



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Calibración de la rigidez del modelo estructural de un
módulo Escuela Técnica de Arquitectura de Valencia por
ajuste de los modos de vibración con acelerómetros.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

AUTOR/A: Sanjuan Martínez, Carlos

Tutor/a: Gil Benso, Enrique

Cotutor/a: Garcia Borràs, Júlia

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Calibración de la rigidez del modelo estructural de un módulo Escuela
Técnica de Arquitectura de Valencia por ajuste de los modos de
vibración con acelerómetros.

TRABAJO FINAL DE GRADO CURSO 2023-2024

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE VALENCIA

ALUMNO: CARLOS SANJUAN MARTÍNEZ

TUTOR: ENRIQUE GIL BENSO

Índice

1. Abstract.
2. Motivación.
Análisis Arquitectónico.
3. Objetivos.
4. Estado del arte.
MEMS
Calibrado del acelerómetro.
Modelos para la simulación estructural.
Parámetros teóricos de la ecuación del movimiento estructural.
Parámetros definidos por la normativa.
5. Metodología y ensayos.
Configuración del dispositivo.
Montaje del sistema.
Excitación de la estructura.
Almacenaje de datos.
Teorema de muestreo de Nyquist.
6. Resultados.
Gráficas de aceleración.
Orientación de los ejes del dispositivo.
Ruido.
Gráficas de aceleración obtenidas.
Otros tipos de gráficas.
7. Análisis de resultados.
Excitación de la estructura.
Gráficas de aceleración esperadas.
8. Conclusiones.
9. Líneas de investigación futuras.
10. Objetivos de desarrollo sostenible.
11. Agradecimientos.
12. Bibliografía.

ABSTRACT

Después del análisis de los modelos estructurales del módulo de acceso a la ETSA (escalera 9) se pretende desarrollar la monitorización de parte de la estructura con el objetivo final de calibrar las rigideces de los elementos estructurales, cerramientos y demás elementos constructivos que dan forma al edificio.

El sistema empleado se basará en acelerómetros idealmente situados en la parte baja de los elementos estructurales, así como en la más alta. Estos dispositivos conectados a internet permiten un envío continuo de datos, a bases de datos temporales, a través de la red para su almacenaje y tratamiento. En este trabajo se desarrolla el sistema a utilizar, así como el tratamiento de los datos y señales que se obtengan.

Para el calibrado será necesario estudiar el periodo propio de vibración real de la estructura, para su obtención la estructura deberá ser excitada para obtener valores representativos de aceleración a través de los acelerómetros instalados.

After the analysis of the structural models of the access module to the ETSA, the monitoring of part of the structure begins to be developed. The final objective is to calibrate the rigidities of the structural elements, enclosures and other construction elements.

The system used will be based on accelerometers ideally located in the lower part of the structural elements, as well as in the highest part. These devices connected to Internet allow continuous sending of data, to temporary databases, through the network for storage and processing. In this work, the system to be used is developed, as well as the processing of the data and signals obtained.

For calibration it will be necessary to study the real vibration period of the structure; for that, the structure must be excited to obtain representative acceleration values through the installed accelerometers.

Realitzat l'anàlisi dels models estructurals del mòdul d'accés a l'ETSA, es procedeix a la monitorització de part de l'estructura amb l'objectiu final de calibrar la rigidesa dels elements estructurals, tancaments y altres elements constructius que formen l'edifici.

El sistema utilitzat es basa en acceleròmetres idealment situats en base i cap del pilar. Aquests dispositius connectats a Internet permeten l'enviament continu de dades, a bases temporals, per al seu emmagatzematge i tractament posterior. En aquest treball es desenvolupa el sistema emprat així com el tractament de les dades i senyals obtingudes.

Pel calibrat, serà necessari estudiar el període fonamental de vibració real de l'estructura, per això l'estructura haurà de rebre alguna excitació per obtenir valors representatius d'acceleració amb els acceleròmetres instal·lats.

MOTIVACIÓN

El objetivo final de este trabajo, o en su caso, de investigaciones posteriores es monitorizar la estructura del módulo recayente a la estación del tranvía de La Carrasca, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPV. Específicamente se pretende calibrar la rigidez real del conjunto estructural y de los elementos constructivos de este módulo estructural que compone el edificio mediante el ajuste del periodo propio de vibración obtenido de acelerómetros [Ilustración 1 a, 1 b, 1 c], con los obtenidos a partir de la simulación estructural.

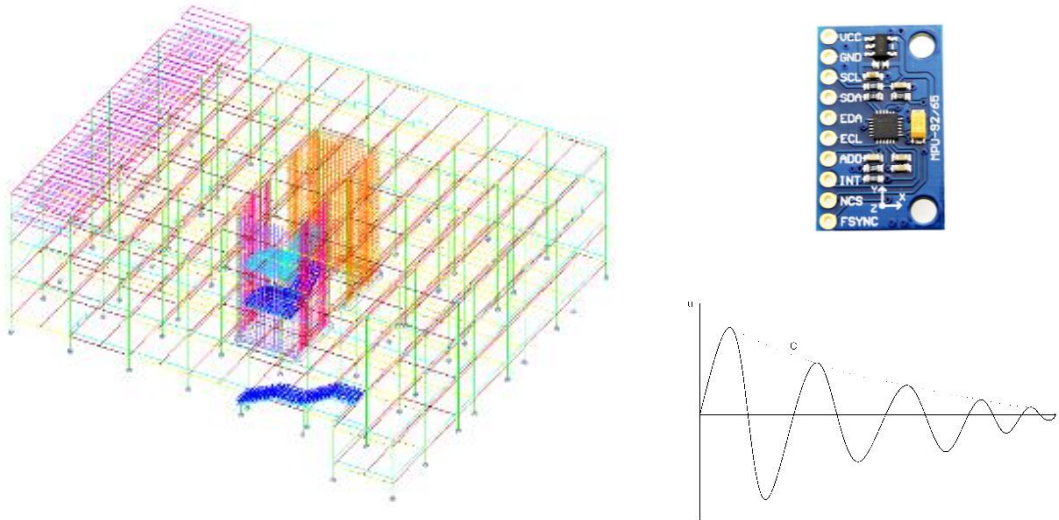


Ilustración 1 a-simulación b-acelerómetro c-gráfica esperadas a utilizar.

El proceso a seguir para la consecución del objetivo final expuesto anteriormente se está formado por diferentes etapas en las que se pretende: la instalación de acelerómetros en el edificio, guardar los datos en bases de datos (que serán servidores web), y analizar los datos para obtener el periodo propio de vibración y el amortiguamiento.

En función de los datos obtenidos de los acelerómetros instalados se medirán el periodo natural de vibración y el amortiguamiento que servirán para ajustar la rigidez de los modelos de simulación por análisis dinámico del total del módulo estructural.

Este ajuste de la rigidez se conseguirá calibrando el módulo elástico del hormigón estructural, y de los otros elementos constructivos, como fachadas y pantallas del núcleo de escalera, que son valores de entrada en los modelos de simulación estructural del edificio, mediante la comparativa de los periodos propios fundamentales de vibración de la simulación con los obtenidos en los acelerómetros que miden la aceleración en cabeza y en base de un pilar del edificio.

En el desarrollo de esta línea de trabajo, se empezó calibrando un acelerómetro de bajo coste, obtenido en los canales de distribución más económicos, de modo que no se garantiza que sea original. Este calibrado se realizó en el año 2013 como Trabajo Final de Grado de Jorge Cardós [1]. Se demostró que si bien el sensor no es un dispositivo profesional tenía una gran sensibilidad y una precisión adecuada.

En el Trabajo de Final de Grado de Jorge Romero [2] se lleva a cabo la simulación de un módulo estructural de la ETSA y se estudian las diferentes rigideces de muros de fachada, muros de núcleos de comunicación vertical, y forjados. Se observó que no teniendo en cuenta los muros, los periodos fundamentales de vibración se desajustaban como es natural.

Posteriormente, al situar cada elemento con su rigidez estimada la forma y modos de vibración ya se aproximaron a lo dispuesto en la normativa sísmica NCSE-02, que se basa en una gran base estadística.

En el trabajo que nos ocupa se está realizando la programación, así como el desarrollo y control de un sistema de acelerómetros MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) que se sitúan en cabeza y base del pilar del mismo módulo estructural del edificio con intención de calibrar la rigidez de los modelos de simulación, siendo este el objetivo final de la investigación.

Este tipo de tecnología (MEMS) integra elementos mecánicos, sensores, actuadores y componentes electrónicos. La aplicación de estos sensores ha sido clave en sectores como el transporte, las telecomunicaciones, etc.

Estas mediciones si no hay una causa externa que saque al edificio de su estado de equilibrio solo recogen valores muy pequeños del orden de ± 3 milésimas de la aceleración de la gravedad, G , para poder excitar el edificio de manera externa se tendría que por ejemplo dejar caer una gran masa cerca de la cimentación, como esto no resulta viable se tendrá que esperar a que exista algún pequeño movimiento sísmico que permita que la señal registrada esté muy por encima de los niveles que se clasifican como ruido para poder analizar tanto el periodo propio de vibración como el amortiguamiento.

Análisis arquitectónico.

El equipo responsable del diseño del Campus y de los edificios [Ilustración 2, 3] fue en primer lugar el Estudio de Arquitectura L35. Se trata de un estudio con gran proyección internacional en el campo de la edificación. La concepción del proyecto parte del uso de prefabricados de hormigón como sistema principal. De modo que resulta en una sencilla puesta en obra de los elementos y se estandarizaba así la fase de diseño.

El equipo ganador del concurso de rehabilitación liderado por D. Vicente Vidal, estudio VVV será el responsable de la posterior remodelación que dan su forma actual. En los aspectos funcionales esta remodelación incluye, desde recuperar los espacios en cota +0.00 m para su uso docente, la redistribución de las clases para optimizar el espacio, la reubicación del Centro de Información Arquitectónica, CIA, en cota +4.00 m, y el Aula Magna entre otros.

Constructivamente, se establece tras peritación estructural que el edificio es capaz de soportar una planta más de altura en aquellas zonas donde había dos. De modo que se generan nuevos espacios mediante la utilización de estructura de perfiles de acero que se superpone a la anterior estructura de hormigón. El espacio resultante será destinado sobre todo a despachos para el profesorado.

La envolvente del edificio se construye mediante un muro de dos hojas sólidas, la interior de ladrillo y la exterior de piedra, trabadas entre sí mediante montantes de piedra. El resultado es un muro continuo terso con aislamiento intermedio.

La cubierta del edificio se ejecuta mediante paneles sándwich sustentados por la estructura metálica.



Ilustración 2 Ubicación ETSA en la UPV.

Leyenda:

- Aulas
- Servicios alumnado
- Servicios administrativos
- Salas exposición/conferencias
- Aseos
- Departamentos
- Física
- Economía
- Estructuras
- Construcción
- Proyectos
- Composición
- Urbanismo
- Expresión Gráfica
- Matemáticas
- Idiomas



P1

Ilustración 3 Módulo de acceso a la ETSA escalera 8.

OBJETIVOS

Se desarrolla la monitorización del edificio contando con los puntos expuestos anteriormente de forma que ya se han calibrado tanto el modelo estructural simulado como el sistema de monitorización.

Se pretende la instalación de uno o dos acelerómetros en un pilar del módulo estructural de acceso a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. En un estadio ideal de investigación se instalaría uno en la cabeza del pilar (planta de cubierta), y otro en la base del pilar (planta baja).

Tras la campaña de ensayos se procesarán los resultados obtenidos. Los resultados son gráficos de aceleración obtenidos para los tres ejes del espacio. Permiten observar los campos de movimiento de la estructura, así como los tiempos de movimiento.

Como objetivo final, de esta investigación o posteriores, se pretende calibrar la rigidez del modelo estructural sometido a ensayos a partir de los resultados obtenidos en laboratorio.

MARCO DE LA INVESTIGACIÓN

Como punto de partida de esta investigación, que forma parte de un extenso trabajo de investigación desarrollado por el equipo formado por Jorge Cardós, Jorge Romero y yo mismo, redactor de este Trabajo Final de Grado, y dirigidos por Enrique Gil Benso cabe contextualizar el trabajo desarrollado.

Anteriormente, se ha llevado a cabo el calibrado de un acelerómetro y se ha realizado un estudio analítico del comportamiento estructural de uno de los módulos que conforman el edificio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPV. Concretamente el módulo estructural que alberga los despachos situados al lado de la Secretaría de la escuela.

Micro Electro-Mechanical Systems.

Si bien desde finales del siglo pasado la tecnología MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) ha sido de gran relevancia en campos como las telecomunicaciones y el transporte, poco a poco se ha ido introduciendo el uso de estos dispositivos en el campo que ocupa a este trabajo, la edificación.

Este tipo de tecnología consiste en dispositivos que funcionan mediante electricidad. El tamaño de los componentes que forman un sistema varía siendo destacable el pequeño tamaño de cada uno de ellos, destacando entre las características del producto final el pequeño tamaño, la eficiencia, rapidez y unos precios baratos de producción.

En un sistema MEMS los circuitos integrados son la parte pensante, esta parte se complementa con funciones de control dando lugar a dispositivos sensores y actuadores. La información detectada por los sensores puede ser de diversos tipos: información resultante de procesos físicos, biológicos, químicos, ópticos, etc. Entre los dispositivos más utilizados se encuentran los acelerómetros, giróscopos...

Estos instrumentos tienen un gran número de aplicaciones, por ejemplo, en dispositivos móviles, el uso de la tecnología MEMS permite que al girar el dispositivo un sensor detecte si la posición de la pantalla ha de ser vertical u horizontal y se produce el giro de la misma en consecuencia.

