

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Uso e implementación de una red de Sismógrafos de bajo costo utilizando
Raspberry Shake para el monitoreo de estructuras edificadas**

Josué Daniel Orozco Chica

Ingeniería Electrónica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Electrónico

Quito, 1 de junio de 2022

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Uso e implementación de una red de Sismógrafos de bajo costo
utilizando Raspberry Shake para el monitoreo de estructuras
edificadas**

Josué Daniel Orozco Chica

Nombre del profesor, Título académico

Diego Benitez

Quito, 1 de junio de 2022

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Josué Daniel Orozco Chica

Código: 00201561

Cédula de identidad: 0603951237

Lugar y fecha: Quito, 1 de junio de 2022

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

Durante esta investigación se realiza la implementación de un prototipo de una red de cuatro sismógrafos Raspberry Shake, por lo que se detalla el funcionamiento de los sensores del sismógrafo al igual que su método de almacenamiento, el protocolo de comunicación y envío de datos hacia otros dispositivos. Los Raspberry Shake utilizan un network time protocol, por lo que para la sincronización horaria es una de las configuraciones necesarias para poder utilizar la herramienta de análisis y visualización Swarm-3.

Con el uso del software de visualización, fue posible realizar pruebas y análisis de los datos obtenidos al utilizar una mesa oscilatoria con frecuencia controlada, demostrando que existe una relación logarítmica entre los conteos medidos por los sensores y la frecuencia de oscilación de la mesa. Como punto final de la red, se genera un script que se ejecuta cada cierto tiempo para acceder a los sismógrafos, además de conectar una USB, respaldar la información que registran los equipos, ya que estos solo almacenan pocos días de información.

Palabras clave: Sismógrafos, Raspberry Shake, geophone, MEMs, Helicoders, SHM, NTP, comunicación.

ABSTRACT

This research project describes the implementation of a prototype of a network of four Raspberry Shake seismographs. The operation of the seismograph sensors is detailed, and its storage method, the communication protocol, and data are sent to other devices. The Raspberry Shake uses a network time protocol. Therefore for time synchronization, it is one of the necessary configurations to use the Swarm-3 analysis and visualization tool.

With the visualization software, it was possible to test and analyze the data obtained by using an oscillating table with controlled frequency, demonstrating that there is a logarithmic relationship between the counts measured by the sensors and the oscillation frequency of the table. As the endpoint of the network, a script is generated that is executed from time to time to access the seismographs and connect a USB, and back up the information recorded by the equipment since this is only capable of storing a few days of information in their memory.

Key words: Seismographs, Raspberry Shake, geophone, MEMs, Helicoders, SHM, NTP, communication.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	10
RASPBERRY SHAKE	11
COBERTURA.....	11
ESTRUCTURA.....	12
MEMs Y GEOPHONES	12
COMUNICACIÓN	14
Desarrollo del Tema.....	15
MODOS DE ACCESO Y CONFIGURACIÓN	15
CONEXIÓN DE LOS EQUIPOS.....	15
ACTUALIZACIÓN	16
INTERFAZ WEB.....	16
ACCESO POR SSH.....	17
ESTABLECER EL TIEMPO	18
VIZUALIZACIÓN	19
SWARM.....	19
GRAFICOS DE CUENTAS Y FRECUENCIA	20
ANALISIS Y TRANSFORMACIÓN DE UNIDADES	24
INSTALACIÓN, ESTABILIDAD Y RUIDO.....	27
RESPALDO DE LA INFORMACIÓN	27
ARCHIVO Y CONFIGURACIÓN DE TIEMPO.....	28
RESPALDO USB.....	29
MANUAL DE USUARIO.....	29
Conclusiones	30
Referencias bibliográficas	32
Anexo A: Estructura de un raspberry shake.....	33
Anexo B: Dos tipos de carcasa para el raspberry shake.....	34
Anexo C: Mesa de oscilación encontrada en los laboratorios de ingeniería en alimentos.....	35
ANEXO D: Tabla de datos para el analisis de las señales obtenidas a diferentes frecuencias en mesa de oscilación	36
ANEXO E: Masa de los dos tipos de raspberry shake adquiridos con diferentes coberturas.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Identificación de Equipos Raspberry Shake16

Tabla 2. Conteos promedio registrados por el sismógrafo a diferentes frecuencias25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura Modular del Raspberry Shake.....	12
Figura 2. Estructura interna de un Geophone y un MEM.....	13
Figura 3. Interfaz Web de Raspberry Shake	17
Figura 4. Formas de onda obtenidas mediante el sensor vizualizadas desde la interfaz web	19
Figura 5. Herramientas del vizualizador Swarm 3.....	20
Figura 6. Gráfico de conteos por parte del sensor a través del tiempo	21
Figura 7. Mínima visualización de las helicoders.....	22
Figura 8. Movimiento armónico registrado por los MEMs (b) Señal en el espectro de la frecuencia de (a) (c) figura (b) definida con ejes en escala logarítmica.....	23
Figura 9. (a) Medicion de AM.R666F a 13 Hz (b) Medición de AM.R03AE a 13 Hz.....	25
Figura 10. Tendencia de la frecuencia en función de la magnitud de conteos.....	26
Figura 11. Script para el accedo y copia de los datos de cada Raspberry Shake	28

Introducción

El uso de sismógrafos va en aumento desde los últimos años, ya que los estudios geográficos y sísmicos de diferentes regiones del mundo han dado paso a identificar ciclos naturales y poder estar preparados para mitigar sus daños. Se debe considerar que los sismógrafos utilizados en el campo son voluminosos, tienen baterías limitadas, son difíciles de instalar y adecuar, además de contar con precios elevados. Es por esta razón, que el desarrollo de mayor tecnología y reducción en los montos de producción ha permitido desarrollar sensores de bajo costo para aplicaciones de monitoreo de sismos, edificios, glaciares o volcanes. Sin embargo es necesario determinar su fiabilidad e idoneidad para cumplir ciertas tareas como el monitoreo en tiempo real.

Por lo que tener la posibilidad de desarrollar una red conjunta con sensores, equipos, un método de comunicación y almacenamiento de la información, que se puedan convertir en una herramienta didáctica para el monitoreo de movimientos del terreno resulta una meta alcanzable y de gran utilidad. Esta investigación se centra en generar un prototipo de una red para el monitoreo de la salud estructural (SHM por sus siglas en inglés) de un edificio e incluso dar pie para futuras investigaciones en el campo.

Para el sistema que se va a construir es necesario cumplir con características de eficiencia y confiabilidad que permiten obtener datos que sean seguros de usar y se encuentren acorde a los valores reales. Además debe contar con parámetros de flexibilidad, donde se debe considerar que se tiene una red escalable para el uso de más equipo, heterogénea con el fin de validar los datos obtenidos en diferentes equipos, también debe ser extendible en los recursos y configuraciones a utilizarse [2].

