



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelación matemática de un
edificio alto para evaluar los efectos
inducidos por el viento**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Uriel Villalobos Joconoxtle

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Adrián Pozos Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL

(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado MODELACION MATEMATICA DE UN EDIFICIO ALTO PARA EVALUAR LOS EFECTOS INDUCIDOS POR

EL VIENTO que presenté para obtener el título de INGENIERO MECÁNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

URIEL VILLALOBOS JOCONXTLE

Número de cuenta: 315330836

Agradecimientos

Gracias a mi familia por todo el apoyo que me han dado durante toda mi vida; a mi hermana, por ayudarme y guiarme siempre que lo necesité; a mi padre y mi madre por todo lo que me han dado: una formación y educación sin la que no hubiera podido lograr esto. También muchas gracias por el amor que me han brindado, en las buenas y en las malas.

Agradezco a Dios, por darme la confianza necesaria para conseguir mis objetivos y la fuerza para enfocarme en mis estudios.

Investigación realizada gracias al **Programa UNAM-PAPIIT IN103422**: Desarrollo de curvas de fragilidad de edificios altos con sistemas de amortiguamiento auxiliar sometidos a vientos turbulentos.

Agradezco a la **Universidad Nacional Autónoma de México** por darme todas las herramientas desde el bachillerato para lograr alcanzar mis metas académicas, a la Facultad de Ingeniería por darme experiencia y estudio suficiente para mi carrera profesional.

Gracias a mi asesor, el Dr. Adrián Pozos Estrada por la ayuda que me brindó a lo largo de mi servicio social, así como el asesoramiento en el desarrollo de mi tesis.

Gracias al M.I Rigoberto Nava González por la paciencia y por todas las tutorías brindadas durante mi servicio social, ya que sin ellas no hubiera podido aprender los programas para la conclusión de este.

Contenido

Agradecimientos.....	1
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas	9
Resumen.....	10
Abstract	11
Capítulo 1. Marco teórico	12
1.1 Introducción	12
1.2 Objetivos	23
1.3 Justificación	23
Capítulo 2. Programa y lenguaje de programación: ANSYS APDL.....	24
2.1 ¿Qué es ANSYS APDL?.....	25
2.2 Objetivos de trabajar con ANSYS APDL.....	29
Capítulo 3. Interacción del viento con edificios.....	31
3.1 Historia.....	31
3.2 Vibraciones mecánicas	35
3.3 Posibles fallas, ejemplos.....	37
Capítulo 4. Metodología	39
4.1 Modelado matemático del edificio (ETABS).....	39
4.2 Modelado de estructuras altas en ANSYS.....	45
KP, L y A	46
Materiales y propiedades.....	49
4.3 Diseño final	52
Mallado	52
Capítulo 5. Aplicación de condiciones de frontera.....	54
5.1 Fuerzas y gravedad	54
5.2 Restricciones	61
Capítulo 6. Metodología y comandos para la resolución del modelo	63
6.1 ¿Qué resultados se buscan? ¿Por qué?	63
6.2 Resolución en ANSYS APDL.....	64
6.3 Comandos necesarios para obtener resultados	64

6.4 Tipos de análisis para obtener resultados	68
Análisis transitorio.....	70
Capítulo 7. Análisis de resultados	76
Capítulo 8. Recomendaciones y conclusiones	79
Bibliografía	82
Apéndice	84

Índice de figuras.

Figura 1.1.1. Ejemplo de un edificio construido en ETABS.....	12
Figura 1.1.2. Representación 2D de la acción del viento sobre un edificio simplificado a un prisma rectangular	14
Figura 1.1.3. Representación 3D de flujo de aire frente a una estructura rectangular	15
Figura 1.1.4. Edificio propuesto del artículo Next Generation Benchmark Control Problem for Seismically Excited Buildings.....	16
Figura 1.1.5. Plano horizontal del edificio, con 5 crujiás en el eje X, y 6 en el eje Y	17
Figura 1.1.6. Rugosidad de terreno.....	18
Figura 2.1.1. Interfaz de ANSYS Mechanical APDL.....	26
Figura 2.1.2. Interfaz de Visual Studio Code y ejemplo de código	27
Figura 2.1.3. Importación de un archivo .txt	27
Figura 2.1.4. Resultado de importar un archivo .txt a Mechanical APDL	28
Figura 2.2.1. Tipos de análisis en la interfaz de APDL.....	29
Figura 3.1.1. Esquema de rugosidad dependiendo el tipo de área	32
Figura 3.1.2. Centro de Ingeniería Avanzada, Facultad de Ingeniería UNAM.....	34
Figura 3.1.3. Gráfica con pérdidas económicas a causa de desastres naturales mayores, a través de los años.....	34
Figura 3.3.1. Puente de Tacoma.....	38
Figura 3.3.2. Edificio Great Plains Life Building, después de balancearse y oscilar durante varios segundos debido a fuertes vientos	38
Figura 4.1.1. Creación de modelo	40
Figura 4.1.2. Vista en planta.....	42
Figura 4.1.3. Vista en elevación del edificio, desde la base hasta el último piso...	43
Figura 4.1.4. Vista en 3D.....	44
Figura 4.1.5. Vista en 3D extruido	45
Figura 4.2.1. KP en la interfaz gráfica de APDL	46
Figura 4.2.2. KP en el script de APDL.....	47
Figura 4.2.3. Representación gráfica con líneas en Ansys	47
Figura 4.2.4. Generación de líneas/vigas en el código.....	48

Figura 4.2.5. División de líneas por sección	48
Figura 4.2.6. Áreas en el código.....	48
Figura 4.2.7. Áreas/Losas en Ansys APDL	49
Figura 4.2.8. Creación de propiedades y materiales	50
Figura 4.2.9. Asignación de perfil, dimensiones, deformación de cortante, tipo de material y sección.....	51
Figura 4.2.10. Asignación de grosor de losa, tipo de sección, carga muerta, tipo de material y desfase	51
Figura 4.3.1. Modelo final	52
Figura 4.3.2. Prototipo extruido y mallado	53
Figura 5.1.1. Comando y valor de la gravedad.....	54
Figura 5.1.2. Interfaz, menús del programa SVTPro16 y archivo de texto cargado para su ejecución	57
Figura 5.1.3. Menú para iniciar múltiples simulaciones.	58
Figura 5.1.4. Área tributaria para dos nodos distintos en el primer nivel	59
Figura 5.1.5. Fragmento del código de Matlab para el cálculo de fuerzas	60
Figura 5.1.6. Escritura de comandos para introducción de fuerzas en APDL	61
Figura 5.1.7. Comando <i>FK</i> , nodo dónde se aplica la fuerza, carga, dirección y tipo de carga	61
Figura 5.2.1. Restricción de nodos.....	62
Figura 6.3.1. Comandos para resolución del análisis modal.	66
Figura 6.3.2. Inicio del análisis transitorio y especificaciones	68
Figura 6.4.1. Primeros dos modos de vibración del edificio	69
Figura 6.4.3. Respuesta de desplazamiento [m] (superior) y aceleración [mili-g] (inferior) en el nodo 1 en la señal 3	72
Figura 6.4.4. Visualización del desplazamiento (superior) y la aceleración (inferior) del edificio en la señal 2, en un tiempo de 300 [s].....	73
Figura 6.4.5. Visualización del desplazamiento (superior) y la aceleración (inferior) en la señal 3, en un tiempo de 300 [s].....	74
Figura A1. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 1	86
Figura A2. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 2	88

Figura A3. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 3	90
Figura A5. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 5	94
Figura A6. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 6	96
Figura A7. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 7	98
Figura A8. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 8	100
Figura A9. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 9	102
Figura A11. Respuesta del modo 3, análisis modal	105
	116
Figura A13. Aceleraciones en los 4 nodos de estudio, durante 600 [s] por señal	125

Índice de tablas

Tabla 1.1.1. Clasificación de la rugosidad y sus coeficientes.....	18
Tabla 1.1.2. Clasificación de estructuras.....	19
Tabla 1.1.3. Valores de altitud y presión barométrica.	20
Tabla 1.1.4. Coeficiente de presión.....	21
Tabla 4.1.1. Materiales y propiedades por utilizar.	41
Tabla 4.1.2. Sección y su material asignado.	42
Tabla 5.1.1. Velocidad media de diseño.	56
Tabla 6.1.1. Estado límite de servicio de distorsiones y de desplazamiento lateral.	63
Tabla 6.1.2. Estados límite de aceleración. n_1 es la frecuencia fundamental en la dirección del viento.....	64
Tabla 6.4.1. Primeros diez modos de la estructura.	68
Tabla 6.4.2. Máximos desplazamientos en cada nodo por señal y su promedio... 75	
Tabla 6.4.3. Máximas aceleraciones en cada nodo por señal y su promedio.	75
Tabla A1. Resultados modales de ETABS.....	84

Resumen

Dada la expansión urbana que se presenta desde comienzos del siglo XX a consecuencia del incremento y diversificación de diferentes empresas, sobrepoblación y crecimiento de zonas semiurbanas, la fabricación de grandes edificios tiende a ser un pensamiento en crecimiento, explotando así al máximo el área designada para su elevación. Sin embargo, dichas construcciones dependen de diversos factores internos y externos a considerar, como lo son: ráfagas de viento, sismos, lluvia, fuerza de levantamiento, tipo de suelo, carga muerta, carga viva, materiales de construcción, esfuerzos, entre otros, de modo que tienen costes excesivos y son sumamente complicados de diseñar y construir.

En la presente investigación se diseñó y analizó un edificio con una altura no mayor a 100 [m], a fin de ejecutar un análisis dinámico con el cual se podrá conocer si su estructura es funcional y segura antes de comenzar su levantamiento, tomando en cuenta únicamente condiciones reales de viento que pueden llegar a interactuar con la estructura y afectarla en casos extremos.

El contenido consta de una introducción al diseño estructural, al igual que una presentación de los programas con los que se trabajó a lo largo de la generación del documento, para después pasar a la metodología, obteniendo resultados donde se demostrará si la edificación tiene una estructura factible. Por último, se presenta un análisis de resultados y conclusiones, dejando comentarios y recomendaciones para futuras investigaciones.

Abstract

Given the urban expansion that has occurred since the early 20th century due to the increase and diversification of different industries, overpopulation, and the growth of semi-urban areas, the construction of large buildings tends to be a growing trend, thus maximizing the area designated for their construction. However, these buildings depend on various internal and external factors to consider, such as wind gusts, earthquakes, rain, lifting force, soil type, dead load, live load, construction materials, stresses, among others. As a result, they incur excessive costs and are highly complicated to design and build.

This research designed and analyzed a building with a height not exceeding 100 meters, in order to conduct a dynamic analysis that will determine whether its structure is functional and safe before its construction begins, considering only real wind conditions that may interact with the structure and affect it under extreme circumstances.

The content includes an introduction to structural design, along with an overview of the software programs used throughout the document's creation. Then, the methodology is presented, yielding results that will demonstrate whether the building's structure is feasible. Finally, an analysis of results and conclusions is presented, along with comments and recommendations for future research.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1 Introducción

En la actualidad, las grandes urbes cuentan con amplias necesidades y servicios, de manera que las empresas de entretenimiento, residencias u oficinas buscan expandir sus bienes. “Muchos datos muestran que las grandes urbes y las áreas metropolitanas siguen atrayendo a la población y concentrando lo esencial de la economía y la actividad en todo el mundo” (Capel, 2003). Es por ello, y también a la reducción de terreno para obras horizontales, que los edificios altos y superaltos se han vuelto la opción más viable dada su construcción en vertical, lo que permite optimizar el espacio disponible.

Si bien la creación de un edificio puede llegar a tardar años, la generación de un prototipo hoy en día es posible en una menor cantidad de tiempo gracias a las herramientas digitales que existen (Figura 1.1.1). Por ejemplo, con la ayuda del programa ETABS 20.0.0, se diseñan una gran variedad de edificaciones, debido a que, dentro de su espacio de trabajo, se toman en cuenta reacciones internas y externas, pudiendo analizar la interacción de este con el ambiente; en este caso en específico, la investigación se centrará en pruebas con fuertes vientos que ejercen presiones positivas (hacia el interior) y negativas (hacia el exterior) en toda la estructura externa, ocasionando reacciones adversas a evitar o controlar.

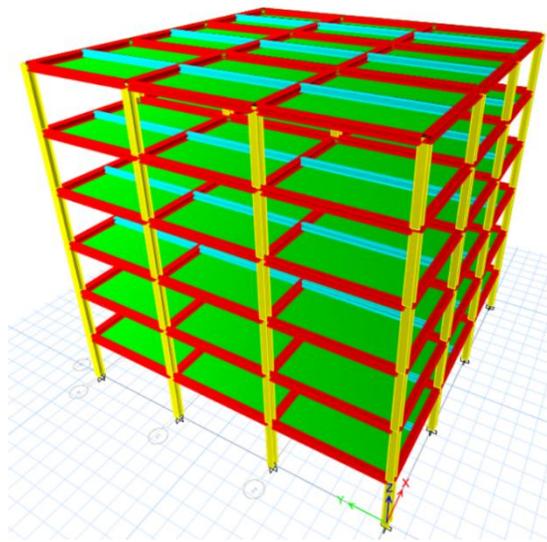


Figura 1.1.1. Ejemplo de un edificio construido en ETABS (Elaboración propia).

La producción de un prototipo digital debe llevarse a cabo con todas las consideraciones y limitaciones con las que se debe crear el inmueble en sí, tomando como base el diseño estructural y también la ingeniería de viento (para este caso de estudio). El diseño estructural se define, a grandes rasgos, como: un análisis conceptual a partir de la naturaleza de una carga aplicada en cierta sección o elemento; dicha carga puede ser una combinación de fuerzas a lo largo del elemento, a través de este y en ocasiones se agrega un par de torsión.

Con el enfoque digital actual y gracias a la variedad de softwares para la modelación y exploración de proyectos, es mucho más sencillo asignar valores numéricos a dichas fuerzas, construyendo una base de datos; dicha base, se encarga de revisar elemento por elemento y verificar si cada uno soporta las cargas satisfactoriamente.

Las fuerzas que afectan a las edificaciones se clasifican en tres tipos: “naturales, útiles y accidentales. Las primeras actúan simplemente por la existencia del edificio, como la gravedad, el viento, la temperatura, etc. Las segundas, suceden y dependen del propósito útil y limitaciones de la construcción; por ejemplo, un puente peatonal se construirá con el propósito de ser utilizado únicamente por peatones en un límite de tiempo, obteniendo cargas variables. El tercer tipo, pueden ocurrir debido a fallas humanas, colisiones o explosiones y ráfagas de viento” (Millais, 2017). En consecuencia a estas fuerzas y su combinación, existen estados límites de comportamiento que restringen el desplazamiento o deformación de una edificación para determinar el inicio de un modo de comportamiento inaceptable, regidos en base a normas.

Con respecto a las acciones útiles, es importante recalcar la existencia de cargas muertas y cargas vivas en el plan de trabajo; a continuación, su definición:

“se considerarán como *cargas muertas* los pesos de todos los elementos constructivos, de los acabados y de todos los elementos que ocupan una posición permanente y tienen un peso que no cambia sustancialmente con el tiempo. Por su parte, las *cargas vivas* se definen como las fuerzas que se producen por el uso y ocupación de las edificaciones y que no tienen carácter permanente”.¹

Dada la importancia del diseño en obras civiles, se llevan a cabo pasos específicos a completar, existiendo tres aspectos fundamentales que se sugieren seguir para una correcta ejecución. Piralla, R. (2015), en su libro *Diseño Estructural* considera que son los siguientes:

Estructuración: aspecto donde se determina los materiales a utilizar, la forma global de la estructura, el arreglo de sus elementos y sus dimensiones.

¹ Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones.

Análisis: conjunto de actividades que determinan la respuesta de la estructura ante las acciones exteriores que pueden llegar a interactuar con ella.

Dimensionamiento: revisión a detalle de los requisitos de seguridad de la estructura. Además, se elaboran planos y especificaciones de construcción.

Estos aspectos deben de ser iterativos dentro del proceso de diseño, complementados con otras actividades de importancia para así diseñar bajo normas de seguridad y atendiendo siempre la seguridad de los usuarios.

El segundo tema de vital importancia dentro de este trabajo es la ingeniería de viento, dado que interviene siempre en las construcciones, independientemente de si son grandes o pequeñas. La historia nos demuestra que siempre se han presentado grandes fallas de estructuras debido a cargas de viento. Sin embargo, gracias a la evolución antes mencionada, estos errores han ido disminuyendo, aumentando la seguridad, la velocidad de levantamiento y la eficacia del tiempo. Este tema se estudia dentro del capítulo 3.

El viento es un movimiento de aire originado por corrientes térmicas en los primeros 15 kilómetros por encima de la superficie terrestre. Cuando el viento libre es obstaculizado por un objeto fijo, se desvía para rodearlo, produciendo presiones sobre el objeto y convirtiéndolo en un factor complejo de estudiar dada su naturaleza cambiante. Dicha naturaleza trae consigo gran cantidad de variables que lo afectan a lo largo de su trayectoria descendente desde la atmósfera hasta el contacto urbano, como lo son la velocidad, direccionalidad, intensidad y frecuencia. Como se muestra en la Figura 1.1.2 y la Figura 1.1.3, sobre la cara denominada de barlovento se ejercen empujes, mientras que, en la cara de sotavento las estelas del flujo se separan del objeto provocando succiones. Estos dos efectos se suman, dando lugar a una fuerza de arrastre (Otero, Zermeño de León, Arroyo Contreras, & López López, 2015).

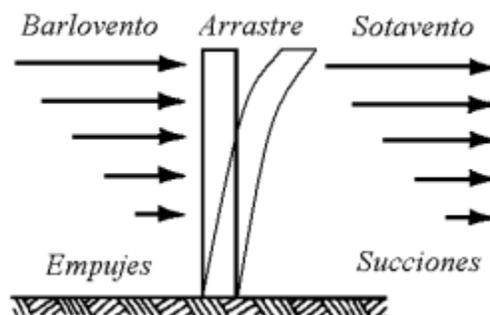


Figura 1.1.2. Representación 2D de la acción del viento sobre un edificio simplificado a un prisma rectangular (Otero, Zermeño de León, Arroyo Contreras, & López López, 2015).

Por su parte, la presión que ejerce el viento sobre un sistema estructural puede verse modificada por varios factores, como lo son: rugosidad del terreno, altura de la edificación, topografía del entorno, importancia de la estructura, direccionalidad del viento, velocidad del viento, turbulencia, abertura en fachadas y vida útil de la estructura (Otero, Zermeño de León, Arroyo Contreras, & López López, 2015). La altura de un edificio tiene una relación directamente proporcional a la velocidad del viento, pues entre mayor sea la altura de este, mayor será la velocidad del viento con la que puede llegar a interactuar la estructura. Dicha velocidad es el componente individual más importante en la determinación de la presión básica.

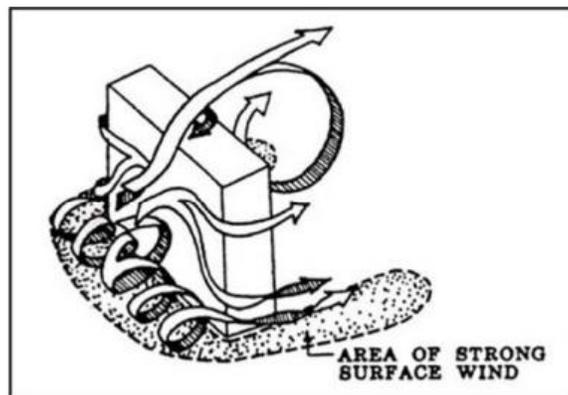


Figura 1.1.3. Representación 3D de flujo de aire frente a una estructura rectangular (Holmes, 2003).

Otro parámetro importante es la geometría de la edificación, pues de esto dependerá el área tributaria (de la cual se hablará más adelante), la cantidad y tipo de material a utilizar, su disposición y por último, pero no menos importante, la dirección de construcción en el área disponible.

En esta investigación, el edificio consta de una geometría rectangular, que cuenta con 20 pisos con una altura total de 80.73 [m], un ancho de 30.48 [m] y un largo de 36.58 [m] (Figura 1.1.4). El largo (eje Y) y ancho (eje X) contarán de 6 y 5 crujeas, respectivamente (Figura 1.1.5); estará totalmente restringido en rotación y traslación en su base; se tendrán columnas rectangulares huecas en las esquinas a todo lo alto de la estructura, así como también en su parte interna; por su parte, las columnas perimetrales tendrán forma en I , variando sus dimensiones dependiendo el entrepiso. De la misma manera, todas las vigas a utilizarse serán en forma en I , solamente cambiando sus dimensiones.

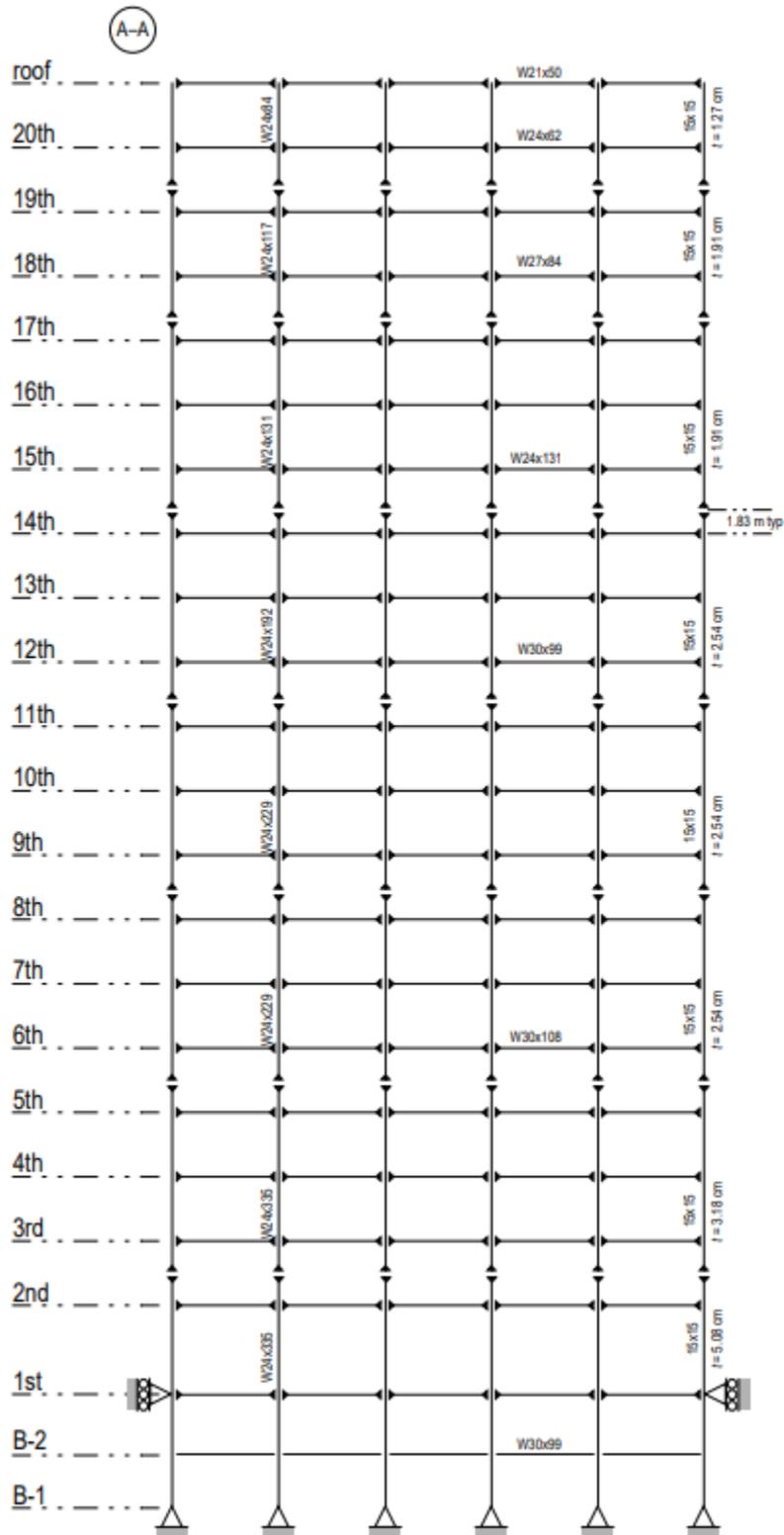


Figura 1.1.4. Edificio propuesto del artículo Next Generation Benchmark Control Problem for Seismically Excited Buildings (Spencer, Christenson, & Dyke, 1999).

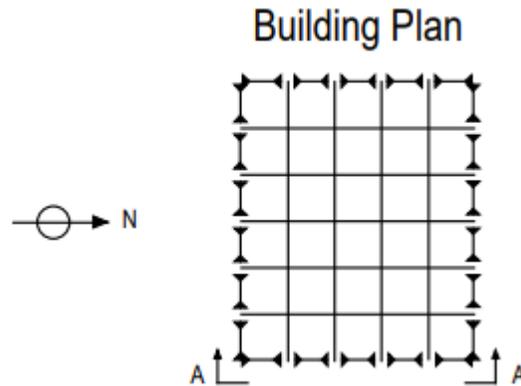


Figura 1.1.5. Plano horizontal del edificio, con 5 crujías en el eje X, y 6 en el eje Y (Spencer, Christenson, & Dyke, 1999).

No obstante, se realizaron adecuaciones para tener una mayor simplicidad. Se tomó el edificio desde el nivel 1, sin considerar los pisos subterráneos y convirtiéndolo en el nivel 0, para no considerar el nivel *roof*. Las conexiones de las columnas ya sean interiores o perimetrales, se consideran siempre al mismo nivel de entrepiso para no generar enlaces innecesarios.

Actualmente, existe literatura fundamentada en la experiencia, observación, experimentación e investigación de un gran número de problemas que se encuentra vaciada en gran variedad de códigos, recomendaciones, especificaciones y manuales, dada la complejidad para generar edificaciones tomando en cuenta la ingeniería de viento. Estos manuales son una guía en el método de diseño estructural y la interacción con ráfagas de viento, en razón de lo cual se toman en cuenta dentro del proyecto, a manera de obtener resultados verídicos y funcionales.

Como ya se mencionó, la rugosidad del terreno es un factor importante que considerar, pues de ello depende la zona en la que se supondrá se construye el modelo. Subsecuentemente, dicha información se toma en cuenta dentro de un programa creado por M.I. Juan Abdel Ortégón Esparza y Dr. Adrián Pozos Estrada en 2016, para la simulación de viento turbulento en el espacio empleando la técnica ARMA² (Auto-regresive moving-average) llamado SVTPro (2016).

La rugosidad del terreno se clasifica de la siguiente manera según el *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por viento* (CFE, 2020):

² ARMA es una metodología desarrollada por Box y Jenkins que proporciona modelos lineales efectivos de series temporales estacionarias, que son capaces de modelar un proceso desconocido con el mínimo número de parámetros (Zhang & Moore, 2015).

Tipos de terreno		α	δ	c
R4	Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m	0.192	470	0.668
R3	Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas	0.140	410	0.832
R2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	0.095	350	1.000
R1	Escasas o nulas obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto	0.061	280	1.142

Tabla 1.1.1. Clasificación de la rugosidad y sus coeficientes.

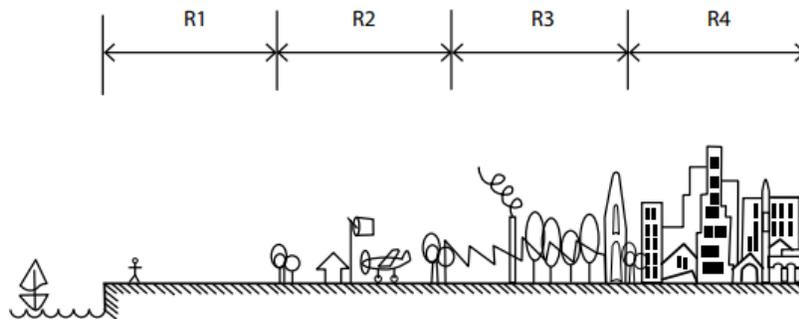


Figura 1.1.6. Rugosidad de terreno (Otero, Zermeño de León, Arroyo Contreras, & López López, 2015).

Existen dos posibilidades de evaluación para estos casos: el análisis estático y dinámico. El análisis dinámico o transitorio se ejecuta cuando: la relación de esbeltez sea mayor a 5 o el periodo fundamental del primer modo de vibración sea mayor a 1 y menor a 5 segundos. En el presente trabajo se desarrollará un análisis transitorio, tomando en cuenta características como la turbulencia en el aire.

Por la variabilidad en el comportamiento de las estructuras ante los principales efectos que el viento puede ocasionar en ellas, las construcciones se clasifican en:

Tipo	Descripción
1	Estructuras poco sensibles a los efectos dinámicos inducidos por las ráfagas del viento; su relación de esbeltez es menor o igual que cinco y su periodo fundamental del primer modo es menor o igual que un segundo.

2	Estructuras sensibles a las ráfagas de corta duración; su relación de esbeltez es mayor que cinco o con periodo fundamental del primer modo de vibrar mayor que un segundo y menor a cinco segundos.
3	Presentan las mismas características que el Tipo 2 y también oscilaciones transversales al flujo del viento al aparecer vórtices debido a estructuras cilíndricas.
4	Estructuras que presentan problemas aerodinámicos inestables debido a los distintos ángulos de incidencia del viento.

Tabla 1.1.2. Clasificación de estructuras.

Como introducción a los cálculos, se determinó tomar del *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por viento* (CFE, 2020), las siguientes ecuaciones y definiciones, con el fin de plasmar una metodología analítica por la cual se pueden llegar a los mismos objetivos que con la metodología aquí presentada: por medio de cálculos de programas especializados.

Presión dinámica de base, q_z .

Cuando el viento actúa sobre una construcción, genera presiones sobre sus superficies, que varían según la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él, a una altura z , se denomina presión dinámica de base q_z , y se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.0048GV_D^2 \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad (1.1.1)$$

donde:

V_D : velocidad básica de diseño, $\left[\frac{km}{h} \right]$.

G : Factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, [1].

El valor de G se obtiene con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{0.392\Omega}{273+t} \quad (1.1.2)$$

donde:

Ω : presión barométrica, [mm de Hg].

t : valor medio anual de las temperaturas mínimas diarias, [°C].

En la siguiente tabla se presentan los valores correspondientes a la variable desconocida Ω .

Altitud [msnm]	Presión barométrica [mm de Hg]
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530

Tabla 1.1.3. Valores de altitud y presión barométrica.

Determinación de la velocidad media de diseño, V'_D .

Dado que la formulación de la respuesta dinámica se ha planteado por diversos códigos internacionales, en términos de la velocidad asociada a un tiempo promediado de 10 minutos, los efectos de la interacción dinámica entre el flujo del viento y la estructura se evalúan a partir de la velocidad media de diseño, V'_D , en $\left[\frac{km}{h}\right]$.

$$V'_D = F_T F'_{vz} V_R \quad (1.1.3)$$

donde:

F_T : factor de topografía, [1].

F'_{vz} : factor de exposición para la velocidad media, [1].

V_R : velocidad regional de ráfaga, $\left[\frac{km}{h}\right]$.

Factor de exposición para la velocidad media, F'_{vz} .

Establece la variación de la velocidad del viento con la altura, y está en función de la categoría del terreno. Se calcula de la siguiente manera:

$$F'_{vz} = c \quad \text{si} \quad z \leq 10 \quad (1.1.4)$$

$$F'_{vz} = c \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad \text{si} \quad 10 < z < \delta \quad (1.1.5)$$

$$F'_{vz} = c \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad \text{si} \quad z \geq 10 \quad (1.1.6)$$

Factor de topografía, F_T .

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura. Se tomarán características normales con ausencia de cambios topográficos importantes, con un valor numérico de 1 [1].

Velocidad regional de ráfaga, V_R .

Se determina tomando en consideración tanto la clasificación de las construcciones según su respuesta ante la acción del viento como su localización geográfica, y se encuentra asociada a ráfagas de 3 segundos. Con la información de la Tabla 1.1.2, se concluyó que la obra se clasifica como una estructura Tipo 2. El valor de la velocidad regional de ráfaga se obtuvo del *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por viento* (CFE, 2020, p.468), tomando un valor de 118.8 [km/h] con un periodo de retorno de 50 años en la Ciudad de México.

Coeficientes de presión.

En el mismo manual, se presenta la siguiente tabla con los diferentes valores del coeficiente de presión.

Cara por analizar	C_p
Barlovento	0.8
Sotavento	-0.5
Muros laterales	-0.65
Techumbres	-1.3,-0.6

Tabla 1.1.4. Coeficiente de presión.

Determinación de la presión de diseño, P_z .

$$P_z = C_p q_z \quad (1.1.7)$$

Este proceso se tiene que seguir cuando se quieran estudiar presiones a partir de velocidades medias de diseño. Si bien es un proceso que se puede utilizar, el uso de SVTPro (2016) modifica un poco la metodología. En este caso, debido a la variabilidad de los resultados, el sistema ARMA implementa de manera automática la velocidad con acciones turbulentas. Según *Otero, Zermeño de León, Contreras y López (2015)*, se parte de la hipótesis de que el aire es un fluido incompresible no viscoso, considerando que la energía cinética permanece constante en cualquier punto, por tanto, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 \quad (1.1.8)$$

donde P_1 y P_2 son presiones estáticas en dos puntos de la corriente de aire, ρ es la densidad del aire, y V_1, V_2 son las velocidades correspondientes. Suponiendo que se toma un punto antes de la estructura y un punto en el centro de la cara del objeto que se opone al flujo, se tiene:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_2 + 0 \quad (1.1.9)$$

El incremento de presión que se provoca contra el objeto resulta:

$$\Delta p = P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 \quad (1.1.10)$$

Dado que la velocidad del flujo varía a lo largo del objeto, el incremento de presión es también diferente con la altura. Realizando una integración del diagrama de presiones sobre la cara de estudio, se puede obtener una presión media determinada como:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 \cdot C_p \quad (1.1.11)$$

donde C_p es un factor de forma, denominado factor de empuje o coeficiente de arrastre. Y como lo que se busca son las fuerzas en el objeto, se puede introducir un área tributaria donde se suponga se ejercerá dicha fuerza:

$$F(t) = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_T^2 \cdot C_p \cdot A_T}{9.807} \quad (1.1.12)$$

donde:

$F(t)$: Fuerza del viento, dependiente del tiempo [kgf]

ρ : Densidad del aire [kg/m^3]

v_T : velocidad total [m/s]

C_p : coeficiente de arrastre [1]

A_T : Área tributaria [m^2]

1.2 Objetivos

Objetivo general: Desarrollar un modelo matemático de un edificio alto y evaluar su respuesta ante cargas de viento.

Objetivos particulares:

- a. Desarrollar conocimientos en los programas especializados para la generación de estructuras, así como para la interacción de mecánica de fluidos con mecánica de sólidos.
- b. Estudiar las generalidades de la construcción de estructuras con acero e incluirlas dentro del proceso de trabajo.
- c. Aplicar los conocimientos aprendidos de los programas (ETABS, ANSYS Mechanical APDL, SVTPro) con los que se trabajará para obtener resultados lo más aproximados a la realidad.
- d. Obtener aceleraciones y desplazamiento del edificio mediante un análisis transitorio.

1.3 Justificación

El presente documento busca aumentar la literatura para la creación de simulaciones con un alto factor de seguridad; con ello, asegurar mejores construcciones y por lo tanto mejores resultados, para la mayor seguridad de los usuarios, maquinaria, etc. Asimismo, busca estudiar las condiciones tanto de fabricación como de viento, para llegar a hacer un prototipo lo más parecido a la realidad, abriendo la posibilidad a la creación física y real del mismo o, si es el caso, la variación de una estructura existente.

Además, se tiene como fines educativos el mejor entendimiento del programa ANSYS APDL, su capacidad y los objetivos que se pueden lograr con su interfaz y lenguaje de programación apoyado del software ETABS.

Capítulo 2. Programa y lenguaje de programación: ANSYS APDL

Hace poco más de un siglo, comenzó a llevarse a cabo la implementación de métodos cuantitativos al diseño estructural; por ende, es relativamente reciente la exploración de esfuerzos y cargas en edificios. En las primeras puestas en práctica ya se tenía conocimiento de conceptos de teoría de elasticidad y resistencia, pero su uso era excesivamente limitado dada la escasez de tecnología. Es por ello, que hoy en día es importante dicha aplicación, ya que, es el método con el que los programas computacionales especializados en aplicaciones ingenieriles trabajan: a través de métodos numéricos avanzados y complicados.

La práctica de la ingeniería estructural tiende en forma natural hacia la automatización, impulsada aceleradamente por el empleo de equipo de cómputo. Este proceso es sin duda benéfico dada su mayor eficacia y precisión, cuando este se utilice de manera adecuada. Buena parte de las actividades de un proyectista en una oficina se dedicaba a la realización de cálculos rutinarios, pero esto cambio al introducir las computadoras, liberando su carga de trabajo y permitiendo dedicar su atención a los problemas fundamentales de la concepción de la estructura y a la revisión de resultados (Piralla, 2015).

Esto ha dado lugar a ingenieros actuando como “codificadores”, quienes tienen que preparar analíticamente o a través de softwares especializados en cálculos, las cargas y las propiedades de la estructura. Como resultado, se ve lleno de hojas de cálculos a interpretar, verificando con sus conocimientos profesionales si los resultados son verídicos (Piralla, 2015).

En la actualidad se tiene una gran variedad de sistemas de cómputo capaces de producir ejemplares y analizarlos, sin necesidad de fabricar un prototipo físico, a partir de la evolución y refinamiento de las técnicas numéricas para el diseño. Estos avances permiten visualizar de forma gráfica los modelos, generar elementos de varios materiales, aplicar cargas y demás. También, en algunos casos, cuentan con postprocesadores capaces de resolver problemas de gran complejidad con un gran número de ecuaciones simultáneas, mostrando resultados gráficos.

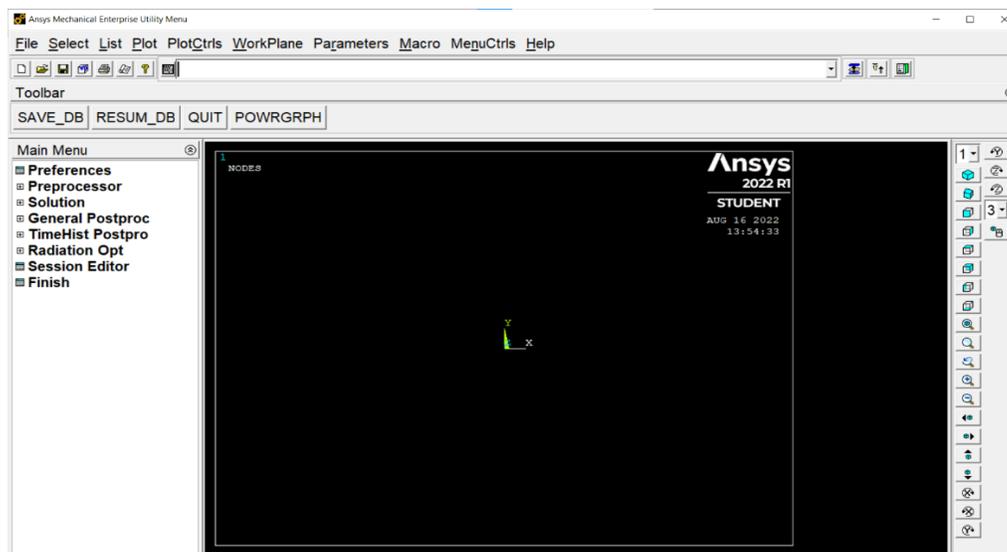
“ANSYS es el software líder mundial en simulación CAE (Computer-aided engineering) multifísico para análisis y simulación por elementos finitos (FEA por

sus siglas en inglés)³. En general, sus productos cuentan con las diferentes fases dentro de un proyecto: preprocesamiento, resolución y postprocesamiento”⁴.

La investigación y experimentación aquí presentada se hizo principalmente mediante ANSYS Parametric Design Language (APDL), programa que, a partir de su lenguaje de programación, es capaz de modelar, diseñar, y analizar un edificio para conocer su respuesta a cargas de viento; todo esto posible aplicando el método FEA.

2.1 ¿Qué es ANSYS APDL?

Es un producto de la compañía estadounidense ANSYS, Inc., dedicada al software de simulación utilizado en diferentes sectores de la industria. “ANSYS APDL es una herramienta CAE poderosa que permite el trabajo a partir de comandos de texto en su propio lenguaje de programación, que puede usarse para automatizar tareas comunes o incluso construir su modelo en términos de variables, sin necesidad de disponer de la interfaz”⁵ (Figura 2.1.1). Dicho lenguaje, a través de los comandos de texto, permite al usuario comunicarse con el programa ANSYS con un mayor control y versatilidad en cada operación, con el objetivo de hacer frente a la situación propuesta, entre las cuales pueden estar problemas de tipo estructural, térmico, eléctrico, magnético y electromagnético.



³ FEA: Técnica matemática para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. En ingeniería es utilizado para dividir dicho sistema en pequeñas piezas o elementos que pueden ser aproximados. (Thompson & Thompsom, 2017)

⁴ (ANSYS, s.f.)

⁵ (CADE, s.f.)

Figura 2.1.1. Interfaz de ANSYS Mechanical APDL (ANSYS, 2022).

APDL es un programa existente desde 1980, convirtiéndolo en uno de los más longevos de ANSYS siendo la base de programas más novedosos como Workbench. Aunque tenga bastante tiempo en uso, no debe olvidarse que aún es un programa en extremo funcional, ya que se pueden ejecutar proyectos de gran calibre en un tiempo menor a otros programas.

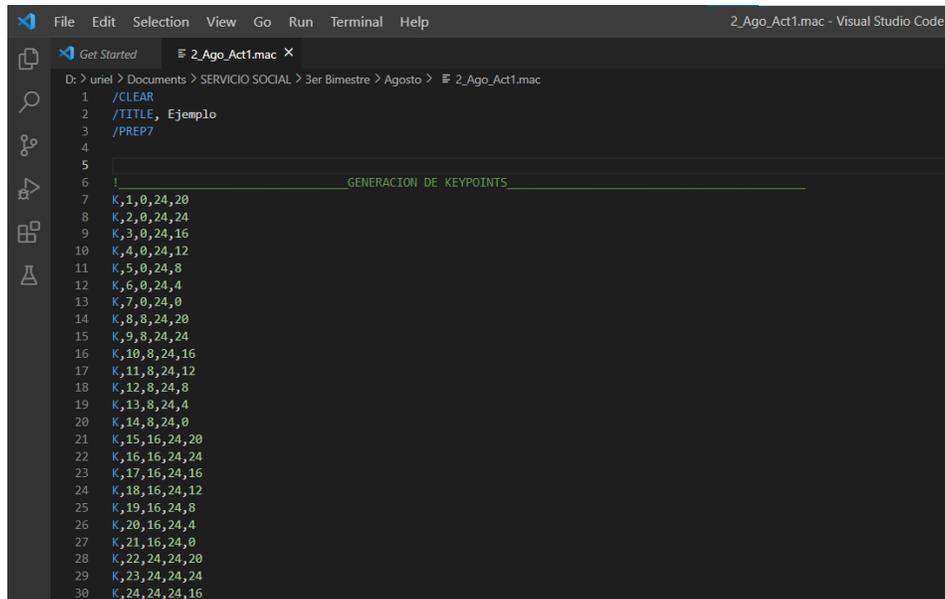
De la misma manera, ANSYS APDL provee un gran control sobre el proceso; es un programa al que se le asignan tareas simples, desde la creación de cierta geometría hasta el postprocesamiento de esta, de manera secuencial y ordenada, obligando al usuario a ordenar cronológicamente las tareas a completar.

Gracias al lenguaje de programación, trabajar con ANSYS APDL puede reducirse a cambios simples que generen diferencias; por ejemplo, si se tiene el caso de una construcción con cierta estructura externa, y se desea realizar una comparación con otra obra con una geometría similar, basta con variar ciertos parámetros dentro del código para crear la nueva geometría en poco tiempo. Además, APDL no solo puede ser utilizado para el diseño de estructuras, también se emplea para análisis por elementos finitos, con comandos únicos para la discretización de la pieza por default o con dimensiones propuestas por el usuario, definición de contactos y fuerzas, y por supuesto, el post procesamiento.

Asimismo, la utilización de APDL en diferentes planes de ingeniería civil consigue como resultado una disminución en el tiempo de entrega y costos, puesto que ya no es necesario la formación de prototipos físicos para mejorar la productividad.

El trabajar dentro de APDL por medio de códigos, proporciona un archivo de tipo .txt con el que se pueden explorar las diferentes condiciones, propiedades, variables y pruebas con las que se va a trabajar al momento de ejecutarse. La lectura de dicho documento se facilita dadas las subdivisiones que se puede crear, pudiendo separar la generación de la geometría de la discretización o del análisis a desarrollar, además de comentarios para explicar algún comando.

Para tener una mejor visualización del script, se decidió utilizar Visual Studio Code, programa que importa y genera archivos de texto de cualquier lenguaje de programación, descargando los comandos necesarios y distinguiéndolos con un código de colores. En la Figura 2.1.2, se muestra un ejemplo de un código que se generó como ejercicio previo al proyecto final, en el que únicamente se genera un bosquejo de KeyPoints.



```
File Edit Selection View Go Run Terminal Help 2_Ago_Act1.mac - Visual Studio Code
Get Started 2_Ago_Act1.mac x
D:\> uriel > Documents > SERVICIO SOCIAL > 3er Bimestre > Agosto > 2_Ago_Act1.mac
1 /CLEAR
2 /TITLE, Ejemplo
3 /PREP7
4
5
6 GENERACION DE KEYPOINTS
7 K,1,0,24,20
8 K,2,0,24,24
9 K,3,0,24,16
10 K,4,0,24,12
11 K,5,0,24,8
12 K,6,0,24,4
13 K,7,0,24,0
14 K,8,8,24,20
15 K,9,8,24,24
16 K,10,8,24,16
17 K,11,8,24,12
18 K,12,8,24,8
19 K,13,8,24,4
20 K,14,8,24,0
21 K,15,16,24,20
22 K,16,16,24,24
23 K,17,16,24,16
24 K,18,16,24,12
25 K,19,16,24,8
26 K,20,16,24,4
27 K,21,16,24,0
28 K,22,24,24,20
29 K,23,24,24,24
30 K,24,24,24,16
```

Figura 2.1.2. Interfaz de Visual Studio Code y ejemplo de código (Elaboración propia).

Posterior a que se genera el código, debe de importarse en ANSYS, por medio del menú *File*, opción *Read Input from*, y buscando la ruta correcta al documento.

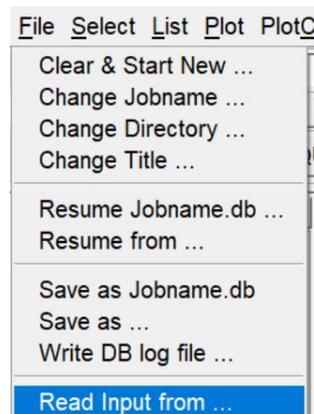


Figura 2.1.3. Importación de un archivo .txt (ANSYS, 2022).

Cuando se selecciona el archivo, ANSYS automáticamente lo ejecuta, mostrando en su interfaz gráfica la geometría o en este caso, los KeyPoints.

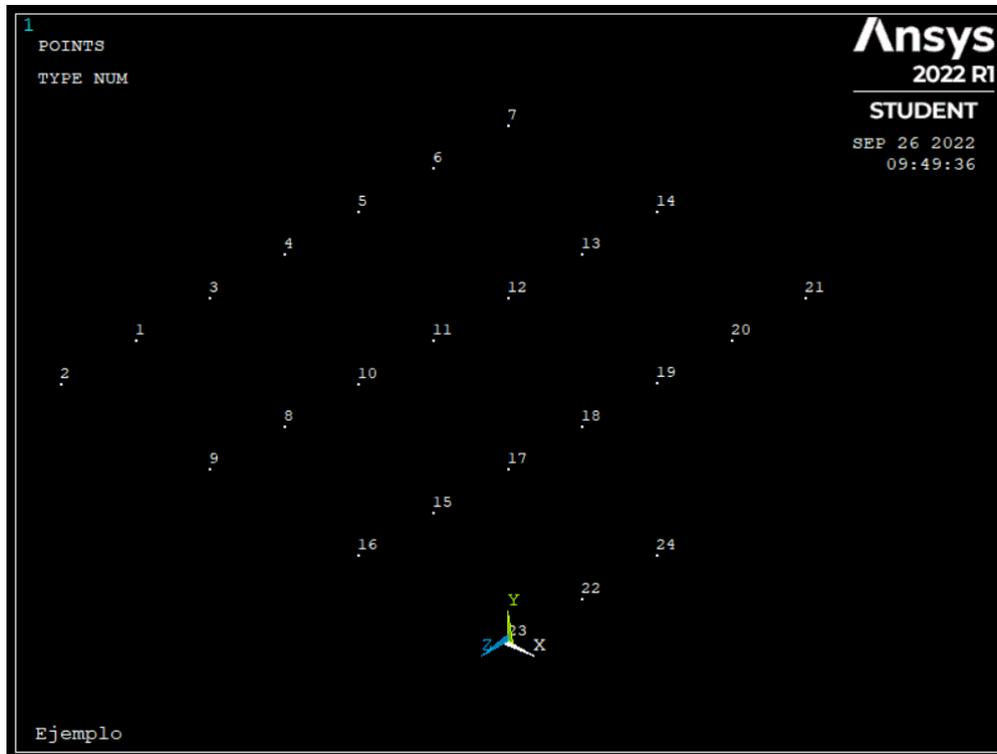


Figura 2.1.4. Resultado de importar un archivo .txt a Mechanical APDL (Elaboración propia).

Cabe recalcar, que ANSYS APDL trabaja con el Sistema Internacional, por lo que es de vital importancia utilizar dimensiones y valores acorde a dicho sistema, ya que, si no se cumple, el programa aun así generará resultados de manera errónea.

En la interfaz del programa, se encuentra un menú llamado *Help*, con opciones como *Tutorials* o *Help Topics*. En el presente trabajo, se empezó por entender los menús y opciones dentro de la interfaz con ayuda de *Tutorials*, que nos redirige al sitio web de ANSYS, donde se muestran ciertos tutoriales de forma gratuita que son desarrollados paso a paso para el mejor entendimiento. Existen tutoriales de tipo estructural, térmicos, electromagnéticos, modales, de contacto, entre otros; en este caso, se completó el tutorial de tipo estructural, en el que se debe modelar un *Corner Bracket*, para analizarse estáticamente.

Sin embargo, dicho tutorial se completó a partir de la interfaz del programa y no es lo que se busca en este estudio. Por ello, se ejecutaron ejemplares con menor dificultad a partir del lenguaje de programación. El primero de ellos se desarrolló completamente dentro de APDL, desde cada nodo y línea que los uniera, hasta la asignación de propiedades y mallado. En el segundo, se decidió crear nodos y líneas dentro del software ETABS, programa de apoyo en donde se pueden realizar modelados bastante más sencillos y veloces, pues de sus tablas resultantes se

pueden obtener los números de identificación de los nodos, de igual forma que su localización y las líneas o trabes que los entrelazan.

Por parte de *Help Topics*, nos redirige igualmente al sitio web de ANSYS, solo que ahora se proporciona más información acerca de comandos para el lenguaje de programación, acerca de los tipos de análisis que se pueden realizar, en qué consisten y guías para el desarrollo de cualquier proyecto. Esta página web se convirtió en un sitio habitual para el crecimiento de esta investigación.

2.2 Objetivos de trabajar con ANSYS APDL

Esta herramienta ofrece las capacidades necesarias para generar tensiones, deformaciones, vibraciones, frecuencias, desplazamientos, aceleraciones, etc., todo ello con los siguientes tipos de análisis: estático, modal, armónico, transitorio o dinámico, espectral, de pandeo y de suelos (Figura 11). Cada uno de estos estudios tienen diferentes comandos dentro del lenguaje de programación que se especifican en la parte de resolución del modelo, llevando consigo parámetros a introducir.

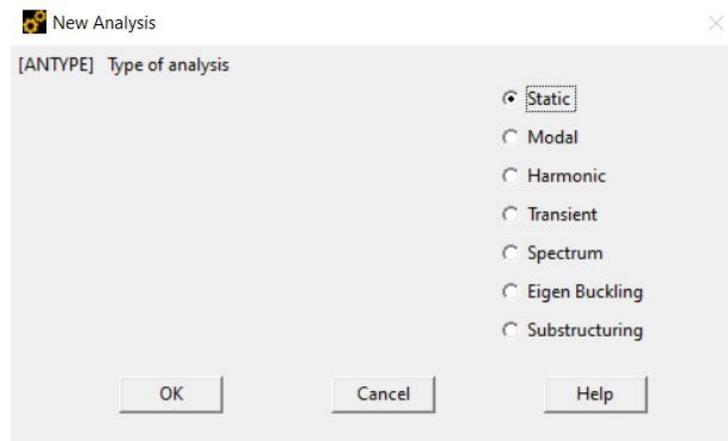


Figura 2.2.1. Tipos de análisis en la interfaz de APDL (ANSYS, 2022).

El proyecto consiste en la creación y ejecución de un edificio sometido a cargas de viento por medio de un método transitorio; dicho de otra forma, es un análisis dependiente del tiempo que incluye efectos de inercia y amortiguamiento. Las respuestas que se buscan son los desplazamientos y las aceleraciones máximas y finalizar el estudio mencionando si la estructura es segura para su producción.

Ya que interpretar los resultados de un análisis dinámico es complicado, es de suma importancia resolver y comprender las variables de salida en análisis estáticos y modales dentro de ANSYS. Agregando a lo anterior y dada la interfaz visual y de trabajo poco intuitiva, se recomienda la utilización de códigos en diferentes ficheros

y la formulación de problemas más sencillos antes de la generación total del script, sobre todo cuando se planea realizar un modelo de gran tamaño computacional, con la finalidad de mejorar la comprensión de los procesos a ejecutar.

Capítulo 3. Interacción del viento con edificios

En el capítulo 1 se dio una breve introducción al diseño estructural y también a la ingeniería de viento. En este capítulo, se mostrará a fondo información acerca de la historia de inmuebles, su interacción con ráfagas de viento y los procesos que se llevaban a cabo para realizar un análisis antes del gran avance en la tecnología. Posterior a ello, se mostrarán métodos escritos para obtener las cargas de viento que actúan en el proyecto, con el fin de complementar la información que se añade al programa. Asimismo, se dedicará un apartado completo a la definición de vibraciones mecánicas y cómo éstas afectan en gran medida tanto en la vida cotidiana como en casos específicos de estudio.

Por último, se mostrarán ejemplos de errores cometidos a lo largo de la historia, con el objetivo de crear consciencia y disminuir dichos accidentes, así como constatar que la ingeniería de viento aún sigue en crecimiento, considerándose un tema vigente.

3.1 Historia

Antes de la evolución estrepitosa de la tecnología y el diseño a partir de ella, el conocimiento del viento era de carácter intuitivo, basándose en la observación de estructuras ya construidas y su reacción visible al viento. Si bien esto implicó cometer gran cantidad de fallas, dicha percepción llevó a un crecimiento no solo en la concepción de edificios, sino a la planificación de ciudades en sí, dando herramientas y principios eólicos sólidos para su construcción (Oleart, 2020).

Los avances científicos sobre el viento se intensificaron en la segunda mitad del siglo XX, a fin de comprender de mejor manera la interacción de este con estructuras, ya sean aisladas o en conjunto, tanto de acero como de concreto y cómo puede llegar a afectar la comodidad urbana. Décadas completas se dedicaron a la investigación y desarrollo de la ingeniería de viento, pasando de métodos de visualización e intuitivos a métodos un poco más analíticos.

