

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**INSTRUMENTACIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS EN PAÍSES**

**SÍSMICOS**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Christian Andree Felices Gilvonio

**ASESOR:**

Rafael Aguilar Velez

Lima, noviembre, 2020

## Resumen

Este trabajo explora la normativa internacional referida a la instrumentación sísmica de edificios y la aplicación de un sistema de procesamiento de señales sísmicas registradas en edificios instrumentados bajo la normativa de instrumentación sísmica peruana. Las normativas revisadas pertenecen a Colombia, Venezuela, Chile, Costa Rica, Turquía, Estados Unidos y Filipinas. Esta recopilación se presenta en cuadros informativos con las principales disposiciones de cada capítulo de instrumentación. Asimismo, se incluye una comparación entre las estipulaciones de una de las normativas estudiadas versus las disposiciones sugeridas por las principales guías internacionales de monitoreo sísmico de edificaciones. Finalmente, se sugieren aspectos normativos a incluir en el capítulo de instrumentación sísmica peruana propuestos en base a la información estudiada. Por otra parte, se revisan los conceptos básicos de señales sísmicas y su procesamiento. Luego, se presentan los conceptos y especificaciones técnicas de estaciones sísmicas y acelerómetros. Después, se realiza el estudio de los métodos numéricos usados para el cálculo de la respuesta dinámica de modelos de un grado de libertad y la construcción de espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración. Finalmente, se desarrolla un programa en LabVIEW para la construcción de espectros de respuesta y la creación de reportes automáticos con la información obtenida del evento sísmico registrado en una edificación instrumentada.

## **Abstract**

This paper explores the international regulations regarding the seismic instrumentation of buildings and the application of a processing system for seismic signals registered in buildings instrumented under the Peruvian seismic instrumentation regulations. The revised regulations pertain to Colombia, Venezuela, Chile, Costa Rica, Turkey, the United States and the Philippines. This compilation is presented in informative tables with the main provisions of each instrumentation chapter. Likewise, a comparison is included between the stipulations of one of the regulations studied versus the provisions suggested by the main international guidelines for seismic monitoring of buildings. Finally, regulatory aspects were suggested to include in the Peruvian seismic instrumentation chapter proposed based on the information studied. On the other hand, the basic concepts of seismic signals and their processing are reviewed. Then, the concepts and technical specifications of seismic stations and accelerometers are presented. Then, the study of the numerical methods used to calculate the dynamic response of one degree of freedom models and the construction of response spectra of displacement, velocity and acceleration is carried out. Finally, a LabVIEW program is developed for the construction of response spectra and the creation of automatic reports with the information obtained from the seismic event recorded in an instrumented building.

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres y hermanas por las enseñanzas, apoyo y cariño constante. Asimismo, un especial agradecimiento a todas las personas de distintas partes del Perú y el mundo que directa e indirectamente me permitieron tener el impulso necesario para la culminación del presente trabajo de investigación. Agradezco, también, a mi asesor de tesis, Dr. Rafael Aguilar, por su estricto y constante apoyo. Finalmente, agradezco a la música, por estar siempre ahí para mí y enriquecer mi existencia día a día.



## Contenido

<b>Resumen</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>iii</b>
<b>Contenido</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>viii</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Instrumentación sísmica	2
1.1.2. Proyectos representativos de instrumentación sísmica de edificios e infraestructura	3
1.1.2.1. Catedral Metropolitana de México	3
1.1.2.2. Edificio de gran altura (Acapulco, México)	7
1.1.2.3. Instrumentación para el monitoreo sísmico de puentes en EEUU	11
1.2. Motivación	19
1.3. Objetivos	20
1.3.1. Objetivo general	20
1.3.2. Objetivos específicos	20
1.4. Metodología	20
<b>Capítulo 2. Marco teórico</b>	<b>22</b>
2.1. Introducción	23
2.2. Conceptos básicos de procesamiento de señales	24
2.2.1. Señales y sistemas	24
2.2.2. Filtros	25
2.3. Equipos para instrumentación sísmica	27
2.3.1. Acelerómetros	28
2.3.2. Estaciones sísmicas	30
2.4. Evaluación numérica de la respuesta dinámica de sistemas estructurales	32
2.4.1. Métodos paso a paso en el tiempo	33
2.4.2. Método de la interpolación lineal (Nigam and Jennings)	36
2.5. Evaluación de la respuesta sísmica de sistemas lineales.	38
2.6. Conclusiones	40
<b>Capítulo 3. Recopilación de normas relacionadas a la instrumentación sísmica de edificios</b>	<b>42</b>
3.1. Introducción	43
3.2. Regulación para la instrumentación sísmica comparada. Normativa nacional y modelos extranjeros.	44
3.2.1. Normativa internacional de instrumentación sísmica	44
3.2.1.1. Normativa de Colombia	45

3.2.1.2. Normativa de Venezuela	47
3.2.1.3. Normativa de Chile	48
3.2.1.4. Normativa de Costa Rica	50
3.2.1.5. Normativa de Turquía	51
3.2.1.6. Normativa del Estado de California, EE.UU.	52
3.2.1.7. Normativa de Filipinas	56
3.2.2. Comparación de la normativa de instrumentación sísmica de Colombia y las buenas prácticas descritas en guías internacionales de instrumentación.	58
3.3.2. Propuesta de la estructura normativa del capítulo de instrumentación sísmica en el Perú	66
3.3. Conclusiones	71
<b>Capítulo 4. Implementación de una herramienta de procesamiento de señales sísmicas en LabVIEW</b>	<b>74</b>
4.1. Introducción	75
4.2. Implementación del programa	76
4.2.1. Entorno de lectura de datos de entrada (módulo 1)	78
4.2.2. Entorno de procesamiento de señales sísmicas (módulo 2)	81
4.2.2.1. Acelerogramas totales y filtrados	81
4.2.2.2. Cálculo de la respuesta dinámica	82
4.2.2.3. Cálculo de los valores espectrales	84
4.2.3. Generación de reporte (módulo 3)	85
4.3. Análisis de eventos sísmicos ocurridos entre 2017 y 2018	87
4.3.1. Información de la estación de monitoreo del edificio del Banco de la Nación	87
4.3.2. Aspectos técnicos del software de referencia “ <i>Seismo Signal</i> ”	88
4.3.3. Comparativo gráfico de espectros de respuesta	89
4.3.4. Comparación numérica de los valores espectrales y la estimación de error	93
4.4. Conclusiones	97
<b>Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>99</b>
5.1. Conclusiones	100
5.2. Trabajos futuros	105
Referencias	106
Anexo A	110
Anexo B	129
Anexo C	143
Anexo D	150
Anexo E	151
Anexo F	155

## Lista de figuras

Figura 1. 1. Pasos para la instrumentación sísmica de un edificio .....	3
Figura 1. 2. Ubicación de los equipos en la primera etapa de monitoreo sísmico de la Catedral de México .....	5
Figura 1. 3. Ubicación de los equipos de monitoreo sísmico en el Edificio de Acapulco, México	9
Figura 1. 4. Características del puente instrumentado .....	12
Figura 1. 5. Ubicación de las estaciones de monitoreo.....	15
Figura 1. 6. Análisis del modelo de elementos finitos del puente .....	18
Figura 2. 1. Esquema del sistema de conversión analógico – digital (A/D).....	25
Figura 2. 2. Tipos de filtros ideales.....	26
Figura 2. 3. Filtro Butterworth pasa-baja de orden $n=1, 2, 3$ y $5$ .....	27
Figura 2. 4. Modelo interno de un acelerómetro.....	28
Figura 2. 5. Modelo de un grado de libertad (1 GDL).....	32
Figura 2. 6. Acelerograma (eje de lectura norte-sur) del sismo de 1974.....	33
Figura 2. 7. Procedimiento estándar de un método paso a paso .....	34
Figura 2. 8. Procedimiento del método de la diferencia central .....	35
Figura 2. 9. Procedimiento del método de Newmark de la aceleración lineal.....	35
Figura 2. 10. Procedimiento del método de la interpolación lineal .....	36
Figura 2. 11. Respuesta de desplazamiento al sismo de 1974 para un $T=0.45$ s.....	37
Figura 2. 12. Respuesta de desplazamiento al sismo de 1974 para un $T=2$ s.....	37
Figura 2. 13. Expresiones de respuesta espectral, pseudo velocidad y pseudo aceleración .....	38
Figura 2. 14. Construcción del espectro de respuesta de desplazamiento del sismo de 1974 .....	39
Figura 2. 15. Espectros de respuesta para una fracción de amortiguamiento de $\xi = 5\%$ .....	40
Figura 3. 1. Países incluidos en el presente estudio y sus normativas sísmicas. ....	44
Figura 4. 1. Módulos de programación para el flujo de datos en Sismo PUCP V.1.0.....	77
Figura 4. 2. Flujo de datos en Sismo PUCP V.1.0.....	77
Figura 4. 3. Esquema del proceso de generación de los acelerogramas originales y filtrados en Sismo PUCP V.1.0.....	82
Figura 4. 4. Esquema del proceso del Sub-VI “Nigam and Jennings”. .....	83
Figura 4. 5. Respuesta de aceleración en el Sub-VI “Nigam and Jennings”. .....	84
Figura 4. 6. Cálculo de valores espectrales en el Sub-VI “Nigam and Jennings”. .....	85
Figura 4. 7. Estructura del formato de reporte usado para la presente tesis. ....	86
Figura 4. 8. Comparación gráfica de los espectros de respuesta de aceleración de Sismo PUCP V.1.0. y Seismo Signal en las tres direcciones de registro .....	90
Figura 4. 9. Acercamiento a la comparación gráfica de los espectros de respuesta de aceleración de Sismo PUCP V.1.0. y Seismo Signal en las tres direcciones de registro.....	91
Figura 4. 10. Comparación gráfica de los espectros de respuesta de velocidad de Sismo PUCP V.1.0. y Seismo Signal.....	92

Figura 4. 11. Comparación gráfica de los espectros de respuesta de desplazamiento de Sismo PUCP V.1.0. y Seismo Signal..... 93

Figura 4. 12. Gráfico de porcentajes de error de la aceleración espectral para cada valor discreto de 0.04 a 1 segundos ..... 95

Figura 4. 13. Gráfico de porcentajes de error de la velocidad espectral para cada valor discreto de 0.04 a 1 segundos de periodo..... 96

Figura 4. 18. Gráfico de porcentajes de error del desplazamiento espectral para cada valor discreto de 0.04 a 1 segundos de periodo. .... 97





## Lista de tablas

Tabla 1. 1. Distribución de equipos de monitoreo sísmico en la Catedral de México.....	4
Tabla 1. 2. Aceleraciones máximas registradas por los equipos de monitoreo sísmico .....	6
Tabla 1. 3. Distribución de equipos de monitoreo sísmico en edificio alto en Acapulco, México	8
Tabla 1. 4. Aceleraciones máximas registradas por los equipos de monitoreo sísmico .....	10
Tabla 1. 5. Distribución de equipos de monitoreo sísmico en el puente de la estación “B” a “F”	13
Tabla 1. 6. Distribución de equipos de monitoreo sísmico en el puente de la estación “L” a “T”	14
Tabla 1. 7. Comparación entre las frecuencias leídas y las obtenidas mediante el modelo y el porcentaje de error. ....	17
Tabla 2. 1. Tipos de acelerómetros: Características, ventajas y desventajas .....	29
Tabla 2. 2. Cuadro comparativo de estaciones sísmicas para el registro de movimientos sísmicos .....	31
Tabla 3. 1. Normativa de instrumentación sísmica de Colombia. ....	45
Tabla 3. 2. Normativa de instrumentación sísmica de Venezuela .....	47
Tabla 3. 3. Normativa de instrumentación sísmica de Chile .....	49
Tabla 3. 4. Normativa de instrumentación sísmica de Costa Rica.....	50
Tabla 3. 5. Normativa de instrumentación sísmica de Turquía .....	51
Tabla 3. 6. Normativa de instrumentación sísmica en la ciudad de Los Ángeles.....	53
Tabla 3. 7. Normativa de instrumentación sísmica en la ciudad de Los Ángeles.....	54
Tabla 3. 8. Normativa de instrumentación sísmica de Filipinas .....	57
Tabla 3. 9. Comparación de aspectos de tipo y altura de edificio en la norma colombiana y las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios.....	60
Tabla 3. 10. Comparación de los aspectos de localización de instrumentos en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios.....	61
Tabla 3. 11. Comparación de los aspectos del espacio de instalación de instrumentos en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios .....	62
Tabla 3. 12. Comparación de los tipos de sensores requeridos en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios.....	63
Tabla 3. 13. Comparación de aspectos definidos para la entidad supervisora de la instrumentación en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios	64
Tabla 3. 14. Comparación de aspectos definidos para la gestión de la instrumentación en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios .....	65
Tabla 3. 15. Comparación de aspectos definidos para la gestión de la información en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios .....	66
Tabla 3. 16. Normativa de instrumentación sísmica de Perú.....	68
Tabla 3. 17. Aspectos sugeridos para la inclusión en el Capítulo IX de la Norma de Diseño Sismorresistente E.030 o en la Guía de Especificaciones Técnicas del IGP. ....	70
Tabla 3. 18. Resumen de la normativa internacional para la instrumentación de edificaciones ..	72

Tabla 4. 1. Datos de entrada para la construcción del acelerograma y los espectros de respuesta. .....	79
Tabla 4. 2. Datos de entrada para la definición del filtro de la señal sísmica.....	80
Tabla 4. 3. Datos de entrada para la construcción de los espectros de respuesta .....	81





## **Capítulo 1. Introducción**

## **1.1. Antecedentes**

### **1.1.1. Instrumentación sísmica**

Durante las últimas décadas la instrumentación sísmica de estructuras se ha desarrollado de manera tal que actualmente es una de las formas más efectivas de comprobar los procedimientos de diseño estructural. Asimismo, permite evaluar la seguridad sísmica de estructuras desde edificios modernos o monumentales hasta presas o puentes (Meli, Rivera, Sánchez, & Miranda, 2001). De esta forma se corroboran los modelos usados para el diseño estructural y se corrigen parámetros en búsqueda de la mitigación del riesgo sísmico. Estos parámetros se actualizan en las normas sísmicas de cada país o se incluyen en guías internacionales de instrumentación sísmica de estructuras civiles (Celebi, 2000).

La instrumentación sísmica consiste en la distribución e instalación de equipos de monitoreo en ubicaciones dentro de una estructura y en el terreno adyacente con el fin de estudiar su comportamiento ante eventos sísmicos de gran magnitud o movimientos leves incluso llegando a la vibración ambiental (Poblete, 2013). Estos equipos de monitoreo, en su mayoría acelerómetros, registran las aceleraciones en cada ubicación, con lo cual se puede verificar cambios en el comportamiento respecto de las aceleraciones leídas a nivel del terreno (Poblete, 2013).

Para el desarrollo de la instrumentación sísmica de una estructura se debe considerar el orden de procesos mostrado en la figura 1.1. (Villaroel, 1998). En primer lugar, se realiza la descripción estructural del edificio, donde se analizan las principales características de la estructura. Luego, según este estudio previo de la estructura, se definen las especificaciones técnicas y la ubicación de los instrumentos. Una vez obtenidos los registros, se construyen los acelerogramas y se pasa al

procesamiento de las señales sísmicas, donde se identifican las propiedades del evento sísmico y la respuesta dinámica. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con la información proveniente de la etapa de diseño de la estructura.

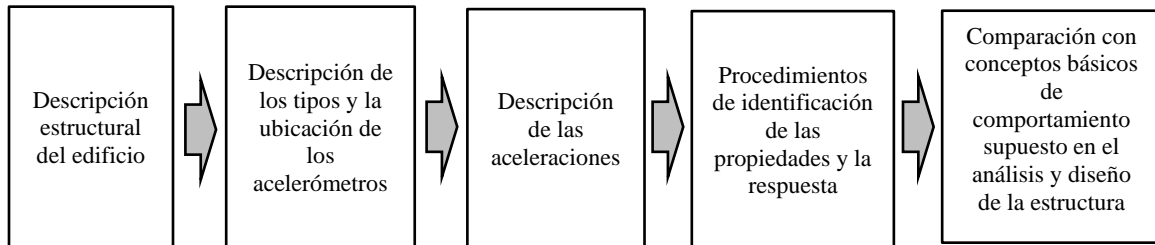


Figura 1. 1. Pasos para la instrumentación sísmica de un edificio (Villaroel, 1998)

### 1.1.2. Proyectos representativos de instrumentación sísmica de edificios e infraestructura

Se revisaron algunos proyectos representativos de instrumentación sísmica desarrollados en México y EE.UU. que se diferencian tanto por las características propias de la estructura a instrumentar, así como por los métodos de instrumentación, los tipos de suelo donde se cimentan.

#### 1.1.2.1. Catedral Metropolitana de México

Los dispositivos usados para la instrumentación de la Catedral Metropolitana de México en el periodo 1997-2000 fueron los acelerógrafos triaxiales de alta resolución modelo “K2” de la marca *Kinematics*, y los registros eran grabados en una memoria de estado sólido. Todos los instrumentos poseían un sistema de activación que registraba solo las aceleraciones superiores al umbral determinado. Asimismo, se escogió a uno de estos como el instrumento principal de activación con un umbral menor al de los demás (Meli et al., 2001).

La ubicación de los dispositivos cambió en tres periodos dentro de los tres años de operación a cargo del Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (CENAPRED). En la tabla 1.1.,

se presenta la distribución de los instrumentos en las diferentes etapas de monitoreo y los objetivos de cada una de las ubicaciones. Como se observa, la primera etapa permitió realizar los estudios a nivel de base y en la zona externa, así como en la azotea de la estructura principal. Luego, en la segunda etapa se cambiaron de posición dos equipos para el monitoreo de una de las torres de la catedral, y finalmente para la última etapa se dejó el instrumento con activador principal en el centro de la cúpula junto con los instrumentos de la torre (Meli et al., 2001).

*Tabla 1. 1. Distribución de equipos de monitoreo sísmico en la Catedral de México*

Etapa	Periodo		Distribución de equipos			N° de equipos de monitoreo	Objetivo
	Mes/Año	Mes/Año	Zona	Ubicación específica	Código		
1°	Ene-97	Jul-97	Externo	Terreno a un lado de la entrada oeste	CL	1	Entender el movimiento del suelo en la zona de fundación del edificio.
			Sótano	Lado sur	SS	3	Entender el movimiento de los niveles inferiores de la estructura.
				Lado norte	SN		
				Centro	SC		
			Azotea	Costado Sur	AS	4	Comprender el movimiento de la cubierta.
				Base tambor de la cúpula central	AC		
				Lado norte	AN		
Costado Oeste	AO						
2°	Dic-97	May-98	Externo	Terreno a un lado de la entrada oeste	CL	1	Entender el movimiento del suelo en la zona de fundación del edificio.
			Sótano	Centro	SC	1	Entender el movimiento de los niveles inferiores de la estructura.
				Costado Sur	AS	4	Comprender el movimiento de la cubierta.
				Base tambor de la cúpula central	AC		
			Lado norte	AN			
			Torre sur-poniente	Costado Oeste	AO	2	Estudiar la respuesta de un sector importante del templo que no había sido cubierto en la primera etapa.
				Parte alta	TA		
3°	Jun-99	Dic-99	Azotea	Base tambor de la cúpula central	AC	1	Comprender el movimiento de la cubierta.
			Torre sur-poniente	Parte alta	TA	2	Estudiar la respuesta de una de las torres.
				Base de campanario	TB		

En la figura 1.2., se muestra un esquema de la distribución de equipos usada en la primera etapa de instrumentación de la catedral. En esta se puede observar los diferentes espacios que componen esta estructura y los lugares aproximados donde se colocaron los instrumentos.

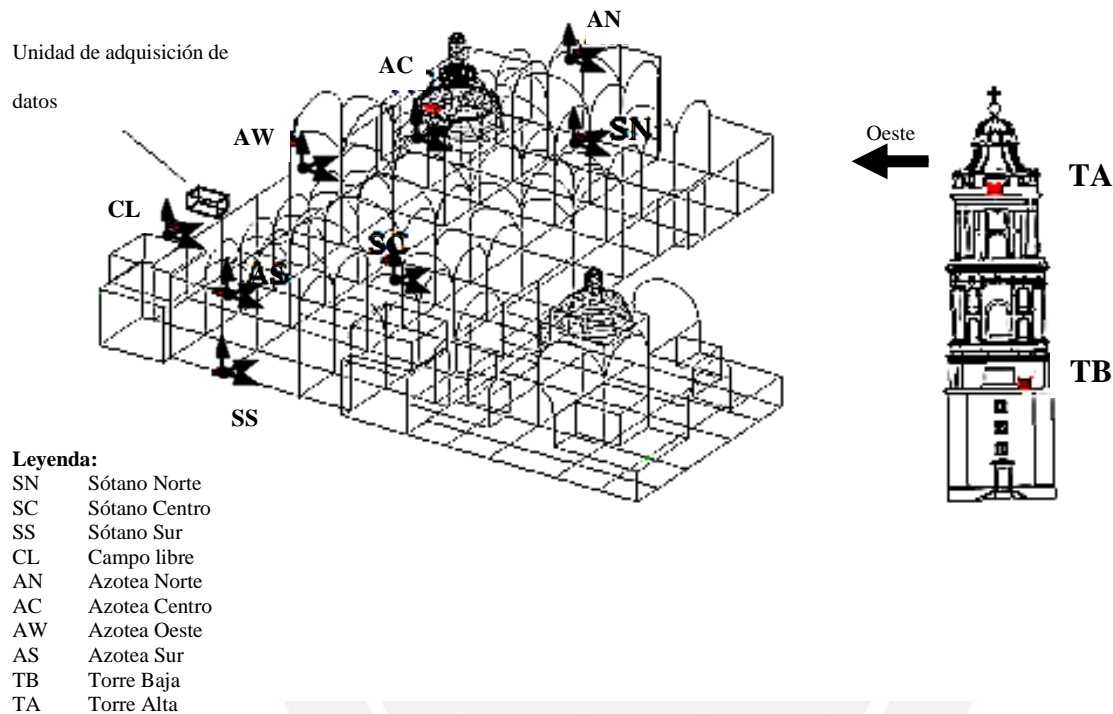


Figura 1. 2. Ubicación de los equipos en la primera etapa de monitoreo sísmico de la Catedral de México (Meli et al., 2001)

A lo largo de las tres etapas de instrumentación los dispositivos registraron 16 sismos de leves a moderados, restringiendo el presente estudio a ser representativo solo de la respuesta a sismos moderados. En la tabla 1.2., se incluye la información de las aceleraciones máximas recogidas por los equipos en los eventos más importantes y su ubicación dentro de la estructura. Es preciso indicar, que los valores de aceleración máxima registrados son reducidos debido a la interacción suelo estructura, donde el suelo altamente compresible de este emplazamiento ( $T=2.6$  s) no amplifica el movimiento de estructuras históricas como esta, las cuales poseen periodos fundamentales no mayores a 0.5 segundos (Meli et al., 2001). Asimismo, las magnitudes de los

eventos usadas en este estudio están en unidades de Magnitud de coda (Mc), las cuales se obtienen a partir de la duración del registro sísmico (M.Suteau & H.Whitcomb, 1979).

*Tabla 1. 2. Aceleraciones máximas registradas por los equipos de monitoreo sísmico*

Descripción	Fecha	Epicentro	Magnitud Mc	Equipos con mayores aceleraciones	Aceleración máxima registrada (g)
Sismo de mayor magnitud	11/01/1997	Costas de Michoacán	7.3	Lado oeste de la azotea	0.02
Sismo con mayores intensidades en el sitio	15/06/1999	30 km del sur de Tehuacán	6.7	Campo libre, azotea centro y torre baja	> 0.025
Sismo registrado por el conjunto completo de equipos	22/05/1997	Rio Balsas, límite entre Michoacán y Guerrero	5.9	Lado oeste de la cúpula central	0.01
Sismo registrado por todos los equipos menos los que estaban en la base	21/07/1999	Rio Balsas inferior	5.8	Parte alta de la torre	0.02

Como procedimientos de identificación de las propiedades se analizaron las coincidencias entre el periodo de vibración de la estructura y la zona de amplificación sísmica usando los espectros de respuesta. De esta forma se verificaba si existía amplificación sísmica en la estructura en los puntos donde se ubicaban los instrumentos (Meli et al., 2001).

En el caso de los espectros de respuesta formados con los registros del instrumento colocado en campo libre (CL), no se logró generar gráficas con un pico de amplificación definido para un periodo determinado, por lo que se procedió a calcular las funciones de transferencia. Mediante este procedimiento se logró encontrar el periodo fundamental del terreno ( $T=2.6$  s), el cual fue similar al periodo calculado en la norma mexicana vigente para el terreno donde se ubica la catedral ( $T=2.5$  s). Con esto se probó que no existían amplificaciones en la estructura, ya que el periodo fundamental de esta solo llegaba a los 0.5 segundos (Meli et al., 2001).



Para el caso de los instrumentos instalados en la base de la estructura se realizaron comparaciones con los espectros calculados en campo libre, con lo que se probó que la estructura filtraba la señal del sismo reduciendo su amplitud debido al volumen y masa de la base de la estructura. Asimismo, se verificó que los tres instrumentos instalados en la base tuvieron el mismo tipo y amplitud de movimiento, con lo que se comprueba la uniformidad de los movimientos en los distintos puntos de la base del edificio (Meli et al., 2001).

Por otro lado, en la cubierta de la catedral se observó que no existen amplificaciones con respecto a los movimientos registrados en la base, por lo que se concluyó que la estructura se comporta como un sólido rígido. Asimismo, mediante la comparación de las respuestas se pudo estimar el amortiguamiento de la estructura, que en promedio resulta cercano a 10%, siendo el doble del amortiguamiento crítico para edificios modernos ante sismos de alta intensidad (Meli et al., 2001).

#### **1.1.2.2. Edificio de gran altura (Acapulco, México)**

La instrumentación sísmica de edificios ha permitido el estudio del comportamiento de estructuras en diferentes partes del mundo y a distintas velocidades de crecimiento. Tal es el caso de Panamá, donde la instrumentación de edificios se desarrolló lentamente en sus inicios, pero durante la década de los 90 se extendió hasta edificios de gran altura, tales como la Torre *Platinum* (1996, 47 pisos) y la Torre *Mirage* (1997, 48 pisos) (Vargas, 2012). Asimismo, en México para el año 2000 existían 25 edificios instrumentados, entre los cuales estaba incluido un edificio ubicado en Acapulco, donde se comenzó a estudiar el comportamiento de estructuras de gran altura en ese país (Taborda Ríos, Muriá Vila, Pérez Mendoza, & Macias Castillo, 2002). Este edificio instrumentado en la ciudad de Acapulco consta de 17 pisos más un sótano usado como estacionamiento y su construcción culminó en el año 2000. El sistema estructural es aporticado

con muros rígidos y se cimentó en una zona de suelo cohesivo, por lo que se requirió de una cimentación profunda con pilotes hasta una profundidad aproximada de 12.5 m (Murià Vila, Taborda, Macías, & Escobar, 2002).

Los equipos instalados en este edificio fueron 24 servoacelerómetros uniaxiales de alta resolución. En la tabla 1.3. se indica la ubicación específica de los instrumentos y la cantidad de equipos en cada posición referenciando su código y los objetivos que se desean lograr con la información registrada en ese punto.

*Tabla 1. 3. Distribución de equipos de monitoreo sísmico en edificio alto en Acapulco, México*

Distribución de equipos			N° de equipos de monitoreo	Objetivo
Zona	Ubicación específica	Código		
Estación de campo	Terreno a un lado de la entrada	JN	3	Entender el movimiento del suelo en la zona de fundación del edificio.
Nivel 4	Dos en la dirección T y una en la dirección L.	4-C, 4-N	3	Verificar el comportamiento de la estructura en el nivel escogido.
Nivel 8	Dos en la dirección T y una en la dirección L.	8-C, 8-N	3	Verificar el comportamiento de la estructura en el nivel escogido.
Nivel 12	Dos en la dirección T y uno en la dirección L.	12-C, 12-N	3	Verificar el comportamiento de la estructura en el nivel escogido.
Sótano	Dos en la dirección T y uno en la dirección L.	SO-N, SO-E, SO-O	4	Comprender los movimientos de la estructura enterrada.
Azotea	Dos en la dirección T y uno en la dirección L.	AZ-O, AZ-S, AZ-E, AZ-N	4	Comprender el movimiento en la parte más alta del edificio.

En la figura 1.3., se muestra un esquema de la distribución de equipos usada en la instrumentación del edificio de Acapulco. En esta se puede observar los diferentes espacios que componen esta estructura y los lugares aproximados donde se colocaron los instrumentos. Asimismo, los ejes

usados para las coordenadas del presente estudio se definieron como ejes perpendiculares T y L dentro de un plano horizontal y V como eje perpendicular a dicho plano indicándose la dirección del Eje Norte.

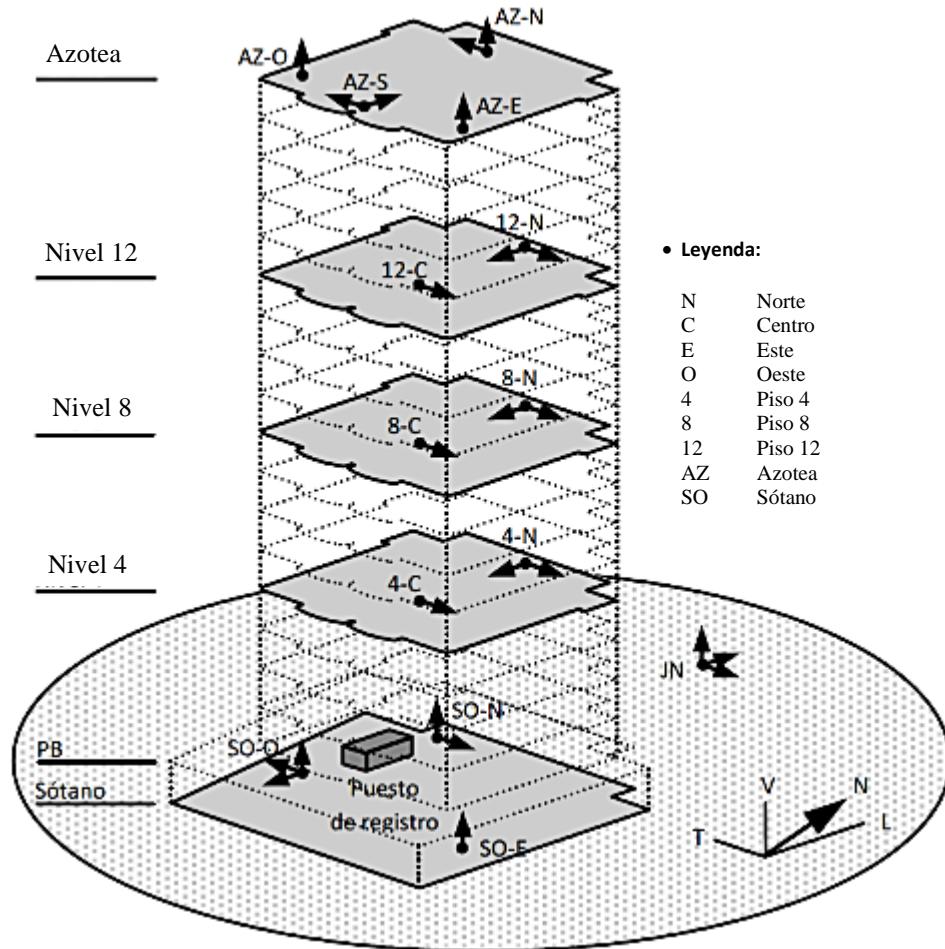


Figura 1. 3. Ubicación de los equipos de monitoreo sísmico en el Edificio de Acapulco, México (Murià Vila et al., 2002)

Los dispositivos instalados recabaron la información de 25 sismos de pequeña intensidad con epicentro cercano a las costas de la ciudad de Guerrero, México. En la tabla 1.4., se muestra la información de los eventos más severos que pudieron leerse con los dispositivos, siendo ninguno de estos eventos de gran intensidad. Otros parámetros para la selección de estos eventos fueron la cercanía al punto de estudio y que los eventos hayan provocado vibración libre de la estructura (Murià Vila et al., 2002). Asimismo, las magnitudes de los eventos mostradas están en unidades

de Magnitud Momento (Mw), la cual se define como la cantidad de energía liberada por un sismo a partir del Momento Sísmico (Peláez, 2011).

*Tabla 1. 4. Aceleraciones máximas registradas por los equipos de monitoreo sísmico*

Descripción	Fecha	Distancia epicentral (Km)	Magnitud Mw	Equipos con mayores aceleraciones	Aceleración máxima registrada (g)
Evento más intenso registrado (SI 01-1)	08/10/2001	44	6.1	Dirección L en la azotea	0.169
Evento SI 01-2	08/10/2001	43	3.4	Dirección T en la azotea	0.019
Evento SI 02-2	17/02/2002	19	4.6	Estación de campo	0.049

Como procedimientos de identificación de las propiedades se desarrollaron espectros de Fourier para realizar un análisis espectral. Asimismo, se calcularon los espectros de respuesta de las estaciones de campo y de la azotea. Luego, se procedió a comparar los cocientes espectrales entre los registros en el centro de la azotea y la estación de campo (Murià Vila et al., 2002). Del mismo modo, se realizó una comparación de las frecuencias de vibración de los cuatro primeros modos de los eventos registrados.

En el caso de los espectros de respuesta calculados en el presente estudio, se observó que se dieron las aceleraciones máximas para los periodos 0.04 y 1.40 segundos y los primeros periodos dominantes entre 1.26 y 1.40 segundos (Murià Vila et al., 2002). Estos valores concuerdan con estudios previos en los cuales se comprobó que el valor promedio del periodo fundamental es 1.33 segundos y también se señala que la amplificación relativa del movimiento es de aproximadamente siete veces respecto a un sitio de terreno firme. Asimismo, de los espectros de respuesta calculados en la zona de la base del edificio se observó un efecto de la interacción suelo-estructura que consiste en una atenuación de los movimientos del terreno para periodos menores de 1 segundo (Murià Vila et al., 2002).

Asimismo, la comparación entre los cocientes espectrales de la azotea central y la estación de campo se observaron variaciones de las frecuencias de vibración en las direcciones T y L, lo que podría evidenciar un comportamiento no lineal en la estructura. Por otro lado, al verificar las frecuencias de los modos de vibrar de la estructura se observó que los valores de las frecuencias variaban en cada evento, lo que puede evidenciar que existe una dependencia de las frecuencias con las intensidades de las solicitaciones de cada evento (Murià Vila et al., 2002).

### **1.1.2.3. Instrumentación para el monitoreo sísmico de puentes en EEUU**

La instrumentación sísmica de puentes aporta información para entender cómo estos reaccionan a movimientos sísmicos en diferentes tramos de su estructura y los efectos de la interacción entre los distintos materiales que los componen (Hibley, 2001). Asimismo, se han desarrollado sistemas integrados a los dispositivos de monitoreo que permiten tomar acciones inmediatas en la estructura durante y posterior a la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud (Hibley, 2001). Dentro de la variedad de diseños de puentes, los puentes colgantes se fueron popularizando por tener una estructura eficiente, a tal punto que se convirtió en la primera opción en zonas con alto peligro sísmico en varias partes del mundo (Chen, Yan, Wang, & Zheng, 2007). Para los años 2000, Estados Unidos tenía ya construidos varios de estos puentes y se comenzó a gestar una búsqueda de mayores longitudes de luz en sus diseños, acompañado de la creciente tecnología en herramientas de análisis estructural y metodologías de construcción que se iba desarrollando hasta ese momento (Chen et al., 2007). Tal es el caso del Puente Conmemorativo de Bill Emerson (*“The Bill Emerson Memorial Bridge”*), puente colgante que atraviesa el Río Mississippi en Estados Unidos cargando con las carreteras estatales 34 y 37 de Missouri y la Ruta 146 de Illinois uniendo las ciudades de Cabo Girardeau perteneciente al estado de Missouri, y el Cabo Este de Girardeau en el estado de Illinois (Chen et al., 2007).

En la figura 1.4. (a), se muestran las dimensiones principales de la superestructura del puente, la cual está compuesta por dos vigas longitudinales de acero, vigas transversales de piso y losas de concreto prefabricado (Chen et al., 2007). En el caso de la subestructura, los muelles 3 y 4 descansan en distintos estratos resistentes de suelo y el muelle 3 descansa en roca. Asimismo, como se observa en la figura 1.4. (b) y (c), a la estructura se le adicionaron dispositivos de conexión vertical y horizontal entre la superestructura y la subestructura como protecciones sísmicas.

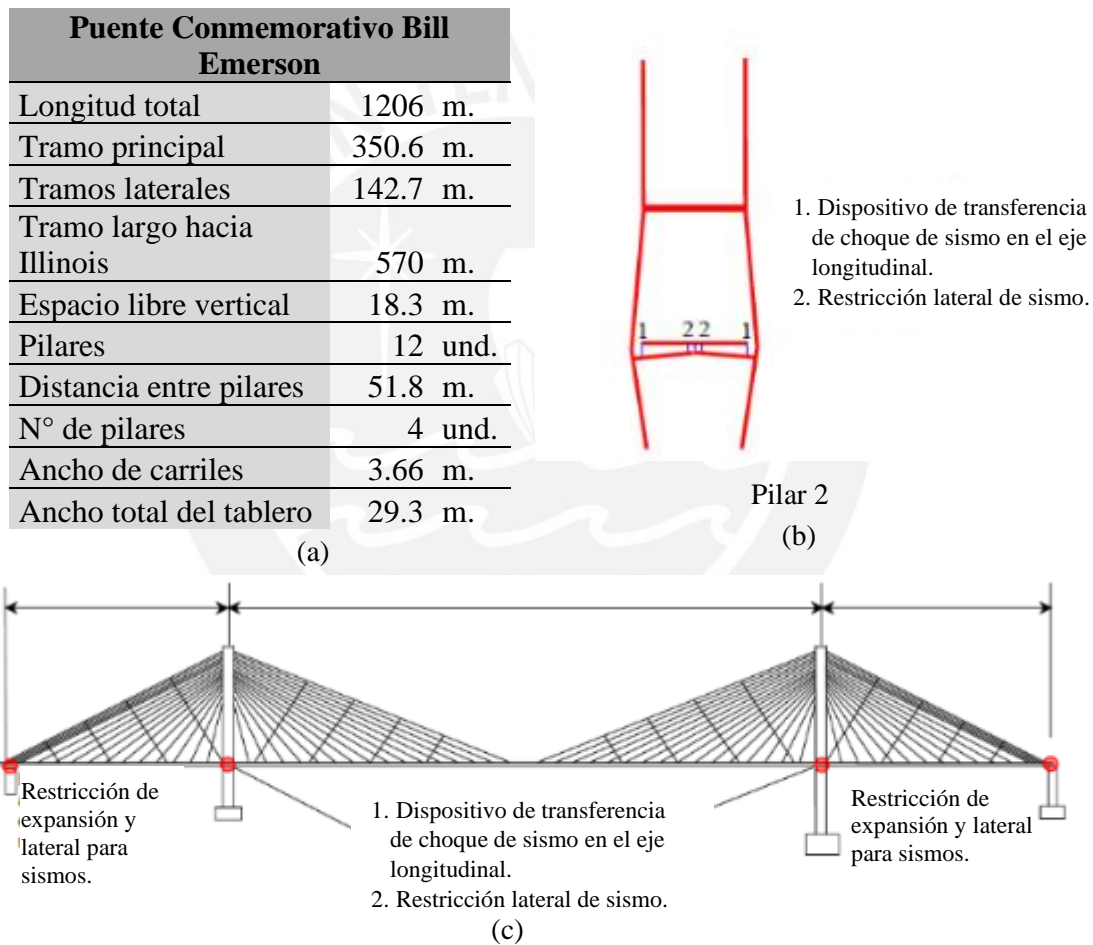


Figura 1.4. Características del puente instrumentado: (a) Dimensiones principales del puente; (b) corte transversal del pilar 2 con la ubicación de los dispositivos de control sísmico (Chen et al., 2007); y (c) corte longitudinal del tramo principal del puente con los dispositivos de control sísmico (Chen et al., 2007)

Para la instrumentación del puente en estudio se utilizó un sistema denominado ASPEN (Chen et al., 2007). Este sistema dividía la distribución de los equipos en tres categorías: la instrumentación

dentro de la estructura, la instalación de equipos en campo abierto y la instalación de instrumentos en las matrices de instrumentación de las fallas más cercanas a la estructura (Chen et al., 2007). En este caso, el puente en estudio fue instrumentado solo en dos de las categorías, en su superestructura y subestructura, y en campo libre en zonas cercanas al puente con un total de 43 estaciones y 84 canales de registro de aceleraciones. Las estaciones sísmicas consistían en acelerómetros *EpiSensor*, digitalizadores Q3030 y concentradores de datos con conexión *Wireless* incorporado.

En la tabla 1.5. se muestran las ubicaciones de los dispositivos de las estaciones B a la F instalados en el puente. Aquí se indica la estructura que monitorea, el lado del puente al que pertenece y el nivel de altura que tiene respecto al tablero del puente. Asimismo, los canales de medición de las estaciones se denominaron “HN2” para la componente transversal, “HN3” para la componente longitudinal y “HNZ” para la componente vertical.

Tabla 1. 5. Distribución de equipos de monitoreo sísmico en el puente de la estación “B” a “F”

Estación	Canales	Ubicación		
		Estructura	Lado del puente	Altura
B1	HN2 HN3 HNZ	Estribo	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
C1	HNZ	Tablero	Centro	Nivel de tablero
C2	HN2 HNZ	Tablero	Centro	Nivel de tablero
D1	HN2 HN3 HNZ	Pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
D2	HN2 HN3 HNZ	Pilar 3	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
D3	HN2 HN3 HNZ	Pilar 4	Este /lado derecho	Nivel de tablero
E1	HNZ	Tablero/Pilar 10	Este /lado derecho	Nivel de tablero
E2	HN2 HNZ	Tablero/Pilar 10	Este /lado derecho	Nivel de tablero
E3	HN2 HN3 HNZ	Tablero/Pilar 15	Este /lado derecho	Nivel de tablero
F1	HN2 HN3 HNZ	Campo libre	Oeste /lado izquierdo	Superficie
F2	HN2 HN3 HNZ	Campo libre	Oeste /lado izquierdo	Enterrado
F3	HN2 HN3 HNZ	Campo libre	Oeste /lado izquierdo	Enterrado
F4	HN2 HN3 HNZ	Campo libre	Este /lado derecho	Superficie
F5	HN2 HN3 HNZ	Campo libre	Este /lado derecho	Enterrado
F6	HN2 HN3 HNZ	Campo libre	Este /lado derecho	Enterrado

Asimismo, en la tabla 1.6., se prosigue con la ubicación de las estaciones “L” y se concluye con las estaciones “T” ubicadas en los niveles más altos de las torres.

Tabla 1. 6. Distribución de equipos de monitoreo sísmico en el puente de la estación “L” a “T”

Estación	Canales	Ubicación		
		Estructura	Lado del puente	Altura
L1	HNZ	Tablero a 35.75 m del estribo 1	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
L2	HN2 HNZ	Tablero a 35.75 m del estribo 1	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
L3	HNZ	Tablero	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
L4	HN2 HNZ	Tablero	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
L5	HNZ	Tablero a 65.63 m. del pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
L6	HN2 HNZ	Tablero a 65.63 m. del pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
M1	HN3	Torre/pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel intermedio de la torre
M2	HN2 HN3	Torre/pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel intermedio de la torre
M3	HN3	Torre/pilar 3	Oeste /lado izquierdo	Nivel intermedio de la torre
M4	HN2 HN3	Torre/pilar 3	Oeste /lado izquierdo	Nivel intermedio de la torre
P1	HN3	Pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
P2	HN2 HN3	Pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel de tablero
P3	HN3	Pilar 3	Este /lado derecho	Nivel de tablero
P4	HN2 HN3	Pilar 3	Este /lado derecho	Nivel de tablero
P5	HNZ	Pilar 4	Este /lado derecho	Nivel de tablero
P6	HNZ HN3 HNZ	Pilar 4	Este /lado derecho	Nivel de tablero
P7	HNZ	Pilar 5	Este /lado derecho	Nivel de tablero
P8	HN2 HNZ	Pilar 5	Este /lado derecho	Nivel de tablero
R1	HNZ	Tablero a 65.63 del pilar 3	Este /lado derecho	Nivel de tablero
R2	HN2 HNZ	Tablero a 65.63 del pilar 3	Este /lado derecho	Nivel de tablero
R3	HNZ	Pilar 3	Este /lado derecho	Nivel de tablero
R4	HN2 HNZ	Pilar 3	Este /lado derecho	Nivel de tablero
R5	HNZ	Tablero a 107.25 m del pilar 4	Este /lado derecho	Nivel de tablero
R6	HN2 HNZ	Tablero a 107.25 m del pilar 4	Este /lado derecho	Nivel de tablero
T1	HN2 HN3 HNZ	Pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel más alto de la torre
T2	HN2 HN3 HNZ	Pilar 2	Oeste /lado izquierdo	Nivel más alto de la torre
T3	HN2 HN3 HNZ	Pilar 3	Este /lado derecho	Nivel más alto de la torre
T4	HN2 HN3 HNZ	Pilar 3	Este /lado derecho	Nivel más alto de la torre



Asimismo, en la figura 1.5. se observa un esquema de las ubicaciones de los dispositivos que se instalaron en el puente. En este caso, el tramo desde el estribo 1 al pilar 4, donde se distribuyen los cables tensores, es la zona más densa en instrumentos de monitoreo sísmico, contándose 32 estaciones sísmicas. Dicho tramo está dividido mediante una junta de expansión en sus dos extremos, las cuales también actúan como restricciones laterales. Por otro lado, en el tramo derecho a partir del pilar 4, solo se cuentan 5 estaciones sísmicas para su estudio y 6 estaciones sísmicas en campo abierto. De esta manera, el sistema de monitoreo en tiempo real inició la recolección de datos aproximadamente entre febrero a marzo de 2004 (Chen et al., 2007).

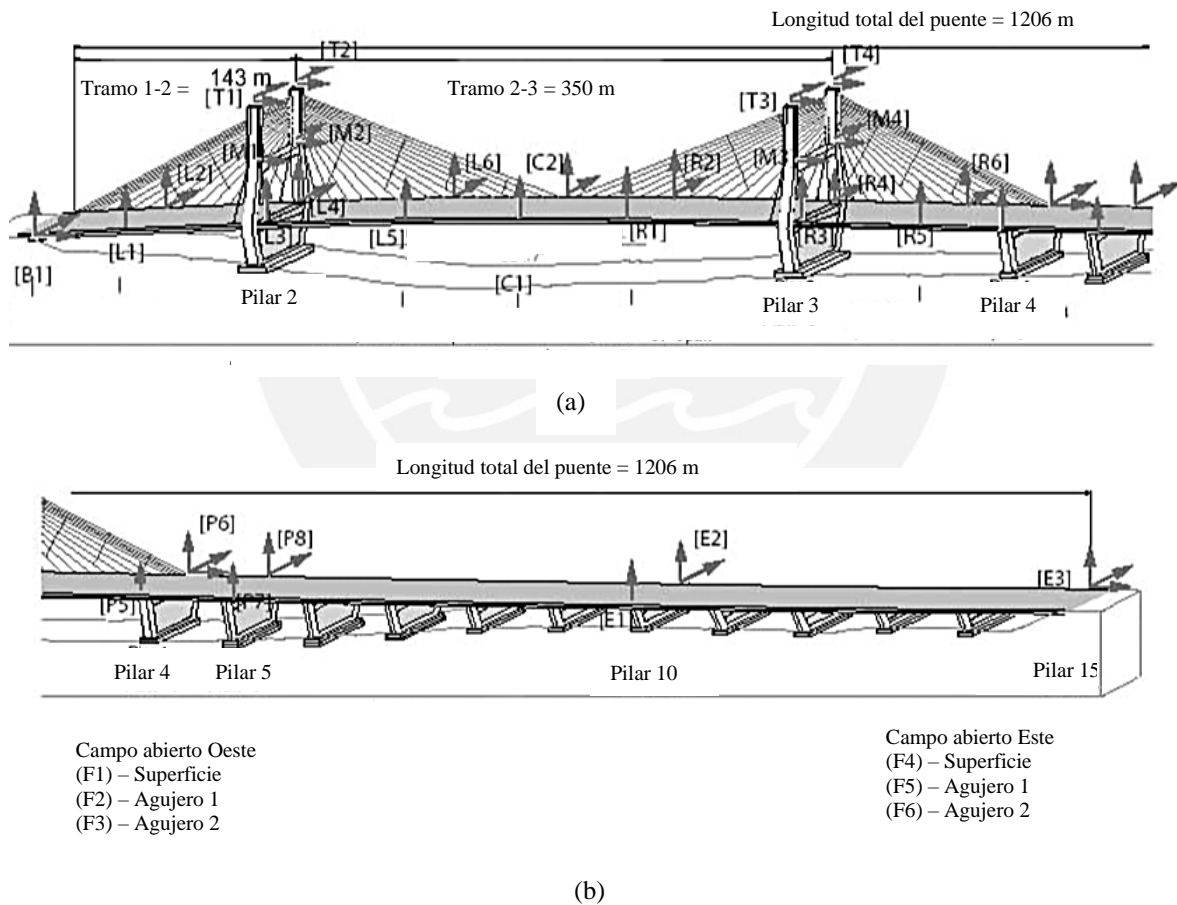


Figura 1. 5. Ubicación de las estaciones de monitoreo: (a) ubicación de estaciones en el tramo principal del puente; y (b) ubicación de estaciones en el tramo de aproximación (Chen et al., 2007)

En este trabajo de instrumentación se analizaron los datos registrados en dos eventos. El primero en seleccionarse fue el grupo de datos de dos minutos de lectura de vibración inducida por el tráfico

en el periodo de 19:20'40'' a 19:22'40'' del 25 de julio de 2006. Asimismo, el segundo grupo de datos en estudio pertenecieron a un evento sísmico ocurrido a las 12:37'32'' del 1 de mayo de 2005 con una magnitud en la escala de Richter de 4.1. El epicentro de este evento estuvo ubicado a 6.44 km de la ciudad de Manila, Arkansas y a 180 km del puente, y ocurrió a una profundidad de 10 km (Chen et al., 2007).

