



Proyecto cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)





Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

Informe sobre los edificios instrumentados

E4_1.1. Informe - Acción 4



Socio responsable del informe: UPC Socio editor del documento: UPC

23/12/2021

Créditos

Autores

Informe: Pujades³ LG, González-Drigo³ R, Lantada³ N, Blázquez¹⁰ A. *Anexo I*: Jara¹ JA. *Anexo II*: Jara JA. *Anexo II*: Negulescu² C. *Anexo IV*: Negulescu² C, Colombain² A, Raucoules² D, François² B, Bouroullec² I, Marchese² A, Taillefer ² N, Barus⁶ M, Welemane⁶ H, Faye ⁶J-P, Dalverny⁶ O, Pujades³ LG. *Anexo V*: Luzi G.

Revisión

Dalverny⁶ O, Echeverría⁵ A, Figueras¹ S, Gallego⁵ N, Goula¹⁰ X, Irizarry¹ J, Jara¹ JA, Martin⁶ C, Negulescu² C, Trapero⁵ L, Welemane⁶ H.

Medidas en el edificio Prat del Rull (Andorra)

Coordinación: Gallego⁵ N. Responsable: Jara¹ JA. Colaboradores: Gallego⁵ N, Pujades³ LG.

Medidas en el edificio del Instituto Santa Eugènia (Girona)

Coordinación de las medidas: Nicolau¹⁴ M, Soler¹⁴ J. *Medidas aceleración*: Jara¹ JA. *Medidas Radar:* Cuevas¹³ M. Luzi¹³ G. *Colaboradores:* Blázquez¹⁰ A, Figueras¹ S, González-Drigo³ R, Irizarry¹ J, Pujades³ LG, Vargas-Alzate³ YF.

Medidas en el edificio del Hospital de Bagnères de Bigorre

Coordinación: Pécastaing¹⁵ C. *Medidas velocidad*: Negulescu² C. *Medidas de aceleración:* Faye⁶ JP. *Medidas radar*: Raucoules² D. *Colaboradores:* François² B, Alison² C, Raucoules² D, Bouroullec² I, Marchese² A, Barus⁶ M, Dalverny⁶ O, Welemane H, Pujades³ LG.

Medidas en el edificio del Departament d'Interior

Coordinación: Hermosilla⁴ S, Medidas radar: Luzi¹³ G. Colaboradores: González-Drigo³ JR.

Palabras clave

Instrumentación de edificios. Análisis modal operacional (OMA. *Operational modal analysis*). Monitorización de la seguridad estructural (SHM. *Structural health monitoring*). Series temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento. Ruido ambiental. Radar de apertura real (RAR). Modelado estructural. Aplicaciones a detección del daño.

Socios del proyecto

- 1. ICGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
- 2. BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 3. UPC: Universitat Politècnica de Catalunya
- 4. DIGC: Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
- 5. IEA: Institut d'Estudis Andorrans
- 6. ENIT: Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
- 7. CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique Délégation Alsace
- 8. EPLFM : Entente pour la Forêt Méditerranéenne
- 9. DW: Deveryware
- 10. ACE: Associació de Consultors d'Estructures

Otras instituciones

- 11. PCA: Protecció Civil Andorra
- 12. CTTC: Centre tecnològic de telecomunicacions de Catalunya.
- 13. ISE: Institut Santa Eugènia (Girona)
- 14. CHB: Centre Hospitalier de Bagnères

© 23/12/2021, proyecto POCRISC



Agradecimientos

La instrumentación y análisis de los edificios esenciales, sobre los que trata este informe, no habrían sido posibles sin la colaboración de entidades, instituciones y personas que han hecho posible, por una parte, el acceso físico al edificio y por otra, la disponibilidad de información, de primer nivel, sobre sus características arquitectónicas y estructurales, imprescindibles para su modelado. Sirva este breve apartado de agradecimiento a todas ellas.

Natàlia Gallego puso a disposición del proyecto todos los medios y recursos necesarios para el éxito de la instrumentación del edificio Prat del Rull, en Andorra. Meritxell Nicolau y Josep Soler, secretaria y administrador del centro respectivamente, hicieron posibles las medidas en el Instituto *Santa Eugènia* de Girona. Antoni Blázquez, de la Asociación de Consultores de estructuras (ACE) facilitó los planos del edificio. La ayuda de Claude Pécastaign fue inestimable en los trabajos en el Hospital de Bagnères. Silvia Hermosilla coordinó las medidas de radar en el edificio sede del Departamento de Interior de la Generalitat de Catalunya.

La profesionalidad, dedicación y saber hacer de personal gestor y administrativo de instituciones participantes en el proyecto ha permitido gestionar los siempre tediosos y delicados temas burocráticos y administrativos que comportan el normal seguimiento del proyecto, permitiendo, al personal investigador, centrarse en los aspectos y desarrollos científicotécnicos. Especiales gracias a Agnès Lladós del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, a Silvia Garceso, Malcolm Campbell Burns, Beatriu Torres y Francesc Vendrell, de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Un agradecimiento especial también a Xavier Goula, que fue impulsor del proyecto y que, incluso después de su jubilación, lo ha dinamizado, implicándose en prácticamente todas las acciones. Su carisma personal y su entusiasmo investigador han contribuido, de forma importante, al desarrollo y resultados del proyecto.



Resumen ejecutivo

Este documento corresponde al entregable E4.1.1: *Informe sobre los edificios instrumentado*s en el marco de la Acción 4: *Reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios esenciales* del proyecto POCRISC: *Por una cultura común del riesgo sísmico,* con referencia EFA158/16 POCRISC, de la segunda convocatoria de proyectos Interreg V A España-Francia-Andorra. POCTEFA 2014-2020. En el documento se describen los principales trabajos, datos y resultados, referentes a la instrumentación de tres edificios esenciales: Edificio Prat del Rull en Andorra la vella (Andorra), Instituto Santa Eugènia en Girona (España) y hospital de Bagnères de Bigorre (Francia).

El objetivo es aplicar el análisis modal operacional (OMA, Operational Modal Analysis) a tres edificios esenciales y estudiar la viabilidad de medidas a distancia para determinar sus propiedades modales. Para cada edificio, se han efectuado los siguientes análisis: i) instrumentación, registro y análisis de ruido ambiental, ii) modelado y iii) análisis de resultados y discusión. Previamente, en el capítulo segundo, se describen los principales conceptos y técnicas relacionadas con el análisis y tratamiento de señales, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En el dominio del tiempo se describe el procedimiento de limpieza y depurado de ruidos y señales espurias, así como técnicas de filtrado para focalizar el análisis en la banda frecuencial de interés; Además, se introduce el concepto y uso de la amplitud cuadrática media y el análisis automático de picos. La amplitud cuadrática media permite analizar la variación temporal de la intensidad del ruido y, disponer de un algoritmo que identifica los picos, ha sido de gran utilidad en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia. En el dominio temporal se han podido relacionar los máximos de intensidad con la actividad en los edificios; en el dominio frecuencial, se han podido determinar, de forma automática, los picos de la densidad espectral de potencia. La amplitud cuadrática media, también se usa, después, para analizar la variación de la intensidad del ruido con el tiempo. En el dominio frecuencial se describen conceptos básicos, en relación a la transformada de Fourier, a los espectros de respuesta y a la densidad espectral de potencia. También se introducen y se discuten las ventajas y limitaciones del uso de las razones espectrales. En este mismo capítulo 2 se introducen elementos de instrumentación, concretamente sobre transductores de aceleración, velocidad y desplazamiento, se da la función de transferencia de los acelerómetros usados en los edificios de Andorra y España y se discute cómo, para altas frecuencias, las amplitudes de desplazamiento son muy pequeñas, comparadas con las amplitudes de las aceleraciones. Finalmente se discute sobre las variaciones que el daño introduce en el periodo propio de un edificio.

Edificio Prat del Rull. Andorra la Vella. Andorra

El edificio, que alberga los servicios de Protección Civil de Andorra y el Centro Nacional del Tránsito andorrano, fue construido en el año 2013. Se trata de un edificio irregular en planta que tiene 2 pisos subterráneos y 6 sobre el nivel de suelo. Los pisos subterráneos tienen muros de hormigón, pilares y vigas; los pisos sobre rasante tienen vigas y columnas de metal. Vale la pena comentar que el edificio de Andorra es complejo y se diferencia de los demás en su estructura espacial. Está formado por dos partes interconectadas, en los ejes norte/sur y este/oeste. La conexión se realiza en torno a una estructura de hormigón armado que contiene el ascensor. Además de su uso para servicios de protección civil, estas especiales características estructurales particulares, contribuyeron a su elección.

El edificio se instrumentó con 7 acelerómetros triaxiales, tipo Güralp Fortimus, entre el miércoles, día 3, y el día 10 de abril, de 2019, según la siguiente distribución: 3 en la planta sex-



ta, 2 en la cuarta, uno en la segunda planta y uno en la planta baja. No se efectuaron medidas de desplazamiento con radar. Se describen los análisis de uno de los acelerómetros instalados en la planta sexta. Se registraron las componentes HN1 y HN2 en las dos direcciones principales horizontales del edifico y HNZ en la dirección vertical. El análisis de la intensidad del ruido permitió distinguir cambios diurnos y nocturnos, así como jornadas laborables y no laborables. También pudieron observarse picos de intensidad relacionados con actividades cercanas o en el propio edificio. En los análisis de la PSD pudieron observarse, con claridad dos rangos frecuenciales. El primero, entre los 2 y 5 Hz, que se supone corresponde al edificio, el segundo, entre los 5 y 10 Hz, que se interpreta como ruido producido por actividad cercana al edificio, probablemente por maquinaria.

Los principales resultados de los análisis de los registros y del modelado estructural se resumen a continuación. En el rango entre las frecuencias de 2 y 5 Hz, periodos entre 0.5 y 0.2 s, aparecen varios picos. La frecuencia de 2.579 Hz corresponde a un modo de flexión en la dirección HN2, aunque parece hay una ligera torsión que involucra la componente HN1. Esta frecuencia estaría cerca de la frecuencia de 2.502 Hz, hallada en el análisis numérico. La frecuencia de 3.673 Hz predomina en la componente HN1 y las frecuencias de 2.870 Hz y 3.006 Hz son muy cercanas, por lo que podrían corresponder a un mismo modo, con torsión, que implicaría a las componentes HN2 y HN1, respectivamente para los períodos de 0.348 y 0.333 s. En la componente HN1 aparece también la frecuencia de 4.37 Hz, periodo de 0.229 s, que también se confirma en el modelo numérico. Filtrados, de paso de banda muy estrechos, permiten observar el movimiento del punto de medida para frecuencias seleccionadas, y la participación de cada componente, HN1, HN2 o HNZ. Los espectrogramas pusieron de manifiesto una buena estabilidad de los periodos modales. También permitieron observar pequeñas variaciones que se atribuyen a un aumento de masa en los momentos de mayor ocupación y a un aumento de la rigidez, debida a variaciones de temperatura durante la noche.

El edificio se ha modelado mediante elementos finitos. En una primera aproximación, no se obtuvo consistencia modelado-observado lo que se atribuyó a la presencia de edificios adyacentes no considerados en el modelo. Un modelo mejorado que incorpora esta interacción identifica bien las frecuencias de 2.502 Hz en la dirección Y (HN2), una de 4.34 Hz en la dirección X (HN1) que se corresponden con las frecuencias de 2.58 Hz y 4.37 Hz, observadas. Por otra parte, se confirma la dificultad de usar el modelado para hallar las condiciones del edificio sano. Con todo, una vez que los parámetros del modelo se han calibrado con los datos experimentales, el modelado numérico es una herramienta de simulación potente y eficiente para el análisis 3D de vibraciones de edificios. En particular, permite identificar las zonas más vulnerables de la estructura y medir las consecuencias que un terremoto tendría sobre el edificio. Así, por ejemplo, para este edificio, el hueco del ascensor se ha identificado como un punto de tensión importante, y se han detectado cambios del 5% o superiores en el periodo que, además, en este caso, son indicadores de daño significativo.

Edificio del Instituto Santa Eugènia en Girona (España)

Es un edificio de pórticos de hormigón armado que tiene planta baja, 3 plantas y la planta cubierta. En la planta cubierta hay una sección interior y una sección exterior accesible. El edificio se instrumentó con 7 acelerómetros triaxiales tipo Güralp Fortimus, los mismos que se usaron en edificio Prat del Rull, en Andorra. En cada una de las plantas, baja, primera, segunda y tercera, se instaló un acelerómetro; en la planta cubierta se instalaron dos, uno en el exterior y uno en el interior; un acelerómetro se instaló fuera del edificio, concretamente en el recinto de prácticas de obra civil y a nivel del suelo. Los registros se hicieron, de forma continua, entre los días 2, jueves, y 9 de mayo de 2019. El día 9 de mayo se realiza-



ron medidas con radar desde 6 posiciones distintas y con duraciones de entre 20 y 30 minutos.

Los sensores de aceleración se orientaron en las direcciones larga, longitudinal, HN1, y corta, transversal, HN2, del edificio. También se registró la componente vertical HNZ. En el informe se presentan los resultados del sensor instalado en la tercera planta. Los análisis de la intensidad del ruido y la identificación automática de picos, ha permitido establecer su correlación con los horarios de las actividades escolares, identificando, claramente, las horas de inicio y final de clases, que suelen comportar cambios de aulas y movimientos de estudiantes. También se distinguen variaciones diurnas y nocturnas y diferencias entre las jornadas lectivas y no lectivas. Los principales periodos modales identificados son: 0.228 s (F=4.379 Hz) que corresponde a una flexión en la dirección longitudinal (HN1); 0.186 s (F=5.379 Hz) en la dirección transversal (HN2). Este segundo modo involucra también la componente vertical, HNZ, lo que puede indicar una cierta torsión o cabeceamiento. Los análisis de movimiento de partícula confirman estos patrones modales. Los periodos son muy estables, pues no dependen de los niveles de intensidad del ruido. Con todo, en los espectrogramas se observan pequeñas oscilaciones. En horario escolar, digamos entre las 8 h y las 18 h, los periodos aumentan, ligeramente, y éstos, disminuyen durante la noche. Los análisis de los registros de radar son de difícil interpretación, debido a que los niveles de amplitud de los desplazamientos están por debajo de la capacidad de resolución del equipo. Sólo focalizando en las frecuencias detectadas con los acelerómetros es posible verificar que, efectivamente, estas frecuencias pueden adivinarse también en los registros de desplazamiento de mayor calidad.

El modelado se efectuó para el edificio de pórticos y para el edificio completo, incluyendo los cerramientos. En el edificio completo se identifican periodos de 0.28 s en la dirección HN1 y de 0.24 s en la dirección HN2. Se efectuó un análisis pushover resultando periodos fundamentales de 0.215 s y de 0.182 s, respectivamente en las direcciones HN1 y HN2. Estos valores muestran un buen acuerdo con los periodos observados (0.228 y 0.186 s).

Edificio del Hospital de Bagnères de Bigorre. (Francia)

El edificio es el bloque número 6, del complejo hospitalario de Bagnères de Bigorre. Se trata de un edificio, irregular en planta, de pórticos de hormigón armado, de 19 m de altura y está compuesto por la planta baja y 4 pisos. Hay también un subterráneo con una planta más reducida. Las medidas se efectuaron los días 9, 10 y 11 de abril de 2019, martes, miércoles y jueves, respectivamente. Para ello, se instalaron velocímetros Güralp (BRGM) y acelerómetros piezoeléctricos PCB (ENIT), en diferentes configuraciones. Para cada configuración, se colocó al menos un sensor dentro de la estructura, y uno, fijo para las tres configuraciones, fuera de la estructura, ambos a nivel del suelo, lo que permitió ensayar razones espectrales. Las medidas se hicieron en horario diurno. En la primera configuración se instalaron 8 sensores en la planta cuarta, dos a nivel del suelo y uno en el piso subterráneo. La dirección Norte de los instrumentos se orientó en la dirección longitudinal. Las medidas duraron 2 horas y 7 minutos. En la segunda se instalaron 5 sensores en el bloque izquierdo, 5 en el bloque central, en ambos casos uno en cada planta, dos en la zona irregular del bloque central, uno arriba en la planta 4 y uno en la primera planta. Uno más, el fijo de las tres configuraciones, en el exterior, en el suelo. Las medidas duraron 1 hora y 50 minutos. En la tercera configuración, se instalaron 5 sensores en el bloque de la derecha y 3 en el bloque central y en la irregularidad. En el primer piso se instalaron 2 sensores y dos sensores más se instalaron en la planta baja, a nivel del suelo, dentro del edificio, y uno en el suelo en el exterior del edificio.



Aunque los días 11 y 12 se realizaron mediciones con un instrumento Radar (BRGM), desde tres posiciones en el exterior del edificio, para analizar los movimientos en las direcciones longitudinal y transversal. No se obtuvieron resultados concluyentes.

En el informe, se muestra el análisis de las series temporales de la primera configuración de medidas. En la dirección transversal, se observan picos espectrales en el rango entre 2 y 10 Hz, destacando frecuencias entre 3.84 y 3.86 Hz y entre 5.7 y 6 Hz. Las razones espectrales entre los espectros de Fourier de los registros en la planta superior y en la planta subterráneo, resaltan estas frecuencias cercanas a los 4 y 6 Hz. Sin embargo, los cocientes entre espectros de respuesta resaltan frecuencias cercanas a los 7 Hz, que no se observan ni en los espectros de Fourier ni en sus razones espectrales. En la dirección longitudinal, también se observan varios picos, en el rango entre 2 y 10 Hz, con predominancia de la frecuencia de 2.661 Hz. Las razones espectrales entre espectros de Fourier resaltan las frecuencias cercanas a 2.7 Hz y en las razones entre espectros de respuesta también sobresale la frecuencia de 2.6 Hz.

Por otra parte, BRGM-Orleans usó el software ARTEMIS para efectuar un análisis de la deformación modal, usando, como inputs, las señales registradas y un modelo del edificio. Se obtuvieron los periodos de 0.26, 0.21 y 0.37 s, frecuencias de 3.85, 4.76 y 2.70 Hz, respectivamente para la deformación modal en la dirección transversal, en la transversal con torsión y en la longitudinal.

A partir de planos detallados, BRGM-Orleans y ENIT, modelaron el edificio en tres dimensiones. BRGM-Orleans usó el software OpenSees y macroelementos para modelar muros de carga, columnas, vigas y paredes de relleno. A partir de un primer modelo básico, de vigas y columnas, se prepararon 4 modelos, incorporando, progresivamente, elementos no estructurales. Para el tercer modelo, que incluía vigas, columnas, muros y paredes, se obtuvieron los periodos de 0.32, 0.28 y 0.20 s, frecuencias de 3.12, 3.77 y 5 Hz, que muestran una buena correlación con los determinados con el programa ARTEMIS de 0.37, 0.26 y 0.21 s, frecuencias de 2.70, 3.85 y 4.76 Hz. ENIT usó el software Abaqus para generar un modelo de elementos finitos de la parte central del edificio. Los periodos observados en los registros, ayudaron a ajustar las propiedades de los materiales. Obtuvieron una frecuencia propia de 3.775 Hz que compara bien con las frecuencias, cercanas a los 3.8 Hz, obtenidas a partir de los registros situados en la dirección transversal en el edificio central.

Sede del Departamento de Interior (Generalitat de Cataluña, España)

Las dificultades halladas con el radar interferométrico aconsejaron realizar medidas adicionales en un edificio del que se dispone de estudios previos. El radar interferométrico identificó bien dos frecuencias modales cercanas a los 2 y 4 Hz. Probablemente a ello contribuyó una relativamente mayor intensidad de los desplazamientos debida a una mayor excitación del edificio, situado en una gran ciudad, y a su mayor altura. Sin embargo, la información proporcionada por el radar sigue siendo muy pobre cuando se compara con la que proporcionan acelerómetros o velocímetros.

Comentarios finales

La instrumentación de tres edificios esenciales ha permitido aumentar nuestro conocimiento sobre el análisis modal operacional (OMA) y sobre el monitoreo de la salud estructural de edificios (SHM). POCRISC nos ha brindado la oportunidad de trabajos y estudios avanzados. Los beneficios trascienden los objetivos específicos y la temporalidad del proyecto. La gran cantidad de datos, de alta calidad, recogidos en los tres edificios, permitirá avanzar en el conocimiento de la oportunidad, viabilidad y utilidad de este tipo de monitoreo, permitien-



do distinguir estructuras y situaciones, en las que los beneficios son claros y relativamente sencillos de implementar, de otras, en las que las características estructurales y los niveles de vibración hagan previsibles menores probabilidades de éxito.

El seguimiento de la variación temporal de intensidad permite detectar cualquier modificación en las condiciones operativas del centro, siendo posible y sencillo identificar periodos de calma y de actividad. Las medidas, sean de aceleración, sean de velocidad, permiten detectar bien los principales modos de vibración y definir sus principales formas modales, ya que su análisis, permite estimar la distribución de los desplazamientos tanto en planta como en altura.

El modelado es una excelente herramienta para conocer el comportamiento modal de un edificio. Sin embargo, la variabilidad e incertidumbre de los parámetros que definen la respuesta estructural pueden complicar la comparación edificio-modelado-edificio-observado. Por lo tanto, una calibración de los parámetros del modelado estructural frente a los resultados experimentales, que incluya los materiales, la geometría y las condiciones de contorno, entre otros, es esencial para definir las condiciones iniciales del edificio, es decir, los parámetros modales del "edificio sano". A partir del modelo calibrado, un interesante ejercicio de simulación, mediante análisis dinámico no lineal de los edificios de Andorra y del Hospital de Bagnères de Bigorre, sometidos a un sismo, confirma la variación del 5% en el periodo fundamental del edificio. En el caso del sismo estudiado, hallan una variación de hasta el 12%. Con todo, hay que ser cautos a la hora de generalizar estos resultados, dado que estos incrementos dependen de la modelización, del software utilizado y sobre todo y de forma importante, del tipo estructural.

En caso de catástrofe sísmica es interesante disponer de una herramienta de diagnóstico del estado de seguridad de edificios, sin acceder a ellos. El radar interferométrico, es un buen candidato para este tipo de medidas a distancia. Las frecuencias propias de los edificios esenciales y residenciales suelen estar por encima de los 2 Hz y es conocido que, para estas frecuencias, las amplitudes de los desplazamientos son muy pequeñas comparadas con las amplitudes de las aceleraciones. En los edificios estudiados, el dispositivo radar utilizado, carece de la suficiente resolución para tratar con los desplazamientos esperados, que son de décimas de micra, dos órdenes de magnitud por debajo de la capacidad de los dispositivos ensayados. Con todo Un estudio adicional en el edificio de la sede del Departamento de Interior de la Generalitat de Catalunya, ha puesto de manifiesto que el radar interferométrico puede ser de utilidad en edificios altos, con frecuencias propias relativamente bajas, y con niveles de excitación altos.



Índice

POCRISC -----

Agradecimientos	i
Resumen ejecutivo	iii
Edificio Prat del Rull. Andorra la Vella. Andorra	iii
Edificio del Instituto Santa Eugènia en Girona (España)	iv
Edificio del Hospital de Bagnères de Bigorre. (Francia)	v
Sede del Departamento de Interior (Generalitat de Cataluña, España)	vi
Comentarios finales	vi
Índice	X
Lista de figurasxv	'ii
Liste des figuresxx	i ii
Lista de tablasxx	V
1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 El proyecto POCRISC	1
1.2.1 La Acción 4: reducción de la vulnerabilidad	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
Mediciones	5
Modelado	5
Análisis	5
1.4 Método	5
1.4.1 Dispositivos situados en el edificio	5
1.4.2 Dispositivos situados fuera del edificio	6
1.5 Contenido del informe	6
2 Aspectos conceptuales y metodológicos	7
2.1 Introducción	7
2.2 Dominio del tiempo	7
2.2.1 Análisis preliminar	7
2.2.2 Intensidad del movimiento	9
2.2.3 Análisis de picos	9
2.3 Dominio de la frecuencia	9
2.3.1 Transformada de Fourier	9

			Transformada discreta	10
			La transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform)	10
	2.	3.2	Espectros de respuesta	11
	2.	3.3	Densidad espectral de potencia (PSD, Power Spectral Density)	11
			Convolución	11
			Correlación	11
			Autocorrelación	12
			Las unidades	12
	2.	3.4	Cálculo práctico de la PSD	13
			Espectrograma	13
	2.	3.5	Razones espectrales (HVSR)	13
	2.4	La i	nstrumentación	13
	2.	4.1	Transductores de aceleración. Acelerómetros	14
			Función de transferencia	14
	2.	4.2	Transductores de velocidad	14
	2.	4.3	Transductores de desplazamiento. La interferometría RAR	15
			La Interferometría	15
			El Radar de Apertura Real (RAR)	16
	2.5	Ace	eleración, velocidad y desplazamiento	17
			Amplitud y frecuencia	17
			Máximos de PSD	18
	2.6	Ince	ertidumbres en el modelado	19
	2.7	Edi	ficio sano-edificio dañado	20
3	Prat	del l	Rull (Andorra)	23
	3.1	Ele	dificio	23
	3.2	La i	nstrumentación	24
	3.	2.1	Acelerómetros	24
	3.	2.2	Radar de apertura real: RAR	25
	3.3	Aná	ilisis de los datos	26
	3.	3.1	Medidas de aceleración	26
			Análisis preliminar	26
			Intensidad del ruido	27
			Frecuencias propias. Densidad espectral de potencia	28
			Espectrogramas	33
			Estabilidad de los períodos	33
			Movimiento de partícula	33



			Periodo T=0.388 s (Frecuencia F=2.577 Hz)	34
			Periodo T= 0.348 s (Frecuencia F=2.874 Hz)	36
			Periodo T= 0.333s (Frecuencia F=3.003 Hz)	36
			Periodo T= 0.296 s (Frecuencia F=3.378 Hz)	36
			Periodos T= 0.272 s y T=0.226 (Frecuencias F=3.677 Hz y F=4.425 Hz)	36
	3	.3.2	Medidas de desplazamiento	36
	3.4	El r	nodelado	36
	3	.4.1	Análisis del edificio sin-daño	39
	3	.4.2	Análisis de daño	40
	3.5	Ref	lexiones finales	40
			Medidas de aceleración: intensidad del ruido	40
			Medidas de aceleración: frecuencias predominantes	42
			Medidas de aceleración: estabilidad	42
			Medidas de desplazamiento	42
			Modelado	42
			El daño y la deriva del periodo	43
4	Insti	ituto	Santa Eugènia (España)	45
	4.1	Εl e	edificio	45
	4.2	La	instrumentación	46
	4	.2.1	Acelerómetros	46
	4	.2.2	Radar de apertura real (RAR)	48
	4.3	Ana	álisis de los datos	48
	4	.3.1	Medidas de aceleración	48
			Análisis preliminar	48
			Intensidad del ruido	50
			Frecuencias propias. Densidad espectral de potencia	52
			Espectrograma	53
			Estabilidad de los períodos	57
			Movimiento de partícula	59
			Frecuencia F=4.379 Hz (Periodo T=0.228 s)	59
			Frecuencia F=5.379 Hz (Periodo T=0.186 s)	59
			Frecuencia F=4.871 Hz (Periodo T=0.205 s)	60
	4	.3.2	Medidas de desplazamiento (RAR)	60
			Campaña de medidas	60
			Análisis preliminar	66
			Frecuencias propias	66



	4.4	El modelado	67
	4.4	I.1 Análisis modal	69
		Edificio de pórticos	69
		Edificio completo	70
	4.4	1.2 Análisis estático no lineal (<i>Pushover análisis</i>)	70
	4.5	Reflexión final	71
		Medidas de aceleración	71
		Medidas de desplazamiento	72
5	Hospi	ital de Bagnères de Bigorre	73
	5.1	Introducción	73
	5.2	El edificio	73
	5.3	La instrumentación	76
	5.3	3.1 Transductores de velocidad y aceleración	76
	5.3	8.2 Radar de apertura real	76
	5.4	Calendario	76
	5.5	Configuración de las medidas	77
	5.5	5.1 Medidas de velocidad	77
		Primera configuración (9 de abril de 2019)	77
		Segunda configuración (10 de abril de 2019)	77
		Tercera configuración (11 de abril de 2019)	79
	5.5	5.2 Medidas de aceleración	79
	5.6	Medidas con Radar	79
	5.7	Resultados	80
	5.7	7.1 Series temporales de velocidad	80
		Primera configuración: 9 de abril de 2019 (Figura 5-5)	80
		Dirección transversal (Dirección Este de los sensores)	80
		Dirección longitudinal (Dirección Norte de los sensores)	82
	5.7	7.2 Sensores PCB de aceleración	86
	5.7	7.3 Radar	86
	5.8	Modelado	90
	5.8	B.1 BRGM-Orleans	91
		Analisis experimental de la deformación modal	91
			91
	5.8		91
	5.9	Reflexion final	94
	5.9	0.1 Medidas de velocidad	94



	5.9	9.2	Medidas de desplazamiento	95
	5.9	9.3	Modelado	
6	6 Conclusiones			
	6.1	Est	udio complementario con Radar	
	6.1	.1	El edificio	
	6.1	.2	Resultados previos	
	6.1	.3	Medidas RAR	
	6.1	.4	Discusión	
	6.2	Cor	nclusión final	
			Intensidad del ruido	
			Análisis modal operacional	
			Modelado estructural	102
			Alcance de las medidas con radar	
R	eferen	cias		105
		orac		
7	Anexo	o I.	Protocolo de medidas. Prat del Rull	107
	Síntes	sis .		111
	7.1	Ele	dificio	112
	7.2	Me	didas de ruido por vibración ambiental	112
	7.2	2.1	Instrumentación	114
	7.2	2.2	Ubicación de los acelerómetros	115
	7.2	2.3	Datos registrados	118
	7.2	2.4	Distribución de los datos registrados	119
	7.3	Cal	endario	119
	7.4	Ane	exo. Especificaciones técnicas del acelerómetro Güralp Fortimus	121
8	Anexo	o II.	Protocolo de medidas. Instituto Santa Eugènia	125
	Síntes	sis .		129
	8.1	Εl e	dificio	131
	8.2	Me	didas acelerométricas del ruido por vibración ambiental	
	8.2	2.1	Instrumentación	
	8.2	2.2	Situación de los acelerómetros	133
	8.2	2.3	Datos registrados	135
	8.2	2.4	Distribución de los datos registrados	
	8.3	Cal	endario	



9	Anexo III. Protocolo de medidas en el Centro Hospitalario de Bagnères de Bigorre.	137
	Medidas de ruido sísmico en el Centro Hospitalario de Bagnères de Bigorre	141
	9.1 Proyecto POCRISC	141
	9.2 Medidas de ruido por vibración ambiental en El Centro Hospitalario	141
	9.2.1 Ejemplo de instrumentación	141
	9.2.2 Equipamiento	143
	Velocímetros Güralp	143
	Acelerómetros PCB y estación de adquisición.	144
	Instrumento Radar	144
	9.3 Participantes en las medidas	145
	9.4 Calendario	145
1(0 Annex IV. Instrumentation du bâtiment 6 de l'hôpital de Bagnères de Bigorre.	147
	Avant-propos	151
	Synthèse	151
	10.1 INTRODUCTION	153
	10.1.1 Type des capteurs	154
	Captures vélocimétriques et accélérométriques	154
	Vélocimétres Güralp et réseau d'enregistrement	154
	Accéléromètres PCB et station d'acquisition	154
	Instrument radar interférométrique (RAR)	155
	10.2 Instrumentation du bâtiment B6	156
	10.2.1 Particularités du bâtiment 6	156
	10.2.2 Configuration des mesures	157
	Mesures vélocimétriques et accélérométriques	157
	Mesures radar interférométriques (RAR)	158
	10.3 PREMIERS RESULTATS	159
	10.3.1 Séries temporelles, Spectres de Fourier, Périodes de vibration	159
	10.3.2 Analyse modale opérationnelle pour les essais in situ des structures	163
	10.4 Annexe 2: Description de projet H2020 : TURNkey alerte précoce	167
	10.4.1 Projet européen Horizon- 2020 « TURNkey »	169
	1. Contexte	169
	2. Informations générales sur le consortium	169
	3 Description technique	170



Anexo V. Informe técnico sobre las medidas Radar adquiridas en el edificio del	
"Institut Santa Eugènia" en Girona1	73
Resumen ejecutivo	79
Introducción18	81
Posición 118	84
Detalles18	84
Comentarios18	84
Posición 218	85
Comentarios18	85
Posición 318	88
Posición 418	88
Posición 518	89
Posición 6	89



Lista de figuras

Figura 1-1.	Dispositivos para la medida de ruido ambiental en un edificio. Se muestra el sensor transductor de velocidad, la planta y el alzado del edificio	2
Figura 1-2.	Registro de ruido en el edificio de la Figura 1-1. a) Historias temporales de velocidad. b) Movimiento de partícula	2
Figura 2-1.	Acelerómetro1	4
Figura 2-2.	Funciones de transferencia en amplitud y en fase de los sensores de aceleración1	5
Figura 2-3.	a) Equipo de radar interferométrico de apertura Real (RAR). b) Esquema de una medición RAR: 1) adquisición; 2) selección de <i>bins</i> sobre el perfil radar; 3) extracción de muestras temporales de desplazamiento	6
Figura 2-4.	Foto del sistema de medición radar1	6
Figura 2-5.	Amplitudes relativas de aceleración, velocidad y desplazamiento1	7
Figura 2-6.	Historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento1	9
Figura 2-7.	Variabilidad de los periodos en función de la resistencia a compresión de la mampostería para el edificio de la derecha1	9
Figura 2-8.	PSDs de las señales de la Figura 2-62	0
Figura 2-9.	a) Variabilidad del periodo en función del daño. a) edificios de hormigón armado antes y después del sismo de Lorca (Vidal et al. 2014). b) Variación del periodo con el grado de daño, para un edificio específico (Hidalgo-Leiva 2017)2	1
Figura 3-1.	a) Situación del edificio Prat del Rull. b) Plano del edificio. Piso subterráneo. c) Fachada Este. d) Fachada Norte2	3
Figura 3-2.	a) Esquema de alzado y b) plano de la planta baja del edificio. Se indica el punto y las direcciones de registro2	4
Figura 3-3.	Acelerómetro usado en la instrumentación del edificio2	5
Figura 3-4.	Calendario del mes de abril de 2019. Se indican las fechas de las mediciones2	5
Figura 3-5.	a) Ejemplo de instalación de un acelerómetro (C002, segunda planta). b) Detalle de la situación de los acelerómetros en la planta 62	6
Figura 3-6.	a) Registro bruto del día 5 de abril de 2019 y b) y c), registros tratados de los días 5 y 6 de abril de 20192	7
Figura 3-7.	Ejemplo de las series temporales finales, después del análisis preliminar. a) Día 5 de abril, viernes. b) Día 6 de abril, sábado2	7
Figura 3-8.	Variación de los niveles de ruido a lo largo del día. a) Viernes 5 de abril. b) Sábado 6 de abril. c) Domingo 7 de abril. Sensor YK.C005, sexta planta2	8
Figura 3-9.	PSD's de las series temporales de los días: a) 5, viernes, b) 6, sábado, y c) 7, domingo, del mes de abril 2019. Sensor YK-C005	0
Figura 3-10.	PSD's correspondientes a las señales temporales de los diferentes días de registro para: a) HN1, b) HN2, y c) HNZ	1
Figura 3-11.	a) PSD's medias y síntesis de las frecuencias detectadas. b) Enfoque en el rango de periodos entre 0.2 y 1 s. (Véase Tabla 3-2)	2
Figura 3-12.	Espectrogramas de las componentes HN1, HN2 y HNZ, sin suavizar (a, b y c) y suavizados (d, e y f) de los registros de aceleración YK-C005, del viernes 5 de abril de 2019. Se muestran también los períodos con máxima PSD	4
Figura 3-13.	PSD's correspondientes a las señales temporales de los diferentes días de registro para: a) HN1, b) HN2, y c) HNZ	5



Figura 3-14.	 a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 2.45-2.71 Hz) b) Movimiento de partícula correspondiente al período T=0.388 s (Frec.=2.577 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección HN2. Registro del viernes, 5 de abril de 2019
Figura 3-15.	Movimientos de partícula correspondientes a los períodos: a) T=0.348 s $(F=2.874 \text{ Hz})$, b) T=0.333 s $(F=3.00 \text{ Hz})$, c) T= 0.296s $(F=3.378 \text{ Hz})$, d) T=0.272 s $(F=3.677 \text{ Hz})$ y e) T=0.229 s $(F=4.425 \text{ Hz})$. Registro del viernes, 5 de abril de 2019
Figura 3-16.	Estrategia del modelado y análisis (Fuente: Dalverny O.)
Figura 3-17.	 a) Desplazamiento Modo 1. Flexión. Frecuencia 2.502 Hz. Eje Y. b) Desplazamiento Modo 3. Flexión. Frecuencia 4.34 Hz. Dirección X. (Fuente: Barus et al. 2020 a)40
Figura 3-18.	 a) acelerograma para el análisis dinámico no lineal. b) modelo de elementos finitos. c) estado del edificio en el instante t=0.8 s, d) estado en el instante t=3.5 s. (Barus et al. 2020 a)41
Figura 4-1.	a) Situación del IES Santa Eugènia. b) Foto general45
Figura 4-2.	Esquema del alzado del edificio, con especificación del bloque instrumentado46
Figura 4-3.	Esquema de una planta del edificio y de las direcciones de los registros de aceleración46
Figura 4-4.	Calendario del mes de mayo de 2019. Se indican las fechas de las mediciones47
Figura 4-5.	a) y b) Ejemplo de acelerómetros instalados. c) Ejemplo de antena GNSS47
Figura 4-6.	a) Operaciones de instalación de acelerómetros. b) Tres antenas correspondientes a los acelerómetros de la planta baja, primera y segunda48
Figura 4-7.	Registro bruto del día 3 de mayo de 2019, a). Registros, tratados, de los días 3 y 4 de mayo de 2019, b) y c). Obsérvese la diferente intensidad de la señal del día 4 (sábado), con respecto a la del día 3 (viernes), en horario lectivo49
Figura 4-8.	Variación de los niveles de ruido a lo largo del día. a) Viernes 3 de mayo, b) domingo 5 de mayo y c) lunes 6 de mayo. Como medida de intensidad se ha tomado la amplitud cuadrática media. Los tiempos corresponden a la hora local
Figura 4-9.	PSD's para las series temporales de los días 3, viernes, a), 5, domingo, b) y 6, lunes, c), de mayo de 201954
Figura 4-10.	PSD's correspondientes a las señales temporales de los diferentes días de registro para: a) HN1-Long, b) HN2-Transv y c) HNZ-Vert
Figura 4-11.	PSD's medias y síntesis de las frecuencias detectadas. (Véase Tabla 4-5 y explicación en el texto)
Figura 4-12.	Espectrogramas de las componentes HN1, HN2 y HNZ, sin suavizar (a, b y c) y suavizados (d, e y f) de los registros de aceleración YK-C011, del viernes 3 de mayo de 2019. Se muestran también los períodos con máxima PSD
Figura 4-13.	Zoom sobre el espectrograma de la componente HN1 del registro del 3 de mayo donde se observan pequeñas variaciones diurnas y nocturnas del periodo con respecto al valor medio (línea a trazos)
Figura 4-14.	a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 4.17-4.61 Hz). b) Movimiento de partícula del período 0.228 s (F=4.379 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección longitudinal (HN1). Registro del jueves, día 2 de mayo de 2019.