En edificación si bien es más reciente su uso, sí que se ha dado lugar a alguna investigación al respecto de utilizar este tipo de dispositivos para la monitorización de edificios para diferentes fines.

Por ejemplo, [3], analiza los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados instalando acelerómetros en los muros de San Giacomo en la ciudad de Corfú, Grecia. Las señales de salida provenientes de los acelerómetros son la suma de ondas sinusoidales, con diferente frecuencia y amplitud, afectadas por el ruido que puede superponerse a los componentes útiles. El filtrado de los datos permite obtener las frecuencias naturales propias del edificio.

En el caso de [4] se colocan acelerómetros a lo largo de un elemento estructural longitudinal, cada 20 cm para ser exactos. Se utiliza como excitación del sistema un estímulo externo, concretamente un impacto. En esta investigación no se llega a una relación clara entre los resultados teóricos y los obtenidos en el ensayo, si bien se aclara una vez se han obtenido datos, que la colocación de un solo acelerómetro en un punto clave del elemento puede resultar suficiente para obtener valores de aceleración fiables.

En [5] se lleva a cabo la utilización de sensores MEMS (acelerómetros) para conformar un Modelo de Red Neuronal Artificial (ANN) que utiliza la posición de la viga y las cargas con parámetros de entrada para predecir desplazamientos. Los acelerómetros utilizados en este caso son capaces de medir aceleración, vibración e inclinación.

Los estudios llevados a cabo por [4,5] muestran valores medios de error muy pequeños. En el caso de [5] los resultados para las deformaciones obtenidas de manera experimental y los resultados que se predicen mediante la ANN son próximos, con un error medio de solo el 1%.

Calibrado del acelerómetro.

Tal y como se ha comentado anteriormente, Jorge Cardós [1] lleva a cabo el calibrado de un acelerómetro. Se denomina acelerómetro al dispositivo que es capaz de transformar aceleraciones en magnitudes eléctricas. Existen mecánicos, capacitivos, piezométricos, etc. Los capacitivos son los empleados en esta investigación.

El acelerómetro electromagnético permite detectar fuerzas de aceleración estáticas y dinámicas. La gravedad sería una fuerza estática, mientras vibraciones y movimientos serían fuerzas dinámicas. Como su nombre indica es capaz de realizar mediciones en los tres ejes del espacio.

Los acelerómetros pueden comunicarse a través de un convertidor analógico, digital, o mediante interfaz de conexión modulada por ancho de impulso.

Con una interfaz analógica transmiten un voltaje proporcional a la aceleración en cada eje. Los que cuentan con una interfaz digital pueden comunicarse a través de protocolos de comunicación SPI o I2C, siendo menos susceptibles al ruido que los anteriores. En los acelerómetros con salida modulada por ancho de impulso, las salidas son de onda cuadrada con un periodo conocido, pero un ciclo de trabajo que varía cuando lo hace la aceleración.

De las anteriores interfaces, las más comercializadas son la analógica y la digital. Se empleará en este trabajo la digital. Como inconveniente, es más difícil de utilizar, ya que es más difícil de integrar con su microcontrolador. Como ventaja, los dispositivos digitales son menos susceptibles al ruido que los analógicos.

Son dispositivos de baja potencia. La corriente requerida es de micro o miliamperios, y la tensión de alimentación es de menos de 5 voltios.

La mayoría de los acelerómetros cuentan con un rango de fuerzas mesurables de entre $\pm 1G$ y $\pm 250G$. En esta investigación en particular interesa un acelerómetro capaz de medir pequeñas aceleraciones, para una mayor precisión en la lectura.

El objetivo final de la investigación es obtener mediciones de las aceleraciones que se producen en elementos estructurales de cara a la detección de patologías. Como resultado de las mediciones, se podrá detectar variaciones importantes en el periodo propio de vibración de estos elementos, y posibles fallos.

El sensor utilizado está incluido en un módulo denominado MPU 9250 [Ilustración 4]. Este módulo tiene un giróscopo de tres ejes, un acelerómetro y de un campo magnético, brújula, también en 3D. Así pues, permite medir giros, aceleraciones y orientaciones. El acelerómetro elegido podrá medir aceleraciones de $\pm 2G$. Un valor de aceleración superior a 2G no podrá ser medido ya que indicará que se encuentra en condiciones de saturación.



Ilustración 4 Acelerómetro.

Arduino es una plataforma de hardware libre desarrollada para facilitar el empleo de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consta de una placa con un microprocesador Esp32 de la casa Espressif con diferentes puertos de entrada y salida, a los que se les puede conectar sensores y actuadores, estos microprocesadores están conectados a internet, lo que permite su control remoto y el acceso a bases de datos que se monitorizan desde páginas web.

El software consiste en un entorno de desarrollo que pone en funcionamiento el lenguaje de programación y el cargador de arranque que se ejecuta en la placa.

[Microcontrolador: Circuito integrado programable capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Compuesto por varios bloques funcionales con funciones específicas.

- Unidad central de procesamiento CPU. Interpreta las instrucciones mediante operaciones básicas aritméticas, lógicas y de entrada y salida del sistema.
- Periféricos de entrada y salida. Comunican un sistema de procesamiento de información con el medio externo.
- Memoria. Dispositivo que retiene los datos durante un periodo de tiempo determinado.]

Se desarrolla el trabajo de investigación con Arduino Nano dado su tamaño reducido y prestaciones.

Las distintas aceleraciones se pueden obtener a partir de un dispositivo móvil incorporado a la placa Arduino, un módulo Wifi que permita establecer la conexión entre el dispositivo y el acelerómetro, o a través de un ordenador al cual se incorpora la placa.

El primer caso, es el resultado del prototipo que se estudia. Se diseña un elemento que se incorpora de manera autónoma en el elemento estructural a analizar, para medir las aceleraciones del mismo. Estas aceleraciones son enviadas al dispositivo móvil (o un servidor web de almacenamiento de datos) en tiempo real, permitiendo observar su evolución. El producto requiere de alimentación mediante batería, por ejemplo, y se programa para que se realicen lecturas solo en casos en que se aprecien valores de aceleración fuera de lo normal.

Para el calibrado, sin embargo, se utiliza la conexión con un PC. Mediante el programa Arduino se programan los parámetros necesarios para establecer la comunicación entre los componentes: placa Arduino y acelerómetro; se fija el acelerómetro a una maqueta que permite albergarlo, y a partir de la cual se pueden obtener seis mediciones de aceleración. Se distingue entre lecturas en estado de fábrica y lecturas en estado actual.

El acelerómetro es capaz de medir aceleraciones de 2G donde G es la aceleración de la gravedad adoptada por la fábrica para el acelerómetro. No se conoce el valor de gravedad de fábrica, no obstante, se sabe que el valor de G equivale a 16384 en positivo y negativo. Estos valores se obtienen a partir del código binario, sabiendo que la precisión del acelerómetro es de 15 bits. Así pues 2^{15} bit counts equivalen a 2G.

Así pues, el valor de 1G sería de 16384, y suponiendo que el valor de la gravedad es de 9.8 m/s^2 la precisión del aparato sería de $0,6 \text{ mm/s}^2$.

Para las lecturas del estado actual, se procura obtener valores para las tres direcciones del espacio (x, y, z) y (-x, -y, -z).

Obtenidas estas componentes, se estudian con las componentes del vector gravedad, el módulo y el vector del ruido.

Se obtiene así un vector gravedad no perfectamente paralelo al plano horizontal. Existe así una componente de ruido que no se puede evitar, debido a diferentes aspectos como la vibración del suelo, o del propio sensor. El ruido se calcula mediante diferencia de la media de los módulos de los vectores obtenidos y el módulo del vector estudiado. El ruido, es así una propiedad intrínseca del acelerómetro que puede ser eliminado mediante la aplicación de filtros (Kalman).

A partir de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta que se pueden haber producido desajustes con respecto al estado de fabricación, debido a la manipulación del sensor, estrés térmico, o errores externos del propio sensor, se ha de calcular una matriz de recalibrado.

El calibrado de fábrica puede ser igualmente válido para la mayoría de los estudios, no obstante, con el recalibrado podrán ser obtenidos valores más precisos. Para el recalibrado hay que estudiar:

El valor aparente de la gravedad. Este valor de aceleración varía hasta un 0,7% del valor máximo al mínimo. Debe conocerse entonces el valor preciso de aceleración en el lugar de recalibrado, si se requiere de la obtención de valores lo más precisos posibles.

El microgravímetro de la UPV proporciona un valor de $9'80114362 \text{ m/s}^2$. Se toma este valor de referencia para el proceso de recalibrado. Se considera un valor suficientemente fiable dado que, las aceleraciones producidas en elementos estructurales en caso de situaciones accidentales varían del orden de centésimas (o décimas). En este sentido la precisión que se necesita es del orden de centésimas $0,00a \text{ m/s}^2$.

El calibrado de los parámetros originales de fábrica. Se puede volver a calcular con el objetivo de corregir errores o desviaciones.

La fábrica cuenta con los medios suficientes para poder llevar a cabo un calibrado preciso, obteniendo dos lecturas (x, y, z) y (-x, -y, -z) en las que los tres valores tienen la misma magnitud. Dos lecturas bastarían para resolver el sistema matricial.

Los ángulos de rotación. Estos deben ser seleccionados cuidadosamente para una precisión mayor.

Modelos para la simulación estructural.

En cuanto a los modelos de simulación realizados por Jorge Romero, [2], el primer modelo [Ilustración 5] trata de una estructura de alambre, con la representación de los elementos estructurales como barras, los forjados son representados mediante áreas de reparto, conjunto de barras que reciben las diversas cargas de los elementos constructivos. El modelo se encuentra arriostrado por el núcleo de comunicaciones verticales, así como los muros de termo-arcilla que conforman los núcleos húmedos. Los elementos de fachada no se representan en el modelo, el peso propio de estos elementos se añade como carga sobre el perímetro del modelo.

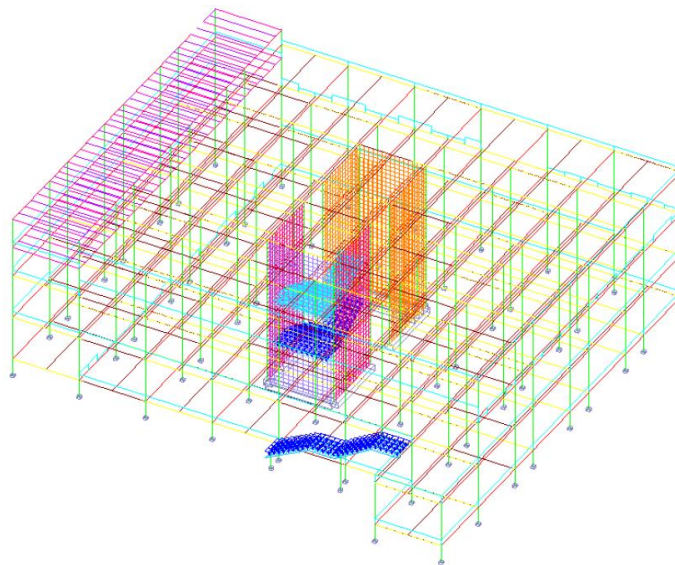


Ilustración 5 Imagen del primer modelo estudiado.

En el segundo modelo [Ilustración 6], se representan los forjados como losas de hormigón formada por elementos finitos. La malla de elementos finitos de 0.15 m de espesor (forjado) se modeliza con un hormigón de menor densidad, para paliar los efectos de representar los forjados como una única losa. El forjado de chapa colaborante tiene un espesor de 0.10 m y el mismo hormigón aplicado en el resto de las plantas.

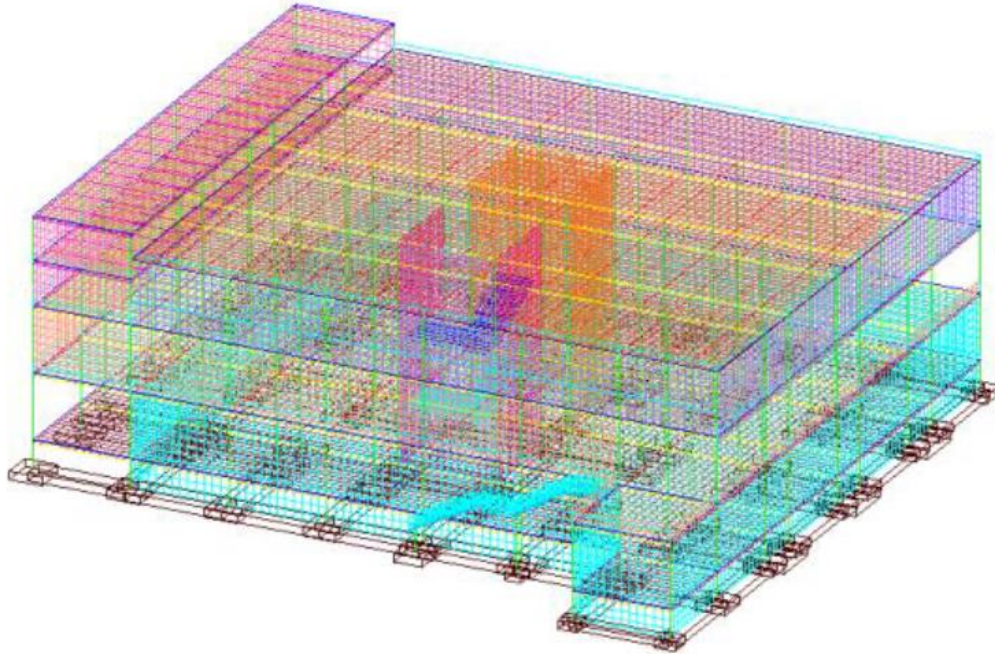


Ilustración 6 Imagen del primer modelo estudiado.