Por consecuencia, se generaron diversos métodos de estudio, ya sea a través de sistemas de medición in situ⁶, túneles de viento y sistemas de fluidos

⁶ Las mediciones in situ incluyen la determinación de parámetros que, por sus características o inestabilidad, deben medirse inmediatamente o es recomendable su medición en campo (LGA, 2019).

computacionales a través de cálculos numéricos y estadísticos del comportamiento del viento. Estos últimos han llegado a producir metodologías y bases de datos, como lo son: mapificaciones, gráficas, diagramas, esquemas espectrales del comportamiento del viento, manuales, etc. (Oleart, 2020). Gracias a dicha diversificación, se crearon tres grandes disciplinas fundamentales: la meteorología, a través de la rama de la climatología urbana; la ingeniería, a través de los estudios de aerodinámica y su interacción con construcciones civiles; y la arquitectura.

Durante la década de 1950 suscitaron grandes avances para este crecimiento, pues se incorporó el cálculo computacional en las predicciones atmosféricas, pudiendo así generar y publicar en el libro *Clima y Arquitectura* (Aronin, 1953), un gráfico sobre los índices de rugosidad urbana en tres niveles: de alta densidad, zona rural y extensión de mar o de baja rugosidad (Figura 3.1.1). El esquema busca explicar lo que tarda el viento en recuperar una velocidad de 100 kilómetros por hora, según la altura. Esta representación se considera el precedente del mapa actual (presentado en el capítulo 1), que no solo tomaba en cuenta la realización de edificaciones, sino la disposición de áreas verdes en zonas pobladas, con el objetivo de mejorar la calidad en la estancia de las ciudades.

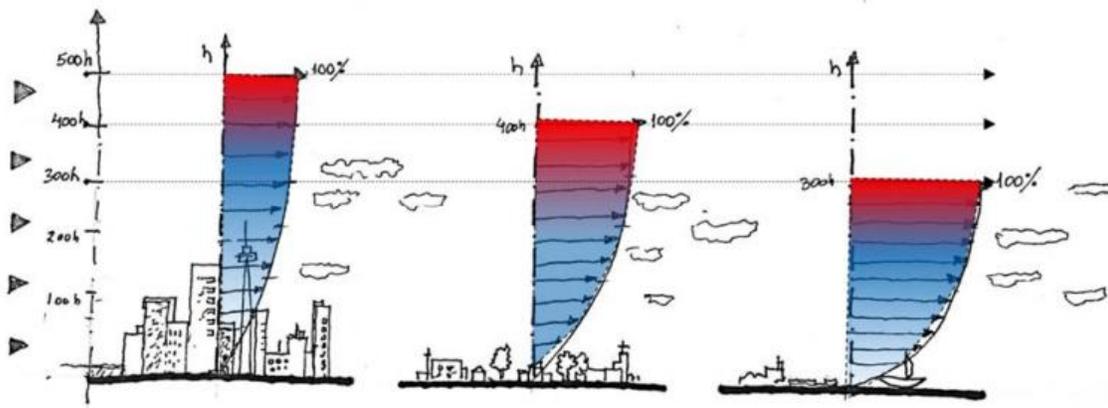


Figura 3.1.1. Esquema de rugosidad dependiendo el tipo de área (Oleart, 2020).

Asimismo, existen antecedentes del desarrollo de investigaciones que tratan la comodidad peatonal a partir del fenómeno mecánico del viento. En muchos casos se trata de estudios en situaciones puntuales, como edificios altos o áreas donde la morfología urbana genera diversos fenómenos concretos como el efecto Venturi⁷; si bien es literatura enfocada en dicha comodidad, incluso sirven de referencia para la elaboración de obras civiles.

⁷ Efecto Venturi: Aumento de la velocidad que se produce cuando el aire se ve canalizado entre edificios convergentes y obligado a pasar por un lugar más estrecho (TELECINCO, 2020).

Una línea de exploración que lleva más de 30 años construyéndose, se centra en la aerodinámica civil, para conocer e indagar el patrón del flujo del viento alrededor de los edificios; pese a ello, sigue siendo un tema extremadamente complicado dada la multiplicidad de variables que influyen y los efectos de éstas, por ejemplo: las dimensiones y forma de los inmuebles, separación entre una edificación y otra, sus orientaciones, lugar de construcción, velocidad de ráfaga del viento, presiones, etc.

Las cargas por viento en estructuras han sido motivos de significativos esfuerzos de estudio en muchos países durante los últimos 30 a 35 años, dado que son el factor más importante en la producción de muchas estructuras, aunque aún no haya un amplio conocimiento en ello. La multidisciplinaria naturaleza del tema, envolviendo probabilidad y estadísticas, meteorología, mecánica de fluidos y dinámica de estructuras, son, sin duda, conocimientos que el ingeniero estructural, acompañado de su experiencia, debe de considerar en el análisis y diseño estructural (Holmes, 2003).

Ya que la ingeniería de viento se conecta directamente al diseño estructural, conlleva a la introducción de acciones relevantes en edificios. A pesar de que ya se realizaban este tipo de procesos, se complementó con la ayuda de propiedades y materiales como lo son el acero y el concreto reforzado. El concreto reforzado ya contaba con una gran gama de estructuras construidas, pero el trabajar en conjunto con el acero y sus aleaciones llevaron a una mejora en cuanto a confiabilidad y economía; por esta razón, en la actualidad la mayoría de las nuevas construcciones se desarrollan con estos dos materiales principalmente. Como ejemplo, se presenta el Centro de Ingeniería Avanzada, localizado en Ciudad Universitaria, al sur de la Ciudad de México (Figura 3.1.2). Este espacio, inaugurado en 2013, se conforma en su mayoría por estructuras de acero, para su mayor seguridad y flexibilidad. En los entresijos se hizo uso de losacero⁸, acompañado de concreto, muy similar a la idea que se plasmó en la presente modelación.

⁸ Losacero: Sistema metálico de entresijo diseñado con un perfil galvanizado, optimizado para anclarse con la losa de concreto y brindar mayor seguridad contra efectos naturales (Acerofom, s.f.)



Figura 3.1.2. Centro de Ingeniería Avanzada, Facultad de Ingeniería UNAM (<https://n9.cl/z41ej>).

Como información adicional, a continuación, se muestra una tabla con las pérdidas en billones de dólares a causa de desastres naturales, desde la década de los setenta hasta finales del siglo XX en todo el mundo. En ella, se representa que el 70% de dichas pérdidas son por razón de tormentas de viento y el incremento significativo desde el año 1987 se debe al aumento de tormentas de viento y huracanes ocurridos a partir de esos años.

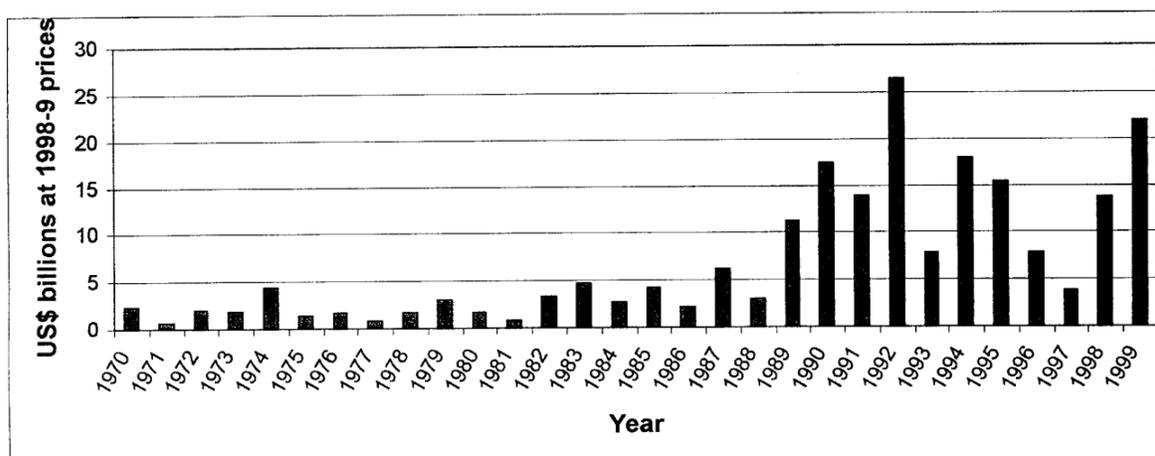


Figura 3.1.3. Gráfica con pérdidas económicas a causa de desastres naturales mayores, a través de los años (Holmes, 2003).

En cuanto al desarrollo de manuales, mapificaciones y gráficas, en México se carece aún de centros de investigación en aerodinámica civil capaces de proponer sus propias normas técnicas para la interacción del viento con edificios. A pesar de ello, existe una aportación importante por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Dirección de Ingeniería Civil, quien publicó en 1993 la Norma de la Comisión Federal de Electricidad para considerar los efectos de viento en sus obras (CFE-93) y la cual es válida para toda la República Mexicana. Como consecuencia, se han empezado a tomar en cuenta normas y técnicas, propuestas en el *Manual de Diseño de Obras Civiles* y en las *Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones*, para la seguridad estructural; tal es su importancia, que dicho manual es la base de la ejecución y resultados del documento en cuestión.

En el libro *La Historia del Viento en las Ciudades (2020)*, se menciona que: “Hoy, la necesidad de reunir estos conocimientos se torna fundamental para lograr un avance interdisciplinario que permita comprender la importancia del viento para la planificación urbana en un mundo que necesita cada vez más conciencia ambiental”.

Una de las motivaciones de la investigación del viento, se centra en reunir y exponer avances científicos, para una optimización y mejor comprensión del tema. Actualmente, se encuentran en desarrollo mapas y pautas climáticas en más de 15 países alrededor del mundo, con el fin de implementar medidas de mitigación para las prácticas de planificación local.

3.2 Vibraciones mecánicas

Dado que la mayoría de las actividades humanas implican vibraciones, su observación se presenta desde hace más de un siglo, llegando a ampliarse cada vez más hacia diferentes ámbitos. En esta ocasión, se enfocará en las vibraciones mecánicas presentadas en el diseño estructural, aunque su estudio ingenieril también incluye: máquinas, motores, turbinas y sistemas de control.

“Cualquier movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo se le conoce como vibración u oscilación. Dicho esto, la vibración de un sistema implica la transformación de su energía potencial en energía cinética y viceversa” (Rao, 2012). Este cambio en ocasiones llega a presentarse con un desequilibrio consecuente a configuraciones defectuosas o fabricación deficiente, causando un desgaste más rápido. La frecuencia natural de un edificio es un tipo de vibración mecánica, y deben ser estudiadas dado que, si dicha frecuencia natural coincide con la excitación externa, se presenta un fenómeno conocido como resonancia, en el que

se amplifican las deflexiones y movimientos, provocando fallas excesivas y oscilaciones peligrosamente grandes.

Debido a los devastadores efectos de las vibraciones, las pruebas de vibración se volvieron un procedimiento estándar en la formulación y ejecución de la mayoría de los sistemas de ingeniería, con el objetivo de prevenir desastres y mejorar la calidad de las edificaciones para con los residentes o trabajadores y sus alrededores. Asimismo, la introducción de sistemas de amortiguamiento ha ido en aumento, con la principal función de disipar parte de la energía en cada ciclo de vibración.

En este documento se hace uso del amortiguamiento presentado por Rayleigh, también llamado amortiguamiento proporcional. Su cálculo se basa en dos coeficientes, generalmente conocidos como alfa y beta, ambos dependientes de un coeficiente de amortiguamiento, que a su vez es dependiente del modo de vibración en el que se encuentre. Con fines de simplicidad, el coeficiente de amortiguamiento será el mismo en ambos modos. A continuación, se presentan las ecuaciones de ambos coeficientes.

$$\alpha = \zeta \frac{2w_i w_j}{w_i + w_j} \quad (3.2.1)$$

$$\beta = \zeta \frac{2}{w_i + w_j} \quad (3.2.2)$$

donde:

ζ : coeficiente de amortiguamiento (1.5%)⁹

w_i : frecuencia para el i – ésimo modo, $\left[\frac{1}{s}\right]$.

w_j : frecuencia para el j – ésimo modo, $\left[\frac{1}{s}\right]$.

Como medida preliminar, se completó un examen modal en el edificio propuesto en la Figura 1.1.4, a fin de distinguir si se realizará un análisis estático o transitorio, e incluso conocer los primeros diez modos de este, con los que obtendremos tanto el periodo como su frecuencia y verificando si se puede seguir adelante con el

⁹ El coeficiente de amortiguamiento varía dependiendo de los materiales de construcción utilizados. Para un edificio con combinación de acero y concreto, el valor de 1.5% es el más adecuado.

procedimiento o si la estructura no es lo suficientemente confiable por sí misma. Los resultados se presentan en el capítulo 6 y se anexan comentarios en el capítulo 7.

3.3 Posibles fallas, ejemplos

Anteriormente, el diseño estructural no implicaba grandes complicaciones, pues se basaba exclusivamente en soluciones empíricas, tomando como punto de partida construcciones ya existentes y el ingenio o intuición. Es por ello, que llegar a los sistemas refinados que admiramos ahora, implicó cometer gran cantidad de fallas, las cuales ayudaron a definir los márgenes dentro de los que se podían resolver las estructuras. Gracias a dicha evolución, el proyectista hoy en día cuenta con tres tipos de bases: los métodos analíticos, normas y manuales y la experimentación.

En lo que implica a los métodos analíticos, su evolución ha sido exponencial durante las últimas décadas, contando con procedimientos de cálculo con gran aproximación en estructuras muy complejas, los cuales “pueden tomar en cuenta efectos como la no linealidad del comportamiento de los materiales, la interacción de la estructura con el suelo y el comportamiento dinámico” (Piralla, 2015); aunque no debe olvidarse que son aproximaciones matemáticas donde la estructura se idealiza, por ello, sus resultados están sujetos a la proximidad del prototipo con la realidad.

Durante los últimos dos siglos, fallas por acciones de viento en diferentes estructuras se hicieron muy significativas, pues la fabricación en masa de grandes rascacielos o puentes, así como la extensión de zonas urbanas, se maximizó, haciendo más vistosos los errores al ojo común. Tales casos pueden verse en: el puente Brighton Chain Pier, en Inglaterra (1836), el Tay Bridge, Escocia (1879) y el Tacoma Narrows Bridge, Wasington (1940) (Figura 3.3.1), siendo este último el más notable. Asimismo, tenemos el colapso de las torres de enfriamiento de Ferrybridge (1965) y la permanente deformación que sufren las columnas del Great Plains Life Building en Texas después de un tornado (Figura 3.3.2).

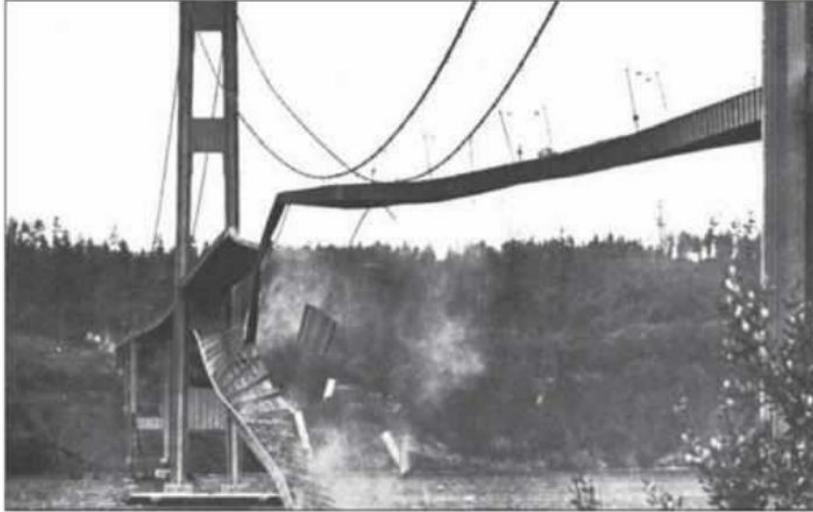


Figura 1.7 El puente Tacoma Narrows durante la vibración inducida por el viento. El puente se inauguró el 1 de julio de 1940 y colapsó el 7 de noviembre del mismo año. (Fotografía de Farquharson, de la Historical Photography Collection, University of Washington Libraries).

Figura 3.3.1. Puente de Tacoma (<https://n9.cl/72jr3>).



Figura 3.3.2. Edificio Great Plains Life Building, después de balancearse y oscilar durante varios segundos debido a fuertes vientos (<https://n9.cl/n5x0e>).

Suplementario a la información presentada arriba, los posibles fallos que se pueden tener durante el desarrollo de este proyecto van desde un mal manejo de los sistemas estructurales y sus conexiones, un uso incorrecto de los programas utilizados, condiciones de frontera incongruentes y errores en el método FEA. Estos se comentan rápidamente en el capítulo 8.

Capítulo 4. Metodología

Durante la ejecución se utilizaron dos programas de modelación y análisis, con el fin de ampliar el conocimiento en ellos y generar una base de datos para realizar una comparación mediante un análisis modal, verificando que los resultados sean congruentes entre ellos. Es por ello, que se empezó a operar con ETABS, software especializado en diseño, análisis, simulación y estudio de estructuras, capaz de completar estudios de comportamientos lineales y no lineales de elementos estructurales, método de elementos finitos, aplicación de diafragmas rígidos y flexibles, análisis modales, dinámicos y estáticos, incluyendo cargas sísmicas y de viento.

La metodología se comenzó por aprender y tener un manejo básico de ETABS con ayuda de esbozos más sencillos y de menor tamaño antes de modelar el edificio en cuestión. Una vez que se tuvo un control básico de la interfaz, se inició el modelado con base en el artículo *Next Generation Benchmark Control Problem for Seismically Excited Buildings* (Spencer, Christenson, & Dyke, 1999), agregando modificaciones. Al completar la configuración, se produjeron tablas con datos suficientes para trabajar dentro de APDL y obtener gran parte del código del proyecto. Posterior a ello, se asignaron materiales y propiedades dentro del script, convirtiendo simples líneas y puntos, a uniones, vigas, columnas y losas. Por último, se realizó una discretización para trabajar con el método de elementos finitos y poder completar el análisis requerido.

Esto conlleva solamente la modelación, aún sin arribar a la etapa de postprocesamiento. Aunque sigue siendo parte de la metodología, se decidió extender el progreso en los siguientes dos capítulos, con el propósito de mejorar la lectura del texto. Por el momento se hablará en general de la producción del edificio por medio de ETABS.

4.1 Modelado matemático del edificio (ETABS)

ETABS es un software innovador enfocado en el análisis estructural y dimensionamiento de edificaciones, ya que ofrece herramientas de modelado y visualización de objetos 3D, amplia gama de materiales, informes y diseños esquemáticos. Es un programa que posee comandos de diseño intuitivos que permiten la rápida generación de plantas y alzados (Eseverri, 2020).

Los informes y resultados son la razón del porque se modeló el edificio dentro de este programa antes de configurarlo dentro de ANSYS APDL. ETABS, como ya se mencionó, arroja informes que contienen las coordenadas exactas (dentro de un

sistema de referencia en 3D con eje X, eje Y, y eje Z) de cada una de las vigas, columnas, losas, paredes y puntos de referencia. Dichas coordenadas, se pueden agregar a una hoja de cálculo en Excel con el propósito de subdividir cada elemento que se construirá, mejorando el orden en la secuencia de comandos. Posteriormente, se añaden dichos datos al script de APDL, facilitando y reduciendo las operaciones dentro del programa. Si se omitiera la gestión de ETABS, la creación tendría que ser elemento por elemento dentro del código de APDL; no obstante, como se generan miles de piezas, este paso sería extremadamente tardado y difícil, ya que se tendría que llevar un orden estricto para hacer coincidir los elementos.

La utilización de ETABS no finaliza en el pre-procesamiento, a través de este también se obtendrá un análisis preliminar modal con las cargas vivas y muertas para compararlo con el resultado conseguido en APDL. Esto con el fin de verificar que ambos modelados coincidan entre sí y por lo tanto estén generados de forma correcta.

Se inició creando el espacio a utilizar.

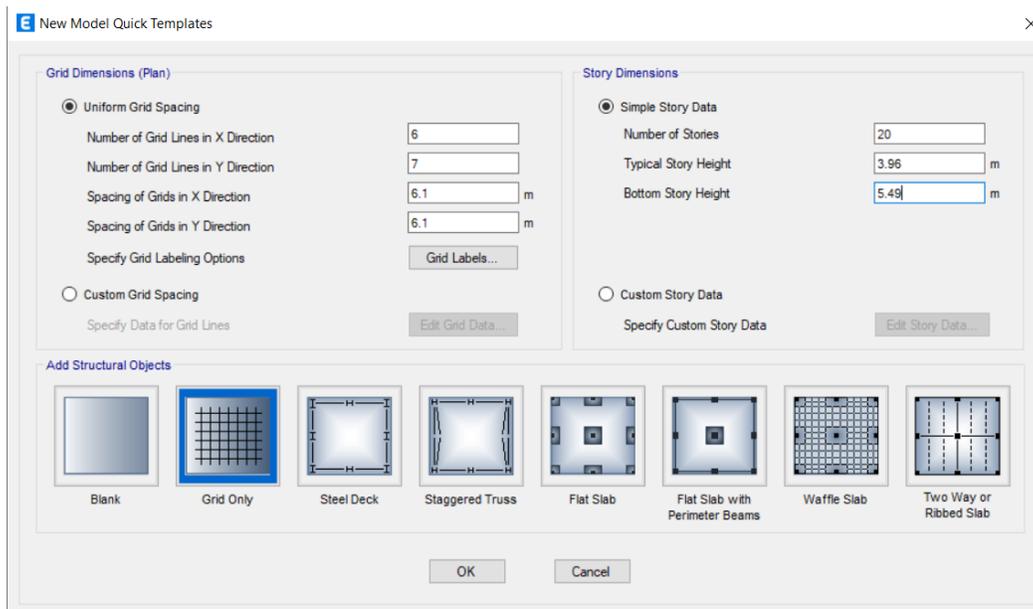


Figura 4.1.1. Creación de modelo (Elaboración propia).

En la figura superior se muestra el menú para la formación del espacio de trabajo, al igual que las especificaciones del número total de pisos o stories y el entrepiso entre cada uno de ellos. Estas especificaciones fueron presentadas en el capítulo 1.

El *grid* o *malla* que se genera es la base del entorno del proyecto. La interfaz permite la adición de partes de la estructura de una manera muy sencilla, identificando cada una de estas con un código de colores. Este paso debe completarse no sin antes verificar que tanto las propiedades de los materiales como las secciones a utilizar se encuentran disponibles dentro del catálogo de ETABS.

Una vez verificada su existencia, se aplican los materiales deseados a las diferentes secciones involucradas. A continuación, se enlistan las secciones que se utilizaron y el material que se le asignó a cada una de ellas.

Material	Propiedades		
	Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Coefficiente de Poisson [1]	Módulo de Young $\left[\frac{N}{m^2}\right]$
Acero A36	7849.047	0.3	1.999×10^{11}
Acero A992Fy50	7849.047	0.3	1.999×10^{11}
Acero A500GrB46	7849.047	0.3	1.999×10^{11}
Concreto	2402.77	0.2	2.1708×10^{10}

Tabla 4.1.1. Materiales y propiedades por utilizar.

Vigas	Material
W30x108	Acero A36
W30x99	
W27x84	
W24x62	
W21x50	
W16x26	
Vigas secundarias	
W12x14	Acero A36
Columnas	
W24x335	Acero A992Fy50
W24x229	
W24x192	
W24x117	
W24x84	
W24x131	Acero A36
C1	Acero A500GrB46
C2	
C3	
C4	Acero A500GrB46
C5	
C6	
Losa	

Tabla 4.1.2. Sección y su material asignado.

La concepción de las secciones de la Tabla 4.1.2, ETABS las realiza a partir de códigos de colores para una mayor identificación y tiene diferentes tipos de visualizaciones: 3D, de planta y de elevación. En la Figura 4.1.2, se muestra el primer piso totalmente construido. El tipo de losa utilizado es “*Deck Section*”, que permite el empleo de losacero en combinación con concreto. En general, las trabes secundarias e internas y la losa usan solo un tipo de material. Por otra parte, las trabes perimetrales y las columnas internas y externas cambian a lo alto del edificio.

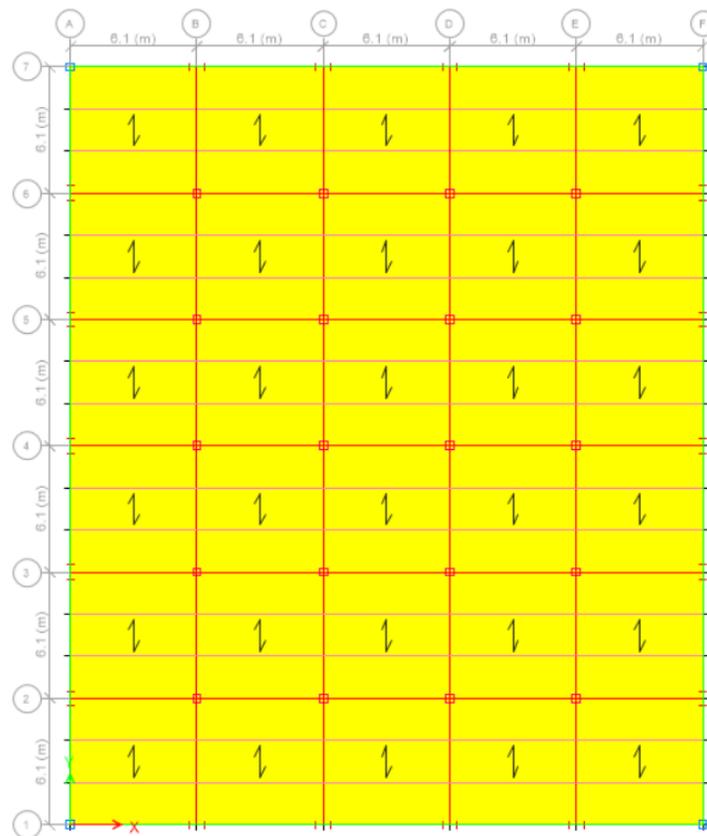


Figura 4.1.2. Vista en planta (Elaboración propia).

En la Figura 4.1.3, el plano ZY muestra las 20 historias, las columnas generadas y el empotramiento en la base. Gracias a este tipo de vistas se vuelve considerablemente más sencillo la generación de cada piso y la asignación de columnas, ya que en vista de planta no tenemos la posibilidad de revisar el tipo de columna que se utiliza, simplemente una representación visual.

Además, se pueden distinguir varias vistas en un mismo plano para la visualización interna de las columnas, pues las que se observan en la Figura 4.1.3 son de tipo perimetrales. La distinción de las diferentes secciones es tan enfática, con la

finalidad de facilitar tanto la aplicación de propiedades, como la discretización dentro del código de APDL.

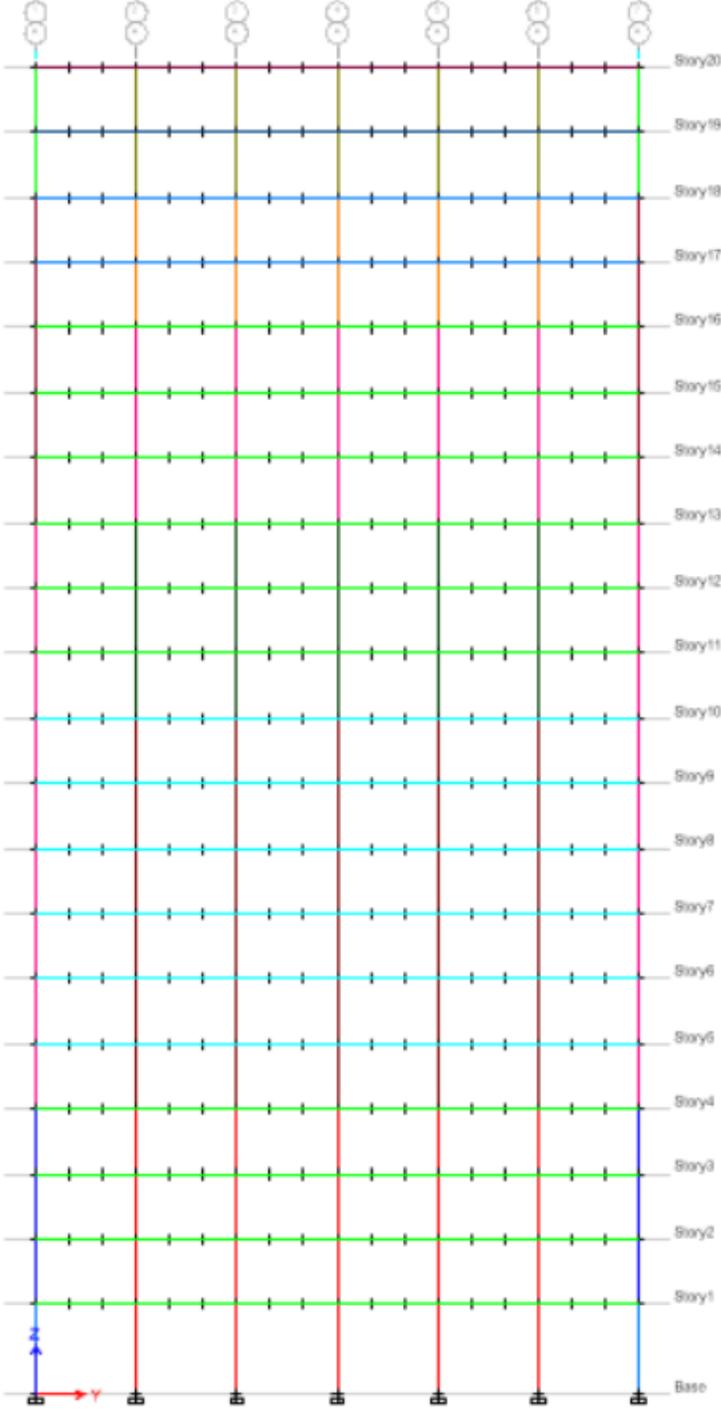


Figura 4.1.3. Vista en elevación del edificio, desde la base hasta el último piso (Elaboración propia).

En la Figura 4.1.4, se tiene una representación con líneas y áreas en 3D del ejemplar construido. Igual que en la vista de planta y elevación, se puede visualizar el nombre de cada elemento, pero por cuestiones visuales se decidió ocultar. Con ayuda de esta vista y el movimiento en 3D en la interfaz gráfica de ETABS podemos revisar cada rincón del modelo, verificando la calidad de este. Por último, en la Figura 4.1.5 se tiene una representación extruida de cada viga, columna y losa.

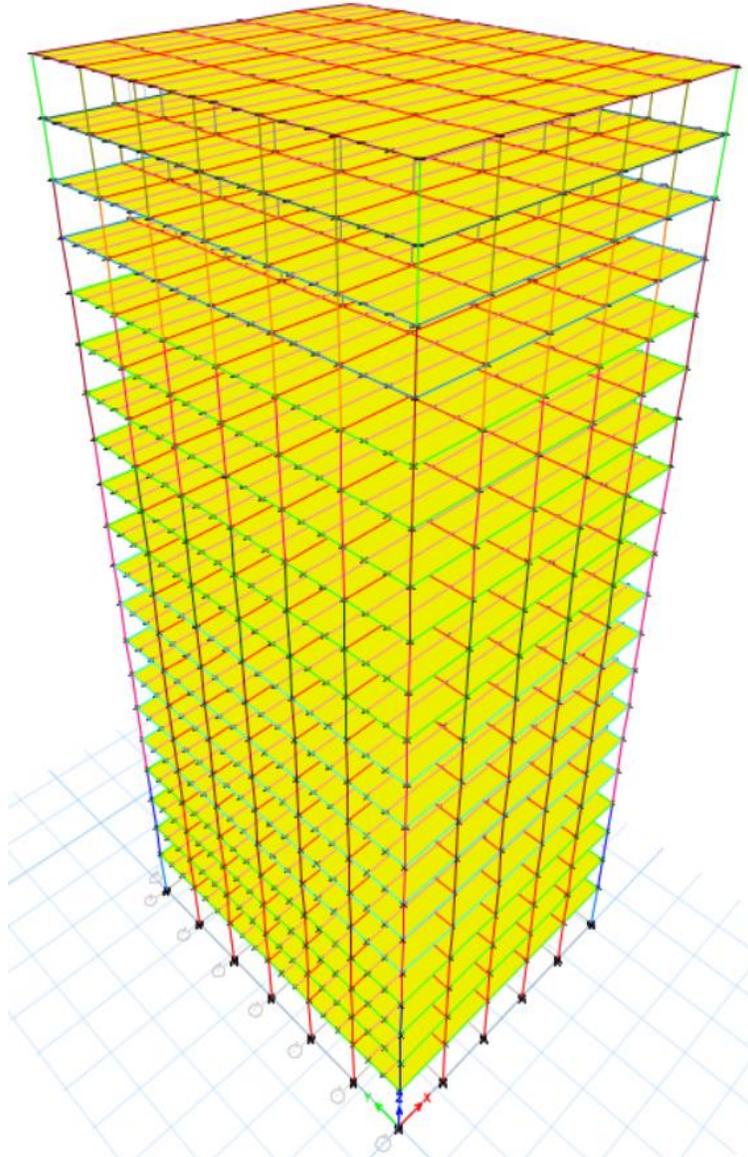


Figura 4.1.4. Vista en 3D (Elaboración propia).

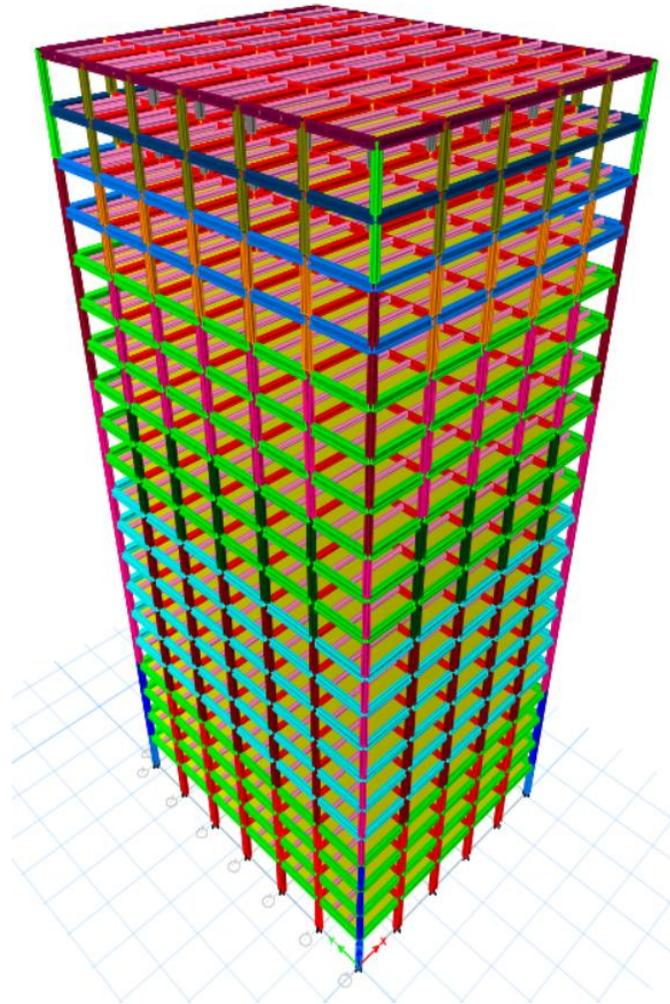


Figura 4.1.5. Vista en 3D extruido (Elaboración propia).

Estas dos últimas visualizaciones son de gran apoyo en el proceso de modelado, logrando un acercamiento bastante parecido a la realidad. No obstante, su representación no es forzosamente el final del proyecto, dando la oportunidad de regresar a una etapa temprana en 2D para corregir elementos y/o conexiones, agregar condiciones y posteriormente volver a ejemplificar la construcción.

4.2 Modelado de estructuras altas en ANSYS

La implementación directa en ANSYS APDL de un edificio con una estructura superior a los 20 metros de altura se vuelve una tarea difícil y larga de lograr, puesto que cada línea que simule una viga o columna debe de conectar con nodos específicos. Es por ello, que se incorpora la utilización de ETABS, programa con el cual podemos extraer estos datos una vez finalizado el modelado.

Aunque es bastante útil ANSYS APDL en estas aplicaciones, hoy en día no existe mucha bibliografía que demuestre la explotación de APDL en la modelación de

estructuras altas, sino para tareas mucho más sencillas, ya que la evolución ha dejado atrás el uso de scripts en esta área, pasando a ser un programa secundario por detrás de su descendencia, ANSYS Workbench. A pesar de ello, este escrito también busca demostrar que, si bien es tardado escribir un script, una vez teniéndolo, la actualización para nuevos análisis en el mismo modelo es bastante sencillo y rápido, cambiando de uno a otro únicamente alterando los respectivos comandos.

KP, L y A

Los KeyPoints (KP) son la base de nuestra estructura; dentro de APDL sin estos puntos o nodos sería imposible generar el edificio y se definen como la coordenada exacta de unión entre las líneas o trabes. El montaje queda representado con puntos de la siguiente manera, en un sistema de referencia ZX (Figura 4.2.1). Se crearon un total de 2341 KP, incluyendo la base, donde no es necesario gran cantidad de nodos. En la Figura 4.2.2, se muestra un fragmento de los KeyPoints en APDL, notando la necesidad de un número de identificación y sus coordenadas; su orden se completa con un archivo de Microsoft Excel extrayendo los datos resultantes de ETABS, donde podemos concatenar cada uno de los datos necesarios. Como ya se mencionó antes, la lectura del código por parte de APDL es secuencial, causando que cada secuencia tenga que comenzar por los KP.

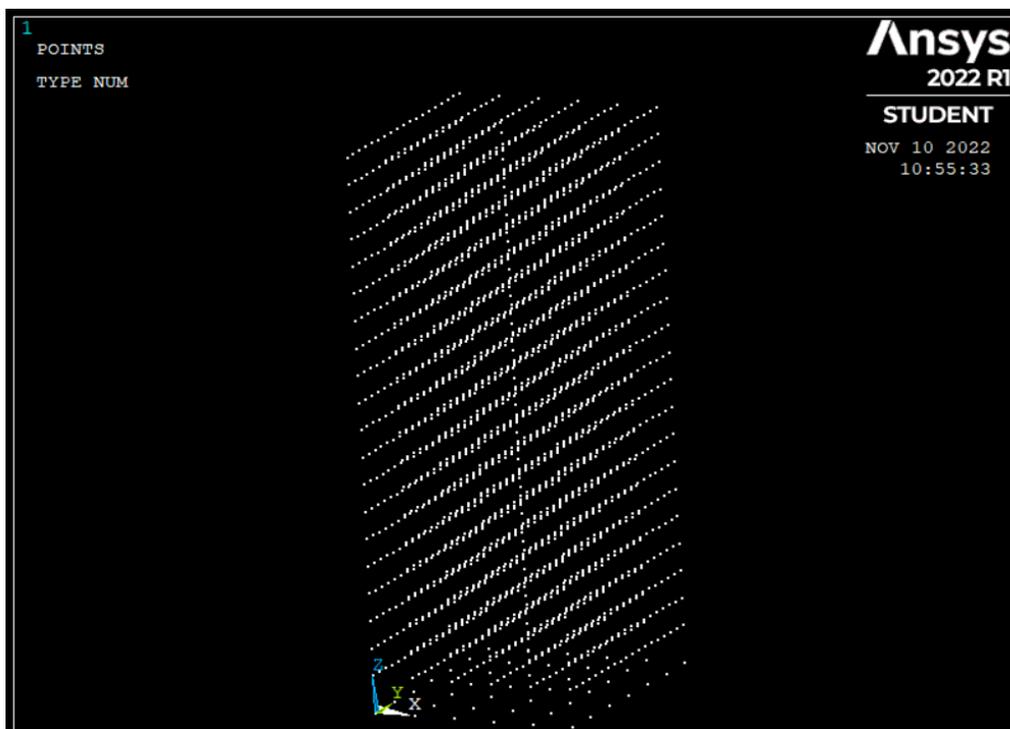


Figura 4.2.1. KP en la interfaz gráfica de APDL (Elaboración propia).

```
5 | GENERACION DE KEYPOINTS
6 | K,2303,0,30.5,80.73
7 | K,2304,6.1,30.5,80.73
8 | K,2305,12.2,30.5,80.73
9 | K,2306,18.3,30.5,80.73
10 | K,2307,24.4,30.5,80.73
11 | K,2313,24.4,24.4,80.73
12 | K,2319,24.4,18.3,80.73
13 | K,2325,24.4,12.2,80.73
14 | K,2331,24.4,6.1,80.73
15 | K,2225,24.4,0,80.73
```

Figura 4.2.2. KP en el script de APDL (Elaboración propia).

Si bien es confusa la visualización, a partir de aquí se pueden empezar a generar las líneas que conecten cada uno de los nodos y obtener una visualización tipo cascarón de nuestra estructura. Como en ETABS, también busca facilitar la distinción de las líneas a partir de un código de colores. Sin embargo, en este caso APDL no cuenta con la misma calidad gráfica que arroje un resultado parecido.

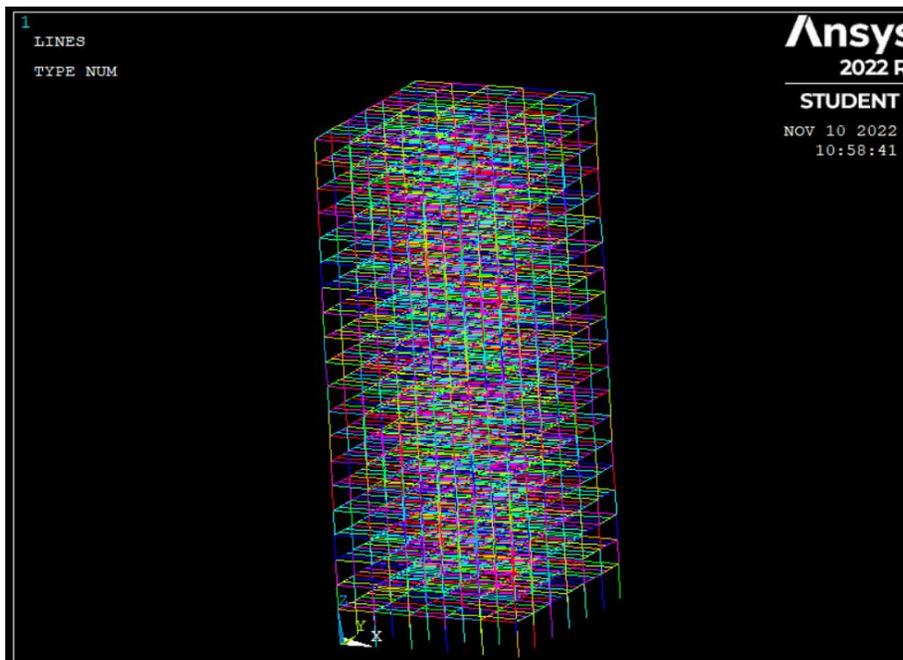


Figura 4.2.3. Representación gráfica con líneas en Ansys (Elaboración propia).

En este momento, ya se tiene un resultado mucho más claro de las vigas y columnas con las que se trabajarán. En el script, la creación de líneas se completa gracias al número de identificación de dos nodos extremos. (Ejemplo: *L,2303,2304*, crea una línea entre los nodos 2303 y 2304 (Figura 4.2.4)). Con el fin de tener una mayor

identificación entre vigas principales, secundarias, etc., se recomienda dividir el código con diferentes notas, cambiando la sección a utilizar (Figura 4.2.5).

Se tiene un total de 4900 líneas conectando todos los KP. Este número aumentó por la disminución en la longitud de algunas vigas (se hablará de este cambio en el capítulo 8).

```
! VIGAS INTERNAS PRINCIPALES W16X26 ACERO A36
L,2303,2304
L,2304,2305
L,2305,2306
L,2306,2307
L,2309,2310
L,2310,2311
L,2311,2312
L,2312,2313
```

Figura 4.2.4. Generación de líneas/vigas en el código (Elaboración propia).

```
7208 !W24X131      7267 !W24X117
7209 L,27,26      7268 L,25,24
7210 L,48,47      7269 L,46,45
7211 L,69,68      7270 L,67,66
7212 L,90,89      7271 L,88,87
```

Figura 4.2.5. División de líneas por sección (Elaboración propia).

Finalmente, se completa la geometría con las áreas o losas de cada piso, tomando cuatro puntos (esquinas) para su realización. Se obtuvo un total de 600 losas en los 20 niveles, dando a cada crujía su propia losa. En este caso, dentro del script no es necesario llevar un orden o división en específico, ya que los entrepisos tendrán siempre los mismos materiales y tipo de sección. A continuación se presenta la escritura dentro del código (Figura 4.2.6) y también el prototipo con losas en APDL (Figura 4.2.7).

```
7349 !LOSAS
7350 A,358,547,22,1
7351 A,547,652,43,22
7352 A,652,757,64,43
7353 A,757,862,85,64
```

Figura 4.2.6. Áreas en el código (Elaboración propia).

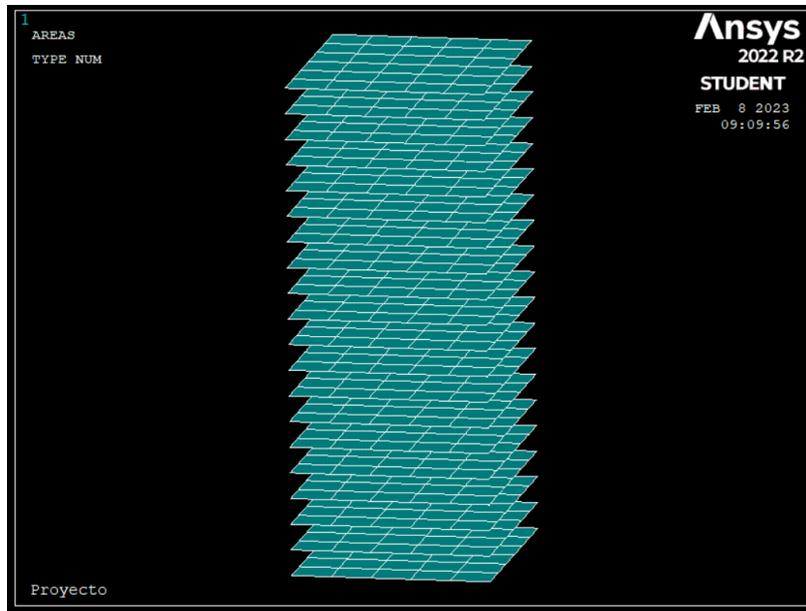


Figura 4.2.7. Áreas/Losas en Ansys APDL (Elaboración propia).

Materiales y propiedades

La asignación de materiales y propiedades depende principalmente de los comandos *ET* (Element Type) y *MP* (Material Properties); con ayuda de un número, el programa es capaz de identificar y asignar cada material a la sección que se deseé. Del mismo modo, las secciones cuentan con un número de identificación y dentro del espacio de trabajo de APDL se tienen diferentes tipos de vigas, dependiendo del uso que se les dará; en este documento se utilizaron BEAM188¹⁰ en todos los casos. Las losas fueron construidas a partir del comando SHELL181, que se utiliza como un cascarón estructural de 4 nodos para estructuras finas; cuenta con 6 grados de libertad en cada nodo y se usa en aplicaciones lineales (Mechanical APDL, s.f.) (Figura 4.2.8).

Desgraciadamente, el paquete de ANSYS APDL no cuenta con el tipo de losa utilizada en ETABS (*Deck section*), pero sí se puede realizar una adaptación: si tenemos la altura del canal de la Losacero y la altura o grosor total del concreto, se puede dividir a la mitad la altura del canal y sumarlo al total del grosor del concreto; este es el valor que se introduce en la altura de la losa en APDL.

¹⁰ BEAM188: Viga 3D de 2 nodos, ideal para analizar estructuras de vigas delgadas a moderadamente anchas. Se basan en la teoría de vigas de Timoshenko, que incluye efectos de deformación por cortante (Mechanical APDL, s.f.).

!PROPIEDADES DEL ELEMENTO	PROPIEDADES DEL MATERIAL	
ET,1,BEAM188	ACERO A36	
ET,2,BEAM188	P,EX,1,1.999e11	!módulo de elasticidad N/m2
ET,3,BEAM188	P,PRXY,1,0.3	!coeficiente de poisson
ET,4,BEAM188	P,DENS,1,7849.047	!densidad kg/m3

Figura 4.2.8. Creación de propiedades y materiales (Elaboración propia).

Por último, el comando *SECTYPE* nos ayuda a asignar el tipo de material y propiedad a cada elemento, incluyendo vigas, columnas y losas, de nuevo con un número de identificación y sin olvidar seleccionar la geometría de estas. Dado su perfil pequeño, una reducción en peso y un gran manejo de cargas, la geometría seleccionada en traveses es en I o W. No obstante, en el caso de esquinas y algunas partes centrales, se utilizaron vigas de tipo rectangular huecas, capaces de soportar grandes cargas y reducir la cantidad de material (en comparación a una viga sólida), que en combinación con otros perfiles de construcción mejora considerablemente.

La Teoría de Vigas de Timoshenko es la más utilizada en situaciones de ingeniería civil en contraste con la Teoría de Vigas de Euler-Bernoulli. Esto sucede, debido a que Timoshenko introdujo efectos de deformación por cortante en las vigas, propiedad relevante ya que toma en cuenta la inercia de rotación al momento de aplicar una carga. Por consecuencia, se introdujo la deformación por cortante para cada uno de los perfiles utilizados con el comando *SECCONTROL*, que permite el uso de la deformación por cortante deseada por el usuario. La deformación por cortante se obtuvo con la ecuación 4.2.1. Por otro lado, *SECDATA* nos da la libertad de introducir la geometría del perfil, cambiando el grosor, altura, etc., dependiendo de las secciones utilizadas. Finalmente, *SECOFFSET* es una ayuda adicional que nos deja colocar un desfase en las vigas horizontales, con el objetivo de que la parte superior del perfil coincida con la parte inferior de la losa.

$$T = \frac{A \cdot G \cdot K}{L} \quad (4.2.1)$$

donde:

T : deformación por cortante, $\left[\frac{kgf}{m}\right]$.

A : Área transversal de la sección, $[m^2]$.

G : Módulo de corte, $\left[\frac{kgf}{m^2}\right]$.

K : Factor de corrección, $[1]$.

L : Longitud del perfil, [m].

A su vez, el módulo de corte se define como:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (4.2.2)$$

donde:

E : Módulo elástico, $\left[\frac{kgf}{m^2}\right]$.

μ : coeficiente de Poisson, [1].

Con respecto al factor de corrección, K , varía dependiendo del perfil a utilizar. En una sección rectangular o cuadrada, su valor es de 0.83, mientras que para secciones en I se obtuvo un valor de 0.455.

La longitud igualmente varía entre vigas y columnas, teniendo valores de 6.1 [m], 3.96 [m] e incluso de 2.03 [m] en algunos casos.

En el caso de módulo elástico y el coeficiente de Poisson, son datos tomados del programa ETABS. El orden de estos datos en el código se muestra en la Figura 4.2.9 y Figura 4.2.10.

```
8058 SECTYPE,1,BEAM,1,W30x108,0
8059 SECNUM,1
8060 SECOFFSET,USER,0,0.37846
8061 SECDATA,0.2667,0.2667,0.75692,0.0193,0.0193,0.01384,0,0,0,0,0
8062 TYPE,1
8063 MAT,1
8064 SECCONTROL,141369272.4,,141369272.4,0,
8065
8066 SECTYPE,2,BEAM,1,W30x99,0
8067 SECNUM,2
8068 SECOFFSET,USER,0,0.37719
8069 SECDATA,0.2667,0.2667,0.75438,0.01702,0.01702,0.01321,0,0,0,0,0
8070 TYPE,2
8071 MAT,1
8072 SECCONTROL,117592356.4,,117592356.4,0,
```

Figura 4.2.9. Asignación de perfil, dimensiones, deformación de cortante, tipo de material y sección (Elaboración propia).

```
8259 SECTYPE,26,SHELL,
8260 SECNUM,26
8261 SECDATA,0.0915,4,0.0,3
8262 SECOFFSET, TOP
8263 TYPE,26
8264 MAT,4
8265 SECCONTROL,,,,,100,,,,,
```

Figura 4.2.10. Asignación de grosor de losa, tipo de sección, carga muerta, tipo de material y desfase (Elaboración propia).

4.3 Diseño final

Gracias a las prácticas realizadas con los tres programas especializados (ETABS, Ansys APDL y Visual Studio Code), la realización del diseño final (Figura 4.3.1) se convirtió en una labor más sencilla, pero sin eliminar por completo las dificultades. Por ejemplo, al completarse el análisis modal dentro de Ansys y cotejando sus resultados con los ya obtenidos dentro de ETABS, se tuvieron que realizar modificaciones a la estructura en Ansys, ya que diseñar y mejorar los elementos fue una parte difícil de completar y con ciertos errores, de modo que la diferencia entre resultados fue abismal. Aplicando dichas correcciones, se logró reducir el porcentaje de error y conceder como satisfactorio la comparación de respuestas. Sin embargo, el porcentaje de error se redujo solamente al 17%, siendo un valor aún muy alto. Se decidió seguir con la experimentación, asumiendo que dicho error se debe a las diferencias de tipos de softwares (uno bastante intuitivo y el otro más mecanizado), además de las propiedades que se pueden asignar en un programa y en el otro no.

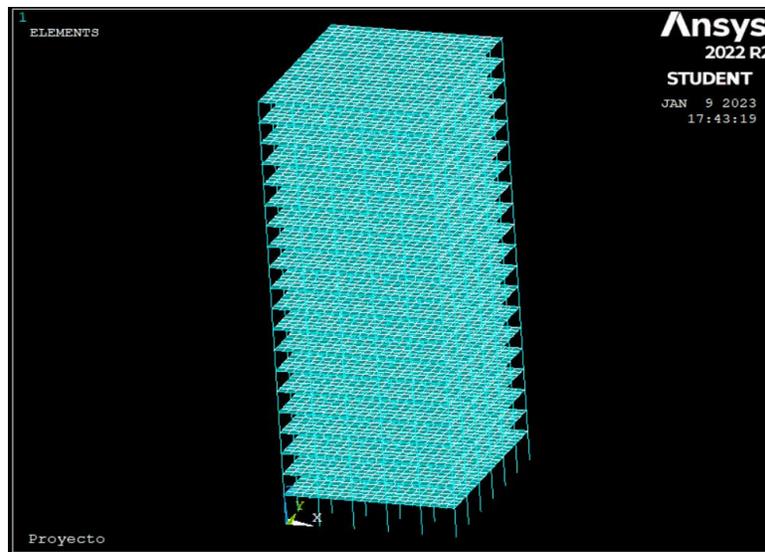


Figura 4.3.1. Modelo final (Elaboración propia).

Mallado

El tamaño de mallado de vigas horizontales, independientemente de su longitud, se propuso de 1.525 [m] y en columnas de 1 [m]. De igual manera, las áreas se subdividieron en secciones de 1.525 [m], a fin de hacerlas coincidir con el mallado de vigas. En la sección de conclusiones y recomendaciones se habla acerca del tamaño de discretización, ya que los resultados visuales son dependientes de este. En la Figura 4.3.2 se presenta el prototipo extruido para explorar por completo el edificio y verificar la representación de las secciones. Complementario a ello, con

ayuda del menú de APDL, se pueden enlistar los materiales, secciones y propiedades, verificando que el programa acepta correctamente el script.

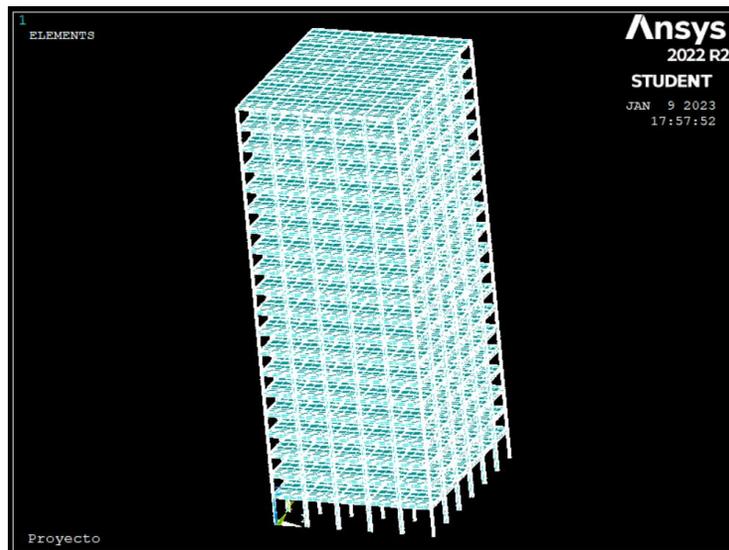


Figura 4.3.2. Prototipo extruido y mallado (Elaboración propia).

