



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i6.2403>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

Structural health monitoring of the “La Estancia” building of the Catholic University of Cuenca

Acompanhamento da saúde estrutural do edifício "La Estancia" da Universidade Católica de Cuenca

Norma Fernanda López-Rivera ^I
nflr90@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0219-4980>

Juan Sebastián Maldonado-Noboa ^{II}
jmaldonadon@ucacue.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

Luis Mario Almache-Sánchez ^{III}
lalmaches@ucacue.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4711-5054>

Correspondencia: nflr90@hotmail.com

*Recibido: 30 de septiembre de 2021 *Aceptado: 20 de octubre de 2021 * Publicado: 16 de noviembre de 2021

- I. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes. Unidad Académica de Posgrados, Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador.
- II. Coordinador Académico de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes. Unidad Académica de Posgrados, Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador.
- III. Docente de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes. Unidad Académica de Posgrados, Universidad Católica de Cuenca, Azuay, Ecuador.

Resumen

El monitoreo de la salud estructural de edificios plantea una línea de investigación innovadora, esta investigación consiste en inspecciones periódicas, a un edificio de dos pisos de estructura de acero para medir el daño acumulado ya que presenta vibración excesiva en sus sistemas de piso, el uso de instrumentos tecnológicos permite comprender mejor el comportamiento histerético de la estructura. La zona del Austro tiene un latente peligro sísmico, pues al estar atravesada por algunas fallas geológicas, donde ocurren constantes sismos superficiales o sismos intraplaca a profundidad intermedia que a pesar de ser de magnitudes intermedias afectan a las estructuras causando un daño acumulado.

El efecto de un sismo sobre una estructura, pone a prueba la concepción dinámica de la misma, ya que pasa del estado de reposo en el que se encuentra, a experimentar un movimiento vibratorio, cobrando fuerza su comportamiento estructural, pues su masa y rigidez serán factores que controlen el efecto producido por el sismo.

Por lo que, a nivel global, se ha planteado la pregunta de qué se puede hacer para precautelar la integridad y seguridad de las estructuras. El monitoreo de la salud estructural en edificios permite conocer el periodo fundamental de vibración de una estructura y también del subsuelo. La instrumentación en tiempo real de edificios facilita comprender el comportamiento o su respuesta ante un movimiento sísmico.

Ésta investigación logra determinar los periodos fundamentales de vibración, mediante instrumentación con sensores del edificio del campus de posgrado “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca, Ecuador con una serie de acelerómetros triaxiales que determinaron la aceleración del edificio ante vibraciones forzosas, con la transformada de Fourier se obtuvo la frecuencia fundamental e implícitamente a través de su inversa se determinó el periodo fundamental de vibración de la estructura.

Palabras clave: Monitoreo; salud estructural; vibración; sensores; acelerómetros.

Abstract

Structural health monitoring of buildings raises as innovative line of research, this paper consists in periodic inspections of a two-story steel structure building to measure the accumulated damage since

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

it presents excessive vibration in its floor systems, the use of technological instruments allows a better understanding of the hysterical behavior of the structure.

The south in Ecuador “El Austro” has a latent seismic hazard, since being crossed by some geological faults, where constant surface earthquakes or intraplate earthquakes occur at intermediate depth that despite being of intermediate magnitudes affect the structures causing accumulated damage.

The effect of an earthquake on a structure prove its dynamic conception, since it passes from rest, to experiencing a vibratory movement, gaining strength its structural behavior, since its mass and stiffness will be factors that control the effects produced by the earthquake.

Therefore, at a global level, the question has been raised of what can be done to protect the integrity and security of structures. Structural health monitoring in buildings allows to know the period of vibration of a structure and also of the subsoil. The real-time instrumentation of buildings makes it easier to understand the behavior or their response to a seismic movement.

This research manages to determine the fundamental periods of vibration, by instrumentation with sensors in the building of "La Estancia" of the Catholic University of Cuenca, Ecuador with a series of triaxial accelerometers that determined the acceleration of the building in the face of forced vibrations, with the Fourier transform the fundamental frequency was obtained and implicitly through its inverse the fundamental period of vibration of the structure was determined.

Keywords: Monitoring; structural health; vibration; sensors; accelerometers.

Resumo

O monitoramento da saúde estrutural de edifícios levanta uma linha inovadora de pesquisa, esta pesquisa consiste em vistorias periódicas, a um edifício de estrutura metálica de dois pavimentos para mensurar os danos acumulados por apresentar vibração excessiva em seus sistemas de piso, utilização de instrumentos tecnológicos permite uma melhor compreensão do comportamento histórico da estrutura.

A área do Austro apresenta um perigo sísmico latente, por ser atravessada por algumas falhas geológicas, onde ocorrem constantes sismos de superfície ou intraplacas a profundidades intermediárias que apesar de serem de magnitudes intermediárias afetam as estruturas causando danos acumulados.

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

O efeito de um sismo sobre uma estrutura põe à prova a sua concepção dinâmica, uma vez que passa do estado de repouso em que se encontra, para experimentar um movimento vibratório, ganhando força o seu comportamento estrutural, visto que a sua massa e rigidez serão factores que controlar o efeito produzido pelo terremoto.

