

# Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos sísmológicos en tiempo real

PEDRO A. VEGA V.  
pav@terra.com pav@tutopia.com  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

## RESUMEN

El objetivo propuesto fue el diseño, caracterización y puesta en operación de un sistema de adquisición de datos en tiempo real. Para lograrlo se partió de un sismómetro existente tipo L-4C con base en el cual se implementaron el software y hardware requeridos para obtener la estación de registro sísmológico. El hardware seleccionado fue una tarjeta de adquisición de datos fabricada por National Instruments, referencia DAQ-516, la cual entre sus principales características cuenta con ocho canales de entrada analógica, y una tasa de muestreo de 50.000 muestras por segundo. El software utilizado fue el LabVIEW 6.0, también de National Instruments, un software de programación gráfica que controla todas las posibilidades de la tarjeta de adquisición de datos y cuenta adicionalmente con poderosas herramientas de tratamiento de datos. Los otros componentes del sistema son un computador portátil y una tarjeta de acondicionamiento de señales. Una vez implementado y probado el sistema de captura de datos, se procedió a realizar la caracterización del sistema. Aquí se determinó el ruido instrumental y se caracterizó el sensor, para lo cual se diseñó y construyó una mesa vibratoria. Mediante una conexión a la red Internet y un software del tipo ATOMTIME 98, se realiza la sincronización del reloj del sistema.

PALABRAS CLAVE: ADQUISICIÓN EN TIEMPO REAL, INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA, SOFTWARE DE DISEÑO EN INSTRUMENTACIÓN

## ABSTRACT

The proposed objective was the design, characterization and setting in operation of a real time data acquisition system. Starting with L-4C type existent seismometer for which was implemented the software and hardware required to obtain the seismological registration station. The selected hardware was a National Instruments data acquisition card DAQ-516, this board has 8 analog input channels (16 bit) and 50 ks/s. The used software LabVIEW 6.0 was also National Instruments which is a graphic programming software that controls all card's data acquisition possibilities and additionally has powerful data handling tools. The other system components are a portable computer and a signal conditioning card. Once implemented and proven the data acquisition system, we proceeded to carry out the characterization of the system. Here the instrumental noise was determined, and the sensor was characterized for this a shaking table was designed and built. By means of an Internet connection, the system's internal clock synchronization is carried out by means of ATOMTIME 98 software.

KEY WORDS: REAL TIME ACQUISITION, SEISMICAL INSTRUMENTATION, SOFTWARE FOR DESIGN OF INSTRUMENTS

## INTRODUCCIÓN

Las ciencias naturales en general, y en especial la geofísica, están fundamentadas en las mediciones realizadas de los parámetros que caracterizan los fenómenos que nos rodean, para, a partir de estos datos, inferir la realidad que se oculta a nuestros sentidos. Es por esto que para obtener conclusiones acertadas se debe prestar la mayor atención al dato mismo, ya que partiendo de datos erróneos se llega a conclusiones alejadas de la realidad.

Por tanto, en el diseño de un sistema de medición es vital conocer principalmente la variable por medir, sus efectos, órdenes de magnitud y factores que la afectan. Con esta información se pueden diseñar los sensores adecuados, filtrar los efectos que generen distorsión y obtener la señal más pura posible.

Aquí se trata principalmente del diseño, caracterización e implementación de un sistema de medición de movimientos de la Tierra, partiendo de un sismómetro tipo L-4C, y el diseño, construcción e implementación de un prototipo de mesa vibratoria para la calibración de sensores sísmicos.

## CONCEPTOS BÁSICOS

### SISTEMAS 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

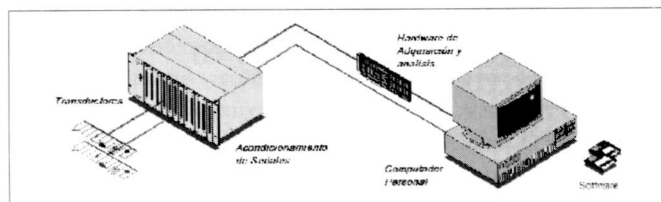


Figura 1. Composición básica de un sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos incluye los sensores, equipos y circuitos para adecuación de señales y transmisión de datos hacia el sistema de cómputo.

El sistema de cómputo realiza el procesamiento de los datos recolectados, ya que aquí se ejecutan rutinas de adquisición, proceso, presentación y registro de los datos.

**EL SISMÓMETRO**

Un sismómetro es un instrumento que permite medir vibraciones de la Tierra, causadas por una gran variedad de procesos, principalmente los terremotos. En general consta de:

- Un sistema inercial, como por ejemplo una masa móvil, acoplada a una cubierta rígida mediante un resorte y un elemento amortiguador.
- Un sistema transductor, que produce una señal de salida, correspondiente al movimiento relativo de la cubierta con respecto a la masa, y que sirve como un punto de referencia debido a su gran inercia.

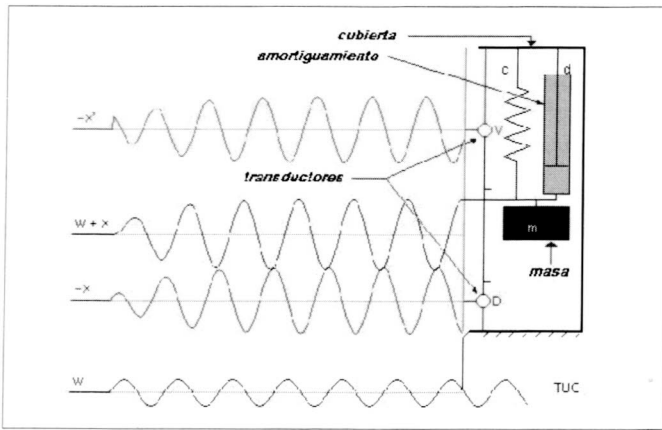


Figura 2. Diagrama esquemático de un sismómetro (Keller, Fritz, 1997)

Para “muy altas frecuencias” del movimiento del suelo (comparado con la frecuencia natural del sistema), la masa suspendida tiende a mantener su posición original, y su desplazamiento relativo a la cubierta representa el desplazamiento del suelo.

Para “muy bajas frecuencias” del movimiento del suelo, la masa tiende a seguir el movimiento de la cubierta y el desplazamiento relativo tiende a ser cero.