Figura 4-15.	a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 4.17-4.61 Hz). b) Movimiento de partícula del período 0.228 s (F=4.379 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección longitudinal (HN1). Registro del sábado, día 4 de mayo de 2019.	62
Figura 4-16.	a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 5.11-5.65 Hz). b) Movimiento de partícula del período 0.186 s (F=5.379 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección transversal (HN2). Registro del domingo, día 5 de mayo de 2019.	63
Figura 4-17.	a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 5.11-5.65 Hz). b) Movimiento de partícula del período 0.186 s (F=5.379 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección transversal (HN2) y un ligero, aunque no negligible, movimiento vertical (HNZ). Registro del jueves, día 9 de mayo de 2019	64
Figura 4-18.	a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 4.63-5.12 H. b) Movimiento de partícula del período 0.205 s (F=4.871 Hz). Se observa el movimiento predominante en la dirección longitudinal (HN1). Registro del jueves, día 2 de mayo de 2019.	65
Figura 4-19.	a) Diagrama de la calidad de la señal. b) Esquema de la geometría de la	66
Figure 4.20	a) Proparativas de la medida desde la pesisión 5 y, h) desde la pesisión 6	00
Figura 4-20.	a) Preparativos de la medida desde la posición 5 y, b), desde la posición 6	
rigula 4-21.	Enfoque de la PSD del registro RAR de la posición 2 en el rango de periodos entre 0.2 y 5 s. c) ampliación e identificación de periodos	68
Figura 4-22.	Modelo numérico: a) elementos de pórticos y forjados; b) plano y direcciones principales del edificio (HN1 corresponde a la dirección longitudinal, larga, mientras que la HN2 corresponde a la dirección transversal, corta); c) representación gráfica (renderizado) del edificio sin cerramientos; d) representación gráfica (renderizado) del edificio con cerramientos	69
Figura 4-23.	a) Modo traslacional en la dirección HN1 (x); b) modo traslacional en la dirección HN2 (y).	70
Figura 4-24.	a) Modo traslacional en la dirección HN1 (<i>x</i>); b) modo traslacional en la dirección HN2 (<i>y</i>).	71
Figura 4-25.	Espectros de capacidad del edificio completo, para las direcciones: a) longitudinal, x y b) transversal, y. En ambos espectros se muestra también la forma bilineal. (Garzón-Andrade 2020).	71
Figura 5-1.	a) Occitania, altos pirineos, Bagnères de Bigorre. b) Situación del edificio, el número 6, dentro del complejo hospitalario. c) Situación del Centro hospitalario en Bagnères-de-Bigorre (fuente <i>Google maps</i>). d) foto de la fachada e) y f) vistas generales del edificio.	74
Figura 5-2.	Visión del edificio instrumentado en el complejo hospitalario, con detalles fotográficos (Fuente: M Barus)	75
Figura 5-3.	a) Sismógrafo Güralp 6TD. b) Acelerómetros PCB. c) Radar IBIS-FS de IDS	76
Figura 5-4.	Calendario del mes de abril de 2019. Se indican las fechas de las mediciones	76
Figura 5-5.	Descripción de la posición de los sensores para la primera configuración	78
Figura 5-6.	Descripción de la posición de los sensores para la segunda configuración	78
Figura 5-7.	Descripción de la posición de los sensores para la tercera configuración.	79
Figura 5-8.	Ejemplos de posiciones del dispositivo RAR.	80



Figura 5-9.	Descripción de las posiciones del radar para las tres configuraciones. a) Primera configuración, primera medida, b) Primera configuración, segunda medida. c) Segunda configuración. d) Tercera configuración
Figura 5-10.	Ejemplo de registro de la componente transversal de velocidad para los sensores instalados el 9 de abril de 2019. Primera configuración83
Figura 5-11.	Espectros de Fourier. Dirección transversal. Primera configuración84
Figura 5-12.	Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/sótano). Dirección transversal. Primera configuración84
Figura 5-13.	Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/nivel-de-suelo). Dirección transversal. Primera configuración85
Figura 5-14.	Razones espectrales. Espectros de respuesta 5% amortiguado (arriba/sótano). Dirección transversal. Primera configuración85
Figura 5-15.	Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/nivel-de-suelo). Dirección transversal. Primera configuración
Figura 5-16.	Ejemplo de registro de la componente longitudinal de velocidad, para los sensores instalados el 9 de abril de 2019. Primera configuración
Figura 5-17.	Espectros de Fourier. Dirección longitudinal. Primera configuración
Figura 5-18.	Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/sótano) Dirección longitudinal. Primera configuración88
Figura 5-19.	Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/Nivel-de-suelo) Dirección longitudinal. Primera configuración
Figura 5-20.	Razones espectrales. Espectros de respuesta 5% amortiguado (arriba/sótano). Dirección longitudinal. Primera configuración89
Figura 5-21.	Registros de sensores PCB en la dirección longitudinal en la escalera central del edificio (aceleraciones en función del tiempo para los cuatro pisos)90
Figura 5-22.	Resultados del análisis de la deformación modal mediante el software ARTEMIS92
Figura 5-23.	Ejemplo de modelos estructurales básicos obtenidos con el software OpenSees
Figura 5-24.	Vista aérea del edificio y modelo estructural del bloque central del edificio, obtenido mediante el software Abaqus94
Figura 6-1.	Vistas aéreas y esquema del alzado del edificio. (Fuente de vistas aéreas: Google Earth)98
Figura 6-2.	PSDs normalizadas de las tres componentes de los velocigramas registrados con el dispositivo de la Figura 1-199
Figura 6-3.	a) Medidas efectuadas. b) Esquema de las posiciones 1 y 3 del equipo. (Luzi 2021)
Figura 6-4.	 a) Ejemplo de serie temporal de desplazamiento. b) PSD correspondiente a la serie temporal. Se observan con claridad los picos a las frecuencias de 1.98 y 3.88 Hz. (Luzi 2021)101
Figura 7-1.	Ubicación e índice de planos del edificio Prat de Rull del Gobierno de Andorra112
Figura 7-2.	Vistas con los alzados del edificio Prat de Rull del Gobierno de Andorra. Ubicación e índice de planos del edificio Prat de Rull del Gobierno de Andorra113
Figura 7-3.	Imagen de un acelerómetro Güralp Fortimus114
Figura 7-4.	Plano de la planta baja del edificio Prat de Rull del gobierno de Andorra115
Figura 7-5.	Plano de la planta segunda del edificio Prat de Rull del gobierno de Andorra116
Figura 7-6.	Plano de la planta cuarta del edificio Prat de Rull del gobierno de Andorra116
Figura 7-7.	Plano de la planta sexta del edificio Prat de Rull del gobierno de Andorra117



Figura 7-8.	Fotografía de la estación YK.C002, instalada en la segunda planta	.117
Figura 8-1.	Situación del edificio de l'Institut Santa Eugènia	.131
Figura 8-2.	Vista del alzado del edificio del <i>Institut Santa Eugènia</i> donde se identifica el "Bloque A", sobre el que se realizan las medidas de ruido por vibración ambiental con acelerómetros y RAR	.131
Figura 8-3.	Imagen de un acelerómetro Güralp Fortimus	.132
Figura 8-4.	Plano de las plantas baja y primera del edificio del Instituto Santa Eugènia sobre el que se realizan las medidas de ruido sísmico y RAR	.134
Figura 8-5.	Plano de las plantas segunda y tercera del edificio del Instituto Santa Eugènia sobre el que se realizan las medidas de ruido sísmico y RAR	.134
Figura 8-6.	Vista del alzado del edificio del Instituto Santa Eugènia sobre el que se realizan las medidas de ruido sísmico y RAR. El círculo rojo indica el punto de instalación de los equipos de la cubierta	. 134
Figura 8-7.	Ortofoto del edificio del Instituto Santa Eugènia sobre el que se realizan las medidas de ruido sísmico y RAR. El círculo rojo indica el punto de instalación de los equipos de la cubierta y en la zona de prácticas de obra civil	. 135
Figura 9-1.	a) Ejemplo de instrumentación de edificio. b) Ejemplo de tratamiento de los registros. Cálculo del período propio de vibración.	.142
Figura 9-2.	Ejemplo esquemático de instrumentación, por planta, del edificio "Medicina" (sensores en verde). Figura extraída del informe INGENIERIE IOSIS)	.143
Figura 9-3.	Presentación de material de medidas de ruido por vibración ambiental	.143
Figura 9-4	Presentación de funcionamiento de una red de registro	.144
Figura 9-5	Sensores PCB y estación de adquisición	.144
Figura 9-6.	Presentación del Radar	. 145



Liste des figures

Figure 10-1.	Présentation du matériel de mesure de bruit de fond GÜRALP	154
Figure 10-2.	Présentation du fonctionnement du réseau d'enregistrement	154
Figure 10-3.	Capteurs PCB et station d'acquisition	155
Figure 10-4.	Présentation du Radar	155
Figure 10-5.	Bâtiment 6 dit « Médecine » de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre avec les travaux de 1985 et 2018 (source archives du bâtiment)	156
Figure 10-6.	Modélisation IOSIS du bâtiment 6 dit « Médecine » de l'hôpital de Bagnères-de- Bigorre (source: archives du bâtiment)	157
Figure 10-7.	Illustration de la configuration 1 avec les capteurs placés sur le dernier plancher accessible du bâtiment	158
Figure 10-8.	Illustration de la configuration 1 du Radar liée au comportement transversal (axe Y) de la structure	159
Figure 10-9.	Enregistrements de la direction transversale (axe Y) lors de la première configuration des capteurs Güralp.	160
Figure 10-10.	Enregistrements des capteurs PCB dans la direction longitudinale (axe X) au sein de la cage d'escalier centrale du bâtiment (accélérations en fonction du temps pour les quatre étages)	161
Figure 10-11.	Spectres de Fourier pour les enregistrements dans le sens transversal Y (gauche) et dans le sens longitudinal X (droite)	162
Figure 10-12.	Spectres de Fourier pour les enregistrements des capteurs PCB dans le sens transversal (axe Y)	162
Figure 10-13.	Périodes de vibration du bâtiment dans les sens longitudinal et transversal issues des mesures vélocimétriques et accélérométriques (*)	162
Figure 10-14.	Déformée modale du bâtiment dans le sens transversal Y correspondante à la période de vibration de 0.26 s (© logiciel ARTEMIS).	163
Figure 10-15.	Déformée modale du bâtiment dans le sens longitudinal X correspondante à la période de vibration de 0.37 s (© logiciel ARTEMIS)	164
Figure 10-16.	Direction transversale Y combinée à la torsion sur le bâtiment (© logiciel ARTEMIS)	165
Figure 10-17.	Déformée modale de la partie centrale du bâtiment dans le sens transversal Y correspondante à la période de vibration de 0,27 s (logiciel LMS TESTLAB)	166



Lista de tablas

- POCRISC -----

Tabla 2-1.	Valores de los polos de la ecuación (2-9).	14
Tabla 2-2.	Acelerómetros Güralp Fortimus usados	14
Tabla 2-3.	Principales características del IBIS-S.	16
Tabla 2-4.	Comparación de amplitudes de aceleración, velocidad y desplazamiento en función del período (Figura 2-5)	18
Tabla 3-1.	Detalle de las medidas de aceleración con indicación del lugar de registro, fechas y horas ^(**) de las medidas inicial y final	25
Tabla 3-2.	Periodos y frecuencias detectadas en los registros YK-C005. (Figura 3-11)	32
Tabla 3-3.	Periodos y frecuencias detectadas en los registros YK-C005. (Figura 3-11)	36
Tabla 3-4.	Análisis de daño. Relación entre el daño y la variación de la frecuencia	42
Tabla 4-1.	Detalle de las medidas de aceleración con indicación del lugar de registro, fechas y horas ^(**) inicial y final de las medidas	47
Tabla 4-2.	Esquema general de actividad y horario en el centro.	51
Tabla 4-3.	Cuadro horario de los principales picos de ruido entre las 08:00 y las 14:45 de los días 3 y 6 de mayo. (véase también la Figura 4-8)	51
Tabla 4-4.	Valores medios de la amplitud cuadrática media, en µm/s², para los diferentes días de registro. Se muestran los niveles mínimo y máximo en negrita	52
Tabla 4-5.	Periodos y frecuencias detectadas en los registros YK-C011. (Véase también la Figura 4-9)	56
Tabla 4-6.	Periodos propios, detectados en los espectrogramas no-suavizados de la estación YK-C011. Se dan también las desviaciones estándar y los coeficientes de variación en %. Se observa una excelente estabilidad de los periodos observados.	57
Tabla 4-7.	Periodos propios, detectados en los espectrogramas suavizados de la estación YK-C011. Se dan también las desviaciones estándar y los coeficientes de variación en %. Se observa una excelente estabilidad de los periodos observados	57
Tabla 4-8.	Detalle de las posiciones, horas y duraciones de las mediciones RAR	60
Tabla 4-9.	Resultados de análisis modal del edificio, sin cerramientos.	70
Tabla 4-10.	Resultados de análisis modal del edificio completo	70
Tabla 4-11.	Puntos de cedencia y de capacidad última de los espectros de capacidad de la Figura 4-25	71
Tabla 5-1.	Frecuencias con máxima amplitud	84
Tabla 5-2.	Frecuencias con máxima amplitud	84
Tabla 5-3.	Frecuencias con máxima amplitud	85
Tabla 5-4.	Periodos con máxima amplitud	85
Tabla 5-5.	Frecuencias con máxima amplitud	86
Tabla 5-6.	Frecuencias con máxima amplitud	88
Tabla 5-7.	Frecuencias con máxima amplitud	88
Tabla 5-8.	Frecuencias con máxima amplitud	89
Tabla 5-9.	Periodos con máxima amplitud	89
Tabla 5-10.	Resumen de los análisis modales efectuados.	91
Tabla 7-1.	Polos de la función de transferencia de los acelerómetros en rad/s	. 115

Tabla 7-2.	Sensibilidad de los componentes de los sensores a la frecuencia de 1 Hz, en cuentas/m/s ²	115
Tabla 8-1.	Polos de la función de transferencia de los acelerómetros en rad/s	133
Tabla 8-2.	Sensibilidad de los componentes de los sensores a la frecuencia de 1 Hz, en cuentas/m/s ²	133
Tabla 9-1.	La lista completa de personas participantes en las medidas	145
Tabla 9-2.	La lista de personas involucradas	145



1 Introducción

1.1 Introducción

Los edificios sometidos a acciones dinámicas vibran de acuerdo a unos periodos y formas de vibración, o formas modales, que son propios de la configuración geométrica de su estructura y de sus propiedades mecánicas y materiales. En edificios regulares y con propiedades homogéneas hay un modo de vibrar que predomina sobre los otros y que se conoce como modo fundamental. A medida que aumenta la altura, la importancia de los otros modos, conocidos como modos superiores, aumenta. También, para una altura determinada, la participación de los modos superiores crece en edificios con irregularidades geométricas, en planta o en altura, así como con las debidas a las distribuciones de masa y rigidez. Por otra parte, es un hecho bien conocido que, las frecuencias propias de un edificio degradado o dañado varían con respecto a las frecuencias modales del edificio original sano. Los períodos crecen con el daño (Vidal et al. 2014).

En este documento se presentan los principales resultados de los trabajos de instrumentación y del modelado estructural realizados en tres edificios, en el marco de la Acción 4 del proyecto "*Por una cultura común del riesgo sísmico*", POCRISC, de referencia EFA158/16 POCRISC de la segunda convocatoria de proyectos INTERREG V-A ESPAÑA-FRANCIA-ANDORRA, POCTEFA 2014-2020. Concretamente, se instrumentan tres edificios considerados esenciales, un centro de gestión de emergencias en Andorra, un hospital en Francia y una escuela de enseñanza secundaria en España. También usando planos detallados de los edificios, se han desarrollado modelos estructurales mecánicos de los mismos y se han realizado estudios de su comportamiento dinámico esperado.

Así, una parte relevante de esta actividad es la medida de la respuesta de edificios a la excitación del *ruido ambiental*¹. La Figura 1-2 muestra un ejemplo de registro de velocidad de ruido sísmico en una esquina de la planta sexta de un edificio metálico de 9 pisos (Figura 1-1). Obsérvese que el edificio se unió a otro edificio. El edificio acoplado es de mampostería no reforzada y esta información y detalles constructivos son muy importantes para la interpretación correcta de las señales registradas. Estos edificios, entre otras unidades, albergan los servicios de protección civil de la Generalitat de Cataluña. Las principales características del proyecto y de la Acción 4, los objetivos del trabajo y el contenido del informe se describen a continuación.

1.2 El proyecto POCRISC

De acuerdo con el formulario de candidatura, el proyecto POCRISC persigue desarrollar una cultura común del riesgo sísmico en las regiones de Cataluña, Andorra y Occitania. Para ello, se pretende afrontar el riesgo sísmico mediante la mejora y el intercambio del conocimiento de la vulnerabilidad de los elementos expuestos y el desarrollo de herramientas específicas para facilitar la gestión de la emergencia, en caso de sismo. En este sentido, se proponen ejercicios fronterizos de gestión de la crisis sísmica, una herramienta automática para generar y difundir escenarios de daño, una aplicación para teléfonos inteligentes para

¹ El ruido ambiental o ruido sísmico, es la vibración persistente del suelo, con amplitudes del orden entre 0.1 y 10 µm/s, debida a actividades relacionadas con el tráfico, la industria, el entretenimiento y las condiciones climáticas, entre otras.

Introducción

la evaluación de la vulnerabilidad y diagnóstico post-terremoto de edificios y un conjunto de documentos y guías técnicas para, entre otros propósitos, la evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica de los edificios, en general, y de los edificios esenciales, en particular.



Figura 1-1. Dispositivos para la medida de ruido ambiental en un edificio. Se muestra el sensor transductor de velocidad, la planta y el alzado del edificio.



Figura 1-2. Registro de ruido en el edificio de la Figura 1-1. a) Historias temporales de velocidad. b) Movimiento de partícula.

Se trata pues de abordar los siguientes objetivos específicos (OE): OE1. Desarrollar herramientas para la gestión del riesgo sísmico, estimar la seguridad sísmica de edificios esenciales, garantizar la adecuación de desarrollos a necesidades operativas; OE2. Publicar recomendaciones para reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios. Mejorar el conoci-

CRIS

miento del fenómeno sísmico de los grupos objetivos y OE3. Compartir experiencias sobre gestión transfronteriza de crisis. Realizar talleres de intervención post-sísmica, utilizando las herramientas desarrolladas. El provecto se estructura en 5 acciones. Además de las acciones destinadas a la preparación (Acción 0), gestión (Acción 1) y al intercambio de experiencias, comunicación y difusión de los resultados del proyecto (Acción 2), la Acción 3 se dedica a desarrollar y compartir herramientas para la preparación de la crisis sísmica; la Acción 4 persigue la reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios esenciales y pretende dotar a protección civil, a los servicios técnicos de autoridades públicas regionales y locales, y a los profesionales de la construcción, de un marco metodológico y de herramientas prácticas para la evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica de los edificios esenciales. Finalmente, la Acción 5, dedicada a la intervención en caso de sismo, dotará de herramientas prácticas a los servicios de protección civil, y a la comunidad sismológica, para intervenir en caso de sismo. Esta acción incluye el desarrollo de un protocolo de intervención sismológica para el registro de réplicas, y la creación de una aplicación para teléfonos inteligentes para evaluar el daño post-sísmico en edificios. También fomentará la colaboración de todos los socios para realizar talleres de intervención post-sísmica, para valorar los desarrollos del proyecto y para fomentar la colaboración transfronteriza de los servicios de emergencias.

A continuación, se describe con mayor detalle la Acción 4, en la que se contempla la instrumentación de edificios.

1.2.1 La Acción 4: reducción de la vulnerabilidad

En esta acción se define un marco metodológico y se desarrollan herramientas para la evaluación y reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios esenciales. La acción se organiza en dos actividades. La primera, A4.1, persigue desarrollar métodos y procedimientos basados en el análisis modal operacional, que permitan determinar los periodos de los principales modos vibracionales de los edificios y estudiar su viabilidad para usar su variabilidad para detectar daño. Además de la instrumentación clásica de transductores de aceleración y de velocidad, se ensaya el radar de apertura real, que permite hacer medidas de la vibración del edificio, desplazamientos en este caso, sin necesidad de entrar en el edificio, lo que puede ser de vital importancia en caso de la atención de una emergencia sísmica, situación en la que puede ser desaconsejable entrar en edificios y estructuras que hayan sufrido daños graves.

Así, en esta acción, se instrumentan tres edificios esenciales: un centro de gestión de emergencias en Andorra, un hospital en Francia y una escuela de enseñanza secundaria en España. También usando planos detallados de los edificios, se han desarrollados modelos estructurales mecánicos de los mismos y se han realizado estudios de su comportamiento dinámico esperado. En la Acción 4.1 se contempla también el redactado de unas recomendaciones sobre la instrumentación de edificios en el cual se recogerán las lecciones aprendidas. Una segunda actividad, A4.2, focaliza en proveer conocimiento y directrices para ayudar en el conocimiento de la vulnerabilidad y en la toma de decisiones para su reducción. En este sentido, esta segunda actividad prevé la redacción de una guía para la evaluación de la vulnerabilidad (E4.2.1), otra referente a acciones para su reducción (E4.2.3) y el diseño e implementación de un aplicativo web (E4.2.2) que permita estimar el nivel de seguridad sísmica de un edificio, permitiendo así, en su caso, priorizar las intervenciones para mejorar su respuesta a acciones sísmicas probables.



1.3 Objetivos

Con relación a los beneficios esperados de esta actividad, un tema crucial es el conocimiento de las propiedades modales de los edificios, por ejemplo y en su caso, antes de sufrir un terremoto; es decir, del edificio sin daño. Se puede argumentar que el modelado y análisis estructural deben proporcionar esta importante información. Sin embargo, ello requeriría un acierto, digamos del 100%, en los materiales; en las propiedades resistentes y geométricas de los elementos estructurales, vigas, columnas, uniones viga-columna, forjados y muros; en los modelos matemáticos histeréticos que permitan simular el comportamiento dinámico "real" del edificio, entre otros muchos factores. Más bien, sí que es cierto que el análisis modal experimental puede y suele usarse para calibrar modelos estructurales. En consecuencia, parece importante dimensionar bien, la necesidad y los beneficios del modelado estructural en este contexto, así como las ventajas y limitaciones de este tipo de estudios, que estarán relacionadas, sobre todo, con el conocimiento de los factores que más influencia puedan tener en la variación de las propiedades modales de los edificios. Por otra parte, también es cierto que el modelado de los edificios es una excelente herramienta que permite estimar la respuesta esperada del edificio a sismos, permitiendo así detectar las características que permiten aumentar su seguridad estructural.

Con esta digresión en mente, se describen, a continuación, los principales objetivos de la actividad. En primer lugar, se orienta el objetivo general y, posteriormente, se detallan una serie de objetivos más específicos.

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general es analizar la viabilidad de medidas, relativamente sencillas, de la vibración de estructuras y edificios sometidos a la excitación del ruido ambiental para determinar sus principales propiedades modales.

Este objetivo general, incluye el contraste de los resultados obtenidos con los que provienen del modelado y análisis estructural. Ambas actividades, medidas empíricas y análisis estructural, se orientan hacia un propósito más ambicioso que es el establecimiento de técnicas y herramientas, relativamente sencillas, que permitan establecer el nivel de degradación de los edificios, lo que, en caso de terremoto, puede ser de transcendental relevancia para el diagnóstico del grado de daño sufrido. Por otra parte, se ensaya la viabilidad del radar interferométrico para realizar estas mediciones. Su uso permitiría tener una estimación del nivel de daño, sin necesidad de entrar en el edificio. Esta información puede ser crucial en caso de daño severo, con riesgo de colapso, ya que puede ser de gran ayuda para la gestión de la emergencia sísmica, permitiendo orientar o, en su caso, desaconsejar, el acceso a edificios específicos, con claros beneficios para la seguridad de las personas responsables de este tipo de inspecciones.

1.3.2 Objetivos específicos

El formulario de candidatura del proyecto POCRISC, prevé, en la Actividad 1 de la Acción 4 la instrumentación de 3 edificios esenciales, uno en cada país participante: Andorra, Francia y España. Para cada edificio, los objetivos específicos se detallan a continuación en referencia a: Mediciones, Modelado y Análisis.



Mediciones

- Seleccionar el edificio esencial teniendo en cuenta la disponibilidad de acceso y de información técnica detallada y fiable, incluyendo los planos estructurales.
- Diseñar e implementar protocolos de medidas de ruido ambiental.
- Ensayar el uso del radar de apertura real para este tipo de medidas.
- Realizar las medidas.

Modelado

- Modelar el edificio, mediante programas estándar de análisis estructural.
- Análisis estructural.

Análisis

- Análisis estándar de las señales temporales.
- Desarrollar herramientas avanzadas, adecuadas para el análisis de las series temporales registradas.
- Analizar la variación de las señales en diferentes condiciones de actividad y periodo, como, por ejemplo, nocturno-diurno y laboral-festivo.
- Analizar la estabilidad de los periodos propios. Para ello será preciso tomar medidas de larga duración, al menos en uno de los edificios instrumentados.
- Análisis comparativo entre los resultados del análisis estructural y los parámetros modales identificados.
- Analizar la viabilidad del modelado para determinar las condiciones iniciales del edificio, conforme a su diseño.

1.4 Método

El método se basa en la instrumentación, registro e interpretación de señales temporales y en el modelado y análisis estructural. Con respecto a las series temporales se usarán dispositivos situados en el interior del edificio y se ensayarán también medidas de desplazamiento, con un dispositivo de radar de apertura real, que no requieren entrar en el edificio. Además de programas y herramientas avanzadas de análisis y tratamiento de señales y de modelado y análisis estructural disponibles, se desarrollarán también herramientas específicas que permitan analizar aspectos que no se pueden abordar con programas públicos o comerciales, que suelen ser más cerrados. Para ello se usará, preferentemente, aunque no exclusivamente, la plataforma MatLab[©].

1.4.1 Dispositivos situados en el edificio

Los dispositivos más típicos para realizar medidas de vibración en edificios son velocímetros ² y acelerómetros ³. Aquí se utilizan acelerómetros triaxiales para registrar la vibración del edificio en tres componentes ortogonales. Las dos componentes horizontales, normal-

³ Ejemplo de acelerómetro: <u>https://www.guralp.com/documents/DAS-FOR-0001.pdf</u> (acceso:23.12:2021)



² Ejemplo de velocímetro. <u>https://moho.world/en/tromino/engineering/</u> (acceso: 23.12.2021)

mente, se orientan normalmente en las direcciones longitudinal y transversal del edificio. Las medidas múltiples se distribuyen espacialmente de acuerdo a una geometría prefijada; de forma que hagan posible el análisis de las formas modales. Es muy conveniente que las medidas estén sincronizadas, de forma que se puedan efectuar estudios de correlación y de coherencia. También es interesante realizar análisis del movimiento de partícula (odogramas), que permitan ver la distribución del movimiento en cada una de las tres componentes.

1.4.2 Dispositivos situados fuera del edificio

Para este estudio ha sido posible emplear un dispositivo avanzado que permite medir series temporales de desplazamiento, sin necesidad de acceder al edificio. El dispositivo se basa en los principios del Radar de Apertura Real (RAR) con capacidad interferométrica y tiene la capacidad de registrar el rebote de ondas electromagnéticas en diferentes puntos del edificio. Para cada punto, el equipo estima la relación señal/ruido, de forma que es posible seleccionar los puntos con una mejor razón señal/ruido, que corresponden a las señales de mayor calidad. Así, para cada punto, un tratamiento y análisis de la señal, permite observar las frecuencias que predominan y relacionarlas con las formas de vibrar del edificio. La magnitud medida, en este caso, es la distancia sobre la visual (*Line Of Sight, LOS*) entre el instrumento y el punto del edificio, la cual se puede interpretar como el centro de una zona elíptica difusa. Este desplazamiento normalmente correlaciona bien con el desplazamiento horizontal del edificio. La capacidad interferométrica del instrumento le permite registrar variaciones de unas pocas micras, del orden de decenas, a frecuencias de 200 muestras por segundo.

1.5 Contenido del informe

POCRISC

Se recogen los principales resultados de las diferentes campañas de medidas de vibración en los tres edificios instrumentados. Concretamente del edificio *Prat del Rull*, en Andorra, que alberga los servicios de protección civil del Principado, el Instituto de educación secundaria, *IES Santa Eugènia* en Girona (España) y el *Hospital de Bagnères de Bigorre* en Francia.

Después de este capítulo introductorio, el capítulo 2 se dedica a aspectos metodológicos, mientras que los capítulos 3, 4 y 5 se dedican a los trabajos realizados para la instrumentación de los edificios seleccionados en Andorra, España y Francia, respectivamente. El capítulo 6 es de reflexión y, en él, se recogen las principales conclusiones de los trabajos realizados. Se anexan al informe los protocolos de medidas en los tres edificios, en Andorra, Anexo I, en España, Anexo II y en Francia, Anexo III. Además, en el Anexo IV se incluye el informe, en francés, sobre los trabajos de instrumentación del edificio N. 6 del complejo hospitalario de Bagnères de Bigorre, en los que participó personal del BRGM, de ENIT y de la UPC. Un último anexo, Anexo V, reproduce el informe técnico realizado por el departamento de teledetección del CTTC sobre las medidas RAR en el Instituto *Santa Eugènia*.

Los principales resultados obtenidos, las dificultades halladas y las lecciones aprendidas, no solo en este proyecto, sino también en trabajos anteriores⁴, van a constituir buenas entradas para el documento hermano que es el entregable *"E4.1.2 Recomendaciones técnicas para la instrumentación de edificios"*.

⁴ Algunos de estos estudios, previos al proyecto, han sido objeto de trabajos académicos, incluyendo tesis doctorales, tesis de máster y artículos en revistas.

2 Aspectos conceptuales y metodológicos

2.1 Introducción

Aunque se considera que los potenciales interesados en este informe tienen experiencia y conocimientos suficientes sobre los antecedentes y estado actual de los temas tratados, se ha considerado oportuno incluir este capítulo dedicado a conceptos y métodos relacionados con los análisis de los registros, en los dominios del tiempo y de la frecuencia, así como otros aspectos relacionados con la instrumentación y con la relación de los periodos moda-les con el daño.

Así, primero, se describen elementos metodológicos relacionados, básicamente, con el registro y análisis de series temporales del movimiento de los edificios, debido a su respuesta estructural al ruido ambiental y, en condiciones operativas. Es decir, sin cancelar ni modificar la función y las actividades que el edificio pueda albergar.

Por otra parte, se introducen elementos de instrumentación y consideraciones sobre la relación de la amplitud de la aceleración, velocidad y desplazamiento en función de la frecuencia; es sabido que las amplitudes de los desplazamientos son mayores que las de aceleración para altas frecuencias, pero, éstas son menores para bajas frecuencias. En los ensayos realizados en los edificios instrumentados, veremos cómo este hecho compromete la aplicabilidad de técnicas basadas en medidas de desplazamiento, como el radar interferométrico.

El capítulo finaliza con una introducción a la variación del periodo propio de un edificio con el daño. Este tema subyace como una apuesta del proyecto por el estudio de la viabilidad del uso del análisis modal operacional (OMA, *Operational Modal Analysis*) como detector de daño en edificios, lo que tiene un interés potencial añadido, por ejemplo, en emergencias símicas.

2.2 Dominio del tiempo

Se analizan a continuación tres aspectos relacionados con el análisis de series temporales, incluyendo el análisis preliminar, el estudio de la intensidad del movimiento y la detección y selección de máximos.

2.2.1 Análisis preliminar

Los datos para el análisis modal operacional son series temporales de aceleración, velocidad o desplazamiento, que suelen registrarse en un formato específico del instrumento de medida. Los pasos normalmente usados son:

- Lectura de las series temporales.
 Los archivos brutos (raw) en el formato usado por el aparato de registro, deben ser leídos y transformados al formato requerido por los programas que los van a tratar. En muchos casos, estos formatos, digamos generales, suelen ser tipo texto (.txt), tipo hoja de cálculo (.xls o similar) o bien formatos específicos de la plataforma de software utilizada. En el caso de Matlab tratamos con el formato .mat.
- Depurado de la señal

POCRISC

Corrección de línea base
 Las señales registradas adolecen de ruidos y distorsiones importantes debi-


Aspectos metodológicos

das a múltiples causas como, entre otras, ruido electromagnético y térmico. Se necesitan señales limpias, que normalmente deben tener un valor medio nulo, tanto de la aceleración, como de la velocidad y del desplazamiento. Estos ruidos y distorsiones son de largo periodo, por lo que un filtrado de las bajas frecuencias suele mejorar sensiblemente la calidad de la señal. Si, como es el caso, se conoce bien el rango de periodos de interés, un filtrado en el correspondiente rango de frecuencias limpia la señal. Correcciones adicionales, como exigir una media nula y un ventaneo que impida inicios y finales bruscos de la serie temporal, suelen ser otros recursos de utilidad en esta tarea preliminar.

Puntos atípicos (Outliers)

En un primer análisis se detectan puntos que, claramente, se alejan mucho de la tendencia de la serie temporal. Están muy lejos del valor mediano del valor absoluto de la serie. Aquí, estos puntos se identifican cuando su amplitud es mayor o igual que un valor umbral predefinido y su amplitud se reduce a este valor umbral. Estos puntos pueden ser debidos a golpes en los apararos o ruidos intensos cercanos. A veces, incluso es necesario tener que prescindir de intervalos temporales en los que la señal es de baja calidad.

• Estabilidad y variabilidad

Otro aspecto interesante del análisis es observar la variación de la intensidad del registro con el tiempo. Este ejercicio permite, por ejemplo, evaluar la influencia del nivel de ruido en la calidad de los resultados. También resulta interesante observar los periodos de actividad e, incluso, las horas críticas de su inicio y final. Así es posible distinguir los periodos diurnos de los nocturnos y los días laborables y festivos, entre otros aspectos de interés.

• El amortiguamiento

El filtrado de banda muy estrecha, en el entorno de una frecuencia modal específica, puede permitir ver el movimiento de la partícula en el punto de registro. Además, la presencia en la señal de pequeñas excitaciones, más o menos puntuales y el decaimiento de las amplitudes con el tiempo, permite hacer estimaciones del amortiguamiento estructural.

• Análisis espectral.

El análisis espectral es una excelente herramienta para caracterizar las series temporales en el dominio frecuencial. Permite observar cuáles son las frecuencias predominantes. Puede considerarse que la señal excitadora de los edificios, el ruido ambiental, es un ruido blanco en el rango de interés, es decir la amplitud es la misma para todas las frecuencias de interés. El registro proporciona la respuesta del edificio a este ruido blanco por lo que sus frecuencias propias quedarán potenciadas y resaltadas. Este es el fundamento del análisis modal operacional.

Las operaciones descritas se han aplicado, cuidadosamente, a las series temporales registradas en los tres edificios estudiados. A continuación, se comentan, con mayor detalle, aspectos relacionados con el análisis de la intensidad del movimiento y con la identificación y selección de valores máximos.



2.2.2 Intensidad del movimiento

Un aspecto, que no es frecuente analizar, pero que aquí se ha considerado interesante, es la variación temporal del nivel de la respuesta del edificio, asociada a variaciones temporales del ruido excitador. Ello, además de dar una idea de los niveles de la magnitud que se está midiendo, sea aceleración, velocidad o desplazamiento, como se ha comentado anteriormente, permite observar, por ejemplo, variaciones diurnas y nocturnas, distinguir entre jornadas laborables y festivas, periodos vacacionales e, incluso, detectar cualquier cambio en el edificio, como, por ejemplo, y como veremos en el caso del Instituto *Santa Eugènia*, los cambios de aula previstos en los horarios escolares.

Para caracterizar el nivel de intensidad del registro y su variación temporal se ha elegido la amplitud cuadrática media (RMSA o *Root Mean Square Amplitude*) que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} (a_j)^2}$$
(2-1)

Donde a_j es el elemento *j* de la serie temporal y *N* es el número de elementos. En los cálculos efectuados aquí para observar la variación temporal de la amplitud cuadrática media, se han considerado ventanas de 1 segundo (100 muestras) con un solape del 50 %, asignando la amplitud hallada al instante de tiempo medio de la ventana.

2.2.3 Análisis de picos

Tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, es de gran utilidad identificar los máximos de las funciones. A este respecto, suele ser útil aplicar técnicas de suavizado que permiten realzar y mejorar la identificación. Estos picos pueden identificarse manualmente, sobre los gráficos de las funciones del tiempo o de la frecuencia, pero, es de gran ayuda disponer de herramientas que permitan su identificación automática. La plataforma Matlab (Math Works 2019) dispone de la función *findpeaks*, pero, se ha desarrollado una función propia, más versátil, y que se adapta mejor a las características de nuestras funciones, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Posteriormente, en los capítulos dedicados a los diferentes edificios instrumentados, se podrá comprobar la oportunidad, la idoneidad y las ventajas de disponer de este tipo de funciones/subrutinas.

2.3 Dominio de la frecuencia

Se introducen aquí diversos aspectos relacionados con el análisis frecuencial de series temporales. Se inicia con la transformada de Fourier, para introducir, después, la densidad espectral de potencia y aspectos aplicados, de su cálculo. Se introduce también el concepto de espectrograma.