Los cerramientos se representan también como mallas compuestas por elementos finitos, de modo que la estructura no solo se encuentra arriostrada por los núcleos anteriores, sino también por todos los elementos de fábrica que aportan rigidez al conjunto. La malla que conforma las fachadas tiene 0.11 m de espesor y altura completa de cada planta, a excepción de los antepechos de la zona de comunicación de la planta +4.00 m. La materialidad asignada es de ladrillo hueco con una resistencia equivalente a la solución real. Los elementos prefabricados de la solución real están unidos a la estructura del edificio, de forma que todos ellos aportan rigidez a la estructura.

La cimentación se asimila a una cimentación superficial en el modelo.

En cuanto al comportamiento estructural del primer modelo [Ilustración 7], Se observan resultados alejados de la norma ya que, en el primer modo natural de vibración, se genera un esfuerzo de torsión y un periodo excesivamente largo, de 0,70 segundos. Al no representarse los elementos de fachada, y resultar insuficiente el arriostramiento por los núcleos centrales de comunicación vertical, la torsión rompe los pilares y se produce el fallo de la estructura por completo. O sea:

- i. Para el primer modo natural de vibración, torsión y periodo excesivamente largo 0,70 s.
- ii. La torsión rompe los pilares y la estructura falla.
- iii. Para el segundo y tercer modo se observan desplazamientos horizontales.
- iv. Para el cuarto periodo se observa una torsión combinada.

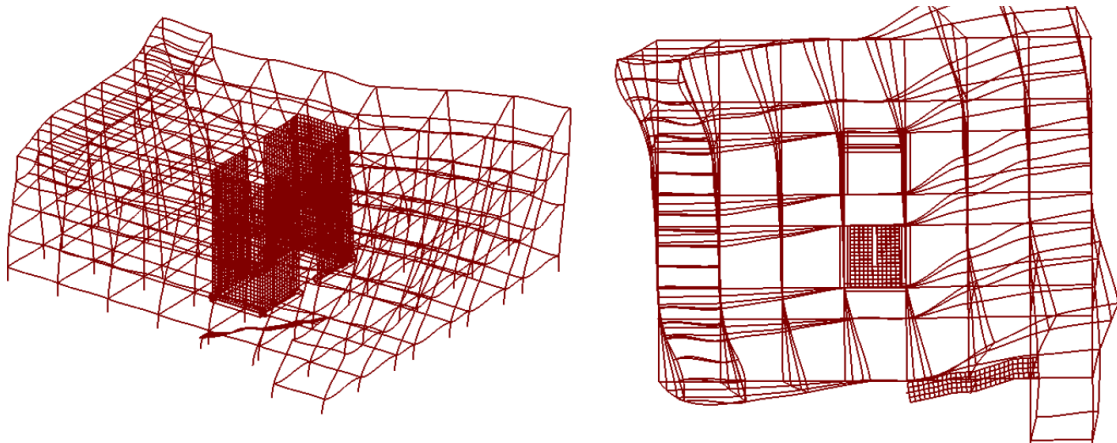


Ilustración 7 Modelo 1: Primer modo de vibración.

Sin embargo, para el segundo modelo estudiado se observa que al arriostrar, el modelo mediante el núcleo central, así como con los elementos de fachada, con una rigidez equivalente al edificio construido, el funcionamiento de la estructura adquiere modos de vibración dentro de la normalidad [Ilustración 8]. Es decir, el esfuerzo soportado en los diferentes modos de vibración se asemeja a la representación de los mismos realizada en la NCSE-02.

El modo natural de vibración experimenta un desplazamiento horizontal en X, mientras el segundo y el tercer modo de vibración experimentan un desplazamiento vertical en Y, y un movimiento de torsión respectivamente.

El periodo fundamental de vibración es de 0.18931 segundos. Así en este caso:

- i. Modos de vibración dentro de la normalidad, se asemejan a los representados en la NCSE-02.
- ii. El periodo de vibración para cada modo se reduce y se acerca a los valores calculados a mano.
- iii. Para el primer y segundo modo se observan desplazamientos, para el tercer modo de vibración torsión.
- iv. Al verse aumentada la rigidez, la estructura no falla.

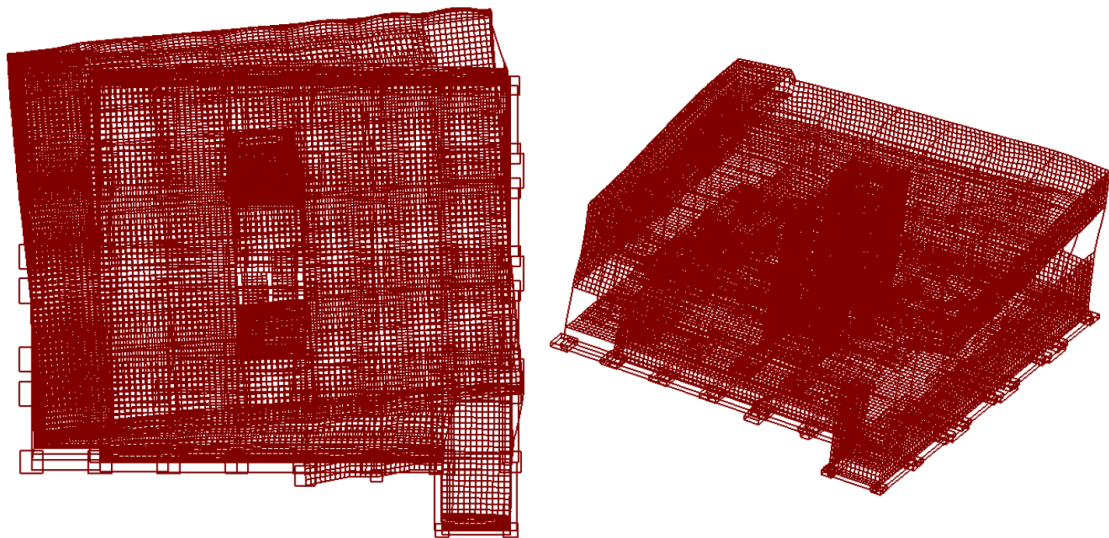


Ilustración 8 Modelo 2: Primer modo de vibración.

En este modelado, ningún elemento estructural que forma la estructura falla. Resulta así favorable la peritación de vigas, zunchos y pilares. Se ha visto reducido el periodo de vibración, y se ha aumentado la rigidez del modelo.

MODO DE VIBRACIÓN	MODELO 1	MODELO 2
Primer modo (Periodo)	0.70 s	0.1893 s
Primer modo (Desplazamiento)	Torsión	Desplazamiento horizontal
Segundo modo (Periodo)	0.643 s	0.1738 s
Segundo modo (Desplazamiento)	Desplazamiento lateral	Desplazamiento vertical
Tercer modo (Periodo)	0.59 s	0.1556 s
Tercer modo (Desplazamiento)	Desplazamiento lateral	Torsión
Cuarto modo (Periodo)	0.564 s	
Cuarto modo (Desplazamiento)	Torsión combinada	

Tabla 1 Resultados para T (Periodo de vibración).

Monitorización de los pilares 39, 40, 41:

Se colocan galgas extensométricas en los tres pilares. Monitorización mediante IOT, interconexión de dispositivos a través de una red. Sensores miden tensiones y deformaciones debidas a compresión y tracción de los pilares. Se convierten los valores de tensión en cambios de resistencias eléctricas, medibles y cuantificables.

Parámetros teóricos de la ecuación del movimiento estructural

La dinámica estructural es una rama de la ingeniería que se ocupa del comportamiento de las estructuras sometidas a cargas dinámicas, es decir, cargas que varían con el tiempo. Este campo es crucial para entender cómo responden las edificaciones a fuerzas como el viento, terremotos, tráfico, y otros eventos que pueden inducir vibraciones.

En una estructura se pueden observar dos tipos de vibraciones fundamentalmente:

Vibraciones libres: Ocurren cuando una estructura vibra sin la influencia de fuerzas externas después de haber sido perturbada. Estas vibraciones son gobernadas por las propiedades inherentes de la estructura, como la rigidez y la masa.

En sistemas no amortiguados la ecuación que describe una vibración libre viene dada por la fórmula:

$$ma(t) + ku(t) = 0$$

Con unas condiciones iniciales determinadas por $u(0)$. De manera que el sistema de resuelve:

$$u(t) = u(0) \cos(\omega t) + \frac{v(0)}{\omega} \text{sen}(\omega t)$$

La solución de esta ecuación diferencial viene dada por un desplazamiento y una velocidad iniciales. La razón seno y coseno dependen del tiempo.

La frecuencia natural del sistema se define como la raíz del cociente de la rigidez entre la masa del sistema. De manera que al aumentar la masa disminuye la frecuencia y aumenta el periodo de vibración; y al aumentar la rigidez, aumenta la frecuencia y se disminuye el periodo de vibración, determinado por la expresión que aparece en el Gráfico 1.

$$T = 2\pi/\omega$$

Vibraciones forzadas: Suceden cuando una estructura está sometida a fuerzas externas periódicas. Estas fuerzas pueden ser armónicas (por ejemplo, maquinaria operativa) o aleatorias (por ejemplo, terremotos).

Cuando las vibraciones tienden a disminuir a medida que pasa el tiempo, es decir, cuando la Amplitud de onda tiende a ser más pequeña, estamos ante un sistema que disipa la energía. En estos sistemas aparece el concepto de amortiguación definido en apartados anteriores.

En realidad, todas las estructuras disipan energía al entrar en movimiento (vibrar). La materialidad de la estructura va a determinar en buena parte esta capacidad de la estructura de disipar la energía.

En este caso la ecuación que define la vibración en un sistema de este tipo viene dada por la expresión:

$$ma(t) + cv(t) + ku(t) = 0$$

La Ley de Newton establece que estas tres fuerzas, que aparecen en la fórmula, están en equilibrio. La vibración sigue dependiendo de unas condiciones iniciales $u(0)$.

Por otra parte, es importante mencionar que en el movimiento armónico simple (un grado de libertad) el periodo de vibración depende exclusivamente de la masa y la constante elástica.

$$T_n = 2\pi\left[\frac{m}{k}\right]^{1/2}$$

El comportamiento del objeto responde a una ecuación diferencial.

En edificación se entiende por periodo fundamental la manera natural en que se mueve dicha estructura. El modo de vibración es entonces, específico de cada estructura. Se puede definir como el tiempo que tarda la estructura en realizar una vibración completa en la forma en la que moviliza la mayor parte de su masa, siendo el modo de vibración con el periodo más largo.

Por ello, el periodo fundamental de vibración desempeña un papel importante dentro del diseño de la estructura de un edificio para su resistencia a sismo. La respuesta dinámica de una edificación durante un sismo depende de la relación entre este periodo de vibración y el periodo de las ondas sísmicas. En la medida que su relación se acerque a la unidad (o sea que ambos periodos alcancen valores similares) la edificación entra en resonancia, aumentando la deformaciones y aceleraciones en el edificio y en consecuencia, aumentan también los esfuerzos en los elementos estructurales.

Parámetros definidos por la normativa.

Las normativas vigentes definen actualmente conceptos de gran relevancia como puede ser el periodo propio de vibración de los edificios.

Estas se basan en grandes bases de datos estadísticas que cuentan con resultados obtenidos en diferentes zonas del mundo.

El periodo fundamental de vibración se define en la NCSE-02 [6], donde:

Para edificios con muros de fábrica de ladrillo o bloques:

$$Tf = 0.06H\left[\frac{H}{2L + H}\right]^{\frac{1}{2}}/[L]^{\frac{1}{2}}$$

Para edificios con pórticos de hormigón armado sin la colaboración de pantallas rigidizadoras:

$$Tf = 0,09n$$

Para edificios con pórticos de hormigón armado con la colaboración de pantallas rigidizadoras:

$$Tf = 0.07n\left[\frac{H}{B + H}\right]^{\frac{1}{2}}$$

Para edificios con pórticos rígidos de acero laminado:

$$Tf = 0,11n$$

Para edificios con pórticos de acero laminado con planos triangulados resistentes:

$$Tf = 0.085n\left[\frac{H}{B + H}\right]^{\frac{1}{2}}$$

El concepto de amortiguación se define como la disipación de energía que la estructura realiza principalmente a causa de la fricción interna de los materiales y componentes de la construcción, reduciéndose las oscilaciones.

En vibración libre, se define como amortiguación crítica aquella para la cual el sistema, después de desplazado, volvería a su posición de reposo sin oscilar. Su valor responde a:

$$Ccr = 2[km]^{\frac{1}{2}}$$

Se puede establecer una constante de amortiguación que se represente como una fracción de la amortiguación crítica.

$$\zeta = c/2[km]^{\frac{1}{2}}$$

La relación de la frecuencia de vibración inducida y la natural del sistema, estudiadas para diferentes valores de amortiguación y en relación con un factor de amplificación de los desplazamientos, se entiende como resonancia.

METODOLOGÍA Y ENSAYOS

Configuración del dispositivo.

Como se ha reflejado anteriormente, el sensor utilizado está incluido en un módulo denominado MPU 9250 que consta de un giróscopo de tres ejes, un acelerómetro triaxial y un campo magnético triaxial. Y que, por tanto, permite valores precisos de giros, aceleraciones y orientaciones en los tres ejes del espacio.