Capítulo 5. Aplicación de condiciones de frontera

Todo proyecto centrado en la experimentación debe contar con condiciones de frontera adecuadas a cada ejercicio. Las condiciones de frontera se pueden definir como la delimitación del objetivo a determinar a través del análisis transitorio. Dicha delimitación incluye fuerzas y restricciones, constantes reales, etc. Con ayuda de estos valores es posible obtener los resultados buscados sin necesidad de realizar cálculos en demasía.

5.1 Fuerzas y gravedad

- Gravedad

La fuerza de gravedad se aplica en todos los cuerpos presentes dentro de la atmósfera de la tierra. El valor dado es de $9.807 [m/s^2]$ en dirección Z negativo. Su introducción en ANSYS APDL se debe gracias al comando *ACEL* (Figura 5.1.1) y dentro del código se escribe únicamente su magnitud en cada eje (sin signos). Con respecto a esto, ANSYS APDL tiene una manera de trabajar diferente con la aceleración de la gravedad, ya que, cuando se introdujo un valor negativo, el edificio se modificaba incorrectamente después de generar un análisis, mostrando que sufría cambios sobre el eje Z positivo, lo que llega a ser poco probable cuando se le aplica una fuerza negativa.

```
8428
8429   ACEL,0,0,9.807,
8430
8431   FINISH
```

Figura 5.1.1. Comando y valor de la gravedad (Elaboración propia).

- Cargas vivas y muertas

Como se explicó en el capítulo 1, la edificación cuenta con cargas vivas y muertas. Dentro de ETABS es necesario introducir los valores de ambas cargas de acuerdo con el uso que se le vaya a dar al edificio. No obstante, ANSYS APDL solo necesita la información de las cargas muertas, introduciéndolas como una masa por unidad de área adicional a las losas, dando a entender que este aumento es parte del peso total de cada losa. La introducción de cualquier valor numérico en APDL debe de tener las dimensiones adecuadas, y siempre utilizar el mismo sistema de unidades para todos los valores. En este caso, se cometió el error de agregar información en $[N/m^2]$ cuando no se estaba trabajando con esas dimensiones, arrojando resultados incorrectos. Estos errores son poco intuitivos dentro del programa, por lo

que el ingeniero debe estudiar con detenimiento la solución para verificar su veracidad. El valor corregido de las cargas muertas en APDL fue el siguiente:

$$CM = 100 [kgf/m^2]$$

- Fuerzas de viento

Las cargas de viento serán aplicadas horizontalmente en el muro que se encuentra en el plano XY, con 6 columnas y 5 crujiás. La generación de fuerzas fue un proceso lento y de aprendizaje, ya que se tuvo que volver a la información existente para conocer velocidades de ráfaga de viento en la zona en la que se supuso la construcción: Ciudad de México, con un tipo de rugosidad y una velocidad regional con un periodo de retorno fijo de 50 años de $118.8 \left[\frac{km}{h} \right]$. SVTPro16 es la herramienta de cálculo que se utilizó para la obtención de la velocidad total con la que se podrán crear vectores de fuerza a través de la ecuación correspondiente; dentro de dicho programa, se necesita únicamente la localización geográfica en 2D de los nodos en donde se desean conocer los resultados y la velocidad media de diseño, variable cuya ecuación se presentó en el capítulo 1 y se desarrolla a continuación.

$$V'_D = F_T F'_{vz} V_R$$

donde:

$$F_T = 1 [1]$$

para $z \leq 10$:

$$F'_{vz} = 0.668 [1]$$

$$V_R = 118.8 \left[\frac{km}{h} \right]^{11}$$

por lo que en el primer y segundo piso:

$$V'_D = 1 \cdot 0.668 \cdot 118.8 = 79.3584 \left[\frac{km}{h} \right] = 22.0440 \left[\frac{m}{s} \right]$$

En la Tabla 5.1.1 se presentan los resultados de Velocidad media de diseño para cada nivel del edificio.

Z [m]	F'_{vz} [1]	V'_D [m/s]
5.49	0.6680	22.0440

¹¹ (CFE, 2020)

9.45	0.6680	22.0440
13.41	0.7067	23.3215
17.37	0.7427	24.5094
21.33	0.7726	25.4951
25.29	0.7983	26.3424
29.25	0.8209	27.0886
33.21	0.8411	27.7571
37.17	0.8595	28.3640
41.13	0.8764	28.9207
45.09	0.8920	29.4357
49.05	0.9065	29.9153
53.01	0.9201	30.3646
56.97	0.9329	30.7875
60.93	0.9451	31.1873
64.89	0.9565	31.5667
68.85	0.9675	31.9277
72.81	0.9779	32.2724
76.77	0.9879	32.6022
80.73	0.9975	32.9186

Tabla 5.1.1. Velocidad media de diseño.

Una vez conociendo la Tabla 5.1.1, se puede adjuntar como un archivo de texto .txt al programa, quedando de la siguiente manera.

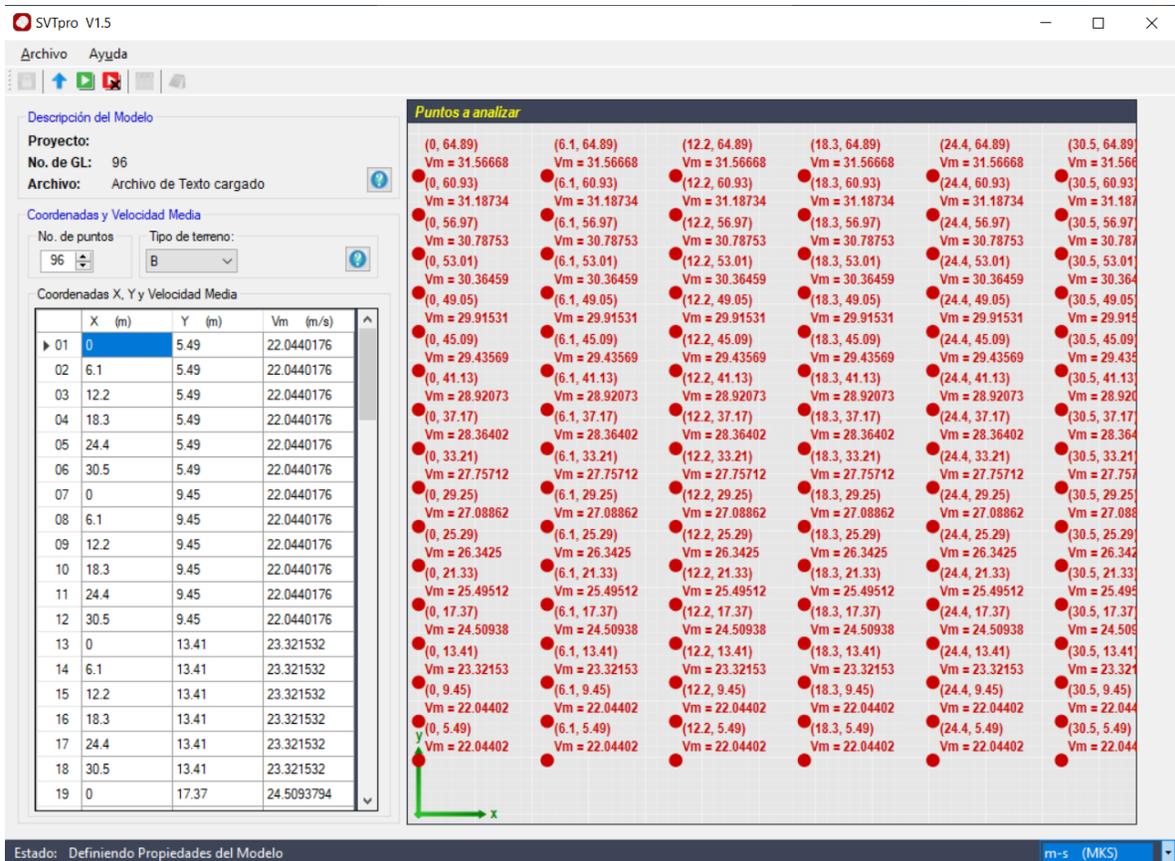


Figura 5.1.2. Interfaz, menú del programa SVTPro16 y archivo de texto cargado para su ejecución (Elaboración propia).

En la figura superior, se presenta un primer archivo con los primeros 96 nodos. Se tienen un total de 120 nodos y debido a que el programa tiene un límite de 100 nodos, se desarrollaron dos ejercicios distintos. Un punto a destacar es que, como el programa trabaja con el sistema ARMA, existe una gran variabilidad entre cada ponderación. Por ejemplo, si se quisiera volver a estudiar el primer análisis con los mismos datos de localización y velocidades después de un día o una semana, los resultados serán distintos. Es por ello, que se deben correr ambos archivos de forma inmediata, a fin de disponer de los resultados más confiables y verídicos posibles (no debe olvidarse que el programa trabaja con unidades MKS $[m/s]$ para la velocidad). Una vez cargado, se procede a realizar un conjunto de resultados, obteniendo 10 señales diferentes (Figura 5.1.3) con una duración de 10 minutos y 6000 puntos distintos cada una. Esto quiere decir que se obtendrá una velocidad de viento cada 0.1 $[s]$, y por consiguiente una fuerza diferente en el mismo lapso.

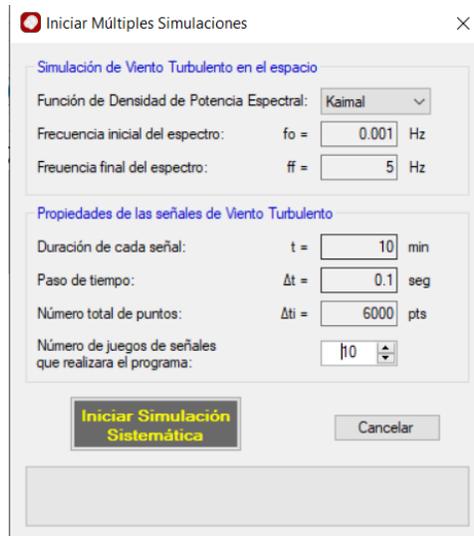


Figura 5.1.3. Menú para iniciar múltiples simulaciones (SVTPro16, 2022).

Cuando el programa termine su proceso, basta con exportar las salidas en 1,200 archivos .txt, contando cada uno con 6,000 resultados de velocidad, completando un total de 7,200,000 velocidades diferentes en 100 minutos.

Como se cuenta con una gran cantidad de archivos por leer y con el fin de automatizar el proceso, en Matlab se escribió un código que los leyera y convirtiera de un formato de tabla a un formato de vector y por medio de la ecuación 1.1.12 se transformen los valores en fuerza y los rescribiera en formato .txt, por lo que se tienen ahora 1,200 documentos, solo que ahora con cargas por viento.

$$F(t) = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_T^2 \cdot C_p \cdot A_T}{9.807} \quad (1.1.12)$$

donde:

$$\rho = 1.3 [kg/m^3]$$

$$C_p = 1.3 [1]^{12}$$

9.807: Factor de conversión de [N] a [kgf]

El área tributaria siempre será en forma rectangular pero varía dependiendo el punto a evaluar. Horizontalmente las crujías tienen la misma distancia y verticalmente, únicamente en el primer nivel se tendrá un cambio en la altura (Figura 5.1.4).

¹² Su valor considera efectos de succión y empuje en muro a barlovento y muro a sotavento (0.8+0.5=0.13).

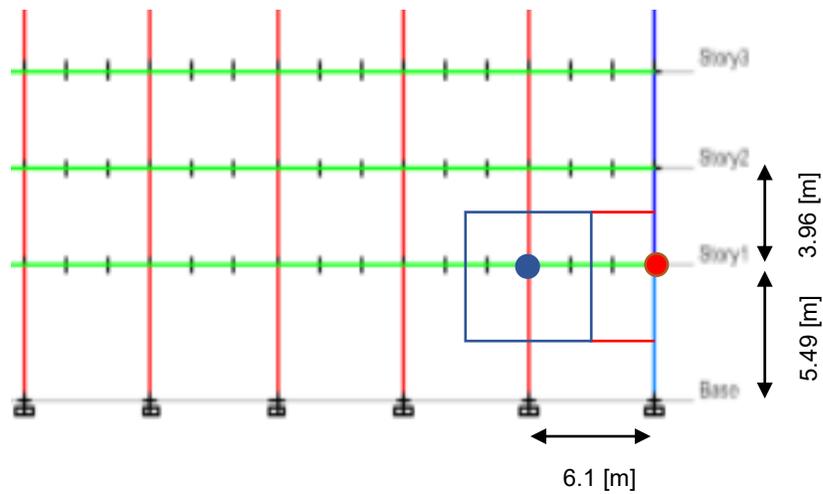


Figura 5.1.4. Área tributaria para dos nodos distintos en el primer nivel (Elaboración propia).

Cálculo del área tributaria en el punto color rojo:

$$A_T = b \cdot h$$

$$A_T = \left(\frac{6.1}{2}\right) \cdot \left(\left(\frac{5.49}{2}\right) + \left(\frac{3.96}{2}\right)\right) = 3.05 \cdot 4.725 = 14.4113 \text{ [m}^2\text{]}$$

Cálculo del área tributaria en el punto color azul:

$$A_T = (6.1) \cdot \left(\left(\frac{5.49}{2}\right) + \left(\frac{3.96}{2}\right)\right) = 6.1 \cdot 4.725 = 28.8225 \text{ [m}^2\text{]}$$

Para todos los niveles del edificio se repite el mismo procedimiento. Las instrucciones dentro de Matlab quedaron como sigue.

```

1 - Sim = readtable("D:\Transf calor MATLAB\Sim1_p1.txt");
2 - A_ex=(6.1/2)*((2.745)+(1.98));
3 - A=table2array(Sim);
4 - Vel=A.^2;
5 - Fuerza = ((0.5 * Vel * 1.3*1.3* A_ex)/9.807);
6
7 - writematrix(Fuerza, 'F-1-1.txt');
8
9 - Sim = readtable("D:\Transf calor MATLAB\Sim2_p1.txt");
10 - A_ex=(6.1/2)*((2.745)+(1.98));
11 - A=table2array(Sim);
12 - Vel=A.^2;
13 - Fuerza = (0.5 * Vel * 1.3*1.3* A_ex)/9.807;
14
15 - writematrix(Fuerza, 'F-1-2.txt');

```

Figura 5.1.5. Fragmento del código de Matlab para el cálculo de fuerzas (Elaboración propia).

Finalmente, la escritura para que APDL reconozca las fuerzas puede ser a través de un loop, aunque en este caso se desarrolló manualmente, ejecutando el mismo documento 10 veces (10 señales). Se comienza por declarar la variable *NVec*, que leerá el número total de vectores: 6,000 por archivo. El comando **SET* deja que se nombre una variable *vec1*, *vec2*, ..., *vecn*, donde *n* es el número total de nodos donde se aplicarán fuerzas (120). **DIM* permite darle dimensión al vector a utilizar, cuyo valor dependerá de *NVec*. **VLEN* es un delimitador para la entrada que se le da; los archivos cuentan con solo una columna en sus 6,000 datos, por lo que se especifica que solo se leerá esa columna. Y **VREAD* lee el formato .txt, que tiene que estar guardado en la misma ruta que el directorio con el que trabaja APDL, y lo asigna a la variable *vecn*.

```

8439  escala=1
8440  Nvec=6000
8441
8442  ! _____ Archivos de fuerza _____
8443
8444  *SET,vec1
8445  *DIM,vec1,,Nvec
8446  *VLEN,Nvec,1
8447  *VREAD,vec1,Viento/F-1-9,txt
8448  (1f16.2)
8449
8450  *SET,vec2
8451  *DIM,vec2,,Nvec
8452  *VLEN,Nvec,1
8453  *VREAD,vec2,Viento/F-2-9,txt
8454  (1f16.2)
8455
8456  *SET,vec3
8457  *DIM,vec3,,Nvec
8458  *VLEN,Nvec,1
8459  *VREAD,vec3,Viento/F-3-9,txt
8460  (1f16.2)

```

Figura 5.1.6. Escritura de comandos para introducción de fuerzas en APDL (Elaboración propia).

El programa hasta ahora solamente ha leído texto, sin tener idea de lo que hará con ello. Por este motivo, con la ayuda del comando *FK* se le ordena al programa recibir dichos archivos como fuerzas, teniendo una dirección sobre el eje *Y* positivo y dando los puntos donde se desea aplicar la carga, así como una escala (que en este caso es 1) que nos ayude a mantener la magnitud. Las letras *ii* funcionan como un método numérico que ayuda al programa a leer los 6000 vectores de cada documento; sin esta escritura el código solamente percibiría los primeros vectores (Figura 5.1.7).

```

9179  FK,272,FY,escala*vec1(ii)
9180  FK,398,FY,escala*vec2(ii)
9181  FK,419,FY,escala*vec3(ii)
9182  FK,440,FY,escala*vec4(ii)
9183  FK,461,FY,escala*vec5(ii)
9184  FK,146,FY,escala*vec6(ii)
9185  FK,271,FY,escala*vec7(ii)

```

Figura 5.1.7. Comando *FK*, nodo dónde se aplica la fuerza, carga, dirección y tipo de carga (Elaboración propia).

5.2 Restricciones

Como restricción inicial, se comentó con el asesor acerca de los alcances de la presente tesis, dejando de lado los eventos como sismos, tornados, entre otros, aislando el trabajo únicamente a fuerzas de viento y su interacción con el edificio,

ya que si se incluyeran más riesgos podría tomarse mucho más tiempo en completarse.

- Grados de libertad

Se cambiaron los grados de libertad que se tienen en los nodos que se encuentran en contacto con el suelo, con el fin de tener una mayor simplicidad en comparación con el artículo original (Spencer, Christenson, & Dyke, 1999). Se determinó una restricción de empotramiento en cada uno de estos puntos, restringiendo cualquier tipo de movimiento de traslación o rotación.

La generación de esta restricción dentro de ANSYS APDL se construye con el comando DK, seguido del número de nodo a ajustar, si se quiere aplicar solo a este o a varios (segundo valor de 0) y finalmente el número de movimientos que se quiera restringir, en este caso ALL.

```
! _____ RESTRICCIONES NODOS _____  
DK,21,ALL,,0,,0,ALL,,,,,  
DK,42,ALL,,0,,0,ALL,,,,,
```

Figura 5.2.1. Restricción de nodos (Elaboración propia).

Todos los demás nodos que completan la estructura se dejaron con todos los grados de libertad libres. A pesar de ello, cuando se comenzó a construir en APDL el modelo, se buscó la manera de introducir otra condición, conocida como *end release*; es una condición que puede ser aplicada a elementos tipo viga, y su función recae en permitir o negar el movimiento de rotación sobre un eje en un extremo o en ambos. Esta idea se está buscando implementar en diferentes proyectos de construcción, con el simple objetivo de visualizar y estudiar los cambios que pudiera ocasionar. En este trabajo desgraciadamente no pudo incluirse, pero se deja a consideración de futuros ingenieros el uso de *end release*.

Capítulo 6. Metodología y comandos para la resolución del modelo

Una vez terminada la implementación del edificio en ANSYS, junto con la aplicación de materiales y propiedades, es posible desarrollar un análisis modal. Posterior a ello, y verificando que los resultados de este sean congruentes, se da lugar al análisis dinámico o transitorio.

6.1 ¿Qué resultados se buscan? ¿Por qué?

Para la verificación de la seguridad y confiabilidad de la estructura, se están buscando resultados de aceleración y desplazamiento a causa de las fuerzas de viento en una dirección longitudinal con respecto a la dirección de las cargas aplicadas. Según el *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento* (CFE, 2020), existen condiciones y estados límites de servicio para el desplazamiento, y enfatiza que la revisión de dichos estados se debe realizar independientemente del tipo de análisis empleado. Es por ello, que en la siguiente tabla se presentan los valores límite para el diseño por viento para estructuras con geometría rectangular con periodos de retorno de 10 o 50 años.

Efecto a controlar	Estado límite de servicio	Observaciones
Distorsiones de entepiso	1/200	Cuando no existan elementos no estructurales que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares.
	1/500	Cuando existan elementos no estructurales que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares.
Desplazamiento lateral	H/500	Calculado a la altura máxima del edificio, H.

Tabla 6.1.1. Estado límite de servicio de distorsiones y de desplazamiento lateral.

Con respecto a resultados de aceleración, lo que se busca es no rebasar la delimitación propuesta por el *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por viento*, con un valor de 10 [mili-g]¹³, para que la comodidad y seguridad del edificio presentado cumpla con lo propuesto por el mismo manual. Adicionalmente, se presenta una tabla con los estados límite de aceleración para inmuebles, según el

¹³ Mili-g: Unidad de aceleración utilizada en mediciones por ráfagas de viento, donde su valor corresponde a la multiplicación de la aceleración en $[m/s^2]$ por 1000, y dividido entre 9.81 (CFE, 2020).

uso que se le dará a la estructura; como no se definió el uso final del edificio, se tomarán ambos valores límite de aceleración para compararlos con los resultados.

Uso de la estructura	Límite de aceleración [mili-g]
Oficinas	$-4.35 \ln(n_1) + 5.5$ para $0.20 \leq n_1 \leq 1.00$
Residencial	$-2.36 \ln(n_1) + 3.0$ para $0.20 \leq n_1 \leq 1.00$

Tabla 6.1.2. Estados límite de aceleración. n_1 es la frecuencia fundamental en la dirección del viento.

6.2 Resolución en ANSYS APDL

La resolución en ANSYS APDL comienza por dar por concluido la modelación, asignación de propiedades y la discretización. Este proceso finaliza por el comando *FINISH*, que permite cambiar a la sección del postprocesamiento. El programa cuenta con una serie de comandos, presentados en el apartado 6.3, que tienen como finalidad determinar el análisis deseado.

APDL tiene un apartado gráfico funcional, pero no maravilloso. Es por ello, que, además de obtener los resultados visuales, se complementará con archivos .txt generados por APDL, que muestren los resultados de desplazamientos y aceleraciones en cada caso presentado, ya que la representación visual solamente muestra resultados promedio. Como en la base se encuentran restringidos los grados de libertad, y dado que la presión del viento es directamente proporcional a la altura del edificio, se decidió tomar los 4 nodos de las esquinas del nivel superior para el estudio, esperando producir valores máximos.

6.3 Comandos necesarios para obtener resultados

El comando inicial por utilizar para cualquier tipo de análisis es */SOLUTION*, abriendo el espacio para los comandos siguientes; sus definiciones completas y observaciones se encuentran en la página web de APDL, comandos de referencia. (ANSYS, s.f.)

A continuación, se presentan en forma de lista los comandos para un análisis modal:

ANTYPE: permite seleccionar el tipo de análisis a completar; en este caso se tiene un valor numérico de identificación de 2.

MODOPT: permite seleccionar el método por el cual se quiere obtener el resultado. El método Block Lanczos es “un procedimiento que sirve para aproximar numéricamente los autovalores de matrices simétricas..., dispersas y de gran tamaño, que puede ser aplicado para sistemas lineales o de mínimos cuadrados” (Mozo, 2021), proceso que completa el programa gracias a su capacidad autónoma de resolución. Como información adicional, solicita el número de modos que desea incorporar el usuario, en este caso se desean 10 respuestas.

EQSLV: especifica el tipo de ecuación a resolver. El tipo *SPARSE*, es aplicable a matrices reales o complejas, simétricas o asimétricas. Se puede utilizar para análisis no lineales y lineales, además de ser muy adecuada para análisis de contacto, y modelos que consistan en elementos tipo *shell* y *beam*.

MXPAND: determina, en conjunto con *MODOPT*, el número de modos a expandir y escribir.

LUMPM: especifica una formulación de una matriz de masa concentrada; con el valor 0 se da por apagado el comando para que el programa no realice una aproximación y use una formulación por default dependiente del elemento.

PSTRES: especifica si los efectos de *prestress* se calculan o incluyen dentro del proceso. El valor de 0 deniega el cálculo o inclusión de dichos efectos.

/STATUS: enlista el estatus de los archivos para el análisis. En el caso de *SOLU*, provee un resumen del estado de la solución.

/OUTPUT: envía todos los resultados obtenidos al final del análisis, hacia un archivo extraído del programa. En este caso, se solicita un formato .txt con el nombre *MODALPROP*.

SOLVE: es el comando que da la orden al programa de comenzar la solución.

```

6908 ! _____ ANALISIS MODAL _____
6909 /SOLUTION
6910 ANTYPE,2
6911
6912 MODOPT,LANB,10
6913 EQSLV,SPAR
6914 MXPAND,10,, ,YES
6915 LUMPM,0
6916 PSTRES,0
6917 !*
6918 MODOPT,LANB,10,0,0, ,OFF
6919 /STATUS,SOLU
6920 /OUTPUT,MODALPROP,out
6921 SOLVE
6922 FINISH

```

Figura 6.3.1. Comandos para resolución del análisis modal (Elaboración propia).

A continuación, se presentan en forma de lista los comandos para un análisis transitorio:

ANTYPE: permite seleccionar el tipo de análisis a realizar; en este caso se tiene un valor numérico de identificación de 4.

TRNOPT: especifica las opciones para el análisis transitorio, pudiendo ser completo (*Full*) o un método por superposición de modos (*MSUP*).

ALPHAD: define el factor que multiplicará la matriz de masa, para el amortiguamiento de Rayleigh.

BETAD: define el factor que multiplicará la matriz de rigidez, para el amortiguamiento de Rayleigh.

ACEL: se introduce de nuevo la magnitud y dirección de la aceleración gravitacional.

AUTOTS: decide si utilizar un paso de tiempo automático, dónde *ON* activa este tipo de paso.

NSUBST: especifica el número de substeps que tendrá el load step.

***DO:** comando que inicia una serie de ordenes que se incluirán dentro de un bucle para que se realice las cantidades necesarias, dependiendo del valor dado. La variable *ii* indica el parámetro que se utiliza para el bucle. El valor de 1 (izquierda), es el valor inicial del loop, *NVec* es el máximo valor y 1 (derecha) es el incremento desde el valor inicial hasta el máximo.

FK: comando explicado en el capítulo 5, para la aplicación de fuerzas sobre el modelo, en los nodos indicados y la dirección deseada.

KBC: define como serán aplicadas las cargas. El 0 identifica una interpolación lineal entre las cargas (rampa) y el valor de 1 las toma como tipo escalonada, o funciones definidas por partes. En este caso se usa entrada tipo escalonada, porque las cargas se mantienen constantes en todos los intervalos y las cargas tipo rampa se utilizan únicamente en análisis estáticos o transitorios con efectos transitorios excluidos.

TIME: define el tiempo que se tendrá al terminar el load step. El tiempo será igual a la variable *ii*, multiplicada por 0.1, lo que nos dará un tiempo igual a 600 [s] o 10 [min].

DELTIM: especifica el tamaño de paso del tiempo del load step.

SOLVE: es el comando que da la orden al programa de comenzar la solución.

OUTRES: controla la información o elementos de la solución que se escribirá en la base de datos del programa. En este caso se solicita la aceleración nodal únicamente en el último substep de cada load step.

**ENDDO*: comando que concluye con el ciclo abierto en **Do* y vuelve a iniciarlo.

/POST26: Entra al postprocesador de resultados de tipo time-history.

NUMVAR: determina el número de variables que se pueden obtener dentro de */POST26*, teniendo un valor máximo de 200.

STORE: guarda la información en la base de datos para las variables definidas, para que, a través de otro comando, se puedan exportar.

```

9164 | _____ Análisis Transitorio _____
9165 /SOLU
9166 ANTYPE,TRANS
9167 TRNOPT,FULL
9168
9169 | _____ Amortiguamiento de Rayleigh con 1.5% _____
9170 ALPHAD, 0.0066579
9171 BETAD, 0.0133238
9172 ACEL,0,0,9.807
9173 AUTOTS,ON
9174 NSUBST,5
9175
9176 *DO,ii,1,Nvec,1
9177 NSUBST,5
9178
9179 FK,272,FY,escala*vec1(ii)
9180 FK,398,FY,escala*vec2(ii)
9181 FK,419,FY,escala*vec3(ii)
9182 FK,440,FY,escala*vec4(ii)
9183 FK,461,FY,escala*vec5(ii)
9184 FK,146,FY,escala*vec6(ii)
9185 FK,271,FY,escala*vec7(ii)
9300 KBC,1
9301 TIME,0.1*ii
9302 DELTIM,0.1
9303 SOLVE
9304 OUTRES,A, LAST
9305 *ENDDO
9306 FINISH
9307
9308 /POST26
9309 NUMVAR,200

```

Figura 6.3.2. Inicio del análisis transitorio y especificaciones (Elaboración propia).

6.4 Tipos de análisis para obtener resultados

El análisis modal en ANSYS mostró los siguientes resultados:

Modo	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
1	0.2496	4.0060
2	0.3219	3.1063
3	0.4353	2.2975
4	0.6979	1.4329
5	0.9215	1.0852
6	1.1689	0.85546
7	1.1997	0.83353
8	1.5751	0.63486
9	1.6360	0.61124
10	2.00203	0.49949

Tabla 6.4.1. Primeros diez modos de la estructura.

Después de un largo proceso de revisión y corrección, los resultados mostrados en la Tabla 6.4.1 pueden tomarse como congruentes, realizando una comparación con los mismos resultados en el programa ETABS. Los resultados visuales de los primeros dos modos se ven como sigue:

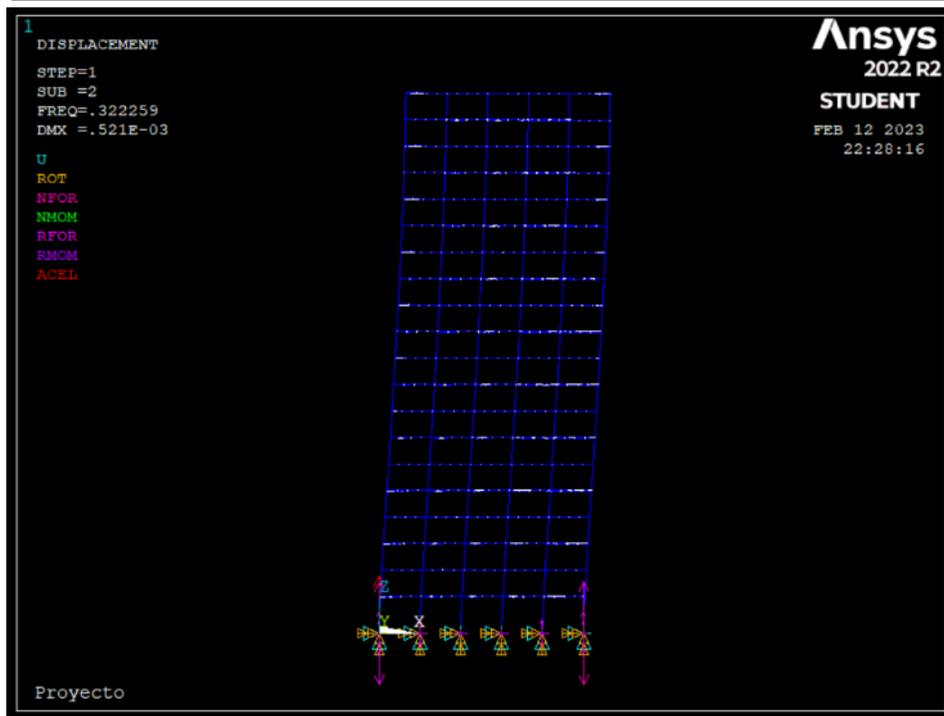
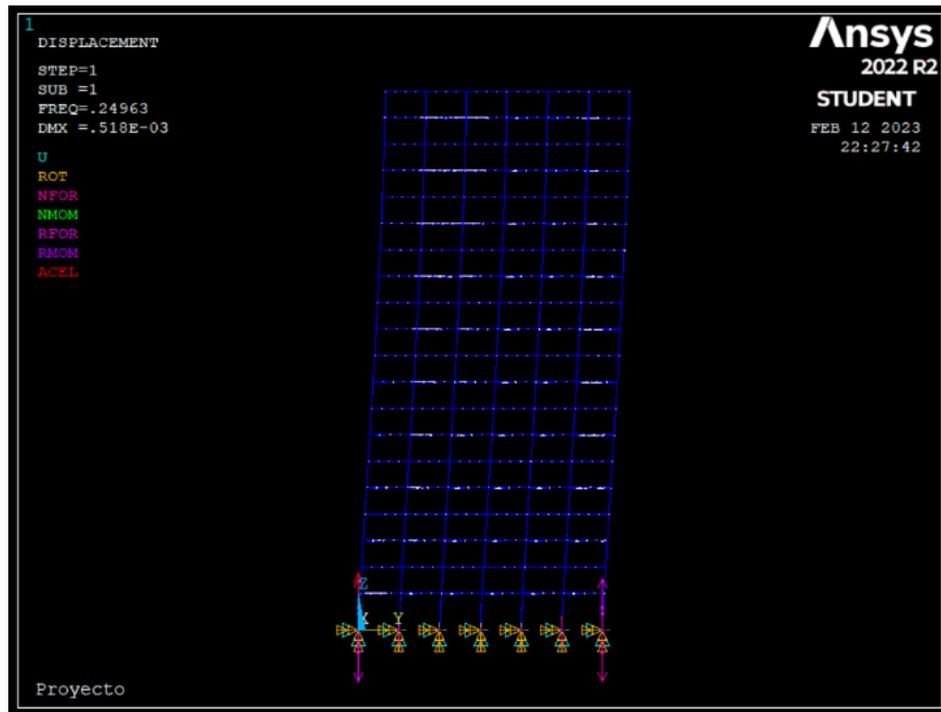


Figura 6.4.1. Primeros dos modos de vibración del edificio (Elaboración propia).

En el apéndice se presenta la gráfica del tercer modo de vibración y los resultados del análisis modal por el programa ETABS.

Análisis transitorio.

El análisis transitorio “se emplea para evaluar la acción resultante de la interacción dinámica entre el flujo del viento y una estructura” (CFE, 2020); se toma siempre y cuando el primer periodo de vibración sea mayor a 1 [s] y menor a 5 [s], y la estructura se considere de tipo 2 (en este caso se cumple). Además, dada la variabilidad de las fuerzas a utilizar por viento, un análisis estático puede que quede corto con relación al transitorio.

Existe una gran cantidad de datos al finalizar el ejercicio, ya que se obtienen la aceleración y el desplazamiento en cada uno de los cuatro nodos, durante 10 señales diferentes. Por ello, cada nodo tendrá 20 respuestas y cada una de estas se conforman por 6,000 datos. Con la finalidad de tener una mayor claridad en la lectura y análisis de resultados, se realizaron 4¹⁴ gráficas distintas por señal. En seguida se presenta como ejemplo las salidas de desplazamiento y aceleración de la señal 2 y 3, en el nodo 1. En el apéndice se presentan las representaciones restantes.

¹⁴ Son 4 gráficas por señal dado que el análisis se extrae en cuatro nodos. Sus coordenadas son: N1(0,0,80.73), N2(30.5,0,80.73), N3(30.5,36.6,80.73) y N4(0,36.6,80.73).

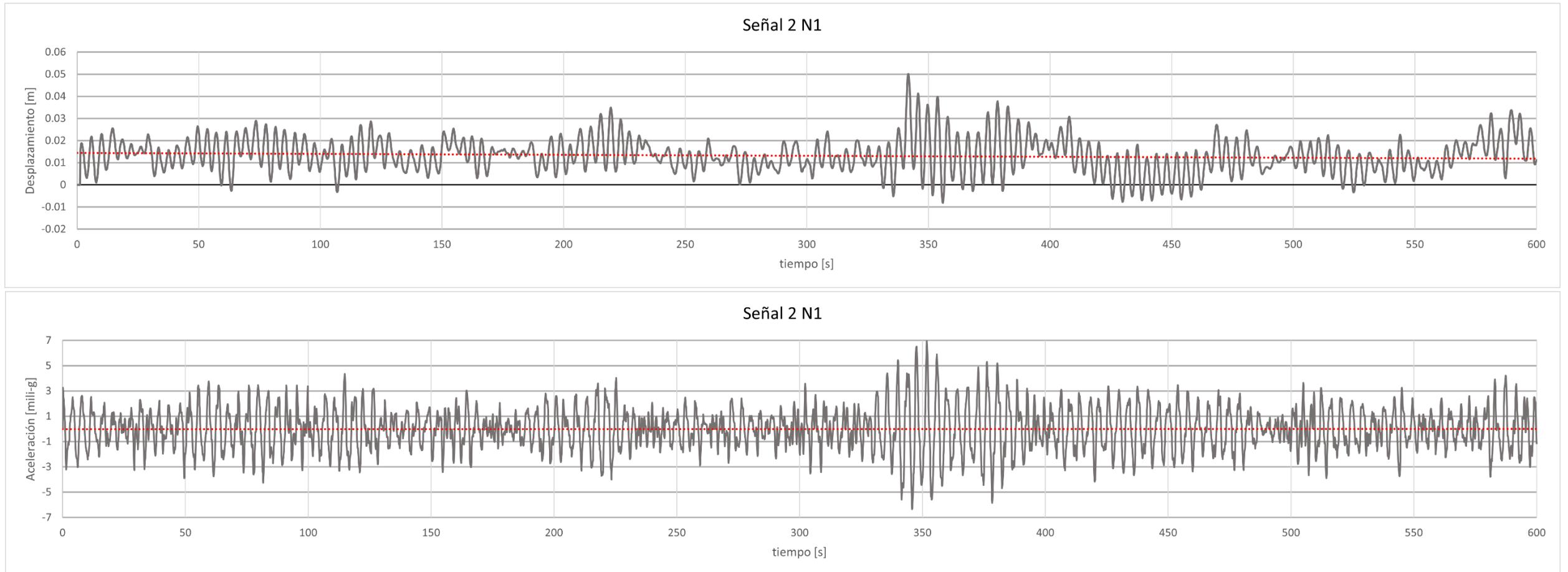


Figura 6.4.2. Respuesta de desplazamiento [m] (superior) y aceleración [m] (inferior) en el nodo 1 en la señal 2 (Elaboración propia).

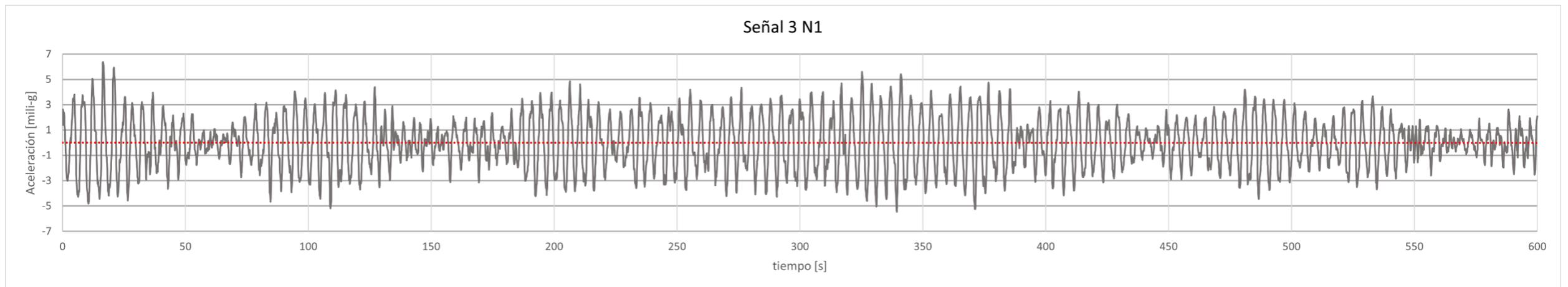
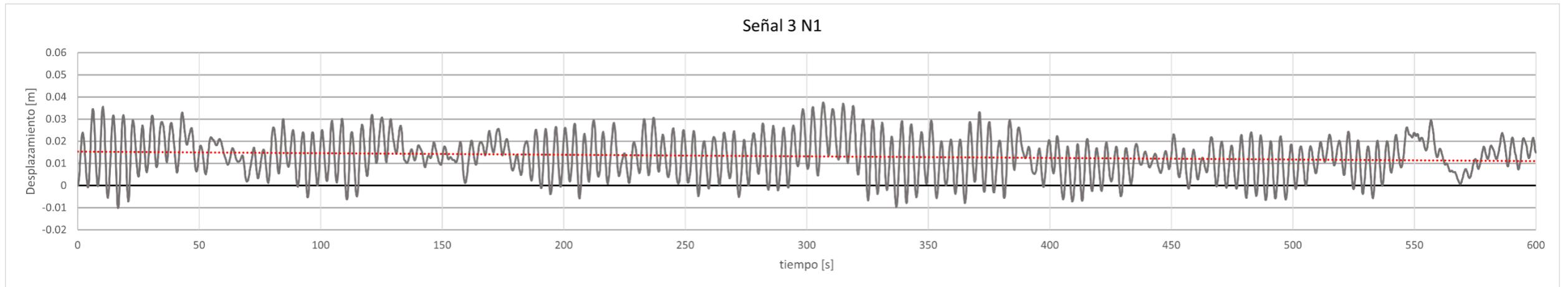


Figura 6.4.3. Respuesta de desplazamiento [m] (superior) y aceleración [mili-g] (inferior) en el nodo 1 en la señal 3 (Elaboración propia).

Los resultados gráficos mostrados en APDL para la señal 2 y 3, son valores promedio de desplazamiento y aceleración, únicamente extraído en la dirección Y. Se mostrarán los efectos en el tiempo 300 [s].

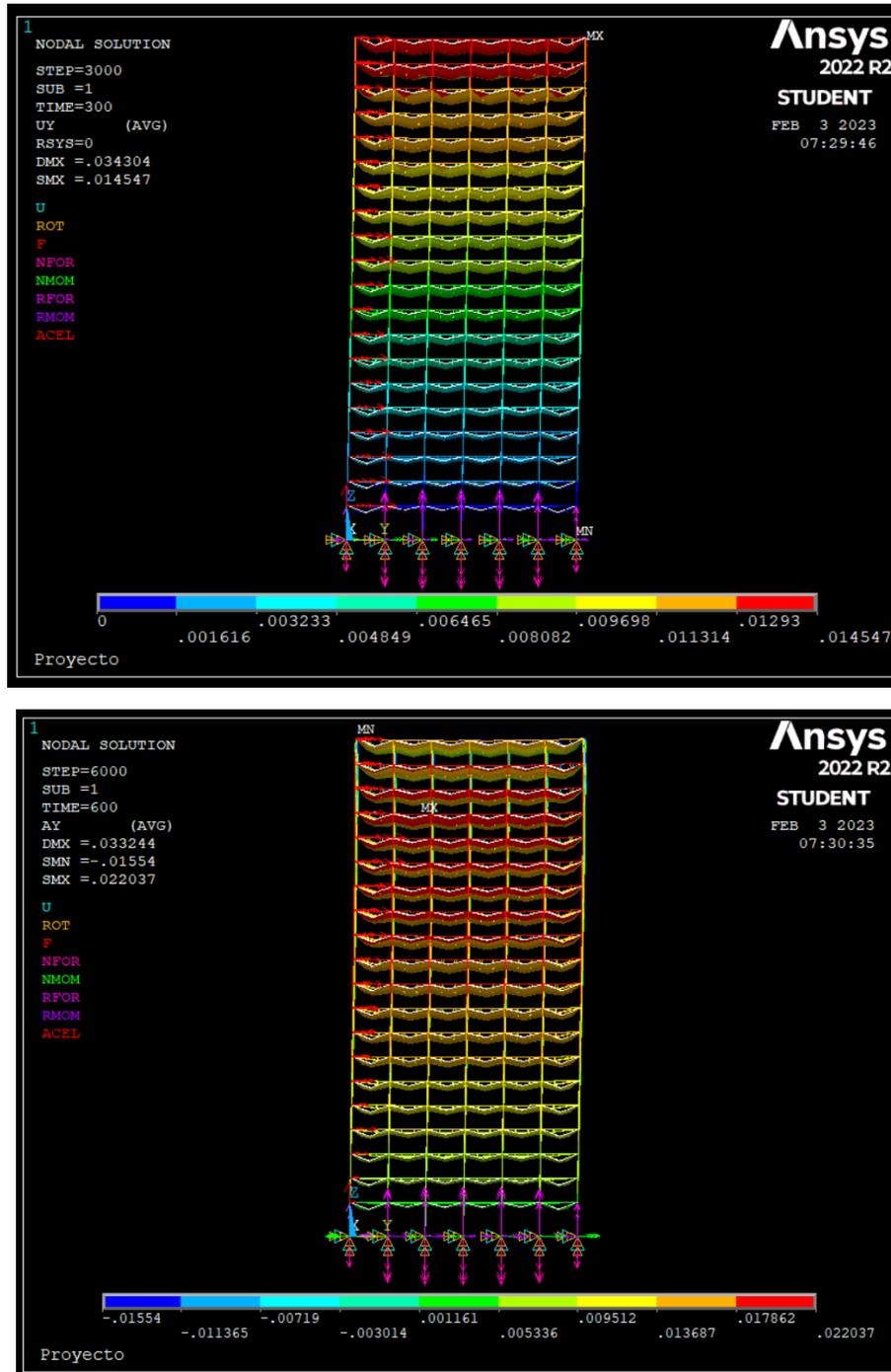


Figura 6.4.4. Visualización del desplazamiento (superior) y la aceleración (inferior) del edificio en la señal 2, en un tiempo de 300 [s] (Elaboración propia).

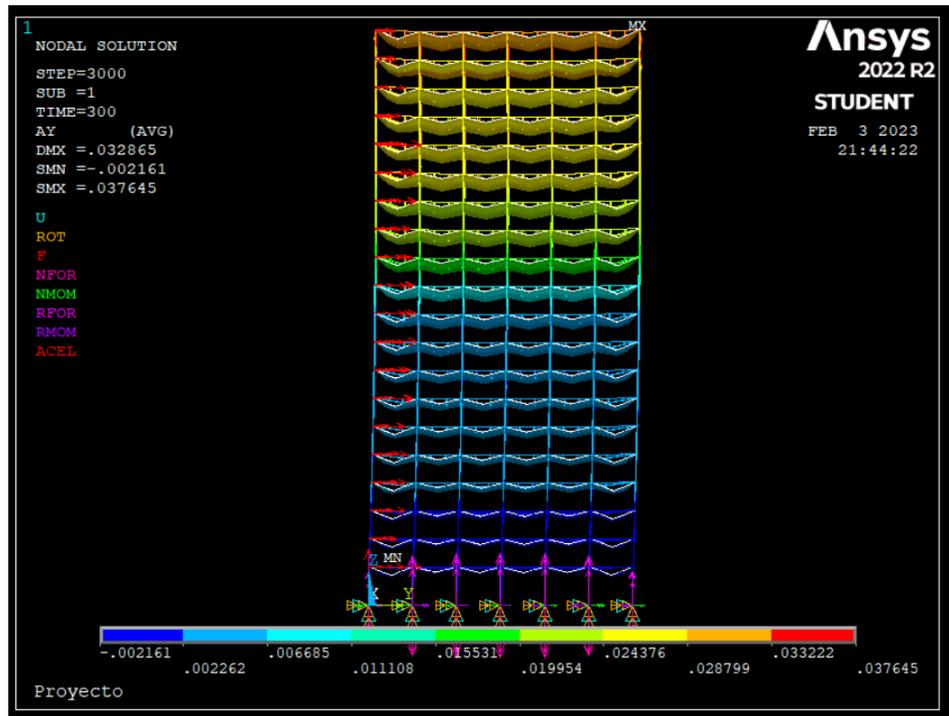
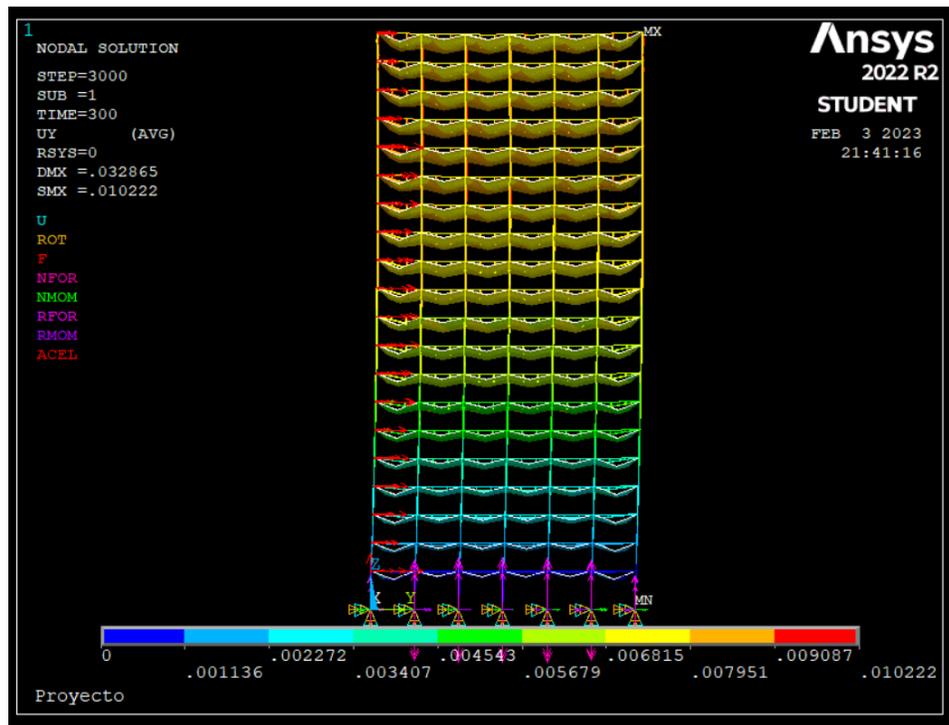


Figura 6.4.5. Visualización del desplazamiento (superior) y la aceleración (inferior) en la señal 3, en un tiempo de 300 [s] (Elaboración propia).

En el apéndice se presentan los resultados completos en tres momentos distintos en el tiempo: 0.1 [s] (primer set), 300 [s] (mitad del estudio) y 600 [s] (final del estudio).

Los archivos de desplazamiento y aceleración contienen una gran cantidad de valores. Para una mejor observación y con el fin de verificar los estados límite del edificio con lo que se indica en la literatura, se obtendrán los valores máximos de cada nodo en todas las señales, tanto del desplazamiento como de la aceleración. A su vez, se obtendrá un valor promedio de estos conjuntos, con la finalidad de comentar los resultados en el capítulo siguiente.

	MÁX N1 [m]	MÁX N2 [m]	MÁX N3 [m]	MÁX N4 [m]
Señal 1	-	0.040684	0.041719	0.041715
Señal 2	0.050111	0.051057	0.051053	0.05165
Señal 3	0.03753	0.038609	0.038604	0.03927
Señal 4	0.04142	0.042484	0.04248	0.043144
Señal 5	0.042874	0.044202	0.044198	0.045024
Señal 6	0.042206	0.043357	0.043353	0.044067
Señal 7	0.034714	0.035524	0.035521	0.036026
Señal 8	0.040793	0.041655	0.041651	0.042184
Señal 9	0.045848	0.047026	0.047023	0.047757
Señal 10	0.039165	0.039964	0.03996	0.040492
Promedio	0.041629	0.0424562	0.0425562	0.0431329

Tabla 6.4.2. Máximos desplazamientos en cada nodo por señal y su promedio.

	MÁX N1 [mili-g]	MÁX N2 [mili-g]	MÁX N3 [mili-g]	MÁX N4 [mili-g]
Señal 1	4.242304	5.376351	5.407951	5.407238
Señal 2	6.929664	6.929664	6.929256	7.018349
Señal 3	6.377064	6.825586	6.827931	7.084709
Señal 4	6.449541	6.967788	6.968298	7.332722
Señal 5	7.070642	7.336901	7.337309	7.397655
Señal 6	6.963609	7.397655	7.396228	7.875841
Señal 7	5.133333	5.370336	5.369419	5.673293
Señal 8	5.787564	6.234862	6.234659	6.534557
Señal 9	7.537920	7.783894	7.782365	7.947503
Señal 10	5.575535	6.525688	6.523140	7.237819
Promedio	6.206718	6.674873	6.677655	6.950968

Tabla 6.4.3. Máximas aceleraciones en cada nodo por señal y su promedio.

Capítulo 7. Análisis de resultados

Si bien un análisis modal no se incluía en los objetivos de este documento, su funcionalidad es increíblemente grande; además de ser resuelto en menos de 10 minutos en APDL, ahorrando tiempo en comparación con la ejecución de un análisis transitorio, sus resultados son la base para desarrollar los objetivos definitivos, puesto que se conoce el comportamiento natural de la edificación. En la Tabla 6.4.1, se presentan los primeros 10 modos de vibración del edificio; aunque podría solicitarse al programa producir más, con 10 son suficientes para conocer el funcionamiento general de la estructura. Los primeros dos modos son de vital importancia, ya que estos definen el movimiento de traslación en el eje Y, y en el eje X respectivamente, mientras que el tercer modo muestra la torsión que sufre la edificación (Figura 6.4.1 y Figura A11).

A su vez, el modo 1 es el periodo fundamental de la estructura, teniendo un valor de 4.0060 [s] que permite confirmar el estudio de tipo transitorio en lugar de uno estático (con base en la literatura). El periodo fundamental es un concepto que se observa mucho dentro de la ingeniería estructural, dado que es el que puede introducir la mayor cantidad de daños y los mayores desplazamientos. De ahí que se considere un periodo de gran relevancia, pero dada la altura del edificio, entra dentro de los límites planeados. Aunque el décimo periodo no sea trascendente, la frecuencia de este sí lo hace; este valor es utilizado en fórmulas para obtener el amortiguamiento de Rayleigh en conjunto con la frecuencia del periodo fundamental, siempre y cuando el coeficiente de amortiguamiento en estos sea el mismo (para este caso, se tomará como el mismo en ambos).

Si se quisieran comparar los resultados con ETABS y APDL, se notan grandes diferencias en los periodos que llegan a dar errores hasta del 17%. Si bien no es un error con el que se desee trabajar, se debe más que nada a las diferencias entre los métodos de resolución de ambos programas. De igual manera, el cambio en la sección utilizada para la losa puede ser un contribuyente, pues en APDL no se dispone de la opción directa de incorporar una sección de tipo *Deck*, tal como lo hace ETABS. La introducción del factor de rigidez al cortante también tiene un impacto en los cambios de los periodos y frecuencias; el hecho de que ETABS trabaje con cargas vivas, cargas vivas instantáneas, cargas muertas, entre otras, modifica el uso que se le da a la estructura, mientras que APDL únicamente funciona a través del peso mismo de los elementos de construcción, sin importarle en gran medida la utilización final del producto.

Durante el análisis transitorio, se creó un documento en Microsoft Excel con la información completa de los resultados de desplazamiento y aceleración, obteniendo gráficos que facilitan su revisión. La gráfica de desplazamiento indica una combinación de parte

dinámica y estática, teniendo una línea de tendencia superior al valor nulo de desplazamiento. Mientras que la gráfica de aceleración solo presenta una parte dinámica; es por lo que la línea de tendencia (color rojo) coincide totalmente con el eje horizontal.

En la Figura 6.4.2 se tiene el estudio en el Nodo 1 durante la segunda señal de 10 minutos, teniendo una gran variabilidad en este lapso. Esta variabilidad se le atribuye al sistema ARMA (Auto Regresive Movil Average) utilizado en el programa SVTPro16; dicho enfoque, recopila información histórica del comportamiento de cualquier acción, en este caso ráfagas de viento, para lograr una predicción futura resultante de la acumulación y desglose del historial, acercándose lo más posible a un valor real y lógico, sin olvidar que consigo traerá un error aceptable.