2.3.1 Transformada de Fourier

Las series temporales de aceleración, velocidad o desplazamiento, son funciones reales de variable real. Así, por ejemplo, en un acelerograma, el tiempo, *t*, es la variable y la aceleración, *h*(*t*), es una función del tiempo. Bajo determinadas condiciones, las funciones temporales pueden representarse en el dominio de la frecuencia. La siguiente ecuación define la transformada de Fourier:



$$h(t) = C_1 \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{+j\omega t} d\omega; \quad H(\omega) = C_2 \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt; \quad C_1 C_2 = \frac{1}{2\pi}$$
(2-2)

h(t) es la función en el dominio del tiempo, $H(\omega)$ es la función en el dominio de la frecuencia, C_1 y C_2 son constantes arbitrarias, pero su producto debe cumplir la condición de la ecuación (2-2). La forma más frecuente de definir estas constantes es: $C_1 = 1/2\pi$ y $C_2 = 1$. Así teniendo en cuenta que $\omega = 2\pi f$ la ecuación (2-2) puede reescribirse como:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f) e^{+j2\pi f t} df; \qquad H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j2\pi f t} dt = |H(f)| e^{j\varphi(f)}$$
(2-3)

H(f) es una función compleja, j es la unidad imaginaria, |H(f)| es el espectro de amplitudes y $\varphi(f)$ es el espectro de fases. Las condiciones suficientes para la función h(t) tenga transformad de Fourier son: i) h(t) tiene un número finito de extremos; ii) h(t) tiene un número finito de discontinuidades y iii) h(t) tiene energía finita, es decir cumple la siguiente condición:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |h(t)| dt$$
 es una cantidad finita (2-4)

Transformada discreta

-- POCRISC -----

Las señales temporales que se registran son funciones discretas. Su transformada de Fourier será también una función discreta:

$$h(k\Delta t) = \Delta f \sum_{n=0}^{N-1} H(n\Delta f) e^{+2\pi j k \frac{n}{N}} \qquad k = 0 \cdots (N-1)$$

$$H(n\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} h(k\Delta t) e^{-2\pi j k \frac{n}{N}} \qquad n = 0 \cdots (N-1)$$
(2-5)

 Δt es el intervalo de muestreo en el dominio del tiempo. Su inverso se conoce como la razón de muestreo, que suele darse en muestras por segundo, Δf es el intervalo de muestreo, en el dominio de la frecuencia. En esta ecuación se ha supuesto que $\Delta t \Delta f = 1/N$, de forma que la frecuencia más baja que puede observarse es Δf . Por otra parte, la frecuencia de Nyquist es la frecuencia más alta que podemos ver, y se define como $f_{Nvg} = 1/(2\Delta t)$.

Elementos de la teoría y práctica del análisis y tratamiento de señales temporales pueden hallarse en Oppenheim y Schafer (1999) y en Proakis y Manolakis (2007).

La transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform)

La transformada rápida de Fourier es un algoritmo que optimiza el tiempo de computación de la transformada de Fourier. Papoulis (1962), Cooley y Tukey (1965), Brigham (1974) y Frigo y Johnson (1998), son algunas referencias básicas y fundamentales sobre la transformada de Fourier y el algoritmo de la transformada rápida.

Existen múltiples funciones y subrutinas estándar que la realizan. En los análisis de las series temporales registradas en los edificios instrumentados se ha usado la función fft (Math Works 2019).

El algoritmo de Cooley y Tukey (1965) requiere que el número de muestras sea una potencia de dos. Así, por ejemplo, una ventana típica de 2¹³=8192 muestras y una frecuencia de muestreo de 100 mps, tiene una duración aproximada de 1.4 minutos, 81.91 s, lo que comporta que el intervalo de frecuencias que podemos analizar está entre 0.012 y 50 Hz, y, de forma equivalente, el rango de períodos está entre los 0.02 y los 82 s.

2.3.2 Espectros de respuesta

Otro recurso, muy usado en Ingeniería sísmica, es el espectro de respuesta. El espectro de respuesta, para un amortiguamiento dado, se define como el máximo del valor absoluto de la respuesta de un sistema lineal de un grado de libertad, caracterizado por su masa, rigidez y fracción de amortiguamiento crítico. Dado un acelerograma, el espectro de respuesta nos proporciona información de su contenido espectral. No en vano, el espectro de respuesta no amortiguada de velocidad, es la envolvente del espectro de Fourier de la aceleración. Así, el espectro de respuesta puede ser también una buena herramienta para el OMA.

2.3.3 Densidad espectral de potencia (PSD, Power Spectral Density)

Las señales estacionarias no cumplen la condición de la ecuación (2-4). Con todo, las señales estacionaras truncadas sí tienen energía finita por lo que es frecuente que se use la transformada de Fourier para su análisis. Sin embargo, en estos casos, es aconsejable que el análisis espectral se efectúe sobre su función de autocorrelación. Se describen, a continuación, conceptos relacionados con la densidad espectral de potencia (PSD, Power Spectral Density), que permite identificar mejor las frecuencias predominantes en señales estacionarias o similares.

Convolución

La función de convolución, c(t), entre dos funciones temporales, h(t) y g(t), se define como:

$$c(t) = \left[h(t) \otimes g(t)\right](t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)g(t-\tau)d\tau$$
(2-6)

La transformada de Fourier, $C(\omega)$, del producto de convolución, se define como el producto de sus trasformadas de Fourier, $H(\omega)$ y $G(\omega)$.

$$C(\omega) = H(\omega) G(\omega)$$
(2-7)

Correlación

La función de correlación, corr(t), entre las dos señales h(t) y g(t), se define como la función de convolución entre h(-t) y g(t)

$$corr(t) = \left[h(-t) \otimes g(t)\right](t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(-t)g(t-\tau)d\tau$$
(2-8)

La transformada de Fourier, $Corr(\omega)$, del producto de correlación, se obtiene como el producto de la conjugada $[H(\omega)]'$ de la trasformada de h(-t) por la transformada de g(t).

$$Corr(\omega) = [H(\omega)]'G(\omega)$$
 (2-9)

Autocorrelación

Cuando h(t) es igual a g(t) la función de correlación, definida en las ecuaciones (2-3) y (2-4), se llama función de autocorrelación.

$$aut_{corr}(t) = \left[h(-t) \otimes h(t)\right](t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(-t)h(t-\tau)d\tau$$
(2-10)

La transformada de Fourier de la función de autocorrelación de h(t), es el cuadrado del módulo de su transformada de Fourier. De esta manera, en el dominio de la frecuencia se cumple que:

$$Aut_{corr}(\omega) = |H(\omega)|^2$$
(2-11)

Las series temporales objeto de análisis, se supone, son muestras finitas de señales estacionarias, es decir, de señales de energía infinita. Como se ha comentado más arriba, en estos casos no es aconsejable hacer el análisis clásico mediante la transformada de Fourier; es preferible analizar la PSD, que se define como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación.

Las unidades

Cuando las series temporales de aceleración nos vienen dadas en (mm/s^2) . Las transformadas de Fourier vienen dadas en $((mm/s^2)s) = (mm/s)y$ las unidades de la función de autocorrelación en el dominio de la frecuencia son: $(mm/s^2)^2 s = (mm/s^2)^2 / Hz$. Cuando la aceleración nos viene en unidades de *g*, las unidades de la *PSD* son (g^2/Hz) . Una unidad frecuentemente usada en el análisis y tratamiento de señales es el deciBelio (dB). El dB se define con respecto a una amplitud de referencia.

$$deciBelio = dB = 20\log_{10}\frac{A}{A_0} = 10\log_{10}\left[\frac{A}{A_0}\right]^2$$
 (2-12)

Se suele tomar la amplitud de referencia $A_0 = 1$ por lo que, en nuestro caso, para expresar la *PSD* en *dB/Hz* se aplica la siguiente ecuación.

$$PSD(dB / Hz) = 10 \log_{10} \left[PSD\left(\left(mm / s^2 \right)^2 \right) \right]$$
(2-13)

En cualquier caso, para una interpretación correcta de las amplitudes involucradas, es imprescindible tener en mente la amplitud de referencia, A_0 . Así, 20dB no tiene el mismo sentido físico si la aceleración se expresa en unidades de g o de mm/s^2 . Aquí se han usado mm/s^2 . Con todo, hay que decir también que, dependiendo de la finalidad del estudio, puede ser irrelevante focalizar en las unidades ya que, en muchos casos, se buscan los periodos o frecuencias con la máxima amplificación, independientemente de las unidades usadas. Así, también es frecuente usar amplitudes normalizadas a una cantidad de referencia. Obviamente, para series temporales de velocidad o desplazamiento, hay que adaptar las unidades correspondientes.

2.3.4 Cálculo práctico de la PSD

Para el cálculo práctico de la PSD se ha usado el método de Welch (Welch, 1967). En señales largas⁵, esta técnica consiste en aplicar ventanas múltiples solapadas, de forma que, para cada ventana, se halla la *PSD* y, al final, se obtiene la curva promedio y las curvas que definen el intervalo del 95% de confianza. La PSD destaca las frecuencias más energéticas que contiene la señal a analizar que, en nuestro caso, están relacionadas con las formas modales del edificio instrumentado.

Espectrograma

El espectrograma de una señal temporal, proporciona información sobre la variación temporal de su contenido frecuencial. También, en este caso, se obtienen las PSD para ventanas temporales convenientemente solapadas y, la PSD se asigna al valor medio temporal de la ventana. De esta forma, un gráfico tridimensional permite observar la variación de la PSD en función del tiempo y de la frecuencia, de forma que es posible analizar la estabilidad o variabilidad, de las frecuencias modales detectadas.

2.3.5 Razones espectrales (HVSR)

Desde que Nakamura (1989, 2000) postuló que, en estudios de microzonificación sísmica de suelos, la componente vertical se puede identificar con el input en el basamento rocoso, los métodos de usar las razones espectrales HVSR (HV Spectral Ratios), se han convertido en un estándar en los estudios de respuesta de suelos. Asimismo, es frecuente usar estas ratios en el OMA. En nuestra opinión, el tema no es trivial y hay casos en que funciona bien y casos en que no. Incluso disponiendo de sensores en la base del edificio, que, en el caso de respuesta de suelos, sería el equivalente de tener sensores en el basamento o similar, en el caso de edificios, las señales de entrada pueden estar fuertemente contaminadas por la interacción suelo-edificio-suelo. Lo que sí parece cierto es que, frecuentemente, estos cocientes ayudan a resaltar y fortalecer determinadas frecuencias, sobre todo, las correspondientes a los modos con vibración en las componentes horizontales. Las HVSR pueden también ser útiles en el caso de vibraciones globales del edificio provocadas por maquinaria, dentro o cercana al edificio, con frecuencias lejanas a las frecuencias modales. En cualquier caso, las HVSR, sea con espectros de Fourier, con PSD o con espectros de respuesta, son una herramienta más en el OMA.

2.4 La instrumentación

POCRISC -----

El análisis de vibraciones requiere su medida y registro fiable. Los transductores transforman una vibración, del suelo o mecánica, en una señal, normalmente eléctrica, que puede ser discretizada y grabada para su posterior estudio. Havskov y Alguacil (2004) es una buena referencia introductoria a la instrumentación. En referencia a movimiento vibratorio, hay transductores de desplazamiento, velocidad y aceleración. Respectivamente, estos dispositivos transforman el movimiento del punto de registro en una señal, directamente proporcional, al desplazamiento, velocidad o aceleración. La relación que permite recuperar el input a partir del output del instrumento es la función de transferencia. En la instrumentación de edi-

⁵ Es frecuente tratar con series temporales extremadamente largas. En los edificios aquí instrumentados, la mayoría de las series temporales son de más de 7 días. Estamos hablando de 7x*8 640 000= 60 480 000 puntos.

ficios se han usado los tres tipos de transductores. Se describen a continuación los dispositivos usados.

2.4.1 Transductores de aceleración. Acelerómetros

En el edificio Prat del Rull, en Andorra la Vella, y en el del instituto de enseñanza secundaria Santa Eugènia, en Girona, se han usado acelerómetros, tipo Güralp Fortimus. La Figura 2-1. muestra el instrumento utilizado. Se describe a continuación su función de transferencia, que permite convertir el registro dado en *cuentas*, a unidades de aceleración (m/s²).

Función de transferencia

La función de transferencia de estos instrumentos viene definida por la ecuación (2-9). En esta ecuación, *s* es una variable compleja, *p*1, *p*2 y *p*3 son los polos, expresados en rad/s, A_0 es el factor de normalización a 1 HZ y tiene un valor A_0 =7.47946E+09 y *G* es la sensibilidad de cada una de las tres componentes a 1 Hz, en unidades de *cuentas/(m/s²)*. La Tabla 2-1 muestra los valores numéricos de los polos y la Tabla 2-2 muestra los valores de la constante G para cada estación y componente.

La Figura 2-2 muestra la función de transferencia, en amplitud y en fase. Se observa cómo en el intervalo de periodos entre 0.1 y 10 segundos (frecuencias entre 0.1 y 10 Hz) estos instrumentos son excelentes transductores de aceleración. La fase nula nos indica que no se van a perturbar los tiempos de llegada de las diferentes frecuencias.

Tabla 2-1. Valores de los polos de la ecuación2-9).				
<i>p</i> 1	-9.990265E+02	1.796991E+03		
<i>p</i> 2	-9.990265E+02	-1.796991E+03		
р3	-1.769345E+03	0.000000E+00		

H(s) = G	A_0	(2-14)
II(3) = 0	(s - p1)(s - p2)(s - p3)	(2-14)

Tabla 2-2.	Acelerómetros	Güralp	Fortimus usados	
------------	---------------	--------	-----------------	--

Fotooián	NI/C	Consta	ante G (<i>cuentas</i> /	ntas/(m/s²))		
Estacion	IN/3	HNZ	HN1	HN2		
YK.C008	4F5A	1.690380E+06	1.713397E+06	1.723372E+06		
YK.C009	175A	1.692104E+06	1.702572E+06	1.696127 E+06		
YK.C010	4A5A	1.687283 E+06	1.696631E+06	1.690748E+06		
YK.C011	435A	1.690397E+06	1.695923E+06	1.687697E+06		
YK.C012	4C5A	1.699951E+06	1.681922E+06	1.701312E+06		
YK.C013	4D5A	1.692816E+06	1.703332E+06	1.693414E+06		
YK.C014	225A	1.719450E+06	1.703486E+06	1.728150E+06		



Figura 2-1. Acelerómetro.

2.4.2 Transductores de velocidad

En el edificio de Francia, Hospital de Bagnères de Bigorre, se han usado transductores de velocidad. Concretamente, velocímetros Güralp y acelerómetros PCB. En los apartados 9.2.1 y 9.2.2 del <u>Anexo III</u>, se describen los instrumentos y las configuraciones usadas en las medidas.



Figura 2-2. Funciones de transferencia en amplitud y en fase de los sensores de aceleración.

2.4.3 Transductores de desplazamiento. La interferometría RAR

En los edificios del centro escolar Santa Eugènia, en Girona, y del complejo hospitalario de Bagnères de Bigorre, se ha ensayado también un dispositivo de radar. Se trata de radares interferométricos, que transforman diferencias de fase en desplazamientos. El principio de funcionamiento de un radar interferométrico aplicado a la monitorización de vibraciones de edificios se puede encontrar en varios documentos, ver, por ejemplo, Coppi et al. (2010), Luzi et al. (2017) González-Drigo et al. (2019). Las principales características de este tipo de equipos y de la interferometría se describen a continuación.

La Interferometría

La Figura 2-3 a) muestra el equipo utilizado y la Figura 2-3 b) esquematiza una medición radar. En esta figura, un *bin* se define como un volumen de muestreo. El sistema radar utilizado trabaja a 17,2 GHz de frecuencia central (banda Ku), correspondiente a una longitud de onda en el vacío de 1,74 cm. Es importante destacar que la técnica interferométrica puede estimar las variaciones de distancia sólo a lo largo de la línea de visión (*Line-Of-Sight*, LOS), es decir, la dirección radar-blanco. Analizando el caso sencillo de un *bin* del radar que comprenda un único blanco en vibración, situado a una distancia R, desde el radar, y cuyo desplazamiento, causado por la vibración, es una función del tiempo, d(t), el término de fase correspondiente, de la respuesta del radar, está relacionado, linealmente, con esta variación de la distancia entre el sensor y el blanco. Si se calcula la variación de fase en el tiempo para un *bin* específico del radar, el término de fase está directamente relacionado con la vibración a lo largo de la LOS.

En el RAR, la relación entre el desfase y la variación temporal de la distancia, $d_{LOS}(t)$, es la siguiente, bien conocida, relación básica interferométrica:

$$d_{LOS}(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta \varphi(t)$$
(2-15)

donde λ es la longitud de onda del radar y $\Delta \varphi$ la fase interferométrica medida. Como la mejor precisión alcanzable en la medición de las fases de radar está directamente relacionada con la relación señal-ruido (SNR) del *bin*, se recomienda analizar los *bins* que muestran las SNR más altas (Coppi et al. 2010).





Figura 2-3. a) Equipo de radar interferométrico de apertura Real (RAR). b) Esquema de una medición RAR: 1) adquisición; 2) selección de *bins* sobre el perfil radar; 3) extracción de muestras temporales de desplazamiento.

El Radar de Apertura Real (RAR)

El equipo radar consiste en un transmisor denominado *Continuous Wave Step Frequency* (CWSF) que transmite ondas con diferentes valores de frecuencia, muestreando un ancho de banda a intervalos de frecuencia constante. Las principales características del sistema se resumen en la Tabla 2-3. La ubicación y la dimensión de los *bins* medidos son dictadas por las antenas transmisoras y receptoras y por la banda del radar. Las antenas utilizadas en este trabajo son dos bocinas piramidales cuyo ángulo de apertura (campo de visión) es de aproximadamente 0.18 radianes, lo que significa que un área de aproximadamente 3 m² está iluminada a una distancia del blanco de 10 m y, este valor se incrementa a medida que aumenta el ángulo de observación. El sistema consta del sensor, un ordenador de control, y una unidad de suministro de energía. El sensor se instala en un trípode equipado con un cabezal giratorio, capaz de dirigir el sensor hacia la estructura investigada. La Figura 2-4 muestra una foto del sistema de medición.

Parámetro	Valor y unidades
Frecuencia de operación	17.2 GHz (Ku band)
Alcance máx. (a 40 HZ de frec. de mues-	500 m
Resolución máxima en distancia	0.5 m
Ancho de banda de radiofrecuencia	300 MHz
Sensibilidad (nominal)	0.01 mm
Frecuencia máxima de muestreo	200 Hz
Peso del equipo/autonomía de baterías	12 kg/5 horas

Principales características del IBIS-S.



Figura 2-4. Foto del sistema de medición radar



Tabla 2-3.

2.5 Aceleración, velocidad y desplazamiento

Para tener una idea de los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento, involucrados en este tipo de mediciones, se ha considerado primero un movimiento armónico monocromático para analizar la amplitud en función de la frecuencia. Después, se ha verificado que los picos de la PSD, son estables independientemente de si se usan series temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Amplitud y frecuencia

La ecuación (2-16) describe el desplazamiento, *x* , velocidad, \dot{x} y aceleración, \ddot{x} , para un movimiento armónico monocromático, de frecuencia ω y fase φ .

$$x = A\sin(\omega t + \varphi);$$

$$\dot{x} = A\omega \cos(\omega t + \varphi);$$

$$\ddot{x} = -A\omega^{2}\sin(\omega t + \varphi);$$

(2-16)

La ecuación (2-17) muestra la relación entre las amplitudes de desplazamiento y aceleración con respecto a la velocidad.

$$A_{Des} = \frac{A_{Vel}}{\omega}; \qquad A_{acc} = \omega A_{Vel}$$
(2-17)

La Figura 2-5 muestra las amplitudes, relativas a la velocidad, en función del período. A la derecha se dan las amplitudes en decibelios (dB) y, a la izquierda, en unidades arbitrarias de amplitud. Para una amplitud de velocidad unitaria, por ejemplo, de 1 mm/s, para $\omega = 1 \operatorname{rad} s^{-1}$ ($T = 2\pi s$), se observa cómo, para las altas frecuencias, periodos bajos, las amplitudes de los desplazamientos decaen drásticamente, mientras que las de las aceleraciones crecen. La Tabla 2-4 muestra las amplitudes de aceleración, velocidad y desplazamiento, para periodos de 0.1, 0.228, 1 y 6.28 s. El período de 0.228 s, se ha incluido por tratarse de uno de los periodos propios del edificio del Instituto Santa Eugènia de Girona.



Figura 2-5. Amplitudes relativas de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Se trata de un edificio muy rígido, y, como se verá más adelante, es esperable un funcionamiento problemático de los sensores de desplazamiento, debido a las bajas amplitudes esperadas. Por ejemplo, para una aceleración, digamos de 27 micras/s², la amplitud del desplazamiento seria de sólo 0.04 micras, es decir, unas pocas centésimas de micra.

OCRISC -----

Periodo	Frecuencia	Aceleración		Desplaza	amiento	Velocidad	
(s)	(Hz)	(mm/s²)	(dB)	(mm)	(dB)	(mm/s)	(dB)
0.1	10	62.8	36	0.016	-36	1	0
0.228	4.4	27.6	29	0.036	-29	1	0
1.0	1	6.28	16	0.16	-16	1	0
6.28	0.16	1.0	0	1	0	1	0

Tabla 2-4.Comparación de amplitudes de aceleración, velocidad y
desplazamiento en función del período (Figura 2-5).

Máximos de PSD

Es bien conocido que, en el dominio de la frecuencia, la transformada de Fourier de la derivada temporal de una señal, es igual al producto de la transformada de Fourier de la señal por $i\omega$ y, en consecuencia, para obtener la transformada de Fourier de la integral basta con dividir por $i\omega$. Dado que en la instrumentación de edificios suelen usarse medidas de aceleración, velocidad y desplazamiento, se ha verificado la estabilidad de los picos de las PSD, de series temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento. Con este sencillo ejercicio se han conseguido tres pequeños objetivos:

- 1. Tener una idea clara de las amplitudes del movimiento vibratorio de respuesta del edificio al ruido ambiental.
- 2. Observar que la PSD del velocigrama coincide con el producto de la PSD del acelerograma por ω^{-2} , y la PSD del desplacigrama es igual a la PSD del velocigrama también multiplicada por ω^{-2} .
- 3. Verificar que las frecuencias/periodos predominantes no varían cuando se dispone de medidas de aceleración, velocidad o desplazamiento. Esto es relevante debido a que uno de los objetivos del estudio del edificio es verificar la viabilidad de la tecnología RAR para la identificación modal y, como es bien sabido, la tecnología RAR registra desplazamientos.

Para ello se ha usado una historia temporal de aceleración registrada en el edificio del Instituto Santa Eugènia de Girona. Los velocigramas y desplacigramas se han obtenido por integración directa del acelerograma. Se ha efectuado la corrección de línea base por media nula y por filtrado. Para el tratamiento de la señal, en la integración de acelerograma, se ha procedido de la siguiente manera: i) el valor medio de la aceleración se resta de la señal, para tener media nula, ii) se aplica un filtrado paso-banda, tipo Butterworth de quinto orden, en la banda frecuencial entre 1 y 10 Hz, iii) se aplica una ventana, tipo Tukey, de parámetros *L* y *r*, siendo *L* el número de puntos del acelerograma y *r/2* se relaciona con el porcentaje de puntos al inicio y al final de la ventana, en la que ésta toma valores de coseno entre 0 y 1. En nuestro caso se ha tomado r=0.01, es decir del 1%. El mismo procedimiento se aplica a la integración del velocigrama para obtener el desplacigrama. La Figura 2-6 muestra las historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamientos de la componente HN1 (longitudinal). Se observa cómo los desplazamientos son muy pequeños, del orden de 2 micras. En los cálculos efectuados con la componente vertical, HNZ, estos desplazamientos son inferiores a 0.5 micras.





Figura 2-6. Historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento.

La Figura 2-7 muestra las PSDs de las tres señales; por una parte se confirma que, para hallar la PSD del velocigrama a partir de la del acelerograma o la del desplacigrama a partir de la del velocigrama, basta con dividir por ω^2 ; por otra parte, se observa cómo las frecuencias predominantes son estables, es decir son las mismas en los PSD de aceleración, velocidad y desplazamiento. En la misma Figura 2-7, se ha ampliado la parte correspondiente a la máxima PSD para poder observar los intervalos de confianza de 95%, que son extremadamente pequeños, indicando así una muy buena estabilidad de los PSD's.

2.6 Incertidumbres en el modelado

La Figura 2-7 muestra un ejemplo de la variabilidad del periodo en función de la resistencia a compresión (*compressive strength*) de la mampostería para un edificio de mampostería. Se observa una variabilidad importante. Para el modo fundamental, por ejemplo, el periodo puede variar entre 0.51 y 0.27 s, con una variabilidad de casi un 50%.



Figura 2-7. Variabilidad de los periodos en función de la resistencia a compresión de la mampostería para el edificio de la derecha.

Conviene, pues, afinar los parámetros al máximo para reducir estos niveles de incertidumbre. Esta variabilidad se ha puesto de manifiesto en el modelado de los edificios instrumentados, en los que, aproximaciones sucesivas al edifico real, han permitido un mejor ajuste



observado-calculado. Es obvio que conviene incluir en los modelos, los elementos, llamados, frecuentemente, "elementos no estructurales", como, por ejemplo y entre otros, la tabiquería, los muros de relleno y las escaleras, incorporando al modelo la máxima información disponible. En general, el análisis modal permite caracterizar bien los modos de vibración. Con todo, como se muestra en la Figura 2-7, la correspondencia entre modelado y realidad no es trivial, debido a la cantidad de variables involucradas en el modelo, incluyendo las propiedades resistentes de los materiales, la geometría y los detalles constructivos. De hecho, más bien, las medidas experimentales de las frecuencias naturales, suelen ser una buena herramienta para calibrar la bondad del modelo.

2.7 Edificio sano-edificio dañado

POCRISC -----

La Figura 2-9 a) (Vidal et al. 2014) muestra la variabilidad de los periodos propios de edificios de hormigón armado, de altura baja y mediana, de entre 2 y 13 pisos, en la ciudad de Lorca, Murcia, en España, antes y después del sismo ocurrido el 1 de mayo de 2011. El estudio se basó en el análisis de 59 edificios sanos, antes del sismo y 34 edificios dañados, después del sismo. Se observa cómo el periodo y su variabilidad con el daño, crecen con el número de pisos.



Figura 2-8. PSDs de las señales de la Figura 2-6.

La Figura 2-9 b) muestra un ejemplo de variación del periodo con el nivel de daño para un edificio (Hidalgo-Leiva 2017). En el umbral del estado de daño completo, se dan variaciones del periodo del 60%; cuando nos acercamos al punto de capacidad última o punto de colapso la variación puede ser del 100%.

Así, un tema muy relevante, cuando se busca usar la medición empírica del periodo propio de un edificio, para detectar el posible nivel de daño sufrido durante un suceso catastrófico, es el conocimiento de su periodo propio inicial; es decir, del edificio sano. También es muy relevante conocer una correspondencia entre el nivel de daño y el incremento en el periodo propio. Una pequeña variación en el periodo, en el caso de edificios rígidos y frágiles, con una escasa ductilidad, puede indicar que el edificio está cerca, o incluso en el punto del co-lapso. Sin embargo, edificios dúctiles, flexibles y deformables, pueden mostrar variaciones significativas de su periodo propio, incluso para niveles de daño moderado. Estos dos aspectos son fundamentales: i) caracterización del edificio sano; ii) variación del período con el daño.





Figura 2-9. a) Variabilidad del periodo en función del daño. a) edificios de hormigón armado antes y después del sismo de Lorca (Vidal et al. 2014). b) Variación del periodo con el grado de daño, para un edificio específico (Hidalgo-Leiva 2017).

El análisis estático no lineal es una excelente herramienta para tener una idea de ambos aspectos, si bien, hay que tener en cuenta las hipótesis para su aplicación y sus limitaciones para edificios irregulares o altos, en los que los modos superiores tienen una contribución significativa. Además, en realidad, las medidas empíricas de vibración del edificio permiten conocer el periodo del edificio en el estado en qué se encuentra, en el momento de la medida y, considerando que es el periodo de su respuesta a acciones extremadamente débiles. En general, puede suponerse que, en condiciones normales, éste corresponde al edificio sano. Pero, escrupulosamente hablando, conocer el periodo del edificio sano requeriría efectuar medidas en periodos cercanos a su construcción, teniendo en cuenta los efectos reológicos, así como consolidaciones del edifico en función del tiempo y del tipo de suelo de la fundación. Hay que tener en cuenta, que cualquier reforma en el edificio también puede alterar el periodo.



3 Prat del Rull (Andorra)

El edificio del Prat del Rull⁶ se selecciona por ser la sede de diversas dependencias del Gobierno del Principado de Andorra y, concretamente, de los servicios de Protección Civil y Gestión de Emergencias y del Centro Nacional del Tránsito andorrano.

3.1 El edificio

El edificio⁷, está situado en la calle de la Grau s/n de Andorra la Vella. La Figura 3-1 muestra la situación del edificio, un plano de la planta baja, indicando los edificios adjuntos, y fotos de las fachadas Este y Norte.



Figura 3-1. a) Situación del edificio Prat del Rull. b) Plano del edificio. Piso subterráneo. c) Fachada Este. d) Fachada Norte.

⁷ Edificio Prat de Rull (acceso: 31/10/2021).



⁶ Servicios de protección civil y gestión de emergencias de Andorra (acceso: 21/11/2021) ⁷ Edificio Prat de Pull. (acceso: 31/10/2021)

La Figura 3-2 muestra un esquema del alzado y del plano de la planta baja, con indicación de las direcciones de los sensores horizontales de aceleración. El edificio fue construido en 2013 y, principalmente, es de hormigón. Tiene dos pisos subterráneos y 6 sobre nivel del suelo. Los pisos subterráneos tienen muros de hormigón, pilares y vigas; los pisos sobre rasante tienen vigas y columnas de metal.

3.2 La instrumentación

Un objetivo de la Acción 4 ha sido el análisis de la posibilidad de conocer el periodo propio de los edificios mediante medidas a distancia, que no requieran entrar en el edificio (en nuestro caso, el estudio de la adecuación de un dispositivo radar). La idea era determinar las propiedades modales del edificio mediante medidas clásicas de aceleración y su contraste con medidas de desplazamiento y con el modelado estructural del edificio. Como se verá más adelante, los trabajos con radar, en los otros dos edificios pusieron de manifiesto niveles de vibración de los edificios rígidos, muy por debajo de la capacidad de resolución del dispositivo radar disponible, lo que desincentivó su uso en Andorra. Se describen a continuación los principales resultados de la campaña de medidas de aceleración.

3.2.1 Acelerómetros

Para la medida de historias temporales de aceleración se usaron 7 acelerómetros triaxiales Güralp Fortimus. La Figura 3-3 muestra uno de los dispositivos usados. Obsérvese cómo la dirección N está indicada en la superficie del instrumento. Para este edificio, se ha definido esta orientación como HN1, dejando la HN2 para la dirección ortogonal. En la Figura 3-2 b) se indica la orientación de los acelerómetros horizontales. En el <u>Anexo I</u>, más abajo, se describe el protocolo de las medidas de aceleración efectuadas. En el <u>apartado 2.4.1</u> se ha descrito la función de transferencia de los sensores de aceleración.





La campaña de medidas se realizó entre los días 3 y 10 de abril del año 2019. La Figura 3-4 muestra el calendario y el detalle de los días de la semana.

Es importante notar que, durante los días 6 y 7, por ser sábado y domingo, la actividad en el edificio y, en consecuencia, los niveles de ruido, son menores, con respecto a los días laborables. La Tabla 3-1 muestra los sitios donde se instalaron los acelerómetros, así como la codificación de las estaciones y los tiempos inicial y final de los registros.



Figura 3-3. Acelerómetro usado en la instrumentación del edificio



La Figura 3-5 a) muestra una foto de acelerómetro instalado en la segunda planta y, la Figura 3-5 b), muestra la situación de los acelerómetros instalados en la planta 6. En la Figura 3-5 a) puede observarse, también, la situación de una de las antenas GNSS ⁸ (*Global Navigation Satellite System*) usadas para la señal de tiempo.

			Abril			
Do	Sa	Vi	Ju	Mi	Ма	Lu
7	6	5	4	3	2	1
14	13	12	11	10	9	8
21	20	19	18	17	16	15
28	27	26	25	24	23	22
					30	29
	Do 7 14 21 28	SaDo67131420212728	Vi Sa Do 5 6 7 12 13 14 19 20 21 26 27 28	Abril Vi Sa Do Ju Vi Sa Do 4 5 6 7 11 12 13 14 18 19 20 21 25 26 27 28	AbrilMiJuViSaDo34567101112131417181920212425262728	Abril Ma Mi Ju Vi Sa Do 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13 14 16 17 18 19 20 21 23 24 25 26 27 28 30



Es interesante señalar la importancia de disponer de una misma señal de tiempo para todas las señales registradas. Ello permite sincronizar los análisis y observar movimientos simultáneos en los diferentes puntos de medida.

Tabla 3-1.Detalle de las medidas de aceleración con indicación del lugar de registro, fechas y
horas(**) de las medidas inicial y final.

N. acc.	Lugar	Códiao	Fecha ini.	Hora ini.	Fecha fin.	Hora fin.
	0	0	dd.mm.aaaa	nn:mm:ss	dd.mm.aaaa	nn:mm:ss
1	PB	C001	04.04.2019	08:01:15	09.04.2019	14:04:54
2	P2	C002	03.04.2019	15:22:10	09.04.2019	12:41:37
3	P4	C003	03.04.2019	16:56:32	09.04.2019	13:02:50
4	P4	C004	03.04.2019	17:35:12	09.04.2019	12:57:24
5	P6	C005	03.04.2019	15:54:14	09.04.2019	13:22:01
6	P6	C006	03.04.2019	16:27:30	09.04.2019	13:30:30
7	P6	C007	03.04.2019	16:37:08	09.04.2019	13:43:13

PB: Planta baja. Pj: Planta j (j=2,4,6).

(**) Se trata de la hora GNSS, con un desfase de 2 horas con respecto a la hora local.

3.2.2 Radar de apertura real: RAR

Por causa de diversos contratiempos y, sobre todo, debido a los resultados obtenidos con el registro de historias temporales de desplazamiento con el radar interferométrico, se consideró que realizar una campaña con radar en este edificio no iba a aportar ninguna novedad al trabajo, debido a las muy bajas amplitudes de los desplazamientos esperados a las altas frecuencias propias observadas con los transductores de aceleración.

⁸ Antenas GNSS



3.3 Análisis de los datos

OCRISC

3.3.1 Medidas de aceleración

Análisis preliminar

Los datos de aceleración se graban en formato miniSEED⁹ y se usa la función Matlab (Mitysca, 2014) que permite previsualizar y tratar las señales. Para ello además se ha realizado una serie de programas, en la versión 2019 b de Matlab (Math Works 2019). Como paso previo, se aplica un filtrado Butterworth paso-banda entre 0.1 y 10.0 Hz (periodos entre 0.1 y 10 s) de tercer orden. Tanto la banda frecuencial como el orden del filtro se han decidido tras realizar diversas pruebas y después de verificar que las frecuencias propias del edificio se hallan en este rango.



Figura 3-5. a) Ejemplo de instalación de un acelerómetro (C002, segunda planta). b) Detalle de la situación de los acelerómetros en la planta 6.

La Figura 3-6, muestra el registro bruto correspondiente al viernes 5 de abril de 2019 y los registros tratados de los días 5 y 6 de abril. Estos registros son del sensor YK.C005 situado en una esquina de la sexta planta del edificio (Figura 3-5). Obsérvense las diferencias en las amplitudes de la señal en horario nocturno y diurno y en día laboral, viernes 5, y festivo, sábado 6. También, en día y horario laboral las componentes horizontales, HN1 (longitudinal) y HN2 (transversal), tienen mayores amplitudes que la componente vertical, HNZ. El tiempo es hora GNSS. Para la hora local hay que añadir dos horas a la hora GNSS.

La Figura 3-7 muestra un ejemplo de los registros finales de los días 5 y 6 de abril, después de un tratamiento adicional, realizado para una mejor depuración de los datos brutos. Este refinado adicional, han consistido en las siguientes operaciones: i) dentro de un mismo día, detectar interrupciones de las grabaciones y acoplar los acelerogramas truncados correspondientes; ii) detectar y reducir amplitudes puntuales excesivas. Estas irregularidades pueden producirse, probablemente y entre otras posibles causas, por golpes, o ruidos, cercanos a los sensores, sin relación con la respuesta estacionaria del edificio.

⁹ Más información sobre el formato miniSEED puede hallarse en: <u>http://www.iris.washington.edu/ds/nodes/dmc/data/formats/miniseed/</u> (Última consulta 20/8/2019).



Edificio Prat del Rull



Figura 3-7. Ejemplo de las series temporales finales, después del análisis preliminar. a) Día 5 de abril, viernes. b) Día 6 de abril, sábado.

Las amplitudes de estos picos se reducen de forma que cumplan las siguientes dos condiciones: i) los picos no pueden ser mayores que un valor máximo, que se ha fijado aquí como 2.5 mm/s² y, ii) ningún valor puede ser mayor que 4 veces el valor mediano de las amplitudes definidas como la mediana de $|y_i - ym|$, siendo ym el valor mediano de $|y_i|$ ($j = 1 \cdots$ Npts).

Intensidad del ruido

OCRISC

Se efectuó un análisis de los niveles de intensidad del ruido, mediante la observación de la variación temporal de la amplitud cuadrática media (*root mean square, RMS*). La Figura 3-8 a), b) y c) muestra ejemplos correspondientes a los días 5, 6 y 7 de abril, respectivamente.

El día 5 de abril fue viernes y los registros son del sensor YK.C005, situado en la sexta planta. Puede observarse un cambio significativo en los niveles de las amplitudes RMS, en días laborables, viernes 5, y festivos, 6, sábado, y 7, domingo; asimismo se observan diferencias importantes entre los periodos de mayor y menor actividad. Se han dibujado tres horas críticas en las que se observan cambios claros de la intensidad del ruido, concretamente las 8, las 17 y las 23 h (hora local). Llaman la atención los bajos niveles de excitación de la com-

Edificio Prat del Rull

ponente HN1 y la caída de la excitación de la HN2 el domingo, día 7, sobre todo en la madrugada, entre las 2 y las 8. También se puede observar un decaimiento importante de la excitación entre las 17 y las 23 horas, que es particularmente anómalo el sábado y el domingo, días en los que se observa una variación, brusca e intensa, a estas horas.