Una descripción cuantitativa de esta característica pasa altos, que relaciona el desplazamiento de la masa con el desplazamiento del suelo – especialmente entre los extremos “muy baja” y “muy alta” frecuencia– puede deducirse a partir del equilibrio de todas las fuerzas internas y externas que actúan sobre la masa, y que conduce a la ecuación diferencial de segundo orden (Keller, 1997):

$$-m \cdot [x''(t) + w''(t)] - dx'(t) - c \cdot x(t) = 0$$

Que relaciona:

$x(t)$ ,  $x'(t)$  y  $x''(t)$  = Desplazamiento relativo de la masa, velocidad y aceleración

y  $w''(t)$  = Aceleración del suelo (= cubierta)

Con los parámetros del sistema mecánico:

$m$  [kg] = Masa suspendida, resultante de una fuerza inercial, proporcional a la aceleración total  $x''(t) + w''(t)$

$d$  [Ns/m] = Constante de amortiguamiento, que produce una fuerza proporcional a la velocidad  $x'(t)$  y que refleja las pérdidas internas.

$c$  [N/m] = Constante del resorte, resultante en una fuerza proporcional al desplazamiento de la masa de su punto de equilibrio (= posición cero), y proporcional al desplazamiento relativo de la masa  $x(t)$ .

**INSTRUMENTO VIRTUAL**

*¿Qué es un instrumento virtual?*

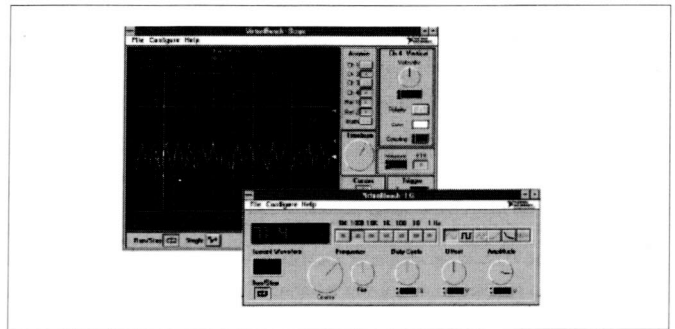


Figura 3. Instrumento virtual

Es la combinación de hardware y software, usados por un computador personal (PC), para cumplir la función de un instrumento tradicional. En general es una aplicación particular de un sistema de adquisición de datos.

El software es la clave del instrumento virtual, ya que éste es el que sustituye al instrumento tradicional. El software desempeña un papel vital en el desarrollo de sistemas de adquisición de datos y control, además de dirigir la interacción de las especificaciones de hardware.

El software se elige de acuerdo con las necesidades y preferencias del usuario. Muchos factores afectan la elección del software, incluidos aplicaciones, requerimientos, el hardware del computador, el sistema operativo y el hardware de instrumentación. El software que el usuario escoge debe ser versátil, para adaptarse a diversas arquitecturas de computadores, a instrumentos y dispositivos diferentes de adquisición de datos.

La tarjeta de interfaz con el PC puede ser de dos tipos: tarjetas insertadas dentro del computador (*plug in*) o instrumentos con puertos de comunicación que operan independientemente (*stand alone*).

**TIEMPO REAL**

El término “tiempo real” es uno de los más ampliamente usados en la industria actualmente; sin embargo, existen al respecto algunas concepciones erróneas.

Una definición ampliamente aceptada de sistema de tiempo real es la siguiente: “Aquellos sistemas en los cuales las correcciones del sistema dependen no sólo de los resultados lógicos de los cálculos sino también

del tiempo en el cual se producen los resultados. La distinción entre tiempo real y no tiempo real es que los sistemas de tiempo real deben cumplir con restricciones de tiempo”.

Los sistemas de tiempo real se clasifican frecuentemente en duros (*hard*) y blandos (*soft*). Los sistemas duros se precisan libres de fallas para satisfacer todos los requerimientos de respuestas de tiempo en forma constante, en cualquier circunstancia y ante cualquier combinación de eventos, como ocurre en los sistemas de control de reactores nucleares en las plantas generadoras de energía. Un sistema blando está más relacionado con el desempeño promedio; de éste se requiere solamente que en la mayoría de los casos la respuesta de tiempo caiga dentro de un margen admisible. Estos sistemas toleran salidas de funcionamiento ocasionales, como ocurre en el caso de los cajeros automáticos.

**DESARROLLO DEL SISTEMA**

Usando el software LabVIEW se realizó la siguiente rutina de adquisición, con el cual se capturan las señales provenientes del sensor y se almacenan en un archivo de texto que graba la fecha, hora y magnitud en voltios para posterior análisis.

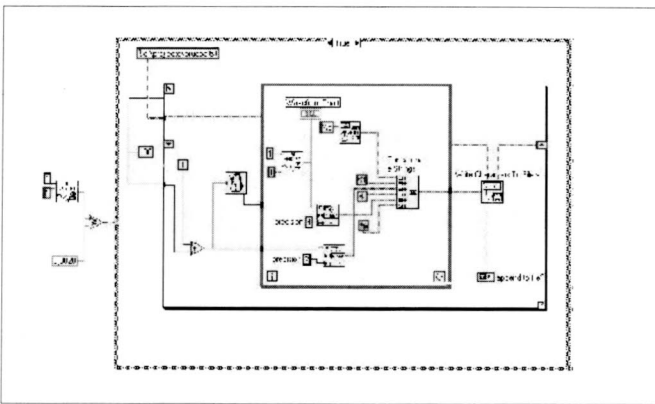


Figura 4. Código gráfico para el sistema de adquisición de datos sísmicos

Igualmente se diseñó en el panel un frontal como el que se muestra en la figura 5.

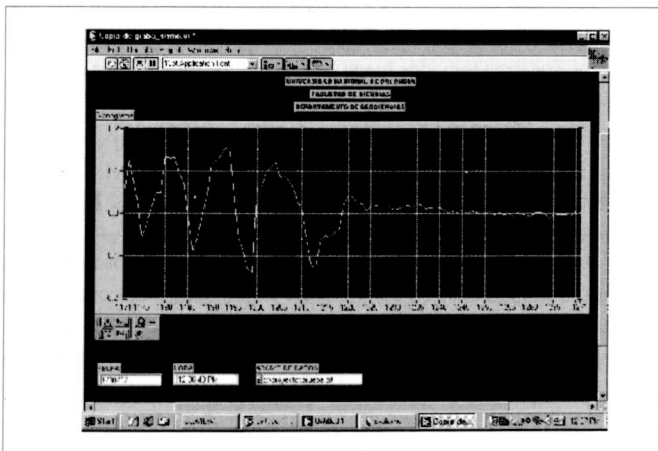


Figura 5. Panel frontal del sistema de adquisición de datos

Cuando se está ejecutando este programa, se sensa permanentemente la entrada del primer canal de la tarjeta, comparándolo con un valor predefinido en una constante numérica; este valor debe corresponder al máximo nivel de ruido del sitio donde se instala el sistema, y, a pesar de ser arbitrario, es el que determina cuál es la amplitud de entrada a partir de la cual consideramos que se presenta un evento de interés.