El análisis de la respuesta de la estructura (tablero y torres) se dividió de acuerdo a los tres ejes de lectura de los acelerómetros: vertical, transversal y longitudinal (Chen et al., 2007). Respecto al comportamiento en el eje vertical ante las vibraciones provocadas por el tráfico, las respuestas del tablero en la zona de las torres (canales L4 y R4) son bastante reducidas en comparación con las respuestas en otros lugares del puente principal debido al soporte vertical brindado por las torres (Chen et al., 2007). En el caso del evento sísmico se dio una respuesta similar, siendo las estaciones L3 y R3 que se encuentran en el tablero cerca a los soportes, donde se tienen las menores respuestas. Así también, según el cálculo de la respuesta, las vibraciones transversales y longitudinales provocadas por el tráfico son aún más débiles que las verticales (Chen et al., 2007). Asimismo, para las respuestas a las vibraciones transversales provocadas por el evento sísmico se tuvieron lecturas similares a las verticales. Finalmente, la respuesta longitudinal provocada por el movimiento sísmico generó mayores aceleraciones en la columna sur tanto a media altura como en la parte más alta de la torre del pilar 2.

Para el análisis y diseño del puente se elaboró un modelo de la estructura en elementos finitos. Esto debido a la complejidad de la interacción entre sus componentes estructurales y a la variedad de materiales que lo componen (Chen et al., 2007). Dicho modelo permitió verificar los modos de vibrar que presenta la estructura hasta un porcentaje de masa de participación del 70% en las tres

direcciones de estudio (longitudinal, transversal y vertical), el cálculo de sus frecuencias naturales y la respuesta bajo cargas dinámicas (Chen et al., 2007). Es preciso mencionar que dicho modelo fue calibrado para que las frecuencias naturales de los primeros modos sean similares a las frecuencias obtenidas en las respuestas medidas. Asimismo, en la publicación se sustenta que dicha modificación representa la incertidumbre de la densidad y la geometría del material y los efectos de componentes no estructurales como arriostramientos o barandas. En la tabla 1.7. se comprueba que efectivamente se tuvieron valores cercanos en las frecuencias y se calcula el porcentaje de error.

Tabla 1. 7. Comparación entre las frecuencias leídas y las obtenidas mediante el modelo y el porcentaje de error.

N°	Modo	Frecuencias del Modelo de elementos finitos	Frecuencias de respuestas medidas	Error (%)	N°	Modo	Frecuencias del Modelo de elementos finitos	Frecuencias de respuestas medidas	Error (%)
1	1	0.339	0.338	0.30	11	115	1.237	1.338	-7.55
2	2	0.400	0.438	-8.57	12	181	1.651	1.725	-4.29
3	3	0.484	0.500	-3.20	13	303	2.167	2.038	6.33
4	5	0.602	0.588	2.47	14	366	2.303	2.338	-1.50
5	6	0.625	0.650	-3.85	15	568	3.187	3.263	-2.33
6	8	0.689	0.713	-3.30	16	1751	7.870	7.625	3.21
7	9	0.740	0.775	-4.52	17	1961	8.834	8.775	0.67
8	10	0.828	0.825	0.36	18	2277	10.760	10.850	-0.80
9	12	0.853	0.850	0.35	19	2528	12.860	12.010	7.05
10	96	1.182	1.075	9.95					

Del mismo modo, en la figura 1.6. a), se observa el comportamiento de la curva que relaciona el número de modo de vibrar de la estructura y su correspondiente valor de frecuencia natural. En este caso se verifica que para notar elevaciones considerables de la frecuencia se analizaron modos del orden de 1000 a 4000, notándose un cierto comportamiento logarítmico. Asimismo, en la figura 1.6. b), se muestra el modelo de diseño del puente completo usado para el cálculo estructural previo a su construcción.

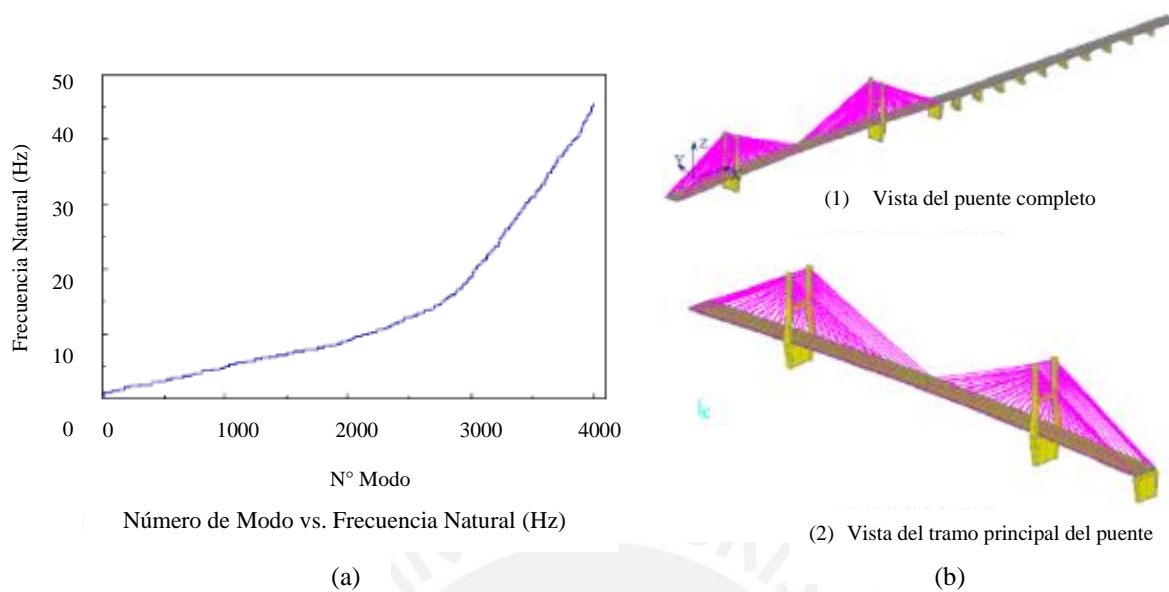


Figura 1. 6. Análisis del modelo de elementos finitos del puente: (a) gráfico que muestra la relación entre el número de modos respecto a cada frecuencia natural; y (b) vista del modelo 3D del puente (Chen et al., 2007)

Finalmente, de los cálculos realizados mediante el modelo 3-D y las lecturas obtenidas por los instrumentos se llegaron a las siguientes observaciones. En primer lugar, de acuerdo a los modos de vibrar y las frecuencias de la estructura, se observó un incremento en la flexibilidad del puente en la dirección vertical y una baja flexibilidad en la dirección longitudinal (Chen et al., 2007). Asimismo, de los 31 modos de vibración más representativos se alcanzó un porcentaje mayor al 70% de masa de participación en los movimientos de traslación y rotación en las tres direcciones de estudio. Asimismo, se definió la frecuencia fundamental equivalente a 0.339 Hz correspondiente a la vibración vertical del puente principal. Así también, en el caso de los cables se verificó una amplificación en la vibración para frecuencias de 0.842 Hz. o mayores y en el tramo de ingreso a Illinois se experimentaron mayores vibraciones en frecuencias cercanas a 3.187 Hz (Chen et al., 2007).

## 1.2. Motivación

Dadas las condiciones propias de la ubicación de nuestro país, el desarrollo de conocimiento y nueva tecnología en temas referentes a la detección temprana de daño estructural son de vital importancia. La instrumentación para el monitoreo sísmico de edificios surge como una alternativa actual para el desarrollo de evaluaciones cuantitativas de las acciones aplicadas por los movimientos sísmicos a las estructuras y de su respuesta ante estas (Murià Vila D. , 2007). Actualmente, en el Perú se tienen pocos edificios instrumentados y los reportes generados de sus comportamientos no están a libre disposición de la comunidad. Esto sumado al poco conocimiento de este tipo de tecnología por parte de la población, generan una falta de implementación real de estos sistemas a pesar que están incluidos en la norma vigente de diseño sismorresistente de edificaciones modernas. la normativa sobre monitoreo sísmico de edificios incluida en la actual norma técnica peruana de diseño sismorresistente (E-030, 2018).

La falta de una base de datos de registros de eventos sísmicos en el Perú y la aún menor cantidad de registros de la respuesta de estructuras instrumentadas, genera dificultades en el desarrollo de la normativa de diseño sismorresistente peruana. Estas dificultades pueden ser resumidas en: a) aspectos de la instrumentación de edificios que la norma no contempla y que no será obedecida por la población; b) falta de métodos de verificación en la búsqueda de la mitigación del riesgo sísmico mediante los parámetros de la norma; y c) poco desarrollo de nuevas tecnologías referentes a la medición no invasiva de daño estructural y su regulación. Con el desarrollo de la instrumentación para el monitoreo sísmico de edificios en el Perú, se logrará nuevos niveles de conocimiento respecto a la respuesta de nuestras estructuras ante nuestros eventos sísmicos, siendo esta la parte central de esta tesis.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es analizar el estado del conocimiento sobre la instrumentación para el monitoreo de edificios, y proponer una herramienta para la generación de reportes automáticos de la respuesta estructural durante eventos sísmicos.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar las principales características de los instrumentos actualmente usados para el monitoreo sísmico de edificios.
- Estudiar el cálculo aproximado de la respuesta dinámica de modelos estructurales para el desarrollo de espectros de respuesta lineales.
- Recopilar las principales normas y guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios.
- Desarrollar una herramienta para la generación automática de reportes sísmicos con información de las características lineales del evento, así como la evolución de aceleraciones en el tiempo.

## **1.4. Metodología**

La presente tesis está organizada en seis capítulos, los cuales abarcan desde el estado del arte requerido para abordar los conceptos de instrumentación sísmica y métodos numéricos para la obtención de espectros de respuesta, hasta la revisión de normativa y guías relacionadas a la instrumentación sísmica. Finalmente, presentando un programa desarrollado en *LabView* para el reporte de eventos sísmicos y las respectivas conclusiones a las que se llegaron producto del presente trabajo. El contenido detallado de esta tesis está presentado a continuación.

Capítulo 1, el presente capítulo, muestra la introducción de este trabajo incluyendo los antecedentes de proyectos de instrumentación de estructuras representativos, seguido por la motivación, así como los objetivos de esta tesis.

Capítulo 2, muestra tanto la información acerca de los dispositivos utilizados para la instrumentación de edificios, así como los métodos numéricos más usados para el cálculo de la respuesta ante excitaciones sísmicas.

Capítulo 3, está dedicado a la recopilación de normas y guías internacionales relacionadas a la instrumentación sísmica de edificios. Así también, durante este capítulo se desarrollan comparaciones entre la diferente normativa existente en distintos países respecto a instrumentación para monitoreo sísmico de edificios.

Capítulo 4, presenta la programación en *LabVIEW* de un sistema para la generación de acelerogramas totales y filtrados, así como la construcción de los espectros de respuesta lineales y su posterior reporte en un archivo de Microsoft Word.

Capítulo 5, presenta las conclusiones a las que se llegó luego de la revisión y comparación de la información, con lo cual se logrará plasmar el aporte final de este trabajo.

## Capítulo 2. Marco teórico

### Resumen

En este capítulo se presentará información relacionada a los equipamientos usados para trabajos de monitoreo sísmico en estructuras civiles. El capítulo inicia con una breve reseña de los conceptos básicos de procesamientos de señales, donde se presentan definiciones de las señales y sistemas, así como los tipos de filtros más usados para limpiar señales sísmicas de frecuencias no deseadas. Luego, se abordan los conceptos de los dispositivos de medición de aceleraciones de sismo, tales como estaciones sísmicas y acelerómetros. Posteriormente, se desarrollarán los métodos numéricos usados para el cálculo de la respuesta de las estructuras ante la acción de una fuerza sísmica. Para finalmente, dar paso a los conceptos de espectro de respuesta lineal, donde se desarrolla el ordenamiento de los valores máximos de respuesta de diferentes estructuras caracterizadas por sus periodos fundamentales para su análisis.



## 2.1. Introducción

La tierra es un sistema dinámico, donde las placas tectónicas contenidas en la corteza terrestre interactúan provocando terremotos y volcanes (Jiménez, 2007). Los terremotos consisten en el movimiento de la superficie terrestre debido a la propagación de las ondas sísmicas. Estas ondas pueden ser de varios tipos, siendo las principales ondas de volumen: a) Las ondas longitudinales de compresión, denominadas ondas P o primarias; y b) las ondas transversales de cizalla, denominadas ondas S o secundarias (Jiménez, 2007). La presencia de estas ondas es detectada en forma de señales sísmicas variantes en el tiempo por los sensores de vibración (Jiménez, 2007).

Los sensores de vibración pueden ser esquematizados como un oscilador de un grado de libertad que mide la velocidad o la aceleración de una superficie con respecto a un sistema de referencia inercial. Estos generan pulsaciones eléctricas proporcionales a la velocidad de la masa con respecto a la cobertura del sensor (para los sismómetros) o la deformación de los elementos elásticos del sensor (para los acelerómetros) (P. Gavin, 2018).

La forma en la que una determinada estructura vibra producto de un movimiento sísmico sin generarse ningún tipo de daño en esta, es denominada respuesta lineal de la estructura. Esta es calculada mediante métodos numéricos que aproximan sus resultados a la respuesta teórica de la ecuación de equilibrio dinámico. Asimismo, una vez calculada la respuesta, es necesario el cálculo de los valores máximos de respuesta, con el objeto de generar los espectros de respuesta lineales para desarrollar análisis del comportamiento de la estructura. Asimismo, su cálculo permite la actualización del espectro de diseño usado para el diseño estructural de los edificios de cada país en específico.

## **2.2. Conceptos básicos de procesamiento de señales**

### **2.2.1. Señales y sistemas**

Las señales se definen como toda magnitud física que puede ser representada por funciones matemáticas de una o más variables, dependiendo de la información que contenga (Moya, 2011). Desde las vibraciones provocadas por movimientos sísmicos, hasta una imagen fotográfica, las señales pueden ser de muchos tipos y variar a través del tiempo, el espacio o cualquier otra variable o variables independientes. La mayor parte de las señales encontradas en la naturaleza son del tipo analógico caracterizadas por tomar valores continuos. Asimismo, con el avance de la tecnología se generaron señales del tipo digital que, a diferencia de las señales analógicas, toman valores discretos en un conjunto finito de valores facilitando su procesamiento (Moya, 2011). Esto llevó a la creación de sistemas de conversión de señales analógicas a digitales para que se pudiera procesar dichas señales con mayor facilidad.

Por otro lado, un sistema es un conjunto interconectado de dispositivos físicos o algoritmos que realizan operaciones sobre la señal (Jiménez, 2007). Entre las tareas u operaciones de los sistemas se encuentra en primera instancia el procesamiento, donde los tipos de datos de entrada y salida se mantienen; y el análisis, donde estos cambian de entrada a salida (G. Proakis & G. Manolakis, 2007).

Para realizar el procesamiento digital de una señal analógica se requiere que esta haya sido previamente convertida en una señal discreta. Las señales analógicas pueden ser convertidas en digitales mediante un sistema de muestreo (convertidor A/D) en instantes discretos de tiempo seguido de un proceso de aproximación denominado cuantificación y finalmente pasar por una

codificación de la señal en valores binarios (G. Proakis & G. Manolakis, 2007). En la figura 2.1. se puede observar un esquema del sistema de conversión analógico – digital (A/D).

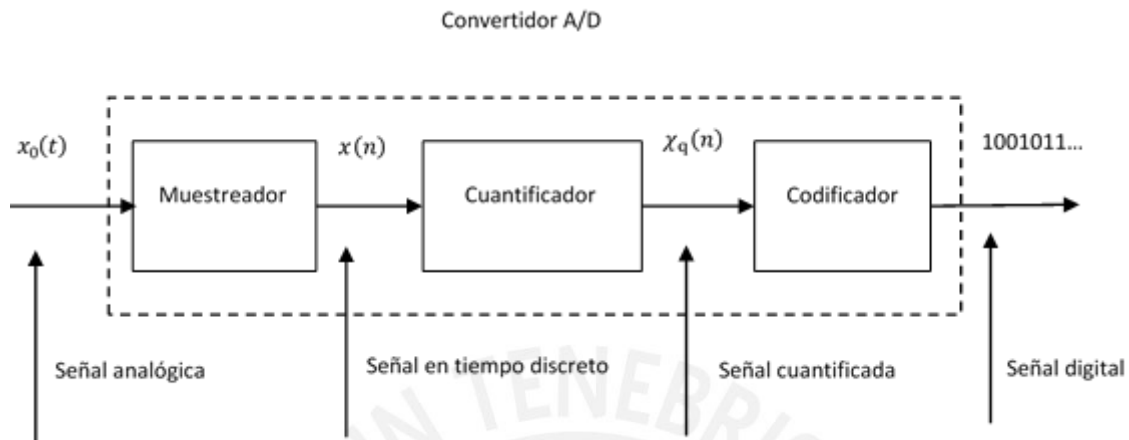


Figura 2. 1. Esquema del sistema de conversión analógico – digital (A/D) (adaptado de G. Proakis & G. Manolakis, 2007)

### 2.2.2. Filtros

Los filtros son sistemas usados para eliminar, atenuar o amplificar bandas de frecuencia en una señal (Alvarado, 2006). Previo a su uso, se requiere verificar el contenido frecuencial de la señal sísmica, por lo que mediante la transformada de Fourier se pasa la señal del dominio del tiempo al de la frecuencia (G. Proakis & G. Manolakis, 2007). Una vez en el dominio de la frecuencia es posible diferenciar los componentes frecuenciales presentes en la señal y escoger el tipo de filtro adecuado para eliminar anchos de frecuencias relacionadas al ruido ambiental u otras perturbaciones no deseadas de la señal (Alvarado, 2006).

Según las distintas aplicaciones de los filtros, estos pueden ser clasificados en pasa baja, pasa alta, pasa banda o elimina banda (W. Smith, 2002). En la figura 2.2., se muestra un espectro de amplitudes ideal afectada por estos cuatro tipos de filtros. En el caso de los filtros pasa baja y pasa alta se tiene sólo una frecuencia de corte y en los dos restantes se requiere de dos frecuencias de corte respecto a las cuales se pueden diferenciar las zonas de paso (sombreadas) y las zonas de

frecuencias bloqueadas (W. Smith, 2002). Para el caso de señales sísmicas, el rango de frecuencia del ruido sísmico está comprendido aproximadamente entre 0.1 Hz. a 1 Hz, por lo que los filtros son de uso extensivo al momento de procesar registros sísmicos.

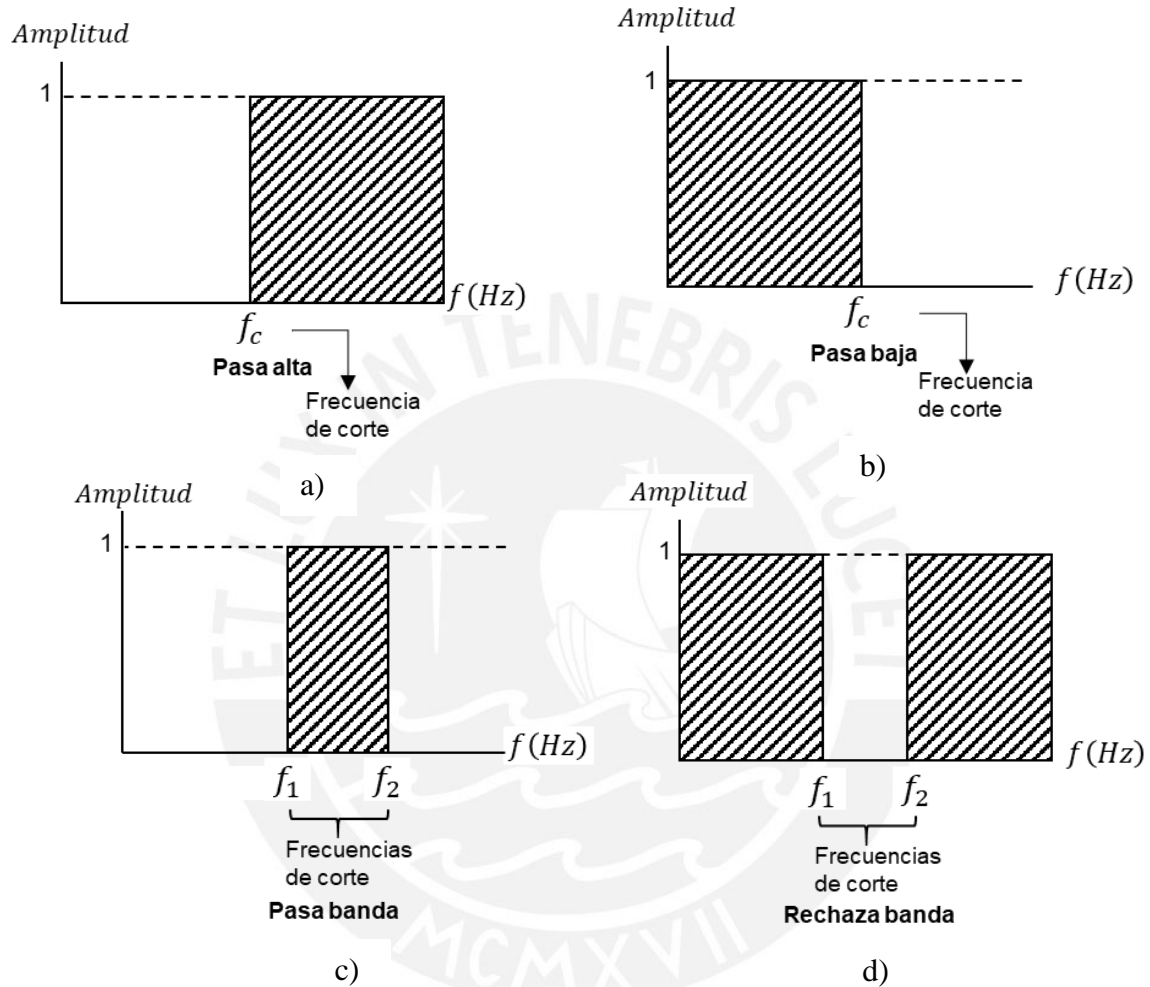


Figura 2. 2. Tipos de filtros ideales (adaptado de W. Smith, 2002): a) Filtro pasa alta; b) filtro pasa baja; c) filtro pasa banda; y d) filtro rechaza banda

Los filtros poseen una pendiente de caída que obedece al grado de aceptación o de rechazo de frecuencias por arriba o por debajo de la respectiva frecuencia de corte denominado “orden” (G. Proakis & G. Manolakis, 2007). El orden equivale a una caída de  $20n$  dB/década, siendo la década el intervalo entre dos valores de frecuencia de  $10^n$  rad/s en la escala logarítmica. Asimismo, los órdenes toman valores enteros desde  $n=1$  en adelante, y van desde una caída suave hasta una caída vertical y pronunciada para los órdenes de  $n=4$  en adelante (G. Proakis & G. Manolakis, 2007). En

la figura 2.3. se observa un filtro del tipo Butterworth pasa baja con órdenes  $n=1, 2, 3$  y  $5$ . En este caso se observa que, a mayor orden, la caída es más abrupta y se evita el pase de más frecuencias mayores pero cercanas a la frecuencia de corte.

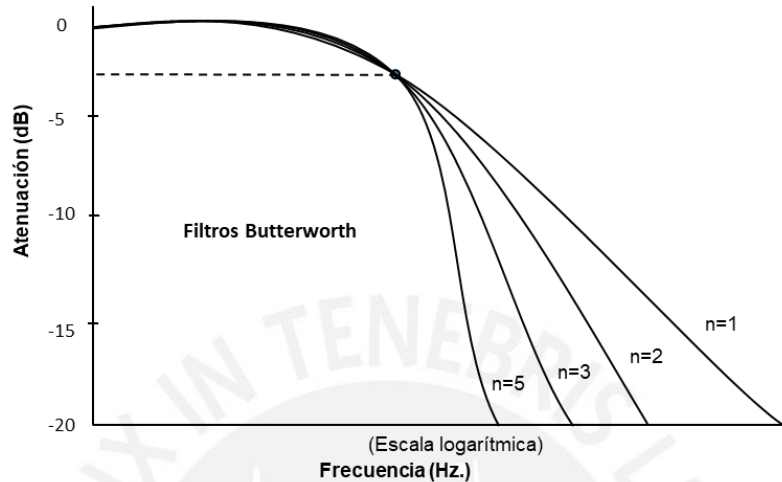


Figura 2. 3. Filtro Butterworth pasa-baja de orden  $n=1, 2, 3$  y  $5$  (adaptado de G. Proakis & G. Manolakis, 2007)

Es importante mencionar que el filtro de mayor uso en sismología es el de Butterworth, ya que posee una pequeña banda de transición y no presenta ondulaciones o “ripple” en la banda de paso (Ellis, 2012). Este se caracteriza por producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte. Es decir, la señal de salida se mantiene constante hasta los valores cercanos a la frecuencia de corte, luego disminuye dependiendo del orden del filtro (Ellis, 2012).

### 2.3. Equipos para instrumentación sísmica

La señal sísmica se produce por la reacción de dos placas tectónicas en su constante interacción debido a la ruptura en una fuente sismogénica (Jiménez, 2007). Esta señal está conformada por parámetros de estudio importantes tales como el contenido frecuencial y la variación de la aceleración del suelo durante el tiempo de ocurrencia del evento sísmico (Kayal, 2008). Para la medición de estos parámetros se utilizan equipos tales como acelerómetros (P. Gavin, 2018),

sismómetros (P. Gavin, 2018) ,entre otros; y se habilitan estaciones de monitoreo sísmico donde se registran lecturas continuas de diferentes características de los sismos durante su ocurrencia.

### 2.3.1. Acelerómetros

Los acelerómetros son sensores de movimiento utilizados para la medición de magnitudes físicas, en este caso específicamente aceleraciones (Santalucia & Montero, 2016). Estos dispositivos funcionan como transductores que convierten la energía de vibración en pulsaciones eléctricas, y en lo que respecta a la ingeniería civil, son los dispositivos más usados por su bajo costo y alta sensibilidad de medición (Villaluenga, 2015). La estructura básica de un acelerómetro se muestra en la figura 2.4., donde se presenta un sistema de un grado de libertad con una masa interna que reacciona al movimiento generado por la fuerza sísmica en un eje determinado y en forma proporcional a la amplitud de la señal de aceleración de la masa en movimiento. En el caso de idealizar al dispositivo, este debería tener una relación lineal entre la señal de entrada y de salida (Villaluenga, 2015).

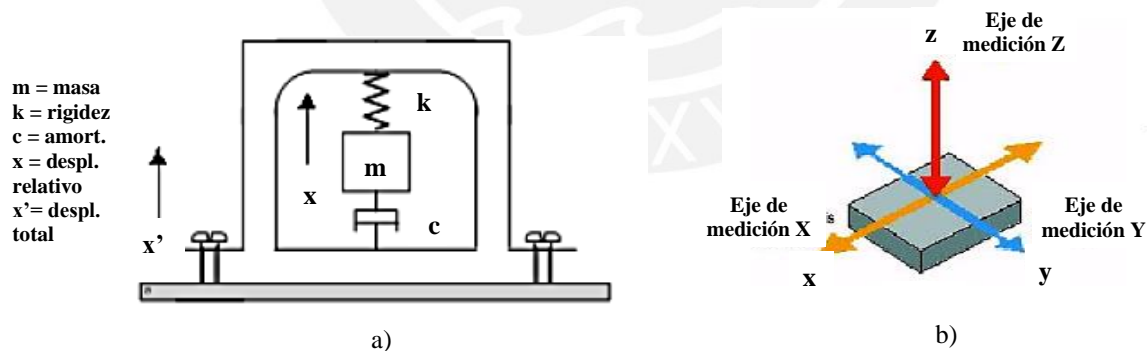
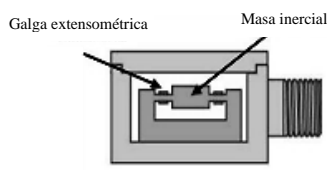
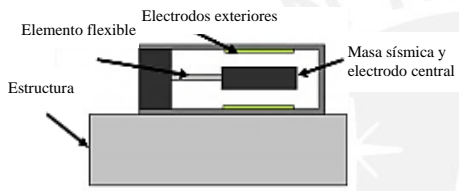
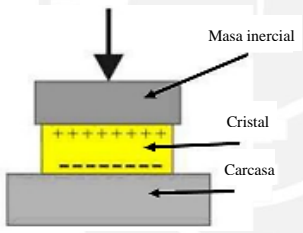
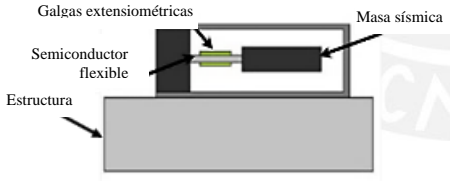
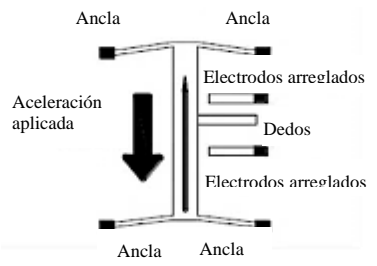


Figura 2. 4. Modelo interno de un acelerómetro: a) Sistema masa-resorte-amortiguador; y b) acelerómetro de tres ejes

Existen diferentes tipos de acelerómetros para diferentes áreas de uso, siendo el acelerómetro piezoeléctrico el más usado para el monitoreo sísmico debido a que la propia estructura de este dispositivo le permite medir directamente la corriente obtenida y luego hallar la aceleración

(Villaluenga, 2015). Como se observa en la tabla 2.1. cada tipo de acelerómetro presenta sus propias características, siendo alguno de ellos más ventajosos para el monitoreo sísmico de estructuras y otros usados en otras áreas.

Tabla 2. 1. Tipos de acelerómetros: Características, ventajas y desventajas

Tipo	Estructura	Características	Ancho de banda (Hz.)	Ventajas e inconvenientes
Mecánico	 <p>Galga extensométrica Masa inercial</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta precisión a bajas frecuencias.</li> <li>-Mide aceleración estática.</li> <li>-Tamaño mediano.</li> </ul>	0-1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitados a bajas frecuencias.</li> <li>- Muy precisos.</li> <li>- Coste medio-alto.</li> <li>- Buena linealidad.</li> <li>- Buena resolución.</li> </ul>
Capacitivo	 <p>Elemento flexible Electrodos exteriores Masa sísmica y electrodo central Estructura</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mide aceleración estática.</li> <li>-Compatibilidad con estándares de circuitos integrados.</li> <li>-Medición sísmica.</li> </ul>	0-2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo en ruido.</li> <li>- Baja potencia.</li> <li>- Bajo coste.</li> <li>- Buena resolución.</li> <li>- Buena linealidad.</li> <li>- Buena precisión.</li> <li>- Tamaño pequeño.</li> </ul>
Piezoeléctrico	 <p>Masa inercial Cristal Carcasa</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Amplio rango dinámico.</li> <li>-No habilitados para medir aceleración estática.</li> <li>-Tamaño relativamente grande.</li> <li>-Medición sísmica.</li> </ul>	10-20000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilidad media.</li> <li>- Soporta bajas temperaturas.</li> <li>- Mala linealidad.</li> <li>- Buena precisión.</li> <li>- Buena resolución.</li> <li>- Costo medio.</li> <li>- Tamaño grande.</li> </ul>
Piezo-resistivo	 <p>Galgas extensométricas Semiconductor flexible Masa sísmica Estructura</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Habilitados para medir aceleración estática.</li> </ul>	0-10000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tamaño pequeño.</li> <li>- Buena linealidad.</li> <li>- Buena resolución.</li> <li>- Buena precisión.</li> <li>- Bajo costo.</li> <li>- Respuesta en continua y alterna.</li> </ul>
MEMS	 <p>Ancla Ancla Electrodos arreslados Dedos Electrodos arreslados Ancla Ancla Aceleración aplicada</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Habilitados para medir aceleración estática.</li> <li>-Compatibilidad con los estándares de circuitos integrados.</li> </ul>	0.1-1500	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta sensibilidad.</li> <li>- Buena linealidad.</li> <li>- Buena resolución.</li> <li>- Costo medio.</li> <li>- Soporta bajas temperaturas.</li> </ul>

### 2.3.2. Estaciones sísmicas






Se denominan estaciones sísmicas al instrumento o conjunto de instrumentos instalados en un área definida y protegida, que permiten realizar mediciones de eventos sísmicos para su estudio y caracterización (Montalvo & Gómez, 2006). En el mercado internacional se puede encontrar diferentes tipos de dispositivos para su implementación. En la tabla 2.2., se observan las características físicas y de sistema de cuatro dispositivos de monitoreo sísmico. Así también, se indica información sobre sus frecuencias de muestreo disponibles, la sensibilidad de cada dispositivo, los tipos de fuente de energía que usan y otros parámetros que permiten decidir en qué contexto y para qué tipos de proyecto de monitoreo sísmico serán usados. Los dispositivos mostrados poseen sensores del tipo triaxial con un sistema de balance de fuerzas para la obtención de las aceleraciones del suelo. En lo referente al rango de lectura de las aceleraciones todos los dispositivos poseen un máximo de lectura de (+/-) 4G (1G corresponde a  $9.81 \text{ m/s}^2$ ), siendo este un límite que representa una fuerza sísmica muy alta, ya que los valores máximos para un sismo de una intensidad severa podrían llegar a no más de 0.65G (Villaluenga, 2015).

Todos los dispositivos mencionados generan datos digitales, por lo que poseen un circuito conversor analógico-digital del tipo Sigma-Delta ( $\Delta\Sigma$ ). Este tipo de modulación es implementada en un tiempo discreto y es de bajo costo, por lo que actualmente es usado en la fabricación de circuitos integrados digitales (Quintáns, 2008). Para la comunicación cuentan con diferentes protocolos de red para enviar los datos de las aceleraciones en tiempo real a los servidores. Entre estos protocolos tenemos a Ethernet, la cual es una red de área local con cableado de nivel físico (Castillo, 2005). Así también, estos utilizan el protocolo de “*SeedLink*” que permite enviar la información a través de Internet o en un circuito privado con el soporte de TCP/IP (Protocolo de



control de transmisión/Protocolo de Internet), el cual representa todas las reglas de comunicación para Internet y se basa en la idea de dar una dirección IP a cada equipo de la red para poder enrutar paquetes de datos (Castillo, 2005). El algoritmo de activación se mantiene operando continuamente realizando lecturas de aceleraciones, pero sólo al superarse la magnitud mínima determinada para un evento sísmico, se activa el instrumento y comienza a guardar las aceleraciones. Uno de estos algoritmos es el disparador a corto y largo plazo o por sus siglas en inglés STA/LTA. Este algoritmo calcula continuamente el promedio de valores de la amplitud absoluta de una señal sísmica en dos ventanas consecutivas (Trnkoczy, 2009).

Tabla 2. 2. Cuadro comparativo de estaciones sísmicas para el registro de movimientos sísmicos

		CUSP-3X	Güralp 5TDE	REF TEK 130 - SMHR	KINEMATRICS Obsidian	KINEMATRICS ETNA 2
						
CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES	Tipo de Sensor:	Acelerómetros triaxiales de silicio MEMS	Acelerómetro ortogonal triaxial (equilibrio de fuerza)	Balance de fuerzas (interno)	Balance de fuerzas acelerómetro triaxial EpiSensor	Balance de fuerzas acelerómetro triaxial EpiSensor
	Rango de escala:	(±) 4G	± 2g estándar, ± 4 g, ± 1 g, ± 0.5 g y ± 0.1 g	(±) 4G	Uso seleccionable de ±2g o ±4g	Uso seleccionable de ±1g, ±2g o ±4g
RENDIMIENTO DEL DIGITADOR	Tipo de Digitador:	16 bit S-A A/D	Modulación Sigma-Delta, 24 bits	Modulación Sigma-Delta, resolución de 24 bits	Convertidor Sigma-Delta individual por canal, 24 bits	3 canales de sensor de 24 bits
	Frecuencia de Muestreo	1 a 400Hz	1 a 1000 Hz.	1 a 1000 Hz.	1 a 5000 Hz.	1 a 500 Hz.
CONEXIÓN	Protocolos	10-BaseT Ethernet TCP/IP, SEEDlink	Scream! (GCF); SEEDlink; CD1.1; GDI-link	10-BaseT Ethernet TCP/IP, UDP/IP, FTP, RTP	Datos en tiempo real via DFS, SEEDLink, Earthworm, Antelope	Datos en tiempo real via Antelope, SEEDLink, Earthworm
FUENTE DE PODER	Suministro de voltaje	10.5 - 18 V (DC)	11 - 30 V (DC)	De 10 - 16 V (DC)	9 – 28 V (DC)	9 – 28 V (DC)
	Consumo de energía	3.6 W, 4.2W máximo	3.2 W	3 W	3 W	3 W
MODO DE ACTIVACIÓN	Modo de activación	Detección de nivel absoluto STA / LTA <AND> o <OR>	STA / LTA, nivel, por canal y votación en la red.	Continua, Evento (STA/LTA), Externa, Nivel, Hora, Lista de horas	Red de disparo con combinación aritmética, STA/LTA, Ventana de tiempo	Red de disparo con combinación aritmética, STA/LTA, Ventana de tiempo

## 2.4. Evaluación numérica de la respuesta dinámica de sistemas estructurales

Para el estudio del comportamiento lineal de edificios debido a la acción de una fuerza sísmica, es común modelarlos como osciladores de un grado de libertad (Chopra, 2014). El motivo es que estos permiten asumir una masa ( $m$ ) concentrada en la parte alta del edificio con una determinada rigidez ( $k$ ), con lo cual se puede calcular el periodo fundamental del primer modo de vibración de la estructura de forma simplificada. Asimismo, se define un valor de amortiguamiento ( $c$ ) determinado por el tipo de material con el cual está constituida la estructura y el valor de amortiguamiento crítico ( $c_c$ ) (Chopra, 2014). El cociente de estos dos valores da lugar al valor adimensional conocido como fracción de amortiguamiento crítico “ $\xi$ ”, el cual será, junto a los anteriores parámetros, valores de entrada para el cálculo de la respuesta dinámica (Chopra, 2014). A continuación, en la figura 2.5. se presenta el modelo de un grado de libertad con amortiguamiento y rigidez constante.

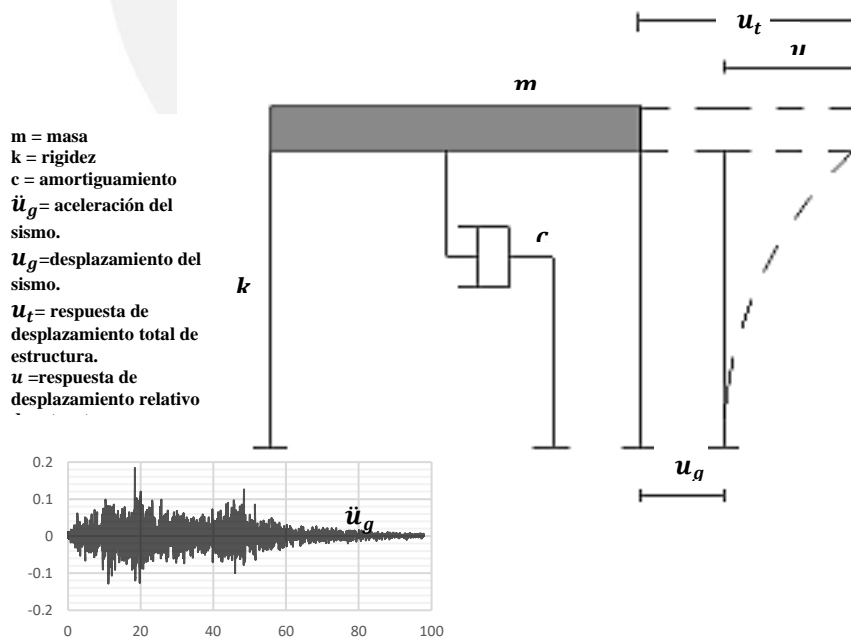


Figura 2. 5. Modelo de un grado de libertad (1 GDL) (adaptado de Chopra, 2014)

Otro valor de entrada que debe estar definido para el cálculo de la respuesta dinámica es la señal sísmica. En este caso, los acelerómetros toman lecturas discretas de la señal con una frecuencia de muestreo determinada “*a priori*” que puede variar según los requerimientos del usuario y definirá un intervalo de tiempo ( $\Delta_t$ ) entre muestras que deberá ser constante (Chopra, Dinámica de estructuras, 2014). Los valores de aceleración se distribuyen en función de la frecuencia de muestreo a lo largo de una línea de tiempo formando el acelerograma del sismo (Chopra, Dinámica de estructuras, 2014). Estos pueden estar en función del valor de la gravedad (g) o en unidades típicas de aceleración como m/s<sup>2</sup> o cm/s<sup>2</sup>. En la figura 2.6. se muestra el acelerograma del sismo ocurrido el 3 de octubre de 1974 en la Ciudad de Lima y registrado por la Estación del Parque de la Reserva; en adelante denominado “sismo de 1974”<sup>1</sup>.

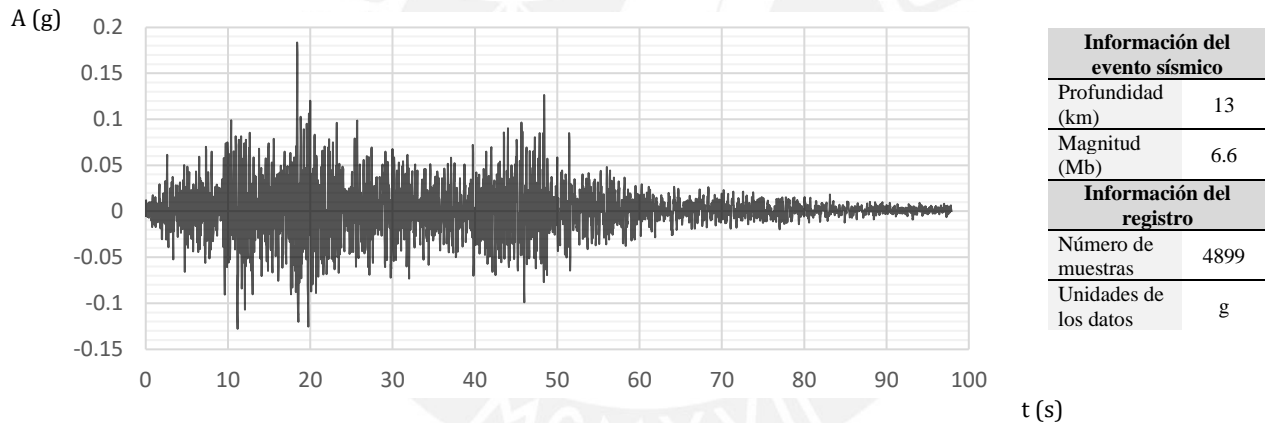


Figura 2. 6. Acelerograma (eje de lectura norte-sur) del sismo de 1974

### 2.4.1. Métodos paso a paso en el tiempo

Los métodos paso a paso permiten trabajar con los valores discretos de las lecturas de un acelerograma y calcular la respuesta dinámica de forma directa usando la ecuación de movimiento. Existen diferentes métodos que constan de fórmulas en función del periodo fundamental, la

<sup>1</sup> Evento sísmico registrado el 3 de octubre de 1974 en la estación denominada “Parque de la Reserva”, ubicada en el distrito de Cercado de Lima, provincia de Lima, región Lima. El dispositivo de medición fue un acelerógrafo analógico con una frecuencia de muestreo de 50 Hz. Las máximas aceleraciones registradas fueron: -194.21 cm/s<sup>2</sup> [dirección este-oeste], 180.09 cm/s<sup>2</sup> [dirección norte-sur] y 100.30 cm/s<sup>2</sup> [dirección vertical].

fracción de amortiguamiento y el delta de tiempo obtenido en función de la frecuencia de muestreo con la que se registró el acelerograma (Chopra, 2014). Es así que, mediante estos datos se puede calcular la respuesta partiendo de un valor de respuesta inicial usualmente asumida en cero, prosiguiendo con el valor de respuesta de un instante siguiente “ $i + 1$ ”. De esta forma, se realizan los cálculos sucesivamente hasta llegar al último valor de aceleración leído, con lo cual se calcula la respuesta a la excitación sísmica en desplazamiento, velocidad y aceleración (Chopra, 2014).

En la figura 2.7. se observa un esquema del procedimiento estándar seguido para la aplicación de estos métodos numéricos. Es preciso indicar que dentro de la ecuación de movimiento se supone una masa constante ( $m$ ), un amortiguamiento viscoso lineal ( $c$ ) y la rigidez ( $k$ ) perteneciente a la fuerza restauradora de un sistema elástico lineal. Asimismo, algunos de estos pasos varían dentro de cada método dependiendo de la metodología con la cual han sido desarrolladas (Chopra, 2014).

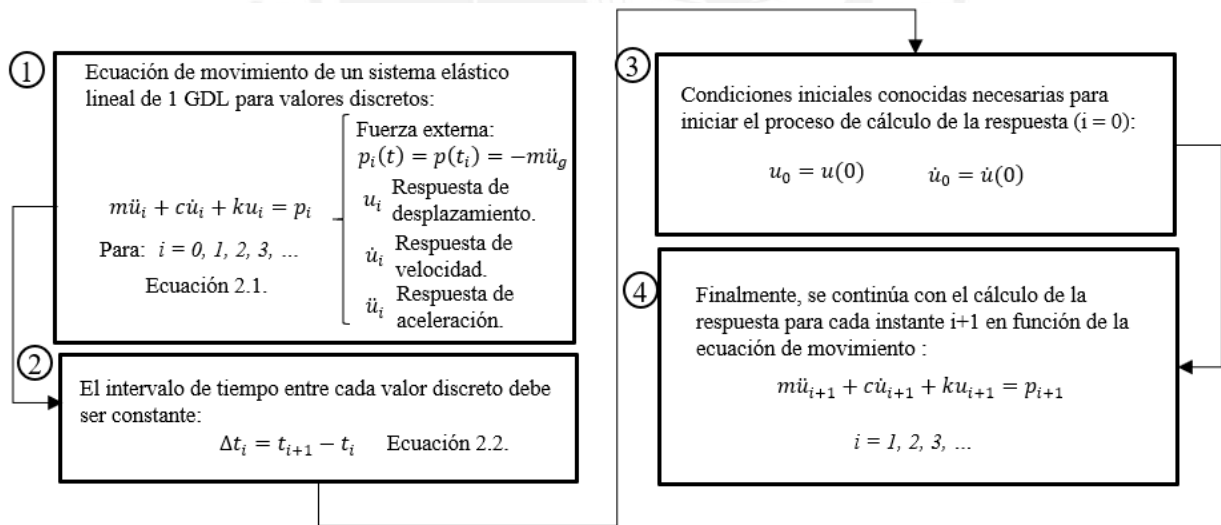


Figura 2. 7. Procedimiento estándar de un método paso a paso

En la figura 2.8. se presenta el esquema del método de la diferencia central, el cual asume una aproximación por diferencias finitas de las derivadas temporales del desplazamiento (la velocidad y la aceleración) (Chopra, 2014).