En general, las gráficas indican el patrón de magnitud de las fuerzas aplicadas y como el edificio reacciona a éstas en los nodos estudiados. Con esto en mente, se entiende por qué son tan similares los datos por señal aunque los nodos cambien; los desplazamientos, por ejemplo, en todos los nodos del mismo nivel, deben de tener un movimiento similar, ya que, si su valor varía en demasía, demuestra que una parte del modelo se podría estar desprendiendo y podría causar fallas estructurales.

Los estados límite para el edificio son:

De la tabla 6.1.1, se obtiene:

$$DL = \frac{80.73}{500} = 0.16146 [m]$$

Y de la tabla 6.1.2, se obtiene:

$$LA_O = -4.35 \ln(0.2496) + 5.5 = 11.5373 [mili - g]$$

$$LA_R = -2.36 \ln(0.2496) + 3 = 6.2754 [mili - g]$$

Ahora, revisando la Tabla 6.4.2 y la Tabla 6.4.3, se pueden comparar los resultados conseguidos con lo que indica la bibliografía. Con respecto al estado límite de desplazamiento que puede sufrir el edificio, se mantiene muy por debajo del tope de 16.146 [cm], siendo el mayor desplazamiento de únicamente 5.165 [cm], alcanzando uno de los objetivos propuestos para este trabajo. Además, el promedio de los valores máximos de desplazamiento por nodo, muestran lo que puede ser la mejor aproximación de resultados después de 100 minutos, logrando mantener un valor menor que el estado límite y cumpliendo satisfactoriamente con uno de los factores más importantes dentro del proceso de construcción.

Por otro lado, la aceleración sí es debatible. Aunque en general se tenga un valor máximo de 10 [mili-g] para cualquier edificación, los resultados de LA_O y LA_R son los buscados en particular para este caso. Si el proyecto se deseara utilizar para residencias, se concluye que no es lo suficientemente seguro, puesto que la aceleración máxima se encuentra en el nodo 4, señal 9, de 7.947503 [mili-g], mientras que la literatura indica no rebasar la frontera de 6.2754 [mili-g] para estos casos. En cambio, para un uso totalmente de oficinas se recomienda no sobrepasar de 11.5373 [mili-g], por lo que los resultados se encuentran óptimos para este fin, teniendo una gran comodidad como consecuencia de la diferencia entre el margen teórico y el máximo experimental. Asimismo, los promedios de la aceleración y los desplazamientos recalcan la afectación que puede sufrir el edificio a través del tiempo dado, aglomerando en un solo valor los resultados por nodo. Si comparamos los promedios con los límites de LA_O y LA_R , se puede deducir que, para el caso residencial sigue sin cumplir con la confiabilidad, mientras que para una aplicación oficinista su confiabilidad y seguridad aumenta.

Una tendencia que se encontró al momento de comparar los resultados de cada señal fue que, si bien cada nodo cuenta con valores máximos, los valores máximos en el nodo 4 fueron superiores a los demás. En este nodo no se aplican fuerzas, únicamente en el nodo 1 y 2 (puesto que se ubican en la cara a barlovento), pero lo que se buscó fue precisamente conocer los resultados en nodos que no tuvieran interacción con las cargas, para conocer sus reacciones a causa de estas. Lo que pueden indicar estos resultados, es que no siempre el punto donde se aplique una carga o fuerza será el nodo que más sufra alteraciones; ya que estos nodos o uniones se encuentran conectados a través de líneas o trabes a lo alto, largo y ancho de toda la edificación, quiere decir que estas conexiones lograrán afectar cada rincón de vigas y uniones, confirmando la interacción dependiente de todo el edificio consigo mismo y su correcta relación durante el modelado.

Capítulo 8. Recomendaciones y conclusiones

Como conclusión, el objetivo general se logró gracias al estudio de los programas especializados, así como del diseño estructural y la aerodinámica civil. Los manuales y libros relacionados a estos temas, además de otros acerca de vibraciones mecánicas e ingeniería de viento formaron una parte fundamental para el éxito del trabajo, ya que, sin ellos no se tendrían bases para los procesos aquí presentados. Adicionalmente, se menciona toda la ayuda presentada por los diferentes programas: desde videos tutoriales para empezar a manejar sus comandos e interfaz, hasta los libros de presentación de ejercicios y resolución de problemas, con los cuales se mejoró la noción de estos. La implementación de cálculos a través de sistemas computacionales se volvió total para el desarrollo, por lo que se exige un manejo básico a intermedio para la introducción, obtención y análisis de estos resultados.

Durante la revisión de los estados límite de desplazamiento máximo permitido, se determinó que la estructura cumple con esta condición con relativa sencillez, pues el máximo desplazamiento de la estructura es apenas el 40% del permitido. Dicha diferencia puede atribuirse a varios factores: tipo de elementos y materiales utilizados, tipo de estructura, magnitud de la fuerza aplicada al edificio, dirección, entre otros; si bien es un máximo válido, se invita a futuros investigadores a cambiar cualquiera de los factores antes mencionados, con la finalidad de alterar dicho desplazamiento y elaborar una comparación entre los resultados obtenidos.

Con respecto a la aceleración, se recomienda tener cuidado a la hora de controlar la estructura en próximos análisis. Si se busca que el inmueble cumpla con un objetivo de construcción en particular, se deben revisar de nuevo las aceleraciones y esforzarse en disminuir dichos resultados, con la intención de tener una estructura mucho más confiable, puesto que la máxima aceleración es el 70% de la aceleración máxima permitida. Se deja, a manera de comentario, que este resultado se reduzca hasta un 50% para la reducción de riesgos. Como ayuda para mejorar las aceleraciones y desplazamientos, se propone estudiar la reducción de grados de libertad por medio del comando *ENDRELEASE* en APDL, además de diversos estudios en diferentes localidades con las ráfagas de viento, pudiendo notar un patrón regional para su mejor localización. Asimismo, se sugiere editar el modelado, cambiando dimensiones de las vigas, trabes y losas, tipo de suelo, propiedades mecánicas, etc. Al momento que se realicen variaciones, se incita a completar comparaciones, para el crecimiento y desarrollo de la base de datos del tema en cuestión.

Se recalca que APDL es un programa muy poco intuitivo que no indica errores de producción ni de conexión, únicamente errores en comandos. A causa de esto y la

inexperiencia al inicio del procedimiento, se cometió el error de construir con vigas perimetrales de 6.1 [m]. Esto trajo grandes equivocaciones, puesto que en cada una de esas vigas se encontraban dos conexiones directas con las vigas secundarias que no podían ser reconocidas por APDL. APDL comprendió que tenía diferentes sistemas independientes en cada unión, dando varios modelos de trabajo, cuando solo se necesita de uno en conjunto. Los problemas fueron localizados con las respuestas del análisis modal: los periodos daban valores superiores a 1000 [s] y la frecuencia era increíblemente pequeña. La recomendación es, identificar cada unión o cruce de vigas en todos los entrepisos, para dar las correctas dimensiones a ETABS y, por lo tanto, el número de vigas y nodos correctos para APDL. La corrección llegó con el cambio de dimensiones, pasando de 6.1 [m] a 2.033 [m], dándole a entender a APDL la relación existente entre las vigas. Durante la observación de los resultados gráficos en el análisis transitorio en APDL, se identificó un “desprendimiento” de mallado, erradicado mediante el cambio del tamaño de mallado, pasando de 1.525 [m] a 6.1 [m]. A pesar de ello, se llegó a la conclusión que se presenta solamente como un detalle visual, ya que se cambió el tamaño varias veces y no varió la resolución del edificio.

Un problema que se tuvo dada la limitada capacidad computacional con la que se trabajó, fue el cambio de nodos donde se buscaron los resultados. En un principio se planteó producir un resultado por nivel, seleccionando 20 nodos distintos. Sin embargo, los resultados fueron insatisfactorios, porque la computadora utilizada no contaba con la capacidad en memoria RAM y memoria ROM suficiente para la culminación del procesamiento. Para este estudio, el tamaño aproximado por señal fue de 500GB en memoria ROM, utilizando 12GB de memoria RAM y el tiempo de solución fue de 8 a 12 horas. Se recomienda trabajar con la mitad de los archivos, o tal vez con un menor número de nodos para tener una reducción en el tiempo de obtención de resultados. Incluso, se invita a realizar un desglose en un solo nodo por entrepiso, obteniendo resultados a lo alto del edificio sin tanta carga de memoria.

Si se llegara a tomar este proyecto como base para escritos posteriores, se hace el llamado para que se comparen valores teóricos con los obtenidos a través de los programas especializados, además de enfocarlo en alguna otra aplicación como efectos sísmicos, de manera que el análisis modal sirva como base para una comparación de frecuencias entre el prototipo y el suelo donde se construye, analizando efectos de resonancia. Igualmente, se recomienda enfocarse en aplicaciones residenciales, con el fin de mejorar el efecto de la aceleración y mejorar la confiabilidad, a través de la modificación de geometría, cambios en los materiales utilizados, zona de levantamiento y su medio ambiente. Por último, se sugiere que en un futuro se trabaje como un edificio cerrado,

colocando paredes del material que se desee para aumentar el ajuste con la realidad y agregar los cálculos teóricos que se deben de ejecutar.

Bibliografía

- Aceriform. (s.f.). *¿Qué es losacero?* Obtenido de https://www.aceriform.com.mx/blog/que-es-el-losacero/?gclid=Cj0KCQiAofieBhDXARIsAHTTIdo_C87UMD02hkjr6m3pYfaN0fmno88TQJXGLxT0OEqrYnlqcrk2MNAAg1CEALw_wcB
- ANSYS. (s.f.). *Ansys Certified Channel Partner*. Obtenido de <https://www.nysplm.com/ansys/>
- ANSYS. (s.f.). *Mechanical APDL Command Reference*. Obtenido de https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_cmd/Hlp_C_CmdTOC.html
- CADE. (s.f.). *FEM models standardization from APDL parameterized models*. Obtenido de <https://cadeengineering.com/fem-models-standardization-from-apdl-parameterized-models/>
- Capel, H. (2003). *Redes, Chabolas y Rascacielos. Las transformaciones físicas y la planificación en las áreas metropolitanas. Ciudades, Arquitectura y Espacio Urbano*, 40.
- CFE. (2020). *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por viento*. México.
- Eseverri, A. E. (16 de 07 de 2020). *ESPACIOBIM*. Obtenido de ETABS, de CSI Spain
¿Qué es ETABS?: <https://www.espaciobim.com/etabs>
- Holmes, J. D. (2003). *Wind Loading of Structures*. New York: Spon Press.
- LGA. (19 de Marzo de 2019). *Toma de muestras y análisis in situ*. Obtenido de <https://laboratorio-lga.com/areas-de-actividad/toma-de-muestras-y-analisis-in-situ/>
- Mechanical APDL. (s.f.). *Mechanical APDL Command Reference*. Obtenido de SHELL181: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html
- Mechanical APDL. (s.f.). *Mechanical APDL Command Reference*. Obtenido de BEAM188: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_BEAM188.html

- Millais, M. (2017). *Building Structures: understanding the basics*. New York: Routledge.
- Mozo, A. M. (2021). *Método de Lanczos*. España.
- Oleart, C. B. (2020). *La historia del viento en las ciudades*. Madrid.
- Otero, E. M., Zermeño de León, M. E., Arroyo Contreras, G. M., & López López, A. (2015). *Efectos de Viento en Estructuras*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Piralla, R. M. (2015). *Diseño Estructural*. México: Limusa.
- Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas*. México: Pearson.
- SEP. (2015). *Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones*. México.
- Spencer, B., Christenson, R., & Dyke, S. (1999). Next Generation Benchmark Control Problem for Seismically Excited Buildings. *Journal of Engineering Mechanics*, 1-41.
- TELECINCO. (11 de Octubre de 2020). *Efecto Venturi o cómo los edificios de la ciudad pueden dominar el viento*. Obtenido de https://www.telecinco.es/eltiempohoy/meteorologia/efecto-venturi-edificios-ciudad_18_3023220070.html
- Thompson, M. K., & Thomspon, J. M. (2017). *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. Estados Unidos: ELSEVIER.
- Zhang, Z., & Moore, J. (2015). *Autoregressive Moving Average*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/autoregressive-moving-average>

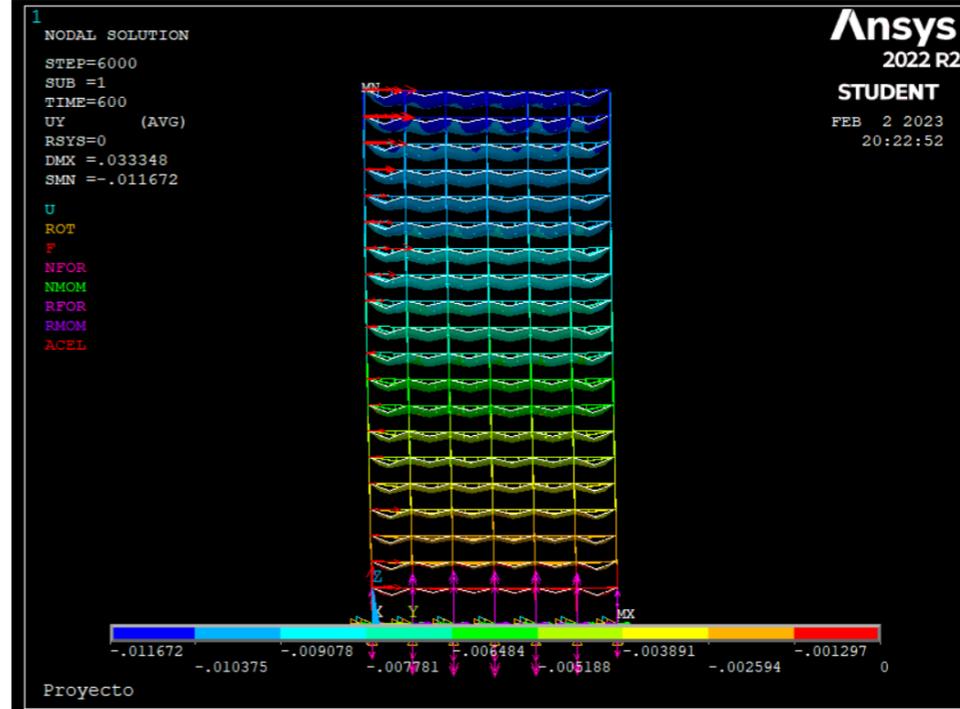
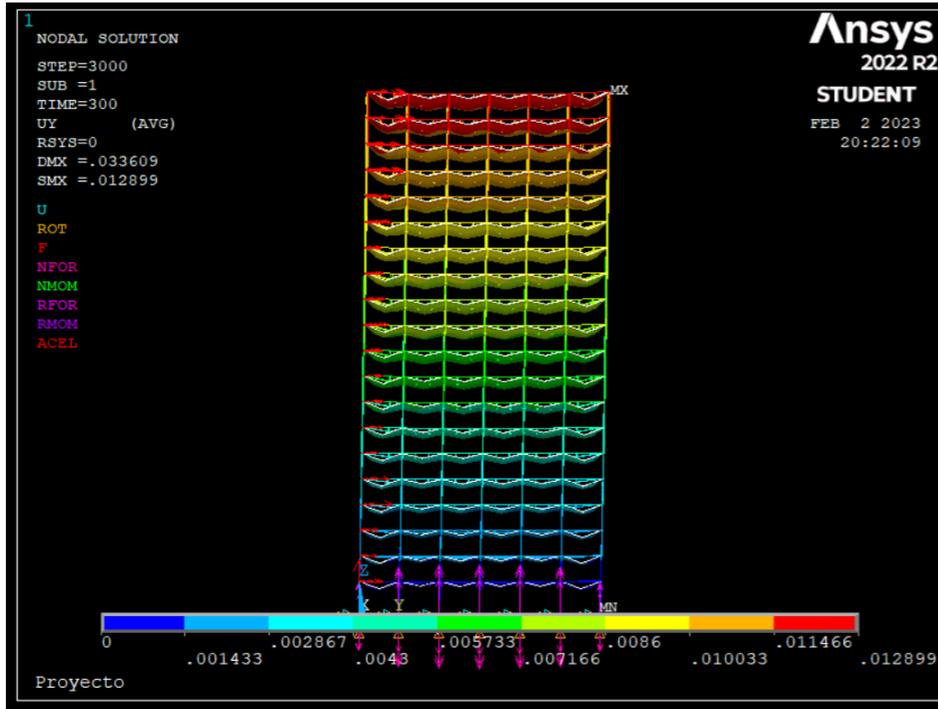
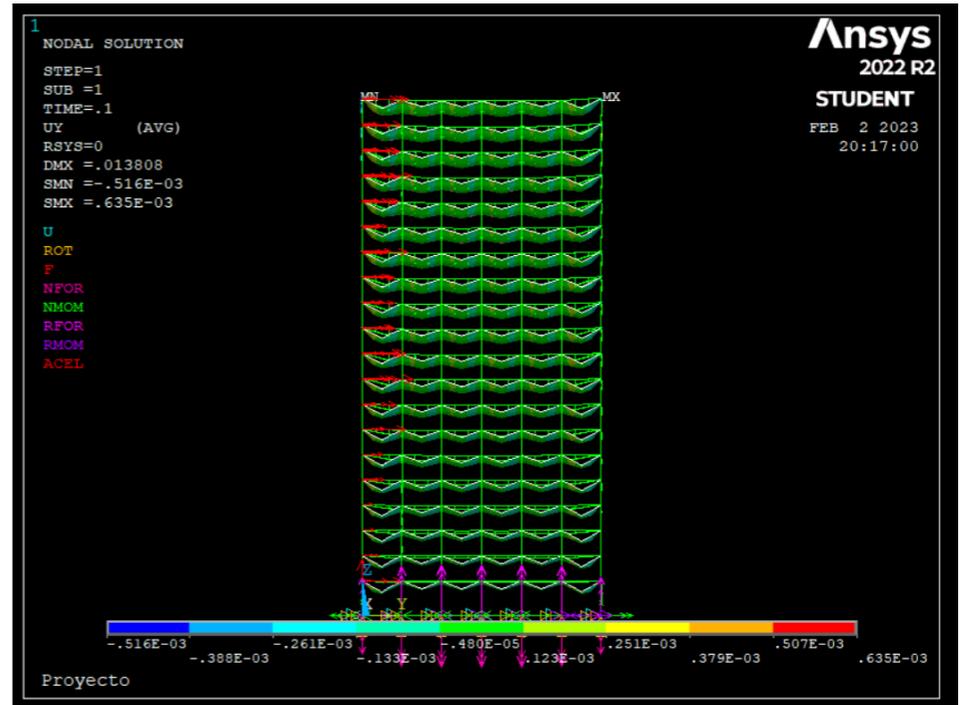
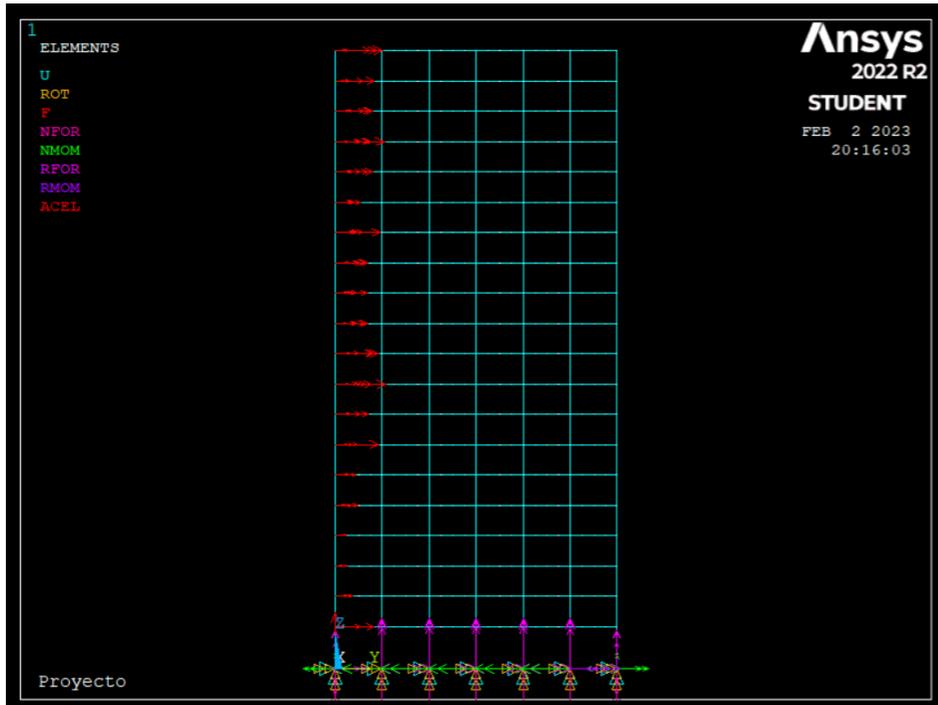
Apéndice

En este apéndice se presentan resultados adicionales, que complementan el estudio realizado a lo largo de la ejecución de este.

Modo	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]
1	3.43986	0.29071
2	3.18244	0.31422
3	2.09878	0.47647
4	1.20686	0.82859
5	1.12158	0.89159
6	0.75286	1.32827
7	0.70916	1.41012
8	0.66136	1.51203
9	0.50358	1.98578
10	0.47039	2.12589

Tabla A1. Resultados modales de ETABS.

Los resultados visuales en cierto tiempo de las 10 señales se presentan a continuación.



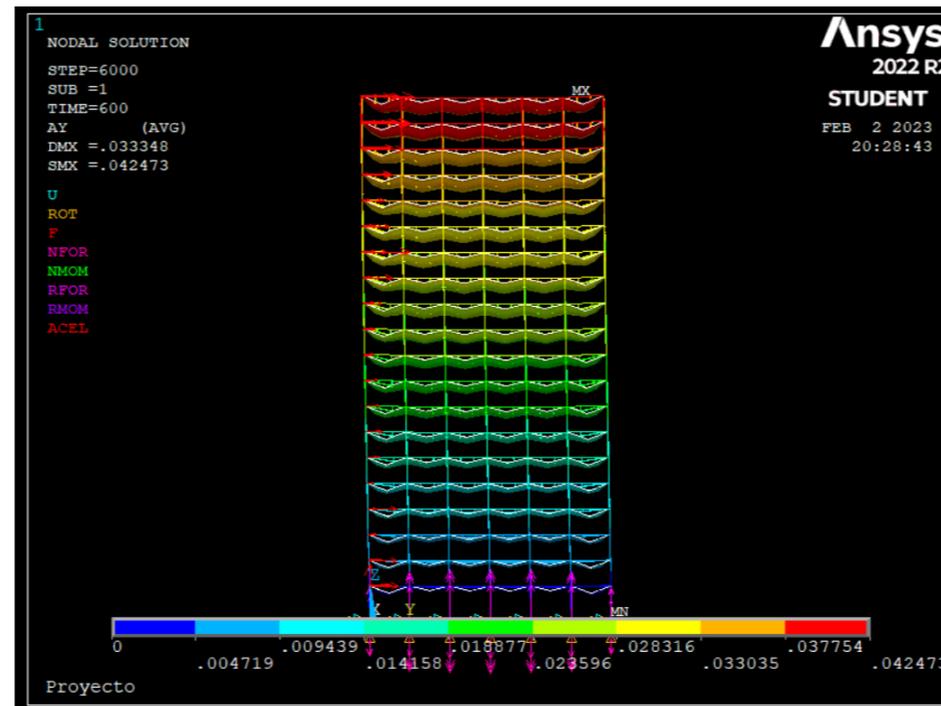
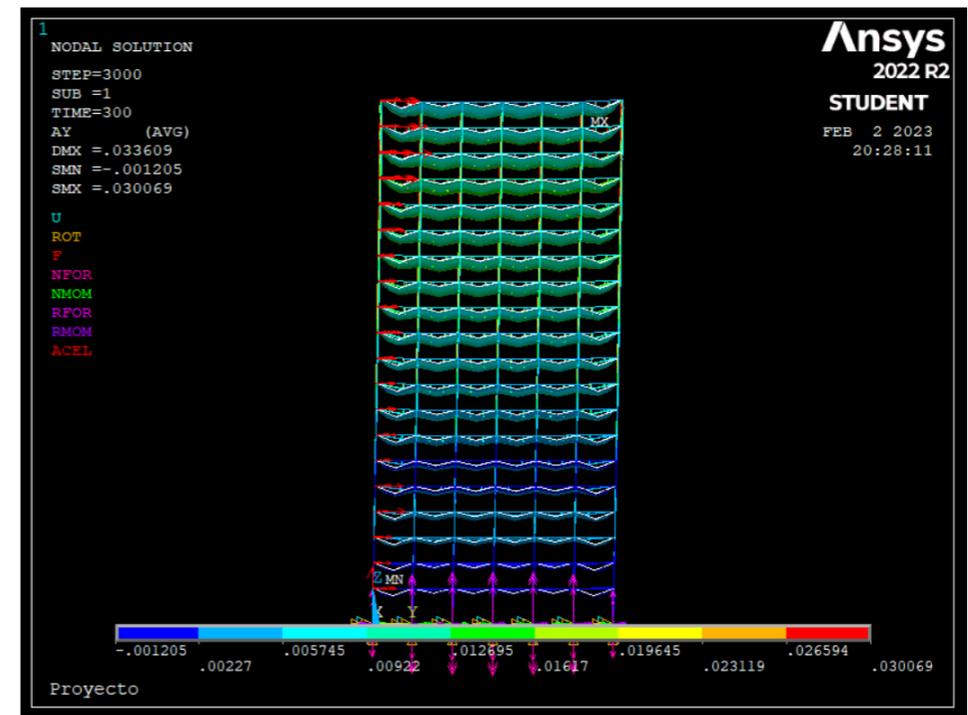
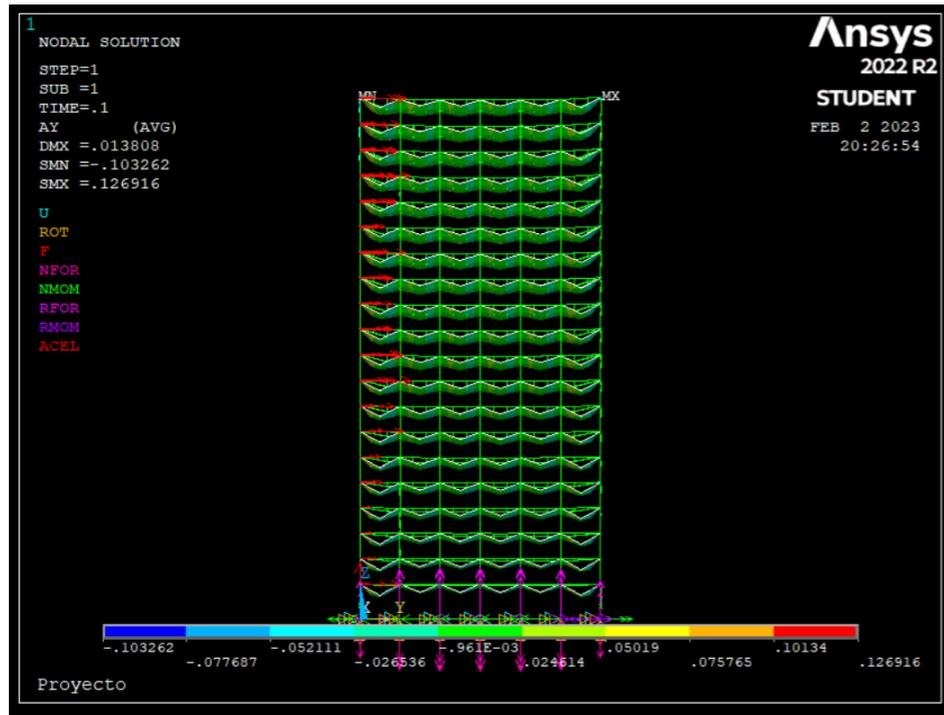
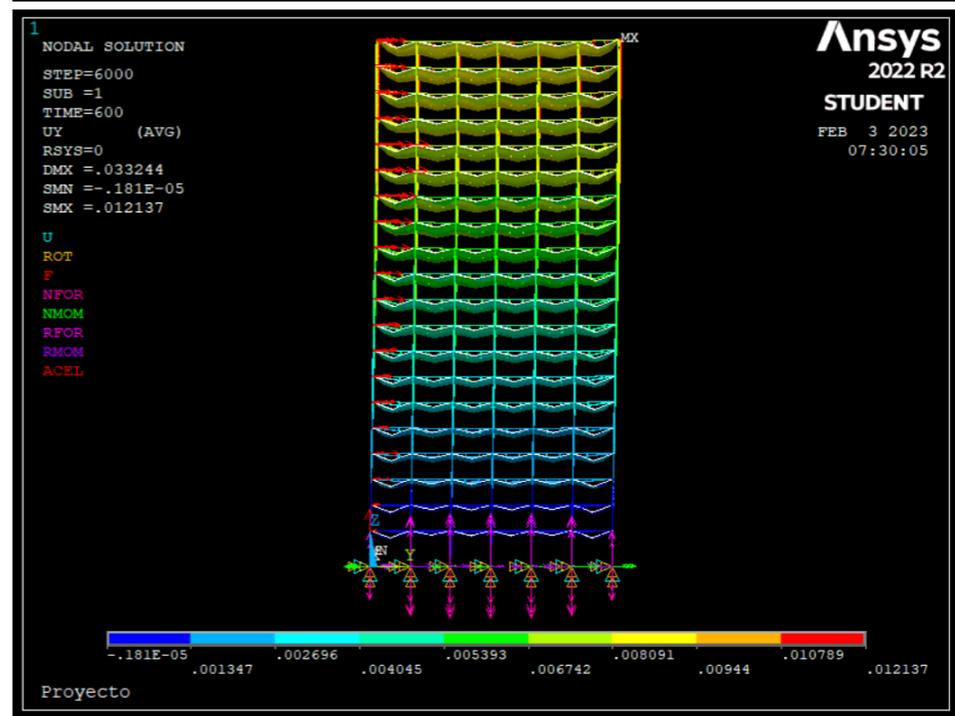
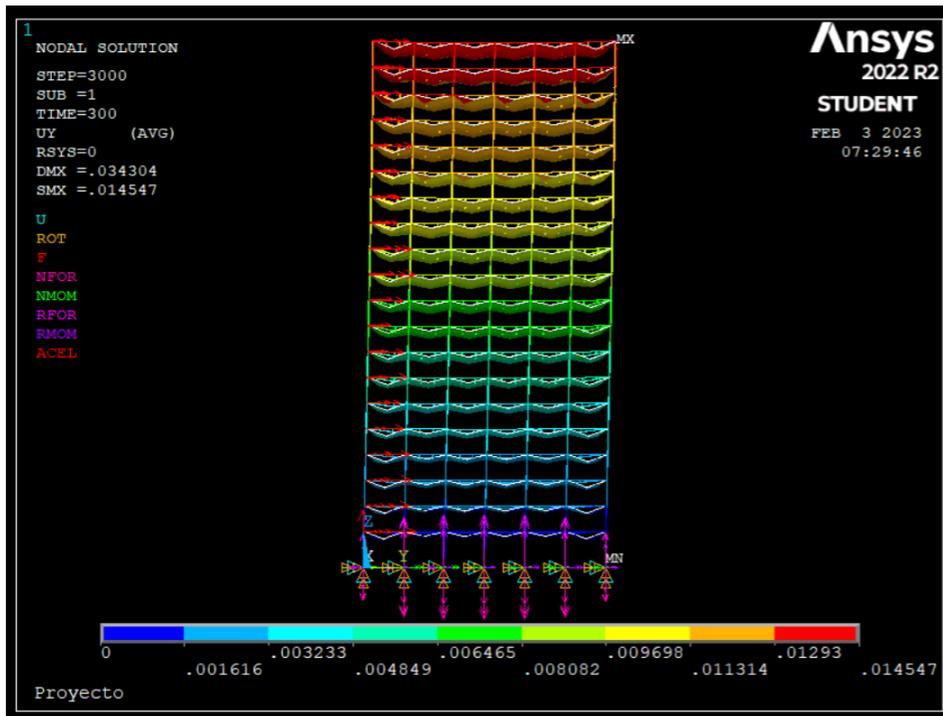
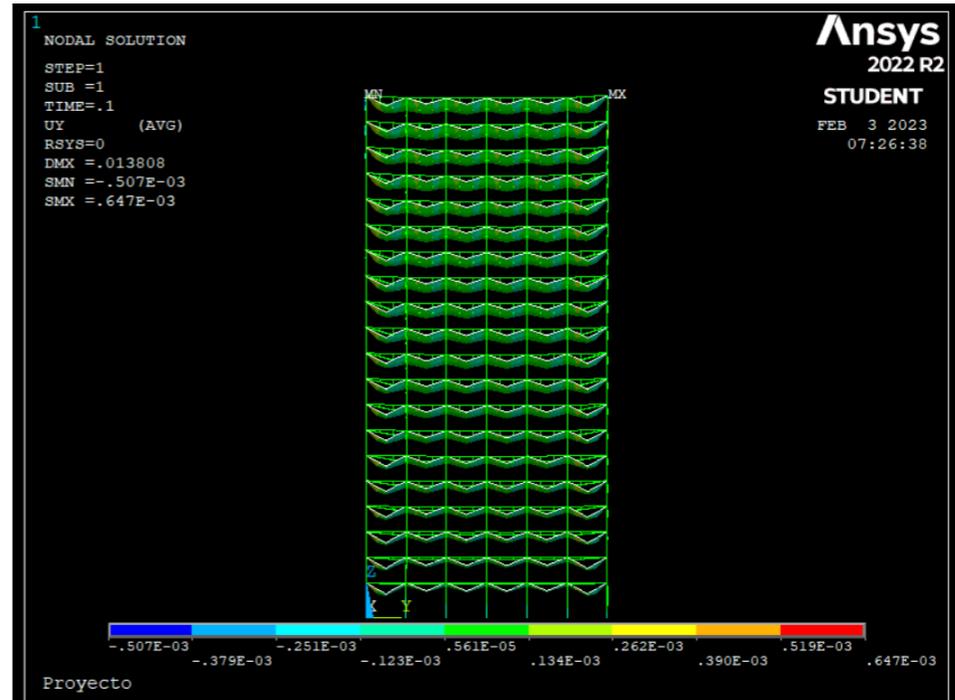
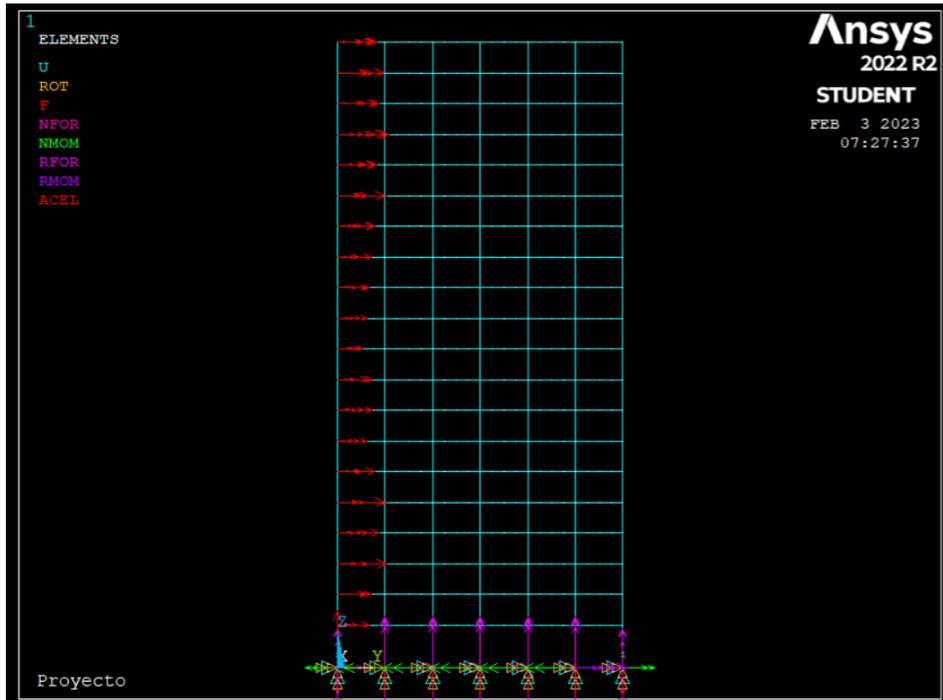


Figura A1. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 1 (Elaboración propia).



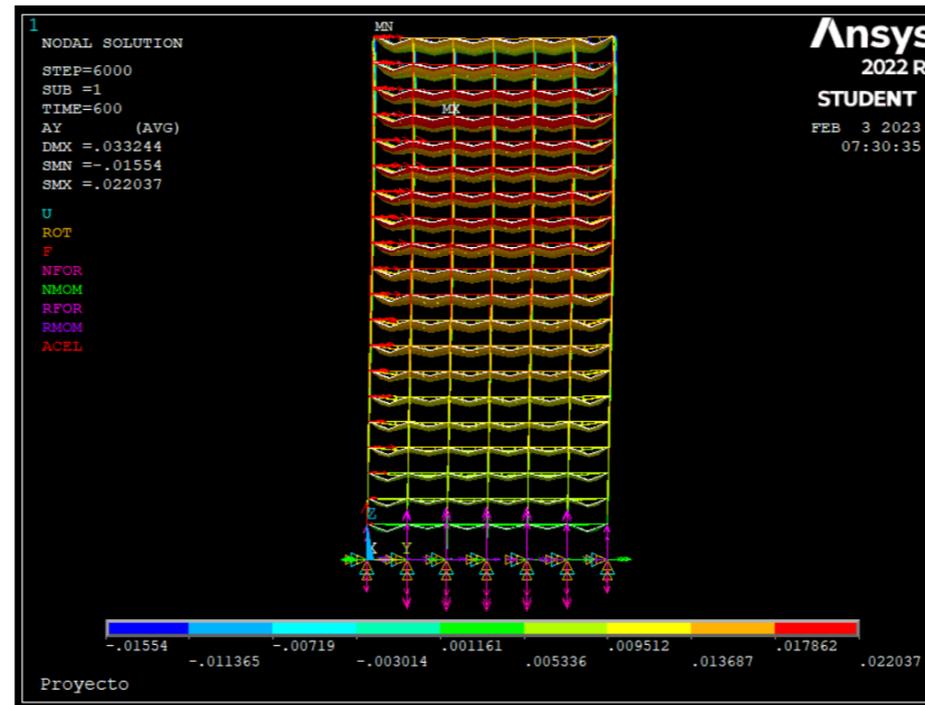
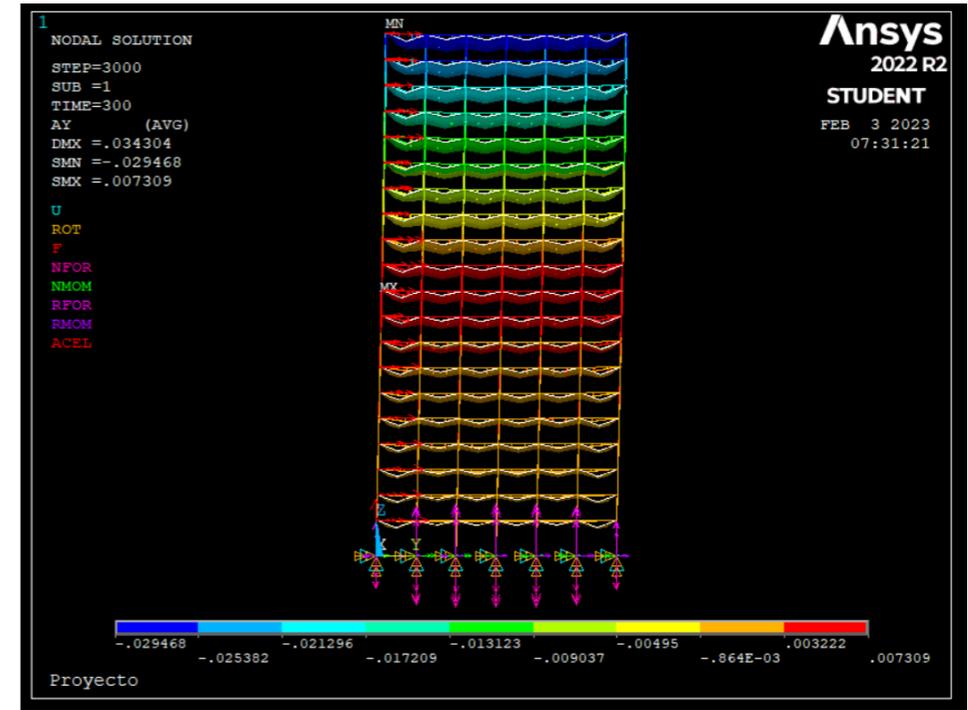
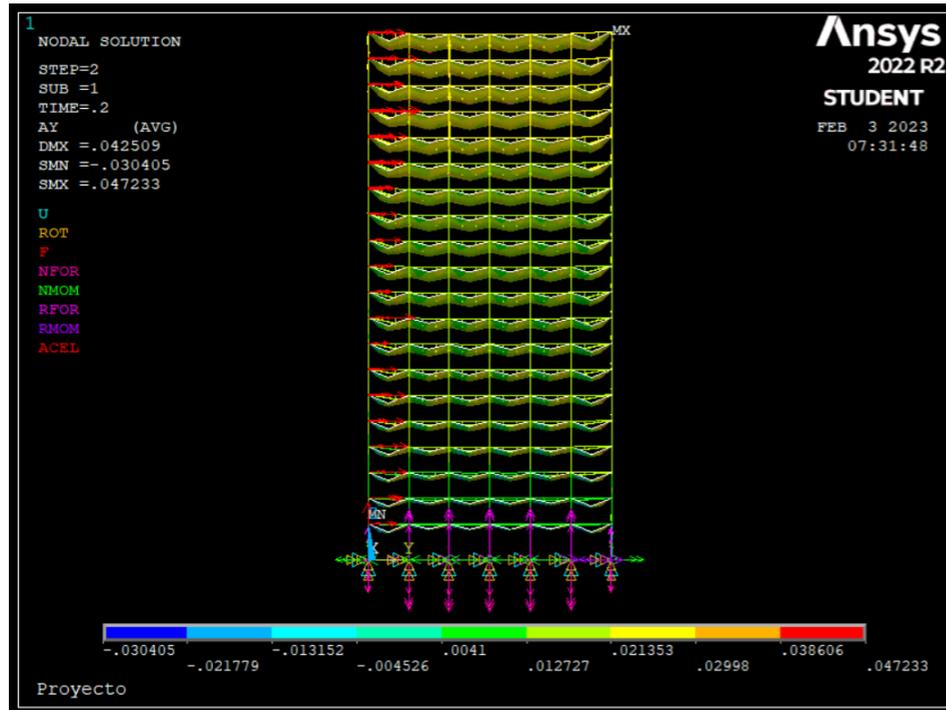
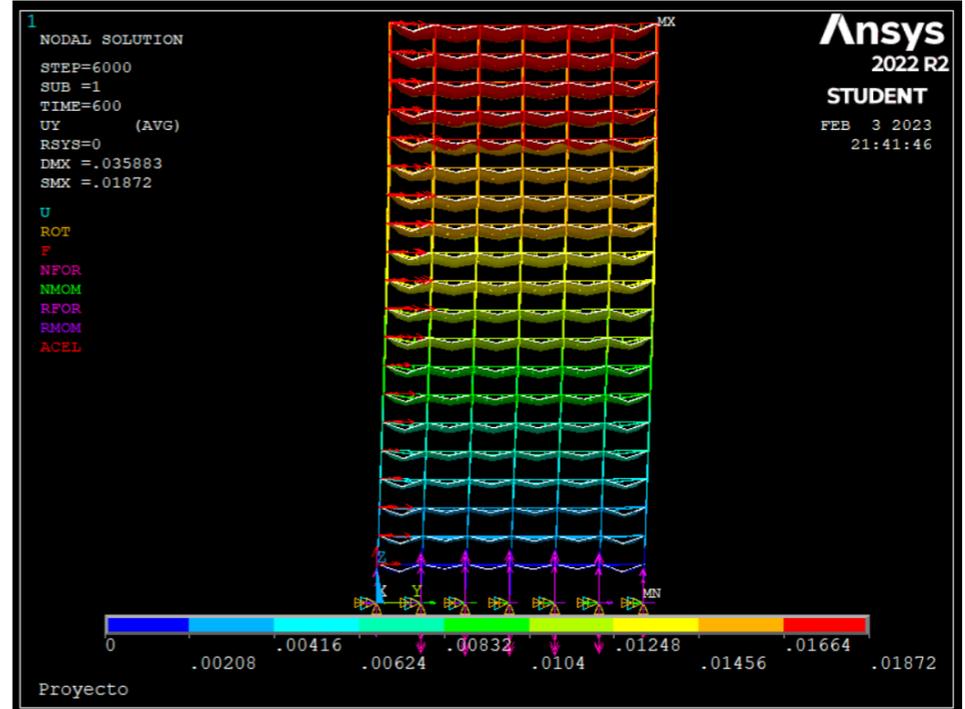
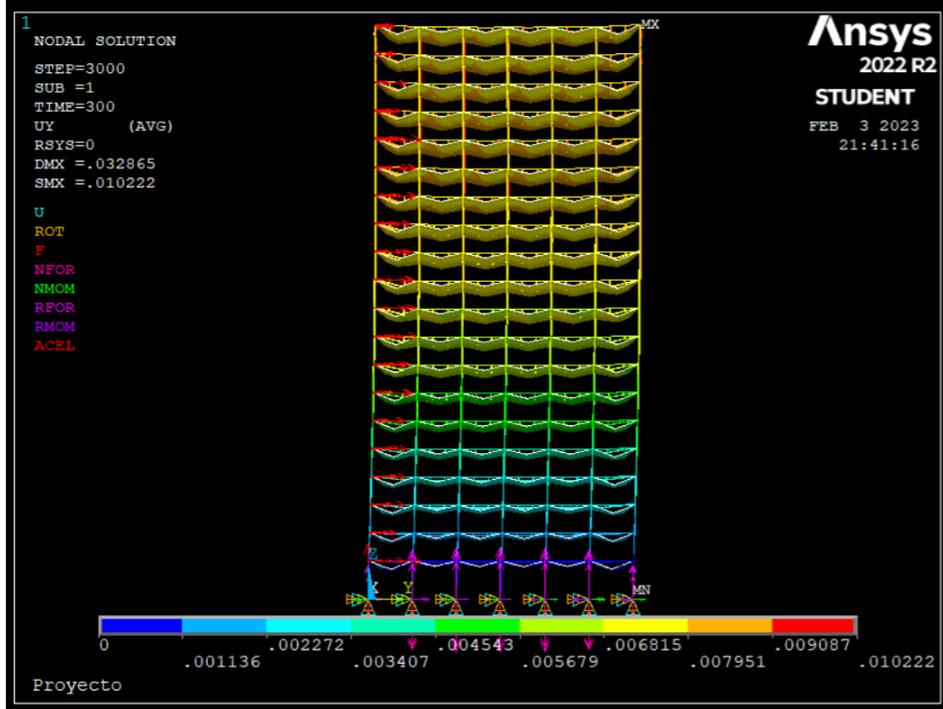
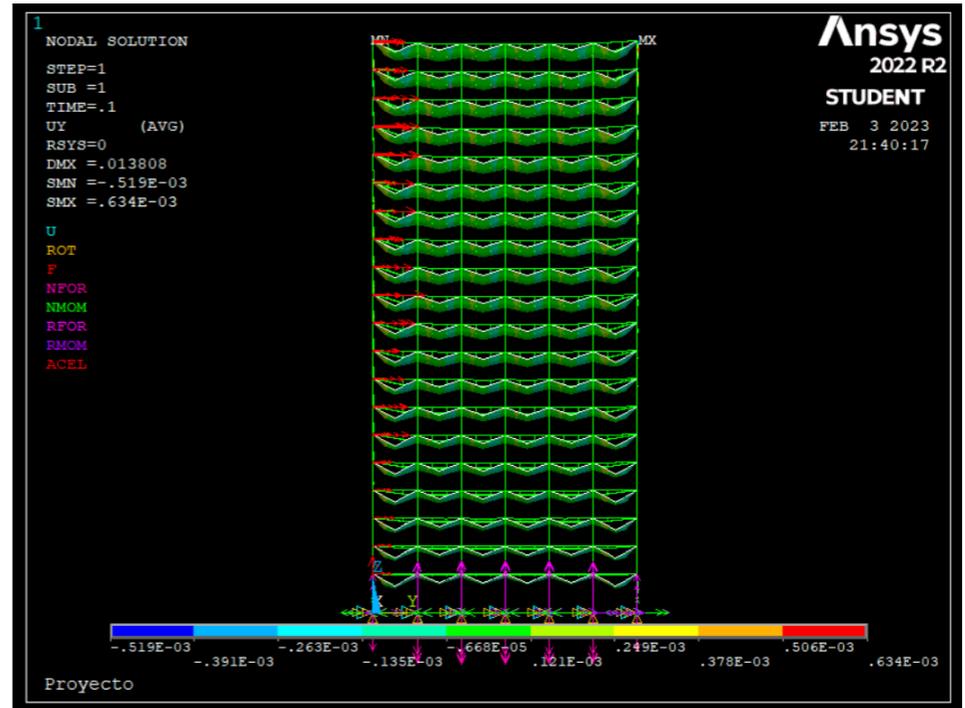
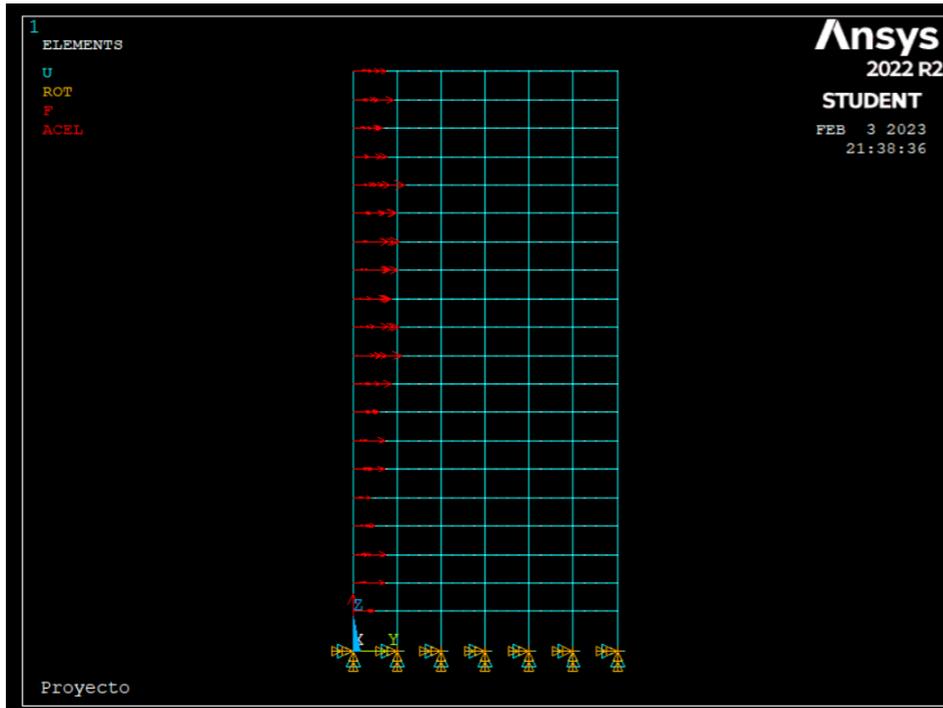


Figura A2. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 2 (Elaboración propia).