Por último, debe utilizar una estructura moderna de implementación que permita una comunicación eficiente, reducir problemas de coordinación, fácil de automatizar y que permita

realizar el análisis de sus datos, a diferencia de estructuras tradicionales de una sola vía o de centros de monitoreo simples que llegan a producir problemas en los puntos ya mencionados [1].

Raspberry shake

Los dispositivos que se van a utilizar para armar este sistema son los Raspberry Shake. Estos dispositivos son sismógrafos de bajo costo que cuentan con acelerómetros, un sensor vertical, una tarjeta Raspberry Pi, un módulo para comunicación Ethernet, USB y HDMI, todo armado y listo para ser usado dentro de un empaquetado (ANEXO A). Según el análisis publicado en GeoScienceWorld, en el que se compara al Raspberry Shake con otros sismógrafos de bajo costo, este muestra una superioridad en su manejo, facilidad de instalación y mejor calidad de datos frente al resto [8].

Para entender de mejor manera el funcionamiento y utilidad de los dispositivos proporcionados por Raspberry es necesario tener claro cada parte del mismo.

Cobertura

Inicialmente se utilizaron 4 dispositivos Raspberry Shake para la configuración de la red, 2 con una adecuación para mantenerlo en interiores o sitios protegidos de los efectos del clima, y otros dos dispositivos con protección IP67 para mantenerse en exteriores sin verse afectados por polvo o agua (ANEXO B). A pesar de ser los mismos dispositivos y contar con los mismos elementos, tienen diferencia en sus conectores, ya que deben mantener la protección IP designada.

Estructura

Al revisar la información planteada por el fabricante, se muestra un diseño modular simplificado para la recolección de datos, transformación y la forma de envío de los mismo. Se inicia con al recolección de datos por parte de los sensores, luego los voltajes recolectados pasan por un amplificador que dirige a señal analógica hacia un digitalizador de 24 bits que transforma las señales análogas en digitales con la precisión que le permite utilizar 2^{24} considerando que se utilizan número negativos de igual manera. La señal digital pasa por procesos de empaquetamiento y es guardado en la memoria y luego puede ser envia a procesos de transmisión de información.

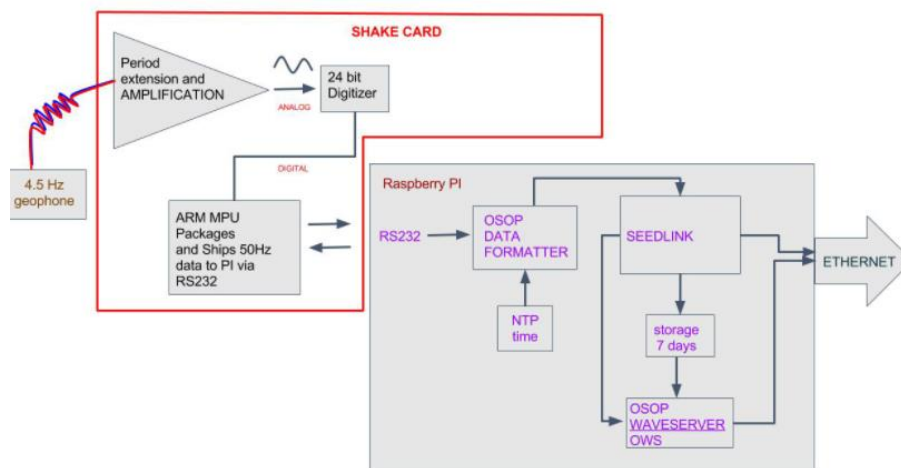


Figura 1: Estructura Modular del Raspberry Shake

Mems y Geophones

Los sistemas micro-electro-mecánicos (MEMs) y los Geophones son sensores que funcionan mediante el uso de una masa en inercia que produce señales eléctricas al momento de existir movimientos mecánicos de la masa mencionada. En el caso de los MEMs estas señales son producidas por capacitancias entre la masa y las paredes que la rodean, mientras que en el

geophone la señal se produce por la inducción magnética que produce la masa al moverse sobre bobinas en las paredes que lo rodean [3].

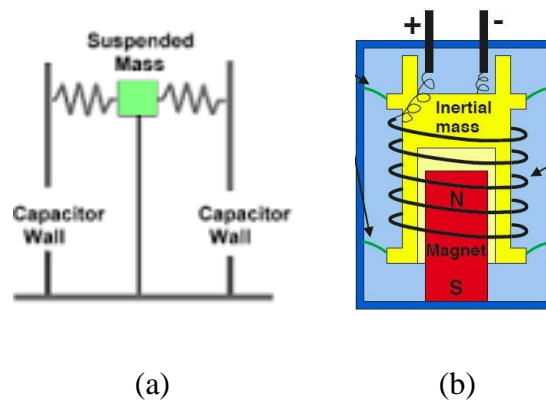


Figura 2: Estructura interna de un Geophone y un MEM

El diseño y características de cada uno de estos sensores va a definir el tipo de uso y mediciones que obtiene. En principio, los geophone están diseñados para tener mediciones de un solo eje, además para el Raspberry Shake tiene una frecuencia de resonancia de 4.5Hz.

Esto quiere decir que movimientos perpendiculares al eje y con frecuencia igual a la resonancia o menor no producen mediciones considerables en el sensor [9].

Por otro lado, los MEM pueden ser establecidos para detectar movimientos en diferentes ejes, en este caso los Raspberry Shake utilizan 3 MEMs para detectar movimientos en tres direcciones, otra ventaja es la frecuencia de resonancia que es menor a la de los geophone, alrededor del 0.5Hz, ampliando el rango de señales visibles por los sensores [9].

Raspberry Shake utiliza ambos sensores para beneficiarse de las ventajas y reducir los errores en mediciones. De esta manera movimientos estructurales de baja frecuencia van a ser cubiertos con mejor precisión, al igual que los de mayor frecuencia dónde el geophone presenta mayor precisión.

Comunicación

El último segmento restante de la estructura de un Raspberry Shake es su método de comunicación, como se observa en la Figura 1, la información es ordenada, codificada y almacenada según un módulo NTP (Network Time Protocol). Para entender la base de la comunicación de estos sismógrafos, primeramente se debe hacer la diferencia entre la comunicación TCP (Transfer Control Protocol) y UDP (User Datagram Protocol).

La gran diferencia entre ambos protocolos es su velocidad de comunicación y validez de la información que se envía, esto debido a que TCP envía la información y espera una respuesta para validar que la información enviada es correcta, mientras que UDP trata de enviar la mayor cantidad de información sin validar detenidamente los paquetes enviados [10].