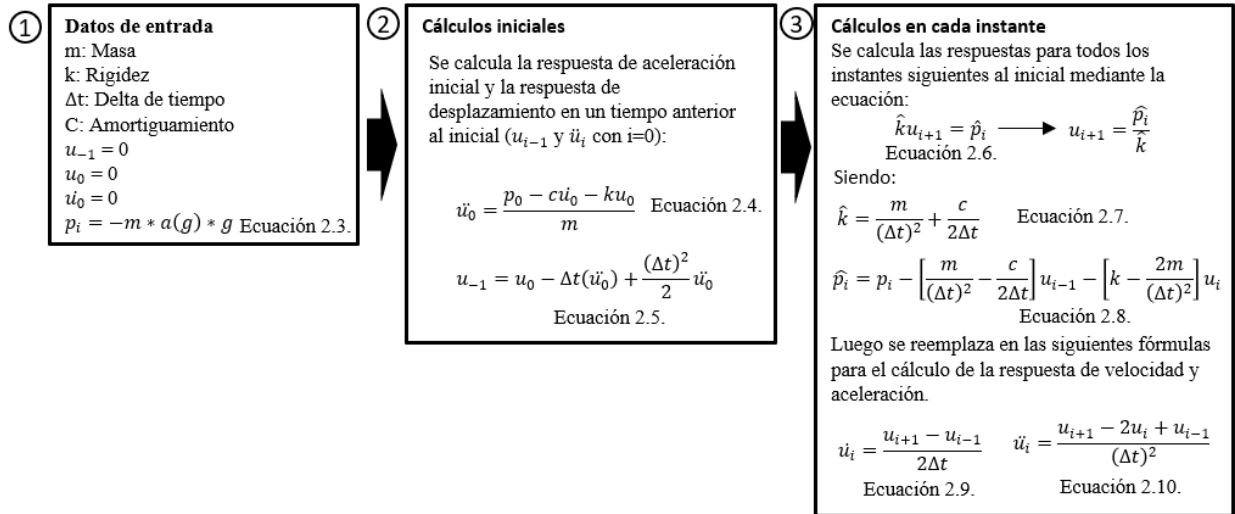


Figura 2. 8. Procedimiento del método de la diferencia central

En la figura 2.9. se presenta el esquema del método de Newmark de la aceleración lineal, el cual supone una variación lineal de la aceleración durante un intervalo de tiempo determinado (Chopra, 2014).

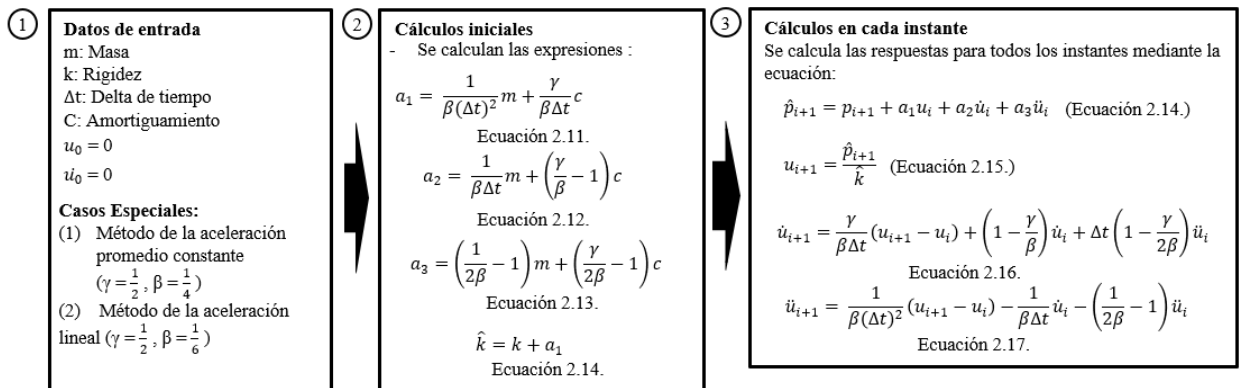


Figura 2. 9. Procedimiento del método de Newmark de la aceleración lineal

Finalmente, en el presente trabajo de tesis se utilizará en adelante uno de los métodos numéricos paso a paso existentes. Este método es denominado de la interpolación lineal de la respuesta y será explicado con mayor detalle a continuación. Este método numérico consiste en la interpolación de la fuerza de excitación en un sistema lineal en cada intervalo de tiempo.

## 2.4.2. Método de la interpolación lineal (Nigam and Jennings)

Como se observa en la figura 2.10., este método requiere de datos de entrada relacionados con la ecuación de movimiento de un sistema elástico lineal (masa y rigidez), así como el intervalo de tiempo de muestreo ( $\Delta t$ ), la fracción de amortiguamiento ( $\xi$ ) y los valores de respuesta  $u_0 = 0$  y  $\dot{u}_0 = 0$  para el instante inicial. Asimismo, en este método se desarrollaron fórmulas en función de los elementos antes mencionados y los valores de la fuerza de excitación, de las cuales derivaron los coeficientes A, B, C y D; para el cálculo de la respuesta de desplazamiento y A', B', C' y D'; para el cálculo de la respuesta de velocidad (Chopra, 2014). Finalmente, para el cálculo de la respuesta de aceleración simplemente se reemplazan los valores calculados de respuesta de desplazamiento y velocidad dentro de la ecuación de movimiento.

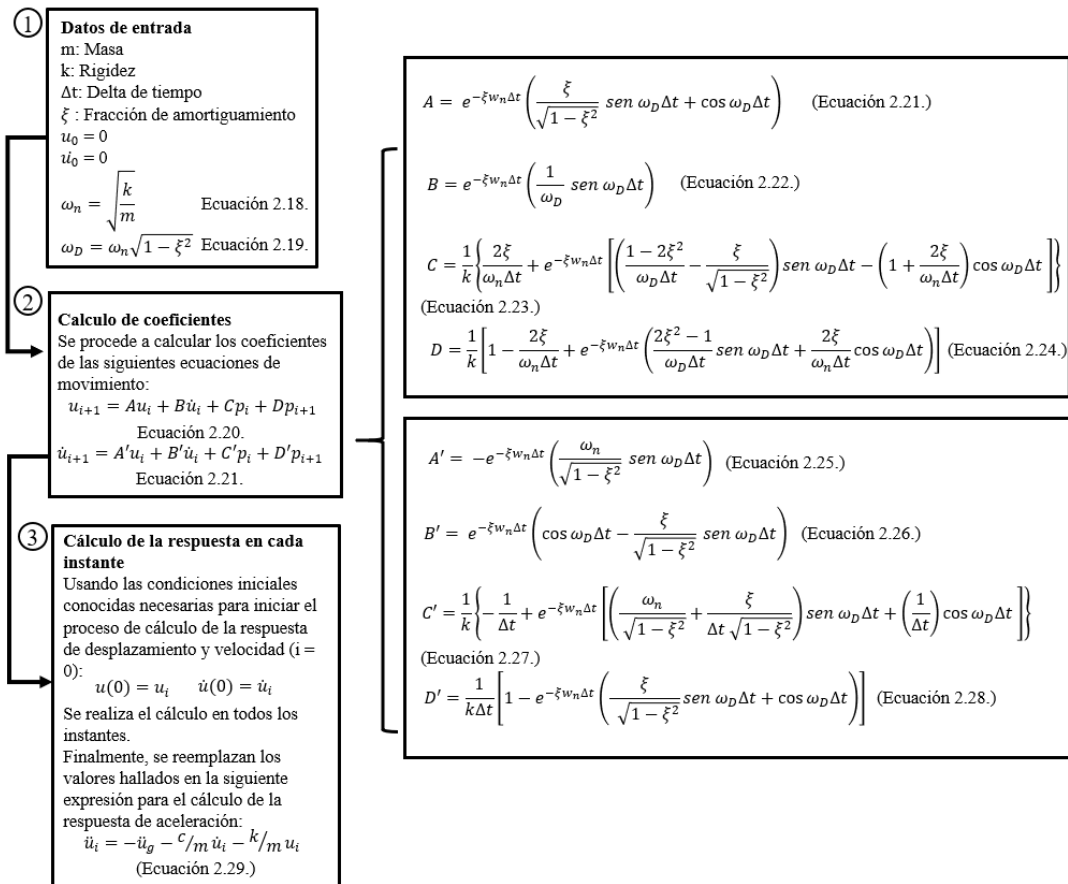


Figura 2. 10. Procedimiento del método de la interpolación lineal

En la siguiente figura 2.11. se observa el gráfico de la respuesta de desplazamiento del sismo del 74 calculada por el método de interpolación lineal para un periodo de 0.45 segundos. Esta gráfica representa los posibles desplazamientos generados por el sismo en toda estructura que posea un periodo fundamental de 0.45 segundos. Asimismo, el valor máximo absoluto de esta gráfica es uno de los valores incluidos en la gráfica del espectro de respuesta de desplazamiento que se desarrollará más adelante en este trabajo. De la misma forma siguiendo este método se pueden calcular las respuestas de velocidad y aceleración para distintos periodos, cuyos valores máximos absolutos también son usados para obtener los espectros de respuesta de velocidad y aceleración, respectivamente (Chopra, 2014).

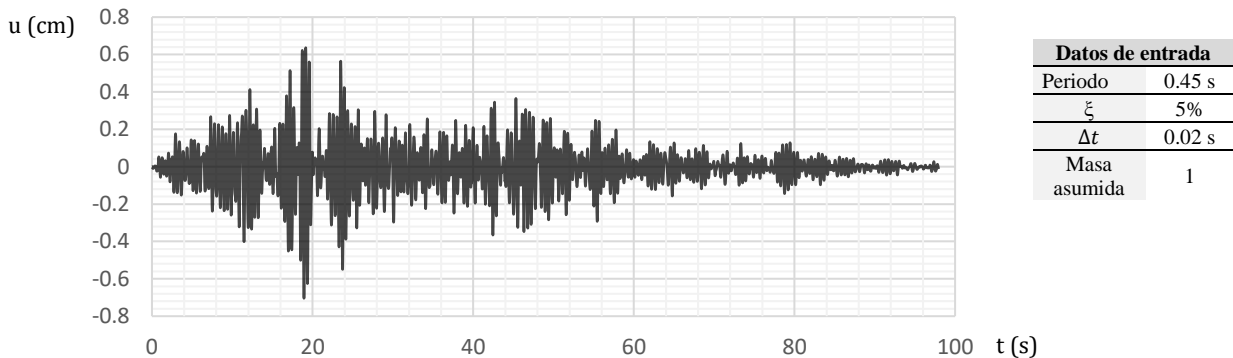


Figura 2. 11. Respuesta de desplazamiento al sismo de 1974 para un  $T=0.45$  s

Asimismo, en la figura 2.12. se presenta la gráfica de respuesta de desplazamiento al sismo de 1974 para un periodo de 2 segundos, en la cual se puede observar un aumento en la amplitud de los desplazamientos y una disminución de la frecuencia de vibración.

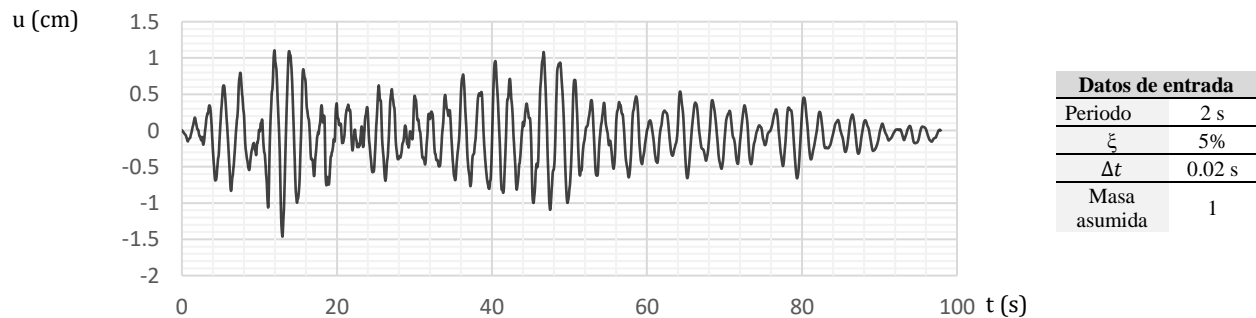


Figura 2. 12. Respuesta de desplazamiento al sismo de 1974 para un  $T=2$  s

## 2.5. Evaluación de la respuesta sísmica de sistemas lineales.

Una vez calculada la respuesta dinámica a un movimiento sísmico de osciladores simples con diferentes periodos de vibración ( $T$ ), es importante determinar los valores máximos de cada respuesta tanto para desplazamiento, velocidad y aceleración; ya que estos muestran las máximas sollicitaciones a las que podrían estar expuestas determinadas estructuras según su periodo fundamental (Chopra, 2006). De esta manera, a la curva que abarca todos los posibles periodos (eje de abscisas) versus las respuestas máximas absolutas (eje de ordenadas) se le denomina espectro de respuesta (Chopra, 2006). Como se observa en la figura 2.13., de los valores de respuesta dinámica calculados se procede a la determinación de los valores máximos absolutos para cada uno de estos periodos, con lo cual se definen los valores espectrales de desplazamiento, velocidad y aceleración. Por otro lado, para un cálculo aproximado de los valores espectrales de respuesta se utilizan los valores de la pseudo velocidad y la pseudo aceleración. En este caso, se obtienen valores cercanos, pero no iguales a los valores espectrales y se requiere de ciertas condiciones referentes a los valores del periodo o de la fracción de amortiguamiento crítico para su adecuada aplicación. (Jenschke, Clough, & Penzien, 1964).

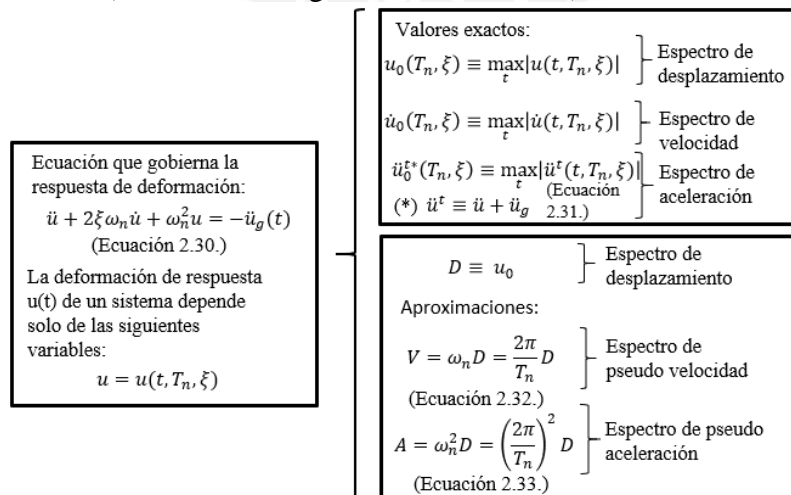


Figura 2. 13. Expresiones de respuesta espectral, pseudo velocidad y pseudo aceleración



En la figura 2.14. se muestra un esquema de la construcción de un espectro de respuesta de desplazamiento calculado para el sismo de 1974. Aquí se puede observar que los valores máximos de respuesta de desplazamiento representan puntos de la gráfica que se distribuyen en función a cada uno de los periodos fundamentales de modelos de un grado de libertad. Usualmente, estas gráficas presentan un rango de periodos de vibración que varía entre 0 y 3 o 5 segundos, donde se incluyen a la mayoría de construcciones comunes. Asimismo, estas curvas se construyen para valores constantes de fracción de amortiguamiento crítico, siendo para el caso del ejemplo, espectros de respuesta para una fracción de amortiguamiento crítico de  $\xi = 5\%$  (Crisafulli & Villafane, 2002).

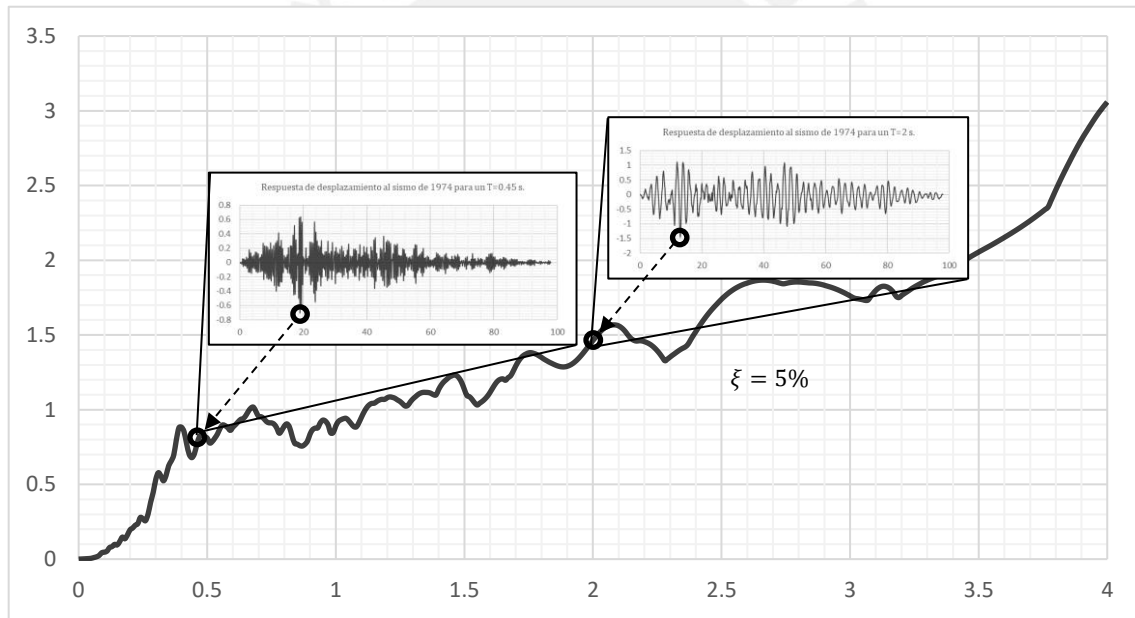


Figura 2. 14. Construcción del espectro de respuesta de desplazamiento del sismo de 1974

De la misma forma, en la figura 2.15. a), se presenta el espectro de respuesta de velocidad del sismo de 1974, donde se observa que existe amplificación en la gráfica de velocidades máximas absolutas en la zona de periodos cortos. En la figura 2.15. b) se muestra el espectro de respuesta de aceleración del sismo de 1974. Esta gráfica es la más usada para el desarrollo de espectros de respuesta de diseño en las diferentes normas en el mundo y especificaciones técnicas para el diseño

estructural, ya que contempla la máxima respuesta de diferentes estructuras bajo la acción de un movimiento sísmico (Tazarv, 2011).

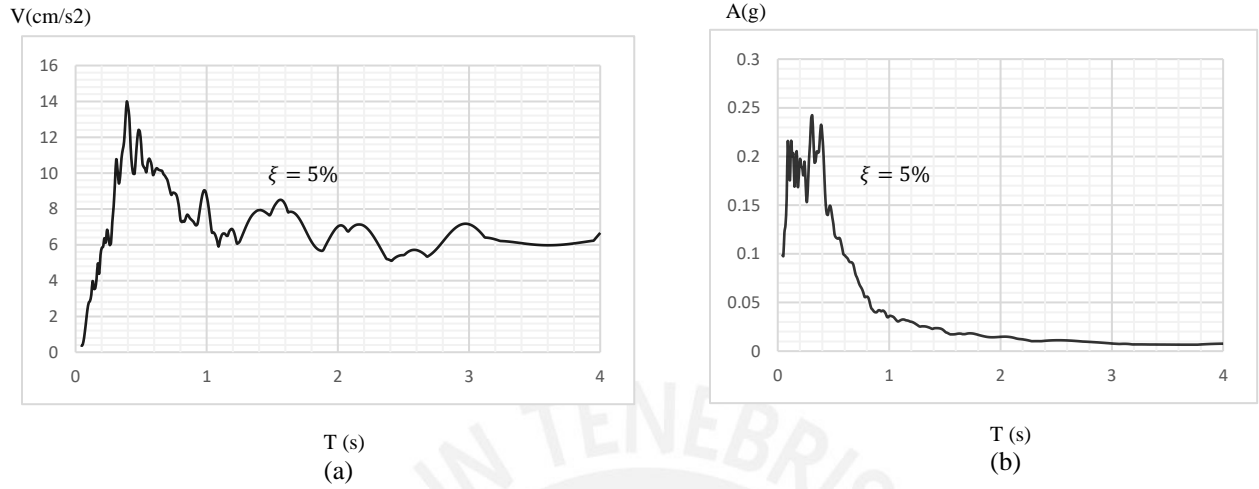


Figura 2. 15. Espectros de respuesta para una fracción de amortiguamiento de  $\xi = 5\%$  : a) espectro de respuesta de velocidad; y b) espectro de respuesta de aceleración.

## 2.6. Conclusiones

Para el análisis de los movimientos sísmicos se realiza un registro de valores discretos según una determinada tasa de muestro. Luego, se procede al procesamiento de esta señal para limpiar la señal de ruido ambiental. Finalmente, con la señal del sismo procesada se realiza su análisis para la comprensión de los efectos de estos movimientos sobre las estructuras existentes.

Existen diferentes tipos de acelerómetros actualmente, según los requerimientos para los que se requiera su uso. Asimismo, en el caso del monitoreo sísmico, los acelerómetros piezoeléctricos son los más usados debido a que la propia estructura de este dispositivo le permite medir directamente la corriente obtenida y luego hallar la aceleración con un rango de tasa de muestreo disponible suficiente para registrar la señal sísmica con la suficiente exactitud necesaria para su análisis.

El monitoreo sísmico de estructuras es un área de investigación que actualmente está ganando una considerable importancia para la ingeniería civil debido a la variedad de sus aplicaciones. Inclusive, existe un área específica denominada monitoreo dinámico de la estructura, que determina la respuesta dinámica de la estructura por medio de pruebas experimentales.

Los espectros de respuesta se utilizan para el estudio de las características de los sismos y su efecto sobre las estructuras. Estas curvas presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, como resultado de la complejidad del registro de aceleraciones del movimiento sísmico. Asimismo, las variables que pueden influir sobre los registros de aceleración y por lo tanto sobre los espectros de respuesta pueden ser los valores máximos del movimiento del terreno (aceleración, velocidad y desplazamiento), el contenido de frecuencias del terremoto, la duración del movimiento fuerte, el mecanismo de generación del terremoto, la magnitud, el tipo de suelo, etc. En resumen, cada evento sísmico, dependiendo de estas variables, presentará espectros de respuesta con valores máximos notablemente diferentes y por ende la forma de la curva característica cambiará.

Los espectros son una herramienta bastante útil en el diseño de estructuras sismorresistentes, debido a que el ingeniero estructural puede estimar el valor máximo de la respuesta (usualmente en términos de aceleración) sin requerir de una evaluación de la historia temporal completa. En este caso, las curvas espectrales de diseño deben considerar el efecto de varios terremotos, es decir deben englobar todos los valores máximos de respuesta a distintos eventos sísmicos ocurridos en un periodo determinado. De esta manera, los valores del espectro de diseño serán representativos de la sismicidad propia de cada región.

# **Capítulo 3. Recopilación de normas relacionadas a la instrumentación sísmica de edificios**

## **Resumen**

En este capítulo se presentará información relacionada a normativa internacional en instrumentación sísmica y el proceso de adecuación de estos parámetros a la norma peruana de diseño sismorresistente E.030. El capítulo inicia con una breve reseña de los conceptos básicos de riesgo sísmico e instrumentación sísmica, para luego pasar a la presentación de la normativa internacional actual referente a la instrumentación sísmica de edificios en siete países. Luego, se desarrolla una comparación entre la normativa mejor estructurada del presente estudio versus la guía de monitoreo sísmico propuesta por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Posteriormente, se presentará el actual capítulo de instrumentación sísmica en el código peruano de diseño sismorresistente E.030. Para finalmente, dar paso a las sugerencias que busquen impulsar el uso extensivo y el desarrollo de esta normativa en el país para la mejora continua en el diseño y construcción de edificaciones.

### **3.1.Introducción**

Las normas técnicas permiten la estandarización de procedimientos de cumplimiento obligatorio dentro del territorio de un determinado país. En el caso de normatividad referida a la instrumentación sísmica, se presentan dos escenarios distintos dentro de la realidad mundial. Por un lado, la regulación estatal de la instrumentación permite dar alcances obligatorios para la adecuada instalación de sistemas de instrumentación sísmica (Celebi, 2000). En este caso, su creación y aprobación son prioritarios en países con una reducida cantidad de investigación referente al comportamiento de los edificios ante eventos sísmicos, lo cual permite su desarrollo progresivo y estandarizado (E-030, 2018). Por otro lado, en países con altos avances y gran cantidad de edificios instrumentados, el Estado, mediante el ente competente, además de regular la instrumentación sísmica, dirige también los esfuerzos de regulación al campo de la recopilación y procesamiento de datos de las redes de monitoreo sísmico de estructuras (Celebi, 2000).

Asimismo, en el ámbito académico, la instrumentación para monitoreo sísmico se constituyó en un área importante de investigación necesaria para el estudio del comportamiento de estructuras (Celebi, 2000). A tal punto que, se desarrollaron guías de buenas prácticas internacionales de instrumentación sísmica en Estados Unidos (2000) y en el continente europeo (2010-2014). Así también, se desarrollaron proyectos como las redes de monitoreo sísmico interconectado en Nueva Zelanda (Uma, King, Cousins, & Gledhill, 2011), sistemas de alertas tempranas en México (Pérez, 2016), sistemas de monitoreo de salud estructural (Fujino & Siringoringo, 2008), entre otros proyectos.

## 3.2.Regulación para la instrumentación sísmica comparada. Normativa nacional y modelos extranjeros.

### 3.2.1.Normativa internacional de instrumentación sísmica

Para el presente estudio se tomó una muestra representativa de los países que poseen un capítulo de instrumentación sísmica dentro de sus normas sismorresistentes. La delimitación de la muestra se realizó según los siguientes criterios: a) normativa disponible para su uso público en formato digital; b) idioma de la normativa (español o inglés); y c) aspectos mínimos referentes a instrumentación sísmica deberán estar incluidos en la norma de diseño. En la figura 3.1. se puede observar la localización de los países incluidos en este estudio.

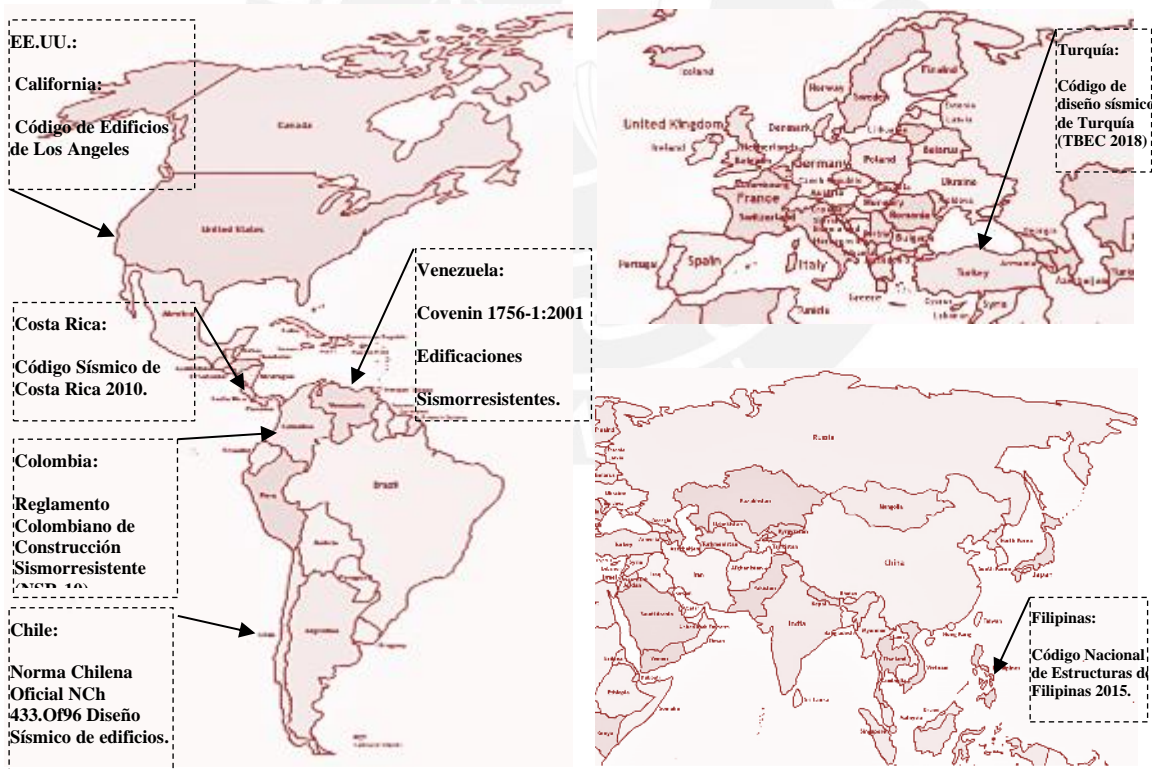



Figura 3. 1. Países incluidos en el presente estudio y sus normativas sísmicas.

### 3.2.1.1. Normativa de Colombia

Este país sudamericano posee una normativa de instrumentación sísmica bastante estructurada para su cumplimiento extensivo. Esto debido, entre otros aspectos, a que condiciona la expedición de la “licencia de construcción” a la inclusión de espacios específicos para la instrumentación sísmica de la edificación desde su etapa de diseño arquitectónico, para que cumpla con los requisitos estipulados en este reglamento (NSR-10, 2010). En la tabla 3.1. se presentan los requisitos definidos en la normativa de Colombia para los edificios que deben ser instrumentados. Asimismo, se mencionan las ubicaciones de los dispositivos y la entidad encargada de la supervisión de la instrumentación en Colombia. Esta normativa se incluye en el Anexo A de la presente tesis.

Tabla 3. 1. Normativa de instrumentación sísmica de Colombia.

País/Norma	Zonas Sísmicas	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Localización de Instrumentos	Entidad Supervisora
<p><b>Colombia</b></p> <p><b>I.Norma:</b> Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente (NSR-10).</p> <p><b>II.Guía estatal de especificaciones técnicas mínimas:</b> Especificaciones para aprobación de Instrumentos NSR-10.</p>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p><b>Leyenda:</b>  <b>A.C.:</b> área construida  <b>H:</b> Altura de edificio en pisos.  <b>Cant. Min.:</b> Cantidad mínima de acelerógrafos.  <b>Nivel:</b> ubicación de los dispositivos.</p> </div>  <p style="text-align: center;"> <span style="margin-right: 20px;">Zonas sísmicas bajas</span> <span style="margin-right: 20px;">Zonas sísmicas intermedias</span> <span>Zonas sísmicas altas</span> </p>	<p style="text-align: center;"><b>Zonas sísmicas altas</b></p> <p>A.C.: &gt; 20,000 m2 H= 3 a 10 pisos.</p> <p>A.C.: &gt; 20,000 m2 H=11 a 20 pisos.</p> <p>A.C.: Todas H=21 o más pisos</p> <p>A.C.: 200 unidades de vivienda (no sociales).</p>	<p>Cant. Min.: 1 Nivel: Inferior</p> <p>Cant. Min.: 2 Nivel: inferior y cubierta.</p> <p>Cant. Min.: 3 Nivel: inferior, medio y cubierta.</p> <p>Cant. Min.: 1 Nivel: campo abierto.</p>	
		<p style="text-align: center;"><b>Zonas de amenaza sísmica intermedia</b></p> <p>A.C.: &gt; 20,000 m2 y entre 5 y 15 pisos.</p> <p>A.C.: &gt; 20,000 m2 H=16 y 25 pisos.</p> <p>A.C.: Todas H=25 o más pisos</p>	<p>Cant. Min.: 1 Nivel: Inferior</p> <p>Cant. Min.: 2 Nivel: inferior y cubierta.</p> <p>Cant. Min.: 3 Nivel: inferior, medio y cubierta.</p>	
		<p>A.C.: 200 unidades de vivienda (no sociales).</p>	<p>Cant. Min.: 1 Nivel: campo abierto.</p>	
		<p style="text-align: center;"><b>Zonas sísmicas bajas</b></p> <p>No requiere instrumentar</p>	<p>No requiere instrumentar.</p>	

Fuente: <https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps> (último acceso el 25 de octubre de 2020).

Los tipos de sensores requeridos por esta norma para la instrumentación de edificios son los acelerógrafos digitales de movimiento fuerte (NSR-10, 2010). En la versión anterior de esta norma, denominada NSR-98, la entidad encargada de la administración de la instrumentación, en ese tiempo denominada INGEOMINAS, publicó la guía “Requisitos mínimos para la instalación de acelerógrafos, norma NSR-98, título A, capítulo A-11”. En este documento se detallan mayores alcances para la selección del equipo más adecuado para la instrumentación, así como también profundiza en las buenas prácticas requeridas para la instalación de dispositivos tanto en campo abierto como dentro de la edificación, incluyendo planos de las casetas para instrumentación. Es así que, para la presente norma en estudio se actualizaron algunos de estos requisitos para las especificaciones técnicas de los instrumentos y se publicó la tabla “Especificaciones para aprobación de instrumentos NSR -10”, vigente actualmente y de uso extensivo a la fecha (NSR-10, 2010).

Según esta norma, la gestión de la instrumentación se divide entre los involucrados en la ejecución del proyecto de edificación (NSR-10, 2010). En este caso, el SGC se encarga de la aprobación de los acelerógrafos usados en la instrumentación y de la verificación del cumplimiento de los espacios requeridos dentro del proyecto para la instalación de la instrumentación sísmica. Asimismo, el costo tanto de los equipos usados, así como de la instalación, seguridad y mantenimiento es asumido por el dueño de la edificación (NSR-10, 2010).


Finalmente, la gestión de la información generada la desarrolla tanto el SGC, así como, en caso lo requiera, el municipio donde se encuentra localizada la edificación. De esta forma, el propietario de la edificación debe poner en conocimiento al SGC y a quien designe la autoridad municipal, sin costo adicional, una copia de los registros obtenidos por lo menos una vez al año (NSR-10, 2010).



### 3.2.1.2. Normativa de Venezuela

La normativa de instrumentación sísmica de Venezuela les otorga la facultad a sus autoridades nacionales y municipales que, en el marco de las leyes vigentes, determinen la necesidad de instrumentar ciertas edificaciones para conocer su respuesta a las acciones sísmicas (COVENIN, 2001). Esto, a diferencia de la normativa de Colombia, le resta el carácter de obligatoriedad que debería tener la norma para que se desarrolle un cumplimiento extensivo en todas las estructuras que cumplen con los requisitos para ser instrumentados en Venezuela. Asimismo, la zonificación sísmica no se incluye como un parámetro determinante en la distribución de los dispositivos (COVENIN, 2001). En la tabla 3.2. se presentan los requisitos definidos en la normativa de Venezuela para los edificios que deben ser instrumentados. Asimismo, se mencionan las ubicaciones de los dispositivos y la entidad encargada de la supervisión de la instrumentación de los edificios en Venezuela. Esta normativa se incluye en el Anexo A de la presente tesis.

Tabla 3. 2. Normativa de instrumentación sísmica de Venezuela

País/Norma	Zonas Sísmicas	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Localización de Instrumentos	Entidad Supervisora
<b>Venezuela</b>  <b>I. Norma:</b> Covenin 1756-1:2001 Edificaciones Sismorresistentes.  <b>II. Guía estatal de especificaciones técnicas mínimas:</b> No cuenta con guía de especificaciones de equipos para monitoreo sísmico.	<b>Leyenda:</b> A.C.: área construida H: Altura de edificio en pisos. Cant. Min.: Cantidad mínima de acelerógrafos. Nivel: ubicación de los dispositivos.   Zonas sísmicas Fuente: <a href="https://www.dlubal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps">https://www.dlubal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps</a> (último acceso el 25 de octubre de 2020).	A.C.: > 6,000 m <sup>2</sup> H: > 6 pisos	Cant. Min.: 2 Nivel: base y azotea.	Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Funvisis)
		A.C.: Todas. H: > 10 pisos	Cant. Min.: 1 Nivel: campo libre.	
		Cant. Min.: 3 Nivel: base, media altura y azotea.	Cant. Min.: 1 Nivel: campo libre.	

Los tipos de sensores requeridos por esta norma para la instrumentación de edificios son los acelerógrafos digitales de movimientos fuertes. Estos instrumentos deben contar con la aprobación de la Fundación venezolana de investigaciones sismológicas (Funvisis). En este caso, la normativa venezolana de instrumentación sísmica no cuenta con una guía de especificaciones técnicas de dispositivos de instrumentación sísmica publicada, por lo que depende enteramente de las disposiciones internas de Funvisis para aprobar los equipos.

La gestión de la instrumentación se divide entre los involucrados en la ejecución del proyecto de edificación. En este caso, el Funvisis se encarga de la aprobación de los acelerógrafos usados en la instrumentación. Asimismo, el costo tanto de los equipos usados, así como de la instalación, seguridad y mantenimiento es asumido tanto por el Funvisis como por la persona, natural o jurídica, propietario de la edificación (COVENIN, 2001). Finalmente, la gestión de la información generada la desarrolla el Funvisis convirtiéndose, según la normativa venezolana, en copropietario de los registros independientemente de quien sea el propietario del instrumento (COVENIN, 2001).

### **3.2.1.3. Normativa de Chile**

En el caso de Chile, dentro de su norma de diseño sismorresistente solo contempla un pequeño párrafo referente a la instrumentación para monitoreo sísmico (NCH433, 2012). En este, se le da a la autoridad competente, la facultad de exigir la inclusión de al menos dos recintos para la instalación de dispositivos en proyectos de edificaciones. A pesar de lo reducida de su normativa referente a instrumentación, Chile en los últimos diez años ha desarrollado proyectos de instrumentación de la mano de Centros de Investigación y de empresas privadas al punto que inclusive desarrolló la instrumentación de edificaciones durante su construcción y de varios edificios de gran altura (NCH433, 2012). En la tabla 3.3. se presenta el párrafo incluido en la

normativa de Chile para los edificios que deben ser instrumentados. Esta normativa se incluye en el Anexo A de la presente tesis.

Tabla 3. 3. Normativa de instrumentación sísmica de Chile


País/Norma	Zonas Sísmicas	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Localización de Instrumentos	Entidad Supervisora
<p><b>Chile</b></p> <p><b>I.Norma:</b> Norma Chilena Oficial NCh 433.Of96 Diseño Sísmico de edificios.</p> <p><b>II.Guía estatal de especificaciones técnicas mínimas:</b> No cuenta con guía de especificaciones de equipos para monitoreo sísmico.</p>	 <p>Zonas sísmicas</p> <p>Fuente: <a href="https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps">https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps</a> (último acceso el 25 de octubre de 2020).</p>	<p>No se menciona en esta normativa.</p>	<p>No se menciona en esta normativa.</p>	<p>No se menciona en esta normativa.</p>

Los tipos de sensores usados para la instrumentación sísmica no son mencionados en la normativa de instrumentación sísmica de Chile. Asimismo, no se ha desarrollado la información sobre la gestión de la instrumentación incluyendo los datos de la entidad que aprueba los dispositivos, quien asume los costos de la instalación, seguridad y mantenimiento. Finalmente, tampoco define qué entidad se hace cargo de recopilar la información generada en los diferentes edificios instrumentados (NCH433, 2012).

### 3.2.1.4. Normativa de Costa Rica

La normativa de instrumentación sísmica de Costa Rica está enfocada en el monitoreo del desempeño de la estructura a diseñar. Debido a esto, se plantean requisitos mínimos de los edificios que deberán ser instrumentados, pero no se incluye mayor información respecto a su instalación (CSCR, 2011). Es preciso indicar que, al igual que la colombiana, esta norma toma en cuenta la zonificación como requisito. En la tabla 3.4. se presentan los requisitos definidos en la normativa de Costa Rica para los edificios que deben ser instrumentados. Asimismo, se mencionan las ubicaciones de los dispositivos. Esta normativa se incluye en el Anexo A de la presente tesis.

Tabla 3. 4. Normativa de instrumentación sísmica de Costa Rica

País/Norma	Zonas Sísmicas	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Localización de Instrumentos	Entidad Supervisora
<b>Costa Rica</b>  <b>I. Norma:</b> Código Sísmico de Costa Rica 2010.  <b>II. Guía estatal de especificaciones técnicas mínimas:</b> No cuenta con guía de especificaciones de equipos para monitoreo sísmico.	<b>Leyenda:</b> <b>A.C.:</b> área construida <b>H:</b> Altura de edificio en pisos. <b>Cant. Min.:</b> Cantidad mínima de dispositivos. <b>Nivel:</b> ubicación de los dispositivos.	<b>Solo para zonas III y IV</b>		No se menciona en la normativa.
		A.C.: 5,000 m <sup>2</sup> H: ≥10 pisos	Cant. Min.: 1 acelerógrafo triaxial Nivel: base	
	 Zonas sísmicas <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: green; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> II <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> III <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span> IV  Fuente: <a href="https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps">https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps</a> (último acceso el 25 de octubre de 2020).	A.C.: 5,000 m <sup>2</sup> H: ≥20 pisos	Cant. Min.: 2 acelerógrafos triaxial Nivel: base y azotea o en el nivel inferior de techo.	


Los tipos de sensores requeridos por esta norma para la instrumentación de edificios son los acelerógrafos digitales de movimientos fuertes. En este caso, la normativa costarricense de

instrumentación sísmica no cuenta con una guía de especificaciones técnicas de dispositivos de instrumentación sísmica publicada. Asimismo, esta norma de instrumentación no menciona aspectos de la gestión de la instrumentación. Finalmente, tampoco se desarrolla mayor información sobre la gestión de la información (CSCR, 2011).

### 3.2.1.5. Normativa de Turquía

La normativa de instrumentación sísmica de Turquía se enfoca en la reglamentación de la verificación de la salud estructural de sus estructuras (SSBD, 2018). En el año 2019 entró en vigencia una actualización de su reglamento de construcción sismorresistente (SSBD, 2018). En el caso del capítulo de instrumentación sísmica se incluyeron numerales que le dieron el carácter de obligatoria a esta práctica, con el fin de monitorear los edificios de gran altura (altura mayor a 70 metros). En la tabla 3.5. se presentan los requisitos definidos en la normativa de Turquía para los edificios que deben ser instrumentados. Esta normativa se incluye en el Anexo A de esta tesis.

Tabla 3. 5. Normativa de instrumentación sísmica de Turquía

País/Norma	Zonas Sísmicas	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Localización de Instrumento	Entidad Supervisora
<p><b>Turquía</b></p> <p><b>I.Norma:</b> Código de diseño sísmico de Turquía (TBEC 2018)</p> <p><b>II.Guía estatal de especificaciones técnicas mínimas:</b> No cuenta con guía de especificaciones de equipos para monitoreo sísmico.</p>	<p><b>Leyenda: H: Altura de edificio</b></p>  <p>Acercaciones de terreno (g):</p> <p>0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.10 0.11 0.12 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35</p> <p>Fuente: <a href="https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps">https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps</a> (último acceso el 25 de octubre de 2020).</p>	<p>H: &gt; 105 m.</p>	<p>No se define en esta normativa.</p>	<p>Departamento de Manejo de Desastres y Emergencias (AFAD)</p>

Los tipos de sensores usados para la instrumentación no son mencionados en la presente norma. En este caso, la normativa turca de instrumentación sísmica no cuenta con una guía de especificaciones técnicas de dispositivos de instrumentación sísmica publicada. Asimismo, esta norma de instrumentación menciona que la instalación de la instrumentación estará a cargo tanto del Departamento de Manejo de Desastres y Emergencias (AFAD) como del propietario del edificio, pero los aspectos de seguridad y el mantenimiento estarán enteramente a cargo del propietario. Finalmente, la gestión de la información registrada deberá estar disponible para la recopilación del Departamento de Manejo de Desastres y Emergencias (AFAD) (SSBD, 2018).

#### **3.2.1.6. Normativa del Estado de California, EE.UU.**


La normativa de instrumentación sísmica de Estados Unidos se focaliza en la costa este de su territorio, específicamente en el estado de California, donde se tiene un código de diseño sismorresistente que incluye un capítulo de instrumentación sísmica (CABC, 2019). Asimismo, dentro de este estado, las ciudades de Los Ángeles y San Francisco poseen normativa que amplían las disposiciones, tanto reglamentarias como de buenas prácticas, para la implementación de sistemas de instrumentación sísmica. Esta normativa se incluye en el Anexo A de la presente tesis.

En el caso de la ciudad de Los Ángeles, dentro de su código de construcción se incluye un capítulo específico que agrupa todas las disposiciones referidas a la instrumentación sísmica de edificios nuevos. Estas incluyen regulaciones respecto a la aplicabilidad de la norma, la gestión de los instrumentos para su localización y mantenimiento; así como aspectos de la instrumentación de edificios existentes (LAMC, 2020).

Por otro lado, en el caso de San Francisco, en su enmienda al código de edificaciones de la ciudad del año 2019 y vigente actualmente, señala que únicamente se seguirán las disposiciones indicadas en el código de construcción de California. Asimismo, en el 2014 se actualizó un boletín administrativo n.º AB-058 del Código de Construcción de San Francisco de 2013, que describe los procedimientos de instalación, monitoreo y reporte de los instrumentos instalados en edificios tanto requeridos por la normativa, así como los dispositivos instalados voluntariamente por sus dueños (SFBC, 2020).

En la tabla 3.6. se presentan los requisitos definidos en la normativa estadounidense para los edificios a instrumentarse en la ciudad de Los Ángeles. Asimismo, se mencionan las ubicaciones de los dispositivos y la entidad encargada de la supervisión de la instrumentación de los edificios en esta ciudad del estado de California.


Tabla 3. 6. Normativa de instrumentación sísmica en la ciudad de Los Ángeles

País	Zonas Sísmicas en el estado de California	Ciudad/Norma (En cumplimiento de la norma del estado de California "California Building Code")	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Cantidad y localización de Instrumentos	Entidad Supervisora
EE.UU.	<div data-bbox="292 1239 698 1354"> <p><b>Leyenda:</b>            A.C.: área construida            H: Altura de edificio en pisos.            Cant. Min.: Cantidad mínima de acelerógrafos.            Nivel: ubicación de los dispositivos.</p> </div> <div data-bbox="292 1365 698 1785"> <p>Zonas sísmicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Zona 0</li> <li>Zona 1</li> <li>Zona 2A</li> <li>Zona 2B</li> <li>Zona 3</li> <li>Zona 4</li> </ul>  </div> <div data-bbox="292 1795 698 1869"> <p>Fuente: <a href="https://www.nishkian.com/what-happened-to-seismic-zones/">https://www.nishkian.com/what-happened-to-seismic-zones/</a> (último acceso el 25 de octubre de 2020).</p> </div>	<p><b>Los Ángeles</b></p> <p><b>I. Norma:</b> Código de Edificios de Los Ángeles</p> <p><b>II. Guía estatal de especificaciones técnicas mínimas:</b> Especificaciones para acelerógrafos y requerimientos de instalación y servicio.</p>	<p>A.C.: &gt; 5,574 m2. H: &gt; 6 pisos.</p> <hr/> <p>A.C.: Todas las áreas. H: &gt; 10 pisos.</p>	<p>Cant. Min.: 3 Nivel: base, media altura y azotea.</p> <hr/> <p>Cant. Min.: 1 Nivel: campo libre.</p> <hr/> <p>Cant. Min.: 3 Nivel: base, media altura y azotea.</p> <hr/> <p>Cant. Min.: 1 Nivel: campo libre.</p>	<p>Departamento de Construcción y Seguridad de Los Ángeles</p>



Asimismo, en la tabla 3.7. se presenta la información referente a la normativa de instrumentación de edificios en la ciudad de San Francisco, así como la entidad supervisora de que dicha normativa se cumpla siguiendo las guías estatales de instrumentación sísmica de esta ciudad.

Tabla 3. 7. Normativa de instrumentación sísmica en la ciudad de Los Angeles

País	Zonas Sísmicas en el estado de California	Ciudad/Norma (En cumplimiento de la norma del estado de California "California Building Code")	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Cantidad y localización de Instrumentos	Entidad Supervisora
EE.UU.	<p><b>Leyenda:</b>  <b>A.C.:</b> área construida  <b>H:</b> Altura de edificio en pisos.  <b>Cant. Min.:</b> Cantidad mínima de acelerógrafos.  <b>Nivel:</b> ubicación de los dispositivos.</p> <p>Zonas sísmicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Zona 0</li> <li>Zona 1</li> <li>Zona 2A</li> <li>Zona 2B</li> <li>Zona 3</li> <li>Zona 4</li> </ul>  <p>Fuente: <a href="https://www.nishkian.com/what-happened-to-seismic-zones/">https://www.nishkian.com/what-happened-to-seismic-zones/</a> (último acceso el 25 de octubre de 2020).</p>	<b>San Francisco</b>	A.C.: > 5,574 m2. H: > 6 pisos.	Cant. Min.: 3 Nivel: base, media altura y azotea.	Departamento de Inspección de Edificaciones (DBI)
		<p><b>I. Norma:</b> Código de Edificios de San Francisco</p> <p><b>II. Guía estatal de especificaciones técnicas mínimas:</b> Procedimientos para la instrumentación sísmica de nuevos edificios.</p>	A.C.: Todas las áreas. H: > 10 pisos.	Cant. Min.: 1 Nivel: campo libre.	