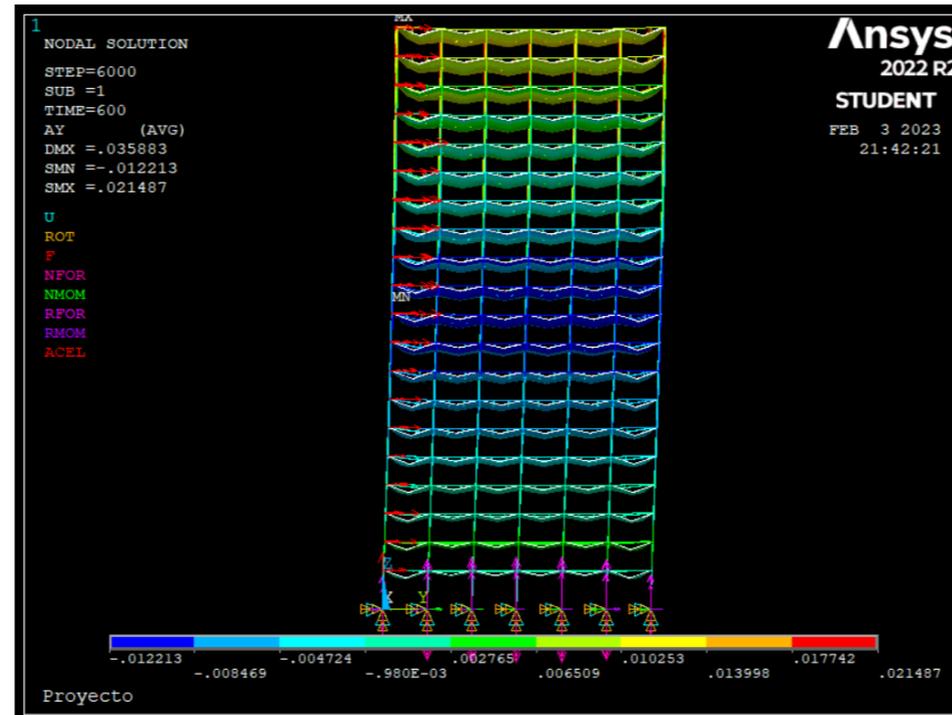
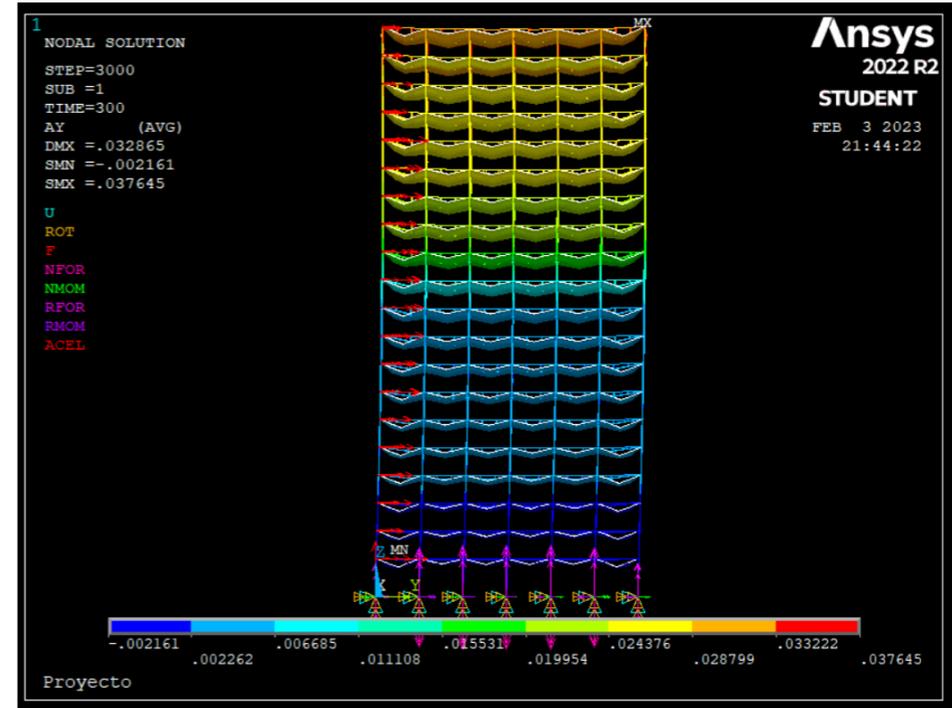
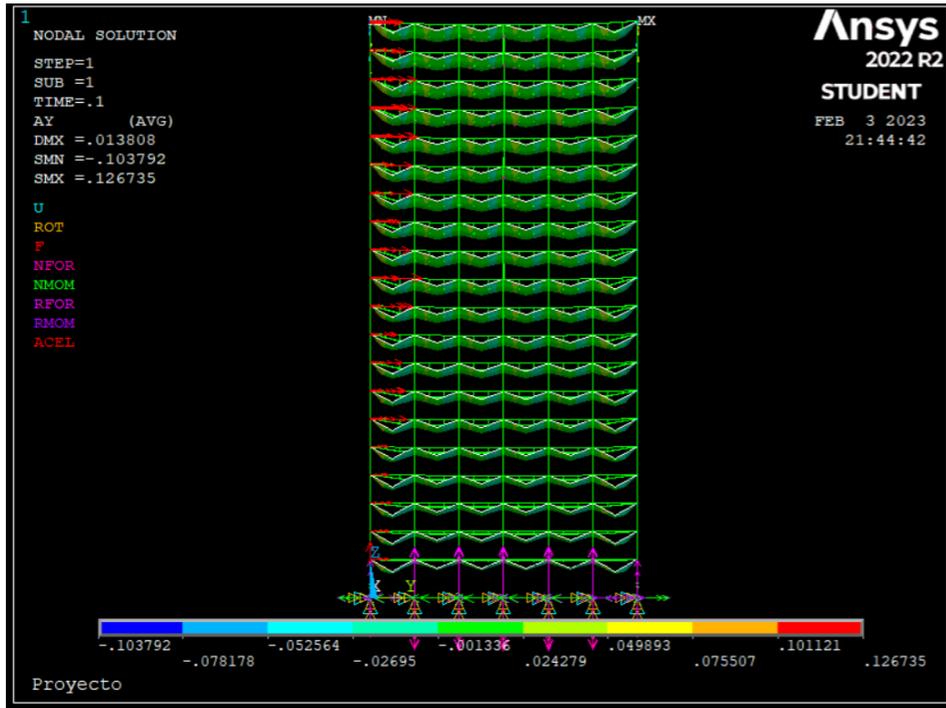
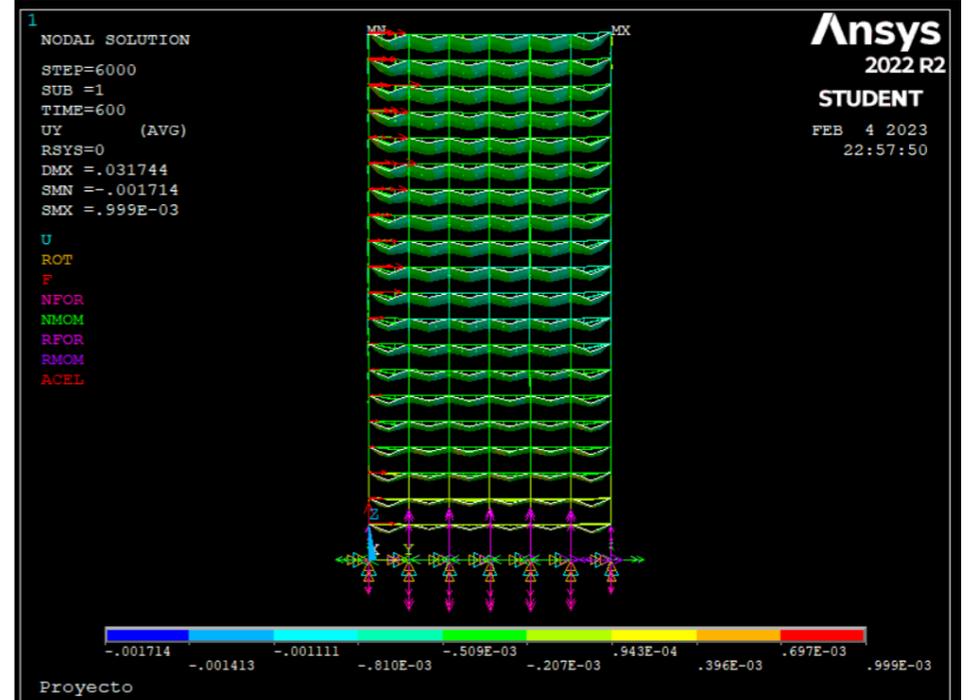
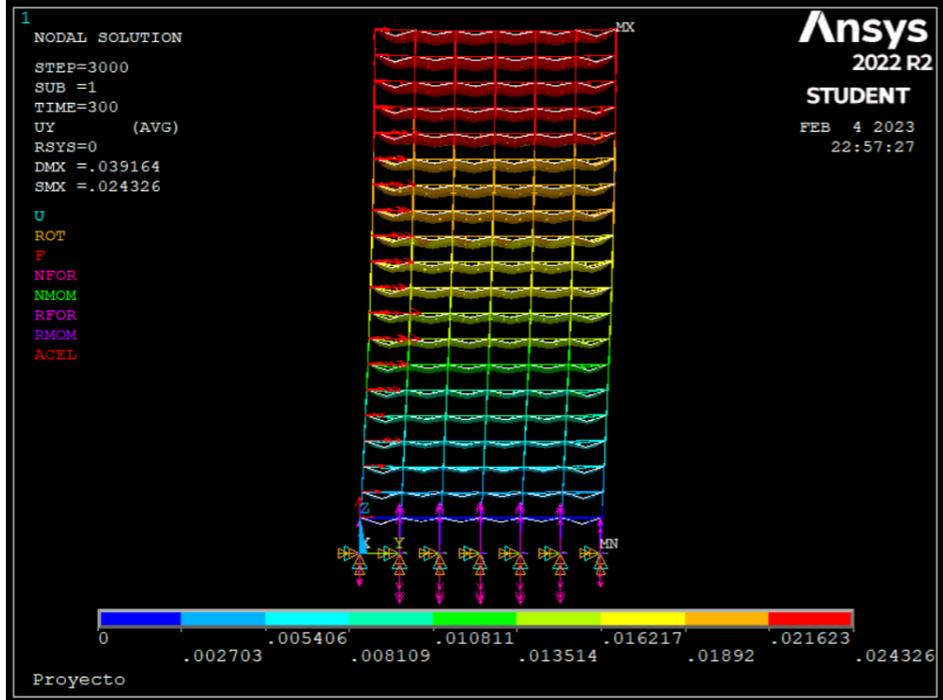
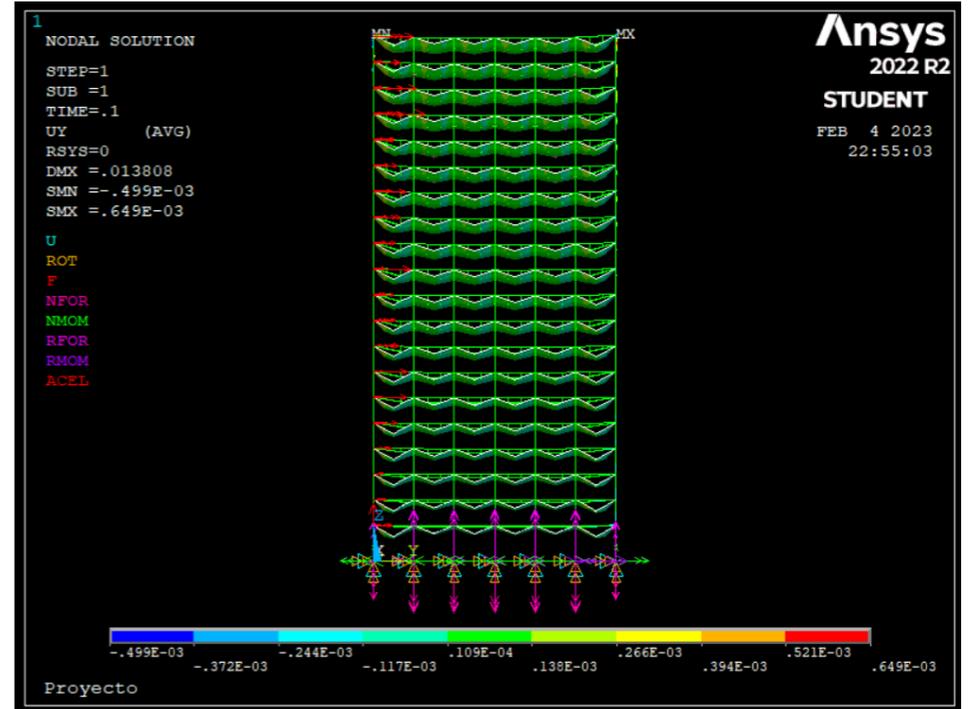
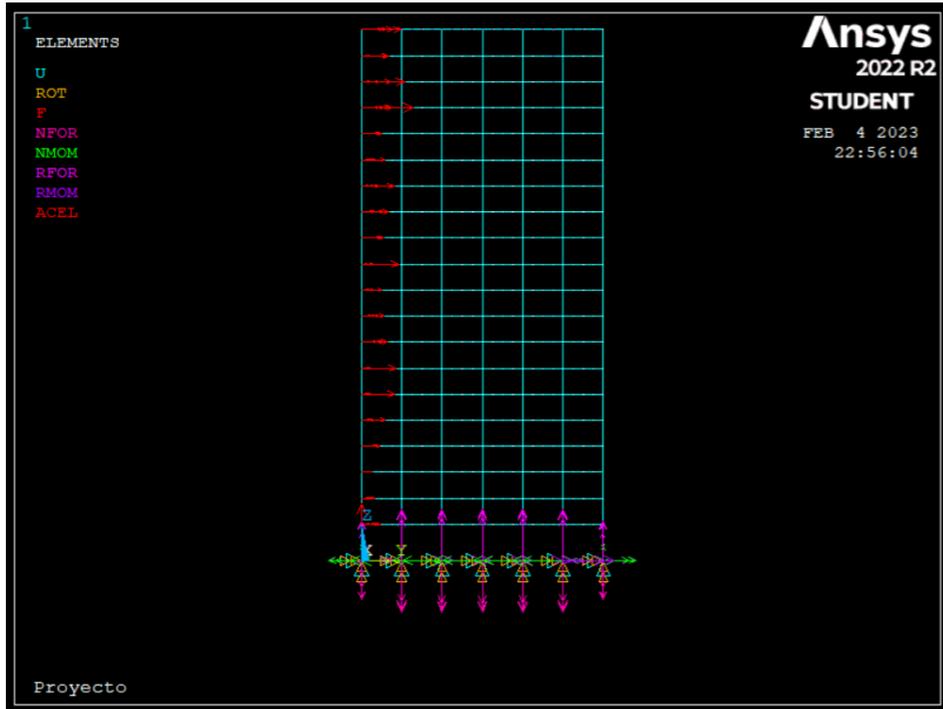


Figura A3. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 3 (Elaboración propia).



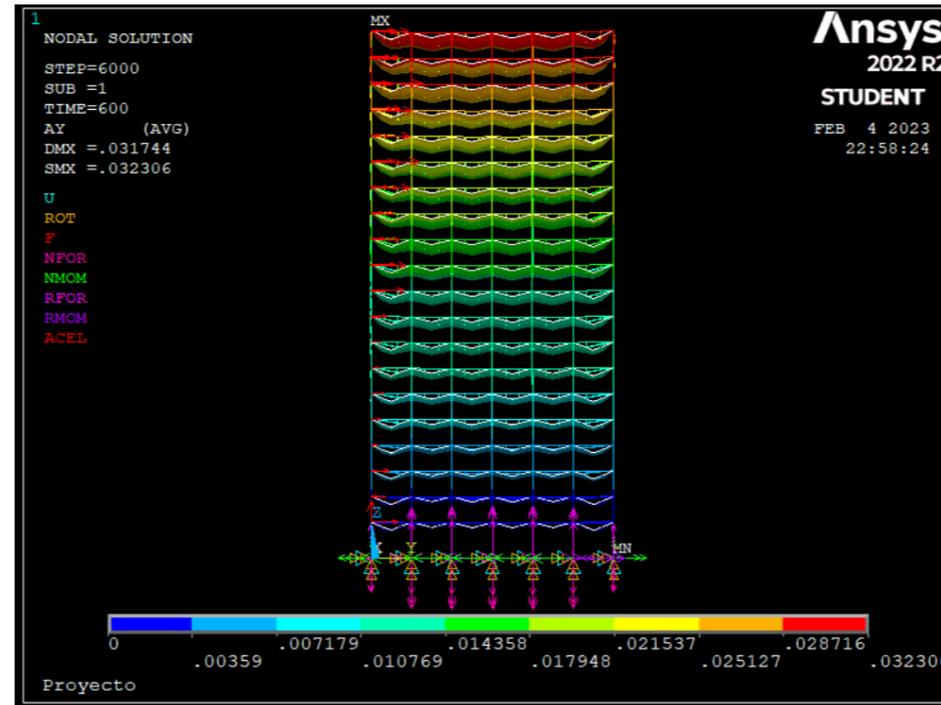
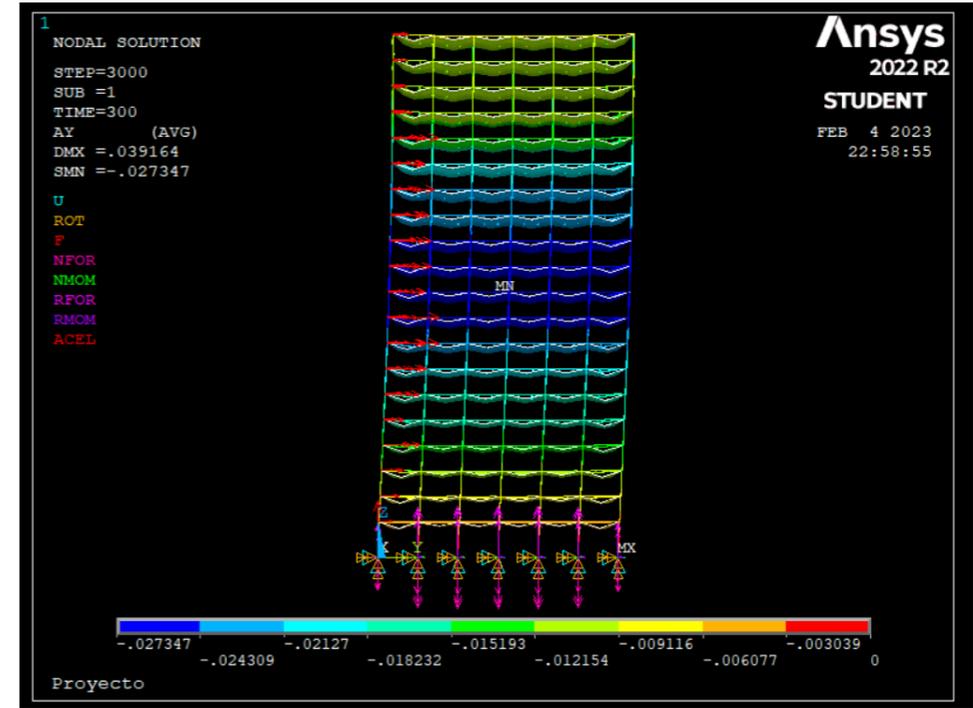
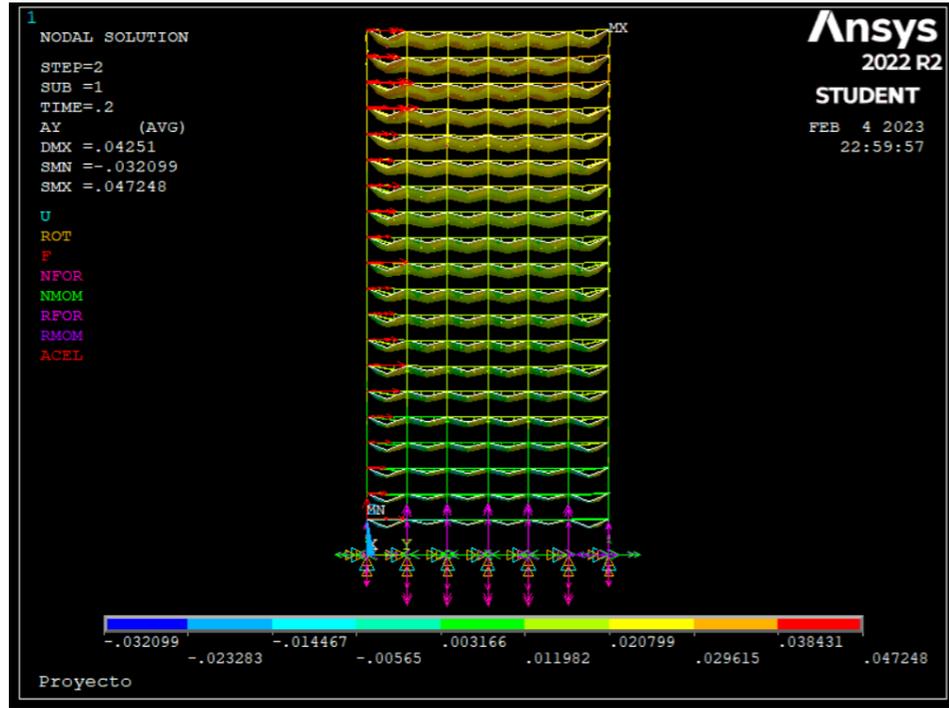
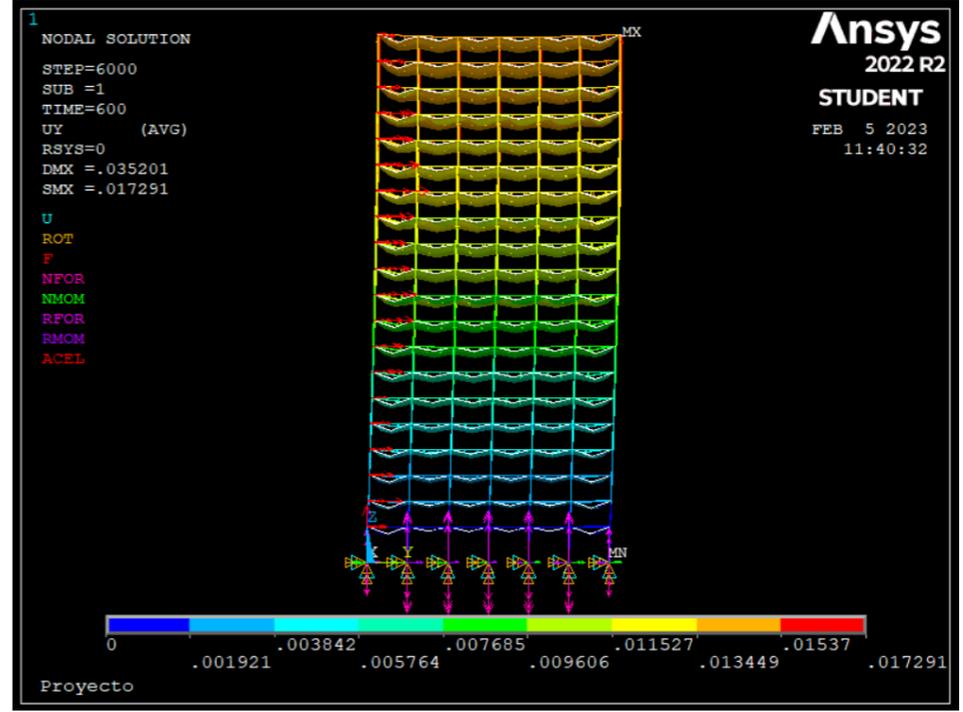
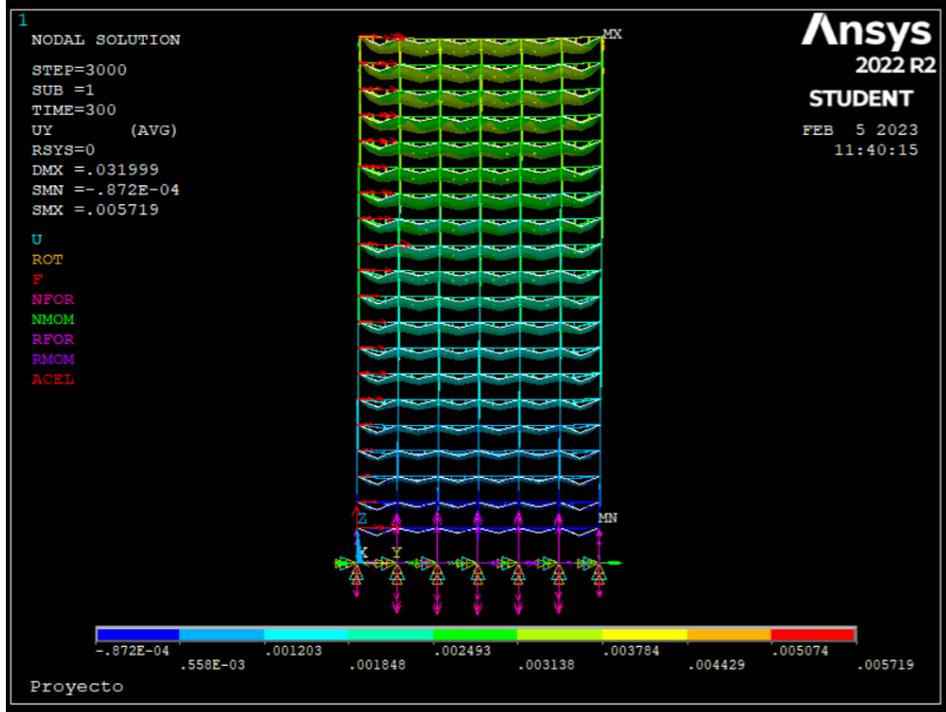
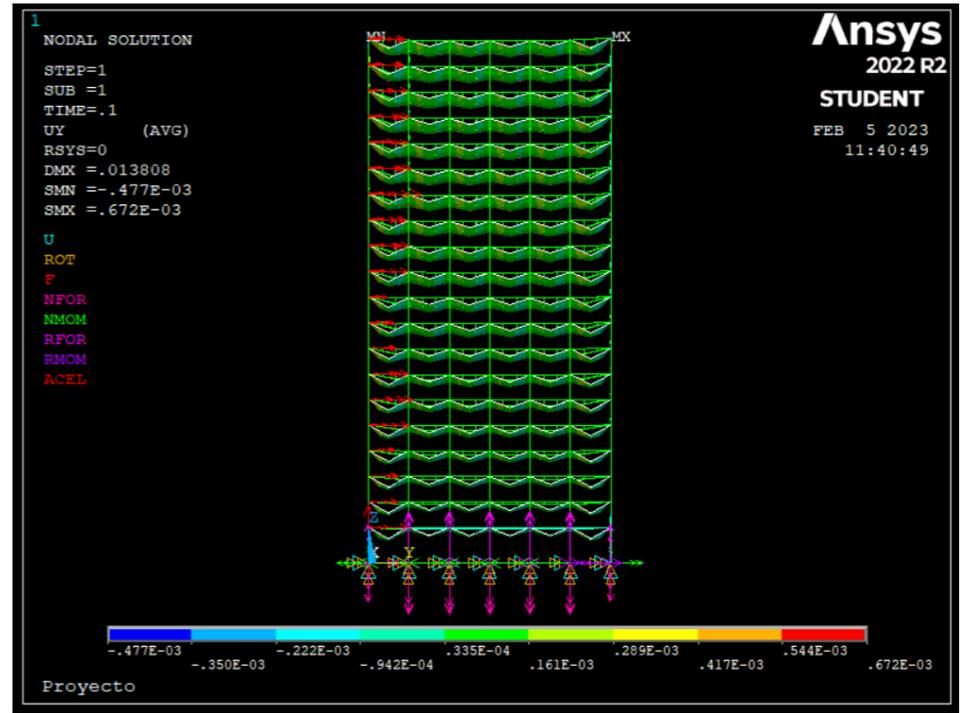
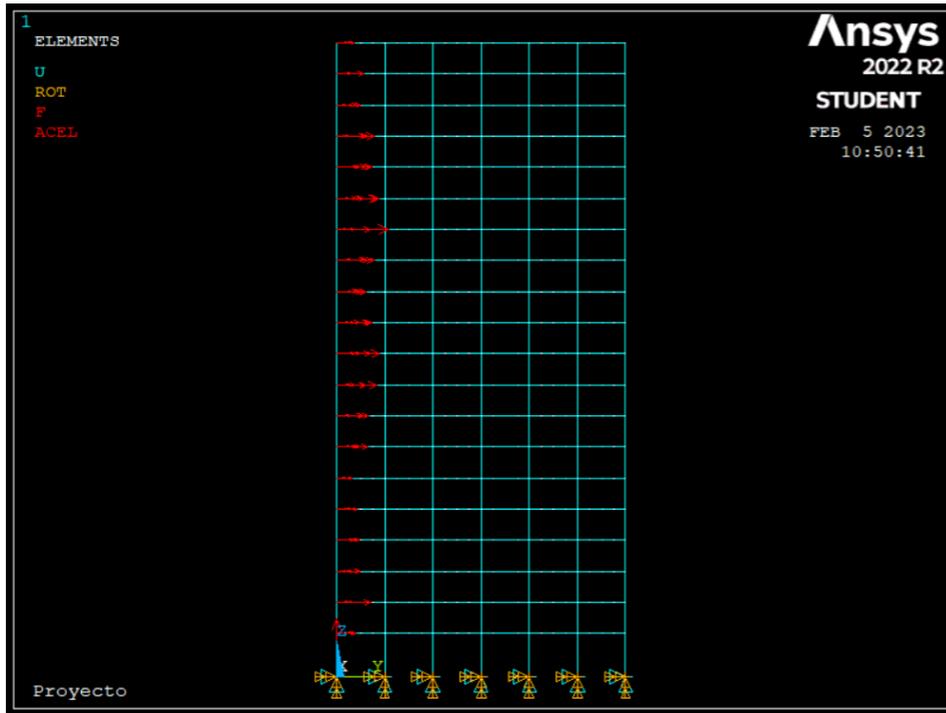


Figura A4. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 4 (Elaboración propia).



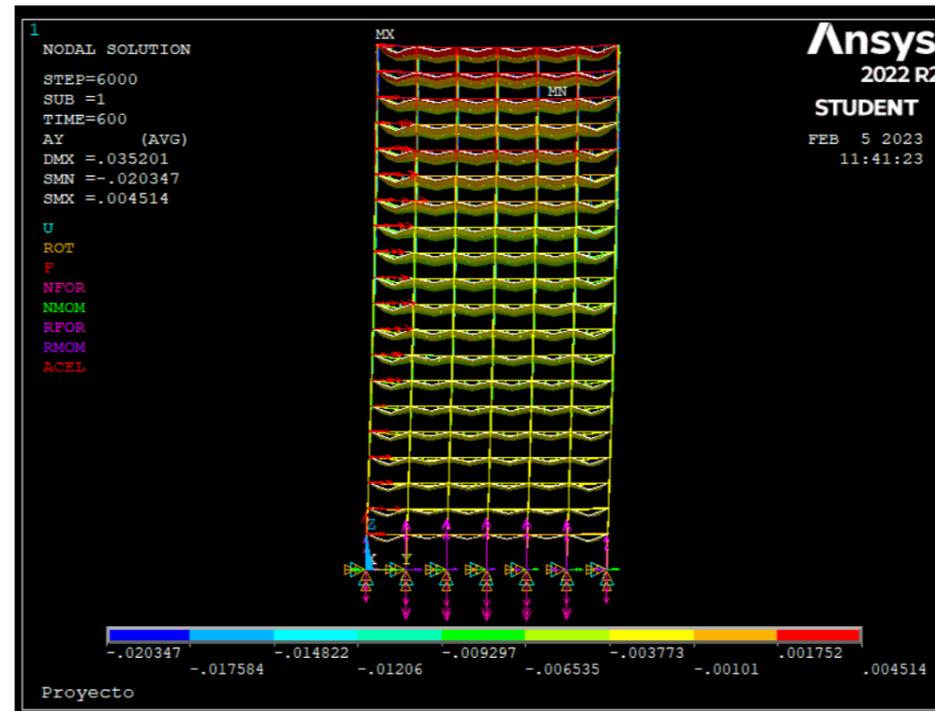
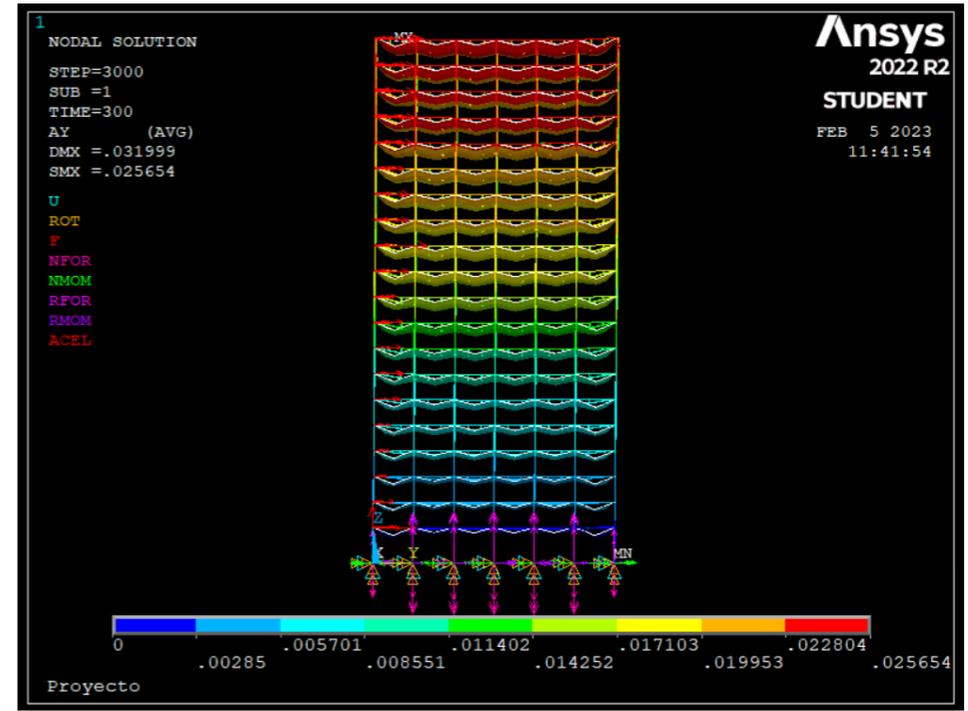
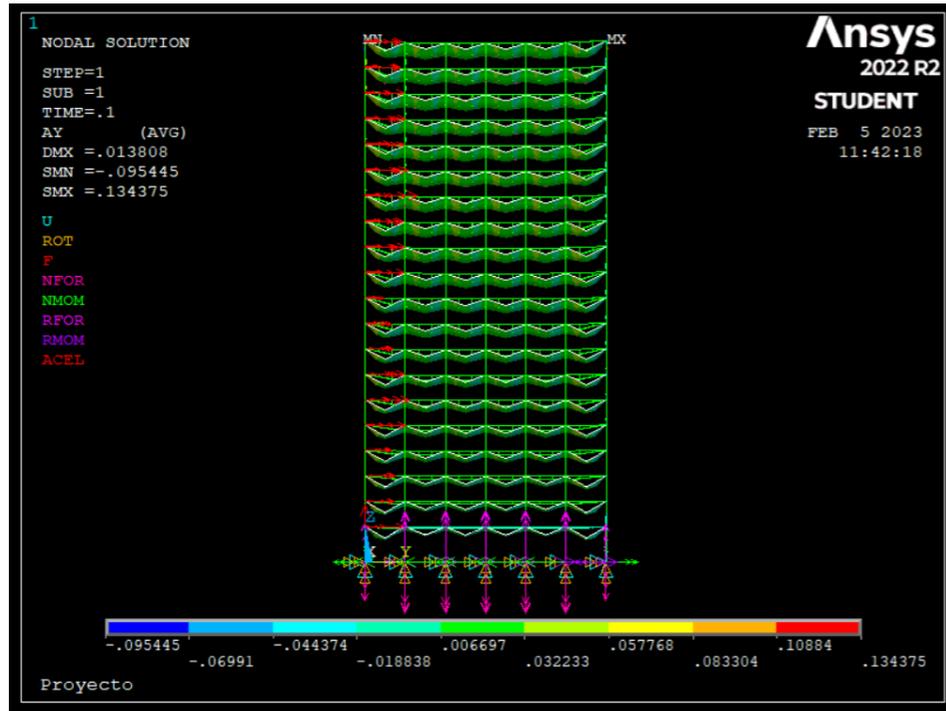
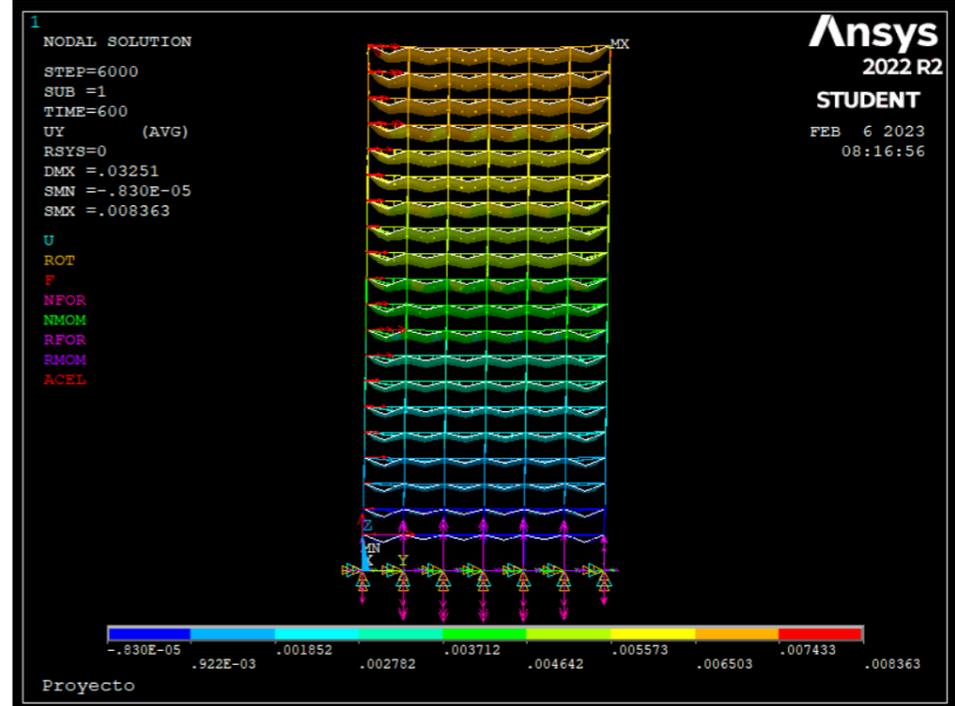
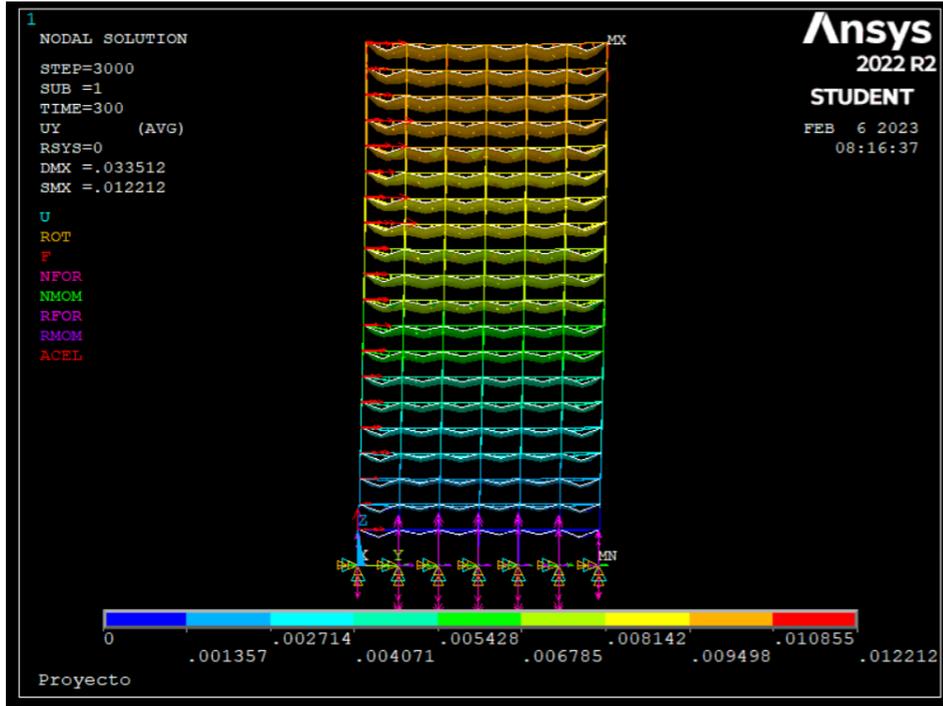
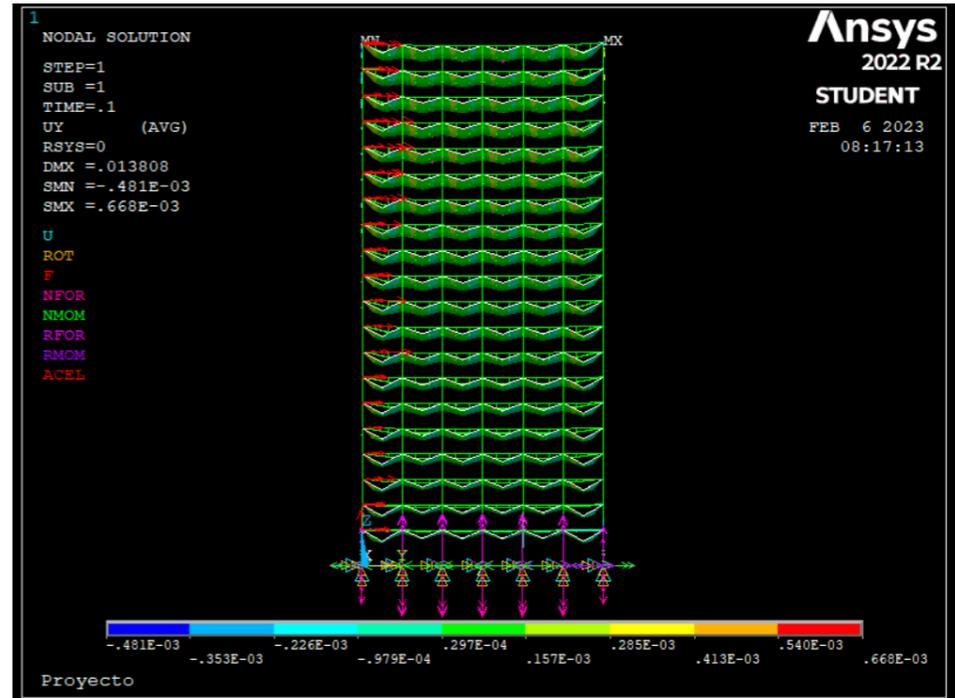
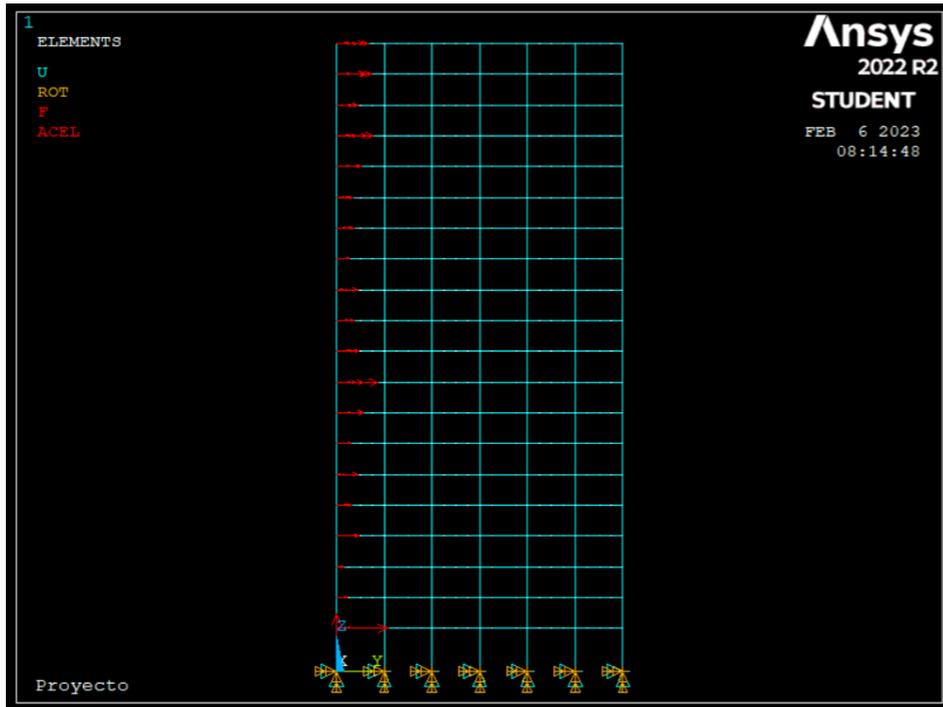


Figura A5. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 5 (Elaboración propia).



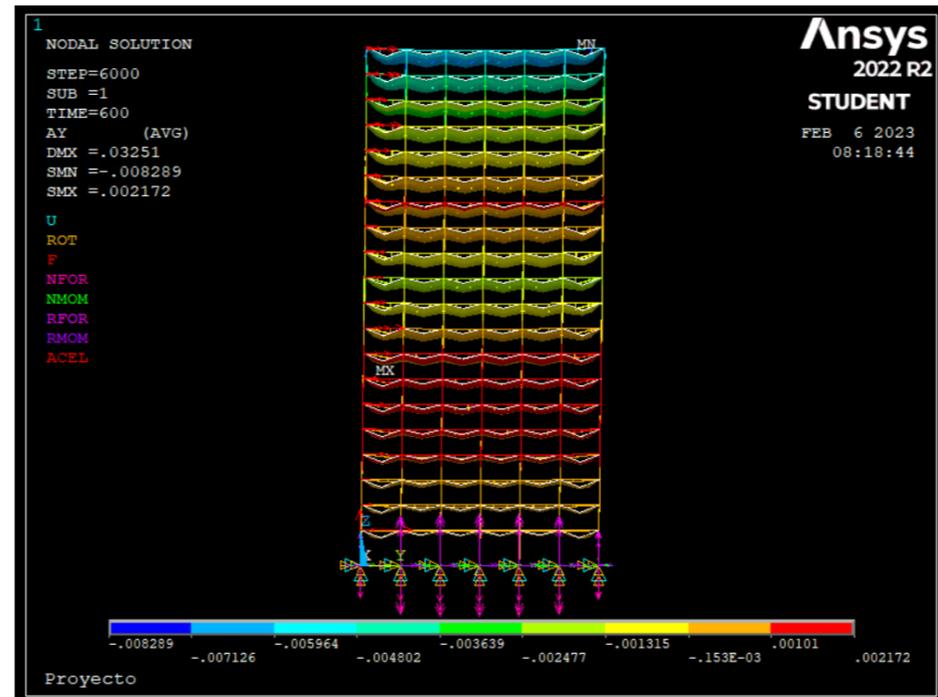
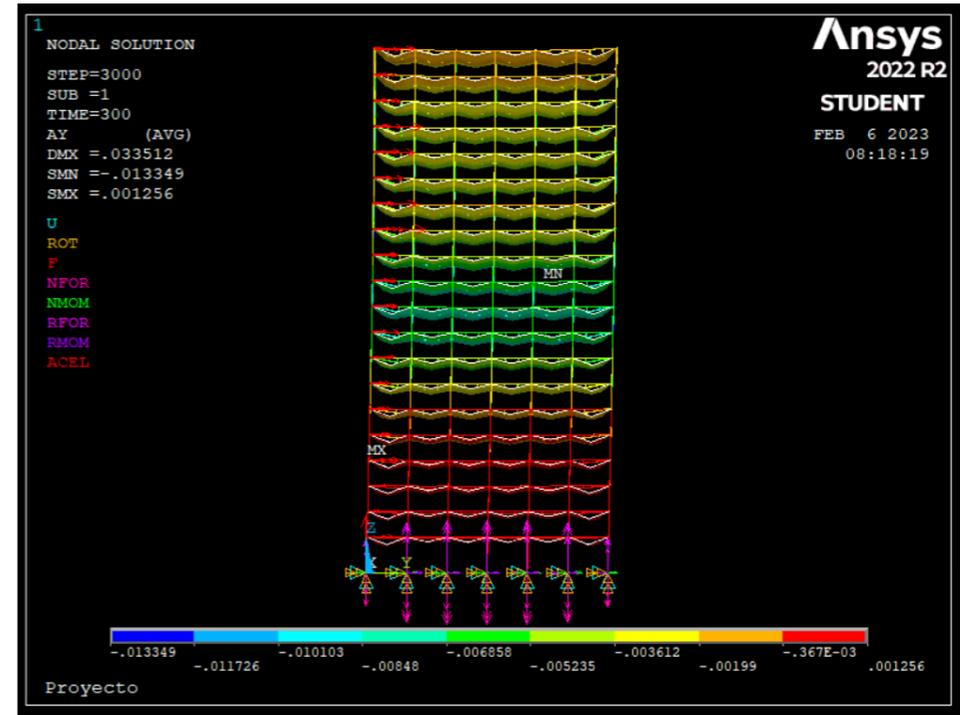
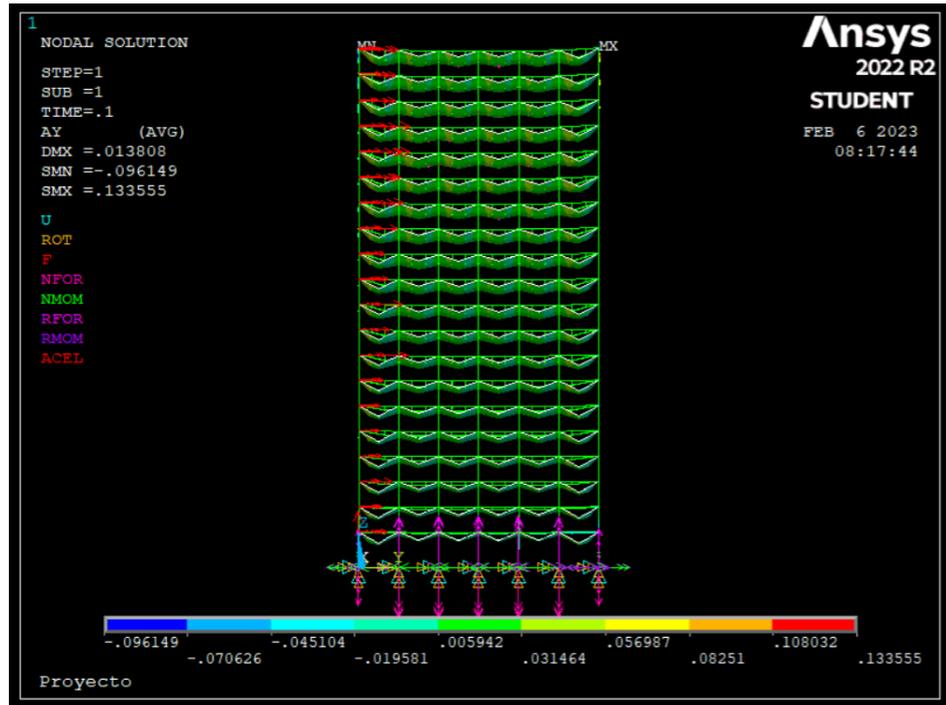
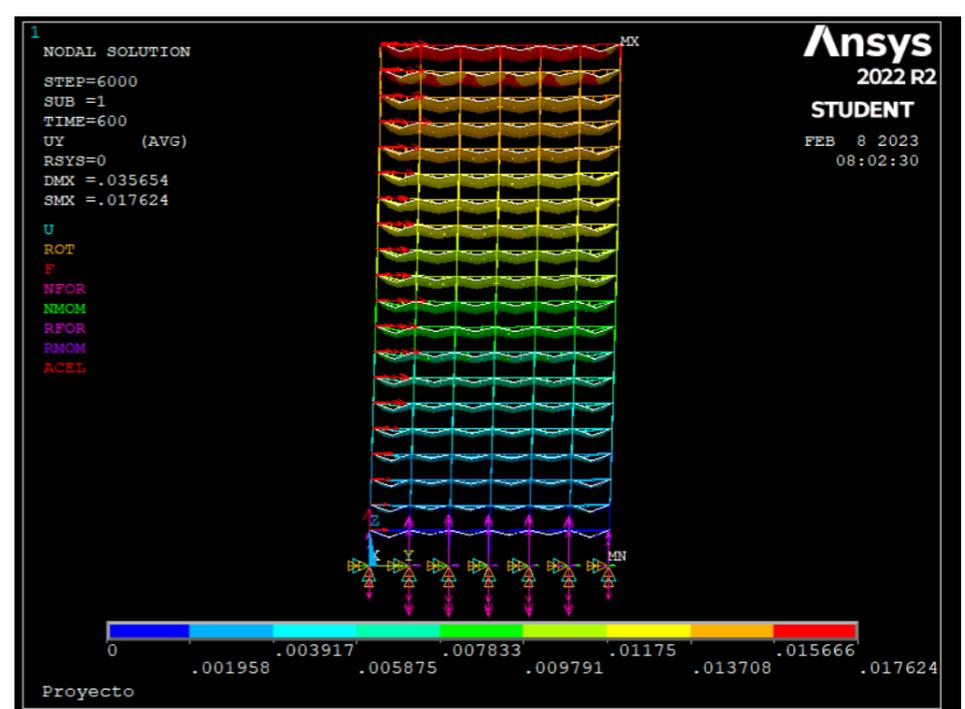
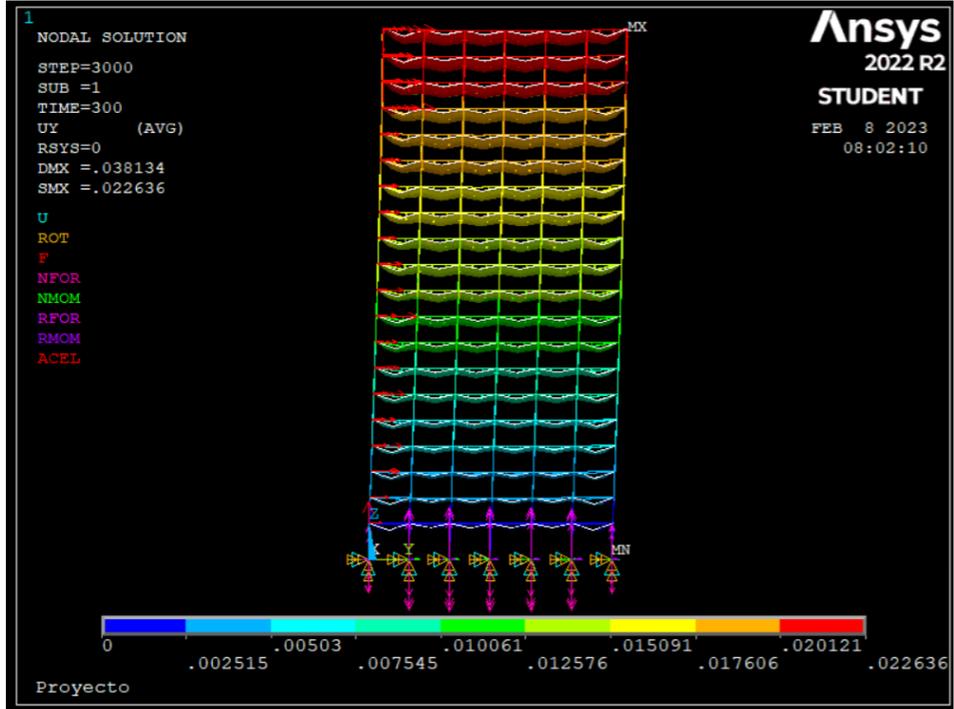
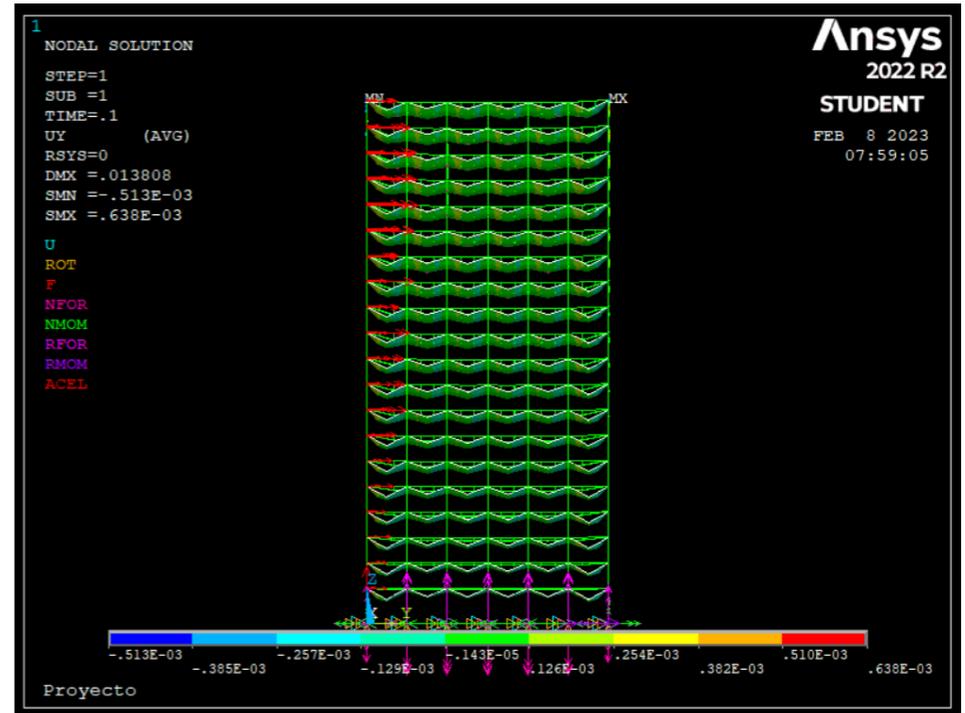
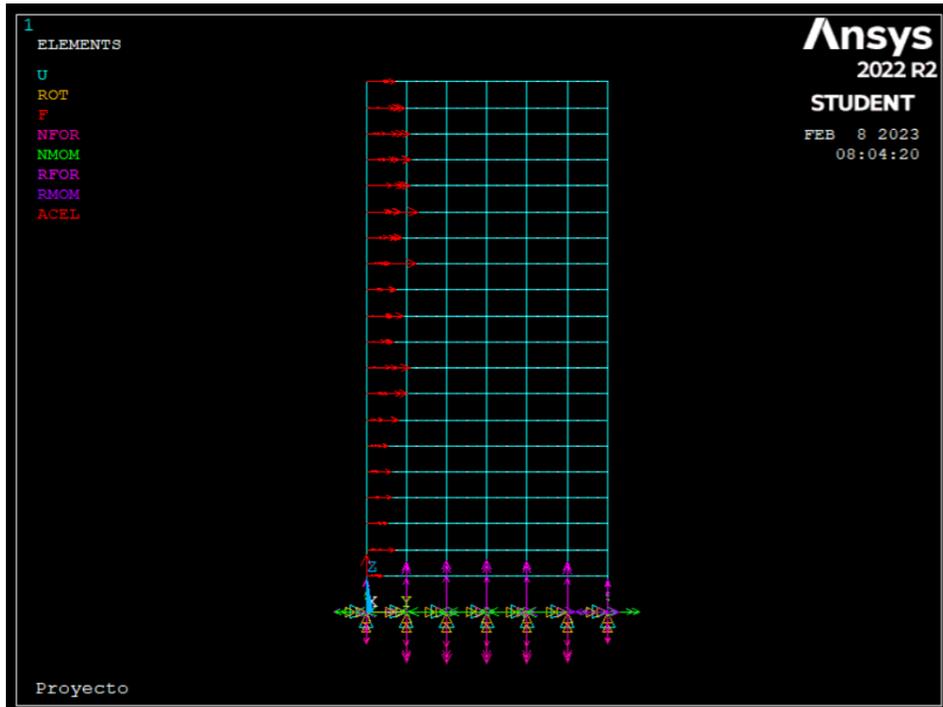


Figura A6. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 6 (Elaboración propia).



