

METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EJECUTAR Y PROCESAR MEDICIONES DE VIBRACIONES AMBIENTALES UTILIZANDO ACELERÓGRAFOS TRIAXIALES EN EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO DE MENOS DE 100M DE ALTURA

PROPOSED METHODOLOGY FOR EXECUTING AND PROCESSING AMBIENT VIBRATION MEASUREMENTS USING TRIAXIAL ACCELEROMETERS IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS LESS THAN 100M HIGH

Ing. Luis Carlos Esquivel Salas

Laboratorio de Ingeniería Sísmica
Universidad de Costa Rica
San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica
Correo Electrónico: luiscarlos.esquivel@ucr.ac.cr

Ing. Víctor Schmidt Díaz, Ph.D.

Laboratorio de Ingeniería Sísmica
Universidad de Costa Rica
San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica
Correo Electrónico: victor.schmidt@ucr.ac.cr

RESUMEN

Se presenta una propuesta para la ejecución y procesamiento de datos de mediciones de vibraciones ambientales en edificios de concreto reforzado con un máximo de 100 metros de altura, utilizando al menos tres acelerógrafos triaxiales. Se basa en la experiencia generada producto de la realización de cinco mediciones de vibraciones de este tipo, aplicadas en tres edificios diferentes. Se dan lineamientos para la preparación y el diseño de la prueba, así como la descripción del equipo utilizado en las mediciones. Para el procesamiento de la información se propone preparar y editar los registros originales utilizando el intérprete de comandos (Shell) de Linux, obteniendo como resultado los registros en formato SAC con unidades de gals. Para la corrección, el filtrado, la generación de espectros de Fourier y funciones de transferencia se presenta un procedimiento utilizando el programa de computación Geopsy (Wathelet, 2011). Se concluye que, siguiendo los procedimientos descritos, se generan espectros y funciones de transferencia confiables, de los cuales se obtienen los períodos naturales de los primeros modos de vibración de la estructura.

Palabras clave: vibraciones ambientales; frecuencia natural; periodo natural; edificios; acelerógrafos; dinámica

ABSTRACT

A proposal for the execution and data processing for ambient vibrations test on reinforced concrete buildings less than 100 meters high using triaxial accelerometers is presented. Is based on the experienced generated from executing five of this test on three different buildings. Guidelines for the preparation and design of the test, as well as the description of the equipment used are given. For the information processing, the use of Linux command interpreter (Shell) for the preparation and editing of the records is proposed, resulting in records on SAC format with gals units. For their correction, filtering, generation of the Fourier spectrum and transfer functions the use of Geopsy (Wathelet, 2011) software is recommended. It is concluded that following the described procedures, one can obtain reliable Fourier spectrum and transfer functions, from which the natural periods of vibration of the structure are obtained.

Keywords: Ambient vibrations, natural frequency, natural period, buildings, acelerographs, dynamics.

1 INTRODUCCIÓN

Se describe una propuesta para la realización de mediciones de vibraciones ambientales (MVA) en edificios, utilizando acelerógrafos triaxiales, con dos opciones de instalación: permanente o temporal. Así mismo, se propone un procedimiento para el procesamiento de los datos obtenidos de las pruebas, con el fin de que esta pueda ser utilizada como un insumo valioso para el estudio del comportamiento dinámico de los edificios. Estas propuestas son fruto de la experiencia generada al realizar cinco mediciones de vibraciones ambientales en tres distintos edificios en San José, Costa Rica, entre los años 2014 y 2015.

Las MVA en estructuras han tomado fuerza a nivel internacional en las últimas dos décadas (Michel, Guéguen & Bard, 2008), debido principalmente a lo económicas que son frente a otras opciones de pruebas dinámicas, como las vibraciones forzadas, y lo inocuas que son para el edificio y sus acabados. Además tienen la gran ventaja de poder realizarse con el edificio en operación, siempre y cuando la misma no produzca vibraciones excesivas, como por ejemplo procesos industriales que incluyan maquinaria pesada. Sin embargo, por ejemplo en un país como Costa Rica, este tipo de mediciones se han realizado una única vez a nivel de tesis de licenciatura (Carvajal, 2005), sin poder contar en esa ocasión con una sincronización por medio de GPS entre los acelerógrafos utilizados, lo cual eleva el nivel de precisión de la medición.

Entre los usos más comunes de este tipo de mediciones se encuentran la verificación de los modelos matemáticos utilizados para el diseño estructural, monitoreo de la salud estructural, verificación de intervenciones estructurales, detección de daños e inspección basada en vibraciones. Lo anterior es posible ya que al analizar los datos de las MVA se determinan parámetros dinámicos importantes en el rango elástico, utilizados por diversos códigos sísmicos a nivel internacional en los métodos de análisis elásticos de estructuras.

Las propuestas expuestas en este trabajo corresponden a identificaciones modales básicas, las cuales tienen como objetivo el determinar los periodos naturales de las estructuras utilizando el método clásico denominado “peak peaking” (Bendat & Piersol, 1993) y, opcionalmente, el amortiguamiento modal principal por medio de la técnica de decaimiento aleatorio. Para otros métodos de identificación modal se requiere comprobar la idoneidad del procedimiento aquí expuesto.

2 METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN DE MVA CON INSTRUMENTACIÓN TEMPORAL

- **Diseño de la prueba**

El diseño de la prueba consiste en la selección de los ejes y puntos de medición dentro del edificio, así como del equipo a utilizar y colocar en estos puntos. Los ejes de medición son líneas verticales que atraviesan el edificio, estos contienen al menos tres puntos de medición, como se aprecia en la figura 1.