Los tipos de sensores requeridos por la normativa de instrumentación sísmica de Los Ángeles se indica en el documento de Especificaciones para acelerógrafos y requerimientos de instalación y servicio que se anexa al presente trabajo (anexo B). En este documento se detallan mayores alcances para la selección del equipo más adecuado para la instrumentación, así como también profundiza en las buenas prácticas requeridas para la instalación de dispositivos tanto en campo abierto como dentro de la edificación. Así también, en el caso de San Francisco, mediante el boletín administrativo (anexo B) indica las especificaciones mínimas que deben cumplir los acelerógrafos



para ser incluidos dentro del sistema de instrumentación sísmica de un edificio dentro de esta ciudad. Este documento se incluye en los anexos de la presente tesis.

Para la gestión de la instrumentación, en el caso de Los Ángeles, la aprobación de los equipos usados para la instrumentación sísmica la realiza el Departamento de Construcción y Seguridad de Los Ángeles de acuerdo a lo indicado en su guía de especificaciones técnicas mínimas (LAMC, 2020). Todos los gastos de instalación y mantenimiento serán asumidos por el dueño del edificio. Asimismo, esta normativa indica que el dueño deberá realizar el mantenimiento de los dispositivos instalados anualmente y presentar un reporte escrito respecto al estado de los equipos instalados. Este reporte certificará que todos los dispositivos instalados recibieron el servicio de mantenimiento y funcionan correctamente. Por otro lado, la gestión de la instrumentación en la normativa de San Francisco indica que el dueño de la edificación se hará responsable de los gastos de mantenimiento y seguridad de los dispositivos (SFBC, 2020). Asimismo, las empresas que proveen los instrumentos sísmicos deben presentar dos juegos de un informe que contenga los planos de todos los pisos instrumentados localizando los acelerógrafos y las especificaciones técnicas tanto de los acelerógrafos como de los equipos relacionados al sistema de instrumentación sísmica. Los planos de este informe deberán ser enviados al Departamento de Inspección de Edificios para su aprobación.

Finalmente, la gestión de la información generada por los sistemas de instrumentación sísmica en la ciudad de Los Ángeles está a cargo de un denominado “superintendente”. En el caso de la instrumentación de edificaciones existentes, los datos registrados serán propiedad del Departamento de Inspección de Edificios (LAMC, 2020). Por otro lado, la gestión de la información en la ciudad de San Francisco se pondrá a disposición, previo requerimiento expreso,


del Departamento de Inspección de Edificios. Asimismo, ante la ocurrencia de un evento sísmico moderado, el Programa de Instrumentación de Movimientos fuertes de California (CSMIP) está capacitado para recopilar los registros del sistema y procesar la información para indicarle al dueño sobre el estado de su inmueble (SFBC, 2020).

### **3.2.1.7. Normativa de Filipinas**

La normativa de instrumentación sísmica de Filipinas se enfoca en la instalación de sistemas de alerta temprana y de verificación de la salud estructural de los edificios posterior a la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud, así como de los posibles tsunamis que se puedan generar a consecuencia de estos. Su normativa de diseño sismorresistente contiene una guía de instrumentación sísmica, con lo cual logra darle el carácter de obligatoriedad a las buenas prácticas en monitoreo sísmico (NSCP, 2016). Es preciso mencionar que la normativa de Filipinas combina el formato de guía de especificaciones técnicas para la instrumentación sísmica con las estipulaciones normativas de un capítulo de instrumentación sísmica general, con lo cual logra el desarrollo de una normativa más específica y técnica. Asimismo, se puede observar una normativa que impulsa la investigación mediante el uso de los registros de monitoreo sísmico de edificios para el desarrollo de espectros de respuesta y otros tipos de procesamiento de datos sísmicos (NSCP, 2016). Esta normativa se incluye en el Anexo A de la presente tesis.

En la tabla 3.8. se presentan los requisitos definidos en la normativa filipina para los edificios que deben ser instrumentados. Asimismo, se mencionan las ubicaciones de los dispositivos y la entidad encargada de la supervisión de la instrumentación de los edificios en el país asiático.

Tabla 3. 8. Normativa de instrumentación sísmica de Filipinas

País/Norma	Zonas Sísmicas	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Localización de Instrumentos correspondiente	Entidad Supervisora
<p><b>Filipinas</b></p> <p><b>I.Norma:</b> Código Nacional de Estructuras de Filipinas 2015.</p> <p><b>II.Guía estatal de especificaciones técnicas mínimas:</b> Guía e implementación de normativa para la instrumentación para monitoreo de sismos en edificaciones.</p>	 <p><b>Intensidad:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I-V</li> <li>VI</li> <li>VII</li> <li>VIII</li> <li>IX-XII</li> </ul> <p><b>Fuente:</b> <a href="https://reliefweb.int/map/philippines/philippines-natural-hazard-risks-national-hazard-map-issued-01-march-2011">https://reliefweb.int/map/philippines/philippines-natural-hazard-risks-national-hazard-map-issued-01-march-2011</a> (último acceso el 25 de octubre de 2020).</p>	<p><b>Edificios estatales</b></p> <p>Tipo: Hospitales, colegios y otros. H: &gt; 50 metros.</p>	<p>Cant. Min.: 3 Nivel: terreno o sótano más bajo, piso intermedio y azotea.</p>	Departamento de Trabajos Públicos y Carreteras
		<p>Tipo: Hospitales (&gt;50 camas) y colegios (&gt; 20 aulas). H: &gt;3 pisos.</p>	<p>Cant. Min.:1 Nivel: terreno o sótano.</p>	
		<p>Tipo: Entidades distritales y provinciales.</p>	<p>Cant. Min.: 1 Nivel: terreno o sótano.</p>	
		<p>H:&gt; 50 metros.</p>	<p>Cant. Min.: 3 Nivel: terreno o sótano, piso intermedio y azotea.</p>	
		<p><b>E. Privados</b></p> <p>Tipo: Hospitales (&gt;50 camas) y colegios (&gt; 20 aulas). H: &gt;3 pisos. A.C.:10,000 m2.</p>	<p>Cant. Min.:1 Nivel: terreno o sótano.</p>	
		<p>Tipo: Edificios comerciales (aforo &gt; 1,000 personas). A.C.:10,000 m2. Edificios industriales (aforo &gt; 1,000 personas).</p>	<p>Cant. Min.:1 Nivel: terreno o sótano.</p>	

Los tipos de sensores requeridos por esta norma para la instrumentación de edificios son los acelerógrafos digitales. Asimismo, la guía de instrumentación sísmica de Filipinas contiene las especificaciones técnicas, donde se detallan mayores alcances para la selección del equipo más adecuado para la instrumentación, así como también profundiza en las buenas prácticas requeridas

para la instalación de dispositivos tanto en campo abierto como dentro de la edificación (NSCP, 2016).

La gestión de la instrumentación en Filipinas según la guía de instrumentación de este país indica que, en lo referente a la prueba de los equipos para su puesta en funcionamiento, los dispositivos deben probarse individualmente y como un arreglo completo previo a su instalación. Estos resultados deberán enviarse al oficial de la edificación, quién suscribirá la certificación para ser el encargado del instrumento verificado. Asimismo, respecto al mantenimiento de los dispositivos, la presente normativa indica que el mantenimiento de los equipos deberá ser anual y el propietario deberá garantizar el mantenimiento de los equipos del sistema de instrumentación sísmica por un periodo no menor de 10 años (NSCP, 2016).

Finalmente, la gestión de la información de la presente norma indica que, ante la ocurrencia de eventos sísmicos de magnitud 6 a más, el propietario del edificio deberá recopilar el registro de los dispositivos y contratar los servicios de un ingeniero estructural certificado para que interprete estos datos. Esta información proporcionada por el profesional deberá presentarse al Departamento de Trabajos Públicos y Carreteras para su almacenamiento y evaluación de seguridad del edificio posterior al terremoto (NSCP, 2016).

### **3.2.2. Comparación de la normativa de instrumentación sísmica de Colombia y las buenas prácticas descritas en guías internacionales de instrumentación.**

La necesidad de verificar si los modelos con los que se diseñan las estructuras en diferentes partes del mundo cumplen con los requerimientos reales a los que se enfrentan estas durante la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud, llevó al progresivo desarrollo de la instrumentación

sísmica de edificios (NSR-10, 2010). Este desarrollo no solo se materializó en normativa o regulaciones estatales, sino que dio paso a la síntesis de buenas prácticas en la instrumentación y a definir las especificaciones técnicas mínimas requeridas para diferentes proyectos de instrumentación incluidas en guías de instrumentación sísmica (Celebi, 2000). Asimismo, mediante estas guías se logra un mayor nivel de detalle en los aspectos técnicos y permite ampliar conceptos que la normativa no logra recoger o que no ve por conveniente.

En este tramo de la presente tesis se escogió a la normativa de Colombia para ser comparada con las más importantes guías de instrumentación sísmica como un ejercicio que permita identificar las fortalezas de la normativa colombiana y los aspectos que se podría mejorar para el desarrollo de un modelo mejorado de capítulo de instrumentación sísmica. Asimismo, para revisar más información referente a las guías de instrumentación usadas en este acápite se recomienda revisar la guía europea NERA (NERA, 2010-2014), la guía del comité de la ANSS (2005), la guía de la USGS (2000) y las guías y recomendaciones que resultaron del congreso COSMOS (2005).

Es preciso indicar que, se escogió la normativa colombiana debido a tres razones: a) su capítulo de instrumentación sísmica está directamente relacionado con la normativa que permite la obtención de la licencia de construcción; b) posee un sistema de aprobación de dispositivos usados en la instrumentación sísmica ordenado; c) permite la posibilidad de que el gobierno municipal tenga participación en todos los aspectos de la administración del monitoreo sísmico (NSR-10, 2010); y en el aspecto geológico, parte de su territorio posee movimientos interplaca de subducción similares a los que se presentan en territorio peruano.

A continuación, para el desarrollo de la comparación entre la normativa colombiana y la guía de instrumentación sísmica del USGS, en las siguientes tablas de comparación, se incluyen los

aspectos más importantes tanto de la norma colombiana como el punto de vista de las guías internacionales respecto a cada aspecto. De esta manera se busca ordenar y dirigir la comparación hacia la mejora de la normativa de instrumentación sísmica en general. En caso se requiera mayor información respecto a cada guía internacional o sobre la norma de diseño sismorresistente de Colombia, se sugiere la revisión de estos documentos completos para que toda la magnitud de estos pueda ser comprendido. En primer lugar, en la tabla 3.9. se compararon los requisitos de tipo y altura de edificio requeridos por la normativa colombiana y las disposiciones indicadas por las guías internacionales.

Tabla 3. 9. Comparación de aspectos de tipo y altura de edificio en la norma colombiana y las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios

<b>Capítulo A.11 “Instrumentación Sísmica” del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10</b>	<b>Guías internacionales de Instrumentación sísmica</b>																							
-No indica un tipo de edificación en específico, ni tampoco el uso o función de la estructura.	-Indica que, existen dos factores necesarios para la selección de las edificaciones a instrumentar: a) la localización de la edificación; y b) el tipo de edificio (NERA, 2010-2014).																							
-Indica que toda edificación a partir de 20 000 m2 de área construida ubicada en una zona de amenaza sísmica alta debe ser instrumentada.	-Recomienda instrumentar edificios en zonas con alto peligro sísmico (NERA, 2010-2014).																							
-Indica la relación descrita en la siguiente tabla entre el número de pisos y la cantidad de instrumentos.	-Recomienda que se instrumenten edificios altos en zonas más alejadas a fallas geográficas y edificios pequeños en zonas cercanas. Esto debido a la atenuación de las ondas y a la proporción entre la altura de la edificación y su periodo fundamental (NERA, 2010-2014).																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pisos</th> <th>Cantidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3-10</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>11-20</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>21- más</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	Pisos	Cantidad	3-10	1	11-20	2	21- más	3	-Indica que el tipo de instrumentación con solo 3 instrumentos no asegura la suficiente cantidad de datos para realizar un cambio significativo en el modelo estructural (Celebi, 2000).															
Pisos	Cantidad																							
3-10	1																							
11-20	2																							
21- más	3																							
-Indica que toda edificación a partir de 30 000 m2 de área construida ubicada en una zona de amenaza sísmica intermedia debe ser instrumentada.	-Indica que un mínimo de 12 acelerómetros será necesario para registrar la respuesta predominante de la estructura descrita por la participación de sus cuatro primeros modos (Celebi, 2000).																							
-Indica la relación descrita en la siguiente tabla entre el número de pisos y la cantidad de instrumentos.	-En la guía de instrumentación de COSMOS se indican los siguientes números de instrumentos en función al número de pisos de la estructura (COSMOS, 2005).																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pisos</th> <th>Cantidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5-15</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>16-25</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>25- más</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	Pisos	Cantidad	5-15	1	16-25	2	25- más	3	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pisos</th> <th>Número mínimo</th> <th>Número recomendado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6-10</td> <td>12</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>11-20</td> <td>15</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>21-30</td> <td>21</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>31-50</td> <td>24</td> <td>30</td> </tr> </tbody> </table>	Pisos	Número mínimo	Número recomendado	6-10	12	15	11-20	15	19	21-30	21	26	31-50	24	30
Pisos	Cantidad																							
5-15	1																							
16-25	2																							
25- más	3																							
Pisos	Número mínimo	Número recomendado																						
6-10	12	15																						
11-20	15	19																						
21-30	21	26																						
31-50	24	30																						
-Indica la instalación un instrumento sísmico en campo abierto para conjuntos habitaciones de más de 200 unidades en zonas de amenaza sísmica alta y 300 en zonas de amenaza intermedia.																								
-Indica que en zonas de amenaza sísmica baja no es necesario instrumentar.																								

Luego, como se muestra en la tabla 3.10., se procedió con la comparación de las disposiciones para la localización de los instrumentos de monitoreo sísmico. En este caso, se observa que la normativa colombiana ya define una determinada localización de los equipos, en comparación con lo dispuesto en las guías, donde se definen procedimientos que se deben realizar en cada edificación a fin de definir la localización y cantidad de instrumentos a usarse.

Tabla 3. 10. Comparación de los aspectos de localización de instrumentos en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios

Capítulo A.11 “Instrumentación Sísmica” del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10	Guías internacionales de Instrumentación sísmica										
-Indica que la responsabilidad de la localización de los instrumentos recae en el ingeniero que realice el diseño estructural del proyecto. -Indica las siguientes localizaciones dentro de la estructura y en campo abierto cercano.	-Indica que se deberá pasar por los siguientes procedimientos para que se defina la localización de los instrumentos (Celebi, 2000):										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Procedimientos</th> <th>Descripción</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Recopilación de datos de la estructura</td> <td>Comprende: -Planos de las distintas especialidades. -Memoria de cálculo de la estructura. -Análisis dinámicos del modelo estructural.</td> </tr> <tr> <td>Diseño del esquema de instrumentación</td> <td>Consiste en determinar las ubicaciones de los transductores que definirán adecuadamente la respuesta de la estructura durante evento sísmico de moderado a fuerte.</td> </tr> <tr> <td>Verificación in situ (para edificios existentes)</td> <td>Un equipo conformado por el ingeniero proyectista, el dueño de la edificación y un especialista en instalaciones eléctricas realizará la verificación final de las zonas donde se ubicarán los instrumentos.</td> </tr> </tbody> </table>	Procedimientos	Descripción	Recopilación de datos de la estructura	Comprende: -Planos de las distintas especialidades. -Memoria de cálculo de la estructura. -Análisis dinámicos del modelo estructural.	Diseño del esquema de instrumentación	Consiste en determinar las ubicaciones de los transductores que definirán adecuadamente la respuesta de la estructura durante evento sísmico de moderado a fuerte.	Verificación in situ (para edificios existentes)	Un equipo conformado por el ingeniero proyectista, el dueño de la edificación y un especialista en instalaciones eléctricas realizará la verificación final de las zonas donde se ubicarán los instrumentos.		
Procedimientos	Descripción										
Recopilación de datos de la estructura	Comprende: -Planos de las distintas especialidades. -Memoria de cálculo de la estructura. -Análisis dinámicos del modelo estructural.										
Diseño del esquema de instrumentación	Consiste en determinar las ubicaciones de los transductores que definirán adecuadamente la respuesta de la estructura durante evento sísmico de moderado a fuerte.										
Verificación in situ (para edificios existentes)	Un equipo conformado por el ingeniero proyectista, el dueño de la edificación y un especialista en instalaciones eléctricas realizará la verificación final de las zonas donde se ubicarán los instrumentos.										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Denominación</th> <th>Localización</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Instrumentación en la altura</td> <td>(Mínimo 3 instrumentos) -Base (sensor triaxial) -Media altura (sensores horizontales ortogonales) -Nivel superior (sensores horizontales ortogonales)</td> </tr> <tr> <td>Instrumento único en la edificación</td> <td>Base (sensor triaxial)</td> </tr> <tr> <td>Instrumento de campo abierto</td> <td>1 instrumento sobre el terreno a una distancia mínima igual a la altura del edificio instrumentado. (no especifica datos del sensor)</td> </tr> <tr> <td>Arreglo de instrumentos</td> <td>Incluye a todas las ubicaciones antes mencionadas.</td> </tr> </tbody> </table>	Denominación	Localización	Instrumentación en la altura	(Mínimo 3 instrumentos) -Base (sensor triaxial) -Media altura (sensores horizontales ortogonales) -Nivel superior (sensores horizontales ortogonales)	Instrumento único en la edificación	Base (sensor triaxial)	Instrumento de campo abierto	1 instrumento sobre el terreno a una distancia mínima igual a la altura del edificio instrumentado. (no especifica datos del sensor)	Arreglo de instrumentos	Incluye a todas las ubicaciones antes mencionadas.	
Denominación	Localización										
Instrumentación en la altura	(Mínimo 3 instrumentos) -Base (sensor triaxial) -Media altura (sensores horizontales ortogonales) -Nivel superior (sensores horizontales ortogonales)										
Instrumento único en la edificación	Base (sensor triaxial)										
Instrumento de campo abierto	1 instrumento sobre el terreno a una distancia mínima igual a la altura del edificio instrumentado. (no especifica datos del sensor)										
Arreglo de instrumentos	Incluye a todas las ubicaciones antes mencionadas.										
-Indica que para toda edificación a instrumentar se debe realizar un estudio geotécnico.											

Se prosigue con la tabla 3.11., donde se compararon las disposiciones referidas a las características de los espacios donde se ubicarán los equipos de monitoreo sísmico dentro y fuera de la estructura. Para este aspecto, se verificó que la normativa colombiana es bastante específica en las especificaciones técnicas de la zona donde se deben instalar los equipos de monitoreo sísmico y

que las guías de instrumentación revisadas solo mencionan aspectos generales a tomar en cuenta para la instalación de estos sensores de aceleración.

Tabla 3. 11. Comparación de los aspectos del espacio de instalación de instrumentos en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios

Capítulo A.11 “Instrumentación Sísmica” del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10	Guías internacionales de Instrumentación sísmica
-Indica que, ante el incumplimiento de la localización de instrumentos en un proyecto enmarcado por el presente reglamento, el estado no expedirá su licencia de construcción. -Indica que el espacio físico donde se coloque instrumentos debe cumplir lo siguiente	- Sugiere que se instrumenten edificios estatales como prioridad, ya que el Estado puede disponer de la instalación de estos equipos sin requerir permisos y evitando futuros litigios (Celebi, 2000). -Indica que el espacio físico donde se coloque instrumentos debe cumplir lo siguiente (Celebi, 2000):

Características	Descripción	Características	Descripción
Dimensiones mínimas	$A \leq 2 \text{ m}^2$ Dimensión mínima en planta= 1 m. Altura libre mínima= 2 m.	General	Los tres sensores del sótano o de la planta baja, deben instalarse horizontal y/o verticalmente sobre la losa del sótano y/o la pared de concreto.
Materiales	Piso de concreto con espesor mínimo de 15 cm., para permitir anclaje de instrumento.		Todos los demás sensores deben montarse horizontalmente en la parte inferior del sistema de piso de la plataforma de metal.
Instalaciones eléctricas	Tomacorriente doble Breaker de 15 amperios Salida de iluminación con interruptor. Tubo de PVC de 1” para realizar conexiones eléctricas entre instrumentos.		El contratista deberá instalar la red de tuberías específicas para la conducción de los cables de los sensores y dispositivos de control de tiempo y GPS.
Aislamiento	Alejado de zonas de alta circulación Espacio cerrado, con ventilación adecuada.		Cables y tuberías Indica que el contratista determinará y coordinará la localización de las tuberías de elevación para los sensores y equipos GPS.
		Fuente de energía y telecomunicaciones	El contratista deberá proveer de conexiones eléctricas (tomacorrientes) a no más de 30cm. del instrumento.



Otro aspecto a comparar se muestra en la tabla 3.12., donde se revisaron las disposiciones referentes a los tipos de sensores requeridos para la instrumentación, donde se observó que la normativa colombiana define al acelerógrafo digital como único tipo de sensor autorizado para instrumentar edificios. Por otro lado, se observó en las guías de instrumentación que definen especificaciones técnicas mínimas para el uso de dispositivos para el monitoreo de edificaciones y que sugieren el uso de acelerómetros.

Tabla 3. 12. Comparación de los tipos de sensores requeridos en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios

Capítulo A.11 “Instrumentación Sísmica” del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10	Guías internacionales de Instrumentación sísmica
-Indica que en la instrumentación sísmica de edificaciones deben emplearse acelerógrafos digitales de movimiento fuerte.	-Indica que los acelerómetros son generalmente los sensores más eficientes para el monitoreo de movimientos fuertes, pero otros sensores pueden ser útiles en determinadas situaciones (COSMOS, 2005).
-Indica que las especificaciones técnicas mínimas para la aprobación de los instrumentos serán definidas por el SGC.	-Indica las especificaciones técnicas mínimas para la aprobación de los instrumentos (COSMOS, 2005).
-Indica el desarrollo de un listado de equipos aprobados.	-Indica el desarrollo de una compilación de toda la información de los equipos instalados, para que, en caso ocurra un evento sísmico y se bloqueen los ingresos o no se tenga definido el estado de la estructura, se pueda administrar la instrumentación sísmica y sus registros eficientemente de forma remota (COSMOS, 2005).

En la tabla 3.13. se verificaron las disposiciones referentes a la entidad encargada de la supervisión de la instrumentación sísmica. En el caso de la normativa colombiana, se observó que se designa al Servicio Geológico Colombiano (SGC) como ente competente para la supervisión de las redes de acelerógrafos y la aprobación de dispositivos de monitoreo sísmico usados en la instrumentación de edificios. Asimismo, esta normativa extiende la responsabilidad hacia los gobiernos locales y regionales que así lo requieran dependiendo del cumplimiento de determinados requisitos. Asimismo, por el lado de las guías internacionales, se definen tipos de programas estatales y privados que permiten una supervisión masiva de los edificios instrumentados dentro de un área de acción.

Tabla 3. 13. Comparación de aspectos definidos para la entidad supervisora de la instrumentación en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios

Capítulo A.11 “Instrumentación Sísmica” del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10	Guías internacionales de Instrumentación sísmica								
-Indica que, el actualmente denominado Servicio Geológico Colombiano (SGC), es el ente encargado de operar la Red Nacional de Acelerógrafos y también de aprobar los tipos de instrumentos a colocarse en las edificaciones.	-Indica que para la supervisión de la instrumentación se pueden tener 3 tipos de programas (Celebi, 2000):								
-Indica que el SGC deberá mantener una lista de los tipos de instrumentos que pueden ser utilizados, así como de sus especificaciones técnicas mínimas.	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="828 472 1088 504">Instituciones/ Programas</th> <th data-bbox="1088 472 1443 504">Descripción</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="828 504 1088 714">Programas federales</td> <td data-bbox="1088 504 1443 714">Se refiere a programas nacionales de monitoreo sísmico que podrán coordinar, instalar, mantener y procesar registros adquiridos por otras instituciones tanto públicas como privadas.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="828 714 1088 924">Programas estatales</td> <td data-bbox="1088 714 1443 924">Se refiere a programas locales que puedan coordinar, instalar, mantener y procesar registros adquiridos por otras instituciones tanto públicas como privadas en una región en específico.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="828 924 1088 1140">Instituciones privadas</td> <td data-bbox="1088 924 1443 1140">Se refiere a empresas que poseen sus propios programas de instrumentación. En este caso la información que recaban no suele estar a disposición del público en general.</td> </tr> </tbody> </table>	Instituciones/ Programas	Descripción	Programas federales	Se refiere a programas nacionales de monitoreo sísmico que podrán coordinar, instalar, mantener y procesar registros adquiridos por otras instituciones tanto públicas como privadas.	Programas estatales	Se refiere a programas locales que puedan coordinar, instalar, mantener y procesar registros adquiridos por otras instituciones tanto públicas como privadas en una región en específico.	Instituciones privadas	Se refiere a empresas que poseen sus propios programas de instrumentación. En este caso la información que recaban no suele estar a disposición del público en general.
Instituciones/ Programas	Descripción								
Programas federales	Se refiere a programas nacionales de monitoreo sísmico que podrán coordinar, instalar, mantener y procesar registros adquiridos por otras instituciones tanto públicas como privadas.								
Programas estatales	Se refiere a programas locales que puedan coordinar, instalar, mantener y procesar registros adquiridos por otras instituciones tanto públicas como privadas en una región en específico.								
Instituciones privadas	Se refiere a empresas que poseen sus propios programas de instrumentación. En este caso la información que recaban no suele estar a disposición del público en general.								
-Indica que la entidad municipal o distrital puede requerir al SGC la potestad de administrar los instrumentos instalados en edificaciones ubicadas dentro de su jurisdicción, si y solo si ha cumplido con la presentación previa del plan de instalación, operación y mantenimiento de una red de acelerógrafos de movimientos fuertes.									

Para el aspecto referente a la gestión de la instrumentación, en la tabla 3.14. se presentan los costos y los responsables de asumir estos, tanto para la normativa colombiana, como por la guía de instrumentación del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Celebi, 2000). En este caso, se verificó que la normativa colombiana requiere al dueño de la edificación a instrumentar la responsabilidad de la compra de todos los equipos requeridos para la instalación de los acelerógrafos digitales en la edificación. De la misma forma, la guía internacional indica que una práctica usual para la gestión de la instrumentación transferir la responsabilidad de la compra de los equipos necesarios para la implementación de la instrumentación sísmica de la edificación.

Tabla 3. 14. Comparación de aspectos definidos para la gestión de la instrumentación en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios

Capítulo A.11 “Instrumentación Sísmica” del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10		Guías internacionales de Instrumentación sísmica	
-Indica que el SGC es el encargado de aprobar los instrumentos usados para la instrumentación sísmica de edificios en Colombia.		-Indica que el costo de los instrumentos deberá ser distribuido de la siguiente manera (Celebi, 2000):	
-Indica que el costo de los instrumentos deberá ser distribuido de la siguiente manera:			
Denominación	Descripción	Denominación	Descripción
Costo de los instrumentos	Serán adquiridos por la persona, natural o jurídica, a cuyo nombre se expida la licencia de construcción. El SGC podrá instalar más instrumentos si así lo viera conveniente.	Costo de los instrumentos	Serán adquiridos por el propietario de la edificación. En caso de incluir más instrumentos, estos deben ser asumidos por la entidad administradora de instrumentación sísmica.
Costo de instalación	Será costeado por la persona, natural o jurídica, a cuyo nombre se expida la licencia de construcción.	Costo de instalación	Serán adquiridos por el propietario de la edificación.
Costos de los espacios para instrumentación	Estarán a cargo del propietario de la edificación.	Costos de los espacios para instrumentación	Serán adquiridos por el propietario de la edificación.
Costo del mantenimiento de los instrumentos	Estará a cargo del propietario de la edificación.	Costo del mantenimiento de los instrumentos	Estará a cargo del propietario de la edificación o en su defecto del ente o programa encargado de la administración de registros en el país.
Costo de la vigilancia del instrumento	Estará a cargo del propietario de la edificación.	Costo de la vigilancia del instrumento	Estará a cargo del propietario de la edificación.

Finalmente, en la tabla 3.15. se procedió con la comparación de las disposiciones referentes a la gestión de la información registrada por los sensores de aceleración instalados en los edificios. En este caso, la normativa colombiana requiere al administrador de la edificación que envíe la información recopilada al Servicio Geológico Colombiano (SGC) como entidad supervisora de la instrumentación sísmica de edificios. Asimismo, se verificó que las guías internacionales apoyan esta disposición y añade que los programas de monitoreo deberían contar también con esta potestad.

Tabla 3. 15. Comparación de aspectos definidos para la gestión de la información en la norma colombiana y en las guías internacionales de instrumentación sísmica de edificios

Capítulo A.11 “Instrumentación Sísmica” del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10	Guías internacionales de Instrumentación sísmica
Indica que los dueños de los edificios instrumentados deberán entregar una copia de todos los datos de eventos sísmicos registrados por los instrumentos al SGC o en su defecto al municipio que tenga a cargo la administración de los instrumentos de la edificación.	Indica que la gestión de la información será desarrollada por la entidad encargada del registro de señales sísmicas de cada país. Asimismo, esta información podrá ser recopilada por programas de monitoreo sísmico de cada región y en determinados casos la información puede estar libre disposición de la ciudadanía (ANSS, 2005).

Como se acaba de verificar en la comparación, se pueden incluir mayores alcances respecto a las buenas prácticas de la instrumentación sísmica de edificios dentro de la normativa sísmica referida a este tópico. Esto con el objetivo de desarrollar mayores estudios sobre el comportamiento de las estructuras, ya que, según la comparación previa, con la instrumentación que se indica actualmente en la mayoría de la normativa internacional no se obtendría la cantidad suficiente de datos para desarrollar análisis más específicos del comportamiento de las estructuras (Celebi, 2000). Asimismo, la determinación de los objetivos de la instrumentación sísmica dentro de la normativa es de vital importancia para el progresivo desarrollo del capítulo de instrumentación, ya que mediante su determinación clara y con visión a futuro se ayudará al desarrollo constante y a la adecuación a la realidad de cada país de esta normativa.

### 3.3.2. Propuesta de la estructura normativa del capítulo de instrumentación sísmica en el Perú

La instrumentación sísmica de edificios se reguló en el Perú a partir de la norma técnica peruana de diseño sismorresistente E.030 publicada en el año 2006 mediante Decreto Supremo N°011-2006-VIVIENDA. De ahí en adelante, todo proyecto de edificación estatal o privada que no tuvo aprobada su viabilidad hasta antes de la fecha de la entrada en vigencia de dicha norma, tuvo que adecuar su diseño a lo dispuesto en esta normativa. En el caso de la instrumentación sísmica, todo


proyecto de edificación que cumplió con los requisitos para su instrumentación tuvo que adecuarse a los lineamientos definidos por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) para la implementación de las estaciones acelerométricas (IGP, 2011).

Esta normativa fue modificándose sucesivamente mediante los Decretos Supremos N° 002-2014-VIVIENDA y N° 003-2016-VIVIENDA. Para el año 2018, una nueva modificación a la normativa de diseño sismorresistente se hizo presente mediante la Resolución Ministerial N°355-2018-VIVIENDA. En este caso, el capítulo de instrumentación sísmica no sufrió mayor cambio del que se implementó en la norma del 2014, por lo que el IGP prosiguió con la supervisión de la instrumentación y con la recopilación de los registros que ya se estaban generando en las edificaciones que entraron en funcionamiento (IGP, 2020). Actualmente, el IGP posee una plataforma web en la que se archivan los datos de los registros, los cuales son recolectados mensualmente para su posterior análisis y procesamiento. Asimismo, toda la información que se obtiene de estos registros es puesta a disposición del público en general junto con un reporte que contiene el acelerograma de la señal sísmica y las gráficas de aceleración espectral en las tres direcciones X, Y y Z (IGP, 2020).

En la tabla 3.16. se presenta la estructura actual del capítulo de instrumentación sísmica de la norma técnica peruana de diseño sismorresistente E.030 (2018), la misma que será anexada al presente trabajo (anexo A). Aquí se puede observar que cuenta con cuatro numerales que definen los requisitos que deberán cumplir los sistemas de instrumentación en este territorio. Asimismo, se menciona el nombre de la Entidad encargada de la supervisión de los sistemas de instrumentación sísmica en edificios. Cabe indicar que la guía con las especificaciones técnicas

mínimas requeridas para los equipos de monitoreo sísmico se adjuntará dentro de los anexos de la presente tesis (anexo B).

Tabla 3. 16. Normativa de instrumentación sísmica de Perú

País/Norma	Zonas Sísmicas	Cap. IX de la Norma Técnica E.030	Desarrollo	Entidad Supervisora						
<p><b>Perú</b></p> <p><b>I.Norma:</b> Norma Técnica E.030 "Diseño Sismorresistente"</p> <p><b>II.Guía estatal de especificaciones técnicas mínima:</b> Especificaciones Técnicas para Registradores Acelerométricos y requisitos mínimos para su instalación, operación y mantenimiento.</p> <p>Fuente: <a href="https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps">https://www.dlupal.com/en/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps</a> (último acceso el 25 de octubre de 2020).</p>	 <p>Zona sísmica: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightblue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightcoral; border: 1px solid black;"></span></p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p><b>Leyenda:</b>  <b>A.T.:</b> área techada  <b>H:</b> Altura de edificio.  <b>Cant. Mín.:</b> Cantidad mínima de estaciones acelerométricas.  <b>Nivel:</b> ubicación de los dispositivos.  <b>Tipo:</b> Uso dado a la edificación.</p> </div>	<p><b>9.1. Estaciones Acelerométricas</b></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Requisitos de Tipo/Altura de Edificio</th> <th>Localización de instrumento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A.T.: &gt;10 000 m2.</td> <td>Cant. Min.: 1 Nivel: terreno natural o base.</td> </tr> <tr> <td>H: &gt; 20 pisos o con disipación sísmica o aislamiento en la base.</td> <td>Cant. Min.: 2 Nivel: base y azotea o techo.</td> </tr> </tbody> </table>	Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Localización de instrumento	A.T.: >10 000 m2.	Cant. Min.: 1 Nivel: terreno natural o base.	H: > 20 pisos o con disipación sísmica o aislamiento en la base.	Cant. Min.: 2 Nivel: base y azotea o techo.	<p>Instituto Geofísico del Perú (IGP)</p>
		Requisitos de Tipo/Altura de Edificio	Localización de instrumento							
		A.T.: >10 000 m2.	Cant. Min.: 1 Nivel: terreno natural o base.							
		H: > 20 pisos o con disipación sísmica o aislamiento en la base.	Cant. Min.: 2 Nivel: base y azotea o techo.							
<p><b>9.2. Requisitos para su ubicación</b></p>	<p><b>Características:</b></p> <p>a) Acceso fácil para su <u>mantenimiento.</u></p> <p>b) Apropia da iluminación, ventilación y suministro de energía eléctrica estabilizada.</p> <p>c) Alejada de fuentes generadoras de cualquier tipo de ruido antrópico.</p> <p>La estación se debe instalar en un área que cumpla con los siguientes aspectos:</p>									
<p><b>9.3. Mantenimiento</b></p>	<p>El mantenimiento deberá ser provisto por los propietarios del edificio, bajo control de la municipalidad y supervisado por el Instituto Geofísico del Perú. La responsabilidad del propietario se mantendrá por 10 años.</p>									
<p><b>9.4. Disponibilidad de datos</b></p>	<p>La información registrada por los instrumentos será integrada al Centro Nacional de Datos Geofísicos y se encontrará a disposición del público en general.</p>									

De todo lo revisado en la presente tesis referente a normativa internacional y guías de instrumentación sísmica, es preciso desarrollar un ejercicio final en el que se plasme todo el estudio realizado en forma de sugerencias dirigidas a la búsqueda de la mejora de la presente normativa peruana.

En primer lugar, se sugiere incluir dentro de los objetivos de la norma de diseño sismorresistente aspectos referentes al logro a largo plazo de mejoras en la instrumentación sísmica como mecanismo de mejora de la norma sísmica. En este caso, tal y como se revisó en la normativa de instrumentación sísmica de Colombia, la definición de objetivos claros permite dirigir la instrumentación hacia un desarrollo más ordenado. Por otro lado, aspectos referentes a la promoción de innovación y apoyo a trabajos de investigación sobre instrumentación sísmica de edificios mediante convenios con Entidades encargadas de estos rubros como Concytec, SENCICO y universidades es un aspecto también importante para considerar dentro de esta normativa.

A continuación, en la tabla 3.17. se presenta un esquema con las sugerencias que resultaron del estudio realizado en la presente tesis con la finalidad de fomentar el desarrollo de estándares de calidad en la instrumentación sísmica y que pueda ser aplicada en la obtención de distintos tipos de información referente al comportamiento de las edificaciones en el Perú. Asimismo, se incluye en el Anexo B las recomendaciones del IGP en relación a las características de los instrumentos a utilizar (IGP, 2011).

Tabla 3. 17. Aspectos sugeridos para la inclusión en el Capítulo IX de la Norma de Diseño Sismorresistente E.030 o en la Guía de Especificaciones Técnicas del IGP.

1. Requisitos generales
<p>a. Definir requisitos para instrumentación de edificaciones patrimoniales.</p> <p><b>En este caso, debido a la complejidad del monitoreo sísmico de este tipo de estructuras, se sugiere la generación de una guía específica para instrumentación de edificaciones patrimoniales, con el fin de verificar el estado de estas estructuras para su mantenimiento o reforzamiento.</b></p>
2. Localización de los instrumentos
<p>a. Priorizar la instrumentación de la estructura</p> <p><b>En este caso, se sugiere que se inicie un cambio de paradigma en el monitoreo de eventos sísmicos, para darle mayor protagonismo a la instrumentación de edificios, ya que de esta manera se generará un mayor desarrollo en la tecnología sísmica en el análisis del desempeño real de las edificaciones.</b></p> <p>b. Especificar la localización de las estaciones acelerométricas en campo libre.</p> <p><b>En este caso, según los lineamientos de las guías internacionales, la estación acelerométrica de campo libre debe tener una localización definida para evitar las lecturas amplificadas por el comportamiento de las edificaciones contiguas. Para esto, se sugiere la especificación de la distancia mínima de la estación de campo abierto en relación a la ubicación de la estructura.</b></p> <p>c. Localización de sensores</p> <p><b>En este caso, se sugiere que la norma pida, como mínimo, la colocación de un sensor triaxial en la base y otro en el último nivel del edificio para casos de edificios de más de 10,000 m<sup>2</sup>.</b></p> <p>d. Definir la cantidad de dispositivos para los distintos arreglos estándar de estaciones acelerométricas.</p> <p><b>En este caso, se sugiere un mayor análisis para definir la cantidad de dispositivos instalados en las edificaciones, en función al objetivo que se busque con su instrumentación.</b></p>
3. Características del espacio donde se colocan los instrumentos y la central de adquisición de datos
<p>a. Definir las características mínimas del espacio donde se coloca la estación acelerométrica. Incluir esquemas o planos típicos para su ubicación.</p> <p><b>En este punto, se sugiere que se elimine cualquier requerimiento que indique un metraje mínimo para el lugar donde se ubica la central de adquisición. Asimismo, se debe especificar que los equipos deben ser colocados lejos de fuentes de vibración permanente. Por último, se deben indicar los puntos de salida para conectividad de datos y corriente eléctrica al lugar donde se instalará la central de adquisición.</b></p>
4. Tipos de sensores requeridos
<p>a. Definir un formato que contenga todas las especificaciones técnicas mínimas para la evaluación de los dispositivos presentados por el dueño del proyecto.</p> <p><b>En este punto, se sugiere desarrollar un “checklist” actualizado para la evaluación de los equipos que se instalará en la edificación. Asimismo, se debe hacer referencia a una lista pública de los equipos aprobados para que los futuros dueños de estructuras tengan información previa sobre los tipos de instrumentos.</b></p>
5. Entidad encargada de la supervisión
<p>a. Definir las competencias de los gobiernos regionales y locales en los aspectos de supervisión y mantenimiento de estaciones acelerométricas.</p> <p><b>En este caso, se recomienda el desarrollo de lineamientos que posibiliten el traspase de responsabilidad de la supervisión de los instrumentos a los gobiernos regionales y locales que cuenten con la capacidad técnica para que su Gerencia de Desastres realice las verificaciones del estado de los equipos periódicamente. De esta manera, se desarrolla la competencia de las entidades en temas referentes a instrumentación sísmica de edificios.</b></p>
6. Gestión de la instrumentación
<p>a. Definir las pruebas necesarias para la puesta en operación de las estaciones acelerométricas y la responsabilidad del propietario de la edificación.</p> <p><b>En este punto, se recomienda definir los lineamientos de las pruebas de funcionamiento de los equipos para la puesta en operación de la estación acelerométrica. Asimismo, se debe definir la responsabilidad del propietario, quién será el responsable de cuidar y hacer los mantenimientos a los equipos sísmicos.</b></p>
7. Gestión de la información
<p>a. Definir la necesidad de la formación de un programa de red de monitoreo de edificaciones nacional.</p> <p><b>En este caso, se sugiere la creación de una red de monitoreo específico para edificaciones. De esta manera, se pueden desarrollar nuevas aplicaciones para la instrumentación como es la alerta temprana o el análisis de salud estructural en tiempo real.</b></p>



### 3.3. Conclusiones

La importancia del monitoreo sísmico de edificio radica en que su desarrollo posibilitará el mejoramiento de los espectros de diseño en post de la construcción de edificaciones que puedan resistir las solicitaciones generada por los sismos sin llegar al colapso.

La claridad de los objetivos planteados para la instrumentación sísmica dentro de la normativa de un país es de vital importancia para su progresivo desarrollo. De este modo se tienen explícitamente determinadas las necesidades para las que se requieren este tipo de mediciones y lo que se desea lograr en un horizonte cercano, intermedio y lejano.

Dentro de la normativa internacional revisada en la presente tesis no se observaron mayores avances referente a la localización de los equipos de monitoreo sísmico dentro de la estructura según el tipo de objetivo buscado ni los tipos de estudios que se realizarán con los datos registrados. En este caso, solo se observaron como variables a la altura de la edificación, su área construida y en algunos casos la zona sísmica en la que se ubica la estructura.

Los capítulos de instrumentación sísmica revisados en la normativa internacional contemplan parámetros básicos de instrumentación sísmica, por lo que las guías o especificaciones técnicas estatales son documentos primordiales para desarrollar con mayor detalle los lineamientos para una adecuada instrumentación de los edificios. Asimismo, estos documentos permiten la estandarización de las especificaciones técnicas de los dispositivos de monitoreo sísmico y su actualización constante, por lo que le permite a la entidad supervisora adecuar los requerimientos mínimos según las características de los más modernos equipos utilizados para instrumentación sísmica en el mercado actual.

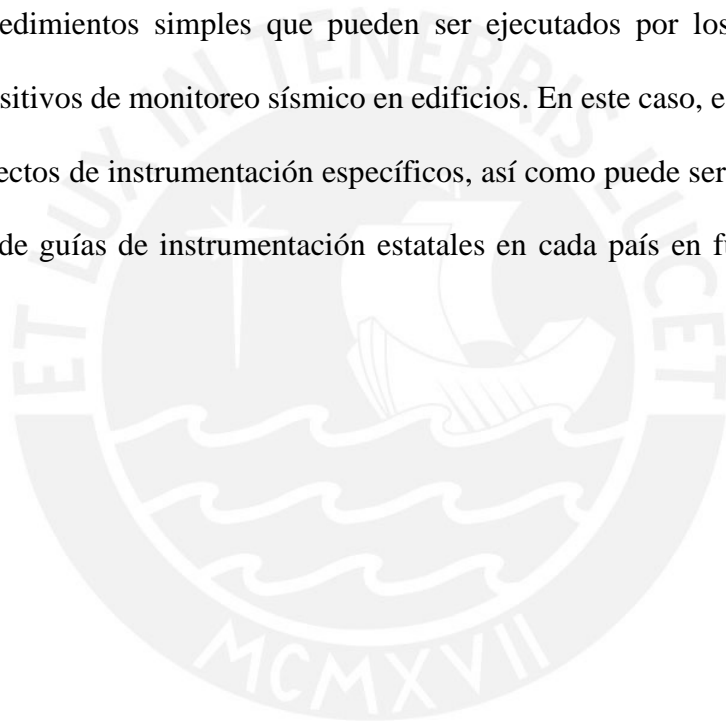
De los países de la región que cuentan con normativa de instrumentación sísmica, la normativa colombiana es la que mejor se ha implementado desde su promulgación. Esto se sustenta en la definición de sus objetivos referentes al uso de la instrumentación sísmica. Asimismo, posee una estructura normativa que recoge los lineamientos principales para una correcta instrumentación. Esta también se apoya en la guía estatal de especificaciones técnicas para desarrollar la evaluación de los equipos de monitoreo y la construcción de la estructura que los albergará. En la tabla 3.18. se resumen las principales características que se observaron en la normativa internacional referida a la instrumentación sísmica de edificios. En este caso, se indica qué aspectos son incluidos en cada normativa y cuales por el momento no son abordados y que están pendientes de un mayor desarrollo en futuras actualizaciones de dichas normas.

Tabla 3. 18. Resumen de la normativa internacional para la instrumentación de edificaciones

ASPECTOS INCLUIDOS EN LA NORMATIVA INTERNACIONAL PARA LA INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS						
País de la Norma	Denominación de la normativa de diseño sísmico	Referente al sistema	Número mínimo de sensores	Referente a la instalación	Referente a la conexión remota permanente	Referente a la Gestión de la Información Adquirida
Colombia	Capítulo A-11 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente (2010)	✓	✓	✓	X	X
Venezuela	Norma Venezolana de Diseño de edificaciones sismorresistentes (2001)	X	✓	✓	X	✓
Chile	Norma Chilena Oficial NCh 433.Of96 Diseño Sísmico de edificios (2009)	X	X	X	X	X
Costa Rica	Código Sísmico de Costa Rica (2010)	X	✓	X	X	✓
Turquía	Código de diseño sísmico de Turquía (2018)	X	✓	✓	X	✓
Estados Unidos	California Building Code (2013)	✓	✓	✓	X	✓
Filipinas	National Structural Code of the Phillippines (2013)	✓	✓	✓	X	X

En la actualización que recientemente emitió el IGP referente a la guía de especificaciones técnicas para la instrumentación sísmica se verificó un mayor desarrollo de los lineamientos establecidos para la instrumentación de edificios en el Perú. Asimismo, según el análisis final del presente capítulo, todavía existen aspectos a desarrollar e incluir dentro de la normativa para un desarrollo más completo de estos lineamientos.

Las guías internacionales permiten la recopilación de diferentes investigaciones con la finalidad de desarrollar procedimientos simples que pueden ser ejecutados por los involucrados en la instalación de dispositivos de monitoreo sísmico en edificios. En este caso, estas guías pueden ser aplicadas para proyectos de instrumentación específicos, así como puede ser una fuente de apoyo para la generación de guías de instrumentación estatales en cada país en función a sus propias necesidades.



# **Capítulo 4. Implementación de una herramienta de procesamiento de señales sísmicas en LabVIEW**

## **Resumen**

En este capítulo se presentará el desarrollo de un programa denominado SISMO PUCP V.1.0., que permite el cálculo de los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración de señales sísmicas registradas en edificaciones instrumentadas en el Perú. Asimismo, permite la creación automática de un reporte con la información necesaria para la caracterización del registro. El capítulo inicia con una breve introducción referente al software de programación LabVIEW y a la fuente de los registros recopilados para la prueba del funcionamiento del programa desarrollado, para luego pasar a la explicación de la implementación del programa desde el desarrollo del algoritmo hasta la interfaz final que se presentará al usuario. Luego, se desarrolla un análisis y comparación de la información obtenida a través del programa SISMO PUCP V.1.0. y un software ya existente y de uso extensivo. Para finalmente, dar paso a la verificación de los errores de estimación que determinen si el programa fue abordado con éxito y si su uso puede ser extensivo.

## 4.1.Introducción

A partir de la necesidad de generar información relevante sobre las características de un evento sísmico posterior a su ocurrencia, es que surge la necesidad del desarrollo de programas de procesamiento de datos sísmicos (Carreño, Bravo, Suárez, & Tordesillas, 1999). Este es el caso de la presente tesis, donde se desarrolló un programa en LabVIEW de procesamiento de registros acelerométricos del terreno denominado SISMO PUCP V.1.0., con el cual se generan los espectros de respuesta lineal de cualquier evento sísmico registrado en un archivo de texto. Es preciso indicar que, el objetivo de estos gráficos de valores espectrales es permitir el análisis del comportamiento de distintos tipos de edificaciones caracterizadas por su valor de periodo fundamental. De esta manera se puede verificar la zona de amplificación sísmica característica de este tipo de gráficas, donde se genera la resonancia entre el movimiento del terreno y el movimiento de respuesta de las estructuras (Crisafulli & Villafane, 2002).

“*Labview*” es un software de programación que permite desarrollar algoritmos de forma gráfica por medio de íconos y conexiones que conforman arreglos lógicos para la ejecución de procesos o el procesamiento de información. Esta herramienta es bastante utilizada en industrias para la operación de equipos electromecánicos y en el caso de la ingeniería sismológica, permite, entre otras aplicaciones, la operación de sistemas de instrumentación sísmica (Julián & Almidón, 2018).