El uso de NTP soporta la comunicación por UDP y es comúnmente utilizado dentro del Internet, ya que el envío de datos se realiza al sincronizarse con el tiempo, esto permite mayor velocidad en el envío de paquetes, estabilidad en las conexiones y confiabilidad en el canal ya que funcionan con servidores de tiempo que no dependen de horarios regionales [4].

De esta manera se ha establecido una plataforma con nombre Shakenet para la información recopilada de todos los Raspberry Shakes conectados alrededor del mundo. Esta plataforma permite la visualización de otros dispositivos en tiempo real dentro de un mapa, los movimientos registrados por cada dispositivo y un sistema de alerta de movimientos telúricos al validar que los sismógrafos cercanos tengan mediciones similares.

En el último segmento para el envío de información se presentan dos opciones para la lectura y envío de información, en ambos casos almacenan la información por siete días, misma a la que se puede acceder mediante un puerto de Ethernet. En un principio, tenemos el protocolo Seedlink, que busca evitar pérdidas de datos aunque existan pequeñas desconexiones entre el servidor y el cliente debido a que guarda parte de los datos en el buffer del servidor [7]. Por

otro lado, la comunicación por el OWS (Osop Wave Server) esta más optimizado que el Seedlink y su comunicación mediante el puerto 16032 trabaja mejor con la transmisión de datos.

Desarrollo del tema

Luego de comprender la estructura y funcionamiento teórico de los sismógrafos que se van a implementar, se llevó a cabo un proceso paso a paso para permitir que los Raspberry Shake se puedan comunicar con una consola, envíen información y se pueda interpretar dicha información. Permitiendo de esa manera que la red pueda ser implementada para una variedad de aplicaciones.

Modos de acceso y configuración

Los dispositivos Raspberry Shake tienen múltiples formas de acceso, comunicación y configuración para el dispositivo. En principio este avance de posibilidades de conexión se debe que se utiliza un dispositivo Raspberry PI con varios puertos de comunicación, además de la interfaz generada por los desarrolladores de Shake como dispositivo. En consecuencia, acceder a un Raspberry Shake puede lograrse a través de una conexión directa mediante patch cord, o al utilizar un teclado USB y un cable HDMI conectado a una pantalla, también se puede utilizar un navegador para comunicarse con el dispositivo mediante HTTP e incluso se tiene acceso disponible desde una terminal mediante Secure Shell (SSH). La versatilidad presentada por estos dispositivos para comunicarse es bastante amplia y útil para la aplicación deseada.

Conexión de los equipos

Para una mejor comunicación entre los Raspberry Shake se utilizó un router TP-LINK, modelo AC1350, con acceso a 4 puntos de comunicación para los 4 dispositivos que se adquirieron.

Por lo tanto, el acceso a los equipos debe hacerse desde una computadora conectada de manera inalámbrica al router. El fabricante utiliza una notación para identificar sus equipos y al estar conectados a un router se establece una IP pública fija para cada uno según su dirección MAC, obteniendo la siguiente tabla para identificar cada equipo.

Cobertura	Nombre	IP
Interiores	AM.R9B17	192.168.0.131
	AM.R03AE	192.168.0.174
Exteriores	AM.R53C6	192.168.0.142
	AM.R666F	192.168.0.103

Tabla 1: Identificación de Equipos Raspberry Shake

Actualización

Después de conectar los sensores de sismos es necesario realizar una actualización de firmware o cualquier otro módulo de trabajo que haya sido modificado por el fabricante y no se encuentren dentro del dispositivo. Este proceso resultó bastante sencillo ya que solo requirió conectar el router a una salida a Internet y las tarjetas Raspberry PI se encarga de conectarse con el servidor y bajar todos los archivos complementarios necesarios de manera automática.

Se sabe que los sensores se encuentran en orden cuando pueden ser visualizados desde la aplicación ShakeNet al igual que la información que se encuentran recopilando.

Posteriormente, se procedió a retirar la salida a Internet del router utilizado

Interfaz web

Al acceder al equipo mediante un navegador web se despliega la siguiente interfaz:

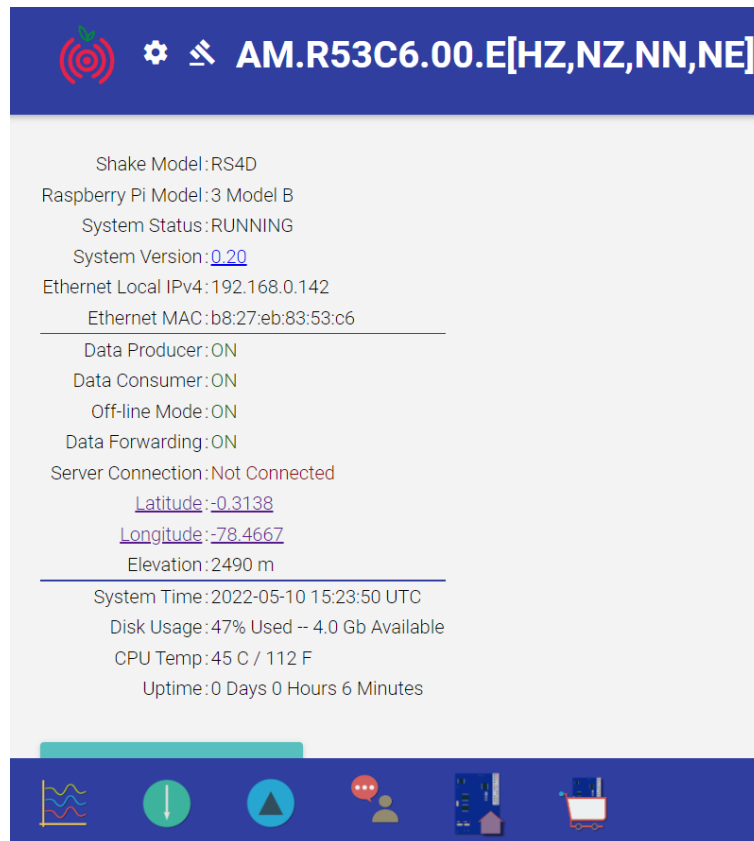


Figura 3: Interfaz Web de Raspberry Shake

Dónde el encabezado se destaca por tener el nombre del equipo, el tipo de mediciones que registra, haciendo alusión a un plano tridimensional donde la base se forma de los ejes E y N y la altura es el eje Z, obtenemos las mediciones del geophone [HZ] y las mediciones de los tres MEMs inclinados a cada uno de los ejes [NZ, NN, NE]. De igual manera se obtienen un resumen del estado y configuraciones del Raspberry Shake que permite modificar el envío y producción de datos.