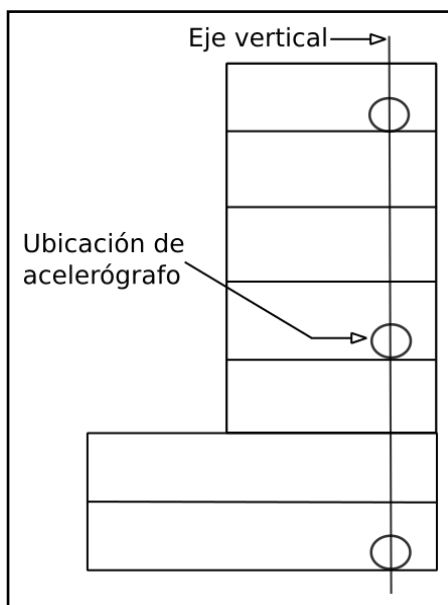


Figura 1: Ejemplo de elevación esquematizada de un edificio.

Para las MVA los autores recomiendan utilizar al menos tres ejes verticales de medición, principalmente para poder comparar resultados obtenidos para cada uno de los ejes. Si se utiliza un único eje, no se tiene punto de comparación para comprobar si los resultados obtenidos son consistentes. Con dos ejes, en caso de que los resultados sean diferentes para cada uno, no es posible discernir cuál de los dos es el correcto. Al contar con al menos tres ejes de medición se crea la oportunidad de obtener resultados semejantes en al menos dos de ellos,

posibilitando la identificación del eje con mayor probabilidad de contener algún error, ruido o participación nociva de algún ente externo al momento de la medición.

Adicionalmente, se pueden medir participaciones de una mayor cantidad de modos, ya que algunos se manifiestan con mayor energía en distintas partes del edificio. Por ejemplo, en las esquinas, generalmente se tiene una mayor participación de los modos torsionales.

Otra ventaja de utilizar al menos tres ejes de medición es que, en estructuras con plantas irregulares, se pueden comprobar comportamientos asociados a estas irregularidades. Por ejemplo, la planta irregular mostrada en la figura 2 puede presentar un comportamiento diferente para las partes A y B, lo que se puede comprobar colocando al menos un eje de medición en la parte A, otro en el ala B y comparar los periodos naturales de ambos ejes.

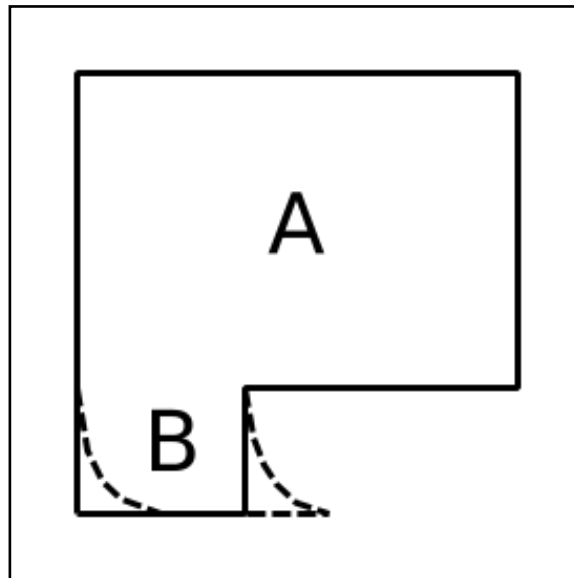


Figura 2: Planta irregular.

Finalmente, dependiendo del modo de vibración este se manifiesta con mayor, menor o nula energía en algunos puntos. Por esto, al tener al menos tres ejes de medición, se tiene más seguridad de medir la mayor cantidad de modos en los puntos donde se manifiesten con mayor energía.

Para determinar la ubicación de los ejes y puntos de medición se debe obtener información necesaria para realizar la prueba. La misma consta como mínimo de los planos estructurales y arquitectónicos, e idealmente, del modelo computacional utilizado para el análisis estructural y diseño del edificio.

Con los planos estructurales podemos darnos una buena idea de la regularidad, tanto en planta como en altura, del edificio. Si se cuenta con el modelo computacional del mismo, se puede estudiar su comportamiento dinámico teórico,

con el objetivo de encontrar los niveles donde suceden los mayores desplazamientos correspondientes a cada modo de vibración. Estos son los niveles donde es más provechoso ubicar los acelerógrafos para la medición. Cabe recalcar que estos deben estar lo más alineados posible verticalmente, formando un eje de medición compuesto por al menos tres puntos de medición.

De no contarse con el modelo computacional, se tienen dos opciones en función del tiempo con que se cuente para diseñar la prueba: crear un modelo propio desde cero basándose en los planos estructurales (se cuenta con un tiempo apropiado antes de realizar la prueba) o utilizar criterio ingenieril para estimar las mejores ubicaciones de los acelerógrafos, basándose en los planos, la experiencia y entendimiento del comportamiento dinámico de las estructuras.

Una vez que se tengan definidos los puntos de medición, estos deben ser sometidos a revisión por parte del representante administrativo del edificio, para que asegure el acceso a los mismos. En caso de que el acceso no fuera posible, se debe indicar un nuevo punto de medición y someterlo al proceso anteriormente descrito. Es conveniente tener puntos de medición alternativos en caso de no tener acceso a algunos de ellos de manera inesperada al momento de la medición.