Portanto, em nível global, foi levantada a questão do que pode ser feito para proteger a integridade e a segurança das estruturas. O monitoramento da saúde estrutural em edifícios permite conhecer o período fundamental de vibração de uma estrutura e também do subsolo. A instrumentação em tempo real de edifícios torna mais fácil entender o comportamento ou sua resposta a um movimento sísmico. Esta pesquisa consegue determinar os períodos fundamentais de vibração, por meio de instrumentação com sensores do prédio do campus de graduação "La Estancia" da Universidade Católica de Cuenca, Equador com uma série de acelerômetros triaxiais que determinaram a aceleração do edifício em Na face das vibrações forçadas, com a transformada de Fourier foi obtida a frequência fundamental e implicitamente através de sua inversa foi determinado o período fundamental de vibração da estrutura.

Palavras-chave: Monitoramento; saúde estrutural; vibração; sensores; acelerômetros.

Introducción

El Ecuador por su ubicación en el cinturón de fuego del Pacífico y por sus múltiples fallas geológicas es propenso a sismos, razón por la que a lo largo de su historia se han registrado en su territorio diversos eventos telúricos. En 2016 la provincia de Manabí sufrió un sismo catalogado como uno de los eventos más catastróficos en el Ecuador. El sismo provocó el colapso de alrededor de 40 edificios de hormigón armado, ubicados en el centro de Portoviejo (1). No es ajena a esta realidad la ciudad de Cuenca debido a la presencia de varias fallas geológicas, la de mayor influencia en la zona la falla de Girón, provocan movimientos telúricos, de acuerdo a la Red Sísmica del Austro hasta 12 sismos de baja intensidad se registran a diario en el sur del País.

El determinar el comportamiento de una estructura ante un posible sismo, pone a prueba la concepción dinámica de la misma, resultando un dilema predecir su desempeño, ya que, a lo largo de la vida útil, las propiedades mecánicas, las características de los materiales cambian sucesivamente, a esto se añade que algunas estructuras han sido diseñadas y edificadas por códigos antiguos de construcción y de una forma menos rigurosa que establece la normativa actual. Por lo que realizar la evaluación de

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

los periodos de vibración por medio del monitoreo ante vibración forzosas y/o ante posibles sismos permitirá conocer el comportamiento de la estructura. Para evaluar el periodo, frecuencia, de una estructura se aplica mediciones de vibraciones como un método no destructivo, (2).

El monitoreo para evaluar la salud estructural en diferentes obras de Ingeniería Civil, han cobrado mucha importancia en los últimos años. El avance tecnológico ha implicado la utilización de sistemas de bajo costo y de fácil aplicación, como sensores, que adaptados a microordenadores permiten registrar, procesar e informar los datos ante una vibración, *conllevando* a conocer la Salud estructural de una edificación. La importancia de implementar sistemas de monitoreo de la salud estructural a largo plazo para diferentes obras de infraestructura civil es cada día mayor, debido a que se garantiza la salud estructural y se puede formular advertencias de daños estructurales para una etapa de prevención con el fin de evitar reparaciones costosas o incluso el colapso de la estructura, (3).

Los edificios son sistemas estructurales complejos y la aplicación de fórmulas empíricas para encontrar el periodo de acuerdo, (4), no suelen ser realistas, al requerir de datos como rigideces módulos de elasticidad en vez del módulo dinámico y la falta de conocimiento de la longitud efectiva de las columnas, conlleva a resultados erróneos del periodo. Ya que se ha comprobado de forma experimental por calculistas que relacionaron el periodo calculado con mediciones posteriores en la construcción. Varias Fórmulas han sido analizadas en edificios nuevos norteamericanos de acuerdo el tipo de tipología de estructura, para edificios de acero una fórmula del periodo en función de la altura es $T = \frac{H}{160}$, midiendo H en pies. Mientras que en edificios de hormigón armado la formula patrón es $T = 0.05 \frac{H}{\sqrt{D}}$, siendo H la altura en pies y D la dimensión del edificio en dirección de la vibración medida en pies.

El desarrollo del presente trabajo, consiste en determinar los periodos fundamentales de vibración del edificio del campus de posgrado “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca, mediante el monitoreo de su frecuencia ante vibraciones forzosas y/o posibles sismos. Para la instrumentación se empleará un Rasp Berry Shake, un prototipo de sismógrafo basado en acelerómetros triaxiales y un sismógrafo de banda ancha compacto Ref Tek. Las aceleraciones registradas por los instrumentos son filtradas y analizadas, determinando así las respectivas frecuencias y a su vez los periodos.