Una vez la rutina de arranque detecta a la entrada del canal análogo una tensión mayor al valor predefinido en la constante numérica, se inicia un Loop Case, el cual ejecuta las siguientes funciones:

- Leer datos de la tarjeta de entrada analógica
- Leer la hora del computador.
- Concatenar las variables string para formar la cadena con la fecha que se registrará en el archivo.
- Concatenar la cadena de fecha y hora con el dato leído desde el primer canal análogo.
- Crear un archivo con los datos que se leen, como el de la figura 6.
- Detener la grabación después de transcurrido el número de lecturas que se ha predefinido.

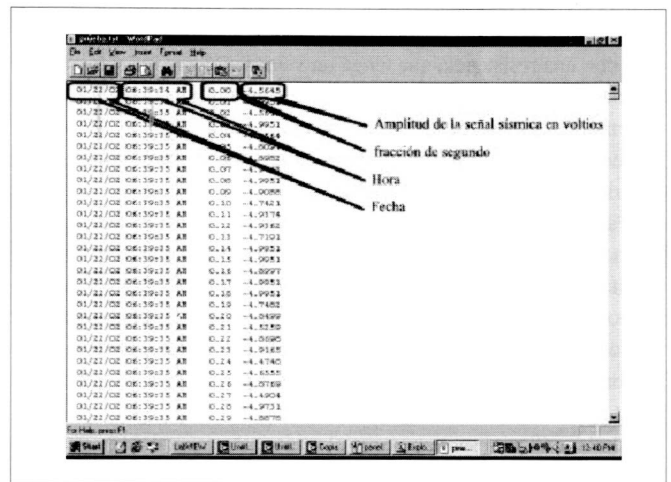


Figura 6. Ejemplo de archivo de datos creado por la rutina

**CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA**

*RUIDO INSTRUMENTAL*

Todos los sismógrafos modernos usan amplificadores semiconductores, los cuales –como otros componentes electrónicos– producen ruido electrónico continuo cuyo origen se distribuye por el equipo. Los transductores electromagnéticos, tales como los usados en geófonos, también producen ruido electrónico térmico (ruido resistivo). Las contribuciones del ruido de los semiconductores y del ruido resistivo es frecuentemente comparable, y juntos limitan la sensibilidad del sistema. Los sismógrafos pueden también sufrir perturbaciones transitorias originadas en semiconductores ligeramente defectuosos o en partes mecánicas cuando están sujetas a esfuerzos.

Los sismómetros y geófonos electromagnéticos son sensores pasivos cuyo auto-ruido es de origen puramente térmico, y no aumenta a bajas frecuencias como ocurre con elementos activos (disipadores de potencia). El nivel de señal a la salida es, sin embargo, comparativamente baja, por lo que se debe insertar un preamplificador de bajo ruido entre el sensor y el registrador (Wielandt, 2001).

Infortunadamente, el ruido del preamplificador aumenta a bajas frecuencias y limita la sensibilidad general. La sensibilidad está normalmente limitada por el ruido del amplificador; sin embargo, este ruido no depende del amplificador solamente sino de la impedancia del transductor. Hasta cierta impedancia el ruido del amplificador es aproximadamente constante, pero luego aumenta linealmente con la impedancia, debido a una corriente de ruido que fluye desde la entrada del amplificador. Por otro lado, la señal de voltaje aumenta con la raíz cuadrada de la impedancia. La mejor relación de señal a ruido se obtiene por tanto con una impedancia óptima definida por la esquina entre el voltaje y el ruido de corriente, la cual es diferente para cada tipo de amplificador, y depende también de la frecuencia, y viceversa: cuando el transductor es dado (nuestro caso) el amplificador debe ser seleccionado para bajo ruido a la impedancia y a la frecuencia de trabajo (Wielandt, 2001).

El ruido electrónico puede predecirse cuando se conocen los datos técnicos del sensor y del amplificador. El ruido semiconductor aumenta a bajas frecuencias, por lo que se deben aplicar las especificaciones del amplificador a las frecuencias sísmicas más que a las frecuencias de audio.

El ruido del amplificador puede observarse bloqueando el sensor o inclinándolo hasta que la masa esté detenida firmemente, o sustituyéndolo con una resistencia que tenga un valor igual a la resistencia de la bobina. Si estas manipulaciones no reducen significativamente el ruido, entonces el sismógrafo no resolverá el ruido sísmico. Un sensor bloqueado o una resistencia no representan exactamente la impedancia eléctrica de un sensor desbloqueado.

Para caracterizar el ruido del amplificador de nuestro sistema, utilizamos un potenciómetro de 5K lineal, con el cual ajustamos una resistencia igual a la resistencia vista desde el amplificador –y que corresponde a la resultante de la interna de la bobina de señal del sensor y la de amortiguamiento, es decir 3,9 kΩ–, se realizó un registro de prueba utilizando la rutina del LabVIEW descrita antes y se obtuvo el resultado mostrado en la figura 7.

De la gráfica observamos que el ruido instrumental de nuestro sistema es de +/- 50 mV, lo que involucra la tarjeta de adquisición de datos, el PC y el software.

Este ruido se redujo instalando un filtro capacitivo de 50 pF a la entrada del canal. Los resultados fueron los mostrados en la figura 8.

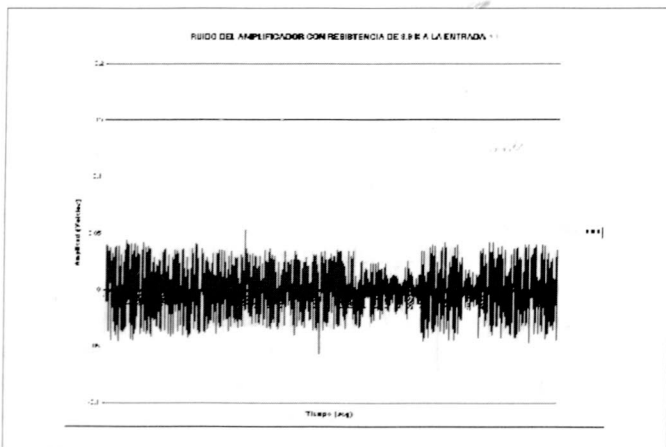


Figura 7. Ruido instrumental registrado con el sistema de adquisición de datos antes de filtro

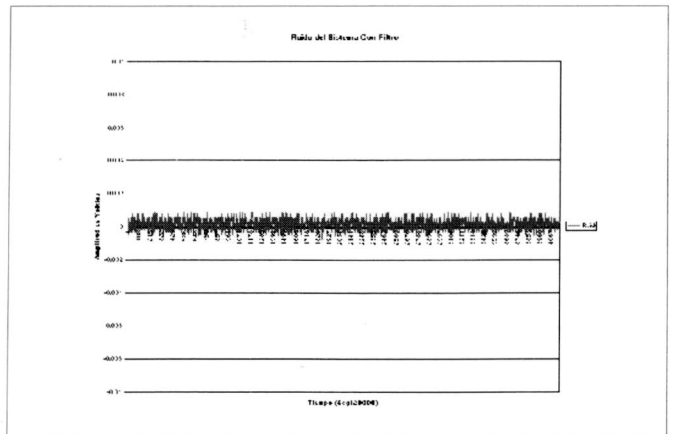


Figura 8. Señal de ruido con el condensador de filtro a la entrada del canal

Adicionalmente se realizaron mediciones de ruido con el sensor conectado, es decir, tomando registros del sistema en el laboratorio.