Acceso por SSH

Como parte de los objetivos del trabajo es acceder a los sensores, recopilar y analizar la información que se recolectan, se estableció una comunicación SSH como el protocolo preferido para conectarse. Con este objetivo en mente, se utiliza la herramienta Oracle VM

Open Box para generar una maquina virtual con un sistema operativo Ubuntu y Linux Mint 20, que permite una mejor manipulación de la terminal del computador que da acceso a los equipos.

Para establecer la conexión es necesario conocer el usuario y contraseña por defecto que tienen el dispositivo, para posteriormente centrarse entre las carpetas disponibles en la que corresponde el almacenamiento de las helicoders, las configuraciones de acceso y las opciones para la habilitación de puertos.

Establecer el tiempo

Los Raspberry Shake, al utilizar un protocolo de NTP de comunicación, tienen como prioridad establecer una configuración de tiempo. En otras palabras, cada vez que se apagen y sean transportados es necesario establecer una misma hora para que todos los dispositivos estén sincronizados, ya sea para una correcta comunicación con los software utilizados o la concordancia con la hora de los movimientos registrados para cada equipo. Como se utilizan los sensores fuera de una conexión a Internet no fue necesario establecer una zona horaria específica, solo mantener una misma hora para todos los dispositivos y para posteriores desarrollos se prefirió dejarlo dentro de la zona horaria de Ecuador GMT -5.

Vizualización

Ya que los sismógrafos Raspberry Shake se encontraban actualizados, configurados y definidos bajo una misma zona horaria, se procede a utilizar herramientas de visualización para las formas de onda obtenidas. Se hace uso de software extra debido a que los datos proporcionadas por la interfaz web de los raspberry, presentan un diseño poco legible y que hace difícil identificar los eventos por horarios.

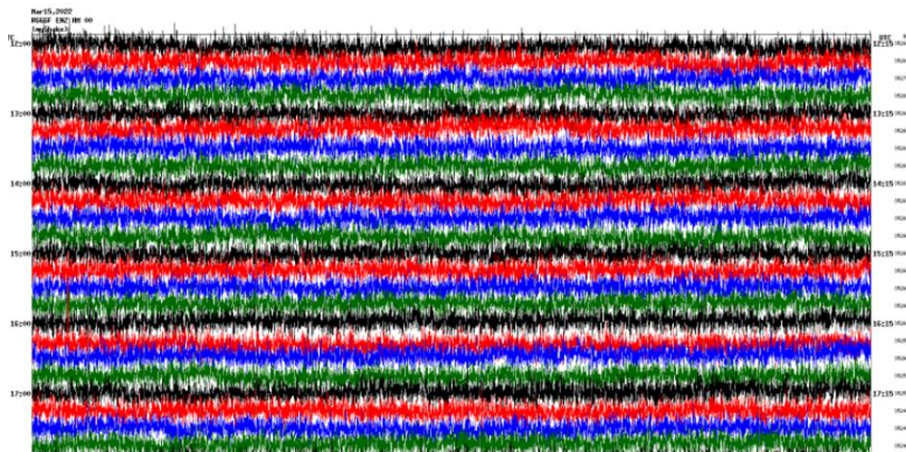


Figura 4: Formas de onda obtenidas mediante el sensor visualizadas desde la interfaz web

Como se observa en la Figura 4, durante un periodo de 6 horas del geophone existe gran cantidad de señales, nada fácilmente identificable o característico con lo que se pueda trabajar y aplicar de tal forma que sirva para un SHM. Por esa razón se decidió utilizar otros software para el análisis.

SWARM

Una de las herramientas de visualización recomendada por los desarrolladores de Raspberry Shake es Swarm 3, plataforma que permite la interacción en vivo con los sensores mediante Wave Server y la IP del dispositivo, ya que permite la visualización en conjunto de varios dispositivos a la vez y la lectura de archivos de helicoders mediante SEEDlink, que son

módulos de transferencia de datos mostrados en la estructura modular de los sismógrafos utilizados.

El software tienen la opción de generar más servidores de comunicación, aunque al usar un Wave Server por el mismo puerto 16032, con otro dispositivo genera conflicto en la información enviada, por lo que se recomienda la generación de uno solo. Además SWARM tienen por defecto un servidor direccionado a los servidores de Raspberry para visualizar otros Shakes alrededor del planeta.

Dentro de Swarm 3 también se observan helicópteros como en la plataforma web de los sensores pero existe una gran diferencia entre ambas herramientas. Swarm presenta una visualización dinámica de las formas de onda, las herramientas presentes permiten la navegación a través del tiempo de la data recolectada, cambios en las magnitudes de los ejes para poder apreciar de mejor manera la información sensada y un cursor que permite desplazarse sobre los datos para una mejor medición.