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) cumple las funciones de asistencia y asesoramiento referente a la instalación de estaciones acelerométricas en edificios y estructuras nuevas, en cumplimiento del capítulo IX de la Norma E.030 (E-030, 2018). Asimismo, de forma mensual esta Entidad recopila los datos de los equipos para su análisis y procesamiento y se construyen espectros de

respuesta que son publicados en su página web junto con cada registro en archivo de texto (IGP, 2020). En el presente capítulo se usarán los registros obtenidos por las estaciones acelerométricas instaladas bajo supervisión del IGP en el edificio del Banco de la Nación ubicado en el distrito de San Borja en la ciudad de Lima; como insumos para la verificación de los cálculos realizados por el programa SISMO PUCP V.1.0.

## **4.2. Implementación del programa**

Este programa permite que los datos obtenidos por las estaciones sísmicas sean leídos desde carpetas específicas y procesados mediante métodos numéricos para luego generar un reporte automático que contenga las características del evento sísmico con un énfasis en el cálculo de los espectros de respuesta lineales. Este reporte contendrá los gráficos de los acelerogramas en todas las direcciones de lectura del dispositivo, así como también los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración.

Como se puede observar en la figura 4.1., la programación se dividió en tres módulos. En el *módulo 1* se generó el código para la lectura de archivos “.txt” que genera la estación sísmica desde una carpeta específica. Posteriormente, estos vectores de aceleración pasan al *módulo 2*, donde se desarrollan los cálculos discretos de la respuesta sísmica para diferentes valores de periodo mediante el método numérico de la interpolación lineal (Nigam & Jennings, 1969). Finalmente, esta información pasa al *módulo 3*, donde se distribuyen los gráficos dentro de un reporte. Este contiene la información de la estación de monitoreo sísmico, los gráficos de los acelerogramas, las aceleraciones máximas y los gráficos de los espectros de respuesta lineales.

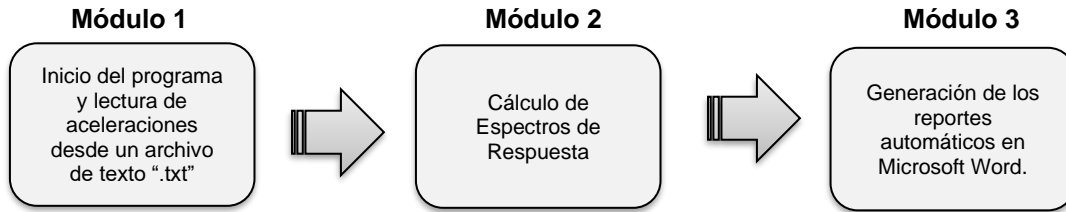


Figura 4. 1. Módulos de programación para el flujo de datos en Sismo PUCP V.1.0.

En la figura 4.2. se pueden observar los diferentes subprocesos que ocurren durante la ejecución en serie de cada módulo. Asimismo, se indica qué subproceso es necesario para la ejecución del siguiente módulo. En este caso, la lectura de las aceleraciones desde el archivo “.txt”, por un lado, permite la obtención de los acelerogramas en todas las direcciones de medición y también estos sirven como datos iniciales para el inicio del *módulo 2*. Para el caso del *módulo 3*, este precisa de las gráficas creadas en los módulos anteriores para su inclusión en el reporte del evento sísmico.

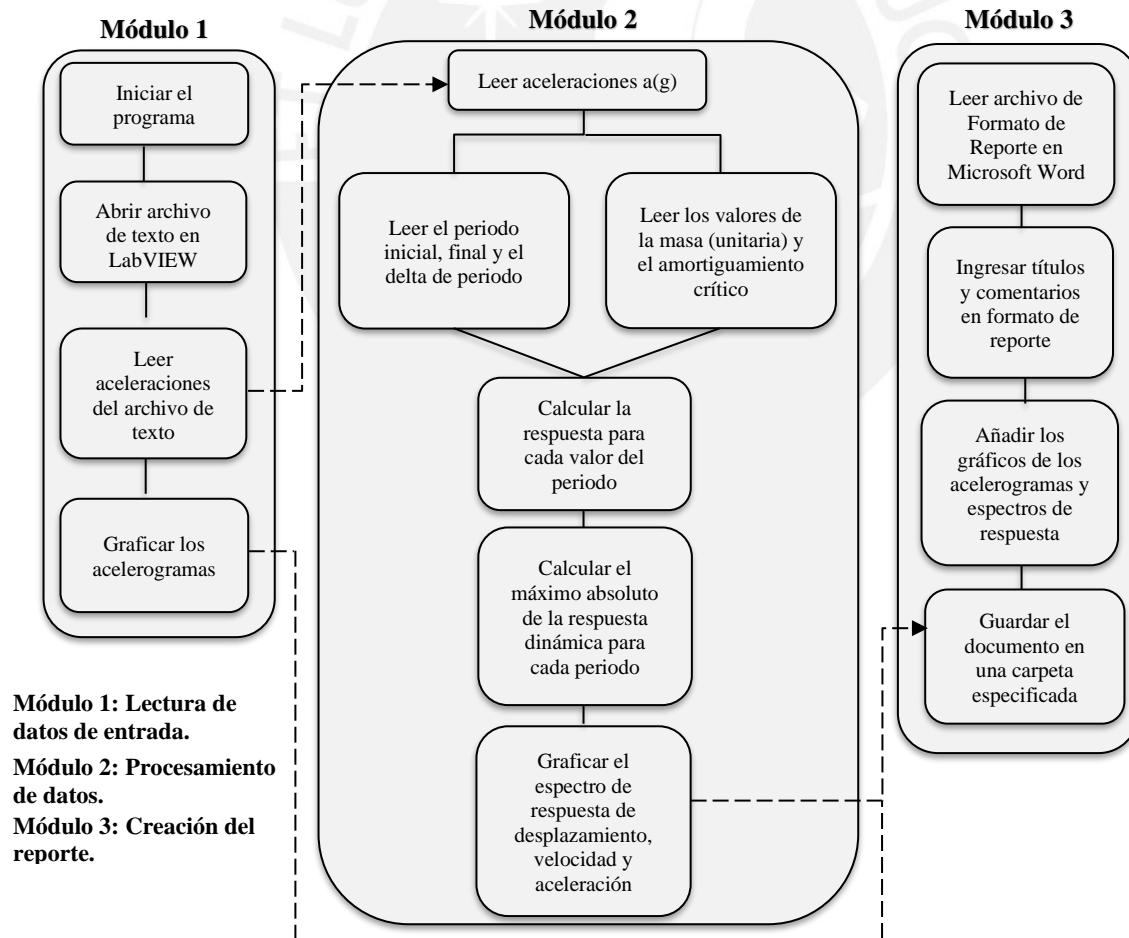


Figura 4. 2. Flujo de datos en Sismo PUCP V.1.0.

#### **4.2.1. Entorno de lectura de datos de entrada (módulo 1)**

El correcto ingreso de los datos de entrada requeridos por el programa Sismo PUCP V.1.0. es primordial para el correcto cálculo de los valores espectrales y para la inclusión de todos los componentes involucrados en la construcción del reporte final, evitando errores durante su ejecución. Estos datos deben ser ingresados antes de dar inicio al programa.

El programa inicia con la generación de los acelerogramas en las tres direcciones de registro del dispositivo total y filtrado (EW, este-oeste; NS, norte-sur; y UD, arriba-abajo). Para la construcción del gráfico de los acelerogramas se requiere del ingreso de la frecuencia de muestreo, con lo cual se obtendrá el intervalo de tiempo entre cada lectura de aceleración. Asimismo, se incluye la posibilidad de ingresar el número de canales de registro, debido a que pueden existir sensores instalados con direcciones de registro sólo en un plano.

Por otro lado, para generar los gráficos de los espectros de respuesta, se requiere del cálculo de la respuesta dinámica, por lo que se necesita de la fracción de amortiguamiento crítico; una masa asumida que permita generar la relación entre masa, rigidez y periodo; definir el valor de periodo inicial y final; y el intervalo de periodo que definirá el nivel de precisión de las gráficas (Chopra, 2006). En la tabla 4.1. se indican los datos de entrada requeridos para el cálculo de los acelerogramas y espectros de respuesta. En este caso, se define la función de cada dato dentro del sistema desarrollado y los valores que se pueden tomar en función tanto de las limitaciones de los dispositivos de registro, así como por las necesidades definidas por el usuario.



Tabla 4. 1. Datos de entrada para la construcción del acelerograma y los espectros de respuesta.

Datos	Descripción	Valores
Fracción de amortiguamiento crítico, $\xi$ . (adimensional)	Este valor depende de los tipos de materiales de los que esté compuesta la estructura.	Para efectos del programa se asumirá un valor de 5%.
Frecuencia de muestreo (Hz.)	Este valor permite el cálculo de los intervalos de tiempo de muestreo.	Su valor depende de la configuración del sensor.
Masa (ton)	Este valor se tomará como una constante durante toda la ejecución del programa.	Puede tomar cualquier valor, por lo que se asumirá un valor unitario.
Periodo inicial (s)	Este valor deberá ser distinto de cero, ya que participa como numerador en el cálculo de la rigidez.	Se recomienda valores en el orden de $1 \times 10^{-3}$ en adelante.
Delta de periodo (s)	De este valor dependerá el nivel de aproximación que se quiera dar a la curva de los espectros de respuesta.	Para efectos de rapidez en el cálculo de los espectros de respuesta, se recomienda valores de $1 \times 10^{-3}$ en adelante.
Periodo final (s)	Este valor definirá la extensión final de los espectros de respuesta.	Para que se visualice la parte de las curvas para periodos cortos, se recomienda valores entre 3 y 5 segundos.
Número de canales (direcciones)	Este valor dependerá de las direcciones que pueda leer el dispositivo.	Para sensores triaxiales se recomienda el valor de 3 direcciones de lectura.

El programa permite al usuario visualizar la señal del acelerograma filtrado, por lo que se requiere de los datos a usarse durante su ejecución: tipo de filtro, frecuencia alta de corte, frecuencia baja de corte y orden del filtro. Esto con el fin de caracterizar al filtro requerido por el usuario y que el programa elimine las frecuencias de posibles ruidos ambientales. Para este trabajo se utilizó específicamente el filtro de Butterworth, ya que no genera efectos de desfase al filtrar la señal (Ellis, 2012). En la tabla 4.2. se muestra la descripción de los datos de entrada requeridos para el filtrado de las señales sísmicas. En este caso, se define la función de cada parámetro dentro del sistema desarrollado y los valores que se pueden tomar en función tanto de las limitaciones de los dispositivos de registro, así como por las necesidades definidas por el usuario.

Tabla 4. 2. Datos de entrada para la definición del filtro de la señal sísmica

Parámetro	Descripción	Valores
Tipo de filtro	En este parámetro se escoge el tipo de filtro dependiendo de qué contenido frecuencial de la señal se desea limpiar.	Filtro pasa-banda Filtro pasa baja Filtro pasa alta Filtro rechaza banda
Orden del filtro	Este valor permite definir la pendiente de decaimiento del filtro.	Puede tomar valores desde 1 a N, y según sea mayor el orden de filtro, la pendiente será más pronunciada.
Frecuencia Alta de Corte (Hz.)	Este valor definirá la máxima frecuencia que el filtro permitirá pasar.	Para los valores de frecuencias contenidas en registros sísmicos, un valor común es 20 Hz.
Frecuencia Baja de Corte (Hz.)	Este valor definirá la menor frecuencia que el filtro permitirá pasar.	Para los valores de frecuencias contenidas en registros sísmicos, un valor común es 0.35 Hz.

Para el desarrollo del reporte automático, se requiere de la creación de carpetas para uso exclusivo del programa, siendo las rutas de estos archivos parte de los datos de entrada. En primer lugar, se debe crear la carpeta que contendrá los archivos que serán leídos por el programa y que sirve como carpeta de paso solo durante la lectura de los datos de los archivos de texto. Luego, se requiere la creación de la carpeta denominada *Banco de Sismos*, donde se guardan todos los archivos luego de ser leídos y procesados por el programa. Después, se requiere de la creación del archivo denominado *Formatos de Reporte* que contiene todos los tipos de formatos en Microsoft Word. El programa incluirá toda la información dentro de estos formatos. Finalmente, se requiere la creación de la carpeta *Reportes Sismos*, donde se archivarán todos los reportes creados.

Por otro lado, en el reporte se incluye información necesaria para la caracterización del evento leído. En este caso, el programa permite el ingreso de información de la estructura instrumentada, plano y descripción de la ubicación de la estructura y el tipo de sensor usado para el monitoreo sísmico. En la tabla 4.3. se describen todos estos datos de entrada referentes a la generación del reporte en formato “.docx”.

Tabla 4. 3. Datos de entrada para la construcción de los espectros de respuesta

Datos	Descripción	Valores
Archivos temporales	El usuario puede ingresar la ruta de la carpeta que albergará temporalmente los archivos de las señales sísmicas en formato “.txt”.	El usuario puede ingresar cualquier tipo de ruta hacia la carpeta.
Formatos de reporte	El usuario puede ingresar la ruta de la carpeta que contenga los archivos en Word con el formato estándar del reporte.	El usuario puede ingresar cualquier tipo de ruta hacia la carpeta.
Banco de sismos	El usuario puede ingresar la ruta de la carpeta donde se guardarán todos los archivos que ya fueron procesados por el programa.	El usuario puede ingresar cualquier tipo de ruta hacia la carpeta.
Reportes de sismos	El usuario puede ingresar la ruta de la carpeta donde se guardarán los reportes terminados.	El usuario puede ingresar cualquier tipo de ruta hacia la carpeta.
Estructura	El usuario puede ingresar el nombre de la estructura que alberga a la estación acelerométrica de la cual se obtuvo el registro.	El usuario puede ingresar cualquier tipo de denominación de la estructura.
Ubicación	El usuario puede ingresar la ciudad en la que se ubica el edificio instrumentado.	El usuario puede ingresar cualquier tipo de denominación para la ubicación.
Sensor	El usuario puede ingresar el nombre del equipo de monitoreo sísmico instalado en la estructura.	El usuario puede ingresar cualquier tipo de denominación para el equipo.
Ubicación de la edificación	El usuario puede ingresar la ruta del archivo de la imagen de la ubicación de la estructura.	El usuario puede ingresar cualquier tipo de ruta que lleve a la imagen. Un requisito indispensable es que la imagen esté en formato JPG.

## 4.2.2. Entorno de procesamiento de señales sísmicas (módulo 2)

### 4.2.2.1. Acelerogramas totales y filtrados

En el caso de los acelerogramas, su construcción consistió en designarle a cada valor de aceleración registrada un valor de tiempo para que se pueda generar el gráfico de la distribución de aceleraciones durante todo el tiempo de ocurrencia del sismo. Como se observa en la figura 4.3., se desarrolló el Sub-VI denominado “*Sismo original*”, el cual define mediante la frecuencia de muestreo, los intervalos de tiempo ( $\Delta t$ ) que separan la lectura de cada aceleración. De este modo, se unieron las lecturas de aceleración del formato “.txt” con los valores de cada instante de tiempo. Asimismo, el programa permite el filtrado de la señal sísmica mediante el Sub-VI denominado

“Sismo filtrado”. En este caso, Sismo PUCP V.1.0. genera la opción tanto de definir las características del filtro Butterworth que se desea usar, así como de decidir si se desea procesar la señal original o la señal filtrada para el cálculo de los espectros de respuesta. El programa pasa la señal del sismo por el filtro de características previamente definidas por el usuario en los datos de entrada. Es preciso indicar que, para efectos de la presente tesis no se utilizó la señal filtrada para la generación de los espectros de respuesta, ya que las señales se registraron en estaciones acelerométricas instaladas dentro del edificio del Banco de la Nación, por lo que los valores de ruido ambiental se asumen como filtrados previamente por los propios dispositivos de registro.

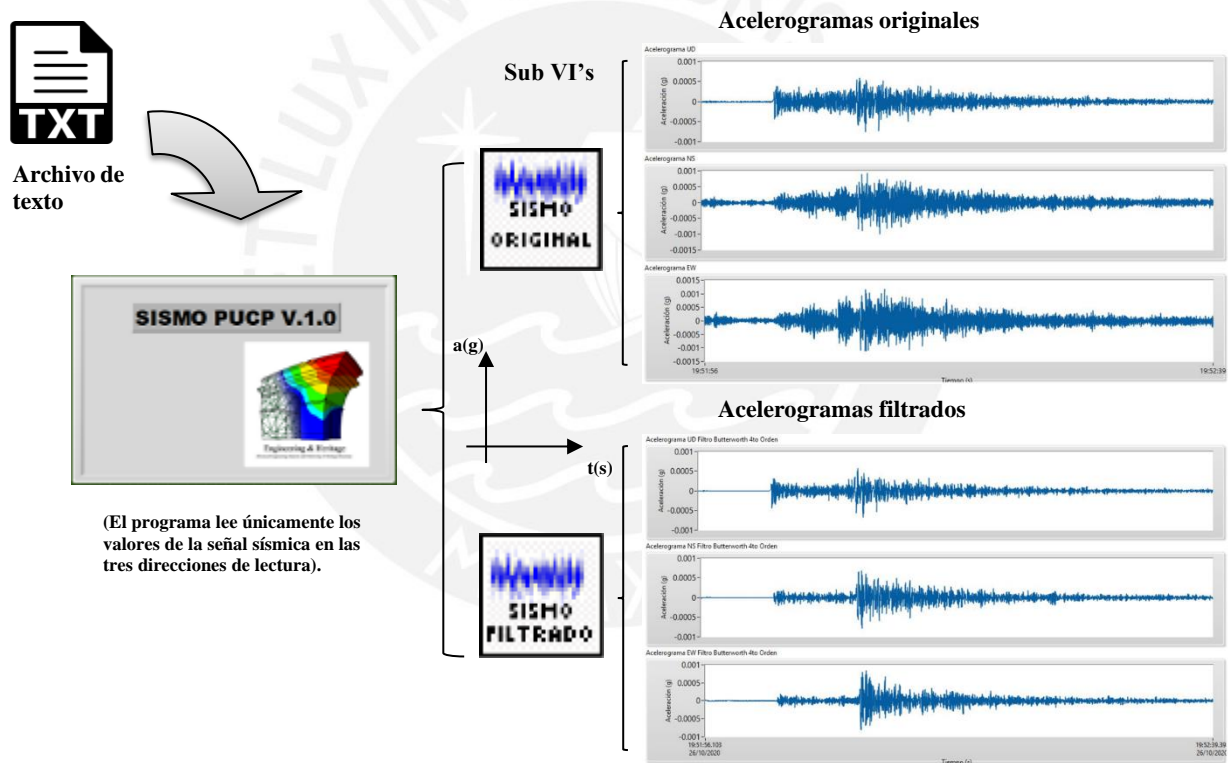


Figura 4. 3. Esquema del proceso de generación de los acelerogramas originales y filtrados en Sismo PUCP V.1.0.

#### 4.2.2.2. Cálculo de la respuesta dinámica

Para el cálculo de la respuesta dinámica se desarrolló un subprograma, o conocido en esta plataforma como Sub-VI, que contiene la programación del método numérico de la interpolación lineal denominado también “Método de Nigam & Jennings”. En este caso, se inició el desarrollo

de este Sub-VI con la definición de expresiones intermedias que permitieron la reducción de las fórmulas requeridas por este método numérico para lograr un cálculo más fluido y ordenado. Como se observa en la figura 4.4., se tienen los valores de entrada, los cuales son utilizados para calcular los valores dependientes que forman parte de las expresiones intermedias. Finalmente, estas expresiones intermedias se usaron para construir las expresiones totales del método numérico. En este caso el Sub VI, denominado “Nigam and Jennings”, realiza el cálculo de la respuesta para diferentes valores del periodo según un delta de periodo definido en el intervalo entre el periodo inicial y el final ( $T_{inicial} \leq T \leq T_{final}$ ) (Chopra, 2014). El método paso a paso usado inicia el cálculo de la respuesta por medio de valores iniciales nulos para la respuesta de desplazamiento y velocidad (Chopra, 2014). Es preciso indicar que el presente método no está definido para calcular valores de respuesta para periodos muy cercanos a 0. El motivo es que, según la relación entre la masa, la rigidez y el periodo; este último parámetro se encuentra en el numerador de la expresión, por lo que genera problemas de estabilidad en el cálculo (Chopra, 2014). Los valores de respuesta para periodo cero son asumidos nulos con excepción de la respuesta de aceleración.

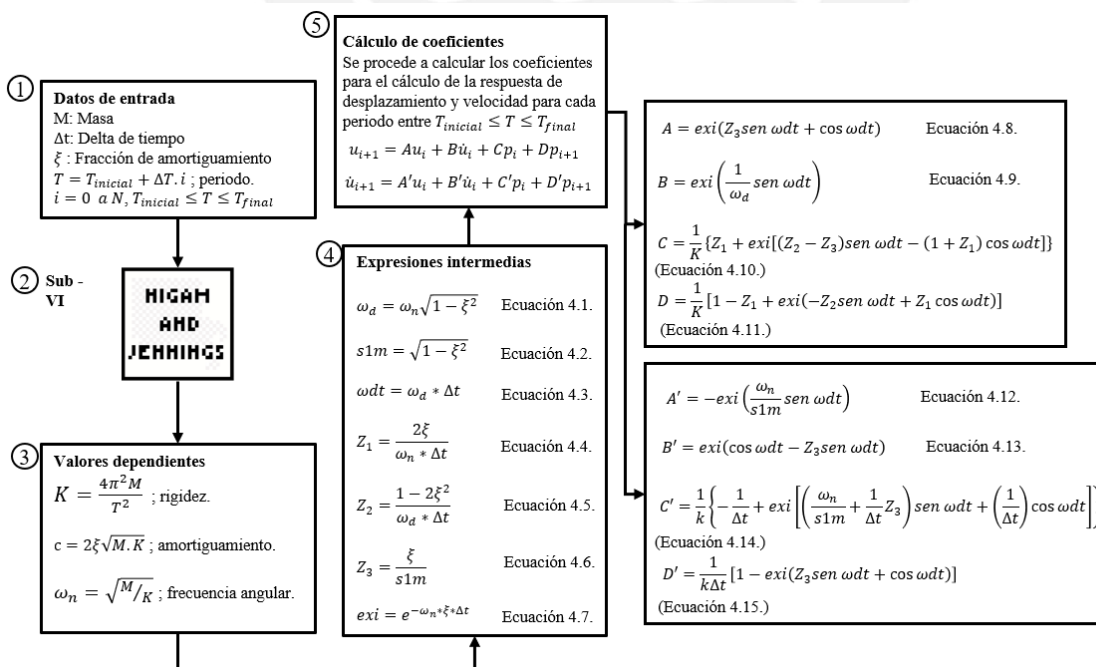


Figura 4. 4. Esquema del proceso del Sub-VI “Nigam and Jennings”.

Es preciso indicar que este método numérico no incluye al cálculo de la respuesta de aceleración, por lo que se procedió a calcularlo desde la ecuación de movimiento (Chopra, 2014). En este caso, se reemplazaron los dos valores de respuesta, tanto de desplazamiento como de velocidad, quedando como única variable a calcular el valor de respuesta de aceleración. Como se observa en la figura 4.5., dentro del Sub-VI se realizó el cálculo de la respuesta de aceleración para todos los valores de periodo definidos en los datos de entrada.

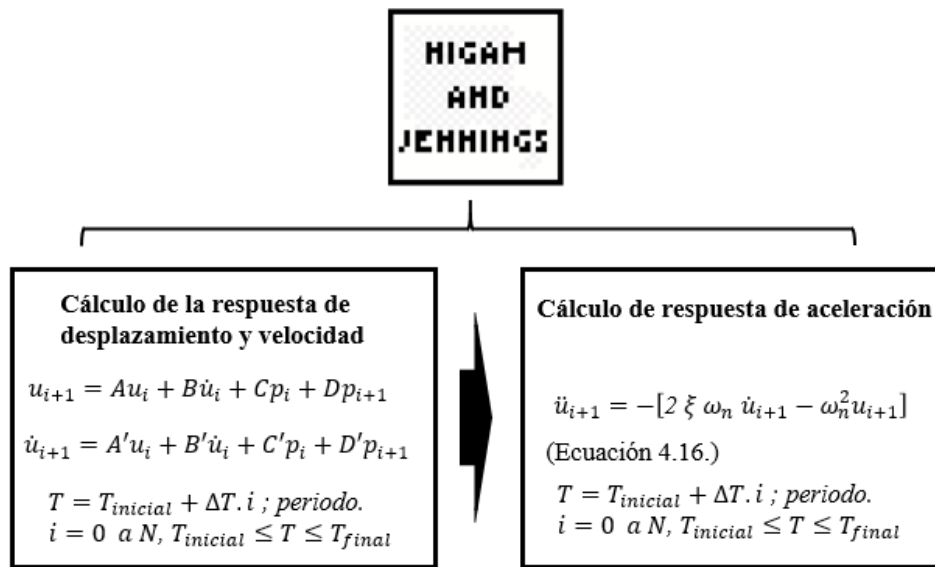


Figura 4. 5. Respuesta de aceleración en el Sub-VI “Nigam and Jennings”.

#### 4.2.2.3. Cálculo de los valores espectrales

Asimismo, se vio por conveniente incluir dentro del Sub-VI “Nigam and Jennings” el cálculo de los valores máximos absolutos para cada periodo evaluado. Esto debido a la disponibilidad de todos los valores de respuesta calculados mediante este método numérico para todos los periodos contenidos dentro del intervalo de análisis. De esta manera, los valores finales que arroja este Sub VI son los valores espectrales usados para el gráfico de los espectros de respuesta (Chopra, 2014). Como se observa en la figura 4.6., la señal sísmica ingresa al Sub-VI y, como resultado de su procesamiento, se obtienen los valores máximos absolutos para cada valor de periodo. Finalmente, se construye la gráfica de los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración.

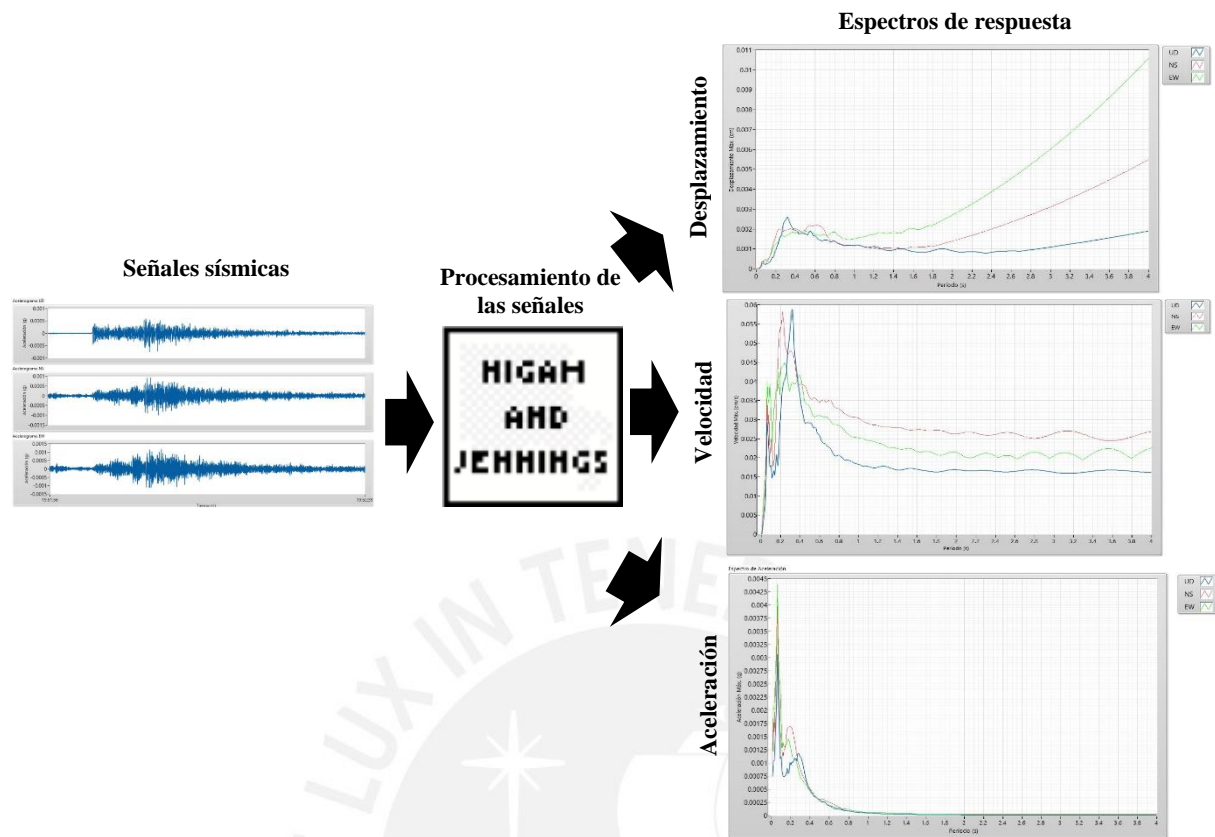


Figura 4. 6. Cálculo de valores espectrales en el Sub-VI “Nigam and Jennings”.

#### 4.2.3. Generación de reporte (módulo 3)

La generación de reportes es una herramienta indispensable que se desarrolla en diferentes programas de uso académico. Esto con el fin de que toda la información procesada por un sistema sea ordenado y presentado al usuario en un formato que pueda ser rápidamente compartido por un equipo de trabajo. La rápida disponibilidad de la información en todos los ámbitos referentes a ingeniería o sismología genera siempre un valor agregado al programa, ya que muchas de las decisiones del día a día son tomadas en cuestión de minutos y pueden repercutir en el desarrollo de estas actividades.

Durante el desarrollo del programa Sismo PUCP V.1.0., se analizaron los diferentes tipos de reportes disponibles para que se ordene la información desarrollada y que tenga un formato

amigable con el usuario. En este caso, se optó por el reporte en el formato de archivo de Microsoft Word “.docx”, ya que permitía el ingreso de texto y la definición de un formato previo estándar para todos los reportes generados por Sismo PUCP V.1.0. En la figura 4.7., se observa el formato estándar del programa, el cual es rellenado con la información de un evento durante la última etapa de su procesamiento.

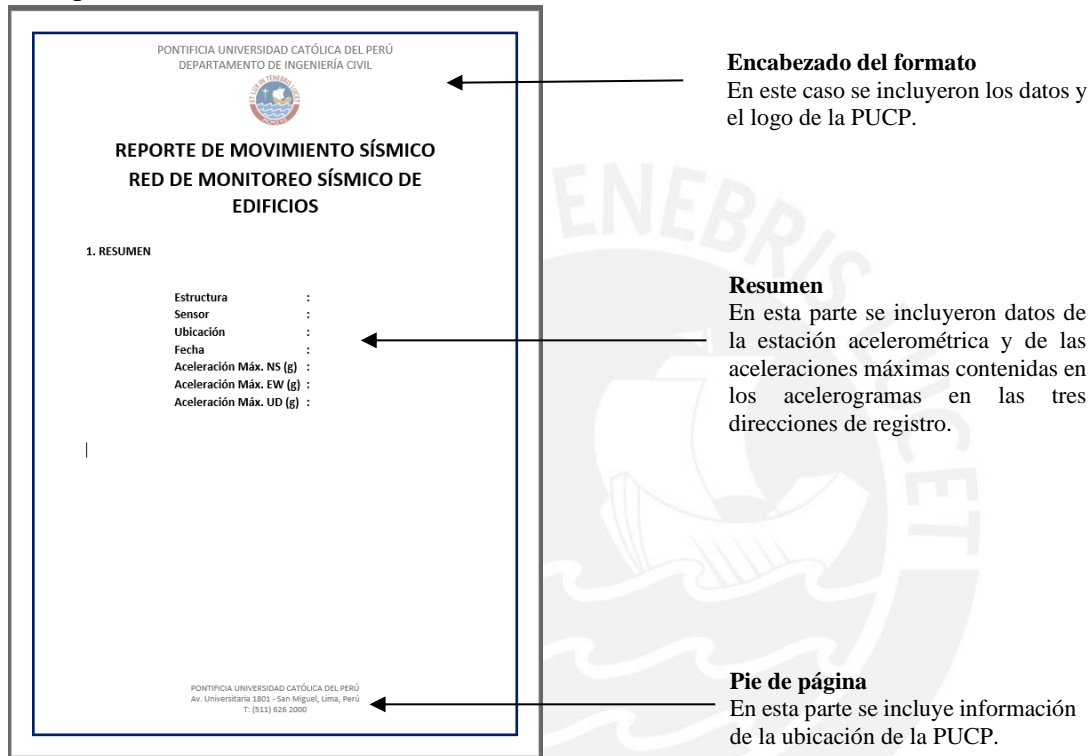


Figura 4. 7. Estructura del formato de reporte usado para la presente tesis.

La división de la información contenida en el informe se estructuró pensando en el nivel de entendimiento del usuario, desde la información característica del evento sísmico y de la estación sísmica, pasando por los acelerogramas que muestra un esquema del contenido de aceleraciones de la señal y concluyendo con los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración en las tres direcciones de lectura.

El uso de Sismo PUCP V.1.0. para el caso desarrollado en la presente tesis, no precisa ser inmediatamente después de la ocurrencia de un evento sísmico. En este caso, Sismo PUCP V.1.0



permitirá el procesamiento de eventos sísmicos agrupados que se recopilarán durante un mes de registro. Esto debido a que se acomodará al requerimiento actual para el monitoreo de edificios ejecutado en Perú. El IGP actualmente recopila los eventos sísmicos de las edificaciones en periodos determinados y no en el momento preciso de la ocurrencia del evento sísmico. Por este motivo, una vez iniciado el programa Sismo PUCP V.1.0., este leerá todos los registros guardados en la carpeta temporal y generará y guardará el reporte de cada evento en la carpeta previamente especificada. De esta manera, se tendrán los reportes ordenados cronológicamente y nombrados con los datos de fecha y hora de ocurrencia. Una vez culminada la lectura de todos los eventos sísmicos se procederá a apagar el programa.

### **4.3. Análisis de eventos sísmicos ocurridos entre 2017 y 2018**

#### **4.3.1. Información de la estación de monitoreo del edificio del Banco de la Nación**

Gracias a la gestión de la información de monitoreo sísmico de edificios ejecutada por el IGP dentro de su plataforma web, se tuvo acceso a la base de datos de los registros generados por los equipos instalados dentro del edificio de la Sede Institucional del Banco de la Nación. Estos registros están a disposición del público en general y se organizan según las estructuras instrumentadas y las fechas de registro (IGP, 2020). La construcción de la sede institucional del Banco de la Nación se desarrolló en el marco de la norma de diseño sismorresistente de 2014, la cual ya contemplaba la obligatoriedad de la instalación de dispositivos de monitoreo. De esta manera, este edificio cumplió con todos los requerimientos necesarios para su instrumentación durante la etapa de ejecución del proyecto y en la actualidad se encarga de su mantenimiento y operación.

La edificación se ubica en el distrito de San Borja, Provincia de Lima, Departamento de Lima. Cuenta con treinta pisos y cuatro sótanos y, hasta la actualidad, ostenta el título del edificio más alto del Perú con 135.5 metros de altura y con un área construida de 66,539 metros cuadrados. Este edificio en particular posee una estructura interna denominada núcleo con un área de 336 metros cuadrados compuesta por placas de concreto en todos los niveles y donde se agrupan las escaleras de emergencia y los ascensores. Asimismo, consta de equipos para la reducción de desplazamientos durante la ocurrencia de eventos sísmicos. En este caso el edificio cuenta con 16 disipadores de energía, desde el piso 23 hasta el 30.

La instrumentación fue realizada por la empresa contratista COSAPI en coordinación con el IGP durante la ejecución del proyecto. En este caso, se instalaron dos estaciones acelerométricas (base y azotea) siguiendo lo requerido por la normativa de instrumentación sísmica vigente en Perú. Los equipos instalados que operan hasta la actualidad son acelerómetros triaxiales modelo Ref-130 SMA de la marca RefTek (IGP, 2020).

#### **4.3.2. Aspectos técnicos del software de referencia “*Seismo Signal*”**

El software *Seismo Signal* permite el procesamiento de señales sísmicas leídas desde diferentes formatos de archivos de texto. Asimismo, cuenta con la opción de filtrar la señal, mostrar los espectros de respuesta elásticos e inelásticos, así como los espectros de Fourier y de Potencia, entre otros tipos de procesamientos. Para el presente trabajo se usó únicamente la lectura de la señal sísmica y la construcción de los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración para su comparación gráfica y numérica con los valores obtenidos por Sismo PUCP V.1.0. En este caso, *Seismo Signal* utiliza el método numérico de Newmark para el cálculo de la respuesta dinámica. Esto se diferencia de Sismo PUCP V.1.0. que utiliza el método de la interpolación lineal

de la excitación sísmica para el cálculo de la respuesta. Es por ello, que la presente comparación permitirá indirectamente la comparación de los cálculos de la respuesta dinámica mediante dos métodos numéricos distintos.

Asimismo, se escogió el software *Seismo Signal*, ya que permite la exportación de los valores espectrales que componen las gráficas de espectros de respuestas a una hoja de cálculo de Microsoft Excel. De esta manera, se pudo comparar cada valor de respuesta calculado mediante *Seismo Signal* con los valores determinados por el programa Sismo PUCP V.1.0. Es preciso mencionar que para la comparación se realizó una aproximación de los valores de cada programa para que tengan la misma cantidad de decimales. Asimismo, se definieron los mismos parámetros iniciales de periodo inicial, periodo final y el delta de periodo. De este modo se tienen valores de respuesta de los dos programas para cada valor de periodo dentro del intervalo previamente definido.

#### **4.3.3. Comparativo gráfico de espectros de respuesta**

Una primera instancia de comparación definida para esta tesis fue la verificación visual del comportamiento de las gráficas obtenidas desde los dos programas usados. Mediante este proceso se buscó dimensionar el nivel de error de los valores calculados por Sismo PUCP V.1.0. en relación a cuan alejadas están las gráficas de respuesta espectral para cada valor de periodo calculadas mediante estos dos programas. Para esta comparación se usaron los registros de las tres direcciones de lectura arriba – abajo (UD), norte – sur (NS) y este – oeste (EW) del evento ocurrido el 1 de julio de 2018 a las 00:08:54 horas en la edificación en estudio.

Como se observa en la figura 4.8. a), b) y c), se obtuvieron los espectros de respuesta de aceleración en las tres direcciones de registro calculados mediante Sismo PUCP V.1.0. y *Seismo Signal*. Se pueden diferenciar solo tres gráficas de espectro de respuesta, por lo que se verificó que mediante los dos programas se construyen gráficas similares con una alta aproximación para valores de periodos largos y diferencias puntuales en valores de periodos cortos entre 0 y 0.1 segundos.

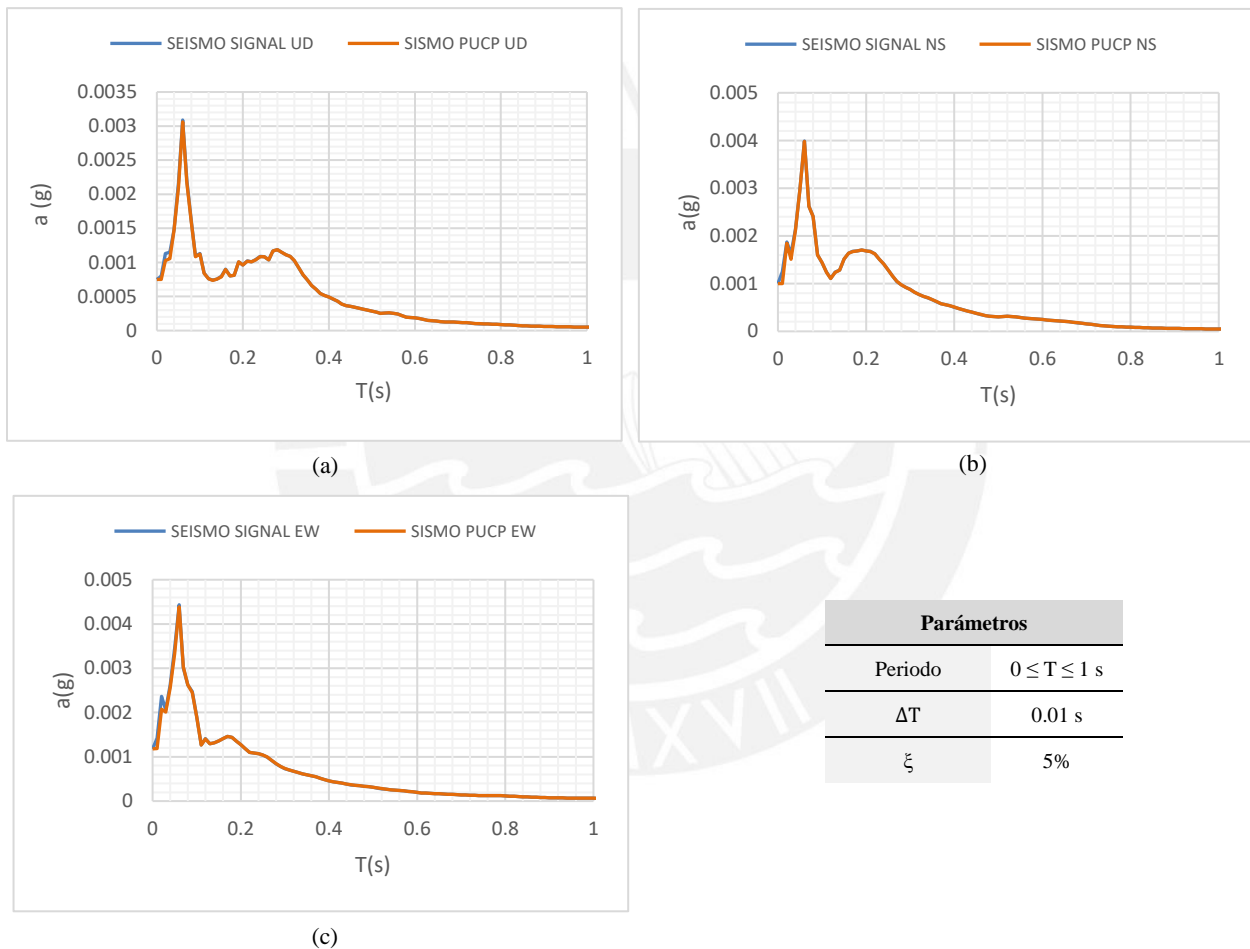


Figura 4. 8. Comparación gráfica de los espectros de respuesta de aceleración de Sismo PUCP V.1.0. y *Seismo Signal* en las tres direcciones de registro: a) dirección de registro arriba-abajo (UD); b) dirección de registro norte-sur (NS); y c) dirección de registro este-oeste (EW)

Para una observación más cercana de los valores de respuesta para periodos cortos se verificó la figura 4.9. En esta se observó con mayor exactitud los valores de periodo en los que se dan los

picos de variación entre las dos versiones de los espectros de aceleración para las tres direcciones. En este caso, en la figura 4.9. a), las gráficas de *Seismo Signal* UD (azul) y *Sismo PUCP* UD (naranja) tuvieron picos de variación en 0.02 y 0.03 segundos. De la misma forma, en la figura 4.9. b), las gráficas de *Seismo Signal* NS (azul) y *Sismo PUCP* NS (naranja) tuvieron picos de variación en 0.01 y 0.03 segundos. Finalmente, en la figura 4.9. c), las gráficas de *Seismo Signal* EW (azul) presentaron dos picos más elevados que la gráfica de *Sismo PUCP* EW (naranja) en los periodos 0.01 y 0.02 segundos.

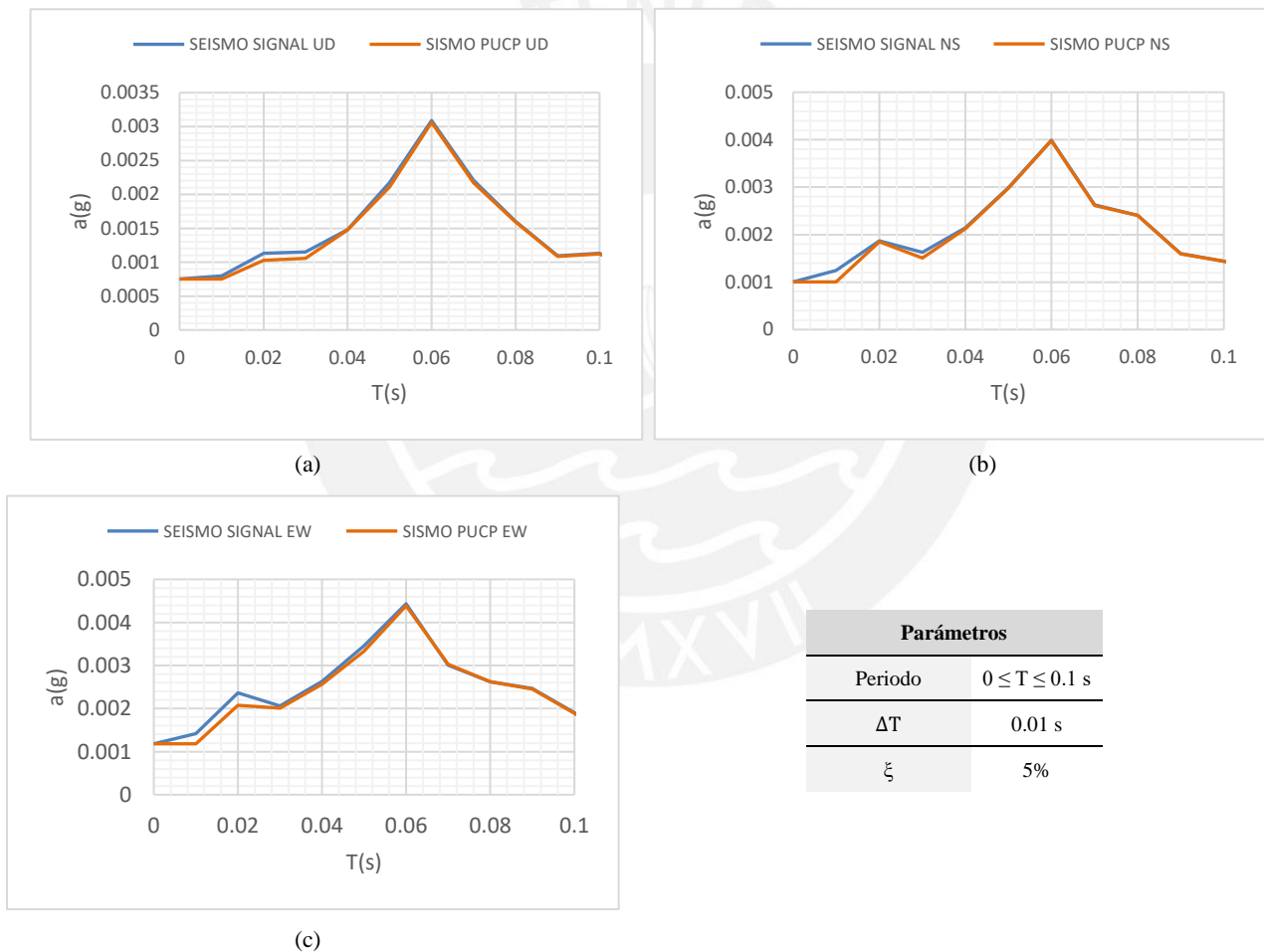


Figura 4. 9. Acercamiento a la comparación gráfica de los espectros de respuesta de aceleración de *Sismo PUCP* V.1.0. y *Seismo Signal* en las tres direcciones de registro: a) dirección de registro arriba-abajo (UD); b) dirección de registro norte-sur (NS); y c) dirección de registro este-oeste (EW)

Asimismo, se procedió con el análisis de los espectros de respuesta de velocidad calculados mediante estos dos programas. En este caso, en la figura 4.10. a), b) y c) se puede observar los espectros de respuesta completos para las tres direcciones de registro, en las cuales no se evidenciaron mayores diferencias visuales entre las dos gráficas de distinta fuente.