Se ha programado el dispositivo de medición elegido a través de la herramienta VS Code, que es un editor de código fuente desarrollado por Microsoft. Mediante el uso de este software se han definido los tiempos durante los que el sensor recoge datos, así como los tiempos que utiliza el dispositivo en enviarlos a la plataforma de almacenamiento (de modo que se envía una señal cada 3 segundos a partir de una medición de casi 2). Utilizando esta herramienta se ha podido configurar el acelerómetro para que mediante la conexión Wifi a la red UPV-PSK envíe la información recogida a dicha plataforma (InfluxDB) que se explica en los próximos párrafos.

Para el correcto envío de datos a través de la red, se solicitó a los informáticos de la ETSA que se registraran los acelerómetros a utilizar con dos WPA. De modo que una vez registrados y conectados pueden enviar la información al servidor.

Se define también en VS Code el servidor y dirección a la que se enviarán los datos para ser almacenados y posteriormente procesados.

```
#define INFLUXDB_TOKEN "_B4HkLrUixX-  
jvUcHKaKMG9WaOwwaJovLQBYmBfBEki9zMqgljetyJWXL7DTWO5kZk1Alfn-Y1JEqeAtB12LeQ=="  
  
#define INFLUXDB_ORG "d8628e61f9d63749"  
  
#define INFLUXDB_BUCKET "Carlos"
```

Montaje del sistema.

Tras el calibrado del sensor [2], el proceso de configuración del mismo para su uso final, y pruebas pertinentes para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, se procede a la instalación del sensor en el pilar objeto de análisis [Ilustración 9 a, 9 b, 9 c]. Se pretende fijar el sensor lo más próximo a la cabeza del pilar objeto de estudio. Previamente, se han realizado pruebas con el sensor fijado en diferentes superficies, con tal de comprobar su correcto funcionamiento a la hora de realizar las mediciones.

Para el funcionamiento del sensor una vez fijado al elemento estructural, se requiere de la instalación provisional de un sistema de alimentación externa, aunque lo ideal sería mantenerlo siempre conectado a la corriente.

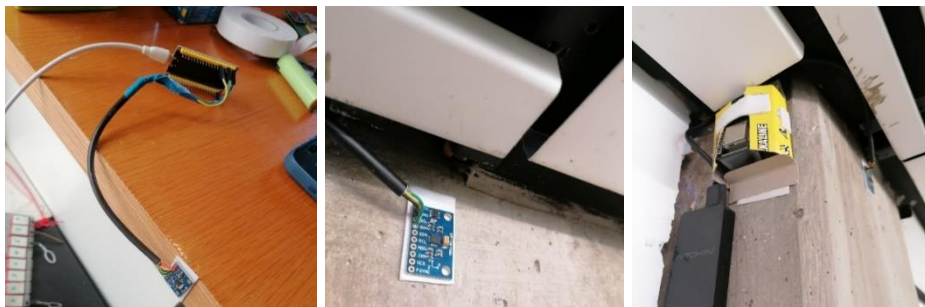


Ilustración 9 a- Prueba del Sistema b- Fijación del sensor c- Instalación provisional.

Excitación de la estructura.

Para la obtención de resultados se precisa de la excitación de la estructura. En una investigación dotada con más medios, la excitación podría darse mediante la estimulación externa del edificio. Por ejemplo, provocando la vibración de la estructura al dejar caer un peso considerable sobre el terreno próximo a la zona objeto de estudio.

Así pues, para esta investigación una vez instalado el sensor, se espera que algún microsismo sea suficiente para la excitación de la estructura. Se espera obtener una señal muy por encima de los valores que más adelante se definen como ruido a partir de las gráficas obtenidas.

El sensor está permanentemente enviado datos al servidor web que los almacena, estos datos oscilan entre valores que no suelen superar los milavos de 1G, por lo que se puede decir que la señal comprendida entre estos valores, en principio, sería la señal ruido.

Almacenaje de datos.

El almacenaje de los datos se lleva a cabo mediante el servidor web InfluxDB [Ilustración 10]. Se trata de una base de datos temporales que permite almacenar y recuperar datos obtenidos de series temporales como son las operaciones de monitorización o análisis de datos de sensores IoT.

Los resultados se consultan a través de una estructura de datos compuesta por mediciones, series y puntos. Cada uno de los puntos supone un par de valor clave llamado campo y una marca de tiempo. Cuando se agrupan un conjunto de campos se forma una serie. Las series dan forma a la medición. Los valores pueden ser números enteros de 64 bits. Los puntos se definen a partir de su tiempo de toma del dato.

Para consultar los resultados seleccionaremos en el menú nuestro conjunto de datos, *bucket*, y a continuación bastará con seleccionar la medida que queremos obtener a partir del sensor MPU, A [Ilustración 11, 12, 13]. Se permite ajustar el periodo de tiempo del cual se quiere visualizar los datos, así como ajustar las unidades de este.

Los datos registrados se pueden consultar a partir de tablas donde las aceleraciones en los ejes X, Y, Z, quedan clasificados por tiempo o mediante gráficas. Pudiendo obtener, además, los valores medios de la aceleración en cada eje, las desviaciones estándar o la temperatura del sensor, por ejemplo.

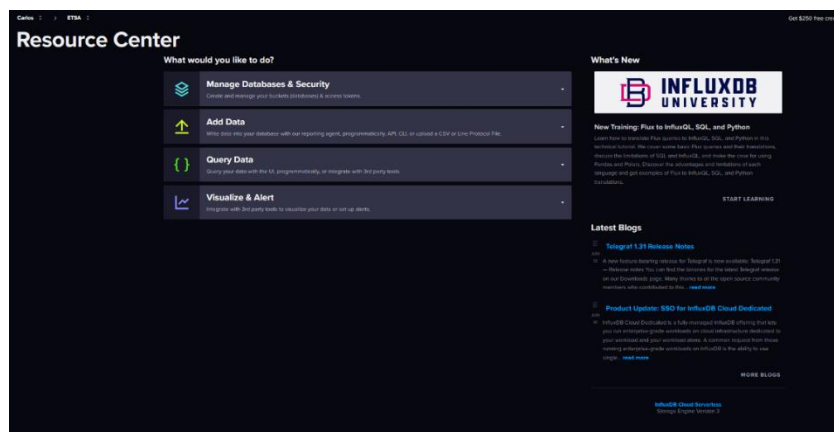


Ilustración 10 Interfaz InfluxDB.

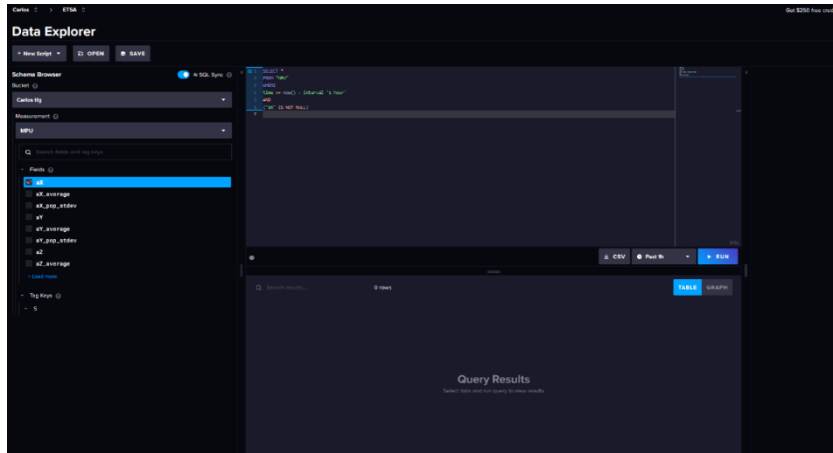


Ilustración 11 Selección de datos.

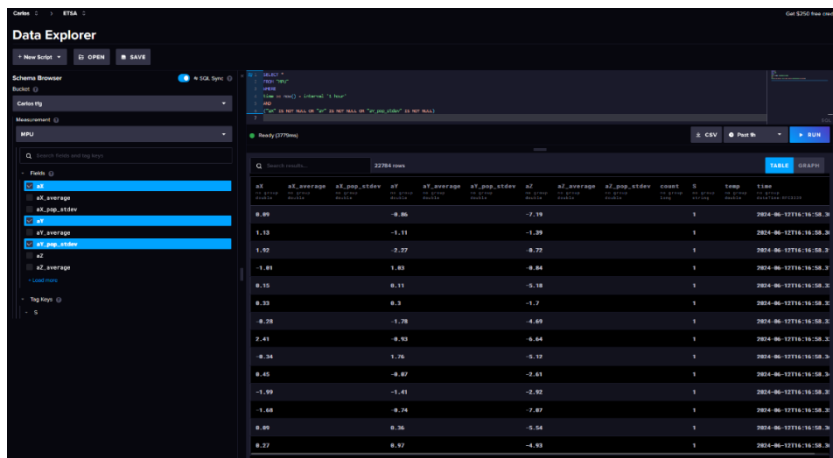


Ilustración 12 Resultados numéricos.



Ilustración 13 Gráficas de resultados.

Teorema de muestreo de Nyquist.

El Teorema de muestreo de Nyquist fue formulado en 1928 y demostrado por Shannon en 1949. Se trata de una de las normas fundamentales del tratamiento digital de señales.

Este teorema explica la relación entre la velocidad de muestreo y la frecuencia de la señal medida. Se afirma que la velocidad de muestreo f_s debe ser mayor que el doble del componente de interés de frecuencia más elevado en la señal medida. Esta frecuencia se conoce como la frecuencia de Nyquist, f_N .

$$f_s > 2f_N$$

De este modo si se supone una onda sinusoidal de frecuencia f tenemos:

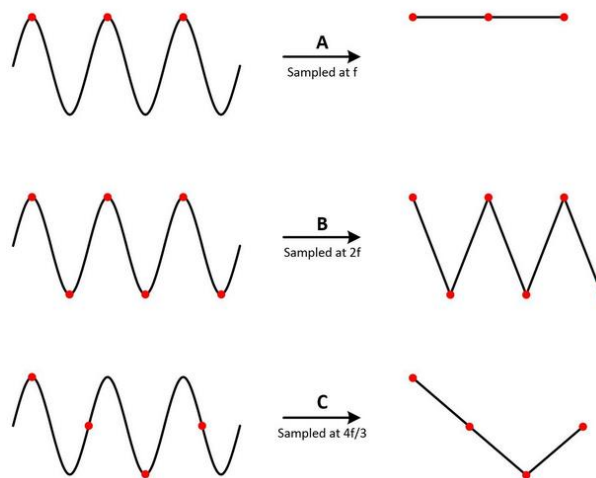


Ilustración 14 Muestreo de una onda sinusoidal.

En el caso A [Ilustración 14], la onda sinusoidal de frecuencia f se ha muestreado a la misma frecuencia. Se ha marcado los muestreos en la figura de la izquierda y a la derecha la reconstrucción de la onda. En este caso la señal representada es incorrecta pues se ha obtenido una recta horizontal.

En el caso B, se ha utilizado una velocidad de muestreo del doble de la frecuencia de la señal. Ahora f es igual a la frecuencia de Nyquist, que es el componente de frecuencia más alto que se permite para evitar *aliasing*, estudiando una frecuencia determinada.

Para el último de los casos la velocidad de muestro es de $4f/3$, esta velocidad de muestreo reproduce una forma incorrecta de la onda como en el primer caso visto.

El *aliasing* es el efecto por el que una velocidad de muestreo menor que el doble de la frecuencia de Nyquist conduce a una representación errónea de la onda. Los componentes de frecuencias falsas más bajas aparecerían reflejados en los datos muestreados.

En la siguiente figura [Ilustración 15] se representa una onda sinusoidal de 800 kHz muestreada a 1MS/s. El resultado del muestreo (línea discontinua) es una representación de una onda falsa sinusoidal de 200 kHz.

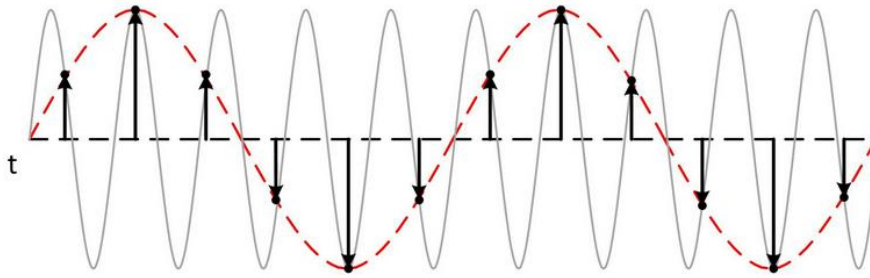


Ilustración 15 Aliasing producido por una frecuencia de muestreo muy baja.

La frecuencia alias, f_a , puede ser calculada para determinar cómo aparece una señal de entrada a una frecuencia sobre la frecuencia de Nyquist.

$$f_a = |\text{closest integer multiple of } f_s * f_s - f|$$

Aumentar la velocidad de muestreo es la manera más usual de prevenir este efecto en el tratamiento de las señales, no obstante, también se puede prevenir utilizando filtros antialiasing.

RESULTADOS

Gráficas de aceleración.

En el caso de esta investigación concreta, lo que se pretende a partir de los resultados obtenidos es ajustar el periodo fundamental de vibración del modelo estructural simulado previamente estudiado [1], mediante el ajuste del parámetro que define la rigidez de los elementos estructurales del modelo. Para ello estudiamos gráficas del tipo Tiempo – Aceleración obtenidas a partir de lecturas que el acelerómetro envía a InfluxDB para su almacenaje.

