciudad de Guayaquil. Aunque la ciudad está alejada más de 200 km de las zonas de colisión de las Placas de Nazca y la Sudamericana, las condiciones de los suelos (mayormente aluviales o suaves, de categoría D y E) pueden amplificar las ondas sísmicas con distancias epicentrales entre 200 y 300 km. (Argudo & Yela, 1995).

Durante el Terremoto de Muisne del 16 de abril del 2016 se observó lo mencionado en el párrafo anterior, ya que la ciudad de Guayaquil estuvo alejada a una distancia de 300 km del epicentro y se registraron aceleraciones de entre hasta $23.04 \frac{cm}{s^2}$, provocando daños, especialmente, en estructuras de hormigón muy flexibles cuyas mamposterías fueron afectadas en gran medida. En la Figura 36 se observan la gráfica de los registros sísmicos y la distancia entre el epicentro y la ciudad de Guayaquil.

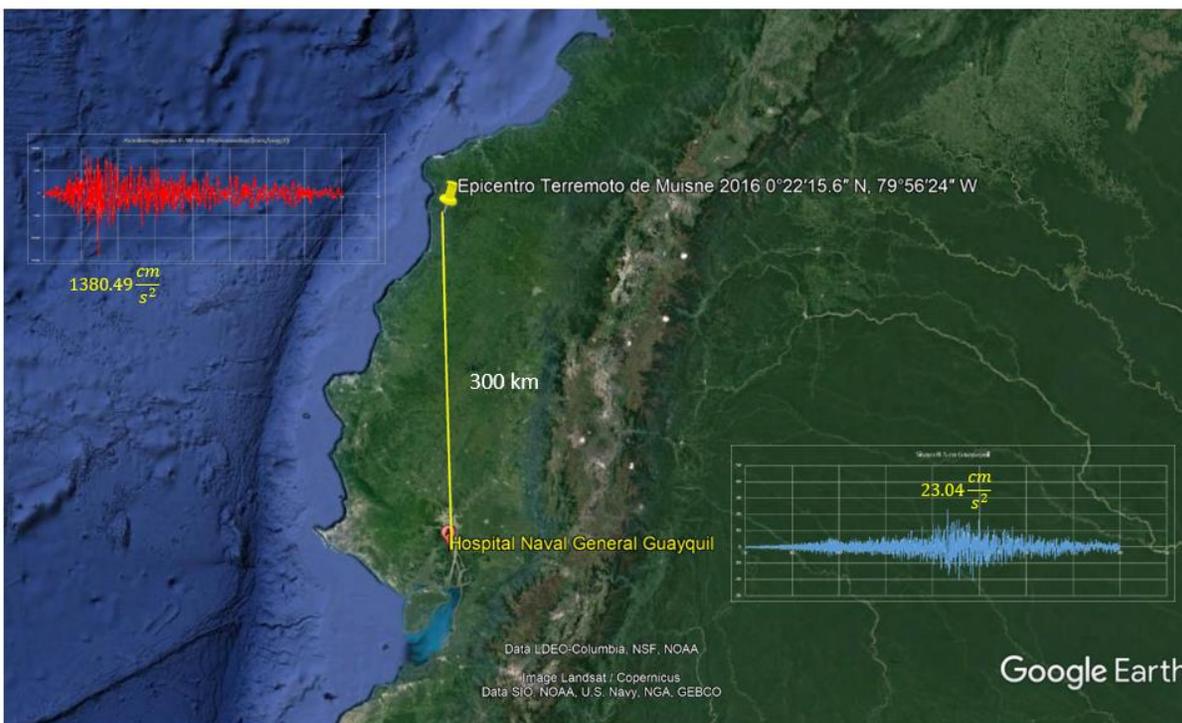


Figura 36 Distancia en línea de aire entre el epicentro del Sismo de Muisne del 2016 y Guayaquil

6.3. Descripción del modelo numérico

6.3.1. Características de la edificación del caso de estudio

El Hospital Naval de Guayaquil se inauguró el 11 de noviembre de 1983, se localiza en el sector del Guasmo de la Ciudad de Guayaquil, en el interior de la Base Naval Sur. Su cercanía al Puerto Marítimo lo constituye como un edificio esencial, muy importante en el área. La Figura 37 presenta la vista superior del complejo hospitalario, el mismo que está conformado por un edificio principal, tres bloques de consultorios, un anexo para consulta de traumatología y un bloque para medicina física y rehabilitación, cada uno separado por juntas entre sí. El presente caso de estudio se circunscribe al edificio principal, el mismo que consta de 7 pisos, con un área de aproximadamente

3000 m². Su configuración es regular en planta y en elevación, como se observa en la Figura 38 y la Figura 39.



Figura 37 Ubicación del Hospital Naval de Guayaquil



Figura 38 Vista frontal y posterior del Hospital Naval de Guayaquil



Figura 40 Daños observados en la mampostería del Hospital Naval de Guayaquil.

La Figura 41 provee la vista en planta y en elevación del reforzamiento. En el eje longitudinal se dispone de 5 ejes de columnas simétricos aproximadamente de 6.8 m de separación, y en el eje transversal con 3 ejes de columnas simétricos de aproximadamente 8 m, con alturas de entrepisos de 3.55 m, regulares entre ellos.

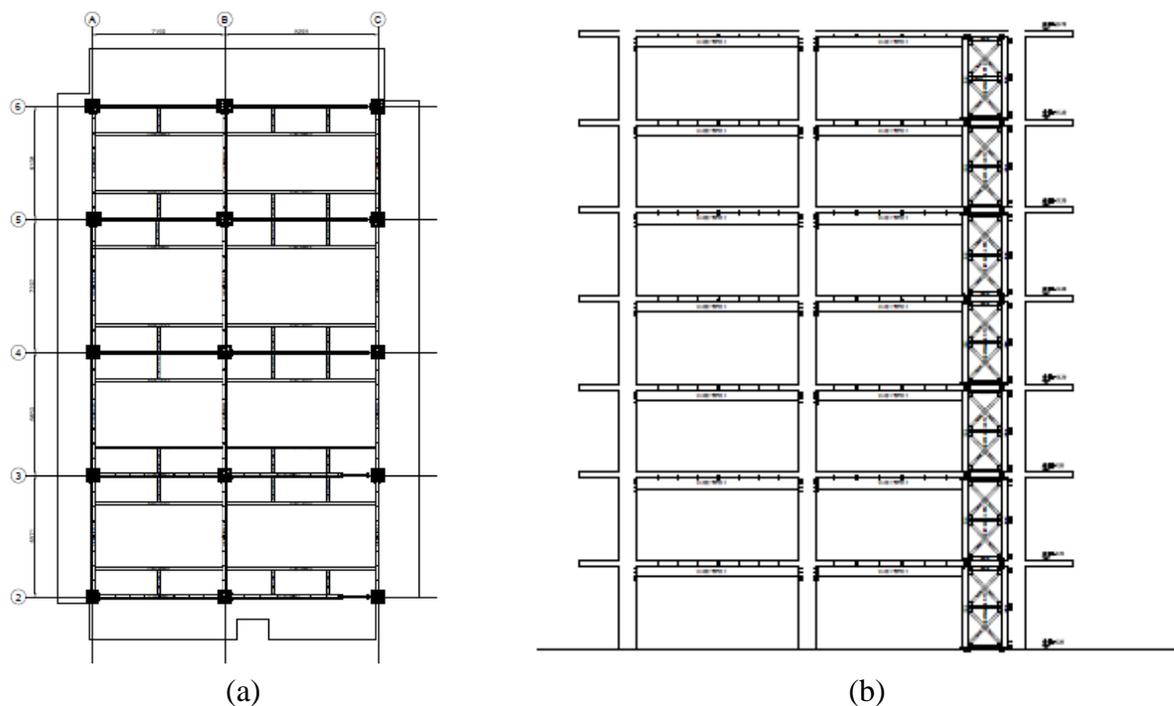


Figura 41 Reforzamiento metálico del Hospital Naval de Guayaquil, (a) Vista en planta (b) Vista en elevación.

6.3.1.1. Estudios geofísico y geotécnico

La consultoría para el diseño del reforzamiento del hospital contempló dos estudios para determinar las características del suelo en el que se encuentra la estructura. De acuerdo al estudio geofísico de sísmica de refracción, en el área estudiada se determinaron dos capas geofísicas principales: la número uno o capa superficial que tiene una velocidad sísmica aproximada de 600 - 1000 m/s, un espesor que varía desde 5,00 a 8,00 metros y que corresponde a suelos arcillosos o arena arcillosos; la capa dos o segunda capa tiene una velocidad sísmica de 1700 m/s, un espesor no determinado en profundidad y que corresponde a la capa de basamento local, la capa se presume está compuesta de arenas húmedas medianamente consolidadas (Narváez & Borja, 2017). Por otro

lado, el estudio geotécnico realizó dos perforaciones de 16 metros y 28 metros de profundidad respectivamente, encontrando arcillas de alta plasticidad, de consistencia blanda a muy blanda, con humedades mayores al 40% e índices de plasticidad altos. Por lo tanto, hasta la profundidad explorada y con la información obtenida, de acuerdo a la Sección 3.2 de la Norma Ecuatoriana de Construcción, en su capítulo de Peligro sísmico, el perfil de suelo podría clasificarse como Tipo E (Ortega, 2017). La Figura 42 expone las características del suelo y sismicidad del sitio donde se ubica el caso de estudio

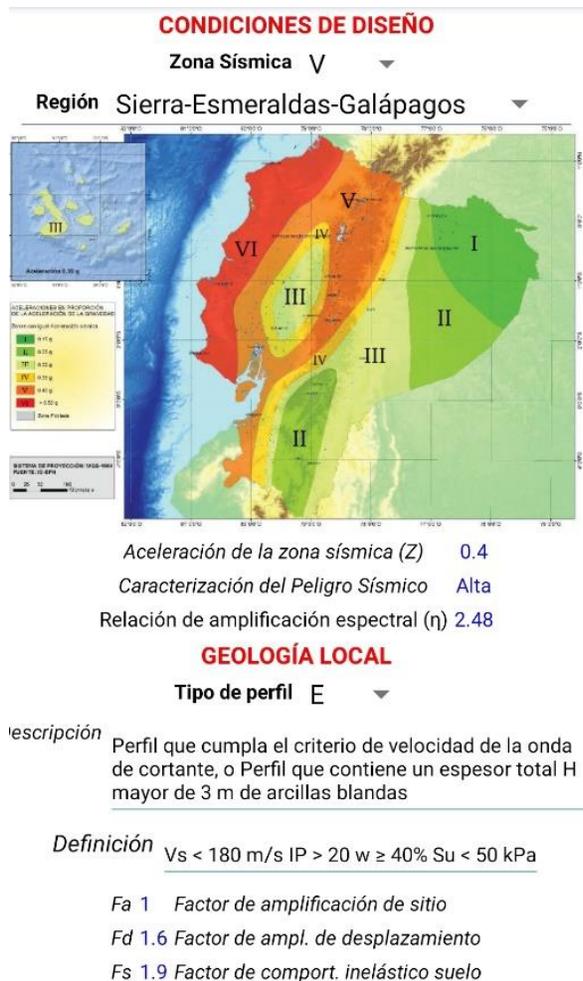


Figura 42 Características de sitio del Hospital Naval de Guayaquil.

El estudio preparado por la consultoría para el reforzamiento no contempló la cimentación y asume un sistema de pilotaje, el cual es analizado mediante su estado límite de falla, de acuerdo con la estratigrafía del suelo encontrada en el estudio geotécnico, presentando que, para un pilote de 16 metros de longitud, la capacidad de carga última de un pilote es igual a 358 kN (diámetro=40 cm), 477 kN (diámetro =50 cm) y 609 kN (diámetro =60 cm) (Ortega, 2017).

6.3.1.2. Análisis de cargas

6.3.1.2.1. Hipótesis de cargas

Se tomó el análisis de cargas asumido por el diseñador del sistema de reforzamiento del Hospital Naval, el mismo que fue realizado por la empresa MM Ingeniería, a cargo del Ing. Mario Morán. Sin embargo, se recomienda realizar el análisis, con los usos de cada piso.

6.3.1.2.2. Carga muerta (D)

Se asume una sola hipótesis de carga debido a que no se dispone de la distribución de los espacios en el sitio, lo que no afecta los resultados actuales con los que se trabajó en el Hospital Naval. La Tabla 18 presenta el análisis de las cargas mínimas, consideradas como permanentes de la estructura (Morán, 2017).

Tabla 18

Análisis de carga muerta del Hospital Naval

Cargas	Peso		Losa tipo (kg/m ²)	Losa de cubierta (kg/m ²)
	Cantidad	(kg/m ³)		
Hormigón	0.122	2400.00	292.80	292.80
Carga accidental			100.00	100.00
Paredes divisorias			268.00	
Acabados e instalaciones			120.00	120.00
SUBTOTAL			780.80	512.80
CARGA MUERTA ASUMIDA(DL)			800.00	550.00

6.3.1.2.3. Carga viva (L)

La carga viva asumida responde a la evaluación del diseñador del reforzamiento, de acuerdo con las consideraciones de uso, y se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19

Análisis de carga viva del Hospital Naval

CARGA VIVA ASUMIDA (LL)	Losa tipo (kg/m²)	Losa de cubierta (kg/m²)
	250	250

6.3.1.2.4. Carga última (Q_u)

La carga última se calcula utilizando las recomendaciones del ACI 318 S14 con lo referente a la combinación de carga mayorada.