- **Equipo utilizado temporalmente**

El equipo utilizado para las mediciones con instrumentación temporal consiste de tres acelerógrafos triaxiales de marca Nanometrics, modelo TitanSMA (ver figura 3) con sensores de fuerza balanceada (FBA por sus siglas en inglés), frecuencia de muestreo de hasta 200 muestras por segundo y capacidad de registrar aceleraciones de hasta 4 g. Cada uno de estos se traslada al edificio donde se realiza la prueba con su respectiva batería, GPS y cable de red para comunicarse con una computadora portátil.



Figura 3: Acelerógrafo Nanometrics TitanSMA con accesorios, instrumentación temporal

El equipo humano para la medición con instrumentación temporal debe estar compuesto de al menos una persona por acelerógrafo. Esto facilita el manejo, manipulación y vigilancia de los mismos, además de reducir de manera importante

el tiempo de duración de la prueba.

- **Preparación previa**

Antes de salir hacia el sitio de medición, se deben hacer algunos preparativos importantes para disminuir la posibilidad de contratiempos en la prueba. Primeramente, se deben probar los acelerógrafos, baterías, GPS, cables y computadoras portátiles a utilizar en la medición. Idealmente, se debe contar con un equipo completo adicional por cualquier eventualidad. Es importante configurar los parámetros de frecuencia de muestreo y aceleración máxima en todos los acelerógrafos con el mismo valor. Estos deben establecerse en 200 hz y 4 g respectivamente.

Seguidamente, se aconseja generar un portafolio con documentos relevantes para la medición, como lo son:

- Permisos para su realización, ya sea carta o correo electrónico.
- Esquemas donde se muestren los puntos de medición previamente definidos, al menos una copia por cada miembro del equipo humano que asistirá a la prueba.
- Reporte de medición donde se anote información relevante de la prueba como contactos, duración de la medición, equipos utilizados y responsables de cada uno de estos, descripción escrita y fotográfica del entorno de los puntos de medición.

Por último, corroborar que se cuenta con al menos un medio de comunicación entre todos los integrantes del grupo, por ejemplo celulares o walkie-talkies. Esto es muy importante para la coordinación durante la prueba, ya que cada persona estará en un nivel diferente del edificio. La opción de walkie-talkies es especialmente atractiva cuando la estructura cuenta con varios niveles de sótano, ya que la señal celular comúnmente presenta problemas en estos entornos.

- **Procedimiento de la prueba**

Una vez en el sitio de medición, se debe contactar al representante administrativo del edificio que concederá el acceso a los diferentes puntos de medición. El primer paso es ubicar los puntos del nivel inferior, esto debido a que generalmente es un sótano, por lo que toma más esfuerzo y tiempo ubicar el GPS de forma tal que reciba la señal necesaria. Generalmente se requiere de al menos dos personas para la colocación del GPS en los niveles de sótano, para el resto de niveles basta con una persona.

Seguidamente, se asigna un acelerógrafo a cada miembro del grupo, los cuales proceden a ubicarse en sus respectivos puntos de medición. Dentro del grupo se designa un encargado, el cual está pendiente del tiempo de medición de

cada eje vertical. Además, este coordina en qué momento se deben mover los acelerógrafos a las nuevas posiciones, hasta terminar con la totalidad de la prueba. Los tiempos de medición por cada eje deben ser de al menos 1000 veces el periodo fundamental de la estructura (Michel et al., 2008).

Previo a la colocación de los acelerógrafos en el piso, se debe limpiar la superficie para asegurarse que no haya alguna piedra pequeña u otros objetos bajo los tornillos de nivelación del acelerógrafo. Luego de nivelar el equipo y confirmar su correcto funcionamiento, se debe estar pendiente de que nadie ajeno lo manipule, camine demasiado cerca o se produzcan golpes fuertes cerca del mismo. Es aconsejable establecer un perímetro alrededor del acelerógrafo (por ejemplo utilizando conos de emergencia), con el fin de facilitar su visualización por parte de los usuarios del edificio y evitar algún contacto accidental.

3 METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN DE MVA CON INSTRUMENTACIÓN PERMANENTE

- **Equipo utilizado permanentemente**

El equipo utilizado para las mediciones con instrumentación permanente consiste de cinco acelerógrafos triaxiales marca Reftek, modelo 130-SMA (ver figura 4), con sensores del tipo estado sólido, frecuencia de muestreo de hasta 200 muestras por segundo y capacidad de registrar aceleraciones de hasta 4 g. La totalidad de estos acelerógrafos se encuentran en un edificio, registrando de manera permanente las aceleraciones del mismo. Cada equipo cuenta con una fuente de poder, batería de respaldo y conexión a Internet por cable de red; el GPS es único y común para los cinco equipos.

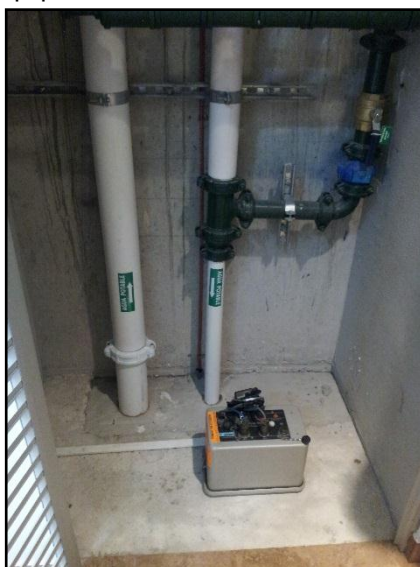


Figura 4: Acelerógrafo Reftek 130-SMA, instrumentación permanente.

