APLICACIÓN DE SISTEMAS MEMS INTEGRADOS EN SMARTPHONES PARA LA DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS DE BAJA FRECUENCIA DE ESTRUCTURAS CIVILES

Presentado por:
WENCEL FABIAN SANTOS RODRIGUEZ 20031005114

Anteproyecto para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director:

Hugo Aya Baquero
Docente de planta

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA

TABLA DE CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3
2. OBJETIVOS 5
   2.1. OBJETIVO GENERAL 5
   2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5
3. JUSTIFICACIÓN 6
   3.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA 6
   3.2. JUSTIFICACIÓN SOCIO-ECONÓMICA 6
   3.3. JUSTIFICACIÓN PERSONAL 6
4. MARCO REFERENCIAL 7
   4.1. SHM (STRUCTURAL HEALTH MORNITORING) 7
      4.1.1. ADQUISICIÓN DE DATOS, NORMALIZACIÓN Y LIMPIEZA DE DATOS 7
      4.1.2. EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN 8
      4.1.3. DESARROLLO DEL MODELO ESTADÍSTICO 8
      4.1.4. AXIOMAS FUNDAMENTALES DEL SHM [20] 8
   4.2. MEMS 9
   4.3. ACELERÓMETROS 9
5. ALCANCES Y LIMITACIONES 10
   5.1. ALCANCES 10
   5.2. LIMITACIONES 10
6. DESARROLLO 11
   6.1. ETAPA 1 11
   6.2. ETAPA 2 13
7. RESULTADOS 17
   7.1. MUESTRAS CON ACTION SCRIPT 17
   7.2. MUESTRAS CON APLICACCIÓN EN ANDROID STUDIO 17
   7.3. ANALISIS FRECUENCIAL 17
8. CONCLUSIONES 23
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 25

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los puentes vehiculares son una de las estructuras más comunes en las grandes ciudades del mundo y Bogotá no es la excepción. En la ciudad hay alrededor de 350 puentes de los cuales hay varios que presentan daños estructurales en las juntas (puntos de unión entre el puente y la vía) [1]. El estado de estos puentes se va deteriorando a lo largo que pasa el tiempo y tal deterioro depende de varios factores, entre ellos el tipo de trasporte que pasa por ellos (carga pesada, carga liviana, etc.), las corrientes de viento, movimientos tectónicos, entre otros [2]. Para poder monitorear el estado de este tipo de estructuras se utilizan diferentes métodos llamados SHM por sus siglas en inglés (Structural Health Monitoring) que traduce Monitoreo de Salud Estructural. Los SHM se utilizan para medir parámetros como vibraciones en una estructura, su temperatura, la presión a la que está sometida o su deformación [3] [4]. De manera general los SHM buscan encontrar fallas estructurales mediante el uso de sensores [5] ubicados en redes de monitoreo que toman muestras en distintas partes de la estructura para luego ser analizadas con algún software especializado.

Dichos sensores pueden ser de tecnología MEMS por sus siglas en inglés (Micro Electronic Mechanical Systems), esta tecnología utiliza transductores de escala micrométrica para traducir señales mecánicas en señales electrónicas. Gracias a esto el uso de MEMS disminuye el tamaño de los sensores sin sacrificar la precisión de la medición. En la actualidad el mercado de los MEMS es cada vez más enfocado hacia aplicaciones domésticas [6] como podómetros o estabilizadores de imagen entre otros. También tienen aplicaciones de tipo específico como medición de ángulo, frecuencia mecánica y aceleración, los cuales ya han sido utilizados para el monitoreo del estado de los puentes [7].

Las redes utilizadas en SHM tienen una gran tendencia a utilizar acelerómetros MEMS ya sean cableados o inalámbricos. Diferentes técnicas de muestreo y procesamiento de datos han sido utilizadas para SHM como por ejemplo: algoritmos genéticos [8], uso de MEMS por cantiléver [9], monitoreo remoto en tiempo real [10], monitoreo mediante ultrasonido [11], análisis caótico no lineal [12], entre otros. Estas redes suelen tomar las muestras mediante sensores de uso específico los cuales son integrados de alguna manera en las estructuras.

Aunque inicialmente las aplicaciones de los MEMS no representaban una gran parte del mercado hoy en día se pueden encontrar en teléfonos celulares, videojuegos, electrodomésticos, entre otros. Ahora es más frecuente tener a la mano una herramienta que permite el acceso a un MEMS, el cual da una gran variedad de oportunidades que en ocasiones no se aprovechan del todo: los Smartphones. Los teléfonos inteligentes o Smartphones se han convertido en una herramienta que la gente utiliza con más frecuencia cada día. Es difícil no encontrar a la mayoría de la población [13] con alguna clase de Smartphone, en Colombia más del 50% de los habitantes usan un Smartphone [14]. Si bien no se conoce todo el potencial que pueden llegar a tener, se sabe que son mucho más que un teléfono y se considera una pequeña computadora de bolsillo. [13] Con procesadores de

4 núcleos, un par de Gigas de RAM y una gran variedad de sensores como: acelerómetros, barómetros, sensores de campo magnético, giroscopios, sensores de luz y algunos más, estos aparatos brindan una gran variedad de aplicaciones que mejoran la calidad de vida [15].

En específico se hablará de los acelerómetros integrados en los Smartphones. Estos acelerómetros dan un rango de sensado de 3 ejes (x, y, z) los cuales se pueden utilizar en aplicaciones académicas [16], médicas [17] [18], entre otras. Con los acelerómetros se puede sensar, además de aceleración, dirección de movimiento, frecuencias mecánicas y ángulos de inclinación. Como estos MEMS están integrados en los Smartphones, tienen muchas ventajas respecto a los MEMS de uso específico, ya que tienen un sistema de procesamiento, almacenamiento y de envío de datos por diferentes medios (bluetooth, internet, redes móviles) además de la visualización de los mismos.

Con esta herramienta disponible es posible crear una aplicación que permita tomar muestras de vibración en un puente vehicular, hacer un procesamiento y almacenamiento de los datos y enviarlos vía email para un diagnóstico preliminar del puente antes de implementar un sistema SHM completo ya que estos sistemas suelen ser costosos y tediosos de implementar ya que requieren que los MEMS sean incrustados en la estructura directamente y una infraestructura de procesamiento local y remota para acceder a los datos. De esta manera los Smartphones pueden ser utilizados como una herramienta de diagnóstico preliminar.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de diagnóstico preliminar para el monitoreo del estado de los puentes vehiculares, a través de una aplicación para Smartphone con sistema operativo Android mediante el análisis de las vibraciones mecánicas producidas por la circulación de vehículos en un puente vehicular.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar una aplicación para detección, almacenamiento, procesamiento previo y envío de datos tomados por el acelerómetro de un Smartphone.
- Utilizar el algoritmo apropiado para el análisis de los datos recolectados por el acelerómetro del Smartphone.
- Encontrar puntos de comparación apropiados para la verificación de efectividad del diagnóstico previo.
- Validar que el sistema de diagnóstico previo de información esté acorde al verdadero estado del puente.

3. JUSTIFICACIÓN

3.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

Este proyecto presenta una integración de desarrollo de software con el hardware utilizado como medio de muestreo de datos; de esta manera se podrá integrar varios campos tanto de ingeniería, como de física y matemáticas vistos en el programa académico de Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, llevando a una mayor comprensión la visión que debe tener un ingeniero electrónico íntegro. También presenta un reto en el sentido del desarrollo de algoritmos para lograr una identificación apropiada del estado de los puentes vehiculares con muestras específicas de vibraciones mecánicas.