En las gráficas de aceleración se reflejan las oscilaciones (vibraciones) que sufre un edificio, en respuesta a perturbaciones o excitaciones a que está sometido. Las vibraciones libres en sistemas de 1 grado de libertad [Ilustración 16] presentan una forma tal que:

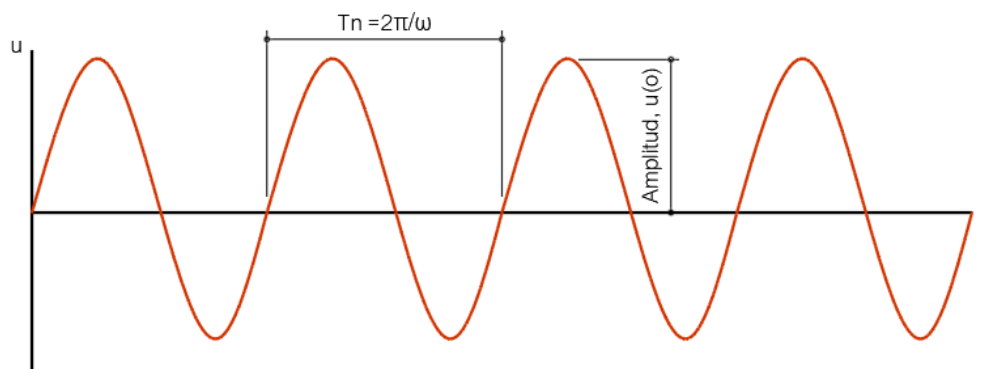


Ilustración 16 Gráfica tiempo-aceleración para un sistema no amortiguado.

Para el análisis de la gráfica de este tipo es conveniente definir:

Patrón Sinusoidal:

La gráfica muestra una onda sinusoidal que es típica de un sistema no amortiguado. Este patrón indica que la aceleración oscila entre valores positivos y negativos de manera periódica.

Frecuencia Natural:

Frecuencia: La frecuencia natural (ω) de la estructura es la inversa del período (T) de la oscilación.

$$\omega = 2\pi/T$$

Período: El período (T) es el tiempo que tarda el sistema en completar un ciclo completo de oscilación.

Amplitud Constante:

La amplitud de las oscilaciones es constante, lo que indica la ausencia de amortiguamiento. En un sistema no amortiguado, no hay pérdida de energía, por lo que la amplitud de la aceleración se mantiene constante a lo largo del tiempo.

Simetría:

La gráfica es simétrica con respecto al eje del tiempo. Esto significa que el sistema no tiene ninguna fuerza externa ni amortiguamiento que altere su comportamiento natural de vibración.

Amplitud Máxima y Mínima:

La máxima aceleración (A_{\max}) y la mínima aceleración (A_{\min}) se observan en los picos de la gráfica.

Periodo de Oscilación:

El período (T) puede ser medido desde un pico hasta el siguiente pico en la misma dirección. Por ejemplo, si un pico positivo se encuentra en $t = 0t$ y el siguiente pico positivo en $t = T$, T es el período de oscilación.

Frecuencia de Oscilación:

La frecuencia (f) es la cantidad de ciclos que ocurren por segundo y es la inversa del período (T).

$$f = 1/T$$

En resumen, podemos estudiar estos sistemas a partir de este tipo de gráficas e identificar:

- Identificación de frecuencia natural: la gráfica permite identificar la frecuencia natural del sistema. Conociendo el período (T), se puede calcular la frecuencia natural.
- Verificación de no amortiguamiento: la constancia de la amplitud confirma que no hay amortiguamiento en el sistema, lo que significa que la energía del sistema se conserva a lo largo del tiempo.
- Importancia práctica: en la práctica, un sistema no amortiguado es idealizado, ya que en realidad siempre existe algún nivel de amortiguamiento debido a la fricción y otras resistencias. Sin embargo, este modelo teórico es útil para entender el comportamiento básico de las estructuras sin amortiguamiento.

Para el caso de un edificio como el objeto de estudio de este trabajo, y sabiendo que los sistemas anteriores no son reales, tendríamos una gráfica [Ilustración 17] que se asemejaría a la siguiente. Estamos hablando de un sistema amortiguado, donde el edificio ha sufrido una excitación externa, por ejemplo, un sismo, un gran impacto, etc.

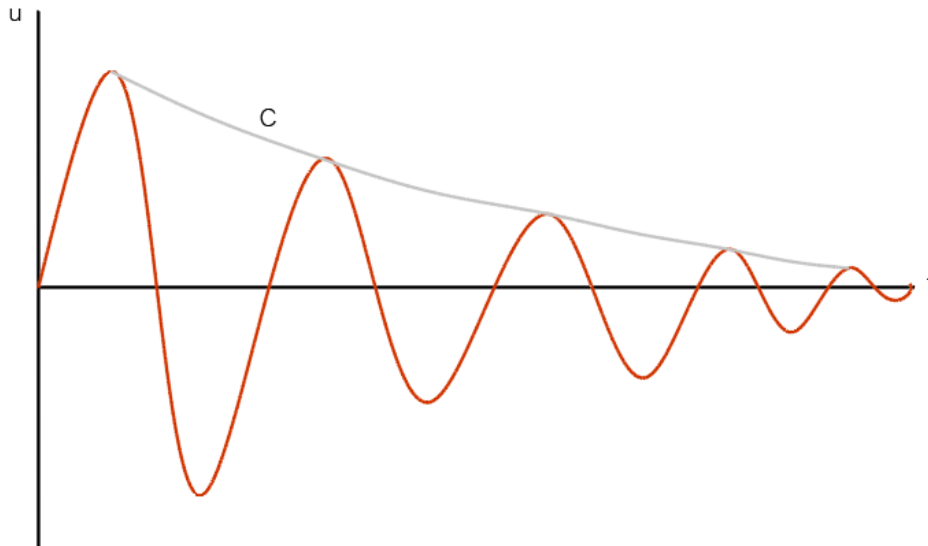


Ilustración 17 Gráfica tiempo-aceleración para un sistema amortiguado.

Para el análisis de este tipo de gráficas:

Patrón Amortiguado:

La gráfica muestra una onda sinusoidal amortiguada. Esto se observa en cómo la amplitud de las oscilaciones disminuye con el tiempo, lo que indica que la energía del sistema se está disipando.

Frecuencia Natural y Amortiguamiento:

Frecuencia Natural: Similar al sistema no amortiguado, la frecuencia natural (ω_n) puede calcularse a partir del período (T). Sin embargo, en un sistema amortiguado, observamos la frecuencia amortiguada (ω_d), que es ligeramente menor que la frecuencia natural no amortiguada.

Frecuencia Amortiguada: La frecuencia (ω_d) se observa como la frecuencia de las oscilaciones que disminuyen.

$$\omega_d = \omega_n [1 - \zeta^2]^{\frac{1}{2}}$$

Coefficiente de Amortiguamiento (ζ): Define la rapidez con la que decaen las oscilaciones.

$$\zeta = \frac{c}{[2km]^{\frac{1}{2}}}$$

Donde c es el coeficiente de amortiguamiento, k es la rigidez del sistema, y m es la masa del sistema.

Amplitud Decreciente:

La amplitud de las oscilaciones disminuye exponencialmente, indicando la presencia de amortiguamiento en el sistema. La rapidez de este decrecimiento está determinada por el coeficiente de amortiguamiento (ζ).

Respuesta a Excitación Externa:

La gráfica muestra la respuesta del edificio a una excitación externa. Los picos iniciales pueden ser más pronunciados debido a la fuerza externa aplicada, como un impulso sísmico, seguido por una disminución gradual debido al amortiguamiento.

Interpretación Detallada:

Amplitud Máxima y Mínima Inicial:

La máxima y mínima aceleración iniciales (A_{\max} y A_{\min}) ocurren en los primeros picos, que son más altos debido a la excitación externa.

Decaimiento Exponencial:

La amplitud de las oscilaciones disminuye de forma exponencial según:

$$A(t) = A_0 e^{-\zeta \omega_n t}$$

Donde A_0 es la amplitud inicial.

Período de Oscilación:

El período (T_d) de las oscilaciones amortiguadas puede ser medido de pico a pico similar al sistema no amortiguado, pero teniendo en cuenta que la frecuencia observada (ω_d) es menor debido al amortiguamiento.

Frecuencia Amortiguada:

La frecuencia amortiguada (ω_d) se determina a partir del período de las oscilaciones restantes después de que la fuerza externa haya cesado.

En resumen, podemos estudiar estos sistemas a partir de este tipo de gráficas e identificar:

- La frecuencia natural y amortiguada: la gráfica permite identificar tanto la frecuencia natural (ω_n) como la frecuencia amortiguada (ω_d), cruciales para entender la respuesta dinámica del edificio.
- Amortiguamiento del sistema: la rapidez con la que disminuyen las oscilaciones proporciona una medida del amortiguamiento del sistema (ζ). Un alto coeficiente de amortiguamiento (ζ) implica una rápida disipación de energía, lo cual es deseable en estructuras para reducir daños durante eventos sísmicos.
- Evaluación de resiliencia: la forma en que la amplitud disminuye te permite evaluar la resiliencia del edificio ante excitaciones externas. Un sistema con un amortiguamiento adecuado reducirá rápidamente la amplitud de las vibraciones, minimizando el riesgo de daño estructural.
- Revisión del diseño estructural: si las oscilaciones persisten durante mucho tiempo o si las amplitudes iniciales son muy altas, puede ser necesario revisar el diseño estructural para mejorar el amortiguamiento, por ejemplo, mediante el uso de amortiguadores sísmicos o dispositivos de disipación de energía.

En el caso de la presente investigación tal y como se ha indicado anteriormente se pretenden utilizar los datos a partir de las gráficas obtenidas en los ensayos para calibrar la rigidez real de la estructura del edificio y corregir sobre el modelo teórico simulado estos los valores de las rigideces de los diferentes elementos constructivos.

El principal dato relevante que podemos medir es la aceleración. No obstante, el sensor se ha configurado para enviar otros que pueden resultar de utilidad. Así pues, entre las diferentes gráficas que se pueden estudiar puede apreciarse:

Las aceleraciones en los tres ejes del espacio. Estos se han llamado aX (aceleración en el eje X), aY (aceleración en el eje Y) y aZ (aceleración en el eje Z). Se accede a cada parámetro a través del menú de selección de InfluxDB. Una vez seleccionado el *bucket*, llamado Carlos tfg y seleccionando para *measurement* MPU en el menú se puede acceder a los diferentes resultados (*Fields*).

En el desplegable [Ilustración 18] se encuentran las diferentes aceleraciones, así como: las aceleraciones medias para cada eje ($aX_average$, $aY_average$ y $aZ_average$), la desviación estándar para cada eje (aX_pop_stdev , aY_pop_stdev , aZ_pop_stdev) y el dato de la temperatura del sensor (*temp*).

Este último valor resulta interesante ya que durante el calibrado del sensor se observó que era bastante sensible a cambios de la temperatura y de hecho este parámetro fue tenido en cuenta durante el calibrado del sensor [2] por Jorge Cardós.

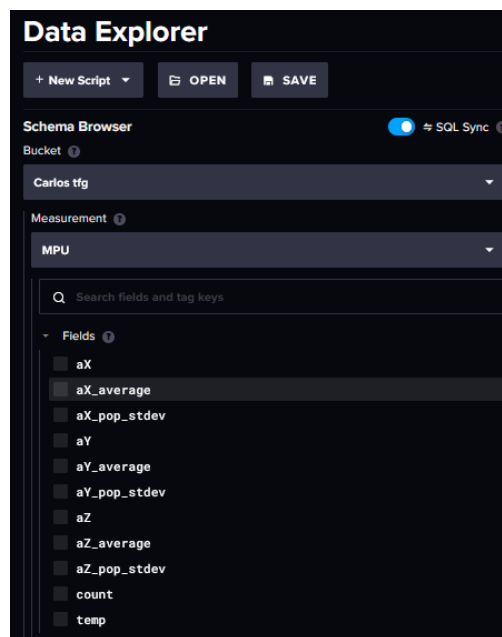


Ilustración 18 Menú navegación InfluxDB

Otra forma de navegar por la interfaz de InfluxDB es escribiendo en las líneas de escritura que aparecen en la parte superior de la página. De esta manera los resultados pueden ser agrupados como sea preciso para obtener gráficas con distintos valores representados.

Por ejemplo, para la obtención de datos para la aceleración únicamente en el eje X se tiene:


```
SELECT *
FROM "MPU"
WHERE
time >= now() - interval '1 hour'
AND
("aX" IS NOT NULL)
```

Entre las combinaciones posibles que podemos encontrar, por ejemplo, para agrupar los tres datos obtenidos para la aceleración en X, Y, Z:

```
SELECT time,
MAX(CASE WHEN field_name = field_name THEN value END) AS aX,
MAX(CASE WHEN field_name = field_name THEN value END) AS aY,
MAX(CASE WHEN field_name = field_name THEN value END) AS aZ
FROM (
SELECT time, "MPU"."aX" AS field_name, "MPU"."aX" AS value
FROM 'MPU'
WHERE time >= now() - interval '1 hour'

UNION ALL
SELECT time, "MPU"."aY" AS field_name, "MPU"."aY" AS value
FROM 'MPU'
WHERE time >= now() - interval '1 hour'

UNION ALL
SELECT time, "MPU"."aZ" AS field_name, "MPU"."aZ" AS value
FROM 'MPU'
WHERE time >= now() - interval '1 hour'
) AS data
GROUP BY time
```

Para la interpretación de las gráficas conviene aclarar cómo trabaja InfluxDB. Las mediciones realizadas por el acelerómetro se traducen en una serie de puntos o *counts* que se sitúan próximos entre sí e InfluxDB une dando así forma a la onda sinusoidal que aparece finalmente representada.