Figura 3-8. Variación de los niveles de ruido a lo largo del día. a) Viernes 5 de abril. b) Sábado 6 de abril. c) Domingo 7 de abril. Sensor YK.C005, sexta planta.

Aunque, probablemente, estos cambios se deban a interrupciones de alguna actividad, dentro o fuera del edificio, no se ha podido identificar una causa específica. Por otra parte, también llaman la atención, el alto nivel de excitación de la componente vertical el viernes y el domingo y, sobre todo, la caída repentina, entre las 5 de la tarde y las 11 de la noche, del domingo. Como curiosidad se indica que, el domingo, 7 de abril de 2019, entre las 9 y las 19 horas, se celebraron las elecciones generales al Consell General.

Finalmente, aunque se han identificado los picos de intensidad, no se han establecido correlaciones entre estos picos y posibles actividades y horarios del edificio. Más adelante se verá que, en el caso del edificio del Instituto Santa Eugènia, sí fue posible establecer este tipo de correlación entre los picos y, en este caso, los horarios de actividades escolares.

Frecuencias propias. Densidad espectral de potencia.

El siguiente paso ha sido hallar la densidad espectral de potencia. Los fundamentos de la técnica se han comentado en el apartado 2.3.3. Recordemos que la técnica consiste en aplicar ventanas múltiples solapadas, de forma que, para cada ventana, se halla la *PSD* y, al final, se obtiene la curva promedio y las curvas que definen el intervalo del 95% de confianza. Se han usado ventanas de Hamming con una longitud de 8192 puntos y un solape del 90%. Téngase en cuenta que la serie temporal correspondiente a un día, tiene 8 640 000 puntos que, con un intervalo de muestreo 100 mps corresponden a 24 horas, de forma que, las ventanas temporales usadas, son de aproximadamente 1 minuto y 23 segundos, con un



solape de 1 minuto y 14 segundos. Con esta longitud de ventana temporal la resolución de las frecuencias es de 0.012 Hz, que se ha considerado suficiente para este análisis. Si se quiere aumentar la resolución en el campo frecuencial hay que aumentar la longitud de la ventana. Por ejemplo, para una longitud de 65536 puntos, aproximadamente 11 minutos, el incremento frecuencial Δf es de 0.0015 Hz. Se han ensayado también varios tipos de ventanas con resultados muy estables. Como se verá más adelante, este mismo procedimiento se ha aplicado también en el estudio del edificio del Instituto Santa Eugènia de Girona. Los principales resultados se resumen a continuación.

La Figura 3-9 muestra las *PSD*s de las tres componentes correspondientes a los días 5, 6 y 7 de abril del 2019. También se han hallado los picos de forma automática. La Figura 3-10 muestra las PSDs correspondientes a la estación YK-C005, los 8 días de registro de las tres componentes: HN1 (Figura 3-10 a) HN2 (Figura 3-10 b) y HNZ (Figura 3-10 c). La Figura 3-11 a) muestra las PSD's medias de las tres componentes , HN1, HN2 y HNZ, indicando los picos detectados. Se distinguen dos rangos de frecuencia. El primero entre 1 y 5 Hz y, el segundo, entre 5 y 10 Hz. Las vibraciones de alta frecuencia se atribuyen a ruido externo, probablemente producido por maquinaria en trabajos de construcción, y que no está directamente relacionado con la respuesta estructural, más allá de formar parte de la excitación. Por este motivo, se ha decidido focalizar en el rango de bajas frecuencias, que se supone son las que están directamente relacionadas con la respuesta estructural del edificio, es decir con sus períodos modales.

Dadas las pequeñas variaciones que pueden darse en una misma frecuencia predominante, detectada en diferentes días, un tema delicado consiste en cómo separar períodos/frecuencias atribuibles a diferentes modos de vibración. Para ello se ha procedido de la siguiente manera. Para cada componente, las frecuencias detectadas se ordenan de mayor a menor; se toma el valor medio de todas las frecuencias que no difieren de este valor más de una tolerancia prefijada, que en nuestro caso se ha tomado del 3%. Cuando la frecuencia que se va a añadir difiere más que esta tolerancia, se reinicia el procedimiento a partir de esta frecuencia. Así, para cada frecuencia se toma su valor medio, su desviación estándar, su coeficiente de variación y el número de días que han intervenido en el promedio, es decir, el número de días que se ha detectado con claridad. La Tabla 3-2 muestra estos valores para los periodos identificados dos o más días.

Para las frecuencias detectadas menos de 3 días, no se han calculado los valores de dispersión, por entender que estas carecen de sentido.

En la Figura 3-11 el tamaño de los marcadores es proporcional al número de días que esta frecuencia ha sido detectada y, en los casos detectados todos los días, 8 en este caso, la línea exterior del marcador es de color negro. En esta misma figura, para las frecuencias identificadas en los PSD's de 3 o más días, se indican los intervalos de confianza del 95%.

El periodo T=0.33 (F=3.0 Hz) destaca con claridad en la componente HN1 y también puede observarse, en la componente vertical, aunque solo se identifica en dos días, Este periodo se atribuye al modo fundamental en la dirección HN1. El periodo T=0.39 s ((F=2.58 Hz) se identifica en la componente HN2 (7 días) y en la HN1, aunque, con claridad, sólo 3 días, Este periodo, que no se observa en HNZ, se asocia al modo fundamental en la dirección HN2, que, en este caso, muestra cierta torsión en la dirección HN1. El periodo T=0.27 s (F=3.7 Hz), que se observa 7 veces en HN1 y 5 en HNZ, se atribuye a un modo superior en HN1, con torsión vertical; posiblemente el período detectado de 0.258 (frecuencia 3.874) pueda estar relacionado con éste, que, en su caso, tendría también cierta torsión en la dirección HN2.







Figura 3-9. PSD's de las series temporales de los días: a) 5, viernes, b) 6, sábado, y c) 7, domingo, del mes de abril 2019. Sensor YK-C005.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique





Figura 3-10. PSD's correspondientes a las señales temporales de los diferentes días de registro para: a) HN1, b) HN2, y c) HNZ.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique



Figura 3-11. a) PSD's medias y síntesis de las frecuencias detectadas. b) Enfoque en el rango de periodos entre 0.2 y 1 s. (Véase Tabla 3-2)

Componente HN1 Co			Com	Componente HN2			Componente HNZ							
Т	Frec.	SD	CV	N	Т	Frec.	SD	CV	N	Т	Frec.	SD	CV	Ν
(s)	(Hz)	(Hz)	(%)	(días)	(s)	(Hz)	(Hz)	(%)	(días)	(s)	(Hz)	(Hz)	(%)	(días)
0.229	4.37	0.045	1.026	5	0.258	3.874	0.043	1.107	3	0.273	3.66	0.037	1.012	5
0.272	3.673	0.031	0.846	7	0.296	3.373	0.046	1.37	3	0.331	3.021			2
0.333	3.006	0.037	1.223	8	0.348	2.87	0.018	0.623	7	SD: D	SD: Desviación estándar			
0.389	2.572	0.007	0.274	3	0.388	2.579	0.009	0.358	7	CV: Coeficiente de variación				

Tabla 3-2. Periodos y frecuencias detectadas en los registros YK-C005. (Figura 3-11).



Finalmente, los periodos 0.229 s y 0.296 s (Frecuencias 4.37, y 3.373) pueden estar relacionados con modos superiores de HN1 y HN2 respectivamente.

Espectrogramas

Para hallar la estabilidad o la variación temporal de los periodos, se ha determinado el espectrograma. Para ello se ha usado la ventana de Hamming con una longitud de 131072 (2¹⁷) puntos (22 minutos aproximadamente) con un solape del 25%, es decir de 32768 (2¹⁵) puntos (5.5 minutos aproximadamente), recuérdese que se tienen 100 muestras por segundo. De este modo, la señal contenida en cada ventana se procesa para hallar la PSD, que se asigna al instante de tiempo medio de la ventana. Como resultado, se obtiene una figura tridimensional con el tiempo, la frecuencia, o el periodo, y la PSD como coordenadas x, y, z respectivamente. Es frecuente también aplicar técnicas de suavizado para mejorar la representación gráfica de los resultados. La Figura 3-12 muestra los espectrogramas sin suavizar (a, b y c) y suavizados (d, e y f) respectivamente de las componentes HN1 HN2 y HNZ de los registros de aceleración YK-C0005, del viernes 5 de abril de 2019. Se muestran también los períodos de 0.33 s, 0.38 s y 0.25 s respectivamente para las componentes HN1, HN2 y HNZ (véase también la Figura 3-11).

Estabilidad de los períodos

La Figura 3-13 muestra una ampliación de los espectrogramas de la Figura 3-12, para focalizar en el entorno de los periodos de 0.33, 0.39 y 0.27 s (frecuencias de 3, 2.5 y 3.6 Hz). Se observan pequeñas variaciones de los periodos. Durante la noche, los períodos son ligeramente inferiores al valor medio, mientras que, durante el día, digamos entre las 8 y las 15 horas, aproximadamente, los periodos quedan ligeramente por encima del valor medio.

Estas variaciones podrían estar relacionadas con variaciones de temperatura y/o de masa. En efecto, la frecuencia angular propia de un sistema lineal amortiguado de un grado de libertad, caracterizado por una masa M, una rigidez K y una fracción de amortiguamiento crítico, v, queda definido por:

$$\omega^* = \omega \sqrt{1 - v^2}; \quad \omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{K}{M}}$$
(3-1)

Como ν suele ser pequeño, del orden de 0.05, tomar $\omega^* \cong \omega$ es una buena aproximación usada en dinámica estructural. Así, descensos en la temperatura, en horas nocturnas, aumentarían la rigidez y, en consecuencia, la frecuencia, mientras que incrementos de masa, debidos a una mayor ocupación del edificio, harían decrecer la frecuencia angular.

Movimiento de partícula

Para analizar el movimiento de partícula correspondiente a los periodos identificados en la Figura 3-11 y en la Tabla 3-2, se ha aplicado un filtro de paso de banda muy estrecha para aislar el movimiento debido al correspondiente modo de vibrar. Se ha usado un filtro pasobanda centrado en la frecuencia identificada y con una variabilidad el 5%. El orden del filtro ha sido 5. Este orden se ha considerado adecuado para aislar las frecuencias objeto de análisis.

La Tabla 3-3 muestra las frecuencias analizadas y las frecuencias límite, baja, F_L y alta F_H . Así, por ejemplo, para la frecuencia más baja, F= 2.577 Hz, se ha usado FL=2.45 Hz y FH=2.71 Hz. También se indica la componente donde esta frecuencia predomina, HN2 en este caso. La Figura 3-14 y la Figura 3-15 muestra los resultados obtenidos.



Edificio Prat de Rull. Andorra



Figura 3-12. Espectrogramas de las componentes HN1, HN2 y HNZ, sin suavizar (a, b y c) y suavizados (d, e y f) de los registros de aceleración YK-C005, del viernes 5 de abril de 2019. Se muestran también los períodos con máxima PSD.

Periodo T=0.388 s (Frecuencia F=2.577 Hz)

La Figura 3-14 a) muestra los registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y deslazamientos, antes y después de un filtrado de banda estrecha, entre 2.45 y 2.71 Hz, para aislar el movimiento que corresponde al modo de vibración de 2.577 Hz. El registro corresponde al día 5 de abril de 2019, viernes. La Figura 3-14 b) muestra el movimiento de partícula, en desplazamiento; para esta figura se ha representado el registro de un segundo, a las 9:00. Se observa que el movimiento corresponde a un modo de vibración traslacional en la dirección HN2, como puede observarse también en la Figura 3-11. Obsérvese que los desplazamientos son extremadamente pequeños: décimas de micra, muy lejos de la resolución del equipo RAR; tanto más si se considera que el nivel de ruido es alto, entre 5 y 10 μm , más de 1.5 órdenes de magnitud.







-20

-40

-60

-80

-100

-120

b)

PSD (dB/Hz)

Periodo T= 0.348 s (Frecuencia F=2.874 Hz)

La Figura 3-15 a) muestra los desplazamientos producidos por este periodo. Se observa movimiento en las direcciones HN1 y HN2, siendo ligeramente predominante el de la HN2. El movimiento en HN1 puede deberse a la influencia de la frecuencia de 3.003 Hz, T=0.333 s, que el filtro de banda estrecha no elimina completamente.

_				
	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Componente predominante	Filtro Butterworth [F∟ F _H] (Hz)
	0.388	2.577	HN2	[2.45-2.71]
	0.348	2.874	HN2	[2.73-3.02]
	0.333	3.003	HN1	[2.85-3.15]
	0.296	3.378	HN2	[3.21-3.55]
	0.272	3.677	HN1	[3.49-3.86]
	0.226	4.425	HN1	[4.20-4.65]

Tabla 3-3.Periodos y frecuencias detectadas en los registros YK-C005. (Figura 3-11).

Periodo T= 0.333s (Frecuencia F=3.003 Hz)

La Figura 3-15 b) muestra los desplazamientos correspondientes. También, en este caso, se observa movimiento en las direcciones HN1 y HN2. También con predominancia de la HN2. Esto se atribuye a que, aunque en la Figura 3-11 el pico corresponde a la componente HN1, La componente HN2 tiene una importante energía por su cercanía al pico anterior, es decir a la frecuencia de 3.003 Hz. En este caso, movimientos relevantes en HN1 y HN2 conviven.

Periodo T= 0.296 s (Frecuencia F=3.378 Hz)

En la Figura 3-15 c) se observa un claro dominio de HN1, lo que está de acuerdo con la Figura 3-11.

Periodos T= 0.272 s y T=0.226 (Frecuencias F=3.677 Hz y F=4.425 Hz)

Para estos dos periodos, en la Figura 3-15 d) y e), se observan patrones de movimiento similares, con desplazamientos comparables en las direcciones HN1 y HN2, y con amplitudes ligeramente mayores para el período de 0.272 s, en el que, además, domina, aunque de forma ligera, la componente HN1. En la Figura 3-11, aunque los picos se detectan en la componente HN1, puede observarse cómo, las energías, para estos dos periodos son similares.

3.3.2 Medidas de desplazamiento

En el edificio de Andorra no se realizaron medidas con el Radar.

3.4 El modelado

El socio ENIT¹⁰ efectuó los trabajos de modelado del edificio Prat del Rull. ENIT además hizo un interesante ejercicio, consistente en someter el edificio a un movimiento fuerte y observar la variación del periodo con el daño. Como veremos, se confirma la elongación del periodo propio con el daño.

¹⁰ Ecole National d'Ingénieurs de Tarbes



Figura 3-14. a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 2.45-2.71 Hz) b) Movimiento de partícula correspondiente al período T=0.388 s (Frec.=2.577 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección HN2. Registro del viernes, 5 de abril de 2019.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique



Figura 3-15. Movimientos de partícula correspondientes a los períodos: a) T=0.348 s (F=2.874 Hz), b) T=0.333 s (F=3.00 Hz), c) T= 0.296s (F=3.378 Hz), d) T=0.272 s (F=3.677 Hz) y e) T=0.229 s (F=4.425 Hz). Registro del viernes, 5 de abril de 2019.

Los primeros resultados de estos trabajos fueron presentados en la reunión de la Acción 4 del proyecto, que se realizó los días 26 y 27 de febrero de 2020, en la sede del BRGM¹¹ en Orleans. Estos trabajos también se han difundido entre la comunidad científica internacional (Barus et al. 2019, 2020 b). El estudio se enmarca en el campo de la monitorización de la salud estructural *(Structural Health Monitoring,* SHM), en relación con los cambios en la respuesta dinámica de la estructura. La estrategia seguida fue caracterizar numéricamente el edificio, antes y después de un sismo, y caracterizar las frecuencias y formas modales.

La Figura 3-16 muestra un esquema de la estrategia seguida, que consta de tres pasos que se resumen a continuación.



Figura 3-16. Estrategia del modelado y análisis (Fuente: Dalverny O.)

- PASO 1: Mediante la simulación numérica, se caracteriza el estado inicial del edificio sano, sin daño. En este primer paso se pueden extraer las frecuencias propias (análisis modal clásico) o, aplicar el análisis modal operacional a series tempora-les numéricas simuladas.
- PASO 2: El edificio se somete a una acción sísmica severa, capaz de dañar el edificio.
- PASO 3: De manera similar al primer paso, pueden extraerse las frecuencias propias del edificio.

Más específicamente, se procedió como sigue: i) construcción el modelo numérico del edificio no-dañado. ii) Calibración del modelo numérico con los datos experimentales. Eventualmente puede calibrarse el análisis modal operacional aplicado a datos numéricos extraídos. iii) Simulación de un sismo severo con capacidad de dañar el edificio. iv) Caracterización del comportamiento dinámico del edificio dañado, usando, por ejemplo, el análisis modal operacional. v) Análisis detallado de la estructura dañada para poder dar recomendaciones.

3.4.1 Análisis del edificio sin-daño

El edificio se modeló mediante un sofisticado modelo de elementos finitos. Los detalles y hipótesis del modelado están descritos en Barus et al. (2020 a, b). En una primera fase se obtuvo una frecuencia fundamental de 1.12 Hz en la dirección Y (HN2). Esta frecuencia se halla lejos de las frecuencias de 2.572 y 2.579 Hz, halladas en las medidas de aceleración. Estas diferencias se atribuyeron a la presencia de edificios contiguos. Un modelo mejorado, incorporando esta interacción, identificó un modo de 2.502 Hz en la dirección Y, y uno de 4.34 Hz en la dirección X, que está cerca de la frecuencia de 4.425 Hz, identificada en las medidas de aceleración, con predominancia en la dirección HN1 (Tabla 3-2). La Figura 3-17 muestra los movimientos inducidos en la estructura por estos dos modos de vibración. También se identificaron otros modos con frecuencias más altas (Barus et al. 2020 a).

¹¹ Bureau de recherches géologiques et minières



Figura 3-17. a) Desplazamiento Modo 1. Flexión. Frecuencia 2.502 Hz. Eje Y. b) Desplazamiento Modo 3. Flexión. Frecuencia 4.34 Hz. Dirección X. (Fuente: Barus et al. 2020 a)

3.4.2 Análisis de daño

El modelo de elementos finitos fue sometido a un movimiento sísmico. Se usó el acelerograma de Northridge que, con una magnitud Mw= 6.7, ocurrió en California, el 17 de enero de 1994. El acelerograma usado tiene una duración de 20 s. La Figura 3-18 muestra el acelerograma. En él se indican dos tiempos del análisis dinámico no lineal para los que se ha analizado la primera frecuencia propia detectada. En el instante t=0.8 s, se inicia el daño y se estima una variación en la frecuencia del 3.2%. Más adelante, en el instante t=3.5 s, se estima una frecuencia de 2.22 HZ, que ha decaído un 12% respecto a la frecuencia inicial de 2.52 Hz. Los análisis dinámicos no lineales, además, ponen de manifiesto que aparece daño significativo a partir de una variación del 5% en la frecuencia. La Figura 3-18 ilustra estos resultados, así como, el acelerograma usado. En él se indican los tiempos de 0.8 y 3.5 s, usados para analizar la variación de la frecuencia propia con el daño. La Figura 3-18 b) muestra el modelo de los elementos finitos y los puntos de referencia usados en el análisis. La Figura 3-18 c) muestra el estado de la estructura en el instante de tiempo de 0.8 s y la Figura 3-18 d) muestra el estado para el tiempo de 3.5 s. En esta última figura se incluye una escala de daño y un detalle de un elemento severamente dañado. La Tabla 3-4 resume los valores numéricos de tiempos y frecuencias. De esta manera, este estudio permite localizar los daños y cuantificar su importancia. En este caso, observamos que la mayor fragilidad se localiza al nivel de la intersección de las dos partes del edificio y concierne al hueco del ascensor que representa el elemento más rígido de la estructura.

3.5 Reflexiones finales

Medidas de aceleración: intensidad del ruido

Las medidas de aceleración ponen de manifiesto la presencia de ruido importante que puede observarse con claridad en la alta excitación de la componente vertical (véase la Figura 3-8). Esta importante excitación se atribuye a la operación de maquinaria de construcción, cerca del edificio, aunque no se ha verificado ni contrastado su causa, por lo que puede ser debida a otras causas. En este sentido, sorprende la caída drástica del ruido entre las 17 y las 23 horas, aproximadamente, del domingo 7 de abril de 2019 (Figura 3-8 c).





Figura 3-18. a) acelerograma para el análisis dinámico no lineal. b) modelo de elementos finitos. c) estado del edificio en el instante t=0.8 s, d) estado en el instante t=3.5 s. (Barus et al. 2020 a)



Medidas de aceleración: frecuencias predominantes

El análisis frecuencial se ha reducido al rango entre 1 y 10 Hz, por considerar que las frecuencias modales del edificio se hallan dentro de este rango. Además, entre 1 y 10 Hz se distinguen dos rangos frecuenciales donde aparecen picos de densidad espectral de potencia (ver Figura 3-11).

El primer rango es entre las frecuencias de 1 y 5 Hz y el segundo entre 5 y 10 Hz. Se ha considerado que las frecuencias altas corresponden a ruido externo, probablemente debido a la operación de maquinaria de construcción, o similar. A favor de esta hipótesis está la elevada PSD, por ejemplo, a la frecuencia de 9 Hz, para la que las PSD son muy similares para las tres componentes registradas.

Tabla 3-4. Análisis de daño. Relación entre el daño y la variación de la frecuencia

	Estado inicial	t=0.8 s	t=3.5 s
Primera frecuencia natural (Hz)	2.52	2.44	2.22
Cambio en la frecuencia (%)		3.2 ^(*)	12 ^(**)

(*) Daño no detectado. (**) Daño detectado a partir de variaciones del 5% en el periodo.

En el rango entre 1 y 5 Hz, periodos entre 1 y 0.2 s, aparecen varios picos (Figura 3-11 y Tabla 3-2). La frecuencia de 2.579 Hz corresponde a un modo de flexión en la dirección HN2, aunque podría tener una ligera torsión que involucraría a la componente HN1. Esta frecuencia estaría cerca de la frecuencia de 2.502 Hz, hallada en el análisis numérico. La frecuencia de 3.673 predomina en la componente HN1 y las frecuencias de 2.870 y 3.006 Hz son muy cercanas, por lo que podrían corresponder a un mismo modo con torsión que implicaría a las componentes HN2 y HN1, respectivamente para los períodos de 0.348 y 0.333 s. Los análisis de movimiento de partícula confirman estas observaciones.

Medidas de aceleración: estabilidad

Lo espectrogramas han permitido observar una buena estabilidad de las frecuencias detectadas. Se observan, con todo, leves variaciones temporales, coincidentes con los periodos de actividad en el edificio. La carga, el aumento de masa repercute en un aumento del periodo.

Medidas de desplazamiento

Los desplazamientos observados quedan muy por debajo de la capacidad del radar de apertura real disponible. Así se confirma, como acertada, la decisión de prescindir de tales medidas en este edificio.

Modelado

Se confirma la dificultad de usar el modelado para hallar las condiciones del edificio sano. La complejidad estructural de los edificios y la variabilidad de los parámetros resistentes de los materiales introduce una elevada incertidumbre en los resultados obtenidos. Sí que es cierto que: i) el modelado permite conocer bien las propiedades modales de los edificios y ii) el modelado se beneficia de los resultados experimentales para calibrar los parámetros involucrados y mejorar la correspondencia modelo-realidad y, iii) el modelado mediante elementos finitos se puede utilizar para examinar la vulnerabilidad de los edificios sujetos a terremotos, concretamente para la localización e intensidad del daño.



El daño y la deriva del periodo

Un ejercicio de análisis dinámico no lineal ha permitido estimar la variación del período con el daño. Se ha observado que cambios del 5% o superiores en el periodo, son indicadores de daño significativo. Con todo, es difícil establecer un criterio general, puesto que estos niveles de variación del periodo fundamental pueden ser distintos para distintos tipos de edificios.

Sin duda, y a nuestro entender, el tema de identificación de daño a partir de la variación de la deriva del periodo no es trivial y es de una complejidad alta. Se requiere mucho más trabajo para hallar criterios generales y de aplicación expedita.


4 Instituto Santa Eugènia (España)

Después de analizar varios edificios candidatos, el Instituto Santa Eugènia¹² fue escogido, principalmente por tres motivos: i) se trata de un edificio que puede considerarse de especial importancia o esencial, por su alto nivel de ocupación de estudiantes, en los niveles de educación secundaria, bachillerato y ciclos de enseñanza superior, así como por su potencial valor estratégico en caso de emergencia sísmica. Es sabido que las instalaciones y servicios de estos centros suelen ser de gran ayuda en la atención de las emergencias creadas por terremotos, ii) por existir abundante documentación sobre sus planos estructurales y iii) por la facilidad que se nos dio para el acceso, la instrumentación y estudio del edificio. Antoni Blázquez, de la Asociación de Consultores de Estructuras (ACE), fue de gran ayuda en la selección del edificio del lado español y en la consecución de los planos estructurales, do-cumentación y detalles del edificio.

4.1 El edificio

El grupo escolar del Instituto Santa Eugènia¹² está situado en la C/ Enric Marquès i Ribalta n. 3, 17006 Girona, España, y está constituido por un conjunto de edificios de diferentes alturas y configuraciones arquitectónicas. La Figura 4-1 muestra la situación del edificio en la ciudad de Girona y una foto general del edificio.



Figura 4-1. a) Situación del IES Santa Eugènia. b) Foto general.

https://www.arquitecturacatalana.cat/es/obras/institut-santa-eugenia



¹² <u>http://web.isantaeugenia.cat/</u> (acceso: 31/10/2021)

 ¹³ Situación del edificio. <u>https://cualbondi.org/es/como-llegar/institut-santa-eugenia/</u>
 ¹⁴ © Juan del Pozo. ©Archivo histórico del COAC.

La Figura 4-2 muestra un esquema del alzado del edificio y el detalle del bloque instrumentado.

8 1 2

Figura 4-2. Esquema del alzado del edificio, con especificación del bloque instrumentado.

4.2 La instrumentación

Uno de los propósitos de la instrumentación de los edificios ha sido el análisis de la viabilidad del uso del radar de apertura real (RAR) para caracterizar las propiedades modales del edificio, básicamente los periodos del modo fundamental y primeros modos, a partir de medidas dinámicas, relativamente sencillas, del desplazamiento de respuesta del edificio a la vibración causada por ruido ambiental. Así, se han usado dos tipos de instrumentación: acelerómetros y un dispositivo RAR. Las principales características de las campañas de medidas se describen a continuación.

4.2.1 Acelerómetros

Para la medida de historias temporales de aceleración se usaron los mismos 7 acelerómetros triaxiales, Güralp Fortimus, que en el edificio de Andorra. Las principales características y funciones de transferencia se han descrito en el Capítulo 2, apartado 2.4. La Figura 3-3, más arriba, muestra uno de los dispositivos usados. Para este edificio, como en el edificio de Andorra, se ha definido la dirección Norte, indicada en el instrumento, como HN1, dejando la HN2 para la dirección ortogonal. De esta manera, en el edificio del Instituto Santa Eugènia, la componente HN1 corresponde a la dirección longitudinal (larga) y la HN2 corresponde a la dirección transversal (corta). La Figura 4-3 muestra una planta del edificio con las direcciones de los ejes HN1 y HN2.



Figura 4-3. Esquema de una planta del edificio y de las direcciones de los registros de aceleración.

Tras una visita preparatoria al centro escolar, el 26 de marzo, la campaña de medidas se realizó entre los días 2 y 9 de mayo del año 2019. La Figura 4-4 muestra el detalle de los días de la semana. Es importante notar que durante los días 4 y 5, por ser sábado y domingo, no hay actividad en el centro educativo. La Tabla 4-1 muestra los sitios donde se instala-



Edificio Santa Eugènia. Girona

ron los acelerómetros, así como la codificación de las estaciones y los tiempos inicial y final de los registros. En el Anexo II, se detalla el protocolo seguido para estas medidas.

_)	Mayo			
-	Do	Sa	vi	Ju	Mi	Ма	Lu
	5	4	3	2	1		
2019	12	11	10	9	8	7	6
	19	18	17	16	15	14	13
	26	25	24	23	22	21	20
			31	30	29	28	27

Figura 4-4. Calendario del mes de mayo de 2019. Se indican las fechas de las mediciones.

Tabla 4-1.Detalle de las medidas de aceleración con indicación del lugar de registro, fechas y
horas^(**) inicial y final de las medidas.

N acc	Lugar	Código	Fecha ini.	Hora ini.	Fecha fin.	Hora fin.
N. acc.	Lugai	registro	dd.mm.aaaa	hh:mm:ss	dd.mm.aaaa	hh:mm:ss
1	PB	YK.C008	02.05.2019	10:11:15	09.05.2019	17:20:25
2	P1	YK.C009	02.05.2019	11:01:40	09.05.2019	17:36:37
3	P2	YK.C010	02.05.2019	11:26:44	09.05.2019	17:29:07
4	P3	YK.C011	02.05.2019	12:25:05	09.05.2019	17:25:06
5	PC	YK.C012	09.05.2019	09:50:30	09.05.2019	16:37:19
6	PCE	YK.C013	09.05.2019	10:16:31	09.05.2019	16:37:19
7	RP	YK.C014	02.05.2019	13:09:34	09.05.2019	16:52:19
	a la alta DA	Dianta nutra n		ada DO. Dianta		

PB: Planta baja. P1: Planta primera. P2: Planta segunda. P3: Planta tercera. PC_I Planta cubierta interior del edificio. PC_E: Planta cubierta exterior del edificio. RP: Recinto de prácticas de obra civil.

^(**) Se trata de la hora GNSS, con un desfase de 2 horas con respecto a la hora local.

La Figura 4-5 a) y la Figura 4-5 b) muestran ejemplos de acelerómetros instalados, la Figura 4-5 c) muestra una de las antenas GNSS, usadas para la señal de tiempo. Es interesante señalar la importancia de disponer de una misma señal de tiempo para todos los registros. La Figura 4-6 a) muestra operaciones de instalación de los equipos y, la Figura 4-6 b) muestra las tres antenas correspondientes a los acelerómetros de la planta baja, primera y segunda.



Figura 4-5. a) y b) Ejemplo de acelerómetros instalados. c) Ejemplo de antena GNSS.



4.2.2 Radar de apertura real (RAR)

Una parte importante de la instrumentación de los edificios ha sido el análisis de la viabilidad, y, en su caso, el análisis de las ventajas y limitaciones del uso de un dispositivo radar, para determinar propiedades modales del edificio. A un nivel más ambicioso, se pretende analizar la capacidad del RAR para determinar el estado de daño después de un terremoto, sin necesidad de entrar en el edificio.

En el edificio del Instituto Santa Eugènia, este estudio ha sido subcontratado al Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Cataluña (CTTC¹⁵). El dispositivo y la técnica del radar interferométrico se han descrito en el Capítulo 2, apartado 2.3, en base a un informe sobre trabajos conjuntos previos (Luzi, 2012). Más abajo, en Anexo V, se incluye el informe sobre los trabajos realizados por el CTTC en el edificio A.



Figura 4-6. a) Operaciones de instalación de acelerómetros. b) Tres antenas correspondientes a los acelerómetros de la planta baja, primera y segunda.

4.3 Análisis de los datos

4.3.1 Medidas de aceleración

CRISC

Análisis preliminar

Los datos de aceleración se graban siguiendo el "*Standard for the Exchange Earthquake Data*" (SEED), concretamente el formato miniSEED ¹⁶. Se ha usado una función Matlab (Mitysca, 2014) que nos ha permitido previsualizar y tratar las señales en la versión Matlab 2019 b (Math Works 2019). Para corregir las severas variaciones de la línea base se ha considerado suficiente un filtrado Butterworth, paso-banda, entre 0.1 y 10.0 Hz (periodos entre 0.1 y 10 s). Esta banda de frecuencias se ha decidido tras varios ensayos, y se ha considerado que las frecuencias propias del edificio se hallan en este rango. También se han usado técnicas estándar de tratamiento de series temporales para mejorar el análisis de la señal.

 ¹⁵ <u>http://www.cttc.es/</u> <u>http://geomatics.cttc.es/remote-sensing/</u> <u>http://geomatics.cttc.es/remote-sensing/rar/</u> (acceso: 17/11/2021)
 ¹⁶ Más información sobre el formato miniSEED puede ballarse en:

¹⁶ Más información sobre el formato miniSEED puede hallarse en: <u>http://www.iris.washington.edu/ds/nodes/dmc/data/formats/miniseed/</u> (acceso: 20/8/2019).



Edificio Santa Eugènia. Girona

La Figura 4-7 muestra el registro bruto correspondiente al viernes día 3 de mayo de 2019 y los registros tratados de los días 3 y 4 de mayo. Obsérvense las diferencias en las amplitudes de la señal en horario nocturno y diurno, y en día lectivo, viernes día 3, y no lectivo, sábado día 4. Lo mismo puede observarse comparando las señales registradas el domingo día 5 y el lunes día 6. También las componentes horizontales, HN1 (longitudinal) y HN2 (transversal), tienen mayores amplitudes que la componente vertical, HNZ. El tiempo es hora GNSS. Para la hora local hay que añadir dos horas a la hora GNSS.



Figura 4-7. Registro bruto del día 3 de mayo de 2019, a). Registros, tratados, de los días 3 y 4 de mayo de 2019, b) y c). Obsérvese la diferente intensidad de la señal del día 4 (sábado), con respecto a la del día 3 (viernes), en horario lectivo.

Intensidad del ruido

Como paso previo al análisis espectral, se consideró interesante observar los niveles de intensidad del ruido, mediante el análisis de la variación temporal de la amplitud cuadrática media (*root mean square, RMS*). La Figura 4-8 a), b) y c) muestra ejemplos correspondientes respectivamente a los días 3, 5 y 6 de mayo que, a su vez, corresponden a viernes, domingo y lunes. Al igual que en la Figura 4-7, también aquí, se observa un cambio significativo entre las amplitudes RMS, en días no lectivos, domingo, y lectivos, viernes y lunes; asimismo, se observan diferencias importantes en los niveles de amplitud RMS entre las componentes horizontales y la vertical, durante las horas de actividad en el centro.



Figura 4-8. Variación de los niveles de ruido a lo largo del día. a) Viernes 3 de mayo, b) domingo 5 de mayo y c) lunes 6 de mayo. Como medida de intensidad se ha tomado la amplitud cuadrática media. Los tiempos corresponden a la hora local.

La Tabla 4-2 resume las principales actividades escolares y los respectivos horarios. Las actividades de la mañana se inician a las 08:00 y finalizan entre las 14:30 y 14:45. Las de la tarde se inician a las 15:00 y finalizan a las 20:20.



Entre estas dos horas, 15:00 y, aproximadamente, las 20:20, el ruido baja sensiblemente, presentándose algunos picos menores, probablemente debidos a actividades por la tarde; estos picos vespertinos son más claros en la Figura 4-8 c), correspondiente al lunes 6 de mayo. A partir de las 20:20, el ruido va decreciendo a niveles nocturnos que, como se observa en la Figura 4-8 b), son niveles parecidos a los de los días no lectivos.

Como ejercicio adicional, se han obtenido las horas de los picos de amplitud para observar, con mayor detalle, la relación entre los niveles de excitación y las actividades lectivas. Estos picos se han seleccionado de forma que la distancia pico-valle (*prominence*) sea superior a 18 μ m/s². Este valor se ha definido a partir de observar la capacidad de la función Matlab, *findpeaks*, para detectar los picos significativos e ignorar otros que se consideran poco relevantes y que, probablemente, son causados por actividades aleatorias y/o externas al centro. También es cierto que picos relevantes pueden no detectarse, particularmente en la componente vertical, debido a los menores niveles de ruido.

La Tabla 4-3 muestra los principales picos detectados entre las 8 y las 14:45 horas de los días 3 y 6 de mayo. Por otra parte, para interpretar los picos de ruido que se observan los días lectivos, es importante conocer el horario de actividades docentes en el instituto, y así, establecer la probable correlación entre la excitación del edificio y estas actividades. De esta manera, en la primera columna de esta Tabla 4-3, se indica también el horario de inicio de cada actividad, que suele implicar cambios de aula de los estudiantes. El desfase de unos pocos minutos se supone debido al tránsito entre la indicación de final de una actividad y el inicio de la siguiente, como, por ejemplo, cambios de aula, o salida al patio a las 11:00. El pico de las 13:30 se extiende hasta las 13:50, apareciendo un pico claro a las 13:50 en las componentes horizontales del lunes 6 de mayo. El pico de las 14:45 se detecta con claridad en las tres componentes y en los dos días.

Actividad escolar	Horario
Enseñanza Secundaria Obligatoria (ESO).	08:00-14:45
Bachillerato	08:00-14:30
Ciclos formativos	08:00-14:30
Otras actividades	15:00-20:20
Actividades extraescolares	Tardes

Tabla 4-2.Esquema general de actividad y horario en el centro.

Tabla 4-3.Cuadro horario de los principales picos de ruido entre las 08:00 ylas 14:45 de los días 3 y 6 de mayo. (véase también la Figura 4-8).

Hora	03 ma	03 mayo 2019 (viernes) 06 mayo 2019 (lunes)				unes)
inicio	HN1	HN2	HZU	HN1	HN2	HZU
actividad	(Long)	(Trans)	(Vert)	(Long)	(Trans)	(Vert)
08:00:00	08:06:40	08:03:20	08:03:20	08:03:20	08:05:00	
09:00:00	09:03:20	09:03:20	09:03:20	09:03:20	09:05:00	09:03:20
10:00:00	10:03:20	10:01:40	10:01:40	10:01:40	10:01:40	10:03:20
11:00:00	11:00:00	11:01:40	11:01:40	11:01:40	11:01:40	11:01:40
11:30:00	11:33:20	11:33:20		11:35:00	11:36:40	11:35:00
12:30:00	12:33:20	12:33:20	12:33:20	12:35:00	12:35:00	12:35:00
13:30:00	13:33:20	13:33:20	13:33:20	13:31:40	13:31:40	13:31:40
				13:50:00	13:50:00	
14:45:00	14:45:00	14:45:00	14:45:00	14:45:00	14:45:00	14:45:00

En la Figura 4-8, como referencia, se han indicado las siguientes horas críticas: 08:00, 14:30, 14:45, 15:00 y 20:20. Las 08:00 corresponden al inicio y las 14:45 al final de las actividades de la mañana. En esta figura, también se muestran los valores medios de la RMS. La Tabla 4-4 detalla estos valores medios para todos los días de registro. En general, los

valores de las dos componentes horizontales en los días lectivos son del orden de 100 micras/s², mientras que, sábado y domingo, las amplitudes caen por debajo de la mitad. La componente longitudinal (HN1), en días lectivos, es mayor que la componente transversal (HN2). La componente vertical presenta amplitudes RMS entre 32 y 37 micras/s² y, en días festivos, cae a menos de la mitad.