Métodos ya publicados

Fundamento teórico

La instrumentación sísmica es una herramienta matemática que determina el enlace perfecto entre un modelo matemático computarizado y los datos que se obtienen experimentalmente a través de una medición. Permitiendo obtener un modelo representativo que logre reflejar el comportamiento de una estructura, (5). La importancia de implementar sistemas de monitoreo de la salud estructural a largo plazo para diferentes obras de infraestructura civil es cada día mayor, debido a que se garantiza la salud estructural y se puede formular advertencias de daños estructurales para una etapa de prevención con el fin de evitar reparaciones costosas o incluso el colapso de la estructura, (3). De forma similar (6), cataloga al monitoreo de salud estructural (SHM) como una táctica de identificación de daños para la infraestructura, definiendo al daño como cambios en el material y/o propiedades geométricas, variaciones en las condiciones que afectan negativamente el rendimiento del sistema. El SHM, se compone fundamentalmente de: (i) sistema de sensores, (ii) sistema de procesamiento de datos el que permite automatizar los registros, (iii) Análisis e interpretación de datos.

El periodo natural de vibración de un sistema denominado T_n , y cuyas unidades son en segundos, según (7), define al periodo como el tiempo requerido para que el sistema no amortiguado complete un ciclo de vibración libre

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (1)$$

Donde:

$T_n =$ periodo natural de vibración

$\omega_n =$ frecuencia circular natural de vibración

La frecuencia cíclica natural de vibración, hace referencia, a que un sistema ejecuta $1/T_n$ ciclos en 1 segundo

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad (2)$$

La frecuencia natural f_n esta relacionada con la frecuencia circular ω_n . Y sus unidades son en Hertz (hz) (ciclos por segundo)

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} \quad (3)$$

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

De igual forma (7), expresa la frecuencia circular natural ω_n , frecuencia natural cíclica f_n y el periodo natural T_n por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \quad (4)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \quad (5)$$

$$T_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\delta_{st}}{g}} \quad (6)$$

En donde $\delta_{st} = \frac{mg}{k}$, siendo (g) la aceleración de la gravedad, δ_{st} , es la deflexión estática de la masa m suspendida de un resorte con rigidez k.

Por lo expresado anteriormente se entiende que el periodo natural de una estructura está íntimamente ligado a su masa y a su rigidez. Esa así que dos sistemas de 1GDL que tenga la misma masa, el que tenga mayor rigidez tendrá la frecuencia natural más alta y el periodo natural más pequeño. De forma similar si dos estructuras tienen la misma rigidez, la que tenga más masa tendrá menor frecuencia natural y su periodo natural será más pequeño.

La respuesta dinámica de una edificación ante un sismo depende de la relación entre el periodo del suelo y el periodo de vibración de la estructura. Si estos periodos se asemejan la estructura entrará en resonancia. También hace referencia, que el periodo fundamental de vibración de una edificación varía con el tipo de suelo en el que se cimenta. Resultando, si un edificio es cimentado sobre roca o suelo duro el periodo de vibración es menor, el comportamiento del movimiento de la estructura se asimilaría a un voladizo perfectamente empotrado. Al contrario, si la estructura es cimentada sobre un suelo blando, se deformaría con las vibraciones y la relación suelo-edificio es más flexible, resultando un incremento en el periodo, (8).

Para determinar la respuesta empírica de las capas superficiales de suelo, Nakamura, supone que el ruido provocado por micro terremotos está formado por varios tipos de ondas. Considera que los movimientos horizontal y vertical son relativamente iguales en la base rocosa, por lo que pretende excluir el efecto que produce las ondas Raleigh. La explicación del autor sobre el cociente espectral H/V, justamente se basa en lo anteriormente detallado, pues se fundamenta en la hipótesis de eliminar el efecto de las ondas superficiales, implicando una relación directa con las funciones de transferencia para las ondas horizontales. El método de Nakamura, emplea como técnica la transformada de Fourier para evaluar los espectros, (9).

Métodos publicados mediante referencias solo relevantes

El monitoreo de la salud estructural en obras de Ingeniería Civil como edificios, puentes, presas ha demostrado ser una herramienta muy útil y ha cobrado mucho interés en los últimos años, por su fácil aplicación y la obtención de datos prácticos que permiten relacionar la dinámica y la rigidez de la estructura, (10). En el contexto de relacionar las variaciones de parámetros modales frente a cambios en la integridad de la estructura, conlleva a determinar la rigidez de la estructura a partir de las características modales. Motivo que una estructura dañada es consecuencia de la disminución dinámica de la rigidez en secciones agrietadas.

El SHM, ha sido aplicado hace varios años, es así que en Japón comenzó en la década de 1950, cobrando importancia los últimos años, es así que actualmente se encuentran monitoreados 850 edificios. La mayor parte de estos edificios pertenecen al sector privado, cuyos propietarios e inversionistas se han visto en la necesidad de implementar dichos sistema con la finalidad de poder conocer el comportamiento de sus inmuebles ante eventos sísmicos y realizar medidas de prevención y corrección a tiempo, (11). El terremoto del 11 de marzo del 2011, provocó temblores de larga duración que tuvieron ondas de propagación a cientos de kilómetros del epicentro, lo cual afecto a edificios altos, de acuerdo a (12), presenta un estudio en el área de Tsukuda de Tokio, Japón el comportamiento de un edificio de 37 pisos muestran una inferencia de los parámetros modales unos días antes, durante y después del sismo, los cuales fueron captados por tres acelerómetros triaxiales desplegados en tres niveles en la superestructura.