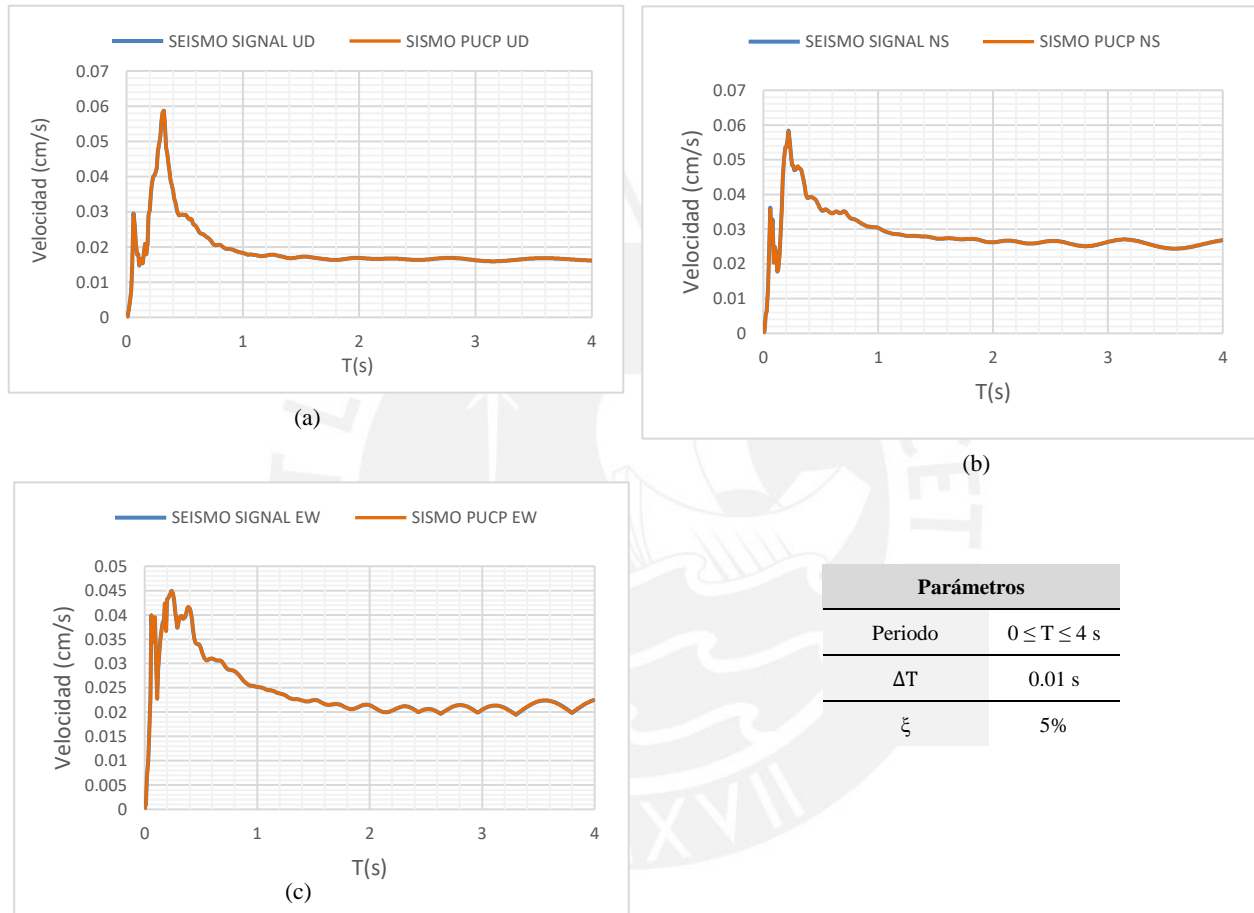


Figura 4. 10. Comparación gráfica de los espectros de respuesta de velocidad de Sismo PUCP V.1.0. y Seismo Signal: a) dirección de registro arriba-abajo (UD); b) dirección de registro norte-sur (NS); y c) dirección de registro este-oeste (EW)

Como última verificación gráfica se procedió con el análisis de los espectros de respuesta de desplazamiento. Como se observa en la figura 4.11. a), b) y c), las gráficas obtenidas por los dos programas en las tres direcciones de registro presentaron similares valores, a tal punto que, solo se diferencia una curva en cada gráfica.

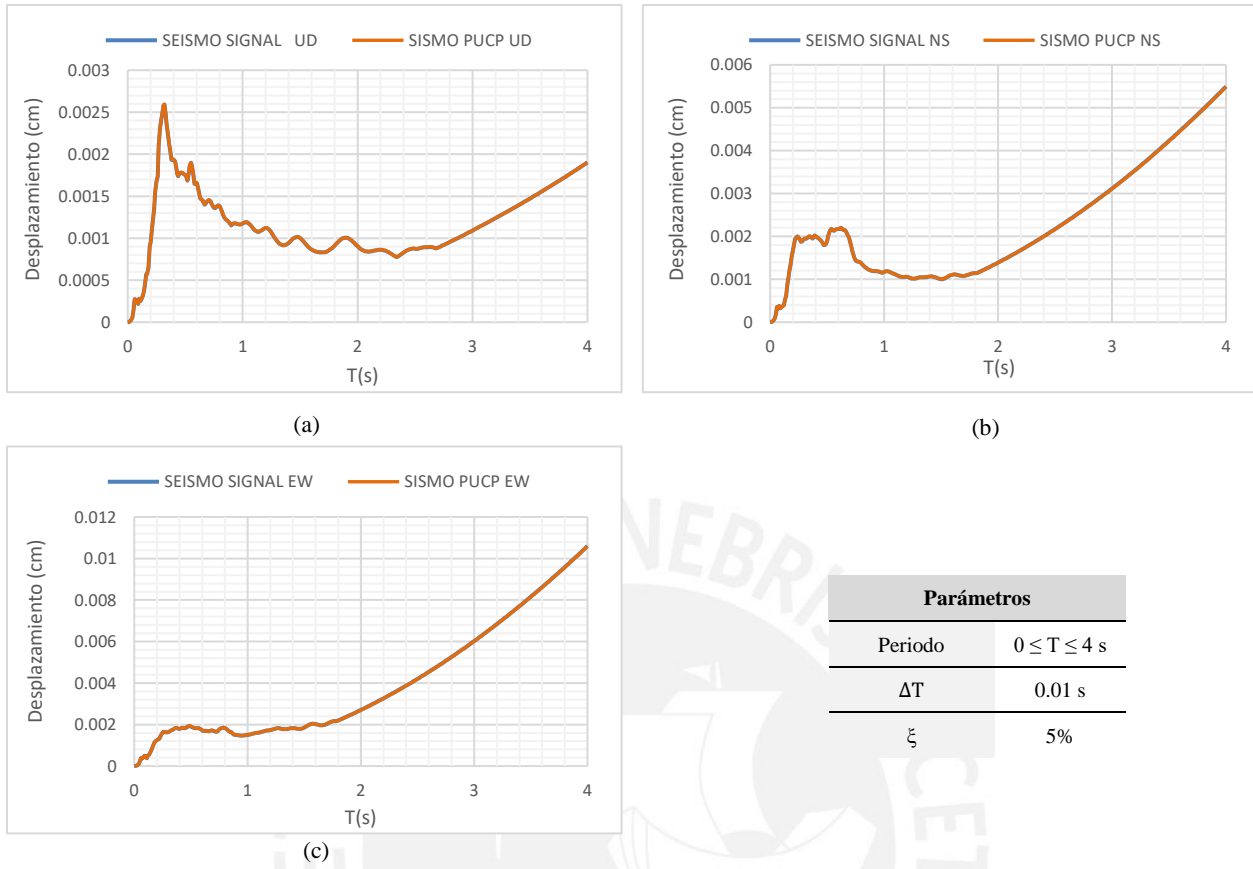


Figura 4. 11. Comparación gráfica de los espectros de respuesta de desplazamiento de Sismo PUCP V.1.0. y Seismo Signal: a) dirección de registro arriba-abajo (UD); b) dirección de registro norte-sur (NS); y c) dirección de registro este-oeste (EW)

#### 4.3.4. Comparación numérica de los valores espectrales y la estimación de error

Para la comparación numérica de todos los valores que componen las gráficas de espectros de respuesta obtenidas mediante los dos programas, se procedió con el cálculo del error relativo tomando como información base la obtenida de *Seismo Signal* según lo indicado en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Error espectral} = \left| \frac{(\text{Valor Sismo PUCP} - \text{Valor Seismo Signal})}{\text{Valor Seismo Signal}} \right| \quad \text{Ecuación 4.17.}$$

Para esta comprobación se definieron los parámetros iniciales según la capacidad máxima de *Seismo Signal* disponible para su licencia educativa, por lo que se tuvo que trabajar con un delta

de periodo de 0.02 segundos y periodos de 0 a 4 segundos. Esto debido a que, el número de muestras de la mayoría de los eventos sísmicos provocaban un error de sobrecarga en el cálculo de los espectros de respuesta cuando el delta de periodo era menor a 0.2 segundos. Asimismo, para el siguiente análisis se omitieron los valores espectrales para el periodo igual a cero y 0.02 segundos. Esto con la intención de realizar un estudio más claro del comportamiento del error a lo largo de los valores de periodo obviando el error inicial que se genera en el valor de 0.02 segundos, ya que este error es desproporcional a los demás.

En la figura 4.12. a), se pueden observar los porcentajes de error del evento de 5.2 de magnitud local registrado con fecha 13 de octubre de 2018 a las 00:13:32 horas en las direcciones de registro UD (arriba-abajo), NS (norte-sur) y EW (este-oeste). En este caso, se verificó que el error relativo decrece a medida que el periodo aumenta. Asimismo, se observó que la disminución del error a niveles cercanos a cero se da para periodos mayores a un segundo. Finalmente, no se pudo definir un tipo de comportamiento matemático del error, ya que se presentan picos de incremento de error aleatoriamente para periodos mayores a un segundo, pero sin exceder de 2%. Asimismo, mediante un acercamiento a los valores de error entre 0.04 y 1 segundo del evento registrado con fecha 11 de abril de 2019 a las 15:50:42 horas (figura 4.12. b), se observó un comportamiento del error similar. En este caso, se observó que el valor del pico inicial de la gráfica sobrepasa el 2% y que luego va decreciendo a medida que aumenta el periodo. Asimismo, se verifica que los porcentajes de error decrecen acercándose a cero para valores de periodo mayores a un segundo. Finalmente, no se evidenciaron porcentajes continuos de error que sobrepasen el 2% en todos los valores de



periodo en estudio, por lo que Sismo PUCP V.1.0 puede utilizarse para el procesamiento masivo de registros sísmicos para el cálculo de espectros de respuesta de aceleración.

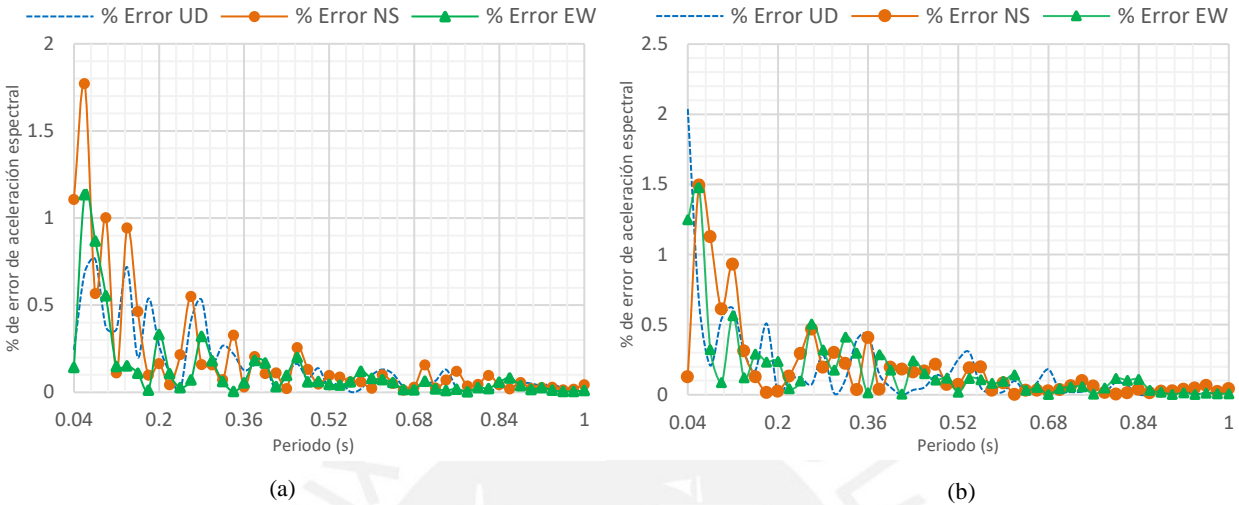


Figura 4. 12. Gráfico de porcentajes de error de la aceleración espectral para cada valor discreto de 0.04 a 1 segundos: a) evento sísmico registrado el 13/10/18; y b) evento sísmico registrado el 11/04/19

Como se observa en la figura 4.13. a), en el caso de los porcentajes de error de velocidad espectral del evento del 13/10/2018, se verificó un alto porcentaje de error inicial en el eje NS (norte-sur) que asciende a 3.85%. Asimismo, se verificó que para los siguientes valores de periodo el error decrece a valores cercanos a cero y que no exceden de 0.5%. De la misma forma, se analizó la zona de periodo entre 0.04 y 1 segundos para el evento del 11/04/2019. En este caso, como se observa en la figura 4.13. b), se presenta una zona donde se concentran los mayores porcentajes de error de hasta 6.24% (eje EW). En este caso, se puede inferir que dependiendo del valor del delta de periodo, se presentará un gran porcentaje de error de la respuesta de velocidad y aceleración calculado para el primer valor de periodo. Asimismo, se puede afirmar también que de este punto en adelante, el porcentaje de error decrece dramáticamente y se convierte en un valor de error promedio dentro de lo esperado (0-1% de error).

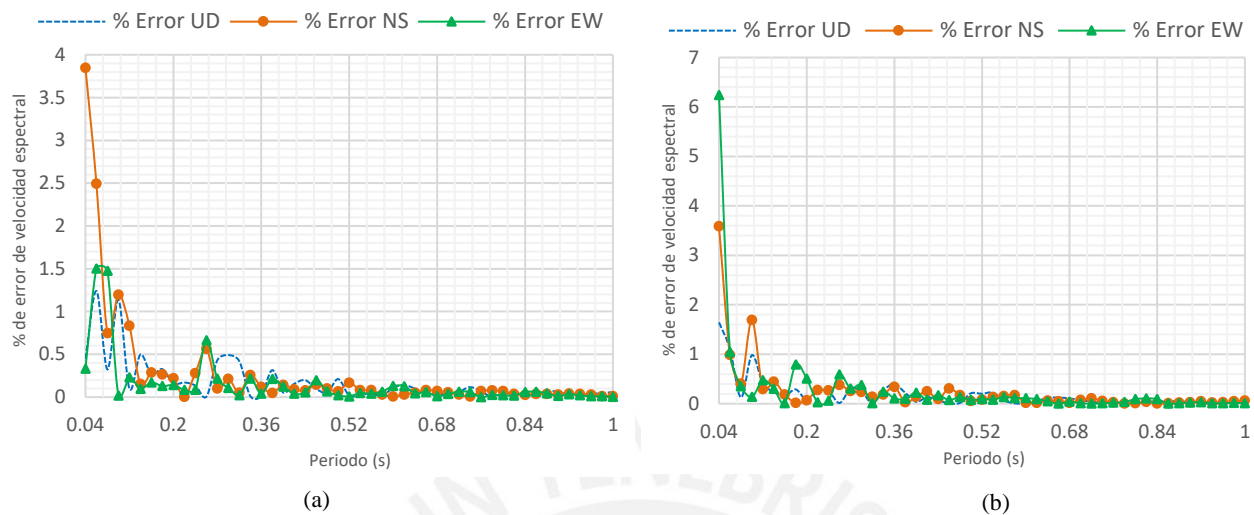


Figura 4. 13. Gráfico de porcentajes de error de la velocidad espectral para cada valor discreto de 0.04 a 1 segundos de periodo: a) evento sísmico registrado el 13/10/18; y b) evento sísmico registrado el 11/04/19.

Finalmente, se procedió con el análisis de los porcentajes de error del desplazamiento espectral. En este caso, se verificó que, de la misma forma que las anteriores gráficas de velocidad y aceleración, se mantiene la zona de bajas frecuencias con un alto porcentaje de error focalizado en la zona cercana al periodo de cero segundos. En la figura 4.17. se tiene la gráfica de porcentajes de error de desplazamiento espectral según lo anteriormente indicado. Al igual que se procedió con las aceleraciones y velocidades, se analizó la zona de periodo entre 0 y 1 segundos. En este caso, como se observa en la figura 4.18., se presenta una zona donde se concentran los mayores porcentajes de error de hasta 1.28%. Asimismo, se puede afirmar también que de este punto en adelante, el porcentaje de error decrece dramáticamente y se convierte en un valor de error promedio dentro de lo esperado (0-2% de error).

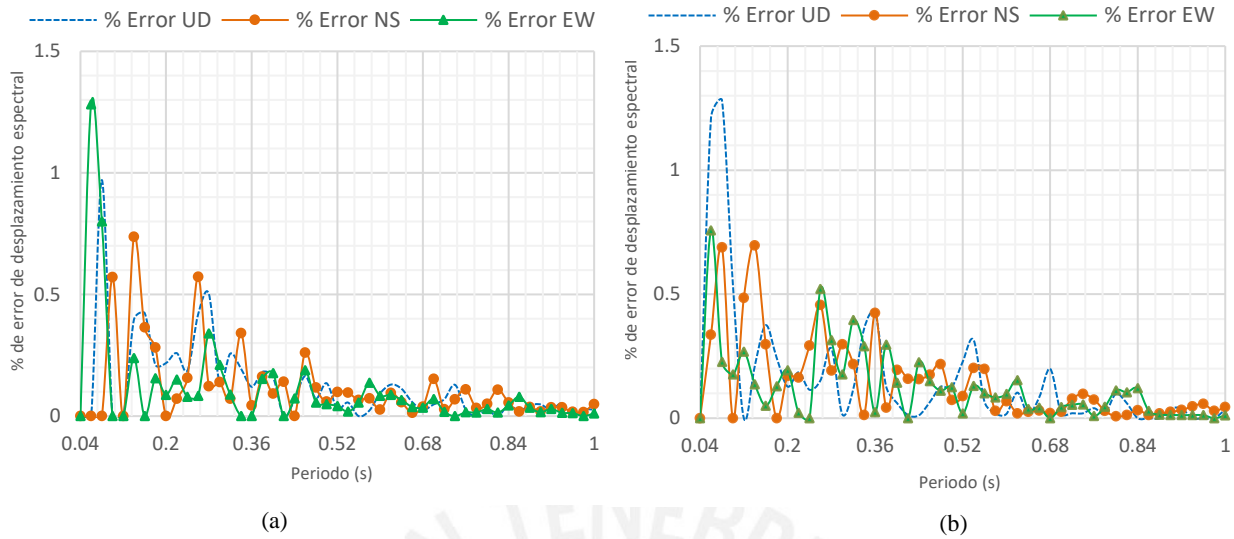


Figura 4. 14. Gráfico de porcentajes de error del desplazamiento espectral para cada valor discreto de 0.04 a 1 segundos de periodo: a) evento sísmico registrado el 13/10/18; y b) evento sísmico registrado el 11/04/19.

#### 4.4. Conclusiones

Sismo PUCP V.1.0. logró completar satisfactoriamente los tres módulos previstos para su desarrollo. En el caso de la lectura de datos se verificó que el programa extrae los datos necesarios del archivo de texto y que todos los datos de entrada se utilizan correctamente para el cálculo de los espectros de respuesta. Asimismo, se verificó que la información es ingresada en el reporte según el ordenamiento previsto.

De la verificación de los valores espectrales calculados con Sismo PUCP V.1.0. se concluye que es necesario analizar con mayor detalle el cálculo de la respuesta dinámica para periodos entre 0 y 0.1 segundos, donde se concentran los mayores porcentajes de error, estudio que escapa a los objetivos de la presente tesis.

De la verificación se concluye también que la programación del Sub VI “Nigam and Jennings” fue desarrollada con éxito. Asimismo, de la comparación visual realizada se puede afirmar que se pueden calcular valores cercanos de respuesta mediante el uso de dos métodos numéricos distintos (método de la interpolación lineal y el método de Newmark).

Sismo PUCP V.1.0. permite un flujo rápido y eficiente de los archivos de entrada y de salida. Asimismo, permite una gestión automática de los archivos de reporte generados. Esto permite que su uso pueda ser utilidad en laboratorios que deseen procesar una gran cantidad de registros sísmicos de forma continua y contar con el sustento

Según los resultados observados en la presente tesis, Sismo PUCP V.1.0. cumple con calcular espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración con un nivel de precisión con un porcentaje de error relativo puntual de hasta 6.24%, lo cual le permite ser una herramienta de procesamiento de señales sísmicas capaz de ser utilizada en aplicaciones de ingeniería o investigación.

## **Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros**



## 5.1. Conclusiones

Las conclusiones del presente trabajo se presentan a continuación organizadas según diferentes aspectos tratados durante su desarrollo como proyectos de instrumentación sísmica actual, procesamiento de señales sísmicas, normativa de instrumentación sísmica internacional y normativa peruana de instrumentación sísmica.

### *Metodologías de instrumentación sísmica de estructuras emblemáticas en el mundo*

En el presente trabajo, se revisaron los aspectos más relevantes de la instrumentación de tres estructuras emblemáticas abarcando a una edificación de gran altura, un monumento histórico y una obra de infraestructura. El principal objetivo de esta revisión fue abordar diferentes tipos de estructuras y mostrar cómo se desarrolló la evaluación previa de la estructura, la localización de los instrumentos y la gestión de información obtenida mediante el monitoreo sísmico. De esta manera, se enfatizó en los diferentes usos que se dieron a la instrumentación sísmica, según las necesidades de cada proyecto.

Estas metodologías de instrumentación sísmica presentadas no siguieron ninguna normativa imperante en su respectivo territorio. En este caso se desarrollaron las distribuciones de equipos según la naturaleza de cada estructura y las necesidades planteadas al inicio de los proyectos. Con esto, el presente trabajo busca plantear la necesidad del desarrollo normativo y de investigación en la rama de la instrumentación sísmica para distintos tipos de estructuras y que éstas sean adecuadamente instrumentadas con objetivos claros para los datos registrados.

### *Procesamiento de señales sísmicas: Señales, filtros y equipos de registro*

Todo análisis de un evento sísmico y sus efectos requiere de un correcto registro de los parámetros que lo caractericen en el tiempo. Mediante el registro discreto de la aceleración sísmica según una tasa de muestreo se caracteriza al evento sísmico. De esta manera, se puede construir una representación del evento sísmico en el tiempo denominada acelerograma. Este trabajo muestra los principales conceptos iniciales requeridos para el tratamiento de señales sísmicas, los aspectos técnicos de los equipos utilizados y la posterior implementación de un sistema de instrumentación sísmica.

Asimismo, en el presente trabajo se desarrollaron esquemas gráficos de la metodología usada por los métodos numéricos para el cálculo de la respuesta dinámica. En este caso, se presentó un esquema gráfico y ordenado de los pasos requeridos para la ejecución de cada uno de los métodos, con un énfasis en el método numérico usado en la etapa de programación del presente trabajo denominado método de la interpolación lineal.

También, se realizó el cálculo de la respuesta dinámica para distintos valores de periodo y se construyó una representación de la construcción de los espectros de respuesta. En este caso, se construyeron los espectros de respuesta del evento sísmico ocurrido en el año 1974 en la ciudad de Lima. Se pudo observar que los espectros de respuesta calculados retratan los comportamientos de las edificaciones que existieron durante su ocurrencia. Así, se verificó que, a mayor valor de periodo fundamental de la estructura, mayor era el desplazamiento de respuesta que experimentaba. También se verificó que el espectro de respuesta de aceleración presentaba la zona de amplificación sísmica para valores de periodos cortos (0 a 1-2 segundos).

*Normativa internacional en contraste con las guías internacionales de monitoreo sísmico de edificios y sugerencias para mejorar la normativa de instrumentación sísmica peruana*

Durante el presente trabajo, se recopiló parte de la normativa mundial referente a la instrumentación sísmica. En primer lugar, durante la etapa de verificación de normativa internacional, se verificó que muchos países con normativa de diseño sismorresistente no incluían un capítulo de instrumentación sísmica dentro de ellas. En este caso se puede mencionar a México como uno de los países que posee altos niveles de investigación referente a instrumentación sísmica de edificaciones, pero que aún no incluye es desarrollo en instrumentación sísmica de edificios dentro de su normativa de diseño sismorresistente.

Dentro de la normativa internacional revisada en la presente tesis, solo se observó la dependencia de la instrumentación sísmica a tres aspectos principales: la altura de la edificación, su área construida y en algunos casos la zona sísmica en la que se ubica la estructura. Asimismo, se verificó la falta de disposiciones estatales que le den el carácter de obligatoriedad al cumplimiento de los capítulos de instrumentación sísmica en algunos de los países analizados. Con todo lo expuesto, se concluye que la instrumentación sísmica aún es vista como un aspecto separado al diseño sísmico en sí mismo, lo cual está distante de su real aporte al diseño, construcción y mantenimiento de estructuras civiles mediante la gestión de la información del comportamiento real de las estructuras.

De la comparación entre la normativa de Colombia y las guías internacionales, se verificó que aún no se toman en consideración los aspectos de innovación y desarrollo dentro de la normativa sobre



instrumentación sísmica. Por otro lado, en el caso de Colombia si se definió correctamente la obligatoriedad de la normativa al incluirla como requisito a cumplir por el dueño de la edificación para la expedición del certificado de construcción.

Las guías o especificaciones técnicas estatales son documentos primordiales para desarrollar con mayor detalle los lineamientos para una adecuada instrumentación de los edificios. Asimismo, estos documentos permiten la estandarización de las especificaciones técnicas de los dispositivos de monitoreo sísmico y su actualización constante, por lo que le permite a la entidad supervisora adecuar los requerimientos mínimos según las características de los más modernos equipos utilizados para instrumentación sísmica en el mercado actual.

*De las sugerencias definidas en este trabajo para la normativa peruana*

La normativa peruana de instrumentación sísmica actual, ha permitido al Instituto Geofísico del Perú, como entidad administradora, regular y acompañar todo el proceso de aprobación e instalación de las estaciones acelerométricas en edificaciones. De esta manera, a la fecha se tienen registros de estaciones acelerométricas instaladas en las bases de estructuras con un área construida mayor a 10,000 metros cuadrados, o en bases y techos de estructuras con más de 20 pisos o que poseen un sistema de disipación sísmica o aislamiento en la base. Dichos datos requieren de la iniciativa académica para la investigación del desempeño de dichas estructuras y del desarrollo de nuevas tecnologías en evaluación de desempeño de edificios como sistemas de alerta temprana o de evaluación de la salud estructural de las estructuras.

En la actualización que recientemente emitió el IGP referente a la guía de especificaciones técnicas para la instrumentación sísmica se verificó un mayor desarrollo de los lineamientos establecidos

para la instrumentación de edificios en el Perú. Asimismo, según el análisis final del presente capítulo, todavía existen aspectos a desarrollar e incluir dentro de la normativa para un desarrollo más completo de estos lineamientos.

*El desarrollo del programa Sismo PUCP V.1.0. para el procesamiento de señales sísmicas*

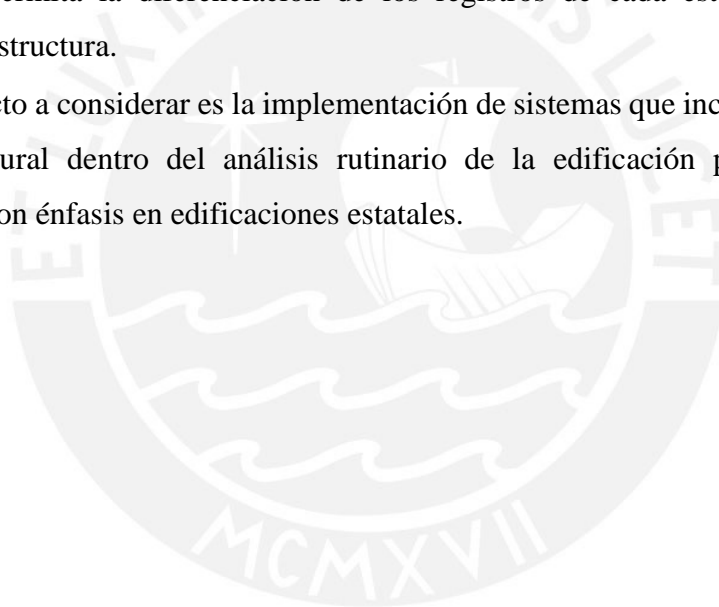
Mediante la comprobación de la información obtenida del programa Sismo PUCP V.1.0., se validó el método numérico utilizado en el Sub VI denominado “Nigam and Jennings”, el cual se basa enteramente en el método numérico de la interpolación lineal. Asimismo, dicha validación de datos permitió la comparación de los valores obtenidos por dos métodos numéricos. Por un lado, Sismo PUCP V.1.0., que se basa en el método de la interpolación lineal, y *Seismo Signal*, que se basa en el método numérico de Newmark. Ambos métodos general valores de respuesta espectral bastante cercanos para diferentes valores de periodo.

Se observó que, para valores de periodo corto (0 a 1-2 segundos), los valores obtenidos por los dos programas presentaban picos de diferencia focalizados, esto permitió concluir que, si se definen valores de intervalo de periodo más pequeños, se podría acortar la zona con diferencias en los valores de respuesta espectral de las gráficas. Por otro lado, no se eliminaría completamente el error, ya que siempre en el primer valor de periodo luego de cero, existirá una diferencia en los valores, propia del tipo de expresiones de cada método numérico.

## 5.2. Trabajos futuros

De la información estudiada referente a la normativa de instrumentación sísmica, y del resultado de la validación realizada al programa Sismo PUCP V.1.0., tres aspectos importantes deben ser considerados para su desarrollo en trabajos de investigación a medio y corto plazo:

- El primer aspecto es la implementación de un sitio web conectado en tiempo real a una red monitoreo de estructuras nacional. En este caso, se generará una plataforma donde se tenga toda la información de los acelerómetros instalados en las edificaciones con una interfaz gráfica y amigable, que permita la diferenciación de los registros de cada estación acelerométrica contenida en la estructura.
- El segundo aspecto a considerar es la implementación de sistemas que incorporen el monitoreo de salud estructural dentro del análisis rutinario de la edificación para su operación y mantenimiento con énfasis en edificaciones estatales.



## Referencias

- Alvarado, J. P. (2006). *Procesamiento digital de señales*. Cartago, Costa Rica: Escuela de Electrónica Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- ANSS. (2005). Guideline for ANSS seismic monitoring of engineered civil systems. U.S. Department of the Interior- U.S. Geological Survey.
- CABC. (2019). California Building Code, Title 24, Part 2. 1&2. (I. C. Council, Ed.) Sacramento, California, USA.
- Carreño, E., Bravo, B., Suárez, A., & Tordesillas, J. M. (1999). Registro y tratamiento de acelerogramas. *Física de la Tierra*, 81-111.
- Castillo, G. G. (2005). Ethernet y protocolos TCP/IPv4.
- Celebi, M. (2000). *Seismic instrumentation of buildings*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Chen, G., Yan, D., Wang, W., & Zheng, M. (2007, Setiembre). *Assessment of the Bill Emerson Memorial Cable - Stayed Bridge based on seismic instrumentation data*. University of Missouri - Rolla.
- Chopra, A. K. (2006, agosto 2). Elastic response spectrum: A historical note. 3-12.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras*. Pearson Educación.
- COSMOS. (2005). Guidelines and recommendations for strong-motion record processing and commentary. Richmond, California, USA: COSMOS Publication N° CP-2005/01.
- COVENIN. (2001). Edificaciones sismorresistentes, requisitos y comentarios . Caracas: Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad.
- Crisafulli, F., & Villafane, E. (2002). *Espectros de respuesta y de diseño*. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería - UN Cuyo.
- CSCR. (2011). Código sísmico de Costa Rica 2010. 4. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

De la Torre Rangel, O., & López Vázquez, R. (2004). Evaluación estructural y comportamiento de las reparaciones efectuadas a edificaciones históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 2-3.

E-030. (2018). Norma Técnica de Diseño Sismorresistente. Perú.

Ellis, G. (2012). *Control System Design Guide*.

Fujino, Y., & Siringoringo, D. (2008). Structural health monitoring of bridges in Japan: an overview of the current trend. *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, (pp. 1-12). Zurich.

G. Proakis, J., & G. Manolakis, D. (2007). *Tratamiento Digital de Señales*. Madrid.

Herraiz, M. (1997). *Conceptos básicos de sismología para ingenieros*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería - CISMID.

Hipley, P. (2001). California Department of Transportation State-of-Practice. *Instrumental Diagnostics of Seismic Response of Bridges and Dams* (p. 3). California: Cosmos Publication N° CP-2001/01.

IGP. (2011). Especificaciones técnicas para registradores acelerométricos y requisitos mínimos para su instalación, operación y mantenimiento. Lima.

IGP. (2020). *Edificios Instrumentados (Norma E.030 - Diseño Sismorresistente)*. Retrieved from <https://intranet.igp.gob.pe/informacion-acelerometrica-e030/registros?BO04N>

Jenschke, V., Clough, R. W., & Penzien, J. (1964). Analysis of earth motion accelerograms. *Report No. SESM 64-1*. Berkeley, CA: University of California.

Jiménez, C. O. (2007). Procesamiento digital de señales sísmicas con Matlab. *Revista de Investigación de Física Vol.10*, 45-46.

Julián, E., & Almidón, Á. (2018). Manual de programación LabVIEW 9.0 (nivel básico). doi:10.5281/zenodo.2557815

Kayal, J. (2008). *Microearthquake seismology and seismotectonics of South Asia*. India: Capital Publishing Company.

LAMC. (2020). Los Angeles Municipal Code. Los Angeles, USA: American Legal Publishing Corporation.

M.Suteau, A., & H.Whitcomb, J. (1979). A local earthquake coda magnitude and Its relation to duration, moment  $M_0$ , and local Richter magnitude ML. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 353-368.

Meli, R., Rivera, D., Sánchez, A. R., & Miranda, E. (2001). Instrumentación sísmica de la Catedral Metropolitana. Resultados 1997-2000. *Revista de Ingeniería Sísmica N°*. 65, 17-48.

Montalvo, J. C., & Gómez, H. d. (2006). *LNIG: Nueva estación sísmica digital en el noreste de México*.

Moya, J. P. (2011). Procesamiento digital de señales. Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Electrónica.

Murià Vila, D. (2007, Setiembre 20). Experiencia Mexicana sobre la Respuesta Sísmica de Edificios Instrumentados. México.

Murià Vila, D., Taborda, R., Macías, M. A., & Escobar, J. (2002). Instrumentación de un edificio alto en la ciudad de Acapulco. *Octavas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*.

NCH433. (2012). Diseño sísmico de edificios. Santiago de Chile: Intituto Nacional de Normalización -INN.

NERA. (2010-2014). *Guidelines for designing optimal dynamic monitoring strategies*. Seventh Framework Programme.

Nigam, N. C., & Jennings, P. C. (1969). Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 909-922.

NSCP. (2016). National Structural Code of The Philippines 2015. *I, 7ma edición*. Quenzon City, Philippines: Association of Structural Engineers of the Philippines, Inc.

NSR-10. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismorresistente. Creada por la ley 400 de 1997.

P. Gavin, H. (2018, Octubre 9). Dynamics of simple oscillators (single degree of freedom systems). 31-34.

Peláez, J. A. (2011). Sobre las escalas de magnitud. Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra.

Pérez, J. L. (2016). Monitoreo sísmico en tiempo real para la alerta temprana, el caso de SeiscomP. *GEOS*, 36(2), 317-327.

Poblete, C. (2013, Mayo). Diseño de la instrumentación sísmica de edificios altos en el norte de Chile. Santiago de Chile, Chile.

Quintáns, C. (2008). Estructuras avanzadas de convertidores analógico-digital: metodologías de diseño, simulación y enseñanza. 79-85. Madrid.

Santalucia, J. R., & Montero, L. G. (2016). Diseño de un acelerómetro para monitoreo sísmico. México.

SFBC. (2020). San Francisco Building Code. San Francisco, California, USA: Municipal Corporation.

SSBD. (2018). Specification for structures to be built in disaster areas. Ministry of Public Works and Settlement Government of Republic Turkey.

Taborda Ríos, R., Muriá Vila, D., Pérez Mendoza, R., & Macias Castillo, M. A. (2002). Efectos de interacción suelo-estructura de un edificio en Acapulco. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 659-670.

Tazarv, M. (2011). Elastic response spectra by Newmark's Beta Method.

Trnkoczy, A. (2009). Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, 1-20.

Uma, S., King, A., Cousins, J., & Gledhill, K. (2011, marzo). The GEONET building instrumentation programme. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(1).

Vargas, R. (2012). Instrumentación Sísmica de edificios en Panamá. Panamá.

Villaluenga, J. L. (2015, junio). Uso de acelerómetros para el control de dispositivos mediante captura de movimiento. 10-18.

Villaroel, L. (1998). Instrumentación Sísmica del Edificio de la Cámara Chilena de la Construcción. Chile: Memoria para optar el título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

W. Smith, S. (2002). *Digital signal processing: A practical guide for engineers and scientists*. California: California Technical Publishing.

## Capítulos de instrumentación sísmica

### Normativa de Perú

#### NORMA E.030 DISEÑO SISMORRESISTENTE

---

estructurales que provocaron los daños y recuperen la capacidad de resistir un nuevo evento sísmico, acorde con la filosofía del diseño sismorresistente señalada en el Capítulo 1.

#### 8.1 Evaluación de estructuras después de un sismo

Ocurrido el evento sísmico la estructura deberá ser evaluada por un ingeniero civil, quien deberá determinar si la edificación se encuentra en buen estado o requiere de reforzamiento, reparación o demolición. El estudio deberá necesariamente considerar las características geotécnicas del sitio.

#### 8.2 Reparación y reforzamiento

La reparación o reforzamiento deberá dotar a la estructura de una combinación adecuada de rigidez, resistencia y ductilidad que garantice su buen comportamiento en eventos futuros.

El proyecto de reparación o reforzamiento incluirá los detalles, procedimientos y sistemas constructivos a seguirse.

Para la reparación y el reforzamiento sísmico de edificaciones se seguirán los lineamientos del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). Solo en casos excepcionales se podrá emplear otros criterios y procedimientos diferentes a los indicados en el RNE, con la debida justificación técnica y con aprobación del propietario y de la autoridad competente.

Las edificaciones esenciales se podrán intervenir empleando los criterios de reforzamiento sísmico progresivo y en la medida que sea aplicable, usando los criterios establecidos en el documento "Engineering Guideline for Incremental Seismic Rehabilitation", FEMA P-420, Risk Management Series, USA, 2009.

### CAPÍTULO 9 INSTRUMENTACIÓN

#### 9.1 Estaciones Acelerométricas

Las edificaciones que individualmente o en forma conjunta, tengan un área techada igual o mayor que 10 000 m<sup>2</sup>, deberán contar con una estación acelerométrica, instalada a nivel del terreno natural o en la base del edificio. Dicha estación acelerométrica deberá ser provista por el propietario, siendo las especificaciones técnicas, sistemas de conexión y transmisión de datos debidamente aprobados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

En edificaciones con más de 20 pisos o en aquellas con dispositivos de disipación sísmica o de aislamiento en la base, de cualquier altura, se requerirá además de una estación acelerométrica en la base, otra adicional, en la azotea o en el nivel inferior al techo.

#### 9.2 Requisitos para su Ubicación

La estación acelerométrica deberá instalarse en un área adecuada, con acceso fácil para su mantenimiento y apropiada iluminación, ventilación, suministro de energía eléctrica estabilizada. El área deberá estar alejada de fuentes generadoras de cualquier tipo de ruido antrópico. El plan de instrumentación será preparado por los proyectistas de cada especialidad,



debiendo indicarse claramente en los planos de arquitectura, estructuras e instalaciones del edificio.

**9.3 Mantenimiento**

El mantenimiento operativo de las partes, de los componentes, del material fungible, así como el servicio de los instrumentos, deberán ser provistos por los propietarios del edificio y/o departamentos, bajo control de la municipalidad y debe ser supervisado por el Instituto Geofísico del Perú. La responsabilidad del propietario se mantendrá por 10 años.

**9.4 Disponibilidad de Datos**

La información registrada por los instrumentos será integrada al Centro Nacional de Datos Geofísicos y se encontrará a disposición del público en general.

## CAPÍTULO A.11 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

### A.11.1 — GENERAL

**A.11.1.1 — INSTRUMENTACIÓN** — En el presente Capítulo se indica cuándo deben colocarse instrumentos sísmicos en las edificaciones, en dónde deben localizarse y quién corre con los costos de los instrumentos, del espacio que éstos ocupen y del mantenimiento y vigilancia de los mismos.

**A.11.1.2 — ACELERÓGRAFOS** — En la instrumentación sísmica de edificaciones deben emplearse acelerógrafos digitales de movimiento fuerte.

(a) **Objetivos de la instrumentación** — Dentro de los objetivos de este tipo de instrumentación se encuentra la recolección de registros que permitan, entre otros: la medición de los periodos de vibración de la edificación al verse sometida a movimientos sísmicos, la determinación del nivel de daño que ocurrió a la edificación debido a la ocurrencia de un sismo que la afecte, la identificación de efectos de sitio causados por la amplificación de las ondas sísmicas debida a los estratos de suelo subyacentes, el grado de atenuación que sufren las ondas sísmicas al viajar desde el lugar donde ocurre la liberación de energía hasta el sitio donde se encuentre localizada la edificación, y en general el mejoramiento sobre el conocimiento que se tiene a nivel nacional de los fenómenos sísmicos y sus efectos sobre las construcciones y los materiales de construcción nacionales. La valiosa información que se recolecta por medio de la instrumentación permitirá realizar ajustes a los requisitos del presente Reglamento en sus ediciones futuras; llevando, a una reducción de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones colombianas, y, muy seguramente, a una reducción de los costos de proveer seguridad sísmica a ellas.

(b) **Aprobación del tipo de instrumento** — INGEOMINAS es la entidad gubernamental que opera la Red Nacional de Acelerógrafos y es la encargada de aprobar los tipos de instrumentos que se coloquen en las edificaciones que los requieran de acuerdo con los requisitos del presente Capítulo. El INGEOMINAS mantendrá una lista de los tipos de instrumentos posibles de ser utilizados y las especificaciones mínimas de los mismos para ser colocados en edificaciones, tal como requiere el presente Capítulo. La Red Nacional de Acelerógrafos del INGEOMINAS y quien designe la autoridad municipal o distrital donde esté ubicada la edificación, deben recibir, sin costo alguno y por lo menos una vez al año, copia de los registros obtenidos, independientemente de quien sea el propietario del instrumento. Cuando el municipio o distrito donde se encuentra localizada la edificación haya, de acuerdo con A.2.9.3.7(d), desarrollado un plan de instalación, operación y mantenimiento de una red de acelerógrafos de movimientos fuertes, la entidad municipal o distrital que administre esta red podrá, si así lo desea, asumir las funciones que en esta misma sección se asignan al INGEOMINAS, a quien deberá informar sobre esta decisión.

**A.11.1.3 — LOCALIZACIÓN** — La definición de la localización de los instrumentos sísmicos acelerográficos dentro de las edificaciones es responsabilidad del Ingeniero que realice el diseño estructural del proyecto, atendiendo las recomendaciones dadas en la presente sección y en A.11.1.4. La localización de los instrumentos debe estar comprendida dentro uno de los siguientes tipos:

(a) **Instrumentación en la altura** — Se dispone un mínimo de tres instrumentos en la altura de la edificación, de tal manera que exista al menos uno en su base, uno aproximadamente a media altura de la edificación y uno en el nivel superior. En este caso el instrumento colocado en la base debe tener tres sensores triaxiales con dos componentes horizontales ortogonales y una componente vertical, y los otros dos instrumentos pueden tener solo dos sensores horizontales ortogonales.

(b) **Instrumento único en la edificación** — Cuando se coloca un solo instrumento en la edificación, éste debe localizarse en la base de la misma.

(c) **Instrumento de campo abierto** — Se coloca un instrumento sobre el terreno, alejado de las edificaciones, por lo menos una distancia igual a su altura.

(d) **Arreglo de instrumentos** — Se dispone un conjunto de instrumentos que cubren las localizaciones anteriores. En este caso los instrumentos deben tener un dispositivo que inicie el registro de aceleraciones en todos ellos simultáneamente.

**A.11.1.3.1** — En todas las edificaciones donde se coloquen instrumentos sísmicos, se debe realizar un estudio geotécnico cuyo alcance permita definir las propiedades dinámicas del suelo en el sitio.

**A.11.1.3.2** — Las Curadurías o las entidades encargadas de expedir las licencias de construcción de acuerdo con lo requerido en la Ley 388 de 1997 y sus decretos reglamentarios se abstendrán de expedir la correspondiente licencia de construcción, incluyendo las de remodelaciones y reforzamientos futuros, cuando en los casos que se requiera instrumentación sísmica según el presente Reglamento no se hayan dispuesto en el proyecto arquitectónico los espacios a que hace referencia este Capítulo y no se haya consignado en el reglamento de propiedad horizontal de la edificación, cuando se trate de copropiedades, las obligaciones de la copropiedad respecto a la ubicación, suministro, mantenimiento y vigilancia del instrumento. La autoridad competente se abstendrá de expedir el certificado de permiso de ocupación al que se refiere el Artículo 46 del Decreto 564 de 2006 cuando no se haya instalado el instrumento o instrumentos que se requieren de acuerdo con lo dispuesto en el presente Capítulo del Reglamento.

**A.11.1.4** — **CARACTERÍSTICAS DEL ESPACIO DONDE SE COLOCA EL INSTRUMENTO** — El espacio físico donde se coloca el instrumento debe tener al menos un área de dos metros cuadrados con una dimensión mínima en planta de un metro y una altura libre mínima de dos metros, debe estar alejado de las zonas alta circulación, de maquinarias y equipos que induzcan vibraciones. El espacio debe ser cerrado, pero con ventilación adecuada, y ser de un material adecuado para garantizar la seguridad del instrumento. Además se debe colocar dentro de él una toma eléctrica doble, un breaker de 15 amperios y una salida de iluminación eléctrica con interruptor. El piso debe ser de concreto y de un espesor suficiente para permitir el anclaje del instrumento (mínimo 15 cm). El espacio no puede ser utilizado para ningún otro fin diferente al de albergar el instrumento. Cuando se utilice un arreglo de instrumentos, los espacios que alberguen los diferentes instrumentos, deben disponer de una conexión entre ellos por medio de un tubo de PVC de diámetro mínimo de una pulgada (1") para poder realizar las conexiones eléctricas entre instrumentos.

**A.11.1.5** — **COSTOS** — Los diferentes costos en que se incurre en la instrumentación de una edificación se distribuyen de la siguiente manera:

- (a) **Costo de los instrumentos** — Los instrumentos serán adquiridos por la persona, natural o jurídica, a cuyo nombre se expida la licencia de construcción de la edificación, quien además debe costear su instalación. El INGEOMINAS se reserva el derecho de colocar instrumentos adicionales, a su costo, dentro de los espacios que se destinen para la instrumentación sísmica. La propiedad de los instrumentos será de quienes los adquieran. Independientemente de quien sea el propietario del instrumento, la Red Sismológica Nacional y quien designe la autoridad municipal o distrital donde esté ubicada la edificación, deben recibir copia, sin costo alguno, de los registros obtenidos por medio de los instrumentos.
- (b) **Costo de los espacios donde se colocan los instrumentos** — El costo del espacio o espacios donde se colocan los instrumentos será de cargo de los propietarios de la edificación. El propietario, o propietarios, de la edificación darán libre acceso a estos espacios a los funcionarios del INGEOMINAS, o a quienes ellos deleguen, para efectos de instalación, mantenimiento y retiro de los registros del instrumento. Cuando se trate de una copropiedad, en el reglamento de copropiedad deben incluirse cláusulas al respecto.
- (c) **Costo del mantenimiento de los instrumentos** — El costo de mantenimiento de los instrumentos correrá por cuenta del propietario o propietarios de la edificación. Esta obligación debe quedar incluida en el reglamento de copropiedad. Quien preste el mantenimiento debe ser aprobado por el INGEOMINAS. El mantenimiento debe realizarse con la frecuencia que requiera el fabricante del instrumento; no obstante, ésta debe realizarse con una periodicidad no mayor de un año.
- (d) **Costo de la vigilancia del instrumento** — Los costos de vigilancia de los instrumentos correrán por cuenta de los propietarios de la edificación donde se encuentren localizados, sean éstos de su propiedad o no. Los propietarios son responsables del instrumento para efectos de su seguridad, y deben adquirir y mantener una póliza de seguros, la cual debe cubrir el costo de reposición del instrumento en caso de hurto, sustracción u otra eventualidad.