		Duración	Componentes (ARMS en µm/s2)					
Día de la semana		del registro	HN1	HN2	HNZ			
		derregistro	Longitudinal	Transversal	Vertical			
Jueves	02/05/2019	14h 55m 40s	101	94	32			
Viernes	03/05/2019	24h 00m 00s	111	101	33			
Sábado	04/05/2019	24h 00m 00s	37	41	16			
Domingo	05/05/2019	24h 00m 00s	32	36	14			
Lunes	06/05/2019	24h 00m 00s	110	100	33			
Martes	07/05/2019	24h 00m 00s	110	99	32			
Miércoles	08/05/2019	24h 00m 00s	111	100	33			
Jueves	09/05/2019	15h 26m 12s	117	129	37			

Tabla 4-4. Valores medios de la amplitud cuadrática media, en µm/s², para los diferentes días de registro. Se muestran los niveles mínimo y máximo en negrita.

El mínimo nivel de ruido se observa el domingo 5 de mayo y el máximo el jueves 9, aunque en este último día el registro finalizó sobre las 17:30 y no es directamente comparable con registros de todo un día. Obsérvese cómo el nivel de ruido es muy estable para los días laborables completos, es decir para los días, 3, 6, 7 y 8 de mayo. Es curioso observar que, los niveles de excitación en días lectivos son mayores en la componente longitudinal que en la transversal, mientras que en días festivos domina la transversal. Posibles explicaciones pueden asociarse, por una parte, a aspectos estructurales del edificio y, por otra, al hecho que los pasillos, por donde se realizan los cambios de actividad, siguen la dirección longitudinal paralela a la fachada del edificio.

Frecuencias propias. Densidad espectral de potencia

El siguiente paso ha sido hallar la densidad espectral de potencia. Los fundamentos de la técnica se han comentado en el apartado 2.3.3, del Capítulo 2, dedicado a aspectos metodológicos. Los detalles numéricos del análisis se han explicado en el apartado 3.3.1, en el capítulo dedicado al edificio de Andorra. Se resumen aquí los principales resultados obtenidos en el edificio de Girona.

La Figura 4-9 muestra las *PSD*s de las tres componentes correspondientes a los días 3 de mayo, viernes, 5 de mayo, domingo y, 6 de mayo, lunes. De manera análoga a la Figura 4-8, se ha usado la función MatLab, findpeaks, para hallar los picos de forma automática. En este caso, el parámetro de prominencia (*prominence*) se ha ajustado de forma que se seleccionan todos los picos con una prominencia superior a 0.5 dB/Hz. Obsérvense las diferencias en los niveles de los PSDs entre los días laborables y festivos. De valores del orden de -20 dB, el viernes y el lunes, pasamos a valores del orden de -30 dB, el domingo. La Figura 4-10 muestra las PSDs correspondientes a la estación YK-C011, los 8 días de registro de las tres componentes: HN1 (Longitudinal-Figura 4-10 a) HN2 (Transversal-Figura 4-10 b) y HNZ (Vertical-Figura 4-10 c); puede observarse el decaimiento de las amplitudes los días no lectivos (sábado y domingo). La Figura 4-11 muestra, por un lado, las PSDs medias de las tres componentes (HN1, HN2 y HNZ) y, por otro, una síntesis de los principales picos detectados. Dadas las pequeñas variaciones que pueden darse en una misma frecuencia predominante, detectada en diferentes días, un tema delicado consiste en cómo separar perío-



dos/frecuencias atribuibles a diferentes modos de vibración. Para ello se ha procedido de la siguiente manera: para cada componente, las frecuencias detectadas se ordenan de mayor a menor; se toma el valor medio de todas las frecuencias que no difieren de este valor más de una tolerancia prefijada que, en nuestro caso, se ha tomado del 3%. Cuando la frecuencia que se va a añadir difiere más que esta tolerancia, se reinicia el procedimiento a partir de esta frecuencia. Así, para cada frecuencia se toma su valor medio, su desviación estándar, su coeficiente de variación y el número de días que han intervenido en el promedio, es decir, el número de días que se ha detectado con claridad. La Tabla 4-5 muestra estos valores. En la primera columna, se ha añadido el periodo, pues, frecuentemente, puede ser más sencillo relacionar el periodo con las características geométricas de los edificios. Para las frecuencias detectadas menos de 3 días, no se han calculado los valores de dispersión, por entender que estos carecen de sentido. La Figura 4-11 muestra las frecuencias identificadas en la Tabla 4-5. El tamaño de los marcadores es proporcional al número de días que esta frecuencia ha sido detectada y, cuando ha sido detectada los 8 días, la línea exterior del marcador es de color negro. En esta misma figura, para las frecuencias identificadas en los PSD's de 3 o más días, se indican los intervalos de confianza del 95% de la variabilidad de las frecuencias identificadas.

Espectrograma

El espectrograma de una señal temporal, proporciona información sobre la variación temporal de su contenido frecuencial. Aquí, la variación de la PSD en función del tiempo. Para hallar estos gráficos se aplica un conjunto de ventanas múltiples con una longitud, tipo de ventana y solape predefinidos. Se ha usado la ventana de Hamming con una longitud de 131072 (2¹⁷) puntos (22 minutos aproximadamente) con un solape del 25%, es decir de 32768 (2¹⁵) puntos (5.5 minutos aproximadamente). Recuérdese que la frecuencia de muestreo es de 100 muestras por segundo. De este modo, la señal contenida en cada ventana se procesa para hallar la PSD, que se asigna al instante de tiempo medio de la ventana. Como resultado, se obtiene una figura tridimensional con el tiempo, la frecuencia, o el periodo, y la PSD, como coordenadas x, y, z, respectivamente. Es frecuente, también, aplicar técnicas de suavizado para mejorar la representación gráfica de los resultados.

La Figura 4-12 muestra los espectrogramas sin suavizar (a, b y c) y suavizados (d, e y f), respectivamente de las componentes HN1, HN2 y HNZ, de los registros de aceleración YK-C011, del viernes 3 de mayo de 2019. Se muestran también los períodos con máxima PSD. Para cada espectrograma, se ha tomado el período con la máxima PSD y se ha calculado su valor medio, su desviación estándar y su coeficiente de variación.

La Tabla 4-6 muestra los períodos observados en los espectrogramas no suavizados y la Tabla 4-7 en los suavizados. Se observa una consistencia muy alta, con incertidumbres muy bajas. Obsérvese, además, cómo el periodo de 0.187 s, se observa con claridad en las componentes HN2 y HNZ. El valor medio ponderado, m_p , y la desviación estándar, σ_p , del conjunto de las *N* medidas, con valores medios, m_i , y desviaciones estándar, σ_i , se han calculado mediante la siguiente ecuación:







Figura 4-9. PSD's para las series temporales de los días 3, viernes, a), 5, domingo, b) y 6, lunes, c), de mayo de 2019.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique





Figura 4-10. PSD's correspondientes a las señales temporales de los diferentes días de registro para: a) HN1-Long, b) HN2-Transv y c) HNZ-Vert.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

	HN1	Longitud	dinal			HN2	Transve				HN	Z Vertica	al		
Т	Frec.	SD	CV	Ν	Т	Frec.	SD	C٧	Ν	·	Γ	Frec.	SD	CV	Ν
(s)	(Hz)	(Hz)	(%)	(días)	(s)	(Hz)	(Hz)	(%)	(días)	(s)	(Hz)	(Hz)	(%)	(días)
0.106	9.436	0.106	1.12	3	0.10	7 9.382	0.007	0.1	5	0.1	07	9.387			1
0.115	8.722	0.070	0.80	4	0.11	3 8.866	0.074	0.8	7	0.1	14	8.74			1
0.205	4.871	0.060	1.24	6	0.12	9 7.747	0.109	1.4	6	0.1	23	8.154			1
0.228	4.379	0.020	0.47	8	0.15	1 6.628			1	0.	30	7.703	0.062	0.8	5
0.368	2.716			2	0.18	6 5.379	0.058	1.1	8	0.	58	6.311			1
0.499	2.004	0.026	1.29	7	0.20	0 4.999			2	0.1	86	5.367	0.037	0.7	8
0.529	1.892			1	0.20	7 4.834			1	0.2	285	3.503			2
S	SD: Des	viación (estánda	ar	0.49	6 2.014	0.000	0.0	3	0.3	313	3.192			2
CV	: Coefic	ciente de	e variad	ión	0.81	9 1.221			1	0.4	194	2.025	0.008	0.4	7
										0.	725	1.379			1
										0.	762	1.312			2

Tabla 4-5. Periodos y frecuencias detectadas en los registros YK-C011. (Véase también la Figura 4-9).



Figura 4-11. PSD's medias y síntesis de las frecuencias detectadas. (Véase Tabla 4-5 y explicación en el texto)

1

0.920 1.086



$$m_{p} = \sum_{i=1}^{N} p_{i} m_{i} / \sum_{i=1}^{N} p_{i}; \ \sigma_{m_{p}} = 1 / \left(\sum_{i=1}^{N} p_{i} \right)^{\frac{1}{2}}; \qquad p_{i} = 1 / \sigma_{i}^{2}$$
(4-1)

Siendo p_i los pesos. La última fila de las dos tablas muestra los periodos medios ponderados, su desviación estándar y su coeficiente de variación. Se observa cómo los periodos detectados corresponden a los de la Tabla 4-5. Los períodos de 0.228 s y de 0.186 s se observaron bien, los 8 días de registro.

Tabla 4-6.Periodos propios, detectados en los espectrogramas no-suavizados de la estación YK-
C011. Se dan también las desviaciones estándar y los coeficientes de variación en %.
Se observa una excelente estabilidad de los periodos observados.

	Peri	Periodo medio (s)		Desvia	ción estái	ndar (s)		Coef. Variación (%)		
Fecha	HN1	HN2	HNZ	HN1	HN2	HNZ		HN1	HN2	HNZ
	(long)	(trans)	(vert)	(long)	(trans)	(vert)	_	(long)	(trans)	(vert)
02/05/19	0.228	0.186	0.185	0.002	0.007	0.005		1.0	3.8	2.7
03/05/19	0.229	0.188	0.188	0.003	0.003	0.011		1.1	1.6	5.8
04/05/19	0.228	0.187	0.188	0.003	0.004	0.005		1.5	2.2	2.6
05/05/19	0.226	0.188	0.187	0.005	0.005	0.011		2.4	2.7	5.8
06/05/19	0.229	0.189	0.189	0.003	0.005	0.006		1.4	2.7	3.4
07/05/19	0.229	0.188	0.185	0.003	0.005	0.017		1.3	2.4	9.4
08/05/19	0.228	0.190	0.179	0.004	0.006	0.027		1.9	3.1	15.2
09/05/19	0.228	0.189	0.187	0.003	0.005	0.013		1.2	2.7	7.1
Val. Medio	0.228	0.188	0.187	0.001	0.002	0.003		0.5	0.9	1.5

Tabla 4-7.Periodos propios, detectados en los espectrogramas suavizados de la estación YK-
C011. Se dan también las desviaciones estándar y los coeficientes de variación en %.
Se observa una excelente estabilidad de los periodos observados.

	Perie	Periodo medio (s)			Desvia	ción estái	ndar (s)	Coef. Variación (%)		
Fecha	HN1	HN2	HNZ		HN1	HN2	HNZ	HN1	HN2	HNZ
	(long)	(trans)	(vert)		(long)	(trans)	(vert)	(long)	(trans)	(vert)
02/05/19	0.228	0.184	0.184		0.001	0.003	0.003	0.6	1.7	1.6
03/05/19	0.229	0.188	0.188		0.002	0.003	0.006	0.8	1.3	3.3
04/05/19	0.228	0.187	0.188		0.001	0.004	0.004	0.6	2.1	2.0
05/05/19	0.228	0.188	0.188		0.002	0.005	0.004	0.8	2.4	2.3
06/05/19	0.229	0.189	0.188		0.003	0.004	0.004	1.1	2.4	2.0
07/05/19	0.229	0.187	0.188		0.002	0.004	0.003	0.8	1.9	1.8
08/05/19	0.227	0.188	0.183		0.003	0.006	0.020	1.2	3.0	10.8
09/05/19	0.228	0.188	0.188		0.002	0.004	0.004	1.1	2.2	2.0
Val. Medio	0.228	0.187	0.187		0.0006	0.0014	0.0014	0.2	0.7	0.8

Un análisis estructural detallado del edificio arrojará luz sobre el significado de estos períodos en relación con las propiedades modales del edificio instrumentado.

Estabilidad de los períodos

A pesar de que las desviaciones estándar y los coeficientes de variación son pequeñas, el análisis detallado de los espectrogramas ha puesto de manifiesto que, durante la noche, los períodos son ligeramente inferiores al valor medio, mientras que, durante el día, digamos entre las 10 y las 18 horas, los periodos quedan ligeramente por encima del valor medio. Estas variaciones pueden observarse en la Figura 4-13.



Edificio Santa Eugènia. Girona



Figura 4-12. Espectrogramas de las componentes HN1, HN2 y HNZ, sin suavizar (a, b y c) y suavizados (d, e y f) de los registros de aceleración YK-C011, del viernes 3 de mayo de 2019. Se muestran también los períodos con máxima PSD.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique



Figura 4-13. Zoom sobre el espectrograma de la componente HN1 del registro del 3 de mayo donde se observan pequeñas variaciones diurnas y nocturnas del periodo con respecto al valor medio (línea a trazos).

Como se ha visto más arriba en el apartado 3.3.1, véase también la ecuación (3-1), estas inestabilidades se atribuyen a variaciones de temperatura y de masa. Descensos en la temperatura aumentarían la rigidez y la frecuencia; aumentos de masa hacen decrecer la frecuencia angular. En consecuencia, parece interesante investigar estas variaciones, dado que, justamente, el principal objetivo de este trabajo es analizar las variaciones en las frecuencias de respuesta de los edificios relacionadas con daños sufridos y/o con modificaciones en sus elementos estructurales y no estructurales.

Movimiento de partícula

Las técnicas de análisis y tratamiento de series temporales permiten aplicar filtros de banda muy estrecha para eliminar, o focalizar, en frecuencias específicas. Estas operaciones son bien conocidas y establecidas en el análisis y tratamiento de series temporales (Proakis y Manolakis, 2007; Oppenheim y Schafer 1999) y se usan a continuación para focalizar en el movimiento vibratorio del edificio en el entorno de las dos principales frecuencias detectadas (Figura 4-11 y Tabla 4-5). Como ejemplo se muestra el movimiento de partícula para los períodos de 0.186 s (frecuencia de 5.379 Hz) y 0.228 s (frecuencia de 4.379 Hz) que se detectan con claridad en los registros de los 8 días. También se ha incluido el movimiento de partícula para la frecuencia F=4.871 Hz (Periodo T=0.205 s), observada en la componente longitudinal, HN1, en 6 días de registro.

Frecuencia F=4.379 Hz (Periodo T=0.228 s)

La Figura 4-14 a) muestra los registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos, antes y después de un filtrado de banda estrecha, entre 4.17 y 4.61 Hz, para aislar el movimiento que corresponde al modo de vibración de 4.379 Hz. El registro corresponde al día 2 de mayo, jueves. La Figura 4-14 b) muestra el movimiento de partícula, en desplazamiento; para esta figura se ha representado el registro de un segundo, a las 14:00. La Figura 4-15 es análoga a la anterior, pero para el día 4 de mayo (sábado) a las 9:00 de la mañana. Se observa que el movimiento corresponde a un modo de vibración traslacional en la dirección HN1, longitudinal, como puede observarse también en la Figura 4-11.

Frecuencia F=5.379 Hz (Periodo T=0.186 s)

POCRISC -----

La Figura 4-16 a) muestra los registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos, antes y después de un filtrado de banda estrecha, entre 5.11 y 5.65 Hz, para aislar el movimiento que corresponde al modo de vibración de



5.379 Hz. El registro corresponde al día 5 de mayo, domingo. La Figura 4-16 b) muestra el movimiento de partícula, en desplazamiento; para esta figura se ha representado el registro de un segundo a las 11:00 de la mañana. La Figura 4-17 es análoga a la anterior, pero para el día 9 de mayo (jueves) a las 16:00 horas. Se observa que el movimiento corresponde a un modo de vibración traslacional en la dirección HN2, transversal, pero, como puede observarse también en la Figura 4-11, no exento de movimiento en la dirección vertical, lo que indica una cierta torsión, balanceo o cabeceamiento, del edificio para este modo de vibración.

Frecuencia F=4.871 Hz (Periodo T=0.205 s)

En la Figura 4-11, aparece, con claridad, esta frecuencia de 4.875 Hz en la componente HN1, longitudinal. En la Tabla 4-5, este pico espectral se observa en 7 días de registro, pero, de forma clara, sólo en esta componente longitudinal. La Figura 4-18 a) muestra los registros del día 2 de mayo sin filtrar y filtrados. La banda de filtrado, en este caso ha sido entre 4.63 y 5.12 Hz. La Figura 4-18 b) muestra el desplazamiento de partícula, durante un segundo, a las 14:00 horas. Se confirma el carácter longitudinal del modo de vibración, que ya ha podido observase en la Figura 4-11 y en la Tabla 4-5.

En resumen, se han observado, con claridad, las frecuencias de 4.379, 4.879 y 5.379 Hz, periodos de 0.228, 0.205 y 0.186 s, respectivamente. La primera, se asocia a una traslación en la componente HN1, longitudinal; las otras dos a movimientos de traslación en la dirección HN2, transversal, con una ligera torsión vertical.

4.3.2 Medidas de desplazamiento (RAR)

En este apartado se resume el informe técnico sobre las mediciones RAR, elaborado por el Departamento de Teledetección (*Remote Sensing Department*) del CTTC. El documento original, en inglés, se ha traducido al español y se adjunta en el Anexo V.

Campaña de medidas

Las medidas RAR, se efectuaron el día 9 de mayo, jueves, desde 6 posiciones del instrumento con respecto al edificio. Para cada posición se efectuaron mediciones con duraciones de entre 20 y 30 minutos.

Posición	1	2	3	4	5	6
Hora (hh:mm:ss)	10:23:58	11:38:29	12:18:10	14:44:38	15:47:44	16:16:07
Duración (minutos)	30	30	20	30	20	20







Figura 4-14. a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 4.17-4.61 Hz). b) Movimiento de partícula del período 0.228 s (F=4.379 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección longitudinal (HN1). Registro del jueves, día 2 de mayo de 2019.





Figura 4-15. a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 4.17-4.61 Hz). b) Movimiento de partícula del período 0.228 s (F=4.379 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección longitudinal (HN1). Registro del sábado, día 4 de mayo de 2019.





Figura 4-16. a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 5.11-5.65 Hz). b) Movimiento de partícula del período 0.186 s (F=5.379 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección transversal (HN2). Registro del domingo, día 5 de mayo de 2019.





Figura 4-17. a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 5.11-5.65 Hz). b) Movimiento de partícula del período 0.186 s (F=5.379 Hz). Se observa el movimiento preferente en la dirección transversal (HN2) y un ligero, aunque no negligible, movimiento vertical (HNZ). Registro del jueves, día 9 de mayo de 2019.





Figura 4-18. a) Registros de aceleración y su doble integración para obtener velocidades y desplazamientos (filtro de banda estrecha 4.63-5.12 H. b) Movimiento de partícula del período 0.205 s (F=4.871 Hz). Se observa el movimiento predominante en la dirección longitudinal (HN1). Registro del jueves, día 2 de mayo de 2019.



Análisis preliminar

En el momento de instalar el aparato se decide la posición y ángulo de inclinación de las antenas, de forma que haya un buen retorno de la señal. Para esta tarea el RAR permite observar el diagrama de los contenedores, conocidos como *rbin*'s, donde se van a almacenar los desplazamientos, en función del tiempo, con un gráfico donde se indica la calidad mediante la relación señal/ruido correspondiente.

Es en función de este gráfico que se decide el número de contenedores que se eligen para el registro, en función de su calidad. En la Figura 4-19 se muestra el diagrama en elevación y el esquema de la posición y orientación del sistema RAR-edificio, para la posición 2. En este caso, se seleccionaron los *rbin* 17 a 25, que se registraron en formato Excel. (.xlsx) siendo, el *rbin* 24, el de mejor relación señal/ruido. La Figura 4-20 muestra los preparativos para la toma de medidas de las posiciones 5 y 6.



Figura 4-19. a) Diagrama de la calidad de la señal. b) Esquema de la geometría de la medición.

Frecuencias propias

Un análisis rutinario de los datos tomados desde las 6 posiciones, mediante el cálculo de la PSD con el método de Welch, no permitió identificar frecuencias claras de la respuesta estructural. En el informe del CTTC, se muestra un ejercicio de análisis que consistió en, una vez conocidas las frecuencias modales, identificadas en las medidas de aceleración, focalizar en el mismo rango frecuencial. Para ello se usó el *rbin 24* de la posición 2, ya que era éste el que mostraba una relación más alta de señal/ruido.

La Figura 4-21 muestra el resultado de este ejercicio. Se observa cómo, aunque extremadamente contaminada de ruido, la PSD del registro de la posición 2, permite ver los dos periodos modales de 0.19 y de 0.24 s, que resultaron del estudio preliminar del registro de aceleración del día 2 de mayo. La cuestión es, si se hubiera sido capaz de identificar unos periodos preferentes, entre los múltiples identificados en la Figura 4-21 c). Alva-Bañuelos (2021), analiza técnicas basadas en análisis multiseñal, como, por ejemplo, la densidad espectral de potencia cruzada (*cross power spectral density*, CPSD), el análisis de coherencia entre señales (*Magnitude squared coherence*, MSC) y la fusión de datos o promediado de espectros, con el objeto de obtener una mejor información de los registros. Aunque estas técnicas, más sofisticadas, pueden mejorar la información que puede obtenerse de este tipo de análisis, a nuestro entender, el problema, en este caso, como ya se ha apuntado más arriba, está en la muy baja amplitud de la señal a identificar, que está muy por debajo, de hecho varios órdenes de magnitud, por debajo de la capacidad de resolución del RAR usado.







Figura 4-20. a) Preparativos de la medida desde la posición 5 y, b), desde la posición 6.

4.4 El modelado

En este estudio se han planteado dos modelos de edificio. El edificio sin cerramientos, al que denominaremos "edificio de pórticos", y el edificio, que incluye los cerramientos, y que denominaremos "edificio completo". Con ello se pretende evidenciar las diferencias en la respuesta estructural de un edifico, sin y con los cerramientos. En la literatura es frecuente no incluir los cerramientos en los modelos, dado que éstos se consideran elementos no estructurales. No obstante, en este estudio se ha considerado incluir estos elementos en el modelado numérico con el objeto de evidenciar su contribución a la rigidez global del sistema. De este modo, a mayor rigidez, y para una misma masa global, se obtienen períodos modales más cortos, frecuencias más altas, que si se opta por un modelo de edificio sin cerramientos

Además, el "*edificio completo*" representa mejor el edificio acabado y en uso, tal como es en el momento de realizar su instrumentación. Garzón-Andrade (2020) muestra un estudio del edificio, incluyendo detalles sobre la geometría, los elementos y materiales usados para su modelado. Para este estudio se ha dispuesto de planos constructivos del edificio, por lo que se ha procurado respetar, de forma cuidadosa y escrupulosa, la correspondencia modelo-edificio. Aquí se resumen sólo los principales resultados del análisis modal y del análisis estático no lineal (*pushover análisis*).

El modelado numérico del edificio se realizó utilizando el software de análisis estructural de edificios ETABS¹⁷ (CSI, 2016).

¹⁷ Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems (ETABS: Análisis Tridimensional Extendido de Edificaciones. <u>https://www.csiespana.com/software/5/etabs</u> (acceso: 6/12/2021)





Figura 4-21. a) Periodos-frecuencias identificadas en los registros de aceleración. b) Enfoque de la PSD del registro RAR de la posición 2 en el rango de periodos entre 0.2 y 5 s. c) ampliación e identificación de periodos.



El programa permite modelar edificios en 3 dimensiones, permitiendo su análisis modal, y sus análisis, estático y dinámico, no lineales. El software incluye una completa interfaz gráfica de pre-proceso, con potentes herramientas para el modelado y edición de la geometría, así como para la asignación de propiedades y solicitaciones a la estructura, incluyendo el uso de acelerogramas específicos. Con ello, la aplicación es capaz de generar, en un tiempo razonable, modelos representativos de la realidad y de la respuesta estructural de los edificios estudiados.

En la Figura 4-22 se muestran los dos modelos de edificio propuestos: *edificio de pórticos* sin cerramientos (Figura 4-22 c) y *edificio completo*, con cerramientos (Figura 4-22 d).

4.4.1 Análisis modal

Se ha realizado el análisis modal en las dos variantes modeladas. Los resultados obtenidos se describen en esta sección.



Figura 4-22. Modelo numérico: a) elementos de pórticos y forjados; b) plano y direcciones principales del edificio (HN1 corresponde a la dirección longitudinal, larga, mientras que la HN2 corresponde a la dirección transversal, corta); c) representación gráfica (renderizado) del edificio sin cerramientos; d) representación gráfica (renderizado) del edificio con cerramientos.

Edificio de pórticos

La Tabla 4-9 muestra los periodos, frecuencias y factores de participación modal de los tres modos principales obtenidos. El primer modo, con un factor de participación del 82%, co-rresponde a la dirección *x*, longitudinal; el segundo, con una participación del 70%, corresponde a la dirección *y*, transversal. Un tercer modo, tiene factores muy bajos de participación modal, concretamente del 1% en la dirección longitudinal, *x*, y del 15%, en la transversal, *y*.

En la Figura 4-23 se representan los dos primeros modos, ambos traslacionales, para el edificio de pórticos.

Edificio Santa Eugènia. Girona

Modo	Periodo	Frequencia	Participad	Participación modal		
	(s)	(Hz)	Dirección <i>x</i> (HN1)	Dirección <i>y</i> (HN2)		
1	0.92	1.09	0.82	*		
2	0.79	1.27	*	0.70		
3	0.75	1.33	0.01	0.15		

Гabla 4-9.	Resultados de análisis modal del edificio, sin cerramientos.
------------	--

(*) Representa una participación modal inferior al 1%.



Figura 4-23. a) Modo traslacional en la dirección HN1 (*x*); b) modo traslacional en la dirección HN2 (*y*).

Edificio completo

En la Tabla 4-10 se sintetizan los resultados del análisis modal, para este caso. La tabla detalla los períodos y los factores de participación modal de los modos analizados. Sólo se han incluido los 3 primeros modos. Otros modos identificados, con periodos de 0.09, 0.08, y 0.06 s, tienen factores de participación modal inferiores al 10-11%. Tampoco se incluyen otros modos con factores de participación inferiores al 3%. En la Figura 4-24 se representan los dos primeros modos, ambos traslacionales, del edificio completo. Obsérvese que el "*edificio completo*" mantiene el patrón de vibración del "*edificio de pórticos*".

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Participación modal		
			Dirección x (HN1)	Dirección y (HN2)	
1	0.28	3.57	0.83		
2	0.24	4.17	0.02	0.64	
3	0.21	4.76	0.02	0.19	

 Tabla 4-10.
 Resultados de análisis modal del edificio completo.

4.4.2 Análisis estático no lineal (Pushover análisis)

Garzón-Andrade (2020) hace también el análisis estático no lineal del edifico completo, obteniendo curvas y espectros de capacidad. La Figura 4-25 muestra los espectros de capacidad en las direcciones longitudinal, *x*, y transversal, *y*, del edificio completo. La ecuación (4-2) muestra la relación entre el periodo fundamental del edificio, *T*, que define el tramo lineal del espectro de capacidad, y las coordenadas (*Sdy*, *Say*) del punto de cedencia.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Sdy}{Say}}$$

(4-2)





Figura 4-24. a) Modo traslacional en la dirección HN1 (*x*); b) modo traslacional en la dirección HN2 (*y*).



Figura 4-25. Espectros de capacidad del edificio completo, para las direcciones: a) longitudinal, x y b) transversal, y. En ambos espectros se muestra también la forma bilineal. (Garzón-Andrade 2020).

La Tabla 4-11 muestra los valores numéricos de los puntos de cedencia, del periodo y del punto de capacidad última. Se observa cómo la dirección longitudinal es más resistente que la transversal. La dirección longitudinal, muestra endurecimiento con el desplazamiento espectral, mientras que la dirección transversal, muestra ablandamiento.

	Punto de cedencia		Periodo	Punto de cap. última	
	Sd _y (cm)	Sa _y (g)	T ₀ (s)	Sd _u (cm)	Sa _u (g)
X (Long)	1.06	0.92	0.215	3.10	1.37
Y (Tran)	0.67	0.81	0.182	3.14	0.46

Tabla 4-11.Puntos de cedencia y de capacidad última de los espectros
de capacidad de la Figura 4-25.

Los periodos fundamentales en las direcciones longitudinal, 0.215 s, y transversal, 0.182 s, muestran una muy buena correlación con los períodos identificados en las medidas de aceleración; 0.228 s y 0.186 s, respectivamente, para las direcciones longitudinal y transversal (ver Tabla 4-5 y Figura 4-11).

4.5 Reflexión final

Medidas de aceleración

Los análisis descritos en esta sección, se han efectuado para todas las señales registradas en el edificio, con resultados compatibles, en lo que se refiere a los períodos predominantes



detectados. Para una mayor simplicidad y claridad, se han presentado sólo los resultados de los registros en el tercer piso. Se ha considerado que, mostrar el detalle de todos los registros, no aportaría nada nuevo significativo, más allá de la constatación del interés de la repetibilidad de los resultados. Como se describe y discute en el apartado dedicado al modelado, se ha obtenido una buena consistencia con los resultados del análisis estructural.

Por otra parte, en los análisis de los registros de fuera del edificio, aunque no se han explotado de forma intensa, ha podido observarse el efecto de interacción estructura-suelo, dado que los periodos predominantes más intensos del edificio, se hallan presentes también en el suelo, fuera del edificio, probablemente, por hallarse a una distancia insuficiente para escapar de la radiación de la vibración que el edificio introduce en el subsuelo.

Otro aspecto interesante a destacar, es el análisis de la variabilidad temporal del periodo. Estas pequeñas variaciones, se han atribuido a cambios de rigidez, relacionada con cambios de temperatura, y a modificaciones de la masa, relacionadas con los niveles de ocupación del edificio.

No se han efectuado análisis más sofisticados, por entender que iban más allá de los objetivos del proyecto; pero, sin duda, los datos recogidos, incluyendo los de aceleración y los de desplazamiento, trascienden la temporalidad del proyecto y son de gran valor e interés para trabajos de investigación, como por ejemplo y entre otros, los que puedan realizarse en el marco de programas de máster y de doctorado de los socios del proyecto.

Medidas de desplazamiento

Las mediciones con el RAR en el edificio del Instituto Santa Eugènia, al igual que las que se realizaron en el edificio hospitalario de Bagnères de Bigorre, no han aportado resultados concluventes. Nuestra impresión es que, para edificios rígidos, con frecuencias modales altas y, para los niveles de excitación del ruido ambiental, estamos en el límite, o más allá del límite, de la capacidad de resolución del dispositivo usado. Alva-Bañuelos et al. (2020) discuten sobre las ventajas y limitaciones de este tipo de medidas en edificios de mediana altura. Obsérvese cómo, en la Tabla 2-3, la sensibilidad nominal del dispositivo es de 0.01 mm; es decir, para una buena resolución, necesitamos desplazamientos del orden del mm, esto es, de varias decenas de micras (µm). Sin embargo, en las representaciones de movimientos de partícula, figuras entre la Figura 4-14 y la Figura 4-18, puede observarse cómo los desplazamientos del edificio, correspondientes a los modos de vibración, son, como mucho, de décimas de micra. Ésta ha sido la razón para realizar una campaña RAR en dos edificios del Departamento de Interior, de la Generalitat de Cataluña. En uno de estos edificios se halla la sede de los servicios de protección civil de Cataluña, en Barcelona. Es un edificio metálico de nueve plantas, sobre el que se tenían experiencias y datos de aceleración de mediciones previas. Más abajo, en la Sección 6.1, se describen, brevemente, los resultados obtenidos en este edificio.



5 Hospital de Bagnères de Bigorre

5.1 Introducción

La vulnerabilidad de estructuras sometidas a acciones dinámicas es un dominio de investigación muy activo. Las instrumentaciones en edificios, en forma de redes de registro de ruido por vibración ambiental deberían mejorar nuestros conocimientos, aún limitados, del comportamiento dinámico de las estructuras.

El objetivo de estas mediciones es evaluar el período natural de vibración de las construcciones y comprender el comportamiento de sus elementos resistentes durante los terremotos. Es particularmente interesante auscultar los edificios piloto muchas veces, con el propósito de seguir la evolución de sus características dinámicas a lo largo del tiempo, antes y después de la solicitación sísmica (*Structural Health Monitoring*).

En este contexto, se efectuaron mediciones de ruido por vibración ambiental en el Centro hospitalario de Bagnères-de-Bigorre, en el edificio "*Medicina*"; en particular, las mediciones se realizaron en el Edificio 6 del Hospital de Bagnères-de-Bigorre. El edificio estaba en uso y la funcionalidad del edificio tuvo prioridad con respecto a la instalación de los sensores. Por lo tanto, algunas de las posiciones deseadas de instrumentación no eran accesibles y fue necesaria una adaptación. En este capítulo se resumen los principales trabajos realizados y resultados obtenidos y está basado en varios informes redactados por los socios que realizaron las medidas y el modelado del edificio. En el <u>Anexo III</u> se describe la programación, previsión y participantes en las medidas; en el <u>Anexo IV</u>, en francés, se transcribe el informe que fue redactado para la gerencia del hospital.

5.2 El edificio

POCRISC-----

El edificio es el bloque número 6, del complejo hospitalario de Bagnères de Bigorre, situado en el número 15 de la calle Gambetta, 65201 Bagnères-de-Bigorre. El edificio, fue construido en 1967, es de hormigón armado y está compuesto por la planta baja y 4 pisos. Estructuralmente, se trata de un edificio de pórticos de hormigón armado, de 19 m de altura; la altura de los pisos superiores es de 3.2 m y la de la planta baja de 4.5 m. Hay también un subterráneo con una planta más reducida. No consta que el edificio tenga diseño sísmico, por lo que se supone fue diseñado por gravedad. La estructura es de pórticos de hormigón armado y, en los extremos, hay muros de hormigón armado de 30 cm de espesor. En el bloque central hay muros verticales de hormigón armado y hay otras paredes de relleno para la tabiquería de compartimentación. Diversos detalles constructivos pusieron de manifiesto la existencia de zonas con piso débil. La Figura 5-1 muestra la situación del edificio, el plano del complejo hospitalario y diversas fotos del edificio, incluyendo la de la fachada principal. La Figura 5-2 muestra la situación del edificio instrumentado, dentro del complejo hospitalario, con detalles fotográficos. En cuanto al comportamiento estructural del Edificio 6, se consideraron dos aspectos geométricos principales para la posición de los sensores: i) la presencia de juntas de dilatación entre los tres bloques y ii) la irregularidad del bloque central, que presenta una parte hexagonal conectada con la parte rectangular regular. Además, se consideraron las diferencias de rigidez de los elementos estructurales del edificio para la instrumentación. La parte principal de la estructura es un pórtico de hormigón armado, pero algunos puntos de mayor rigidez, representados por la escalera y los ascensores, en la parte central, y por las escaleras de los dos bloques extremos, pueden inducir efectos de torsión.



Figura 5-1. a) Occitania, altos pirineos, Bagnères de Bigorre. b) Situación del edificio, el número 6, dentro del complejo hospitalario. c) Situación del Centro hospitalario en Bagnères-de-Bigorre (fuente *Google maps*). d) foto de la fachada e) y f) vistas generales del edificio.





Figura 5-2.

Visión del edificio instrumentado en el complejo hospitalario, con detalles fotográficos (Fuente: M Barus).



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

5.3 La instrumentación

Para la instrumentación del edificio se usaron transductores de velocidad y de aceleración y un radar interferométrico. En el Anexo III se describe la instrumentación utilizada, con mayor detalle. Se resumen aquí los equipos usados.

5.3.1 Transductores de velocidad y aceleración

Para los trabajos se usaron velocímetros Güralp (BRGM) y acelerómetros PCB (ENIT) que, mayoritariamente, se instalaron en el interior del edificio en diferentes configuraciones. Otros sensores se instalaron en el exterior para poder resaltar la respuesta estructural mediante razones espectrales. La Figura 5-3 a) y b) muestran sensores Güralp 6TD y sensores PCB, respectivamente.

5.3.2 Radar de apertura real

Para las medidas a distancia, sin entrar en el edificio, se utilizó un radar interferométrico, IBIS-FS de IDS. La Figura 5-3 c) muestra el dispositivo radar interferométrico.



Figura 5-3. a) Sismógrafo Güralp 6TD. b) Acelerómetros PCB. c) Radar IBIS-FS de IDS.

5.4 Calendario

La campaña de medidas se realizó durante los días, 9, 10 y 11 de abril de 2019. Se programaron tres configuraciones para capturar los diferentes modos de vibración del edificio. Se dedicó un día al registro y análisis preliminar de cada configuración. La Figura 5-4 muestra las fechas de las medidas.

-
9

Figura 5-4.

Calendario del mes de abril de 2019.
 Se indican las fechas de las mediciones.

Las medidas con radar se efectuaron los días 10 y 11 de abril, tomando medidas desde diferentes posiciones.



5.5 Configuración de las medidas

Se establecieron tres configuraciones para capturar el comportamiento de la estructura y ayudar a comprender los aspectos estructurales específicos. Para cada configuración, se colocó, al menos, un sensor en el nivel del suelo, dentro de la estructura, y otro en el suelo, fuera de la estructura, pero cerca de ella. De esta manera, para las tres configuraciones se dispuso un sensor de referencia, al nivel del suelo, dentro de la estructura. La posición de este sensor fue la misma los tres días de mediciones. Estos sensores son útiles para comprobar la eventual interacción estructura-suelo. Por otra parte, estos sensores se utilizan para hallar las relaciones espectrales entre las señales de los sensores de niveles superiores y las del nivel del suelo, con el fin de eliminar posibles frecuencias no relacionadas con la respuesta estructural.