3.2. JUSTIFICACIÓN SOCIO-ECONÓMICA

Los métodos de monitoreo del estado de estructuras suelen ser métodos limitados por los costos de implementación ya sean inalámbricos o cableados, además que el tiempo de intervención para dicha implementación es relativamente alto [2] [7] [19] [20]. Para evitar gastos innecesarios la herramienta propuesta en este proyecto ayudaría a los ingenieros o arquitectos a cargo del monitoreo del estado de un puente a dar un diagnóstico previo a la implementación de dichos sistemas, con una herramienta que está al alcance de la mano sin la necesidad de comprar un hardware adicional. Haciendo el diagnóstico inicial con esta herramienta se podrían identificar fallas estructurales y en caso de encontrar alguna irregularidad, proceder con la implementación del sistema de monitoreo completo.

3.3. JUSTIFICACIÓN PERSONAL

Llevar a cabo este proyecto pretende comprender nuevos campos de acción relacionados con la Ingeniería Electrónica, además el desarrollo de aplicaciones móviles relacionadas con el área de la ingeniería es una gran motivación para darle un uso práctico a las herramientas que nos ofrecen estos dispositivos, llevándolas más allá del uso cotidiano que por lo general se les da.

Involucrarme en un proyecto que requiere implementación tanto de hardware como de software, apunta a un crecimiento en ambas ramas de la electrónica llevándome a ser un profesional integral, adquiriendo conocimientos que trascienden la academia y procuran una proyección a futuro que será bastante útil en el campo laboral.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. SHM (STRUCTURAL HEALTH MORNITORING)

El Monitoreo de Condición Estructural o SHM por sus siglas en ingles es el proceso de implementar sistemas de detección de daños y estrategias de caracterización para estructuras de ingeniería. El daño se define como cambios en los materiales y/o las propiedades geométricas de la estructura, incluyendo condiciones de frontera y sistemas de conectividad física. Este proceso involucra la toma de muestras de manera periódica mediante la utilización de arreglos de sensores, la extracción de características sensibles al daño de estas medidas y análisis estadísticos para determinar el estado actual de la estructura.

En la literatura se pueden encontrar dos tipos de aproximaciones para abordar el problema: la primera es directa en la cual se utiliza la información obtenida del daño para determinar las características dinámicas de la estructura y la segunda es de manera inversa donde las características dinámicas de la estructura se utilizan para determinar las características del daño.

En el proceso de monitoreo hay ciertas etapas cuya dificultad incrementa con cada una de estas y que requieren previo conocimiento de las etapas anteriores, dichas etapas son:

- Detectar daño en la estructura.
- Localizar el daño.
- Identificar el tipo de daño.
- Cuantificar la severidad del daño.

Hay que tener en cuenta que el sistema propuesto en este documento solo apunta a descubrir la primera etapa, las otras tres quedaran abiertas a investigaciones futuras.

4.1.1. ADQUISICIÓN DE DATOS, NORMALIZACIÓN Y LIMPIEZA DE DATOS

En la adquisición de datos se debe tener en cuenta el tipo de sensor a utilizar, la cantidad de sensores, la ubicación de estos y el tipo de excitación que se utilizará. Además se debe tener en cuenta el tipo de almacenamiento de datos y la manera de transmitirlos si es necesario. También el intervalo de tiempo entre las muestras y el número de muestras. La normalización de las muestras se hace importante en la medida en que haya factores variables en las pruebas o la adquisición de datos. La limpieza de datos hace referencia a la depuración de las muestras, esto se puede

hacer de manera automática sin embargo en su mayoría se realiza de manera manual por una persona experimentada en el área.

Esta parte del SHM es diferente para cada estructura y debe ser determinado de acuerdo a las necesidades.

4.1.2. EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Esta etapa del SHM es crucial ya que es la que determina que patrones en los datos corresponden a estructuras con daño. Los patrones determinantes son específicos a la aplicación y hay diferentes métodos para reconocer estos patrones. De los métodos más comunes para la extracción de patrones es la correlación de las cantidades medidas como frecuencia o amplitud de vibración. Otro método es crear estructuras defectuosas y comparar su respuesta con estructuras no defectuosas. También se pueden obtener estos patrones es a través de datos teóricos como simulación de elementos finitos las cuales pueden ser estimuladas con daños introducidos por simulación. Al final se pueden obtener los patrones de daño con un método o la combinación de varios.

4.1.3. DESARROLLO DEL MODELO ESTADÍSTICO

Hace referencia a los algoritmos requeridos para identificar los patrones de una estructura dañada de una sin daño. Estos algoritmos pueden ser de diferentes naturalezas dependiendo de los datos disponibles, si hay datos de estructuras con daño y estructuras sin daño se utilizan algoritmos de aprendizaje supervisado; de lo contrario se pueden utilizar algoritmos de regresión.

4.1.4. AXIOMAS FUNDAMENTALES DEL SHM [21]

Hay 7 axiomas fundamentales para el monitoreo de estructuras, que son los siguientes:

1) Todos los materiales tienes defectos inherentes.
2) La estimación del daño requiere la comparación de dos estados del sistema.
3) Identificar la existencia y lugar del daño puede hacerse mediante un modo no supervisado de aprendizaje, sin embargo identificar el tipo de daño y la severidad del mismo requiere por lo general aprendizaje supervisado.
4)
    a) Los sensores no pueden detectar daño. La extracción de información, modelos estadísticos y el análisis de señales son necesarios para convertir la información del sensor y lograr determinar daño.
    b) Sin extracción de información inteligente, entre más sensible sea un dato al daño también será más sensible a factores ambientales.

5) La escala de longitud y tiempo asociadas con la iniciación del daño dictan las propiedades requeridas para el sistema de sensado.
6) Hay un relación inversa entre la sensibilidad al daño de un algoritmo y su capacidad de rechazo al ruido
7) El tamaño del daño que puede ser detectado en cambios de la dinámica de un sistema es inversamente proporcional al rango de frecuencia de excitación.

4.2. MEMS

Los MEMS (Sistemas Mecánicos Microelectrónicos) por sus siglas en inglés son dispositivos electromecánicos de escala muy pequeña, estos varían desde 20 µm hasta 1 mm de longitud y son utilizados en una amplia gama de aplicaciones. Sirven tanto como sensores como actuadores y su producción ha sido posible gracias a los avances en la tecnología de fabricación de los componentes electrónicos.

En las últimas décadas los desarrolladores y fabricantes de MEMS han ido revolucionando el mercado haciendo aplicaciones en múltiples campos incluyendo: sensores de temperatura, presión, fuerzas de inercia, químicos, de campo electromagnético, radiación, entre otras. Lo más importante a remarcar es que el desempeño de los MEMS superan el desempeño de sus análogos de escala macro. Además de ser mejores en cuestiones de desempeño también resultan ser de manufactura económica ya que utilizan las mismas técnicas de fabricación de los componentes microelectrónicos. Además de micro sensores también hay micro actuadores, en este campo también hay avances remarcables como micro válvulas de gas y líquidos, micro bombas para crear presión de fluidos, micro espejos para displays entre otros.

4.3. ACELERÓMETROS

Los acelerómetros son dispositivos que pueden medir aceleraciones relativas al objeto medidor, es decir mide la aceleración respecto al MEMS, en este caso el MEMS mide la aceleración de la gravedad al estar en reposo pero no la mide en caída libre a pesar de que su velocidad es cada vez mayor debido a que el MEMS está en un marco de referencia en el que no tiene peso. Las aplicaciones de los acelerómetros varían ampliamente, estos pueden ser un solo eje o de varios ejes y son utilizados en ingeniería para medir aceleraciones en vehículos para controlar diferentes actuadores (como los airbags de los carros), en biología son utilizados para reconocimiento de patrones de movimiento en diferentes seres vivos.