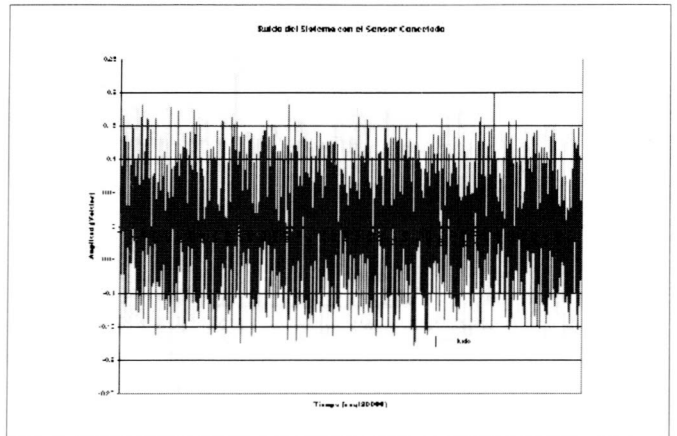


Figura 9. Señal de ruido con el sensor conectado

En el caso con el sensor conectado, hay que tener en cuenta que aquí se está registrando el ruido ambiente, es decir, se está registrando todo aquello que influye sobre el sensor en el lugar en donde está instalado. Aquí se observan amplitudes de +/- 0.15 voltios.

En los registros tomados luego de instalar el condensador de entrada, se puede observar que las amplitudes de las señales de ruido se reducen hasta  $\pm 0.001$  voltio.

#### CALIBRACIÓN CON ONDAS SENO

Con una entrada senoidal, la salida de un sistema lineal es también senoidal, y la relación de las dos amplitudes es el valor absoluto de la función de transferencia. Por tanto, un experimento con ondas seno permite un chequeo inmediato de la función de transferencia, sin ningún conocimiento *a priori* de su forma matemática y sin modelamiento de la forma de onda; éste es frecuentemente el primer paso en la identificación de un sistema desconocido.

Cuando solamente se tiene disponible equipo análogo, la bobina de calibración o la mesa agitadora deberán ser alimentadas con una señal

de prueba senoidal, y se deben registrar las señales de entrada y salida en un registrador X-Y.

Posteriormente, las señales de deberán ser graficadas como una elipse de Lissajous, a partir de la cual tanto la amplitud como la fase se pueden leer con buena precisión.

Los resultados obtenidos para nuestro sistema, y a una frecuencia de 1 Hz, fueron los siguientes:

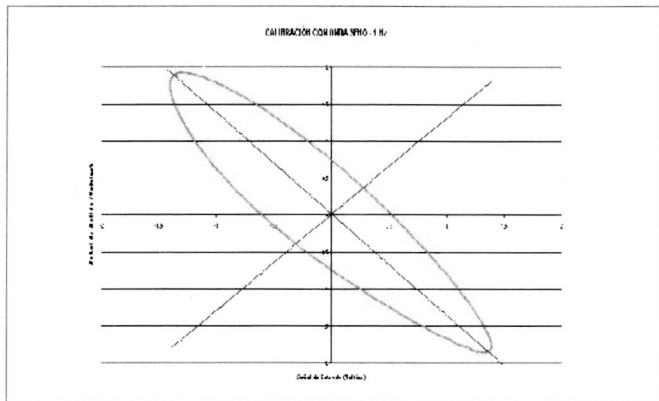


Figura 10. Gráfico para medida de la fase en el sísmómetro L4C para una frecuencia de 1 Hz

A partir de este gráfico se puede calcular el desfase mediante la fórmula:

$$\varphi = \pm 2 \arctan g \left( \frac{d_1}{d_2} \right) = \pm 2 * \arctan g \left( \frac{2.1}{10.5} \right) = \pm 22.62$$

Para la realización de la verificación de la respuesta en frecuencia del sensor, se alimentó una señal senoidal suministrada con un generador marca Hewlett Packard, modelo 8116A por la bobina de calibración del sensor, y se registraron tanto la entrada como la salida, tomando un registro de 30.000 lecturas para cada una de las siguientes frecuencias: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 150 y 200 Hz.

Con los datos así obtenidos, se realizó una curva de respuesta en frecuencia en la cual se graficó la amplitud de salida contra la frecuencia, y a partir de la cual se puede establecer que la frecuencia de resonancia de este sensor es de 1 Hz.

Una vez determinada mediante este procedimiento la frecuencia natural, se procedió en esta frecuencia a realizar pruebas de entrada/salida a diferentes niveles de voltaje, con lo cual se pudo establecer la respuesta del sensor en amplitud, la cual tiene una forma funcional como la que se muestra en la figura 12.

**RESPUESTA ESCALÓN Y PRUEBA DE LEVANTAMIENTO DE PESO**

Las forma más simple pero solamente moderadamente precisa de calibración es observar la respuesta del sistema a una señal de entrada escalón. Ésta puede ser generada interrumpiendo una corriente a través de la bobina de calibración, o aplicando y removiendo una fuerza mecánica constante sobre la masa sísmica.