Según los datos almacenados en el servidor web, puede darse el caso de que la curva presente una forma tal que no queda definida la máxima amplitud de la onda [*Ilustración 19*]. Es decir, en muchas mediciones las gráficas aparecen de la siguiente manera:

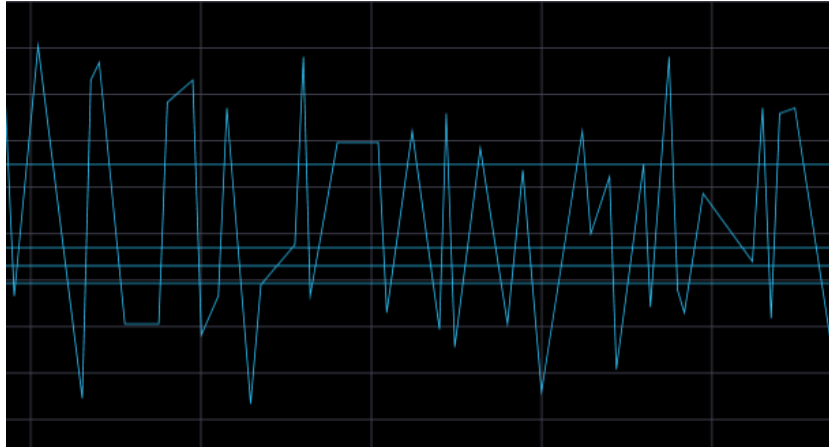


Ilustración 19 Resultados para el eje X el 13/06/2024 18:05:21.

Al aproximar la gráfica a un instante determinado encontramos que la onda se corta, aunque aparece representada de manera continua quedando unidos todos los valores para los puntos representados (*counts*). Trabajando en milisegundos se observa que entre las 18:05:21.480 y las 18:05:21.495 aparece una línea prácticamente horizontal uniendo dos puntos. Se sabe que este comportamiento no es real.

En este caso, no se determina con exactitud el valor máximo o mínimo que alcanza la amplitud de onda. Si bien el valor máximo y mínimo que resulte de interés podría ser representado orientativamente añadiendo puntos estimados a la representación y así completar la onda [*Ilustración 20*].

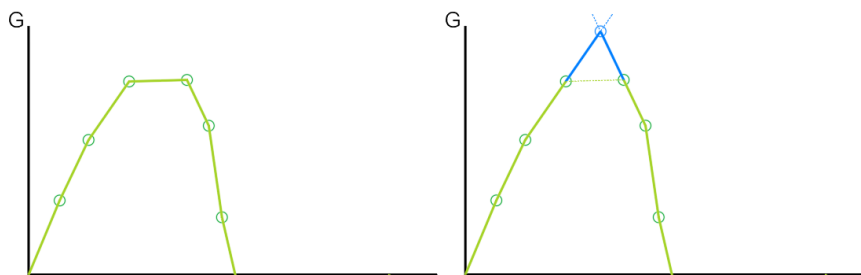


Ilustración 20 Estimación de un punto máximo en la gráfica.

Orientación de los ejes del dispositivo.

Como ya se ha mencionado, el acelerómetro es capaz de medir aceleraciones y giros en los tres ejes del espacio. Estos tres ejes son perpendiculares entre sí y se alinean con un sistema tridimensional de coordenadas.

El eje X, normalmente representa la dirección perpendicular. Así pues, colocado el dispositivo sobre una superficie plana como es el caso del pilar, si el dispositivo experimenta un desplazamiento hacia la derecha, la masa interna contenida en el sensor se desplaza hacia la izquierda por inercia, siendo este desplazamiento registrado por el acelerómetro.

El eje Y, mide las aceleraciones en la dirección perpendicular al eje X. De manera análoga a lo expuesto anteriormente registra los desplazamientos que sufre por inercia la masa en el interior del dispositivo.

El eje Z, se sitúa perpendicular al plano definido por los ejes X e Y [Ilustración 21].

Al medir la aceleración en los tres ejes simultáneamente, el acelerómetro es capaz de determinar la orientación del dispositivo en el espacio. Esto se debe a que la aceleración de la gravedad siempre actúa hacia el centro de la Tierra, proporcionando así una referencia constante.

Teóricamente si el dispositivo se encuentra en una posición vertical sobre una superficie plana, es uno de los dos ejes X o Y, el que se encuentra alineado con la gravedad. De manera que teóricamente en un acelerómetro fijado en una superficie vertical, uno de estos ejes mostraría el valor de la gravedad en uno de estos ejes y la señal registrada en el eje Z sería próxima a 0.

La medición de un acelerómetro en la medición de aceleraciones en cada eje depende de varios factores como la calidad del sensor, la calibración o la temperatura entre otros.

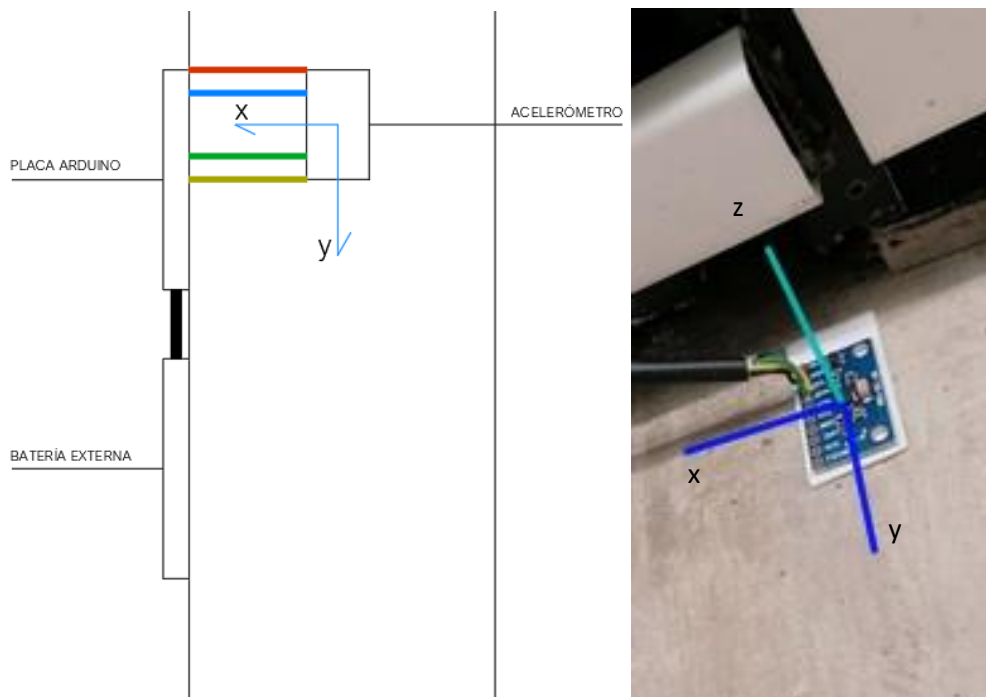


Ilustración 21 Orientación de los ejes del dispositivo.

Ruido

Si se acerca la vista a una gráfica de este tipo veríamos que la onda está formada por pequeñas señales que se consideran ruido [Ilustración 22]. De modo que la onda sinusoidal presentaría a lo largo de todo su desarrollo una composición del tipo:

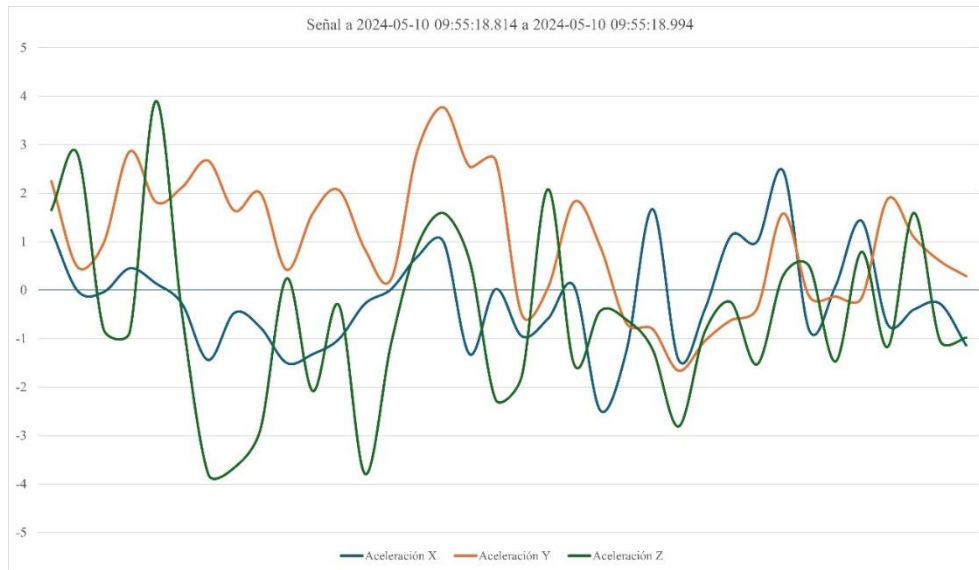


Ilustración 22 Señal ruido

El ruido es un factor importante a considerar cuando se analizan las gráficas de aceleración en sistemas amortiguados, especialmente en aplicaciones prácticas como la monitorización de edificios.

En el caso que ocupa a este trabajo de investigación se ha estimado que la señal de ruido rondaría entre los -4 mG y los $+4$ mG, tal y como se puede observar en la imagen superior. A pesar de que el calibrado del dispositivo y la configuración del mismo antes de ser instalado fueron procesos bastante cuidados, debido a la alta precisión del sensor es inevitable contar con esta señal.

El ruido es cualquier componente de la señal de aceleración que no proviene de la excitación del sistema ni de la respuesta dinámica real de la estructura. Puede originarse de diversas fuentes, incluyendo:

- Instrumental: inherente a los acelerómetros y otros equipos de medición.
- Ambiental: vibraciones de fuentes externas no relacionadas con la excitación principal (tráfico, maquinaria, viento).
- Eléctrico: interferencias en los circuitos electrónicos del equipo de medición.

Las características que presenta el ruido son:

- Aleatorio: el ruido suele ser una señal aleatoria que puede oscurecer las características verdaderas de la respuesta dinámica de la estructura.
- Amplia Banda de Frecuencia: a menudo, el ruido afecta una amplia gama de frecuencias, lo que complica la identificación de las frecuencias naturales y modos de vibración.
- Amplitud Baja: generalmente tiene amplitud menor que las señales de interés, pero puede ser significativo en relación con señales de baja amplitud.

En las gráficas que se estudian, del tipo Tiempo – Aceleración el ruido puede producir lo que se denominaría una señal oscurecida. Las pequeñas oscilaciones debidas al ruido pueden aparecer en las gráficas superpuestas con las oscilaciones reales de la estructura, haciendo difícil distinguir entre la señal que se pretende analizar y el ruido.

Otro efecto del ruido son los picos falsos. Y es que debido al ruido pueden aparecer picos falsos en la representación de los resultados de modo que se interprete erróneamente la respuesta dinámica de la estructura.

Técnicas para trabajar el ruido:

Una de las maneras de tratar esta componente de ruido puede ser el filtrado de la señal:

- Filtros Pasa-Bajas: permiten el paso de frecuencias bajas (reales) y atenúan las frecuencias altas (ruido).
- Filtros Pasa-Altas: atenúan las frecuencias bajas (ruido de baja frecuencia) y permiten el paso de frecuencias altas (señal de interés).
- Filtros Pasa-Banda: permiten el paso de un rango específico de frecuencias, filtrando tanto las frecuencias muy bajas como las muy altas.

El promediado de datos también puede cumplir una función similar:

- Promediado en el Tiempo: tomar múltiples mediciones y promediar los resultados puede ayudar a reducir el ruido aleatorio.
- Promediado en Frecuencia (FFT): al promediar varias transformadas de Fourier de diferentes segmentos de la señal, se puede atenuar el ruido de fondo.

Si se trabaja con gráficas del tipo FFT podría procederse de maneras complementarias a la anteriormente descritas tal como:

- FFT Smoothing: aplicar suavizado a la gráfica FFT para reducir las fluctuaciones causadas por el ruido.
- Métodos de Análisis Modal Estocástico: técnicas avanzadas como el análisis modal estocástico pueden separar las características del ruido de las respuestas modales reales.

La importancia del filtrado del ruido es importante a la hora de la obtención adecuada de señales y mejorar la claridad de los datos de aceleración. El uso de técnicas avanzadas como el análisis modal estocástico y el suavizado en FFT permiten separar el ruido de las respuestas dinámicas reales.

Gráficas de aceleración obtenidas.



Ilustración 23 Gráfica de aceleración para aX a fecha 06-06-2024.



Ilustración 24 Gráfica de aceleración para aY a fecha 06-06-2024.