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1. ALCANCES

La finalidad del proyecto es obtener un modelo preliminar para el análisis del estado de los puentes. Se tomaran muestras con dos modelos diferentes de Smartphones en un puente ubicado en la ciudad de Bogotá donde se registra alto tráfico vehicular, en especial de buses del sistema Transmilenio. Las muestras se pasaran por un sistema de procesamiento de FFT (Transformada Rápida de Fourier) para poder tener análisis tanto temporal como frecuencial. Se harán puntos de comparación con estudios realizados en la literatura.

Se desarrollará una aplicación básica en el Sistema Operativo Android que realizará la recolección, almacenamiento, pre procesamiento y envío por correo electrónico de los datos.

El trabajo será en su mayor parte experimental para comprobar si los MEMS integrados en los Smartphones pueden ser utilizados como herramienta preliminar a redes de registro de datos de una SHM.

Las muestras serán tomadas una a la vez procurando que las condiciones entre muestra y muestra sean lo suficientemente similares. El procesamiento de los datos será verificado en un programa en la computadora como MATLAB para mostrar la consistencia de los mismos.

5.2. LIMITACIONES

El proyecto tendrá una limitación con la disponibilidad de hardware, ya que se cuenta solamente con dos Smartphones. También contará con limitaciones temporales ya que las muestras deben ser similares entre si y se deberá esperar a que dos eventos sean lo suficientemente parecidos para que la muestra sea válida.

También habrá limitaciones en la parte de software ya que el poder de procesamiento del Smartphone no es tan bueno como el de una computadora personal.

Se limitará a verificar la capacidad de los Smartphones para un diagnostico preliminar de las estructuras, el diagnostico en si requiere de un estudio previo del puente que no se posee y por ende quedara fuera de los alcances de este proyecto.

6. DESARROLLO

6.1. ETAPA 1

De los trabajos realizados en la literatura respecto al análisis de estructuras mediante dispositivos MEMS se encontró que Miao et al [4] tiene un modelo que da una buena aproximación a lo que se pretende en este trabajo. Aunque utilizan análisis de vibraciones y elongación, el análisis desarrollado con vibraciones es aplicable al proyecto de puentes en Bogotá y por ende será el que se va a utilizar.

Básicamente se tomarán las muestras obtenidas con el acelerómetro en el dominio del tiempo y se aplicará FFT (Transformada rápida de Fourier) para llevarla al dominio de la frecuencia, finalmente se sacarán los modos de cada muestra y el promedio para cada Smartphone para verificar que tan similares o diferentes son los resultados en cada caso.

El puente utilizado fue escogido procurando un alto tráfico de buses de sistema Transmilenio. Según estos criterios se escogió el puente de la AV Américas con AV 68 (Fig.1).

Los teléfonos utilizados fueron un *Sony Xperia Z2* y un *Samsung Ace J*. El *Z2* tiene un acelerómetro de 3 ejes marca *BOSCH*, referencia *BMA2X2* con resolución de 0.0191497803 m/s^2 y rango máximo de 39.2265930176 m/s^2, el *Ace J* tiene un acelerómetro de 3 ejes marca *STM*, referencia *K2HH* con resolución de 0.0019971008 m/s^2 y rango máximo de 39.2266006470 m/s^2. El rango de frecuencia que puede entregar el sensor estará dado por las limitaciones de procesamiento del Smartphone y se analizara en la siguiente etapa.

Para poder tomar las muestras se debe fijar el Smartphone a la estructura con un sistema de sujeción, para esto se utilizaron 4 puntos pequeños de plastilina en cada esquina del teléfono, el teléfono se coloca con la pantalla apuntando hacia arriba acostado en el suelo en el punto estratégico que se escogió para tomar las muestras (Fig. 2). Para asegurar que las muestras se tomen en el eje adecuado del acelerómetro se utilizó la aplicación Bubble Level la cual muestra el Angulo del teléfono respecto al plano (Fig. 3). Esto se logró haciendo que los puntos de plastilina fueran de mayor espesor a un lado que al otro.



Fig. 1 Puente del cruce de la Av. 68 con Av. Américas



Fig. 2 Método de fijación del teléfono al punto de toma de muestras.

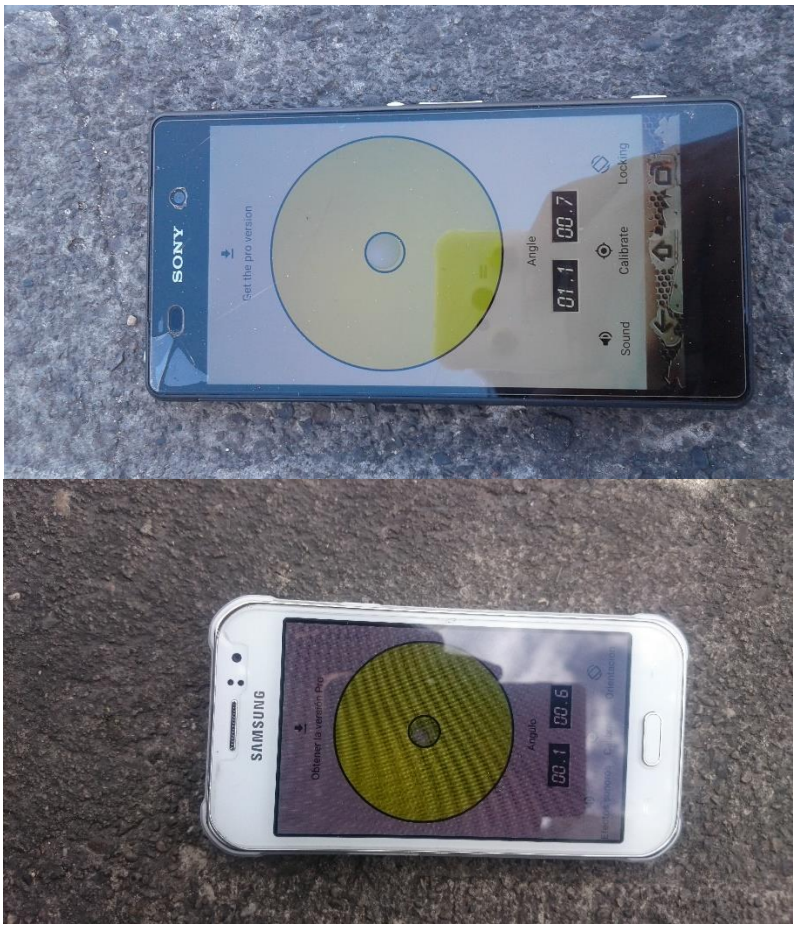


Fig. 3 App Bubble Level que permite poner el Smartphone en posición horizontal.

6.2. ETAPA 2

Para el desarrollo del experimento se desarrolló una aplicación para Android en la plataforma Adobe Flash CC la cual tiene opciones de exportación de aplicaciones para dispositivos Android, se hicieron pruebas con el módulo de acelerómetro (la clase Accelerometer) del lenguaje de programación *Action Script 3 (AS3)*.

Se debe tener en cuenta es el efecto de *aliasing*, que se genera si la frecuencia de muestreo no es lo suficiente mente grande para la muestra que se está tomando. Este efecto se evita cumpliendo el criterio de Nyquist que dice que la frecuencia de muestreo s debe ser mayor o igual a 2f donde f es el ancho de banda de la señal. En el caso de este trabajo se desconoce el ancho de banda de la señal que se va a tomar así que se debe tomar la frecuencia de alrededor de 10 Hz encontrada por Miao et al [4].

Se encontró que para esta librería detectar el valor del acelerómetro en intervalos muy pequeños arroja datos inconsistentes los cuales no funcionan para el experimento ya que se necesitan datos separados en intervalos de tiempo fijos para

poder determinar la frecuencia de muestreo y además se requiere una frecuencia de muestreo mayor a la obtenida por este medio, la frecuencia de muestreo entregada por el Action Script es de 10 Hz, como se observa no cumple el criterio de Nyquist y por ende no funciona para esta aplicación.