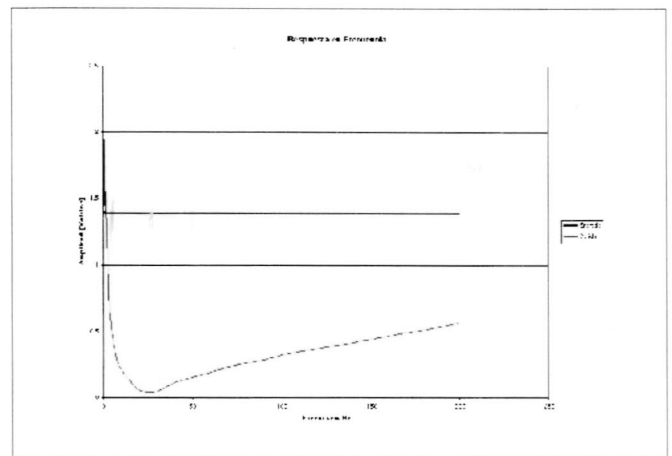
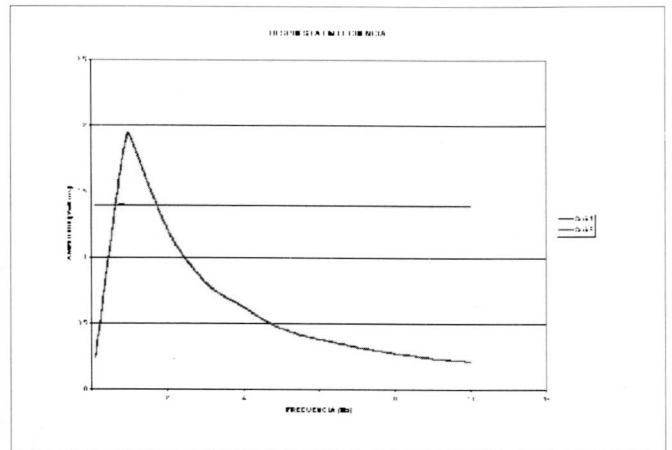


Figura 11. Respuesta en amplitud del sensor L-4C

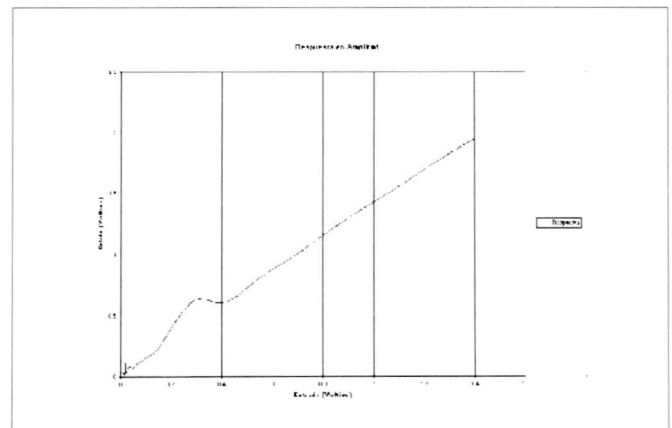


Figura 12. Respuesta en amplitud del sensor L-4C

En el contexto de calibración relativa, el método de la respuesta escalón es todavía útil como una prueba rápida e intuitiva, y tiene la ventaja de que puede evaluarse manualmente. La figura 13 muestra la respuesta escalón característica de filtros de segundo orden pasa alto, pasa banda y

pasa bajo con un amortiguamiento crítico de  $1/\sqrt{2}$ . Cada respuesta es una oscilación fuertemente amortiguada alrededor de su valor asintótico. Con el amortiguamiento especificado, los sistemas son filtros Butterworth, y la amplitud decae hasta  $e^{-\pi}$  o 4.3% dentro de un semiciclo. La relación de dos amplitudes subsiguientes de polaridad opuesta es conocida como razón de *overshoot*, y puede ser evaluada para el amortiguamiento numérico  $h$ , donde  $x_i$  y  $x_{i+n}$  son dos amplitudes  $n$  períodos alejada, con  $n$  entero o semi-entero, entonces (Wielandt, 2001):

$$\frac{1}{h^2} = 1 + \left( \frac{2\pi n}{\ln x_i - \ln x_{i+n}} \right)^2$$

El período libre puede en principio también ser determinado a partir de la respuesta de impulso o escalón de un sistema amortiguado, pero debe preferiblemente ser medido sin amortiguamiento eléctrico de tal forma que se puedan observar más oscilaciones. Un sistema con período libre  $T_0$  y amortiguamiento numérico  $h$ , oscila con un período  $T_0 / \sqrt{1-h^2}$  y la relación de *overshoot*  $e^{-\pi \cdot h} / \sqrt{1-h^2}$  (Wielandt, 2001).

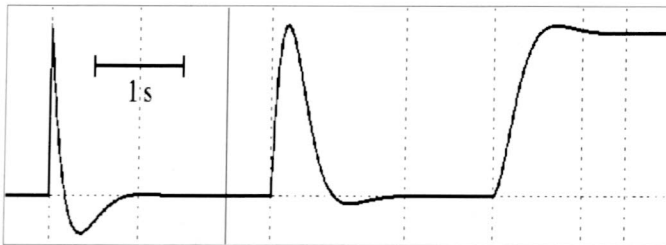


Figura 13. Respuestas escalón normalizadas de filtros de segundo orden pasa altos, pasa banda y pasa bajo

En este caso se utilizó una onda cuadrada de 0.1 Hz, con la cual se probó la respuesta a un impulso. La figura 14 muestra la respuesta a esta onda, a partir de la cual, y utilizando la fórmula antes descrita, permitió calcular el amortiguamiento  $h$ , y posteriormente el período libre.

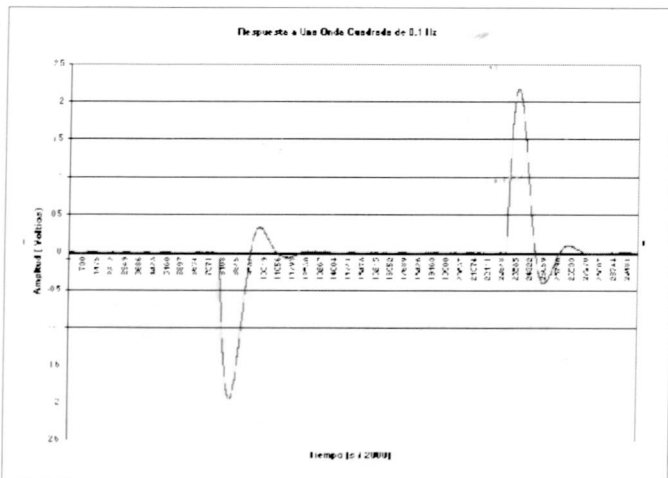


Figura 14. Respuesta a una onda cuadrada de 0.1 Hz

A partir de la figura se midió la amplitud de dos máximos consecutivos

Max1 = -4.24

Max2 = +0.27

Max3 = -0.08

Max4 = +0.02

Aplicando la fórmula se obtiene  $h = 0.40$

Midiendo el período de oscilación en la figura se obtiene  $T = 1.021$  s

Por tanto  $T_0 = 0.99$  segundos

Calculando la relación de *overshoot* mediante la fórmula se obtiene:

$$e^{-\pi \cdot h} / \sqrt{1-h^2}$$

Relación de *overshoot* = 0.34

Haciendo uso de la fórmula del manual MEQ800-B se puede calcular entonces el amortiguamiento del sensor:

Coefficiente de amortiguamiento total:

$$b_t = b_0 + b_c$$

donde  $b_0 = 0.28$  para *shunt* abierto, es decir sin resistencia de amortiguamiento y

$$b_c = \frac{1.1 \cdot R_b}{(R_b + R_s)}$$

$R_b$  = Resistencia de la bobina

$R_s$  = Resistencia del *shunt*

Aplicando estas fórmulas se tiene un amortiguamiento de 0.61 (utilizando los valores obtenidos para  $R_b$  y  $R_s$ ).

