



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**MONTAJE, IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL VIBRADOR APS 400  
PARA REALIZAR ESTUDIOS DINÁMICOS DE ESTRUCTURAS Y SUELOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DANIEL IGNACIO BERROETA GONZÁLEZ**

**PROFESOR GUÍA:  
FABIAN ROJAS BARRALES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CESAR PASTEN PUCHI  
PEDRO SOTO MUÑOZ**

**SANTIAGO DE CHILE  
2016**

---

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: DANIEL BERROETA  
FECHA: 11/05/2016  
PROF. GUÍA: Sr. FABIÁN ROJAS B.

“MONTAJE, IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL VIBRADOR APS 400  
PARA ESTUDIOS DINÁMICOS DE ESTRUCTURAS Y SUELOS”

El presente estudio comprende desde la conexión hasta la puesta en marcha del sistema de vibración uni-direccional APS 400, para facilitar su uso; describe las instrucciones de armado y operación, permitiendo la reproducción de señales periódicas y aleatorias, tanto en forma horizontal como vertical. Se incorporan también estudios que validan su funcionamiento, en base a ensayos experimentales que permiten caracterizar los límites operacionales físicos del equipo.

Para que el vibrador reproduzca señales de forma coherente, se analizaron cerca de 300 registros de señales sinusoidales y el registro de Concepción (2010) reducido a un nivel tolerable por el equipo. Su desplazamiento generado fue analizado en el espacio del tiempo y mediante espectros de respuesta. Los resultados indican que la respuesta del equipo depende del ancho de banda del registro entrante, en particular, amplifica en forma distinta cada frecuencia de la señal de entrada, por lo que es incapaz de reproducir de forma exacta un registro aleatorio con un alto contenido de frecuencias.

Otro eje importante del vibrador es su contribución como fuente activa en un ensayo de caracterización sísmica del suelo, para lo cual se analizaron registros de ondas superficiales generadas por la oscilación periódica del equipo a distintas frecuencias. Los resultados revelan que el vibrador posee energía insuficiente para visualizar información en frecuencias bajas.

En definitiva el vibrador simula ondas de carácter periódico de forma coherente, por lo tanto su uso se limita a encontrar formas modales y períodos fundamentales de estructuras a escala reducida, quedando como opcional su uso en registros aleatorios o sintéticos, pero teniendo en consideración que la señal de entrada será amplificada en distinta magnitud para cada una de sus frecuencias. Con respecto a su uso en suelos se restringe a estudiar áreas pequeñas o singularidades y puede utilizarse en la obtención y cuantificación del amortiguamiento del suelo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermanos que me han acompañado durante toda mi etapa universitaria, a mis abuelos, tíos y primos, a Carolina, mi polola, por su apoyo permanente de verdad gracias.

A todos los que contribuyeron a la realización de esta memoria: Profesores, por su excelente disposición durante todo este tiempo, Omar y Mario por su ayuda permanente en el laboratorio, se agradece enormemente.

A mis compañeros de generación, de selección y del club que fueron parte del trayecto de mi vida universitaria, grandes amistades, momentos inolvidables que seguirán presentes, gracias totales.

# TABLA DE CONTENIDO

1.0	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	MOTIVACIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS .....	1
1.3	METODOLOGÍA:.....	2
2.0	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1	EQUIPO PRINCIPAL .....	4
2.2	EQUIPOS PERIFÉRICOS .....	8
2.3	VARIABLES OPERACIONALES .....	11
3.0	MANUAL DE USO .....	19
4.0	APLICACIÓN 1: ENSAYO CON ONDAS PERIÓDICAS CON EL VIBRADOR EN POSICIÓN HORIZONTAL.....	28
4.1	METODOLOGÍA.....	28
4.2	RESULTADOS.....	29
5.0	APLICACIÓN 2: REPRODUCCIÓN DE REGISTRO SÍSMICO DEL VIBRADOR EN POSICIÓN HORIZONTAL.....	38
5.1	METODOLOGÍA.....	38
5.2	RESULTADOS.....	39
6.0	APLICACIÓN 3: REPRODUCCIÓN DE REGISTRO SÍSMICO EN MARCO ESTRUCTURAL SOBRE EL VIBRADOR EN POSICIÓN HORIZONTAL.....	42
6.1	METODOLOGÍA.....	42
6.2	RESULTADOS.....	42
7.0	APLICACIÓN 4: CARACTERIZACIÓN DEL SUELO MEDIANTE MASW USANDO EL VIBRADOR EN POSICIÓN VERTICAL.....	43
7.1	METODOLOGÍA.....	43
7.2	RESULTADOS.....	45
8.0	CONCLUSIONES.....	49
	BIBLIOGRAFÍAS.....	51
	ANEXO A: ESPECIFICACIONES DE ACELERÓMETRO UTILIZADO:.....	53

## **1.0 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Motivación**

La constante actividad sísmica en Chile, ha obligado a perfeccionar el diseño de estructuras de hormigón armado, acero y albañilería, entre otras. Debido a estas crecientes necesidades el ingeniero estructural egresado debe manejar los conocimientos tanto del diseño como de la teoría dinámica. En pos de complementar el aprendizaje, es necesario contar con elemento vibrador que permita realizar ensayos dinámicos y de esta forma enriquecer la docencia.

El vibrador APS 400 es un sistema de movimiento de 1 grado de libertad, con orientación horizontal o vertical. Opera por el principio de inducción magnética y fue creada por la compañía APSDYNAMICS.

El tema estudiado en esta memoria busca implementar el vibrador para realizar ensayos dinámicos en especímenes de sistemas estructurales en escala reducida, tales como sistemas de marcos y enrejados con varios grados de libertad, entre otros, con el fin de estudiar formas modales, períodos naturales y respuesta sísmica. También participar en la caracterización de suelo, generando ondas superficiales.

El desafío es lograr que el vibrador sea capaz de reproducir señales aleatorias, como registros sísmicos, de forma correcta para complementar el aprendizaje teórico de ingeniería con aplicaciones prácticas de carácter dinámico y que permita realizar ensayos ya sean de carácter estructural o geotécnico, necesarios en memorias, tesis e investigaciones.

### **1.2 Objetivos**

#### **Objetivo General:**

El objetivo general es implementar el vibrador APS 400, de modo que permita la reproducción de señales aleatorias y periódicas, en un amplio rango de frecuencias.

#### **Objetivos Específicos:**

- Implementar una plataforma computacional que permita la reproducción de movimiento periódico y aleatorio.

- Desarrollar la metodología y el alcance de trabajos experimentales a fin de registrar el correcto funcionamiento del vibrador APS 400.
- Calibrar el movimiento del vibrador, luego ensayar en especímenes de estructuras a escala y en caracterización de suelo.

### **1.3 Metodología:**

#### **Conexión y revisión del Vibrador**

Consiste en montar las partes del sistema APS 400, verificando los elementos de conexión son suficientes para la puesta en marcha, finalmente determinar procedimientos de encendido, operación y apagado.

#### **Programación**

En esta etapa se utiliza el lenguaje de programación LabVIEW 7.0 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), para desarrollar una interfaz computacional que permita la entrada de señales aleatorias y su reproducción en el vibrador APS 400.

#### **Ensayos Experimentales**

Con el fin de caracterizar el movimiento, es necesario realizar pruebas, reproduciendo señales tanto aleatorias, como periódicas, variando el nivel de amplificación, entregando distintos voltajes de entrada y comparándolos analíticamente con las mediciones de salida al término de cada ensayo.

#### **Puesta en marcha**

Finalmente el vibrador debe ser probado usando sensores para chequear que la entrada y salida de señales sean correctas, además, probar su uso con probetas estructurales y en generación de ondas para caracterización de suelo en terreno.

El informe se divide en ocho capítulos, además de la introducción, que son detallados a continuación.

En el Capítulo 2 se presenta una descripción de los equipos principales y periféricos que componen al sistema APS 400, describe la adquisición generación de datos, el manejo de errores y calibración de datos experimentales.

En el Capítulo 3 se describen los procedimientos de encendido, apagado y armado del vibrador APS 400. También instruye como modificar un registro sísmico para reproducirlo en el equipo.

En el Capítulo 4 se verifica el funcionamiento del vibrador reproduciendo series de ondas sinusoidales, también se revisa la repetitividad del equipo y se varían las variables operacionales logrando determinar relaciones entre ellas que caracterizan al sistema APS.

En el Capítulo 5 el vibrador, en forma horizontal, es sometido al registro de Concepción (2010), modificado de forma que pueda reproducido dentro de sus parámetros admisibles. Se compara la respuesta del equipo frente al registro, con el fin de determinar si es capaz de reproducir señales con un amplio ancho de banda.

En el Capítulo 6 se somete a una probeta de un marco estructural de cuatro pisos, sobre el vibrador horizontal, al registro de Concepción (2010) modificado, y se analiza la respuesta de cada piso frente al sismo.

En el capítulo 7 se estudia la capacidad del vibrador, en su forma vertical, de generar ondas superficiales bajo el suelo que puedan ser detectadas por un arreglo lineal de sensores, para complementar estudios de caracterización sísmica del suelo.

Finalmente en el capítulo 8 se establecen las conclusiones de las pruebas experimentales del vibrador APS 400, como también recomendaciones de uso. También son discutidos los objetivos planteados y se proponen trabajos futuros para complementar la utilidad del equipo

## 2.0 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Equipo Principal

Los equipos principales que componen al vibrador APS 400 son mostrados en las Figuras 2.1, 2.2 y 2.3:



Figura 2.1: Vibrador (APS Dynamics 2013)



Figura 2.2: Amplificador de Señales (APS Dynamics 2013).



Figura 2.3: Controlador de Posición (SPEKTRA GmbH 2011)

#### Vibrador ElectroSeis APS 400:

El vibrador APS 400 ELECTRO-SEIS® es fundamentalmente un generador de fuerzas, cuyo principio básico de funcionamiento es la conducción de corriente en un conductor eléctrico, localizado perpendicularmente a un campo magnético (APS Dynamics 2013). En su posición horizontal (Figura 2.4), junto con su tabla auxiliar, permite empotrar modelos a escala de estructuras y determinar el período fundamental de oscilación, generando ondas sinusoidales a distinta frecuencia hasta visualizar el primer modo de oscilación correspondiente. Y en su posición vertical permite generar perturbaciones sobre el suelo.



Figura 2.4: Vibrador APS 400 horizontal como mesa vibratoria, con tabla auxiliar incorporada.

Las especificaciones del vibrador APS 400 se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Especificaciones del vibrador (National Instruments 2013).

Parámetro	Descripción
Rango frecuencias	0 a 200 [Hz]
Alcance máximo	158 mm <i>pk-pk</i>
Orificio Empotramiento	6 [mm] (diámetro)
Corriente nominal	15,2 [A]
Peso Tabla Auxiliar	5,1 [kg]
Peso Total	73 [kg]

### Controlador de Posición Cero (Zero position Controller, APS 0109):

Permite controlar el punto de origen del movimiento y centrar el vibrador (Figura 2.6), tanto para su funcionamiento horizontal, como vertical. También señala la posición del vibrador respecto a su punto de origen en todo instante de tiempo, el equipo se muestra en la Figura 2.5. Las especificaciones del Controlador de posición se muestran en la Tabla 2.2:



Figura 2.5: Controlador de posición.

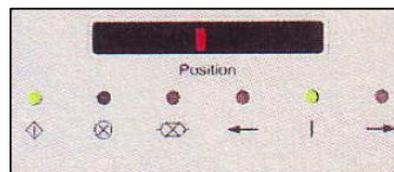


Figura 2.6: Posición de origen centrada.

Tabla 2.2: Especificaciones del Controlador (SPEKTRA GMBH 2011).

Parámetro	Descripción
Voltaje de Operación	115/230 VAC
Voltaje máximo de entrada	$\pm 15$ V
Ancho de Banda	1 Hz a 25kHz
Ajuste de posición cero	$\pm 10\%$ del máximo desplazamiento

### **Amplificador (Amplifier, APS 145):**

Controla y asegura tanto el voltaje, como la corriente con los que funciona el vibrador. Es capaz de amplificar la señal entrante y en caso de que se sobrepase la corriente estipulada, detiene el funcionamiento del sistema, el equipo se muestra en la Figura 2.7.



*Figura 2.7: Amplificador*

Las especificaciones del Amplificador se muestran en la Tabla 2.3:

*Tabla 2.3: Especificaciones del Amplificador (APS Dynamics 2013).*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Ganancia:	-
• Modo Voltaje	18 V/V $\pm$ 2dB
• Modo Corriente	7,5 A/V $\pm$ 2dB
Visualización del Monitor:	-
• Modo Voltaje	0,1 V/V $\pm$ 3%, 5Hz... 15kHz
• Modo Corriente	0,1 V/A $\pm$ 3%, 5Hz... 15kHz
Peso	22 kg

### **Conexión entre Componentes del sistema APS:**

Los componentes conectados en la Figura 2.8 son: Amplificador de señales, vibrador y Controlador de Posición, sin embargo, la Figura 2.9 incluye un sistema de adquisición de datos en una computadora portátil que guarda las señales de sensores de desplazamiento y acelerómetro, por lo que para la caracterización del sistema es necesaria la incorporación de estos elementos para registrar la respuesta frente a señales entrantes.

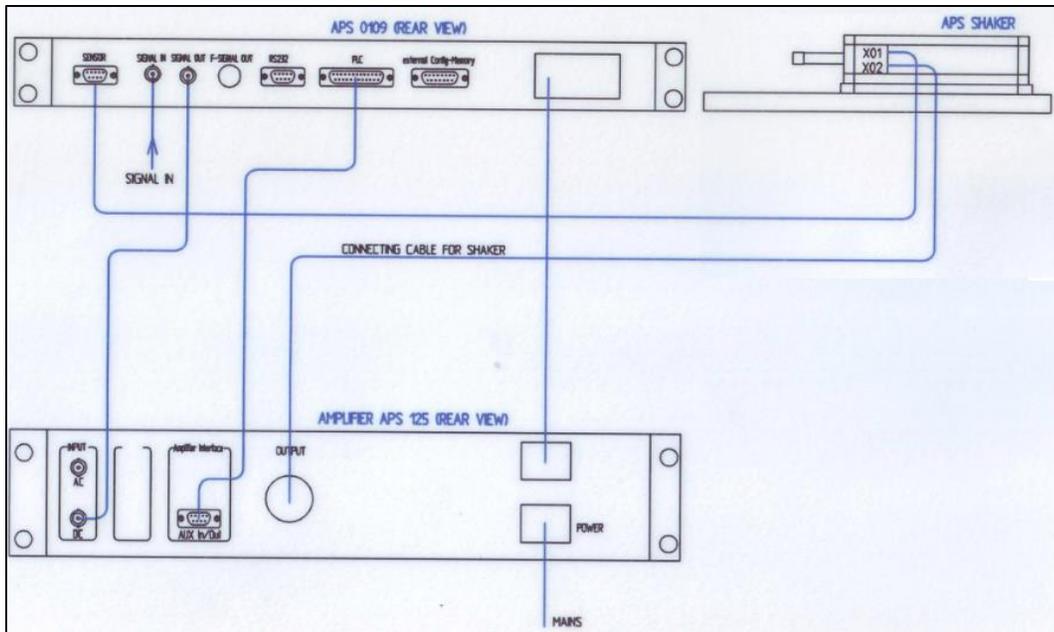


Figura 2.8: Diagrama de Conexión (SPEKTRA 2010).