La aplicación del monitoreo continuo es esencial para la detección de problemas, claro ejemplo el de la Catedral de la Ciudad de México, la cual fue rehabilitada durante la década de 1990, debido a grandes efectos de asentamientos diferenciales. Se realizó un proyecto integral en el que se incorporó el seguimiento de la respuesta de la estructura durante, y después de la rehabilitación, concluyendo que la misma ha prologado significativamente la vida útil del edificio. Pero con el antecedente de los asentamientos diferenciales en el sitio, el monitoreo continuo es esencial para divisar posibles hundimientos y la respuesta sísmica de la estructura, (13)

Un parámetro utilizado en el diseño y la evaluación de una estructura existente, es el periodo fundamental, según (14), en el estudio realizado en 146 edificaciones de hormigón armado en el centro de Quito, en las cuales se aplicó vibración ambiental, se encuentran variaciones entre las relaciones empíricas del periodo que son función de la altura o número de pisos, con lo que estipula

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

la norma sísmica del Ecuador. Esta variación está ligada al tipo de suelo, fecha de construcción y la cantidad de eventos sísmicos que han atravesado las estructuras de análisis. Se midieron vibraciones ambientales posteriores al terremoto del 16 de abril de Pedernales, que ocasiono en la ciudad de Quito una aceleración entre 0.017 y 0.081 g, generando una reducción de frecuencia de resonancia de los edificios analizados y confirmando el daño acumulativo que están sometidos los edificios en zonas sísmicas.

El determinar la evaluación de posibles daños en una estructura y la estimación de su vida útil, es factible a través de SHM. La complementación de la SHM y los avances informáticos lograron proponer una plataforma que detecta el tamaño y la ubicación de daños en una estructura. Esta plataforma consta de un módulo WI-FI empleado para enviar los datos a una nube, una placa única ordenador Raspberry Pi 2 cuyo sistema operativo permite el análisis y cálculo de datos los cuales son enviados a la nube de datos, un convertidor de analógico a digital (ADC) , un convertidor digital a analógico (DAC), un buffer y sensores piezoeléctricos. Esta plataforma, ha sido validada en pruebas de laboratorio, con un error máximo de 1.03% para la ubicación del daño y 8.43% de error para el ancho del daño, (15)

Desarrollo del caso

El edificio del campus de posgrado “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca, está ubicado en la provincia del Azuay, en la ciudad de Cuenca, camino a Patamarca (Figura 1). De acuerdo a la norma ecuatoriana de la construcción 2015, la ciudad de Cuenca tiene una caracterización sísmica alta, con un factor Z de 0.25g.



Figura 1. Ubicación de Campus Posgrado Estancia

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

El edificio de 2 pisos, con una altura de 5.70 m aproximadamente, está estructurado un bloque por pórticos de estructura metálica, mampostería de ladrillo, y un bloque de pórticos de estructura de hormigón armado, mampostería de ladrillo. El edificio es usado como centro de educación de posgrado, de esta forma categorizándose de acuerdo a la normativa de construcción vigente como una estructura de ocupación especial, con un factor de importancia de 1.3



Figura 2. Edificio de Campus Posgrado Estancia

El edificio del campus de Posgrado Estancia Luis Cordero de la Universidad Católica fue seleccionado para monitoreo estructural, debido a que se encuentra en una zona altamente sísmica, y al registrar sus respuestas de vibración ante vibraciones y / o posibles sismos, permitirá evaluar el periodo del suelo y el periodo de la estructura.

El edificio objeto de estudio está emplazado aproximadamente a 1.5 km de una de las estaciones acelerográficas de la Red Sísmica del Austro, estación “Miraflores”, la misma que de acuerdo a Bermeo, tiene un suelo tipo “C”, con un espectro de diseño de acuerdo a NEC tiene aceleraciones altas y periodos de vibración de 0.5g cubriendo los periodos de vibración que van desde 0.1 a 0.5 s.

Metodología

El sistema de monitoreo instalado en el edificio comprende de un sismógrafo Rasp Berry Shake RS4D, de un sismómetro de banda ancha Refteck y un prototipo de sismógrafo desarrollado en función de una Rasp Berry pi 3 y acelerómetros triaxiales tipo MPU 6050. La ubicación de los instrumentos de monitoreo, está dispuesta de tal forma que detecta la señal en la dirección norte-sur

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

(N-S), en el sentido este-oeste (E-O) y en el sentido vertical, permitiendo evaluar la frecuencia y a la vez el periodo del suelo y de la estructura.

El sismógrafo Rasp Berry Shake, emplazado en la planta baja del edificio, registró el sismo que se dio el 19 de septiembre de 2021. El cual, de acuerdo al Instituto Geofísico Militar de la Escuela Politécnica Militar fue de magnitud 4.67 grados, a una profundidad de 10.00 Km a 57.42 Km de la Ciudad de Azogues, provincia del Cañar. Los datos registrados permitieron evaluar el periodo del suelo bajo los efectos de este acontecimiento sísmico.

Las señales producto de vibración forzada, la cual se estimuló por medio de un vibrador mecánico de hormigón fueron registrados por medio del prototipo de sismógrafo colocado en la losa de la primera planta alta y por el sismógrafo de banda ancha localizado en la planta baja.