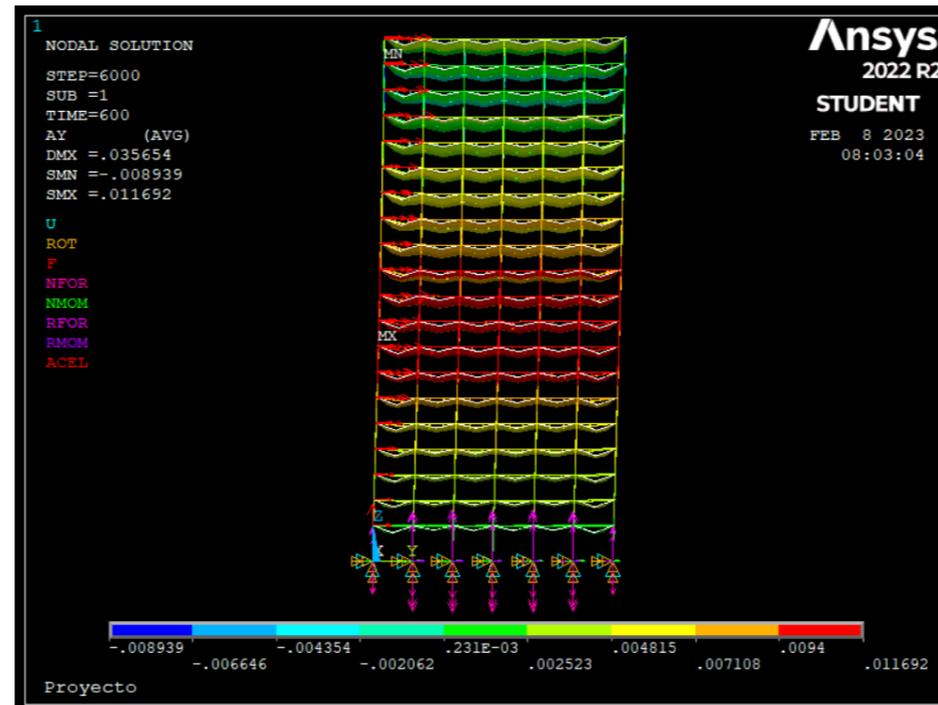
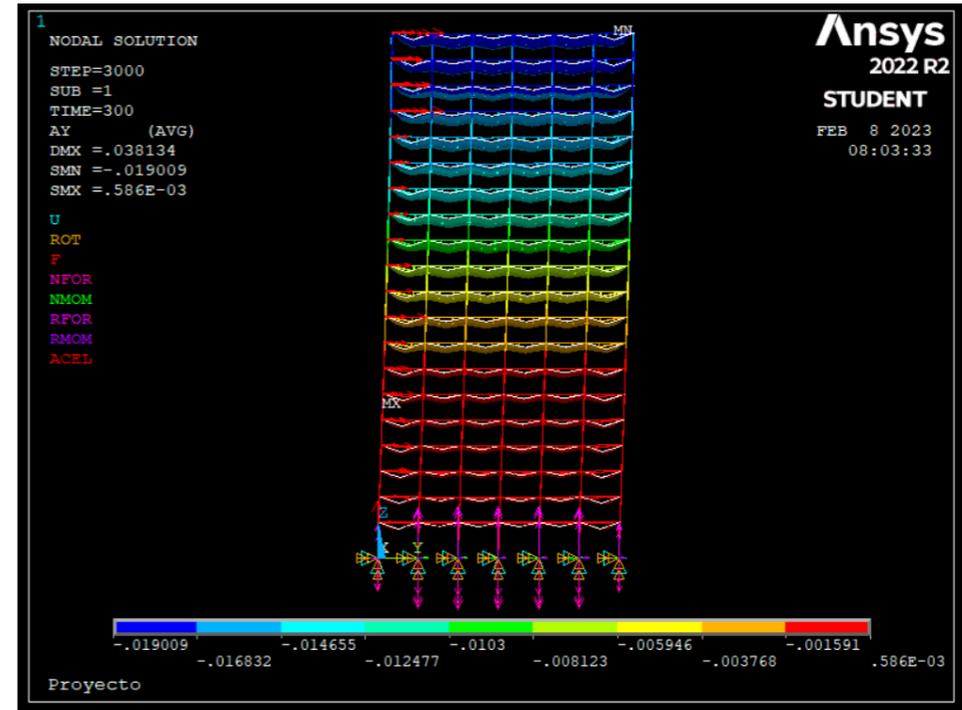
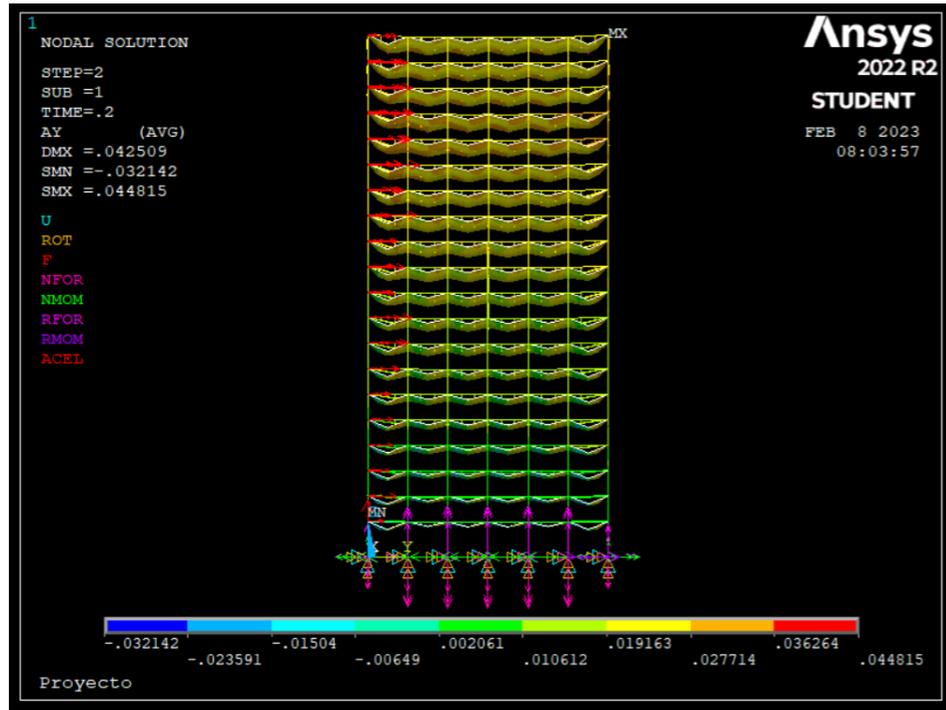
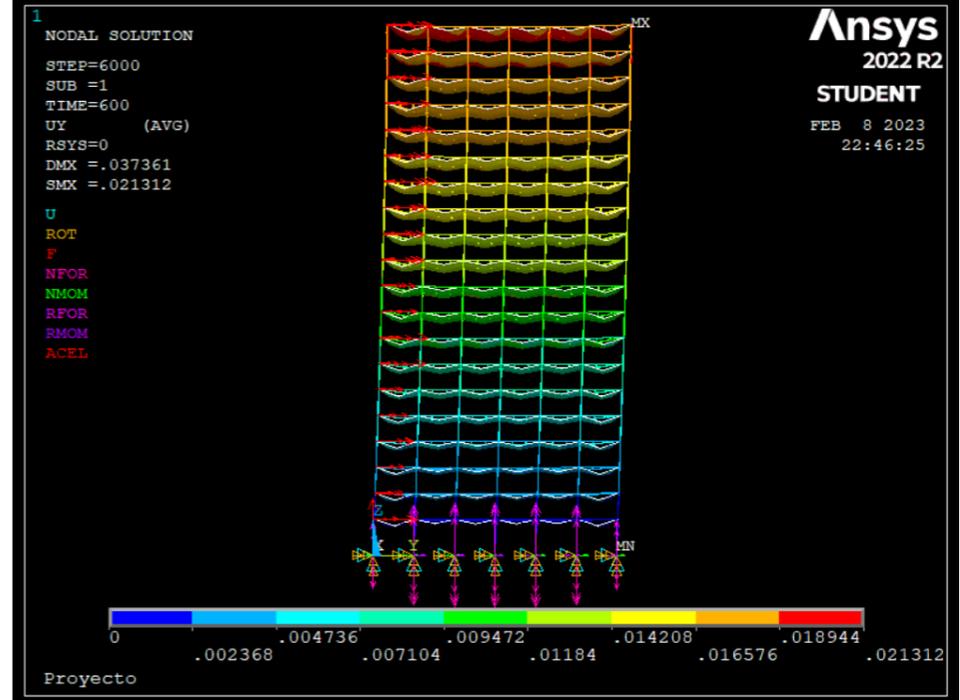
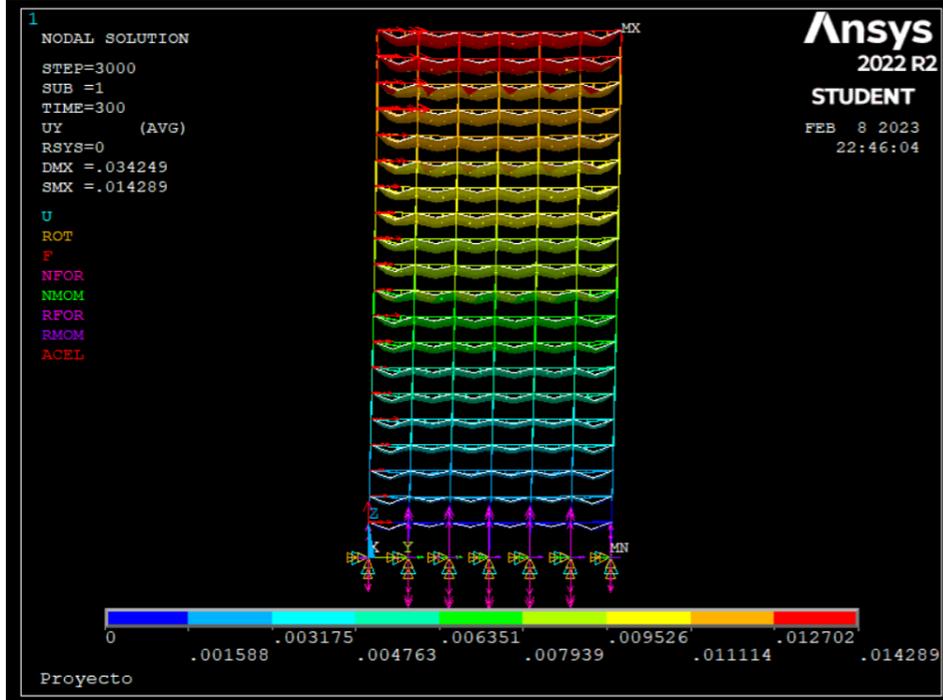
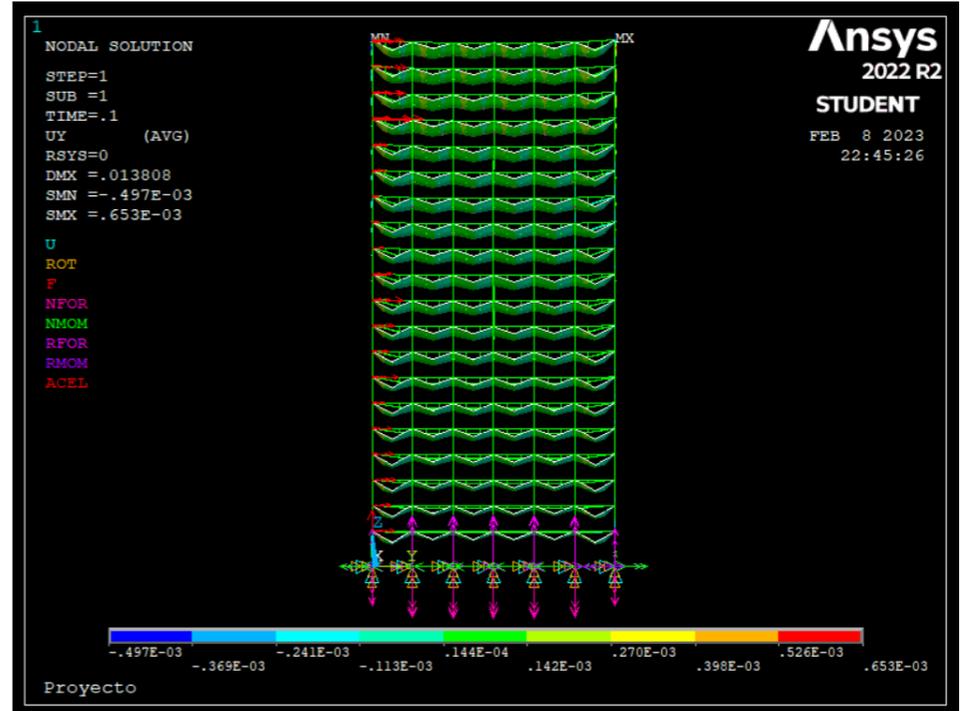
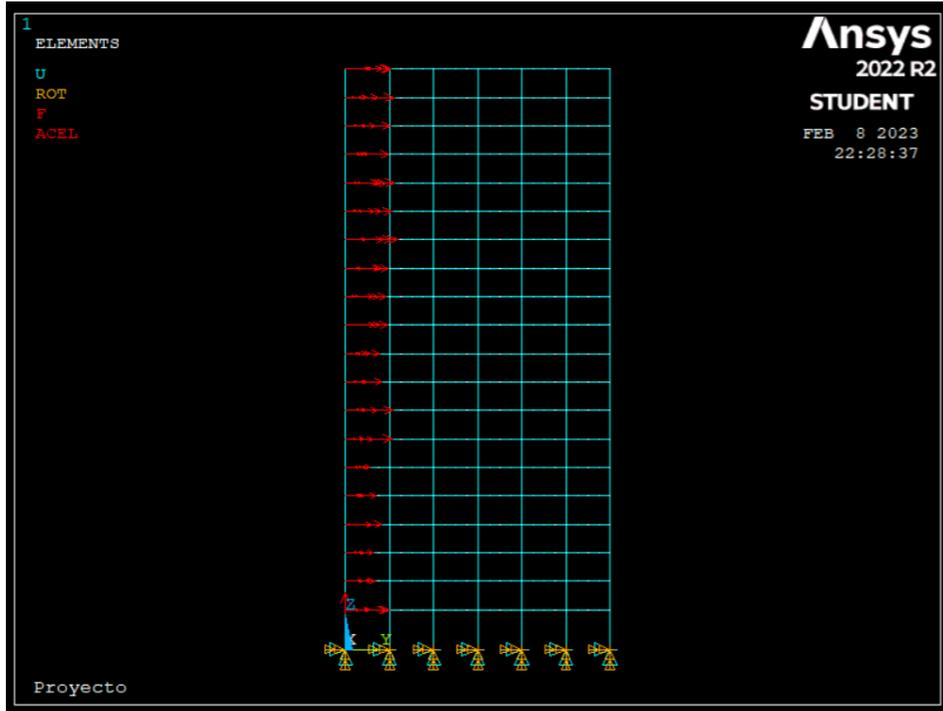


Figura A7. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 7 (Elaboración propia).



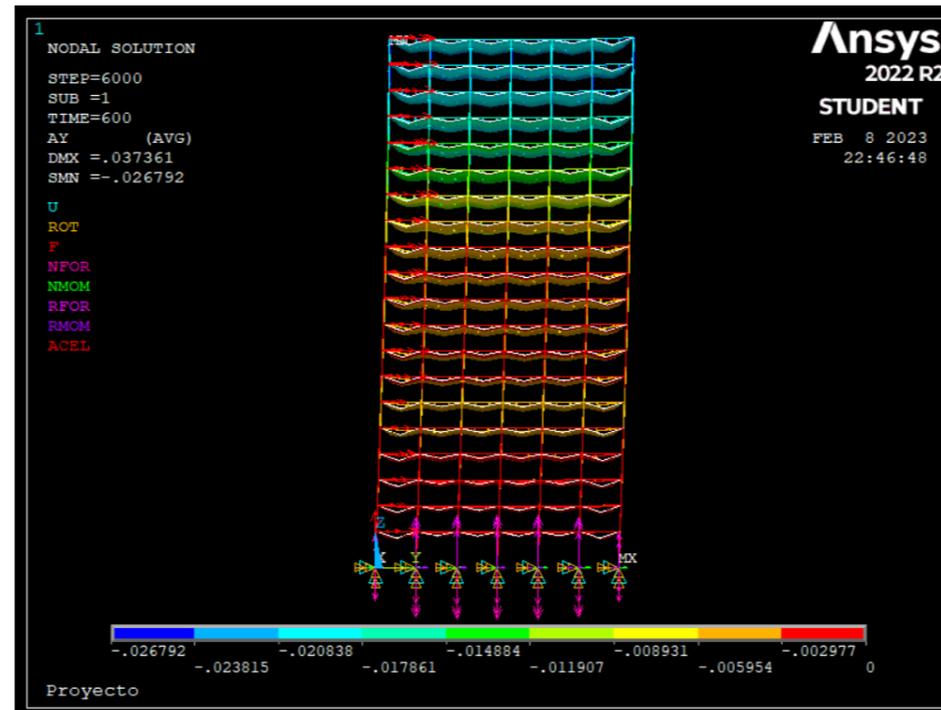
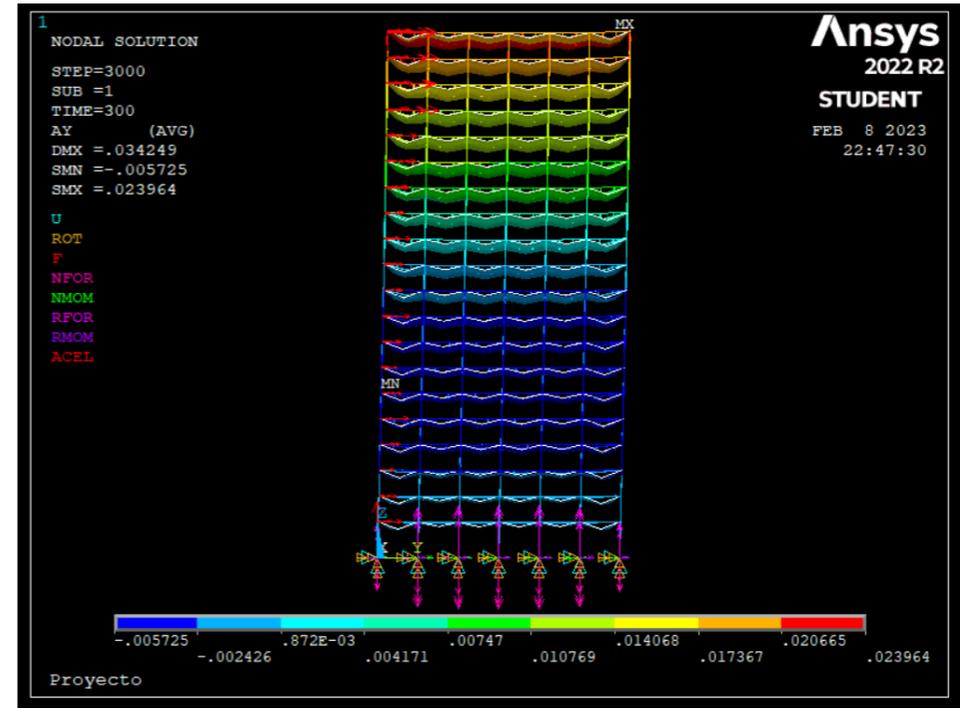
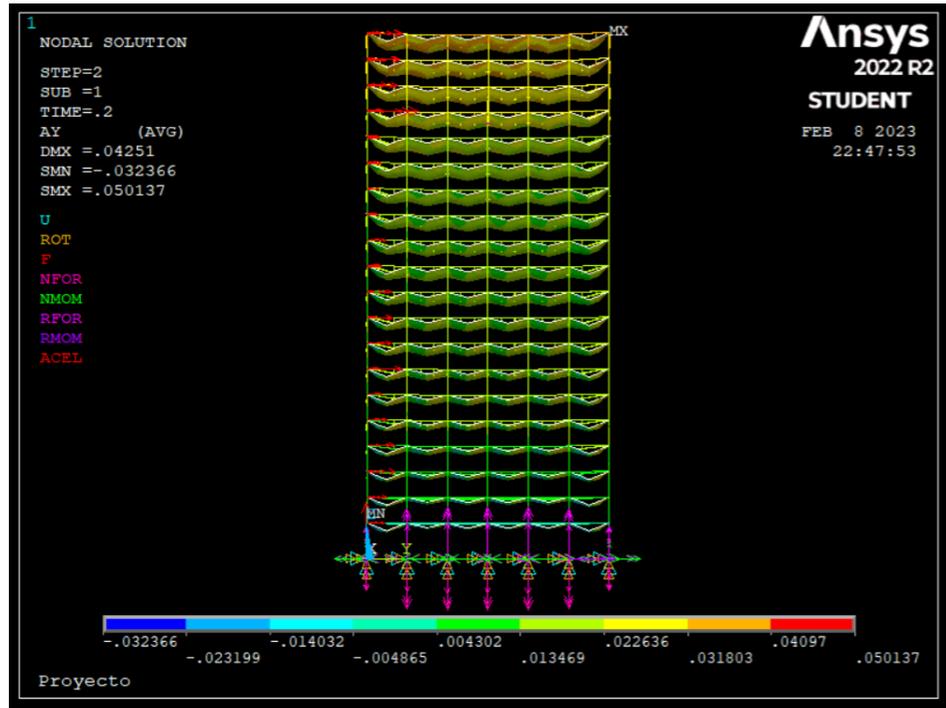
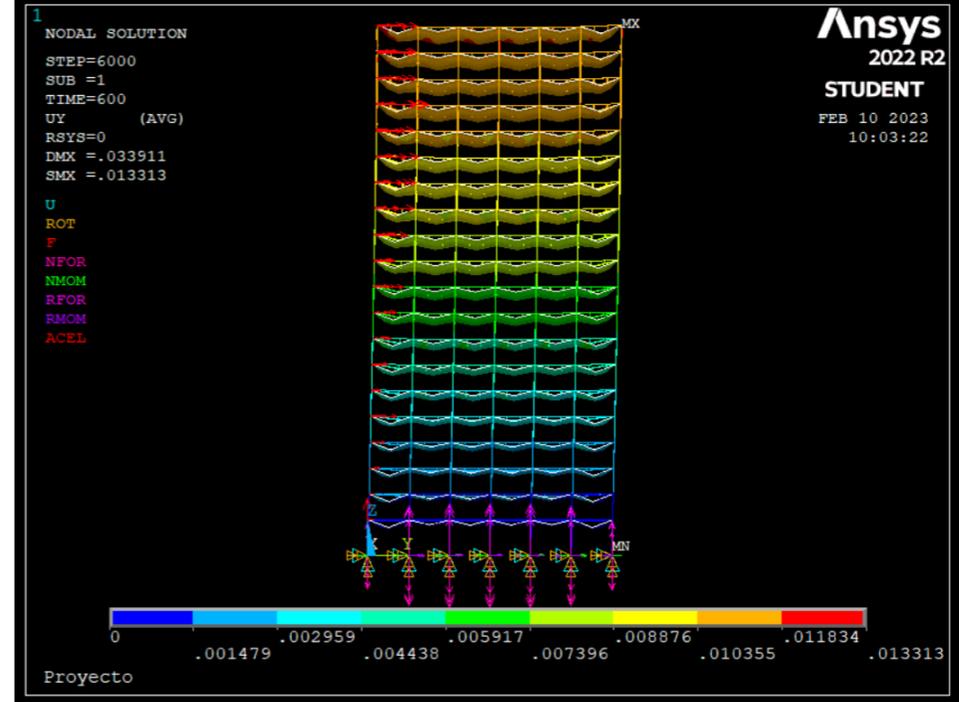
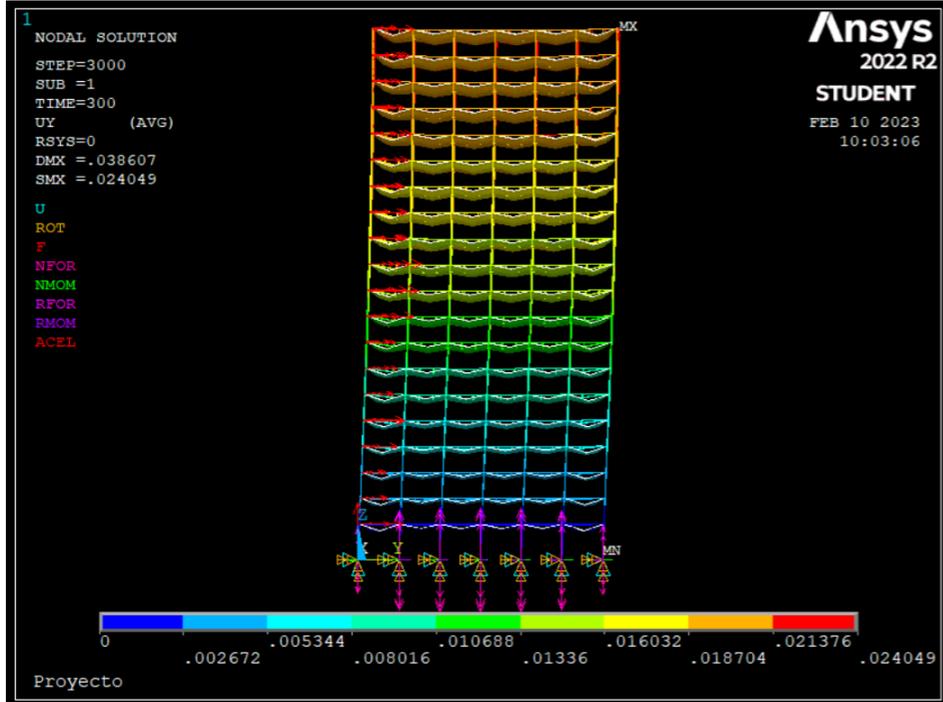
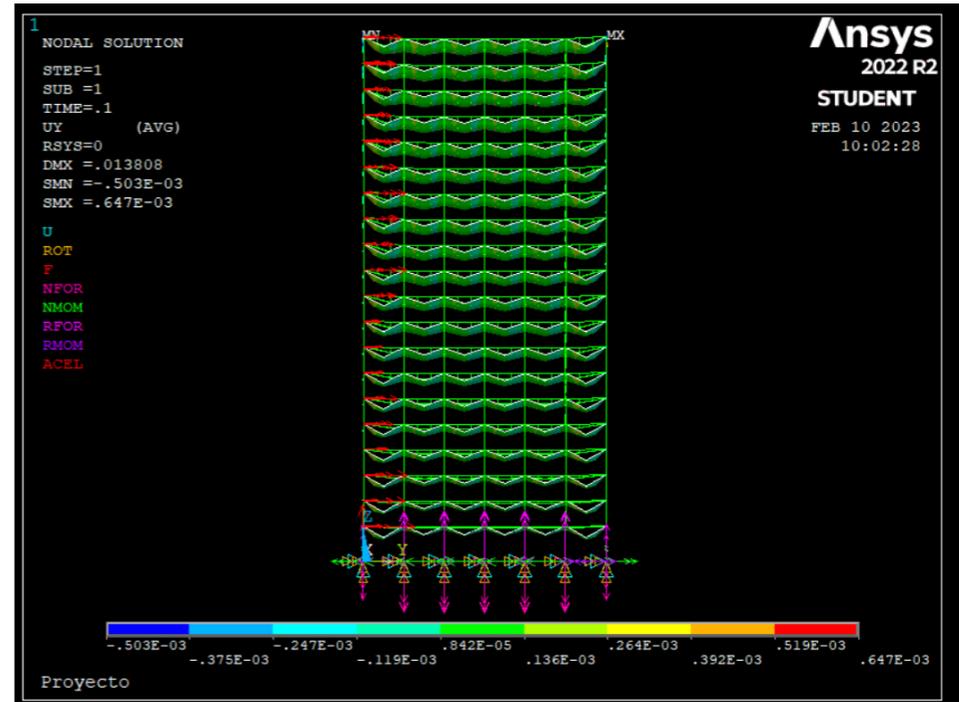
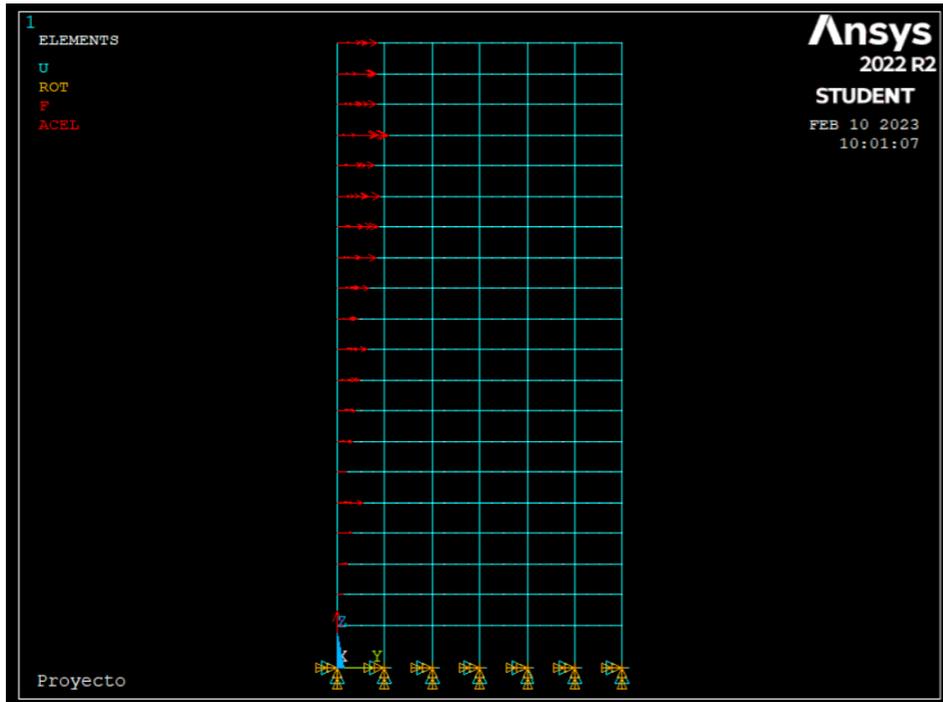


Figura A8. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 8 (Elaboración propia).



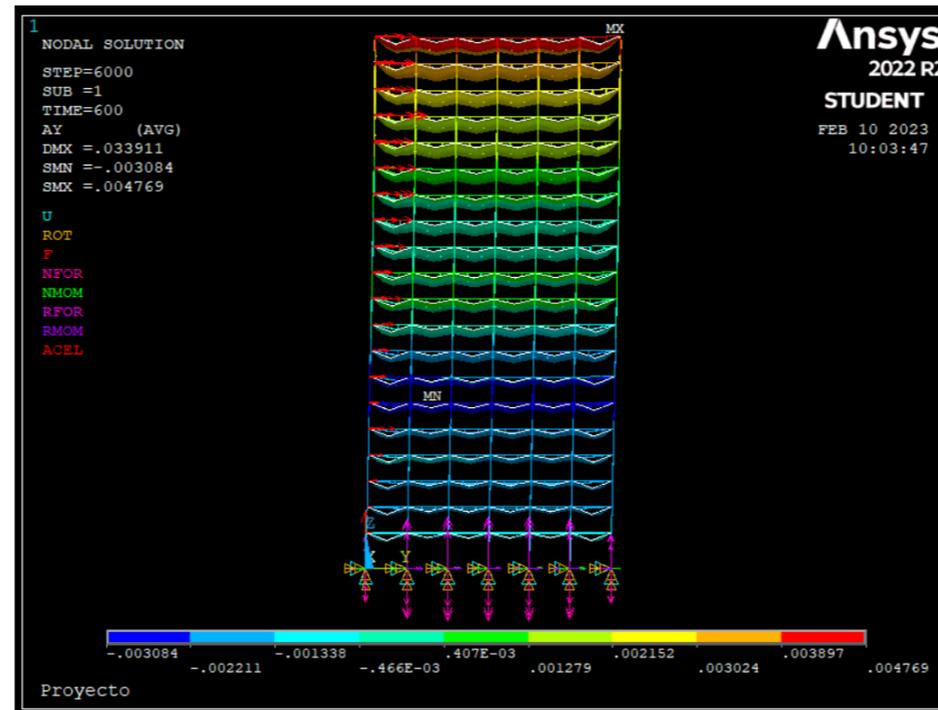
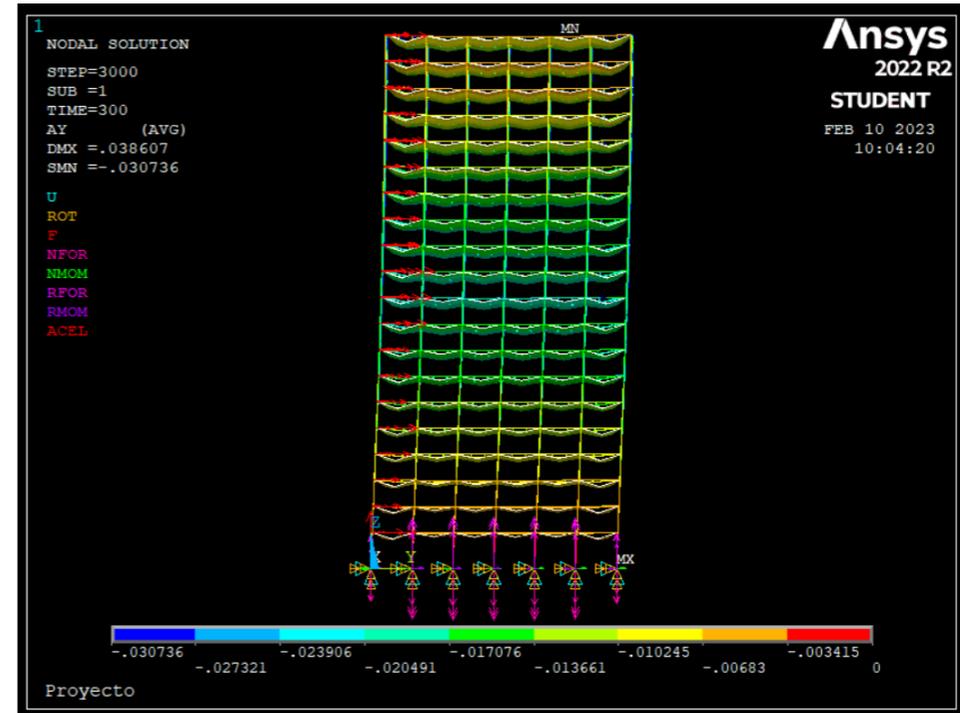
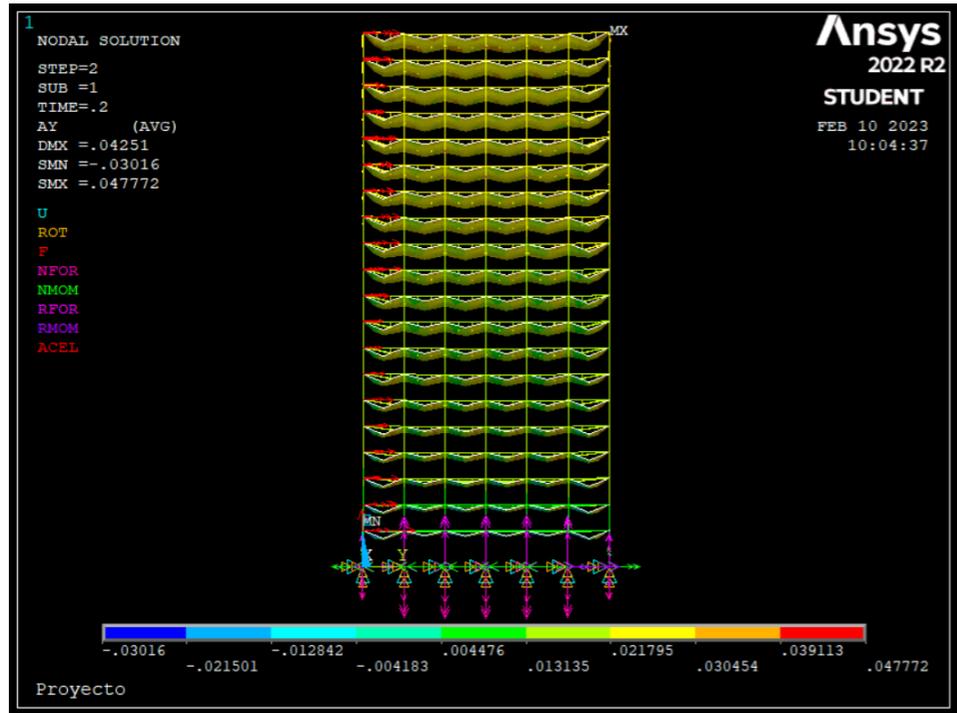
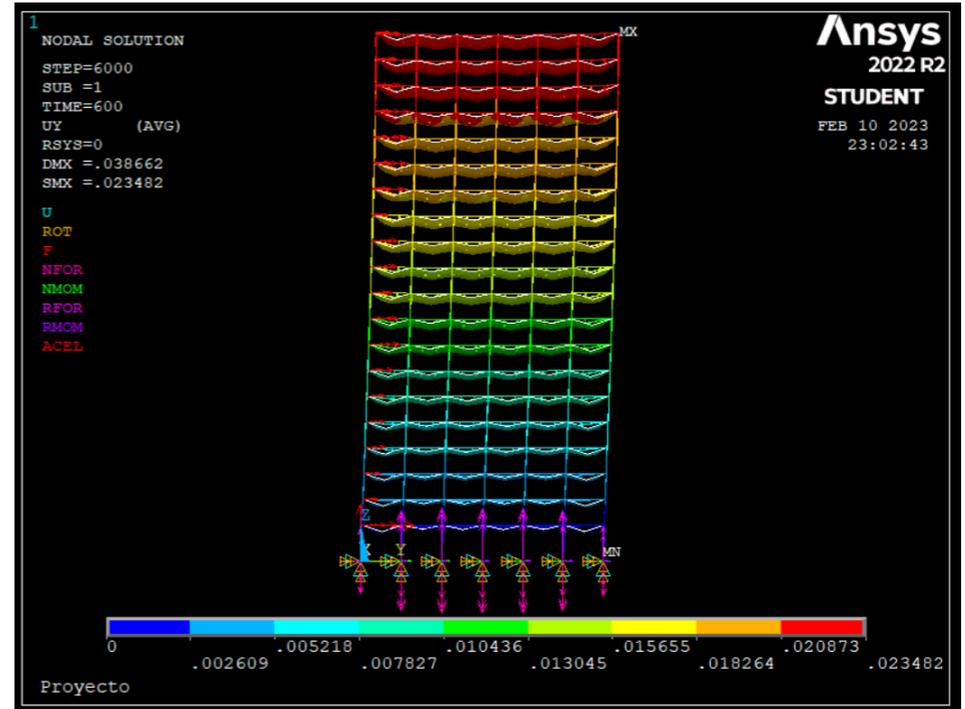
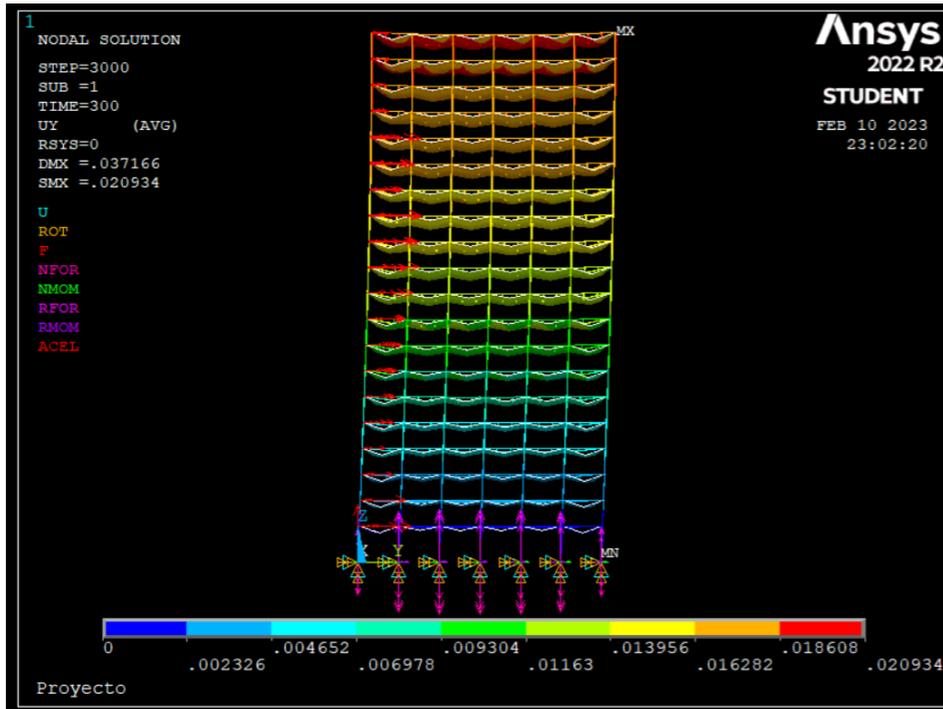
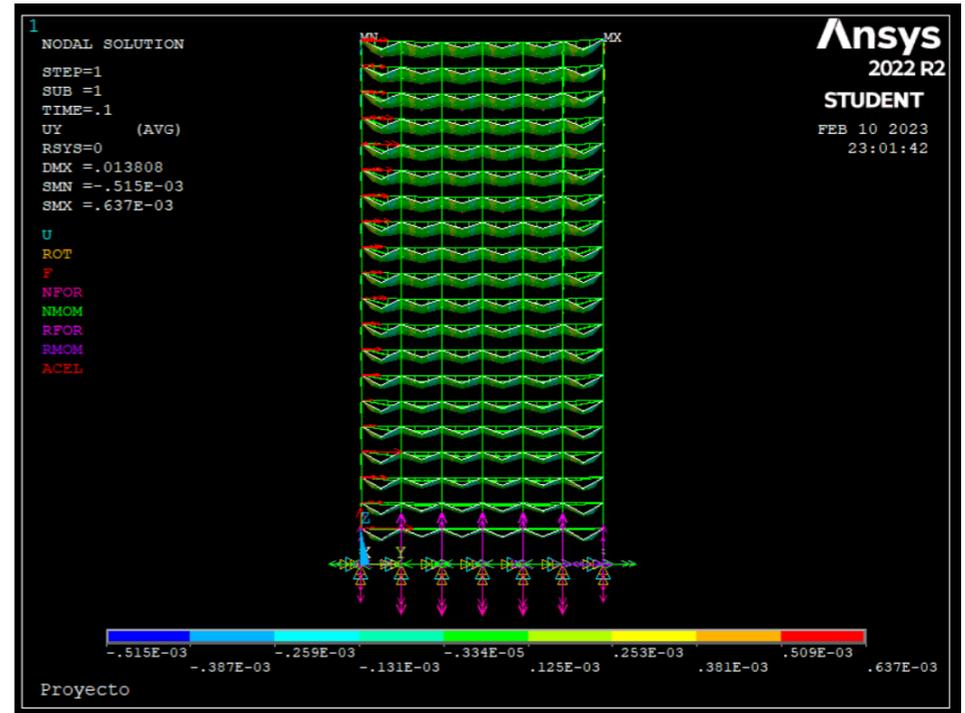
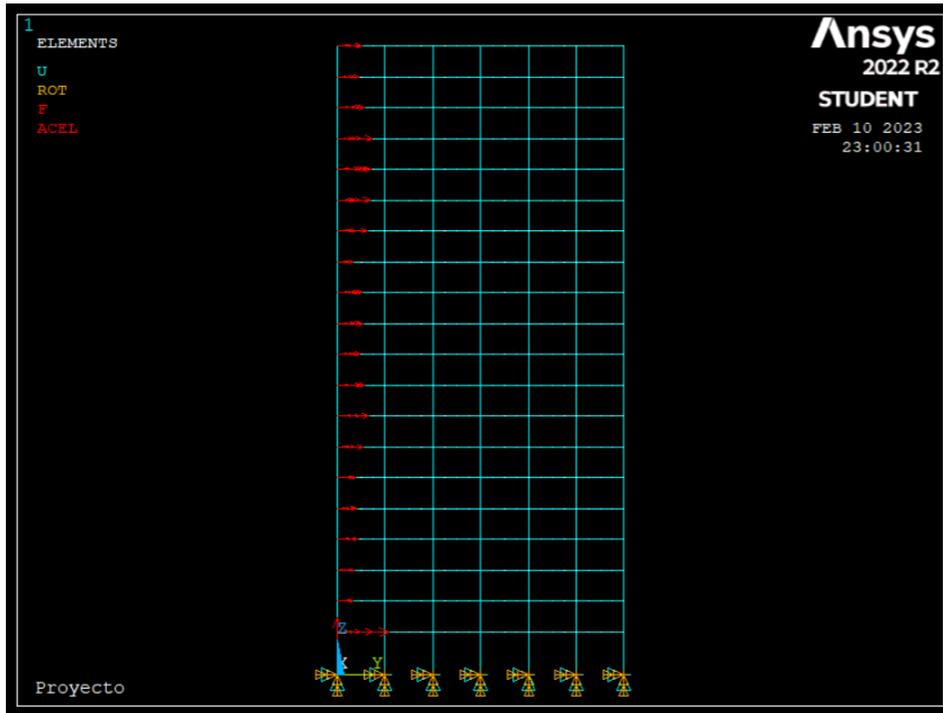


Figura A9. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 9 (Elaboración propia).



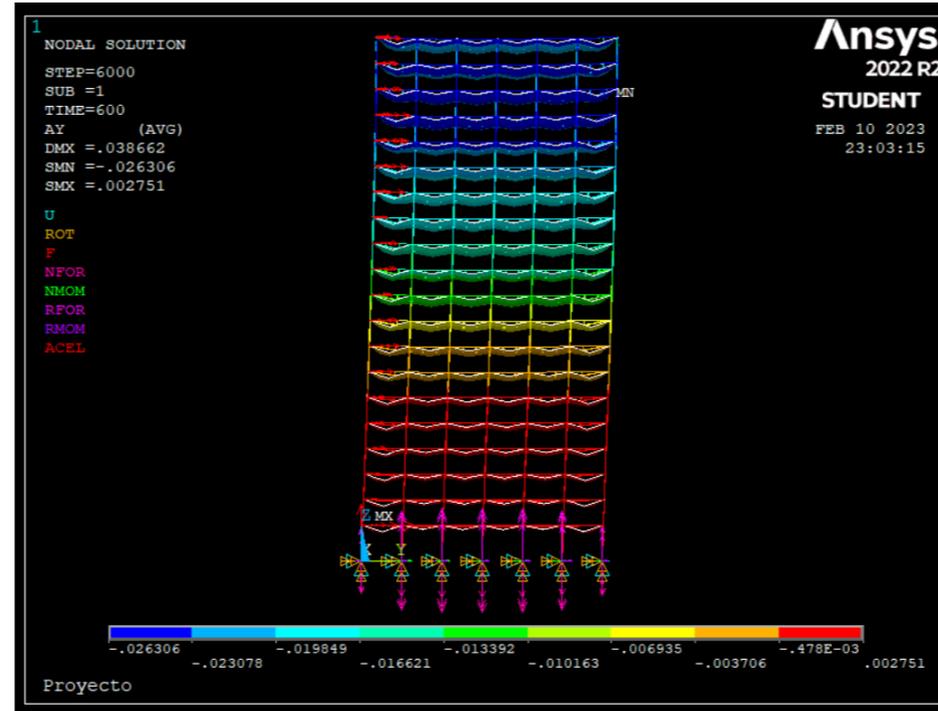
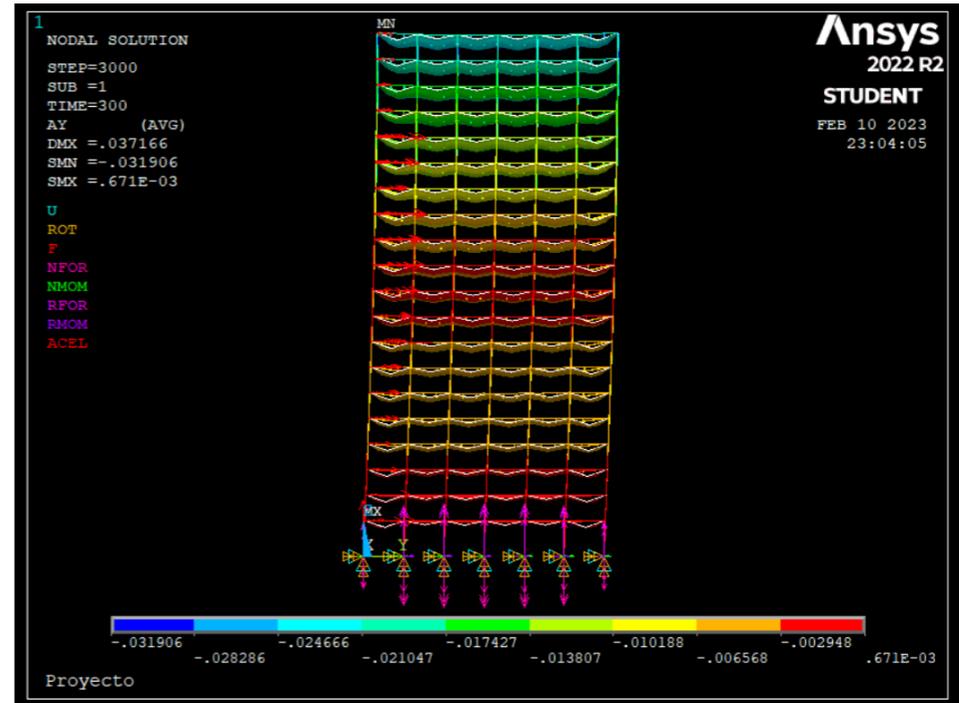
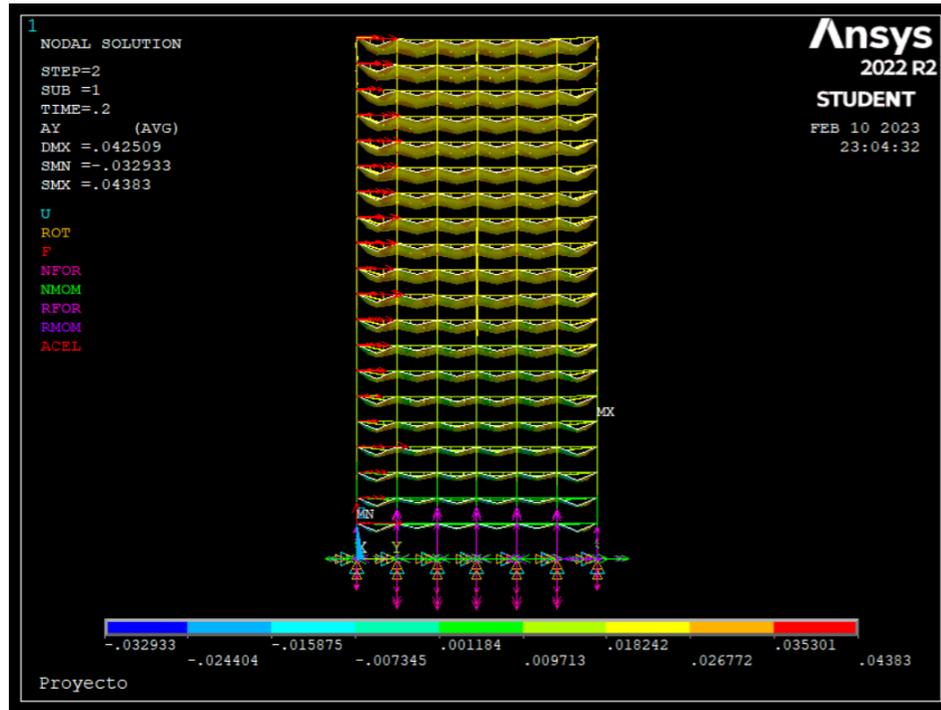


Figura A10. Conjunto de respuestas de aceleración y desplazamiento en la señal 10 (Elaboración propia).