- **Consideraciones generales**

En el caso de la instrumentación permanente, la ejecución de las MVA es relativamente más sencilla debido a que los acelerógrafos se encuentran previamente ubicados dentro del edificio, lo cual supone una disminución importante en tiempo y esfuerzo.

Con respecto al diseño de la prueba, para este tipo de instrumentación los ejes de medición se encuentran previamente definidos, sujetos a la ubicación de los acelerógrafos permanentes. La preparación previa consiste en obtener los permisos para la extracción remota de los datos, además de solicitar los planos estructurales y arquitectónicos con el fin de visualizar la ubicación de los acelerógrafos en el contexto del sistema estructural del edificio. Finalmente, el procedimiento de la prueba se reduce a la selección de las ventanas de tiempo con que se quiera trabajar. Es importante recordar que como mínimo, esta ventana de tiempo debe ser al menos 1000 veces el periodo fundamental de la estructura analizada.

4 METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS

- **Shell de Linux**

La información obtenida de la prueba debe ser procesada para obtener resultados confiables y con la mayor precisión posible. La primera decisión que se debe tomar es definir el formato de los registros a utilizar para realizar el análisis, ya que dependiendo de la marca del equipo este varía. En esta investigación se emplean equipos de las marcas Nanometrics y Reftek, los cuales almacenan datos utilizando los formatos SEED y RT respectivamente. Entonces, se debe seleccionar un formato común al cual convertir los dos anteriores; en este caso el formato escogido es SAC (Seismic Analysis Code), uno de los formatos más utilizados a nivel mundial por la comunidad de investigación sísmica.

Debido a la gran cantidad de datos que contiene un solo archivo de MVA (20 minutos de registro contienen 240 mil datos), su manipulación en hojas de cálculo es sumamente ineficiente en esta etapa. Por esta razón, para la transformación de formato y edición preliminar de los archivos se utiliza el intérprete de comandos del sistema operativo Linux, llamado Shell.

El Shell actúa como un intermediario entre el usuario y Linux, primero leyendo los comandos que se introducen en él, ejecutándolos dentro de Linux y luego generando resultados. La gran ventaja de utilizar el Shell es su eficiencia a la hora de manejar archivos con gran cantidad de datos, además de poder ejecutar rutinas desarrolladas por fabricantes de acelerógrafos y la comunidad científica para la conversión de formatos de registros acelerográficos.

Para el caso de los archivos en formato SEED, (ver figura 5) se empleó una rutina desarrollada por IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) llamada *mseed2sac* para transformarlos al formato SAC. Los datos del archivo en formato SAC son convertidos a unidades de gals (cm/s^2) utilizando una rutina escrita por el geólogo Aarón Moya, PhD, investigador del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica. Dentro de esta, los archivos del formato

SAC son convertidos a ASCII con ayuda de otra rutina llamada *readsac*, obteniendo los archivos en formato de texto (SAC.gals.ascii en la figura 5).