La primera configuración concentró casi todos los sensores en el último piso accesible de la estructura (cuarto piso). Con esta configuración se investiga el comportamiento global de la estructura y los efectos de torsión, tanto por las irregularidades geométricas como por las irregularidades de rigidez. Al mismo tiempo, se colocaron otros tres sensores, respectivamente, en la planta baja, en el piso subterráneo y en el suelo, en el exterior, pero cerca de la estructura.

Con la segunda configuración se busca analizar la deformación vertical modal de la estructura. Para ello, se coloca un sensor en cada nivel desde la planta baja, hasta el cuarto nivel. En esta configuración se estudiaron juntos los bloques derecho y central.

La tercera configuración tiene el mismo objetivo que la segunda, pero esta vez los sensores se colocan en el bloque izquierdo de la estructura. Este bloque izquierdo de la estructura tiene la particularidad de presentar un túnel en la planta baja, lo que induce cambios estructurales. Faltan pilares y vigas, que son substituidos por muros de hormigón armado.

5.5.1 Medidas de velocidad

Primera configuración (9 de abril de 2019)

Para la primera configuración, se instalaron 8 sensores en la cuarta planta, uno en la planta baja, a nivel del suelo, uno en el piso subterráneo y uno, en el exterior del edificio, pero cercano y a nivel de suelo. La dirección N del dispositivo se orientó en la dirección longitudinal de la estructura. Los sensores se activaron entre las 12:28 y las 14:35. La Figura 5-5 muestra los puntos donde se instalaron dichos sensores.

Segunda configuración (10 de abril de 2019)

Para la segunda configuración se instalaron 13 sensores. 5 en el bloque izquierdo, 5 en el bloque central, dos en la zona irregular del bloque central y uno en el suelo en el exterior del edificio. La Figura 5-6 muestra esquemas del edificio y de la disposición de los sensores. Los sensores se orientaron de forma que la dirección N fuera paralela a la dirección longitudinal del edificio, positivo en la dirección N. Los sensores se activaron entre las 12:45 y las 14:35 horas.





Start 2: sensor 107, 14h35





- of the structure (<- positive direction on N component)
- Start 1: sensor C4207/B061, 12h45 (sault), configuration 10 sensors on 2 verticals
- Start 2: sensor 105, 14h35 configuration 10 • sensors + 3 sensors

Figura 5-6. Descripción de la posición de los sensores para la segunda configuración.



Tercera configuración (11 de abril de 2019)

En el cuarto piso, se instalaron 5 sensores en el bloque de la derecha y 3 en el bloque central y en la irregularidad. En el primer piso se instalaron 2 sensores, y dos sensores más se instalaron en la planta baja, a nivel del suelo, dentro del edificio, y uno en el suelo en el exterior del edificio. La Figura 5-7 muestra los esquemas de esta tercera configuración.



Figura 5-7. Descripción de la posición de los sensores para la tercera configuración.

5.5.2 Medidas de aceleración

Los sensores PCB se colocaron en el hueco de la escalera central del edificio, en varios pisos (1°, 2°, 3° y 4° piso). Éstos están destinados a adquisiciones en los sentidos longitudinal y transversal del edificio, correspondientes a los movimientos predominantes del edificio. Esta configuración permite medir las aceleraciones inducidas por el ruido blanco y así estudiar el comportamiento dinámico de la parte central del edificio. La adquisición de esta información en varios pisos del edificio conduce a una descripción completa de los movimientos de la estructura en toda su altura.

5.6 Medidas con Radar

Las medidas RAR se efectuaron los días 10 y 11 de abril. La Figura 5-8 muestra dos ejemplos de posiciones del radar. Se realizaron medidas con tres configuraciones. La primera tiene dos medidas de alrededor de 1 hora. Las otras dos configuraciones tienen medidas de entre 2 y 3 horas, aproximadamente. La primera configuración está relacionada con el comportamiento transversal de la estructura, y se realizó desde el suelo en el exterior. La segunda configuración está relacionada también con el comportamiento transversal de la misma estructura, y se realizó desde el lado opuesto de la estructura, y desde la cubierta de la


terraza de la planta baja. La tercera configuración está relacionada con el comportamiento del hueco en la dirección longitudinal, que es un pequeño espacio, que se creó al construir parte de una pared más alejada del resto. La Figura 5-9 muestra los esquemas de las 3 con-figuraciones.

5.7 Resultados

Se describen, a continuación, los principales resultados obtenidos a partir de los registros de velocidad, de la primera configuración, y de aceleración.

5.7.1 Series temporales de velocidad

Primera configuración: 9 de abril de 2019 (Figura 5-5).

Los sensores 68, 61 y 67 están en el bloque central; el 61 y el 67 están cerca de las escaleras centrales. El sensor 80 está en la irregularidad del bloque central. El sensor 64 está en el sótano y el 63 a nivel del suelo.



Figura 5-8. Ejemplos de posiciones del dispositivo RAR.

En primer lugar, las historias temporales se imprimen, se visualizan y se observan de forma general, sólo con el propósito de tener una visión global, preliminar, de los datos registrados. Esto se hace para cada configuración y registro y, respectivamente, para cada dirección por separado. La dirección Norte del sensor representa la dirección longitudinal de la estructura y la dirección Este de los sensores representa la dirección transversal. En una segunda fase, se halla el espectro de Fourier para todos los sensores en la dirección transversal y en la dirección longitudinal. El valor pico máximo se incorpora a una tabla. Posteriormente se efectúan análisis más detallados de los datos. Además de los espectros de Fourier, se hallan los cocientes espectrales de los espectros de las señales en los pisos, con respecto al espectro de la señal registrada en la planta subterráneo del edificio (el 64 en este caso). También se hallan los espectros de respuesta 5% amortiguada y los correspondientes co-cientes espectrales.

Dirección transversal (Dirección Este de los sensores)

La Figura 5-10 muestra un ejemplo de registros para la primera configuración de los sensores. La Figura 5-11 muestra los espectros de amplitudes de Fourier. Se observan picos en el rango de frecuencias entre 2 y 10 Hz.





Figura 5-9. Descripción de las posiciones del radar para las tres configuraciones. a) Primera configuración, primera medida, b) Primera configuración, segunda medida. c) Segunda configuración. d) Tercera configuración.



La Tabla 5-1, muestra el pico más sobresaliente de cada registro. Destaca la frecuencia entre 3.84 y 3.86 Hz y también la de entre 5.7 y 6.0 Hz. Con todo, aunque se indican estas frecuencias en la tabla, también puede observarse en la Figura 5-11, la presencia de diferentes picos, en la práctica totalidad de los registros.

La Figura 5-12 muestra las razones espectrales entre los espectros de amplitud de Fourier, de los registros en la planta superior y en la planta subterráneo. La Tabla 5-2, muestra los picos de cada registro. Aunque en todos los registros se observan varios picos, los más sobresalientes son los de las frecuencias de 3.99, 4.16, 5.68 y 6.05 Hz.

La Figura 5-13 y la Tabla 5-3 corresponden a las razones espectrales entre los espectros de amplitud de Fourier de los registros en la planta superior y a nivel de suelo. Se observa una buena consistencia entre las frecuencias detectadas y las de la Figura 5-12 y las de la Tabla 5-2.

La Figura 5-14 muestra las razones espectrales entre los espectros de respuesta, 5% amortiguados, en la planta superior con respecto a los de la planta subterráneo. La Tabla 5-4 muestra los periodos con la máxima amplitud detectados en cada registro. La Figura 5-15 es análoga a la Figura 5-14, pero con los cocientes respecto a los espectros de respuesta de los registros a nivel-de-suelo. La Tabla 5-5 muestra los periodos con máxima amplitud detectados. Se observa una muy buena consistencia entre los periodos de la Tabla 5-4 y los de la Tabla 5-5. Se observa una buena consistencia de los picos basados en cocientes espectrales de los espectros de amplitud de Fourier y los de los cocientes espectrales de los espectros de respuesta. Con todo, en el caso de los espectros de respuesta, se observa unas frecuencias altas, de 6.9 y 7.3 Hz, que no se observan ni en los espectros de amplitud de Fourier, ni en los cocientes espectrales entre espectros de amplitudes de Fourier.

Dirección longitudinal (Dirección Norte de los sensores)

La Figura 5-16 muestra un ejemplo de registros en la dirección longitudinal para la primera configuración de los sensores. La Figura 5-17 muestra los espectros de amplitudes de Fourier. Se observan picos en el rango de frecuencias entre 2 y 10 Hz. La Tabla 5-6, muestra el pico más sobresaliente de cada registro. Se observa una buena estabilidad a una frecuencia de 2.661 Hz. Con todo, aunque se indican éstos en la tabla, en la Figura 5-16, puede observarse la presencia de otros picos, en todos los registros.

La Figura 5-18 muestra las razones espectrales entre los espectros de amplitud de Fourier, de los registros en la planta superior y el del espectro en la planta sótano. La Tabla 5-7, muestra los picos de cada registro. Aunque en todos los registros se observan varios picos, los más sobresalientes se observan a las frecuencias de 2.71, 2.70, 2.70 y 2.70 Hz.

La Figura 5-19 y la Tabla 5-8 corresponden a las razones espectrales entre los espectros de amplitud de Fourier de los registros en la planta superior y a nivel de suelo. Se detectan las frecuencias de 4.526, 2.737, 2.740 y 2.786 Hz.

La Figura 5-20 muestra las razones espectrales entre los espectros de respuesta 5% amortiguados en la planta superior con respecto a los de la planta subterráneo. La Tabla 5-9 muestra los periodos con la máxima amplitud, detectados en cada registro, siendo de 0.4 s (frecuencia de 2.6 Hz), para todos los registros.





Figura 5-10. Ejemplo de registro de la componente transversal de velocidad para los sensores instalados el 9 de abril de 2019. Primera configuración.



Velocity April 9, 2019



abla 5-1. Frecuencias con máxima amplitud			
Sensor	Frecuencia (Hz)	T (s)	
61e	3.845	0.260	
62e	3.848	0.260	
63e	3.836	0.260	
64e	3.836	0.260	
66e(*)	6.061	0.165	
67e	3.848	0.260	
68e	3.854	0.259	
79e(**)	5.688	0.176	
80e	3.845	0.260	

(**) Bloque extremo izquierdo.

Figura 5-11. Espectros de Fourier. Dirección transversal. Primera configuración.



Tabla 5-2. Frecuencias con máxima			
	umpiltuu.		
Sensor	Frecuencia (Hz)	T (s)	
66e/64e (*)	6.046	0.165	
67e/64e	3.995	0.250	
68e/64e	4.163	0.240	
79e/64e (**)	5.676	0.176	

(*) Bloque extremo derecho.

(**) Bloque extremo izquierdo.

Figura 5-12. Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/sótano). Dirección transversal. Primera configuración.



Tabla 5-3. Frecuencias con máxima			
	amplitud.		
Concor	Frecuencia		
Sensor	(Hz)		
66e/63e (*)	6.039		
67e/63e	3.973		
68e/63e	4.050		
79e/63e (**)	5.692		
(*) Diaguna autraga	. davaaba		

(*) Bloque extremo derecho. (**) Bloque extremo izquierdo.

Figura 5-13. Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/nivel-de-suelo). Dirección transversal. Primera configuración.



Tabla 5-4. Periodos con máxima am-				
	plitud.			
Sensor Periodo Frec. (s) (Hz)				
66e/63e (*)	0.137	7.3		
67e/63e	0.263	3.8		
68e/63e	0.263	3.8		
79e/63e (**)	0.176	5.7		

(*) Bloque extremo derecho. (**) Bloque extremo izquierdo.





٦	Tabla 5-5. Frecue	ncias con	máxima
		amplitud	
	Sensor	Periodo (s)	Frec. (Hz)
	66e/64e (*)	0.144	6.9
	67e/64e	0.263	3.8
	68e/64e	0.263	3.8
	79e/64e (**)	0.176	5.7

(**) Bloque extremo izquierdo.

Figura 5-15. Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/nivel-de-suelo). Dirección transversal. Primera configuración.

5.7.2 Sensores PCB de aceleración

La Figura 5-21 muestra las adquisiciones del acelerómetro para la parte central del edificio y para los cuatro pisos estudiados durante un período de 120 segundos. La coherencia general de las señales, se puede ver tanto en su intensidad, como en su evolución temporal tiempo. Cabe señalar que los datos acelerométricos confirman los valores obtenidos por los velocímetros en la parte central: frecuencia de 3.76 Hz (periodo de 0,27 s).

5.7.3 <u>Radar</u>

Los análisis de las series temporales de desplazamiento, no han aportado resultados concluyentes, debido a las bajas amplitudes de los desplazamientos, para las frecuencias propias del edificio. Las velocidades registradas son del orden de 10^{-4} cm/s, lo que corresponde a desplazamientos del orden de $10 \ \mu m$ (Figura 5-10 y Figura 5-16)

Teniendo en cuenta que las frecuencias de interés están en el rango entre 2 y 9 Hz (ver, por ejemplo, la Figura 5-17), los desplazamientos esperados serían del orden de entre 0.4 y $0.8 \,\mu m$, muy por debajo de la capacidad de resolución ¹⁸ del dispositivo RAR ¹⁹, que es del orden de 0.01 mm (10 μm).

⁹ <u>Radar IBIS-FS</u> (Acceso: 27/12/2021) Radar IBIS-FS-Plus (Acceso: 27/12/2021)



Radar IBS-FS-Plus: Especificaciones técnicas (Acceso:28/12/2021)
Padar IBIS ES. (Acceso: 27/12/2021)



Figura 5-16. Ejemplo de registro de la componente longitudinal de velocidad, para los sensores instalados el 9 de abril de 2019. Primera configuración.





Tabla 5-6. Frecuencias con máxima amplitud				
Sensor	Frecuencia (Hz)	T (s)		
61n	2.661	0.376		
62n	2.661	0.376		
63n	2.658	0.376		
64n	2.655	0.377		
66n(*)	2.661	0.376		
67n	2.661	0.376		
68n	2.661	0.376		
79n(**)	2.661	0.376		
80n	2.661	0.376		

(**) Bloque extremo izquierdo.

Figura 5-17. Espectros de Fourier. Dirección longitudinal. Primera configuración



Tabla 5-7. Frecuencias con máxima				
	amplitud.			
Sensor Frecuencia T (s) (Hz)				
66n/64n (*)	2.710	0.369		
67n/64n	2.698	0.371		
68n/64n	2.698	0.371		
79n/64n (**)	2.704	0.370		

(*) Bloque extremo derecho.

(**) Bloque extremo izquierdo.

Figura 5-18. Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/sótano) Dirección longitudinal. Primera configuración.



Tabla 5-8. Frecuencias con máxima			
	amplitud.		
Sensor	Frecuencia (Hz)	T (s)	
66n/63n (*)	4.526	0.221	
67n/63n	2.737	0.365	
68n/63n	2.740	0.365	
79n/63n (**)	2.786	0.359	

(**) Bloque extremo izquierdo.

Figura 5-19. Razones espectrales. Espectros de Fourier (arriba/Nivel-de-suelo) Dirección longitudinal. Primera configuración.



Tabla 5-9. Periodos con máxima am-				
	plitud.			
Sonoor	Periodo	Frec.		
Sensor	(s)	(Hz)		
66n/64n	0 389	2 571		
(*)	0.000	2.071		
67n/64n	0.389	2.571		
68n/64n	0.389	2.571		
79n/64n	0.000	0.574		
(**)	0.389	2.571		

(*) Bloque extremo derecho. (**) Bloque extremo izquierdo.

Figura 5-20. Razones espectrales. Espectros de respuesta 5% amortiguado (arriba/sótano). Dirección Iongitudinal. Primera configuración.



Figura 5-21. Registros de sensores PCB en la dirección longitudinal en la escalera central del edificio (aceleraciones en función del tiempo para los cuatro pisos).

5.8 Modelado

El edificio fue modelado por los socios BRGM-Orleans y ENIT. Los principales análisis y resultados fueron presentados en el workshop que se celebró en Orleans el 26 de febrero del año 2020. Se resumen, a continuación, los principales aspectos de los modelos estructurales y de los resultados obtenidos. Para los efectos de este informe, se ha considerado suficiente una descripción cualitativa de los modelos, sin entrar en aspectos cuantitativos, relacionados con las propiedades geométricas y resistentes de los elementos estructurales y con las propiedades de los materiales.

De esta forma, se ha preferido focalizar en los principales resultados obtenidos en relación con los objetivos perseguidos en el proyecto, en la Acción 4 y, de forma particular, en la instrumentación de los edificios.



5.8.1 BRGM-Orleans

Análisis experimental de la deformación modal

El análisis de la deformación modal se efectuó mediante el programa ARTEMIS²⁰, acrónimo de "*Advanced Research on Test and Evaluation of Mixed-Signal ICs and Systems*". Para ello se necesita un modelo del edificio y las señales registradas. En la sección 5.4.1 más atrás, se han descrito las tres configuraciones de los sensores instalados. La Figura 5-5 muestra la disposición de los sensores para la primera. La Figura 5-22 muestra la deformación modal en la dirección transversal (a), la transversal combinada con torsión (b) y la longitudinal (c). Los períodos correspondientes son de 0.26 s, 0.21 y 0.37 s respectivamente.

Modelo

El socio BRGM-Orleans desarrolla un modelo 3D utilizando el programa OpenSees ²¹, acrónimo de "*Open System for Earthquake Engineering Simulation*". A partir de planos detallados, se usaron elementos de marco, para vigas y columnas, y muros. Para muros de relleno de mampostería se usaron elementos de celosía (*truss elements*). La Figura 5-23 muestra ejemplos de modelos estructurales básicos 3D del edificio. Se modeló el edificio con sucesivas aproximaciones: i) solo elementos viga y columna; ii) Añadiendo elementos celosía (*truss elements*); iii) añadiendo elementos de las paredes. iv) usando elementos celosía (*truss elements*) y paredes mejorados. La Tabla 5-10 muestra los principales periodos identificados mediante las diferentes aproximaciones.

5.8.2 Modelo ENIT

El socio ENIT, por su parte, modeló la parte central del edificio. Para el modelado se usó el software Abaqus²² que permite desarrollar sofisticados modelos mediante elementos finitos. La Figura 4-24 muestra el edificio y el modelo estructural. De hecho, los resultados de la instrumentación del edificio permitieron ajustar las propiedades de los materiales.

Análisis modal	Descripción del modelo.	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)
Experimental	Análisis registros	0.37	0.26	
Modelo 1º	Vigas y columnas	0.86	0.85	0.84
Modelo 2º	Viga, columnas y celosías	0.55	0.35	0.20
Modelo 3º	Vigas, columnas, celosías y paredes	0.32	0.28	0.20
Modelo 4º	Elementos celosía y paredes mejorados.	0.69	0.44	0.37

Tabla 5-10. Resumen de los análisis modales efectuados.

Tras definir adecuadamente las cargas, los parámetros y los modelos resistentes, y las condiciones de contorno se obtiene una frecuencia de 3.775 Hz, período de 0.265 s, que compara bien con las frecuencias, periodos, obtenidas a partir de los registros experimentales de los sensores instalados en la dirección transversal en el edificio central, y que se sitúan en torno a los 3.8 Hz (ver, por ejemplo; Tabla 5-1,Tabla 5-4 y Tabla 5-5) con diferencias inferiores al 0.67%.

²⁰ <u>ARTEMIS modal</u> (acceso: 26/12/2021) <u>Experimental modal análisis</u> (acceso: 26/12/2021)

²¹ OpenSees software (acceso: 26/12/2021)

²² Sitio web del software Abaqus (acceso: 26/12/2021)



Figura 5-22. Resultados del análisis de la deformación modal mediante el software ARTEMIS.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique



Figura 5-23. Ejemplo de modelos estructurales básicos obtenidos con el software OpenSees.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique



Figura 5-24. Vista aérea del edificio y modelo estructural del bloque central del edificio, obtenido mediante el software Abaqus.

5.9 Reflexión final

Los objetivos de la Acción 4, en lo que se refiere a la estima de las propiedades modales de edificios esenciales, es ambicioso. Se busca analizar la viabilidad de detección de daño mediante el análisis de variaciones en estas propiedades. La herramienta ha sido el conocido análisis modal operacional (OMA, acrónimo de "*operational modal analysis*"). El OMA consiste en el análisis detallado del registro de la respuesta de edificios a las excitaciones del ruido ambiental, en condiciones operativas. Los trabajos realizados han permitido delimitar determinadas condiciones sobre los instrumentos a usar, sobre los edificios más idóneos para esta identificación y en general, sobre el alcance y limitaciones de estas técnicas, particularmente cuando se deben aplicar a edificios rígidos, con altas frecuencias de respuesta. Pero, sin duda, también abren nuevas perspectivas de trabajo y estudio. La infraestructura creada, la cantidad y calidad de información y datos compilados, y los resultados obtenidos permiten proyectar al futuro los beneficios del proyecto. Se muestran a continuación unas breves reflexiones sobre los tres aspectos ensayados en el Hospital de Bagnères de Bigorre: las medidas de velocidad, las medidas de desplazamiento y el modelado del edificio.

5.9.1 Medidas de velocidad

Los sensores de velocidad aportan una buena información para identificar los principales modos de vibración del edificio. A falta de modelos y análisis estructurales de detalle, disponibles antes de instrumentar, el juicio experto es una buena alternativa para decidir la ubicación de los sensores. Una adecuada distribución de sensores es la clave del éxito de este tipo de trabajos. Obviamente, la cantidad y tipo de sensores a usar, dependerá también del propósito del estudio. En el caso del hospital de Bagnères de Bigorre, se han ensayado tres configuraciones. Los resultados aquí expuestos corresponden a la primera y se han considerado suficientes para los objetivos de la Acción 4. Sin duda la riqueza de datos e información disponibles son un valor añadido del proyecto, que aportará beneficios, más allá de la temporalidad de POCRISC, con trabajos académicos en curso y también en futuros trabajos de investigación.



5.9.2 Medidas de desplazamiento

De nuevo, como ocurrió con el edificio del Instituto Santa Eugènia de Girona, las amplitudes de desplazamiento quedan muy por debajo de la capacidad de resolución del radar, que sí puede ser una buena herramienta para estructuras e infraestructuras con mayores períodos modales, en los que son esperables desplazamientos dentro del rango de resolución del radar, es decir de decenas de micras. Esta reflexión nos ha llevado a programar un ensayo adicional en un edificio metálico de 9 plantas sobre el que ya se tienen estudios anteriores de medidas de aceleración. En el capítulo dedicado a discusión y recomendaciones, se muestran los resultados obtenidos en este trabajo.

5.9.3 Modelado

El modelado cuidadoso del edificio instrumentado es una excelente herramienta para confirmar y caracterizar las propiedades modales del edificio, lo que es de gran ayuda en la interpretación de los resultados del estudio experimental. Esto es particularmente cierto, en edificios irregulares donde aparecen efectos de torsión. Con todo, pensando en la identificación de daño a partir de medidas de periodos propios, el modelado es de escasa ayuda para conocer las condiciones del edificio sano, dadas las incertidumbres inherentes en el modelado de edificios, con geometría compleja y con propiedades resistentes no exentas de cierta aleatoriedad. La dialéctica observación-modelado cobra así un interés particular, en el sentido que permite hallar un modelo de edificio acorde con los resultados observados. Obsérvese cómo los modelos más realistas, que persiguen reproducir detalles estructurales y no estructurales como, por ejemplo y entre otros detalles, la tabiquería, progresivamente ajustan mejor los periodos observados. También vale la pena anotar aquí, que los resultados obtenidos corresponden a movimientos extremadamente débiles y que los periodos de respuesta bajo movimientos intensos son mayores.



Este documento informa sobre una de las tareas más relevantes de la Acción 4 del proyecto, en relación con la reducción de la vulnerabilidad de los edificios esenciales. Concretamente con la instrumentación de edificios esenciales. En él se han descrito, además de elementos metodológicos relacionados con el tratamiento de series temporales, los detalles y principales resultados de la instrumentación de 3 edificios, uno en cada país participante en el proyecto: Andorra, España y Francia.

Antes de entrar en las principales conclusiones y lecciones aprendidas de la instrumentación de edificios, se considera oportuno comentar y discutir sobre la viabilidad de la herramienta RAR, para el tipo de edificios de interés en la ingeniería sísmica, concretamente, para edificios esenciales y residenciales. Los ensayos aplicados en el proyecto han arrojado luz sobre el alcance y limitaciones del dispositivo de radar disponible. Las bajas amplitudes esperadas de los desplazamientos para las frecuencias modales típicas de los tres edificios esenciales estudiados han llevado al dispositivo a sus límites operacionales. Por este motivo se ha considerado interesante y oportuno realizar una pequeña campaña adicional sobre un edificio que ha sido bien estudiado previamente por el socio UPC. Se describe a continuación este estudio complementario.

6.1 Estudio complementario con Radar

Los desplazamientos de respuesta para las frecuencias modales de los edificios instrumentados, son muy inferiores a la capacidad de resolución del radar. Las frecuencias involucradas para los modos fundamentales son de 2.6 Hz, 4.4 Hz y 2.7 Hz respectivamente para los edificios de Andorra, España y Francia, con desplazamientos de unas pocas décimas de micra. Ello es debido a la alta rigidez de los edificios, lo que conlleva elevadas frecuencias modales y desplazamientos muy pequeños. Recordemos que la resolución del Radar es de decenas de micra, es decir, dos órdenes de magnitud por encima. Esta inadecuación del equipo disponible se puso de manifiesto en los edificios del Hospital de Bagnères de Bigorre, y en el Instituto Santa Eugènia de Girona, donde se realizaron diversas medidas con escaso o nulo éxito. Estos resultados desincentivaron los trabajos de radar en el edificio de Andorra.

Por este motivo, y antes de cerrar el proyecto, se consideró oportuno ensayar el dispositivo RAR en un edificio más flexible, dúctil. Se escogió uno de los edificios en los que se alojan los Servicios de Protección Civil de Cataluña, situado, en la calle Diputación, 355, y sobre el cual, el socio UPC disponía de información de trabajos y medidas previas con velocímetros y acelerómetros. Se resumen a continuación los trabajos y análisis efectuados.

6.1.1 El edificio

El departamento de interior de la Generalitat de Cataluña tiene su sede en la Calle Diputación 355, en la esquina entre la calle Diputación y el Paseo de San Juan. El edificio se muestra en la Figura 6-1. Puede observarse, cómo el inmueble consta de dos edificios adosados, correspondientes a los números 353 y 355 de la calle Diputación. El primero es un edificio de 6 plantas, más una planta sótano; es antiguo, de mampostería no reforzada, típico del distrito del Ensanche. El segundo es un edificio metálico de 9 plantas, también con



una planta sótano. Es interesante resaltar que hay dependencias compartidas entre ambos edificios, que están unidos mediante escaleras, también de estructura metálica. Obsérvese en la Figura 6-1 c) cómo los forjados de ambos edificios están a diferentes niveles. Como se comenta más adelante, este hecho es importante a la hora de interpretar las series tempora-les correspondientes a la vibración del edificio, que hay que considerar como un edificio único.



Figura 6-1. Vistas aéreas y esquema del alzado del edificio. (Fuente de vistas aéreas: Google Earth)

6.1.2 <u>Resultados previos</u>

A efectos de este estudio complementario focalizaremos en el modo fundamental, que suele identificarse con la frecuencia más baja detectada.

Un informe sobre diversos trabajos previos realizados por el socio UPC puede hallarse en Caselles et al. (2015). Uno de los trabajos en el edificio, usando un transductor de velocidad, también está bien documentado en Pujades (2015). El dispositivo y su situación en el edificio pueden verse en la Figura 1-1 y, en la Figura 1-2 se muestra un ejemplo de registro. Ambas figuras en el primer capítulo introductorio. La Figura 6-2 muestra la PSD, normalizada, correspondiente a los registros de las componentes transversal, longitudinal y vertical. La frecuencia del pico de mínima frecuencia, es de 1.96 Hz (periodo T=0.51 s). Esta fre-



cuencia se usará para contrastar los resultados de las medidas RAR con un dispositivo mejorado.

6.1.3 Medidas RAR

Para esta campaña adicional y, en vistas de las dificultades halladas en los trabajos con el radar de apertura real, se usó un nuevo sensor radar desarrollado en el CTTC, basado en el módulo *Sentire* y producido por el "*Institute of Mobile and Satellite communication Technolo-gy*" (IMST²³). Así, se efectuaron distintas medidas de una duración aproximada de entre 20 y 30 minutos, con una frecuencia de muestreo de 50 Hz. El dispositivo mejora, en un factor de 3, la resolución espacial del sensor Ibis-S que se usó en el edificio de Santa Eugènia, por lo que permite un mejor muestreo de la fachada del edificio y, por consiguiente, una mejor elección de los puntos con un mejor retorno. Luzi (2021) describe otros detalles técnicos del sensor y del equipo, así como de las medidas efectuadas.



Figura 6-2. PSDs normalizadas de las tres componentes de los velocigramas registrados con el dispositivo de la Figura 1-1.

La Figura 6-3 muestra la configuración y detalles de las medidas efectuadas. La Figura 6-4 a) muestra la serie temporal correspondiente a la señal con mejor retorno en el radar. La Figura 6-4 b), muestra la PSD correspondiente. Se observan con claridad dos picos a las frecuencias de 1.98 Hz (T=0.505 s) y 3.88 Hz (T=0.258 s).

6.1.4 Discusión

Con respecto a las frecuencias observadas, en un primer análisis, se consideró sorprendente, que un edificio metálico de nueve plantas tuviera frecuencias modales tan altas. Serían de esperar periodos de entre 0.8 y 1.1 s, es decir, frecuencias entre 0.9 y 1.3 Hz. Estudios más detallados y documentación adicional sobre la estructura del edificio, pusieron de manifiesto que las altas frecuencias detectadas son debidas a que, en realidad, se está registrando, no la vibración del edifico metálico aislado, sino la del edificio formado por dos edificios contiguos acoplados, el de mampostería de Diputación 353 y el metálico. Por otra parte,

²³ IMST | SENTIRE RADAR. (Acceso: 15/12/2021)



las reformas realizadas en la unión física estructural de ambos edificios sin duda contribuyeron a rigidizar el conjunto estructural.

En cuanto al uso de esta versión mejorada de radar, los resultados mejoran ligeramente los obtenidos con el dispositivo usado en el Instituto Santa Eugènia. Con todo, la comparación entre la Figura 6-4 b y la Figura 6-2, confirma la dificultad del equipo RAR para identificar frecuencias altas.



Figura 6-3. a) Medidas efectuadas. b) Esquema de las posiciones 1 y 3 del equipo. (Luzi 2021)

Se han ensayado técnicas más sofisticadas de análisis, basadas en la correlación y coherencia entre señales y en el apilamiento (*stacking*) de series temporales y, aunque se obtie-

nen mejoras significativas en la identificación de las frecuencias más bajas, digamos, y forzando un poco, por debajo de los 4 Hz, la adecuación de este tipo de medidas, en su nivel actual de desarrollo, para discriminar daño en edificios rígidos, es cuestionable. Con todo, como se ha puesto de manifiesto en otros estudios y trabajos, esto no invalida su adecuación y utilidad para medidas en otras estructuras o infraestructuras, como torres de aerogeneradores, edificios muy altos y puentes, entre otros. En general, la respuesta del radar será satisfactoria para frecuencia bajas.



Figura 6-4. a) Ejemplo de serie temporal de desplazamiento. b) PSD correspondiente a la serie temporal. Se observan con claridad los picos a las frecuencias de 1.98 y 3.88 Hz. (Luzi 2021)

6.2 Conclusión final

La instrumentación de tres edificios esenciales ha permitido aumentar nuestro conocimiento sobre el análisis modal operacional (OMA) y sobre el monitoreo de la salud estructural de edificios (SHM). POCRISC nos ha brindado la oportunidad de trabajos y estudios avanzados. Asimismo, los beneficios trascienden los objetivos específicos y la temporalidad del proyecto. La gran cantidad de datos, de alta calidad, recogidos en los tres edificios, permitirá avanzar en el conocimiento de estos dos temas de interés indudable, permitiendo establecer la oportunidad, viabilidad y utilidad de este tipo de monitoreo, permitiendo distinguir estructuras y situaciones en los que los beneficios son claros, y relativamente sencillos de implementar, de otros, en los que las características estructurales y los niveles de vibración hagan previsibles menores probabilidades de éxito. Se resumen a continuación tres conclusiones que consideramos relevantes en referencia a: i) la intensidad del ruido; ii) el análisis modal experimental; iii) el modelado estructural y iv) el alcance y limitaciones de las medidas con radar.

Intensidad del ruido

El OMA se basa en el análisis de vibración de los edificios en condiciones operativas, es decir, sin aplicar excitaciones más allá del ruido ambiental y sin interrumpir la actividad normal en el edificio. Del análisis de la variación temporal de intensidad de las vibraciones se concluye en su capacidad para detectar cualquier modificación en las condiciones operativas del centro, siendo posible y sencillo identificar periodos de calma y de actividad, Curiosamente, en el caso de Instituto Santa Eugènia pudo detectarse, con claridad, los horarios de las actividades lectivas.



Análisis modal operacional

Las medidas de aceleración y de velocidad permiten detectar bien los modos de vibración de los edificios. Aunque aquí no se ha explotado este tipo de estudios, también hay técnicas para estudiar los niveles de amortiguamiento estructural. Por otra parte, dependiendo de la distribución geométrica de los sensores, también es posible definir las principales formas modales de los diferentes modos, puesto que permite hallar los desplazamientos de cada modo tanto en su distribución en planta como en altura.

Con todo, hay que tener en mente, que los resultados obtenidos, periodos, amortiguamientos y formas modales corresponden a movimientos extremadamente débiles. Es bien conocido que los periodos aumentan en caso de movimientos sísmicos intensos.

Modelado estructural

El modelado es una excelente herramienta que permite conocer el comportamiento modal de un edificio. Sin embargo, la variabilidad y la incertidumbre de los parámetros que definen la respuesta estructural pueden complicar la comparación modelado-observado. Por lo tanto, una calibración de los parámetros referentes a los materiales, a la geometría y a las condiciones de contorno, entre otros, del modelado estructural, a partir de los resultados experimentales, es esencial para definir la condición inicial del edificio, es decir, los parámetros modales del "edificio sano". Sin esta dialéctica, el modelado estructural sólo permite estimar el patrón modal, pero las frecuencias propias están sujetas a incertidumbres significativas. Además, uno de los objetivos de la Acción 4 ha sido determinar la viabilidad de este tipo de estudios, concretamente de la variación del periodo con el daño, para usar como indicador de daño, en caso de una catástrofe sísmica. El problema subyacente es el conocimiento de las frecuencias propias iniciales del edificio sano. El modelado estructural no resuelve este problema. Con todo, el socio ENIT ha realizado un interesante ejercicio de análisis dinámico no lineal, en el que se confirma la variación del periodo con el daño, estableciendo que, para el edificio objeto de estudio, el inicio de daño significativo comporta una variación del 5% en el periodo fundamental del edificio. En el caso del sismo estudiado, hallan una variación del 12 %. Con todo hay que ser cautos a la hora de generalizar estos resultados, dado que estos incrementos, sin duda, pueden depender del tipo estructural. En edificios extremadamente rígidos y frágiles, como edificios de baja altura de mampostería no reforzada, por ejemplo, la variación entre la frecuencia fundamental del edificio sano y en el colapso, puede ser pequeña.

Alcance de las medidas con radar

En caso de catástrofe sísmica es interesante disponer de una herramienta que permita el diagnóstico del estado de seguridad de un edificio, sin entrar en él, es decir, técnicas de teledetección y mediciones a distancia. En este sentido, la creciente capacidad de dispositivos diseñados, en principio, para medidas cuyas principales ventajas son su enorme precisión y rapidez, y que permiten registrar series temporales con frecuencias de muestreo superiores a 100 muestras por segundo, hacen del radar interferométrico, un buen candidato para este tipo de medidas a distancia. Con todo, es conocido que para frecuencias por encima de un Hz las amplitudes de los desplazamientos son pequeñas comparadas con las amplitudes de las aceleraciones. Las frecuencias propias de los edificios esenciales y resi-



denciales suelen estar por encima de los 2 Hz. Tal ha sido el caso de los edificios aquí analizados. La conclusión de los estudios efectuados es que, aun reconociendo la alta capacidad del radar interferométrico, su aplicabilidad al problema aquí planteado requiere resoluciones de desplazamientos de décimas de micra, dos órdenes de magnitud por debajo de la capacidad de los dispositivos ensayados.



