



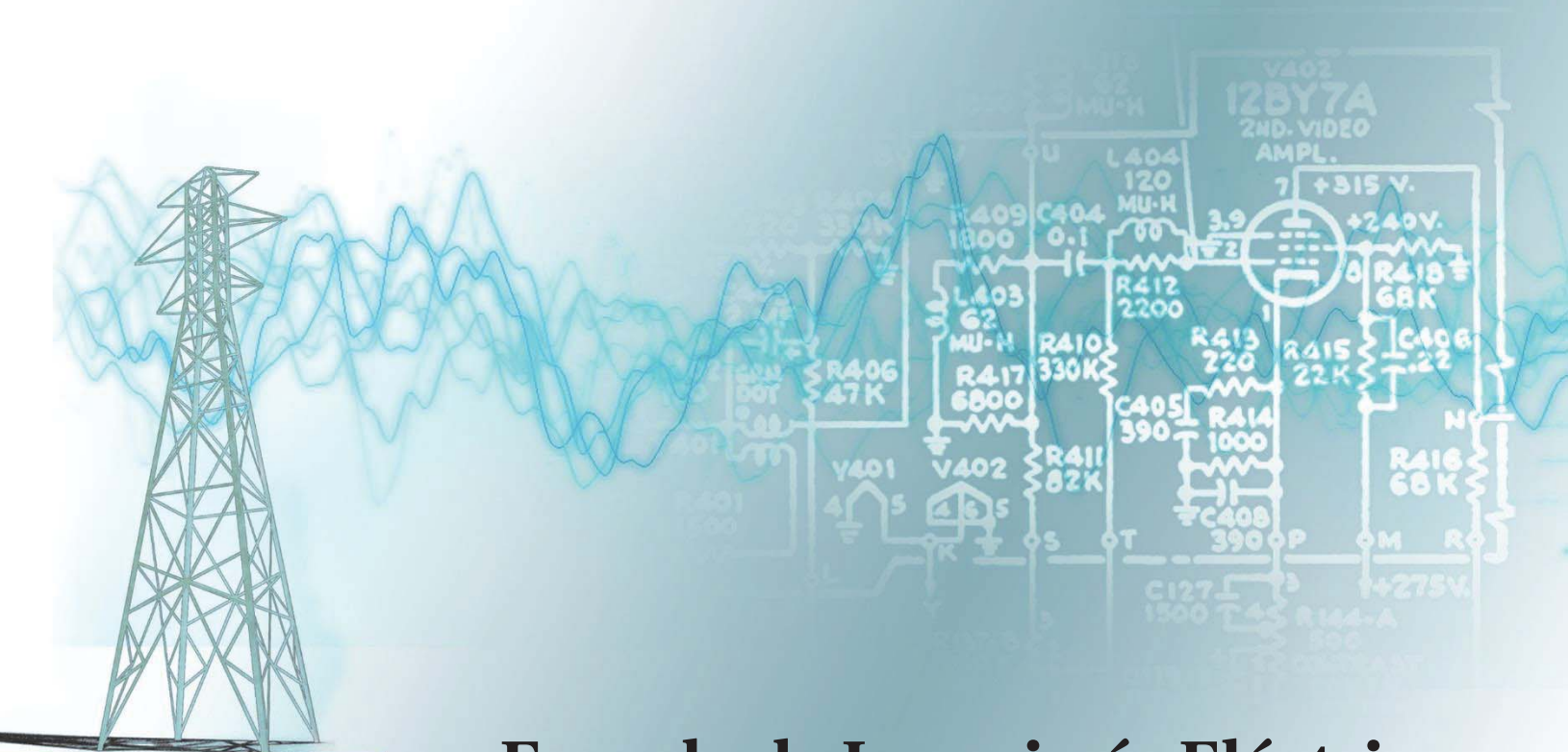
PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATOLICA  
DE VALPARAISO



**Diego Alfredo Fuentes González**

**Sistema Programable de Excitación  
de Sensores de Aceleración a  
Frecuencias Características de  
Movimientos Sísmicos**

**Informe Proyecto de Título de Ingeniero Electrónico**



**Escuela de Ingeniería Eléctrica**



PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
**CATOLICA**  
**DE VALPARAISO**

# Sistema Programable de Excitación de Sensores de Aceleración a Frecuencias características de Movimientos Sísmicos

Diego Alfredo Fuentes González

Informe Final para optar al título de Ingeniero Electrónico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann  
Profesor Guía

Sr. Pablo Alcaíno Reyes  
Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza  
Director

Valparaíso, 7 de Junio de 2017

# Agradecimientos

En primer lugar agradezco por el tiempo dedicado, la voluntad de entregar su experiencia y el constante apoyo recibido por parte de los profesores Sebastián Fingerhuth, Pablo Alcaíno y Francisco Santibañez.

Además hago uso de esta instancia para mencionar a mi familia que ha hecho todo lo posible para que yo pueda asistir cada día a cumplir con mis labores académicas, y así poder alcanzar las metas propuestas desde un comienzo, y a lo largo de todo este proceso que culmina con todo lo expuesto en el presente informe final.

*Valparaíso, 9 de Mayo de 2017*

D. F.

# Resumen

Para determinar las características dinámicas de comportamiento y respuesta de los equipos que se utilizarán para calibrar los sensores de aceleración que irán instalados en túneles para estudiar así respuesta de los mismos ante actividad sísmica, se realizaron pruebas en tonos puros a frecuencias de interés para los fines estipulados.

Los dispositivos utilizados para la construcción de un sistema de excitación de sensores que permitiera calibrar posteriormente los mismos, poseen características que los posicionan por su naturaleza en diferentes áreas, pero cada uno de ellos es esencial para alcanzar los objetivos planteados. Sumado a lo anterior, que responde a características físicas, también se encuentran los procesos digitales que completarían el quehacer del sistema.

La plataforma de Arduino fue utilizada en gran medida, al igual que Processing, con tal de programar las señales que logran excitar, a través de un dispositivo denominado motor shield de manera deseada el shaker del cual se dispone. Todo esto para simular movimientos a baja frecuencia de oscilación que permitan excitar sensores de aceleración.

El trabajo realizado gracias a los equipos presentes principalmente en el Laboratorio de Medios Complejos y Fenómenos No Lineales, permitió recopilar datos sobre desplazamientos de las partes móviles de los dispositivos denominados shaker, tanto de la marca Pasco como el de la empresa Brüel & Kjaer, en base a señales programadas en más de un rango de amplitud.

Como método de reconocimiento de desplazamiento en función del tiempo también se utilizó el registro en vídeos de alta velocidad, que permitió llevar a cabo procesamiento de imágenes para así llegar a reconocer los desplazamientos producidos por el excitador de vibraciones o shaker de la marca Pasco. Es en base a estos datos que se pudo obtener información sobre el comportamiento y dinamismo de los mismos, conocer sus anomalías, no linealidades y obtener de manera más cierta las aceleraciones límites que puede llegar a ejercer dicho dispositivo. Toda esta información es y será de gran utilidad a la hora de excitar con este equipo los sensores de aceleración adquiridos para llevar a cabo la investigación de la cual el presente proyecto forma parte.

Palabras claves: actividad sísmica, procesos digitales, Arduino, Processing, motor shield, shaker, procesamiento de imágenes.

# Abstract

To determine the dynamic behavior and response characteristics of the equipment to be used to calibrate the acceleration sensors that will be installed in tunnels to study their response to seismic activity, pure tone tests were performed at frequencies of interest for the purposes stipulated.

The devices used for the construction of a sensor excitation system that would later allow them to be calibrated, have characteristics that position them by their nature in different areas, but each one of them is essential to reach the stated objectives. In addition to the above, which responds to physical characteristics, are also the digital processes that would complete the task of the system.

The Arduino platform was used to a great extent, as well as Processing, in order to program the signals that manage to excite, through a device called motor shield in a desired way the shaker of which it is available. All this to simulate movements at low frequency of oscillation that allow to excite sensors of acceleration.

The work carried out thanks to the equipment mainly present in the Laboratorio de Medios Complejos y Fenómenos No Lineales, allowed to collect data on displacements of the moving parts of both, the Pasco and the Brüel & Kjaer shaker, based on signals programmed in more than a value of amplitude.

As a method of recognition of displacement as a function of time was also used the recording in high-speed videos, which allowed to carry out image processing in order to recognize the movements produced by the vibration exciter or shaker Pasco brand. It is on the basis of these data that it was possible to obtain information about the behavior and dynamism of the same, to know its anomalies, nonlinearities and to obtain in a more certain way the accelerations that the device can exert. All this information is and will be very useful when exciting with this equipment the acceleration sensors acquired to carry out the research of which this project forms part.

Keywords: seismic activity, digital processes, Arduino, Processing, motor shield, shaker, image processing.

# Índice general

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción.....                                                        | 1  |
| 1 Equipos e instrumentos .....                                           | 6  |
| 1.1 Propuesta.....                                                       | 6  |
| 1.2 Dispositivos dentro del sistema de calibración de sensores .....     | 8  |
| 1.2.1 Excitador de vibraciones o shaker marca Pasco modelo SF-9324 ..... | 8  |
| 1.3 Arduino UNO R3 .....                                                 | 11 |
| 1.3.1 Pololu DRV8835 Dual Motor Driver Shield .....                      | 11 |
| 1.3.2 Cámara de vídeo de alta velocidad Phantom modelo Miro M320S .....  | 12 |
| 1.4 Conclusiones del capítulo .....                                      | 13 |
| 2 Programación, conexión y registro .....                                | 15 |
| 2.1 Caracterización shakers Pasco y B&K a amplitudes medias .....        | 15 |
| 2.1.1 Sensibilidad de la respuesta .....                                 | 20 |
| 2.2 Programación de Arduino y motor shield.....                          | 21 |
| 2.3 Protocolo de generación de señales .....                             | 24 |
| 2.3.1 Archivo de texto .....                                             | 24 |
| 2.3.2 Lectura del archivo de texto .....                                 | 25 |
| 2.3.3 Configuración de puertos y comunicación.....                       | 25 |
| 2.4 Registro de vídeos de alta velocidad.....                            | 26 |
| 2.4.1 Medición de intensidad de corriente entregada a shaker Pasco.....  | 26 |
| 2.4.2 Configuraciones y formatos .....                                   | 27 |
| 2.5 Procesamiento de imágenes .....                                      | 29 |
| 2.6 Conclusiones del capítulo .....                                      | 31 |
| 3 Análisis de respuesta de shaker .....                                  | 33 |
| 3.1 Curvas y análisis de respuesta .....                                 | 33 |
| 3.2 Conclusiones del capítulo .....                                      | 41 |
| 4 Discusión y conclusiones.....                                          | 42 |
| 4.1 Conclusiones .....                                                   | 42 |
| 4.2 Discusión y trabajos futuros .....                                   | 44 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Bibliografía .....                                         | 46 |
| A Apéndice.....                                            | 48 |
| A.1 Gráficas obtenidas por procesamiento de imágenes ..... | 48 |

# Introducción

Actualmente la sociedad refleja su desarrollo tecnológico y evolutivo en primera instancia mediante las características y volumen de las construcciones e infraestructura de sus ciudades. Estas son conectadas mediante carreteras que deben cruzar en muchas ocasiones por zonas que geográficamente no cumplen con las características mínimas necesarias para la realización de caminos y accesos viales superficiales de forma inmediata. En determinado caso, y por darse la situación de enfrentarse a cerros o montañas, se abre entonces la posibilidad de construir túneles para la circulación de vehículos y peatones.

Englobando la idea anterior y definiendo de manera general, toda construcción realizada por el hombre en el interior de la tierra con el fin de suplir alguna de sus necesidades es llamada entre otras formas como obra subterránea. El desarrollo de esta actividad de ingeniería, a lo largo de muchos centenares de años se ha practicado con excavaciones para extracción de minerales, conducción de aguas, vías de comunicación, sistemas de transporte masivo, depósitos de combustible, industrias, parqueaderos, instalaciones energéticas, botaderos radioactivos, estadios, catedrales, refugios, hangares de aviación y muchos otros.

La Tierra no es un cuerpo estático sino que ha estado y está sujeta a una continua actividad, es decir, la Tierra es un sistema dinámico. Esto se debe a la interacción de las fuerzas geológicas del interior de la Tierra. Como producto de esta interacción entre placas, se generan los terremotos, que consiste en el movimiento de la superficie terrestre debido a la propagación de las ondas sísmicas [1].

Considerando lo anteriormente mencionado, en muchos lugares del mundo, debido a su baja actividad sísmica, los efectos que pudiesen provocar los terremotos en la infraestructura de túneles, no son considerados con antelación en etapas de diseño. Incluso en países donde la actividad sísmica es frecuente y de alta intensidad, no se acostumbra mantener un monitoreo constante de comportamiento de estas estructuras durante y luego de los eventos telúricos. Es por esto que las consecuencias en variados casos se han pagado con vidas humanas producto de derrumbes y colapsos de estructuras al interior de estas obras subterráneas.

El comportamiento de los túneles bajo carga sísmica repetida no está caracterizado con precisión y por lo tanto, los diseños y estrategias de gestión de desastres podrían ser mejorados de manera considerable. Esto se debe en parte, a la falta de información acerca del comportamiento de



túneles reales ante dichos eventos. Los accidentes ocurren rara vez, pero cuando lo hacen, tienen consecuencias significativas (por ejemplo el túnel de Pedro Galleguillos en Tocopilla, 2007) [2]. En [3] el diario “La Nación”, menciona en base a dicha tragedia: “Dos mujeres perecieron a causa de derrumbes en Tocopilla, confirmó la Onemi. En tanto, unos 50 operarios que trabajan en túnel cerca de esa ciudad quedaron aislados”.

Los túneles son hoy en día unas de las arterias fundamentales del mundo moderno. Transportan gente, agua, electricidad, minerales y energía. Son una parte esencial de la infraestructura que sirve a la gente y por lo tanto, son fundamentales para su salud, prosperidad y bienestar [2].

Los impactos de la urbanización global y el cambio climático están forzando a las naciones a mirar hacia el mundo subterráneo. A nivel mundial, la construcción de túneles está en auge y Chile no es una excepción a la regla. Existen múltiples proyectos que están en fase de desarrollo o ejecución (por ejemplo el túnel andino que unirá Argentina y Chile, multitud de túneles mineros, como por ejemplo los 1,000km planeados en Chuquicamata, o el Metro de Santiago en continua expansión, por nombrar algunos) [2].

Para registrar movimiento del suelo o cualquier masa acoplada mecánicamente a un evento sísmico, es necesario referirlo a un punto fijo en el espacio. En [4] el autor se refiere a estos principios diciendo: “Si quisiéramos referirlo a un punto anclado al mismo suelo nos sería imposible obtener un registro puesto que el punto también se movería junto con el suelo (o masa acoplada a éste) al que esté anclado. Para salvar esta dificultad, podemos recurrir al principio de inercia de los cuerpos, como sabemos este principio nos dice que todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento al variar su velocidad, en otras palabras, los cuerpos tienden a moverse con la velocidad que poseían en el instante anterior al presente”.

En la actualidad existen diversos dispositivos utilizados para medir de alguna forma los movimientos en base al principio de inercia. Los sismógrafos para estudios de micro-sismicidad o de sismicidad regional o global registran velocidades o desplazamientos. Los instrumentos de registro de movimientos intensos en el campo próximo son normalmente acelerógrafos. Estos registran aceleraciones y no desplazamientos principalmente porque un registro de desplazamiento exigiría la utilización de instrumentos de rango dinámico muy grande, es decir, que pudieran responder con buena fidelidad y precisión en mediciones tanto para fracciones de milímetros como para cientos de ellos [5].

Los primeros sensores de aceleración y vibración eran auténticos sistemas de alta complejidad y reducida fiabilidad que se basaban en la medida de los desplazamientos de una masa inercial sujeta a la aceleración con resortes que contrarrestaban el efecto de la fuerza generada por la masa. De la misma forma, la medida de la vibración resulta muy parecida a la de la aceleración ya que la presencia de movimientos vibratorios supone aceleraciones cambiantes cuyo aspecto es similar al del movimiento inicial [6].

En todos estos casos cabe hablar de medidas de aceleración y los sensores para cada aplicación serán siempre acelerómetros aunque, en función de lo que se vaya a medir, el dispositivo estará diseñado para ofrecer las mejores características en ese sentido: por ejemplo, cuando se van a

medir aceleraciones constantes no tiene sentido el empleo de dispositivos piezoeléctricos puesto que no responden bien ante sollicitaciones constantes [6].

Cuando lo que se pretende medir es una vibración, como es el caso dentro del mantenimiento predictivo de máquinas rotativas, muchas veces sólo interesa su amplitud y/o su frecuencia con lo que la linealidad del dispositivo que la mida es un factor secundario. Así pues, aunque la medida de la aceleración genérica tenga varias vertientes, en muchas ocasiones los sensores se denominan como sensores de vibración, de choque o impacto, a pesar de que todos ellos puedan ser agrupados dentro del campo de los acelerómetros porque, de hecho, lo son [6].

Dentro de la problemática anterior se centra el proyecto de investigación del cual trata el presente informe. Este busca la obtención de información, mediante los datos que pudiesen arrojar múltiples sensores de aceleración, de la forma en que se desplazan las masas de estructura durante los eventos sísmicos. Sin embargo, antes de toda instalación y puesta en marcha, se debe tener conocimiento de la característica de respuesta de cada uno de los sensores de aceleración, puesto que ellos pueden presentar diferencias que para la investigación y sus resultados es vital conocerlas.

Los sensores adquiridos para cumplir con los objetivos del proyecto corresponden a acelerómetros de naturaleza denominada MEMS (Micro Electro-Mechanicals Systems por sus siglas en inglés). Estos, si bien es cierto que serán utilizados para medir aceleraciones de baja frecuencia, puede que no cumplan con las expectativas que sobre ellos existan. Considerando lo anterior, es que se debe diseñar y preparar un sistema de pruebas mediante vibraciones y mediciones para dichos sensores, con la finalidad de estudiar su característica de respuesta ante excitaciones que posean características similares a las encontradas durante un evento sísmico en un túnel.

Las pruebas de vibración se utilizan ampliamente en muchos productos de alta tecnología, incluidos cohetes, satélites, automóviles y máquinas móviles que funcionan en caminos ásperos, además de materiales de ingeniería modernos. Estas pruebas se realizan generando un ambiente artificial "vibrante" en el que la fuente de la fuerza aplicada es controlada por un dispositivo externo que a menudo se define como un excitador de vibración. La construcción y control del excitador de vibraciones es una tarea difícil en muchos casos, especialmente cuando gran fuerza de salida y un rango de alta frecuencia es necesario [7].

Estos dispositivos se utilizan en actividades tan diversas como en la evaluación de estrés, pruebas de chirrido y análisis modal. Estos sacudidores pueden ser accionados por señales sinusoidales, aleatorias o transitorias basadas en la aplicación. Son invariablemente impulsados por un amplificador de potencia de audiofrecuencia y se puede utilizar "bucle abierto" (como en la mayoría de las pruebas modales) o bajo control cerrado donde la entrada al amplificador de accionamiento es servo controlado para lograr un nivel de movimiento deseado en el artículo bajo prueba [8].

Los equipos denominados shaker o también llamados excitadores de vibración, a disposición para el desarrollo del presente proyecto son las unidades presentes en el Laboratorio de Acústica

y Vibraciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, y en el Laboratorio de Medios Complejos y Fenómenos No Lineales de la Escuela de Física, ambos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Estos son de las marcas Pasco y Brüel & Kjaer respectivamente.

Así como el reconocimiento de las características de respuesta de cada uno de los acelerómetros es de máxima importancia, también lo es el reconocer el comportamiento de los shaker que se utilizarán en el proceso de caracterización de los equipos. Y es natural pensarlo, porque como todo artefacto real, no reacciona de igual manera ante cada una de las que conforman la amplia gama de tipos de entrada a la cual puede ser expuesto. Para ello se realizarán mediciones de movimiento en cuanto a amplitud y frecuencia con diversos dispositivos mecánicos, magnéticos y también a través de registros de vídeos en alta velocidad.