Figura 4. Ubicación de sismógrafos

La aplicación del método de Nakamura se fundamentó en la siguiente metodología propuesta por el autor: (i) Para atenuar los ruidos de baja y muy alta frecuencia se emplea un Filtrado de pasa-banda. (ii) Se emplea el respectivo ventaneo, que consta de la separación en intervalos de tiempo de cada una de las señales de los tres canales. (iii) Se procede con el cálculo de la FFT dentro de cada una de las ventanas. (iv) En cada una de las ventanas establecidas se realiza el suavizado de la FFT. (v) El cálculo de la razón espectral H/V se realiza en cada ventana. (vi) Finalmente se realiza el promedio de todas las ventanas del cociente espectral H/V.

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

Por otro lado, se realizó una comparación de la señal registrada por el sismógrafo de banda ancha versus el sismógrafo Raspberry Shake. Consecuentemente los resultados de las vibraciones naturales, así como forzosa receptadas por los instrumentos de monitorización fueron analizadas y filtradas por medio del programa SWARM y GEOSPY; programas que sirvieron de soporte para determinar la frecuencia y periodo de la estructura, y del suelo.



Figura 5. Sismógrafo Rasp berry Shake y sismógrafo de banda ancha Refteck para comparación de señales

Resultados

El tiempo tomado como muestra para registrar los datos que reciben los instrumentos fue de 15 días. Durante ese tiempo se registró un sismo de magnitud 4.67. Según la información recibida por el Rasp Berry Shake ubicado en la planta baja del Edificio de la Estancia de la Universidad Católica de Cuenca, muestra la siguiente información.

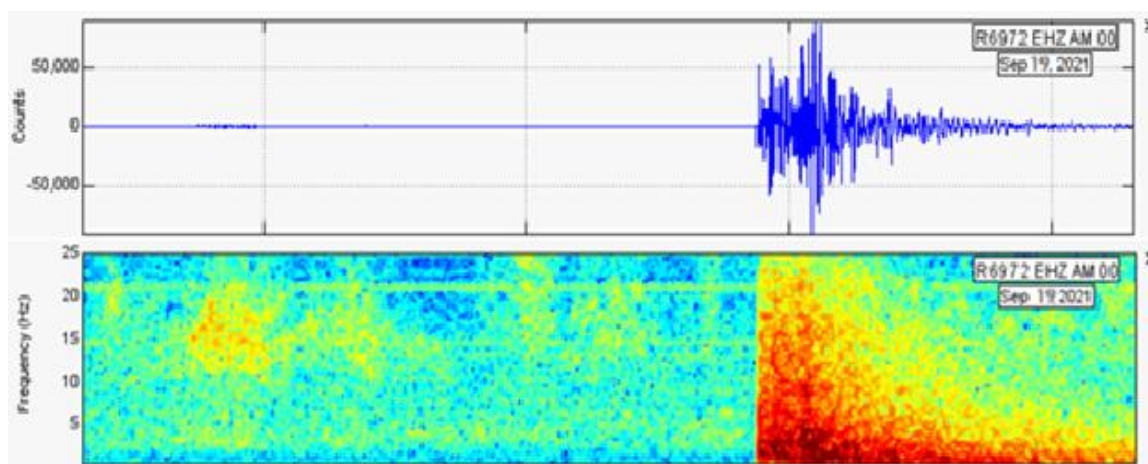


Figura 3. a) Registro de Sismo, b) Espectrograma

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

El método de Nakamura muestra la relación entre los espectros de Fourier, supone que el movimiento horizontal y vertical es similares en la base rocosa. Para estimar la frecuencia natural y a su vez el periodo en que vibra el suelo se aplica el coeficiente espectral, lo cual se determinó procesando las señales registradas en el programa Geopsy.

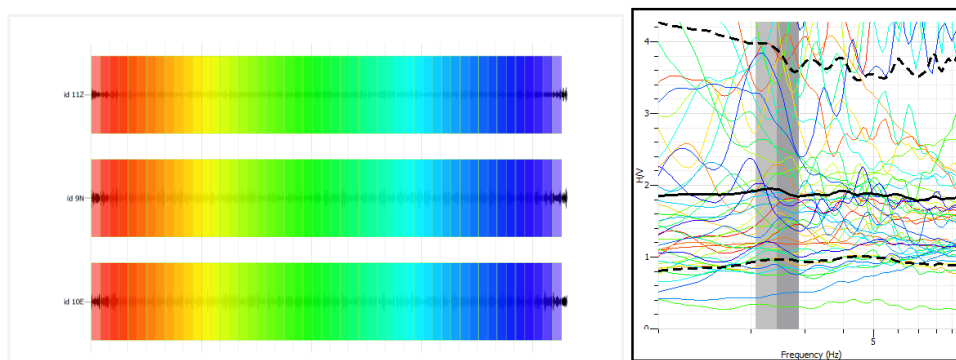


Figura 4. a) Ventaneo empleado de 10 s, utilizando la transformada de Fourier en cada ventana para determinar las frecuencias predominantes en la señal. b) Cociente espectral H/V versus Frecuencia predominante

En la gráfica, las líneas de colores muestran la superposición de los espectros de Fourier, la línea continua negra representa la curva media H/V, las líneas punteadas negras representan las curvas de confianza que resultan de la multiplicación y división de la curva media H/V por la desviación estándar de la amplitud. En la intersección, se encuentra la frecuencia sumada y restada por la desviación estándar de las frecuencias. Resultando una frecuencia es de 2.43 Hz, y consecuentemente a un periodo de 0.41s.