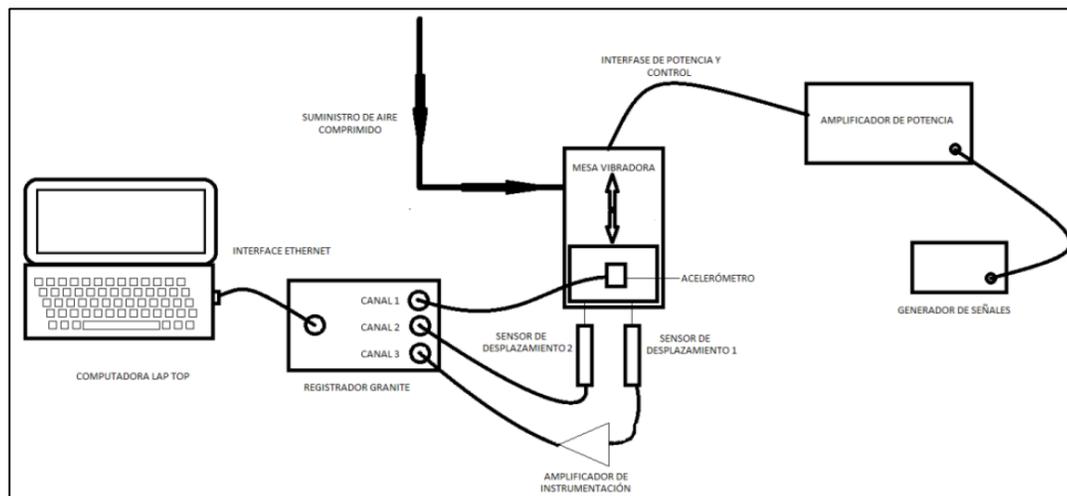


Figura 2.9: Diagrama de interconexión (Torres, Ramírez et al. 2014), incluyendo LAP TOP y sensores.

## 2.2 Equipos Periféricos

### Generador de Señales Periódicas y Osciloscopio:

El Generador de Señales Periódicas y el Osciloscopio permiten el envío de señales al vibrador APS 400 y la lectura en tiempo real del voltaje entregado, ambos son mostrados en las Figuras 2.10 y 2.11:



Figura 2.10: Generador de señales periódicas (Bench-top Instrument Manual)

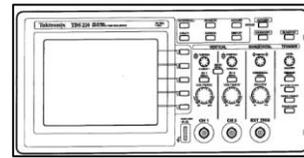


Figura 2.11: Osciloscopio (Tektronix User's Manual)

### Tarjeta de Adquisición CB-68LP (1998)

La tarjeta CB-68LP es un accesorio de terminación de bajo costo con 68 terminales de tornillo para una fácil conexión de señales E/S (entrada o salida) en campo a productos de adquisición de datos de 68-pin (National Instruments 2016). Está instalada en el computador N°5 del Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados y conectada por un cable conductor SH68-68-D1, terminado con dos conectores serie tipo D de 68-pin (DAQ Accessories Selection Guide NI, 2014). Los accesorios son mostrados en las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14:

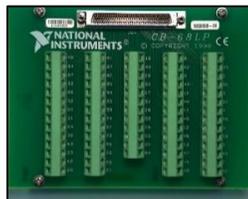


Figura 2.12: Tarjeta de Adquisición CB-68LP



Figura 2.14: Cable conductor SH68-68-D1.



Figura 2.13: Computador del Lab. N°5.

Las especificaciones de la tarjeta de adquisición se muestran en la Tabla 2.4:

*Tabla 2.4: Especificaciones de la tarjeta de Adquisición (NI CB-68LP User Guide, 2013).*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Conector E/S	Un conector de 68-pin SCSI
Terminales de tornillo	68-pin, todas las señales E/S
Dimensiones	14,35 [cm] x 10,74 [cm]
Peso	155 [gr]

### **Sensor de desplazamiento:**

Corresponde a un sensor ultrasónico serie S18U, con salida análoga. Emite múltiples pulsos de ondas, que viaja a través del aire a la velocidad del sonido. Una porción de esta energía es reflejada del objetivo y vuelve al sensor. Este mide el tiempo total requerido para que la onda alcance el objetivo y regrese al sensor (Banner 2013).

Para realizar mediciones con el ultrasónico en un mismo plano horizontal, debe ser fijado con una base magnética, con tal de mantener una misma dirección de lectura, evitando errores en la medición. Se encuentra calibrado, por lo tanto es conocida la relación entre voltaje y centímetro medido, como se muestra en la (Ecuación 2.1):

$$\text{Desplazamiento [cm]} = \text{Voltaje[V]} * 5,4358 + 2,8461 \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Las especificaciones del sensor de desplazamiento se muestran en la Tabla 2.5:

*Tabla 2.5: Especificaciones del Ultrasónico (Banner 2013).*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Rango de detección	30 300 [mm]
Voltaje de alimentación	10 30 [V] (dc)
Configuración de salida	0 a 10 [V] (dc)
Tiempo de respuesta	30 ms: Con Cable entre 0-2V dc
Resolución	2.5 ms: ±1 mm
	30 ms: ±0,5 mm



*Figura 2.15: Sensor de desplazamiento o Ultrasónico (Banner 2013).*

## 6) Acelerómetro

Permite medir aceleraciones en una dirección, en esta oportunidad interesan las horizontales. El sensor, con el fin de obtener un buen registro de datos, está apernado en una escuadra adaptada y ésta a su vez, a la tabla auxiliar. Especificaciones en Anexo A.



*Figura 2.16: Acelerómetro Serie 17322, ubicado en el laboratorio MECESUP.*

Pueden generarse interferencias en el acelerómetro durante la captación de la señal de salida, ya sea por generación de ruidos producto del movimiento del vibrador o externos, causando que el sensor responda como la superposición de la señal física medida con la interferencia (Webster, J.G. 1998).

## 2.3 Variables Operacionales

Los elementos que controlan el equipo son imprescindibles para conocer el comportamiento del vibrador. Estas variables definen los ensayos experimentales con el fin de adaptar el equipo a los objetivos propuestos.

### Nivel de Ganancia:

El nivel de ganancia es la amplificación sobre la señal de entrada, que varía desde cero (Reset) hasta el punto de calibración, abreviado Cal., tal como se muestra en la Figura 2.17. Cabe destacar que los niveles al no estar cuantificados de forma explícita en el amplificador, son escogidos tres puntos (1, 2 y 3) para el desarrollo de distintos ensayos.

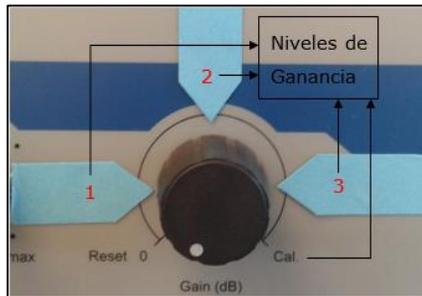


Figura 2.17: Niveles de ganancia del amplificador

### Relación Voltaje-Frecuencia-Desplazamiento:

Para caracterizar el comportamiento del vibrador APS 400, es necesario reproducir en él, un barrido de frecuencia con ondas sinusoidales a distinta amplitud para relacionarlas con el desplazamiento que genera.

### Rango del filtrado de resultados:

Dado que se trabaja con acelerómetros y ultrasónicos, que son, afectados por ruidos ambientales, se hace necesario fijar un rango de frecuencia para filtrar las mediciones provenientes de ellos, para lo cual se realizan ensayos repetitivos de las mismas señales, ya sean aleatorias o periódicas y se analiza el cambio en la respuesta ante distintos rangos de frecuencia. Finalmente el rango es el que deja las mediciones de forma más coherente al uso que se le dan.

## Masas sobre el vibrador en forma horizontal:

Si bien el vibrador, en su posición horizontal, soporta una masa máxima de 23 [kg]. Es importante conocer cuánto cambia su respuesta, o bien si mantiene constante su operatividad.

## Modo de operación:

Existen dos modos de operar el vibrador APS 400; corresponde analizar ambos para ver el funcionamiento completo del sistema, tal como se muestra en la Figura 2.18:

- 1) Modo Voltaje (*Voltage Mode*): Provee voltaje constante, independiente de cambios en el objeto de prueba en el excitador. Entrega la mejor onda de aceleración y es, entonces, preferible entre ensayos de vibración (APS Dynamics 2013).
- 2) Modo Corriente (*Current Mode*): Provee características de corriente constante, dejando la fuerza generada independiente de cambios en el objeto de prueba. Es el modo más preferido para las aplicaciones de ensayos modales (APS Dynamics 2013).

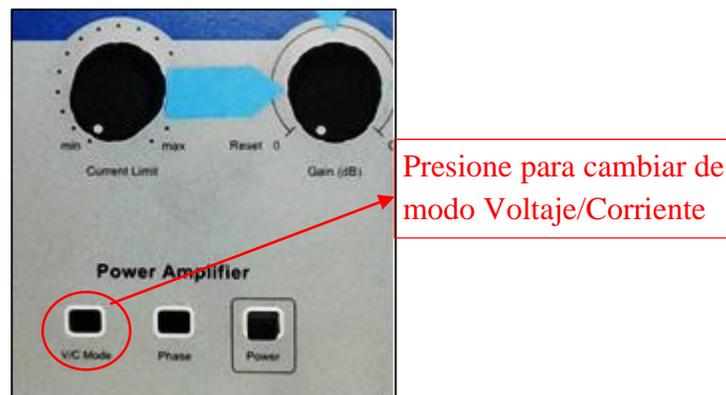


Figura 2.18: Cambio de modo voltaje/corriente en el amplificador.

## Sistema de Adquisición de datos:

En las últimas décadas, la tecnología ha desarrollado sistemas complejos de adquisición de datos, compuestos por subsistemas que interactúan coordinadamente, implementados tanto en software como en hardware (National Instruments Corporation, 2000). Un sistema de adquisición de datos está conformado básicamente por tres subsistemas:

- Subsistema de adquisición de datos
- Subsistema de cómputo
- Subsistema de interfaz

La implementación del vibrador, incluye un sistema de adquisición de datos: sensores, equipos y circuitos, para adecuación de señales y transmisión de datos hacia el sistema de cómputo. Luego el software elegido que controla el desarrollo del sistema de adquisición de datos y control debe ser versátil, para adaptarse a diversas arquitecturas de computadores a instrumentos y dispositivos diferentes de adquisición de datos (Vega 2001). El software seleccionado es LabVIEW, porque da la flexibilidad y rendimiento a un lenguaje de programación considerado por muchos usuarios como la vía más rápida para programar sistemas de instrumentación y adquisición de datos (National Instruments Corporation, 1997). Para su instalación se debe corroborar previamente que el hardware sea compatible con el programa.

La computadora emite señales aleatorias como registros de sismos y a su vez recibe la señal de salida adquirida por los acelerómetros, creando un loop cerrado. En el caso que el sensor no provea inherentemente una señal de salida digital, entonces la salida analógica del sensor debe ser convertida por un convertidor analógico/digital (ADC), como se muestra en la Figura 2.19, de tal forma que pueda interactuar con el equipo de adquisición de datos y si la señal de salida es pequeña se requiere de un amplificador (Webster, J.G. 1998):

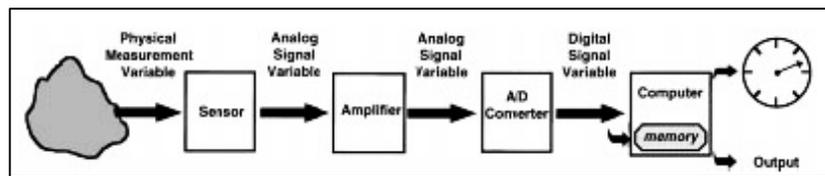


Figura 2.19: Modelo de Instrumentación con amplificador, convertidor de señal (ADC) y computador como salida (Webster, J.G. 1998).

LabVIEW es un programa que permite crear instrumentos virtuales (VIs), poseen un panel frontal y un diagrama de bloque. En él, las barras de herramientas contienen las opciones para crear y modificar los VI (NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 1997). Su uso se extiende a la generación y adquisición de datos en ensayos experimentales, donde se requieren tomar muestras de algún dato físico y registrarlo en un archivo compatible con el hardware en uso. En las Figuras 2.20 y 2.21 se presentan, como ejemplo, un panel frontal y su diagrama de bloques en LabVIEW.

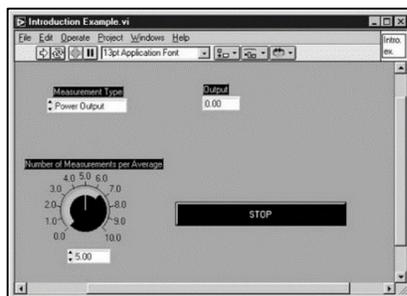


Figura 2.20: Código gráfico para el sistema de ingreso de datos (Bitter et. al. 2001).

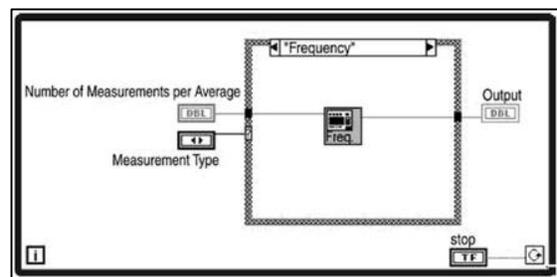


Figura 2.21: Panel frontal del sistema de datos (Bitter et. al. 2001).

El uso del programa en esta memoria, se divide en dos partes: Generación de señales y adquisición de datos, la primera permite a la tarjeta de adquisición enviar voltajes que generan el movimiento en el vibrador, en cambio, la segunda lee y guarda los datos provenientes de los sensores, en un archivo de texto.

### 1) Generación de señales:

Un ejemplo de la generación de señales, utilizando el diagrama de bloques de LabVIEW, se encuentra en la Figura 2.22, en donde los datos iniciales son guardados indexando la dirección de un archivo de texto contenedor de una señal, luego son multiplicados por un factor de reducción y graficado en tiempo real en el panel frontal mediante “*Waveform Graph*”. Luego la configuración de la emisión de la señal es ingresada de forma manual, con parámetros como: el número del canal de emisión, tamaño del buffer, tasa de envío, parámetros que durante los ensayos suelen permanecer fijos, después la señal es enviada a desde de la tarjeta de adquisición por el canal indicado hasta el equipo que reproduce el registro, en este caso, si el programa es finalizado manualmente durante el envío, seguirá la reproducción hasta terminar con todo el contenido.

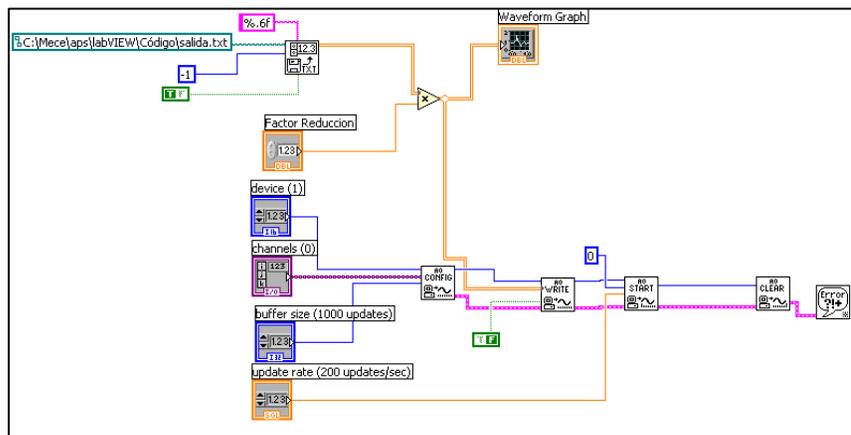


Figura 2.22: Código que genera señales desde un archivo de texto.

El código de la Figura 2.22 sigue el siguiente procedimiento:

1. Lee un archivo de texto que posea un arreglo en 1D, de una señal aleatoria. En caso de un registro sísmico, debe haber sido reducido previamente, según corresponda, de tal forma que los desplazamientos generados sean admisibles.
2. Configura el buffer o espacio de almacenamiento temporal de la información, los canales a utilizar, el dispositivo y la tasa de generación de datos.
3. Escribe los datos del registro leído en el buffer.

4. Empieza con la generación de señales, con los datos ya almacenados.
5. Termina con la generación con el VI Clear AO.

Otra aplicación útil, es la reproducción continua de señales sinusoidales, es así como la Figura 2.23 permite a la tarjeta de adquisición, emitir una señal sinusoidal y almacenarla en un archivo de texto.

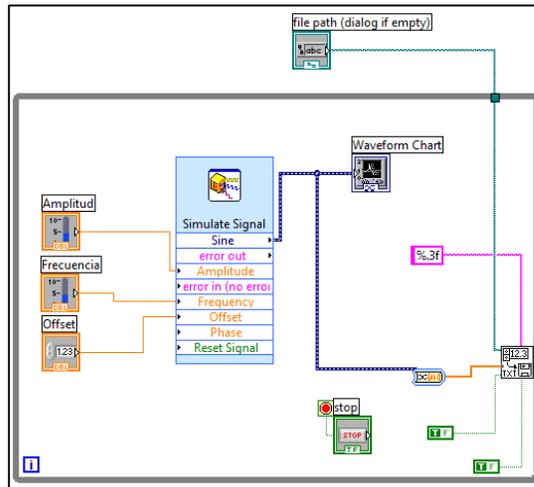


Figura 2.23: Código que genera señales sinusoidales.