Desde el primer piso hasta el sexto piso, se presenta la ecuación (24):

$$Q_u = 1.2 * D + 1.6 * L = 1.2 * 800 + 1.6 * 250 = 1360 \frac{kg}{m^2} \quad (24)$$

Para el séptimo piso, se presenta la ecuación (25):

$$Q_u = 1.2 * D + 1.6 * L = 1.2 * 550 + 1.6 * 250 = 165.4 \frac{kg}{m^2} \quad (25)$$

6.3.2. Descripción del modelo computacional

Un modelo computacional representativo fue desarrollado en ETABS® (CSI 2018), ya que es un software que permite el modelamiento estructural en un entorno intuitivo, a la vez que es posible obtener resultados en pantalla con mucha facilidad. La Figura 43 presenta el modelo tridimensional de la estructura, la Figura 44 expone la vista superior en planta, la Figura 45 enseña la vista lateral

en elevación en sentido X y la Figura 46 muestra la vista lateral en elevación en sentido Y. Las consideraciones y criterios de diseño hacen referencia a la NEC-15, así como a la información obtenida de la memoria técnica del reforzamiento del hospital y a los ensayos realizados para el presente estudio. Las asunciones de las configuraciones de los elementos y las cargas, se detallan en la sección correspondiente.

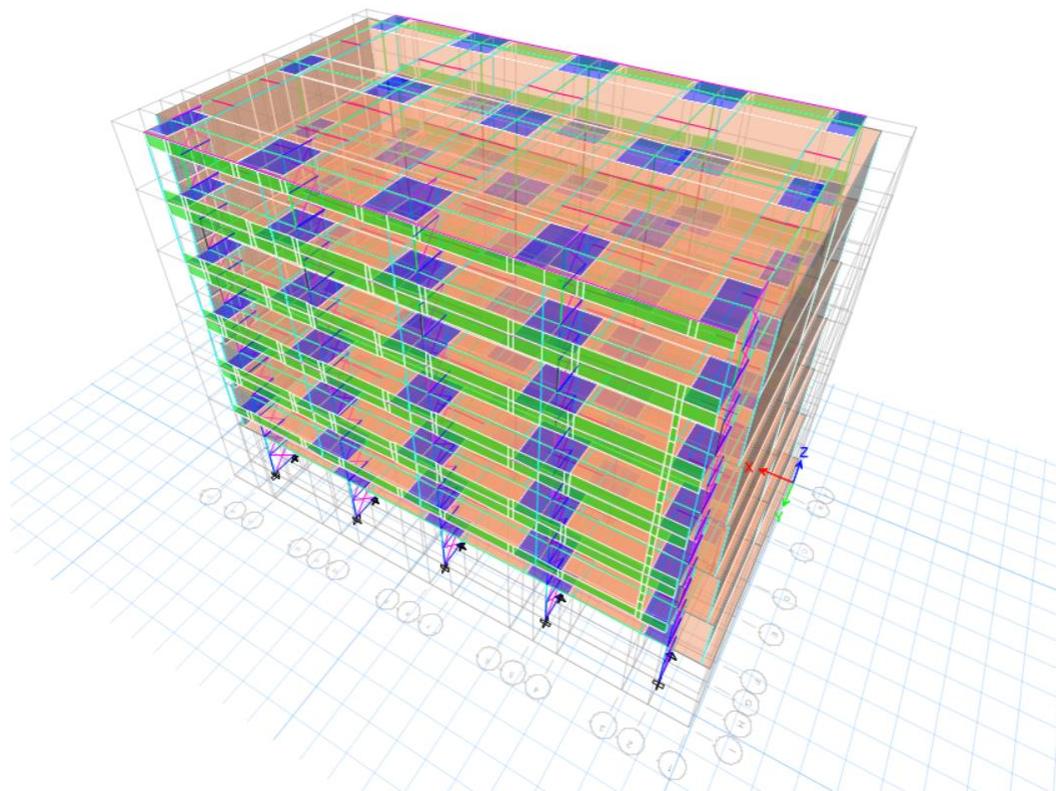


Figura 43 Modelo tridimensional de la estructura evaluada, modelamiento en ETABS®.

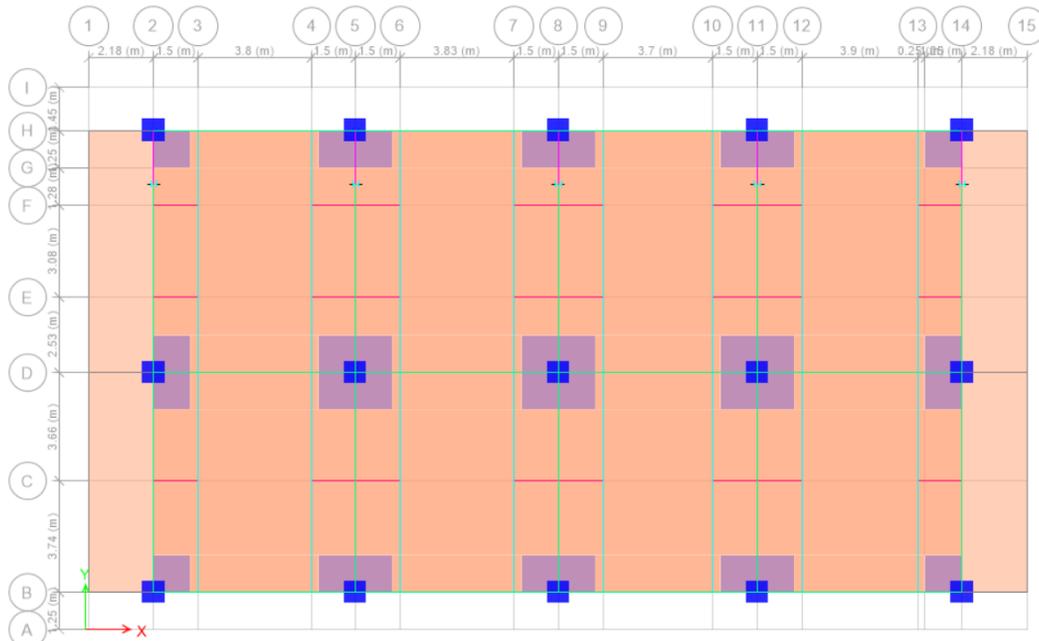


Figura 44 Vista en planta de la estructura evaluada, modelamiento en ETABS®.

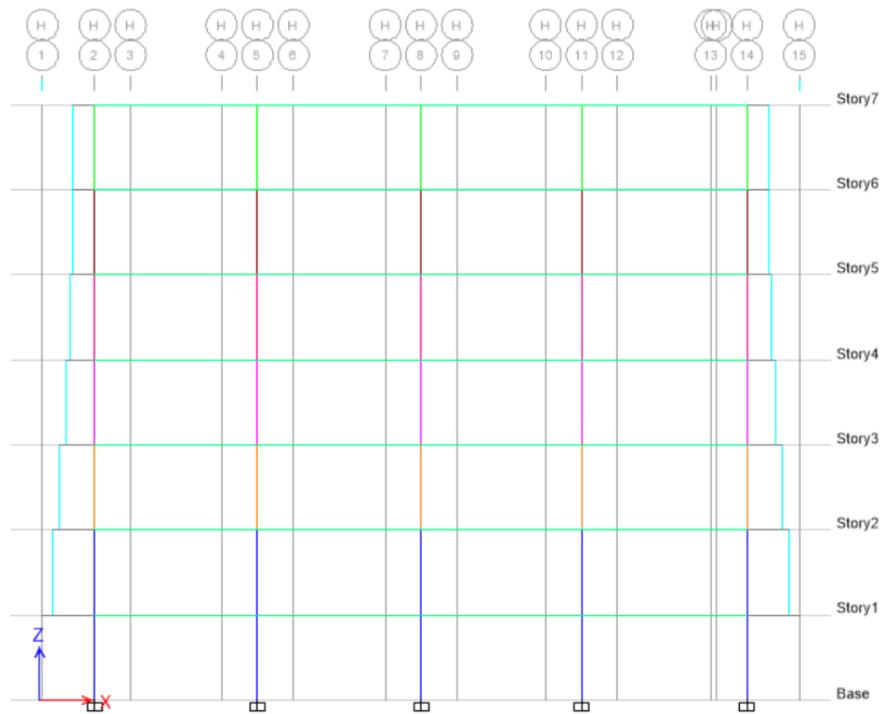


Figura 45 Vista lateral en elevación en sentido X (eje H), modelamiento en ETABS®.

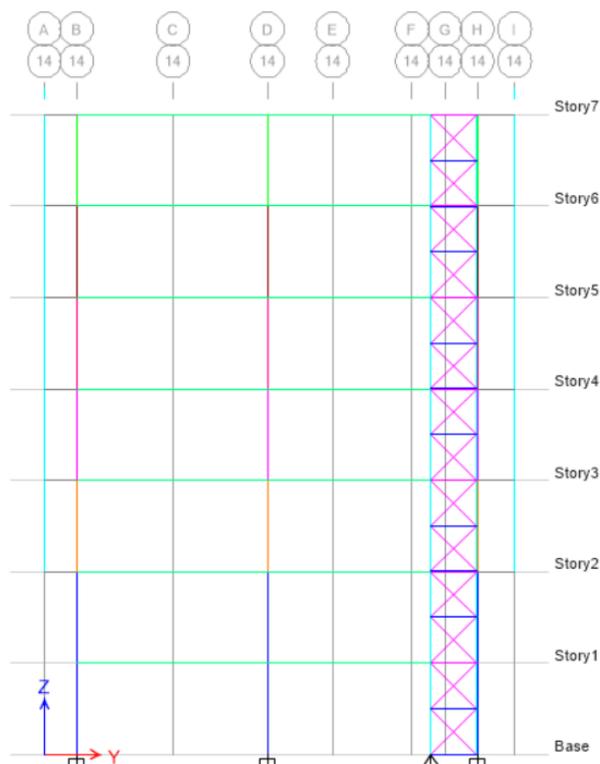


Figura 46 Vista lateral en elevación en sentido Y (eje 14), modelamiento en ETABS®.

6.3.3. Descripción de secciones

En este acápite se hace referencia a los detalles de los elementos estructurales que fueron considerados en el modelo numérico. La información, inicialmente, fue extraída de los planos y la memoria técnica, posteriormente fue verificada en el sitio de la edificación, lo que permitió disponer de un modelo más refinado. Se consideraron los factores de agrietamiento provistos en el ACI 318S-14 (American Concrete Institute, 2015) de acuerdo a la Tabla 20.

Tabla 20

Factores de agrietamiento en función del momento de inercia y área de la sección transversal permitidos para el análisis

Miembro y condición	Momento de inercia	Área de la sección transversal
Columnas	0.70I _g	
Muros	No fisurados	0.70I _g
	Fisurados	0.35I _g
Vigas	0.35I _g	1.0A _g
Placas planas y losas planas	0.25I _g	

En las siguientes subsecciones se detallan las secciones de los elementos estructurales y consideraciones especiales para el modelamiento.

6.3.3.1. Losas

La estructura dispone de una losa plana de acuerdo a la presentada en la Figura 47 y Figura 48, debido a la flexibilidad de la misma. El modelo se emplea un elemento tipo membrana de espesor de 10 cm ya que no hay transmisión de momentos debido a las cargas laterales (sísmicas) y a que, por el reforzamiento con vigas metálicas, el trabajo de los nervios se puede considerar despreciable.



Figura 47 Losa plana alivianada

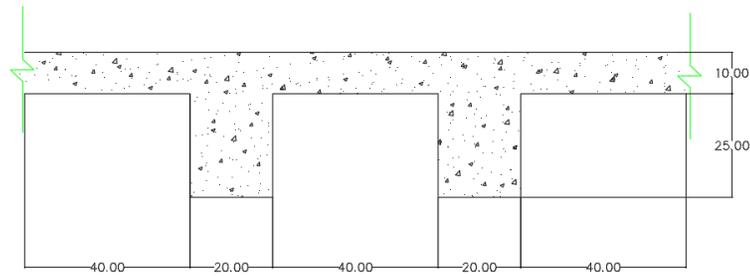


Figura 48 Dimensiones de la losa plana alivianada.

6.3.3.2. Vigas

El reforzamiento de la estructura contempló vigas metálicas de tres tipos, de acuerdo con el detalle de las Figura 49. Las mismas que están conectadas con la estructura de hormigón mediante pernos de 5/8", cuya separación oscila entre 0.8 y 1 m, y la Figura 50 presenta una imagen de la convergencia de los tres tipos de vigas metálicas. En el modelo se configuraron secciones compuestas de la losa equivalente de hormigón con base en el ancho del ala de la viga metálica, utilizando la utilidad *Section Designer* de ETABS®, las mismas que se detallan en la Figura 51.