Referencias

- Alva-Bañuelos RE, Pujades LG, González-Drigo R, Luzi G, Caselles O, Pinzón L (2020) Dynamic Monitoring of a Mid-Rise Building by Real-Aperture Radar Interferometer: Advantages and Limitations. Remote Sens. 2020, 12, 1025; doi:10.3390/rs12061025. https://www.mdpi.com/2072-4292/12/6/1025.
- Alva-Bañuelos RE (2021) Daño sísmico y propiedades dinámicas en estructuras de edificación. Tesis doctoral. Departamento de IngenieríaCivil y am biental. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad politecnica de Cataluña. BarcelonaTech. 256 pp. <u>http://hdl.handle.net/10803/672659</u>.
- Barus M, Dalverny O, Faye JP, Welemane H and Martin C (2019). Determination of a building structural behaviour through the numerical modelling of seismic events. 10^è Colloque Natonal AFPS. Strasbourg. 24-27/09/2019. 10pp.
- Barus M, Dalverny O, Welemane H Faye JP, and Martin C (2020a). Determination of a building structural behaviour through the numerical modelling of seismic events. -Application to the Andorran Civil Protection building. PPT Presentation at POCRISC action 4 workshop. BRGM-Orleans. 34 diapositivas. 25-27 defebrero. 2020.
- Barus M, Dalverny O, Welemane H Faye JP, and Martin C (2020b). Seismic vulnerability of structures: application to the Civil Protection building in Andorra. Mechanics & Industry 21, 514 (2020) Published by EDP Sciences 2020. https://doi.org/10.1051/meca/2020045.
- Brigham EO (1974). The Fast Fourier Transform. Prentice Hall Inc. 252 pp.
- Caselles JO, González-Drigo JR, Luzi G y Pujades LG (2015) Vibración natural de edificios. Aplicación a dos edificios de Barcelona. 80 pp.
- Cooley JW, Tukey JW (1965) "An algorithm for the machine computation of the complex Fourier series," Mathematics of Computation, vol. 19, pp. 297–301, Apr. 1965.
- Coppi F, Gentile C, Riccia PP (2010) A Software Tool for Processing the Displacement Time Series Extracted from Raw Radar Data AIP Conference Proceedings 1253, 190 (2010); <u>https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3455458</u>
- Havskov J, Alguacil G (2004) Instrumentation in earthquake seismologyu. Springer. 358 pp. <u>https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-2969-1</u>.
- Frigo M, Johnson SG (1998) "FFTW: An Adaptive Software Architecture for the FFT." Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol. 3, 1998, pp. 1381-1384.
- Garzón-Andrade AL (2020). Evaluación de la vulnerabilodad sísmica. Aplicación a edificios convencionales, de especial importancia y esenciales. Trabajo de final de máster TFM. 101 pp. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB). Universidad Politècnica de Cataluña (UPC-Barcelona-Tech). https://upcommons.upc.edu/handle/2117/342067 (acceso: 06/12/2021).
- Gonzalez-Drigo R, Cabrera E, Luzi G, Pujades LG, Vargas-Alzate YF Jorge Avila-Haro J (2019) Assessment of Post-Earthquake Damaged Building with Interferometric Real Aperture Radar. Remote Sens. 2019, 11, 2830; <u>https://www.mdpi.com/2072-4292/11/23/2830</u>.
- Hidalgo-Leiva D (2017) Análisis estructural probabilista orientado a evaluación del daño sísmico con aplicaciones a tipologías constructivas empleadas en Costa Rica. Tesis

doctoral. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. UPC-BarcelonaTech. 228 pp. https://www.tesisenred.net/handle/10803/405589#page=1

- Luzi G (2012) Pryecto NAGIAR: Memoria de trabajo. Institut de geomàtica. Informe interno. 13 pp.
- Luzi G (2021) Informe técnico sobre las medidas Radar adquiridas delante de los dos edificios de la Proteción Civil de Catalunya situados en c/ Diputació 355 el 26 de noviembre 2021. Informe CTTC PARA proyecto POCRISC. 11pp.
- Luzi G, Crosetto M, Fernández E (2017) Radar Interferometry for Monitoring the Vibration Characteristics of Buildings and Civil Structures: Recent Case Studies in Spain. Sensors 2017, 17, 669; doi:10.3390/s17040669 <u>https://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/669</u>.
- Math Works (2019) The Math Works, Inc., MATLAB, versión 2019b (Natick, MA: The Math Works, Inc., 2019), , <u>https://www.mathworks.com/</u> (Acceso: 19 diciembre 2021).
- Nakamura Y (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR Railway Tech. Res. Inst., 30(1), 25-33. https://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf
- Nakamura Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering (Vol. 2656). New Zealand: Auckland. https://www.sdr.co.jp/papers/n_tech_and_application.pdf
- Oppenheim AV, Schafer RW (1999) Discrete time signal processing. Prentice Hall. ISBN: 0-13-754920-2. 893 pp.
- Papoulis A (1962). The Fourier integral and its applications. McGraw-Hill Book Company, Inc. 317 pp.
- Proakis JG, Manolakis DG (2007) Tratamiento digital de señales. Principios, algoritmos y aplicaciones. Cuarta edición.Pearson-Prentice Hall. 996 pp.. ISBN: 978-84-8322-347-5
- Pujades LG (2015) Edificio Torre. Diputación 355. Anexo V en: Vibración natural de edificios. Aplicación a dos edificios de Barcelona.(Caselles et al. 2015). Informe para protección civil de Cataluña. pp. 62-80.
- Vidal F, Navarro M, Aranda C, Enomoto T (2014). Changes in dynamic characteristics of Lorca RC buildings from pre- and post-earthquake ambient vibration data. Bull Earthquake Eng :2095–2110.<u>https://doi.org/10.1007/s10518-013-9489-5</u>.
- Welch P (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms," in IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, vol. 15, no. 2, pp. 70-73, June 1967, doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.



7 Anexo I. Protocolo de medidas. Prat del Rull



Anexo I. Protocolo de medidas: edificio Prat del Rull







Proyecto cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER))





Per una cultura comuna del risc sísmic Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

Medidas de ruido de fondo en el edificio Prat del Rull del Gobierno de Andorra



Informe - Acción 4



Autor :

José Antonio Jara Salvador¹

Palabras clave: estructura, edificio, ruido por vibración ambiental, periodo de vibración, mitigación del riesgo sísmico

- 1. ICGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
- 2. BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 3. UPC: Universitat Politècnica de Catalunya
- 4. DIGC: Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
- 5. IEA : Institut d'Estudis Andorrans
- 6. ENIT: Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
- 7. CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique Délégation Alsace
- 8. EPLFM: Entente pour la Forêt Méditerranéenne
- 9. DW: Deveryware
- 10. ACE: Associació de Consultors d'Estructures

© «2019», Projecto POCRISC



Síntesis

El objetivo del proyecto POCRISC es fomentar una cultura común del riesgo sísmico en los Pirineos, desarrollando aproximaciones armonizadas de la evaluación del riesgo sísmico para los gestores de emergencia, favoreciendo la difusión de información común y compartida dirigida a las autoridades locales y al público, y proporcionando las herramientas de ayuda a la toma de decisiones, adaptadas a las necesidades de los gestores de crisis. Todo ello focalizado en una zona transfronteriza que comprende las regiones de Cataluña en España, Occitania en Francia y Andorra. Este proyecto mejorará el conocimiento del riesgo sísmico y de los elementos expuestos, proporcionando herramientas de apoyo a las estrategias de vigilancia y mitigación del riesgo, que incluyen la sensibilización de la población de los tres países participantes frente al fenómeno sísmico. De igual modo, el proyecto proveerá a los gestores del riesgo y a los ciudadanos de información, estudios y resultados, que permitirán mejorar la cultura para una gestión eficiente de las situaciones del riesgo sísmico.

Uno de los principales resultados del proyecto es una estimación automática, a nivel municipal y en tiempo casi-real, de los daños causados por un terremoto, dirigida a gestores de emergencias. Además, una aplicación para teléfonos inteligentes, para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios y del daño post-sísmico, serán de gran utilidad en los servicios de la gestión de la emergencia sísmica. Las guías prácticas de vulnerabilidad sísmica, dirigidas a los técnicos de la construcción y a los gestores del riesgo, representan un gran valor añadido. Los resultados se pondrán en común entre los servicios transfronterizos de emergencia a través de ejercicios de crisis, talleres formativos, para la utilización de las herramientas desarrolladas, y un simulacro de intervención post-sísmica.

Los organismos multidisciplinares que participan en el proyecto POCRISC analizan la problemática del riesgo sísmico desde diferentes perspectivas: innovadora (universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas), práctica (entidades responsables de la información sísmica y la gestión del riesgo, protecciones civiles) y previsora (asociación de constructores). Los datos serán accesibles en la página web en construcción: <u>www.pocrisc.eu</u>.



7.1 El edificio

El edificio donde se realizan las medidas es el edificio Prat de Rull del Gobierno de Andorra, ubicado en la calle Camino de la Grau s/n, AD500 Andorra la Vella.



Figura 7-1. Ubicación e índice de planos del edificio Prat de Rull del Gobierno de Andorra

Se trata de un edificio con planta en forma de "T" con dos fachadas con orientación Norte y Este. El edificio tiene 9 plantas, 7 de las cuales están sobre rasante (Figura 7-2).

7.2 Medidas de ruido por vibración ambiental

La vulnerabilidad de las estructuras sujetas a acciones dinámicas ha sido un campo de investigación muy activo en los últimos años. La utilización de instrumentación para el registro de ruido por vibración ambiental, es decir, de la respuesta del edificio a la excitación del ruido por vibración ambiental, es una herramienta que permite conocer las propiedades dinámicas del edificio y así, mejorar nuestro conocimiento del comportamiento dinámico de las estructuras, en general, y de las instrumentadas en particular.

El principal propósito de estas mediciones es evaluar los períodos propios de los modos de vibración de las construcciones y su variabilidad temporal, con el propósito de entender el comportamiento de los edificios y su resistencia durante los terremotos. Es especialmente interesante medir los períodos de vibración de las construcciones varias veces, para conocer cuándo variaciones en las características dinámicas se deben a factores ambienta-les/naturales o a una variación significativa de sus características estructurales: reformas estructurales o daños relevantes.





Anexo I. Protocolo de medidas: edificio Prat del Rull

Figura 7-2. Vistas con los alzados del edificio Prat de Rull del Gobierno de Andorra. Ubicación e índice de planos del edificio Prat de Rull del Gobierno de Andorra.

Así pues, esta investigación se enmarca en el ámbito de la monitorización de la salud estructural (*Structural Health Monitoring*) del edificio.



En este contexto, el edificio de Prat del Rull se ha escogido por: i) ser un edificio de especial importancia por su función (gobierno) y ii) ser un edificio muy bien documentado, desde el punto de vista estructural, lo que permitirá el contraste entre los datos empíricos observados y el modelado estructural. Así pues, se realizarán medidas de ruido sísmico de fondo en el edificio Prat del Rull del Gobierno de Andorra, ubicado en la calle Camí de la Grau s/n, AD500 Andorra la Vella.

7.2.1 Instrumentación

Este protocolo se refiere a medidas con acelerómetros. Para realizar las medidas del ruido por vibración ambiental se utilizarán 7 acelerómetros triaxiales de la marca Guralp Fortimus (ver <u>Anexo</u>). Estos equipos permiten medir la aceleración en 3 ejes ortogonales que, en campo libre, suelen orientarse en los ejes geográficos (NS, EW y Vertical) y, en el caso de estructuras civiles, en ejes relacionados con las estructuras qué se miden. En edificios se acostumbra a orientar las medidas horizontales en las direcciones longitudinal (larga) y transversal (corta) del edificio. Las vibraciones del edificio se registran para su posterior tratamiento y análisis.

Estos acelerómetros se configurarán con un rango dinámico de ± 0.5 g y una velocidad de muestreo de 200 muestras por segundo. Los datos se grabarán en una estructura de datos tipo SDS (*SeisComP Data Structure*) en formato miniSEED con compresión Steim2 y bloques de 512 bytes de tamaño.

El ancho de banda de los sensores es DC-315 Hz, y su función de transferencia H(s) viene dada por la ecuación (7-1).

$$H(s) = G \frac{A_0}{(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)}$$
(7-1)



Figura 7-3. Imagen de un acelerómetro Güralp Fortimus.

donde:

- p1, p2 y p3 son los polos de la función de transferencia, expresados en rad/s (Tabla 7-1),
- A0 es el factor de normalización de la función de transferencia a 1 Hz, con valor 7.47946E+09, y
- G es la sensibilidad de cada una de las componentes a 1 Hz (Tabla 7-2), en cuentas/m/s2.



Anexo I. Protocolo de medidas: edificio Prat del Rull

Tipo	Parte Real	Parte Imaginaria
p1	-9.990265E+02	1.796991E+03
p2	-9.990265E+02	-1.796991E+03
р3	-1.769345E+03	0.000000E+00

Tabla 7-1. Polos de la función de transferencia de los acelerómetros en *rad/s*

Tabla 7-2. Sensibilidad de los componentes de los sensores a la frecuencia de 1 Hz, en cuentas/m/s²

Estación	N/S	G _{HNZ}	G _{HN1}	G _{HN2}
YK.C001	4F5A	1.690380E+06	1.713397E+06	1.723372E+06
YK.C002	175A	1.692104E+06	1.702572E+06	1.696127 E+06
YK.C003	4A5A	1.687283 E+06	1.696631E+06	1.690748E+06
YK.C004	435A	1.690397E+06	1.695923E+06	1.687697E+06
YK.C005	4C5A	1.699951E+06	1.681922E+06	1.701312E+06
YK.C006	4D5A	1.692816E+06	1.703332E+06	1.693414E+06
YK.C007	225A	1.719450E+06	1.703486E+06	1.728150E+06

7.2.2 Ubicación de los acelerómetros

Para el registro del ruido por vibración ambiental se instalan 7 acelerómetros, que se distribuyen en el interior del edificio de acuerdo con los planos de las siguientes figuras (desde la Figura 7-4, hasta la Figura 7-7). Los círculos de color rojo representan la ubicación de las estaciones y las flechas rojas muestran la orientación de las componentes horizontales de los sensores.



Figura 7-4. Plano de la planta baja del edificio Prat de Rull del gobierno de Andorra.




Figura 7-5. Plano de la planta segunda del edificio Prat de Rull del gobierno de Andorra.



Figura 7-6. Plano de la planta cuarta del edificio Prat de Rull del gobierno de Andorra.





Figura 7-7. Plano de la planta sexta del edificio Prat de Rull del gobierno de Andorra.

Los equipos se alimentan mediante la conexión a un enchufe de 220Vac, se conectan a la red informática del edificio mediante un cable Ethernet y, para disponer de señal de tiempo, se instala una antena GNSS, cerca de una de las ventanas (Figura 7-8).



Figura 7-8. Fotografía de la estación YK.C002, instalada en la segunda planta.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique Las componentes HN1 de todos los sensores están orientadas longitudinalmente al edificio, con un azimut de 350°, las componentes HN2 están orientadas transversalmente al edificio, con un azimut de 80°, y, finalmente, las componentes HNZ, corresponden a la orientación vertical.

7.2.3 Datos registrados

Para cada una de las estaciones instaladas sus principales metadatos se muestran a continuación:

- Estación: YK.C001
 - o Planta: Baja
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio de registro: 04/04/2019
 - o Fin de registro: 09/04/2019
- Estación: YK.C002
 - o Planta: Segunda
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio de registro: 03/04/2019
 - o Fin de registro: 09/04/2019
- Estación: YK.C003
 - o o Planta: Cuarta
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio de registro: 03/04/2019
 - o Fin de registro: 09/04/2019
- Estación: YK.C004
 - o Planta: Cuarta
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio de registro: 03/04/2019
 - Fin de registro: 09/04/2019
- Estación: YK.C005
 - o Planta: Sexta
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio de registro: 03/04/2019
 - Fin de registro: 09/04/2019
- Estación: YK.C006
 - o Planta: Sexta
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio de registro: 03/04/2019
 - o Fin de registro: 09/04/2019
- Estación: YK.C007
 - o Planta: Sexta
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - Inicio de registro: 03/04/2019
 - o Fin de registro: 09/04/2019



7.2.4 Distribución de los datos registrados

Esta distribución de datos se realiza mediante el servidor FDSN (International Federation of Digital Seismograph Networks) del ICGC http://ws.icgc.cat/fdsnws bajo licencia Creative Commons CC BY 4.0.

Tanto los datos registrados como los metadatos de las estaciones utilizadas para su registro se distribuyen utilizando los servicios estándar fdsnws-dataselect versión 1.1 y fdsnws-station versión 1.1.

7.3 Calendario

El calendario de realización de las medidas de ruido en el edificio Prat del Rull fue el siguiente:

- 3 de abril de 2019
 - o Movilización de personal y equipamientos de Barcelona en Andorra.
 - Replanteamiento de los puntos de instalación de los acelerómetros en el interior del edificio.
 - o Inicio de los trabajos de instalación de los acelerómetros.
- 4 de abril de 2019
 - o Finalización de los trabajos de instalación de los acelerómetros.
 - o Desmovilización del personal de Andorra en Barcelona.
- 9 de abril de 2019
 - o Movilización de personal de Barcelona en Andorra.
 - o Revisión del funcionamiento de los acelerómetros previamente instalados.
 - o Desinstalación de los acelerómetros.
- 10 de abril de 2019
 - o Desmovilización de equipamientos y de personal de Andorra en Barcelona.



7.4 Anexo. Especificaciones técnicas del acelerómetro Güralp Fortimus²⁴



²⁴ <u>Manual del acelerómetro</u> (acceso:23.12.2021) <u>Especificaciones técnicas-es</u> (acceso: 23.12.2021). <u>Especificaciones técnicas-en</u> (acceso: 23.12.2021).



FORTIMUS STRONG MOTION DIGITAL ACCELEROMETER Fortimus El Fortimus es un acelerómetro digital inteligente de banda ancha simple de usar, de instalación rápida que destaca el registro de datos y software de comunicación para el manejo inmediato del instrumento y de los datos. La ganancia variable optimiza el desempeño para una amplia gama de escenarios de temblores y, cuando es usado en modo de ultra-bajalatencia, el Fortimus es el instrumento ideal para la alerta temprana de Terremotos y de aplicaciones de monitoreo de infraestructuras. DIMENSIONES DEL FORTIMUS 2.4 PULGADAS SENSIBLE AL TACTO LCD MENU PRINCIPAL 165 mm ALINEACIÓN 165 mm 72.5 mm \$4 mm FORMAS DE ONDA INSTALACIÓN SIMPLE Y RÁPIDA CON UN (FIXING) TORNILLO M8 SIMPLE



21

El Güralp Fortimus es un acelerómetro digital triaxial de fuerza balanceada de muy bajo ruido con un amplio rango dinámico, ideal para alerta temprana de terremotos, mitigación de riesgos sísmicos y aplicaciones de ingeniería civil.

Con opciones de ganancia variable de 0.5 ga 4 g, el Fortinus tendrá un rendimiento óptimo en una amplia variedad de escenarios de temblores y de terremotos. El digitalizador Minimus integrado ofrece una gran cantidad de características adicionales que hacen de Fortimus el instrumento perfecto para las aplicaciones de alerta temprana de terremotos (EEW) y control de salud estructural:

> Modo de latencia ultra baja para EEW, cuando se usa con el protocolo GDI, la transmisión se puede lograr en 40 ms (frecuencia de muestreo y red dependiente)

Características Clave

Componentes de bajo ruido para alta precisión y rango dinámico mejorado

Opciones de ganancia variable: ±4 g ±2 g ±1 g o ±0.5 g

Modo de latencia ultra baja para EEW: cuando se usa con el protocolo GDI , la transmisión se puede lograr en 40 ms. Algoritmos de activación estándar de la industria para EEW

(STA / LTA) Compatible con software estándar de la industria como

Earthworm, SeisComp.

Admite la interfaz de datos de SEEDlink para una integración perfecta

Votación multi-instrumento para mitigar falsas alertas positivas

Protocolo de alerta común (CAP) habilitado para advertencia de emergencia automatizada

Instalación simple y rápida con un solo tornillo de fijación MS

Forma delgada, robusta e impermeable a IP68 – se sumerje a 3 m por 72 horas

Pantalla LCD de 2,4 pulgadas sensible al tacto integrada para ver las formas de onda, el estado de salud, el nivel de instrumentos virtuales y el acceso a todos los controles de red y de instrumentos

Conectividad de red avanzada: se puede acceder a los controles completos en el instrumento, a través de Güralp Discovery, muestra plataforma de software, o a través de un navegador web estándar

Ethernet (10/100 / 1000BASE-T) con alimentación a través de Ethernet (PoE), Wi-Fi

Fuente de alimentación aislada para funcionamiento de 10 - 36 V

Tarjetas microSD dual - redundantes de 64 GB

Identificación de la dirección IP a través del servidor de registro Discovery y Cloud

Seleccione entre las fuentes de tiempo GNSS (GPS, GLONASS o BeiDou) o PTP (Precision Time Protocol) Compatible con ScreamTM > Algoritmos de activación de EEW(STA / LTA) estándar para la industria

 > Votación multi-instrumento para mitigar falsas alertas positivas

> Protocolo de Alerta Común (CAP) habilitado para la advertencia de emergencia automatizada

> Conectividad de red avanzada; se puede acceder a los controles completos en el instrumento, a través de Güralp Discovery, nuestra plataforma de software, o a través de un navegador web estándar

Lo nuevo en Fortimus es una pantalla LCD multitáctil a todo color de 2,4 pulgadas que muestra formas de onda, estado de salud del instrumento, configuración de ganancia, configuraciones de red y un nivel de instrumento virtual.

Aplicaciones

- > Sistemas de alerta temprana de terremotos.
- > Monitoreo de la salud estructural

(por ejemplo, presas, industria, edificios)

- > Instalación de superficie y bóveda.
- > Despliegue en posthole
- > Arregios en red Arrays



Gráfico de ruido propio para el sensor Fortis con una ganancia de 4 g

31



Fortimus



ESPECIFICACIONES

SISTEMA DEL SENSOR		
Configuración / Topología	Ortogonal triaxial	
RENDIMIENTO DEL SENSOR		
Banda de salida de aceleración	DC - 315 Hz	
Opciones de ganancia variable	±4 g, ±2 g, ±1 g or ±0.5 g	
Salida pico / escala completa	Diferencial: ±20 V (40 V pico-a-pico)	
Nivel de clip	4.2 g	
Rango dinámico del sensor	>160dB	
Ruido propio por debajo de NHNM	> 0.07 Hz (14 segundos)	
Ruido propio por debajo de AHNM	DC to 100 Hz	
Ruido propio por debajo de ALNM	0.8 to 45 Hz	
Rechazo del eje transversal	0.001 g/g	
Linearidad	Escala completa 0.1%	
Resonancia espuria más baja	>450 Hz	
Compensación a cero	Automático al inicio y al comando del usuario.	
RENDIMIENTO DEL DIGITALIZA	DOR	
Tipo de convertidor ADC	Delta-sigma	
Formato de Salida	32-bit	
Deriva de Ganancia	3 ppm /°C	
Rechazo de Modo Común	>110 dB	
PROCESAMIENTO DE DATOS		
Tasas de salida disponibles	1 muestra por hora hasta 5000 muestras por segundo para canales primarios, seleccionable por el usuario Hasta 500 muestras por segundo para canales ambientales.	
Filtros de decimación	+2, +3, +4, +5 (Causal / Acausal)	
Rechazo fuera de banda	>194 dB	
Modo de transmisión de datos	Continuos y por disparo	
Modos de disparo	STA/LTA	
Ganancia Seleccionable	Unidad, ×2, ×4, ×8, ×12	
TIEMPO Y CALIBRACION		
Precisión de la fuente de tiempo	Precisión cuando el GPS está bloqueado ± 50 ns. Deriva típica cuando no está sincronizada (sin GPS) <1 ms por día	
Fuentes de Tiempo	GNSS (GPS, GLONAS, BeiDou), PTP (Precisión Protocolo de tiempo)	
Generador de señal de	Ruido sinusoidal, escalonado o de banda ancha,	
INTERFAZ DE USUARIO	todos con amplitud y recuencia ajustables	
Configure alée a control	(Ethernet) Citrala Diseasans dooroo	
contiguration y control	gratuita, interfaz de navegador web. Aplicación GúVú (Bluetooth) disponible para dispositivos Android e iOS	

COMUNICACIÓN DE DATOS		
Formatos de grabación de datos	miniSEED (metadatos almacenados en SEED sin formato de datos)	
Protocolos de transmisión de datos (a través de Ethernet)	Protocolos de transmisión de datos: GCF (Scream!) GDI- link * y SEEDlink * (* metadatos envindos en formatos de archivo RESP / dataless SEED)	
ALMACENAMIENTO DE DATOS	ABORDO	
Memoria flash y almacenamiento	Tarjetas microSD de 64 GB de doble redundancia	
SOFTWARE		
Sistema operativo	Compatible con Windows, Linux and macOS	
Tecnologías de comunicación soportadas.	Ethemet (10/100 / 1000BASE-T) con Power over Ethemet (PoE), Wi-Fi	
OPERACIÓN Y USO DE LA POTE	NCIA	
Temperatura de Operación	-20 to +70 °C	
Rango de Humedad relativa	Cero a 100%	
Fuente de alimentación	10 - 36 V DC * o Power over Ethernet (PoE)	
Consumo de energía a 12 V DC	2 W típico (sin GPS o Ethemet)	
* Voltaj e de alimentación para el funcionat adicional o el uso de cables más largos pue	niento de esta unidad solament e. La conexión a instrumentación de resultar en un mayor requerimiento de voltaj e de entrada.	
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
Tipo de carcasa	Aluminio anodizado duro, sellado para el medio ambiente.	
Sensor ambiental	Humedad y temperatura	
Peso	1.9 kg (desconectado)	
Diametro	165 mm	
Altura con los pies	84 mm	
Altura (solo sensor)	72.5 mm	
Tipo de conector	MIL-DTL-26482 Serie 1: Ethernet - 8P8C (RJ45) Alimentación - 4 pines	
	LEMO: GNSS / serial - 14 pin	
Protección del medio ambiente	IP68: protección contra los efectos de la inmersión prolongada a 3 m de profundidad durante 72 horas	
El paquete de Fortimus incluye	Cable de alimentación, cable Ethernet, receptor GNSS (GPS / GLONAS / BeiDou) y cable de consola	



<u>Original: www.guralp.com</u> Traducción: Vase Sísmica México



8 Anexo II. Protocolo de medidas. Instituto Santa Eugènia







Projecte cofinançat pel Fons Europeu de Desenvolupament Regional (FE-





Per una cultura comuna del risc sísmic Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

Medidas de ruido de fondo en el Institut Santa Eugènia de Girona









Editor: ICGC

25/04/2019

Autores:

José Antonio Jara Salvador¹

Palabras clave: estructura, edificio, ruido por vibración ambiental, período de vibración, mitigación riesgo sísmico, radar

- 4. DIGC: Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
- 5. IEA: Institut d'Estudis Andorrans
- 6. ENIT: Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
- 7. CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique Délégation Alsace
- 8. EPLFM: Entente pour la Forêt Méditerranéenne
- 9. DW: Deveryware
- 10. ACE: Associació de Consultors d'Estructures

^{1.} ICGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya

^{2.} BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières

^{3.} UPC: Universitat Politècnica de Catalunya

Síntesis

El objetivo del proyecto POCRISC es fomentar una cultura común del riesgo sísmico en los Pirineos, desarrollando aproximaciones armonizadas de la evaluación del riesgo sísmico para los gestores de emergencia, favoreciendo la difusión de información común y compartida dirigida a las autoridades locales y al público, y proporcionando las herramientas de ayuda a la toma de decisiones, adaptadas a las necesidades de los gestores de crisis. Todo ello, enfocado a una zona transfronteriza que comprende las regiones de Cataluña en España, Occitania en Francia y Andorra. Este proyecto mejorará el conocimiento del riesgo sísmico y de los elementos expuestos, proporcionando herramientas de apoyo a las estrategias de vigilancia y mitigación del riesgo que incluyen la sensibilización, de la población de los tres países participantes, frente al fenómeno sísmico. De igual modo, el proyecto proporcionará, a los gestores del riesgo y a los ciudadanos, información, estudios y resultados que permitirán mejorar la cultura para una gestión eficiente de las situaciones del riesgo sísmico.

Uno de los principales resultados del proyecto es una estimación automática, a nivel municipal, en tiempo casi-real, de los daños causados por un terremoto, dirigida a gestores de emergencias. Además, una aplicación para teléfonos inteligentes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios y del daño post-sísmico serán de gran utilidad en los servicios de la gestión de la emergencia sísmica. Las guías prácticas de vulnerabilidad sísmica, dirigidas a los técnicos de la construcción y a los gestores del riesgo, representan un gran valor añadido. Los resultados se pondrán en común entre los servicios transfronterizos de emergencia a través de ejercicios de crisis, talleres formativos para la utilización de las herramientas desarrolladas y un simulacro de intervención post-sísmica.

Los organismos multidisciplinares, que participan en el proyecto POCRISC, analizan la problemática del riesgo sísmico desde diferentes perspectivas: innovadora (universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas), práctica (entidades responsables de la información sísmica y la gestión del riesgo, protecciones civiles) y previsora (asociación de constructores). Los datos serán accesibles en la página web en construcción: <u>www.pocrisc.eu</u>.



8.1 El edificio

El edificio donde se realizan las medidas es el "*Institut Santa Eugènia*", situado en la calle Enric Marquès i Ribalta, 3, 17006 Girona.



Figura 8-1. Situación del edificio de l'Institut Santa Eugènia.

Se trata de un conjunto de edificios, cada uno de ellos con una altura distinta. Las medidas de ruido con acelerómetros y con un dispositivo RAR (*Real Aperture Radar*) se realizan sobre el bloque A del edificio de la Figura 8-2

		-

Figura 8-2. Vista del alzado del edificio del *Institut Santa Eugènia* donde se identifica el "Bloque A", sobre el que se realizan las medidas de ruido por vibración ambiental con acelerómetros y RAR.

8.2 Medidas acelerométricas del ruido por vibración ambiental

POCRISC

La vulnerabilidad de las estructuras sujetas a acciones dinámicas ha sido un campo de investigación muy activo en los últimos años. La utilización de instrumentación para el registro de ruido por vibración ambiental, es decir, de la respuesta del edificio a la excitación del ruido por vibración ambiental, es una herramienta que permite conocer las propiedades dinámicas del edificio y así mejorar nuestro conocimiento del comportamiento dinámico de las estructuras en general, y de las instrumentadas en particular.

El principal propósito de estas mediciones es evaluar los períodos propios de los modos de vibración de las construcciones y su variabilidad temporal, con el propósito de entender el comportamiento de los edificios y su resistencia durante los terremotos. Es especialmente

interesante medir los períodos de vibración de las construcciones varias veces para conocer cuándo variaciones en las características dinámicas se deben a factores ambientales/naturales o a una variación significativa de sus características estructurales: reformas estructurales o daños relevantes. Esta investigación se enmarca en el ámbito de la monitorización de la salud estructural (*Structural Health Monitoring*) del edificio.

En este contexto, el Instituto Santa Eugènia se ha escogido por: i) ser un edificio de especial importancia, por su función (enseñanza), ocupación (un número importante de población en edad escolar) y valor (los ocupantes forman parte del futuro de nuestra sociedad) y ii) por ser un edificio muy bien documentado, desde el punto de vista estructural, lo que permitirá el contraste entre los datos empíricos observados y el modelado estructural. Así pues, se realizarán medidas de ruido por vibración ambiental en el Instituto Santa Eugènia, ubicado en la calle Enric Marquès i Ribalta, 3, 17006 Girona.

8.2.1 Instrumentación

Este protocolo se refiere a medidas con acelerómetros. Para realizar las medidas del ruido por vibración ambiental, se utilizarán 7 acelerómetros triaxiales de la marca Guralp Fortimus (apartado 7.4). Estos equipos permiten medir la aceleración en 3 ejes ortogonales que, en campo libre, suelen orientarse en los ejes geográficos (NS, EW y Vertical) y, en el caso de estructuras civiles, en ejes relacionados con las estructuras que se miden. En edificios, se acostumbra a orientar las medidas horizontales en las direcciones longitudinal (larga) y transversal (corta) del edificio. Las vibraciones del edificio se registran para su posterior tratamiento y análisis.

Estos acelerómetros se configurarán con un rango dinámico de ± 0.5 g y una velocidad de muestreo de 200 muestras por segundo. Los datos se grabarán en una estructura de datos tipo SDS (SeisComP Data Structure) en formato miniSEED, con compresión Steim2 y bloques de 512 bytes de tamaño. El ancho de banda de los sensores es DC-315 Hz, y su función de transferencia H(s) viene dada por la ecuación (8-1).

$$H(s) = G \frac{A_0}{(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)}$$



Figura 8-3. Imagen de un acelerómetro Güralp Fortimus.

donde:

- p1, p2 y p3 son los polos de la función de transferencia, expresados en *rad/s* (Tabla 8-1).
- A0 es el factor de normalización de la función de transferencia a 1 Hz, con valor 7.47946E+09.
- G es la sensibilidad de cada una de las componentes a 1 Hz (Tabla 8-2), en cuentas/m/s².

(8-1)

Anexo II. Protocolo de medidas: edificio Santa Eugènia

Tipo	Parte Real	Parte Imaginaria
р1	-9.990265E+02	1.796991E+03
p2	-9.990265E+02	-1.796991E+03
р3	-1.769345E+03	0.000000E+00

Tabla 8-1. Polos de la función de transferencia de los acelerómetros en *rad/s*

Tabla 8-2. Sensibilidad de los componentes de los sensores a la frecuencia de 1 Hz, en cuentas/m/s²

Estación	N/S	GHNZ	G _{HN1}	G _{HN2}
YK.C001	4F5A	1.690380E+06	1.713397E+06	1.723372E+06
YK.C002	175A	1.692104E+06	1.702572E+06	1.696127 E+06
YK.C003	4A5A	1.687283 E+06	1.696631E+06	1.690748E+06
YK.C004	435A	1.690397E+06	1.695923E+06	1.687697E+06
YK.C005	4C5A	1.699951E+06	1.681922E+06	1.701312E+06
YK.C006	4D5A	1.692816E+06	1.703332E+06	1.693414E+06
YK.C007	225A	1.719450E+06	1.703486E+06	1.728150E+06

8.2.2 Situación de los acelerómetros

Para el registro del ruido por vibración ambiental se instalarán 7 acelerómetros y la ubicación se identificará en los planos de las siguientes figuras. Los círculos de color rojo representarán la ubicación de las estaciones y las flechas rojas muestran la orientación de las componentes horizontales de los sensores.

Para la instalación de estos 7 equipos es necesario disponer de un enchufe de 220V y de proximidad a una ventana o a un punto de acceso al exterior, para poder instalar una antena del *Global Navigation Satellite System* (GNSS), para proporcionar la señal tiempo al acelerómetro, y conexión a la red informática con salida a Internet.

Se prevé situar un equipo en la sala del Departamento de Idiomas, en la planta baja, un equipo en la sala del Departamento de Castellano, en la primera planta, un equipo en la sala del Departamento de Matemáticas, en la segunda planta, un equipo en la sala del Departamento de Edificación y Obra Civil, en la tercera planta, y 2 equipos en el tejado, sobre cada uno de los voladizos laterales que hay entre el bloque A y el módulo de escaleras, y uno en la zona de prácticas de obra civil, situada en el exterior del bloque A, que se trasladará junto al RAR durante la campaña de medidas radar. Para la instalación de este último equipo en la zona de prácticas de obra civil será preciso prever un orificio para sacar la antena GNSS al exterior del edificio.

Los componentes HN1 de todos los sensores están orientados longitudinalmente al edificio, con un azimut de 205º, los componentes HN2 están orientados transversalmente al edificio con un azimut de 295º y finalmente los componentes HNZ corresponden a la orientación vertical.



Anexo II. Protocolo de medidas: edificio Santa Eugènia



Figura 8-4. Plano de las plantas baja y primera del edificio del Instituto Santa Eugènia sobre el que se realizan las medidas de ruido sísmico y RAR.



Figura 8-5. Plano de las plantas segunda y tercera del edificio del Instituto Santa Eugènia sobre el que se realizan las medidas de ruido sísmico y RAR.



Figura 8-6. Vista del alzado del edificio del Instituto Santa Eugènia sobre el que se realizan las medidas de ruido sísmico y RAR. El círculo rojo indica el punto de instalación de los equipos de la cubierta.





Figura 8-7. Ortofoto del edificio del Instituto Santa Eugènia sobre el que se realizan las medidas de ruido sísmico y RAR. El círculo rojo indica el punto de instalación de los equipos de la cubierta y en la zona de prácticas de obra civil.

8.2.3 Datos registrados

Para cada una de las estaciones instaladas se muestran, a continuación, sus principales metadatos:

- Estación: YK.C008
 - o Planta: Baja
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio del registro: 02/05/2019
 - o Fin del registro: 09/05/2019
- Estación: YK.C009
 - o Planta: Primera
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio del registro: 02/05/2019
 - o Fin del registro: 09/05/2019
- Estación: YK.C010
 - o Planta: Segunda
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2
 - o Inicio del registro: 02/05/2019
 - Fin del registro: 09/05/2019
- Estación: YK.C011
 - o Planta: Tercera.
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2.
 - o Inicio del registro: 02/05/2019.
 - Fin del registro: 09/05/2019.
- Estación: YK.C012
 - o Planta: Cubierta.
 - o Canals: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2.
 - Inicio del registro: 09/05/2019.
 - Fin del registro: 09/05/2019.



Per una cultura comuna del risc sísmic Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

- Estación: YK.C013
 - o Planta: Cubierta.
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2.
 - o Inicio del registro: 09/05/2019.
 - Fin del registro: 09/04/2019.
- Estación: YK.C014
 - o Planta: Baja (prácticas obra civil).
 - o Canales: 00.HNZ, 00.HN1, 00.HN2.
 - Inicio del registro: 02/05/2019.
 - Fin del registro: 09/05/2019.

8.2.4 Distribución de los datos registrados

Esta distribución de datos se realiza mediante el servidor FDSN (*International Federation of Digital Seismograph Networks*) del ICGC <u>http://ws.icgc.cat/fdsnws</u> bajo licencia *Creative Commons* CC BY 4.0.

Tanto los datos registrados como los metadatos de las estaciones utilizados para su registro se distribuyen utilizando los servicios estándar *fdsnws-dataselect* versión 1.1 y *fdsnws-station* versión 1.1.

8.3 Calendario

El calendario previsto para la realización de las medidas de ruido en el edificio del Instituto Santa Eugènia es el siguiente:

- 2 de mayo de 2019
 - Instalación de los 5 acelerómetros previstos en las plantas baja (Departamento de Idiomas), primera (Departamento de Castellano), segunda (Departamento de Matemáticas), tercera (Departamento de Edificación y Abre Civil) del edificio y en la zona de prácticas de obra civil.
- 9 de mayo de 2019
 - Instalación de los 2 acelerómetros de la cubierta y traslado del acelerómetro instalado en la zona de prácticas de obra civil junto al RAR,
 - o medidas RAR
 - o desinstalación de los acelerómetros i RAR.
- 10 de mayo de 2019
 - Eventualmente, si se considera necesario, se harían medidas adicionales con el equipo RAR.
 - En este caso, el día 9 sólo se desinstalarán los acelerómetros de la cubierta y el RAR, los cuales se volverían a reinstalar a primera hora del día 10.
 - o Una vez finalizadas todas las medidas, desinstalación de todos los equipos.



 9 Anexo III.
Protocolo de medidas en el Centro Hospitalario de Bagnères de Bigorre.







Projecte cofinançat pel Fons Europeu de Desenvolupament Regional (FE-





Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

Autores:

Caterina Negulescu²

Medidas de ruido sísmico en el Centro Hospitalario de Bagnères de Bigorre



Informe - Acció 4





Anexo III. Protocolo de medidas: Centro hospitalario de Bagnères de Bigorre.