Se propone que para realizar la caracterización de respuesta de los sensores, los procedimientos se lleven a cabo en laboratorio con la ayuda de un excitador mecánico, y la instrumentación que permita reconocer tanto las características de dichos movimientos como los datos que los sensores arrojen al ser expuestos a tales perturbaciones.

Además, y complementando las funciones del trabajo propuesto, se establece que los desplazamientos generados por tal sistema sean captados por una cámara de alta velocidad, registrando vídeos a altas tasas de cuadros por segundo. Esto permitirá luego, mediante procesamiento de imágenes, obtener gráficos e información útil para la obtención de la respuesta de los sensores de aceleración a caracterizar.

En resumidas cuentas, como solución y objetivo general se plantea el desarrollo de un sistema programable que permita excitar mecánicamente sensores de aceleración con características propias de movimientos sísmicos, que pueda producir movimientos sinusoidales conocidos a frecuencias características de eventos sísmicos. De esta manera, en etapas posteriores, se podrá comprender el comportamiento exacto de cada sensor ante diversos tipos de estimulaciones, en rangos de frecuencia de interés para el estudio de la actividad sísmica.

El sistema anteriormente mencionado debe poseer tanto el actuador o generador de movimiento, como el generador de señales que lo impulse según lo programado. Además es importante recalcar que cada movimiento debe poder ser medido o leído de alguna manera, reconociendo así su amplitud y frecuencia real. Por último esta debe ser de entre 0,5 y 20 Hz para cumplir con el apartado de “frecuencias características de movimientos sísmicos”, ya que dicho rango es de interés dentro del estudio de respuesta sísmica de sistemas estructurales.

Para la realización de lo descrito en párrafos anteriores, es preciso ir cumpliendo objetivos específicos. Para el presente proyecto se plantean los siguientes:

- Seleccionar dispositivos que puedan cumplir con las funciones necesarias para conformar el sistema programable de excitación de sensores, dentro de los recursos a disposición.
- Realizar la programación de micro-controlador y dispositivo amplificador que permita generar las señales de interés para el proyecto.

- Probar la metodología de medición de desplazamiento en función del tiempo mediante registro de vídeo de alta velocidad.
- Realizar algunos registros sobre señal de entrada y desplazamiento del sistema, para posterior análisis de característica de la respuesta del mismo en función de dicha señal, en especial para las mayores amplitudes en desplazamiento que permita el sistema.
- Analizar datos obtenidos mediante procesamiento de imágenes para obtención de información útil para la caracterización del equipo generador de vibraciones, también llamado excitador de vibraciones o shaker.
- Establecer los parámetros de funcionamiento del sistema para las mayores amplitudes de desplazamiento posibles, describiendo la curva de respuesta para tales características de señal de entrada, dejando registro además de las magnitudes de aceleración que se llegan a alcanzar bajo dichas condiciones.

Así es como en el presente informe se mostrarán los equipos utilizados, las metodologías en los procesos y etapas del proyecto, y en general el trabajo realizado con la finalidad de la obtención de los objetivos y la preparación de un sistema programable de excitación de sensores de aceleración.

# 1 Equipos e instrumentos

El desarrollo del presente capítulo, se centra en primera instancia en la descripción de los dispositivos utilizados para la constitución del sistema programable de generación de movimiento en rangos de frecuencia de interés para estudios sismográficos. Luego, dentro de la segunda sección se mostrarán los resultados obtenidos durante el trabajo que responde a la programación, y también se explicarán las características que hacen de los dispositivos escogidos, buenas opciones para poder llegar, mediante ellos, a los resultados deseados.

## 1.1 Propuesta

Como propuesta para la resolución del problema de calibración de acelerómetros se ha establecido la conformación de un sistema programable de excitación de sensores de aceleración a frecuencias características de movimientos sísmicos, cuyos desplazamientos sean analizados mediante procesamiento de imágenes.

La importancia del análisis de comportamiento del sistema es tan importante como la misma caracterización futura de los acelerómetros.

Lo anterior se debe a que mientras se esté cumpliendo la función principal de excitación de sensores de aceleración con el sistema conformado en esta etapa del proyecto, sus desplazamientos y comportamiento deben ser totalmente conocidos, para así tener la información exacta sobre las características de la señal de entrada que recibirán cada uno de los acelerómetros dispuestos para su calibración.

Los componentes que conformarían tal sistema son:

- Ordenador.
- Microcontrolador Arduino UNO, versión R3.
- Motor driver marca Pololu, modelo DRV8835.
- Shaker, también llamado excitador de vibraciones de la marca Pasco modelo SF-9324.
- Cámara de alta velocidad de la marca Phantom modelo Miro M320S.

Cabe destacar que a los componentes mencionados se le sumaría el uso de los softwares con sus respectivos drivers correspondientes a:

- Arduino IDE versión 1.6.7.
- Processing versión 3.3.
- Phantom Camera Control Application versión 2.8.
- Matlab R2015a.

Los componentes y programas mencionados serán utilizados para cumplir funciones que por su naturaleza pueden ser divididas en cuatro etapas.

1. Generación de señal de potencia.
2. Producción de desplazamientos con el excitador de vibraciones (shaker).
3. Registro de desplazamientos con cámara de alta velocidad.
4. Procesamiento de imágenes en ordenador mediante la plataforma Matlab. Sumado a esto se encuentra el análisis de datos, para la obtención de información sobre comportamiento de shaker y características de las vibraciones producidas.

Los pasos anteriores, pueden apreciarse en el esquema representado en la Figura 1-1, donde se muestran los componentes mencionados dentro de la cadena de procesos y funciones que desempeñan como parte del sistema programable de excitación de sensores de aceleración.



Figura 1-1: Esquema representativo del orden de procesos dentro del sistema programable de excitación de sensores de aceleración, involucrando a cada uno de sus componentes.

En la Figura 1-1 se adiciona el cuadro correspondiente a acelerómetro para dar a conocer la ubicación dentro de la cadena de procesos que ocupará el mismo, sin embargo durante este informe y proyecto, se trabajará sin sensores de aceleración centrándonos en el resto de aspectos que conforman el sistema.

## 1.2 Dispositivos dentro del sistema de calibración de sensores

En esta sección se presentan las características de los dispositivos utilizados para conformar el sistema de excitación de sensores de aceleración.

### 1.2.1 Excitador de vibraciones o shaker marca Pasco modelo SF-9324

Al momento de desear producir movimientos de baja frecuencia en un dispositivo que a la vez mantenga entre sus partes móviles un muy bajo índice de roce que pudiese alterar la reproducción fidedigna de las señales programadas, es fácil pensar en un excitador de vibraciones, también llamado Shaker.

Un Shaker o también denominado Mechanical Wave Driver es, como su nombre lo dice, un generador de ondas mecánicas a partir de señales eléctricas, el cual puede producir movimientos de amplitud y frecuencia variable.

Los shakers electrodinámicos son relativamente baratos, fáciles de controlar, de interfaz simple y bastante lineal en su comportamiento (si se utiliza dentro de sus límites de movimiento y fuerza especificados). La estructura de estas máquinas tiene cierta semejanza a un altavoz común, pero es más pesado y mucho más robusto [8].

En el corazón del shaker está una bobina de una sola capa de alambre, suspendida en un campo magnético radial. Cuando se pasa una corriente a través de esta bobina, se produce una fuerza longitudinal proporcional a la corriente y esto se transmite a una estructura de tabla a la que se puede fijar el artículo de ensayo. Varios puntos de los detalles de diseño son dignos de examinar [8].

Para apreciar de manera gráfica el concepto de construcción de un shaker, puede hacerse uso de la Figura 1-2, donde se aprecia el interior de uno en un formato tipo corte transversal.

En primer lugar, se requiere producir el campo magnético que actúa en un plano normal al eje de la bobina. Esto se logra construyendo un circuito magnético de hierro o acero alrededor de un magneto cilíndrico axialmente polarizado. Una pieza polar interior transmite flujo desde un extremo del imán, digamos la cara norte. A su vez el disco conduce el flujo al extremo opuesto, es decir, la superficie sur de la polarización del imán. A su vez, este disco está íntimamente conectado a un tubo cilíndrico permeable que se acopla a otro disco permeable con un agujero en su centro que rodea la bobina. Este segundo disco es la pieza polar exterior. Por lo tanto, la el polo interior está polarizado al norte y rodeado por un toroide que está polarizado hacia el sur. Esto da como resultado un campo de flujo radial a través de la separación entre estas partes ferrosas [8].

En segundo lugar, se debe permitir que la bobina se mueva axialmente. Debe ser exactamente centrado en el estrecho espacio entre el interior y exterior polos. La mesa de accionamiento está rígidamente unida a un extremo de la forma de la bobina. Las flexiones están aseguradas a la pieza polar exterior a través de espaciadores y tornillos o remaches. Los conductores flexibles se fijan a los extremos de la bobina y conéctelos con el conector de entrada del cuerpo del shaker [8].

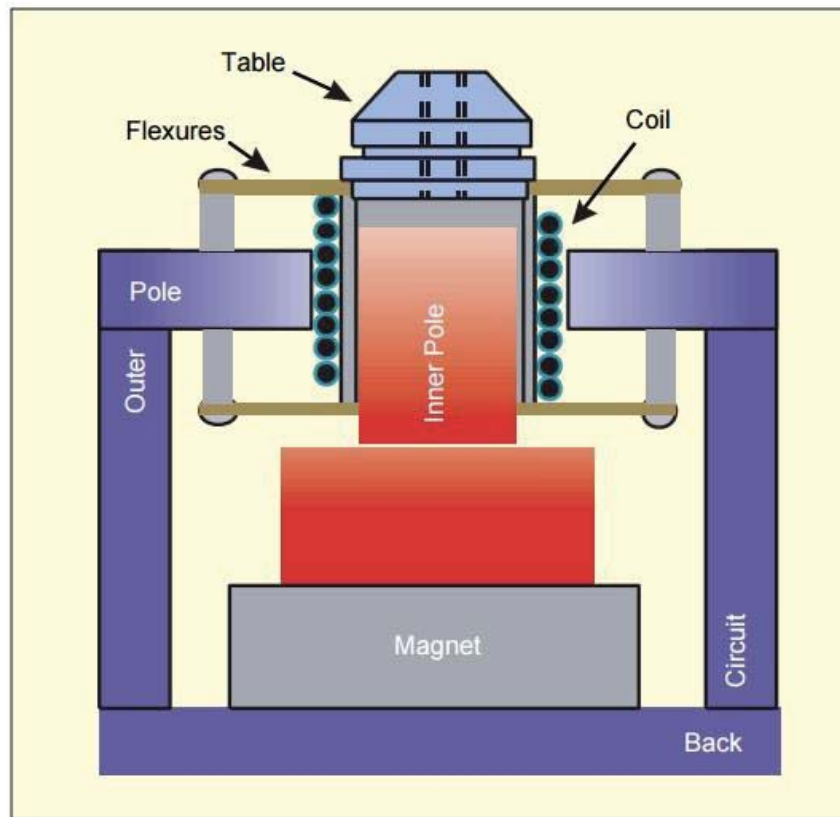


Figura 1-2: Interior de un shaker electromecánico [8].

En tercer lugar, la fuerza proporcionada por la máquina es proporcional al flujo magnético que pasa a través de la bobina, a la corriente que fluye a través de la bobina y al número de vueltas de la bobina dentro del flujo. Por esta razón, la bobina es normalmente más larga que la anchura del polo exterior por lo menos de la carrera de la máquina. En general, las bobinas de shaker utilizan conductores de mayor grosor que los altavoces para permitir corrientes de mayor intensidad [8]. Es así como en [8] el autor se refiere a este punto diciendo: “Por lo tanto, la resistencia de la bobina de un shaker será menor que el de los altavoces comunes, un factor a tener en cuenta cuando seleccionamos un amplificador de señal”.

En cuarto lugar, la impedancia de la bobina es compleja. Las parejas de bobinas fuertemente acopladas con el hierro de las piezas polares, producen un componente inductivo en su impedancia. La resistencia (DC) de la bobina define la impedancia mínima exhibida en los terminales de entrada del shaker [8]. Respecto a la impedancia de las bobinas, esta aumenta directamente en función de la frecuencia de señal eléctrica que las excita, es decir, mientras más alta sea la frecuencia de la señal, más alta será la impedancia de la bobina. Por último, la interacción entre los dominios mecánicos y eléctricos no se realiza en un solo sentido. Cuando la



bobina se mueve dentro del campo magnético, se genera una tensión a través de la bobina en proporción a la velocidad experimentada por los componentes [8].

En resumen, basándose en los mismos principios electromagnéticos que hacen que la membrana de un altavoz vibre al compás de la música, los excitadores electromagnéticos aprovechan un campo magnético creado mediante un electroimán o un imán permanente para generar vibración al hacer pasar una corriente eléctrica por una bobina situada en medio del campo magnético.

El modelo del dispositivo utilizado es el SF-9324 de la marca Pasco y estructurales pueden ser apreciadas en la Figura 1-3



Figura 1-3: Vista diagonal superior del Pasco SF-9324 [9].

Dentro de las características del SF-9324 resaltan:

- Respuesta de frecuencias entre 0,1 y 5.000 Hz.
- Amplitud peak-to-peak de 7mm.
- Máxima intensidad de corriente de 1 Ampere, límite asegurado por fusible integrado.
- Impedancia de entrada de 8 Ohms.
- Bloqueo de seguridad para evitar pérdidas de características elásticas de las membranas internas.

Cabe destacar que los terminales integrados en el dispositivo para conexión de señales eléctricas son los globalmente utilizados en laboratorio y aplicaciones varias “banana plug”.

### 1.3 Arduino UNO R3

Como parte de la producción de señales eléctricas se consideró la opción de utilizar la plataforma Arduino como unidad de controlador programable, además de un Shield de Arduino que permitiese entregar en niveles de tensión e intensidad de corriente apropiadas para poder excitar el Shaker aprovechando al máximo sus características.

Arduino Uno R3 es una plataforma de hardware libre, diseñado para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. Es el último de una serie de placas Arduino USB y el modelo de referencia de la plataforma Arduino, para una comparación con las versiones anteriores. Esta tarjeta incorpora nuevas características como el procesador Atmega 16U2 en lugar del 8U2 usado en versiones anteriores de Arduino (o el FTDI de generaciones previas) esto permite tasas de transferencia más altas y brinda más memoria. No requiere de drivers para su instalación en Linux o Mac (la versión para Windows trae incluido los drivers) el ya mencionado procesador Atmega 16U2 permite al dispositivo ser Plug and Play y ser reconocido como un dispositivo periférico USB [10].

El Arduino en pocas palabras y de manera global es una plataforma computacional física open-source basada en una simple tarjeta de I/O y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring.

La placa Arduino Uno R3 físicamente puede apreciarse en la Figura 1-4.

#### 1.3.1 Pololu DRV8835 Dual Motor Driver Shield

Este shield de motor de la marca Pololu y su correspondiente biblioteca Arduino facilitan el control de un par de motores de corriente continua (DC) bidireccionales con una tarjeta Arduino o compatible, como el A-Star 32U4 Prime. El tablero incorpora el controlador de motor de doble puente H DRV8835 de Texas Instruments, que le permite operar desde 1,5 volts hasta 11 volts y lo hace especialmente adecuado para la conducción de motores pequeños y de baja tensión. Este shield puede además proporcionar un 1,2 amperes continuos por canal y tolerar corrientes máximas de hasta 1,5 amperes por canal durante algunos segundos, además los canales pueden configurarse opcionalmente para que funcionen en paralelo para entregar el doble de corriente a un solo motor [11].

En dichos casos y en general se recomienda conectar una fuente de poder externa a los terminales indicados debido a que la potencia máxima sólo se puede alcanzar de esta manera, es decir, la placa Arduino, no puede suministrar las cantidades de energía que hacen que el DRV8835 trabaje a su máxima capacidad.

La forma en que se adquiere el motor driver de fábrica se muestra en la Figura 1-5, donde puede apreciarse que antes de utilizar se suele soldar los terminales y conectores adjuntos a la placa.



Figura 1-4: Tarjeta Arduino Uno en su versión R3 [12].

Como característica especial de este módulo, cabe destacar la opción de poder entregar modulaciones por ancho de pulso a frecuencias de hasta 250 kHz. Además de la protección interna que posee, la cual es activada por temperatura dependiendo de la cantidad de energía entregada en determinados intervalos de tiempo. Ésta inhabilita las salidas del shield mientras la temperatura esté por sobre los límites programados.

Si bien es cierto que el DRV8835 de Pololu puede operar a frecuencias supersónicas para la conformación de las señales por modulación de ancho de pulso, las librerías entregadas por el fabricante para operar con la placa y plataforma Arduino, permiten sólo hacerlo a una frecuencia fija de 20 kHz.

### 1.3.2 Cámara de vídeo de alta velocidad Phantom modelo Miro M320S

El equipo principal durante la grabación de un vídeo, es la cámara. Y en este caso se utilizó la cámara de alta velocidad de la marca Phantom, modelo Miro M320S. Ésta puede grabar vídeos con hasta 1500 fps, y gracias a su intuitivo software de control en el ordenador, puede configurarse para grabar en diferentes resoluciones y a variadas tomas de cuadros por segundo.

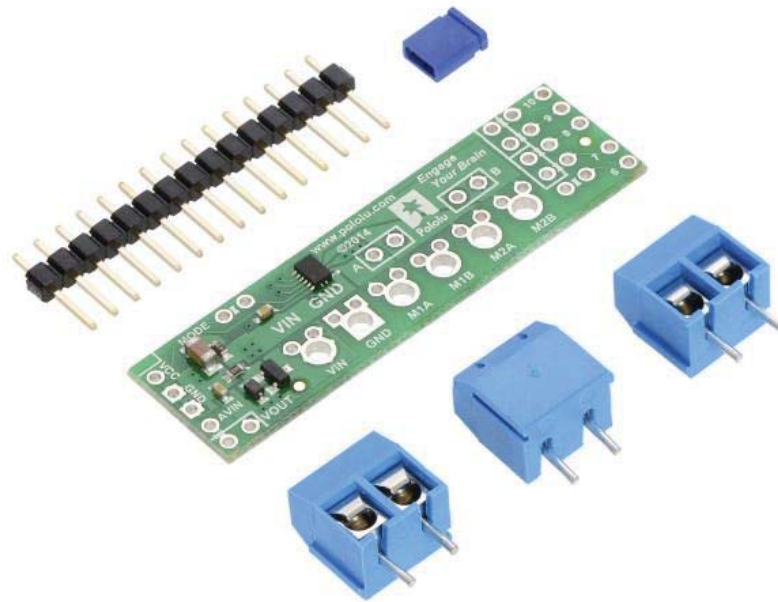


Figura 1-5: Shield para Arduino de la marca Pololu, modelo DRV8835 en su estado original de fábrica [11].

La Miro 320 es una cámara de 2 megapíxeles con 3,2 Gigapíxeles/segundo (Gpx/s) de rendimiento. Esto se traduce a 1380 fps a 1920 x 1200 o 1500 fps a 1920 x 1080. Las velocidades de fotogramas de hasta 325.000 fps están disponibles en resoluciones reducidas. El Miro 320 utiliza microlentes en su sensor CMOS con 10  $\mu\text{m}$  de paso de píxeles para lograr una gran sensibilidad a la luz, y con una profundidad de píxel de 12 bits se puede esperar una excelente calidad de imagen [13].

En la Figura 1-6 puede apreciarse la cámara de alta velocidad con lente marca Canon.

La cámara de alta velocidad es un elemento fundamental dentro de la caracterización de la respuesta del shaker, puesto que los registros tomados con ella serán los que luego de ser analizados entregarán las características de desplazamiento que produzca el excitador de vibraciones. Además características propias de la misma como la velocidad del obturador permite capturar una posición más estable de objetos en movimiento, como lo es el caso del shaker utilizado.