A partir de esto se utilizó el programa Android Studio 2.1.3 para desarrollar la aplicación en java. Se encontró que con él, programando la aplicación en el framework nativo las frecuencias entregadas son mejores y se logró obtener un mayor rango de frecuencias para trabajar. Sin embargo este rango depende de la capacidad de procesamiento del Smartphone así que para cada uno de los Smartphone utilizados se utilizó una frecuencia de muestreo diferente, ya que se quiso observar la toma de muestras con la mayor frecuencia posible. Para el *Z2* se encontró que se pueden tomar muestras a 200 Hz mientras que el *Ace J* solo logra tomar muestras a 100 Hz. Estas frecuencias están muy por encima de lo esperado cumpliendo con el criterio de Nyquist evitando el aliasing.

Para comprobar que los resultados obtenidos por la aplicación son correctos se utilizaron:

- *Android Studio 2.1.3*
- *Androidplot 2.0* (https://github.com/halfhp/androidplot)
- *Matlab 2013* con la función *fft* para el análisis de Fourier.

La aplicación tiene una interfaz gráfica sencilla con un botón para iniciar la toma de muestras y un plano cartesiano donde se muestra la gráfica resultado del análisis post toma de muestras. Al presionar el botón el dispositivo toma muestras por 5 segundos, luego hace un análisis de Fourier y una vez terminado guarda los datos en un archivo .csv en la carpeta AccelerometerData en el root del dispositivo. También muestra una ventana emergente para dar la opción de enviar el archivo por email.

En Fig.5 se puede observar la interfaz gráfica de la aplicación para Android.

Las muestras se tomaron en 4 puntos en cada puente. Los puntos fueron los puntos de unión de la placa superior del puente y la placa posterior (Fig. 4). En estos puntos se evidenciaron las vibraciones de mayor amplitud a diferencia de otros puntos en el puente. Las muestras fueron tomadas cuando los vehículos pasaban por encima de estos puntos. Estas muestras tienen una duración de aproximadamente 3 s cada una, se comienza a tomar la muestra unos 10 m antes de que el vehículo cruce por el punto de medición y se detiene 10 m después de que el vehículo ha pasado.



Fig. 4 Puntos de toma de muestras.

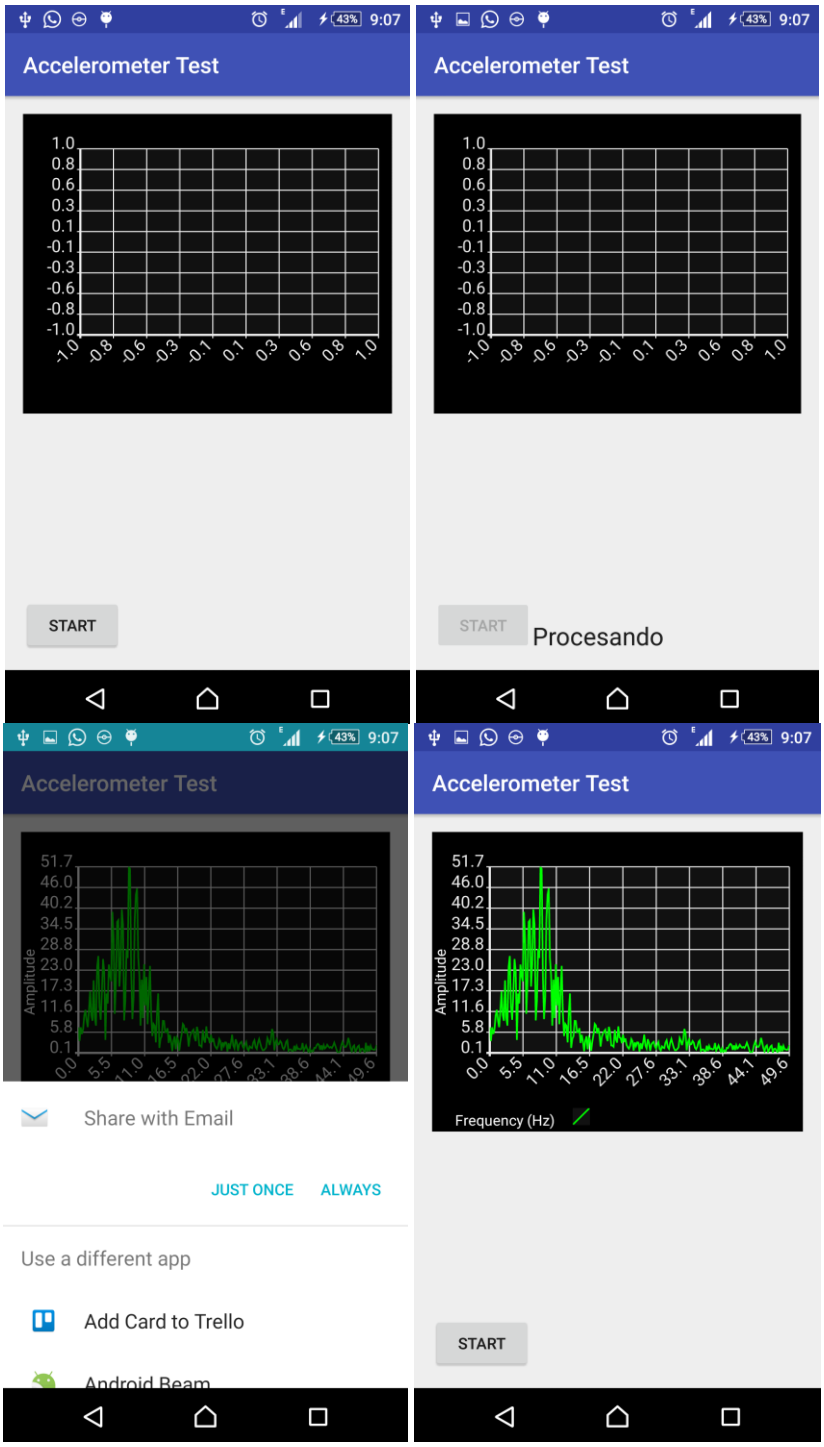


Fig. 5 Interfaz gráfica de la aplicación desarrollada para Android.

7. RESULTADOS

7.1. MUESTRAS CON ACTION SCRIPT

Para poder tomar las muestras inicialmente se pensó en una app propia desarrollada con Flash programada en AS3. Básicamente se escribió un script de prueba que tomaba el valor del acelerómetro en el eje z y se guardaba en memoria para graficarlo. Para ello se utilizó la clase nativa *Accelerometer* de AS3, esta clase tiene un evento llamado *UPDATE* que actualiza el valor de las variables del acelerómetro en los 3 ejes y el intervalo en el que se actualiza este valor está dado por una variable llamada *setRequestedUpdateInterval* la cual está dada en milisegundos. Se hicieron pruebas desde 500 ms hasta 5 ms y se encontró que a partir de 100 ms se empiezan a perder datos; es decir, no se registraban algunos valores en el arreglo donde se estaban guardando los valores. Entre más pequeño es el valor mayor número de muestras se perdían. Ante este comportamiento se abandonó el desarrollo en AS3 ya que con muestras mayores a 100 ms se obtenía una frecuencia de muestreo de 10 Hz la cual es muy pequeña para las frecuencias que, como se verá, registran las vibraciones de los puentes.

7.2. MUESTRAS CON APLICACCIÓN EN ANDROID STUDIO

Se tomaron 100 muestras con cada Smartphone exclusivamente con el paso de buses de Transmilenio. En ambos casos las muestras se tomaron para vehículos cruzando en el carril ubicado al lado del andén, esto se hizo con el propósito de tomar las vibraciones con la mayor amplitud posible.