#### CALIBRACIÓN SOBRE MESA VIBRADORA

Usar la mesa vibradora es la forma más directa de obtener una calibración. En la práctica, sin embargo, la precisión es usualmente pobre por fuera de la banda de frecuencias comprendidas entre 0.5 y 5 Hz. A frecuencias mayores, una mesa vibradora cargada con un sismómetro puede desarrollar resonancias parásitas, y las fuerzas inerciales pueden causar movimientos no deseados de la mesa. A bajas frecuencias, los máximos desplazamientos ocasionan que la relación señal-ruido sea insuficiente, y el movimiento puede ser no uniforme debido a fricción o rugosidad en los rodamientos. Aún peor, la mayoría de las mesas vibradoras no producen un movimiento puramente translacional sino también alguna inclinación. Esto tiene dos efectos indeseables: la aceleración angular puede ser sensada por el sismómetro, y la gravedad puede estar acoplada dentro de la señal sísmica. La inclinación puede ser catastrófica para las componentes horizontales a períodos largos, ya que el error aumenta con el cuadrado del período de la señal. Se puede pensar que una inclinación de 10 mrad por mm de movimiento lineal no tiene importancia; sin embargo, una inclinación así inducirá a períodos de 30 segundos, señales sísmicas el doble de largas que las originadas por el movimiento lineal. A períodos de 1s, el efecto de la misma inclinación podría despreciarse. Mediciones de períodos largos en una mesa vibratoria, si fueran posibles, requerirían cuidados extremos (Wielandt, 2001).

Para realizar la caracterización absoluta del sensor se diseñó una mesa de agitación basada en una bobina móvil a frecuencia y amplitud variable, con la cual se pudo encontrar la respuesta del sensor en un rango de frecuencias entre 0.1 y 100 Hz.

La parte básica es una bobina móvil que se encuentra en un campo magnético constante generado por un imán permanente. Esta bobina es alimentada con una señal de corriente, a la cual se le puede controlar la frecuencia, la amplitud y la forma. Dependiendo de la forma de la señal recibida, esta bobina se desplazará desde su posición de equilibrio, siguiendo la forma de la señal.

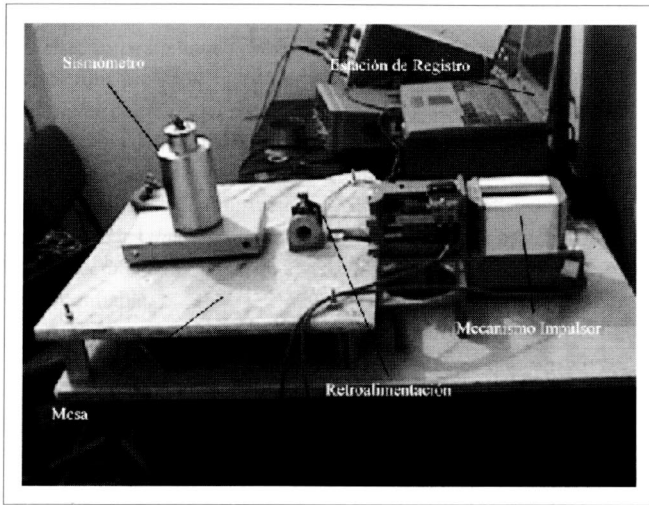


Figura 15. Mesa vibradora diseñada para calibrar el sensor

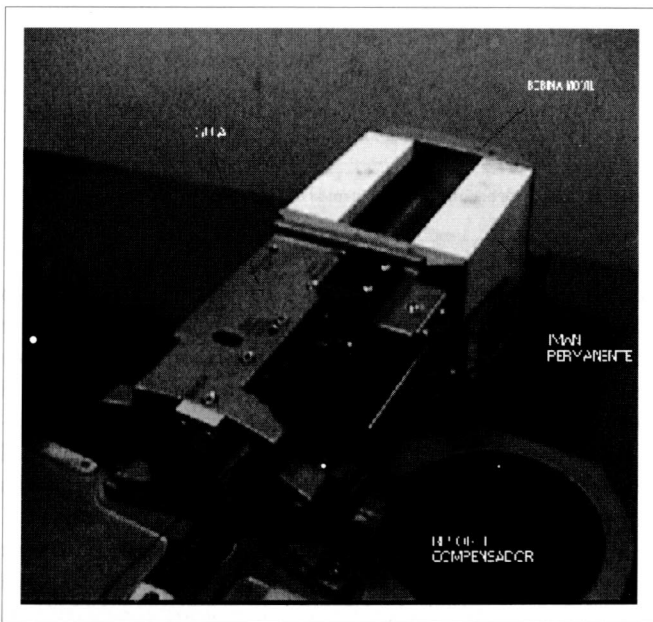


Figura 16. Distribución de elementos del mecanismo impulsor

La mesa vibradora está compuesta por dos partes principales: el servomecanismo (bobina, imán permanente y guía) y la parte electrónica de control (generador de frecuencia, fuente de alimentación, etapa de control y etapa de potencia). El servomecanismo controla el movimiento del sensor mediante una guaya de acero.