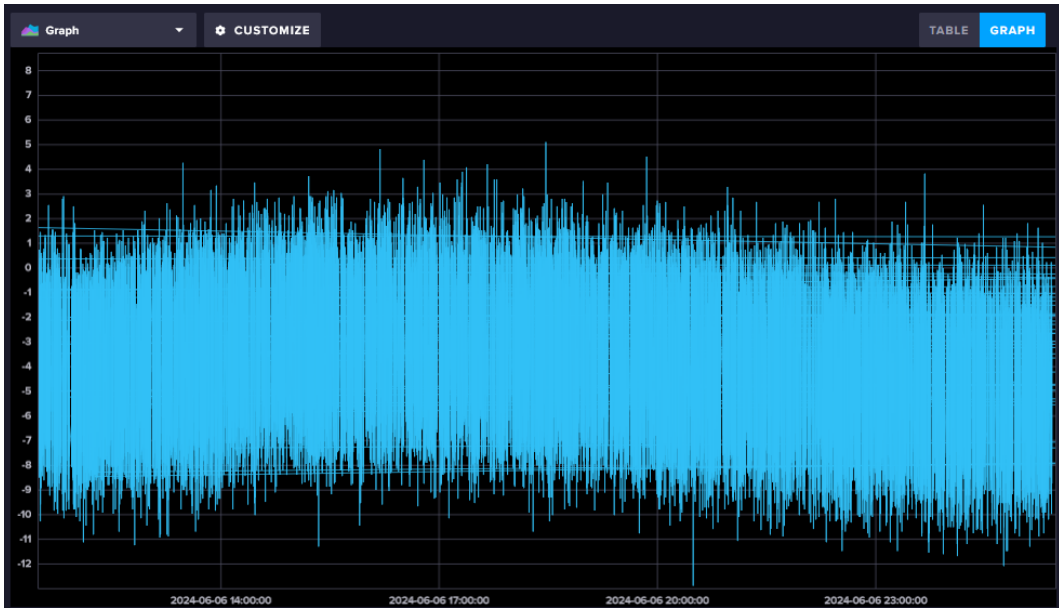


Ilustración 25 Gráfica de aceleración aZ a fecha 06-06-2024.

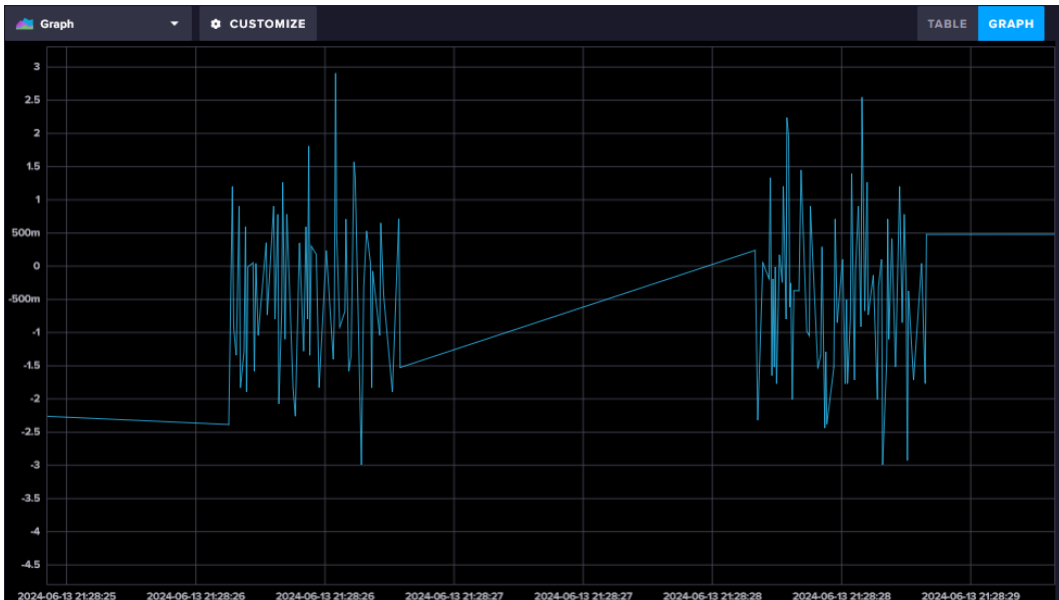


Ilustración 26 Aproximación a señal grabada para aX.



Ilustración 27 Aproximación a señal grabada para aX.

Otros tipos de gráficas.

Entre los distintos tipos de gráficas que pueden obtenerse a partir de este tipo de ensayos se encuentran:

GRÁFICAS DE ACELERACIÓN – TIEMPO

Estas gráficas muestran cómo varía la aceleración en función del tiempo en una ubicación específica de la estructura [Ilustración 23, 24, 25, 26, 27].

Donde aparecen:

- Eje Y (Aceleración): la aceleración medida, generalmente en unidades de G (gravedad) o m/s^2 .
- Eje X (Tiempo): el tiempo en segundos (s).

A la hora de interpretar los resultados se debe observar:

- Patrones de vibración: observar los patrones en la aceleración. Picos regulares pueden indicar una vibración periódica, mientras que picos irregulares pueden sugerir respuestas a eventos transitorios, como impactos o terremotos.
- Amplitud: la magnitud de los picos indica la intensidad de la aceleración. Altas amplitudes pueden sugerir resonancia o grandes fuerzas actuando sobre la estructura.
- Frecuencia de los picos: la frecuencia con la que ocurren los picos puede dar información sobre las frecuencias naturales de la estructura.

GRÁFICAS DE ESPECTRO DE FRECUENCIA (FFT)

El análisis de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) permite transformar los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, proporcionando una visión clara de las frecuencias predominantes en la señal de aceleración.

Donde se tiene:

- Eje Y (Amplitud): la amplitud de las frecuencias componentes de la señal.
- Eje X (Frecuencia): las frecuencias, generalmente en Hertz (Hz).

Para la interpretación de resultados se ha de estudiar:

- Picos de frecuencia: los picos en esta gráfica representan las frecuencias naturales de la estructura. Identificar estas frecuencias es crucial para detectar posibles resonancias.
- Frecuencia dominante: la frecuencia con la mayor amplitud es la frecuencia dominante y puede corresponder a un modo de vibración significativo.
- Ancho de los picos: un ancho estrecho indica una frecuencia bien definida, mientras que un ancho mayor puede sugerir amortiguamiento o la presencia de múltiples modos cercanos.

GRÁFICAS DE RESPUESTA DE FRECUENCIA (FRF)

Las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) muestran cómo una estructura responde a diferentes frecuencias de excitación.

En donde aparecen las siguientes magnitudes:

- Eje Y (Magnitud): la respuesta de la estructura, generalmente en términos de desplazamiento, velocidad, o aceleración.
- Eje X (Frecuencia): las frecuencias de excitación.

A la hora de interpretar los resultados se debe observar:

- Picos de Respuesta: similar al espectro de frecuencia, los picos indican las frecuencias naturales de la estructura.
- Amplitud en frecuencias naturales: un alto pico en una frecuencia natural sugiere que la estructura responde fuertemente a esa frecuencia.
- Comparación con modelos teóricos: comparar los picos observados con las predicciones teóricas del análisis modal puede validar tu modelo estructural.

GRÁFICAS DE DESPLAZAMIENTO O VELOCIDAD

A veces, los datos de aceleración se integran para obtener desplazamientos o velocidades.

Donde aparecen:

- Eje Y (Desplazamiento/Velocidad): el desplazamiento en metros (m) o la velocidad en metros por segundo (m/s).
- Eje X (Tiempo/Frecuencia): el tiempo en segundos o la frecuencia en Hz, según el tipo de gráfica.

A la hora de interpretar los resultados se debe observar:

- Desplazamiento máximo: proporciona una medida directa de cómo se está moviendo la estructura. Esto es crucial para evaluar la seguridad y funcionalidad de la estructura.
- Velocidad: ayuda a entender las velocidades máximas a las que se mueve la estructura, lo cual es importante para ciertos criterios de diseño.

La interpretación rigurosa de los resultados que se reflejan en las diferentes gráficas que pueden obtenerse para el análisis de estructuras de edificación puede ser de utilidad, por ejemplo, para:

Identificación de problemas estructurales: las altas amplitudes en frecuencias específicas pueden indicar problemas como resonancias o daños estructurales.

Evaluación de amortiguamiento: analizar el ancho de los picos y la caída de amplitud con la frecuencia puede darte información sobre el amortiguamiento en la estructura.

Validación de modelos: comparar tus resultados experimentales con modelos teóricos te ayudará a validar o ajustar tus modelos estructurales.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de la monitorización de uno de los pilares del módulo de acceso de la ETSA es la calibración de las rigideces de los elementos que la componen para la corrección de los valores obtenidos a partir de los modelos teóricos.

La instalación del acelerómetro se llevó a cabo a mediados de marzo, después de unas semanas de trabajo que se centró en la configuración del dispositivo mediante su programación en C++. Se han llevado a cabo durante estos meses las labores pertinentes para el mantenimiento en funcionamiento del sistema, así como la observación de las señales que se registraban durante 30 días en el servidor web InfluxDB.

Excitación de la estructura.

Como se ha comentado anteriormente debido a la imposibilidad de ensayar el comportamiento dinámico de la estructura mediante una excitación externa provocada artificialmente se ha esperado un sismo cercano para la obtención de resultados.

En la base de datos del ICV, (Instituto Cartográfico Valenciano) se pueden visualizar los sismos, clasificados por fecha y magnitud que han tenido lugar en la Comunidad Valenciana [*Ilustración 28 a, 28 b*].

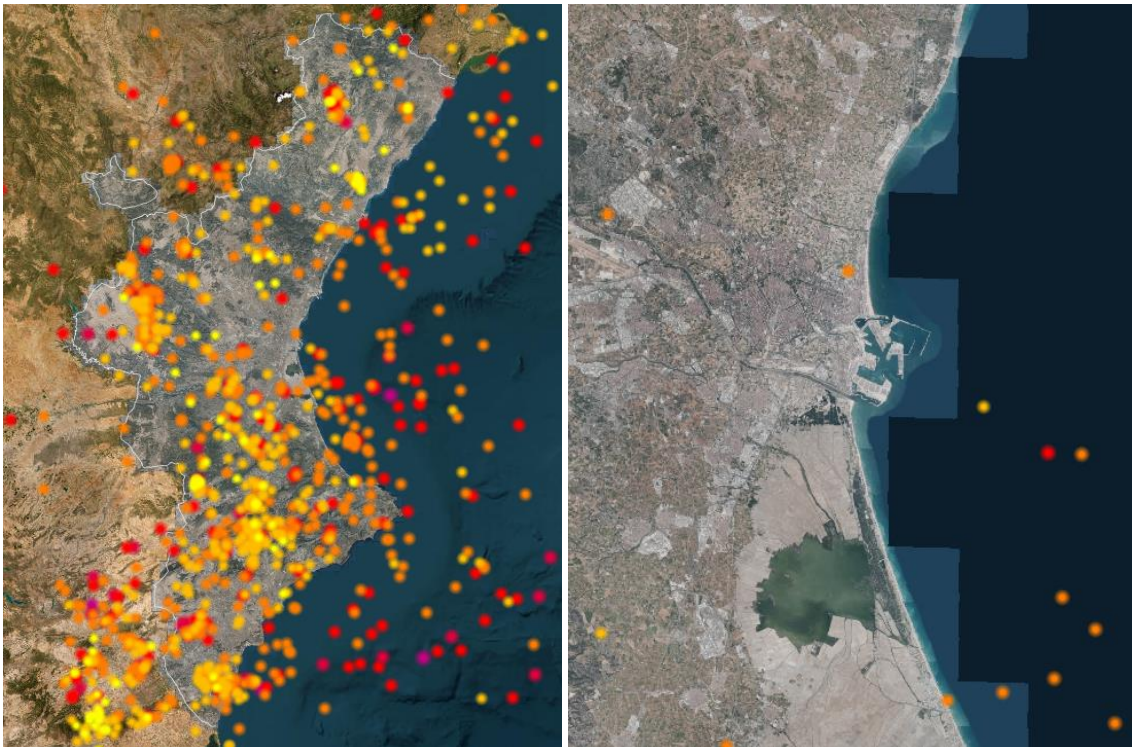


Ilustración 28 a- Mapa Sísmico CV b- Sismos próximos a Valencia

Los sismos reflejados en este visor más próximos a la UPV, lugar de instalación del acelerómetro serían tres. El de mayor magnitud, 1,9 situado en el municipio de Manises registrado con fecha de 12/01/2023; a este sismo le sigue uno bastante próximo a la universidad localizándose en l'Horta Nord con una magnitud de 1,5 registrado el 16/09/2023. Finalmente, cerca de la costa se localiza alguno de menor magnitud, 1,2 a fecha de 26/01/2023.

Al no estar estos sismos dentro de las fechas en que se realiza este trabajo no son de utilidad para la obtención de resultados.

Se contacta con la red SISCOVA para obtener información más amplia al respecto de posibles sismos que puedan haber producido una excitación de la estructura obteniéndose los siguientes datos facilitados por SISCOVA:

Evento	Fecha	Profundidad	Intensidad	Localización
es2024cxttp	11/02/2024	4	3,3	GOLFO VALENCIA
es2024bzcqe	28/01/2024	7	2	GOLFO VALENCIA
es2024bzcqe	13/04/2024	11	1,8	GOLFO VALENCIA
es2024aagwq	01/01/2024	12	1,7	Q. DE LES VALLS
es2024ajbfp	05/01/2024	12	1,7	LLOSA DE RANES
es2024cfxqp	01/02/2024	22	1,6	GOLFO VALENCIA
es2024eygkr	11/03/2024	22	1,6	CULLERA
es2024bskky	25/01/2024	0	1,5	BUÑOL
es2024ckoap	04/02/2024	14	1,5	ALBORACHE
es2024hffxq	12/04/2024	1	1,4	N. MILLARES
es2024hlmbc	15/04/2024	10	1,3	SIETE AGUAS
es2024hffvo	12/04/2024	0	1,1	N. MILLARES
es2024aszqk	11/01/2024	9	1,4	CARCAIXENT

Tabla 2 Últimos eventos sísmicos Comunidad Valenciana.