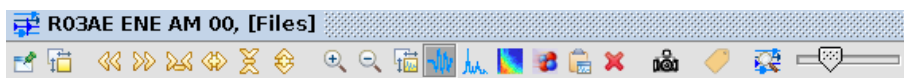
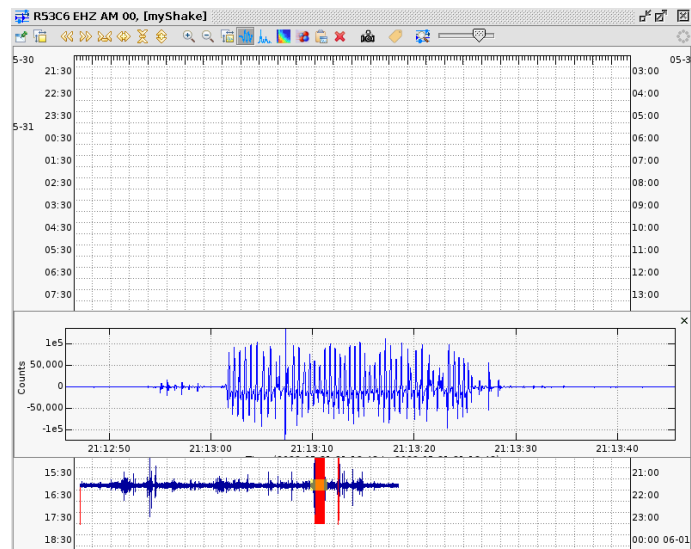
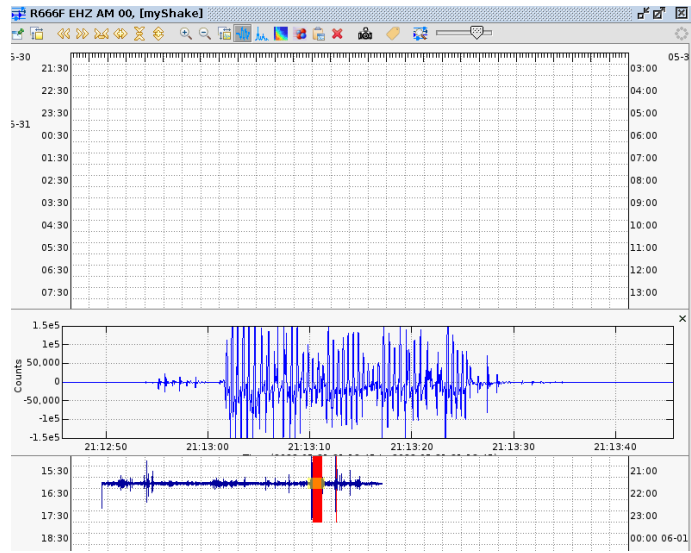
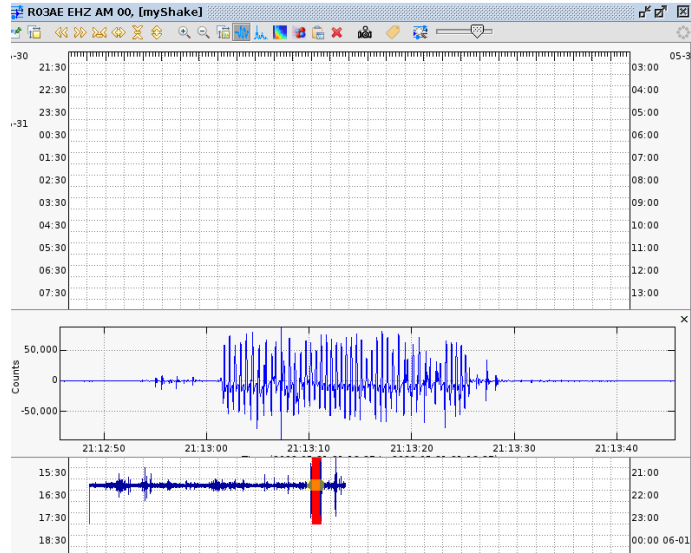


Figura 5: Herramientas del visualizador Swarm 3

Luego de comprender todas estas herramientas de uso, resulta de gran utilidad, entender la información recopilada de los sensores y como usarla a nuestro favor para realizar posteriormente otras mediciones y análisis.

Graficos de cuentas y frecuencia

Posteriormente para mencionar el funcionamiento de los MEMs y geophones se sabe que las mediciones obtenidas tienen como unidad de medida los conteos cada cierto número de tiempo, estas gráficas se representan como las mostradas a continuación:



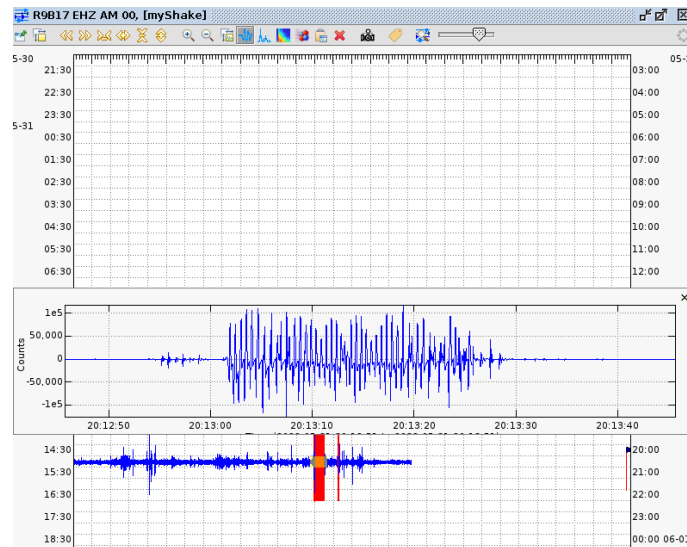


Figura 6: Gráfico de conteos por parte del sensor a través del tiempo

La Figura 6 muestra la validez de la información recopilada y que se encuentran en sincronía para los 4 Raspberry Shake. Los sismógrafos registran el número de conteo cada 1ms que transcurre, por lo que las mediciones pueden llegar a oscilar dentro de un mismo segundo según el tipo de movimiento que se encuentre registrando. Utilizando el visualizador, la medida más pequeña que se puede apreciar son saltos de 500ms, aunque el cursor es capaz de medir todos los puntos entre las escalas.



Figura 7: Mínima visualización de las helicoders

Posteriormente a observar las mediciones de los sensores, como son presentadas, los límites que tienen y que los valores van a variar en espacios pequeños de tiempo para nuestra percepción, resulta útil habilitar otra funcionalidad de la herramienta Swarm, que corresponde a la visualización de las ondas en el espectro de la frecuencia. Este segundo

método permite obtener otra perspectiva de las características de los movimientos registrados además de los conteos y permite describir mejor los comportamientos.

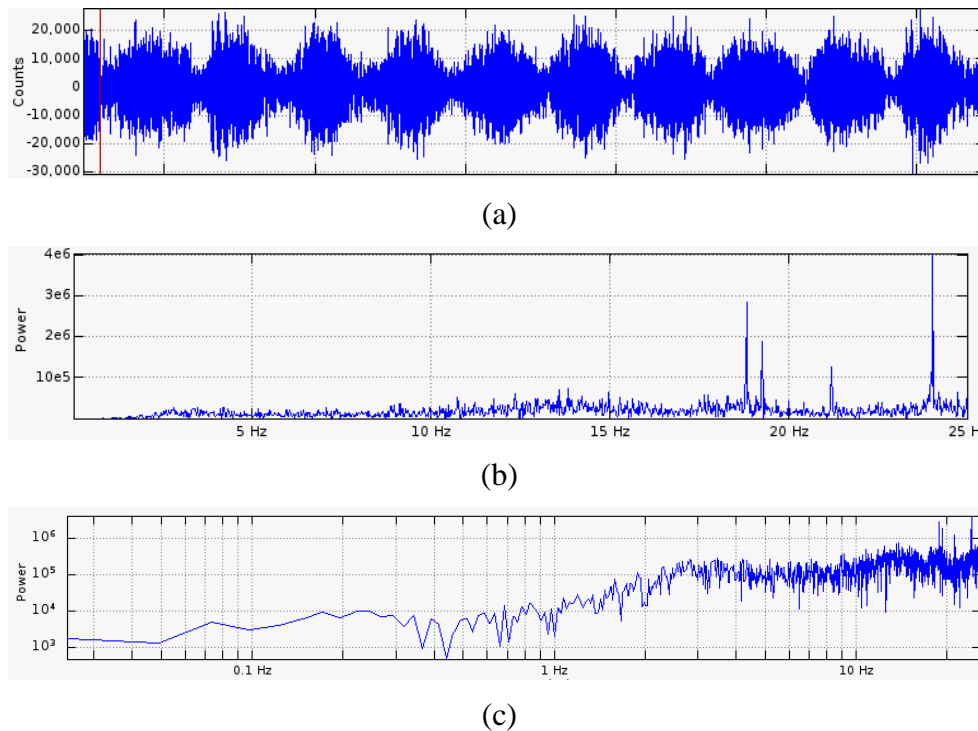


Figura 8: (a) Movimiento armónico registrado por los MEMs (b) Señal en el espectro de la frecuencia de (a) (c) figura (b) definida con ejes en escala logarítmica