7.3. ANALISIS FRECUENCIAL

Una vez tomadas las muestras se hizo un análisis frecuencial para identificar la frecuencia de oscilación del puente y de esta manera determinar qué tan similares son la una de la otra y que precisión se obtiene de los resultados arrojados por el acelerómetro de los teléfonos. En Fig. 6 se puede observar el resultado obtenido de una de las muestras en el dominio temporal, la primera es del teléfono Xperia Z2 y la segunda del teléfono Samsung Ace J. Como se puede observar la gráfica del Z2 se ve más densa debido a su mayor frecuencia de muestreo. Además se puede ver que la amplitud de la muestra del Z2 es mucho mayor que la amplitud de la muestra del Ace J.

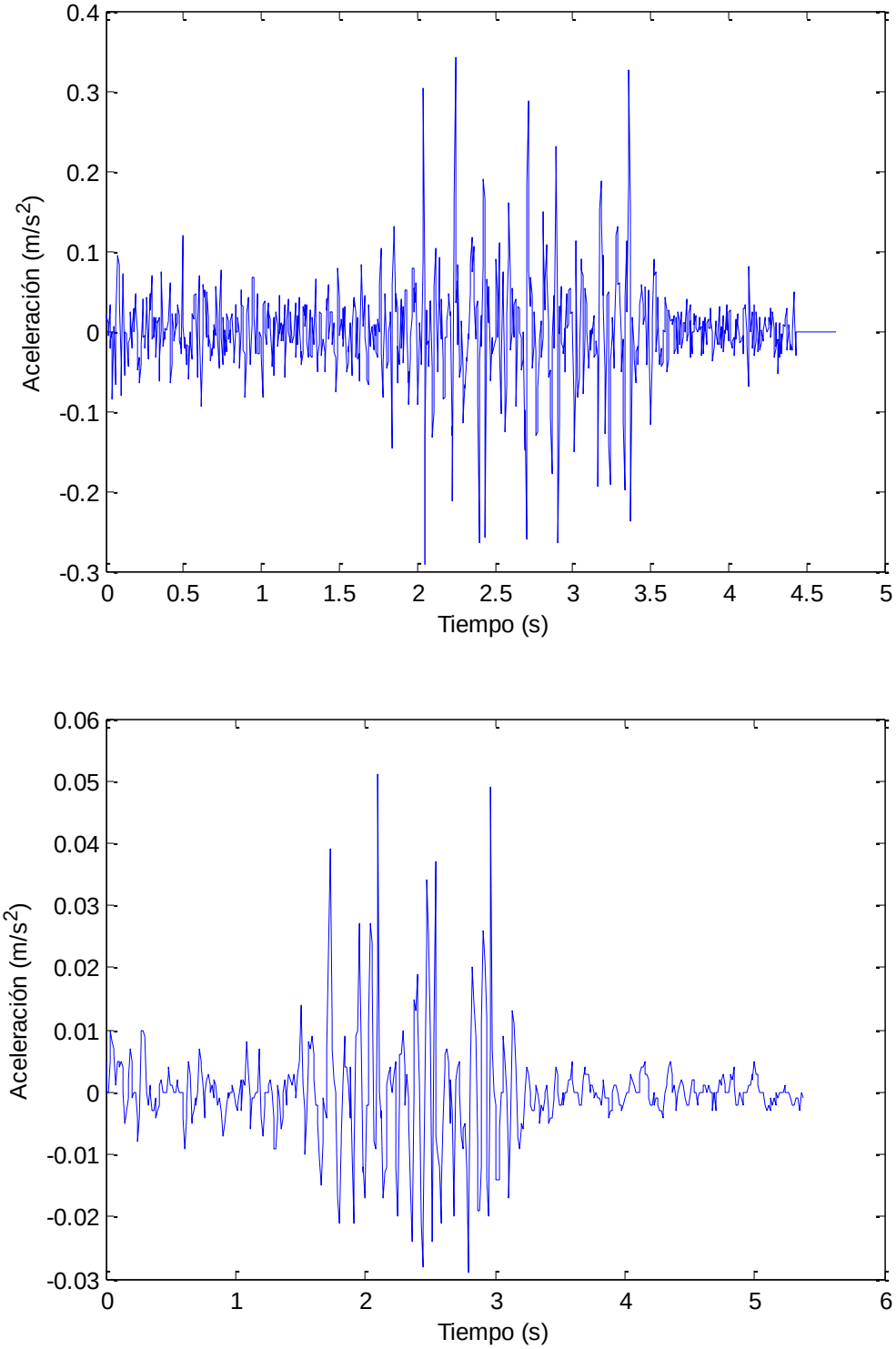


Fig. 6 Graficas en el dominio del tiempo de algunas de las muestras (arriba Z2, abajo Ace J).

Cada muestra fue pasada por la función *fft* de Matlab para hacer un análisis en frecuencia, cuando se tiene la transformada de Fourier se calcula la densidad

espectral de potencia para encontrar las frecuencias más significativas para cada muestra. Una vez se normaliza el espectro se obtiene Fig. 7 y Fig. 8 donde se puede ver el promedio de la densidad espectral para todas las muestras en cada punto y la información sobre las frecuencias de los modos, en rojo están las del Xperia Z2 y en azul las del Samsung Ace J. Con estos resultados se encuentran los modos de cada punto con cada celular los cuales se encuentran en la Tabla 1 con un punto para cada celular y su frecuencia de ocurrencia.