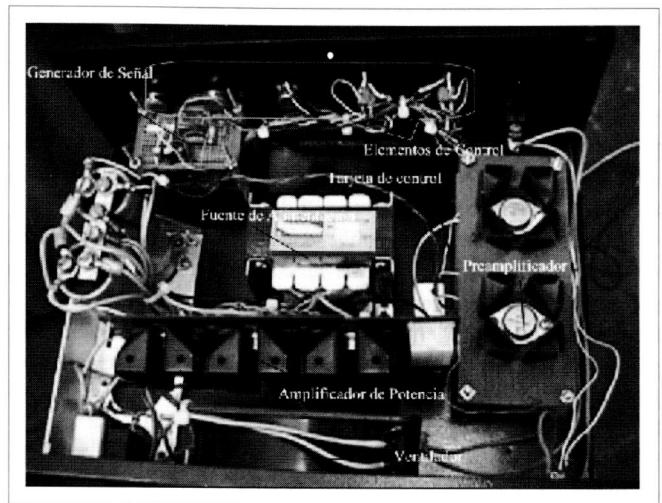


Figura 17. Distribución de elementos dentro del módulo de control

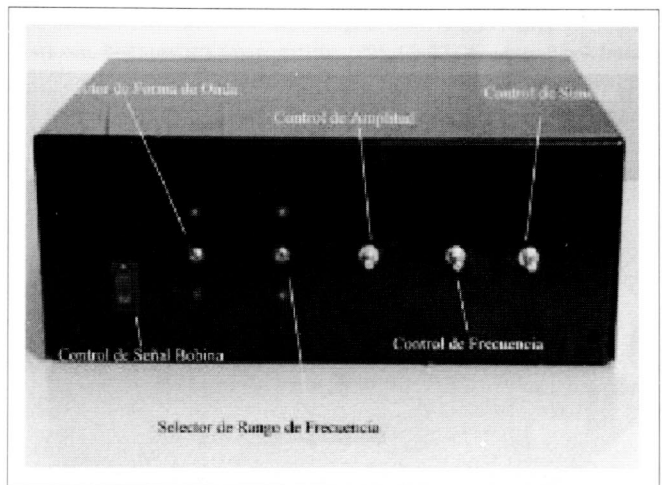


Figura 18. Unidad de control

La fuente de alimentación está constituida principalmente por dos partes; una regulada (compuesta por dos reguladores 7815 y 7915) que suministra la potencia regulada de +15 y -15 voltios D.C. a la parte de control, y una no regulada que proporciona el voltaje que mantendrá la corriente de alta en la bobina; está constituida por un transformador y un puente de diodos como rectificador de onda completa.

La etapa de generación de frecuencia está basada en un circuito integrado LM 8038, que mediante la conmutación de tres condensadores permite variar la frecuencia entre 0.1 Hz y 100 Hz aproximadamente. Este circuito también hace posible ajustar la simetría de la onda, amplitud y tipo (permite generar ondas cuadradas, triangulares y senoidales).

La etapa de control se basa en el circuito integrado LM324, el cual alberga cuatro amplificadores operacionales independientes. En esta etapa se controla la señal que se aplicará a la bobina mediante una etapa PID; además recibe la retroalimentación de un potenciómetro ubicado

en el camino del sensor, el cual garantiza que el servomecanismo siga exactamente el movimiento de la señal aplicada.

En esta etapa se utiliza un amplificador operacional en configuración seguidor, que permite el acople de impedancia y amplifica la corriente proveniente del generador de señales; aquí la ganancia es 1. Esto se encuentra en paralelo con otro amplificador operacional, también con configuración seguidor, que permite ajustar el recorrido de la bobina.

La señal se aplica a un amplificador operacional en configuración inversor, la cual, junto con la señal de retroalimentación tomada de un potenciómetro movido por la guaya de tracción es enviada a un amplificador que amplifica el error que existe entre el movimiento del sensor y la señal aplicada; esta señal es enviada a la etapa proporcional-integral, que a la vez le envía la señal de corrección a la bobina a través de la etapa de amplificación de potencia.

Para entregarle la corriente a la bobina se diseñó una etapa de potencia, la cual está basada en dos pares de transistores complementarios: ECG280-ECG281 (cuatro transistores) en paralelo; éstos son amplificadores de potencia de propósito general cada uno con una ganancia de 70 ( $h_{fe} = 70$ ) y una corriente máxima de colector de 12 amperios.

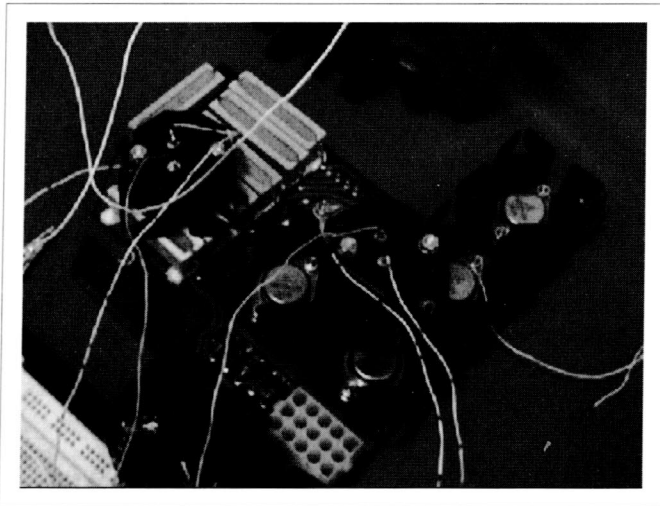


Figura 19. Etapa de amplificación de potencia

El conjunto está conectado a un PC equipado con una tarjeta de adquisición de datos, a la cual se conectan las señales: tanto la generada por la mesa vibradora como la respuesta del sensor.

Para registrar las dos señales se utilizó el software del LabVIEW que se muestra en la figura 20. Esta rutina registra dos canales en sendos archivos y permite modificar la rata de muestreo y el número de muestras tomadas, con lo que se puede seleccionar el número de ciclos de la señal que se requiera registrar, ahorrando así espacio en el disco.

En la figura 21 se muestran las curvas de respuesta obtenidas en la mesa vibradora, para posición vertical y para inclinaciones de 60 y 75. Se puede observar que para estas inclinaciones la respuesta del sensor es sobreamortiguada, ya que las amplitudes caen verticalmente y no permiten oscilaciones, debido a que la masa sísmica se frena con la cubierta.

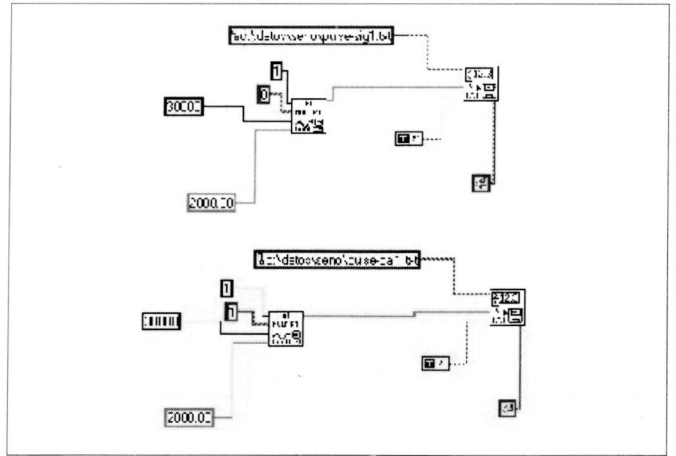


Figura 20. Subrutina de LabVIEW utilizada en las pruebas y tomas de datos de la mesa vibradora