Dentro de los gráficos en frecuencia obtenidos se observan picos que representan los valores de mayor oscilación de la señal y como se comporta. En los gráficos en frecuencia resulta sencillo definir las frecuencias aproximadas, mientras que al tener los ejes en escala logarítmica se puede apreciar la tendencia de las onda, es decir las frecuencias con mayor magnitud registrada.

En el caso de movimientos que simulen comportamientos armónicos, se puede aproximar transformaciones a otras unidades como velocidad y aceleración del movimiento, con la ayuda de ecuaciones de movimiento oscilatorio que trabajan con la frecuencia. A pesar de tener este acercamiento, dentro de la implementación para movimientos estructurales o sísmicos no se cuenta con estas aproximaciones, para esos casos se pueden utilizar

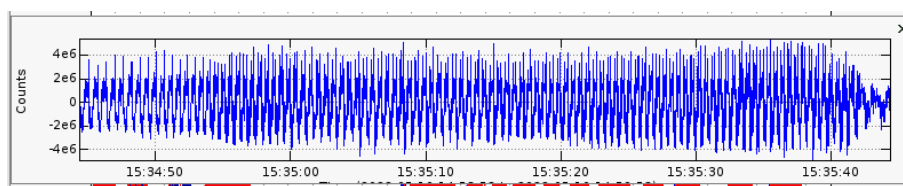
transformaciones a partir de simulaciones controladas que permitan un mejor acercamiento a otro tipo de ondas registradas.

Analisis y transformación de unidades

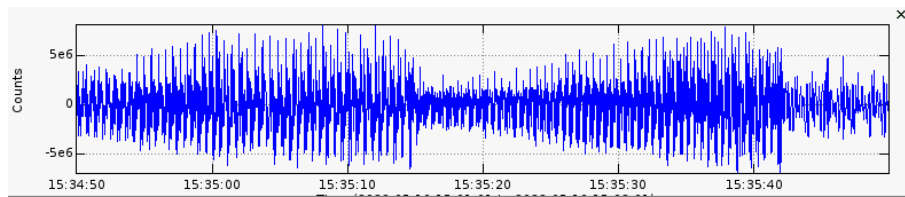
Luego de encender, actualizar, conectar y configurar los equipos Raspberry Shake se decidió realizar pruebas de la red implementada, validando de esa manera que la recolección de data se igual para todos los dispositivos, que la información se envíe correctamente y que la comunicación no genere inconveniente.

Para cumplir este objetivo, se realizaron pruebas en el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos dentro del campus principal de la USFQ, dónde se cuenta con una mesa oscilatoria con un motor trifásico de 0.75kW de potencia que es controlado por un variador de frecuencia SINAMICS G110, de la marca SIEMENS. Es importante resaltar que la mesa oscilatoria tiene una amplitud de aproximadamente 4cm en su oscilación y que el variador de frecuencia tienen un rango de operación entre 0.1 Hz y 15Hz (ANEXO C).

El rango escogido para realizar una aproximación del número de conteos que registra los sensores según la frecuencia de oscilación esta entre 6 Hz y 10 Hz para obtener medidas válidas. Esto debido a que al acercarse a la frecuencia de resonancia del geophone las mediciones incluyen errores, por otro lado al tener dispositivos de baja masa como lo es el caso de los Raspberry Shake para interiores (ANEXO E), la amplitud de oscilación y frecuencia sobre los 11 Hz los dispositivos empiezan a desplazarse sobre la mesa oscilatoria, causando medidas erróneas.



(a)



(b)

Figura 9: (a) Medición de AM.R666F a 13 Hz (b) Medición de AM.R03AE a 13 Hz

Como se mencionó la medición de conteos llega a ser bastante variable, aunque los conteos realizados en el tiempo deben cumplir con valores promediado según la magnitud a la que se realiza la oscilación. Para llegar a valores precisos se tomo medidas de conteos al azar de cada dispositivo para cada frecuencia de oscilación y se resumió en una tabla los datos obtenidos.

Frecuencia (Hz)	Conteo
10	1602994
9,5	1392758
9	905105
8,5	690754
8	548748
7,5	349290
7	269738
6,5	245545
6	171293

Tabla 2: Conteos promedio registrados por el sismógrafo a diferentes frecuencias

Con los datos de la Tabla 2 se realiza una gráfica que permita encontrar una correlación y poder definir una relación entre las dos magnitudes. Se conoce que la tendencia que la frecuencia medida en función de los conteos debe cumplir con una tendencia logarítmica [11], esto debido a los rangos de operación de los dispositivos y características electromecánicas de los sensores.

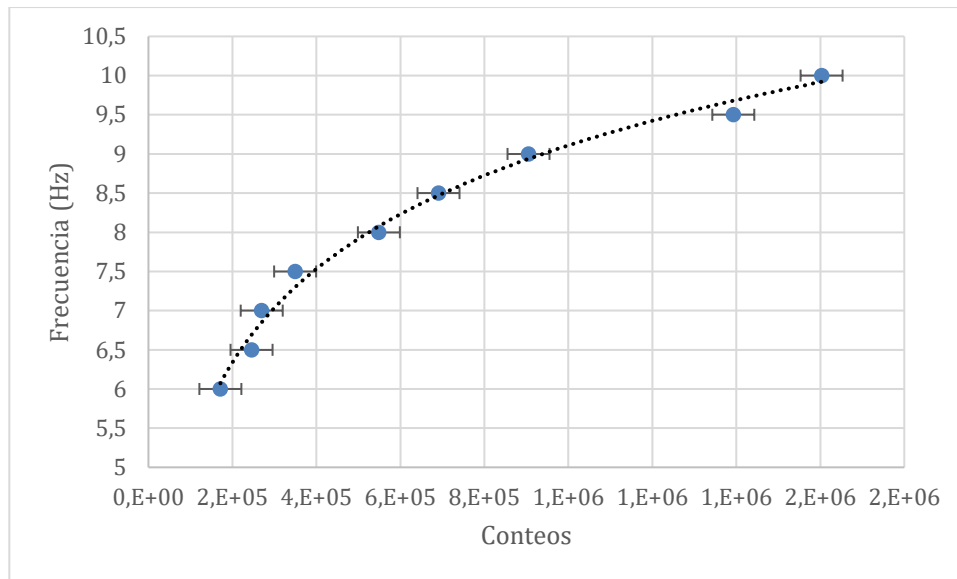


Figura 10: Tendencia de la frecuencia en función de la magnitud de conteos

La ecuación que considera la relación entre la frecuencia y los conteos generados dentro del geophone y los acelerómetros es:

$$Frecuencia = 1.721 \times \ln(Conteos) - 14.67$$

La aproximación obtenida es un buen acercamiento al análisis del comportamiento de los sismógrafos Raspberry Shake y como funciona la lectura de datos. A pesar de que se llegó a una relación entre los parámetros de medición y la frecuencia, no son medidas precisas para un SHM, esto debido a que la oscilación con amplitud de 4cm de la mesa oscilatoria sobrepasa las condiciones de elasticidad que tendrá una estructura en condiciones normales [5]. A pesar de esta diferenciación, un análisis similar se puede realizar con los equipos ya instalados que ayudaran en posteriores usos de la información recopilada o aplicación de parámetros dentro de otros softwares complementarios.

Instalación, estabilidad y ruido

Para la instalación de los sismógrafos Raspberry Shake se debe considerar tres aspectos para mantener la recopilación de datos lo más precisa posible. Primero, los dispositivos cuentan con un indicador de nivel (ANEXO A) para mostrar si se encuentran posicionados de manera correcta sobre la superficie, esto debido a que si los sensores del dispositivo como son el geophone y los acelerómetros no están nivelados pueden generar errores en sus medidas si tienen un grado de inclinación diferente al óptimo [7].

Segundo, por la sensibilidad de los sensores estos pueden producir conteos por sonidos del ambiente, como se aprecia en la Figura 8, en donde se puede apreciar que se generan ondas armónicas de alta frecuencia pero baja magnitud en comparación a las generadas por un movimiento de la superficie en la que se encuentra, por lo que se debe evitar ubicar los sensores con altos índices de ruido.

Por último, se debe considerar si los dispositivos van a ser anclados a una superficie, esto debió a como se muestra en la Figura 9, en caso que la fuerza del movimiento sea suficiente para desplazar los dispositivos las medidas son inservibles. A pesar que los sismógrafos tienen un diseño para ser anclados (ANEXO B) y los sensores pueden registrar aceleraciones de 2g, los Raspberry Shake están contemplados como sismógrafos de micromovimientos.

Respaldo de la información

Los sismógrafos cuentan con una memoria SD incluida, la misma que está configurada para almacenar 7 días de información y luego eliminarla, para evitar problemas de espacio. Por esa razón es necesario generar otros métodos de respaldo de la información que permitan tener registros de mayor rango en el tiempo. Se estima que cada día se genera un máximo

20MB por lo que se tienen espacio para más de 7 días, aun así es necesario tener otros espacios donde almacenar y utilizar los datos registrados.

Archivo y configuración de tiempo

Para solucionar el problema del almacenamiento utilizó un script para acceder a los dispositivos de manera automática, luego dirigir esta información al directorio donde se almacenan los datos registrados, para esto se copia la carpeta, mediante un protocolo scp, en un directorio local y la coloca con nombre de la fecha y hora de ese momento.

```

CUR_DATE=$(date +%Y-%m-%d-%H-%M)
DEVICE="R9B17"
NAME=$DEVICE-$CUR_DATE
echo "Iniciar Copia $DEVICE"
#echo $CUR_DATE
sshpass -p shakeme scp -r myshake@192.168.0.131:/opt/data/archive/2022/AM/-
R9B17 ~/JOSUE/"$NAME"
echo "Finalizar Copia"

```

Figura 11: Script para el acceso y copia de los datos de cada Raspberry Shake

Para finalizar el proceso de respaldo de información se hace uso del Crontab, este es un archivo de texto que cumple la función de guardar una lista de comandos para ejecutarse en segundo plano dentro de un periodo especificado de tiempo [6]. Se conoce que los Raspberry cuentan con este archivo y tiene definido como operación de borrado de datos todos los días Lunes a las 00:00:01, por lo que el archivo para la copia de los datos debe estar definido para ejecutarse todos los Domingos a las 23:54:00, teniendo así el tiempo necesario para realizar la copia, con la menor pérdida posible de información y evitando tener registros duplicados.

Respaldo usb

Como segunda medida de seguridad, se habilitó la opción de conectar una USB a los sismógrafos Raspberry Shake que funcionen como segunda forma de almacenamiento además de la SD, en este caso de mayor capacidad y sin la configuración de borrar los datos almacenados. El proceso requiere cambiar la configuración dentro de uno de los archivos de los dispositivos que habilita montar una USB para almacenamiento.

Manual de usuario

Como producto final de todos conocimientos, configuraciones y especificaciones encontradas y establecidas se elaboro un manual para el usuario con el fin de otorgar herramientas para una futura implementación en sitio de los dispositivos, dando inicio a la recopilación de datos y análisis de los mismo con mayor rapidez que para una persona que utiliza los sismógrafos Raspberry Shake por primera vez.

Conclusiones

Con todo lo realizado durante el trabajo de se puedo comprender la utilidad de tener redes de sensores sísmicos para el análisis estructural en general y como esto beneficia a la mitigación de posibles amenazas dentro de una estructura. De igual manera, se encontró un sismógrafo de bajo costo como lo son los Raspberry Shake, que luego de entender los sensores que utiliza y la comunicación que tiene con el resto de equipos, se dice que cumple con el proceso de obtención de datos de manera fiable, es de fácil configuración, traslado e instalación.

Fue posible conectar los cuatro dispositivos disponibles dentro de una misma red, logrando así identificarlos por valores como su dirección IP y nombre generado por el fabricante. Además, accediendo a la red de los sismógrafos fue posible la interacción con la interfaz web y sus configuraciones que permitieron el inicio de envío de datos y conexiones por otros medios a los dispositivos.

Se usó de manera efectiva la herramienta como lo es una maquina con un sistema operativo Linux para acceder a los dispositivos mediante un protocolo SSH, de esta manera haciendo más fácil a la manipulación de los datos almacenados, configuraciones de seguridad y necesariamente de sincronización de tiempo ya que la red utilizada se encuentra sin salida a Internet, por lo que no cuenta con un servidor de tiempo que ayuda a la sincronización de sus comunicaciones.