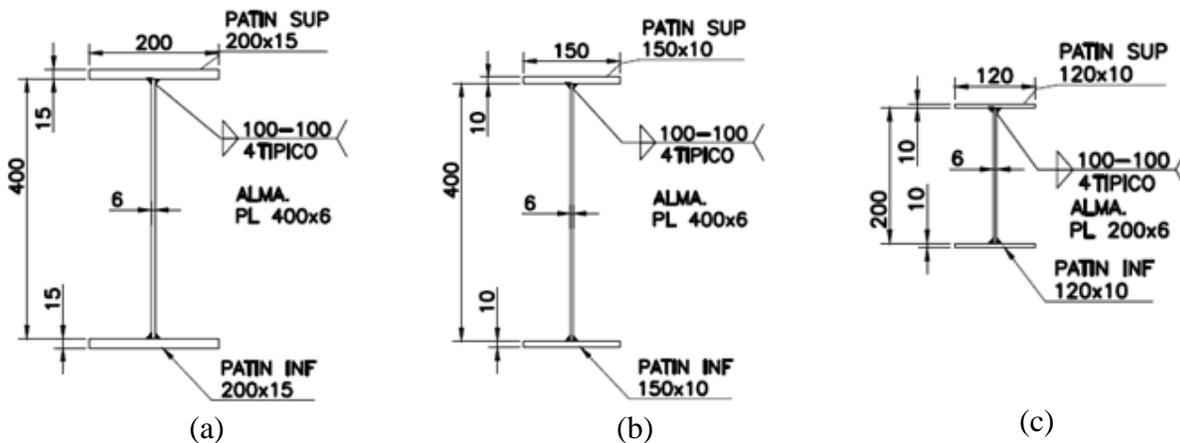


Figura 49 Secciones de las vigas metálicas del reforzamiento estructural; (a) Tipo 1, (b) Tipo 2, (c) Tipo 3.

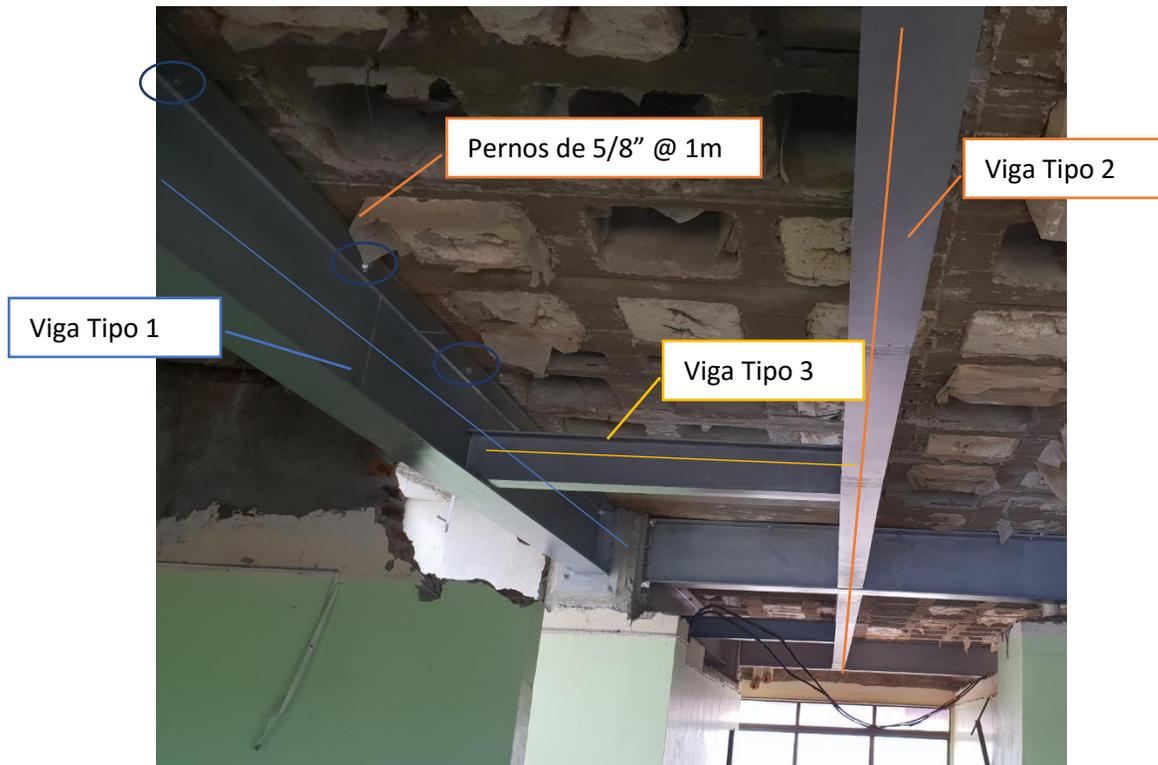


Figura 50 Disposición de las vigas metálicas del reforzamiento estructural.

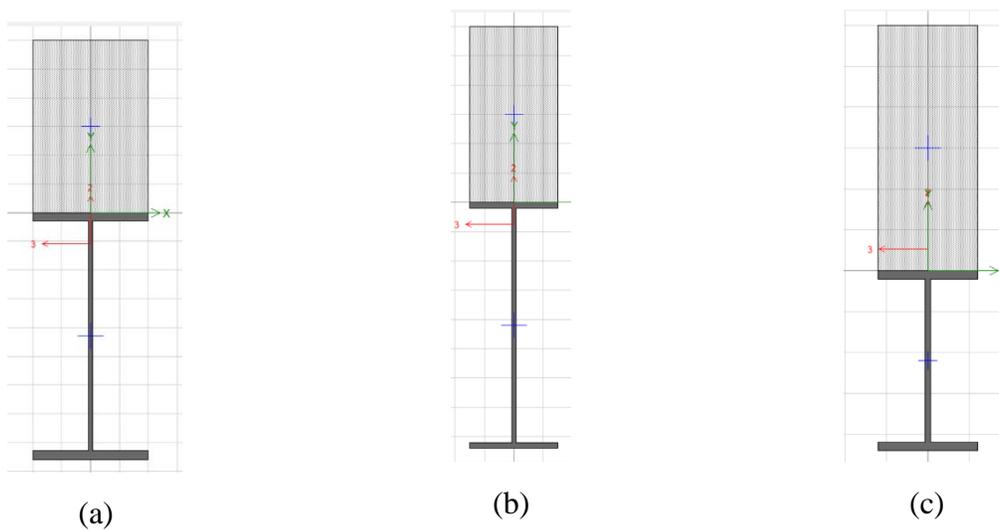


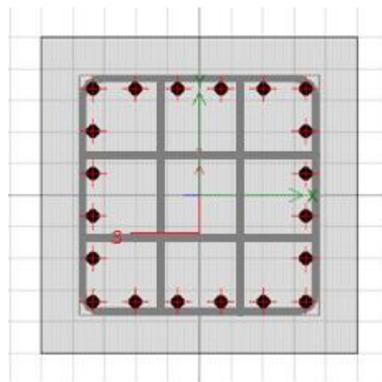
Figura 51 Secciones de las vigas compuestas del reforzamiento estructural consideradas en el modelo; (a) Tipo 1, (b) Tipo 2, (c) Tipo 3.

6.3.3.3. Columnas

De acuerdo con la evaluación efectuada en el hospital, se identificó que las dimensiones de la sección de columnas son de: 75/75 cm, 75/75 cm, 70/70 cm, 65/65 cm, 60/60 cm, 55/55 cm y 50/50 cm, iniciando desde la planta baja hasta el piso 7. Cada columna dispone de un refuerzo longitudinal de $20\phi 20\text{mm}$ y un refuerzo a corte de $2E \phi 12\text{mm} @ 10\text{cm}$. En la Figura 8 (a) se presenta la fotografía de la columna de 55/55 cm y en la Figura 8 (b) presenta la geometría de la columna de 55/55 cm.



(a)



(b)

Figura 52 Secciones de las columnas consideradas en el modelo estructural; (a) fotografía de la columna del eje D-8, (b) sección transversal de la columna D-8.

6.3.3.4. Diafragma de refuerzo

El reforzamiento estructural contempla un diafragma con 2 perfiles HEB 200 como elementos verticales, 6 perfiles UPN 100 como elementos horizontales y 4 perfiles UPN 100 como diagonales arriostradas, según el detalle de la Figura 53. Los diafragmas se modelaron con una separación de 01 cm a los elementos estructurales de hormigón y enlazados mediante elementos tipo *Frame*, empleando factores modificación de 6, a fin de representar los pernos de unión a la estructura de hormigón.

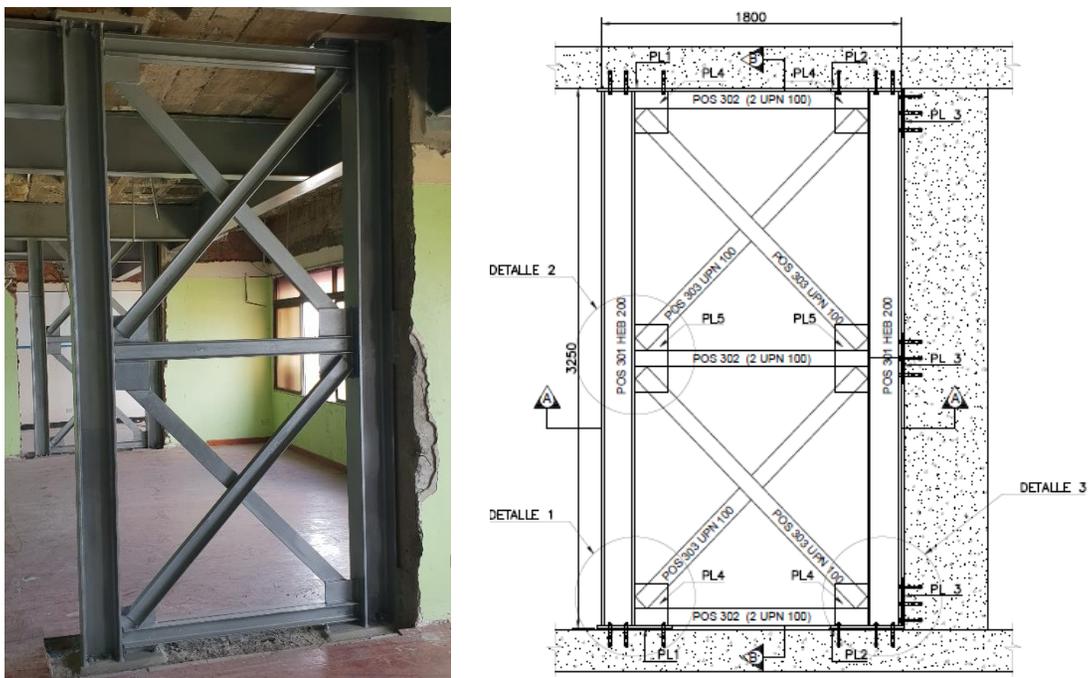


Figura 53 Diafragma TIPO (35 unidades)

6.3.4. Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales se extrajeron de la memoria técnica del reforzamiento, y fueron verificadas en el sitio, en lo que respecta a la mampostería, se estableció un procedimiento para determinar sus propiedades.

6.3.5. Esclerometría

La determinación de la resistencia del hormigón mediante esclerómetro emplea la norma ASTM C805 (Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete) (ASTM, 2008), la misma que menciona que deben ser descartadas todas las lecturas que difieran en más de 6 unidades de la media. Si existen más de dos lecturas que cumplan esta condición debe descartarse el conjunto.

Mediante el ensayo se determinaron las resistencias del hormigón, los ladrillos de arcilla y del mortero. Los valores obtenidos fueron: $f'_c = 351.54 \frac{kg}{cm^2}$, $f'_u = 161.71 \frac{kg}{cm^2}$ y $f'_{cp} = 210.92 \frac{kg}{cm^2}$, respectivamente. Considerando que, en la memoria técnica entregada por el diseñador del sistema de reforzamiento, se establece la resistencia del hormigón equivalente a $f'_c = 210 \frac{kg}{cm^2}$, y que de acuerdo a lo indicado al ACI 318-S14, en el numeral: 26.5.3.2 Requisitos de construcción a cumplir, en lo referente a ensayos destructivos, que menciona que deben tener un 85% del valor especificado de diseño, se asume que: $f'_c = 247 \frac{kg}{cm^2}$, valor con el cual se relaciona para obtener la resistencia a la compresión de los ladrillos de arcilla y del mortero equivalentes cuyos valores calculados son: $f'_u = 113.65 \frac{kg}{cm^2}$ y $f'_{cp} = 148 \frac{kg}{cm^2}$, respectivamente

6.3.5.1. Hormigón Armado

El hormigón armado se compone de concreto de resistencia nominal a la compresión de $247 \frac{kg}{cm^2}$, de la misma manera se observó que las varillas de acero de refuerzo empleadas en la construcción del hospital, corresponden a un límite de fluencia de $4200 \frac{kg}{cm^2}$.

6.3.5.2. Acero estructural

El acero empleado para los elementos del reforzamiento (vigas y diafragma) es el ASTM A36 con un esfuerzo límite de fluencia de $2530 \frac{kg}{cm^2}$.

6.3.6. Mampostería

6.3.6.1. Ensayo de compresión del ladrillo de arcilla

El procedimiento para determinar la resistencia del mampuesto se detalla en la norma NTE INEN 639 “Bloques Huecos de Hormigón, muestreo, inspección y recepción” (INEN, 1993) y la NTE INEN 2619 “Refrentado de las unidades para ensayo a compresión” (INEN, 2012). Se presenta la Tabla 21 con los resultados obtenidos.