El evento más próximo y ocurrido durante el periodo en que se desarrolla el trabajo sería el ocurrido el 13/04/2024 en el Golfo de Valencia con una intensidad de 1,8. No se han registrado con el sensor instalado señales que superen notablemente los valores de ruido que se perciben de manera habitual.

Así pues, durante el periodo de observación no se ha registrado ninguna señal que supere notablemente estos niveles de ruido que se han ido registrando, como puede observarse en las imágenes adjuntas en este trabajo.

Gráfica de aceleración esperada.

Mediante la excitación de forma manual externa del sensor instalado se ha obtenido una gráfica de aceleración que se asemejaría a la esperada en caso de que se hubiera dado una excitación suficiente por sismo [Ilustración 29].



Ilustración 29 Gráfica obtenida para X, Y, Z mediante estímulo artificial.



Ilustración 30 Gráfica de aceleración en Z obtenida mediante estímulo artificial.

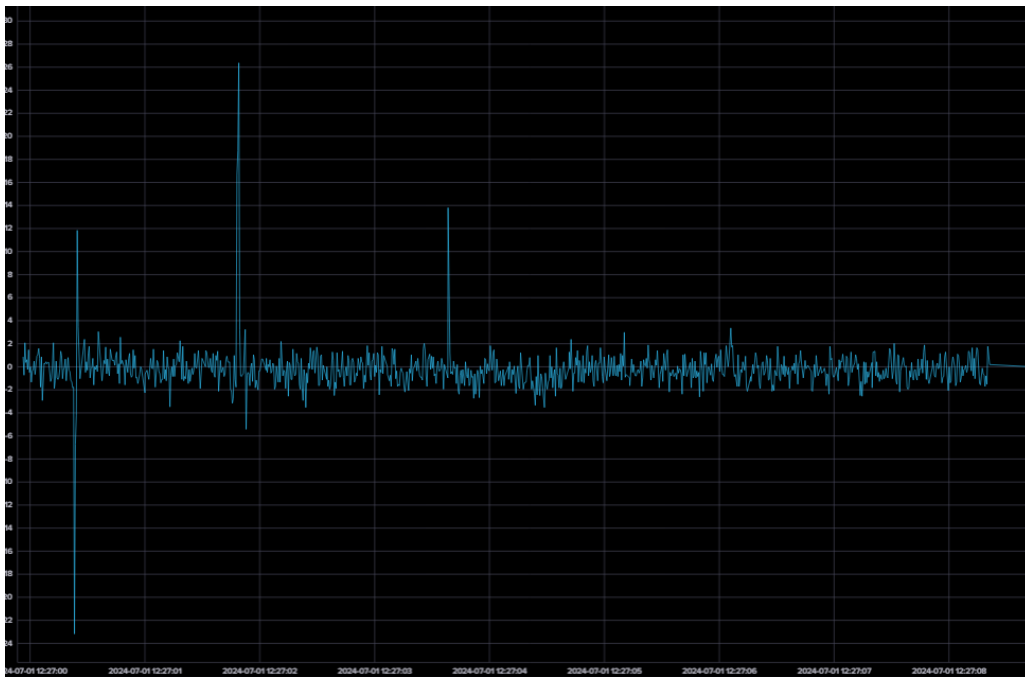


Ilustración 31 Gráfica de aceleración en Y obtenida mediante estímulo artificial.

La señal obtenida por el sensor mediante su excitación artificial [Ilustración 30, 31] refleja una gráfica de aceleración-tiempo similar a la que se habría obtenido en caso de sismo. Por ejemplo, en 2011 durante el sismo producido en Lorca (Murcia) se registró una señal [7] que presentaba la siguiente forma [Ilustración 32]:

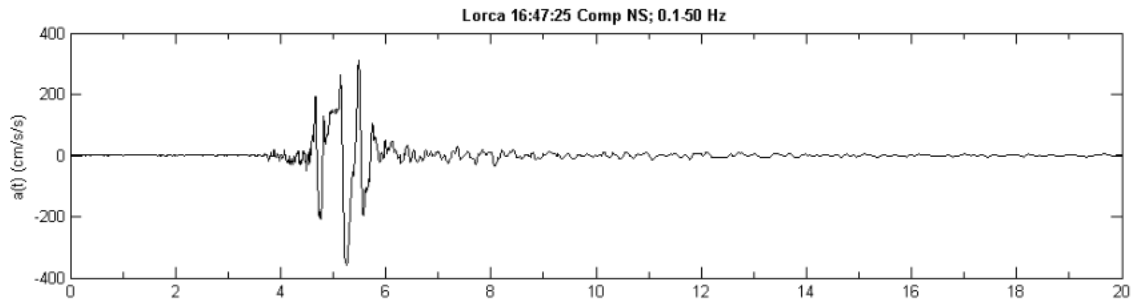


Ilustración 32 Gráfica Aceleración-Tiempo sismo en Lorca año 2011.

En esta señal se ha filtrado la componente de aceleración en la dirección NS. En esta dirección se registraron los valores mayores tanto para aceleración como para velocidad y desplazamiento [Ilustración 33].

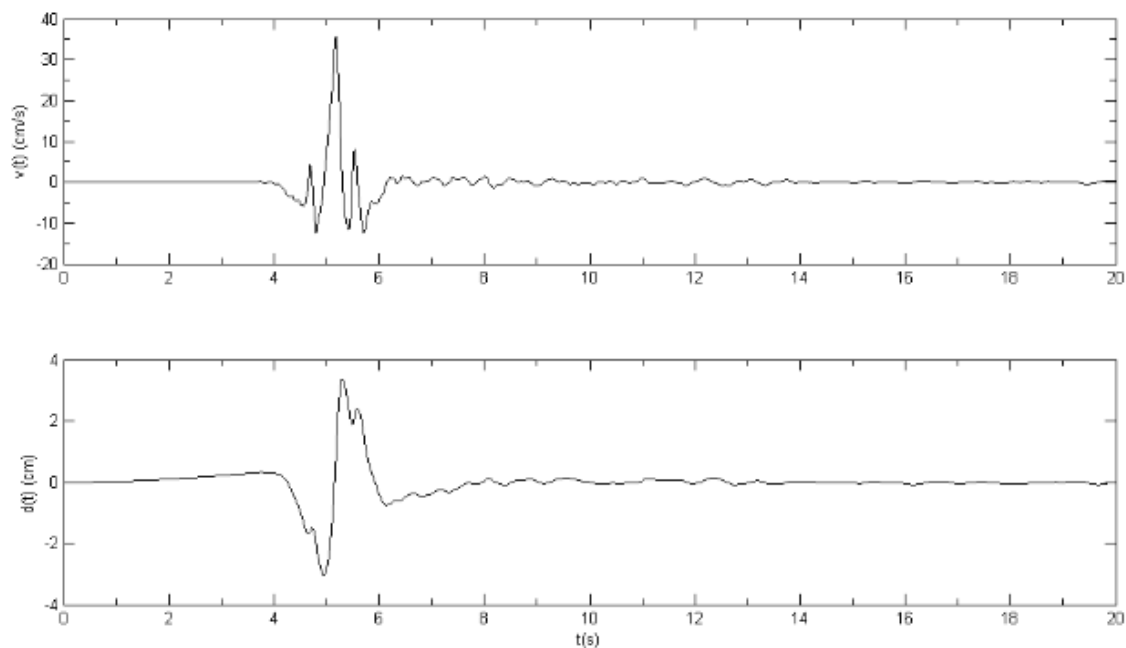


Ilustración 33 Gráficas Velocidad-Tiempo y Desplazamiento-Tiempo sismo en Lorca año 2011.

Se puede observar como el desplazamiento queda casi reducido a un único pulso de largo periodo correspondiente al paso por el emplazamiento, de la perturbación propagada. Este periodo tiene una amplitud máxima del orden de 3 cm.

El análisis de los espectros de amplitudes indica que la máxima energía del movimiento está en la banda de frecuencia entre 0,5Hz y 8 Hz, aproximadamente, con máximos de amplitudes en el rango de 1 y 3 Hz. Siendo estos valores mayores en el principal terremoto y no en los sucedidos posteriormente.

Para la interpretación de la gráfica de interés en este caso, la de aceleración, y asumiendo la duración del sismo de 6 para una mejor aproximación [Ilustración 34] se tiene:

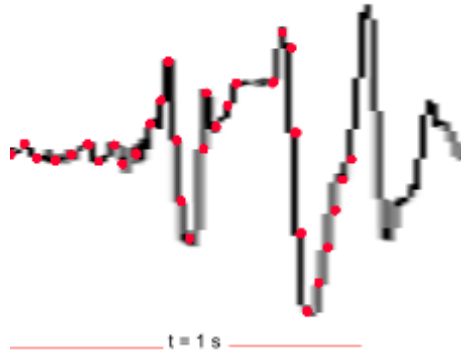


Ilustración 34 Ejemplo de muestreo a 32 Hz sobre el sismo Lorca

Para un tiempo de 1 segundo durante la actividad del sismo de Lorca se han muestreado un total de 32 puntos de la señal. La gráfica está representada con exactitud suficiente y refleja un aspecto real según el Teorema de Nyquist.

Para el muestreo de la gráfica que se ha obtenido en el ensayo que ocupa a este trabajo de manera artificial, y suponiendo una señal debida a sismo de duración de unos 16 segundos, para un total de 1024 datos registrados, se debería muestrear al menos 64 puntos de la señal para cada tiempo de un segundo.

Con este muestreo la representación de la onda sísmica se asemeja a la de la figura superior, y se cumple el Teorema de Nyquist.

CONCLUSIONES

- I. El sistema de monitorización desarrollado es lo suficiente preciso y contrastado para monitorizar las aceleraciones de la estructura.
- II. Se ha comprobado la precisión del sistema mediante la comparación con el dato de la aceleración de la gravedad ofrecida por el microgravímetro de la Universidad.
- III. La velocidad de la toma de muestra es programable entre 32 Hz y 125 Hz y se ha comprobado que cumple el Teorema de muestreo de Nyquist para un muestreo suficiente de las posibles aceleraciones sísmicas que puede sufrir el edificio con el orden de al menos 4 veces las frecuencias esperadas de excitación sísmica.
- IV. Se ha desarrollado el software que permite ver los datos tanto en tiempo real como de la base histórica de las aceleraciones.

Si bien es verdad que se queda a la espera de capturar una excitación exterior para caracterizar el Periodo Fundamental de vibración de la estructura y su amortiguación al no disponerse de los medios necesarios para excitar de manera artificial la estructura.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Como línea de investigación futura se propone continuar con la monitorización del pilar objeto de estudio o más a la espera de un estímulo suficiente de la estructura, para determinar con precisión los periodos naturales de vibración de la estructura, para calibrar la rigidez de la misma y comparar los resultados con los modelos teóricos simulados anteriormente.

Para facilitar la tarea se propone, a falta de un sismo que pueda ocasionar una respuesta dinámica considerable de la estructura, una excitación artificial de la estructura del edificio, por ejemplo, utilizando la caída de una gran masa cerca del edificio.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Este trabajo puede ser relacionado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) siendo el Objetivo N° 11 el que más relación guarda con el tema estudiado.



Objetivo 11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles

La monitorización de edificios puede resultar vital para predecir la respuesta de las estructuras en circunstancias accidentales como puede ser un sismo. Conociendo este comportamiento dinámico de las estructuras se podría estudiar la fatiga de los materiales y así actuar en caso de que fuera necesario de manera prematura a un posible accidente. De este modo las pérdidas económicas directas atribuidas a los desastres podrían descender notablemente al tratarse de actuaciones menores que aspiran a prevenir un desastre de relevancia.

Puede resultar de interés el estudio de las respuestas dinámicas de la estructura también en caso de edificio históricos o patrimoniales. Ya que podrían actuarse con más seguridad y precisión a la hora de conservar el Patrimonio de nuestras ciudades.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Enrique Gil Benso, profesor del departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de las Estructuras, tutor de este Trabajo Final de Grado y director del equipo de investigación del que forman parte Jorge Cardós y Jorge Romero, a quienes agradezco sus anteriores aportaciones que sirven como punto de partida para este trabajo y su contextualización.

BIBLIOGRAFIA

[1] Calibrado de un acelerómetro. Cardós Villanueva, Jorge. Tutor: Gil Benso, Enrique. TFG Grado en Fundamentos de la Arquitectura Curso: 2014/2015.

[2] Estudio previo del edificio de acceso a la escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia para su Monitorización en tiempo real. Autor: Romero Blanco, Jorge. Tutor y cotutor: Gil Benso, Enrique; García Borrás, Júlia. TFG Grado en Fundamentos de la Arquitectura Curso: 2022/2023.

[3] A digital analysis of the experimental accelerometers data used for buildings dynamical identification. N.I. Giannoccaro, L. Spedicato. Dept. of Innovation Engineering University of Salento, Lecce, Italy.

[4] Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination. J. Maeck, M. Abdel Wahab, B. Peeters, G. De Roeck, J. De Visscher, W.P. De Wilde, J.M. Ndambi, J. Vantomme. Department of Civil Engineering. Department of Mechanics of Materials and Constructions. Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

[5] Prediction of displacement in reinforced concrete based on artificial neural networks using sensors. Arvindan Sivasuriyan, D.S. Vijayan. Civil engineering Veedu Institute of Technology. India.

[6] Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02). Aprobada por el Real decreto 997/2002 del 27 de septiembre.

[7] Caracterización del Sismo en Lorca año 2011

<http://www.ign.es/web/resources/sismologia/www/lorca/Lorcainfo2011.pdf>

Recurso electrónico acceso el día 28/06/2023 a través de la web de Instituto geológico Nacional <https://www.ign.es/web/ign/portal>