### A.11.2 — COLOCACIÓN DE INSTRUMENTOS SÍSMICOS

Dentro de las construcciones que se adelanten en el territorio nacional, cubiertas por el alcance del presente Reglamento, deben colocarse instrumentos sísmicos en los siguientes casos:

**A.11.2.1 — ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA ALTA** — En las siguientes edificaciones, localizadas en zonas de amenaza sísmica alta deben colocarse instrumentos sísmicos:

- (a) En toda edificación con un área construida de más de 20 000 m<sup>2</sup> y que tenga entre 3 y 10 pisos debe colocarse un instrumento sísmico como mínimo. El espacio para su colocación será colindante con el sistema estructural y debe localizarse en el nivel inferior de la edificación.
- (b) En toda edificación con un área construida de más de 20 000 m<sup>2</sup> que tenga entre 11 y 20 pisos, deben colocarse al menos 2 instrumentos sísmicos, en espacios colindantes con el sistema estructural, localizados, uno en el nivel inferior y otro cerca a la cubierta. En este caso el instrumento localizado cerca de la cubierta puede tener solo dos sensores horizontales ortogonales.
- (c) En toda edificación de 21 o más pisos, independientemente del área construida, deben colocarse 3 instrumentos, en espacios colindantes con el sistema estructural. Uno en el nivel inferior, uno aproximadamente a mitad de la altura y otro en inmediaciones de la cubierta. Los instrumentos deben conformar un arreglo. Alternativamente al arreglo de tres instrumentos, se puede realizar la instalación de tres sensores de aceleración, uno triaxial y dos biaxiales como indica A.11.1.3(a), conectados a un sistema central de captura de datos.
- (d) En todo conjunto habitacional que tenga más de 200 unidades de vivienda, que no sean de interés social, se debe colocar un instrumento de campo abierto.

**A.11.2.2 — ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA INTERMEDIA** — En las siguientes edificaciones, localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia deben colocarse instrumentos sísmicos:

- (a) En toda edificación con un área construida de más de 30 000 m<sup>2</sup> y que tenga entre 5 y 15 pisos debe colocarse un instrumento como mínimo. El espacio donde se coloque el instrumento será colindante con el sistema estructural y debe localizarse en el nivel inferior de la edificación.
- (b) En toda edificación con un área construida de más de 30 000 m<sup>2</sup> que tenga entre 16 y 25 pisos, deben colocarse al menos 2 instrumentos sísmicos, en espacios colindantes con el sistema estructural, localizados, uno en el nivel inferior y otro cerca a la cubierta.
- (c) En toda edificación de más de 25 pisos, independientemente del área construida, deben colocarse 3 instrumentos sísmicos, en espacios colindantes con el sistema estructural. Uno en el nivel inferior, uno aproximadamente a mitad de la altura y otro en inmediaciones de la cubierta. Los instrumentos deben conformar un arreglo. Alternativamente al arreglo de tres instrumentos, se puede realizar la instalación de tres sensores triaxiales de aceleración, conectados a un sistema central de captura de datos.
- (d) Todo conjunto habitacional que tenga más de 300 unidades de vivienda, que no sean de interés social, debe colocarse un instrumento sísmico de campo abierto.

**A.11.2.3 — ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA BAJA** — En las edificaciones localizadas en zonas de amenaza sísmica baja no hay obligación de colocar instrumentos sísmicos.

## CAPITULO 13

### INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

#### 13.1 GENERAL

Las autoridades nacionales, estatales o municipales, según proceda y establezcan las leyes, determinarán la necesidad de instrumentar una edificación para conocer su respuesta a las acciones sísmicas. FUNVISIS es la entidad gubernamental que opera la Red Nacional de Acelerógrafos y por tanto le corresponde coordinar la elección y distribución de sitios de registro. La instrumentación sísmica se hará de acuerdo con los siguientes lineamientos:

- Edificaciones con más de seis niveles de altura o un área construida de al menos 6 000 m<sup>2</sup> debe ser instrumentada con dos acelerógrafos.
- Edificaciones con más de 10 niveles de altura sin importar el área construida se instrumentarán como mínimo con tres acelerógrafos.
- En cualquier caso deberá colocarse por lo menos un instrumento en campo libre en un área representativa del perfil geotécnico en el cual se encuentre fundada la edificación.

#### 13.2 TIPO DE INSTRUMENTO

Los tipos de instrumentos que se coloquen en las edificaciones que así lo requieran deberán contar con la aprobación de FUNVISIS, quien será copropietaria de la información generada independientemente de quien sea el propietario del instrumento. En la instrumentación sísmica de edificaciones, deben emplearse acelerógrafos digitales para el registro de movimientos fuertes.

#### 13.3 LOCALIZACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

Cuando se requieran dos equipos, estos se ubicarán en la base y en el tope de la edificación. Para el caso en que se requieran tres equipos, el tercero se ubicará a media altura. Estos acelerógrafos deberán estar interconectados entre sí para garantizar registros simultáneos.

Los instrumentos deben colocarse en sitios alejados de las áreas de circulación y de fácil acceso para su mantenimiento. Los planos arquitectónicos mostrarán los espacios o recintos para alojar los acelerógrafos. Los planos de instalaciones eléctricas y telecomunicaciones mostrarán las acometidas para los acelerógrafos

### **13.4 COSTOS Y MANTENIMIENTO**

Para cubrir los costos de adquisición, instalación, área de instalación y mantenimiento, se llegará a un acuerdo con el o los propietarios de la edificación. El mantenimiento debe realizarse con la frecuencia que requiera el fabricante del instrumento; no obstante, se recomienda una periodicidad no menor de seis meses.



## Normativa de Chile

NCh433

4.2.3.2 Cuando la información sobre el suelo de fundación permita clasificarlo dentro de dos o más tipos de suelo, se debe optar por la Clasificación Sísmica que resulte en el caso más desfavorable.

### **4.3 Clasificación de ocupación de edificios y otras estructuras de acuerdo a su importancia, uso y riesgo de falla**

4.3.1 Para los efectos de la aplicación de esta norma los edificios y otras estructuras se clasifican según lo establecido en la Tabla 4.3.

### **4.4 Instrumentos sísmicos**

Al proyectar una obra, la Autoridad Competente puede exigir que en el proyecto se contemple la inclusión de por lo menos dos recintos adecuados para la instalación de acelerógrafos de movimiento fuerte.

- b. Estudio de suelos.
- c. Memoria de cálculo que incluya una descripción de los *sistemas sismorresistentes* y la importancia relativa de sus componentes.

En las viviendas que cumplan las condiciones para utilizar la opción de diseño simplificado del capítulo 17 de este código no se requiere la memoria de cálculo, pero se debe documentar el cumplimiento de los requisitos de diseño del artículo 17.1.

### 16.4 Inspección y supervisión

El proceso constructivo de toda edificación debe contar con la participación de un profesional responsable de asegurar que la construcción de los *sistemas sismorresistentes* se realice de conformidad con los planos constructivos.

### 16.5 Instrumentación

En toda nueva edificación ubicada en zonas III o IV que tenga algún *sistema estructural* con 10 o más *pisos* y un área total de 5000 m<sup>2</sup> o más, se debe instalar un acelerógrafo de movimiento fuerte, con tres componentes, en el *nivel de base*. Si la edificación tuviera más de 20 *pisos* se debe colocar uno adicional, de iguales características, interconectado al primero, en el *nivel de azotea* o en el *nivel* inferior al techo de la edificación.



## Normativa de Turquía

### 6.12. NON – BUILDING STRUCTURES

Non – building structures permitted to be analyzed in accordance with the requirements of this chapter and the corresponding *Structural Behavior Factors*, (*R*), to be applied to such structures are given in **Table 2.8**. Applicable seismic load reduction factors shall be determined in accordance with **Equation (2.3)**. Where applicable, *Building Importance Factors* specified in **Table 2.3** shall be used for non – building structures. However *Live Load Participation Factors* specified in **Table 2.7** shall not be applied. Except snow loads and crane payloads, unreduced weights of all solid and liquid materials stored and mechanical equipment shall be used.

**TABLE 2.8 - STRUCTURAL SYSTEM BEHAVIOUR FACTORS FOR NON-BUILDING STRUCTURES**

<i>TYPE OF STRUCTURE</i>	<i>R</i>
Elevated liquid tanks, pressurized tanks, bunkers, vessels carried by frames of high ductility level or steel eccentric braced frames	4
Elevated liquid tanks, pressurized tanks, bunkers, vessels carried by frames of nominal ductility level or steel centric braced frames	2
Cast – in – situ reinforced concrete silos, industrial chimneys and suchlike structural systems with uniformly distributed mass along height <sup>(*)</sup>	3
Reinforced concrete cooling towers <sup>(*)</sup>	3
Space truss steel towers, steel silos and industrial chimneys with uniformly distributed mass along height <sup>(*)</sup>	4
Guyed steel high posts and guyed steel	2
Inverted pendulum type structures carried by a single structural element with mass concentrated at the top	2
Industrial type steel storage racks	4

<sup>(\*)</sup>*Seismic analysis of such structures shall be performed in accordance with 2.8 or 2.9 by considering discrete dynamic degrees of freedom defining the structure sufficiently.*

### 2.13. REQUIREMENTS FOR SEISMIC ANALYSIS REPORTS

The following requirements shall be applied for the analysis reports that include seismic analysis of buildings:

2.13.1 – Types of irregularities specified in **Table 2.1** shall be evaluated in detail for the building to be designed and, if any, existing irregularities shall be identified.

2.13.2 – The selected structural system of high or nominal ductility level shall be clearly defined with respect to the requirements of **Chapter 3** or **Chapter 4**, and the selection of the applicable *R* factor from **Table 2.5** shall be explained.

2.13.3 – The selection of the applicable analysis method in accordance with **2.6** shall be clearly explained by considering the seismic zone in which the building exists, building height and structural irregularities involved.

2.13.4 – The following rules shall be applied in the cases where the analysis is performed by computer:

(a) Analysis report shall include three-dimensional illustrations of structural system by indicating the joint and element numbering.

(b) All input data as well as output data including internal forces and displacements shall be included in the analysis report in an easily understandable format. When requested by the approval authority, all computer files shall be delivered in electronically.

(c) The title, author and the version of the computer software used in the analysis shall be clearly indicated.

(d) When requested by the approval authority, theory manual and user's guide of the computer software shall be included in the analysis report.

#### **2.14. INSTALLATION OF ACCELEROMETERS**

Upon endorsement by the Ministry of Public Works and Settlement, strong motion accelerometer shall be permitted to be installed by the ministry or university institutions on the public, private or corporate buildings and other structures for the purpose of recording the strong earthquake motions, and owners or operators of buildings or structures shall be responsible from the safety of such instruments.

APPENDIX L

EARTHQUAKE RECORDING INSTRUMENTATION

*The provisions contained in this appendix are not mandatory unless specifically adopted by a state agency, or referenced in the adopting ordinance.*

11

User notes:

**About this appendix:** The purpose of Appendix L is to foster the collection of ground motion data, particularly from strong-motion earthquakes. When this ground motion data is synthesized, it may be useful in developing future improvements to the earthquake provisions of the code.

**Code development reminder:** Code change proposals to this appendix will be considered by the IBC—Structural Code Development Committee during the 2019 (Group B) Code Development Cycle. See explanation on page ix.

SECTION L101  
GENERAL

**L101.1 General.** Every structure located where the 1-second spectral response acceleration,  $S_1$ , determined in accordance with Section 1613.2, is greater than 0.40 and either exceeds six stories in height with an aggregate floor area of 60,000 square feet (5574 m<sup>2</sup>) or more, or exceeds 10 stories in height regardless of floor area, shall be equipped with not fewer than three approved recording accelerographs. The accelerographs shall be interconnected for common start and common timing.

*[OSHPD 1 & 4] There shall be a sufficient number of instruments to characterize the response of the building during an earthquake and shall include at least one tri-axial free field instrument or equivalent.*

**L101.2 Location.** As a minimum, instruments shall be located at the lowest level, mid-height, and near the top of the structure. Each instrument shall be located so that access is maintained at all times and is unobstructed by room contents. A sign stating "MAINTAIN CLEAR ACCESS TO THIS

INSTRUMENT" in 1-inch (25 mm) block letters shall be posted in a conspicuous location.

*[OSHPD 1 & 4] A proposal for instrumentation and equipment specifications shall be forwarded to the enforcement agency for review and approval.*

**L101.3 Maintenance.** Maintenance and service of the instrumentation shall be provided by the owner of the structure. Data produced by the instrument shall be made available to the building official on request.

Maintenance and service of the instruments shall be performed annually by an approved testing agency. The owner shall file with the building official a written report from an approved testing agency certifying that each instrument has been serviced and is in proper working condition. This report shall be submitted when the instruments are installed and annually thereafter. Each instrument shall have affixed to it an externally visible tag specifying the date of the last maintenance or service and the printed name and address of the testing agency.

APPENDIX L

*[OSHPD 1] The owner of the building shall be responsible for the implementation of the instrumentation program. Maintenance of the instrumentation and removal/processing of the records shall be the responsibility of the enforcement agency.*

---

## APPENDIX 1-B

### GUIDELINES AND IMPLEMENTING RULES ON EARTHQUAKE RECORDING INSTRUMENTATION FOR BUILDINGS

Association of Structural Engineers of the Philippines, Inc.  
Suite 713, Future Point Plaza Condominium 1  
112 Panay Avenue, Quezon City, Philippines 1100

Tel. No. : (+632) 410-0483  
Fax No. : (+632) 411-8606  
Email: [aseponline@email.com](mailto:aseponline@email.com)  
Website: <http://www.aseponline.org>



## APPENDIX I-B GUIDELINES AND IMPLEMENTING RULES ON EARTHQUAKE RECORDING INSTRUMENTATION FOR BUILDINGS

### I. INTRODUCTION

Technology on building instrumentation for seismic monitoring has improved tremendously in the past decade. The purpose of this Guidelines and Implementing Rules on Earthquake Recording Instrumentation for Buildings is to provide information on the specifications and uses of earthquake recording instruments or buildings as provided in Section 105.2 of the National Structural Code of the Philippines 2010 Volume 1, Sixth Edition [NSCP 2010].

The Guidelines and Implementing Rules on Earthquake Recording Instrumentation for Buildings provide earthquake instrumentation schemes for certain buildings to record building response during major seismic events for subsequent analysis. Adequate analysis of building response during earthquake is an important parameter in building safety evaluation in the confirmation and resumption of operations.

Installation of earthquake recording instruments first appeared in the National Structural Code of the Philippines 1992 Edition. At that period, structural engineers were mostly interested in the strength design capacity of the buildings based on seismic parameters provided in the Uniform Building Code (UBC) of the United States, a referral standard of the NSCP. This provision in the 1992 NSCP, however, was not enforced. Code developers started to recognize the importance of not only strength but serviceability in buildings as well. The experiences from the 1994 Northridge Earthquake in the US and the 1995 Kobe Earthquake in Japan gave credence to these considerations.

The NSCP 2010 states that *“Unless waived by the building official, every building in Seismic Zone 4 over fifty (50) meters in height shall be provided with not less than three (3) approved recording accelerograph. The accelerograph shall be interconnected for common start and common timing.”* Due to recent earthquakes and proliferation of high-rise buildings, the Philippines needs to have its own earthquake records for validating the seismic design parameters used, in order to support earthquake disaster mitigation / remedial efforts; thus, there is the need to implement the requirements for the earthquake recording instrumentation. Until such time that considerable sets of

adequate earthquake records have been obtained for various types of buildings or relevant provisions in the NSCP have been amended, the waiver stated above is temporarily suspended and buildings indicated in Table 1 shall be provided with earthquake recording instruments.

ASEP therefore deemed it necessary to improve our understanding of the building response based on real seismic event from local earthquake generators by promoting earthquake recording instrumentation for buildings as the NSCP provision was reiterated in the 2001 and 2010 Editions. Due to more recent developments in building instrumentation technology, a number of instrumentations are available to obtain the building response, and satisfy and comply with the objective of the NSCP Section 105 provisions. Hence, the requirement for three (3) accelerographs is further enhanced and modified to consider the latest and economical building instruments, thus, the combination or combinations of accelerographs, accelerometers, velocity meters and data loggers are considered. To measure building response due to long period earthquakes and distant sources normally critical to tall buildings, the addition of velocimeters is necessary.

To further address the disaster management effort in the country, essential facilities such as hospitals and some government buildings, which are important facilities in disaster response, are recommended to be instrumented. In addition, with this new provision, building response from low-rise structures can be obtained to determine building behavior due to near source or short period earthquakes.



### III. OBJECTIVES OF THESE GUIDELINES

Section 102 of the National Building Code of the Philippines (PD 1096) states that *“It is hereby declared to be the policy of the State to safeguard life, health, property, and public welfare, consistent with the principles of sound environmental management and control; and to this end, make it the purpose of this Code to provide for all buildings and structures, a framework of minimum standards and requirements to regulate and control their location, site, design, quality of materials, construction, use, occupancy, and maintenance.”*

In conformance thereto and as provided in the NSCP 2010, these Guidelines and Implementing Rules on Earthquake Recording Instrumentation for Buildings is developed to improve the understanding of the actual dynamic behavior of buildings under earthquake loading and confirm the design according to the NSCP. The recorded data can be used to improve the structural code thereby reducing loss of lives and limbs as well as properties during future damaging earthquakes. The response data from several buildings in a particular area or several areas will also be used as basis for the government’s earthquake disaster mitigation/remedial and rehabilitation strategies including its emergency response and relief operations programs. The instruments may also be used to set off alarms at specified intensity levels. They may also be used to trigger automatic switching off utilities such as gas lines, electric power lines and elevators as may be prudent in case of high intensity earthquake. The recorded data are important parameters for building safety re-evaluation and resumption of operations including post-earthquake evaluation of buildings.

### IV. DEFINITION OF TERMS

**ACCELEROGRAPH** are accelerograph records the acceleration of particles on the surface of the earth as a function of time, which is called an accelerogram. The accelerograph generally records three mutually perpendicular components of motion in the vertical and two orthogonal horizontal directions.

**ACCELERATION** is the rate at which the velocity of a particle changes with time.

**ACCELEROMETER** is an instrument used to measure acceleration in the vertical and two orthogonal horizontal directions. An accelerometer has no built-in data recording capacity and is attached to a multi-channel data logger or an accelerograph to record measured acceleration.

**ACCREDITED STRUCTURAL ENGINEER (ASE)** is a civil engineer with special qualifications to practice structural engineering with special training in earthquake engineering and certified by ASEP.

**ACTIONS (GROUND MOTION)** is a general term including all aspects of ground motion, namely acceleration, velocity, or displacement from an earthquake or other energy source.

**BANDWIDTH** is the frequency range that the sensor operates, measured in hertz. (Hz)

**CHANNEL** is a path along which information (as data or voice) in the form of electrical signal, passes; a band of frequencies of sufficient width for a single radio or television communication.

**CLUSTERED BUILDINGS** is a group of buildings built close together on a sizable tract of land in order to preserve open spaces larger than the individual yard for common recreation.

**DAMPING** is the energy dissipation properties of a material or system under cyclic stress.

**DATA LOGGER** is a data logger is an electronic device that records data over time or in relation to location either with a built in instrument or sensor or via external instruments and sensors.

**DISPLACEMENT** is the measured distance travelled by a particle from an initial position.

**ENVIRONMENT** is the aggregate of surrounding things, conditions, or influences that may affect the operability of an instrumentation device such as accelerograph, velocimeter, etc.

**ERI.** Earthquake Recording Instrumentations.

**FFT.** Fast Fourier Transform (FFT) is a numerical algorithm to compute the discrete Fourier transform (DFT) and its inverse. Fourier analysis converts time to frequency and vice versa; an FFT rapidly computes such transformations by factorizing the DFT matrix into a product of sparse factors.

**GALS** is the unit measure of acceleration equivalent to  $(1/1000)^{\circ}g$ . Note that  $1000 \text{ gals} = 1g$ .

**g** is acceleration due to gravity equals to  $9.81 \text{ m/s}^2$  or  $32.2 \text{ ft/s}^2$ .

**INTENSITY** is a number (written as a Roman numeral) describing the severity of an earthquake in terms of its effects on the earth's surface and on humans and their structures.

**INTENSITY METER** is an intensity meter records and stores the various data that are associated with the earthquake and that it can notify those data to host system as it equips data communication function. In addition, it makes the "Earthquake Early Warning System" workable with creating a system network by making use of optional "earthquake early detecting function."

**IP67.** The Ingress Protection rating system is a classification system showing the degrees of protection of the instrumentation device from solid objects and liquids. The first number refers to the protection against solid objects, normally dust. If the first number is 0, there is no protection provided. A number 5 refers to limited protection against dust. The number 6 is for total protection against dust. The second number of the IP rating system refers to protection against liquids. A "0" indicates no protection, while a "7" refers to protection against immersion between 15 cm to 1 m for 30 minutes.

**NATURAL FREQUENCY** is the number of wave cycles per second which a system tends to oscillate in the absence of any driving or damping force.

**PEAK GROUND ACCELERATION [PGA]** is the maximum ground acceleration at a specific location for the time interval.

**PERIOD** is the time interval required for one full cycle of a wave.

**REFUGE AREA** is an area inside a building where people evacuate or assemble during a disaster or emergency i.e. fire, but not for earthquake.

**RESPONSE SPECTRUM** is a plot of the peak or amplitude of steady-state response (displacement, velocity or acceleration) of a series of oscillators of varying natural frequency that are forced into motion by the same base vibration or shock.

**SIR.** Seismic Instrumentation Room.

**STRONG MOTION** is a ground motion of sufficient amplitude to be of interest in evaluating the damage caused by earthquakes or nuclear explosions.

**TIME HISTORY** is the sequence of values of any time-varying quantity (such as a ground motion measurement) reckoned at a set of [usually] equal time intervals.

**VELOCIMETER** is an instrument used to measure velocity of a particle.

**VELOCITY** is a measure of the rate of motion of a particle expressed as the rate of change of its position in a particular direction with time.

**V. EARTHQUAKE RECORDING INSTRUMENTATION REQUIREMENTS**

The requirements of NSCP Section 105.2 shall apply to all existing buildings listed in Table 1, located in Seismic Zone 4 (entire Philippines except Palawan and Tawi-Tawi), for which certificates of occupancies were issued. Building permits shall only be issued for buildings qualified for seismic instrumentation when site or location of SIR has been indicated or incorporated in the plan.

TABLE 1. EARTHQUAKE RECORDING INSTRUMENTATION REQUIREMENTS		
TYPE AND HEIGHT OF BUILDING	LOCATION	REQUIREMENTS
<b>GOVERNMENT BUILDINGS</b>		
A. Hospitals, schools and other buildings fifty (50) meters high and above	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Three (3) accelerographs at Ground Floor / Lowest Basement; Middle Floor; and Floor Below Roof, or</li> <li>2. One (1) accelerograph at Ground Floor / Lowest Basement interphased with two (2) accelerometers at Middle Floor and Floor Below Roof, or</li> <li>3. Three (3) accelerometers with common data logger at Ground Floor / Lowest Basement; Middle Floor; and Floor Below Roof</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Accelerograph for recording waveform and transformed to FFT.</li> <li>2. Data output to include acceleration response spectra and pseudo acceleration response.</li> <li>3. With GPS capability.</li> <li>4. Capability to send data to data center of the government.</li> </ol>
B. Hospitals with 50-bed capacity or more and Schools with twenty (20) classrooms or more but not less than three (3) storey high	One (1) accelerograph or one (1) accelerometer connected to a data logger, at Ground Floor / Lowest Basement	
C. Provincial / City / Municipal Halls and Buildings	One (1) accelerograph or one (1) accelerometer connected to a data logger, at Ground Floor Level/Lowest Basement	



TABLE 1. EARTHQUAKE RECORDING INSTRUMENTATION REQUIREMENTS (continued)		
TYPE AND HEIGHT OF BUILDING	LOCATION	REQUIREMENTS
<b>PRIVATE BUILDINGS</b>		
A. Buildings fifty (50) meters high and above	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Three (3) accelerographs at Ground Floor / Lowest Basement; Middle Floor; and Floor Below Roof, or</li> <li>2. One (1) accelerograph at Ground Floor / Lowest Basement interphase with two (2) accelerometers at Middle Floor and Floor Below Roof, or</li> <li>3. Three (3) accelerometers with common data logger at Ground Floor / Lowest Basement; Middle Floor; and Floor Below Roof</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Accelerograph for recording waveform and transformed to FFT.</li> <li>2. Data output to include acceleration response spectra and pseudo acceleration response.</li> <li>3. For buildings above ninety (90) meters or thirty (30) storeys in height, additional velocity meter at ground floor / lowest basement shall be installed. Output data to include velocity response spectra and pseudo velocity response spectra. Data logger to be part of the system.</li> </ol>
B. Hospitals with 50-bed capacity or more and Schools with 20 classrooms or more but not less than three (3) storey high	One (1) accelerograph or one (1) accelerometer connected to a data logger at Ground Floor / Lowest Basement	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. With GPS capability.</li> </ol>
C. Commercial Buildings with occupancy of at least one thousand (1,000) persons or gross floor area of at least ten thousand (10,000) square meters	One (1) accelerograph or one (1) accelerometer connected to a data logger at Ground Floor / Lowest Basement	

Table 1 shows the types of buildings required to be installed with earthquake recording instrumentation. The requirements for installation of accelerograph are for buildings located in cities and municipalities within a 200 km radius from a Type A faults as specified in the NSCP 2010 and as indicated from the active fault maps issued by the Philippine Institute of Seismology and Volcanology (PHIVOLCS).

For clustered buildings with completely similar design and construction, it shall have a minimum of eighteen (18) channels with a common data logger. The location of the instruments shall be determined by an Accredited Structural Engineer.

1. *Maintenance.* Earthquake Recording Instruments shall be maintained in proper working condition. The installation, servicing or removal of the instruments shall be done by qualified technical personnel of the supplier whose product complies with the minimum specifications as specified in these Guidelines and Implementing Rules.

Maintenance of the instruments shall be by the owner of the building subject to the monitoring of the Building Official or its designated representative.

2. *Service Period.* The maximum service interval is one (1) year. If the instrument is inoperative at two consecutive service inspections, then a re-inspection and servicing shall be required at a maximum service interval of six (6) months until the instrument is rendered fully operative. When the instrument continuously requires repair for a period of four (4) consecutive years, or inoperative repeatedly for at least three (3) times in a four (4)-year period, the instrument shall be replaced.
3. *Instrumentation of Selected Building.* All owners of existing buildings listed in Table I shall provide accessible space for the installation of appropriate earthquake recording instruments. Location of said instruments shall be determined by an Accredited Structural Engineer.

For proposed buildings, the Accredited Structural Engineer shall include the layout, instrument specifications, installation requirements, and location of the instrument in the structural plans submitted for building permit purposes.

The actual installation of the instruments shall be verified by the Building Official.

For existing buildings without ERI, the installation of these instruments shall form part of the requirements of the Annual Certificate of Inspection issued by the Building Official.

For existing buildings with ERI, the building owner shall be required to submit a certification from ASE that the existing ERI conform to these guidelines. If the existing ERI do not conform to these guidelines, the building owner shall upgrade such ERI.

For new buildings, the installation of these instruments shall form part of the requirements for Certificate of Occupancy issued by the Building Official.

4. *Additional Requisite Information of Buildings to be instrumented.* It is necessary to establish a baseline data to make effective use of the records to be collected from the accelerograph(s) installed in the building. The following information are required:
  - As-built blueprints,
  - Structural design calculations,
  - Dynamic analysis (mode shapes and frequencies) as used in the design calculations, if available, forced-vibration test results, and ambient-vibration test results, and
  - Comprehensive subsurface soil exploration and investigation report.

## VI. DATA PROCESSING

Modern strong motion instruments have capabilities to store and transmit digital data through telecommunications links and other media, including the internet.

1. The data from digital recordings are passed through a correction algorithm that applies a high-frequency filter (50 Hz typical: 1 Hz=1 cycle per second). Plots of the corrected acceleration, velocity, and displacements for each channel of recording are prepared.
2. Response spectra are calculated for periods up to about half of the long-period limit. Linear plots of relative-acceleration response spectra and plots of pseudo-acceleration response are prepared if specified to the instrument supplier.
3. Fourier amplitude spectra, calculated by Fast Fourier Transform (FFT), are presented on linear axes and log-log axes. These sets of processed data are then provided to the user for evaluation, assessment of facilities and structures, and research.

## Guías de especificaciones técnicas para la instrumentación sísmica

### Guía de instrumentación de Colombia

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

ESPECIFICACIONES PARA APROBACIÓN DE INSTRUMENTOS NSR - 10				
MARCA:				COMPACTO
REFERENCIA:				(Sensor + Digitalizador)
OTRO:				Si: No:
CONTACTO (Nombre; Móvil y Email):			FBA <input type="checkbox"/>	MEMS <input type="checkbox"/>
			FECHA:	
No.	REQUISITOS MÍNIMOS	ESPECIFICACIONES FABRICANTE	VERIFICACIÓN	APROB.
<b>SENSORES</b>				
1	Triaxial <input type="checkbox"/> Biaxial <input type="checkbox"/> Ortogonales			
2	Escala Total min. ±2 g (gravedad)			
3	Respuesta Frecuencia 0.02 Hz - 50 Hz			
4	Rango Dinámico Mínimo 90 dB			
5	Rango de Temperatura -20 °C a +60 °C			
6	Pruebas de Funcionamiento de señal			
7	Protección EMI y RFI			
<b>DIGITALIZADOR</b>				
8	Adquisición 3 canales independientes			
9	Convertidor ADC			
10	Resolución mín. 16 bits			
11	Tasa de muestreo mín. 200 mps			
12	Rango Dinámico > 70 dB			
13	Banda de Frecuencia > Sensor			
14	Nivel de ruido < 0.02 mg			
15	Rango de Temperatura -20 °C a +60 °C			
16	Señales de Control			
17	Almacenamiento Local			
18	Software de comunicación integrado.			
19	Opciones de Comunicación: (Ethernet TCP/IP, RS-232, FTP, SFTP.)			
20	Telemetría (Opcional)			
21	Protección EMI y RFI			
<b>DETECCIÓN</b>				
22	STA/LTA, trigger/dettrigger, min. 0.1 Hz - 12 Hz			
<b>ALMACENAMIENTO</b>				
23	Mínimo 2 Gb			
<b>SISTEMA DE CONTROL DE TIEMPO</b>				
24	GPS (Recomendado) <input type="checkbox"/> NTP <input type="checkbox"/>			
<b>ENERGÍA</b>				
25	Comercial			
<b>SOFTWARE</b>				
26	Software configuración y extracción datos			
<b>FORMATO DE REGISTROS</b>				
27	Formato MiniSeed			
ANEXOS (Descripción breve de folleto(s), ficha(s) técnica(s), catálogo(s), etc., que se adjuntan):				
OBSERVACIONES:				

**IMPORTANTE:** Un instrumento para movimiento fuerte corresponde a un acelerógrafo (tal como hace referencia el reglamento NSR-10), elemento este que debe contar con dos componentes básicos: *sensor de aceleración* y *digitalizador de señal*. De esta forma, las dos partes (sensor, digitalizador), pueden o no encontrarse compactos. En el evento en el cual estos elementos no se encuentren compactos, el SIGC no considera un arreglo la conformación del acelerógrafo por estos dos elementos independientes (sensor, digitalizador), para cumplir con la instrumentación requerida por la NSR - 10.

# Guía de instrumentación sísmica de Los Ángeles, California



## INFORMATION BULLETIN / PUBLIC - BUILDING CODE

REFERENCE NO.: LABC 1613.10  
DOCUMENT NO.: P/BC 2014-048  
Previously Issued As: P/BC 2011-048

Effective: 01-01-2014  
Revised:

## **SPECIFICATIONS FOR STRONG-MOTION ACCELEROGRAPHS & REQUIREMENTS FOR INSTALLATION AND SERVICING**

### SCOPE:

This Information Bulletin shall apply to any building which contains one or more strong motion accelerographs required by Section 1613.10 of the Los Angeles Building Code.

### PART I: SPECIFICATIONS

Strong-motion accelerographs must be complete integrated systems, small in size, easily serviced and stable over long periods of time without attention. Recording should be at least equal in quality and accuracy to that of the U.S. Coast and Geodetic Survey's standard strong-motion seismographs which have been in use since 1931.

The following are specifications for digital accelerographs installed in buildings to fulfill requirements of LABC Section 1613.10.

- United States Geographical Survey (USGS) approved Accelerographs
- California Geological Survey (CGS) approved Accelerographs. (See [www.conservation.ca.gov/cgs/smip/documents/systemrqmts-triaxialaccelerograph.pdf](http://www.conservation.ca.gov/cgs/smip/documents/systemrqmts-triaxialaccelerograph.pdf))
- Accelerographs approved by the Department of Building and Safety in accordance with the minimum standards set forth below:
  - A. Accelerographs
    1. A minimum of three components (V, L and T).
    2. Natural frequency - above 40 cps.
    3. Damping - approximately 70 percent critical.
    4. Sensitivity - 4 g (at full scale recording).
  - B. Recording
    1. Sampling Rate - A minimum of 200 samples per second.

As a covered entity under Title II of the Americans with Disabilities Act, the City of Los Angeles does not discriminate on the basis of disability and, upon request, will provide reasonable accommodation to ensure equal access to its programs, services and activities. For efficient handling of information internally and in the internet, conversion to this new format of code related and administrative information bulletins including MGD and RGA that were previously issued will also allow flexibility and timely distribution of information to the public.

2. **Time of Recording** - From at least 20 seconds before the ground shaking begins until 30 seconds after the last triggering level motion.
  3. **Cycles** - At least 30 separate automatic operations without a necessity of servicing up to the recording capacity of the accelerograph (40 minutes or longer).
  4. **Rms Noise** - System noise shall be less than 40 micro-g's measured over 0-80 hz.
- C. **Timing**
1. **Accuracy** - Plus or minus 0.2 seconds per 100 minutes.
  2. **Type** - Internal plus a provision for external.
- D. **Starting**
1. **Method** - Pendulum or other device using earthquake motion as the exciting force.
  2. **Level** - 1% G nominal.
  3. **Time** - Full operation of the accelerograph in not over 0.1 seconds after activation by the starting device.
  4. **Instrument Interconnection and Communication** - Accelerographs shall be interconnected for common start and common timing. A dial-up telephone line is recommended at the base-level instrument with a connection to the others.
- E. **Power**
1. A battery maintained by a trickle charger from AC power and capable of powering the accelerograph for 2 days after loss of power.

## **PART II: INSTALLATION, SERVICING AND REMOVAL OF ACCELEROGRAPHS**

All required strong motion accelerographs shall be serviced and maintained in proper working condition in it's building to provide information about the action of a major earthquake. The installation, servicing, and/or removal of the strong motion accelerographs shall only be done by a licensed Accelerograph Maintenance Agency.

### **A. Buildings with three strong motion accelerographs.**

Three strong motion accelerographs shall be in proper working condition in the building to provide information about the action of a major earthquake in the basement, mid-level, and near the top of the building. This arrangement provides the maximum information to the owner of any damage to the building from a major earthquake.

---

As a covered entity under Title II of the Americans with Disabilities Act, the City of Los Angeles does not discriminate on the basis of disability and, upon request, will provide reasonable accommodation to ensure equal access to its programs, services and activities. For efficient handling of information internally and in the Internet, conversion to this new format of code related and administrative information bulletins including MGD and RGA that were previously issued will also allow flexibility and timely distribution of information to the public.



**B. Existing nonconforming buildings with two strong motion accelerographs.**

In the existing nonconforming buildings where two strong motion accelerographs are maintained, one in the basement and one at the top of the building, the one in the basement shall be provided with either a horizontal or vertical triggering device and shall be connected to the strong motion accelerograph in the upper portion of the building.

**C. Existing nonconforming buildings with one strong motion accelerograph.**

In the existing nonconforming buildings where one strong motion accelerograph is maintained, shall have the instrument placed at the top of the building. This may either be an existing building complying with Los Angeles City Ordinance No. 156,995 and originally having only one strong motion accelerograph or where all three instruments were removed and a new strong motion accelerograph was placed in the building. The accelerograph placed in the upper portion of the building shall have a vertical trigger.

**D. Vertical Trigger.** Strong motion accelerographs placed in the upper portion of the building shall start to record upon a vertical acceleration of 0.01 of gravity.

**E. Location and Installation.**

1. **General** - The preferred locations for the instruments are in small, seldom-used rooms or closets near a column (in a vertically aligned stack), with adequate space to mount the instrument and an approved protective enclosure securely to the floor. The proposed locations shall be marked on the structural and architectural floor plans.
2. **Installation Details** - All instruments shall be installed with the same orientation relative to the building, with the reference or long dimension of the instrument aligned with a major axis of the building.
3. **Installation Details** - All instruments shall be installed with the same orientation relative to the building, with the orientation chosen such that the reference or long dimension of the instrument is aligned with a major axis of the building. The orientation of the instrument shall be clearly marked on the structural plans. The installer shall certify the equipment was oriented as per the structural plans.

**F. Record.** When film is used for recording, a new film load shall be placed in the accelerograph when the film remaining is less than 1/3 of original load. For digital accelerographs, memory should be copied out and emptied when the amount remaining is less than 1/3 of the original capacity.

**G. Retrieval.** After a significant earthquake, the office of the CGS, has agreed to collect records from instruments located at the top of buildings, develop the records and deliver high-quality duplicate of those records to the owner and the Department. For digital accelerographs that CGS has agreed to monitor, the records will be recovered and processed by CGS and provided to the owner and the Department. The film and digital records not retrieved by the CGS shall be retrieved by a licensed Accelerograph Maintenance Agency. These records shall be delivered to the owner and the Department.

- H. **Service Period.** The maximum service interval is one year. If the accelerograph is inoperative at consecutive service inspections because of recurring similar problems, then a reinspection and servicing shall be required at least semi-annually until the problem is corrected. The Accelerograph Maintenance Agency shall determine the shorter period so the accelerograph is continually operative. For digital recorders that meet the specifications of CGS and are provided with a telephone connection, CGS will agree to remotely monitor the instrument status. The maximum service interval shall be four years, with the other repairs made when notified by CGS. If the instrument is repaired when necessary, the annual report required per LABC 1613.10 by the owner to the city, that the instrument is in working condition, will be made by CGS.
- I. **Refurbishing and Replacement.** Where the Accelerograph Maintenance Agency finds that the instrument must be removed from the building for repair, the instrument shall be returned and made operative as soon as possible but in not more than 60 days from the removal date. When all analog equipment is replaced, instruments meeting the specifications listed in Part I of this bulletin shall be used.
- J. **Battery Inspection.** The accelerograph shall be tested with any charge device disconnected from an electric power source.

**APPENDIX C**  
**Guideline and General Considerations for**  
**Strong Motion Instrumentation in Tall Buildings**

Strong motion instrumentation should be located strategically in a building in order to learn as much as possible about the response of the building during an earthquake and to confirm/verify design and analysis assumptions.

1. It is important to measure horizontal drift and torsional motion from the base to the roof. This requires (at least) three separated uniaxial horizontal accelerometers, on a number of floors. Two should be located near the perimeter of the building along opposite walls (as distant as practical from the core) to get the best torsional measurement. They should be at the same relative position along the walls (e.g., at mid length) and oriented with sensing direction parallel to the walls. The third should be placed near the center of the floor, oriented perpendicular to the other two, to measure horizontal motion in that direction. (The number of floors to be instrumented is discussed below.)
2. Another goal is to measure rocking at the base of the building, especially for a stiff building founded on soft soils, to determine any rocking contribution to the drift. At least two vertical accelerometers are needed, placed near opposing walls. To measure rocking in both directions, a third is needed near one of the other walls.
3. For interpretation and analysis of the recorded data, sensors on different floors should be stacked vertically if possible, that is, placed at the same relative position on each floor, so the same location in the response is measured.
4. To assist in evaluating the performance of nonstructural components, on every third floor where horizontal sensors are located, at least one vertical sensor should be located midspan between adjacent columns and/or at the center of the longest span on that floor.
5. If there are special features near the roof, such as mechanical equipment in the penthouse or architectural features with mass, it may be important to place additional sensors there.
6. The number of sensors depends on the number of stories:

Stories	Minimum No.	Recommended No.
6-10	12	15
11-20	15	19
21-30	21	26
31-50	24	30
>50	30	38

As an example, a 34-story building would have a minimum of 24 sensors. Three horizontal sensors would be located at the base level, the roof level, and on five intermediate levels. Three vertical sensors would be located at the base. Additional sensors include, on two of the instrumented floors, a vertical sensor at mid span and possibly one at a nearby column. In general, the intermediate levels would be chosen where there are changes in stiffness or mass, or offsets in the structural system, if any; otherwise they would be evenly distributed over the height.



7. It is often most practical to install the sensors in the interstitial space above the false ceiling, if present. This keeps the sensors out of the way of normal building activities, reducing likelihood of damage. Thus, the sensors planned to measure the motion of the 8th floor would actually be located on the underside, above the ceiling on the 7th floor, for example. Accelerometers are often the most effective sensors in strong motion monitoring but other sensors (e.g., relative/absolute displacement sensors, etc.) may be also be useful in certain situations.
8. The central recorder should be located in a utility or electrical room with AC available, on one of the lower floors of the building for convenience. Communication to the central recorder is essential to access data following a significant event. The communication link should be at least a phone line; a hardwired Ethernet port is the preferred form of communication.
9. Cabling from each sensor to the recorder should be dedicated continuous runs (i.e., no splices) to achieve robustness not possible via a building's internal network, for example. A pathway will need to be established for the vertical run from the sensors on the upper floors to the recorder location. If there is more than one recorder, a dedicated cable is needed to interconnect them for common timing and triggering. Depending on local ordinances and fire codes, cabling may need to be plenum rated.
10. Maintenance and service of the instruments shall be provided by the owner of the building, subject to the approval of the Building Official. Experienced private companies, or agencies like CSMIP or NSMP, should be contracted for monitoring and/or maintenance. Data produced by the instruments shall be made available to the Building Official upon request. A sign stating, "Maintain clear access to this instrument" shall be posted in a conspicuous location near each sensor and the recorder.

#### Documentation

Documentation is important since after an earthquake it may not be possible to access certain areas in a building until building officials have visited. With good documentation, analysis of the recorded data and assessment of the structural response could occur without accessing the building.

The sensor locations should be well documented to facilitate interpretation of the data. A sensor layout diagram should be prepared similar to Figure 1, showing the sensor locations and on plan and typical sections. Strong shaking is infrequent, and care must be taken that by the time an earthquake occurs sensors have not been moved for construction and not returned to the original location and orientation. Digital photos should be taken to document the location and orientation of each sensor at installation and after construction is completed. It is valuable to archive design plans, especially structural plans, to allow thorough analysis of the data and finite-element modeling of the building when earthquake motion has been recorded.

## ATTACHMENT A

APPENDIX A  
CABLING, COMMUNICATIONS  
AND EQUIPMENT SPECIFICATIONS**Cabling**

- a) *Communication: A continuous 4-pair communications cable (plenum-rated Category 5 such as Belden 1624P or approved equal) is required between the instruments.*
- b) *Interconnection: A continuous 4-pair interconnection cable (plenum-rated RS485 cable similar to Belden 9844 or approved equal) is required between the instruments. (Conduit is only required where the cable is likely to be damaged.)*
- c) *Alternate communication and interconnection methods using dedicated building cabling between the instruments may be approved after review.*

**Communications**

*A four-port AC-powered telephone switch (such as ComSwitch 7500 or approved equal) is to be installed at the base-level instrument (with the default port connected to that instrument), to allow communication with all three instruments via one phone line. The other telephone switch ports are to be connected to the other instruments via the communication cable. Alternate methods of communication between the instruments may be approved after review.*

**Equipment Specifications**

The minimum performance requirements for the accelerographs are as follows:

The instruments should be comprised of either a central-recording system with simultaneous sampling of the sensors or of three interconnected individual accelerographs located as required above. In either case, the system shall be digital recording, of a type approved and in use by the CGS or USGS strong motion programs, and meet the following criteria:

1. Sampling rate: 200sps.  
Full scale recording capability: >3 g.
2. Rms noise of system shall be less than 40 micro-g measured over a 0-80Hz band.
3. If separate accelerographs are used, they must have common triggering and common timing, with timing to better than 2 milli-seconds.
4. The accelerograph system may extract peak accelerations and velocities in real time, and transmit these together with event time and location, by email to the building owner or his agent.
5. Owners are encouraged to employ more than the minimum three instruments.
6. Instruments meeting the referenced System Requirements will be monitored to assure correct operation by CSMIP at the owner's request.



## 1. Introducción

Los sismos son procesos naturales que ocurren como consecuencia de la compleja interacción de las placas tectónicas Nazca y Sudamérica y de la dinámica de las fallas activas que existen sobre el territorio nacional. El registro sísmico histórico se inicia en la época colonial; mientras que, los registros instrumentales se hacen rutina desde mediados del siglo XX. La Figura 1 presenta los mapas de actividad sísmica del Perú y el mapa de zonificación sísmica de la Norma E030.

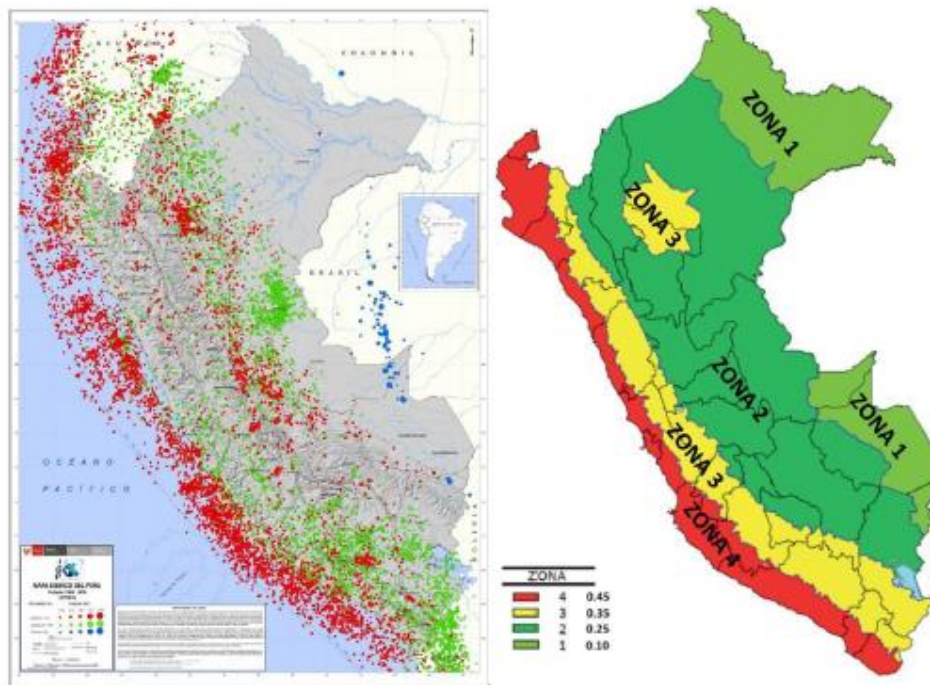


Figura 1. Izquierda, Mapa Sísmico y derecha, Mapa de Zonificación Sísmica del Perú

Los eventos sísmicos se pueden catalogar como sismos extremos cuando su magnitud supera el grado 6.0 en la escala de magnitud momento ( $M_w$ ). En estos niveles, las ondas sísmicas que alcanzan la superficie presentan aceleraciones máximas a frecuencias variables dependientes del tipo de suelo. Estos niveles de aceleración constituyen un elevado riesgo para las edificaciones de las zonas urbanas que es importante minimizar. Por este motivo, el registro de las aceleraciones que producen los movimientos sísmicos sobre las edificaciones y obras de ingeniería en general son de





PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú

vital importancia para conocer el estado de salud de los mismos dado que la aceleración máxima se traduce en una carga adicional que afecta el diseño estructural.

Esta misma información permite identificar los periodos de vibración en las estructuras afectadas, así como los factores de amplificación de los suelos, y que en conjunto contribuirán a la mejora de la Norma E.030. Asimismo, los niveles de aceleración medidos a nivel regional pueden ser integrados en una base de datos a fin de elaborar curvas de atenuación e inferir niveles de aceleración en aquellos lugares intermedios que no cuentan con mediciones instrumentales. Por ejemplo, cuando se quiere realizar obras de ingeniería en zonas rurales. El instrumento apropiado para registrar aceleraciones del suelo producidas por las ondas sísmicas se denomina acelerómetro digital y existen en el mercado internacional bajo diferentes niveles de sensibilidad, capacidad de registro y transmisión de datos.

Dentro de este contexto, surge la necesidad de instrumentar con acelerómetros digitales los edificios y obras de ingeniería debido a su importancia social, política y económica. Es por este motivo que con Resolución Ministerial N° 355-2018-vivienda, el Ministerio de Vivienda y Construcción, actualizó la Norma E.030 "Diseño Sismo-Resistente" que en su capítulo noveno establece que los proyectos de edificaciones con un área igual o mayor de  $10,000 \text{ m}^2$  construida, deberán instrumentarse con una estación acelerométrica. Para el caso de edificaciones con 20 o más pisos éstas deberán contar con una estación acelerométrica adicional en la azotea o en el nivel inferior al techo. También establece que las mencionadas deberán ser provistas por el propietario y deben estar de acuerdo con las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

El presente documento brinda las pautas y procedimientos requeridos para la instalación, operación y mantenimiento del acelerómetro digital, así como para la transmisión y disponibilidad de la información que este equipo brinda. Esperamos que la presente guía sea de fácil comprensión a fin de que el usuario pueda proceder al cumplimiento de la Ley.

## 2. Estación Acelerométrica

Una estación acelerométrica es un espacio seguro con un área adecuada que contiene un sensor triaxial de aceleraciones, un sistema de registro, almacenamiento y transmisión de la señal, desde el punto de registro al centro de procesamiento. La estación debe poseer las condiciones apropiadas para el correcto registro de vibraciones sísmicas, contar con sistema de referencia de tiempo y energía eléctrica estable y segura.