Para evitar un cambio brusco de voltaje al inicio del envío de señales, traducido en un desplazamiento del vibrador mayor al admisible, es necesario incluir un atenuador al inicio de la señal sinusoidal, indicado en la Figura 2.24, de forma que el inicio del movimiento sea suave.

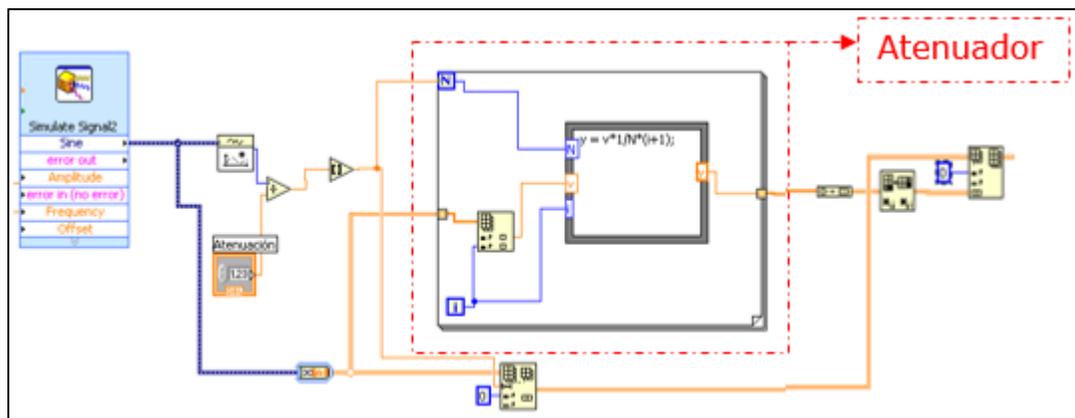


Figura 2.24: Código que genera señales sinusoidales atenuadas.

La función del atenuador, retratado en la Figura 2.25, es multiplicar una función lineal (F), que crece desde 0 hasta 1, con una función seno (G).

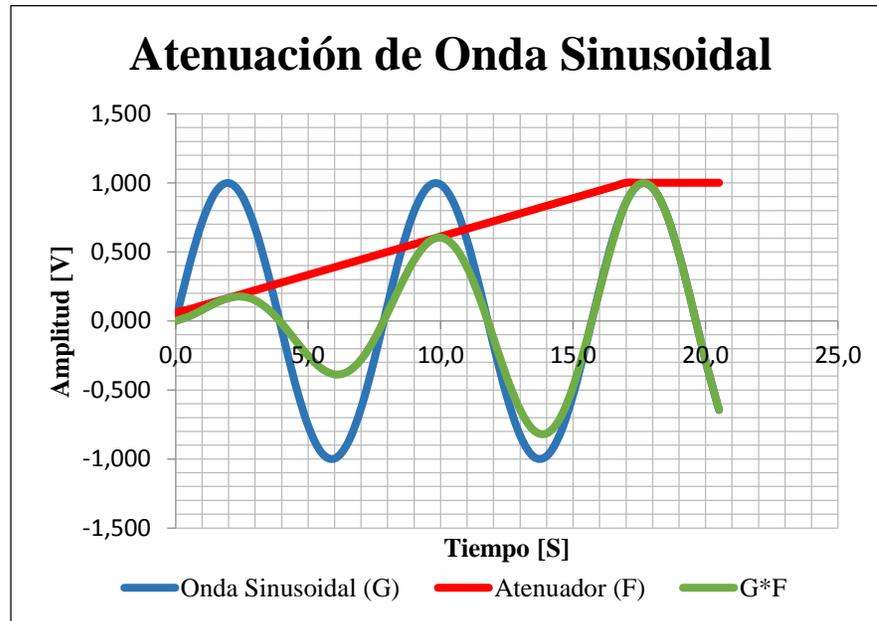


Figura 2.25: Multiplicación de onda sinusoidal con un atenuante lineal.

## 2) Adquisición de Señales:

La adquisición de señales permite observar en tiempo real, la aceleración y desplazamiento del vibrador, mientras reproduce un registro, ejemplificado en la Figura 2.26:

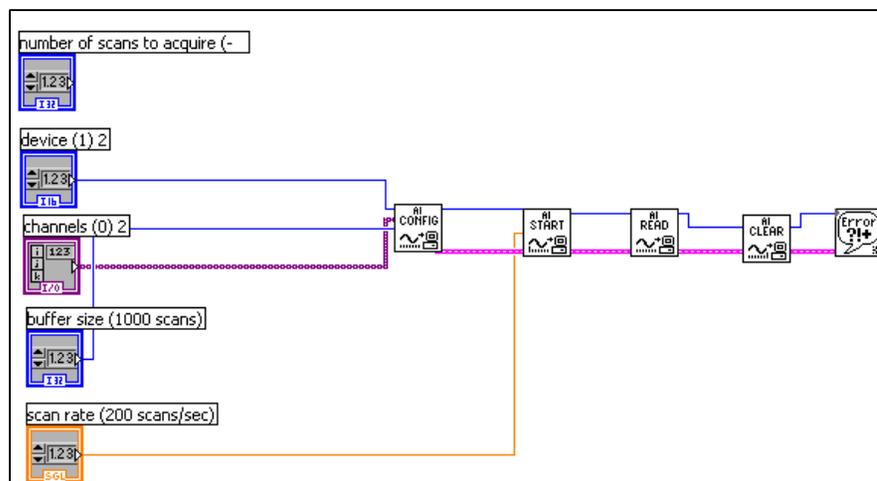


Figura 2.26 Ejemplo básico de código que lee señales.

El procedimiento de funcionamiento de la Figura 2.26 es:

1. Configura el buffer, que almacena de forma temporal los datos físicos; define los canales de lectura, dispositivo y frecuencia de muestreo.
2. Una vez definida la frecuencia de muestro, comienza la lectura de datos.
3. Finalizado el proceso, termina con el VI Clear AI.

### Calibración de señales:

La relación entre la medición física de entrada y la señal variable de salida de un sensor específico es conocida como la calibración del sensor (Webster, J.G. 1998). Los datos pueden ser graficados en una curva de calibración y la sensibilidad del equipo es determinada por su pendiente (Figura 2.27). Realizar este tipo de curvas permite identificar posibles fallas en la entrada y salida de señales durante el estudio de un registro sísmico, así como calibrar el sensor usado también.

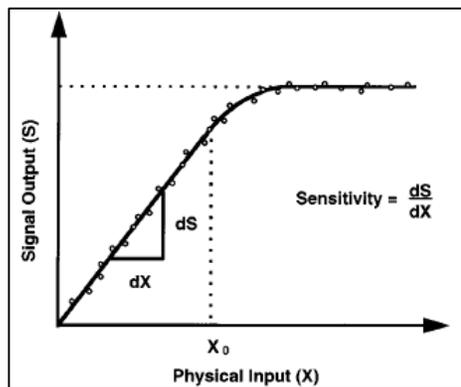


Figura 2.27: Curva de calibración (Webster, J.G. 1998).

### Errores Instrumentales y Mitigación de Ruido:

La instrumentación permite obtener datos empíricos mediante ensayos, y cada uno involucra errores e incertidumbre (Dunncliff, J. 1993). Dos clásicos son los errores sistemáticos y aleatorios, un ejemplo de los primeros es la descalibración del sensor, estos si bien pueden ser removidos, los segundos, definen la precisión de la medición. La Figura 2.28 muestra distintas fuentes de error.

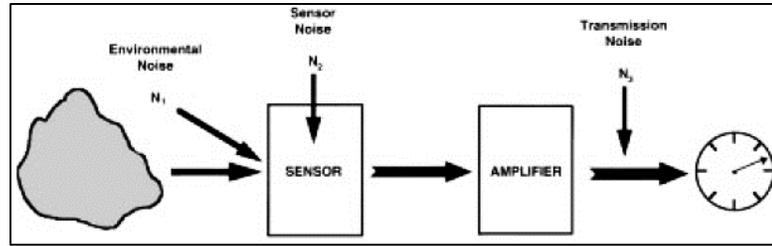


Figura 2.28: Modelos de instrumentación con fuentes de ruido (Webster, J.G. 1998).

Torres, Ramírez et al. (2014), analizaron la variación en la respuesta instrumental, de un registro periódico de aceleración medido por dos sensores de desplazamiento y un acelerómetro. Por ejemplo en la Figura 2.29 evidentemente hay variación entre la medición de los distintos dispositivos y también con respecto al registro integrado, producto de errores aleatorios.

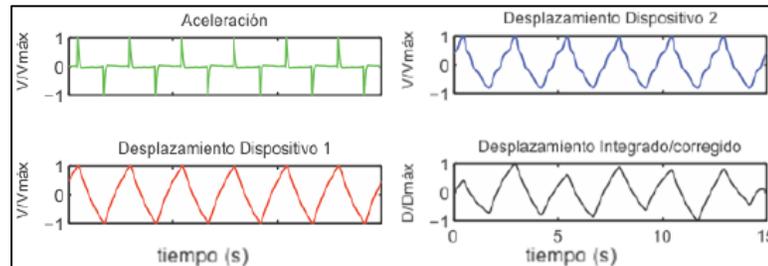


Figura 2.29: Registro Experimental (Torres, Ramírez et al. 2014).

Análisis de calibración, hechos por Sleeman, Van Wettum et al. 2006, desarrollan métodos para estimar el ruido propio como función de la frecuencia usando tres canales de medición, sistemas lineales y la función de transferencia relativa entre ellos. Está basado en un análisis de correlación de los registros de una señal entrante coherente. Berger, Agnew et al. 1979, desarrollaron técnicas cross-espectrales. Holcomb 1989, establece una aproximación directa para extraer los niveles de ruido de dos sistemas lineales con una señal entrante coherente, y aunque, la solución matemática es simple, la aplicación práctica se topa con algunas dificultades.

Diferencias entre los métodos son su implementación, contenido teórico, si se realiza análisis en la señal de salida, en operación, la simplicidad de ejecutarlo en la práctica y su antigüedad, siendo el primer método nombrado el más reciente.

Otra forma es usar filtros, que suprimen y segregan un grupo de señales dependiendo de la aplicación en particular (Webster, J.G. 1998).

### 3.0 MANUAL DE USO

#### Encendido del sistema APS:

El protocolo para hacer uso del vibrador APS 400 es:

- 1) Defina previamente su uso: Vertical u horizontal y arme según corresponda (Siga la descripción del montaje).
- 2) Realice las conexiones entre el vibrador, amplificador y el controlador de posición, siguiendo el plano de la Figura 2.8.
- 3) Verifique que no existen señales entrantes al controlador de posición.
- 4) Encienda el amplificador y aumente la perilla de ganancia al máximo (sentido horario). En caso de usar el vibrador en vertical, se recomienda cambiar manualmente la posición cero a la de reposo del vibrador junto a las masas de reacción, usando las flechas ubicadas a la derecha del monitor “*Zero position*” (Figura 2.5) del Controlador de posición, hasta que prenda la luz verde central en el monitor de posición (Figura 2.6), luego presione “Start”.
- 5) Una vez que el vibrador se encuentre en su posición de origen, ya centrada, se recomienda aumentar en el Controlador de posición la “*Stiffness*” (Rigidez) en un valor de 31, luego por seguridad, disminuya la ganancia una cantidad suficiente de tal forma que no se amplifique excesivamente la señal entrante.
- 6) Conecte el generador de señales, o envíe voltaje por el panel frontal del programa en LabVIEW, por la entrada fijada en la Figura 2.8, desde la tarjeta de adquisición.
- 7) Aumente la ganancia hasta alcanzar un nivel deseado de desplazamiento.
- 8) Realice el ensayo y la adquisición de datos.

#### Apagado del sistema APS 400:

- 1) Gire la perilla de ganancia (dB) al mínimo, en sentido horario y también la del límite de corriente.
- 2) Desconecte el generador de señales, o presione DETENER en el panel frontal del programa *mesaAPS400.vi*.
- 3) Apague el Controlador de posición y luego el Amplificador.

## Uso del Panel Frontal

El código que permite el movimiento del vibrador, primero genera un paquete de datos, que bien pueden ser ondas sinusoidales o registros sísmicos, que son guardados temporalmente en un buffer, luego son reproducidos (las ondas sinusoidales atenuadas), leídos y guardados simultáneamente, hasta que terminen los datos. La generación de un paquete de datos es única, por lo que, no es posible cambiarlo en tiempo real, por ejemplo al reproducir una onda seno con 1 [Hz] y 1 [V], su reproducción seguirá tal cual aunque cambie en el panel frontal su frecuencia u amplitud. El diagrama de bloques del programa *mesaAPS400.vi* está incluido en el Plano N°1.

En la Figura 3.1 se muestra el Panel Frontal del mismo programa, con enumeraciones, que de forma secuencial, indican el procedimiento de envío de señales hacia el vibrador y de la adquisición de datos:

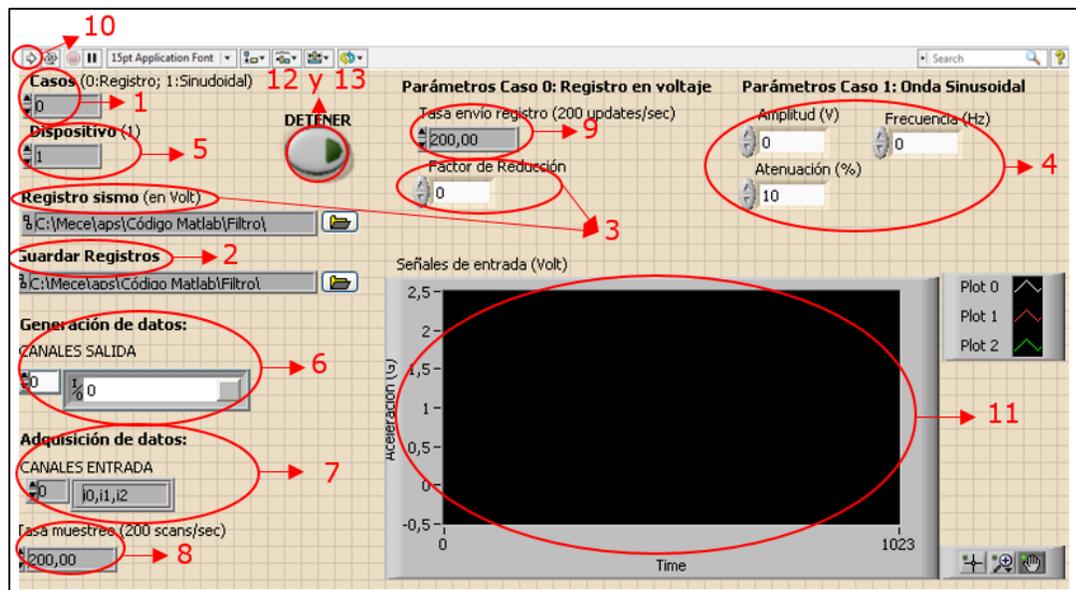


Figura 3.1: Panel Frontal controlador del movimiento del vibrador APS 400, con instrucciones enumeradas.

Instrucciones de uso del panel de la Figura 3.1:

- 1) Defina previamente si el vibrador será usado para reproducir sismos o bien, para generar ondas sinusoidales, si es el primer caso definir 0 en el panel frontal, o bien, 1 en el segundo.
- 2) Defina la ruta del archivo de salida, en el cual son guardados los datos experimentales.

- 3) En caso de usar registros, defina la ruta del archivo de entrada y su correspondiente factor de reducción, existen dos tipos de registros:
- a. Registros previamente transformados en voltaje, reducidos y listos para ser usados en el vibrador. En la Tabla 3.1 se muestran los registros transformados y sus factores de reducción para alcanzar el máximo desplazamiento del vibrador en posición horizontal, utilizando la máxima ganancia del equipo APS 145.