La aplicación de vibración forzosa a través de un vibrador de motor de hormigón colocado en la losa de la primera planta alta, en la cual se emplazó el prototipo de sismógrafo arrojó los siguientes datos

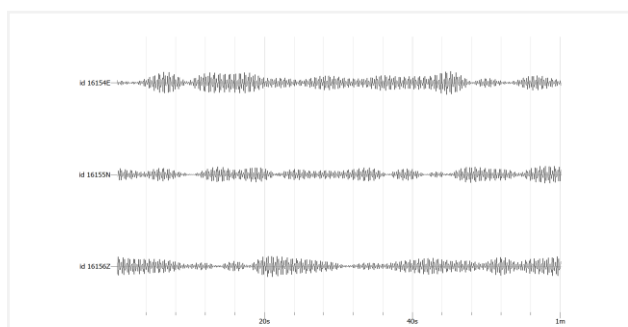


Figura 5. a) Señal de Onda filtrada canal: EW, NS y UD registrada en la losa

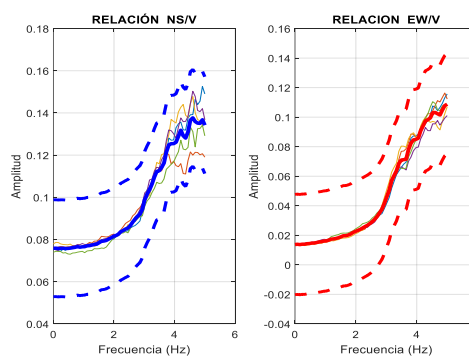
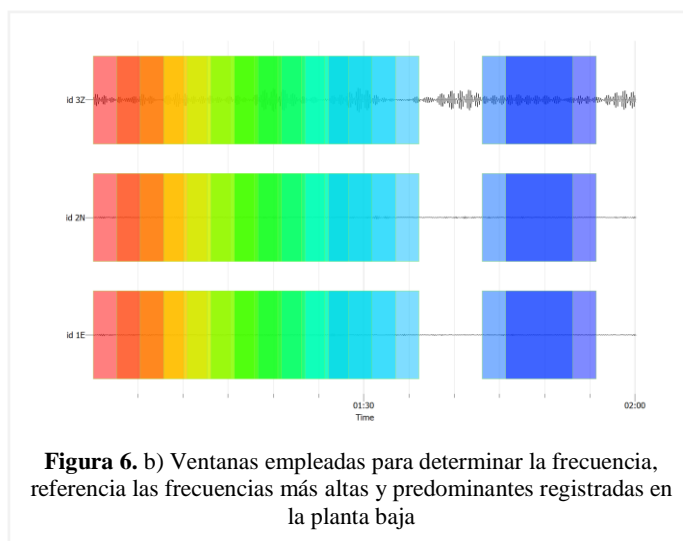
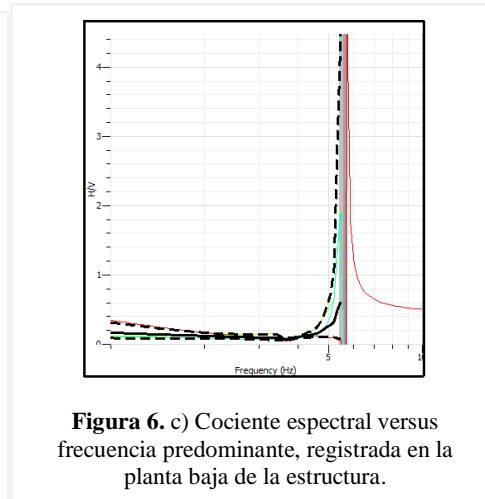
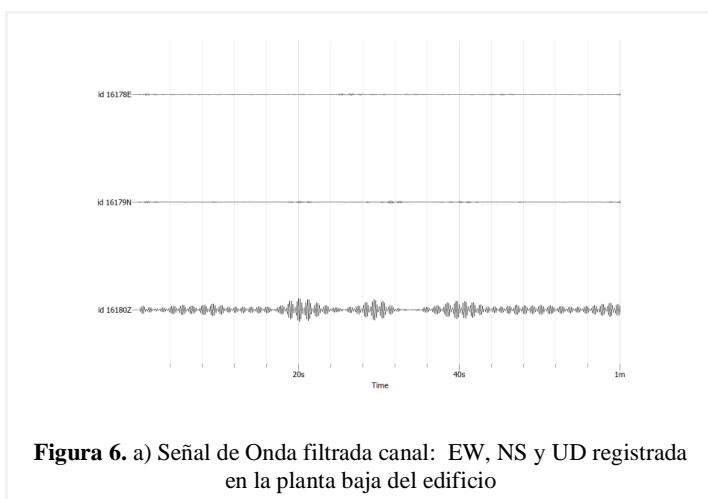


Figura 5. b) Relación NS/V y relación EW/V, registrada en la planta losa

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

La superposición de los espectros de Fourier, la relación del coeficiente espectral, muestra que la frecuencia pico en el canal NS es de 4.60 Hz determinando un periodo de 0.21 segundos, y el pico de frecuencia que se registra en el canal EW es de 4.92 Hz resultando un periodo de 0.20 segundos.