## 1.4 Conclusiones del capítulo

A modo de cierre del actual capítulo se puede concluir que los equipos propuestos para cumplir con los objetivos del proyecto, son en su mayoría elementos de fácil acceso y bajo costo, exceptuando por la cámara de alta velocidad. Además en lo que respecta a programación tanto

del motor shield como posteriormente el procesamiento de imágenes, no implica algoritmos de muy larga extensión ni de mucha investigación, puesto que el soporte que entrega tanto Pololu como Matlab respecto a las funciones que pudiesen ser utilizadas, es bastante completo.



Figura 1-6: Cámara Phantom Miro M320S con lente Canon [13].

## 2 Programación, conexión y registro

El presente capítulo se centra en el desarrollo del sistema programable que permitirá excitar mecánicamente sensores de aceleración con señales cuya frecuencia de oscilación sea propia de movimientos sísmicos.

Forman parte importante de esta sección los trabajos de programación del sistema de generación de señales de potencia destinadas a energizar al excitador de vibraciones. También las pruebas realizadas con un segundo shaker de la marca Brüel & Kjaer (abreviándose B&K) a modo comparativo con el shaker Pasco. Y todo lo que involucra la toma de los vídeos de alta velocidad, para que de esta manera, posteriormente se pueda caracterizar la forma de respuesta de principalmente el excitador de vibraciones de la marca Pasco, en especial ante señales de entrada de la mayor amplitud posible, generando las más altas aceleraciones posibles con tal dispositivo.

### 2.1 Caracterización shakers Pasco y B&K a amplitudes medias

Si bien es cierto que se busca principalmente obtener las más grandes aceleraciones dentro de lo posible, en frecuencias de entre 0,5 y 20 Hz ya que se espera simular condiciones de eventos sísmicos de mediana y gran intensidad, las alternativas y oportunidades que entrega el Laboratorio de Medios Complejos y Fenómenos No Lineales no se podían dejar pasar.

El laboratorio perteneciente al Instituto de Física de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso ofreció entre sus instrumentos lo necesario para poder realizar una caracterización de ambos shaker mencionados de una manera diferente a la planteada desde un principio en este informe y para el presente proyecto.

Hablando brevemente sobre el shaker Brüel & Kjaer, modelo Type 4809, proporcionado por el Laboratorio de Medios Complejos y Fenómenos No Lineales, ofrece versatilidad y fiabilidad para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo mediciones de impedancia mecánica y movilidad y calibración de acelerómetro [14].

El Brüel & Kjaer type 4809 presenta una amplia gama de frecuencias (10 Hz - 20 kHz) y un desplazamiento continuo de 8 mm (0,32 pulgadas) de pico a pico. Puede impartir 45 N de fuerza senoidal - o hasta 60 N con enfriamiento asistido [14].

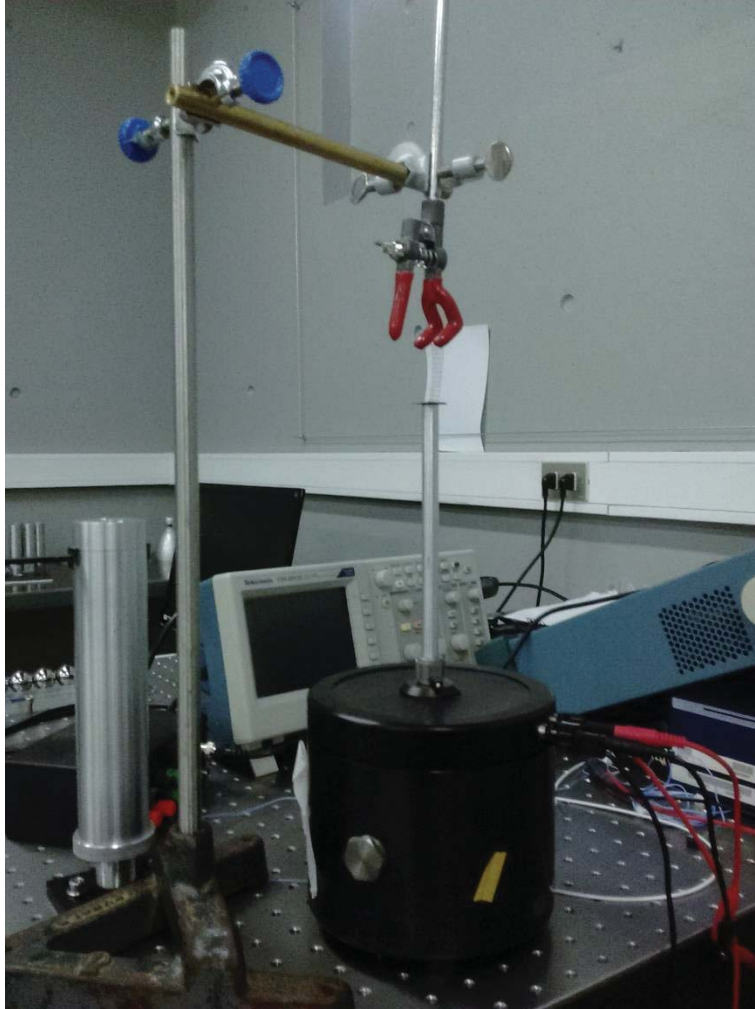


Figura 2-1: Shaker Brüel & Kjaer, modelo Type 4809, junto al montaje que pudiese soportar al sensor magnético por encima del vástago del dispositivo electromecánico.

Al momento de producir señales con el equipamiento presente en el Laboratorio de Medios Complejos y Fenómenos No Lineales, la instrumentación nos permite hacerlo con generador de funciones, o con el ordenador unido a una tarjeta convertora de señal digital-análogo, y análogo-digital, o también llamada tarjeta de adquisición de datos.

Se decidió utilizar la segunda opción debido a que, gracias a programas desarrollados en Matlab, se programó una secuencia de señales que partía en un límite inferior de frecuencias de 0,5 Hz, y con aumentos en la misma cantidad de oscilaciones por segundo, llevar la señal, aumentando progresivamente hasta llegar a los 20Hz. Cabe destacar que cada intervalo de tiempo en que se mantuvo la señal en una determinada frecuencia se programó para durar 20 segundos.

Dicha señal fue enviada desde el ordenador, a través de la tarjeta convertora, que a su vez pasó por el bloque conector BNC-2110 (presente en la Figura 2-2) el que 'busca simplificar la conexión de señales analógicas, algunas señales digitales y hasta dos conexiones definidas por el usuario al dispositivo de adquisición de datos y mantiene la integridad de sus medidas' [15].



Figura 2-2: Bloque conector de blindado marca National Instruments, modelo BNC-2110 [15].

Luego de pasar por dicho elemento, la señal fue dirigida hacia el amplificador marca Brüel & Kjaer, modelo Type 2718, presente en la Figura 2-3.

Finalmente la salida de este amplificador, con ganancia posicionada en unitaria en cuanto a voltaje, es conectada al shaker para producir su movimiento.

Debido a las posibilidades que entrega el sistema completo de adquisición de datos, es que se pudo además utilizar las mismas tarjetas mencionadas anteriormente para recibir los datos en tiempo real proporcionados por el sensor magnético de desplazamiento de la marca OMEGA, modelo LD701 2/5, el cual puede ser apreciado entre otras 2 versiones en la Figura 2-4. Estos sensores lineales sin contacto tienen una salida analógica que es proporcional a la distancia objetivo de amortiguación. Estos sensores utilizan tecnología inductiva, y la distancia de detección, está influenciada por algún objetivo metálico [16].

Debido a la previa configuración de la tarjeta de adquisición de datos, y a la compatibilidad entre sensor, conectores y en general las cualidades del sistema para interactuar entre cada componente, no fue necesario prestar atención a detalles de montaje y configuración adicional.

Al comenzar a desarrollarse los movimientos producidos por los shakers y programados a tonos puros, como se mencionó al inicio de este capítulo, los datos sobre desplazamiento, voltaje de la señal de entrada y frecuencia de la misma, fueron siendo guardados en paquetes de información recopilada durante 20 segundos para cada uno de los tonos puros mencionados. Cabe resaltar



que, como ya se mencionó en el presente párrafo, se utilizó un medidor de voltaje en la entrada de los shakers, para así medir fidedignamente la amplitud de la señal de entrada a los mismos.

Las frecuencias a las cuales se trabajó partieron desde los 0,5 hasta los 20 Hz, en intervalos de 0,5 Hz, es decir, se hicieron 40 pruebas de 20 segundos, cada una a una frecuencia fija diferente dentro del intervalo establecido.



Figura 2-3: Amplificador de señal analógica marca Brüel & Kjaer, modelo Type 2718.



Figura 2-4: Sensores magnéticos de la marca OMEGA, modelos LD701 en formatos 1/2 , 2/5 y 5/10 [16].

Terminado el proceso de recopilación de datos, se llevó a cabo el procesamiento de los datos obtenidos. Se ideó la forma de graficar tanto los datos de voltaje de entrada al shaker, como los de

desplazamiento arrojados por el sensor magnético, ambos en función de la frecuencia a la cual se trabajó. Es importante mencionar que se procesaron los datos para obtener un promedio de las amplitudes medidas durante los 20 segundos de cada prueba.

Los puntos obtenidos para cada una de las 40 pruebas fueron unidos en una curva graficada. Así es como se obtuvo para el shaker Pasco modelo SF-9324, y para el Brüel & Kjaer Type 4809 las curvas características de amplitud en voltaje de las señal de entrada en ambas pruebas (Figura 2-5), y en otro gráfico las curvas de respuesta en desplazamiento para dichas señales de entrada (Figura 2-6).

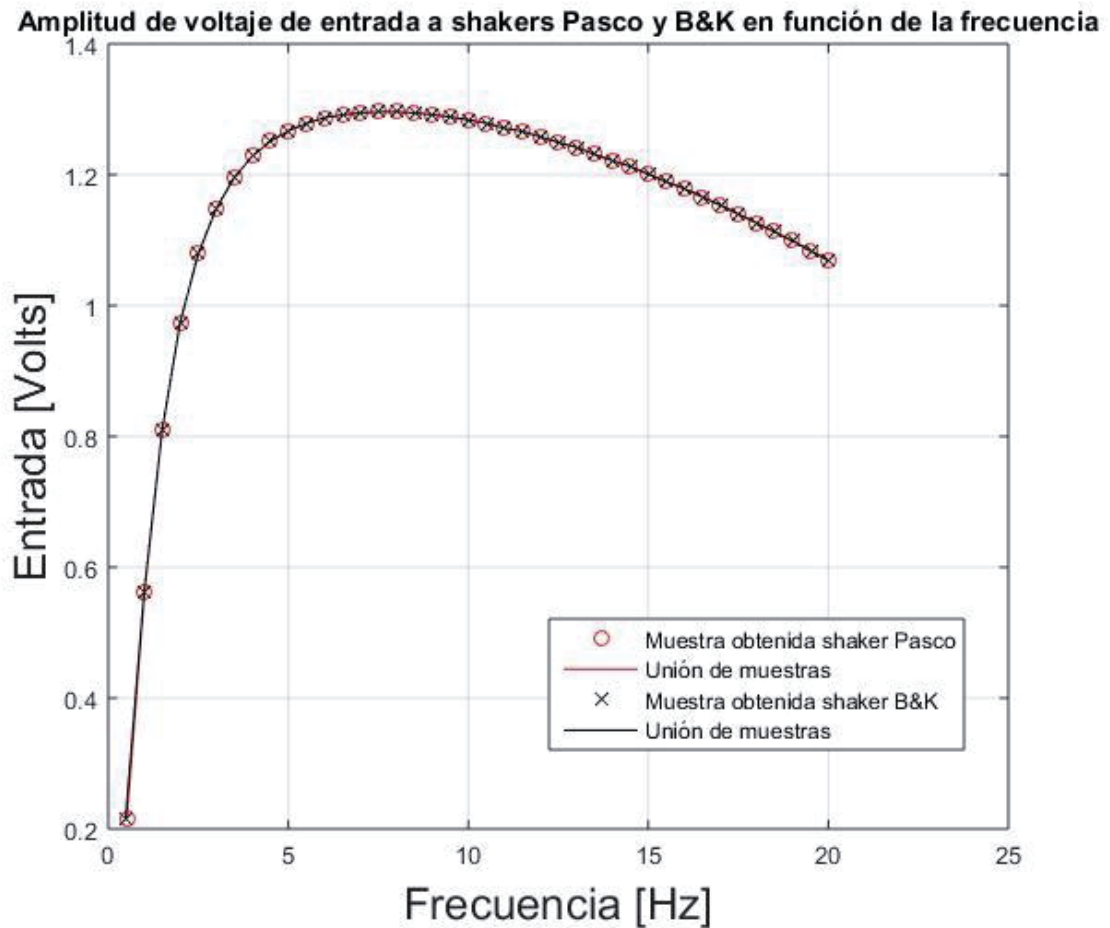


Figura 2-5: Curvas de voltaje de entrada en volts para shaker Pasco SF9324 y shaker Brüel & Kjaer Type 4809 para semiciclos de trabajo (amplitud peak). Ambos en función de la frecuencia.

Se puede apreciar en la Figura 2-5 que tanto para el shaker marca Pasco como para el Brüel & Kjaer, las amplitudes de voltaje de entrada durante ambos experimentos fueron las mismas.

A pesar de haber sido configurada como fija la amplitud de señal que excitaría a ambos shaker y para cada uno de los tonos puros utilizados, la variación que existe de dicho voltaje en función de la frecuencia es debido a los filtros internos que posee el amplificador de señales de la marca Brüel & Kjaer, modelo Type 2718. Este, dentro de su información técnica no posee datos sobre su

respuesta de amplificación de señales cuya frecuencia esté en el rango de las señales trabajadas, y es así como debido a que no está diseñado para operar con señales de estas características, amplifica las mismas variando su amplitud en función del número de oscilaciones por segundo que posea esta dentro del rango trabajado.

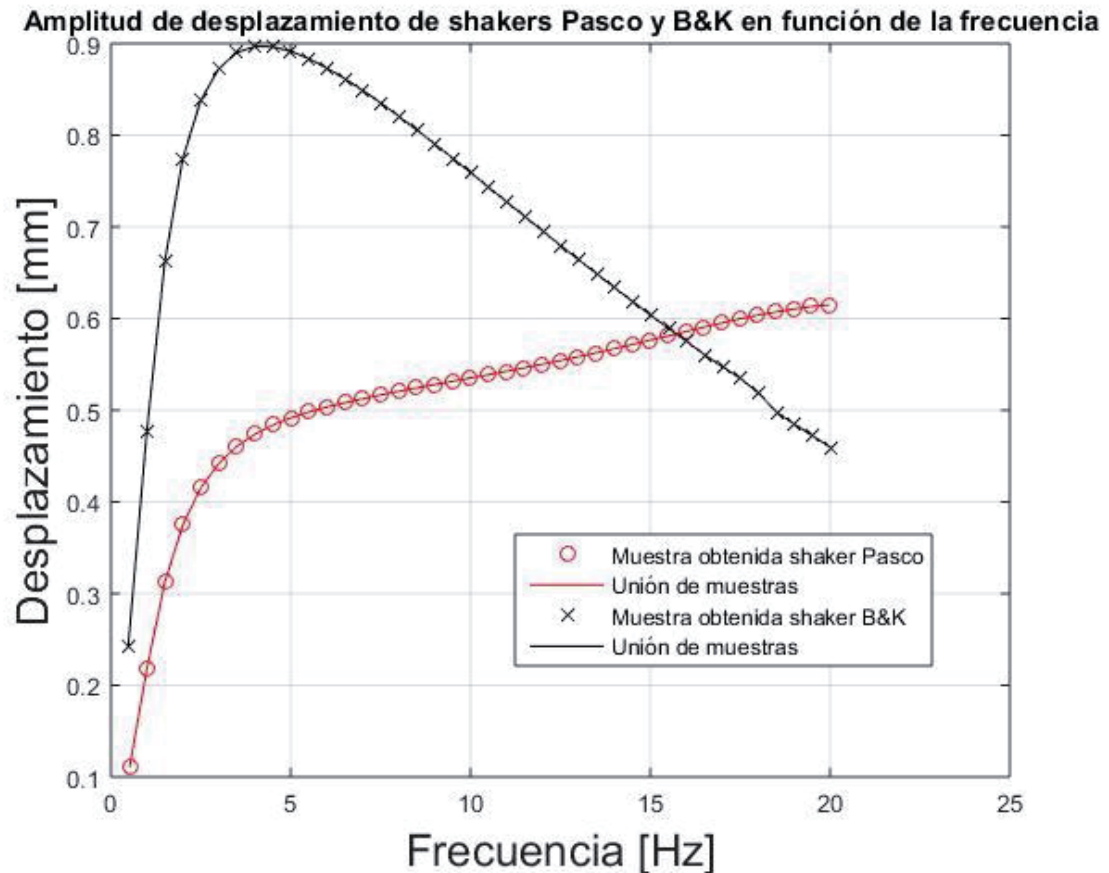


Figura 2-6: Curvas de desplazamiento en milímetros del shaker Pasco SF9324 y del shaker Brüel & Kjaer Type 4809 para semiciclos de trabajo (amplitudes peak). Ambos en función de la frecuencia.

### 2.1.1 Sensibilidad de la respuesta

Dentro de la información rescatable a partir de los datos recopilados se encuentra la sensibilidad del dispositivo ante una entrada en voltaje para determinadas frecuencias de trabajo.

Esta corresponde al cociente entre el desplazamiento que produce el shaker, y la unidad de amplitud en volts de la señal que lo excitó en tal instante. Así es como con los datos obtenidos en cada una de las 40 pruebas, se pueden obtener 40 datos para sensibilidad para frecuencias desde los 0,5 Hz, hasta los 20 Hz, tanto para Shaker Pasco como para Brüel & Kjaer.

Realizando las divisiones correspondientes y graficando los datos se pudieron obtener los resultados apreciables en las Figuras 2-7.

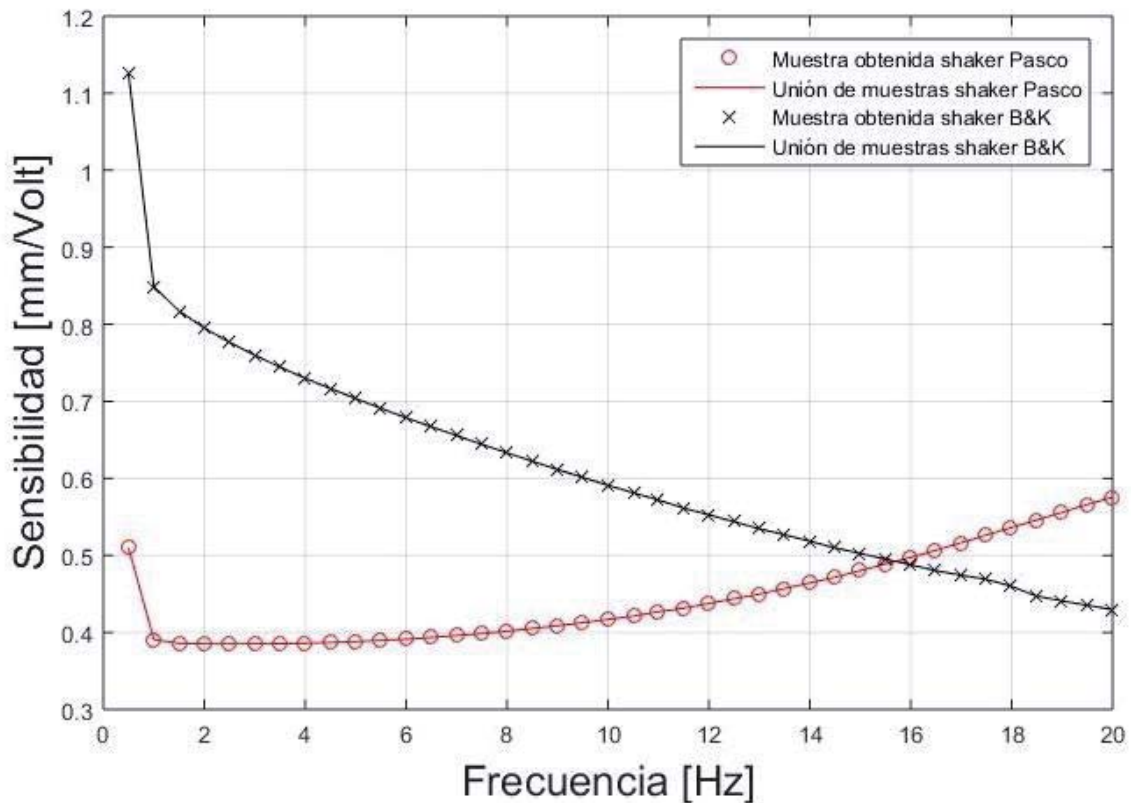


Figura 2-7: Gráfico de sensibilidad en función de la frecuencia para shaker Pasco SF9324, representado por curva con muestras circulares, y shaker Brüel & Kjaer Type 4809, cuya curva se muestra marcada por cruces.

Cabe destacar que las pruebas fueron realizadas con señales de entradas que dentro de las aceptadas por el fabricante, en función de la corriente máxima que puede soportar el shaker Pasco, se encuentran entre las medias para su funcionamiento. Es por esto, y buscando amplitudes que pudiesen lograr aceleraciones más grandes para los mismos rangos de frecuencia es que se decidió por realizar nuevas pruebas con señales de entrada que pudiesen estar cerca de los límites máximos que estipula el fabricante.

Debido a que hasta ahora se trabajó con el amplificador de señales de la marca Brüel & Kjaer, el que no respondió linealmente ante señales de baja frecuencia, es que se optó por trabajar y realizar las próximas pruebas con el dispositivo generador y amplificador de señales constituido por placa Arduino, Pololu Motor Shield, y las plataforma Processing.

## 2.2 Programación de Arduino y motor shield

Arduino como plataforma, y a través de su IDE o programa compilador permite, utilizando el lenguaje C++, obtener soluciones lógicas bastante complejas y de manera relativamente rápida.

Muchas funciones y variables aceptadas dentro del IDE, están ligadas a acciones básicas de la tarjeta, soportadas por distintos tipos de librerías que deben ser, en algunos casos, descargadas y asociadas al programa para el reconocimiento de algunas funciones.

Processing es un entorno y lenguaje de programación de código abierto basado en java orientado a quienes busquen programar imágenes, animaciones e interacciones.

Mediante Processing es que se encontró la manera de interpretar datos en archivos de texto (mediante una metodología explicada a continuación), que luego son enviados a Arduino de manera tal que dicha información se convierta en niveles de tensión eléctrica que serán entregados por el motor shield hacia el shaker.

Para ejemplificar, si se desea producir los datos propios de una senoide, en “Excel” se genera un listado con determinado período de diferencia entre cada número en la secuencia, para luego en otra columna, obtener con una función el valor del seno del número correspondiente a la misma fila. El siguiente paso es multiplicar dicho valor entre -1 y 1 por 400. La razón de este paso se debe a que la librería entregada por el fabricante del Pololu DRV8835 permite, en su función de velocidad, tomar valores enteros que van desde el -400 al 400, permitiendo así una resolución de 801 valores posibles de voltaje de salida. Éstos son en el caso de -400 y 400, el valor máximo de voltaje con el cual se alimenta la entrada de potencia del DRV8835, pero en el caso del -400 y todos los valores negativos, la polaridad es invertida respecto a la de alimentación. Así se puede entregar valores de voltaje pequeños, para números cercanos a 0, y en el mismo 0, el voltaje de salida es nulo.

Continuando con el trabajo en Excel, se generó una columna donde los valores ya multiplicados, son aproximados a su valor entero más cercano, debido a que, como ya fue mencionado, el motor shield utilizado sólo permite valores enteros en el rango descrito.

Los valores ahora aproximados al entero más cercano fueron copiados y pegados en “Notepad++”, donde se adaptaron para poder ser leídos por processing agregando el signo “\$” sin comillas, y al final de cada valor,” también sin comillas. Esto se debe a que se programaron los algoritmos de manera tal que se leyera la cifra que se encuentre entre un signo “\$” y una “,”, pasando de una en una dentro de cada archivo de texto, el cual al ser finalizado en su lectura, vuelve a leerse desde el principio.

Un ejemplo de un archivo de texto terminado con las mencionadas características puede ser apreciado en la Figura 2-8.

Posterior a la lectura, cada uno de estos datos es enviado vía serial desde el ordenador hacia la placa de Arduino, donde el programa cargado en ella asigna tal valor al argumento de la función que establece el nivel de voltaje de salida del motor shield.

En la Figura 2-9 puede apreciarse un esquema que muestra por pasos la forma en que se presentan los datos en cada etapa del proceso de generación de señales, y a su vez explica de manera más sencilla lo descrito en párrafos anteriores.



Los cuadros finales encargados de mostrar el final del recorrido de los datos muestran la expresión “Vin” que corresponde a la tensión eléctrica aplicada al motor shield mediante una fuente de poder, es decir, el voltaje entregado al shaker no sólo depende de la cifra o valor generado anteriormente, pues también está directamente ligado a la tensión de voltaje en corriente continua entregada por la fuente mencionada.

## 2.3 Protocolo de generación de señales

En primer lugar, es importante centrarse en la generación adecuada en cuanto a formato, del archivo de texto que será leído y luego interpretado a forma de respuesta como señal de voltaje.

### 2.3.1 Archivo de texto

Para la fácil y rápida generación de señales sinusoidales discretizadas en valores como los mencionados en el párrafo anterior, se ha creado un archivo en formato Excel llamado Sen\_gen.xls, el cual puede ser apreciado de manera parcial en la Figura 2-10, y representa dichas unidades, en base a la variable de frecuencia deseada. Es decir, sólo basta con cambiar el valor en el recuadro de frecuencia (casilla A6) por algún número decimal positivo múltiplo de 0,5, y el archivo representará en su última columna, los valores que representen una senoide con frecuencia de muestreo de 278 muestras por segundo. Esta frecuencia de muestreo está presentada por defecto en el mismo archivo Excel, debido a que es a la cual opera Arduino, al enviar señal al motor driver, sin embargo, podría ser modificada.

|    | A          | B            | C | D           | E | F          | G | H | I   |
|----|------------|--------------|---|-------------|---|------------|---|---|-----|
| 1  | tiempo     | 0,00359712 T |   | 0,011300454 |   | 4,52018149 |   |   | 5   |
| 2  | Fs         | 0,00719424   |   | 0,022599464 |   | 9,03978573 |   |   | 9   |
| 3  | 278        | 0,01079137   |   | 0,033895589 |   | 13,5582355 |   |   | 14  |
| 4  |            | 0,01438849   |   | 0,045187385 |   | 18,0749539 |   |   | 18  |
| 5  | f          | 0,01798561   |   | 0,05647341  |   | 22,5893641 |   |   | 23  |
| 6  | 0,5        | 0,02158273   |   | 0,067752224 |   | 27,1008894 |   |   | 27  |
| 7  |            | 0,02517986   |   | 0,079022385 |   | 31,6089539 |   |   | 32  |
| 8  | Delta t    | 0,02877698   |   | 0,090282454 |   | 36,1129817 |   |   | 36  |
| 9  | 0,00359712 | 0,0323741    |   | 0,101530995 |   | 40,6123978 |   |   | 41  |
| 10 |            | 0,03597122   |   | 0,112766569 |   | 45,1066275 |   |   | 45  |
| 11 |            | 0,03956835   |   | 0,123987742 |   | 49,5950969 |   |   | 50  |
| 12 |            | 0,04316547   |   | 0,135193082 |   | 54,0772328 |   |   | 54  |
| 13 |            | 0,04676259   |   | 0,146381157 |   | 58,5524628 |   |   | 59  |
| 14 |            | 0,05035971   |   | 0,157550538 |   | 63,0202154 |   |   | 63  |
| 15 |            | 0,05395683   |   | 0,1686998   |   | 67,47992   |   |   | 67  |
| 16 |            | 0,05755396   |   | 0,179827518 |   | 71,9310071 |   |   | 72  |
| 17 |            | 0,06115108   |   | 0,190932271 |   | 76,3729084 |   |   | 76  |
| 18 |            | 0,0647482    |   | 0,202012641 |   | 80,8050565 |   |   | 81  |
| 19 |            | 0,06834532   |   | 0,213067214 |   | 85,2268854 |   |   | 85  |
| 20 |            | 0,07194245   |   | 0,224094576 |   | 89,6378305 |   |   | 90  |
| 21 |            | 0,07553957   |   | 0,235093321 |   | 94,0373285 |   |   | 94  |
| 22 |            | 0,07913669   |   | 0,246062044 |   | 98,4248175 |   |   | 98  |
| 23 |            | 0,08273381   |   | 0,256999343 |   | 102,799737 |   |   | 103 |
| 24 |            | 0,08633093   |   | 0,267982233 |   | 107,161530 |   |   | 107 |

Figura 2-10: Extracto de archivo Excel denominado “Sen\_gen.xls”.

Cabe destacar además que la frecuencia máxima a la cual puede operar el sistema por la característica descrita en el párrafo anterior, y según el teorema del muestreo de las señales, es de 278 dividido 2, es decir, 139 Hz.

Luego de este paso es donde se realiza la adaptación de formato agregando los signos "\$" y "," explicados anteriormente.

### 2.3.2 Lectura del archivo de texto

Para realizar esta función se utiliza el programa denominado "txt\_sendCOM\_v11.pde", dentro del cual en la sección mostrada en la Figura 2-12, se debe agregar el nombre del archivo de texto creado en base a las indicaciones de la sección anterior.

```

88 void an_A_received() {
89   /*If the String received = A, then import the text file
90   change the background to blue, and start by sending the
91   first line of the text file to the Arduino */
92   background(0, 0, 255);
93   println(" - - - Reading file - - -");
94   textFileLines=loadStrings("data0101.txt");
95   println("- - - - ready to send to Arduino... Sebastian, sending - - -");
96   readACompleteLineByItsNum(counter);
97 }
98
99 void an_S_received() {
100  /*The readACompleteLineByItsNum method is used to send a specific line
101  from the imported text file to the Arduino. The first
102  line item tells the Arduino to either switch the LED on or off.
103  The second line item, tells the Arduino how long to keep the
104  LED on or off. The full-stop is sent to the Arduino to indicate
105  the end of the line. */
106  println("An S was sent. This means a new line will be sent.");
107  counter++;
108  if (counter > (textFileLines.length-1)) {
109    println("Hey!!! There aren't so much lines!?!?!");
110    background(255, 0, 0);
111    counter=0;
112  } else {
113    readACompleteLineByItsNum(counter);
114  }

```

Figura 2-11: Extracto de programa en Processing donde se resalta en recuadro rojo la función de lectura de archivo de texto.

Cabe destacar que el archivo de texto creado debe ser guardado en la misma carpeta en que está instalado el programa Processing.

### 2.3.3 Configuración de puertos y comunicación

Dentro de la comunicación está la relevante configuración de los puertos serial, o en este caso, el puerto serial que irá conectado a la placa Arduino en la que está cargado el programa denominado "receive\_ASCII\_from\_COM\_v11.ino"



En primer lugar se debe conectar la placa Arduino a través de un cable USB con el ordenador. Seguido a esto, abriendo el programa mencionado en el párrafo anterior, se debe ir a la pestaña herramientas y seleccionar las opciones según el puerto en el que esté conectado la placa. En base a esto, y según sea el puerto COM5 o COM6, es que se debe ingresar en el programa de processing “txt\_sendCOM\_v11.pde”, el 0 o 1 respectivamente, en la línea 22 del código.

### 2.4 Registro de vídeos de alta velocidad

En la búsqueda de alcanzar las máximas amplitudes posibles dentro de los rangos seguros de trabajo para frecuencias de interés con shaker Pasco, se debió eliminar la opción de recoger datos de desplazamiento mediante los sensores magnéticos utilizados en pruebas pasadas, ya que los que se poseen actualmente, lo logran medir distancias de las magnitudes esperadas, es decir, alrededor de 6 milímetros peak to peak. Además se sabe por lo descrito en [17] que la frecuencia natural del shaker Pasco es de 22.76 Hz. Y debido a que la frecuencia natural se encuentra por sobre las frecuencias de interés, será un dato teóricamente más fácil de aislar filtrando o analizando en el dominio de la frecuencia cuando se trate de la búsqueda de respuesta.

De esta manera, se decidió realizar pruebas con voltajes de señal de entrada que permitieran la conducción de intensidades de corriente cercanas a 1 ampere, (límite establecido por el fabricante) y medir los desplazamientos producidos mediante registros de vídeos de alta velocidad, cuyos cuadros pudiesen ser procesados para obtener distancias de desplazamiento.

#### 2.4.1 Medición de intensidad de corriente entregada a shaker Pasco

Debido al gran desafío que implica la medición de la intensidad de corriente entregada en forma de señal de potencia de frecuencias entre 0,5 y 20Hz, puesto que los amperímetros poseen sus propios filtros internos que los orientan al trabajo con sinusoides de 50/60Hz o bien para señales continuas, es que se decidió trabajar con el sistema de placa Arduino y motor driver. De esta manera, y debido a que el motor driver se alimenta con voltajes continuos, se puede medir la intensidad de corriente en DC que sale desde la fuente de poder en función del tiempo, y así llegar a niveles de potencia límites para el desempeño del shaker sin llegar a dañarlo.

El amperímetro utilizado, fue el que posee internamente la fuente de poder marca Shenzhen Mastech, modelo HY-5005, la cual puede ser apreciada en la Figura 2-12.

Debido a que en su pantalla digital el valor de intensidad de corriente tiene un período de refresco de aproximadamente medio segundo, fue necesaria la observación durante algunos segundos en que el sistema estuviese funcionando, para poder rescatar los valores máximos estimados de intensidad de corriente que llegase a mostrar en pantalla la fuente de poder.

Fue así que con valor peak de corriente mostrado en pantalla igual a 0,92 ampere, durante el funcionamiento del sistema para frecuencia de 0,5 Hz, la fuente de poder arrojaba 6,5 volts, valor que se tomó para realizar las demás pruebas con variados niveles de frecuencia.



Figura 2-12: Fuente de poder marca Shenzhen Mastech, modelo HY-5005.

A su vez se decidió utilizar un valor más elevado de tensión (8 volts) para realizar pruebas a frecuencias desde los 4 Hz en adelante. La razón por la cual no se abarcó el rango completo de frecuencias utilizado con 6,5 volts es debido a la intensidad de corriente elevada que se producía a frecuencias bajas. Esto podría desencadenar un sobrecalentamiento en la bobina del shaker, y por ende, daños irreparables al mismo. Lo anteriormente mencionado puede explicarse por la disminución de la impedancia de la bobina del shaker a medida que también se disminuye la frecuencia de la señal, lo que implica mayores intensidades de corriente a frecuencias más bajas.

Pasando nuevamente al montaje, luego de conectar la cámara al ordenador a través de conexión LAN, y darle energía mediante su fuente de poder, se montó en un trípode apuntando hacia el shaker instalado de manera horizontal. En este se instaló una pieza metálica de medidas conocidas para poder diferenciar en ella de mejor manera los bordes. El shaker se puso en funcionamiento gracias al sistema Arduino-motor driver, y fue alumbrado por un panel de luminarias led, como se puede apreciar en la Figura 2-13.

### 2.4.2 Configuraciones y formatos

La configuración utilizada en el programa que entrega el fabricante denominado “Phantom Camera Control Application”, fue puesta en una resolución de 1280x800 pixeles, a una tasa de 200 cuadros por segundo con tiempo exposición a la luz de 300 microsegundos.



Figura 2-13: Cámara de alta velocidad apuntando a shaker Pasco instalado de forma horizontal, alumbrado por luminarias LED y con fondo color negro.

Los vídeos fueron tomados con el shaker marca Pasco dispuesto de forma horizontal (movimientos en ambos sentidos de dicha dirección) para frecuencias de 0,5, 1, 2, 4, 8, 12, 16 y 20 Hz, para amplitudes basadas en la tensión de 6,5 volts entregada por la fuente de poder. Además se hicieron pruebas adicionales para frecuencias de 4, 8, 12, 16 y 20 Hz con amplitudes basadas en la tensión de 8 volts entregada por la ya mencionada fuente tensión.

Luego de registrar los vídeos en formato CINE, se debió separar cada uno de ellos en imágenes correspondientes a cada cuadro registrado por la cámara de alta velocidad. Para hacerlo se utilizó nuevamente el programa “Phantom Camera Control Application” cuya interfaz visual puede apreciarse en la Figura 2-14. Eligiendo la pestaña “Reproducir”, se selecciona la opción guardar cine, luego se selecciona un formato de imagen como JPEG, y al final del nombre se le agrega “+5” sin comillas, lo que significa que el vídeo será separado en cuadros, hasta llegar al cuadro que en decimal contemplara el máximo valor posible con 5 cifras si es que existiesen en el registro tal cantidad de cuadros.

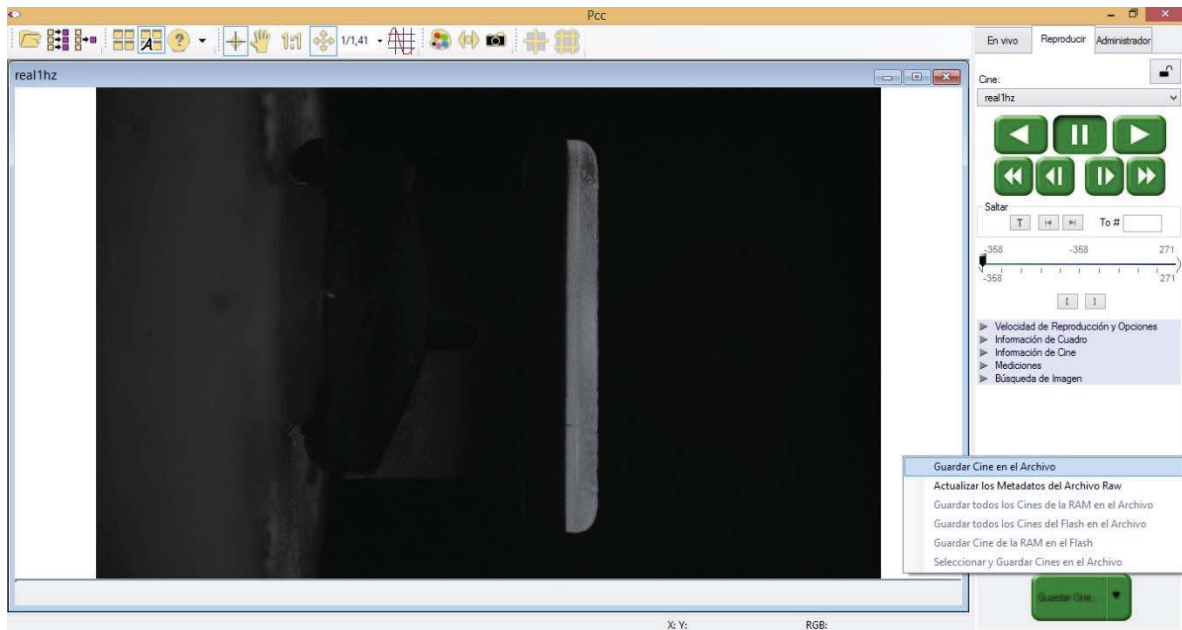


Figura 2-14: Interfaz de usuario del programa Phantom Camera Control Application, en el cual se selecciona la opción de guardar el vídeo con la finalidad de cambiar su formato a secuencia de imágenes.

Al obtener la secuencia de imágenes, se puede proceder a las etapas de procesamiento de las mismas.

## 2.5 Procesamiento de imágenes

Los programas utilizados para esta etapa de procesamiento de las secuencias de imágenes obtenidas en los pasos recopilados en el capítulo anterior, son “Imagej” y “Matlab”. ImageJ admite una gran cantidad de formatos de archivo de imagen estándar, incluida la reciente implementación de compatibilidad de imagen compuesta de color de 48 bits. Además no sólo se importan los datos de imagen, también se importan los metadatos adicionales. Esto puede incluir información útil, como la configuración de la exposición pero también ajustes esenciales como el tamaño de píxeles y la tasa de adquisición, todos necesarios para una interpretación correcta de los datos [18].

Si bien es cierto que todo podría hacerse con Matlab, se decidió utilizar Imagej para crear la escala que compara los píxeles con milímetros.

Describiendo las etapas del trabajo presentado en esta sección, nos podemos referir a los primeros pasos como los que constituyen el reconocimiento del recuadro o sector de la imagen que será procesado. Para ello se ajustó el contraste de tal manera que fuera fácilmente reconocible el terminal metálico conectado a la punta del vástago del shaker, entre todo el resto de información capturada por las imágenes.

Para ello se leyeron algunas imágenes de la secuencia a través de Matlab y con el cursor, se determinó el cuadro en el que se lograra observar todo el recorrido del movimiento, y una fracción de la altura de la pieza metálica.

De esta manera, y sabiendo que una imagen es interpretada como una matriz, el siguiente paso fue recorrer columna a columna hasta encontrar una columna en la que se pudieran encontrar sólo pixeles que según el contraste perteneciera a blanco, entonces se marcaría esa columna de pixeles como la perteneciente a la curva de desplazamiento para esa imagen.

Para graficar los datos obtenidos de cada secuencia de imágenes, se compararon dichos datos con una senoide generada en Matlab, y así poder corroborar de que a partir del movimiento percibido en la secuencia, se generara una señal sinusoidal de la misma frecuencia a la que se excitó el shaker.

En la Figura 2-15 se logra apreciar que el dt corresponde al tiempo en que debe ir graficado cada dato obtenido a partir del proceso de cada cuadro de la secuencia de imágenes, recordando que cada imagen corresponde a 1 entre 200 que fueron tomadas cada segundo en la captura del vídeo.

```

21 %
22 - freq = 1;
23 - dt = 1/200;
24
25 - t = (0:dt:dt*(kl-1))';
26 - A = 140/44.14;
27 - phi = pi/0.7;
28 - yt = A*sin(2*pi*freq*t + phi);
29
30 - meanborde = (meanborde - mean(meanborde))/44.14;
31
32 - figure
33 - plot(t,meanborde,'k-o',t,yt,'r-')
34 - xlabel('tiempo [s]')
35 - ylabel('desplazamiento [mm]')
36
37 - chld = get(gcf,'children');
38 - set(chld,'XGrid','on','YGrid','on')

```

Figura 2-15: Extracto del programa realizado en Matlab para procesar secuencia imágenes. Se aprecia sección de generación de senoide de referencia e instrucciones de gráficas.

El valor de 44.14 corresponde a la escala que fue obtenida mediante Imagej al comparar el largo de una sección de la pieza metálica empleada con la medición tomada con pie de metro en laboratorio.

Para llegar a medir el largo en pixeles de la sección indicada en la Figura 2-16 con ayuda del programa Imagej, se realizaron medidas de 6 imágenes elegidas de entre 6 secuencias de las mismas, correspondientes cada una a pruebas realizadas a diferentes frecuencias. Estas además se realizaron acercando las imágenes, ampliando la sección designada en un 600%.

La cantidad de pixeles medidos en cada una de las imágenes elegidas se presenta en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Mediciones de cantidad de pixeles en imágenes pertenecientes a secuencias de las mismas creadas a partir de videos de alta velocidad.

| Nombre de imagen    | Frecuencia(Hz) | Voltaje(V) | N° de Pixeles |
|---------------------|----------------|------------|---------------|
| FOUR_00002          | 4              | 6,5        | 140,33        |
| FIVE_00003          | 8              | 6,5        | 140,33        |
| SEVEN_00004         | 12             | 6,5        | 141,01        |
| NINE_00007          | 16             | 6,5        | 140,33        |
| THREE_00015         | 4              | 8,0        | 139,67        |
| SIX_00006           | 8              | 8,0        | 140,33        |
| Promedio de pixeles |                |            | 140,33        |

La interfaz gráfica de Imagej durante el proceso de medición de pixeles de la sección designada para establecimiento de la escala se puede apreciar, como se mencionó anteriormente en la Figura 2-16.

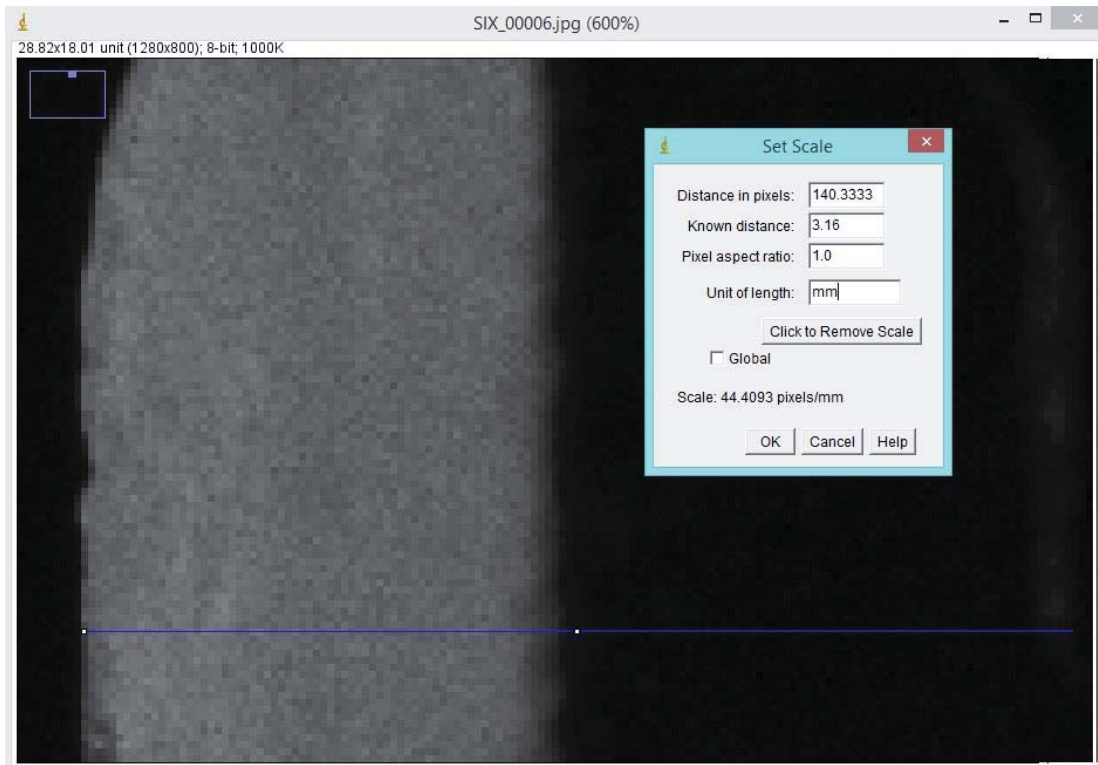


Figura 2-16: Trazo de medición y posterior escala referencial con la medida conocida de 3.16mm, dando una escala de 44.4 pixeles por mm.

## 2.6 Conclusiones del capítulo

Mediante el trabajo realizado, puede apreciarse en primer que, tanto el shaker Pasco como el B&K, poseen características de respuesta a amplitudes medias que permiten realizar trabajos

como los deseados en este proyecto sin problemas dentro de las frecuencias de interés. Esto último salvo por los bajos niveles de aceleración que las amplitudes medias generan.

Dentro del protocolo de comunicación y generador de funciones es bueno mencionar que permite trabajar programando una amplia gama de funciones considerando el rango de dígitos de discretización entre -400 y 400, y las amplitudes máximas de voltaje con las que se puede alimentar el motorshield.

Y por último al referirse al procesamiento de imágenes es importante darle énfasis a que debido a la forma en que se trabajó la escala, el error en pixeles en ella, según la cantidad de mediciones realizadas, es cercana a 1 pixel, lo que equivale a 0.22 milímetros, lo cual es un bajo margen de error dentro del desplazamiento esperado para el shaker Pasco.

## 3 Análisis de respuesta de shaker

En el presente capítulo se muestran los resultados del trabajo previamente realizado centrado en experimentación, medición, grabación y procesamiento de imágenes. Los resultados finales son sólo obtenidos luego de analizar los datos que el procesamiento de imágenes obtenidas a partir de los vídeos de alta velocidad grabados enfocando al shaker marca Pasco funcionando de manera horizontal a diferentes frecuencias y amplitudes. Así es como dichos datos pueden ser interpretados en la información que represente las características de respuesta que posee el shaker Pasco para las señales de entrada probadas.

### 3.1 Curvas y análisis de respuesta

Luego de hacer correr el programa escrito en Matlab para cada uno de los tonos puros seleccionados y registrados, se obtuvieron las gráficas que representan los desplazamientos, medidos en milímetros, producidos por el shaker en función del tiempo. Además se muestra una curva de referencia generada a través de Matlab, cuyos datos son totalmente independientes a los obtenidos por el procesamiento de imágenes.

La razón por la que se decidió demostrar una curva con una señal sinusoidal de referencia en la misma gráfica, es para poder comparaciones rápidamente. La curva de desplazamiento, que debiese tender a una senoide de la misma frecuencia de la señal de entrada, y de la señal de referencia, debiese por tanto, coincidir en varios puntos si se llegasen a superponer en la gráfica.

A pesar de las dificultades que puede implicar el encontrar el mismo punto de fase entre la señal de desplazamiento procesada y la señal de referencia, se puede observar tanto en la Figura 3-1 como en la Figura 3-2, que lo planteado en el párrafo anterior es corroborado.

Como se menciona anteriormente, los resultados en forma de gráficos para sinusoides en 4 y 12Hz pueden apreciarse en la Figuras 3-1 y Figura 3-2.

Analizando la Figura 3-1, es apreciable que los semiciclos positivos son de menor amplitud que los negativos, es decir, el recorrido que producen las partes móviles del shaker Pasco en dirección a su cuerpo, son de menor amplitud que las que van en sentido contrario al mismo. Respecto a esto, es importante hacer énfasis en que la disposición del excitador de vibraciones o shaker, para



estas pruebas, fue dispuesto de manera horizontal, y los resultados podrían variar de hacerse pruebas posicionando el mismo dispositivo de otra manera.

El fenómeno se logra apreciar también en pruebas a otras frecuencias, y es en base a ello que se preparó un gráfico que representa el porcentaje de aumento de amplitud en los semiciclos o movimientos alejándose del cuerpo del shaker Pasco en comparación a la amplitud que se logra en movimientos hacia el cuerpo del dispositivo.

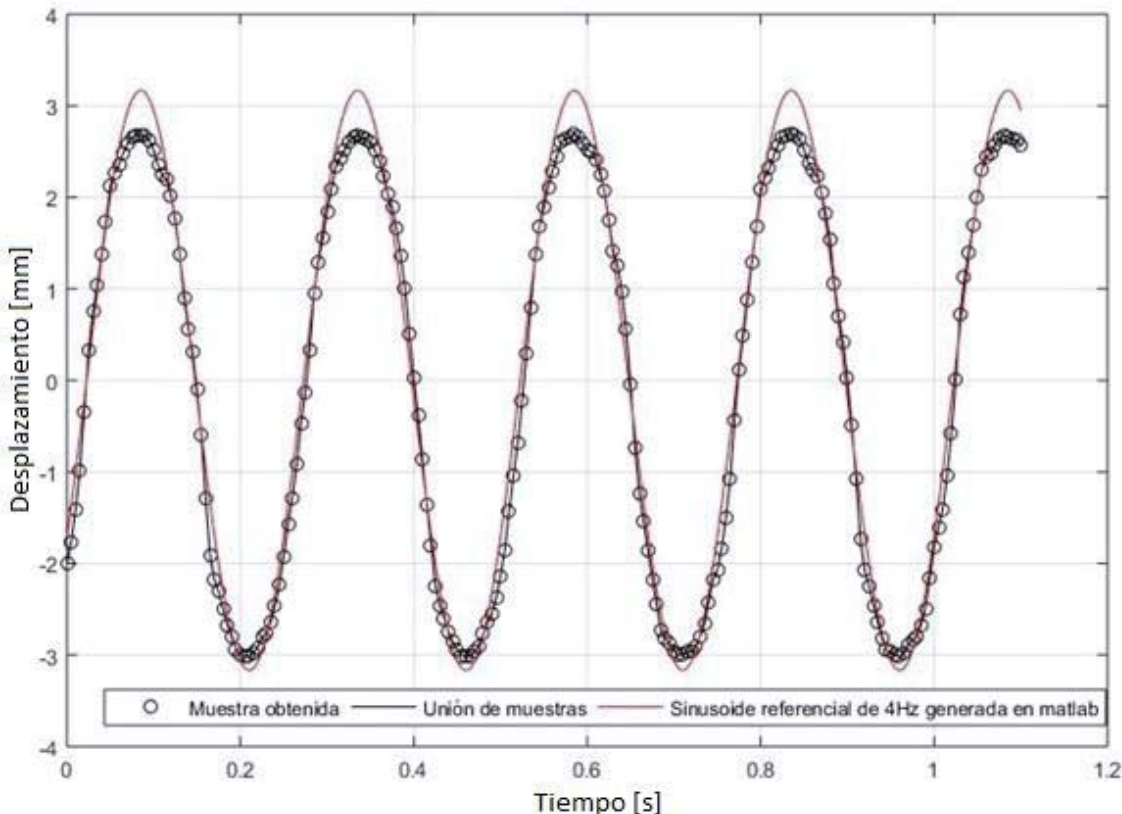


Figura 3-1: Gráfica de desplazamiento en el tiempo para 4Hz. Curva compuesta por “o” representa el desplazamiento del objeto metálico en la secuencia de imágenes. Curva lisa y de mayor amplitud representa la generada en Matlab para efectos de corroborar igualdad en frecuencia.

Las gráfica de la Figura 3-3 fue construida considerando los valores peak de cada semiciclo de las sinusoides obtenidas en el procesamiento de imágenes. Luego fueron promediados los semiciclos positivos y negativos por separado, seguido por el cálculo de la diferencia entre ambos promedios y para finalizar la comparación del porcentaje de dicha diferencia respecto al promedio de semiciclos más pequeño en amplitud. En otras palabras, corresponde al porcentaje de amplitudes promediadas que un semiciclo posee por encima del otro.

Además comparando dicho fenómeno entre las pruebas realizadas tanto a 6,5 como a 8 volts, y para frecuencias que van desde los 4 Hz en adelante se preparó la gráfica de la Figura 3-4.

Es fácil notar en la Figura 3-4 que la curva que representa los datos obtenidos en las pruebas realizadas a 8 volts, llega a valores menores a 0. Esto representa que a dichas frecuencias los

semiciclos que van en sentido orientado hacia el cuerpo del dispositivo poseen mayor amplitud promedio que los que van en sentido contrario.

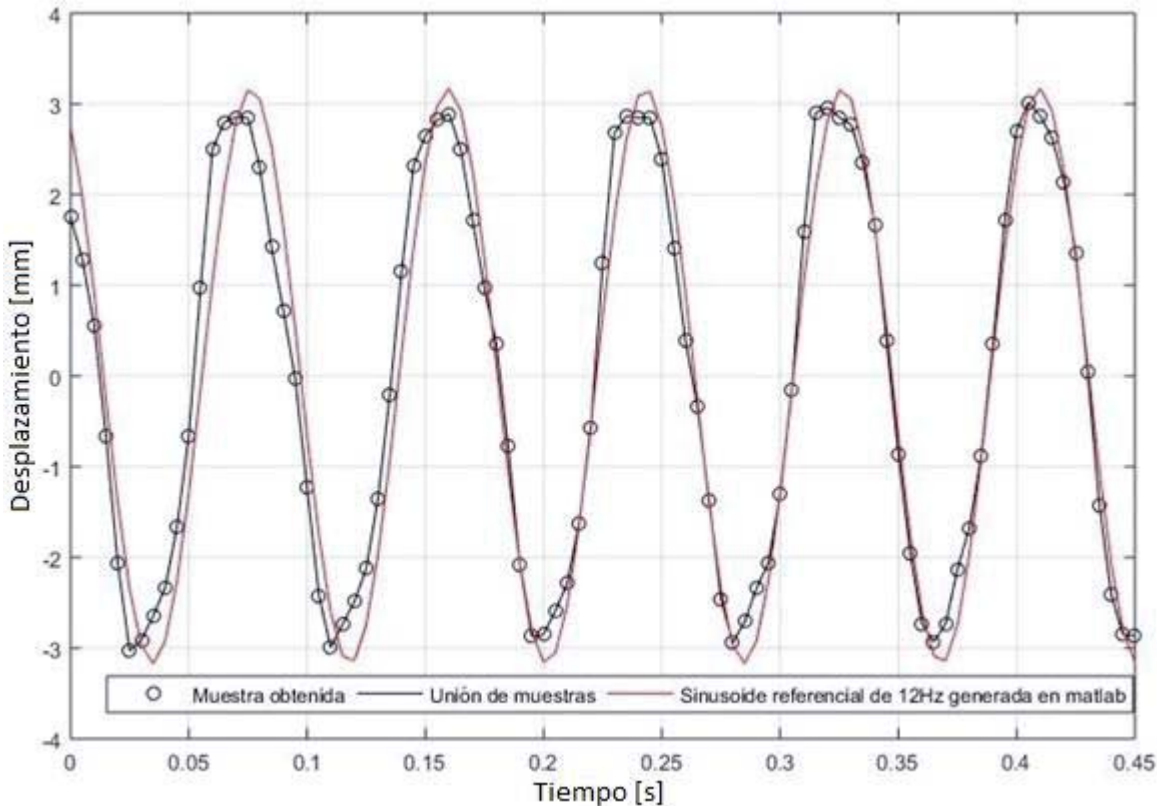


Figura 3-2: Gráfica de desplazamiento en el tiempo para 12Hz. Curva compuesta por “o” representa el desplazamiento del objeto metálico en la secuencia de imágenes. Curva lisa y de mayor amplitud representa la generada en Matlab para efectos de corroborar igualdad en frecuencia.

En base a las curvas obtenidas para tonos puros desde 0,5 hasta 20Hz, y considerando el promedio de amplitudes en milímetros lograda por el shaker Pasco, se generó una curva de respuesta en amplitudes peak, para cada una de las frecuencias con las que se experimentó (Figura 3-5). Además en base a ella y utilizando la doble derivada de la representación sinusoidal de la posición, obteniendo así la representación sinusoidal de la aceleración, la cual básicamente es la posición multiplicada por la frecuencia angular al cuadrado, se obtuvo a partir del programa representado en la Figura 3-6, y la curva graficada está presente en la Figura 3-7.

Cabe destacar que como se muestra en el programa (Figura 3-6), las medidas en milímetros se pasaron a metros, y luego la curva fue representada en aceleración de gravedad (g).

El arreglo “y” posee los promedios de las amplitudes máximas obtenidas a partir del procesamiento de imágenes en cada uno de los tonos puros analizados.

Sumando al gráfico de la Figura 3-7, para mayor claridad de los datos de aceleración para las 3 frecuencias más bajas, se presenta la curva de la Figura 3-8. Ésta corresponde a los primeros 3 datos graficados en la Figura 3-6, pero expuestos por separado para aumentar el detalle de la información reflejada en dicha gráfica.

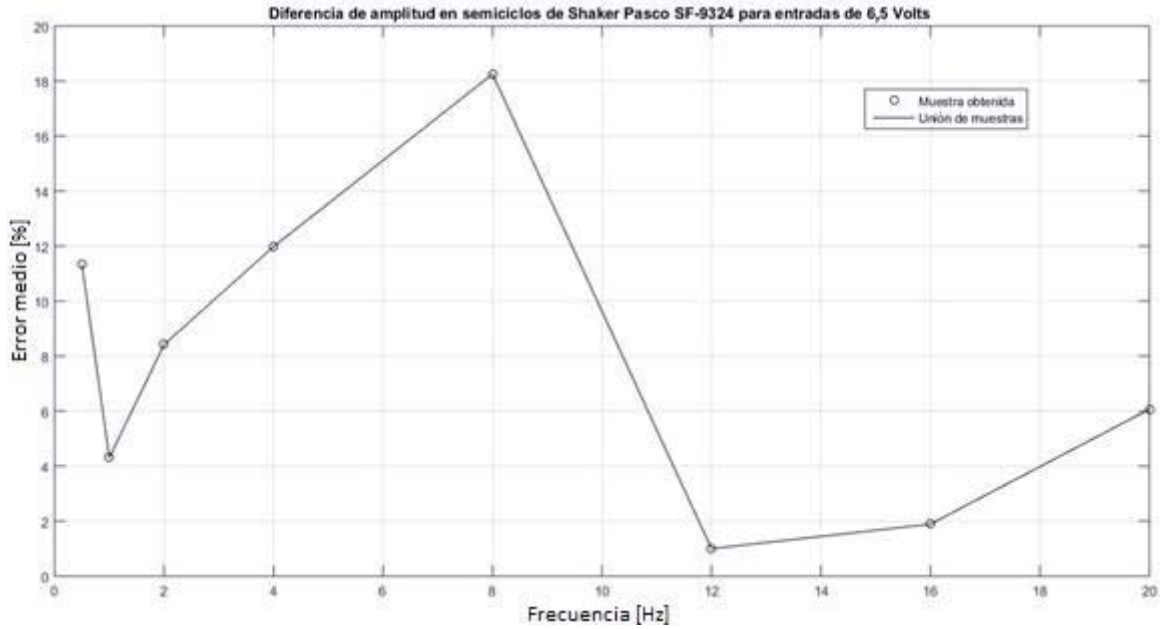


Figura 3-3: Gráfica cuya curva representa el porcentaje de diferencia de amplitudes promediadas que el semiciclo cuyo desplazamiento se realiza en sentido contrario al cuerpo del shaker sobre el semiciclo restante. Pruebas realizadas a 6,5 volts.

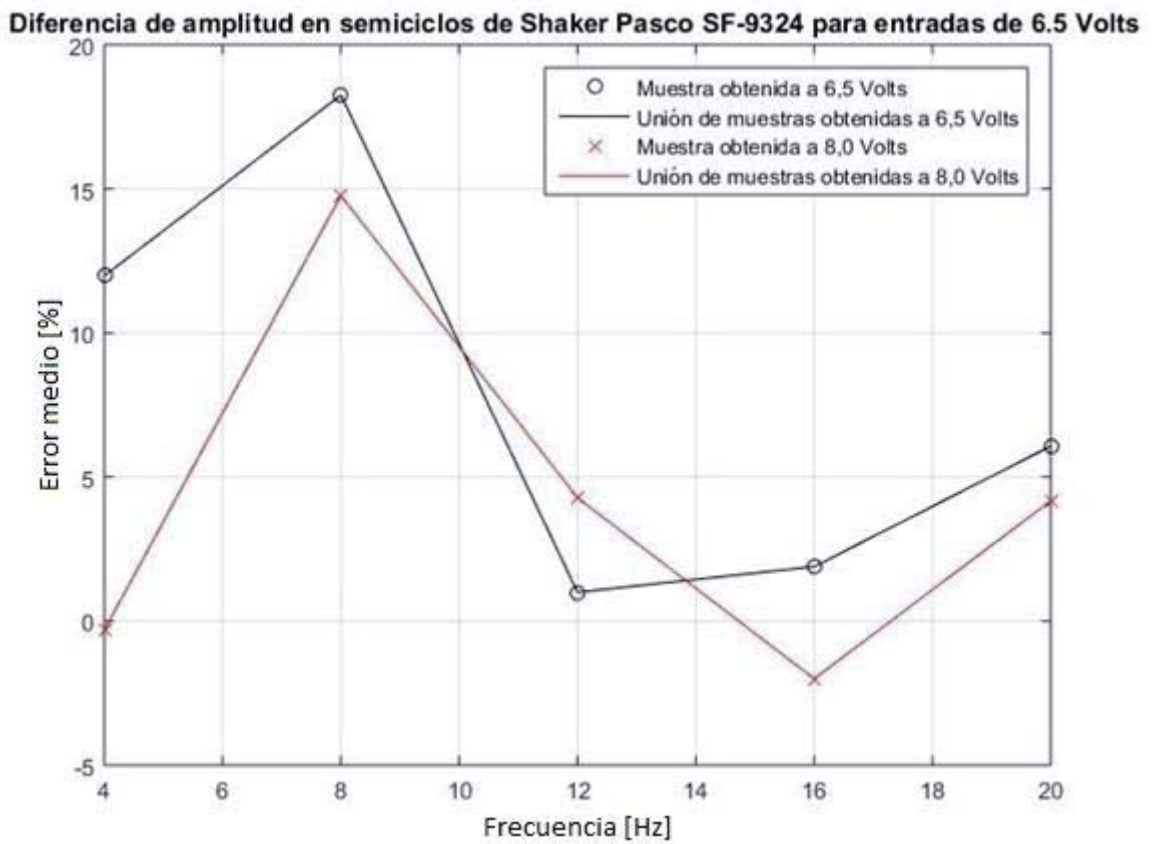


Figura 3-4: Gráfica cuya curva representa el porcentaje de diferencia de amplitudes promediadas que el semiciclo cuyo desplazamiento se realiza en sentido contrario al cuerpo del shaker sobre el semiciclo restante. Pruebas realizadas a 6,5 y 8 volts.

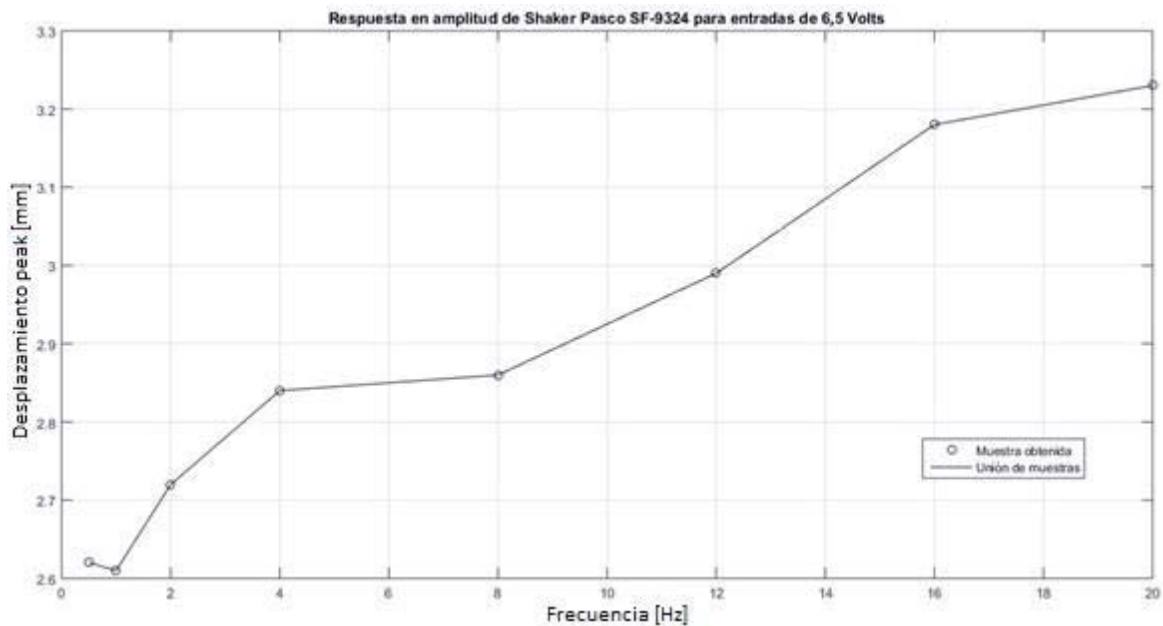


Figura 3-5: Gráfica de amplitud de desplazamiento en función de la frecuencia de shaker Pasco SF-9324 para señales de 6,5 volts. Las marcas "o" representan las muestras de amplitudes promedio.

```

1 - clear; clc; close all;
2 - freq=[0.5 1 2 4 8 12 16 20];
3 - y=[2.62 2.61 2.72 2.84 2.86 2.99 3.18 3.23];
4
5
6 - for k1=1:8
7 -     omega=freq(k1)*2*pi;
8 -     acceleration(k1)=(y(k1)*omega^2)/9800;
9 - end
10 - figure
11
12 - plot(freq,acceleration,'k-o')
13
14 - xlabel('frecuencia [hz]')
15 - ylabel('aceleración [g]')
16 - title('Respuesta en aceleración de Shaker Pasco SF-9324 para entradas de 6.5 Volts ')
17
18 - chld = get(gcf,'children');
19 - set(chld,'XGrid','on','YGrid','on')

```

Figura 3-6: Programa para representar aceleraciones en g, respecto a frecuencias, a partir de datos de amplitud.

Considerando las pruebas realizadas con tensión de 8 volts, se lograron graficar curvas que a modo comparativo, para frecuencias desde los 4 Hz, pueden dar una visión un poco más amplia del comportamiento de respuesta del shaker Pasco a altas amplitudes.

### 3 Análisis de respuesta de shaker

En la Figura 3-9 se pueden apreciar las curvas de amplitud en función de la frecuencia tanto de las pruebas realizadas a 6,5 como a 8 volts.

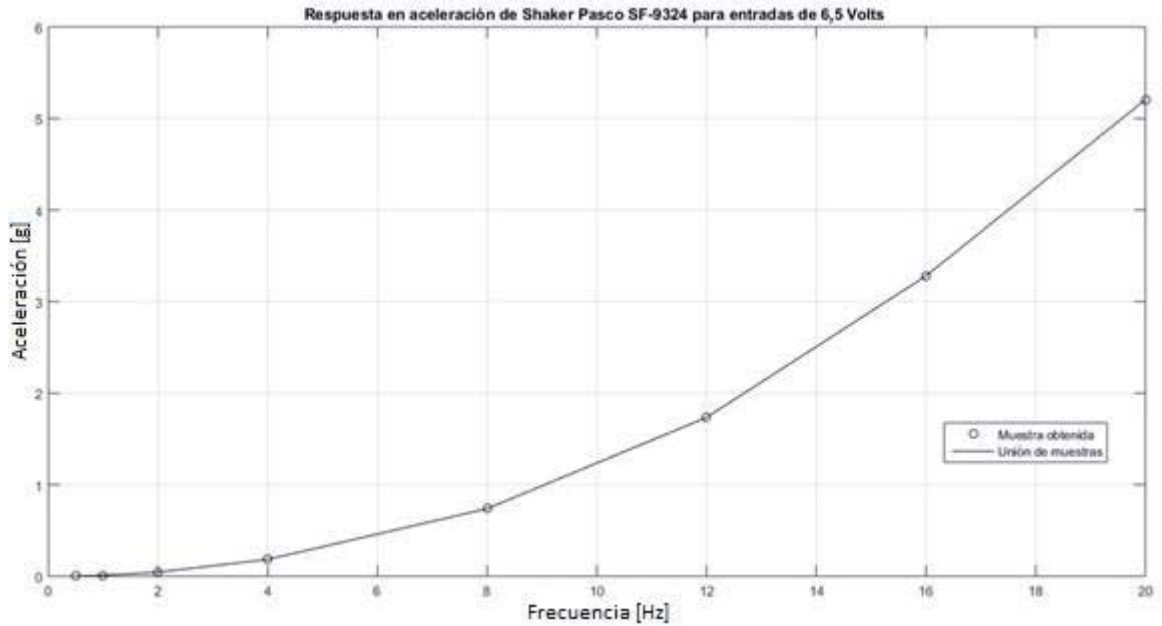


Figura 3-7: Representación gráfica de las aceleraciones obtenidas con los movimientos de las partes móviles del shaker Pasco SF-9324 bajo las condiciones descritas.

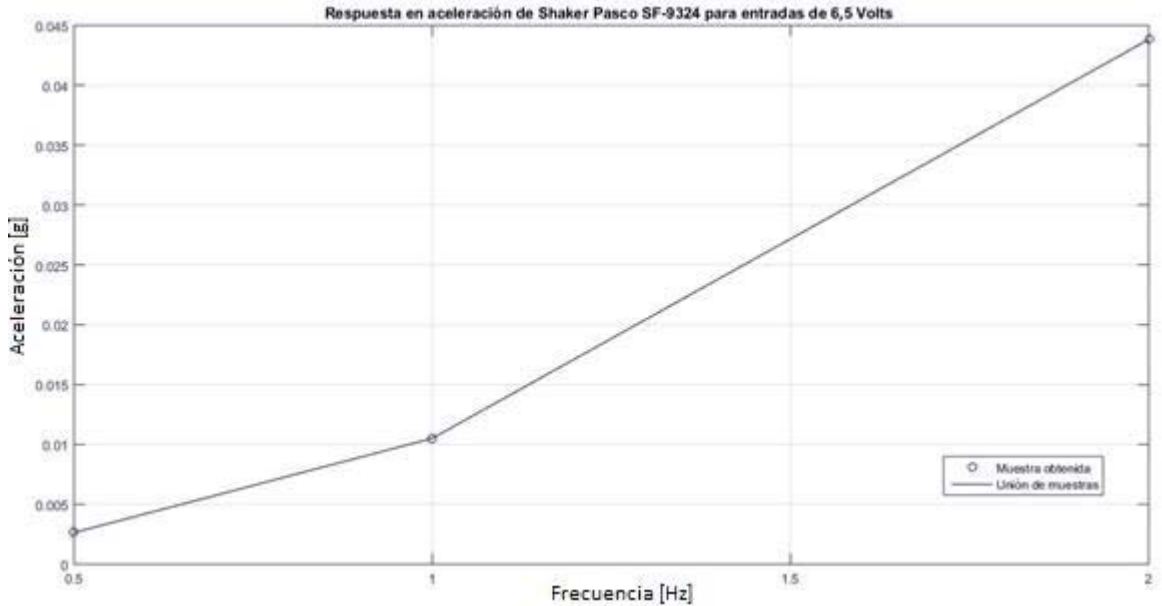


Figura 3-8: Representación gráfica de las aceleraciones obtenidas con los movimientos de las partes móviles del shaker Pasco SF-9324 para las 3 frecuencias de trabajo más bajas en base a las condiciones descritas.

Al comparar ambas curvas se puede notar a simple vista bastante similitud en sus características, sin embargo las diferencias, aunque pequeñas, existen.

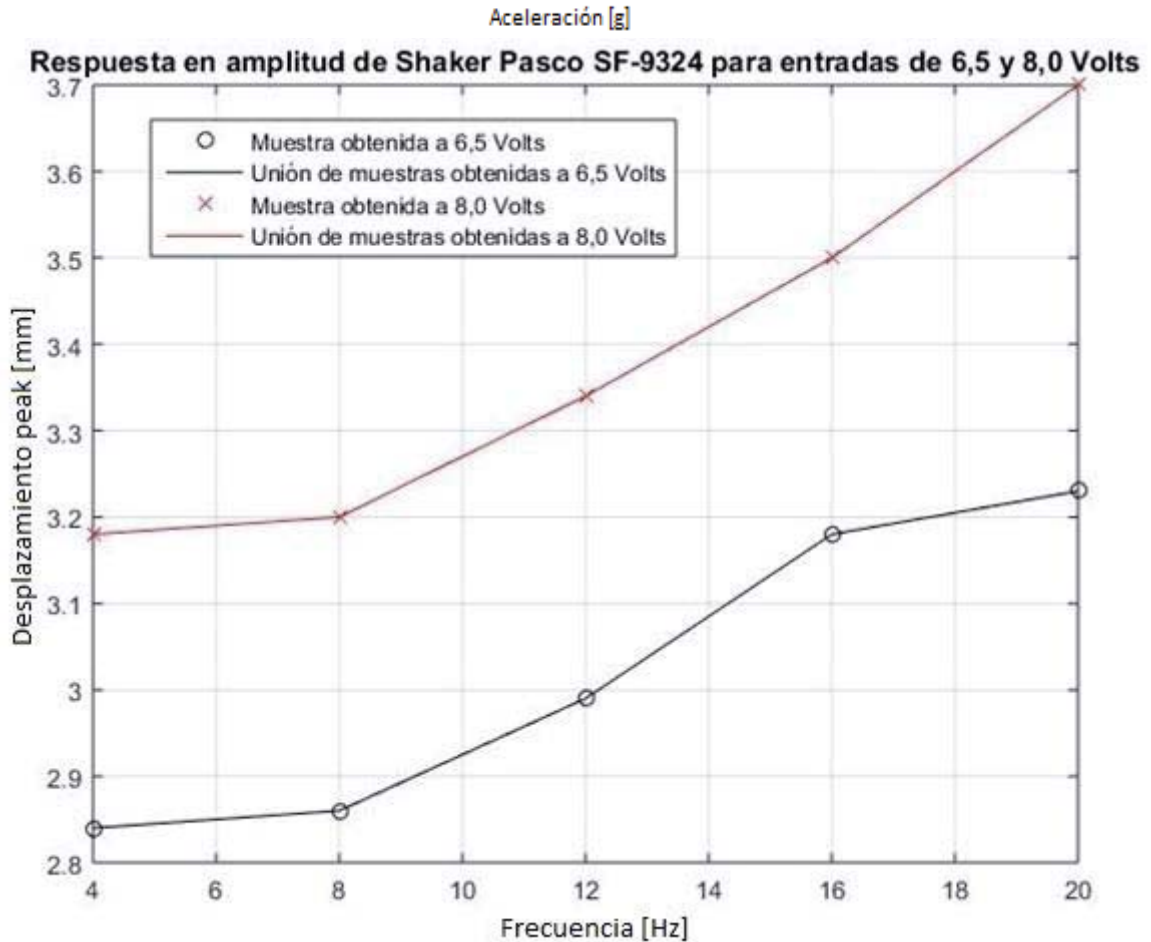


Figura 3-9: Gráfica de amplitud de desplazamiento en función de la frecuencia de shaker Pasco SF-9324 para señales de 6,5 y 8 volts. Las marcas "o" y "x" representan las muestras de amplitudes promedio.

Un sistema de este tipo podría presentar linealidad en su respuesta en función del voltaje de entrada sólo si a medida que hiciera variar la amplitud de entrada, la salida en milímetros cambiara en base a algún factor que se mantuviera a lo largo de todas las frecuencias trabajadas. En otras palabras, en la gráfica de la Figura 3-9, se presentaría linealidad si la diferencia entre los datos obtenidos para las pruebas a 8 y 6,5 volts en 4 Hz, fuese la misma diferencia que la que hay en 8, 12, 16 y 20 Hz.

Tabla 4-1: Valores de desplazamiento peak en milímetros para 6,5 y 8 volts, en cada una de las frecuencias trabajadas y diferencia entre dichos desplazamientos.

| Frec.(Hz) | Desp.8 volts(mm) | Desp.6,5 volts(mm) | Diferencia(mm) |
|-----------|------------------|--------------------|----------------|
| 4         | 3,18             | 2,84               | 0,34           |
| 8         | 3,2              | 2,86               | 0,34           |
| 12        | 3,34             | 2,99               | 0,35           |
| 16        | 3,5              | 3,18               | 0,32           |
| 20        | 3,7              | 3,23               | 0,47           |

En base a lo descrito en el párrafo anterior, la Tabla 4-1 presenta las diferencias existentes en desplazamiento peak entre las pruebas realizadas a 8 y 6,5 volts, para cada uno de los tonos puros con los que se trabajó.

De esta forma se puede corroborar que no existe linealidad en el rango de 4 a 20 Hz, sin embargo, si se decidiera analizar la sección entre 4 y 8 Hz, se puede determinar la existencia de linealidad en la respuesta en función de los voltajes indicados para ambos tonos puros.

Además gracias a estos datos sobre respuesta en desplazamiento es posible obtener aceleraciones para las pruebas realizadas a 8 volts. De esta manera, como se puede apreciar en la Figura 3-10, fue posible la representación de las curvas de aceleración para ambos valores de voltaje, y para frecuencias desde los 4 Hz.

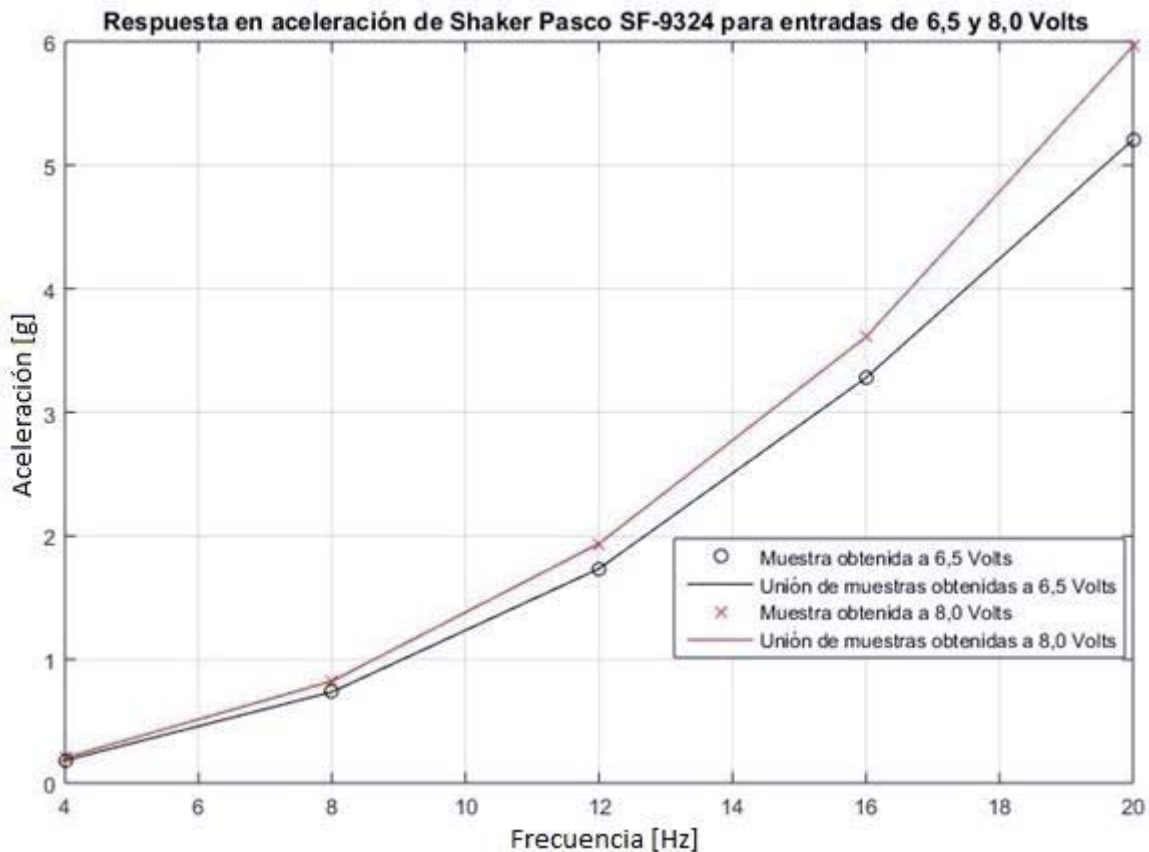


Figura 3-10: Representación gráfica de las aceleraciones obtenidas con los movimientos de las partes móviles del shaker Pasco SF-9324 bajo pruebas realizadas a 6,5 y 8 volts.

Como a 8 volts se alcanzan mayores amplitudes de desplazamiento, es natural que existan mayores aceleraciones que en las pruebas realizadas a 6,5 volts para cada uno de los valores de frecuencia con los que se trabajó.

### 3.2 Conclusiones del capítulo

Para concluir el presente capítulo es una prioridad el destacar los resultados obtenidos a modo de curvas de respuesta ante entradas sinusoidales de amplitudes altas para lo admisible por el shaker marca Pasco. Estas curvas representan el comportamiento que genera las mayores aceleraciones posibles con el excitador de vibraciones utilizado (a frecuencias de interés), para a su vez utilizar como perturbación o entrada, a los sensores de aceleración que en trabajos futuros se deberán calibrar.



## 4 Discusión y conclusiones

Considerando el trabajo realizado a lo largo de todo el proyecto presentado en el actual informe es que se redacta el presente capítulo. En este se concluye discutiendo el alcance del proyecto, mencionando los objetivos alcanzados y los puntos que deben ser considerados en futuros trabajos.

Cabe destacar que es en base al capítulo número cuatro de donde se tomarán los principales puntos que contemplarán la sección de conclusiones, ya que es él donde se presenta la mayor parte de la información obtenida luego de todo el trabajo previamente realizado.

### 4.1 Conclusiones

Para concluir con el trabajo descrito a través del presente informe es importante recalcar temas de relevancia desde el inicio de las actividades.

En primer lugar, respecto a la información entregada en el capítulo 3, al revisar los datos sobre voltaje entregado a cada shaker, es a simple vista notorio que dicha magnitud, a pesar de haber sido programada para entregarse de manera constante, se ve distorsionada por el actuar de los filtros presentes en el amplificador de señal, lo que, aunque en este caso no interrumpe mayormente el trabajo de análisis de los datos obtenidos, agrega un elemento más con respuesta no plana al sistema de calibración, y por tanto, una variable adicional a considerar para futuros trabajos en los que se busque la entrega de voltaje continuo.

Otro punto a considerar es la característica de sensibilidad que presenta cada uno de los shaker para las frecuencias en las que se realizaron los experimentos. Es cierto que ambas son bastante diferentes de manera global, sin embargo, al conocerlas se puede trabajar sin problemáticas, midiendo el voltaje de entrada al dispositivo, y multiplicándolo por el factor que para esa frecuencia entrega el gráfico de sensibilidad. Además recalcar que las pruebas realizadas, y por tanto los datos obtenidos y la información rescatada de ello, es útil para rangos de desplazamiento de orden cercano a los de las pruebas, ya que para amplitudes más altas, puede que se acentúe aún más la naturaleza de respuesta no plana en base a frecuencia y voltaje de entrada de los shaker.

Una gran ventaja del sistema conformado por Arduino (con los programas asociados a su funcionamiento anteriormente detallados), motor driver marca Pololu y shaker marca Pasco, es la buena respuesta que posee a señales de baja frecuencia, del orden de 0,5 o 1 Hz. Esto resalta al analizar los datos obtenidos en el trabajo con el amplificador de señales de la marca B&K. Es fácilmente apreciable en las gráficas de respuesta que la señal de voltaje es muy baja para dichos valores de frecuencia, incluso habiendo sido programada la señal a una amplitud fija, e igual para cada uno de los tonos puros con los que se trabajó. La razón de esta variación de amplitud en función de la frecuencia en las señales sinusoidales entregadas por el amplificador B&K para las pruebas realizadas, se encuentra en que el mismo fue diseñado para operar a rangos de oscilaciones desde los 10 hasta los 20 kHz, y de esta manera resulta natural que el dispositivo no opere de manera lineal en función de la frecuencia para señales que posean menor cantidad de oscilaciones por segundo a las inferiores a dicho ancho de banda.

Por otro lado, el motor driver marca Pololu modelo DRV8835, logró responder bastante bien ante ello a los requerimientos de amplificación de señales sinusoidales a frecuencias menores a 20 Hz, reflejado en gráficos de medición de desplazamiento del shaker Pasco, a través del método de registro de vídeos de alta velocidad y posterior procesamiento de los cuadros o imágenes obtenidas.

Pasando al procesamiento de imágenes se puede concluir en base a las curvas de desplazamiento por tonos puros, que los datos recopilados a través de este método son cercanos a lo esperable con un sensor de proximidad, lo que es corroborado por la gran similitud entre las señales creadas a través de Matlab, con la recreada a partir de los datos procesados en cada una de las muestras de la secuencia de imágenes.

Respecto al comportamiento del shaker Pasco, es claro que posee no linealidades en especial a la hora de hablar de la variación de las amplitudes de desplazamiento en un sentido respecto al otro para una misma señal sinusoidal de excitación y también al hacer variar la tensión de la misma. Por el hecho de la asimetría que posee el dispositivo durante el recorrido en un sentido respecto al otro, alcanzando amplitudes de diferentes medidas, los efectos en los acelerómetros debiesen ser de baja relevancia para los fines que se busca. Esto se debe a que el hecho no altera la frecuencia de los desplazamientos, y los cambios de aceleraciones producidos durante dichos desplazamientos serían de muy baja intensidad.

Por otro lado, al referirse a la no linealidad del excitador de vibraciones marca Pasco en función de las amplitudes de la señal de entrada, genera un problema sobre la incertidumbre respecto a la característica de salida que podría tener ante una entrada cuya amplitud sea diferente a las amplitudes probadas y documentadas en el presente informe. Es por esto que es necesario caracterizar la respuesta específica del shaker mediante los métodos aquí presentados, o con otro tipo de instrumentación, ante el tipo de entrada que se fuese a utilizar si se desea tener certeza de la respuesta que tendrá el dispositivo ante dicha señal.

Al referirse a la respuesta en amplitud del mismo shaker en función de la frecuencia, se puede afirmar que será un desafío poder trabajar en frecuencias de 0,5 y 1Hz y obtener resultados concluyentes con acelerómetros si es la calibración de los mismos lo que se busca, debido a las

bajas aceleraciones que produce el excitador de vibraciones a dichas frecuencias. Esto llevaría a la posibilidad de un alto ruido que pudiesen entregar los equipos a calibrar. Sin embargo, es posible que para frecuencias de 2 Hz en adelante, luego de filtrar frecuencias entre los datos que pudiesen entregar los sensores de aceleración, los resultados puedan ser más claros y determinantes.

Y para finalizar, cabe mencionar una vez más que las pruebas realizadas con el procesamiento de imágenes se realizaron con el shaker Pasco generando movimientos horizontales, y todos estos resultados podrían variar si se realizan las mismas pruebas de manera vertical debido a la interacción con la aceleración de gravedad.

### 4.2 Discusión y trabajos futuros

La elección de los componentes que conforman el sistema programable de excitación de sensores de aceleración a frecuencias de interés de movimientos sísmicos no fue solo limitada por los equipos a los cuales se tuviera acceso. Estos fueron elegidos también conformando un conjunto de elementos que dentro de su simpleza, lograron realizar las labores que han ayudado a cumplir con los objetivos del proyecto.

Si al excitador de vibraciones marca Pasco con el que se realizaron las pruebas definitivas a altas amplitudes se refiere, cabe la interrogante sobre si habrá sido la mejor opción por sobre el shaker de la marca B&K. Sin embargo, en base a las pruebas realizadas a amplitudes medias se puede observar que tanto el shaker Pasco como el B&K poseen características de respuesta que distan bastante de lo que vendría siendo una respuesta plana en función de las frecuencias de interés para el proyecto. Es por esto, y basado también en que el shaker B&K, para amplitudes más grandes debiese conservar una característica de respuesta similar a la que mostró en las pruebas, es que la elección del shaker Pasco no se puede considerar como una mala alternativa.

En miras del desarrollo de investigación ligada a este proyecto es que se debe seguir avanzando con las calibraciones de los sensores de aceleración dispuestos para la investigación. Es durante ese período que se utilizará todo lo abordado y alcanzado hasta ahora en este proyecto.

El trabajo de calibración de sensores podría tomar más de una vía para cumplir con el objetivo de la caracterización de cada uno. La ventaja que hoy se posee respecto a ello, es no sólo el sistema programable que los excitará, sino que también la información recopilada durante este proyecto, acerca de los procedimientos de generación hasta las características de comportamiento del excitador de vibraciones.

En el caso que se llegase a necesitar el conocimiento del tipo de respuesta que tendría el excitador de vibraciones ante una señal de entrada de características diferentes a las probadas y documentadas hasta el momento, es recomendable utilizar los métodos de caracterización a través del procesamiento de imágenes. Sin embargo, de ser otro el caso, y en base a los objetivos planteados, se recomienda utilizar señales cuyas características correspondan a las utilizadas para la confección del presente informe, es decir, señales sinusoidales de frecuencias entre los 0,5 y 20 Hz, con amplitudes de voltaje entre los 6,5 y 8 volts. Las razones se deben a que con ellas se

pueden alcanzar desplazamientos cercanos a los máximos posibles con el excitador de vibraciones (a mayor amplitud de desplazamiento para una misma frecuencia, se obtendrá mayor aceleración), y además, que este documento entrega la información acerca del comportamiento y tipo de respuesta del dispositivo ante ellas.

Para finalizar esta sección es importante mencionar los trabajos futuros que deben realizarse tomando como referencia los resultados que el desarrollo del presente proyecto ha entregado hasta ahora.

En primer lugar se deben realizar las pruebas de excitación de sensores de aceleración montados al shaker marca Pasco y realizar los análisis correspondientes a respuesta tanto de desplazamientos del shaker con dicha carga, como de los mismos acelerómetros en relación a los datos que pudiesen arrojar bajo dichas condiciones de excitación.

Si bien es cierto que se obtuvo información acerca del comportamiento del shaker Pasco ante señales sinusoidales a frecuencias de interés y amplitudes cercanas a los límites admisibles por el dispositivo (shaker Pasco), estas pruebas fueron realizadas montando el excitador de vibraciones de manera horizontal, y por tanto no se posee información sobre el comportamiento del mismo bajo las mismas condiciones, pero orientado de manera vertical. Es importante resaltar la necesidad de realizar el trabajo de caracterización del shaker marca Pasco ante señales sinusoidales con frecuencias de interés para el proyecto, y a amplitudes cercanas a las máximas admisibles por el dispositivo para poder discernir si es una mejor opción trabajar con él de manera horizontal o vertical, especialmente al momento de hablar de la simetría que existe en el desplazamiento del mismo.

Y finalmente, buscando aceleraciones más grandes con movimientos sinusoidales a frecuencias dentro del rango de las trabajadas, se debe buscar un nuevo excitador de vibraciones que pueda realizar dichos movimientos con amplitudes de desplazamiento más grandes, y de esta manera poder excitar sensores con mayor aceleración en especial para frecuencias cercanas a 1 Hz. En base a lo anterior, y como requisito para lograr mover un dispositivo de mayor potencia, se requerirá un amplificador que pueda suministrar la cantidad de energía que se necesite. Es por esto que se debe adaptar el sistema a un nuevo motor driver que permita proporcionar mayores niveles de energía como es el caso del “Pololu Dual VNH5019 Motor Driver”, el cual posee la capacidad de entregar hasta 24 amperes de corriente continua a frecuencias de modulación de ancho de pulso de 20 kHz.

# Bibliografía

- [1] C. O. J. Tintaya, «Procesamiento digital de señales sísmicas con Matlab.» Revista de Investigación de Física, 10(02)., 2007.
- [2] R. Fuentes, «RCUK-CONICYT Research Partnerships Call Summary in Spanish Shaking Tunnel Vision,» University of Leeds, Swindon, 2015.
- [3] La Nación, «[www.lanacion.cl](http://www.lanacion.cl),» 14 Noviembre 2007. [En línea]. Available: <http://www.lanacion.cl/noticias/pais/terremoto-dos-fallecidas-y-obreros-de-tunel-aislados/2007-11-14/174928.html>. [Último acceso: 15 02 2017].
- [4] J. M. Espíndola y Z. Jiménez, «Terremotos y ondas sísmicas (Vol. 1).» UNAM., 1994.
- [5] A. Roca, «Instrumentación para campo cercano y análisis de acelerogramas. Física de la Tierra, (1), 131.,» 1989.
- [6] D. Monje Centeno, «Conceptos electrónicos en la medida de la aceleración y la vibración,» UNIVERSIDAD DE SEVILLA, SEVILLA, 2010.
- [7] J. Ruan y R. T. Burton, «An electrohydraulic vibration exciter using a two-dimensional valve,» Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, 2008.
- [8] L. G. Fox, «Electrodynamic Shaker Fundamentals,» Data Physics Corporation,, California, 1997.
- [9] Pasco, «<https://www.pasco.com>,» 2017. [En línea]. Available: [https://www.pasco.com/prodCatalog/SF/SF-9324\\_mechanical-wave-driver/](https://www.pasco.com/prodCatalog/SF/SF-9324_mechanical-wave-driver/). [Último acceso: 15 02 2017].
- [10] A. A. Patiño, «Diseño y elaboración de la guía para sistemas digitales con arduino uno r3,» Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2014.

- 
- [11] Pololu, «[www.Pololu.com](http://www.Pololu.com),» 2017. [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/2511>. [Último acceso: 15 02 2017].
- [12] O. Chile, «<http://arduino.cl>,» 2017. [En línea]. Available: <http://arduino.cl/arduino-uno/>. [Último acceso: 15 02 2017].
- [13] Phantom, «<https://www.phantomhighspeed.com>,» Phantom, 2017. [En línea]. Available: <https://www.phantomhighspeed.com/Products/Miro-Midsize-Cameras/Miro-LAB-320-Camera>. [Último acceso: 15 02 2017].
- [14] Brüel & Kjaer, «<https://www.bksv.com>,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-exciters/measurement-exciters/vibration-exciter-type-4809>. [Último acceso: 15 02 2017].
- [15] National-Instruments, «[www.NI.com](http://www.NI.com),» National Instruments, Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/1865>. [Último acceso: 01 12 2016].
- [16] Omega, «[www.omega.com](http://www.omega.com),» Omega, Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://cl.omega.com/pptst/LD701.html>. [Último acceso: 01 12 2016].
- [17] X. Liang y S. A. Boppart, «Dynamic optical coherence elastography and applications. In Asia Communications and Photonics (pp. 763403-763403),» International Society for Optics and Photonics., 2009.
- [18] T. Collins, «ImageJ for microscopy,» Biotechniques, 43(1 Suppl), 25-30., 2007.

# A Apéndice

En el presente apéndice se muestran principalmente algunos gráficos cuyas curvas fueron procesadas a través de los métodos descritos en el informe, pero que por temas de compresión de la información no fueron mostrados.

## A.1 Gráficas obtenidas por procesamiento de imágenes

Los datos obtenidos a partir del procesamiento de imágenes acerca de los desplazamientos producidos por el excitador de vibraciones y capturados con la cámara de alta velocidad forman parte importante de las curvas de respuesta del dispositivo en función de la frecuencia. Esto debido a que esta última se conforma a partir de cada una de las curvas de desplazamiento obtenida para cada uno de los tonos puros con que se trabajó.

Es importante recalcar que los datos presentados a continuación fueron recopilados en base a experimentación con el excitador de vibraciones marca Pasco modelo SF-9324 montado de manera horizontal (cuyos movimientos fueron registrado en tal eje).

A continuación se presentan gráficos que formaron parte del trabajo descrito.

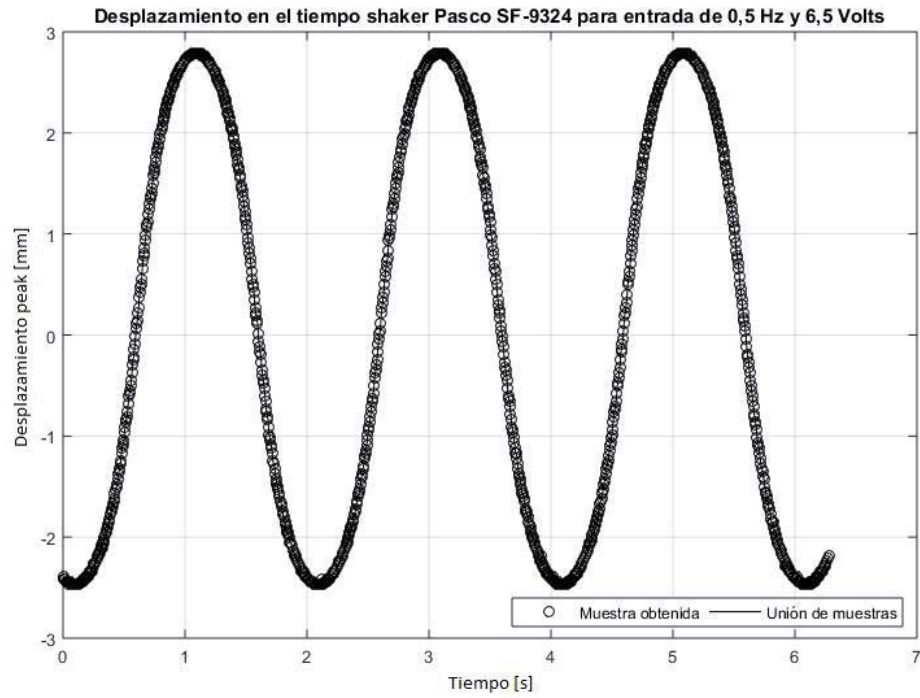


Figura A-1: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 0,5 Hz y 6,5 volts.

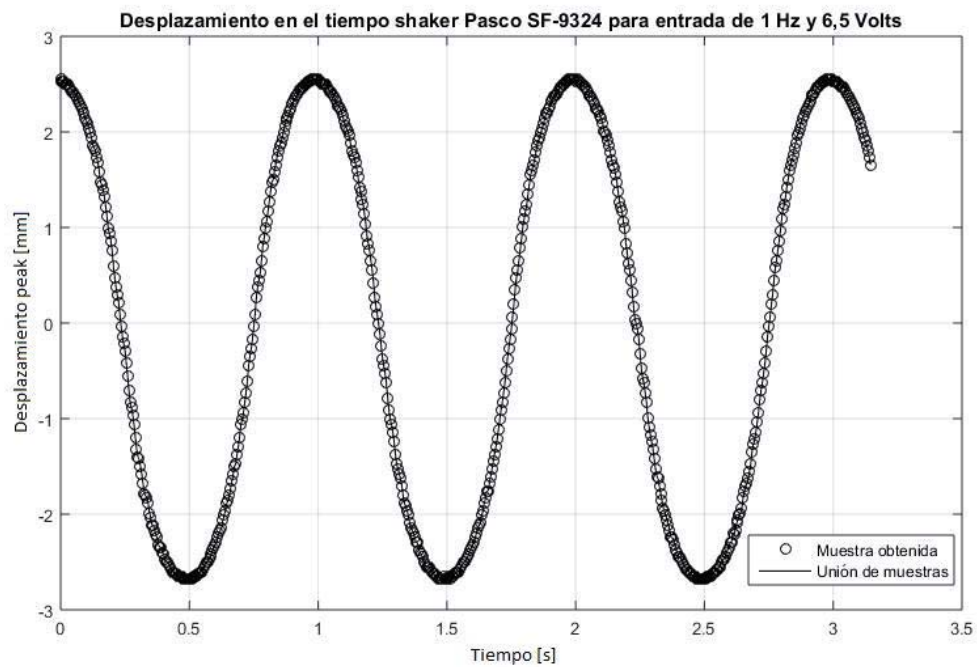


Figura A-2: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 1 Hz y 6,5 volts.



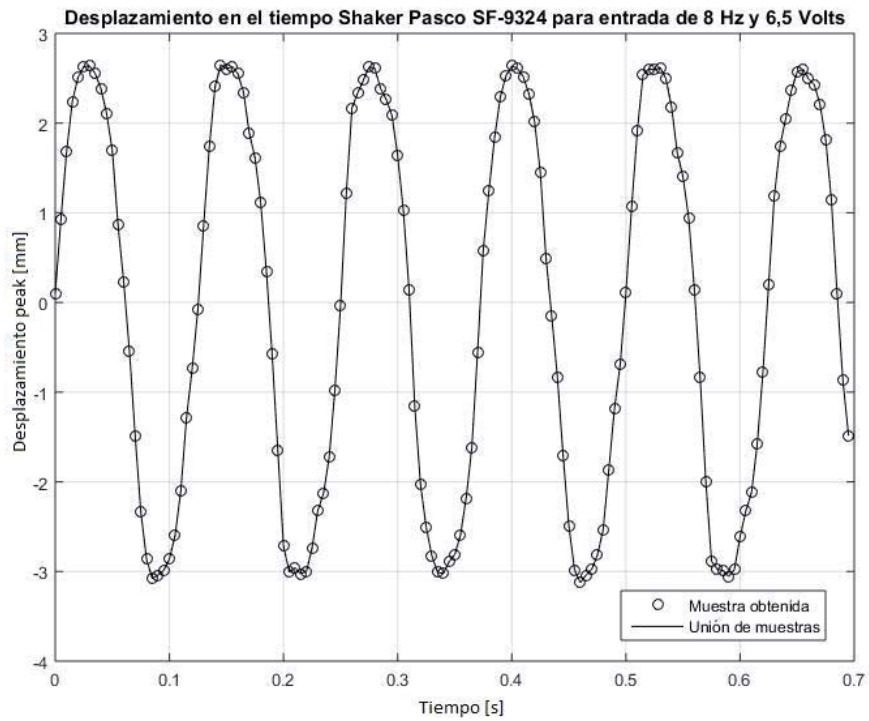


Figura A-3: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 8 Hz y 6,5 volts.

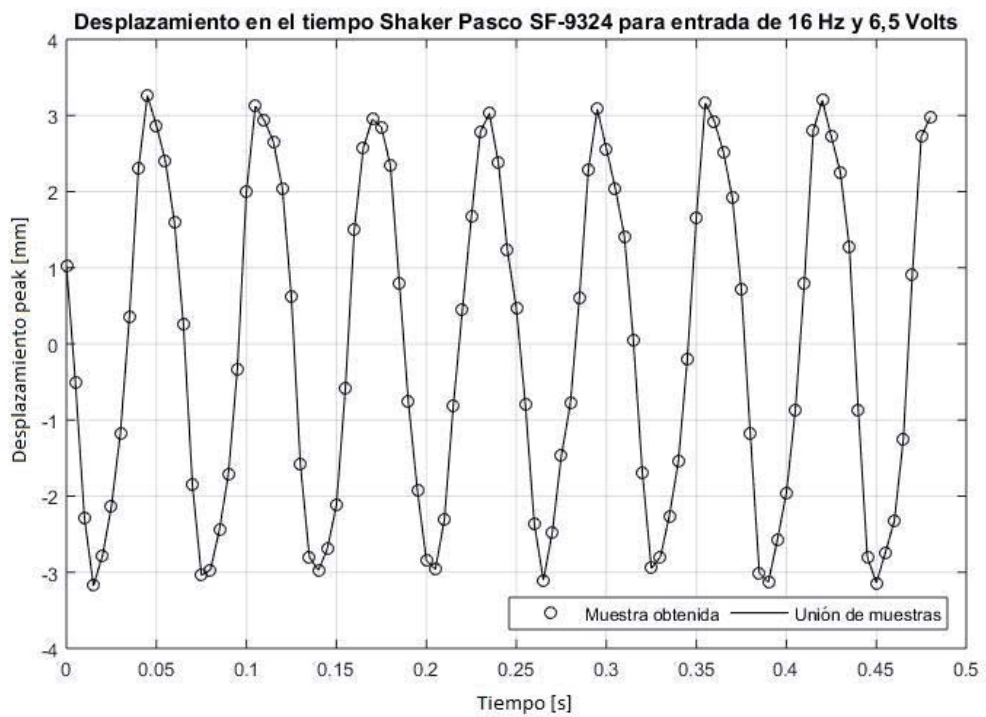


Figura A-4: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 16 Hz y 6,5 volts.

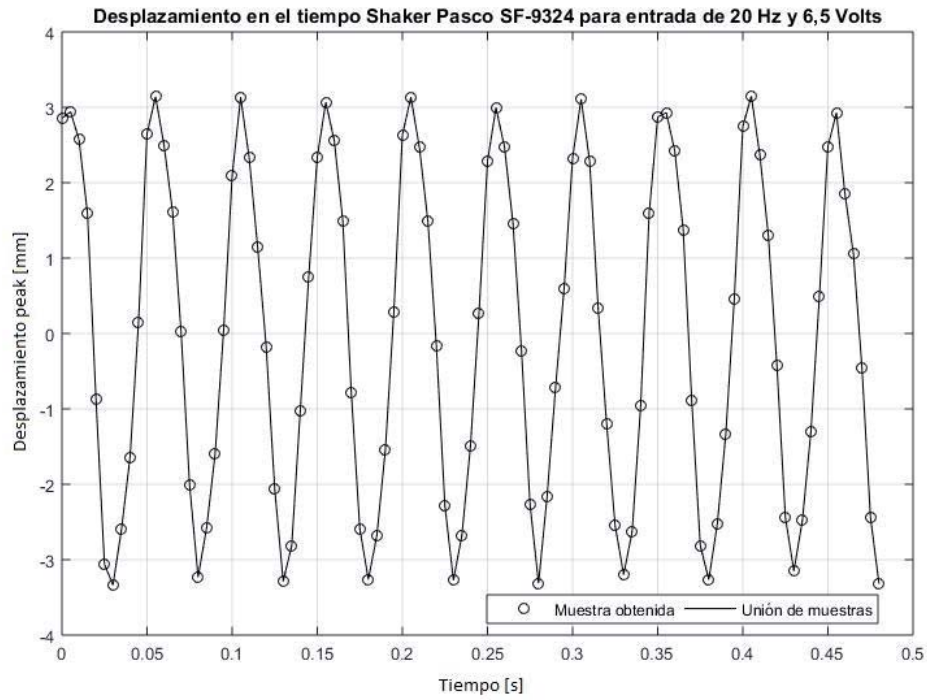


Figura A-5: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 20 Hz y 6,5 volts.

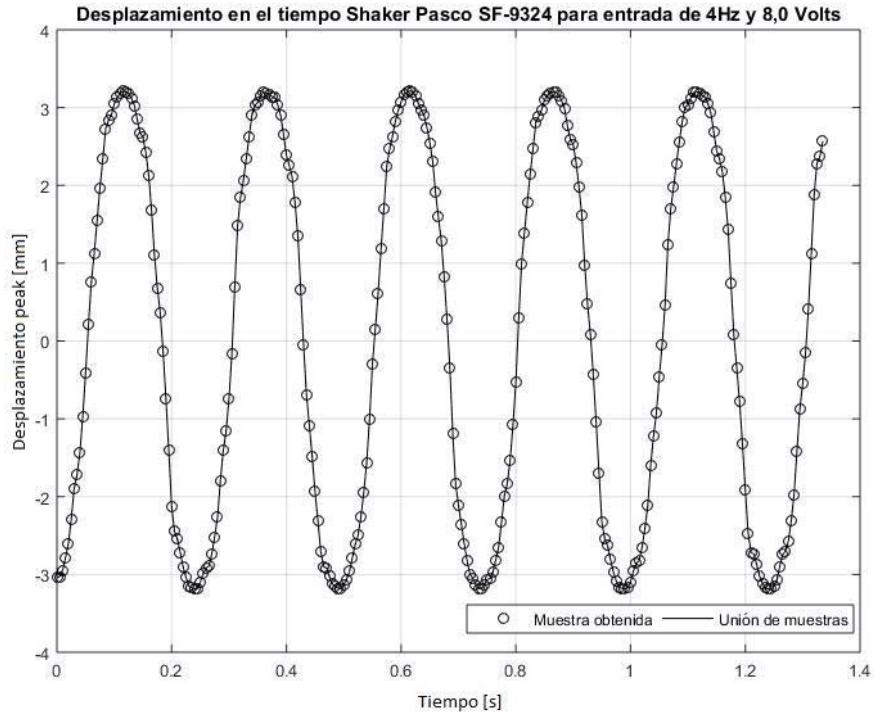


Figura A-6: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 4 Hz y 8 volts.

**Desplazamiento en el tiempo Shaker Pasco SF-9324 para entrada de 8Hz y 8,0 Volts**

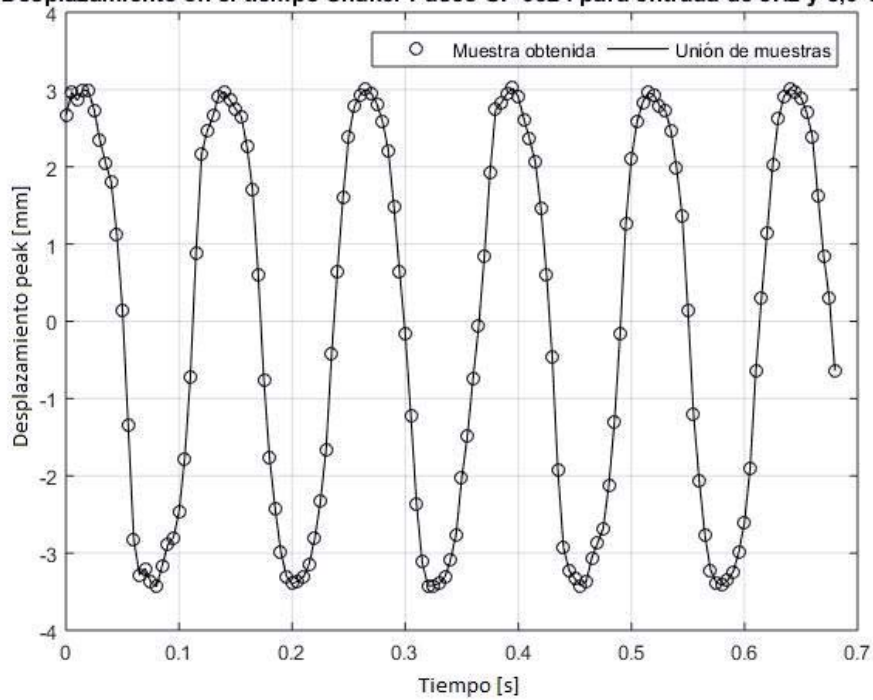


Figura A-7: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 8 Hz y 8 volts.

**Desplazamiento en el tiempo Shaker Pasco SF-9324 para entrada de 12Hz y 8,0 Volts**

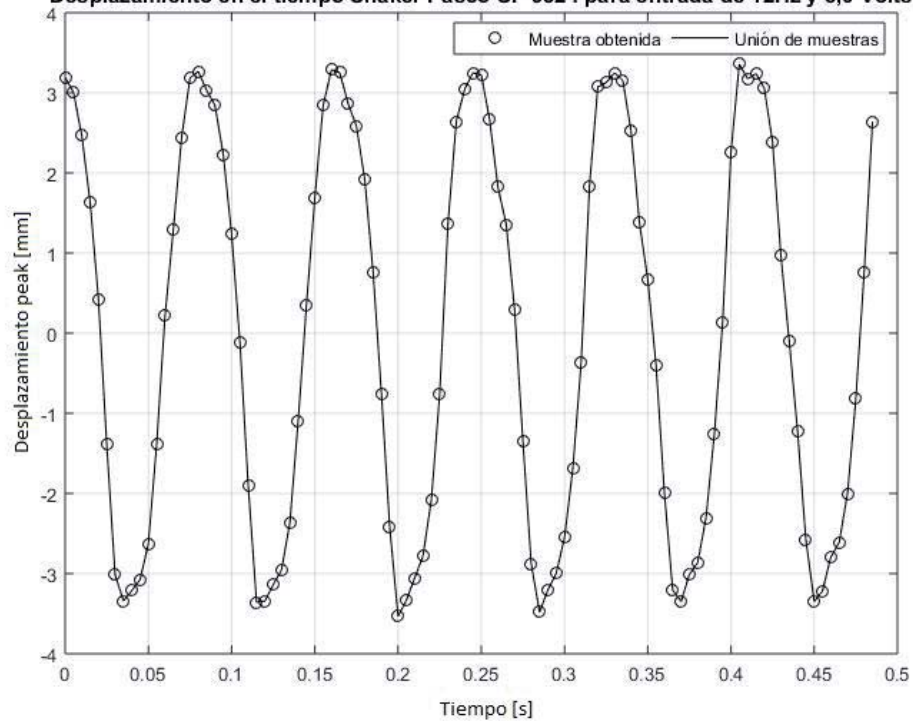


Figura A-8: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 12 Hz y 8 volts.

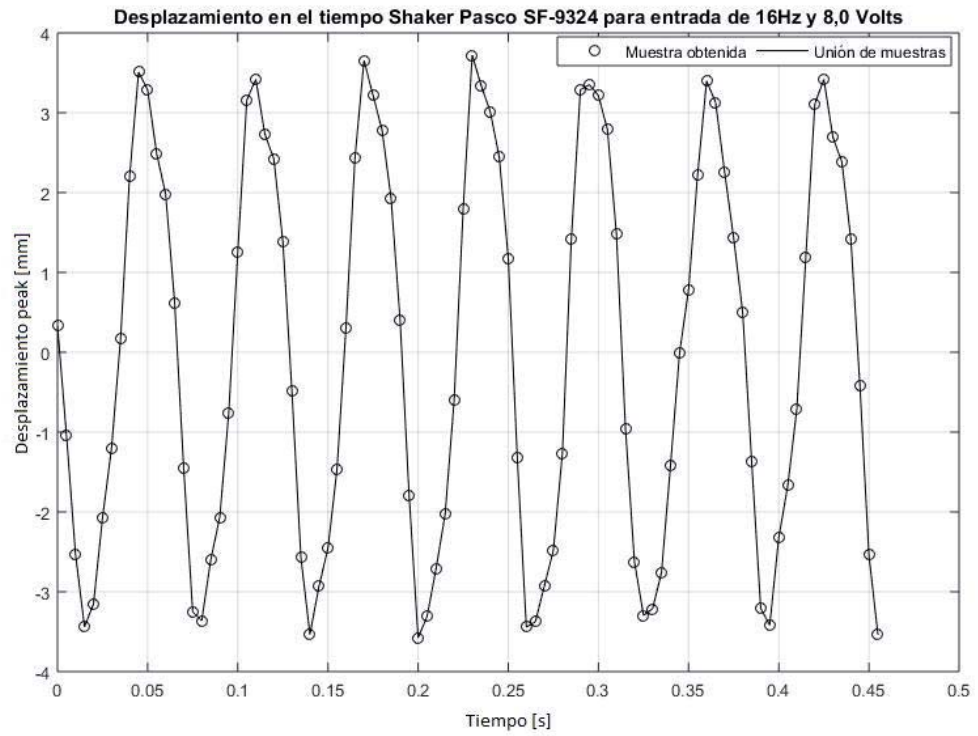


Figura A-9: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 16 Hz y 8 volts.

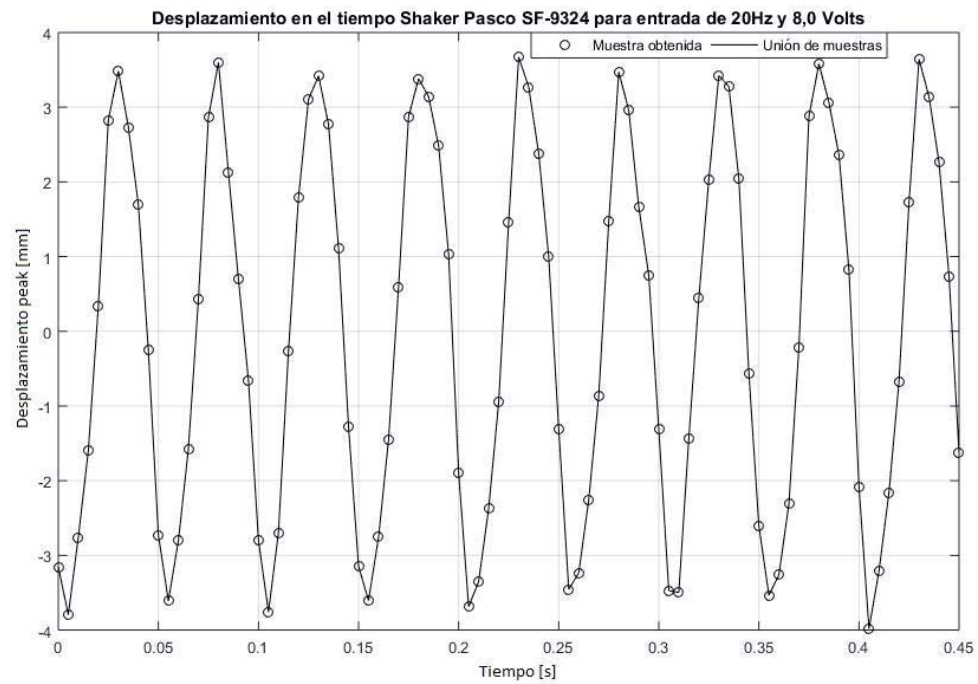


Figura A-10: Desplazamiento de shaker Pasco para entrada de 20 Hz y 8 volts.