*Tabla 3.1: Registros y factores de reducción*

<b>Registro<sup>1</sup></b>	<b>Factor de Reducción</b>
Concepción (2010)	0,15
Iquique Chipana (2014)	0,28
Iquique Hospital (2014)	0,19
LLolleo	0,15

- b. Nuevos registros sin procesar que se desean incorporar al vibrador. En este caso el archivo debe estar guardado en extensión .txt, con sus datos en voltaje ordenados en un vector de orden nx1 (n filas y 1 columna), y en caso que sea necesario, reducidos para que el vibrador funcione en su rango admisible de desplazamiento.
- 4) En caso de usar ondas sinusoidales, varíe su amplitud y frecuencia, el porcentaje de atenuación indica la fracción de la señal que es atenuada (Figura 2.25), para impedir grandes variaciones de voltaje al inicio del movimiento, que pueden generar desplazamientos fuera del rango admisible.
  - 5) Elija el dispositivo que contiene la tarjeta de adquisición, por defecto es 1.
  - 6) Defina los canales a utilizar para la generación de señales, de preferencia seleccione el canal “oO”, para la salida desde el canal cero.
  - 7) Defina los canales para la adquisición de datos, se sugiere preferentemente empezar con los canales i0, i1, i2... y así sucesivamente en orden numérico.

---

<sup>1</sup> Los archivos de los registros se ubican en el computador N°5 del MECESUP, cuya ruta es: C:\Mece\aps Daniel\LabVIEW\Sismos.

- 8) Como tasa de muestreo se sugiere utilizar 200 (*Scans/sec*).
- 9) Tasa de envío sugerida: 200 (*Updates/sec*).
- 10) Una vez establecidos los parámetros, inicie con *run* el programa.
- 11) Observe en tiempo real, las mediciones en voltaje desde el gráfico: “Señales de entrada” en pantalla.
- 12) Una vez finalizado el movimiento del vibrador, presione DETENER para finalizar la adquisición y generación de datos.
- 13) Nuevamente presione DETENER (debe estar apagado antes de volver a usar el programa) y volver al punto 1.
- 14) Para variar los parámetros como amplitud, frecuencia, o factor de reducción, debe reiniciar el programa. Cambiar estos parámetros durante la emulación de una señal no altera la respuesta en tiempo real.

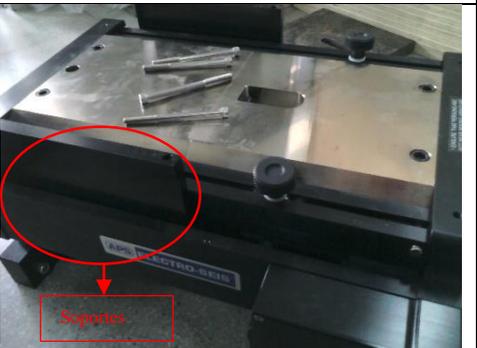
### **Procedimiento de cálculo del factor de reducción teórico para un registro sísmico:**

Es ocupado sólo cuando se requiere reproducir una señal aleatoria como un registro sísmico, su función es reducirlo de tal forma que su máximo desplazamiento esté dentro del rango admisible permitido por el vibrador (Tabla 2.1).

Para calcularlo, primero escoja el registro de aceleración, si los datos están en bruto, fíltrelo (Recomendación: 0,25 – 25 [Hz]), corrija su offset inicial e intégrele dos veces, para obtener el desplazamiento en función del tiempo y su máximo valor, luego elija el rango de frecuencias con mayor amplificación dinámica del registro, después divida el máximo por el admisible indicado en la Figura 4.10. Luego en caso que la división sea mayor que uno, se divide el registro original por este valor, así estará reducido, en caso que sea menor, es innecesaria la reducción del registro.

Luego transforme el registro de desplazamiento en voltaje, según la Figura 4.10. Se recomienda usar la menor de las pendientes del rango de frecuencias predominante en el registro, así es posible reproducirlo en el vibrador (en posición horizontal).

## Descripción del montaje horizontal del vibrador:

<p>1) Posicione el vibrador en forma horizontal:</p>	 Una fotografía de un vibrador industrial de color negro con una placa superior metálica, montado sobre ruedas y listo para uso.
<p>2) Extraiga del maletín anexo soportes y pernos:</p>	 Una fotografía de un maletín de aluminio abierto, mostrando un soporte metálico con un agujero central y otros componentes dentro.
<p>3) Instale soportes laterales y pernos del maletín de forma vertical al vibrador:</p>	 Una fotografía que muestra el vibrador con los soportes laterales instalados. Una línea roja circular resalta uno de los soportes, y una flecha roja apunta a él desde un recuadro rojo con el texto "Soportes".
<p>4) Extraiga la tabla auxiliar del maletín anexo:</p>	 Una fotografía de un maletín de aluminio abierto, mostrando una tabla auxiliar metálica perforada con muchos agujeros.

<p>5) Instale Tabla auxiliar sobre los soportes y emperne:</p>	
<p>6) Instale bandas protectoras en caso de desuso:</p>	

**Descripción del montaje vertical del vibrador:**

<p>1) Remueva tabla auxiliar y soportes:</p>	
<p>2) Componentes se ubican en la caja anexa:</p>	

3) Instale soportes laterales:



4) Levante, con cuidado, en posición vertical:



5) Instale soportes restantes:



<p>6) Remueva paneles laterales y rueda de seguridad en ambos costados del vibrador:</p>	
<p>7) Acuéstelo en posición horizontal:</p>	
<p>8) Posicione soporte vertical en ambos costados del vibrador:</p>	
<p>9) Instale masa de reacción con pernos en dirección vertical:</p>	

<p>10) Verifique la posición correcta de los pernos en la masa de reacción:</p>	
<p>11) Instale la segunda masa de reacción para uso vertical:</p>	
<p>12) Coloque elásticos, cuidando que su parte ancha pase por los pernos:</p>	
<p>13) Levante en posición vertical y repetir pasos 9 a 12 para instalar el segundo set de masas de reacción. Para realizar ensayos se recomienda usar solo dos bandas elásticas en cada costado del vibrador:</p>	

## **4.0 APLICACIÓN 1: ENSAYO CON ONDAS PERIÓDICAS CON EL VIBRADOR EN POSICIÓN HORIZONTAL**

### **4.1 Metodología**

Mediante la reproducción de ondas sinusoidales a distinta amplitud y frecuencia, es posible caracterizar el máximo rendimiento del vibrador APS 400, así como también barrer un amplio espectro de frecuencias para cada voltaje de salida del amplificador, para generar un mapa que los relacione con el desplazamiento generado.

Las condiciones del ensayo son las siguientes:

- 1) El vibrador dispuesto en posición horizontal con la tabla auxiliar instalada.
- 2) El nivel de amplificación es el máximo, en Cal. (Figura 2.17), excepto en el punto 7 y 10. Se trabaja en el modo voltaje, excepto en el punto 10.
- 3) Con el Panel Frontal (Figura 3.1), se reproducen señales periódicas de prueba, desde trenes de ondas hasta sinusoides.
- 4) Para el registro del movimiento se usa el ultrasónico sujetado horizontalmente a una base magnética (Figura 4.1), y el acelerómetro a una escuadra apernada a la tabla auxiliar (Figura 4.2).
- 5) Se verifica con el ultrasónico el procedimiento de encendido, búsqueda de posición cero y reproducción de ondas sinusoidales, como también la frecuencia mínima de correcto funcionamiento del vibrador.
- 6) El vibrador es sometido a un análisis de repetitividad para verificar que reproduce una misma señal varias veces, disminuyendo el error relativo entre ellas.
- 7) Los voltajes de salida de la tarjeta de adquisición son relacionados con los del amplificador, según el nivel de amplificación.
- 8) Se calcula el espectro de desplazamiento del vibrador, medidos desde la posición cero por defecto del controlador de posición, en otras palabras, desde el centro del máximo alcance del vibrador (Tabla 2.1).
- 9) Se relaciona el desplazamiento del vibrador para cada voltaje de salida del amplificador, recorriendo un barrido de frecuencias, relación denominada VFD.
- 10) Se analiza la respuesta del vibrador frente a un tren de ondas periódicas, variando la frecuencia, amplitud, tiempo de retardo, ganancia y los modos de operación.



Figura 4.1: Ultrasonico midiendo el desplazamiento del Vibrador horizontal

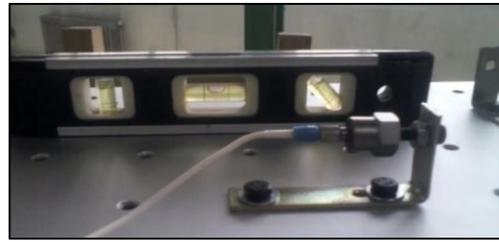


Figura 4.2: Acelerómetro apertado midiendo aceleración

## 4.2 Resultados

La posición cero (de origen) se ubica utilizando el controlador de posición, luego aplicando voltaje con el generador de señales y dejando constante el nivel de ganancia del amplificador, es posible, usando el programa descrito, obtener mediciones de desplazamiento según muestra la Figura 4.3:

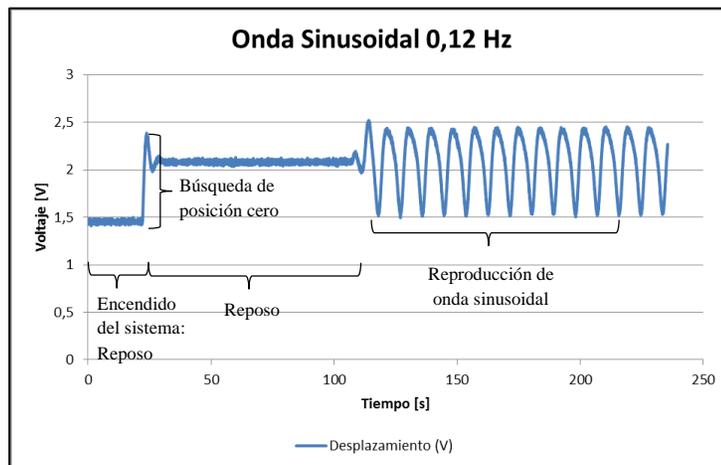


Figura 4.3: Lectura de desplazamiento de una onda sinusoidal con frecuencia 0.12 Hz, siguiendo el procedimiento de encendido.

A simple vista las mediciones simulan de forma coherente lo que ocurre en el procedimiento del experimento, que es encendido de del vibrador, encontrar la posición de origen y luego generar ondas sinusoidales.

La frecuencia mínima en que el vibrador en forma horizontal funciona coherentemente es del orden de los 0.2 [Hz], obtenido verificando que las curvas de desplazamiento forman sinusoides imperfectas, para frecuencias menores, como se muestra en la Figura 4.4:

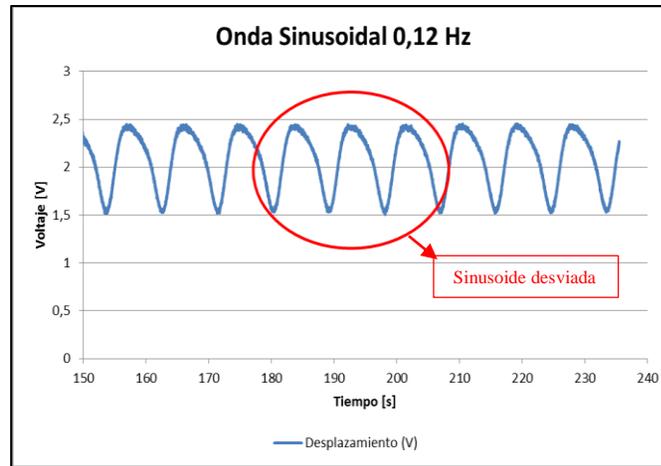


Figura 4.4: Sinusoides desviadas para frecuencias bajo 0,2 [Hz], medidas por el ultrasónico.

Según la Figura 4.5, el espectro de potencia de ocho pruebas con ondas sinusoidales a 5 [Hz], muestra que la máxima amplificación ocurre efectivamente a la misma frecuencia de emisión, cuyos armónicos corresponden en múltiplos de 5.

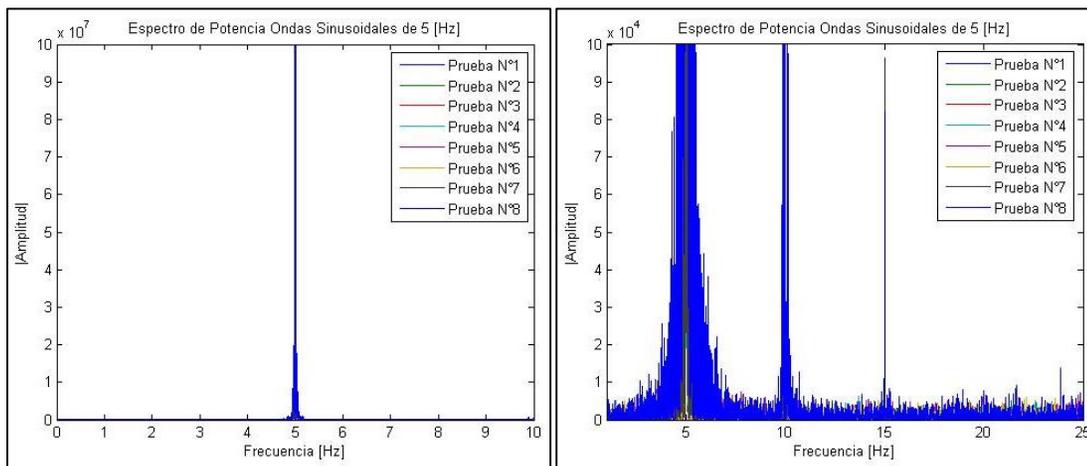


Figura 4.5: Lectura de ondas sinusoidales con 5 [Hz] enviadas desde la tarjeta de adquisición CB-68LP.

El comportamiento es extrapolable a todo el rango admisible de frecuencias del vibrador, luego reproduce ondas sinusoidales de manera coherente.

La relación entre voltajes de salida, en función del nivel de ganancia se muestra en la Figura 4.6 y su representación numérica en la Tabla 4.1.

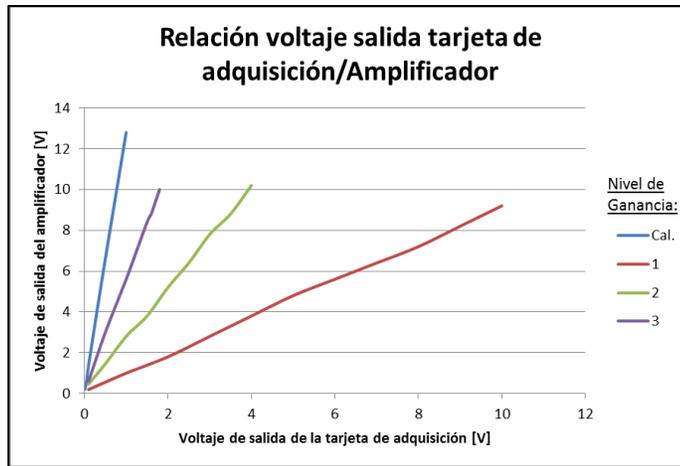


Figura 4.6: Relación lineal entre voltajes de salida para el Modo Voltaje.

Tabla 4.1: Voltaje del amplificador vs el de salida de la tarjeta de adquisición ( $V_t$ ), en Volts.

Nivel de Ganancia	Voltaje Amplificador [V]	Rango de voltaje ( $V_t$ ) sugerido
1	$0.9042 * V_t + 0.1067$	[0-10]
2	$2.4857 * V_t + 0.2143$	[0-4]
3	$5.4615 * V_t + 0.1452$	[0-1,8]
Cal.	$12.7911 * V_t + 0.0733$	[0-1]

El espectro de máximos desplazamientos admisibles en dirección horizontal, para cada frecuencia de oscilación, se muestra en la Figura 4.7:

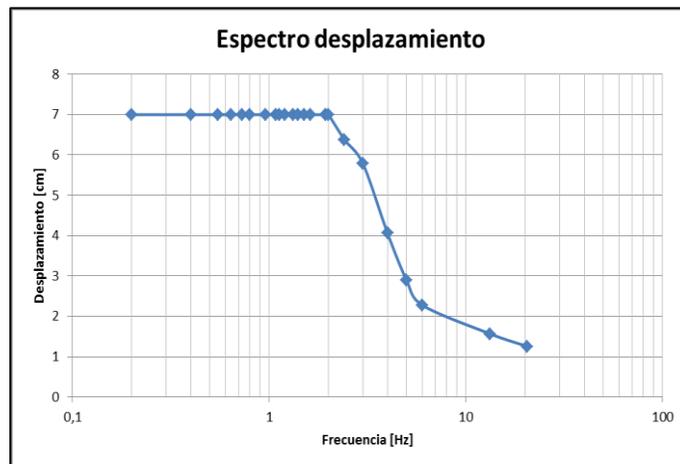


Figura 4.7: Máximos desplazamientos admisibles por el vibrador APS 400, para distintas frecuencias de oscilación.