Tabla 21

Resultados del ensayo de compresión para ladrillos de arcilla

Resistencia f'_u						
Muestra	Peso (g)	Carga máxima (T)	l (cm)	b (cm)	A (cm ²)	f'_u (kg/cm ²)
I	2108.6	11.81	12	11.5	138	93.20
II	2053.4	10.039	13	11.8	153.4	67.15
III	1920.4	13.224	13	11.5	149.5	86.21
IV	1835.5	8.312	13	11	143	58.13
PROMEDIO						76.17

6.3.6.2. Determinación teórica de la resistencia a compresión de la mampostería

La resistencia teórica a compresión de la mampostería, se puede determinar en función de las resistencias a compresión de sus componentes, con la siguiente ecuación:

$$f'_m = K * f'_u{}^{0.65} * f'_{cp}{}^{0.25}$$

$$f'_{cp} \leq 20 \text{MPa} \quad (26)$$

$$f'_{cp} \leq 2 * f'_u$$

Donde:

K es una constante que puede tener los siguientes valores:

0.60 Para piezas de hormigón

0.55 Para piezas de arcilla

f'_u resistencia normalizada a compresión de las piezas de fabrica en la dirección del esfuerzo, en MPa.

f'_{cp} resistencia a compresión especificada del mortero de pega, en MPa.

El valor de f'_m también se puede determinar empleando la siguiente ecuación:

$$R_m = \left(\frac{2 * h}{75 + 3 * h} \right) * f'_u + \left(\frac{50 * k_p}{75 + 3h} \right) * f'_{cp} \leq 0.8 * f'_{cu} \quad (27)$$

	$f'_m = 0.75 * R_m$	(28)
--	---------------------	------

Cuando la mampostería tiene celdas con mortero de inyección, la resistencia a compresión de la mampostería (f'_m), sera determinada con la siguiente ecuación:

$$f'_m = 0.75 * (i * R_m + 0.9 * (1 - i) * f'_{cp}) \leq 0.94 * R_m \quad (29)$$

Donde:

f'_m resistencia nominal a la compresión de la mampostería, en MPa.

f'_u resistencia especificada a la compresion de la unidad de mampostería medida sobre el área neta, en MPa.

f'_{cp} resistencia especificada a la compresión del mortero de pega, en MPa.

h altura de la unidad de la Mampostería, en mm.

k_p factor de corrección por absorción de la unidad, adimensional:

1.4 para unidades de concreto

0.8 para unidades de arcilla

R_m parámetro definido en la ecuación (8)

i índice de macizo, adimensional

En la Tabla 22 se presentan los resultados de las resistencias de los mampuestos. Se emplean un promedio de los valores de las resistencias obtenidas ($f'_{u1} = 76.17 \frac{kg}{cm^2}$, $f'_{u2} = 113.65 \frac{kg}{cm^2}$), a fin de mantener criterios conservadores, es así que para la resistencia de los ladrillos de arcilla se asume $f'_u = 94.91 \frac{kg}{cm^2}$. y para la resistencia a la compresión del mortero se asume: $f'_{cp} = 148 \frac{kg}{cm^2}$.

Tabla 22

Resistencia a la compresión, f'_m , de la mampostería

Método 1	
f'_{cp} (MPa)	14.82
K	0.55
f'_m (MPa)	4.66
Método 2	
h (mm)	3500
k_p	0.8
R_m	6.34
f'_m (MPa)	4.75

Con el objetivo de mantener análisis conservador, se asume el menor valor calculado, es decir,

$$f'_m = 4.66 \text{ MPa.}$$

6.3.7. Antepechos de hormigón armado

Un caso particular se observa en el edificio del Hospital Naval, en el sentido longitudinal existen antepechos de 0.7 m de alto y un ancho variable de 0.2 a 0.4 m, cuyo objetivo es estético, como se observa en la Figura 54, además en la parte superior de cada piso se tiene una estructura descolgada similar, lo que da el aspecto de mampostería. Para modelar estos elementos se estableció utilizar las propiedades mecánicas del hormigón y utilizar la misma representación que con la mampostería de ladrillo.



Figura 54 Antepechos de hormigón armado en el sentido longitudinal del Hospital Naval.

6.3.8. Definición de cargas y patrones de carga

La Tabla 23 describe los patrones de carga y la Tabla 24 puntualiza la definición de los casos de cargas utilizados en el modelo. Se realizó un análisis estático y un análisis modal con el espectro de diseño de la NEC-15, de acuerdo a las consideraciones de la Figura 55 y en la Figura 56 se observa el espectro de respuesta para el Hospital Naval de Guayaquil.

Tabla 23

Patrones de carga del modelo numérico del caso de estudio, Hospital Naval de Guayaquil. Obtenido de ETABS®

Caso	Tipo	Multiplicador peso propio	Carga Lateral	Valor (kN)
D	Dead	1	-	0.8
L	Live	0	-	0.25
EX	Seismic	0	User coefficient	-
EY	Seismic	0	User coefficient	-

Tabla 24

Casos de carga utilizados en el modelo numérico. Obtenido de ETABS®.

Caso	Tipo
Permanente (D)	Linear Static
Viva (L)	Linear Static
Sismo X	Linear Static
SismoY	Linear Static
SismoDinamicoX	Response Spectrum
SismoDinamicoY	Response Spectrum

RESUMEN			
Información General		Configuración Geométrica	
Nombre del Proyecto	HOSNAG	Factor de Importancia (I)	1.5
Altura (m)	24.85	Irregularidad en planta ($\emptyset p$)	1
Sitio y Geología		Irregularidad en elevación($\emptyset e$)	1
Zona Sísmica	V	Factor de Reducción (R)	3
Región	Sierra-Esmeraldas-Galápagos	Caract. Método DBF	
Tipo de Suelo	E	Coe. Edific. (Ct)	0.055
Aceleración de la zona sísmica (Z)	0.4	Impedancia semiespacio (a)	0.75
Caracterización del Peligro Sísmico	Alta	Periodo Fund. Metodo 1 (T1) [s]	0.61215
Relación de ampl. espectral (η)	2.48	Periodo Fund. Metodo 2 (T2) [s]	0.7958
Factor de amplificación de sitio (Fa)	1	Per. Nat. de Vibr. (Tx) [s]	1
Fact. de ampl. de desplazamiento (Fd)	1.6	Per. Nat. de Vibr. (Ty) [s]	1
Fact. de comport. inelástico suelo (Fs)	1.9	% de reduc. de espect. (f)	0.33333
Periodo Límite en $T=T0$ (T0) [s]	0.304	Cortante Basal (V)	0.496
Periodo Límite en $T=Tc$ (Tc) [s]	1.672		
Periodo fund. de vibr. aprox. (Ta) [s]	0.988		
Per. lim. vibr. Espec. Resp. (TL) [s]	3.84		
Aceleración en $T=0$ (Sa) [g]	0.4		
Aceleración en $T=T0$ (Sa T0-Tc) [g]	0.992		
Factor de espectro suelo (r)	1.5		

Figura 55 Resumen de las cargas sísmicas consideradas para el Hospital Naval.

Fuente:(NEC-SE-DS, 2015).



Figura 56 Espectro de respuesta considerado para el Hospital Naval

Fuente:(NEC-SE-DS, 2015).

6.3.9. Comparación de modelos matemáticos

Con el objeto de identificar la información relevante del modelo, se realizaron 5 modelos. El primero considerando solamente los elementos de hormigón armado, sin reforzamiento. El segundo considerando los elementos de hormigón armado y la mampostería, sin reforzamiento. El tercer modelo con la estructura de hormigón armado y el reforzamiento metálico de vigas y diafragmas sin mampostería. El cuarto con la estructura de hormigón armado y el reforzamiento metálico de vigas y diafragmas con mampostería. El quinto modelo con la estructura de hormigón armado y el reforzamiento metálico de vigas, pero sin diafragmas con mampostería. Además, se recopiló información del Proyecto del Instituto de Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Guayaquil (IIFIUC), realizado en 1995 con los ensayos de vibración ambiental (Argudo & Yela, 1995). La Tabla 25 presenta los valores de periodos en diferentes configuraciones.

Tabla 25

Periodos de vibración del Hospital Naval de Guayaquil con diferentes configuraciones estructurales.

IIFIUC	Sin reforzamiento		Reforzado con estructura metálica		
	Sin mampostería	Con mampostería	Sin mampostería	Con mampostería	Con mampostería, con vigas metálicas, sin diafragmas
Año 1995			Año 2019		
0.71	2.481	1.287	1.047	0.934	0.937
0.52	1.945	1.005	1.04	0.756	0.823
-	1.82	0.695	0.945	0.576	0.606

En la Tabla 26 se presenta la relación $\frac{H}{T}$ (Guendelman B. et al., 2010), que categoriza a las estructuras en: extremadamente flexibles (EF) ($\frac{H}{T} < 20$), flexibles (F) ($20 \leq \frac{H}{T} < 40$), de rigidez normal (RN) ($40 \leq \frac{H}{T} < 70$), rígida (R) ($70 \leq \frac{H}{T} < 150$).

Tabla 26

Relación $\frac{H}{T}$ para los diferentes periodos del Hospital Naval de Guayaquil

IIFIUC	Sin reforzamiento		Reforzado con estructura metálica		
	Sin mampostería	Con mampostería	Sin mampostería	Con mampostería	Con mampostería, con vigas metálicas, sin diafragmas
Año 1995			Año 2019		
35.00 (F)	10.02 (EF)	19.31 (EF)	23.73 (F)	26.61 (F)	26.52 (F)
47.79 (RN)	12.78 (EF)	24.73 (F)	23.89 (F)	33.00 (F)	30.19 (F)

6.4. Instrumentación por vibración ambiental

6.4.1. Adquisición de datos in-situ

La instrumentación del caso de estudio se realizó en cuatro configuraciones, tomando como piso base o común la planta cuatro, lugar donde se ubicó el dispositivo de adquisición de datos durante todo el ensayo. En la Figura siguiente se puede observar un pórtico tipo del hospital, y las configuraciones realizadas.

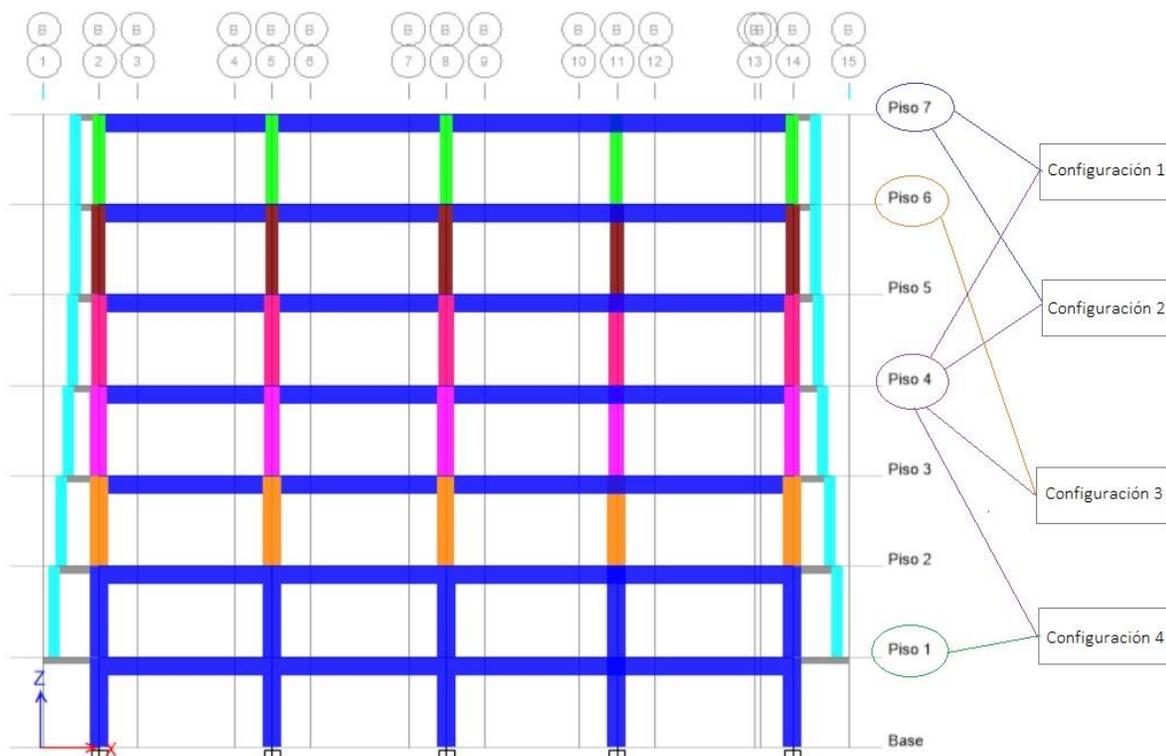


Figura 57. Vista en elevación de un pórtico de la estructura analizada, configuraciones realizadas en la instrumentación.

Los sensores se colocaron en esquinas opuestas con el objetivo de captar movimientos de torsión, en caso de que existan; en la Figura 28 se puede observar su posición, así como la ubicación del DAQ, y los ejes asumidos para el ensayo.