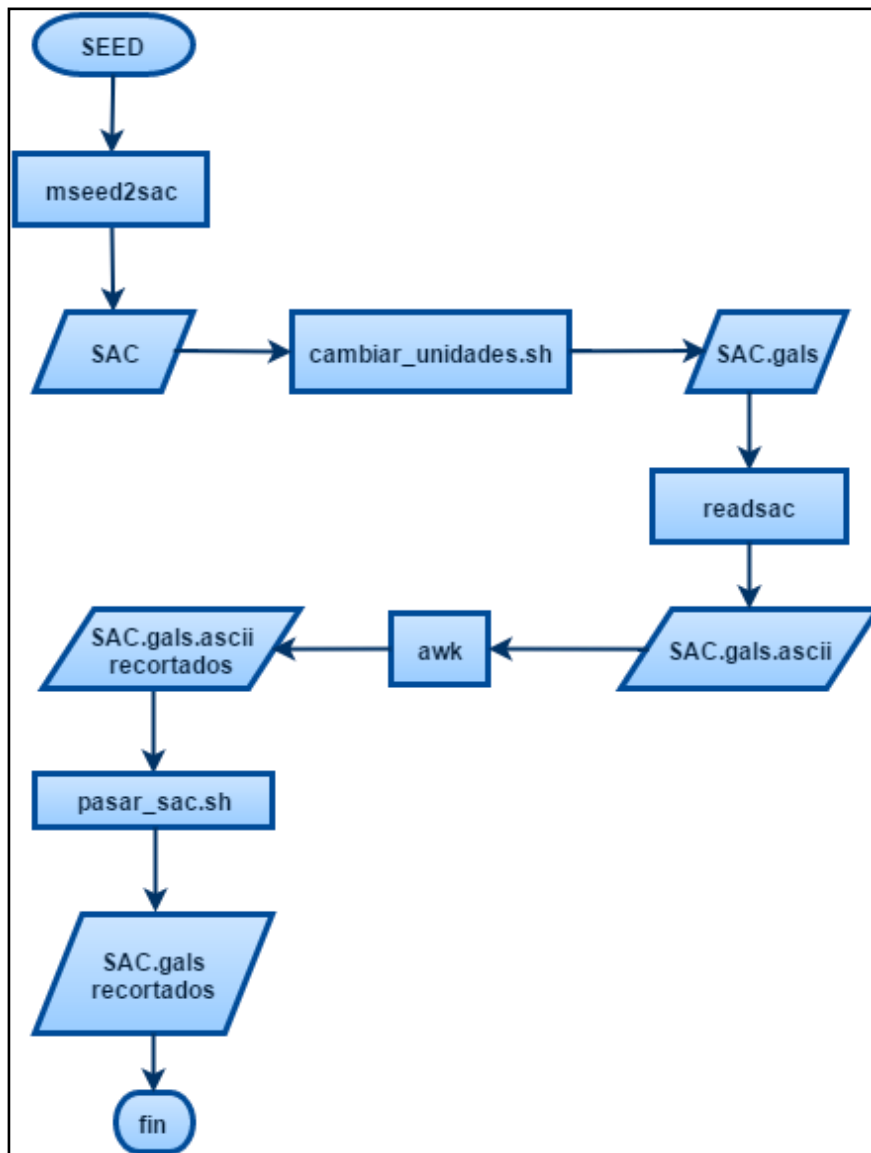


Figura 5: Procesamiento de datos para archivos en formato SEED.

El objetivo de transformar los archivos a formato de texto es el poder utilizar el lenguaje *awk*, el cual está integrado en el Shell y trabaja exclusivamente este tipo de formato. Este lenguaje es muy poderoso para manipular archivos con grandes cantidades de datos, permitiendo editarlos de la forma que el usuario necesite en muy poco tiempo.

Con la ayuda de *awk* se obtiene la ventana de tiempo común para todos los registros de cada eje de medición. Los archivos conteniendo únicamente esta

ventana de medición se denominan “recortados”. Este recorte se debe hacer aún cuando los acelerógrafos se encuentren sincronizados entre sí por medio de GPS, que fue el método de sincronización utilizado en este trabajo. Lo anterior se debe a la necesidad de que el tiempo inicial y final sea exactamente el mismo para todos los archivos, aspecto trascendental en el cálculo de las funciones de transferencia.

Se debe recordar que esto no ocurre en el campo ya que en el sitio de medición cada acelerógrafo comienza y termina de registrar a una hora diferente. Por ejemplo, los acelerógrafos se van colocando y encendiendo conforme el operario del mismo ubica el punto de medición dentro del edificio. En el caso del primer nivel el acceso generalmente es inmediato, por lo que este acelerógrafo empieza a registrar antes que el que deba ubicarse en la azotea. Esto implica que el tiempo total del registro es mayor para un acelerógrafo en el primer nivel que en la azotea, por lo que para definir la ventana de tiempo común se debe recortar el registro más largo, el del primer nivel; de ahí la necesidad de editar los archivos en *awk*.

El archivo generado por *awk* es de tipo texto, por lo que se utiliza una rutina escrita por Moya llamada *cambiar_unidades.sh*, que a su vez utiliza *writesac* para convertir archivos de texto al formato SAC. Estos archivos en formato SAC con unidades de gals, recortados para contener únicamente la ventana de tiempo de interés (SAC.gals recortados en la figura 5), son los que se utilizarán en Geopsy.

Para el caso de los archivos en formato RT (ver figura 6), se extrae directamente la ventana de interés por medio del programa *arcfetch2*, facilitado por el fabricante de los acelerógrafos Reftek. No hubo necesidad de cortes manuales debido a que estos acelerógrafos registran de manera continua, por lo que se extrae la misma ventana de tiempo para cada equipo indicando el tiempo inicial y final de interés para el usuario al programa *arcfetch2*, por medio de la conexión remota entre los acelerógrafos y un servidor. Luego se convierten al formato SAC por medio de la rutina *rt2sac* y se convierten a unidades de gals, al igual que para los archivos SEED.

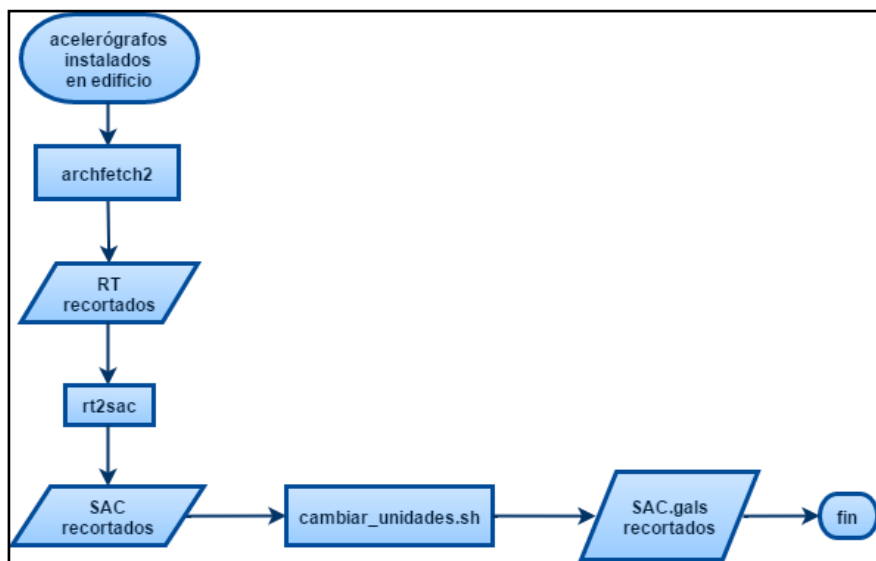


Figura 6: Procesamiento de datos para archivos en formato RT.