Palabras clave : estructura, edificio, ruido por vibración ambiental, período de vibración, mitigación riesgo sísmico, radar

- 1. ICGC : Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
- 2. BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 3. UPC : Universitat Politècnica de Catalunya
- 4. DIGC : Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
- 5. IEA : Institut d'Estudis Andorrans
- 6. ENIT : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
- 7. CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique Délégation Alsace
- 8. EPLFM : Entente pour la Forêt Méditerranéenne
- 9. DW : Deveryware
- 10. ACE : Associació de Consultors d'Estructures

© «2019», Projecte POCRISC



Medidas de ruido sísmico en el Centro Hospitalario de Bagnères de Bigorre

9.1 Proyecto POCRISC

El objetivo de POCRISC es promover una cultura común de riesgo sísmico en los Pirineos: desarrollar enfoques compartidos de evaluación de riesgo para los servicios encargados de la prevención, favorecer la difusión de una información común a las autoridades locales y al público en general y proporcionar herramientas de apoyo a la toma de decisiones, adaptadas a las necesidades de los gestores de crisis. El perímetro del proyecto es el área transfronteriza de las regiones de Cataluña, en España, Occitania, en Francia y Andorra.

Uno de los principales resultados es una herramienta de estimación de daños, en tiempo casi real, a nivel municipal, destinada a los actores de la gestión de riesgos. Otro resultado es el desarrollo de una aplicación para teléfonos inteligentes (smartphone) para evaluar la vulnerabilidad sísmica y los daños posteriores al terremoto, que será útil para los servicios de gestión de crisis. Otro valor añadido del proyecto será una guía de buenas prácticas para reducir la vulnerabilidad a los terremotos, dirigida a ingenieros, arquitectos y gestores. Todos estos resultados se implementarán mediante colaboraciones conjuntas de los servicios transfronterizos de socorro, con ejercicios de crisis sísmica.

Los resultados obtenidos, a escala del proyecto, serán transferibles a todo el macizo pirenaico. Los datos estarán accesibles en el sitio web en construcción: <u>www.pocrisc.eu</u>

9.2 Medidas de ruido por vibración ambiental en *El Centro Hospitalario*

La vulnerabilidad de estructuras sometidas a acciones dinámicas es un dominio de investigación muy activo, estos últimos años. Las instrumentaciones en edificios en forma de redes de registro de ruido por vibración ambiental deberían mejorar nuestros conocimientos, aún limitados del comportamiento dinámico de las estructuras.

El objetivo de estas mediciones es evaluar el período natural de vibración de las construcciones y comprender el comportamiento de sus estructuras resistentes durante los terremotos. Es particularmente interesante auscultar los edificios piloto muchas veces, con el propósito de seguir la evolución de sus características dinámicas a lo largo del tiempo, antes y después de la solicitación sísmica (*Structural Health Monitoring*).

En este contexto, se efectuarán mediciones de ruido por vibración ambiental en el edificio "Medicina".

9.2.1 Ejemplo de instrumentación

El nivel de conocimiento de las características dinámicas de la estructura está relacionado con el número de sensores distribuidos en el edificio y conectados a una misma unidad central de adquisición de datos. El esquema de la Figura 9-1 a) representa un diagrama clásico de instrumentación para determinar el período natural de vibración de un edificio. La Figura 9-1 b) es un ejemplo de tratamiento de los registros. Se pondrá en marcha un esquema de instrumentación más complejo para el Edificio "*Medicina*", con el fin de identificar, además del período natural de vibración, varios puntos de eventual vigilancia: torsión, comportamiento de las uniones entre los diferentes bloques que constituyen el edificio, concentración de restricciones (Figura 9-2).





Figura 9-1. a) Ejemplo de instrumentación de edificio. b) Ejemplo de tratamiento de los registros. Cálculo del período propio de vibración.



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

9.2.2 Equipamiento

En el marco de la campaña de medición, se implementarán dos tipos de instrumentación:

- Velocímetros Güralp (BRGM) y acelerómetros PCB ²⁵ (ENIT) que se instalarán en el interior del edificio en diferentes configuraciones.
- Un instrumento de radar (BRGM) que hará medidas del exterior del edificio

Velocímetros Güralp

CRIS(

El sistema de adquisición de datos de ruido sísmico en red consta de 8 estaciones Güralp (con sismómetros 10 s CMG-6TD) y un sistema de adquisición wifi. Los instrumentos se muestran en la Figura 9-3 y en la Figura 9-4.



Figura 9-2. Ejemplo esquemático de instrumentación, por planta, del edificio "Medicina" (sensores en verde). Figura extraída del informe INGENIERIE IOSIS).



Figura 9-3. Presentación de material de medidas de ruido por vibración ambiental.

²⁵ <u>https://www.pcb.com/sensors-for-test-measurement</u> <u>https://www.pcb.com/applications/test-and-measurement/infrastructuretestingandmonitoring</u>

Acelerómetros PCB y estación de adquisición.

El sistema de adquisición se compone de una estación y 4 sensores PCB cableados (longitud del cable 50 m). Estos sensores de pequeñas dimensiones (diámetro 1,5 cm y espesor 2 cm) permiten la adquisición de datos en una banda de frecuencias entre 0,06 Hz y 450 Hz, garantizando así, una calidad óptima de las medidas acelerométricas (Figura 9-5).



Figura 9-4.- Presentación de funcionamiento de una red de registro.





Figura 9-5 Sensores PCB y estación de adquisición

Instrumento Radar

OCRISC

El radar interferométrico de apertura real, apoyado en el suelo (GBInRAR) (Figura 9-6), ha sido propuesto, recientemente, como instrumento de medida para la vigilancia dinámica de grandes estructuras, como puentes, torres, edificios y presas, que actualmente se realiza mediante redes de acelerómetros. El uso de radar interferométrico tiene varias ventajas como la velocidad de instalación, la posibilidad de monitorear áreas / objetos inaccesibles, áreas / objetos en los que la masa de los acelerómetros puede influir en las mediciones.

El IBIS-FS ²⁶, de IDS GeoRadar, es un radar interferométrico innovador para aplicaciones en los dominios de la explotación minera, ambientales y de ingeniería civil.

²⁶ Radar interferométrico. IBIS-FS de IDS GeoRadar. <u>https://idsgeoradar.com/products/interferometric-radar/ibis-fs</u> (acceso: 19/10/2021)



Anexo III. Protocolo de medidas: Centro hospitalario de Bagnères de Bigorre.



Figura 9-6. Presentación del Radar.

9.3 Participantes en las medidas

Tabla 9-1. La lista completa de personas participantes en las medidas.

Nombre	Institución	Contacto
Caterina Negulescu	BRGM	0633411368
Benjamin François	BRGM	
Colombain Alison	BRGM	
Daniel Raucoules	BRGM	
Bouroullec Isabelle	BRGM	i.bouroullec@brgm.fr
Antonio Marchese	UNISA/ BRGM	amarchese@unisa.it
Matthias Barus	ENIT	matthias.barus@enit.fr
Hélène Welemane	ENIT	helene.welemane@enit.fr
Olivier Dalverny	ENIT	olivier.dalverny@enit.fr
Jean-Pierre Faye	ENIT	jean-pierre.faye@enit.fr
Luis G. Pujades	UPC	lluis.pujades@upc.edu

El evento será cubierto por el C-PRIM ²⁷ de Lourdes, responsable de comunicación del proyecto Pocrisc. Se realizarán fotos y videos de la instrumentación.

Tabla 9-2.	La lista de	personas	involucradas
------------	-------------	----------	--------------

Nom	Institution	Contact
Oriane Guilhot	C'Prim Lourdes	contact@c-prim.org
Eric Dufour	Obatala Bagnères de Bigorre	ed@obatala.fr

9.4 Calendario

CRISC

El calendario previsto para las visitas es la semana del 8 al 13 de abril. El BRGM/ENIT tienen previsto dedicar esta semana de trabajo en el lugar del Hospital, tiempo variable en función de la superficie del edificio a visitar/instrumentar y de la organización general del lugar del establecimiento. Un calendario más preciso se enviará oportunamente, antes de la llegada al lugar.

²⁷ Le Centre Pyrénéen des Risques Majeurs (C-PRIM): <u>https://www.c-prim.org/</u> (acceso: 19/10/2021)

10 Annex IV. Instrumentation du bâtiment 6 de l'hôpital de Bagnères de Bigorre.



Annex IV. Instrumentation du bâtiment 6 de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre

Instrumentation du bâtiment 6 de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre par mesures vélocimétriques, accélérométriques et radar - avril 2019

Note non technique - Action 4





Rédacteur : BRGM-ENIT-UPC

Octobre 2019



Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismiq**ue**

Auteurs :

BRGM: C. Negulescu, A. Colombain, D. Raucoules, B. François, I Bouroullec, A. Marchese, N. Taillefer. ENIT: M. Barus, H. Welemane, J.-P. Faye, O. Dalverny. UPC: L. Pujades. *Avec la collaboration*: Hôpital de Bagnères-de-Bigorre : J.-P. Andry, C. Pécastaign.

Mots-clés: Projet Interreg Poctefa, Fonds Européen de Développement Régional, Action 4, mesures vélocimétriques, mesures accélérométriques, mesures radar, bâtiment de gestion de crise, Bagnères-de-Bigorre, Hautes-Pyrénées, Occitanie, France, Europe

- 1. ICGC : Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
- 2. BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 3. UPC : Universitat Politècnica de Catalunya
- 4. DIGC : Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
- 5. IEA : Institut d'Estudis Andorrans
- 6. ENIT : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
- 7. CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique Délégation Alsace
- 8. EPLFM : Entente pour la Forêt Méditerranéenne
- 9. DW : Deveryware
- 10. ACE : Associació de Consultors d'Estructures

© Octobre 2019, projet POCRISC

Avant-propos

L'équipe de projet « Pocrisc » de l'action 4 remercie tout le personnel de l'Hôpital de Bagnèresde-Bigorre qui a permis de réaliser cette instrumentation dans un bâtiment en fonctionnement et a bien voulu porter à la connaissance du projet tous les éléments nécessaires au bon déroulé de l'instrumentation.

Synthèse

La vulnérabilité des structures soumises à des actions dynamiques est un domaine de recherche très actif ces dernières années. Les instrumentations en bâtiment sous la forme de réseaux d'enregistrement du bruit de fond devraient permettre d'améliorer nos connaissances encore limitées sur le comportement dynamique des structures.

L'objectif de ces mesures est d'évaluer la période propre de vibration des constructions et de comprendre leur comportement pendant les séismes. Il est notamment intéressant d'ausculter des bâtiments pilotes, utiles en gestion de crise, plusieurs fois, afin de suivre l'évolution de leurs caractéristiques dynamiques au cours du temps, avant et après sollicitation sismique pour la surveillance structurelle.

Dans ce cadre, des mesures, vélocimétriques, accélérométriques de bruits de fond et radar sont effectuées dans le centre hospitalier de Bagnères-de-Bigorre sur le Bâtiment 6 dit «Médecine».


10.1 INTRODUCTION

Le projet POCRISC EFA158/16 est financé à 65% par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) au travers du programme Espagne France Andorre Interreg V-A (POCTEFA 2014-2020). L'objectif du projet Interreg Poctefa « POCRISC » est de promouvoir une culture commune du risque sismique dans les Pyrénées : développer des approches partagées pour l'évaluation du risque pour les services chargés de la prévention, favoriser la diffusion d'une information commune aux autorités locales et au grand public et fournir des outils d'aide à la décision adaptée aux besoins des gestionnaires des crises.

Le périmètre du projet est la zone transfrontalière des régions de la Catalogne en Espagne, d'Occitanie en France et d'Andorre.

Un des objectifs du projet est le développement d'un outil d'estimation des dommages en temps quasi réel, à niveau communal, destiné aux acteurs de la gestion des risques. Il est également envisagé de créer une application smartphone pour évaluer la vulnérabilité sismique et les dégâts post-séisme qui sera utile aux services de gestion des crises. Une autre contribution du projet sera un guide sur les bonnes pratiques pour la réduction de la vulnérabilité vis-à-vis des séismes, à destination des ingénieurs, architectes et gestionnaires. Tous ces résultats seront mis en application au travers de collaborations conjointes des services transfronta-liers de secours avec des exercices de crise sismique. Les avancées réalisées dans le cadre du projet POCRISC seront transférables à l'ensemble du massif pyrénéen. Les données seront accessibles sur le site internet : <u>https://pocrisc.eu.</u>

L'instrumentation du bâtiment 6 de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre s'inscrit dans l'action 4 du projet dédié à la réduction de la vulnérabilité des bâtiments. Cette action, pilotée par l'UPC et l'ENIT, est consacrée:

- À l'évaluation du comportement sismique des bâtiments essentiels à partir d'instrumentations innovantes (accéléromètres qui mesurent l'accélération linéaire selon les trois axes orthogonaux (x; y; z) et interférométrie à base de radar RAR);
- 2. Au développement de méthodes et d'outils d'aide à la prise de décision pour la réduction de la vulnérabilité des bâtiments;
- 3. À la mise en place d'un outil web interactif qui permettra d'évaluer le niveau de vulnérabilité des bâtiments essentiels face au risque sismique.

Cette note non technique présente les premiers résultats de l'instrumentation d'un bâtiment dans le cadre du point 1 « évaluation du comportement sismique des bâtiments » de l'action 4 du projet.



10.1.1 <u>Type des capteurs</u>

Dans le cadre de la campagne des mesures deux types d'instrumentations sont mises en place des vélocimétres Güralp (BRGM) et des accéléromètres piézoélectriques PCB (ENIT) installés à l'intérieur du bâtiment en différentes configurations,

Un instrument Radar (BRGM) qui fera les mesures de l'extérieur du bâtiment.

Captures vélocimétriques et accélérométriques

Vélocimétres Güralp et réseau d'enregistrement

Le système d'acquisition de données de bruit de fond sismique en réseau est composé de 14 stations Güralp (avec sismomètres 10 s CMG-6TD) et d'un système d'acquisition wifi. Les instruments sont présentés sur les illustrations suivantes.





Figure 10-1. Présentation du matériel de mesure de bruit de fond GÜRALP.



Wireless communication makes data retrieval easy.





Pour une culture commune du risque sismique Por una cultura común del riesgo sísmico Le système d'acquisition est composé d'une station et de 4 capteurs PCB piézoélectriques filaires (longueur de câble 50 m). Ces capteurs de faibles encombrement (diam. 1,5 cm et L 2 cm) permettent l'acquisition de données sur une plage de fréquences allant de 0,06 Hz à 450 Hz et assurent ainsi une qualité optimale des mesures accélérométriques.



Figure 10-3. Capteurs PCB et station d'acquisition

Instrument radar interférométrique (RAR)

Le radar interférométrique à ouverture réelle basé au sol (GBInRAR) a été récemment proposé en tant qu'instrument de mesure pour la surveillance dynamique de grandes structures, telles que des ponts, des tours, des bâtiments et des barrages, dont le suivi est réalisé à l'aide de réseaux d'accéléromètres. L'utilisation du radar interférométrique a plusieurs avantages comme la rapidité de l'installation, la possibilité de surveiller des zones/objets non accessibles, des zones/objets pour lesquels la masse des accéléromètres peut avoir une influence sur les mesures.

IBIS-FS d'IDS GeoRadar est un radar interférométrique innovant pour des applications dans les domaines de l'exploitation minière, de l'environnement et du génie civil.



Figure 10-4. Présentation du Radar



10.2 Instrumentation du bâtiment B6

10.2.1 Particularités du bâtiment 6

Les caractéristiques du bâtiment sont les suivantes :

Date de construction: 1971, sur une conception de 1967 (*a priori*, hors d'application des règles de construction parasismique de 1969 dites PS69.)

Travaux: 1985 et 2018 (nouvelles trémies).

Il existe deux joints de dilatation (la fonction est à vérifier).

Les étages et le rez-de-chaussée montrent des différences de structure importantes, avec des reports de charge et des interruptions de murs. C'est particulièrement le cas dans les salles d'activités communes et le hall d'entrée.

Etages: R+4 avec sous-sol partiel / hauteur totale de 19m (hors toiture) Dimensions du bloc principal (hors excroissance) en plan : 77mx16m

Surface: 1685m² par niveau courant, sous-sol partiel, et extension RdC le long de la façade (7m de large).



Figure 10-5. Bâtiment 6 dit « Médecine » de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre avec les travaux de 1985 et 2018 (source archives du bâtiment)

En ce qui concerne le comportement structurel du bâtiment 6, deux points géométriques principaux ont été pris en compte pour la position des capteurs : la présence de joints entre les trois blocs et l'irrégularité du bloc central qui présente une partie hexagonale par rapport à la partie rectangulaire régulière.

De plus, la différence de rigidité de l'élément structurel de la structure a été prise en compte pour l'instrumentation. La partie principale de la structure est un cadre en béton armé, mais certains points de rigidité supérieure représentés par l'escalier et les ascenseurs dans la partie centrale et par les escaliers d'extrémité dans les deux blocs des extrémités, peuvent induire des effets de torsion.





Figure 10-6. Modélisation IOSIS du bâtiment 6 dit « Médecine » de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre (source: archives du bâtiment)

10.2.2 Configuration des mesures

Pour les mesures, le bâtiment 6 étant utilisé, la fonctionnalité du bâtiment est prioritaire par rapport à l'installation des capteurs, par conséquent, une partie des positions souhaitées des instruments ne sont pas accessibles, et une adaptation a été nécessaire.

Plusieurs configurations ont été établies afin de recueillir le comportement de la structure et d'aider à comprendre les spécificités structurelles.

Mesures vélocimétriques et accélérométriques

Les capteurs de référence vélocimétriques Güralp pour les trois configurations sont les capteurs placés au niveau du sol à l'intérieur de la structure. La position de ce capteur est inchangée pendant les trois mesures. Pour chaque configuration, il y a au moins un capteur au niveau de la dalle du rez-de-chaussée et un deuxième capteur sur le terrain naturel près de la structure. Ces capteurs sont utiles pour vérifier l'interaction éventuelle entre la structure et le sol. Dans le même temps, ces capteurs sont utilisés pour faire le rapport entre les capteurs au niveau supérieur de la structure et au niveau du sol afin d'éliminer la fréquence non liée au comportement structurel.

- La première configuration concentre presque tous les capteurs sur le dernier étage accessible de la structure (4^{-ème} étage). Cette configuration permet d'étudier le comportement global de la structure et les effets de torsion dus soit aux irrégularités géométriques, soit aux irrégularités de rigidité. Dans le même temps, trois autres capteurs ont été placés au rez-de-chaussée, au sous-sol et sur le terrain naturel près de la structure.
- La seconde configuration recherche la déformation verticale modale de la structure en plaçant un capteur à chaque niveau de la structure, du niveau du sol au 4^{-ème} niveau. Dans cette configuration, le bloc droit et le bloc central ont été étudiés ensemble.
- La troisième configuration a le même objectif que la deuxième configuration, mais cette fois les capteurs sont placés dans le bloc gauche de la structure. Ce bloc gauche de la structure a la particularité de présenter un tunnel au rez-de-chaussée, ce qui fait qu'il manque des éléments structuraux de poutres-colonnes qui sont remplacés par des murs en béton armé.





Figure 10-7. Illustration de la configuration 1 avec les capteurs placés sur le dernier plancher accessible du bâtiment.

En ce qui concerne les accéléromètres PCB, ceux-ci ont été placés au sein de la cage d'escalier centrale du bâtiment, à plusieurs étages (1^{er}, 2^{-ème}, 3^{-ème}, et 4^{-ème} étages). Ceux-ci visent à des acquisitions dans les directions longitudinales et transversales du bâtiment correspondant aux mouvements prépondérants du bâtiment (soit selon les axes orthogonaux X et Y, Figure 10-7). Cette configuration permet de mesurer les accélérations induites par un bruit blanc et ainsi d'étudier le comportement dynamique de la partie centrale du bâtiment. L'acquisition de ces informations à plusieurs étages du bâtiment conduit à une description complète des mouvements de la structure sur toute sa hauteur.

Mesures radar interférométriques (RAR)

Trois configurations ont été réalisées pour les mesures RAR. La première configuration comporte deux mesures d'environ 1 heure. Les deux autres configurations ont une mesure d'environ 2-3 heures.

- La première configuration est liée au comportement transversal (selon l'axe Y) de la structure réalisée à partir du sol.
- La seconde configuration est liée au comportement transversal de la structure réalisé depuis le côté opposé de la structure et depuis le toit en terrasse du rez-de-chaussée.
- La troisième configuration est liée au comportement de l'évidement dans le sens longitudinal (selon l'axe X), qui est un petit espace créé par la construction d'une partie d'un mur plus en retrait du reste.





Distance in LOS 22.63m Angle between LOS and horizontal 42° Perpendicular distance to building 16 m Distance to building on the vertical of LOS 16.8m Sampling frequency 200Hz Signal SNR to 18, 22, 24 and 27 m

Figure 10-8. Illustration de la configuration 1 du Radar liée au comportement transversal (axe Y) de la structure.

10.3 PREMIERS RESULTATS

10.3.1 Séries temporelles, Spectres de Fourier, Périodes de vibration

Avant de faire des études plus détaillées, les signaux enregistrés sont traités dans le domaine temporel et le domaine fréquentiel en utilisant la Transformée de Fourier. Cela nous permet d'avoir une première estimation du comportement du bâtiment et de ses périodes de vibration. Dans une étude sismique de type dimensionnement ou renforcement du bâtiment, les périodes de vibrations associées à la masse du bâtiment sont utilisées pour calculer l'intensité des forces latérales auxquelles le bâtiment sera soumis pendant le séisme. Ainsi, une bonne estimation de la période de vibration du bâtiment est primordiale pour le calcul de la résistance du bâtiment face aux agressions sismiques.

La Figure 10-9 représente le signal (vitesse) enregistré par les vélocimètres en fonction du temps sur 300 secondes. Il est à noter une différence d'amplitude importante entre les capteurs qui se trouvent au RDC (63 et 64) et les autres capteurs qui sont dans les étages supérieurs. Par ailleurs, des capteurs ont un signal uniforme et d'autres ont un signal bruité.

La Figure 10-10 quant à elle illustre les acquisitions des accéléromètres pour la partie centrale du bâtiment et pour les quatre étages étudiés sur une durée de 120 secondes. On note une cohérence globale de la réponse tant pour l'intensité du signal que pour son évolution dans le temps.





Figure 10-9. Enregistrements de la direction transversale (axe Y) lors de la première configuration des capteurs Güralp.





Figure 10-10. Enregistrements des capteurs PCB dans la direction longitudinale (axe X) au sein de la cage d'escalier centrale du bâtiment (accélérations en fonction du temps pour les quatre étages).

La première approche pour la détermination de la période de vibration est la transformée de Fourier. La Figure 10-11 montre les spectres de Fourier pour les enregistrements dans le sens transversal et dans le sens longitudinal. Ces spectres permettent d'identifier la période de vibration du bâtiment dans les deux sens. Pour le sens longitudinal (axe Y) du bâtiment, le comportement est assez homogène avec une amplification maximale de tous les capteurs (indépendamment de leur position sur le plancher) sur la fréquence de 2.66Hz (soit 0.37 secondes).



Annex IV. Instrumentation du bâtiment 6 de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre



Figure 10-11. Spectres de Fourier pour les enregistrements dans le sens transversal Y (gauche) et dans le sens longitudinal X (droite)



Figure 10-12. Spectres de Fourier pour les enregistrements des capteurs PCB dans le sens transversal (axe Y).

Dans le sens transversal (axe Y) du bâtiment, le comportement est moins homogène avec une amplification maximale des capteurs qui change en fonction de leur position sur le plancher. Cela signifie que dans le sens transversal l'amplification de mouvement est différente entre le centre du bâtiment et ces deux extrémités. La fréquence du corps central issue des mesures vélocimétriques est de 3.845Hz (soit 0.26 secondes), tandis que les fréquences les plus amplifiées sont de 6.061Hz (soit 0.16 secondes) pour le bloc de droite et de 5.688Hz (soit 0.18 secondes) pour le bloc de gauche. Notons que les données accélérométriques confortent les valeurs obtenues par les vélocimètres sur la partie centrale (fréquence de 3.76 Hz, soit 0.27 s). La différence de fréquences entre les blocs de droite et de gauche est certainement liée aux joints transversaux. Les analyses qui vont se poursuivre avec un modèle numérique du bâtiment en liaison avec les mesures de bruit ambiant effectuées étudieront plus en détail le fonctionnement des joints.

Sens d'analyse du	Période (seconde)				
bâtiment	Gauche	Centre	Droite		
Transversal	0.18	0.26 (0,27*)	0.16		
Longitudinal	0.37	0.37 (0,36*)	0.37		

Figure 10-13. Périodes de vibration du bâtiment dans les sens longitudinal et transversal issues des mesures vélocimétriques et accélérométriques (*).



10.3.2 Analyse modale opérationnelle pour les essais in situ des structures

Dans le cas de l'analyse modale opérationnelle in situ, une partie ou la totalité des forces d'excitation sont inconnues. Cela signifie, dans le cadre théorique, que l'analyse modale opérationnelle doit être différente de la relation d'entrée-sortie connue (déterministe) de la fonction de réponse en fréquence. Dans ce contexte, le cadre théorique passe à un cadre stochastique où l'entrée est maintenant supposée être un processus dit stochastique. La déformation modale issue des mesures vélocimétriques est réalisée avec le logiciel ARTEMIS, tandis que les acquisitions accélérométriques sont traitées avec le logiciel TESTLAB. Le cadre stochastique utilisé dans l'analyse modale opérationnelle suppose que l'excitation qui alimente le système est un processus stochastique dit de bruit blanc gaussien. Ceci peut se traduire par une entrée d'excitation ayant le même niveau d'énergie à toutes les fréquences étudiées. Cette seule hypothèse implique que tous les modes sont excités de la même façon.

Cependant, ce n'est pas le cas dans la réalité car il y a toujours des entrées à certaines fréquences qui contiennent plus d'énergie que d'autres. Pour compenser cela, les forces d'excitation inconnues modélisées dans ce cadre stochastique sont supposées être le résultat d'une mise en forme du bruit blanc. La mise en forme est supposée être faite par un filtre linéaire qui peut transformer le bruit blanc plat en une forme correcte ayant une distribution d'énergie comme les véritables forces d'excitation inconnues.

Ainsi, dans ce cadre, la réponse d'une structure est supposée être le résultat d'un système combiné composé du système structurel contenant la dynamique de la structure testée ainsi que du filtre d'excitation qui fournit les forces d'excitation inconnues non mesurables.



Figure 10-14. Déformée modale du bâtiment dans le sens transversal Y correspondante à la période de vibration de 0.26 s (© logiciel ARTEMIS).



Annex IV. Instrumentation du bâtiment 6 de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre



Figure 10-15. Déformée modale du bâtiment dans le sens longitudinal X correspondante à la période de vibration de 0.37 s (© logiciel ARTEMIS)





Figure 10-16. Direction transversale Y combinée à la torsion sur le bâtiment (© logiciel ARTEMIS)

Les résultats présentés ici sont des résultats préliminaires basés sur le premier traitement des enregistrements des bruits ambiants réalisés à l'hôpital. Le modèle numérique du bâtiment est en cours de réalisation. Ce modèle sera, premièrement, calé avec les enregistrements effectués à l'hôpital, ensuite, il sera soumis à des accélérogrames dynamiques afin d'étudier le comportement du bâtiment sous sollicitation sismique. Les résultats de cette 2^{-ème} partie de l'étude seront disponibles au cours du 1^{er} trimestre 2020.





Figure 10-17. Déformée modale de la partie centrale du bâtiment dans le sens transversal Y correspondante à la période de vibration de 0,27 s (logiciel LMS TESTLAB).

Le projet européen H2020 TURNKey, présenté dans l'annexe 2, propose de saisir l'opportunité d'utiliser les premiers résultats du projet Pocrisc pour s'investir ensuite dans l'analyse de la réponse sismique de ce bâtiment.



10.4 Annexe 2: Description de projet H2020 : TURNkey alerte précoce



10.4.1 Projet européen Horizon- 2020 « TURNkey »

Vers l'amélioration de la résilience des sociétés urbaines contre les périls sismiques à travers le développement de systèmes multi-capteurs d'alerte précoce et de réponse rapide

1. Contexte

Le BRGM est partenaire du projet de recherche TURNkey (<u>https://earthquake-turnkey.eu</u>). L'objectif de ce projet est de la mettre en place une plateforme multi- capteurs pour l'alerte et la réponse en temps réel en cas de séisme.

Dans ce cadre, le massif des Pyrénées a été retenu comme une des 6 zones d'étude du projet, pour le déploiement de capteurs sismiques «low cost» (accéléromètres RaspberryShake). Ces capteurs, en complément du réseau accélérométrique déjà existant, peuvent être installés à l'intérieur ou à proximité de structures ou infrastructures critiques : grâce à la mise en place d'un flux continu de données en temps réel, il est ainsi possible de caractériser les vibrations induites en cas de séisme et de détecter de potentiels dommages dans un délai très court.

2. Informations générales sur le consortium

Le projet TURNkey est coordonné par NORSAR (Réseau de surveillance sismique norvégien) et est composé d'une vingtaine de partenaires européens (universités, centres de recherche, observatoires nationaux, PMEs).

Participant	Participant organization name	Short name	Country
1	Stiftelsen NORSAR	NOR	Norway
2	Stichting Deltares	DEL	Netherlands
3	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut	KNMI	Netherlands
4	Bureau de Recherches Géologiques et Minières	BRGM	France
5	Euro-Mediterranean Seismological Centre	EMSC	France
6	Haskoli Islands (University of Iceland)	Ulce	Iceland
7	Fondazione Eucentre	EUC	Italy
8	University of Strathclyde	UStr	UK
9	Bauhaus-Universität Weimar	BUW	Germany
10	Universidad de Alicante	UA	Spain
11	Anglia Ruskin University Higher Education Corporation	ARU	UK
12	Università degli Studi di Bergamo	UBgm	Italy
13	University College London	UCL	UK
14	Institutul National de Cercetare si Dezvoltare pentru Fizica Pamantului	INFP	Romania
15	YetItMoves! SRL	YET	Italy
16	Gempa GmbH	GMP	Germany
17	National Observatory of Athens	NOA	Greece
18	Nutcracker Research Ltd.	NTC	UK
19	Beta 80 SpA	B80	Italy
20	Siminn hf.	SIM	Iceland
21	Panepistimio Patron (University of Patras)	UPat	Greece



Six zones d'étude sont prévues pour l'application et la calibration des méthodes d'alerte précoce et/ou de réponse rapide qui seront développées :

- CS-1 : Bucarest, Roumanie ;
- CS-2 : Massif des Pyrénées, France ;
- CS-3 : Hveragerði et Húsavík, Islande;
- CS-4 : Patras et Aegio, Grèce ;
- CS-5 : Installation portuaires de Gioia Tauro, Italie ;
- CS-6 : Province de Groningen, Pays-Bas.



3 Description technique

Le principal produit du projet sera le développement d'un système d'information et d'alerte sismique basé sur des capteurs à bas coût, qui puisse être déployé comme un système clé-enmain (*TURNkey*) complétement opérationnel.

Description des capteurs RaspberryShake RS-4D fournis par Gempa Gmbh dans le cadre du projet :

https://shop.raspberryshake.org/product/turnkey-iot-home-earth-monitor-rs-4d/





Taille : environ 10x10 cm

Il est prévu une installation semi-permanente (au moins jusqu'à la fin du projet – juin 2022) de quelques capteurs RS-4D : le flux de données en temps réel peut alors être traité à distance par le BRGM Orléans, afin de détecter des changements dans les propriétés dynamiques de la structure en cas de séisme (détection de l'apparition de dommages ou de déformations excessives).

Grâce aux actions d'instrumentation menées dans le cadre du projet POCRISC (conjointement avec l'ENIT), nous disposons d'un modèle structurel de l'hôpital de Bagnères-de-Bigorre, ainsi que de mesures de haute qualité en divers points du bâtiment. Fort de ces connaissances, nous serions alors en mesure de sélectionner les points de mesures les plus pertinents et d'assurer une surveillance en quasi-temps-réel de la structure.



11 Anexo V. Informe técnico sobre las medidas Radar adquiridas en el edificio del "Institut Santa Eugènia" en Girona





Informe técnico sobre las medidas Radar adquiridas delante del edificio del "Institut Santa Eugènia" en Girona adquiridas el 9 de mayo 2019

Castelldefels, 10 septiembre 2019





Fundació Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya

NIF	ES G62616586				
Persona de contacto	Guido Luzi				
Dirección	Parc Mediterrani de la Tecnologia				
	Av. Carl Friedrich Gauss 7				
	08860 Castelldefels (Barcelona)				
	España				
Teléfono	93 645 29 00				
Fax	93 645 29 29				
e-mail	info@cttc.es				
Cliente:	Universitat Politècnica de Catalunya				
Persona de contacto	Prof. Lluis Pujades				
Dirección	ETS Enginyers de Camins, Canals i Ports				
	Jordi Girona 1-3, Edifici D2				
	08034 Barcelona				
Teléfono	+34 03 401 7258				
e-mail	iiuis.pujades@upc.edu				

Proyecto: POCRISC

Titulo:

Informe técnico sobre las medidas Radar adquiridas delante del edificio del "Institut Santa Eugènia" en Girona adquiridas el 9 de mayo 2019

Para:

Prof. Lluis Pujades Universitat Politècnica de Catalunya ETS Enginyers de Camins, Canals i Ports Jordi Girona 1-3, Edifici D2 08034 Barcelona Iluis.pujades@upc.edu



Tipo de documento:

Resumen técnico sobre la campaña de medidas llevada a cabo por el CTTC en el marco del proyecto POCRISC.

<u>Autor</u>:

Guido Luzi Remote Sensing Department Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA) Division of Geomatics Av. Gauss, 7 E-08860 Castelldefels (Barcelona) Spain E-mail: gluzi@cttc.cat Teléfono: +34 93645 29 00

Lugar y fecha:

Castelldefels, 17/07/2019



Resumen ejecutivo

Este informe describe los resultados de las mediciones realizadas por el CTTC, el 9 de mayo de 2019 en Girona (España), en el marco del proyecto POCRISC, mediante el radar interferométrico disponible. Se ha monitoreado un edificio, el Instituto Santa Eugènia de Girona, desde seis posiciones diferentes, con el propósito de detectar sus principales frecuencias de vibración. Aquí se resumen los resultados obtenidos mediante un procesado básico de las señales registradas, es decir, de las historias temporales de desplazamientos, para los distintos "Radar bins" (contenedores del radar), correspondientes a diferentes zonas del edificio observado. Se muestra el cálculo de la Densidad Espectral de Potencia (Power Spectral Density, PSD) con el método de Welch, de todas las señales adquiridas. Es importante tener en cuenta que la técnica interferométrica sólo puede detectar desplazamientos a lo largo de la dirección LOS. Por lo tanto, el desplazamiento obtenido por radar representa una parte del vector desplazamiento, 3D, que está afectando a la estructura.

Este informe representa la primera fase del procesado. Se ha realizado un análisis preliminar y más detallado de los datos adquiridos desde la posición 2. Los resultados no son muy satisfactorios debido a las difíciles condiciones de medición; se llevará a cabo un procesado más exhaustivo en cooperación con el cliente. Este informe se entrega junto con el conjunto completo de datos sin procesar (historiales temporales de desplazamientos), en formato Excel, para la conveniencia del cliente.



Introducción

En este apartado se resumen las medidas realizadas con el aparato Ibis-S. Una tabla muestra las diferentes geometrías de adquisición y el correspondiente perfil de distancia (*range profile*), es decir, el gráfico que permite identificar las diferentes partes del edificio medido representadas por bins de radar. Los bins con mayor precisión son los correspondientes a la mayor SNR (intensidad del eco de radar recibido, referida al ruido del aparato). Las señales de amplitud de desplazamiento obtenidas mediante las mediciones de fase interferométrica tienen una duración aproximada de 30 minutos y se han muestreado a una frecuencia cercana a 100 Hz (95,69 Hz). La resolución espacial en la dirección de propagación de la señal radar es de 0,5 m; para estimar la distancia inclinada, que se proyecta sobre la estructura, es necesario multiplicar la resolución en rango por un factor relacionado con la inclinación de la superficie iluminada con respecto a la línea de visión del radar; a medida que aumenta la altura de la ubicación del "radar bin", la resolución real empeora.

Se han adquirido diferentes posiciones para caracterizar el desplazamiento en tres direcciones diferentes; además, debido a la alta rigidez del edificio, y al consiguiente pequeño valor de la amplitud de vibración, dedicamos un tiempo a buscar una elevación capaz de proporcionar la SNR más alta: la posición óptima se obtuvo después de algunos ensayos realizados con diferentes geometrías (principalmente cambiando el ángulo de elevación y la distancia).









MCTTC⁹

Posición 1







Detalles



Comentarios

En el análisis espectral llevado a cabo calculando la densidad espectral de potencia (PSD) usando el método de Welch no ponen en evidencia picos para los contenedores (bins) seleccionados.



Posición 2



Comentarios

Aparentemente, también en esta posición, un simple cálculo de la PSD con el método Welch, no evidencia picos para los Radar-bins seleccionados. Haciendo un análisis más profundo enfocándose en cuatro bins (# 20, # 23, # 24, # 25), después de un filtrado (Filtro de Butterworth de tercer orden, Frecuencia baja=3 Hz ; frecuencia alta=7 Hz), algunos picos sobresalen en la porción del espectro donde se espera la frecuencia de vibración del edificio. Los resultados de este procesado se muestran en las siguientes figuras y se comparan con una medición realizada mediante acelerómetros.





Acercándose a la región donde los acelerómetros muestran los picos sobresalientes, ver figura c), podemos ver que los espectros del Radar, aunque se detecten algunos picos en el rango donde se esperaban, según los resultados de los acelerómetros, la situación es muy ruidosa. Esto exigirá un análisis más profundo.



Los valores de los periodos obtenidos a través de la figura anterior, se resumen en la siguiente tabla. Teniendo en cuenta la alta concordancia, podemos considerar que los tres valores detectados por los acelerómetros, salen también por el Radar. La mayor complejidad de los espectros de radar podría estar asociada a un mayor ruido con respecto a los acelerómetros.

Períodos acelerómetros		0.19	0.20		0.24			
Períodos Radar	0.182	0.190	0.200	0.207	0.238	0.274	0.288	0.298/0.30


Posición 3







Posición 4









Posición 5





Posición 6