Los máximos desplazamientos siguen una tendencia a disminuir para frecuencias mayores a 2 [Hz], debido a limitaciones mecánicas y energéticas, el máximo desplazamiento, alrededor de 7 [cm], decae para altas frecuencias. Uno de los factores influyentes es el roce mecánico. Para frecuencias mayores a 10 [Hz] los desplazamientos máximos bajan del 1 [cm], por lo que el sensor de desplazamiento usado no permite obtener datos precisos, debido a su margen de error (Tabla 2.5), es así que a partir de la doble integración del registro de aceleración es posible continuar la curva.

La relación entre el voltaje de salida del amplificador; la frecuencia de ondas sinusoidales (enviadas a través del programa *mesaAPS400.vi*) y con el desplazamiento generado en el vibrador, abreviada como VFD, se muestra en la Figura 4.8. Es claro que para altas frecuencias, los desplazamientos disminuyen en forma significativa, independiente del nivel de voltaje. Situación que coincide con la teoría, ya que para que el vibrador reproduzca altas frecuencias, necesita una cantidad de energía mayor que la proveída por el equipo, es más, parte de ella es disipada por limitancias mecánicas, por ejemplo: el roce, por lo que se reducen los máximos desplazamientos alcanzables. Existe una zona de desplazamiento cuasi-constante predominante, cuyos valores rondan entre 1-2 [cm], por sobre el resto, básicamente porque en las zonas de alta frecuencia los desplazamientos serán siempre menores, por las limitancias mecánicas del equipo, no así para bajas frecuencias, en las que, éstos serán mayores pero con mayor rango de variación.

Luego la relación entre la frecuencia y el voltaje de salida, se muestra en la Figura 4.9, que corresponde al plano de Frecuencia y Voltaje de la Figura 4.8. Se forman bandas verticales de amplificación, lo cual complica el cálculo del factor de reducción, porque la respuesta del equipo es distinta para cada nivel de frecuencia. Por ejemplo, en la reproducción de un registro sísmico que posea un amplio ancho de banda, según la Figura 4.8, la amplificación del desplazamiento es mayor para bajas frecuencias y en general, varía de forma no lineal, entonces la respuesta del equipo va a ser totalmente distinta a la señal original.

## Desplazamiento admisible Vibrador Horizontal

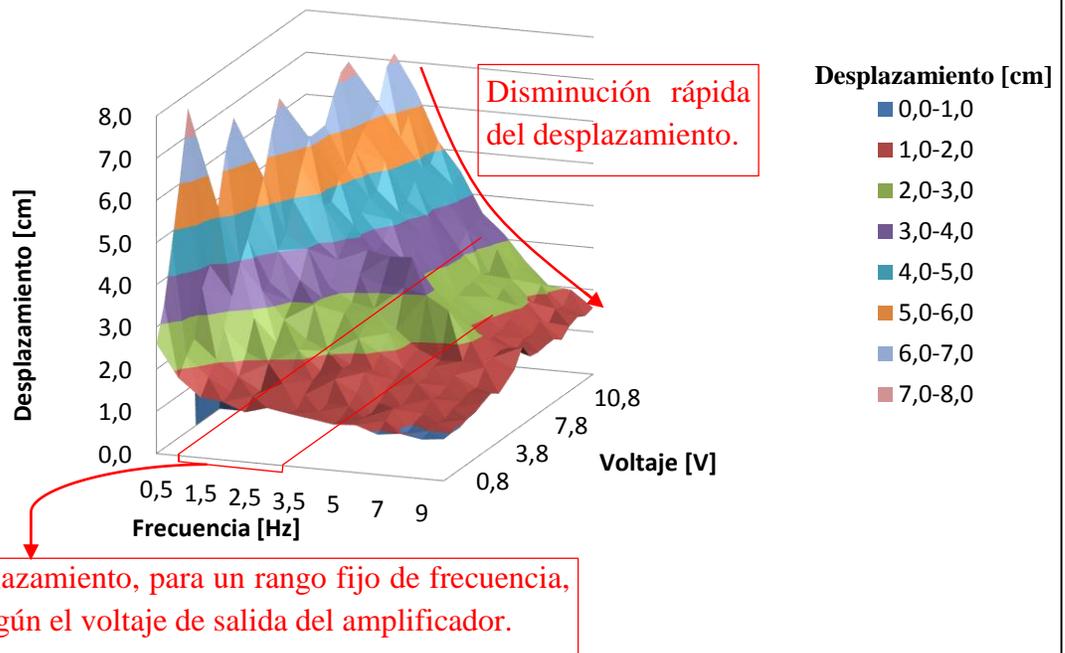


Figura 4.8: Relación voltaje-Desplazamiento-frecuencia del vibrador APS 400, que describe su rendimiento en Modo Voltaje.

## Desplazamiento admisible Vibrador Horizontal

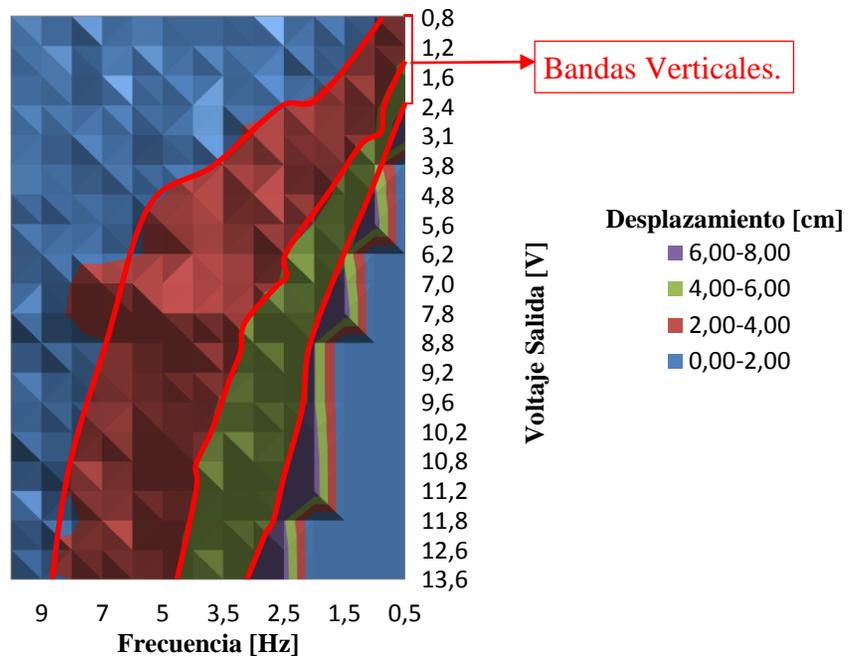


Figura 4.9: Vista en el plano Frecuencia-Voltaje de la relación VFD del vibrador en Modo Voltaje.

La vista del plano Desplazamiento contra Voltaje de la Figura 4.8 permite relacionar ambos parámetros linealmente en función del nivel de frecuencia, tal como se muestra en la Figura 4.10:

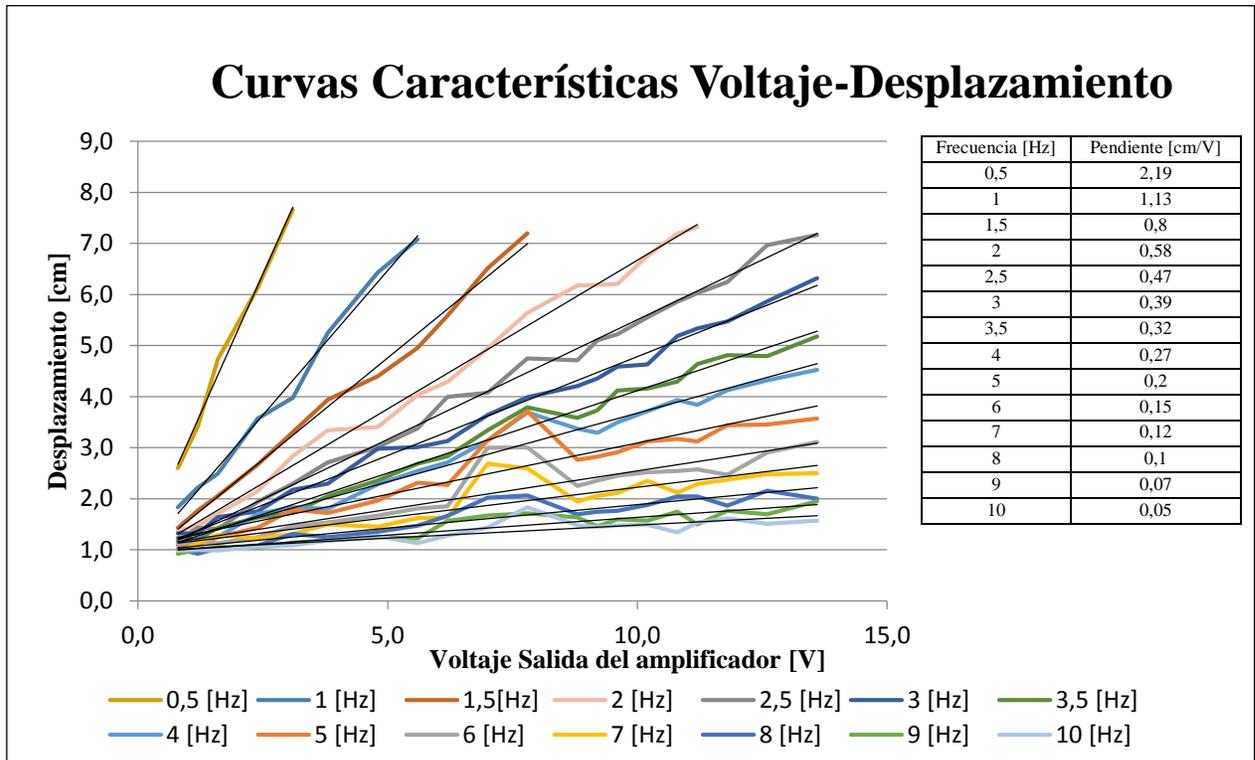


Figura 4.10: Relación entre voltaje de salida del amplificador con el desplazamiento horizontal del vibrador, en Modo Voltaje.

Es claro que la respuesta del equipo depende del ancho de banda del registro de entrada, pero en la Figura 4.10, a medida que aumenta la frecuencia, la respuesta de amplificación del equipo se estabiliza siguiendo una tendencia lineal, lo cual es totalmente opuesto a los que ocurre para bajas frecuencias, en que la razón entre el desplazamiento y el voltaje de salida cambian bruscamente.

Luego, en teoría, para reproducir un registro filtrado en el vibrador, se puede ver cada señal como serie de *Fourier* y encontrar un factor de reducción por cada frecuencia, según el nivel de amplificación de la Figura 4.10.

## Caracterización por Tren de ondas periódicas

### 1) Modo Voltaje:

En primera instancia el ensayo contempla el envío de ondas sinusoidales aumentando la frecuencia en cada paquete ondas y el nivel de ganancia es bajo, entre 1 y 2 (Figura 2.17), tal como se muestra en la Figura 4.11. El desplazamiento generado por el vibrador es de carácter sinusoidal hasta los 120 [s], al igual que el voltaje de salida de la tarjeta de adquisición, pero luego de los 130 [s], comienza a desviarse la posición de origen en torno a la cual oscila el vibrador, en otras palabras pierde su centro de giro. Los factores incidentes más probables son el bajo nivel de ganancia y el tiempo reducido de retardo entre cada tren de onda.

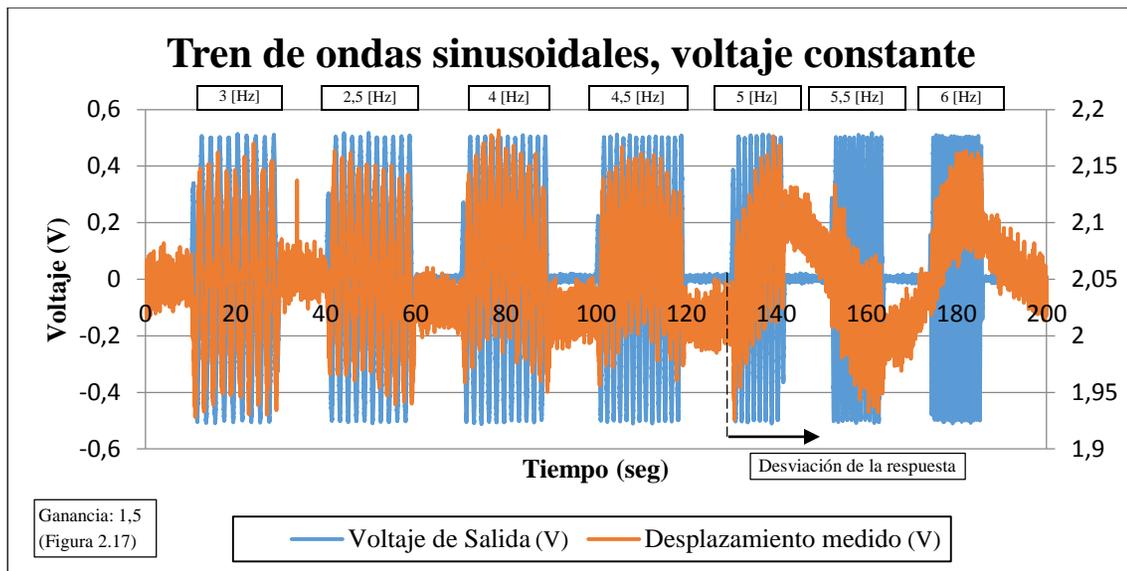


Figura 4.11: Comparación del voltaje generado por el tren de ondas contra el desplazamiento generado en el vibrador horizontal, variando la frecuencia, con nivel de ganancia bajo y en modo voltaje.

En la Figura 4.12, el tren de ondas, aumenta gradualmente la amplitud del voltaje entregado, dejando constante la frecuencia en 0,5 [Hz] y manteniendo el nivel de ganancia. A partir de los 200 [s] la desviación del centro de giro es evidente y comparable con el máximo desplazamiento generado en el tren de ondas, pero finalizando el ensayo, el vibrador vuelve a su posición de origen y permanece allí. Lo que ocurre es que el Controlador de Posición en todo momento del ensayo está buscando su "zero position". Esto conlleva a problemas con las mediciones para bajas ganancias en el amplificador.

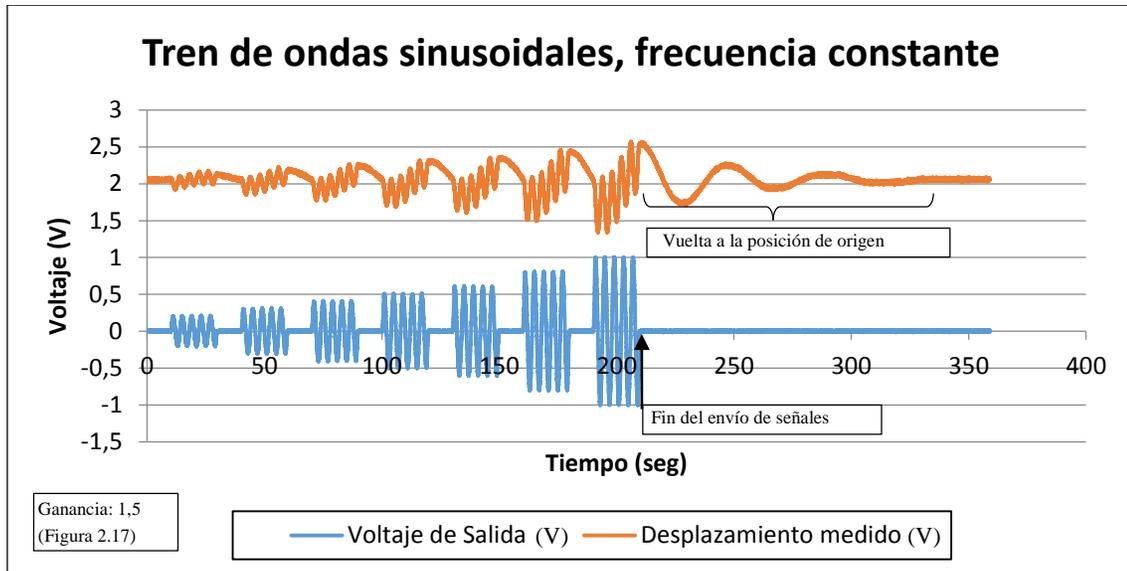


Figura 4.12: Comparación entre voltaje de salida y desplazamiento con el vibrador horizontal, variando la amplitud de onda, manteniendo la frecuencia en 0.5 [Hz], con nivel de ganancia bajo y usando modo voltaje.