- **Geopsy**

Geopsy es un programa de computadora desarrollado por Marc Wathelet desde el año 2002, el cual es de licencia gratuita. El programa fue originalmente creado para procesar señales de ruido producidas por mediciones de carácter geofísico, en la actualidad cuenta con una rutina específica para el análisis de mediciones de vibraciones ambientales en estructuras.

En esta investigación Geopsy se utiliza para corregir y filtrar las señales, así como la generación de los espectros de Fourier y funciones de transferencia a partir de estas.

- **Corrección y filtrado**

El procedimiento para la corrección y filtrado de las señales se resume en la figura 7. Lo primero por hacer a cada una de las señales es una inspección visual con el objetivo de identificar anomalías o incongruencias, como aceleraciones evidentemente excesivas producto frecuentemente de algún golpe o manipulación del acelerógrafo. Para los casos en que esto ocurre al principio o final del registro, la señal se corta manualmente utilizando la función “cortar” de Geopsy para eliminar esta sección alterada. En caso de que la alteración se encuentre cerca de la mitad del registro, se utilizan algoritmos explicados más adelante para eliminar estas secciones del análisis.

Se procede a corregir la señal por línea base, para luego aplicar el filtro frecuencial tipo pasa banda, filtrando las señales entre los 0.3 hz y los 30 hz, límites utilizados ampliamente en procesamiento de registros de vibraciones ambientales en estructuras (Domínguez, 2012). Finalmente, se aplica una disminución gradual al principio y final del registro, llamada *taper*, con el objetivo de que este inicie y finalice en cero.

- **Espectro de Fourier y Función de Transferencia**

Una vez corregida y filtrada la señal, se procede a la elaboración de los espectros de Fourier y las funciones de transferencia, de los cuales se obtienen las frecuencias naturales de la estructura. Para esto, Geopsy ofrece las herramientas de “espectro” y “espectro de la estructura”, las cuales son análogas al espectro de Fourier y función de transferencia, respectivamente.

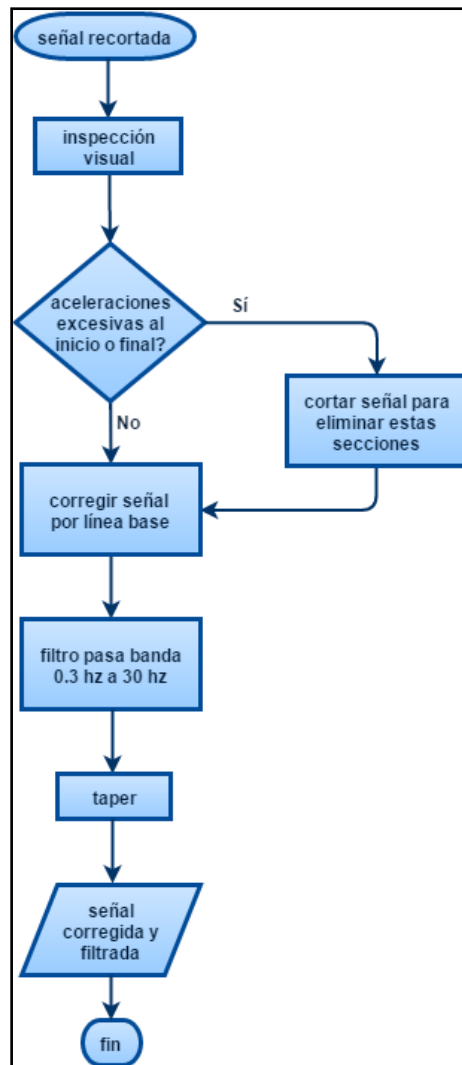


Figura 7: Corrección y filtrado de la señal.

Para ambos casos, la principal variable en su determinación es la ventana de análisis utilizada, la cual a su vez tiene otros parámetros para definirla completamente. Para esta investigación se prueban varias formas de definir estas ventanas, a saber:

1. Ventanas automáticas: se indica a Geopsy que utilice un determinado criterio de selección para obtener ventanas con características óptimas.
2. Ventanas manuales: el usuario que está procesando la información selecciona las ventanas a su criterio, proceso obviamente subjetivo.
3. Una sola ventana: manualmente se indica a Geopsy que utilice una sola ventana de la duración total de la medición.

4. Ventanas automáticas decimadas: igual a la opción 1, con la diferencia de que el registro contiene una menor cantidad de datos al aplicar una decimación en el tiempo, en este caso por un factor de tres.

El criterio de selección utilizado para obtener las ventanas automáticas implementa el algoritmo STA y LTA, promedio de tiempo corto y promedio de tiempo largo respectivamente. El mismo es comúnmente usado para la identificación de eventos (sismos) durante el registro continuo en estaciones acelerográficas, asegurando de esta manera su almacenamiento, disparo de alarmas y otras funciones.

En el caso de las vibraciones ambientales, se utiliza de manera inversa para identificar picos de aceleraciones fuera del rango de interés de estas mediciones, correspondientes a excitaciones puntuales producidas, por ejemplo, por golpes fuertes al entrepiso. De esta forma esta porción del registro no se toma en cuenta, consecuentemente no se le asigna ventana para el cálculo de los espectros de Fourier y funciones de transferencia. Se define un STA de 1 segundo y un LTA de 30 segundos, una razón STA/LTA mínima de 0.5 y máxima de 2.5 en la señal cruda (Atakan, Bard, Kind, Moreno, Roquette, Tendo & SESAME Team, 2004).