Con la disponibilidad del software Swarm-3, es posible generar monitoreo y análisis de los movimientos registrados, lo que era la pieza faltante para integrar la solución de los sismógrafos Raspberry Shake con su aplicación de SHM al momento de ser implementado. Mostrando de igual manera que se establece una relación entre los conteos y la frecuencia de oscilación y tiene una tendencia logarítmica. Con estos valores es posible definir constantes de frecuencia y aceleración de un movimiento registrado, que posteriormente serán valores útiles

para utilizar software de análisis estructural y entender mejor las fuerzas a las que se somete un edificio.

Para finalizar el proceso de diseño de la red, fue necesario guardar los datos obtenidos en una maquina de administración debido a el rango de tiempo de guardado designado para los Raspberry Shake, este proceso fue automatizado en código y en sequencia de tiempo, además de utilizar una doble validación con el uso de memorias USB para otro respaldo de información.

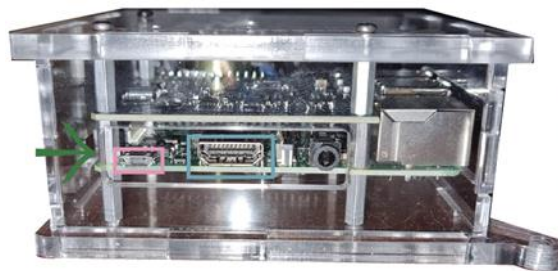
Referencias bibliográficas

- [1] E. Sdongos et al., "A novel & practical approach to structural health monitoring — The RECONASS vision: Local positioning, sensor networks, secure communications and remote sensing at the service of structural monitoring to assess construction damage and related needs," 2014 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems Proceedings, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/EESMS.2014.6923261.
- [2] F. Zonzini et al., "Structural Health Monitoring and Prognostic of Industrial Plants and Civil Structures: A Sensor to Cloud Architecture," in IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 23, no. 9, pp. 21-27, December 2020, doi: 10.1109/MIM.2020.9289069.
- [3] Lund, B., Bödvarsson, R., Dynesius, L., & Schieschke, M. (2017). *Study of high-frequency seismic signals in the Forsmark area*. Solna: SWEDISH NUCLEAR FUEL AND WASTE MANAGEMENT CO.
- [4] Mills, D. L. (1991). Internet time synchronization: the network time protocol. IEEE Transactions on Communications, 39(10), 1482–1493. doi:10.1109/26.103043
- [5] Ministerio del Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). Componentes horizontales de la carga sísmica: espectros elásticos de diseño. En NEC: Peligro Sísmos diseño sismo resistente (págs. 32-36). Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- [6] ORACLE. (2011). Programación de tareas del sistema (tareas). En *Guía de administración del sistema: administración avanzada* (págs. 111-115). EE.UU.: Oracle.
- [7] Raspberry Shake Manual. (2021). *Raspberry Shake Documentation v20211213*. <https://manual.raspberrypi.org/index.html>.
- [8] Robert E. Anthony, Adam T. Ringler, David C. Wilson, Emily Wolin; Do Low-Cost Seismographs Perform Well Enough for Your Network? An Overview of Laboratory Tests and Field Observations of the OSOP Raspberry Shake 4D. Seismological Research Letters 2018; 90 (1): 219–228. doi: <https://doi.org/10.1785/0220180251>
- [9] Tellier, N. (2017). Understanding MEMS-based digital seismic sensors. *First Break* (vol. 35), 93-99.
- [10] Xylomenos, G., & Polyzos, G. C. (1999). TCP and UDP performance over a wireless LAN. IEEE INFOCOM '99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future Is Now (Cat. No.99CH36320). doi:10.1109/infcom.1999.751376
- [11] Z. -F. Gao, Y. -L. Du, M. -B. Su and B. -P. Chen, "Network Sensor and Its Application in Structure Health Monitoring System," First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume I (ICICIC'06), 2006, pp. 68-71, doi: 10.1109/ICICIC.2006.120.

ANEXO A: Estructura de un raspberry shake

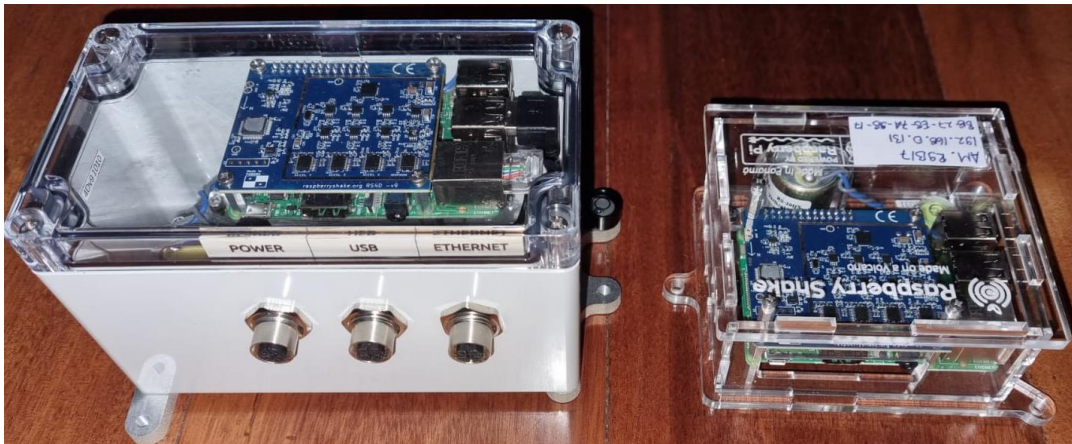


- Raspberry Pi
- Acelerómetros (MEMs)
- Geophone
- Puerto Ethernet
- Puertos USB
- Nivel



- Puerto HDMI
- Alimentación
- Tarjeta USB

ANEXO B: Dos tipos de carcasa para el raspberry shake



ANEXO C: Mesa de oscilación encontrada en los laboratorios de ingeniería en alimentos



ANEXO D: Tabla de datos para el análisis de las señales obtenidas a diferentes frecuencias en mesa de oscilación

Frecuencia (Hz)	Conteos
10.0	2726789
	1347234
	2254921
	998642
	1279453
9.5	1755651
	2667514
	736774
	965369
	1573278
9.0	722206
	1451696
	1086951
	680750
	782997
8.5	432820
	979938
	479042
	1288650
	600624
8.0	1998814
	432820
	357461
	335879
	479042
7.5	479042
	128865
	661415
	539833
	235879
7.0	854587
	428861
	218631
	96416
	184831
6.5	680750
	328630
	167030
	113664
	307584

6.0	161056
	328630
	113664
	196464
	124771

ANEXO E: Masa de los dos tipos de raspberry shake adquiridos con diferentes coberturas