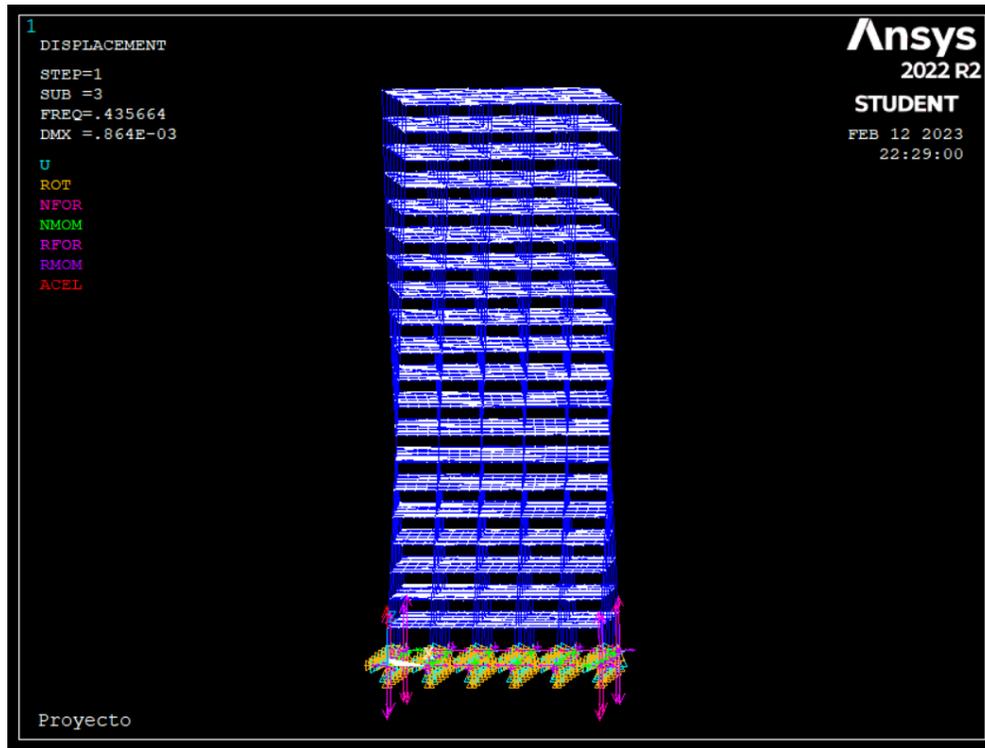
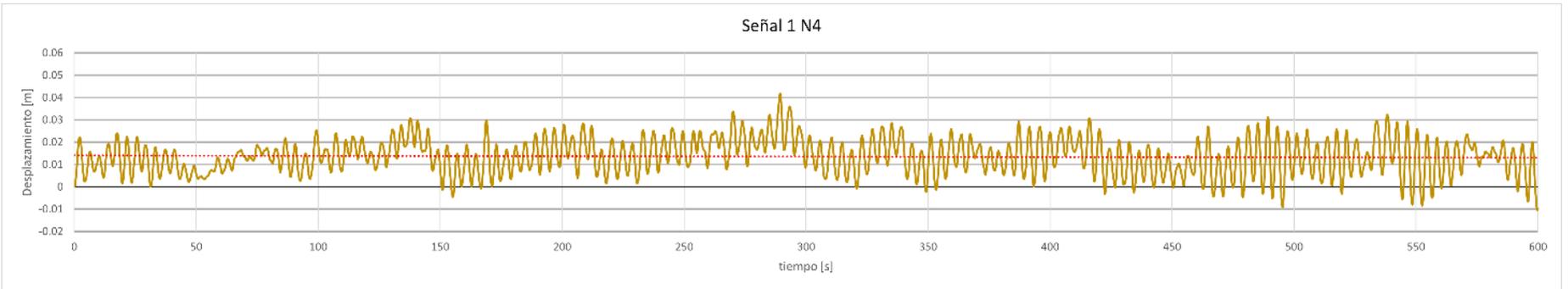
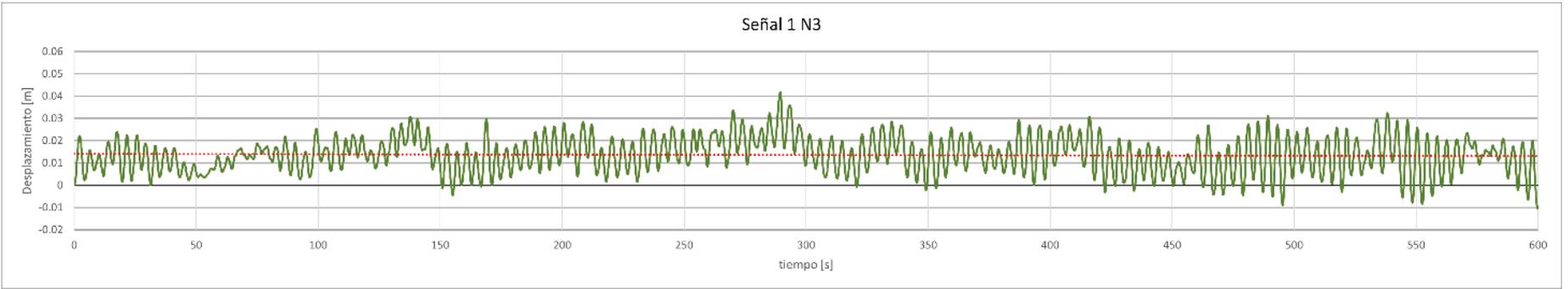
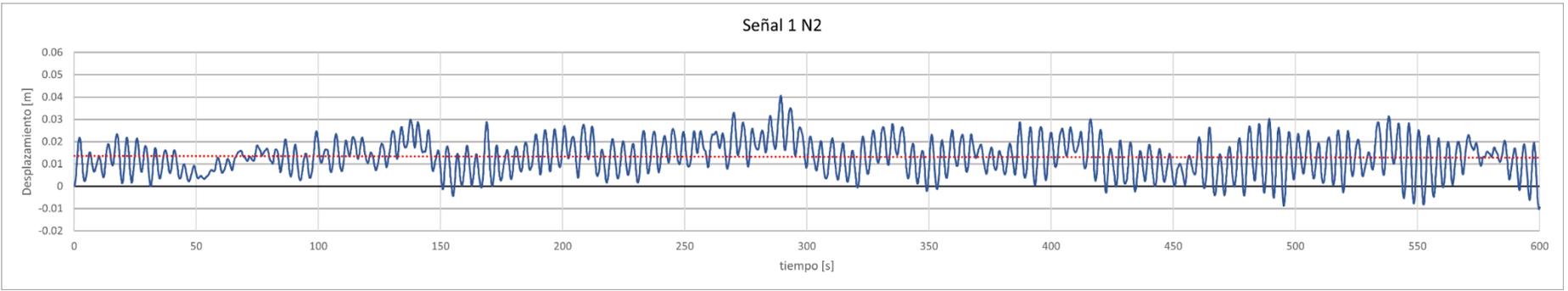
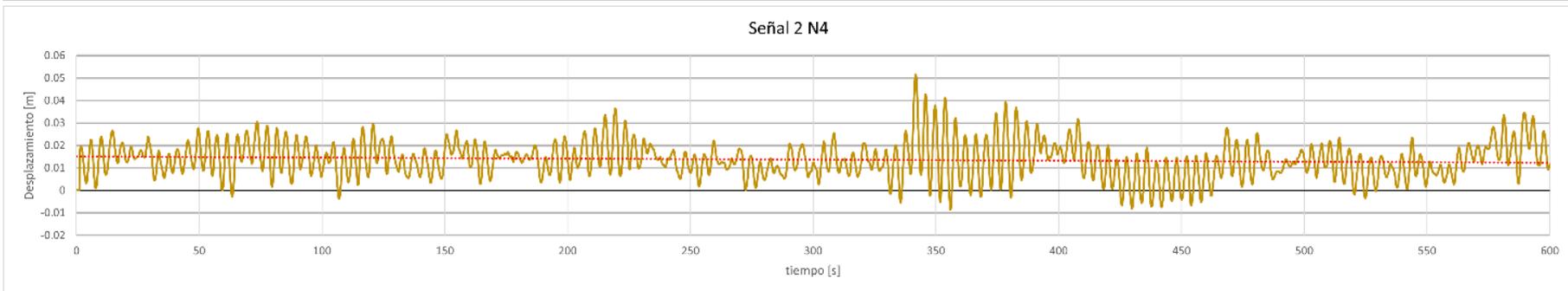
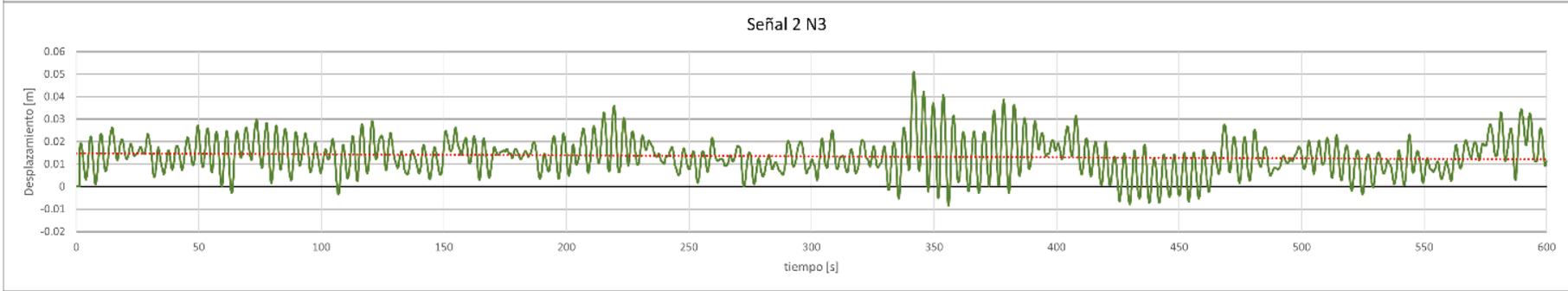
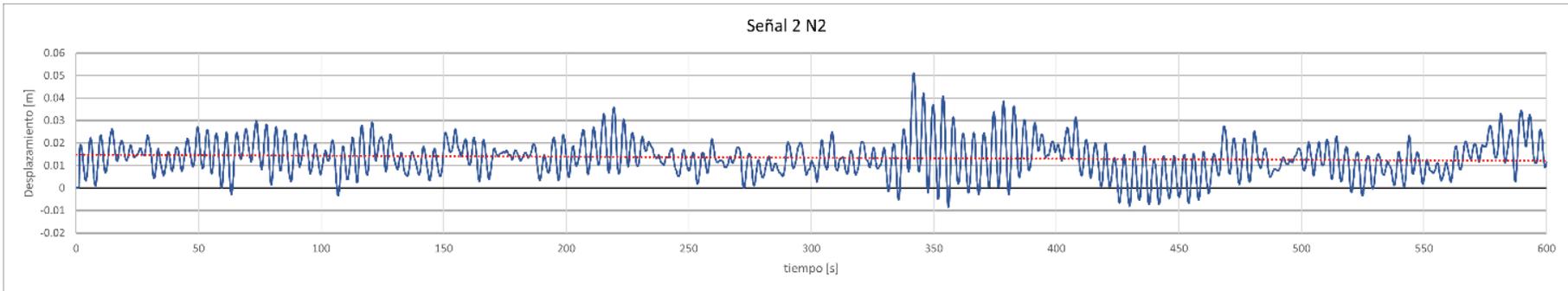
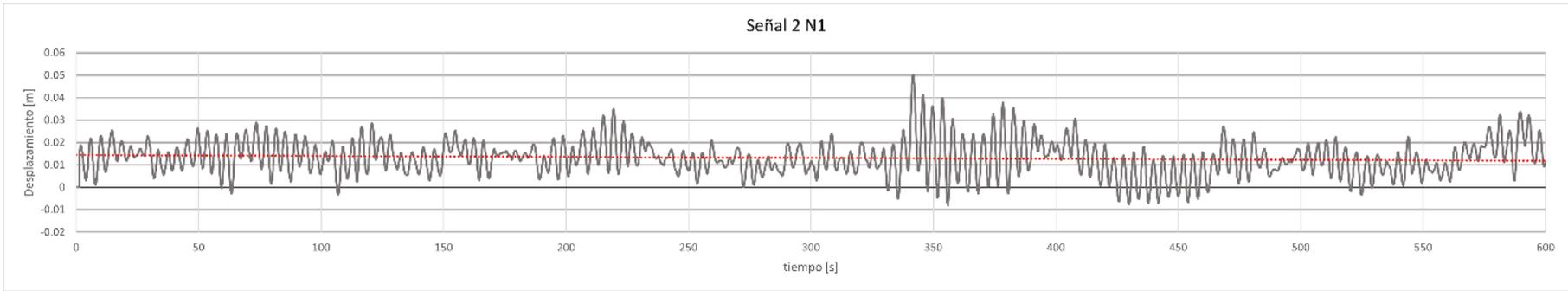
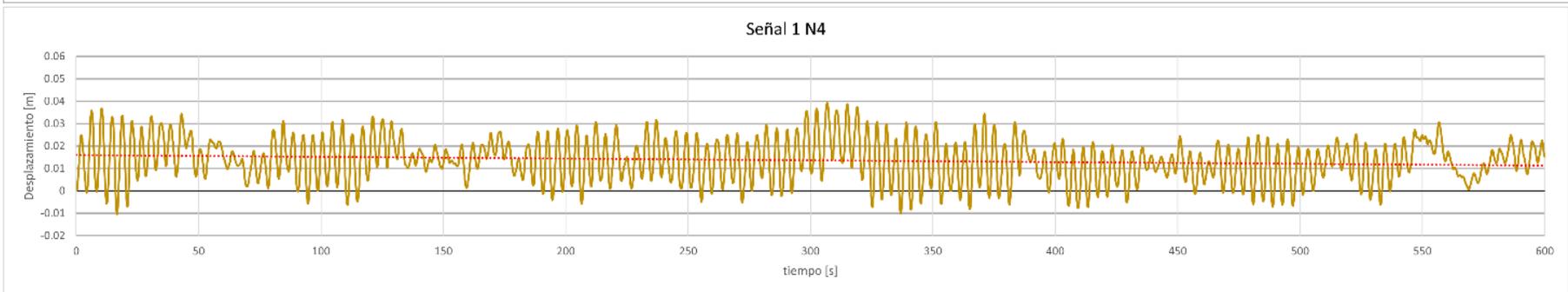
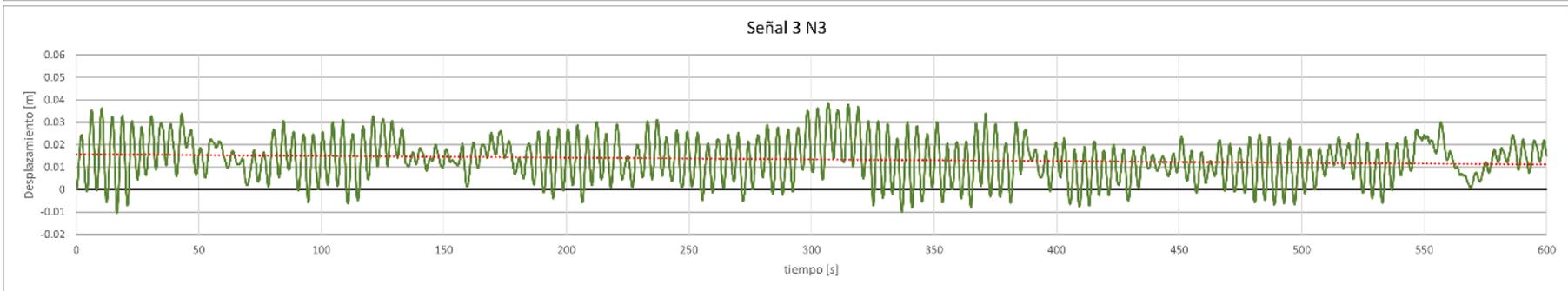
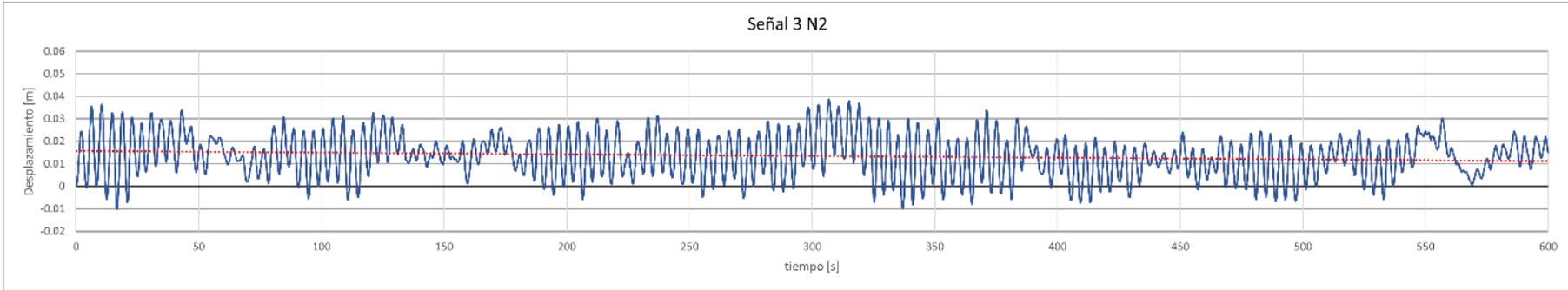
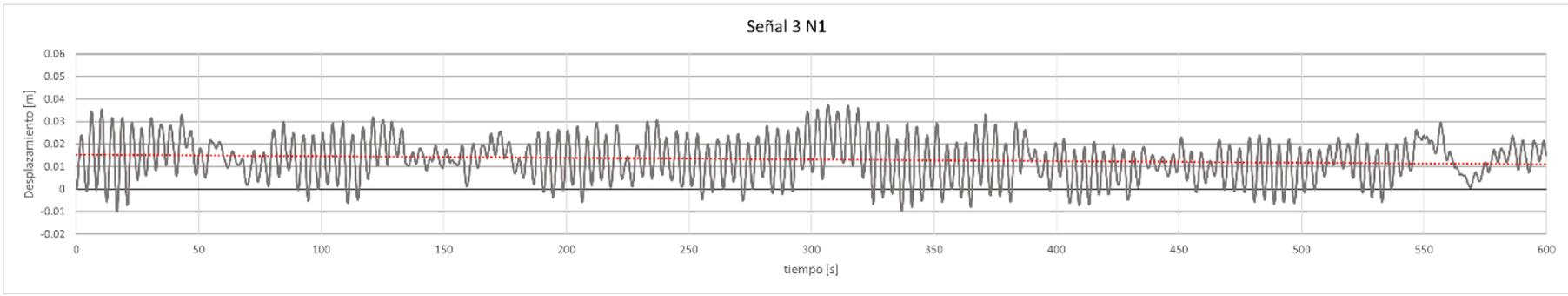


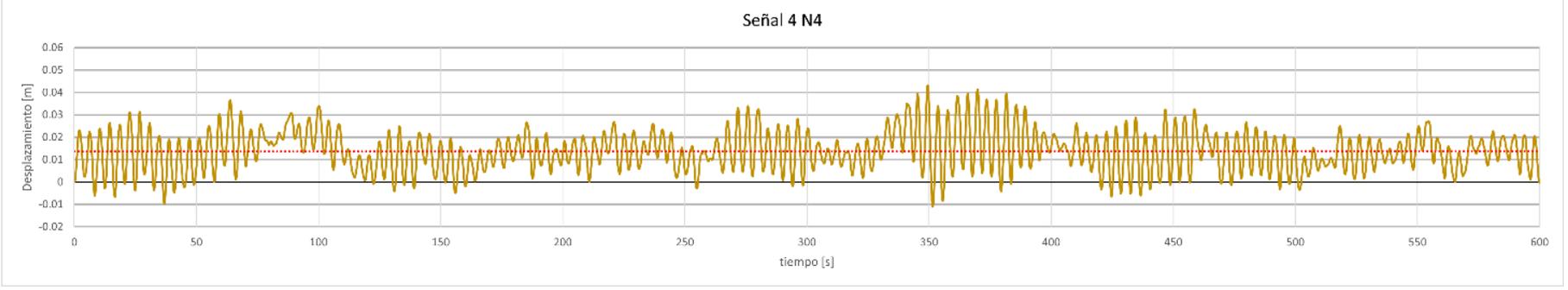
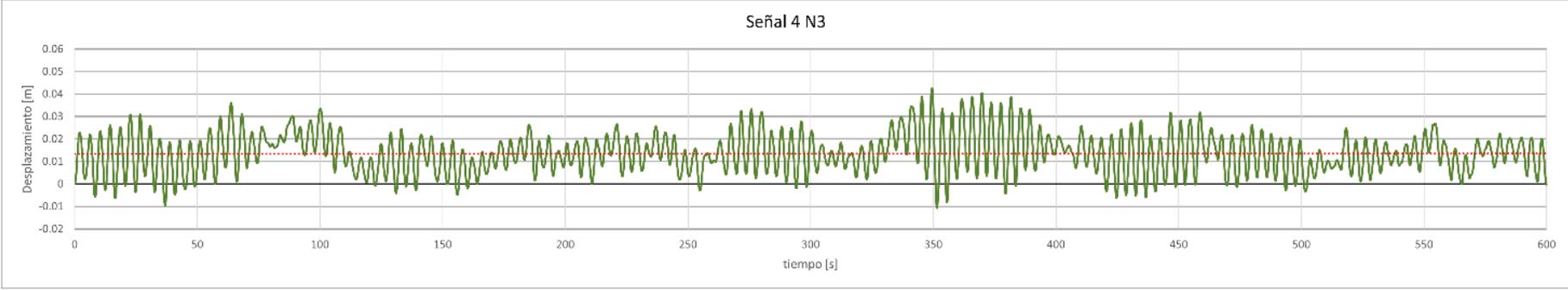
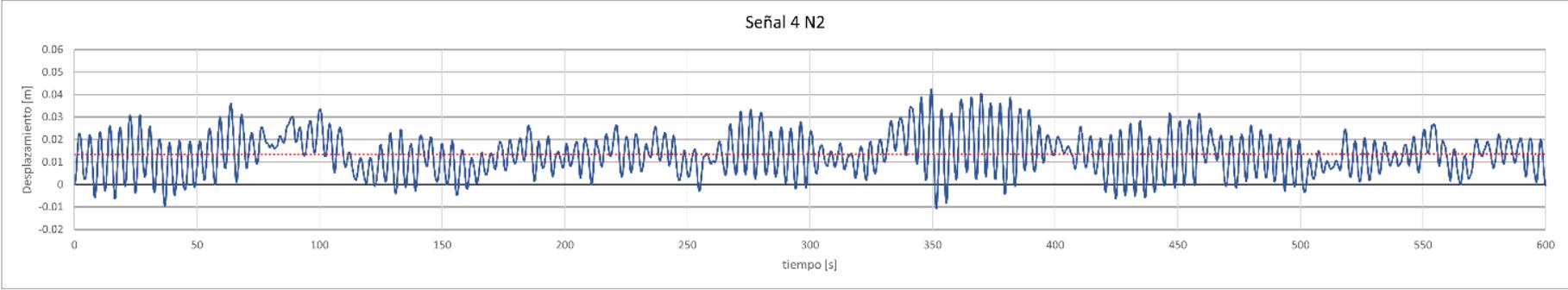
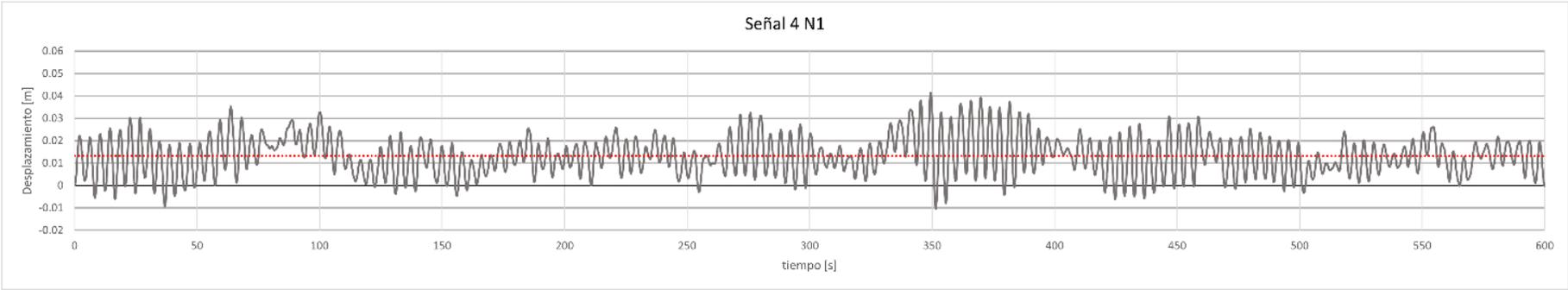
Figura A11. Respuesta del modo 3, análisis modal (Elaboración propia).

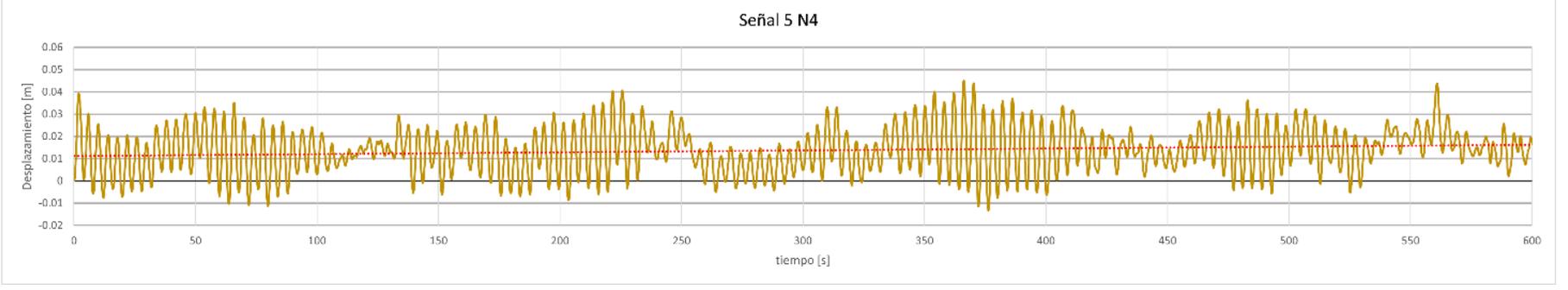
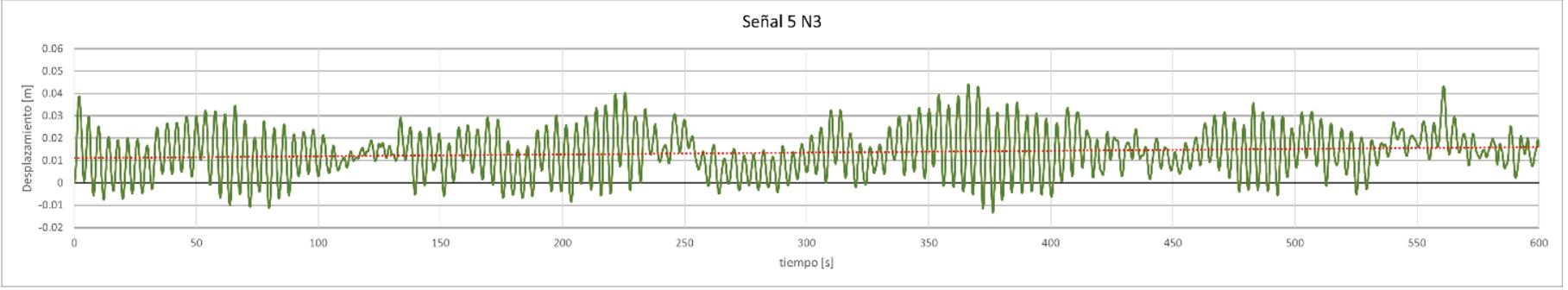
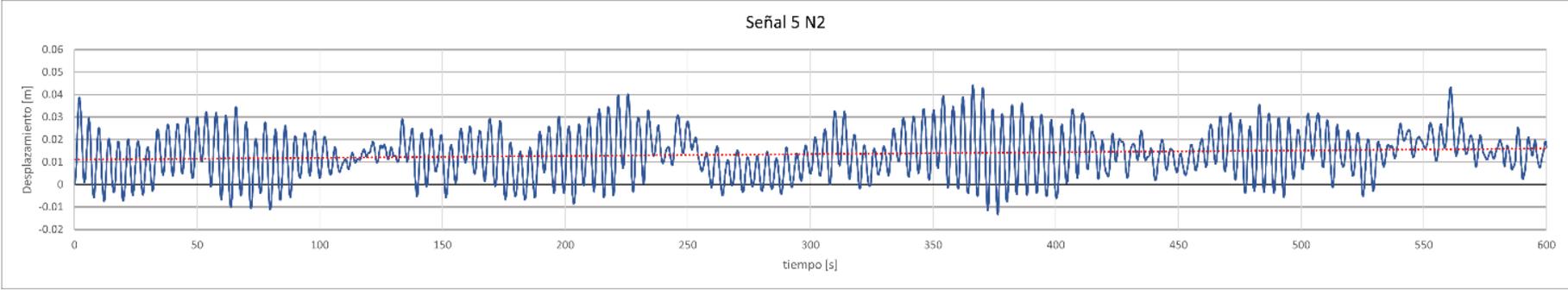
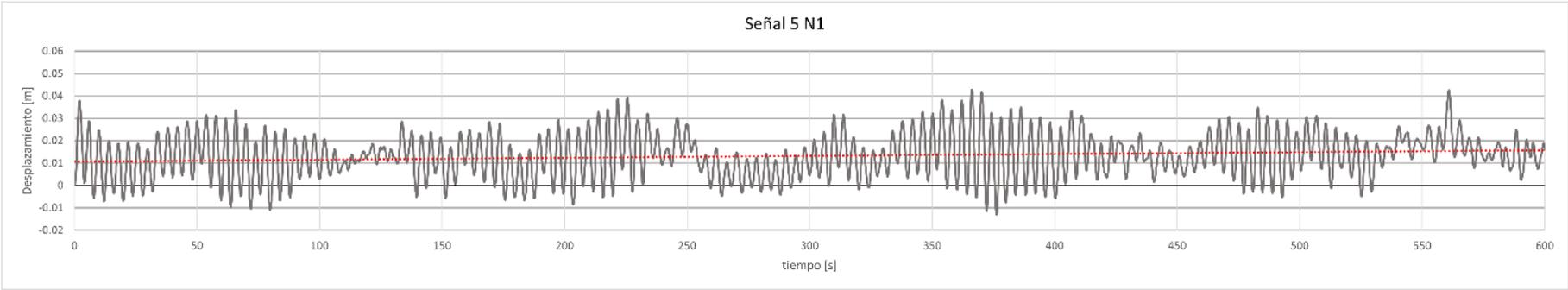
Finalmente, se agregan las gráficas de desplazamiento y aceleración para cada señal y cada nodo.

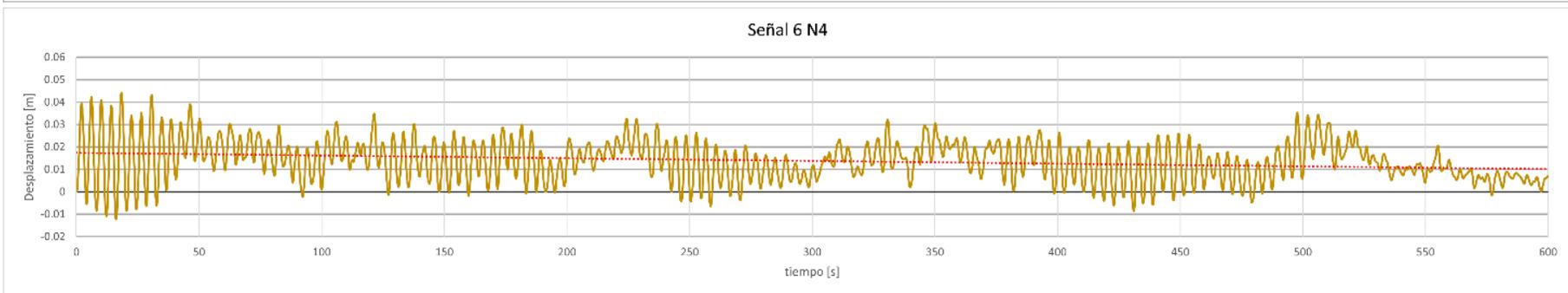
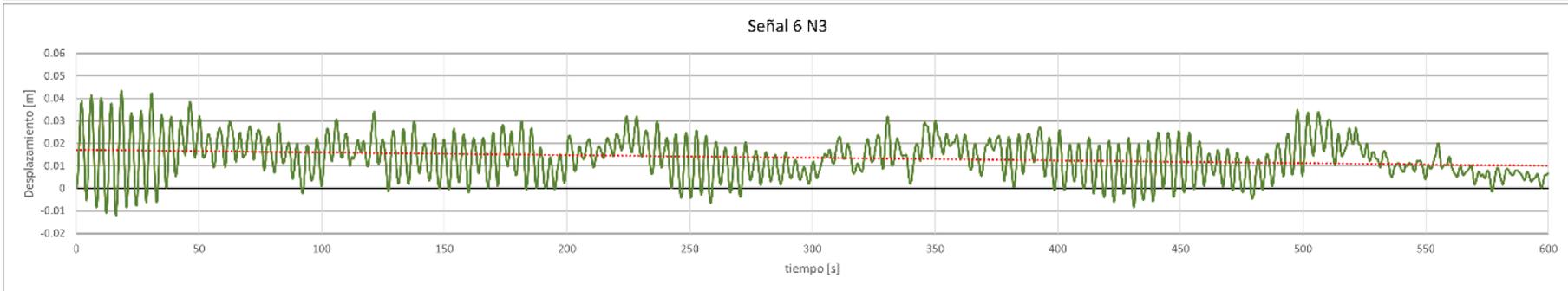
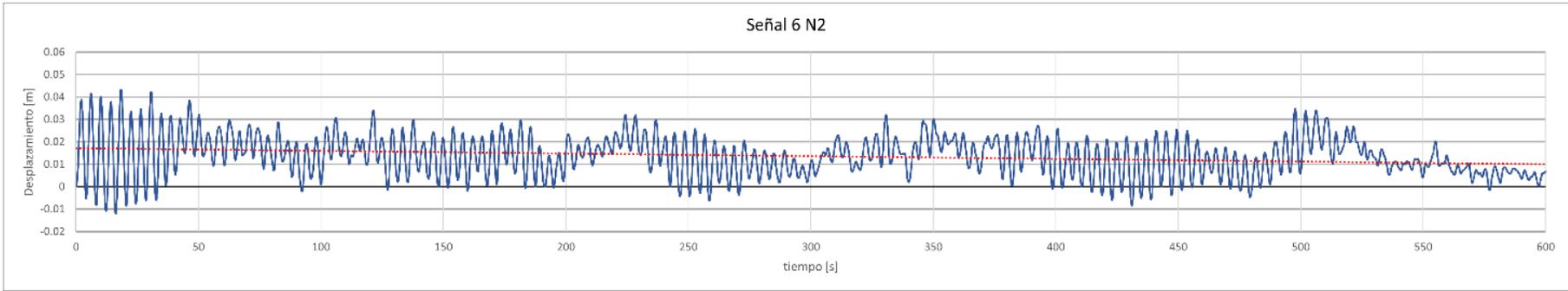
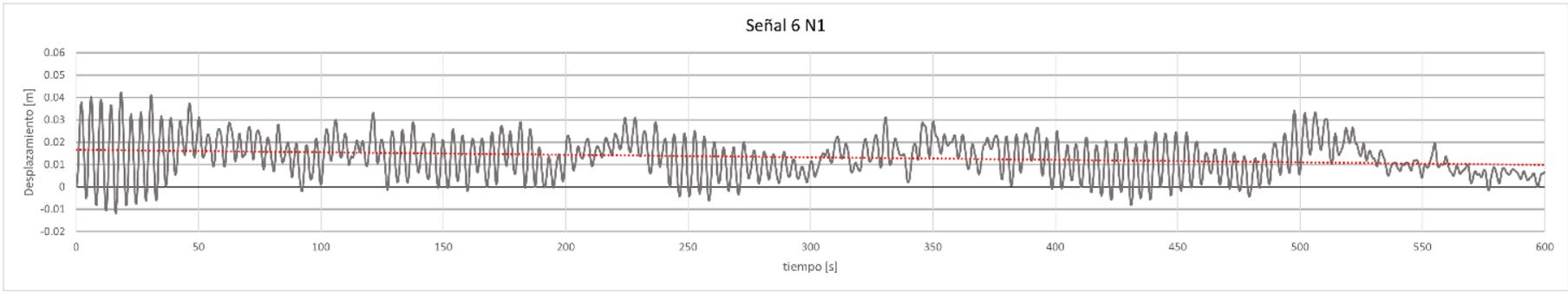


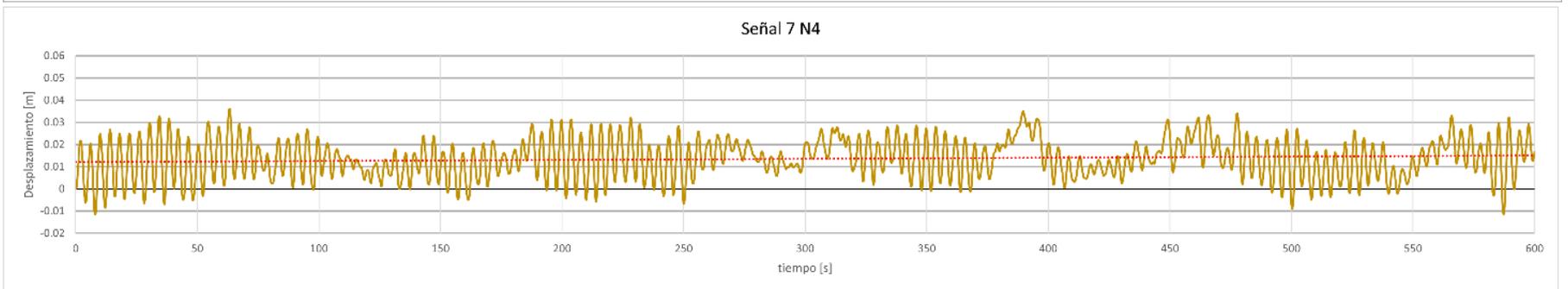
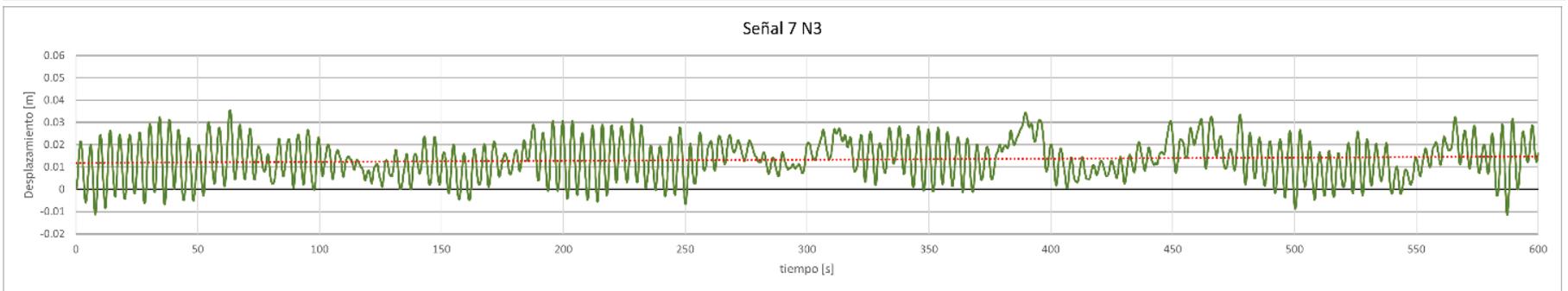
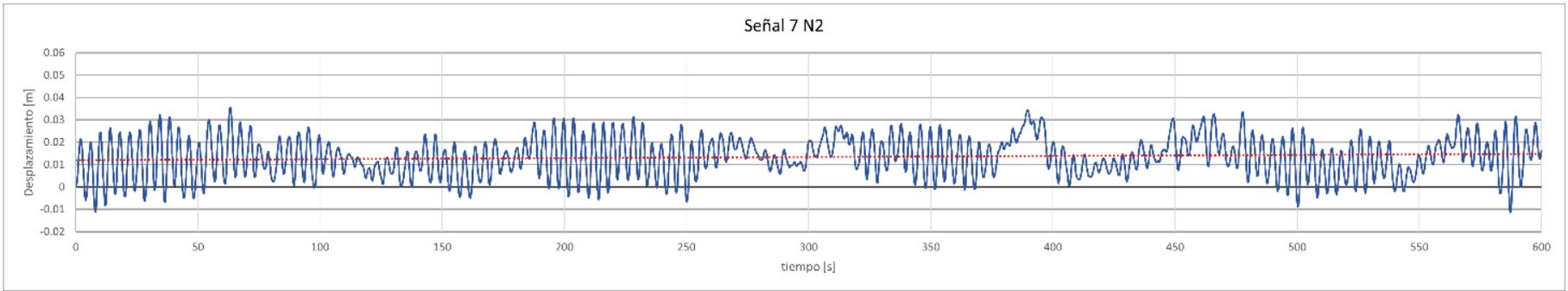
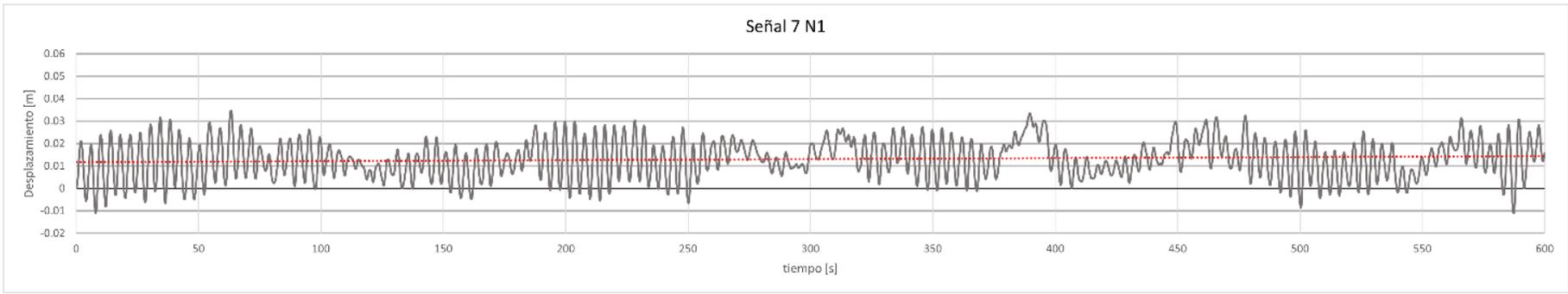


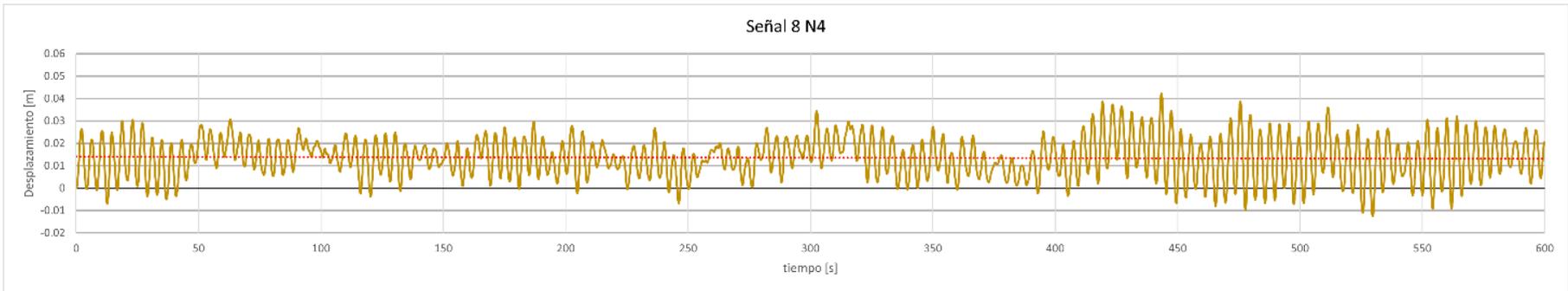
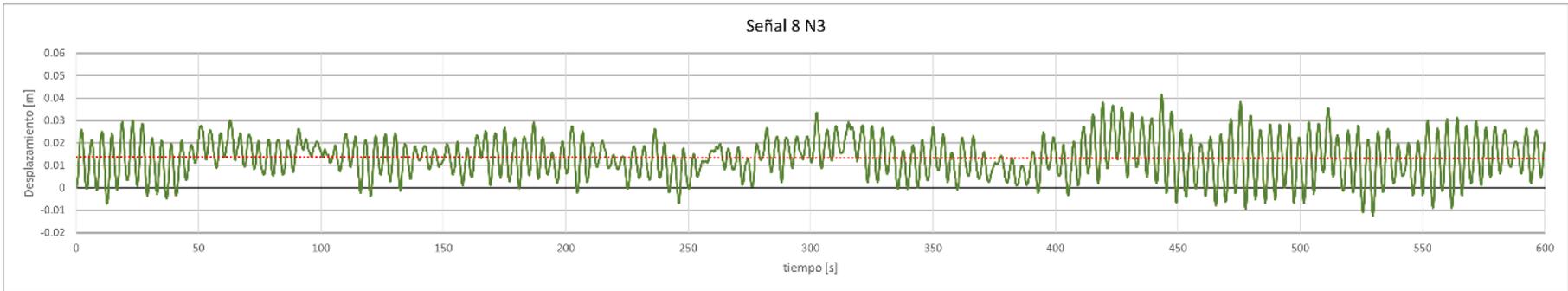
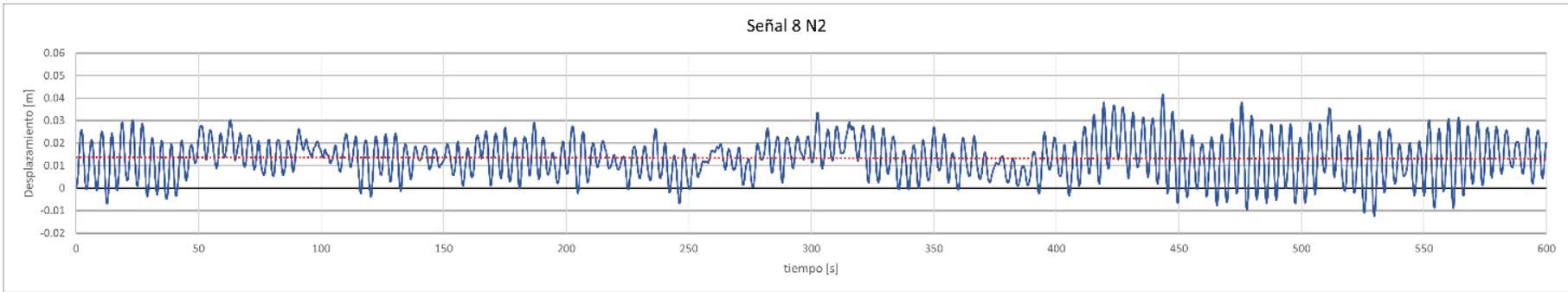
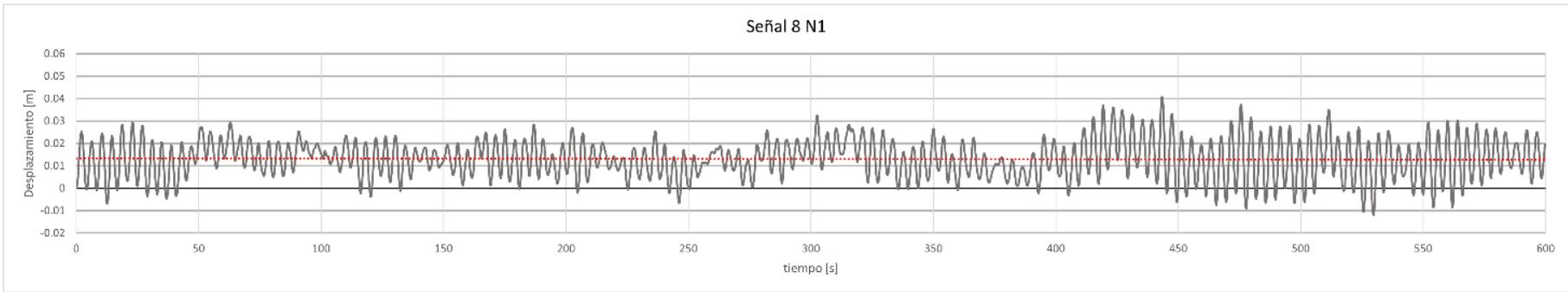


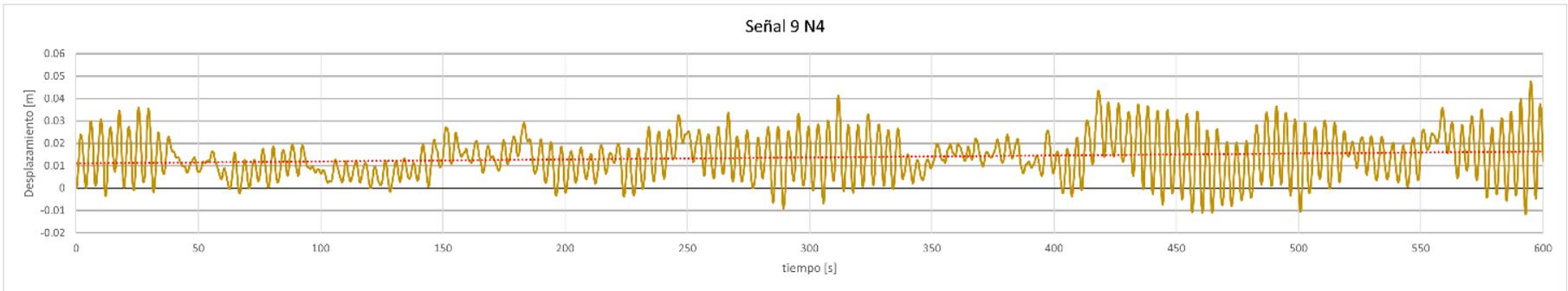
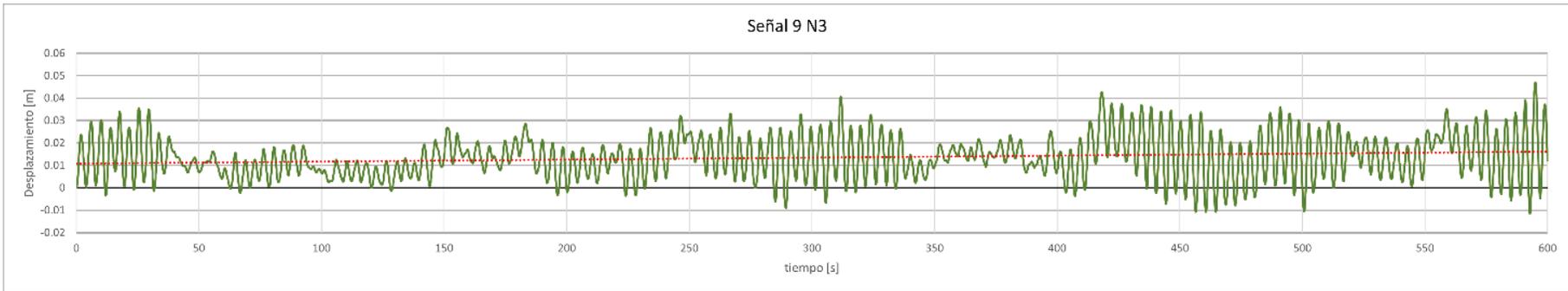
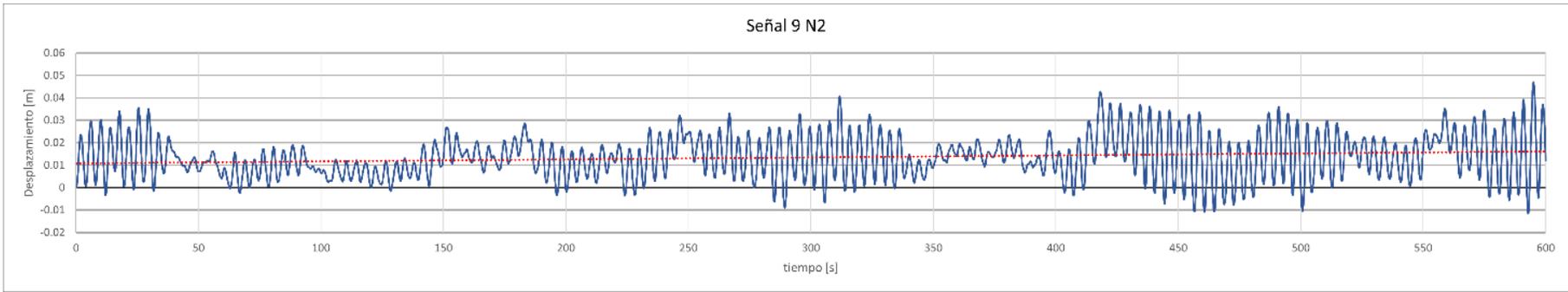
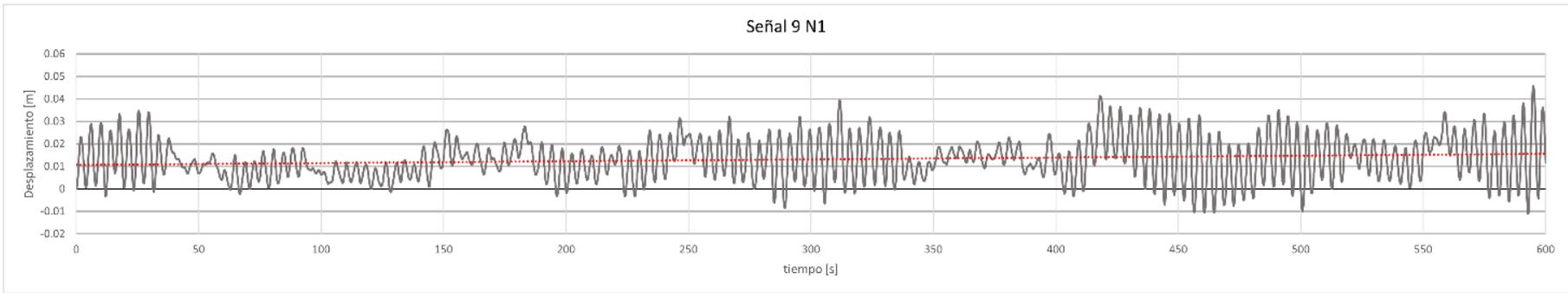