Para determinar cuál forma de definir las ventanas de análisis produce mejores resultados, en esta investigación se toman dos registros de vibraciones ambientales y se analizan con cada una de las propuestas de selección de ventanas enumeradas anteriormente. En el caso específico de ventanas automáticas, se deben analizar adicionalmente los parámetros para la delimitación de la longitud de tiempo. Geopsy brinda varias opciones para esto, en este trabajo se utiliza la opción de delimitación por medio de límites inferiores y superiores.

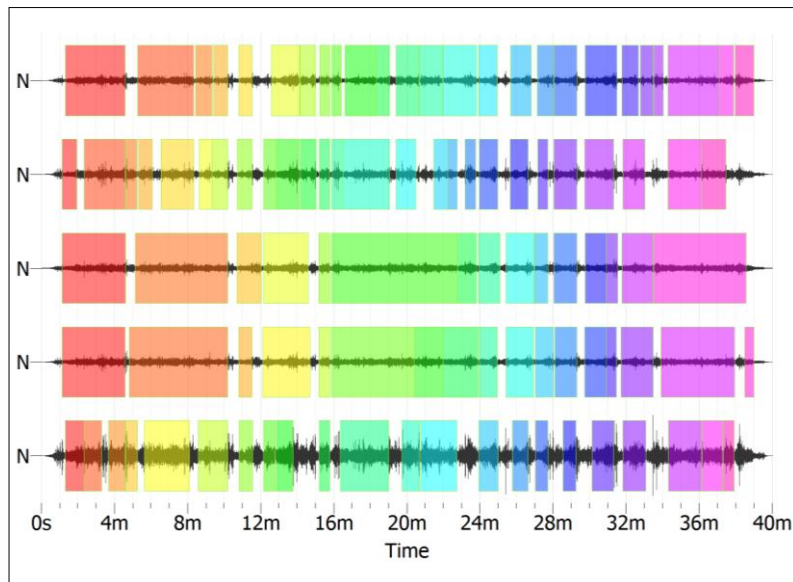
Lo anterior consiste en suministrar al software el valor de tiempo mínimo y máximo de la ventana de análisis. La longitud final debe estar dentro de estos límites y se termina de definir al aplicar el logaritmo STA LTA. Se investigaron los límites de tiempo de 30 a 1800 segundos y de 20 a 40 segundos, este último recomendado por Málaga y Gómez (2007). El valor de 1800 segundos corresponde a la duración total de la ventana de medición, 30 minutos por cada eje de medición.

En la tabla 1 se muestran los coeficientes de variación de las frecuencias naturales asociados a las formas de escoger las ventanas. Para el caso específico de una sola ventana, naturalmente no aplica el coeficiente de variación, por lo que se realiza en su lugar una comparación de los espectros de Fourier. En esta se pudo observar que utilizando una sola ventana se pueden reconocer claramente las dos primeras frecuencias fundamentales, pero el contenido de frecuencias altas es mucho mayor que cuando se utilizan varias ventanas. Debido a las limitaciones que conlleva utilizar una sola ventana, como lo son la imposibilidad de remover aceleraciones excesivas producto de excitaciones bruscas y puntuales, o el hecho de no poder comparar para un registro estimaciones de frecuencias naturales de varios tramos del mismo, se decide utilizar alguna de las otras formas de selección de ventanas.

Tabla 1: Coeficientes de variación de las frecuencias fundamentales.

Ventanas	Coeficiente de Variación	
	Registro No. 1	Registro No. 2
Automáticas de 20 a 40 seg.	10.7%	13.7%
Automáticas de 30 a 1800 seg.	10.1%	6.4%
Manuales	10.2%	11.2%
Automáticas decimadas por 3	9.2%	11.7%

De la tabla 1 se puede observar, en el caso del registro 1, que los coeficientes de varianza son similares y el menor de ellos corresponde a las ventanas automáticas decimadas por un factor de tres. En el caso del registro 2, el menor coeficiente de varianza corresponde a las ventanas automáticas de 30 a 1800 segundos. Se decide trabajar con esta última (sin decimar) debido a que la cantidad de datos no fue una limitante para el manejo de los archivos SAC.gals.recortados en Geopsy, además de que para el caso del registro 2 el coeficiente de variación es bastante menor al resto. En la figura 8 se muestra un ejemplo de la selección de ventanas automáticas de 30 a 1800 segundos para generar espectros de Fourier, para un edificio con cinco acelerógrafos. Cada ventana tiene asociado un color para poder diferenciarlas.

**Figura 8:** Ejemplo de selección de ventanas automáticas con Geopsy.

Tomando en cuenta los anteriores puntos, finalmente se procede a generar los espectros de Fourier y funciones de transferencia con la ayuda de Geopsy. De estos gráficos se pueden leer los períodos naturales por medio, por ejemplo, del método “peak picking” mencionado en la introducción de este documento. A continuación se muestra un ejemplo del resultado final.