Los datos que capto el sismógrafo de banda ancha producto de la vibración inducida por medio del vibrador de hormigón colocado en la losa de la primera planta se muestran en la siguiente imagen.



Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

La frecuencia determinada en la planta baja corresponde a un valor de 5.52 Hz, resultado un periodo de 0.18 segundos. Adicionalmente se determinó el periodo de la estructura por medio del “Método 1”, de la NEC-15, en el capítulo Peligro y Diseño Sísmico $T = Ct * hn^\alpha$, donde el tipo de edificio y la altura medida desde la base de la estructura, son parámetros determinantes para encontrar el periodo. En el objeto de estudio en el bloque que se midió la vibración forzosa está estructurado por pórticos de hormigón armado sin muros estructurales ni diagonales rigidizadores, por lo que corresponde un valor a Ct de 0.055 y $\alpha = 0.90$ y una altura $hn = 5.70m$, determinando de esta manera un periodo igual a 0.26 segundos.

En la comparación de las señales registradas tanto por el sismógrafo Rasp Berry Shake RS4D como por el sismógrafo de banda ancha, los cuales fueron localizados en el parqueadero de la edificación y al someterlos a la vibración forzosa producida por el accionar del vibrador de motor de hormigón, se determinó que de acuerdo al análisis de resultados y forma de onda las variaciones son relativamente mínimas en las direcciones Este-Oeste así como en el canal vertical, sin embargo en el cana que registra las vibraciones en el sentido Norte- Sur se notó que las variaciones de los resultados fueron mayores como se muestra en la siguiente imagen.

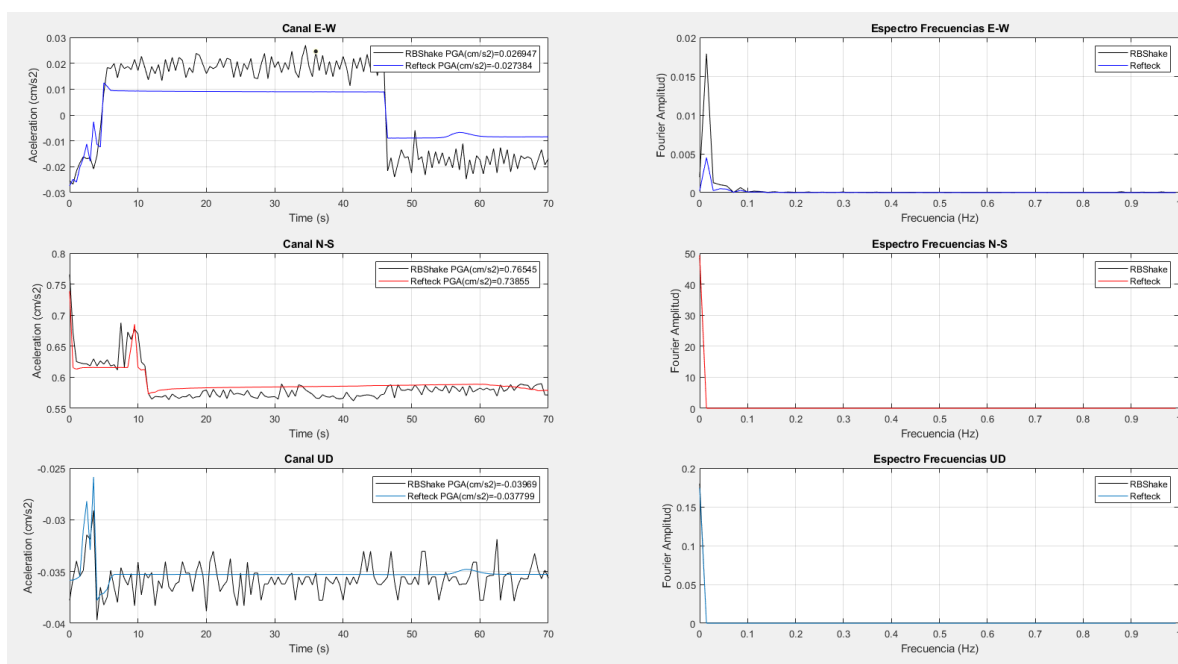


Figura 7. Comparación de la señal registrada por sismógrafo Rasp Berry Shake RS4D y el sismómetro de banda ancha bajo la misma excitación provocada por el vibrador de motor de hormigón.

Conclusiones

El periodo de vibración del suelo de 0.41s, resultado del sismo de magnitud 4.67, el cual se dio a una profundidad de 10.00 Km a 57.42 Km de la Ciudad de Azogues, provincia del Cañar. Se encuentra en el intervalo de referencia que cubren los periodos de vibración de 0.3 a 0.5 s, valores de referencia a la estación “Miraflores”.