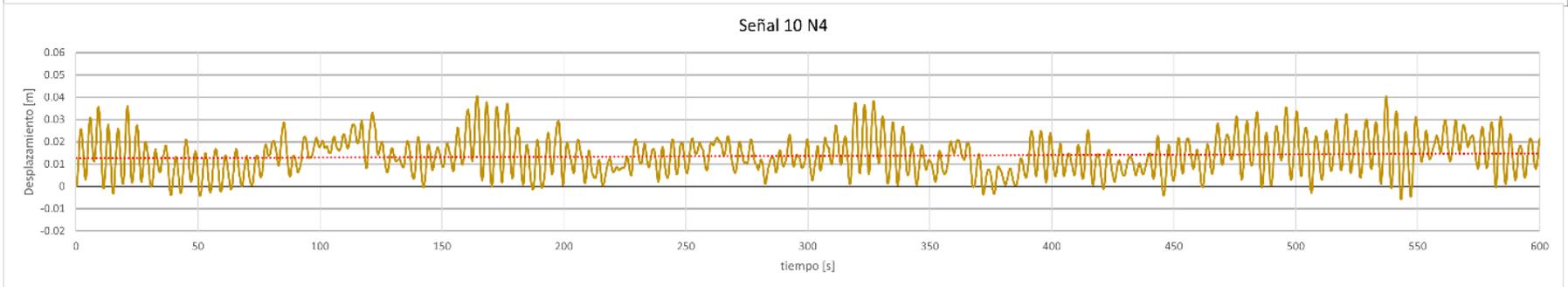
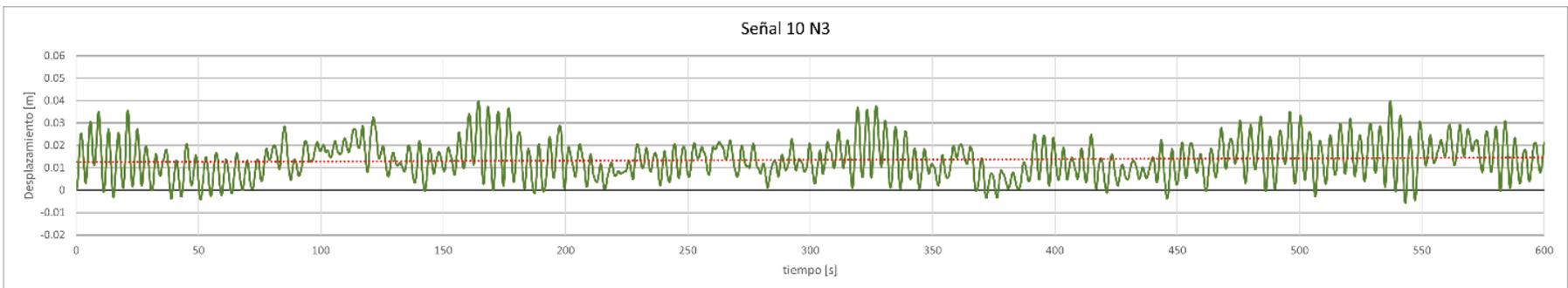
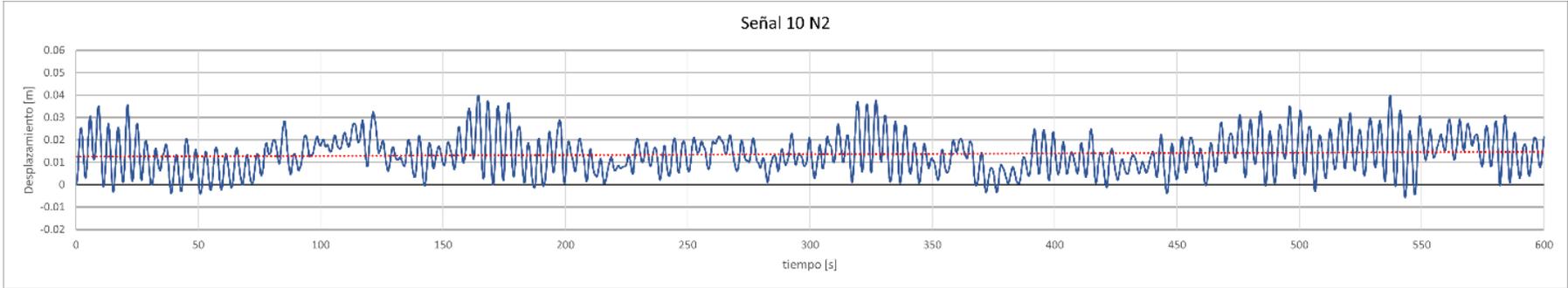
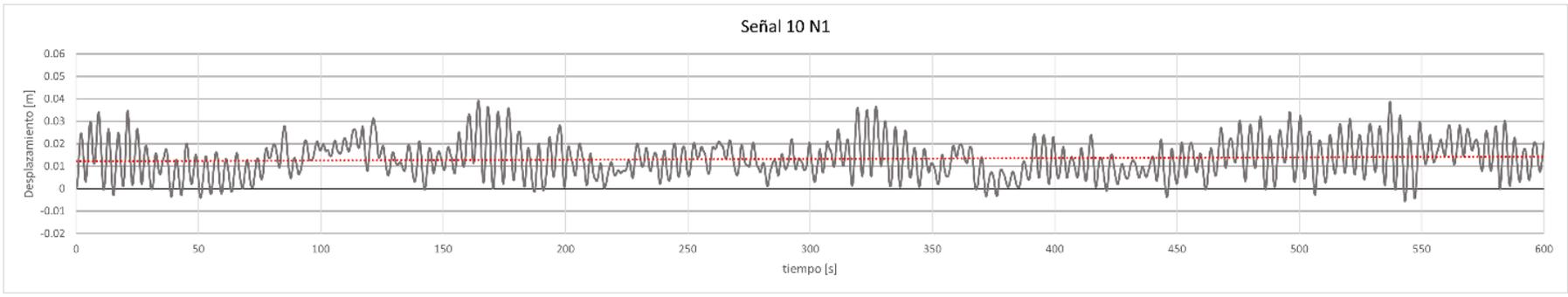
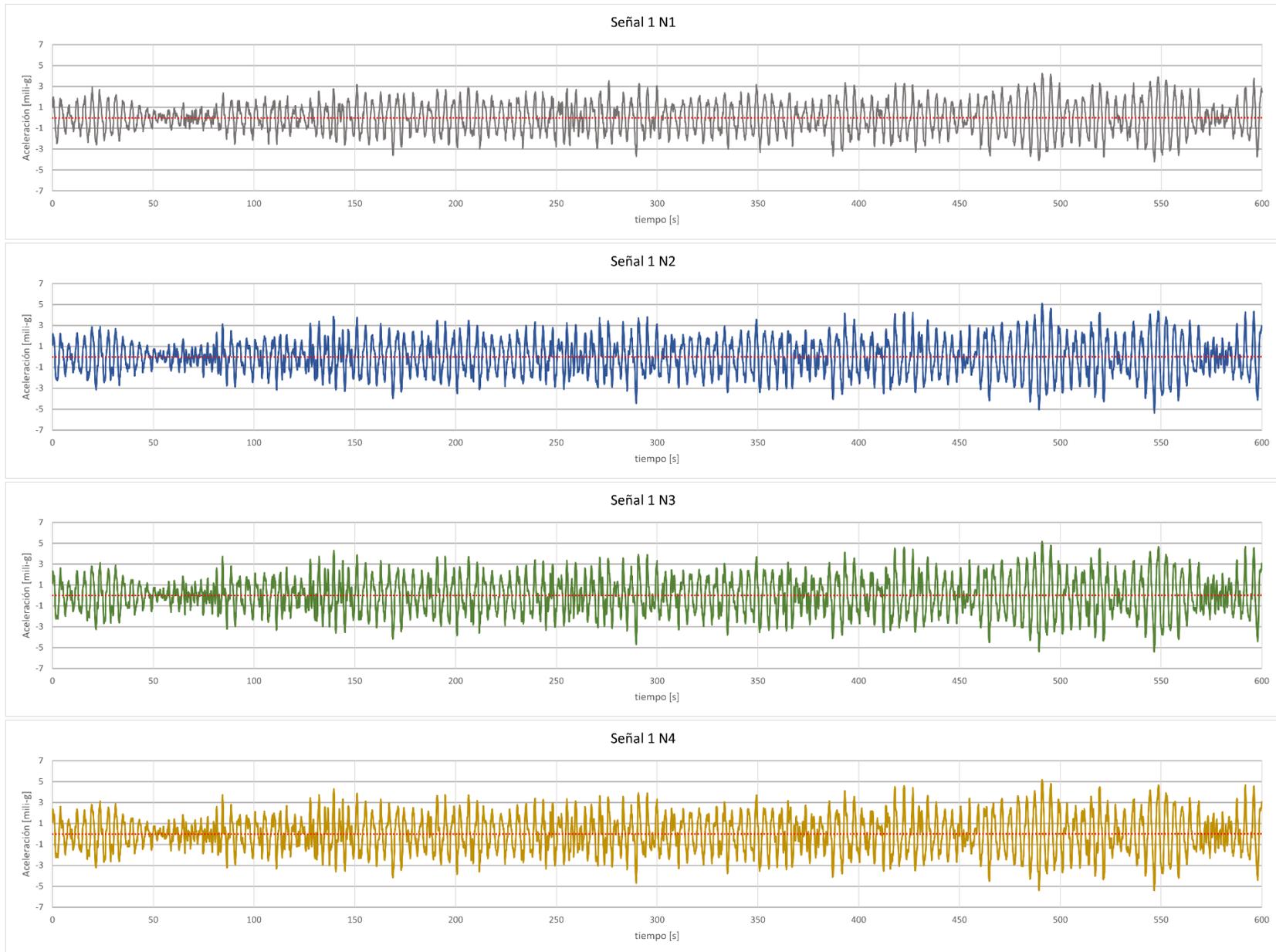
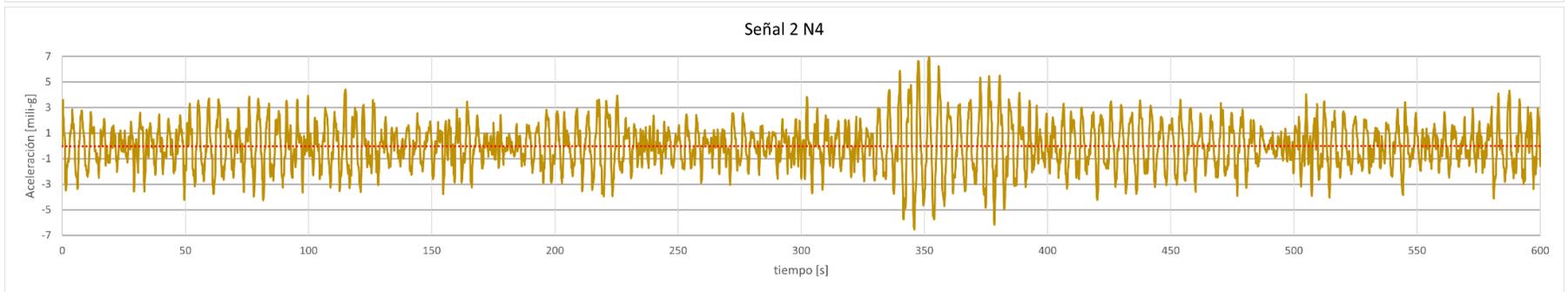
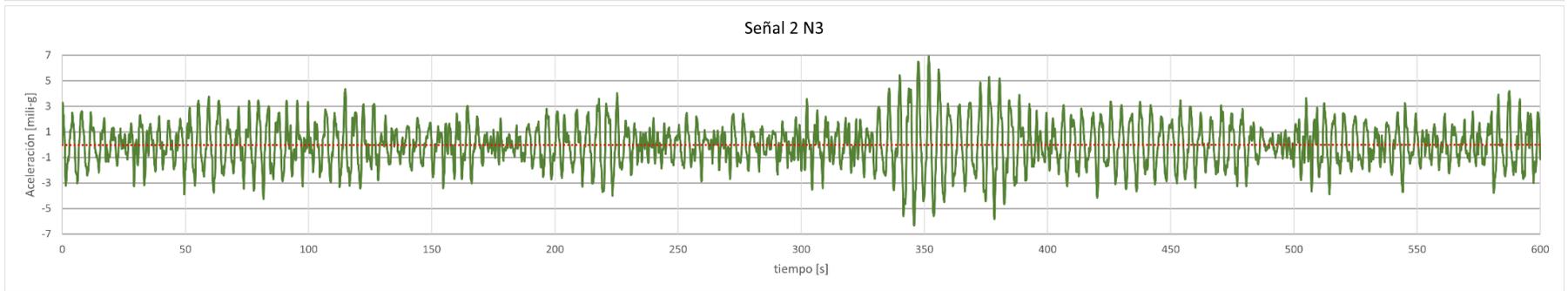
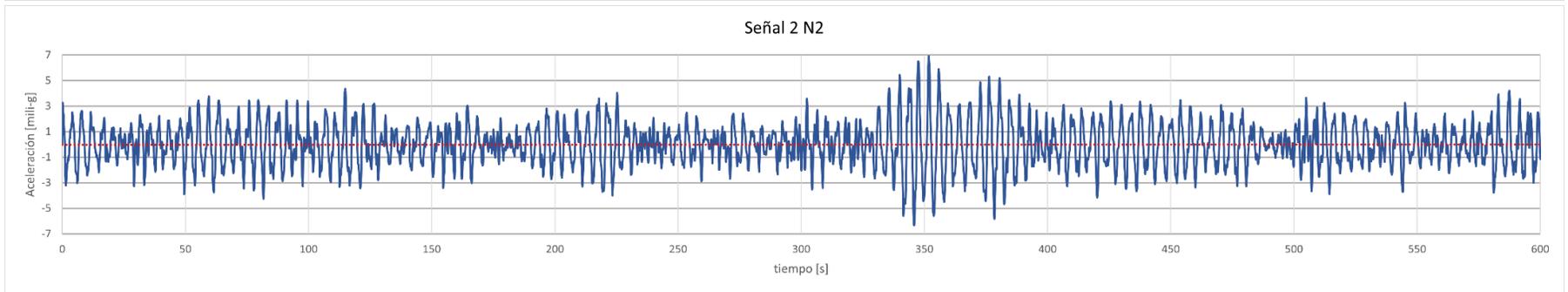
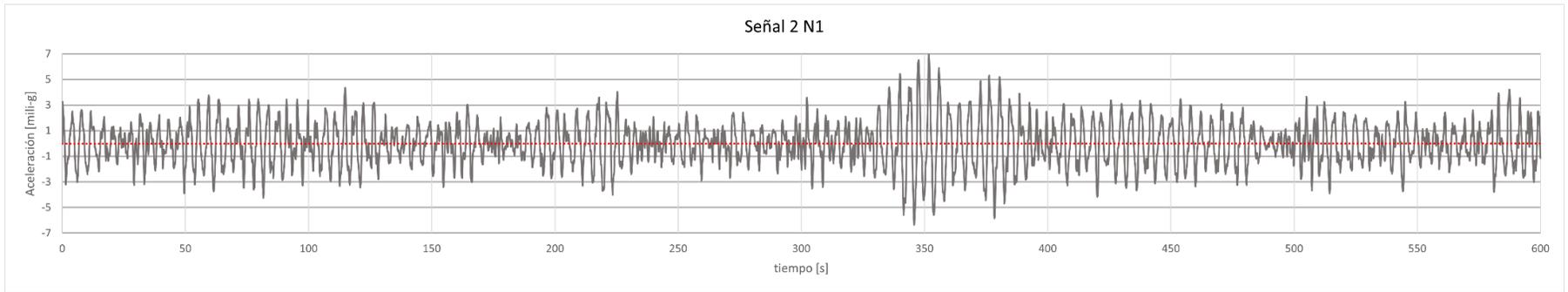
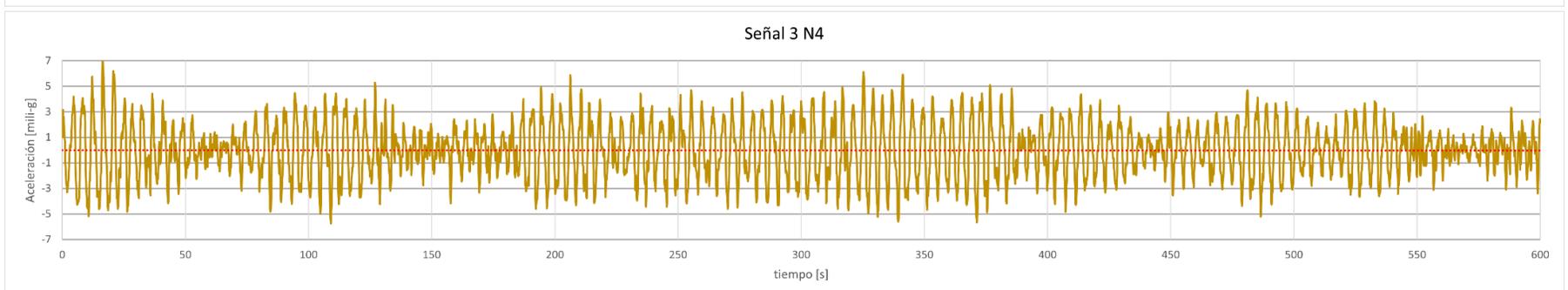
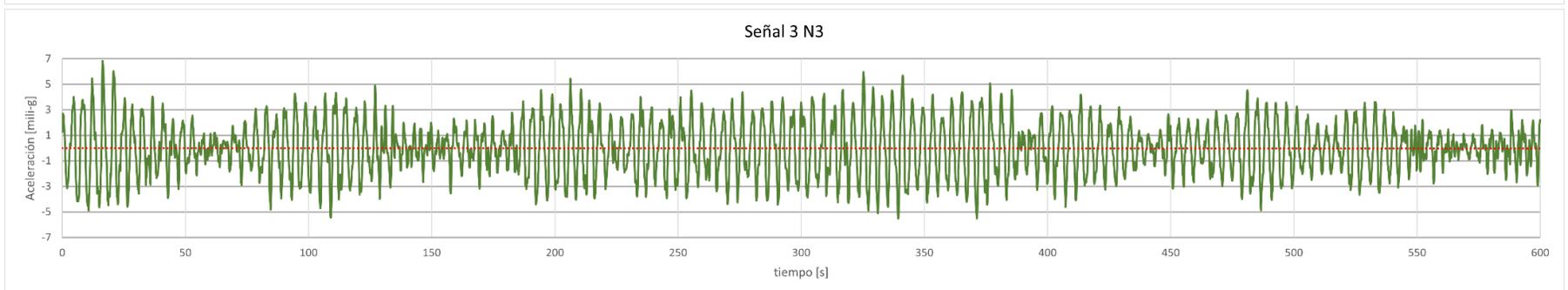
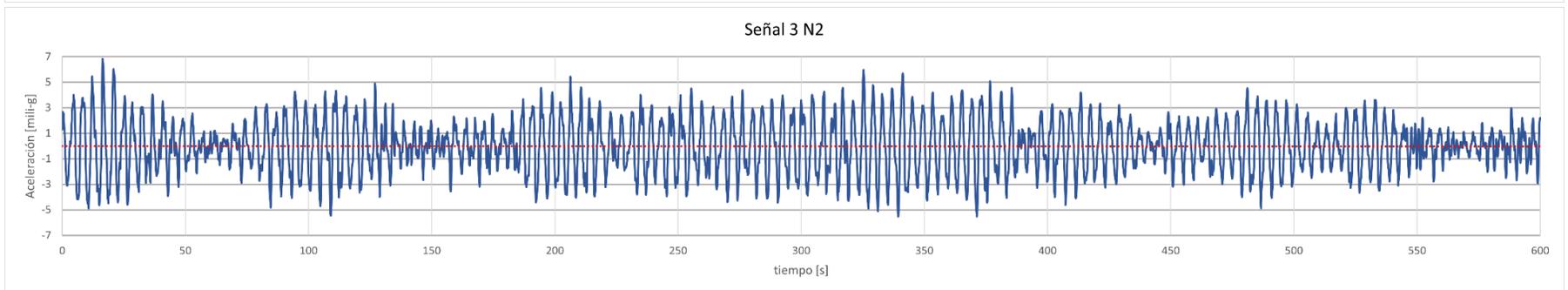
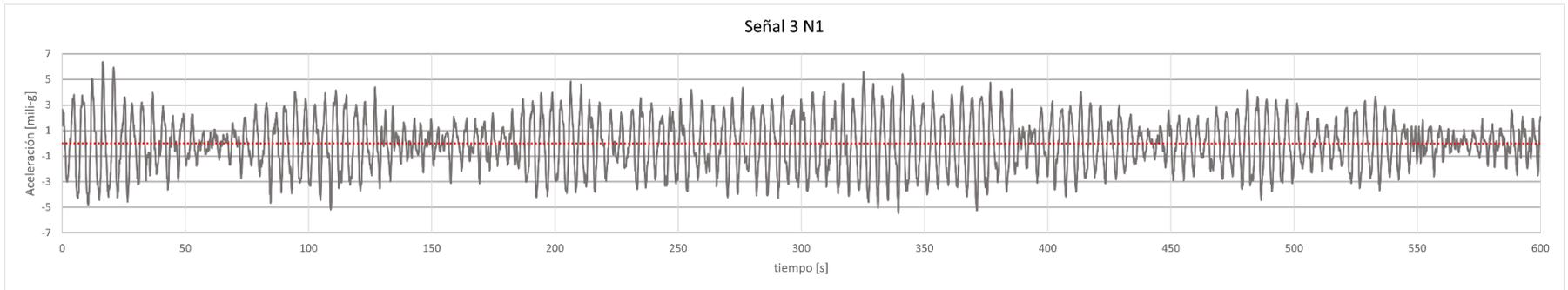
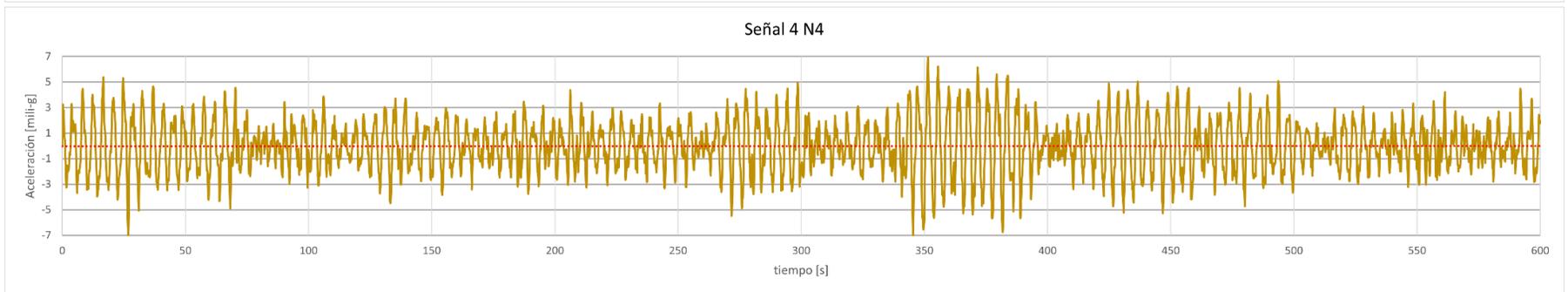
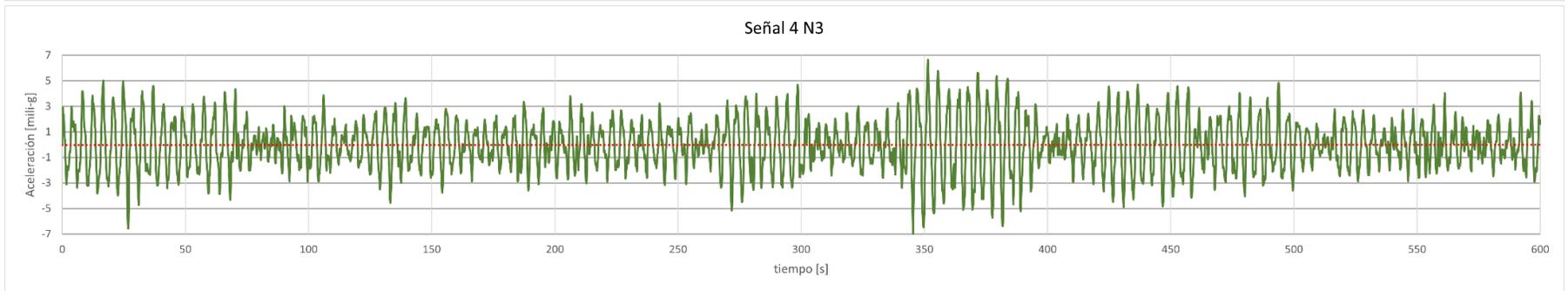
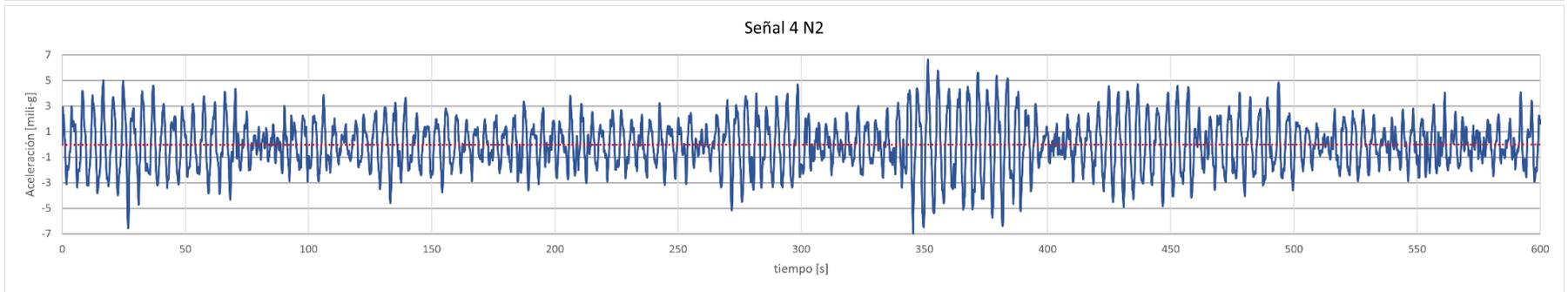
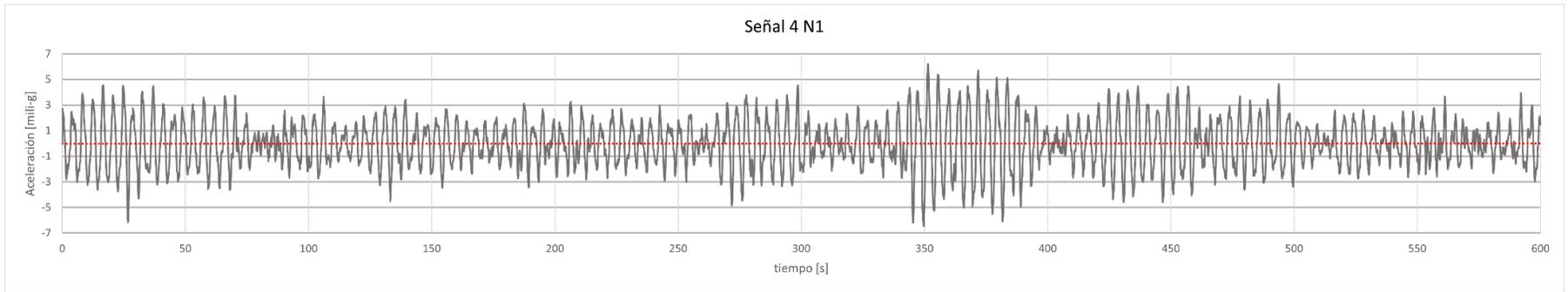


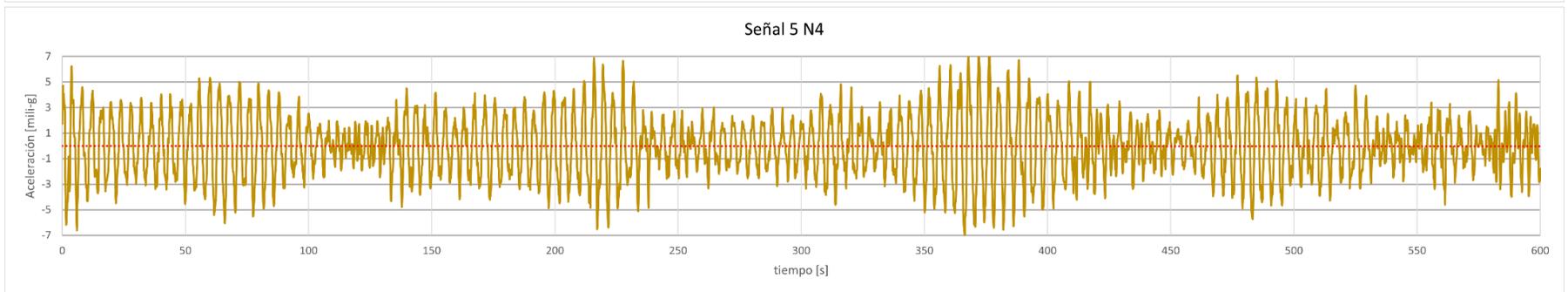
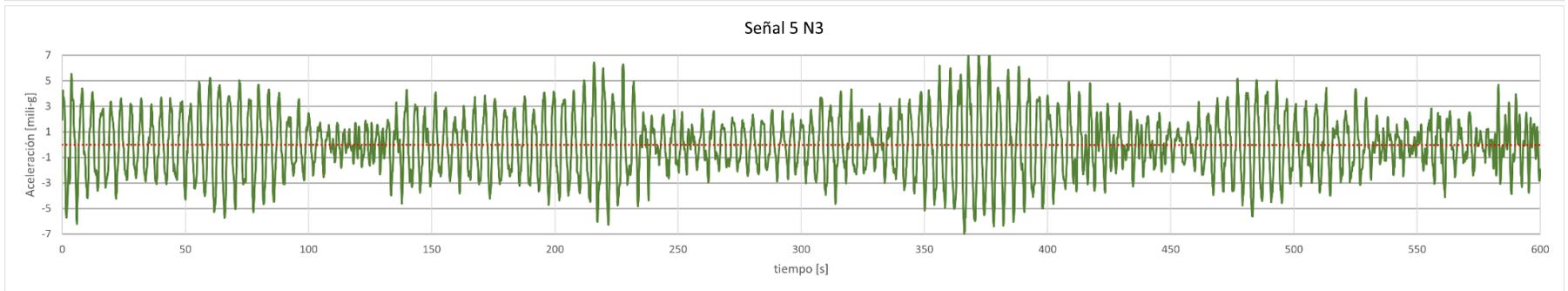
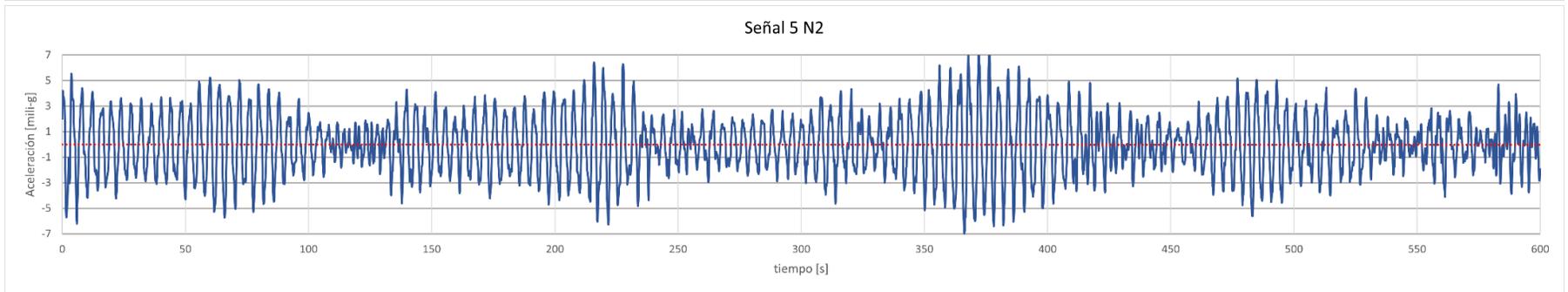
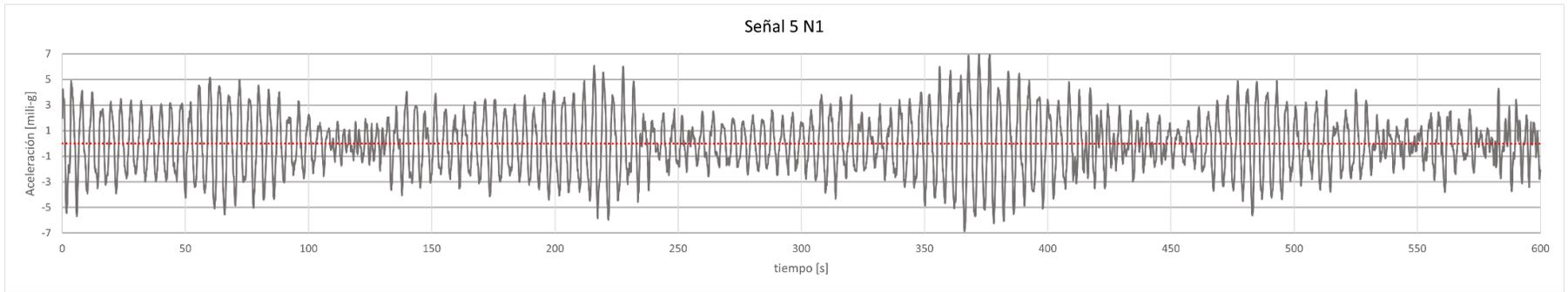
Figura A12. Desplazamientos presentados en los 4 nodos de estudio, en las 10 señales (Elaboración propia).

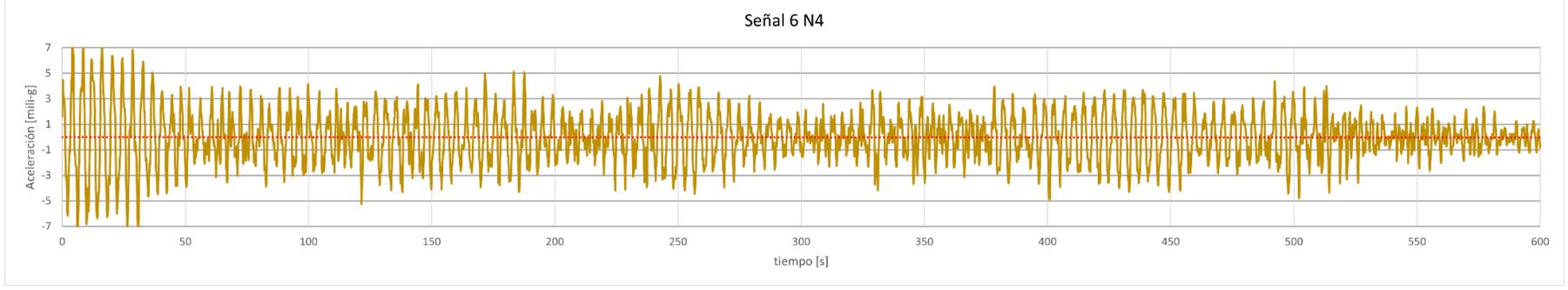
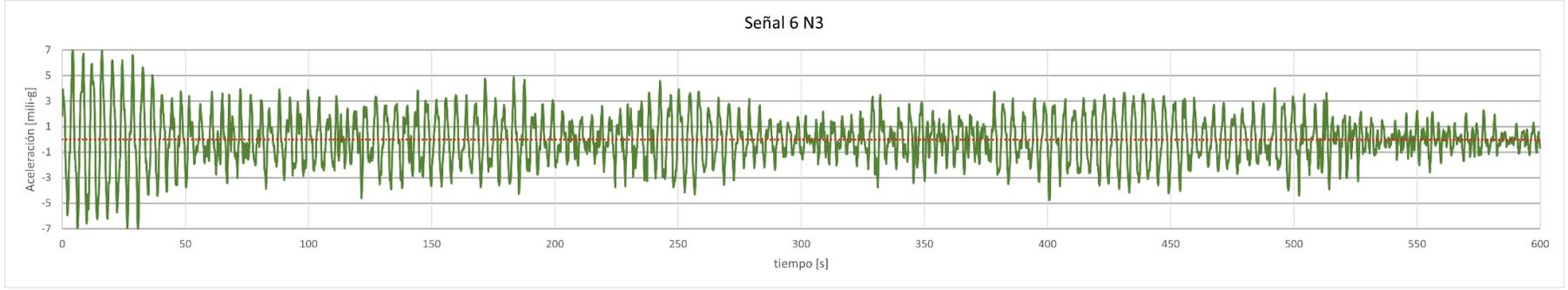
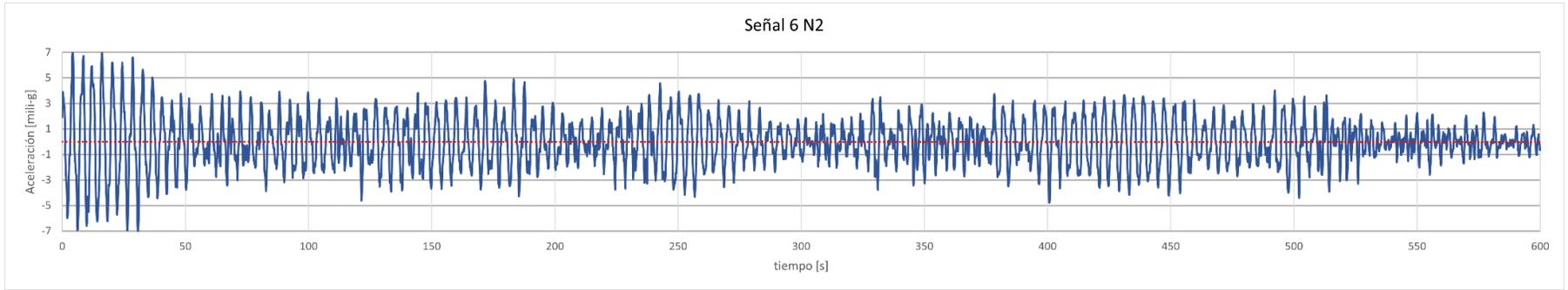
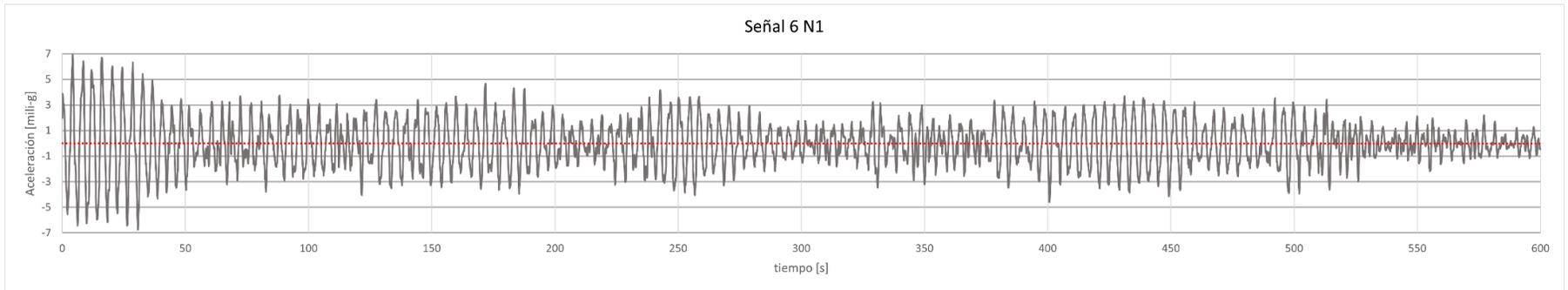


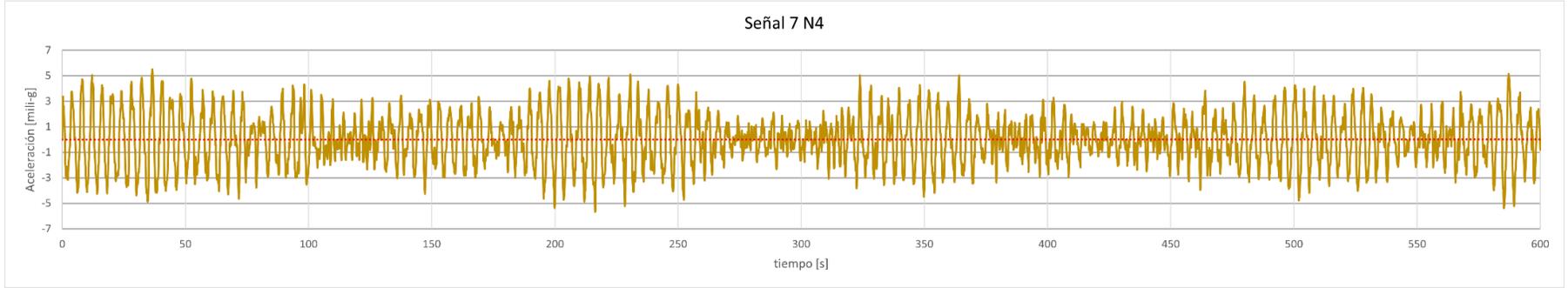
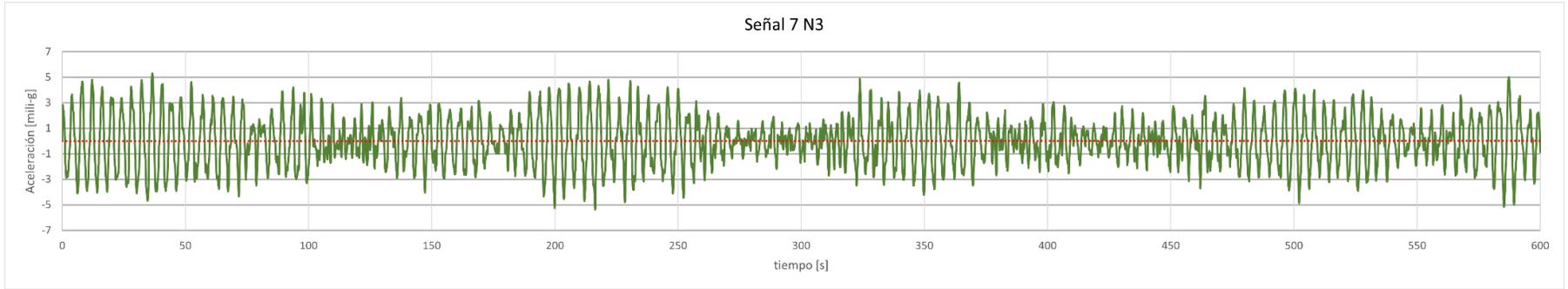
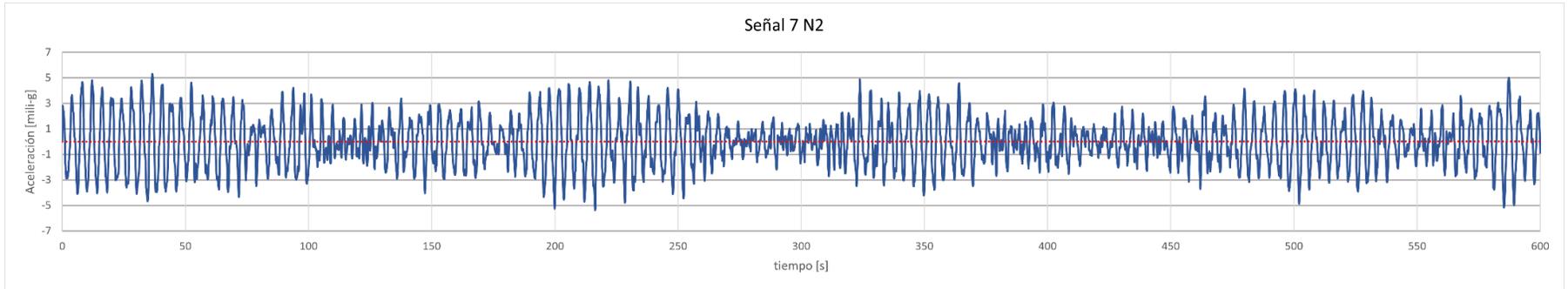
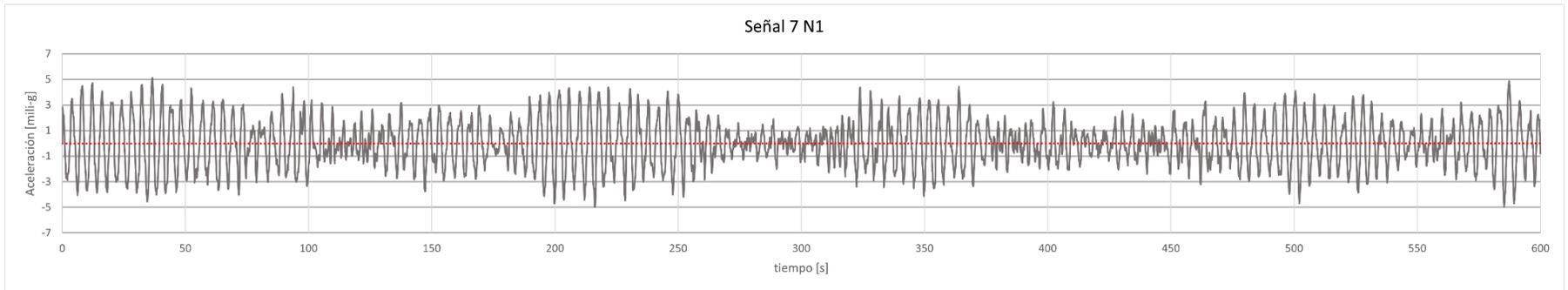


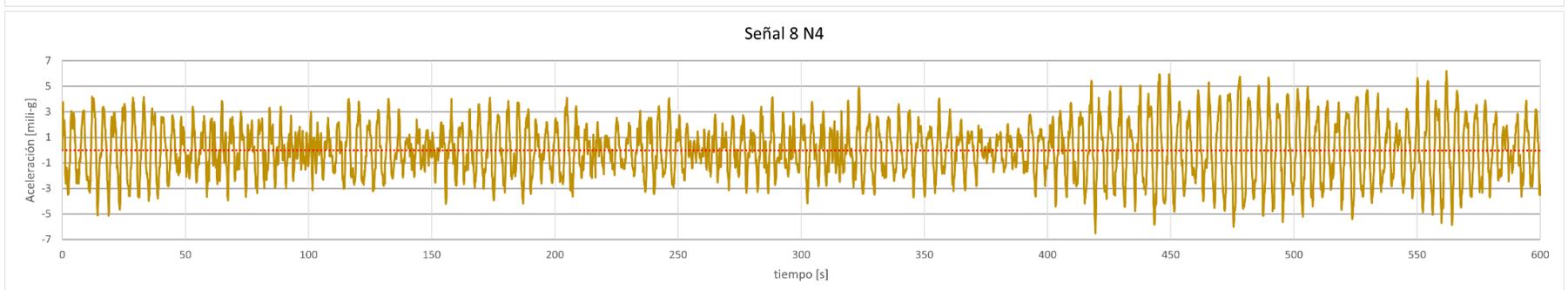
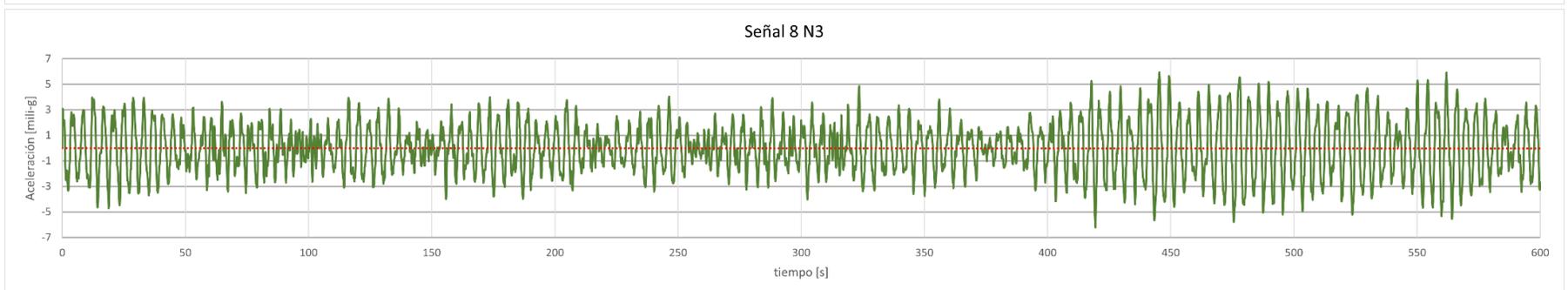
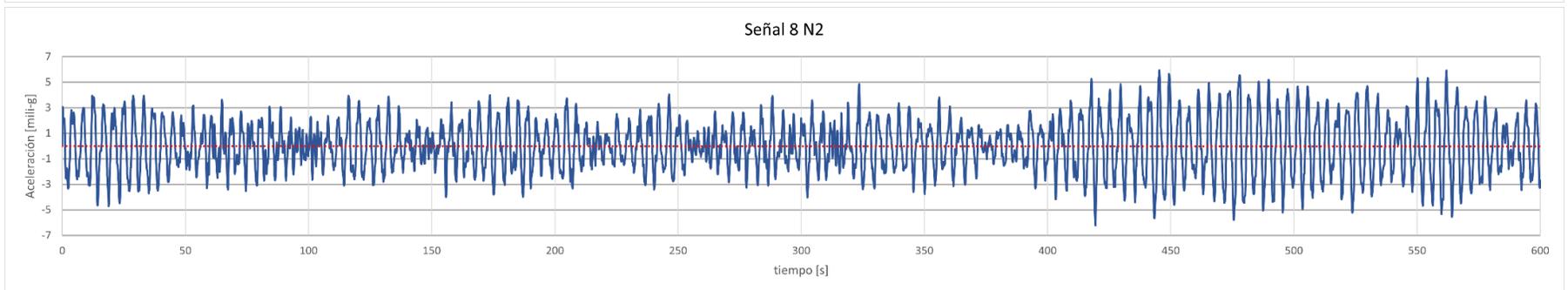
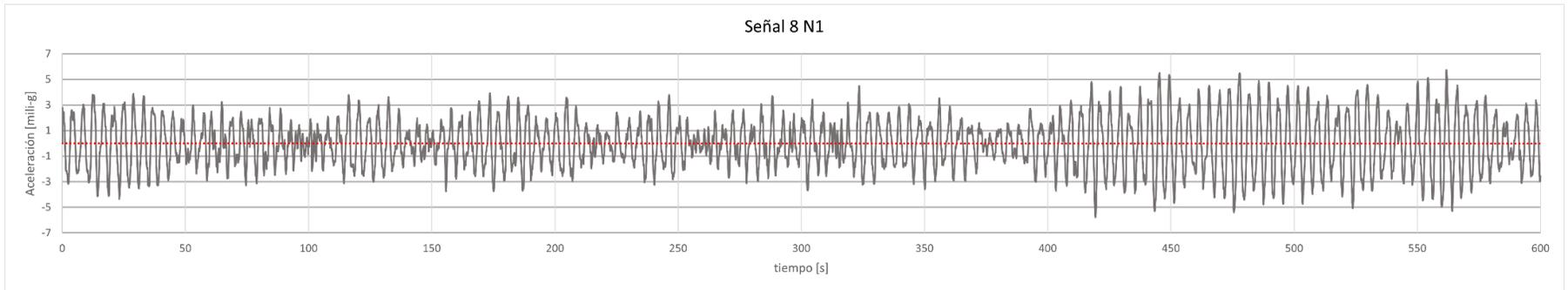


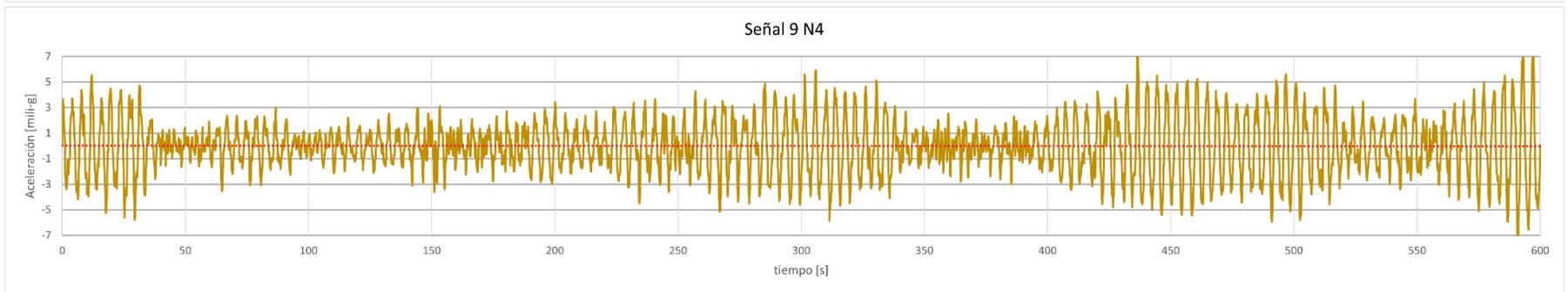
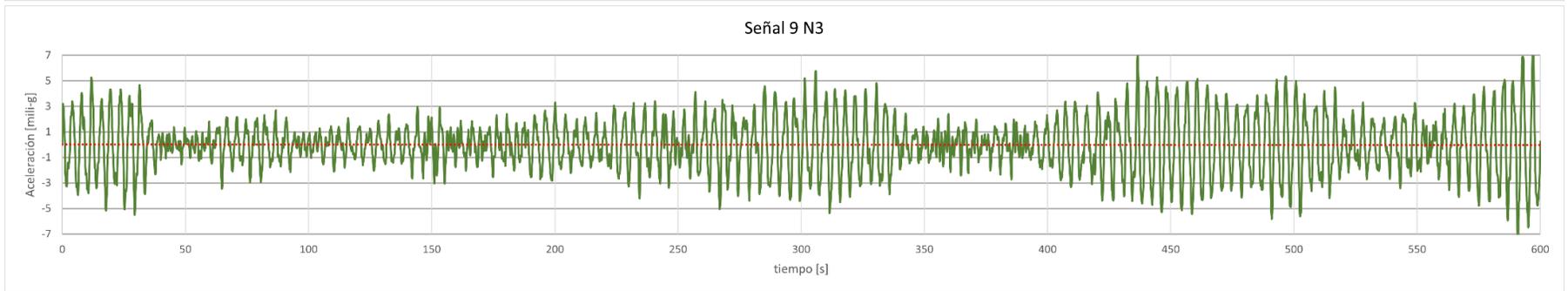
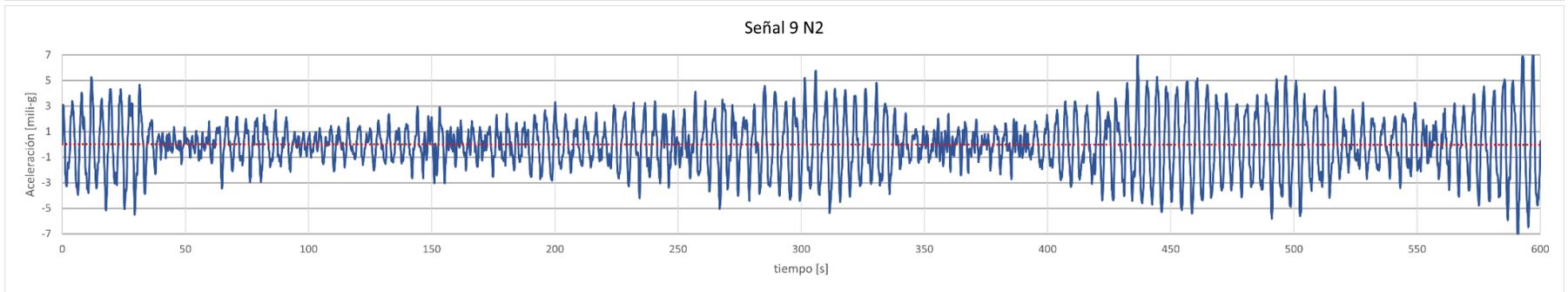
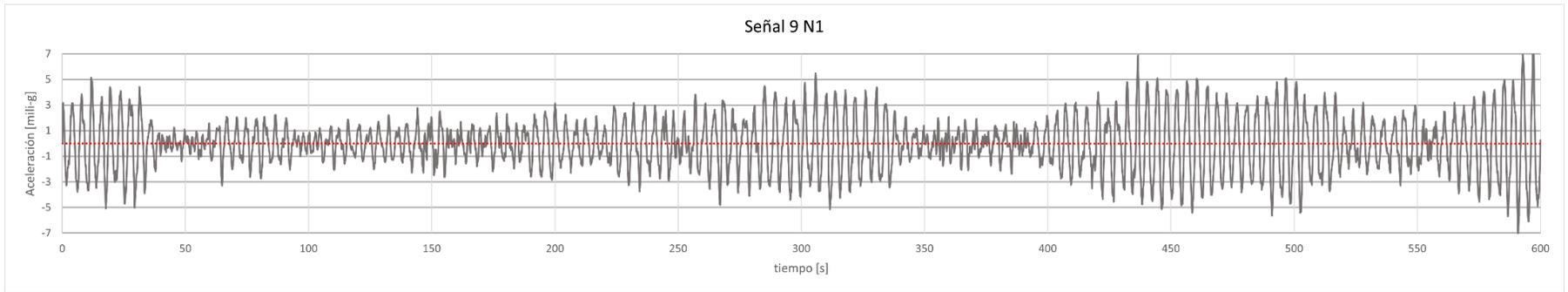












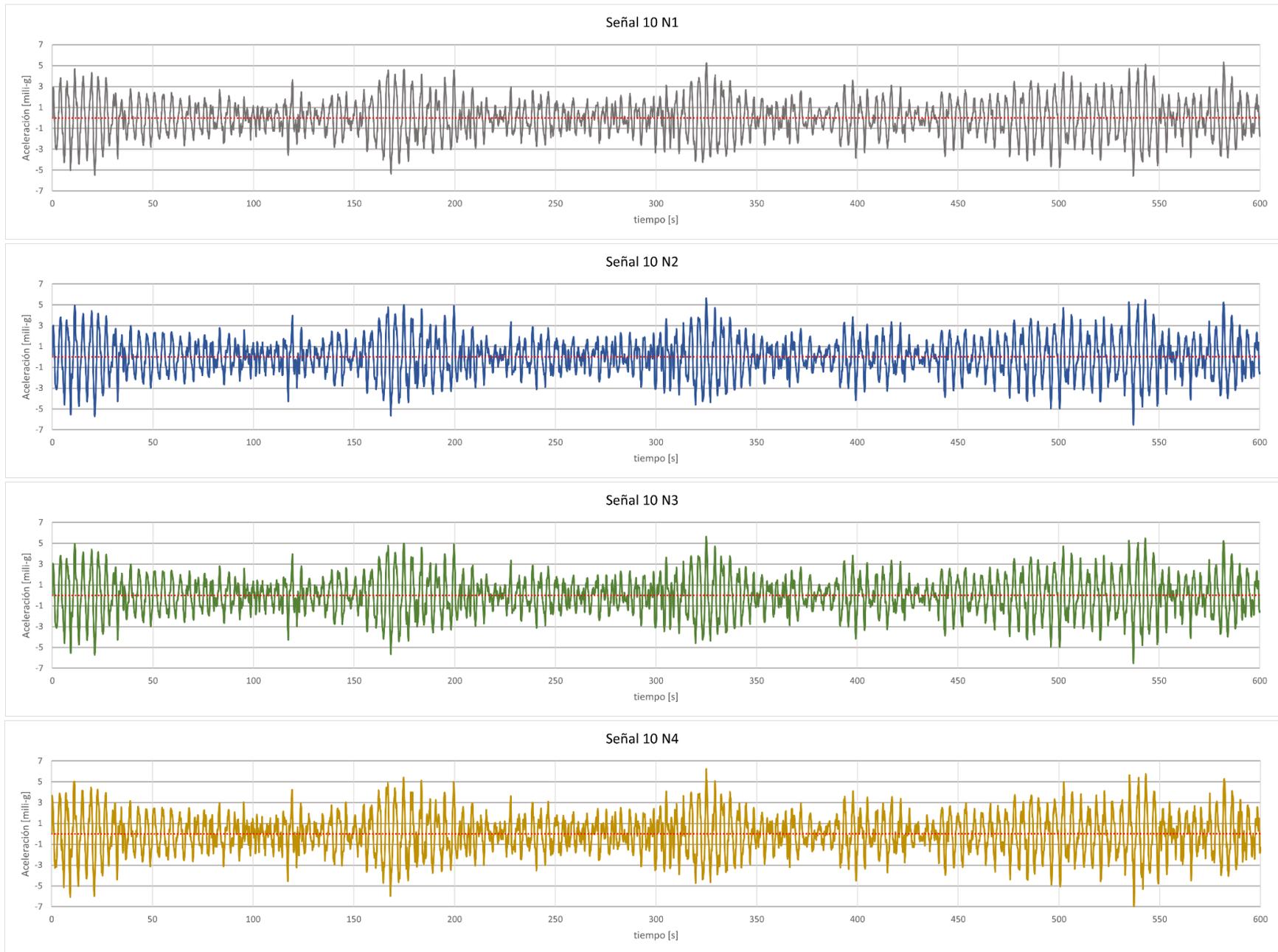


Figura A13. Aceleraciones en los 4 nodos de estudio, durante 600 [s] por señal (Elaboración propia).