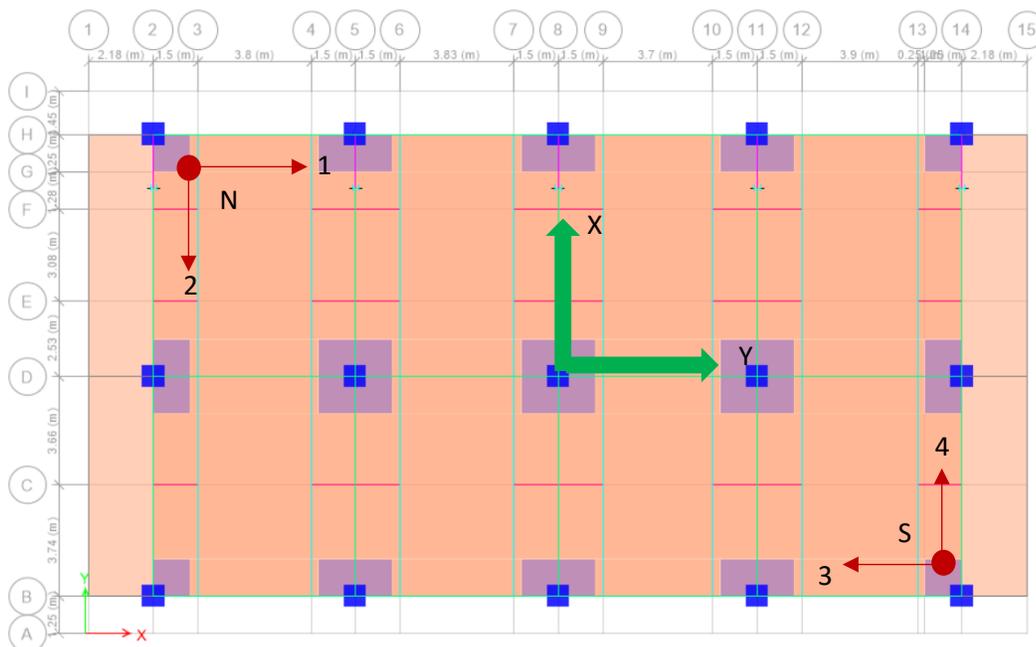


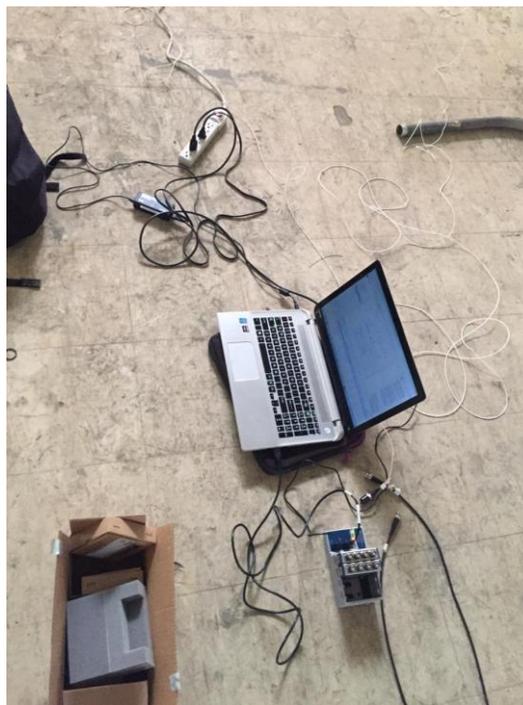
Figura 58. Ubicación de los sensores en planta del caso de estudio, ubicación del DAQ en el cuarto piso y ejes asumidos durante el ensayo.

En los puntos N y S se colocaron dos sensores, uno por cada dirección; los puntos 2 y 4 están paralelos al eje X, mientras que los puntos 1 y 3 están paralelos al eje Y. Para el presente caso de estudio, como en el de validación, los ejes de la instrumentación son contrarios a los asumidos para el modelamiento estructural; razón por la cual, para la comparación de resultados, se optó por cambiar los ejes del modelo.

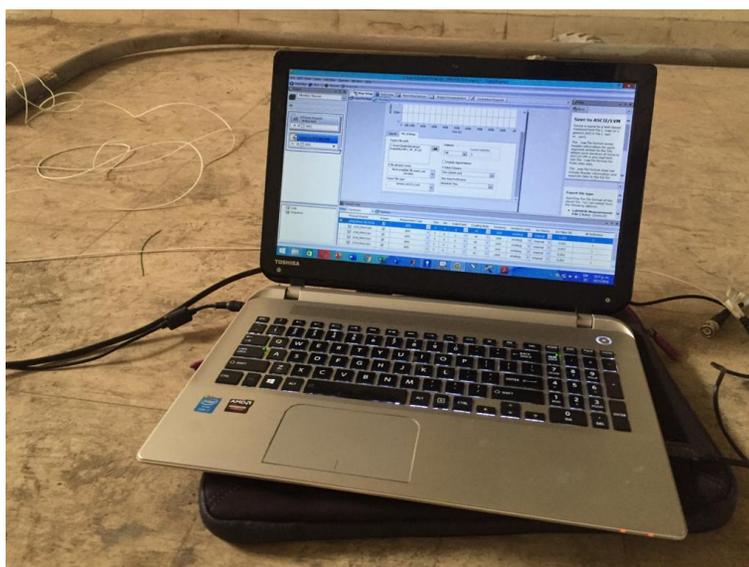
En la Figura 59 se observan los sensores conectados, y la estación de trabajo del proceso de adquisición de datos en el caso de estudio.



(a)



(b)



(c)

Figura 59. Adquisición de datos en campo; (a) sensores conectados en dos direcciones, cerca de un diafragma, (b) estación de trabajo tipo: DAQ, computador, fuente de poder, cables y conexiones, (c) Software Signal Express para la adquisición de datos.

Tabla 27*Documentación del ensayo de instrumentación, Hospital Naval de Guayaquil.*

SET UP	CANAL NO.	PISO	LOC.	SENTIDO	ID SENSOR	F.	F.CAL (V/g)	DAQ. CH		COL. ARCHIVO
						CAL (mV/g)		M	C	
1	1	4	N	X	50352	999	0.999	1	0	2
	2	4	N	Y	50479	967	0.967	1	1	3
	3	4	S	X	50353	1000	1	1	2	4
	4	4	S	Y	50480	1032	1.032	1	3	5
	5	7	N	X	50351	992	0.992	2	0	6
	6	7	N	Y	50481	1018	1.018	2	1	7
	7	7	S	X	50350	995	0.995	2	2	out
	8	7	S	Y	50482	996	0.996	2	3	8
2	1	4	N	X	50352	999	0.999	1	0	2
	2	4	N	Y	50479	967	0.967	1	1	3
	3	4	S	X	50353	1000	1	1	2	4
	4	4	S	Y	50480	1032	1.032	1	3	5
	5	7	N	X	50351	992	0.992	2	0	6
	6	7	N	Y	50481	1018	1.018	2	1	7
	7	7	S	X	50350	995	0.995	2	2	8
	8	7	S	Y	50482	996	0.996	2	3	out
3	1	4	N	X	50352	999	0.999	1	0	2
	2	4	N	Y	50479	967	0.967	1	1	3
	3	4	S	X	50353	1000	1	1	2	out
	4	4	S	Y	50480	1032	1.032	1	3	4
	5	6	N	X	50351	992	0.992	2	0	5
	6	6	N	Y	50481	1018	1.018	2	1	6
	7	6	S	X	50350	995	0.995	2	2	7
	8	6	S	Y	50482	996	0.996	2	3	8
4	1	4	N	X	50352	999	0.999	1	0	2
	2	4	N	Y	50479	967	0.967	1	1	3
	3	4	S	X	50353	1000	1	1	2	out
	4	4	S	Y	50480	1032	1.032	1	3	4
	5	1	N	X	50351	992	0.992	2	0	5
	6	1	N	Y	50481	1018	1.018	2	1	6
	7	1	S	X	50350	995	0.995	2	2	7
	8	1	S	Y	50482	996	0.996	2	3	8

Al igual que en el caso de validación, es necesario llevar una documentación de la instrumentación realizada; en ella se identificará los sensores y su ubicación en la estructura, además del orden en que fueron conectados al DAQ y, por lo tanto, en que columna de la matriz de datos estará cada uno de los canales. Esta información es la mostrada en la Tabla anterior.

En la Tabla 28 se muestran, de forma resumida, los puntos medidos en cada configuración, señalando con guion los canales de los que no fue posible tomar datos por problemas con el cable coaxial.

Tabla 28

Canales medidos por cada configuración realizada, información válida para el análisis inicial del Hospital Naval de Guayaquil

DIRECCIONES MEDIDAS POR CONFIGURACIÓN

SET UP	PISOS	N-W	S-E	N-W	S-E
		X	X	Y	Y
1	4	•	•	•	•
	7	•	-	•	•
2	4	•	•	•	•
	7	•	•	•	-
3	4	•	-	•	•
	6	•	•	•	•
4	4	•	-	•	•
	1	•	•	•	•

Para el caso de estudio se tomaron veinticuatro minutos de datos por cada configuración, la particularidad de este caso de estudio es que se tomó en la segunda configuración las mismas plantas que en la primera, pero se tomó el punto que había sido omitido en principio; en adelante se colocaron canales en los pisos 6 y 1, omitiendo un punto en la planta 4.

6.5. Resultados y comparación

De acuerdo al procedimiento se crearon matrices de datos de nueve minutos por configuración para el análisis; posterior a la prueba de confiabilidad de los datos, y pasarlos al dominio de la frecuencia, se calcularon las demás herramientas de identificación. En las Figuras siguientes se detallan los resultados:

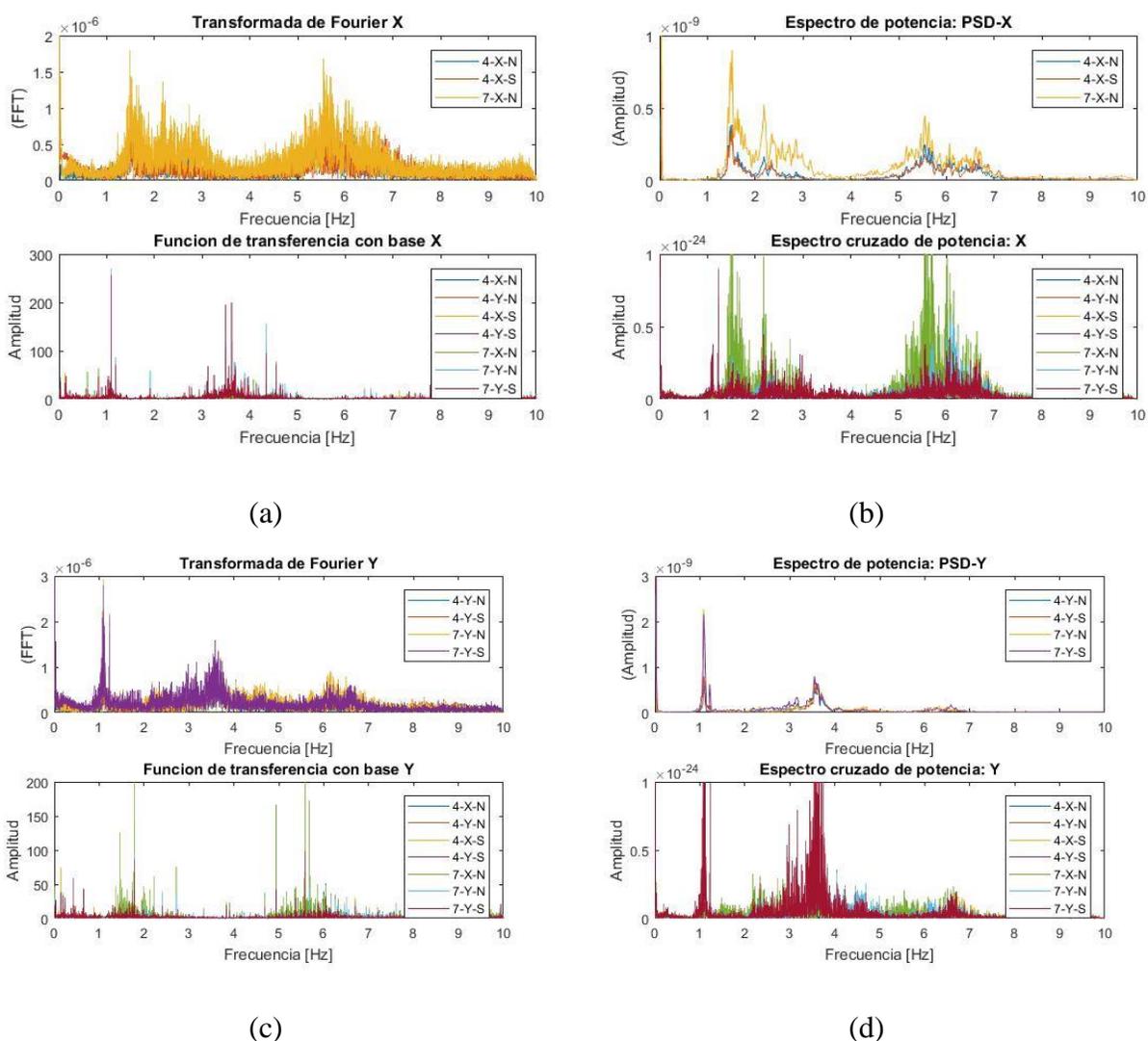


Figura 60. Herramientas de identificación para la configuración 1 del Hospital Naval. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.