*Especificaciones Técnicas - Setiembre de 2020*



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú

El principal componente de una estación acelerométrica, es el acelerómetro triaxial, descrito como un dispositivo electrónico con capacidad para registrar los niveles de aceleración producidos por los movimientos sísmicos fuertes, medidos en tres direcciones (vertical y dos horizontales), físicamente son compactos y de fácil mantenimiento y uso.

## 2.1. Especificaciones Técnicas mínimas

De manera general

### Sensor triaxial de aceleración:

- Sistema de tres componentes ortogonales.
- Ancho de Banda: DC hasta 100 Hz o más.
- Rango dinámico mayor igual a 90 dB
- Rango de medición igual o mayor a  $\pm 2g$

### Sistema de Registro:

- Frecuencia de muestreo: seleccionable a 50, 100, 200 muestras por segundo
- Resolución: mayor a 16 bits efectivos por canal
- Modos de registro:
  - Por nivel aceleración
  - Por comparación de promedio de energía en ventanas de tiempo (Algoritmo STA/LTA)
- Ventana de Tiempo de registro de 30 segundos antes del inicio del sacudimiento y 30 segundos después de cumplida la condición del fin del evento.
- Referencia de tiempo por GPS y oscilador interno compensado de alta estabilidad. Cuando sea necesario colocar más de una estación acelerométrica, todas las estaciones deben contar referencia de tiempo GPS o en su defecto solo una de ellas, pero las restantes deben contar con un mecanismo de sincronización especialmente diseñado para ese fin.
- Capacidad de Almacenamiento: mayor o igual a 4 Gigabytes, en dispositivo de memoria fijo o removible, colocado en el interior del equipo.
- Capacidad de Conectividad: puerto Ethernet con interfaz usuario vía web para el control, configuración y descarga de datos.
- Otros medios opcionales: USB2.0, USB3.0, serial, bluetooth, otros.



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú

#### Software:

- Aplicativos para configuración y control.
- Convertidor de datos registrados por el equipo a formato MINISEED, ASCII, SAC.

#### Fuente de Energía:

- Externa 12 VDC; con cargador 220VAC.
- Capacidad de mantener al equipo operativo por lo menos dos (02) días ante pérdida del suministro eléctrico.

#### Ubicación:

En aplicación de la norma, si la edificación es de 10,000 m<sup>2</sup> la estación acelerométrica debe ser instalada en la base del edificio (una adicional en la azotea o último piso si excede los 20 pisos). El espacio físico (ambiente) debe ser por lo menos 4 m<sup>2</sup> y deberá estar claramente señalado en los planos de arquitectura, teniendo en cuenta las siguientes características:

- Fácil acceso para su mantenimiento
- Adecuada iluminación y ventilación.
- Disponibilidad de energía eléctrica ininterrumpida.
- Disponibilidad de ducto al exterior para el cableado de la antena GPS de control de tiempo, la antena GPS de sistema de control de tiempo debe tener cielo abierto para funcionar adecuadamente.
- Buena seguridad física.

Además, es necesario mencionar que para una apropiada operación del acelerómetro es necesario que el ambiente dispuesto para tal fin sea de uso exclusivo, y no empleado como depósito o lugar de operación de otros equipos, en especial si estos generan vibración. El circuito de suministro eléctrico para alimentación deberá ser especial para evitar el daño del equipo por perturbaciones en la línea. En lo posible, el lugar de instalación deberá estar alejado de fuentes de vibración fuertes como ascensores, bombas, motores, o lugares de tránsito de vehículos. El equipo deberá estar libre de ser sometido a condiciones extremas de temperatura y humedad.

#### 2.2. Instalación:

El Eje X del acelerómetro digital debe estar alineado y en dirección del lado de mayor longitud de la edificación asimismo por perpendicularidad, el Eje Y quedará alineado y orientado en la dirección de menor longitud. Es necesario que un plano ubicación del edificio siempre esté disponible en el lugar de la estación. El instrumento deberá estar montado sobre una base de concreto simple dispuesta para este fin y con las siguientes dimensiones: Largo 40 cm, Ancho 40 cm y Alto 10 cm. Asimismo el concreto deberá



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú

tener como mínimo un  $f'c$  de 180 Kg/cm<sup>2</sup>, como referencia para la construcción del sitio del acelerómetro digital ver el diagrama del Anexo I.

Al momento de la instalación, el acelerómetro digital deberá quedar fijado a la base de concreto por un mecanismo de tomillo de fijación que estará anclado en el concreto, de esta manera se asegura el acoplamiento del instrumento a la estructura.

Una vez realizada la instalación, el propietario solicitará al IGP que realice la inspección correspondiente, verifique se cumplen las especificaciones técnicas y emita el documento de constancia correspondiente..

### 3. Mantenimiento

En la Norma Técnica de Edificación E.030, Diseño Sismo resistente, se encuentra establecido que el mantenimiento operativo, incluyendo los materiales y componentes, está a cargo de los propietarios del edificio, pero deberá ser efectuado bajo control de las municipalidades y supervisión del Instituto Geofísico del Perú.

El máximo intervalo de mantenimiento debe ser cada seis (06) meses. Si el acelerómetro digital es encontrado inoperativo después de este periodo, se deberán efectuar mantenimientos adicionales cada 3 meses o antes de requerirse. La ejecución y resultados de todo el mantenimiento del equipo deberá ser de conocimiento del IGP, para ello el propietario proporcionará el nombre de la persona de contacto autorizada para toda coordinación.

Cuando el IGP o la empresa que efectúe el mantenimiento encuentren que el equipo requiere ser retomado a fábrica para reparación, el tiempo de inoperatividad no deberá exceder los sesenta (60) días. A su reposición se requiere nuevamente se efectúe la verificación del IGP.

Todas las pruebas del equipo se efectuarán siguiendo las instrucciones del fabricante.

Cuando en virtud de las características técnicas del equipo, y por disponibilidad del propietario, este accede a proveer una conexión a Internet para el equipo que permita su conexión al sistema de vigilancia sísmica del IGP, la institución aceptará efectuar el control de operatividad remotamente, y los sucesos serán informados a los propietarios. El costo de este servicio es gratuito.

### 4. Sistemas de transmisión de datos

- Conexión internet, el equipo puede ser conectado a cualquier línea internet de la edificación y deberá contar con un número IP público. (modo óptimo).
- Facilitará el acceso al personal IGP cuando estos lo requieran de manera mensual para descarga de los datos.



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú

## 5. Disponibilidad de los datos

- Los propietarios deberán dar facilidades para que personal del IGP de manera periódica o cuando la situación lo amerite (después de sismos fuertes) de acceder a sus instalaciones y recuperar la información grabada.
- Los datos procesados serán publicados en la página web del IGP.

## 6. Contáctenos

- Si requiere más información contactar con el Instituto Geofísico del Perú – Subdirección de Redes Geofísicas. Teléfono: 317-2300 Anexo 157; 250-1037.
- E-mail: [ebautista@igp.gob.pe](mailto:ebautista@igp.gob.pe)
- Página web: <https://portal.igp.gob.pe/norma-e030-diseno-sismorresistente>



### Manual de uso del programa SISMOPUCP V.1.0.

**PASO 1:** Crear las siguientes carpetas dentro del ordenador:

- Archivos Temporales
- Formato de Reporte
- Banco de Sismos
- Reportes de Sismos

**PASO 2:** Abrir el programa y en la pestaña “Carpetas Reporte” copiar las rutas de cada carpeta en el enlace que corresponda.

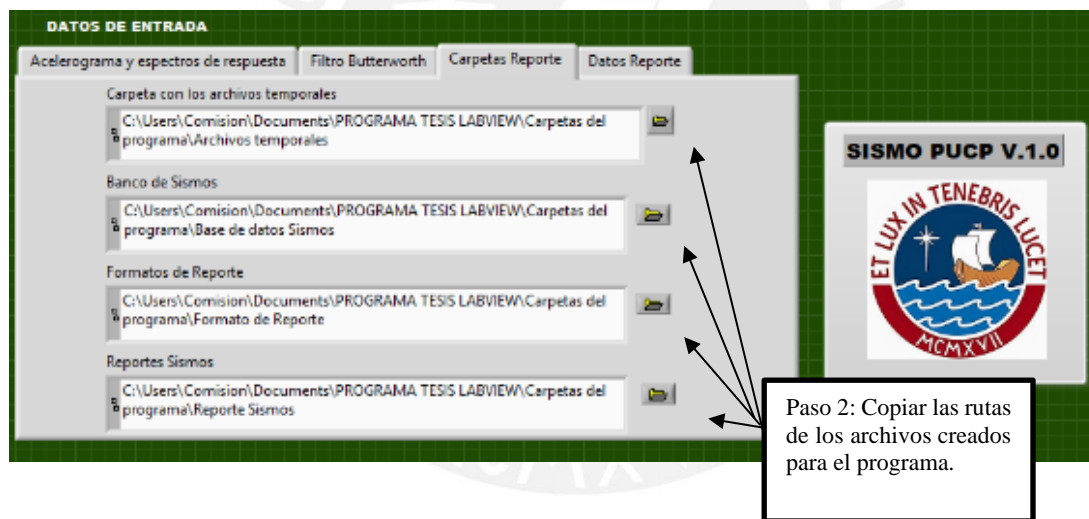


Figura 1C. Ingreso de rutas de los archivos usados por Sismo PUCP V.1.0.

**PASO 3:** En la pestaña “Acelerogramas y espectros de respuesta” ingresar la fracción de amortiguamiento y la frecuencia de muestreo del acelerómetro o caja de registro.

**PASO 4:** En la pestaña “Acelerogramas y espectros de respuesta” se podrá variar algunos valores que el programa toma como predeterminados siendo la única limitación el que el periodo inicial ( $T$  inicial) no sea igual a cero.

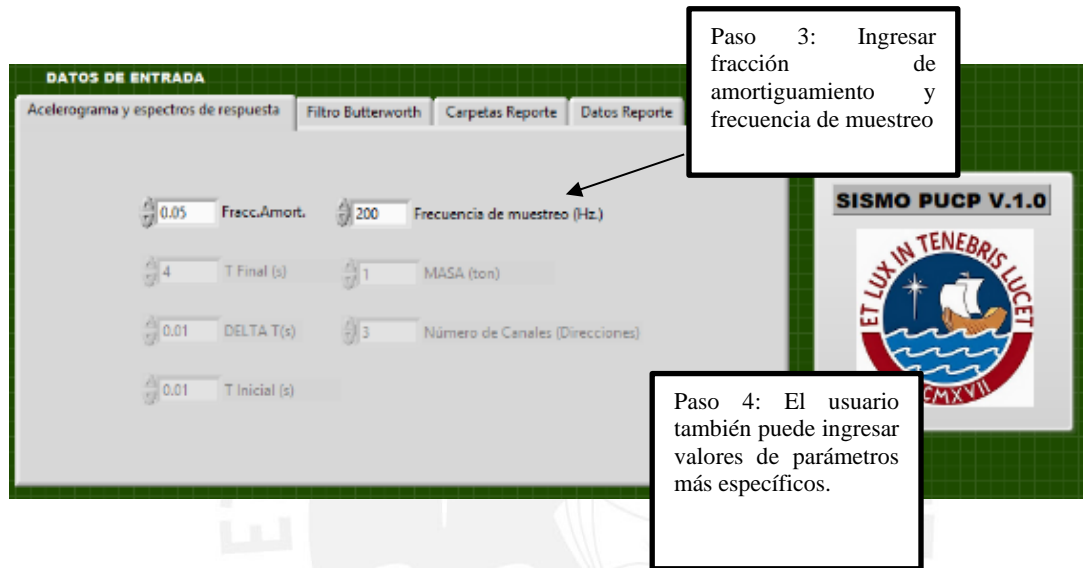


Figura 2C. Datos de entrada en la pestaña “Acelerograma y espectros de respuesta”

**PASO 5:** Para poder variar los parámetros del filtro ir a la pestaña “Filtro Butterworth”. El programa te permite cambiar los valores del intervalo de corte (frecuencia alta de corte y baja de corte), el número de orden y el tipo de filtro. Asimismo, mediante el botón “Activar filtro”, permite al usuario escoger entre el registro total o el filtrado para el cálculo de los espectros de respuesta.

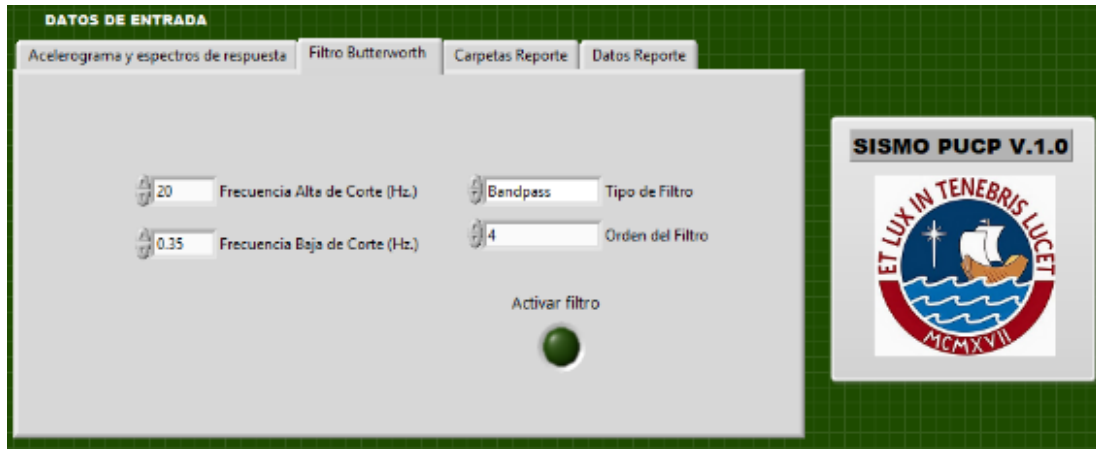


Figura 3C. Ingreso de las características del filtro Butterworth requerido por el usuario

**PASO 6:** Para poder dar información sobre la ubicación del dispositivo de medición ir a la pestaña “Datos Reporte” y se puede adicionar un mapa con la ubicación del dispositivo en formato de imagen “.JPG”.

**PASO 7:** Para incluir mayor información en el Reporte Automático se puede ingresar el nombre de la estructura que se está instrumentado, su ubicación y el nombre del sensor que se está utilizando para el monitoreo sísmico.

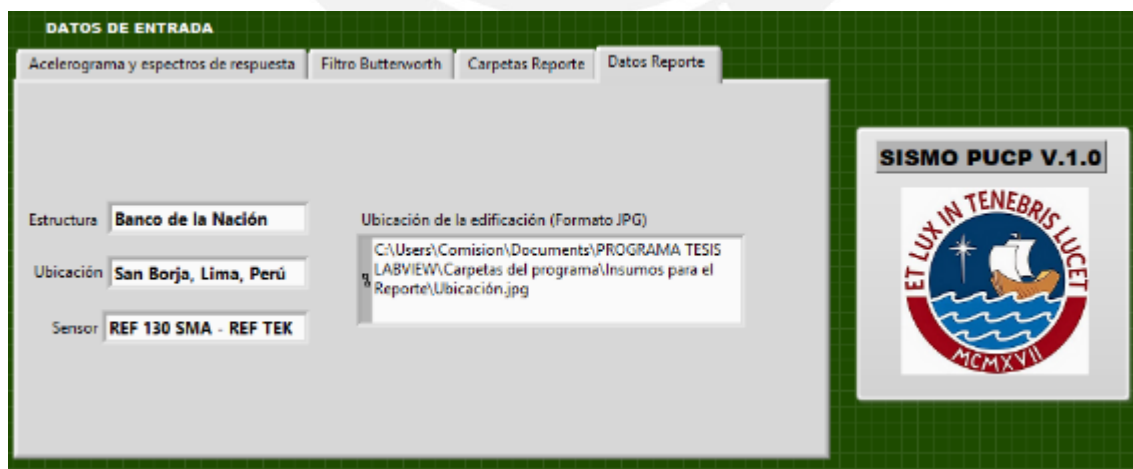


Figura 4C. Datos del sistema de instrumentación sísmica y de la estructura

**PASO 8:** Una vez iniciado el programa, se procesarán las señales leídas de los archivos de texto y la información de las aceleraciones en las tres direcciones (Norte, Sur, Este y Oeste) se incluirán dentro de reportes de cada evento y se guardarán en la carpeta “Reportes de sismo”. A continuación, se muestran los gráficos generados por el programa Sismo PUCP V.1.0.

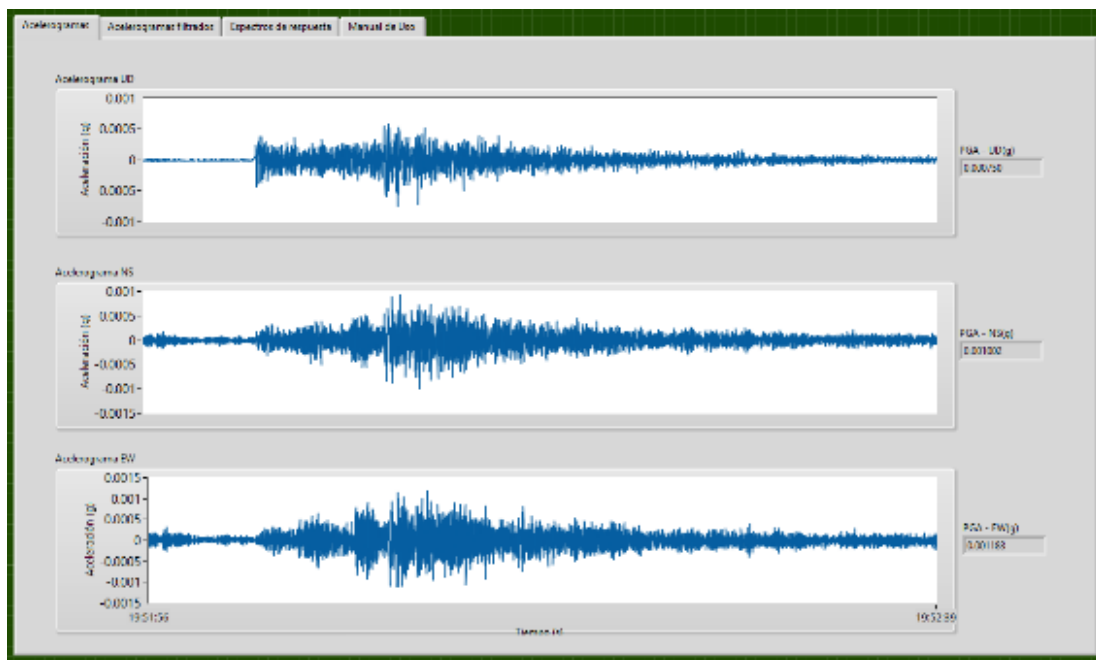


Figura 5.C. Acelerogramas totales de la señal sísmica en las tres direcciones de registro

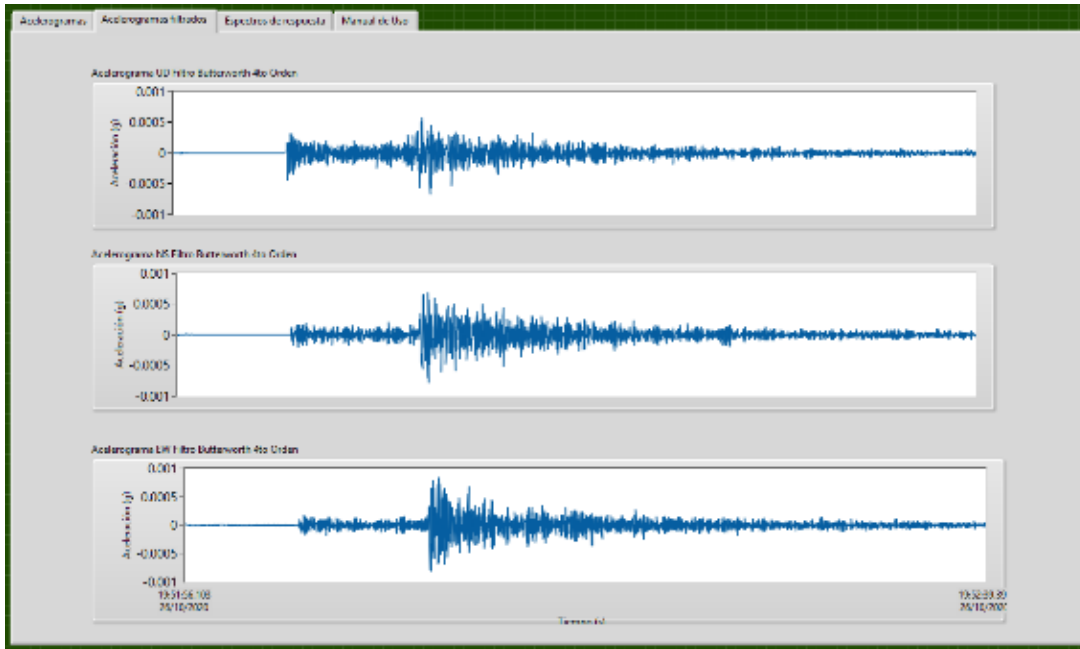


Figura 6.C. Acelerogramas filtrados de la señal sísmica en las tres direcciones de registro

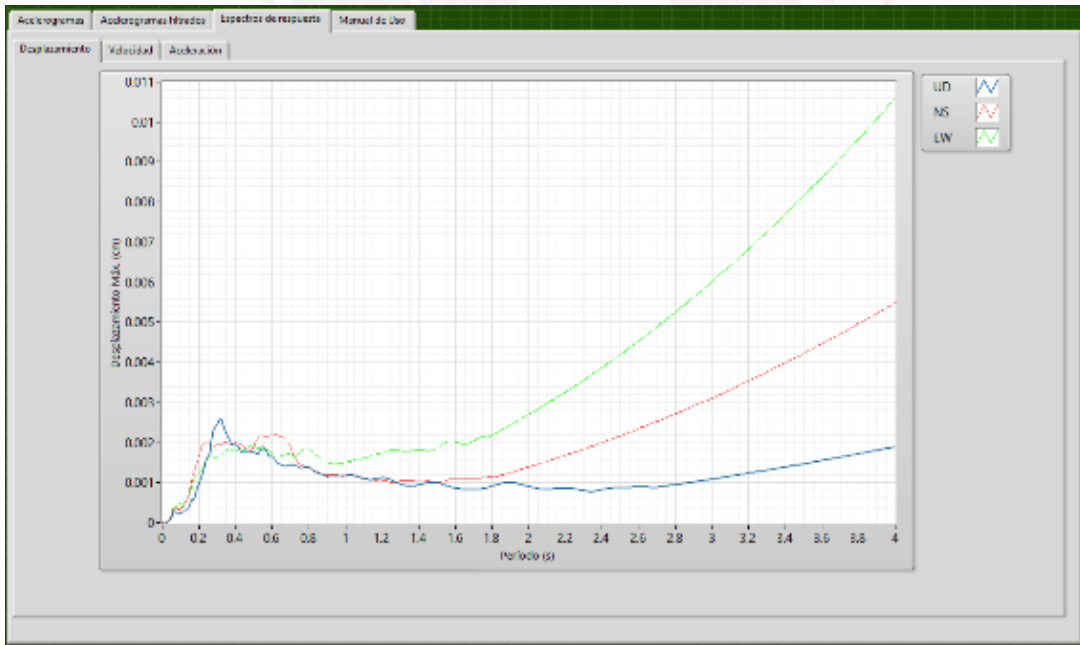


Figura 7.C. Espectros de respuesta de desplazamiento en las tres direcciones de registro.

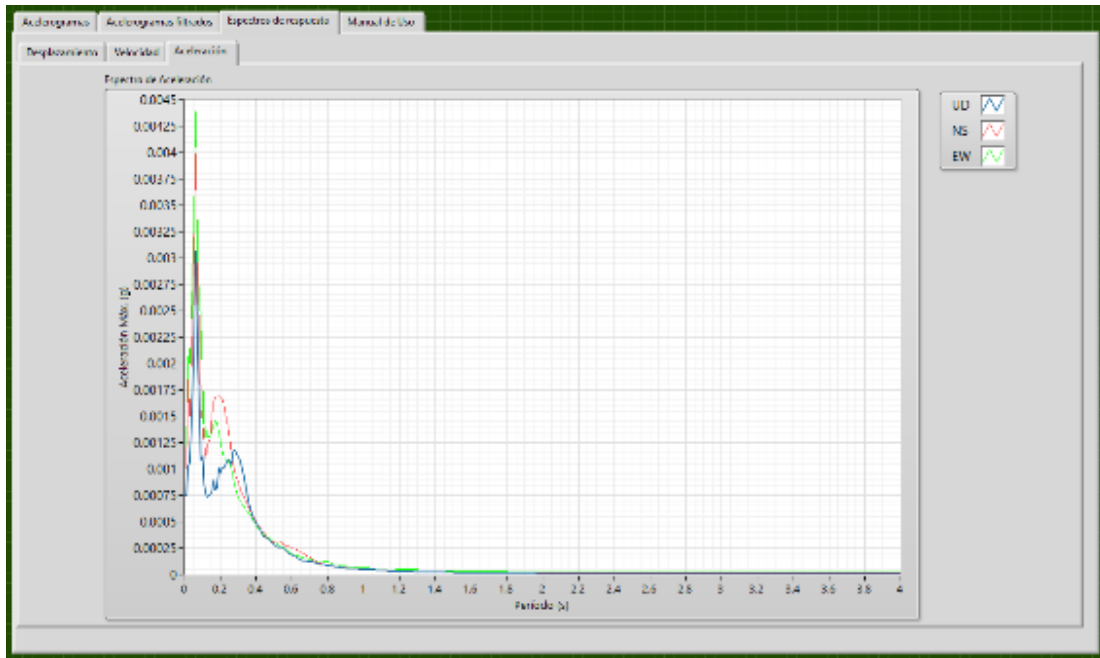


Figura 8.C. Espectros de respuesta de velocidad en las tres direcciones de registro.



Figura 9.C. Espectros de respuesta de aceleración en las tres direcciones de registro

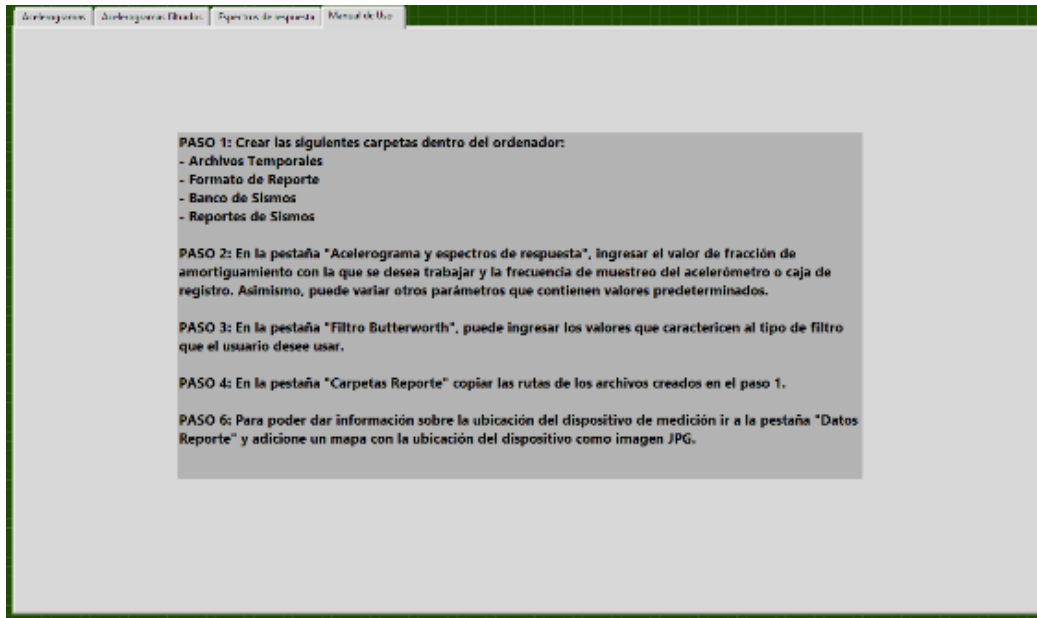



Figura 10.C. Pasos a seguir para la ejecución del programa Sismo PUCP V.1.0.



## Reporte generado por Sismo PUCP V.1.0.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL		
		
<b>REPORTE DE MOVIMIENTO SÍSMICO RED DE MONITOREO SÍSMICO DE EDIFICIOS</b>		
<b>1. RESUMEN</b>		
<b>Estructura</b>	<b>:</b>	<b>Banco de la Nación</b>
<b>Sensor</b>	<b>:</b>	<b>REF 130 SMA - REF TEK</b>
<b>Ubicación</b>	<b>:</b>	<b>San Borja, Lima, Perú</b>
<b>Fecha</b>	<b>:</b>	<b>F_20180701-H_000848</b>
<b>Aceleración Máx. NS (g)</b>	<b>:</b>	<b>0.000750</b>
<b>Aceleración Máx. EW (g)</b>	<b>:</b>	<b>0.001002</b>
<b>Aceleración Máx. UD (g)</b>	<b>:</b>	<b>0.001183</b>
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ Av. Universitaria 1801 - San Miguel, Lima, Perú T: (511) 626 2000		





## 2. INTRODUCCIÓN

El proyecto de monitoreo sísmico del edificio del Banco de la Nación, fue implementado con el propósito de registrar movimientos sísmicos y reportar parámetros característicos de dichos registros. Esto en cumplimiento de lo requerido en la Norma Técnica Peruana E.030 "Diseño Sismorresistente" en su capítulo IX "Instrumentación Sísmica".

En la FIG.1 se puede observar la ubicación del instrumento:



FIG.1 UBICACIÓN DEL INSTRUMENTO, FUENTE (IGP)



Las mediciones son realizadas en las estaciones acelerométricas, las cuales poseen 3 sensores de aceleración ortogonales. Este equipo se encuentra instalado sobre una fundación en suelo y según la orientación de los puntos cardinales. El sistema es totalmente automático y permite obtener información esencial de un evento sísmico segundos después de finalizado el mismo.

### 3. ACELEROGRAMAS

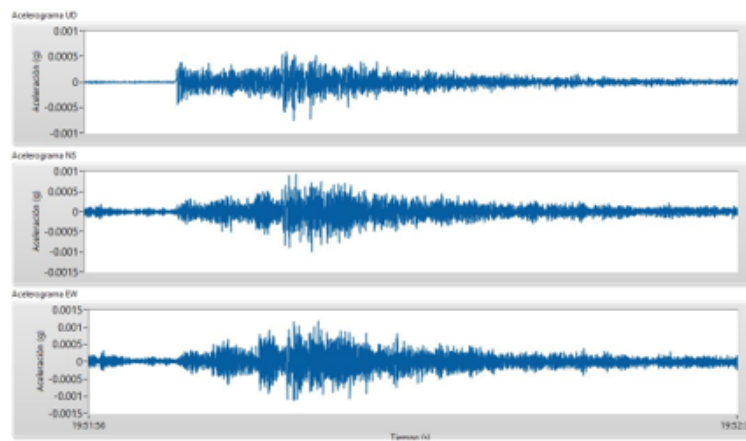


FIG.2 ACELERACIONES EN LA BASE. DIRECCIONES NS, EW Y UD

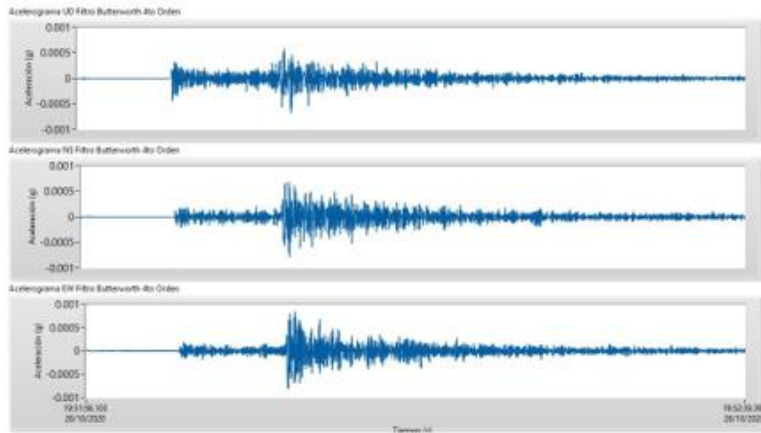


FIG.3 ACCELERACIONES FILTRADAS. DIRECCIONES NS, EW Y UD

#### 4. ESPECTROS DE RESPUESTA

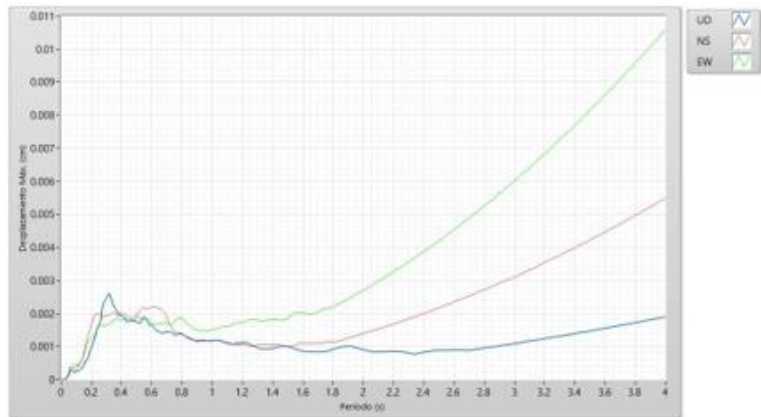


FIG.4 ESPECTRO DE DESPLAZAMIENTO

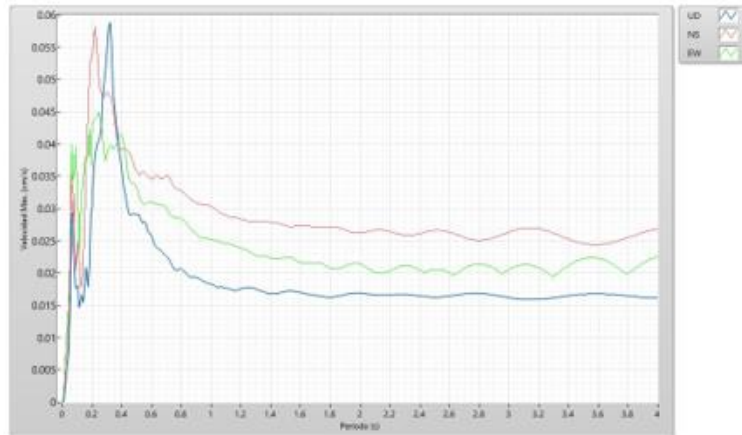


FIG.5 ESPECTRO DE VELOCIDAD

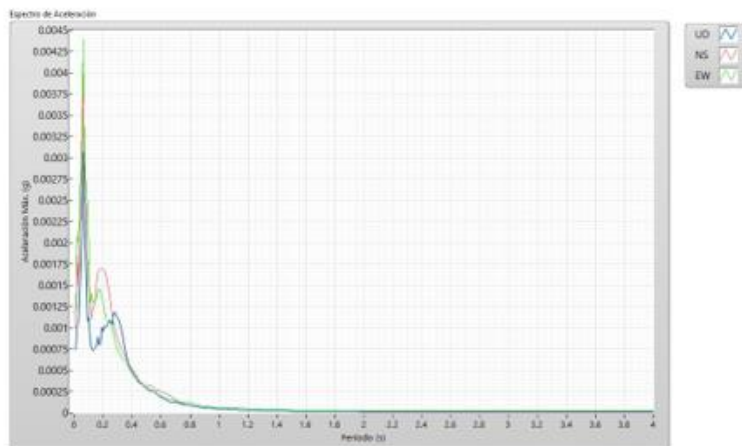
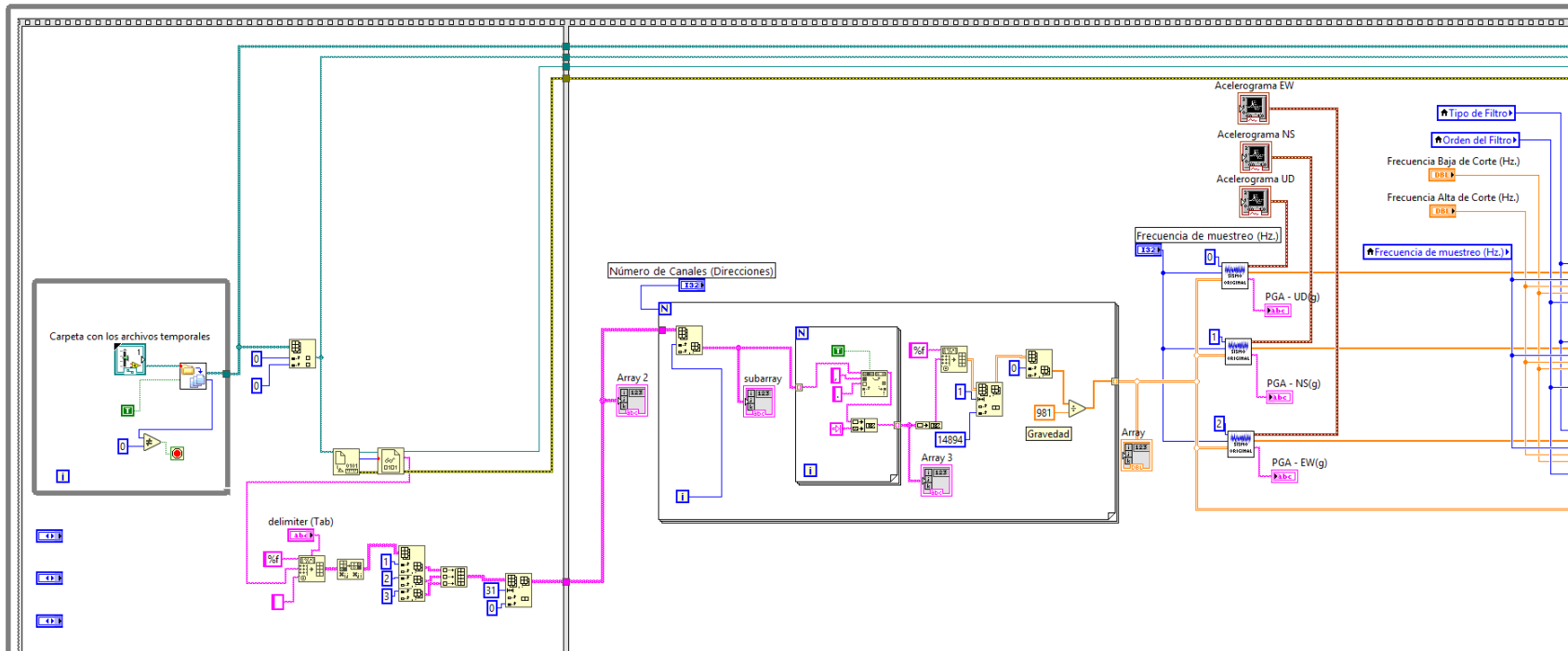
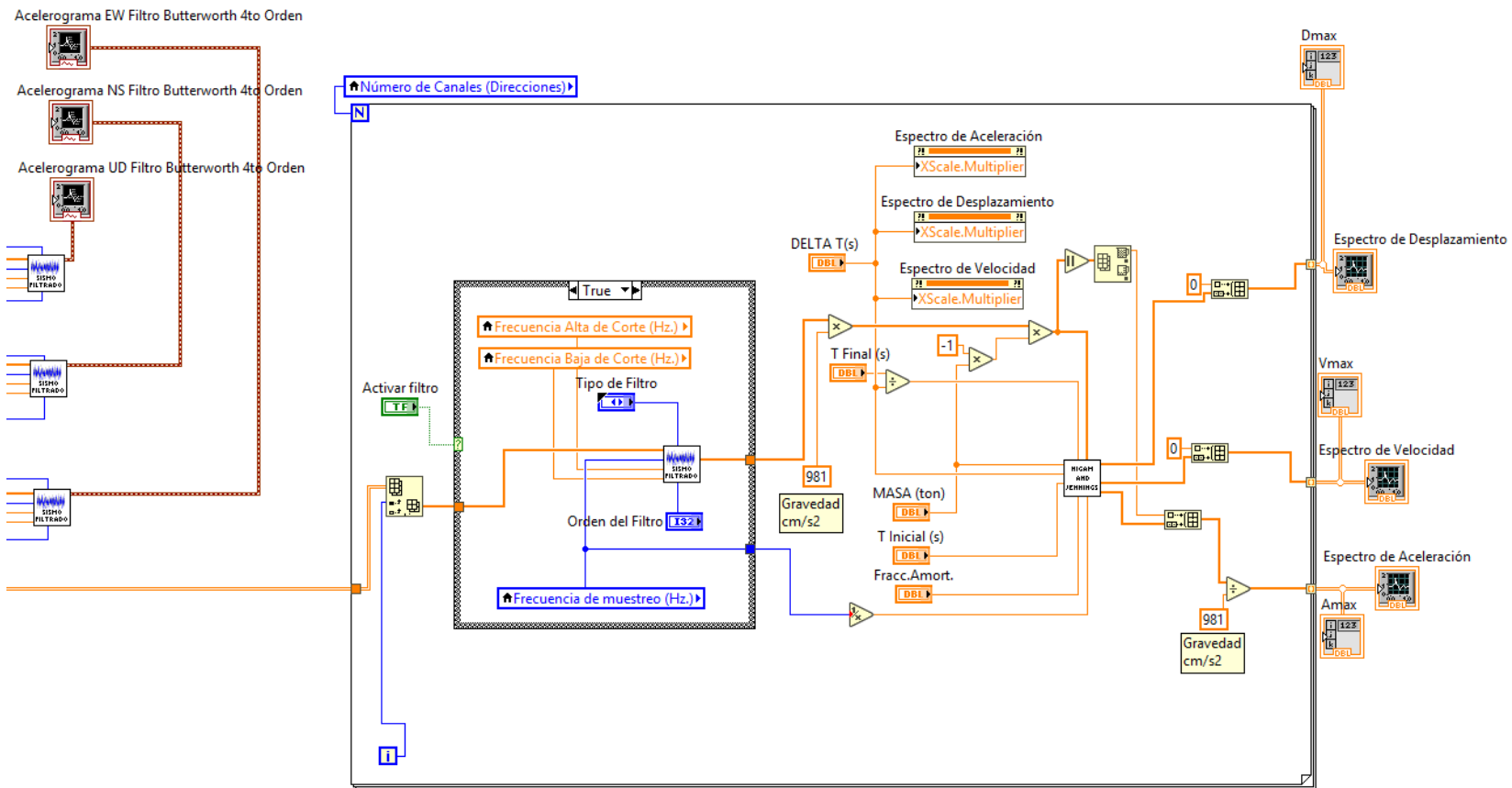
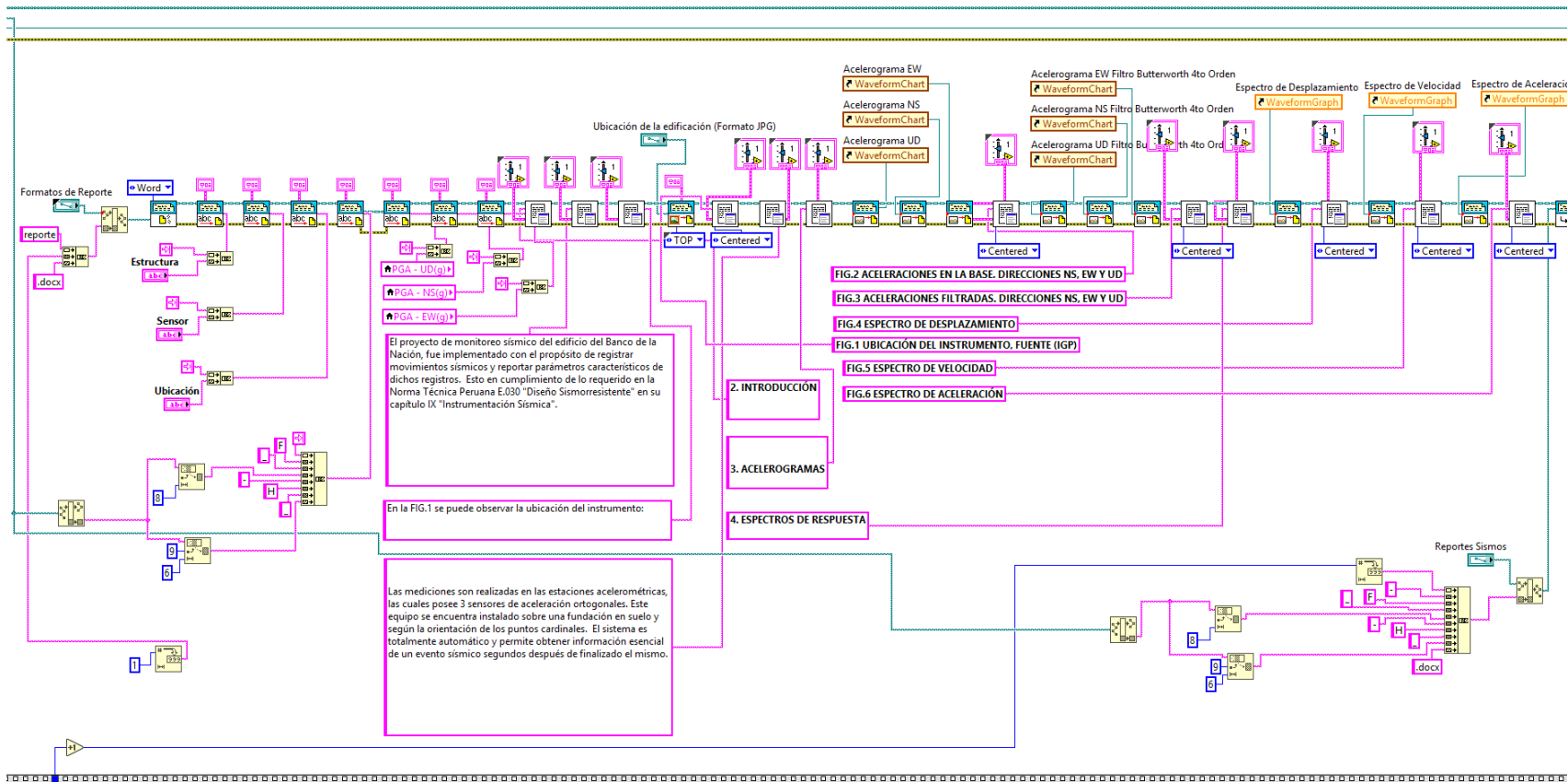


FIG.6 ESPECTRO DE ACCELERACIÓN

## Diagrama de bloque del programa Sismo PUCP V.1.0.







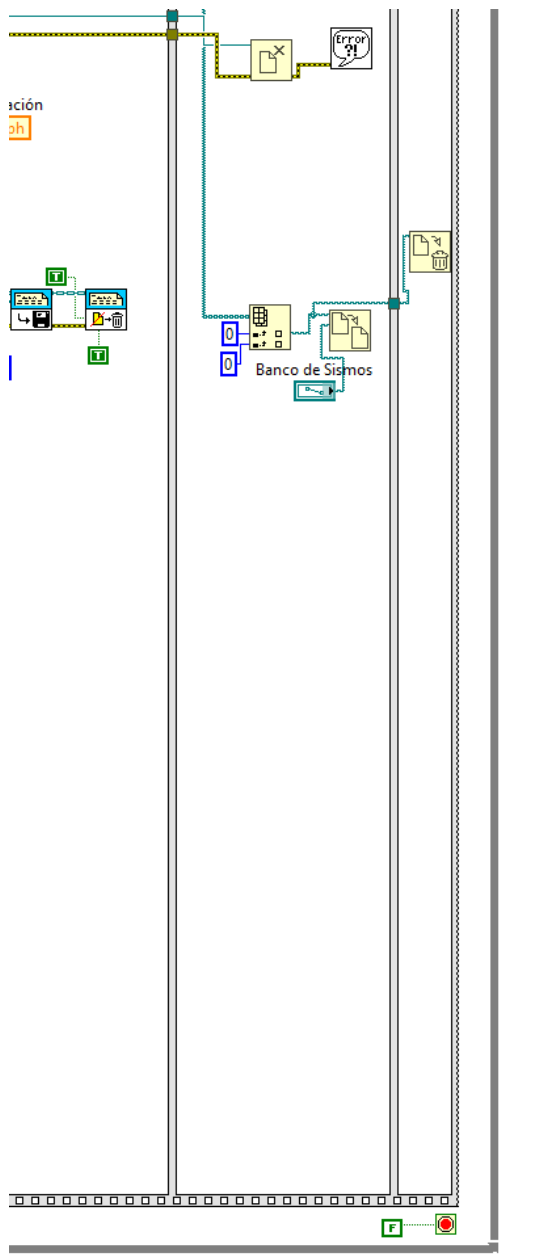




Diagrama de bloque del Sub VI “Nigam and Jennings”