Los periodos determinados debido a vibración forzosa, aplicada mediante un vibrador de motor de hormigón en la losa de la primera planta, muestran que los valores de los periodos tanto del suelo 0.18 s y de la losa en el sentido NS es de 0.21s y en sentido EW es de 0.20 s, sin embargo la vibración en el eje Z parece excesiva por lo cual es recomendable que el edificio pueda ser reforzado en su sistema de piso y que siga siendo monitoreado a largo plazo, a esto agregándole que existe grietas en las paredes de la estructura del segundo nivel y grietas en las baldosas del área exterior las cuales muestran el daño acumulado de la estructura..

Los resultados de los periodos de la estructura en los sentidos NS 0.21 segundos y EW 0.20 segundos son menores al periodo de la estructura determinado por medio de la Normativa vigente ecuatoriana 0.26 segundos. Sin embargo, la comparación y seguimiento de los resultados del periodo de la estructura con el periodo del suelo es de vital importancia para el monitoreo de la salud estructural ya que contribuirá para mejorar la seguridad y la prevención de daños estructurales que implicarían altos costos de reparación o incluso conllevarían a un fracaso estructural.

La comparación de los resultados del sismógrafo Rasp Berry Shake y del sismógrafo de banda ancha Reftek, muestran en uno de los canales una diferencia en su señal captada, sería recomendable emplear instrumentos de frecuencia de muestreo similar los que la sensibilidad de los acelerómetros. La implementación de monitoreo estructural en nuestro medio, es relativamente nula debido a que instrumentos como sismógrafos de banda ancha y de alta precisión implican inversiones económicamente representativas. Sin embargo, la aplicación de sensores de bajo costo, en funcionamiento continuo, enlazados a una red sísmica, emplazados en estructuras de ocupación esencial o especial, es de suma importancia pues generarían información rápida y confiable sobre la respuesta de las estructuras ante diferentes vibraciones; logrando determinar advertencias de daños estructurales, lo que implicaría la aplicación oportuna de mantenimientos y evitaría reparaciones costosas e incluso colapsos.

Referencias

1. Aguiar R, Mieles Y. Analysis of Buildings That Collapsed of Portoviejo During the Earthquake of 16 April 2016. *Rev Int Ing Estructuras* [Internet]. 2016;21(3):257–82. Available from: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/view/601>
2. Kanwar V, Kwatra N, Aggarwal P. Damage detection for framed RCC buildings using ANN modeling. *Int J damage Mech.* 2007;16(4):457–72.
3. Li H-N, Ren L, Jia Z-G, Yi T-H, Li D-S. State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. *J Civ Struct Heal Monit.* 2016;6(1):3–16.
4. Husid R. Análisis de las medidas de períodos de vibración de edificios nuevos. *Rev IDIEM.* 1965;4(3):ág-175.
5. Rivera Darío 2021, C.v EV s. . de. Analisis de la Respuesta Dinamica de las COsntrucciones mediante Vibracion Ambiental. 2021.
6. Farrar CR, Worden K. An introduction to structural health monitoring. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci* [Internet]. 2007;365(1851):303–15. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33846995979&doi=10.1098%2Ffrsta.2006.1928&partnerID=40&md5=045ec6404f278a98240d44b060e04705>
7. Chopra AK. *Dynamics of structures : theory and applications to earthquake engineering.* Harlow: Pearson Education; 2014.
8. Caicedo MD. Períodos de vibración de las edificaciones. *Rev Arquitect e Ing.* 2014;8(2):1.
9. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railw Tech Res Institute, Q Reports.* 1989;30(1).
10. Maeck J, De Roeck G. Damage detection on a prestressed concrete bridge and RC beams using dynamic system identification. In: *Key engineering materials.* Trans Tech Publ; 1999. p. 320–7.
11. Kanda K, Nakashima M, Suzuki Y, Ogasawara S. “q-NAVI”: A case of market-based implementation of structural health monitoring in Japan. *Earthq Spectra.* 2021;37(1):160–79.
12. Çelebi M, Kashima T, Ghahari SF, Abazarsa F, Taciroglu E. Responses of a tall building with US code-type instrumentation in Tokyo, Japan, to events before, during, and after the Tohoku earthquake of 11 March 2011. *Earthq Spectra.* 2016;32(1):497–522.
13. Sánchez AR, Meli R, Chávez MM. Structural monitoring of the Mexico city Cathedral (1990–2014). *Int J Archit Herit.* 2016;10(2–3):254–68.

Monitoreo de la salud estructural del edificio “La Estancia” de la Universidad Católica de Cuenca

14. Perrault M, Guéguen P, Parra G, Sarango J. Modification of the data-driven period/height relationship for buildings located in seismic-prone regions such as Quito (Ecuador). *Bull Earthq Eng.* 2020;18(8):3545–62.
15. Abdelgawad A, Yelamarthi K. Internet of things (IoT) platform for structure health monitoring. *Wirel Commun Mob Comput.* 2017;2017.

©2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).