En la Figura 4.13 el nivel de ganancia es el máximo (Cal.), el tiempo de retardo es mayor, considerando una atenuación al inicio y término de cada onda, con estos parámetros la respuesta del vibrador es óptima. Así, el equipo es capaz de reproducir ondas periódicas sin desviación de la trayectoria, el problema de desviación queda opacado por el aumento del tiempo de retardo, la atenuación de la señal y los altos niveles de ganancia son los factores que permiten una reproducción eficiente de ondas.

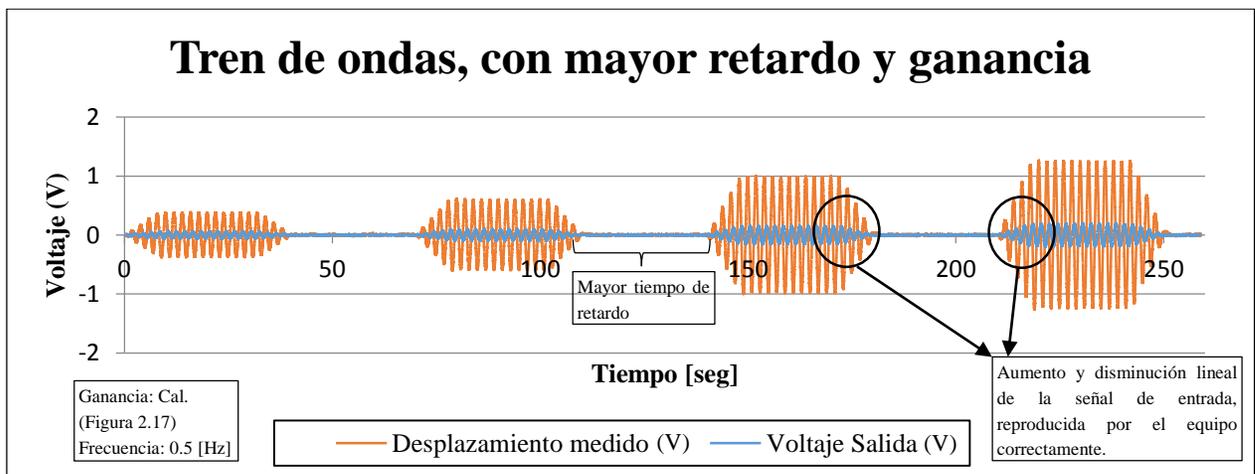


Figura 4.13: Comparación entre voltaje de salida y desplazamiento con el vibrador horizontal, variando la amplitud de onda, manteniendo la frecuencia en 0.5 [Hz], con nivel de ganancia alto y usando modo voltaje.

## 2) Modo Corriente:

El último tren de ondas, mostrado en la Figura 4.14, está hecho en el modo corriente, y es claro que el funcionamiento del vibrador es impredecible. En cada tren de onda, la respuesta del vibrador es incoherente por lo que este modo de operación queda descartado.

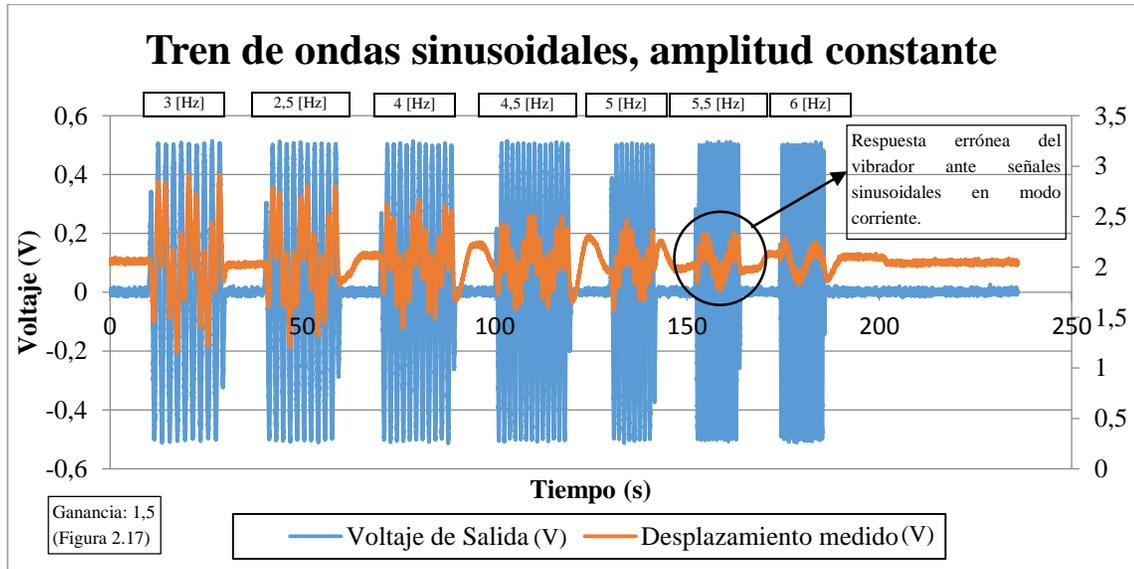


Figura 4.14: Tercer tren de ondas que compara el voltaje de salida de la tarjeta de adquisición contra el desplazamiento generado en el vibrador, en modo corriente.

## 5.0 APLICACIÓN 2: REPRODUCCIÓN DE REGISTRO SÍSMICO DEL VIBRADOR EN POSICIÓN HORIZONTAL

### 5.1 Metodología

El objetivo del ensayo es determinar de qué forma es posible reproducir sismos en la vibrador APS 400, comparando la entrada y salida de señales del registro de Concepción (2010). El procedimiento de ensayo corresponde a:

- 1) El vibrador dispuesto en posición horizontal con la tabla auxiliar instalada. El nivel de amplificación es el máximo, en Cal. (Figura 2.17) y se trabaja en el modo voltaje.
- 1) La disposición de los sensores es análoga a la Aplicación 1 (Figura 4.1 y Figura 4.2).
- 2) A través del Panel Frontal, se reproduce el registro de Concepción (2010) modificado de dos formas distintas, porque el desplazamiento máximo del registro (Figura 5.2), alrededor de 20 [cm], es superior al límite permitido por el vibrador (~7 [cm]):
  - a. Filtrado entre 2 y 3 [Hz], rango elegido por su leve variación de pendiente en la relación Voltaje-Desplazamiento y su tendencia lineal coherente (Figura 4.10). Los desplazamientos del vibrador son transformados en voltaje de salida del amplificador, promediando las curvas pertenecientes al rango entre 2-3 [Hz] de Voltaje-Desplazamiento (Figura 4.10) y dividiendo el registro por la pendiente de la curva promedio, mostrada en la Figura 5.1:

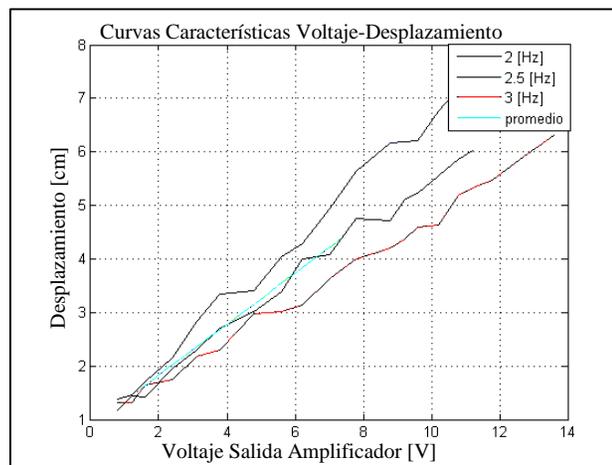


Figura 5.1: Promedio entre curvas características de voltaje-desplazamiento.

- b. Reducido proporcionalmente (0.31 veces), de forma conservadora, para un desplazamiento máximo de 6,2 [cm]. Es importante mencionar que debe ser reducido adicionalmente al usar el nivel de ganancia en Cal. (Figura 2.17), por

un factor 0.1 en el panel frontal del código (Figura 3.1). La mayor dificultad es transformar los desplazamientos del registro en voltaje de salida de la tarjeta de adquisición, porque según la Figura 4.9, esta relación varía según el rango de frecuencias, y como el registro reducido posee un amplio ancho de banda se complejiza la transformación. Como simplificación al problema, este caso toma la misma curva promedio (Figura 5.1).

- 3) Los registros son reproducidos entre 8 y 10 veces, cambiando las condiciones del vibrador, en particular, incluyendo masas, con el fin de analizar su repetitividad.

## 5.2 Resultados

El registro sísmico usado el del Maule 2010, en Concepción, Chile, se muestra en la Figura 5.2, y a partir de las modificaciones hechas al registro de Concepción (2010), se calcularon sus desplazamientos, siendo ambos admisibles por el vibrador, mostrados en la Figura 5.3:

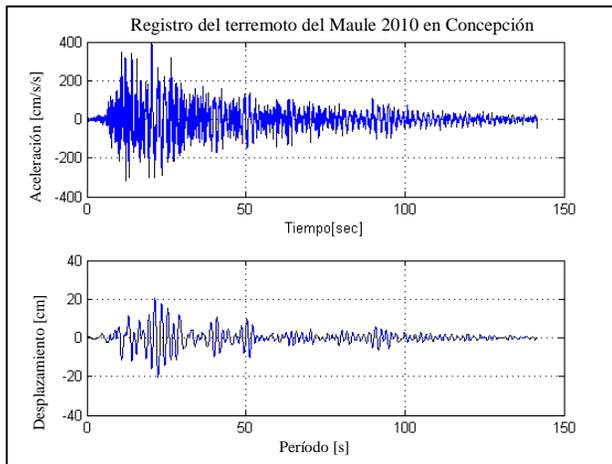


Figura 5.2: Aceleración y desplazamiento del terremoto Maule 2010, medido en Concepción.

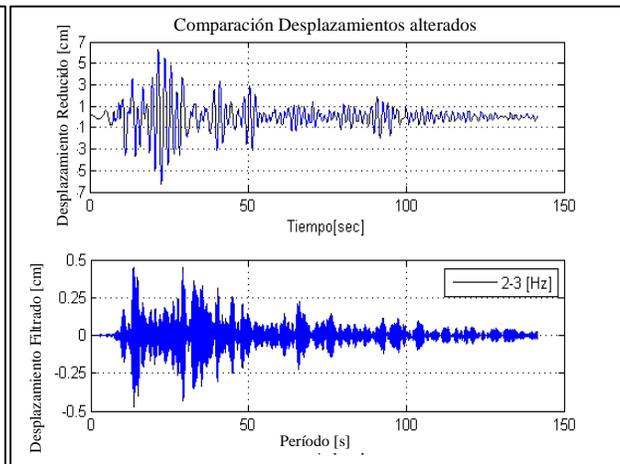


Figura 5.3: Desplazamientos reducidos y filtrados a partir del registro de Concepción.

### Reproducción de registro filtrado:

Se comparan los espectros de respuesta del registro filtrado de Concepción (2010) contra las mediciones de los sensores, con un amortiguamiento del 5%, mostrado en la Figura 5.4, ambos espectros son idénticos, luego la amplificación, es homogénea en rangos pequeños de frecuencia, en este caso entre 2-3 [Hz] y en términos de repetitividad, el vibrador es capaz de reproducir continuamente el mismo registro. En la Figura 5.5 se muestra el mismo registro pero con una masa de 10 [kg] sobre la tabla auxiliar. En primer lugar, no altera significativamente la repetitividad del

vibrador, y en segundo lugar, si afecta la máxima amplitud del desplazamiento que alcanza el vibrador, en promedio disminuye un 17% respecto del caso sin carga.

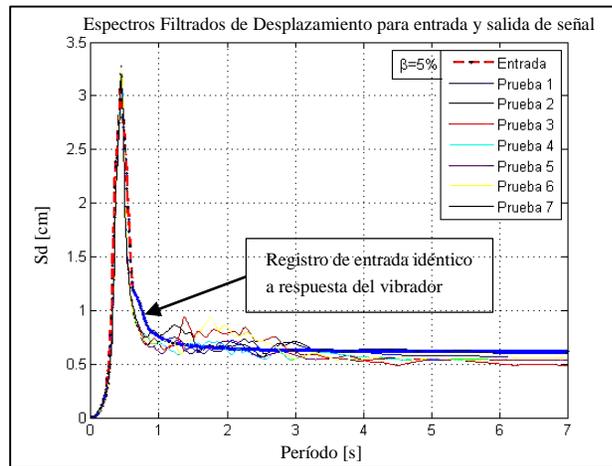


Figura 5.4: Espectro de desplazamiento al reproducir reiteradamente el registro filtrado.

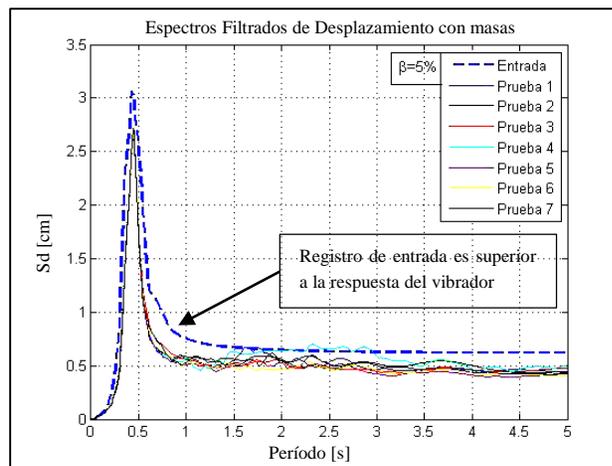


Figura 5.5: Espectro de desplazamiento del registro filtrado incluyendo una masa de 10 [kg] sobre el vibrador horizontal.

### Reproducción de registro Reducido:

De la Figura 5.6 - Izquierda, el espectro del registro reducido, es menor que el de respuesta del vibrador, principalmente por el contenido del ancho de banda, entonces en este caso si es notoria la amplificación de la señal. Notar que los espectros pueden ser ajustados, amplificando linealmente por un factor constante, como se muestra en la Figura 5.6 - Derecha, es claro que para períodos bajo 3 [s], el espectro de la señal de salida tiende a ser una amplificación casi lineal de la

entrada, y como en este caso el contenido de frecuencias del registro de entrada es mayor que el caso filtrado (según la relación VFD) la amplificación ya no es lineal para períodos sobre 3 [s].

La repetitividad se mantiene entre las pruebas hechas, por lo que es independiente del ancho de banda del registro. El caso reducido contiene desplazamientos mayores con *peaks* que difieren en el período con respecto al caso filtrado (Figura 5.4), principalmente por el distinto contenido de frecuencias.