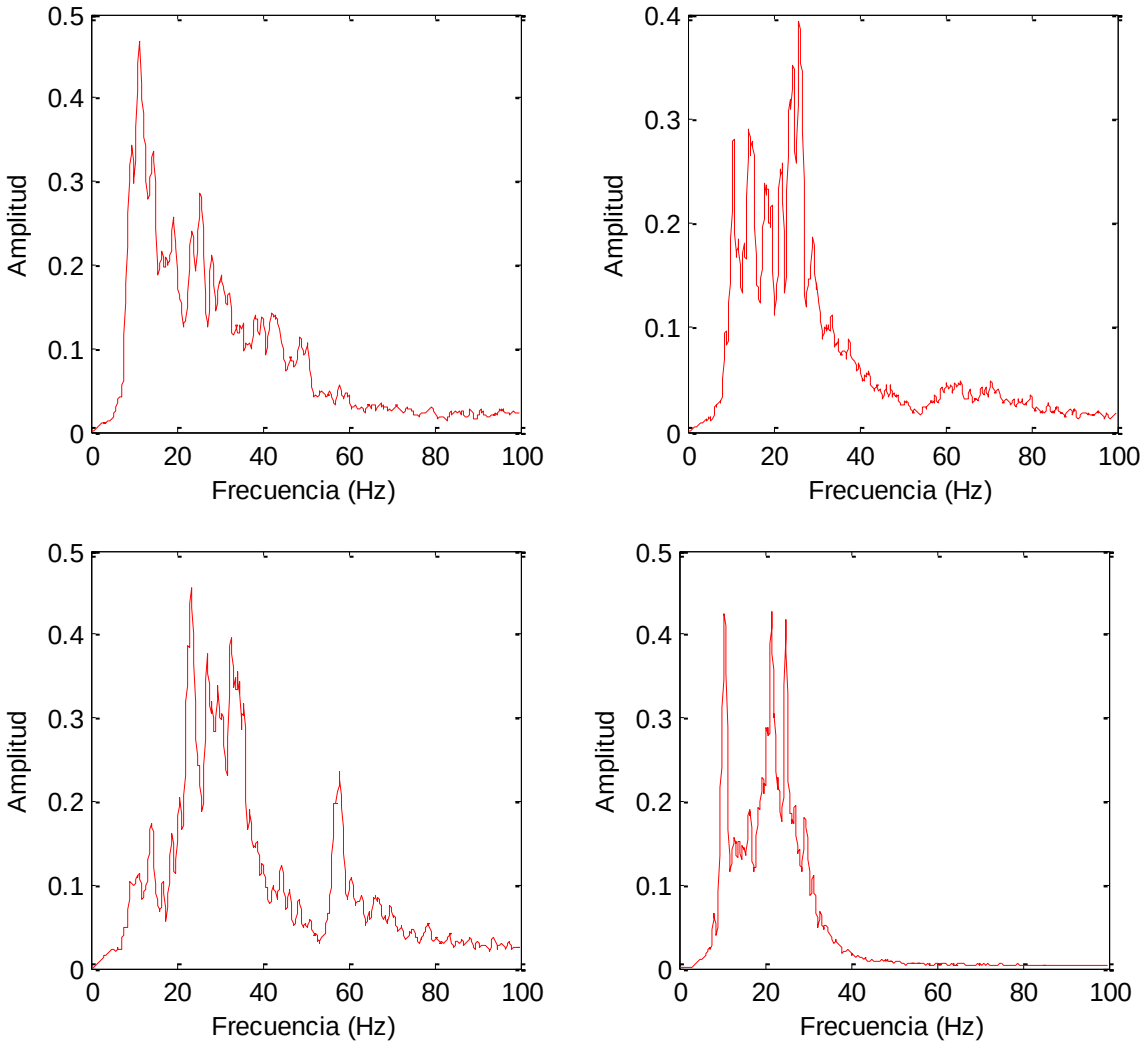


Fig. 7 Promedio de densidad de potencia espectral para los cuatro puntos del puente con las muestras del Xperia Z2.

En la graficas se evidencian frecuencias que sobresalen y que dan información sobre el estado del puente. En Tabla. 1 están las frecuencias principales para cada punto según cada Smartphone. Aunque la frecuencia de muestreo es mayor en el Xperia Z2 el Samsung muestra resultados más coherentes el uno con el otro. Las frecuencias más representativas encontradas con el Samsung se encuentran entre

9 y 11 Hz para todos los puntos mientras que con el Xperia Z2 están separadas por más de 10 Hz cada una siendo la más baja en 11.29 Hz y la más alta en 32.69 Hz.

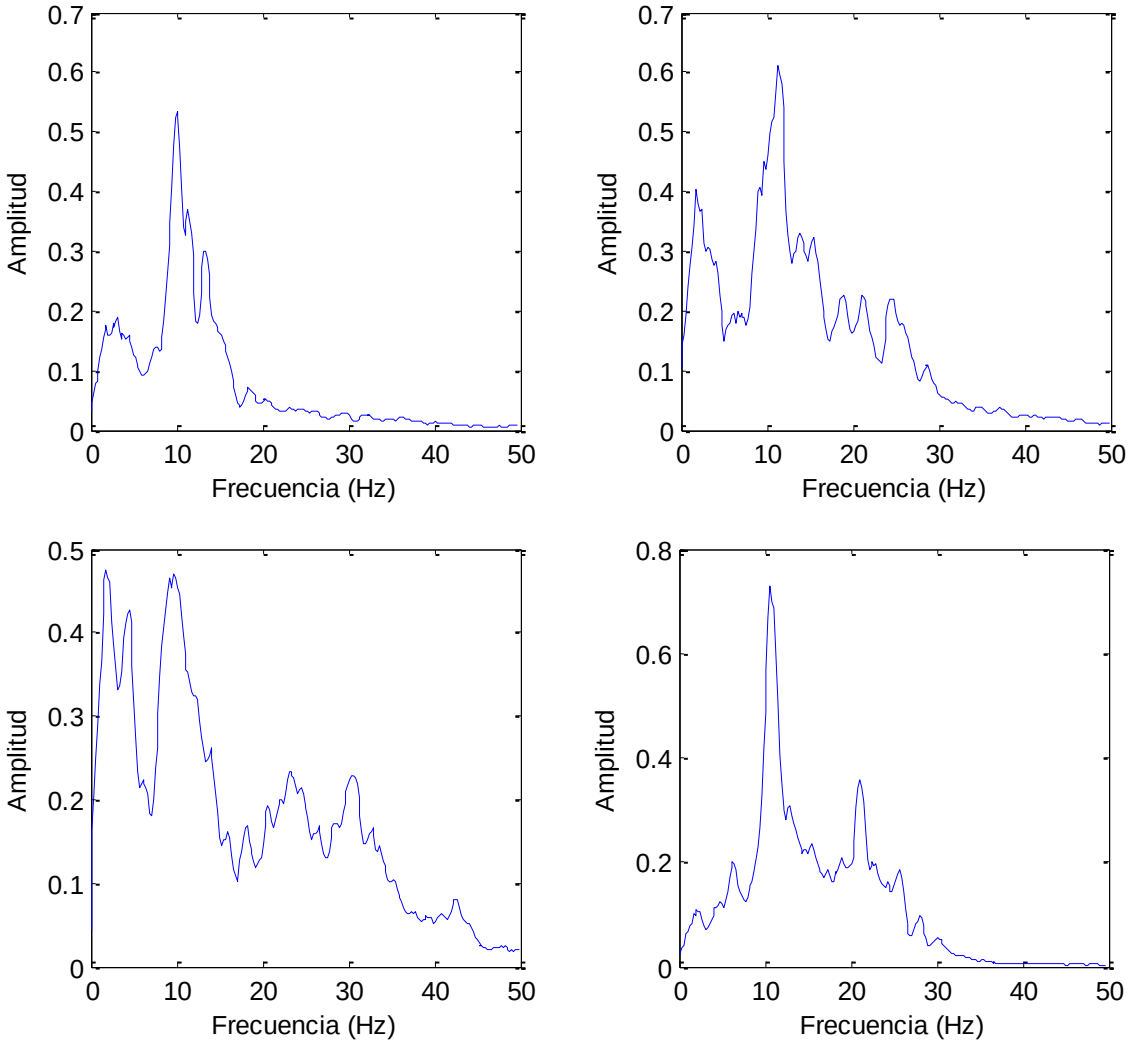


Fig. 8 Promedio de densidad de potencia espectral para los cuatro puntos del puente con las muestras del Samsung Ace J.

Además de la variación en las frecuencias más representativas se observa que el porcentaje de ocurrencia en estas frecuencias es mucho menor para los resultados en el Xperia que en el Samsung reafirmando que la consistencia en los resultados del segundo.

Los resultados son mejores en el Samsung que en el Xperia debido a la resolución del acelerómetro de cada dispositivo, mientras que en el Xperia la resolución es de 0.0191497803 m/s^2 en el Samsung es de 0.0019971008 m/s^2, es decir, casi 18 mm/S^2. Esta divergencia se identifica en la calidad de las muestras tomadas. Aunque el Xperia tiene una capacidad de procesamiento mejor y por ende una mayor frecuencia de muestreo, sin un acelerómetro de mejor calidad no podrá

tomar muestras tan precisas como el Samsung. Una frecuencia de muestreo de 100 Hz es suficiente para analizar este tipo de estructuras ya que se obtienen resultados muy similares a los resultados obtenidos en el modelo teórico [4].

Punto 1 Xperia Z2			**Punto 1 Samsung Ace J**		
Modo	**Frecuencia (Hz)**	**Ocurrencia**	**Modo**	**Frecuencia (Hz)**	**Ocurrencia**
Modo 1	9.58	34.3%	Modo 1	3.15	18.9%
Modo 2	11.29	46.15%	Modo 2	10.02	53.55%
Modo 3	14.48	33.65%	Modo 3	11.32	36.92%
Modo 4	16.61 – 17.47	26.92%	Modo 4	13.17 – 13.35	29.9%
Modo 5	19.2	23.96%			
Modo 6	23.6	24%			
Modo 7	25.56	28.58%			
Modo 8	28.33	21.21%			
Modo 9	30.25 – 30-46	18.91%			
Modo 10	32.16 – 32.38	16.68%			
Punto 2 Xperia Z2			**Punto 2 Samsung Ace J**		
Modo 1	10.63 – 10.76	28.74%	Modo 1	1.69	40.38%
Modo 2	14-17 – 15.09	29%	Modo 2	11.22	61.21%
Modo 3	14.17 – 18-63	28.99%	Modo 3	13.77	33.15%
Modo 4	21-26 – 22.05	25.73%	Modo 4	15.46	32.31%
Modo 5	24.54	35.14%	Modo 5	19.68	22.72%
Modo 6	25.98	39.34%	Modo 6	20.97	20.45%
Modo 7	29.26	18-74%	Modo 7	24.35 – 24.8	21.99%
Punto 3 Xperia Z2			**Punto 3 Samsung Ace J**		
Modo 1	17.24	14.1%	Modo 1	1.82	47.47%
Modo 2	23.95 – 23.56	45.58%	Modo 2	4.45	42.66%
Modo 3	27.08 – 27.24	37.56%	Modo 3	9.10	46.57%
Modo 4	29-48	33.92%	Modo 4	9.71	47.01%
Modo 5	32.69 – 32.85	39.6%	Modo 5	23.07	23.42%
Modo 6	35.6	31.63%	Modo 6	30.56	22.93%
Modo 7	57.85	23.64%			
Punto 4 Xperia Z2			**Punto 4 Samsung Ace J**		
Modo 1	10.66	42.25%	Modo 1	6.26	20.05%
Modo 2	16.29	18.93%	Modo 2	10.64	73.03%
Modo 3	21.57	42.73%	Modo 3	21.08	35.86%
Modo 4	24.85	41.67%	Modo 4	25.67	18.64%
Modo 5	29.19	18.16%	Modo 5	27.97	9.77%

Tabla. 1 Modos para cada uno de los análisis en el puente según punto y Smartphone.

A partir de estos resultados se concluye que si el acelerómetro del Smartphone tiene una resolución del orden de 10^{-3} m/s^2,los resultados del análisis frecuencial

serán confiables para hacer una comparación con el modelo de diseño del puente; se deben confrontar las frecuencias naturales del puente con las obtenidas en las muestras y verificar que están alejadas de la frecuencia de resonancia del puente, de ser así, estas condiciones indicarán que el puente está en buen estado, sino se requeriría un análisis más a fondo de la estructura.

Esos análisis están fuera del alcance de este trabajo ya que no se cuenta con un modelo completo del puente ni se conocen sus frecuencias características. Según los resultados obtenidos la frecuencia a la que vibra el puente en su mayoría con una carga continua de autos está cerca a los 10 Hz. El modelo real del puente habrá sido calculado en su construcción y diseño haciendo los resultados aquí obtenidos relevantes.

8. CONCLUSIONES

- Los dispositivos MEMS integrados en los Smartphones, en específico el acelerómetro, sirven para hacer un diagnóstico previo del estado de un puente, siempre y cuando el acelerómetro integrado tenga una resolución aceptable en los rangos a evaluar y que su capacidad de procesamiento permita una frecuencia de muestreo de al menos 100 Hz. Hay que tener en cuenta las limitaciones de muestreo que tiene el sistema operativo, ya que estos dispositivos están diseñados para aplicaciones más cotidianas y no explotan todo el potencial del acelerómetro integrado
- Aunque el porcentaje de ocurrencia de las frecuencias representativas en la pruebas no llego a ser de 100% en ningún caso, se puede considerar como aceptable ya que por la calidad de los acelerómetros se pudo presentar errores en ciertas medidas que corrieron un poco la medición de algunas frecuencias haciéndolas cercanas pero no iguales a la frecuencia representativa, tal vez si estas frecuencias "erróneas" se tomaran como ocurrencias, estos valores serían más cercanos a 100%.
- Para poder tener resultados confiables no es necesario que el Smartphone sea de gama alta, basta con verificar la calidad del acelerómetro que tenga integrado y este será adecuado para hacer un diagnóstico previo a la estructura.
- Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede afirmar que los Smartphones se pueden utilizar como herramienta de diagnóstico previo y que es viable desarrollar una app para hacer todo el análisis frecuencial dentro de la misma, de esta manera poder enviar los resultados por medio digital según sea el requerimiento. Este procedimiento está por fuera de los alcances de este trabajo y queda como tarea a próximas investigaciones.
- No se encontraron trabajos similares en el puente en cuestión, por ende queda para futuras investigaciones comparar los resultados de esta investigación con los nuevos hallazgos.
- Hay que tener en cuenta que el sistema de sujeción puede causar atenuaciones en la señal de salida, aunque se procuró que la capa de plastilina fuese tan delgada como fuese posible no se descartan errores por este factor. Para poder verificar este fenómeno sería necesario probar con diferentes materiales de sujeción como por ejemplo magnéticos o mecánicos; sin embargo esto se sale del propósito de este trabajo y queda para futuras investigaciones.
- Por ultimo podemos concluir que el desarrollo de la aplicación para dispositivos con sistema operativo Android cumplió con los requerimientos para este proyecto ya que puede medir las frecuencias previstas para el desarrollo de las práctica propuesta las cuales son consideradas bajas frecuencias. Otras funcionalidades pueden ser desarrolladas en futuras investigaciones para

aprovechar de manera más efectiva las capacidades de los MEMS integrados en el dispositivo, por ejemplo el uso de sensores fusionados [22] podría dar un resultado más preciso de las vibraciones en los puentes, esto se dejara como tarea para futuras investigaciones.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] L. L. Jiménez, «Puentes vehiculares de Bogotá están bajo la lupa de ingenieros,» *El Tiempo,* 1 Agosto 2014.

[2] Z. Dai, S. Wang y Z. Yan, «BSHM-WSN: A Wireless Sensor Network for Bridge Structure Health Monitoring,» de *2012 International Conference on Modelling, Identification and Control*, Wuhan, 2012.

[3] S. Mekid, A. Starr y R. Pietruszkiewicz, «Intelligent Wireless Sensors,» de *E-maintenance*, Londres, Springer, 2010, pp. 83-123.

[4] S. Miao, A. Knobbe, E. Koenders y C. Bosma, «Analysis of Traffic Effects on a Dutch Highway Bridge,» *IABSE Symposium, IABSE Symposium, Rotterdam 2013: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures,* pp. 357-364, 2013.

[5] B. W. Xiaoya Hu y X. Hu, «A Novel Energy-Balanced Time Synchronization Protocol in Wireless Sensor Networks for Bridge Structure Health Monitoring,» de *Database Technology and Applications (DBTA), 2010 2nd International Workshop on*, Wuhan, China, 2010.

[6] Benedetto Vigna, E. Lasalandra y T. Ungaretti, «Motion MEMS and Sensors, Today and Tomorrow,» de *Nyquist AD Converters, Sensor Interfaces, and Robustness*, Londres, Springer, 2013, pp. 117-127.

[7] J. Kumar y R. Bajpai, «Application of Mems in Bridge Structures Health Monitoring,» *International Journal of Engineering and Innovative Technology,* vol. 2, nº 4, pp. 103-106, 2012.

[8] M. Huang, J. Li y H. Zhu, «Optimal Sensor Layout for Bridge Health Monitoring Based on Dual-structure Coding Genetic Algorithm,» de *Computational Intelligence and Software Engineering, 2009. CiSE 2009. International Conference on*, Wuhan, 2009.

[9] A. Plankis, *Structural Health Monitoring MEMS Sensors Using Elaticity-BAsed Vibrations,* Fort Collins: Colorado State University, 2012.

[10] Z. Jianting, H. Hanmin, H. Shanglian, C. Weiming, J. Zhen, Z. Zhixiang y L. Simeng, «Remote Real-time Health Monitoring and Evaluation System for Long Bridge Structure,» de *IMACS Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications"(CESA)*, Beijing, 2006.

[11] W.-J. Yi, S. Gilliland y J. Saniie, «Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring using System-on-Chip with Android Smartphone,» de *SENSORS, 2013 IEEE*, Baltimore, 2013.

[12] J. Yang y J. Zhou, «Non-linear Chaotic Analysis of Bridge Health Monitoring Information based on Phase Space Correlation Dimension,» de *3rd International Congress on Image and Signal Processing*, Yantai, 2010.

[13] H. F. Rashvand y K.-F. Hsiao, «Smartphone intelligent applications: a brief review,» *Multimedia Systems,* 2013.

[14] R. Semana, «Semana,» 27 06 2015. [En línea]. Available: http://www.semana.com/tecnologia/articulo/colombia-el-pais-de-los-smartphones/432806-3. [Último acceso: 19 11 2016].

[15] L. Liu y J. Liu, «Biomedical sensor technologies on the platform of mobile phones,» *Frontiers of Mechanical Engineering,* vol. 6, nº 2, p. 160–175, 2011,.

[16] P. Vogt y J. Kuhn, «Acceleration Sensors of Smartphones: Possibilities and Examples of Experiments for Application in Physics Lessons,» *Frontiers in Sensors,* vol. 2, nº 1, pp. 1-9, 2014.

[17] R. LeMoyne, T. Mastroianni y W. Grundfest, «Quantified reflex strategy using an iPod as a wireless accelerometer application,» de *34th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, San Diego, 2012.

[18] R. LeMoyne, T. Mastroianni, W. Grundfest y K. Nishikawa, «Implementation of an iPhone wireless accelerometer application for the quantification of reflex response,» de *35th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Osaka, 2013.

[19] M. J. Whelan, M. V. Gangone y K. D. Janoyan, «Highway Bridge Assessment Using an Adaptive Real-Time Wireless Sensor Network,» *IEEE SENSORS JOURNAL,* vol. 9, nº 11, pp. 1405-1412, 2009.

[20] F. Zhang, R. Wang, S. Gao, S. Yu, J. Hu y Y. Jin, «Design and implementation of wireless bridge health monitoring system,» de *Smart and Sustainable City (ICSSC 2011), IET International Conference on*, Shanghai, 2011.

[21] K. Worden, G. M. Charles R. Farrar y G. Park, «The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring,» *Philosophical Transactions of the Royal Society A,* vol. 463, nº 2082, p. 1639–1664, 2007.

[22] A. R. Ubejd Shala, «Indoor Positioning using Sensor-fusion in Android Devices,» School of Health and Society Department Computer Science Embedded Systems Kristianstad University, Kristianstad, 2011.

[23] J. Kim, S. Kwon, S. Park y Y. Kim, «A MEMS-based Commutation Module with Vibration Sensor for Wireless Sensor Network-based Tunnel-blasting Monitoring,» *Journal of Civil Engineering,* vol. 17, nº 7, pp. 1644-1653, 2013.

[24] J. C. C. Palacio, L. V. Abad, F. Gimenez y J. A. Monsoriu, «A quantitative analysis of coupled oscillations using mobile accelerometer sensors,» *European Journal Of Physics,* nº 34, p. 737–744, 2013.

[25] S. Mohanty, K. K. Gupta, K. S. Raju, V. Mishra, V. Kumar y P. B. Prasad, «Characterization of Wireless Accelerometer Sensor and Its Industrial Applications,» de *2014 Twentieth National Conference on Communications (NCC)*, Kanpur, India, 2014.

[26] W. Lee, P. Chan y L. Siek, «Electrical Modeling of MEMS Sensor for Integrated Accelerometer Applications,» de *Electron Devices Meeting, 1999. Proceedings. 1999 IEEE Hong Kong*, Shatin, 1999.

[27] R. LeMoyne, T. Mastroianni, M. Cozza, C. Coroian y W. Grundfest, «Implementation of an iPhone for characterizing Parkinson's disease tremor through a wireless accelerometer application,» de *32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Buenos Aires, 2010.

[28] Y. Li, Y. Zhao, N. Yao, H. Wang, B. Wang y K. Zhang, «Low Power Human Behavior Detection Method with Low Sampling Frequency 3D-Accelerometer,» de *SICE Annual Conference 2013*, Nagoya, 2013.

[29] M. Trifunovic, V. A.M y W. v. Driel, «MEMS Accelerometers and their BioApplications,» de *2012 13th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, Cascais, 2012.

[30] S. Mekid y Z. Zhu, «MEMS Sensors,» de *E-maintenace*, Londres, Springer, 2010, pp. 25-171.

[31] G. Bartolomeo, S. Salsano y A. Frisiello, «Mobile Electronic Memos,» *Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking,* vol. 6869, pp. 178-187, 2011.

[32] M. Lantz, C. Hagleitner, M. Despont, P. Vettiger, M. Cortese y B. Vigna, «Sensors and Actuators on CMOS Platforms,» de *More than Moore*, Londres, Springer, 2009, pp. 109-177.

[33] E. G. Kostsov, «Status and Prospects of Micro- and Nanoelectromechanics,» *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing,* vol. 45, nº 3, p. 189–226, 2009.

[34] M. Pedley, *Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer (Application Note),* Freescale Semiconductor, 2013.

[35] M. Pedley, *High Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer (Application Note),* Freescale Semiconductor, 2013.

[36] J. Song, E. Y. Tang y L. Liu, «User Behavior Pattern Analysis and Prediction Based on Mobile Phone Sensors,» de *Network and Parallel Computing*, Londres, Springer, 2010, pp. 177-189.

[37] A. Lombardi, M. Ferri, G. Rescio, M. Grassi y P. Malcovati, «Wearable Wireless Accelerometer with Embedded Fall-Detection Logic for Multi-Sensor Ambient Assisted Living Applications,» de *Sensors, 2009 IEEE*, Christchurch, 2009.

[38] M. J. McGrath y C. N. Scanaill, «Wellness, Fitness, and Lifestyle Sensing Applications,» de *Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications*, Apress, 2013, pp. 217-248.

[39] J. Huang, H. Ogai, C. Shao y J. Zheng, «On Vibration Signal Analysis in Bridge Health Monitoring System by Using Independent Component Analysis,» de *SICE Annual Conference 2010*, Taipei,, 2010.

[40] W. Zi-yan, L. Shu-kui, H. Yin y Y. Hai-feng, «Vibration-based Physical Parameter Identification of Bridge Structures under Traffic Excitation,» de *Information Engineering and Computer Science, 2009. ICIECS 2009. International Conference on*, Wuhan, 2009.

[41] D.-H. Wang y W.-H. Liao, «Wireless Transmission for Health Monitoring of Large Structures,» *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT,* vol. 55, nº 3, pp. 972-981, 2006.

[42] C. Yu, L. Shang, L. Tan, Y. Yang y X. Tu, «Design and implementation of bridge structure health monitoring data analysis platform,» de *World Automation Congress (WAC)*, Puerto Vallarta, 2012.

[43] P. R. Kumar, T. Oshima, T. Yamazaki, S. Mikami y Y. Miyamouri, «Detection and localization of small damages in a real bridge by local excitation using piezoelectric actuators,» *Journal of Civil Structural Health Monitoring,* vol. 2, nº 2, pp. 97-108, 2012.

[44] W. H. V. Gómeza y C. A. R. Jerez, *Caracterización dinámica en condiciones de excitación natural de puentes de concreto reforzado,* Medellin: Tesis de Ingeniería Civil, Universidad De Antioquia, 2011.

[45] cogprojects, «Fast Fourier Transform Android Application,» [En línea]. Available: https://cogprojects.wordpress.com/2012/10/04/fast-fourier-transform-android-application/. [Último acceso: 06 10 2016].