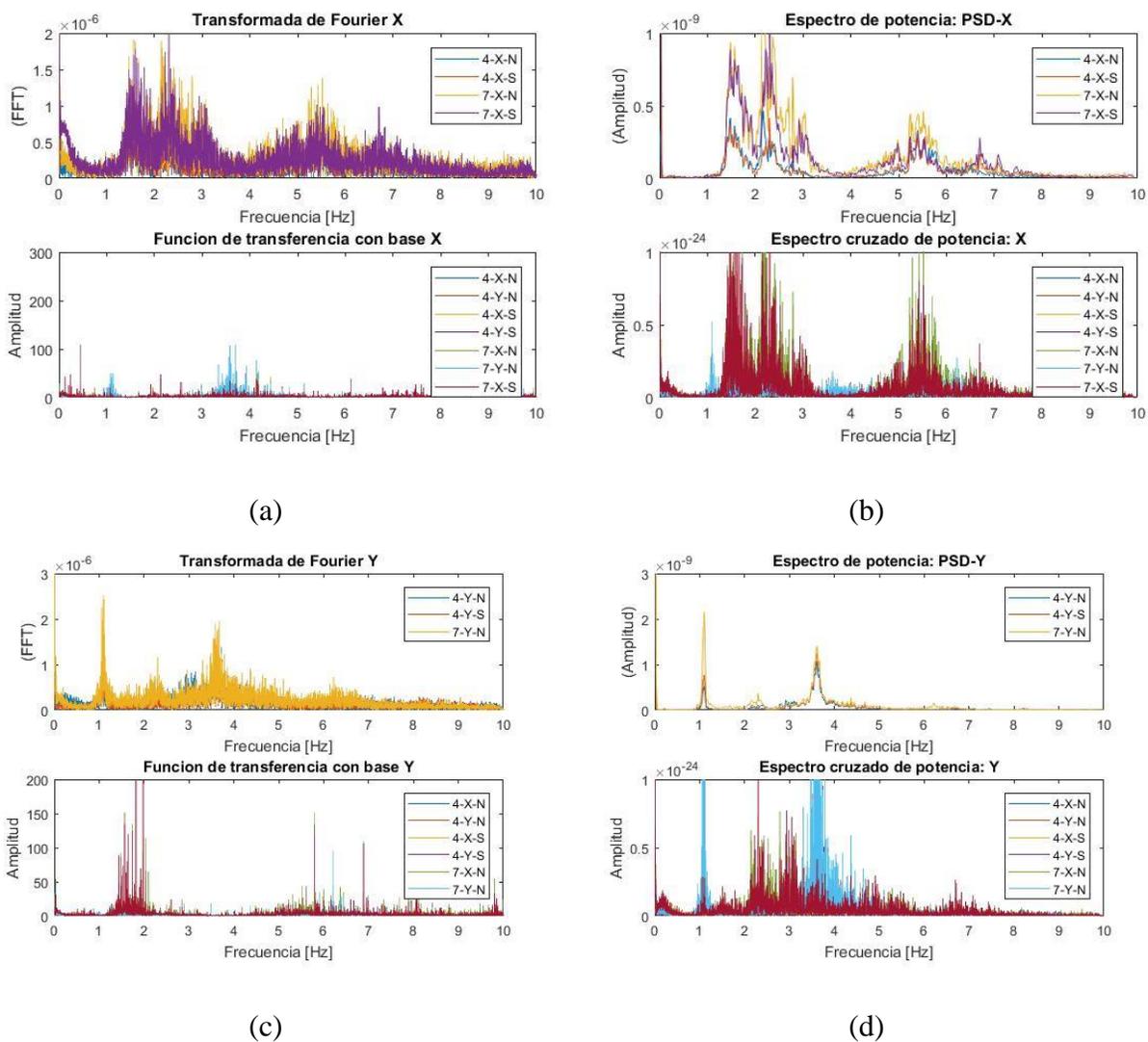


Figura 61. Herramientas de identificación para la configuración 2 del Hospital Naval. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.

Los picos identificables en la Figura 61 coinciden con los visibles en la configuración 1 (Figura 60); sin embargo, en ambos casos varían ligeramente respecto al canal de entrada o base que se utilice; inicialmente se lo podría atribuir a la diferencia de rigidez evidente del edificio de un sentido al otro.

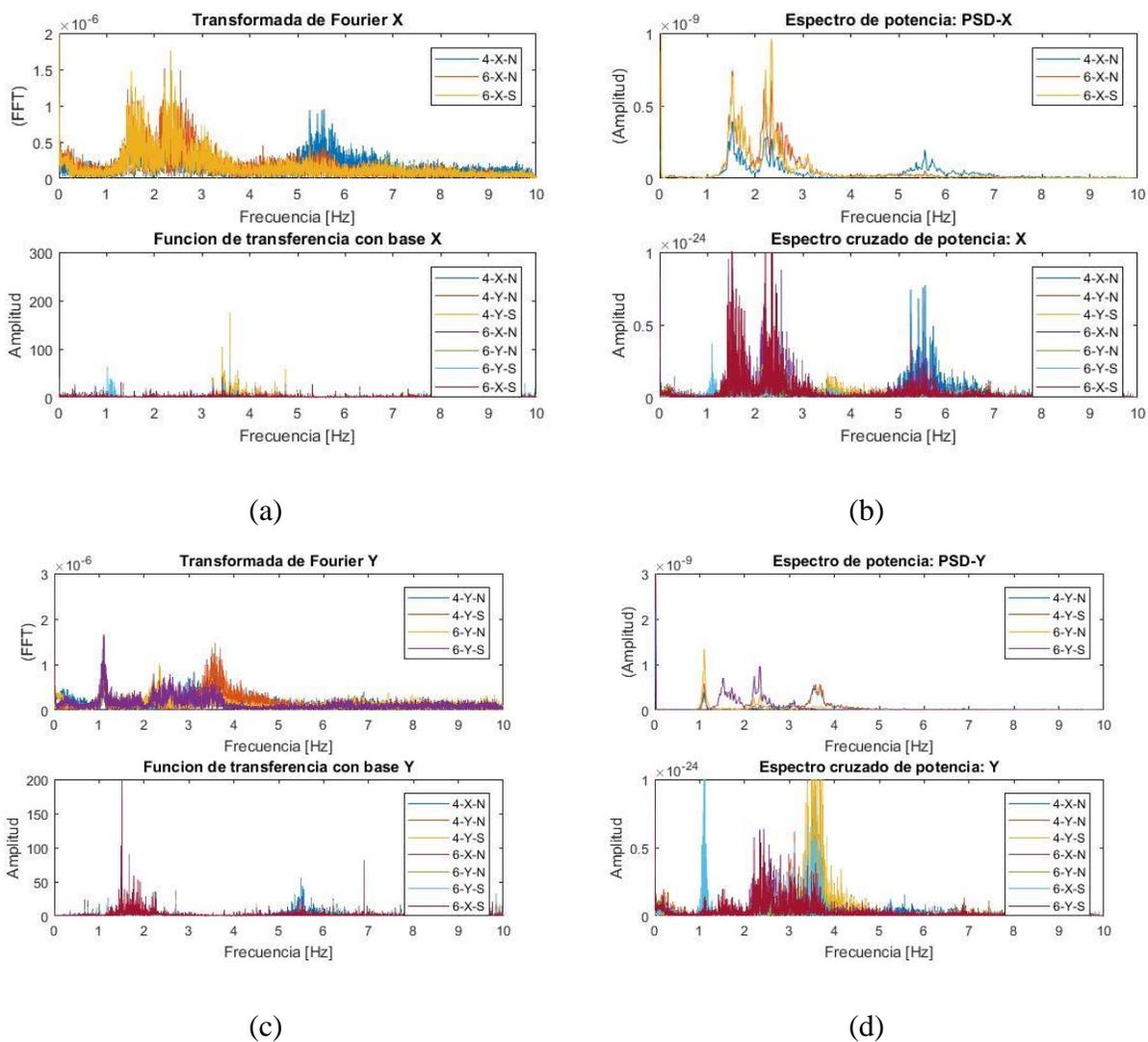


Figura 62. Herramientas de identificación para la configuración 3 del Hospital Naval. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.

Para el caso de la configuración 3, correspondiente a los pisos 4 y 6, la tendencia de los picos se mantiene, e incluso se encuentran picos en común que son enlistados según es mencionado en el procedimiento.

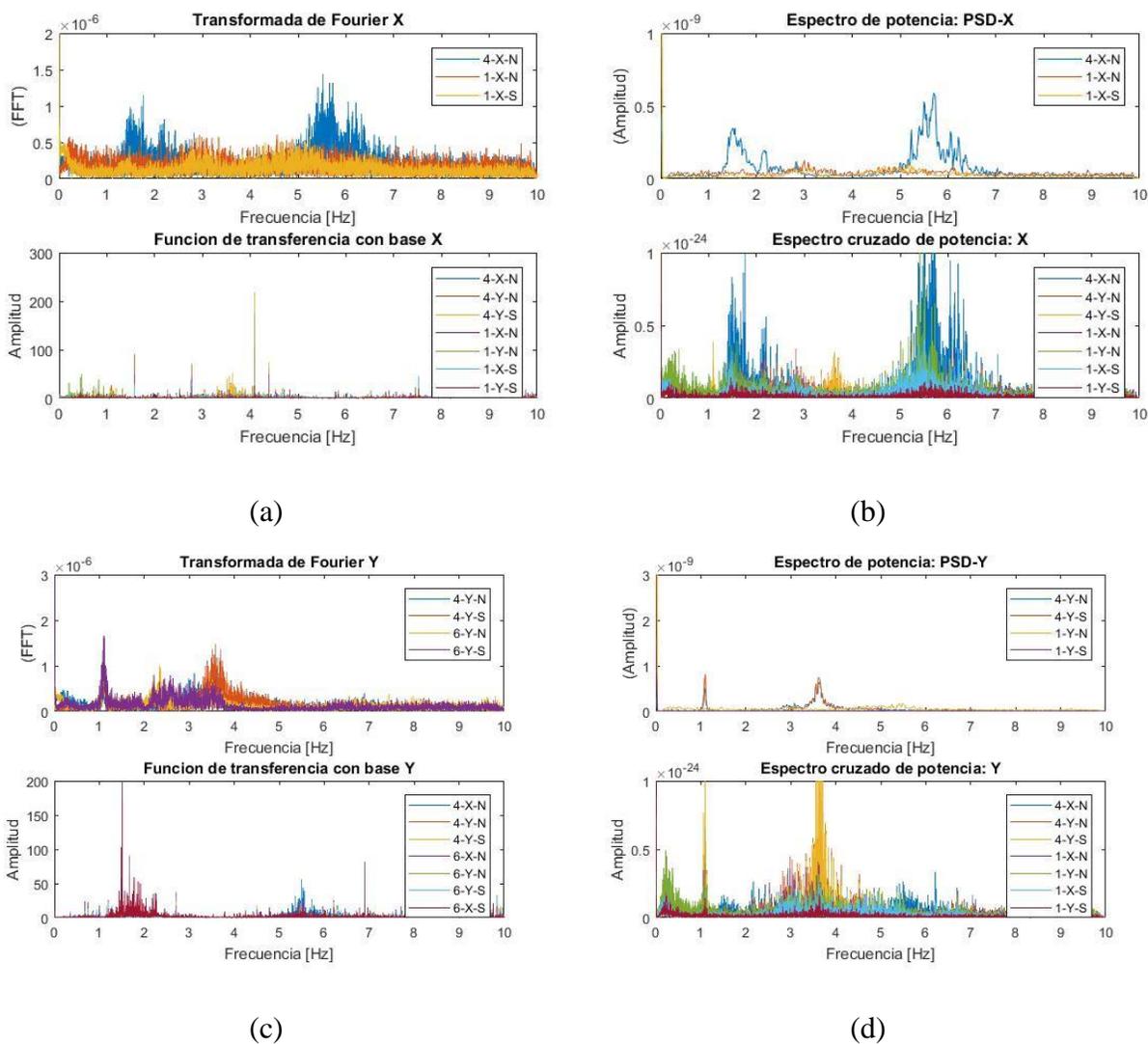


Figura 63. Herramientas de identificación para la configuración 4 del Hospital Naval. (a) y (b) herramientas utilizando como base un canal en el sentido X; (c) y (d) herramientas utilizando como base un canal en el sentido Y.

Finalmente, en la configuración 4, se puede probar que la tendencia de picos se mantiene durante todo el ensayo; comprobando así que, efectivamente, los picos se tratan de la respuesta dinámica de la estructura.

En la Tabla siguiente se enlistan algunos de los picos encontrados en común en las herramientas de identificación y en todas las configuraciones; estos valores deberán ser descartados por medio de la herramienta compass y el ploteo de los ángulos de fase, como se hizo en el caso de estudio anterior.

Tabla 29

Frecuencias obtenidas mediante la metodología “peak picking” del Hospital Naval de Guayaquil.

Modo 1	Modo 2	Modo 3
1.049	1.317	1.633
1.067	1.386	1.637
1.081	1.411	1.644
1.085	1.464	1.728
1.087	1.467	1.748
1.100	1.487	1.764
1.181	1.517	1.875

Si la herramienta compass permiten visualizar que, efectivamente, ángulos de los vectores de la función de transferencia de cada configuración, están en fase, se procede a construir el vector de función de transferencia que involucre a todos los pisos instrumentados; en la ecuación siguiente, se muestra el vector total de la estructura, expresado en función de los canales a tomar en cuenta:

$$Vtrnf = \begin{Bmatrix} P1 \\ P4 \\ P6 \\ P7 \end{Bmatrix} \quad (30)$$

Donde:

Vtrnf: vector resultante de la función de transferencia de toda la estructura instrumentada.

P1: Son los canales conectados al piso 1, en este caso, 4 canales.

P4: Son los canales conectados al piso 4, puesto que este es el piso en común, se tendrán datos en todas las configuraciones de esta planta; se recomienda promediar los resultados de este piso.

Por otro lado, al ser el piso en común, también Figura como el canal de entrada para las funciones de transferencia y el espectro cruzado de potencia, como resultado se tendrán 3 canales, más 1 canal cuyo valor siempre será uno, ya que se lo ha dividido para sí mismo.

P_6 y P_7 : son los valores de función de transferencia correspondientes a los pisos 6 y 7 respectivamente; y vendrán 4 canales cada uno.

Una vez obtenido el vector total de la estructura, corresponde normalizarlo por el método SRSS antes mencionado, y finalmente crear las formas modales correspondientes. Como ya se mencionó en el caso de validación, queda a criterio del usuario que función de transferencia conviene a la forma modal.

Los resultados son expuestos en las Figuras 64, 65 y 66 correspondientes a los tres primeros modos de la estructura.

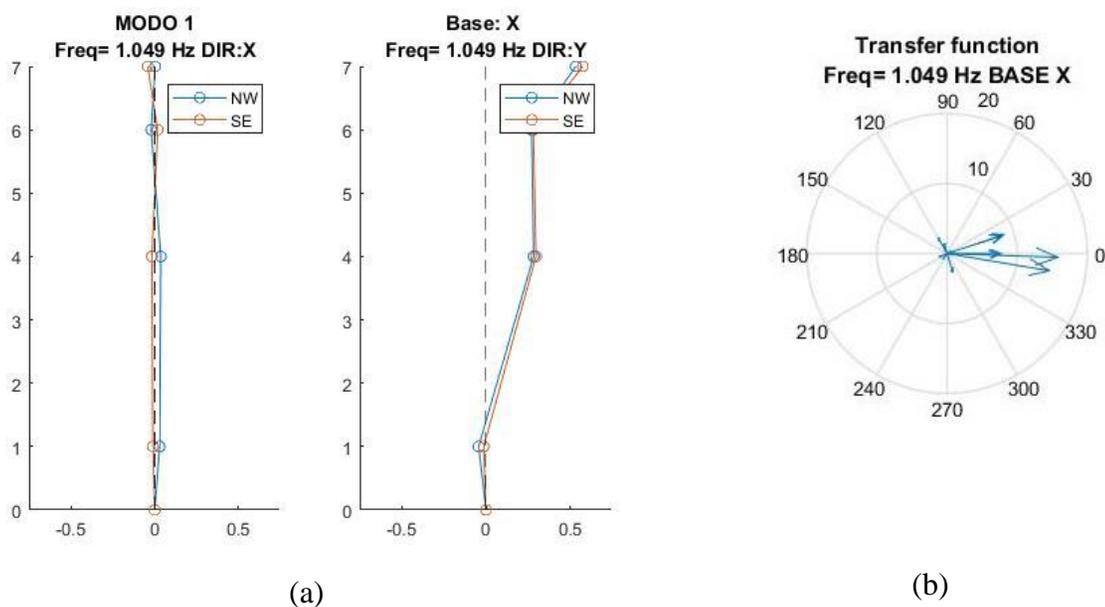


Figura 64 Modo 1, frecuencia 1.049 Hz del Hospital Naval de Guayaquil; (a) Forma modal 1 (b) herramienta compass con ángulos de fase.

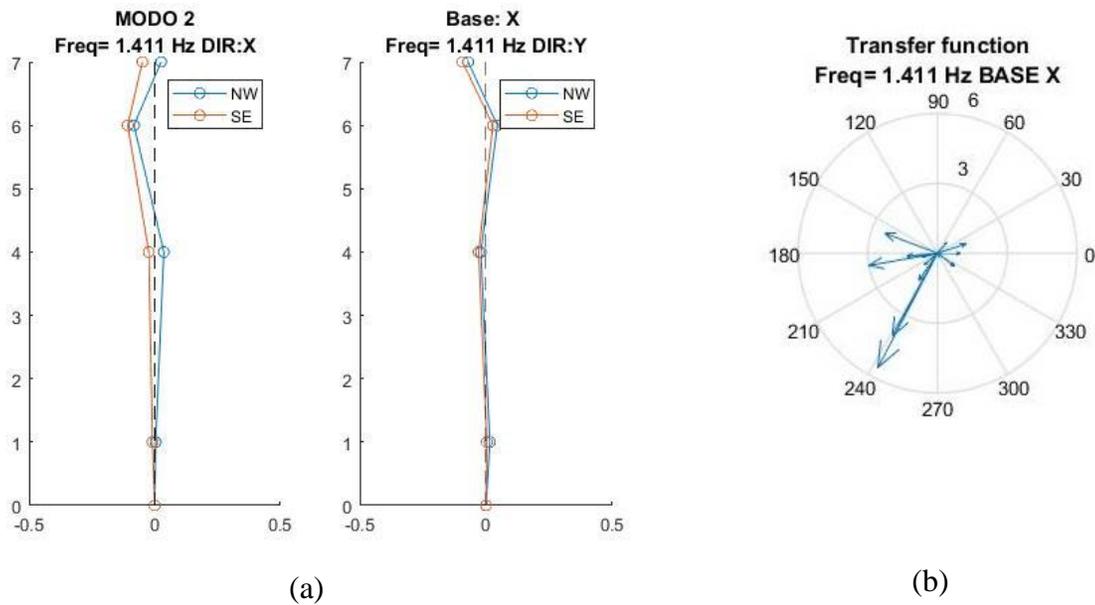


Figura 65 Modo 2, frecuencia 1.411 Hz del Hospital Naval de Guayaquil; (a) Forma modal 2 (b) herramienta compass con ángulos de fase.

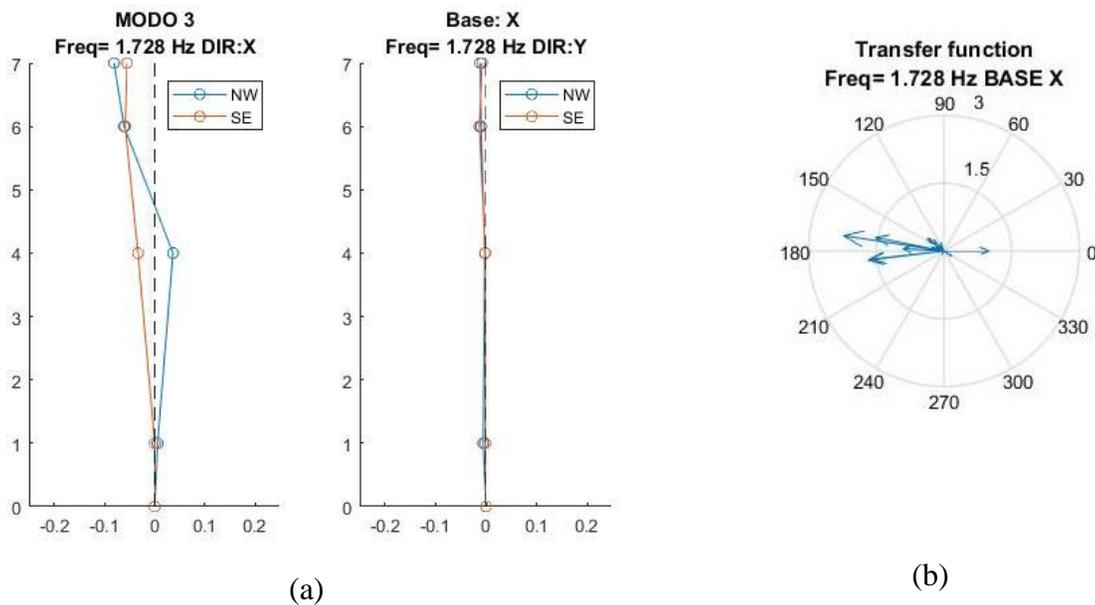


Figura 66 Modo 3, frecuencia 1.728 Hz del Hospital Naval de Guayaquil; (a) Forma modal 3 (b) herramienta compass con ángulos de fase.

Una vez obtenidos los modos de vibración de la estructura, se procede a su validación o comprobación con el modelo numérico desarrollado; inicialmente, se comparan los periodos y frecuencias obtenidos por ambos métodos, en la Tabla 30 se muestra en resumen esta comparación, resultando frecuencias muy cercanas entre sí.

Tabla 30

Modos de vibración expresados en frecuencia y periodo, comparación entre el modelo numérico y la instrumentación; Hospital Naval de Guayaquil.

Frecuencias y periodos- Instrumentación			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Frecuencia (Hz)	1.049	1.411	1.728
Periodo (s)	0.953	0.709	0.579
Frecuencias y periodos- Modelo numérico			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Frecuencia (Hz)	1.071	1.323	1.736
Periodo (s)	0.934	0.756	0.576

Si bien, respecto al valor de las frecuencias, estas son muy cercanas entre ellas, es necesario determinar la correspondencia de las formas modales encontradas con dichas frecuencias, para lo cual se calcula el criterio de aseguramiento modal. En las Tablas 31 y 32 se muestran las coordenadas de las formas modales correspondientes al modelo numérico, así como a las obtenidas por la instrumentación. Respecto al modelo numérico, las formas modales vienen dadas por los desplazamientos del diafragma de piso a causa del análisis modal; si bien estos valores son pequeñas longitudes en milímetros, y se los debe comparar con aquellas formas modales que por definición son adimensionales, para el cálculo del MAC esto no es relevante, pues compara su tendencia y correspondencia vectorial; como se mencionó en el capítulo anterior, incluso la normalización de los resultados es irrelevante.

Tabla 31

Vectores de desplazamiento de las formas modales obtenidas a partir del modelo numérico del Hospital Naval de Guayaquil.

Formas modales- modelo numérico				
Dirección	Piso	Modo1	Modo2	Modo3
X	1	-7.34E-06	-5.00E-03	-1.77E-04
	4	-4.58E-05	-1.90E-02	4.48E-05
	6	-6.92E-05	-2.60E-02	-6.64E-05
	7	-7.97E-05	-3.00E-02	-3.43E-04
Y	1	4.00E-03	-3.23E-05	1.00E-03
	4	2.00E-02	-4.68E-05	-2.78E-04
	6	2.60E-02	-5.75E-05	4.45E-05
	7	2.80E-02	-6.20E-05	-2.08E-04

Tabla 32

Vectores adimensionales de las formas modales obtenidas por medio de la instrumentación al Hospital Naval de Guayaquil

Formas modales-instrumentación			
Punto	Modo1	Modo2	Modo3
NXBY	0.045	-0.019	0.048
	0.007	-0.028	-0.104
	0.008	0.230	0.524
	0.001	-0.007	0.289
NYBY	-0.038	-0.066	-0.500
	0.057	0.057	0.057
	-0.093	-0.108	0.089
	0.114	0.138	0.072
SXBY	0.000	0.005	-0.004
	0.004	0.018	0.082
	-0.007	0.268	0.504
	0.122	0.187	0.063
SYBY	-0.238	0.022	-0.022
	0.071	0.099	0.026
	-0.096	-0.081	0.123
	0.122	0.187	0.063

Aplicando la fórmula descrita en el capítulo 4, correspondiente al criterio de aseguramiento modal o MAC, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 33, que resaltan los promedios obtenidos por cada dirección de análisis; en el primer modo se tiene una correspondencia casi total en la dirección Y, mientras que en X el valor es menor al deseado, en el segundo modo la correspondencia es buena en ambos sentidos, mientras que para el tercer modo tiene una correspondencia en el límite en el sentido X y una baja en el sentido Y. Estos valores de MAC se atribuyen a la diferencia de rigidez de la estructura de una dirección a otra.

Tabla 33

Criterio de aseguramiento modal MAC del Hospital Naval de Guayaquil; comparación de formas modales.

Criterio de aseguramiento modal (MAC)							
Freq (Hz)	Modo	MAC NX	MAC SX	MAC NY	MAC SY	MAC X Prom	MAC Y Prom
1.049	1	0.32	0.98	0.98	0.98	0.65	0.98
1.411	2	0.85	0.99	0.88	0.89	0.92	0.88
1.728	3	0.92	0.61	0.55	0.54	0.76	0.55

6.6. Resumen

El Hospital Naval de Guayaquil es una estructura recientemente reforzada a la que se instrumentó con el objetivo de determinar su periodo fundamental, modos de vibrar y formas modales; así como también analizar si el reforzamiento aportó a rigidizar la estructura o a mejorar de forma efectiva la respuesta dinámica de la misma. Por otro lado, se realizó un modelo computacional que simule el comportamiento real de la estructura y que valide la instrumentación realizada; como resultado se obtuvieron frecuencias similares entre el modelo y la instrumentación, con formas modales en correspondencia vectorial, resultado obtenido por medio del criterio de aseguramiento modal o MAC, como es lo deseado.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

La instrumentación de edificios por medio de vibraciones ambientales es una herramienta efectiva y económica para obtener la respuesta dinámica de las estructuras. Por lo tanto, la teoría de la dinámica tradicional es aplicable sustancialmente en este caso. Mediante los sistemas de identificación de señales se obtienen los registros de aceleraciones de piso, las mismas que son analizadas con herramientas, a fin de discretizar la información y seleccionar los datos relevantes como periodos y frecuencias; por otro lado, la dinámica de estructuras, partiendo de un diseño, también obtiene estas características. Es así, que tanto el método analítico, como el experimental tienen su fundamento, principalmente, en el análisis modal.

El proceso de instrumentación se llevó a cabo por medio de sensores acelerómetros de alta sensibilidad PCB 393B04, los datos fueron adquiridos mediante el programa NI Signal Express™, y almacenados en archivos de texto. En relación con el procesamiento de datos, se desarrollaron códigos en lenguaje C++ en MATLAB®, producto de los cuales se obtuvieron periodos y frecuencias experimentales del caso de estudio, correspondientes a los primeros tres modos de vibración, cuyos valores son: modo1 con una frecuencia de 1.049 Hz y 0.953 segundos; modo 2 con una frecuencia de 1.411 Hz y periodo 0.709 segundos; y el modo 3 con una frecuencia de 1.728 Hz y 0.579 segundos de periodo. Respecto a las formas modales se pueden observar los resultados en el capítulo 6.

El modelo matemático del Hospital Naval tuvo como insumos iniciales los siguientes: la memoria técnica y los planos arquitectónicos, estructurales y de reforzamiento, entregados por la

empresa consultora. En las visitas al edificio, se constataron diferencias entre lo citado por el plano y lo encontrado in situ, especialmente, en la separación de los ejes, las cotas de los entrepisos, las resistencias de los materiales, las secciones de las columnas, la geometría de la losa y el refuerzo de acero de los elementos de hormigón armado. Con base en la información de campo se realizó el modelo computacional empleando el software ETABS®, comparando diferentes modelos, desde la simulación del estado anterior al reforzamiento hasta uno refinado evaluando la contribución de los elementos no estructurales en la respuesta dinámica del edificio, verificando que su comportamiento sea consistente con los resultados de la instrumentación sometida a vibración ambiental. Producto del modelo computacional se obtuvieron periodos y frecuencias analíticas del caso de estudio, correspondientes a los tres primeros modos de vibración, cuyos valores son: modo 1 con una frecuencia de 1.071 Hz y 0.934 segundos; modo 2 con una frecuencia de 1.323 Hz y periodo 0.756 segundos; y el modo 3 con una frecuencia de 1.736 Hz y 0.576 segundos de periodo.

Para la comparación experimental con la analítica, se empleó el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) entre los vectores de las formas modales; del modelo numérico se extrajeron los desplazamientos en milímetros del centro de masas de las plantas instrumentadas; mientras que, experimentalmente se obtuvieron los vectores normalizados de la función de transferencia de las frecuencias de interés; la teoría menciona que las formas modales son vectores adimensionales, sin embargo, el cálculo del MAC hace una relación de correspondencia vectorial, sin que las dimensiones o unidades sean de verdadera relevancia.

Como resultado de la comparación por medio del MAC se obtuvieron valores que denotan una correspondencia entre las formas modales de la instrumentación y el modelo numérico; es importante mencionar que, en el modo 1 y 3 algunos de los valores son menores al recomendado de 0.80 en al menos una dirección, con un error porcentual entre 4 y 18%, esto se atribuye a la

configuración del modelo computacional del caso de estudio, ya que tiene mayor rigidez en una dirección que en otra, debido a las características del reforzamiento de la estructura especialmente por la presencia de los diafragmas metálicos paralelos al sentido corto y a los antepechos de hormigón presentes en el sentido longitudinal.

Como parte de la investigación realizada, particularmente a la relación $\frac{H}{T}$ expuesta en el Capítulo 6, se evidencia que la estructura de hormigón armado es flexible y que la presencia de la mampostería perimetral contribuye en gran medida a la rigidización. Se espera que el comportamiento frente a cargas gravitacionales aumente, debido a la estructura de reforzamiento, ya que el estudio fue realizado en el rango lineal.

De acuerdo con lo presentado en el Capítulo 6, en la Tabla 25, correspondiente a los periodos de vibración del Hospital Naval de Guayaquil, se puede analizar que, en estructuras esenciales, como el caso de estudio, se requiere cumplir los criterios de funcionalidad continua. Si se observa la respuesta dinámica de la estructura actual en los dos sentidos: modo 1, con desplazamiento en el sentido X y período de 0.934 segundos, y modo 2 con desplazamientos en sentido Y con periodo de 0.753 segundos; y se compara con la del año 1995 de periodo 0.71 segundos en el primer modo con desplazamientos mayormente en X, y 0.52 segundos del segundo modo con su similar en Y, se observa que los periodos incrementaron, se puede deducir que esta diferencia es debido a que la estructura sufrió la pérdida de rigidez por el tiempo, el uso y los eventos sísmicos, por lo tanto, la estructura se tornó más flexible; al considerar el daño ocurrido por el sismo de Muisne del año 2016, se infiere que en un evento de similares características podrían suscitarse los mismos efectos, especialmente en la mampostería y los contenidos (equipos médicos, camas hospitalarias, sistemas de gases, entre otros), ocasionando grandes pérdidas.

7.2. Recomendaciones

- Los sensores utilizados para la instrumentación son de alta sensibilidad y pueden perder su factor de calibración con bastante facilidad, por lo que es necesario mantenerlos seguros y aislados en sus cajas hasta el momento del ensayo, también debe realizarse un mantenimiento periódico de los mismos. Los cables coaxiales son de diámetro pequeño y susceptibles a doblarse y enredarse entre sí, el recubrimiento de estos con algún tipo de material plástico, que les aporte rigidez evitará daños y rupturas.
- Para la instrumentación de estructuras se recomienda seguir el protocolo descrito en el capítulo tres, ya que está basado en la parte teórica, así como en la practicidad del uso de los equipos.
- Respecto al análisis de datos, los códigos desarrollados son de gran ayuda para obtener resultados confiables; sin embargo, estos no son completamente automatizados y requieren del criterio del usuario, razón por la cual se recomienda entender de forma clara las herramientas utilizadas y la metodología de selección de frecuencia descrita en el capítulo cuatro.
- La dificultad de obtener un Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) superior a 0.80 es directamente proporcional al número de pisos instrumentados, es decir, a la dimensión del vector de la forma modal.
- En el estudio presentado, se evalúa el comportamiento dúctil lineal. Los elementos de enlace entre la estructura de reforzamiento y la estructura de hormigón armado son insuficientes, ya que la capacidad de resistencia al corte es reducida por las largas distancias entre pernos y sus pequeñas secciones; por lo tanto, es necesario revisar el diseño del reforzamiento, a fin de cumplir con solicitaciones grandes debido a las fuerzas laterales provocadas por los sismos. Además, es necesario considerar longitudes de perno mucho mayores que atraviesen las

secciones de hormigón y unan las vigas y placas de los diafragmas del piso superior e inferior y formen un confinamiento para la losa, todo esto con el objetivo de crear un comportamiento monolítico entre los dos sistemas.

- Es importante realizar un análisis no lineal de la estructura, ya que la contribución del reforzamiento metálico, especialmente por los diafragmas, indica muy poca variación entre los periodos obtenidos con o sin ellos; evidenciando que el reforzamiento tuvo poco impacto en la estructura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R. (2012). *Dinámica de estructuras con CEINCI-LAB* (Issue April 2012).
https://www.researchgate.net/publication/279914782_Dinamica_de_Estructuras_con_CEINCI-LAB
- American Concrete Institute. (2015). Momento de inercia y área de la sección transversal permitidos para el análisis. In Comité ACI 318 (Ed.), *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-14) y comentario (ACI 318SR-14)* (II impresi, p. 78).
- Argudo, J., & Yela, R. (1995). *Vulnerabilidad estructural de hospitales de Guayaquil - Ecuador*.
- ASTM. (2008). *ASTM C805-08: Standard test method for rebound number of hardened concrete*.
<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C805C805M>
- Ati, D. (2017). *Informe técnico evaluación estructural sismo-resistente del del Hospital Naval de Guayaquil*.
- Batel, M. (2002). Operational modal analysis - another way of doing modal testing. *S V Sound and Vibration*, 36(8), 22–27.
- Cables Direct. (2019). *RG59 BNC female to female coaxial cable coupler adapter connector*.
<https://www.cablesdirectonline.com/rg59-bnc-female-to-female-coaxial-cable-coupler-adapter-connector/>
- Chango, D. (2016). *Análisis teórico experimental de la variación del período fundamental durante el proceso de construcción de un edificio de acero*. Escuela Politécnica Nacional.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras* (IV Edición).
- Damgaard, M. (2011). *An introduction to operational modal identification of offshore wind turbine structures*.
- Echeverry, Julián David;Guarnizo Lemus, Cristian;Orozco, Á. Á. (2007). Análisis de la densidad espectral de potencia en registros MER. *Scientia Et Technica*, 13(035), 123–126.
<https://doi.org/10.22517/23447214.5379>

- Espinoza, F. (1999). Determinación de características dinámicas de estructuras. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93533>
- Ezequiel, M. (2014). *Sistemas de tiempo discreto - señales discretas*.
- Galiote, M. (2006). *Una aplicación de la instrumentación sísmica de edificios*. Universidad Autónoma de México.
- Gallegos, M. F., & Saragoni, G. R. (2017). Analysis of strong-motion accelerograph records of the 16 april 2016 mw 7.8 Muisne, Ecuador earthquake. *16th World Conference on Earthquake Engineering, 5013*(January 9th), 12.
- Geocimientos S.A. (2017). *Estudio geotécnico final para la rehabilitación del bloque principal del Hospital Naval de Guayaquil*.
- Gualoto, J., & Querembas, O. (2019). *Análisis de la vulnerabilidad sísmica del barrio Solanda sector 1 en el Distrito Metropolitano de Quito mediante ensayo con acelerómetro y formato de evaluación estructural*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Guendelman B., T., Guendelman, M., & Lindenberg, J. (2010). *Perfil bio-sísmico de edificios*. 17, 44–51. <http://biblioteca.cchc.cl/datafiles/22358.pdf>
- Harris, C. M., & Piersol, A. G. (1962). Shock and vibration handbook. In *Physics Today* (Vol. 15, Issue 9). <https://doi.org/10.1063/1.3058392>
- Henao, D. (2013). *Identificación de las propiedades dinámicas de una estructura sometida a vibración ambiental empleando análisis espectral*. Universidad EAFIT.
- IGEPN. (2011). *Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional*. <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/457-sismo-de-bahía-de-caráquez-4-de-agosto-de-1998>
- INEN. (1993). *Bloques huecos de hormigón, muestreo, inspección y recepción*.
- INEN. (2012). *Bloques huecos, refrentado de las unidades para ensayo a compresión*.
- Legrand, D., Baby, P., Bondoux, F., Dorbath, C., Bés De Berc, S., & Rivadeniera, M. (n.d.). *El*

enjambre sísmico de Macas (Cordillera de Cutucú).

- Morales, E., Filiatrault, A., & Aref, A. (2017). Sustainable and low cost room seismic isolation for essential care units in developing countries. *16th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Morales, Enrique, Filiatrault, A., & Aref, A. (2018). Seismic floor isolation using recycled tires for essential buildings in developing countries. In *Bulletin of Earthquake Engineering* (Vol. 16, Issue 12). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0416-7>
- Morán, M. (2017). *Análisis sismo – resistente y diseño del reforzamiento estructural para mejorar la seguridad sísmica del Hospital Naval de Guayaquil.*
- Mosquera Andrade, D. F. (2015). *Evaluación de los componentes y elementos no estructurales del Hospital Regional Militar de Guayaquil (II - de “Libertad”) ante un potencial peligro sísmico según FEMA E-74 FEMA 396 Y FEMA 577.*
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10358>
- Narváez, D., & Borja, C. (2017). *Estudios geofísico de sísmica de refracción.*
- National Instruments. (2019a). *C Series sound and vibration input module.*
<http://www.ni.com/en-us/shop/select/c-series-sound-and-vibration-input-module?modelId=122186>
- National Instruments. (2019b). *cDAQ-9174.* <https://www.ni.com/en-us/support/model.cdaq-9174.html>
- National Instruments. (2019c). *Cuenta de usuario.*
https://lumen.ni.com/nicif/esa/header_login/content.xhtml?action=login&du=https%3A%2F%2Fwww.ni.com%2Fmyni%2Fdashboard%2Fesa%2F
- National Instruments. (2019d). *Instalar y configurar chasis CompactDAQ.*
<http://www.ni.com/getting-started/set-up-hardware/data-acquisition/esa/compactdaq>
- National Instruments. (2019e). *NI DAQmx.* <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/drivers/download.ni-daqmx.html#325032>

- National Instruments. (2019f). *Serial numbers for LabVIEW SignalExpress limited edition activation*.
<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000P7mXSAS&l=es-EC>
- National Instruments. (2019g). *SignalExpress*. <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/software-products/download.signalexpress.html#322415>
- NEC-SE-DS. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción; Peligro sísmico, diseño sísmico resistente*.
- Ortega, H. (2017). *Estudio geotécnico final*.
- Paredes, R. (2015). *Influencia de los elementos no estructurales en la respuesta dinámica de un edificio. Aproximación teórica-experimental*.
- Parra, K., & Sarango, J. (2016). *Análisis estadístico del periodo experimental de vibración en edificios aporticados de hormigón armado en el Distrito Metropolitano de Quito*. 220.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/14781>
- Peñaherrera, E. (2018). *Memoria técnica de cálculo y diseño Edificio TITÁ*.
- Prof. C. E. Efstathiou. (n.d.). *Signal Sampling: Nyquist - Shannon Theorem*.
http://195.134.76.37/applets/AppletNyquist/App1_Nyquist2.html
- Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational modal analysis of civil engineering structures: an introduction and guide for applications*.
- Ruiz Costa-Jussà Helenca, M., & Barrobés, D. (n.d.). *Conceptos de señales y sistemas*.
https://doi.org/PID_00188064
- Stavridis, A. (2019). *Instrumentation 101 requirements for a good measuring*.
- Sunico, M. R. (2005). *Análisis modal operacional: teoría y práctica*. 41092.
- Yousefian, S., & Stavridis, A. (n.d.). *System identification of structures*.

ANEXOS