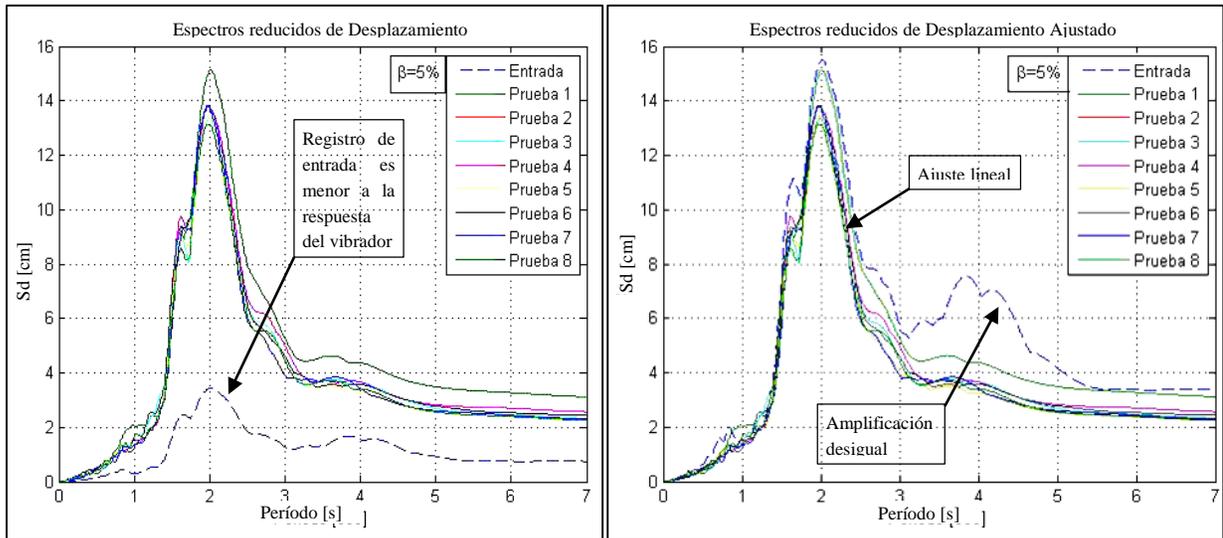


Figura 5.6: Espectro de desplazamiento de la adquisición de datos al reproducir reiteradamente el registro reducido.

## 6.0 APLICACIÓN 3: REPRODUCCIÓN DE REGISTRO SÍSMICO EN MARCO ESTRUCTURAL SOBRE EL VIBRADOR EN POSICIÓN HORIZONTAL

### 6.1 Metodología

El ensayo consiste en reproducir el registro de Concepción (2010) modificado, filtrado entre 2-3 [Hz] y amplificado cuatro veces, en el vibrador dispuesto en posición horizontal y la tabla auxiliar instalada sobre él. Con el fin de analizar la respuesta de un marco estructural (Figura 6.1) empotrado sobre el equipo, consta de cuatro losas de hormigón cada una con un acelerómetro y columnas de madera.



Figura 6.1: Probeta estructural

### 6.2 Resultados

En la Figura 6.2 se muestran los espectros de respuesta de cada piso, notando que a mayor altura, los desplazamientos son mayores:

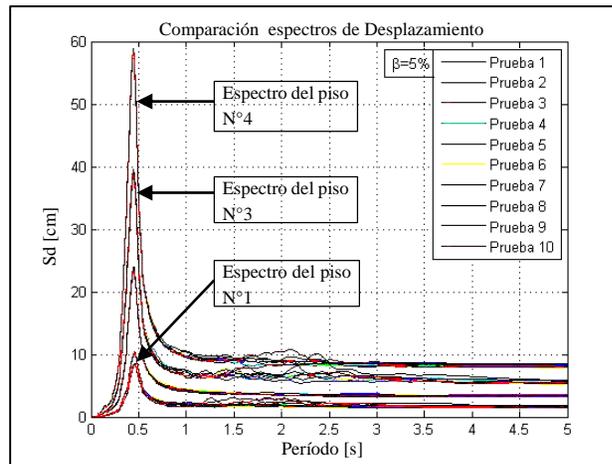


Figura 6.2: Espectro de respuesta de la adquisición de datos al reproducir reiteradamente el registro filtrado amplificado  $\times 4$  sobre el marco empotrado en el vibrador.

Los espectros son de igual forma, pero de distinta amplitud, se cumple que el peak de desplazamiento ocurre para una frecuencia cercana a los 2 [Hz], lo cual es consecuente con el rango entre 2-3 [Hz] de filtrado del registro sísmico en Concepción (2010). Con respecto a la repetitividad, es claro que la respuesta es idéntica para todas las pruebas.

## 7.0 APLICACIÓN 4: CARACTERIZACIÓN DEL SUELO MEDIANTE MASW USANDO EL VIBRADOR EN POSICIÓN VERTICAL

### 7.1 Metodología

MASW es un método de caracterización sísmica utilizado para estimar la rigidez  $G$  o la velocidad de onda de corte  $V_s$  en un depósito de suelo (Geophysics, 1999). En este caso la fuente es el vibrador APS 400, de carácter activo. Con un arreglo de geófonos son medidas las aceleraciones de las ondas superficiales, luego mediante la adquisición y procesamiento de datos es posible complementar, teóricamente, los resultados con los de una fuente activa, por ejemplo un martillo.

Los dispositivos usados en el ensayo que se muestran en las Figura 7.3, Figura 7.4 y Figura 7.5, son:

- 12 Geófonos espaciados cada 3 [m] y 4 Trominos.
- Una Batería BOSCH y un generador eléctrico BAUKER.
- Una Laptop como control, un sismógrafo Geode para la adquisición de las señales.
- Geopsy: Programa que permite el análisis de señales.
- Como fuente, un martillo y el vibrador vertical, junto con todos sus componentes, incluyendo el generador de señales FG-7002C (Figura 2.10).

La distribución de los ensayos son dos:

- Primer caso: 4 Trominos ubicados cada tres metros de la fuente, como se muestra en la Figura 7.1, usando como fuente las ondas sinusoidales del vibrador vertical con 3, 5 y 8 [Hz] a máxima potencia:

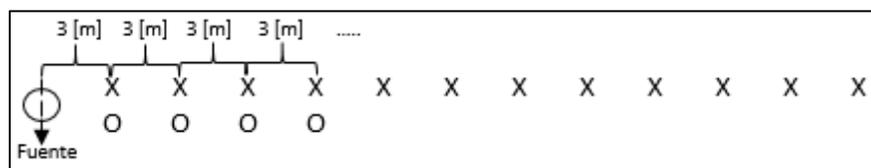


Figura 7.1: Configuración de geófonos (X) y Trominos (O).

- Segundo caso: Ensayo de MASW en Plaza Ercilla, midiendo sólo con los geófonos, se realizan golpes con martillo en la dirección Norte-Sur y Sur-Norte (Figura 7.2).

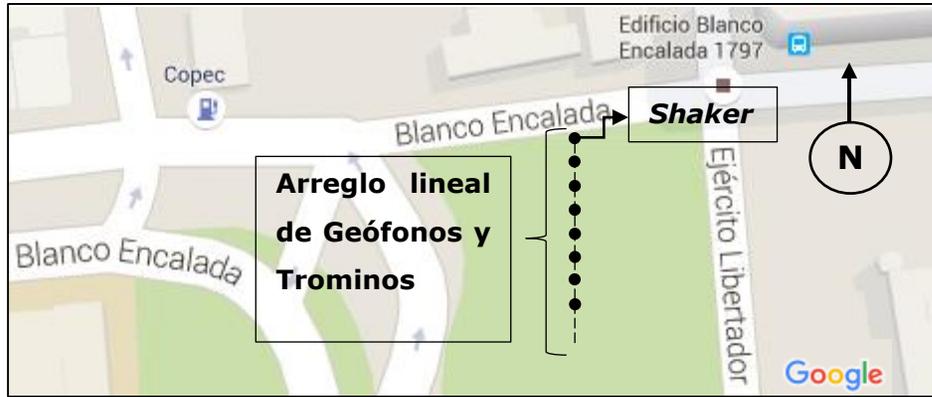


Figura 7.2: Mapa del sitio de ensayo.

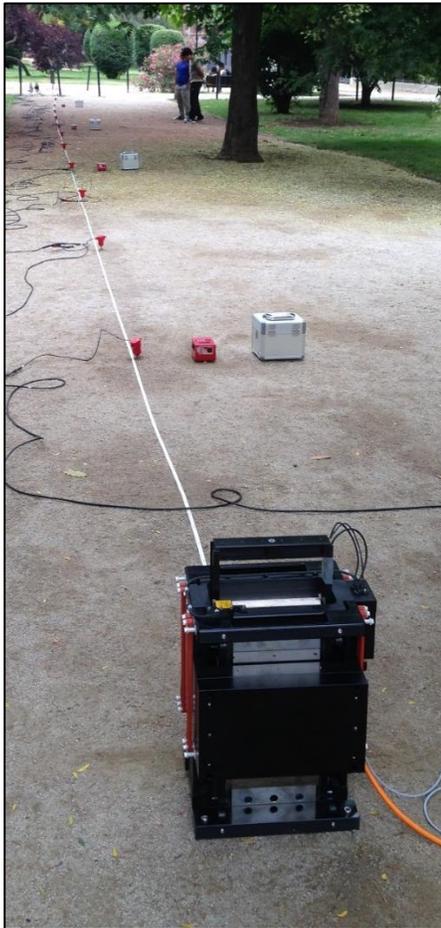


Figura 7.3: Vibrador, y arreglo lineal de geófonos con trominos.



Figura 7.4: Geode, Laptop y Batería en terreno.

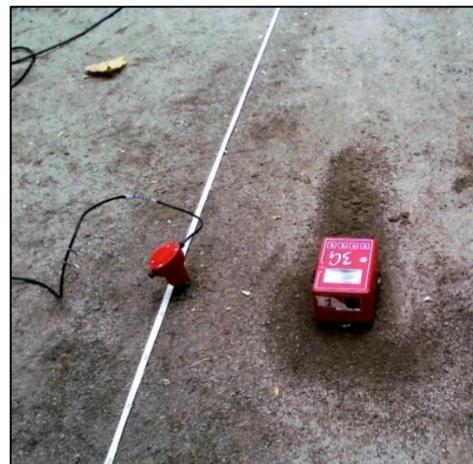


Figura 7.5: Geófono y Tromino midiendo ondas superficiales.

## 7.2 Resultados

En la Figura 7.6 la mayor energía, tanto en el caso de los geófonos, como de los trominos, se concentra en el dispositivo más cercano a la fuente y decae rápidamente. También existe influencia del ruido ambiental entorno a los 8 [Hz], que opaca la frecuencia de oscilación del vibrador y también afecta entre 4-5 [Hz] en menor magnitud, porque la frecuencia fundamental de los geófonos es de 4.5 [Hz], entonces existe mayor sensibilidad en aquel rango.

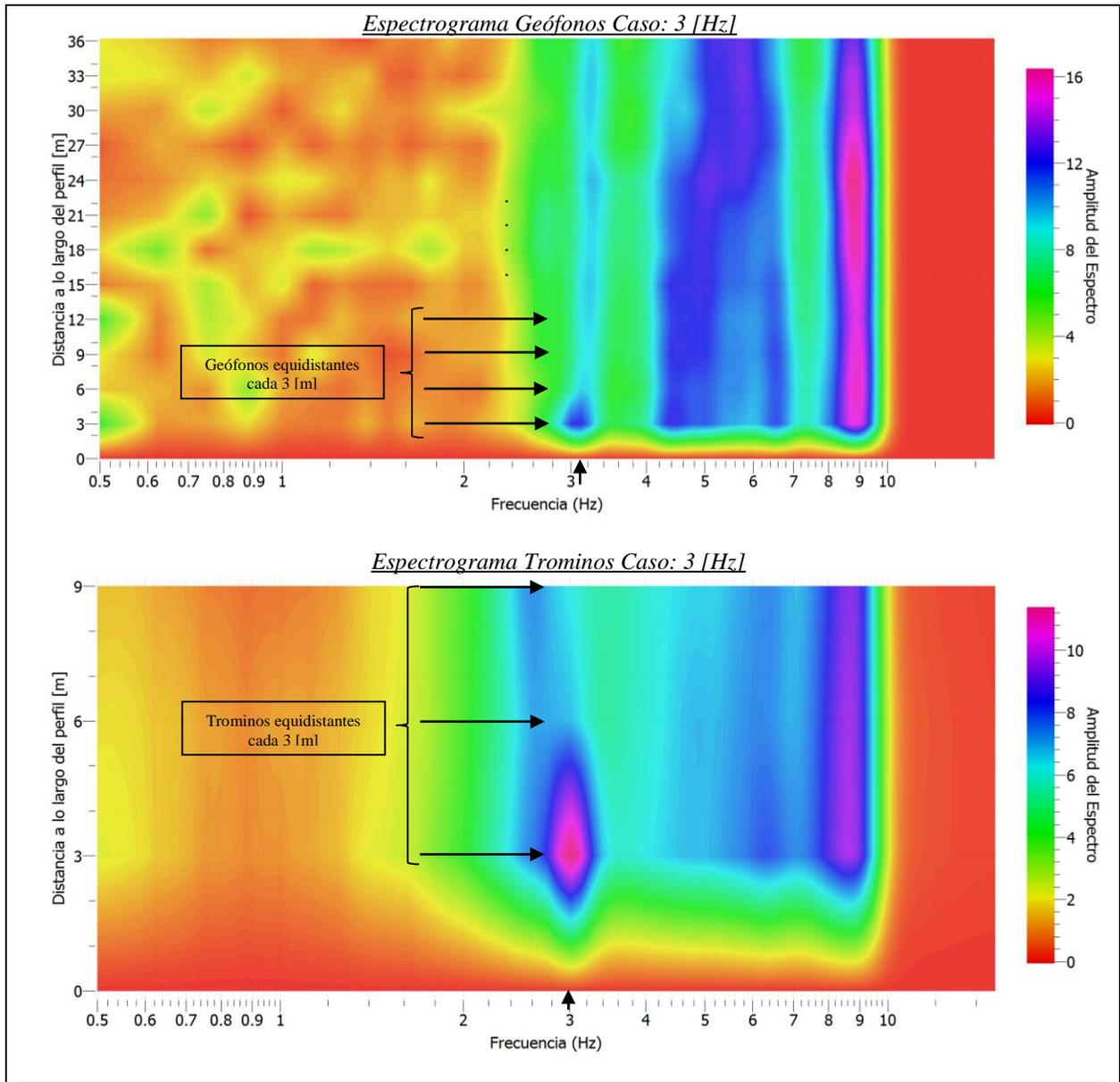


Figura 7.6: Espectrograma de Trominos y Geófonos del ensayo con el vibrador a 3 [Hz].

Ya en la Figura 7.7, en el caso de los Trominos, es claro que los últimos dispositivos del arreglo lineal (Figura 7.2), son incapaces de medir perturbaciones provenientes del vibrador, en cambio, en los geófonos la degradación de la señal es incierta, hecho que corrobora la interferencia del ruido ambiental en conjunto con la mayor precisión del geófono para frecuencias cercanas a su fundamental. Todavía existe perturbación cercana a los 8 [Hz].

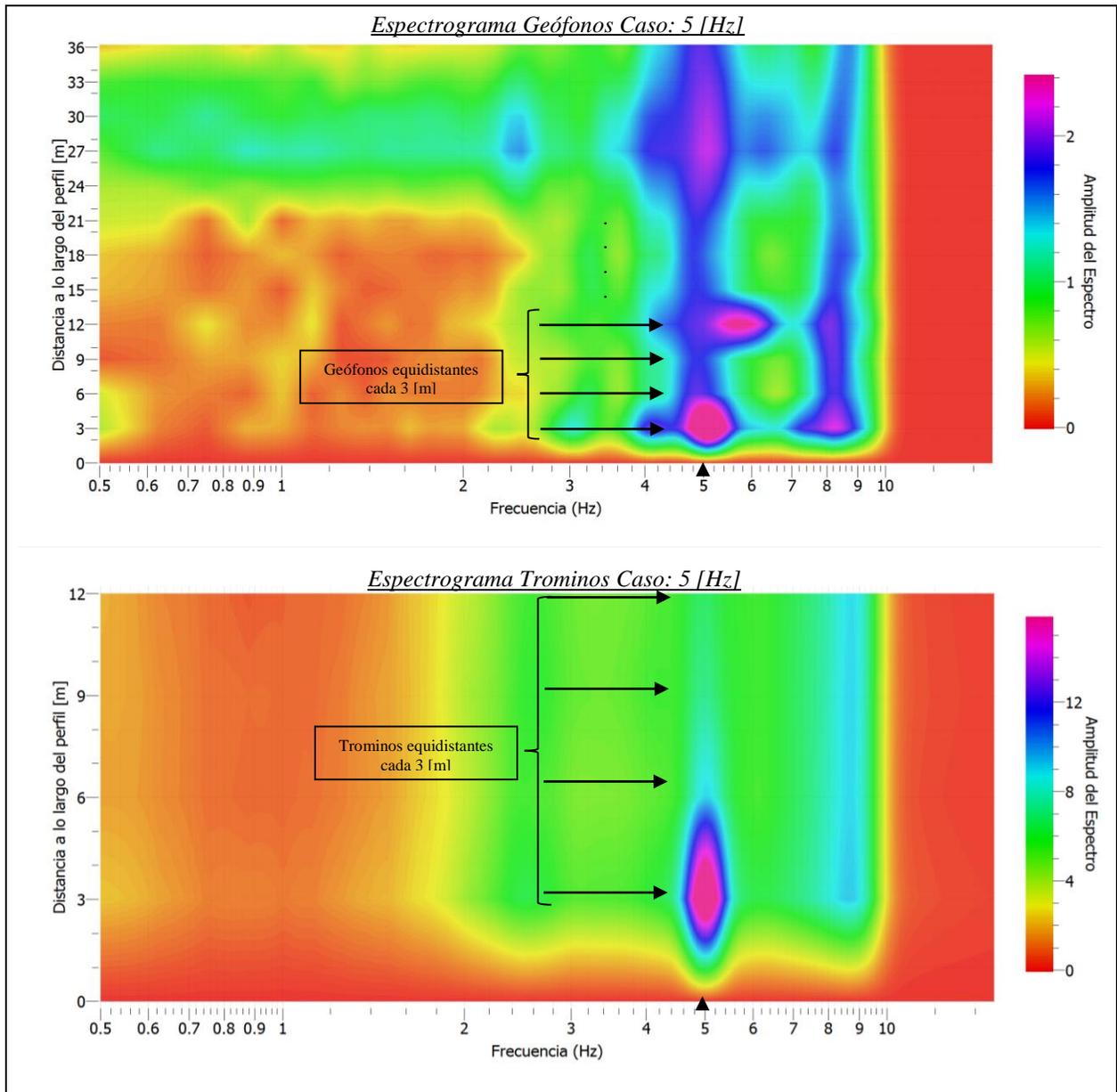


Figura 7.7: Espectrograma de Trominos y Geófonos del ensayo con el vibrador a 5 [Hz].