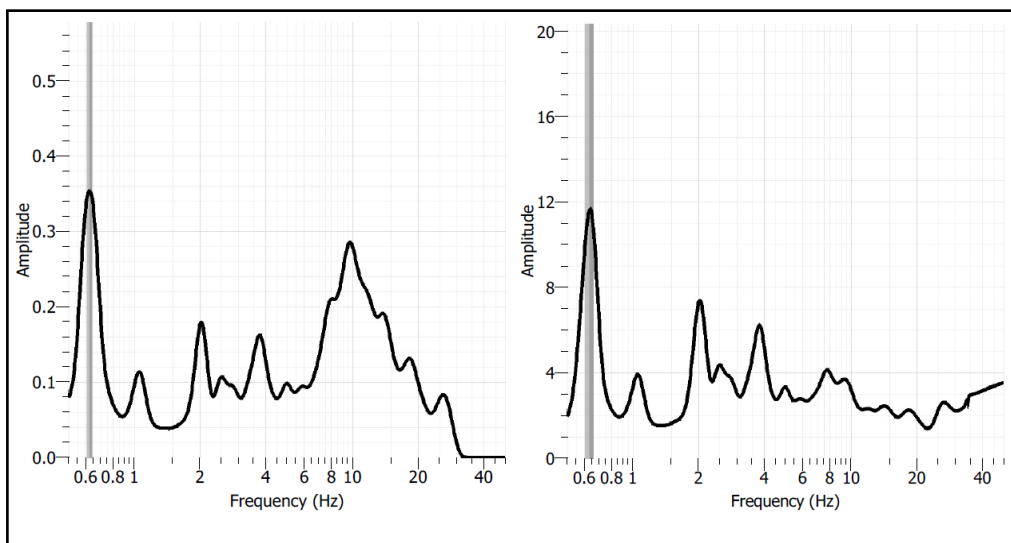


Figura 9: Espectro de Fourier (izquierda) y función de transferencia (derecha).

La figura 9 corresponde al mismo punto de medición, por lo que las diferencias observadas corresponden propiamente a la forma de definir cada espectro. Las líneas verticales que atraviesan los primeros picos de cada espectro corresponden a la frecuencia fundamental, determinada según el espectro de Fourier y la función de transferencia. Como se puede apreciar, en este caso ambos estiman la frecuencia fundamental muy cercana a los 0.6 hz, produciendo resultados consistentes. Una observación interesante es lo que sucede luego de los 6 hz, donde las frecuencias altas se manifiestan con mayor energía en el espectro de Fourier. Una de las ventajas de las funciones de transferencia es precisamente disminuir la participación de entes externos en el análisis de la señal, asociados generalmente con estas altas frecuencias.

5 CONCLUSIONES

Se expone una propuesta para realizar mediciones de vibraciones ambientales y el procesamiento de sus datos utilizando acelerógrafos triaxiales en edificios de concreto reforzado de menos de 100m de altura, con el objetivo de identificar sus primeros períodos naturales de vibración. Se propone el equipo a utilizar, una metodología de diseño de la prueba, la preparación previa necesaria y el procedimiento de una medición de vibraciones típica, tanto para el caso de instrumentación temporal como permanente.

La medición puede ser ejecutada con tres acelerógrafos triaxiales que cumplan las características descritas en este trabajo, manejados por tres personas; el tiempo total de duración depende del área y altura del edificio, así como las facilidades para moverse internamente. Por ejemplo, una MVA con instrumentación temporal realizada por los autores para un edificio de 12 pisos en construcción, sin ascensores funcionando, con un equipo de tres personas, tres ejes de medición con ventanas de tiempo de 30 minutos cada uno, tarda alrededor de seis horas. Por otro lado, otra MVA con el mismo equipo humano, mismos acelerógrafos, la misma cantidad de puntos pero en un edificio de seis pisos, totalmente terminado y con ascensores funcionando, tarda tres horas.

Así mismo, se detalla una propuesta para el procesamiento de la información generada de este tipo de pruebas. Se propone la utilización de intérprete de comandos de Linux, Shell, para la preparación y edición de los registros, así como el software especializado Geopsy para la corrección y filtrado de los mismos. También se propone utilizar este software para la generación de los espectros de Fourier y las funciones de transferencia, de los cuales se obtienen los períodos fundamentales por medio del método "pick picking".

Adicionalmente se concluye que utilizando ventanas de análisis automáticas definidas por medio del algoritmo STA LTA, con límite de tiempo inferior de 30 segundos y superior correspondiente a la totalidad de la ventana de medición, en este caso de 1800 segundos, se producen resultados confiables y consistentes. Lo anterior basado en el diseño, ejecución y análisis de resultados de cinco mediciones de vibraciones ambientales en edificios de concreto reforzado de menos de 100 m de altura, realizadas entre los años 2014 y 2015.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Atakan, K., Bard P., Kind F., Moreno B., Roquette P., Tendo A. & SESAME Team. (2004). J-SESAME: A Standardized Software Solution for the H/V Spectral Ratio Technique. En: 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canadá.
2. Bendat, J. & Piersol, A. (1993). Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. 2da edición, John Wiley & Sons, Nueva York, USA.
3. Carvajal, O. (2005). Identificación de parámetros dinámicos de dos tipos de edificio, utilizando técnicas analíticas y experimentales (Tesis de Grado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
4. Domínguez, A. (2012). Determinación de las propiedades dinámicas y efecto de la interacción suelo-estructura de un edificio en la ciudad de México mediante un estudio de vibración ambiental. (Tesis de maestría en Estructuras). Instituto Politécnico Nacional, México.
5. Michel, C., Guéguen, P. & Bard, P. (2008). Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: an aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard

regions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 293-604. Recuperado de [http:// www.elsevier.com/locate/soildyn](http://www.elsevier.com/locate/soildyn)

6. Málaga, C. & Gómez, O. (2007). Caracterización Estructural por medio de Vibraciones Ambientales. En: *XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil*. Arequipa, Perú.
7. Wathelet, M. (2011). Geopsy: Geophysical Signal Database for Noise Array Processing (Versión 2.9.0) [Programa computacional]. Disponible en <http://www.geopsy.org>.