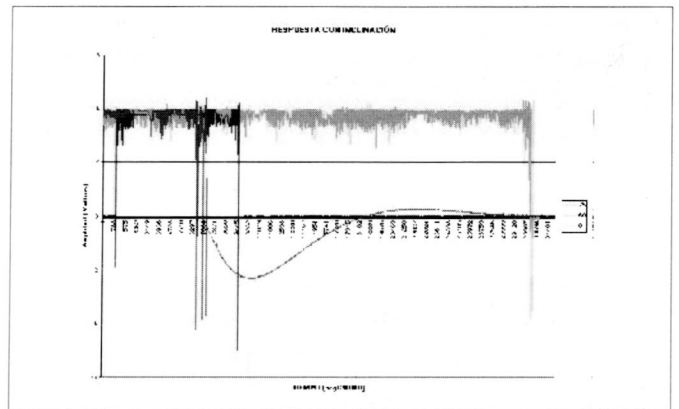


Figura 21. Respuesta a la inclinación obtenida en la mesa vibradora

### SINCRONIZACIÓN DE TIEMPO

Como se dijo al comienzo, los sistemas de tiempo real pueden ser *hard* o *soft*, y dado que este equipo tolera salidas de operación transitorias, se clasifica como *soft*. Lo que se pretende es que la etiqueta de tiempo de los eventos esté lo más cerca posible del tiempo real o correcto en el momento del evento, es decir que el tiempo del computador que adquiere los datos y que genera la etiqueta de tiempo esté sincronizado con el tiempo astral, de tal manera que los datos puedan servir en las redes sísmicas como apoyo para el cálculo de los parámetros del terremoto.

Con esto en mente, se investigaron formas posibles de sincronizar el reloj del computador con el tiempo astral. La más precisa es adquirir un reloj GPS, el cual calcula el tiempo y la posición, basado en la red de satélites de geo-posicionamiento, y genera un tren de pulsos que le entrega al computador un código con la fecha y hora exactas; con este dato se sincroniza el reloj interno del sistema.

Otra forma no tan precisa, pero mucho mas barata, es como lo hacemos en este sistema: utilizar programas de distribución a bajo costo (USD\$50), a través de la red Internet, que sincronizan el tiempo del computador con el tiempo leído de un servidor de tiempo (*time server*)



está generando permanentemente los pulsos de sincronización. Estos servidores de tiempo son sistemas basados en un reloj atómico que envía señales con la fecha y hora exactas a través de la red.

El software utilizado se denomina ATOMTIME 98 versión 2,5, que cuando se instala y ejecuta presenta una ventana en la cual se puede ver el tiempo del computador en ese momento, y algunos botones que permiten configurar la conexión, el chequeo del tiempo y una casilla donde indica el tiempo del *time server*.

Este software hace posible además tener pulsos automáticos a períodos fijos preestablecidos por el usuario para realizar la verificación y el ajuste del reloj del sistema, como se puede ver en la figura 21.

Este tipo de sistema de sincronización tiene el inconveniente de los retrasos en las redes de comunicaciones, que dependen de la congestión en las líneas de transmisión de datos y de las distancias a que se encuentren los *time server*; sin embargo, el hecho de estar permanentemente recibiendo el pulso de sincronización garantiza un reloj del sistema confiable.

Aunque este software permite un intervalo mínimo de tres horas entre chequeo y corrección del reloj, existen otros que permiten tener pulsos cada segundo, con lo cual se tendría una corrección más cercana, pero el precio se incrementa considerablemente.

## SÍNTESIS

Se concluye el capítulo sintetizando los experimentos realizados en la tabla 1, que muestra los resultados obtenidos y que caracterizan el sistema de adquisición de datos realizado.

Sólo se transcribirán algunos de los resultados con el objeto de no caer en repeticiones innecesarias.

TABLA 1. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS OBTENIDAS PARA EL SISTEMA

|    |                              |                |
|----|------------------------------|----------------|
| 1  | Rango entrada amplificador   | $\pm 5$ V D.C. |
| 2  | Rata de muestreo máxima      | 6250 s/s       |
| 3  | Resolución teórica           | 7.63 $\mu$ V   |
| 4  | Conversión A/D               | 16 Bits        |
| 5  | Sensor                       | Mark Products  |
| 6  | Relación de <i>overshoot</i> | 0.34           |
| 7  | Periodo libre $T_0$          | 0.99 seg       |
| 8  | Amortiguamiento              | 0.61           |
| 9  | Masa                         | 965.2 gr       |
| 10 | Frecuencia natural           | 1 Hz           |
| 11 | Respuesta en amplitud        | Figura 11      |
| 12 | Respuesta en frecuencia      | Figura 11      |

## CONCLUSIONES

Se diseñó, construyó e implementó un sistema de adquisición de datos sismológicos portátil, debidamente caracterizado, que permite el almacenamiento en disco de los eventos sísmicos con una etiqueta de tiempo sincronizada con el tiempo astral.

Se caracterizó el sensor Mark products L-4C para ser usado como detector de actividad sísmica, y se puede garantizar dentro de los límites establecidos en las curvas de calibración.

Se le entrega a la Universidad un equipo caracterizado con el cual se pueden realizar prácticas académicas.

Como parte del proyecto, se diseñó, construyó y probó una mesa vibratoria que permite realizar calibraciones de sensores sísmicos.

Se ha demostrado que se pueden desarrollar instrumentos y equipos con elementos que se pueden conseguir en el mercado nacional.

Es posible aplicar esta técnica a otro tipo de instrumentos en el área geofísica, con lo cual se pueden crear nuevos instrumentos y recuperar los que se encuentren deteriorados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASEA. 1990: Course C4 Remote Terminal Unit, Sindac Training.
- DEWEY, James. (To 1900). 2001: USGS National Earthquake Information Center, The Early History of Seismometry.
- HAVSKOV, Jens. 2001: Institute of Solid Herat Physics, Instrumentation of Earthquake Seismology.
- KELLER, Fritz. 1997: Institut Fuer Geophysik Der TU Clausthal, Seismometer Documentation.
- LANDTECH ENTERPRISES. 1999: Instructions on How to Calibrate a Seismograph, Modified From: Manual of Seismological Observatory Practice.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 1996: Cb-27 Connector Block Installation Guide.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 1996: Daqcard-500 User Manual.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 1997: LabVIEW Quickstart Guide.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 1998: Developing a LabVIEW Instrument Driver.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 1999: Data Acquisition Fundamentals.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. 2000: Data Acquisition Basics Manual.
- RODGERS, Peter W. 1999: Signal Coil Calibration of Electro-Magnetic Seismometers.
- SAM, Dekey. 1998: Making Windows NT a Real-Time Solution (A Technical Overview).
- SOLÉ, Enric Figueras. 1999: Diseño de aplicaciones Scada con LabVIEW.
- SPRENGNETHER INSTRUMENTS INC. 1986: Microearthquake System MEQ-800-B, Technical Manual.
- WIELANDT, Erhard. 2001: Institute of Geophysics, University of Stuttgart, Seismic Sensors and Their Calibration.