En el último caso (Figura 7.8), probablemente la señal está influenciada por ruidos ambientales, incluso en los Trominos, pues ya en los casos anteriores hay amplitudes significativas en los 8 [Hz], lo cual cuestiona la potencia del vibrador para generar ondas energéticamente superiores a los factores externos al ensayo. También hay una banda entre los 5-6 [Hz] de menor intensidad que los 8 [Hz] presente, al igual que en el caso de los 3 [Hz], luego existe una gran probabilidad que sea ruido ambiental durante las mediciones.

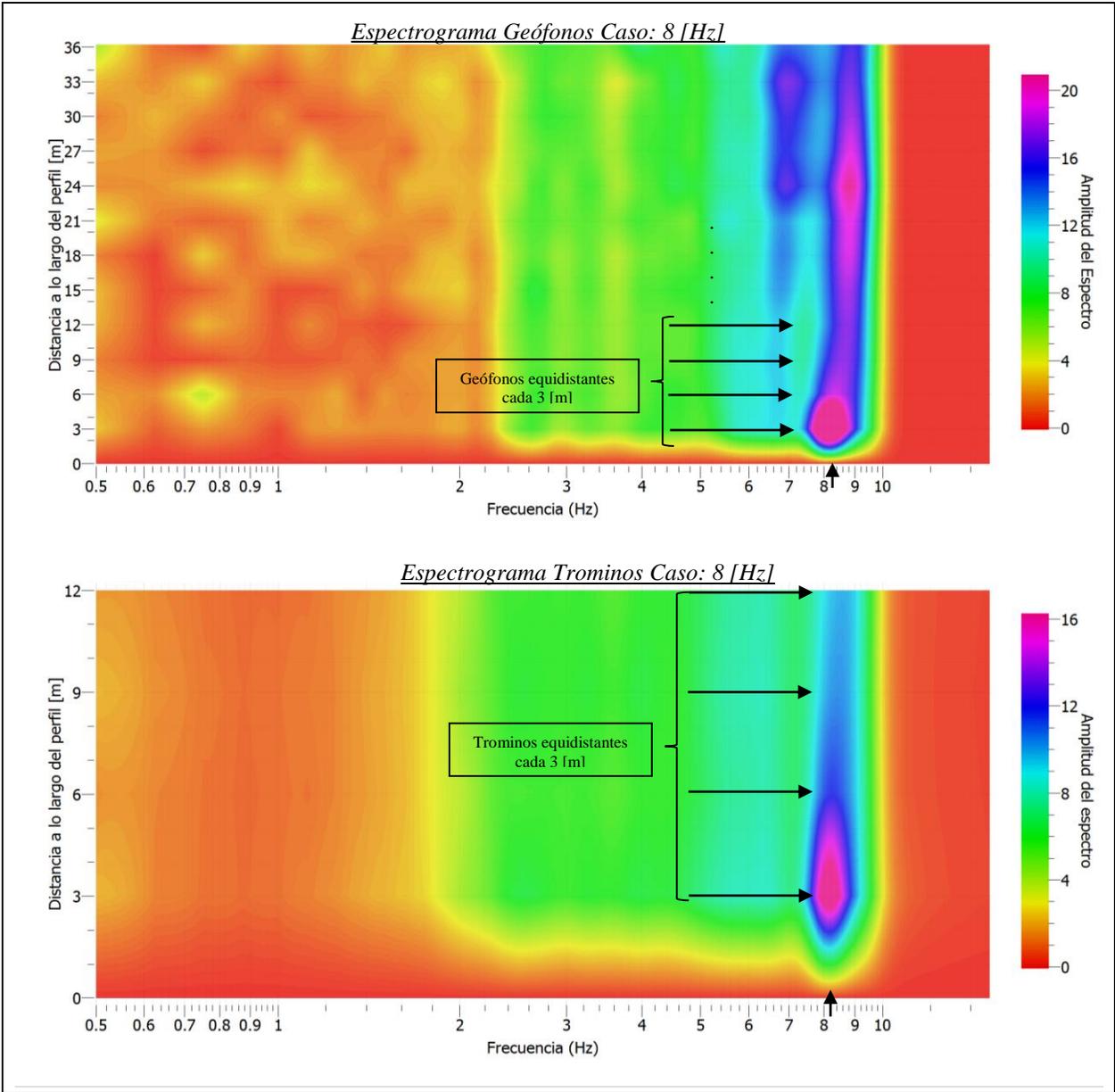


Figura 7.8: Espectrograma de Trominos y Geófonos del ensayo con el vibrador a 8 [Hz].

Finalmente los *peaks* de amplitudes en cada espectro coinciden con la frecuencia de oscilación del vibrador. En todos los casos la mayor amplitud ocurre en el Geófono y Tromino más cercano a la fuente, disminuyendo paulatinamente hasta el último. Cabe destacar que existe interferencia predominante de frecuencias sobre los 10 [Hz] en los datos registrados, producto de las condiciones del ensayo: los ruidos generados por automóviles y el generador a gasolina *BAUKER*.

Con respecto al ensayo MASW, del conjunto de golpes a martillo es posible obtener una curva de dispersión (Park et. al. 1999) del sitio, relacionando la velocidad de fase de las ondas superficiales con su frecuencia, tal como se muestra en la Figura 7.9. La curva de dispersión indica que el suelo tratado es de carácter rígido, por poseer velocidades de fase sobre los 400 [m/s] bajos los 20 [Hz], decae desde bajas hacia altas frecuencias, terminando prácticamente constante por sobre los 27 [Hz]. Se caracteriza por la alta precisión en la respuesta en altas frecuencias o bajos períodos de onda, justificado por la disminución del ancho de la curva, lo que se traduce en una mejor aproximación de las características físicas del suelo en bajas profundidades.

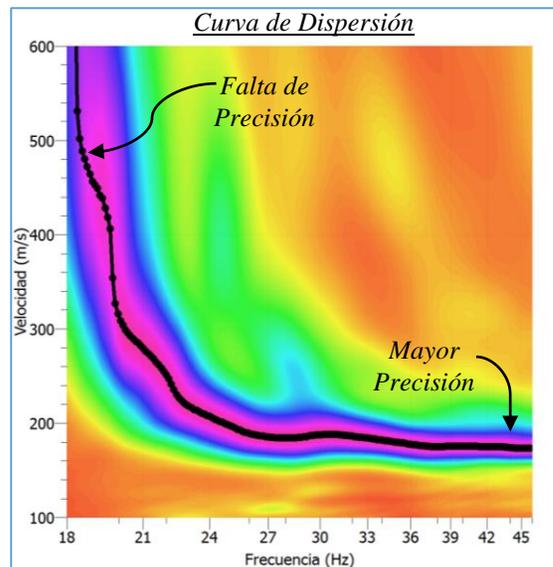


Figura 7.9: Curva de dispersión de los datos adquiridos por los geófonos usando un martillo como fuente activa.

## 8.0 CONCLUSIONES

Considerando la caracterización del equipo, en conjunto del análisis de los ensayos con señales de distinta naturaleza y vibración sobre el suelo, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

El vibrador está capacitado para reproducir señales aleatorias, pero con restricciones, por un lado opera incuestionablemente con amplios rangos de frecuencias, pero es incapaz de reproducir el espectro de desplazamiento del registro de entrada, producto de su amplificación desigual en función del ancho de banda. Por otro lado, al filtrar un registro en un rango acotado de frecuencias, mejora la respuesta, más en el caso límite de una señal periódica, el equipo emula con certeza la frecuencia de envío. Por lo tanto su uso se limita a encontrar formas modales y períodos fundamentales de estructuras a escala, quedando como opcional su uso, ya sea, en registros aleatorios o sintéticos, considerando la influencia del ancho de banda en la respuesta del vibrador.

Respecto a la variación no lineal del desplazamiento en función de la frecuencia y voltaje (VFD), es contraproducente utilizar un solo factor de reducción para un registro sísmico completo. El vibrador al tener una gran variación del desplazamiento en un mismo rango de frecuencia, amplifica de forma heterogénea un registro sísmico. En particular, al descomponer un registro de desplazamientos como serie de Fourier, la amplificación será distinta para cada nivel de frecuencia. Entonces el vibrador es incapaz de reproducir registros sísmicos con exactitud, por lo tanto como solución preliminar se propone descomponer un registro como serie de Fourier y obtener para cada desplazamiento en función de la frecuencia un factor de reducción distinto, dependiendo si es mayor al admisible por el vibrador.

Los resultados del ensayo de suelos, confirman que el vibrador posee energía insuficiente para visualizar información en frecuencias bajo 10 [Hz], rango que permite estudiar a mayor profundidad el suelo, no obstante, por el rápido decaimiento de la señal de envío, el vibrador puede ser usado en estudios que contemplen un área pequeña de interés, como en pavimentos, o en capas delgadas de suelo, usando sensores más cercanos a la fuente. Debido a las interferencias en las mediciones, los ensayos en suelo deben ser realizados en sectores con condiciones ambientales óptimas, minimizando el ruido y que su amplitud sea opacada por la señal coherente. Paralelamente una forma de tratar la pérdida de energía entre sensores es estudiar el amortiguamiento y cuantificación del suelo.

Aparentemente la potencia del equipo está limitada por el controlador de posición, porque cuando el equipo trabaja con los máximos voltajes admisibles, falla la localización de la posición de origen.

Lamentablemente el vibrador queda inoperativo sin el controlador, por lo que termina reduciendo su máximo alcance.

Considerando los estudios de caracterización del equipo se entregan recomendaciones de uso:

Para utilizar de forma eficiente el vibrador es necesario tener en consideración los factores más influyentes en su funcionamiento, uno de ellos es el nivel de ganancia del amplificador, que intensifica la señal de forma lineal. Se recomienda utilizar valores altos, de preferencia trabajar en *Cal.*, para garantizar una respuesta óptima del equipo y solo utilizar el modo Voltaje.

El vibrador responde a variaciones de voltaje por ende se restringe reproducir señales constantes o cuyo último valor sea distinto de cero. El voltaje máximo sugerido es de 15 [V], marcado en el panel del amplificador, sin embargo es posible utilizar valores mayores en frecuencias altas, desde 5 [Hz] en adelante, el límite puede ser sobrepasado siempre y cuando la operatividad del equipo no se vea afectada. Con respecto a la frecuencia mínima de funcionamiento, en la posición horizontal es 0,2 [Hz] para ondas periódicas, quedando como límite máximo 200 [Hz], para el máximo nivel de ganancia.

En otro aspecto, la repetitividad del vibrador permanece constante, independiente del número de repeticiones de un registro y peso sobre el equipo, generando diferencias menores al 1% de los datos.

Sobre los objetivos planteados es posible mencionar:

Actualmente, el vibrador cuenta con los procedimientos de encendido, apagado y operatividad de señales tanto aleatorias (con restricciones), como periódicas. También con un Panel Frontal que permite reproducir ondas en él, también adquirir datos físicos y ver en tiempo real su respuesta de desplazamiento. Por lo que la implementación del equipo queda completa.

## **BIBLIOGRAFÍAS**

SPEKTRA GMBH (2011). "Manual APS 109." Zero Position Controller for APS 400 SHAKER, Version 1.9.5: 1-55

APS Dynamics (2012). "INSTRUCTION MANUAL APS 0412 REACTION MASS ASSEMBLY FOR APS 400 ELECTRO-SEIS® SHAKER." Systems for Generating Controlled Vibration a subsidiary of SPEKTRA: 1-18

APS Dynamics (2013). "INSTRUCTION MANUAL ELECTRO-SEIS® APS 400 SHAKER." Systems for Generating Controlled Vibration a subsidiary of SPEKTRA, Serial Number 1273: 1-44

APS Dynamics (2013). "INSTRUCTION MANUAL Type APS 145 POWER AMPLIFIER." Systems for Generating Controlled Vibration a subsidiary of SPEKTRA: 1-17

Banner (2013). "U-GAGE S18U Ultrasonic Series Sensor, Analog Output"

Bench-top Instrument Manual: Sweep Function Generator Operation Manual.

Berger, J., D. C. Agnew, R. L. Parker and W. E. Farrell (1979). "Seismic system calibration: 2. Cross-spectral calibration using random binary signals." Bulletin of the Seismological Society of America 69(1): 271-288.

Bitter R., T. Mohiuddin and M. Nawrocki (2001). "LabVIEW™ Advanced Programming Techniques".

Carrillo, J., N. Bernal Ruiz and P. Porras (2013). "Evaluación del diseño de una pequeña mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sismo-resistente."

Dunnicliff, J. (1993), "Geotechnical Instrumentation for monitoring field performance", Ed. Wiley-Interscience.

Geophysics, Vol. 64, NO. 3 (Mayo-Junio 1999); P. 800-808.

Holcomb, L. G. (1989). "A direct method for calculating instrument noise levels in side-by-side seismometer evaluations." HISTORY 2: 1.

Leiva, J. (2007). "Diseño y fabricación de mesa vibratoria uni-direccional con un actuador hidráulico". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 1997: LabVIEW Quickstart Guide.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 2000: Data Acquisition Basics Manual.

National Instruments (2003). "LabVIEW User Manual." Graphical Programming Environment and Techniques for Building Applications in LabVIEW: 1-349

National Instruments (2013). "NI CB-68LP/CB-68LPR User Guide". Unshielded 68-Pin Screw Terminal Connector Block Accessories.

Park, C. B., R. D. Miller and j. Xia (1999). "Multichannel analysis of surface waves:." Geophysics v. 64: 800-808.

Sleeman, R., A. Van Wettum and J. Trampert (2006). "Three-channel correlation analysis: a new technique to measure instrumental noise of digitizers and seismic sensors." Bulletin of the Seismological Society of America 96(1): 258-271.

Tektronix User's Manual: Digital Real-Time Oscilloscopes.

Torres, M., et al. (2014). "Instrumentación De Una Mesa Vibradora Para La Obtención De Parámetros del Movimiento Del Terreno Debido A Sismos Utilizando Registros de Aceleración." SOMI Congreso de Instrumentación XXIX: 1-7.

Vega, P. A. (2001). "Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos sismológicos en tiempo real." Earth Sciences Research Journal; núm. 5 (2001); 73-81 Earth Sciences Research Journal; núm. 5 (2001); 73-81 2339-3459 1794-6190.

Webster, J.G. (1998), "Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook", Ed. CRC Press.

# ANEXO A: ESPECIFICACIONES DE ACELERÓMETRO UTILIZADO:

