Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2012, Vol.13, No.1, pp.5- 13, ISSN 1729-3790

Mejoramiento de la calidad del registro sísmico mediante el cambio de la metodología de calibración de los sensores, caso de estudio sismómetro SM-3

Eduardo R. Diez-Zaldívar *(1), David Zuliani (2) y Fausto Pontón (2)

(1) Investigador Agregado, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIS), Santiago de Cuba, Cuba E-mail: diez@cenais.cu, diez@ictp.it.

(2) Centro di Ricerche Sismologiche (CRS), Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Italy. E-mail: dzuliani@inogs.it, fponton@inogs.it

Recibido: mayo 19, 2011	Aceptado: octubre 06, 2011

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos mediante el cambio de la metodología de calibración de los sensores sísmicos, específicamente para los sismómetros SM-3 de fabricación rusa usados en el Servicio Sismológico Nacional. Se comparan los resultados de la aplicación de los métodos analíticos de calibración empleados hasta el presente con los obtenidos mediante el método propuesto en este artículo. Sobre la base del sensor SM-3 se grafican las curvas de amplitud-fase obtenidas y se explican las diferencias entre estas, analizando distintas variantes de amortiguamiento pasivo y su incidencia en la sensibilidad del sensor así como las limitaciones inherentes a cada método. Finalmente se presenta el diseño de un circuito de realimentación electrónica, que incide en el mejoramiento del amortiguamiento del sismómetro en la vecindad de la frecuencia de oscilaciones propias del sensor y consigue una curva de respuesta en frecuencia estándar.

Palabras clave: calibración, respuesta en frecuencia, sismómetro, SM-3

Improving the quality of the seismic record by changing the sensor's calibration methodology; case study seismometer SM-3

ABSTRACT

We are presenting the results obtained using new seismic sensors calibration methodology, specifically for SM-3 Russian-made seismometers, commonly used in the National Seismological Survey. It compares the result of applying analytical calibration methods, with those obtained by the method proposed in this article. Consider SM-3 as case study, the amplitude-phase response curves are plotted with details about the differences among them, analyzing different passive and active damping procedures and its effect on the sensor sensitivity considering the limitations inherent in each method, finally we present the design of an electronic feedback loop for the improvement of seismometer damping in the vicinity of his natural oscillation frequency in order to get an standard frequency response.

Key words: Seismometer, calibration, frequency response, SM-3

**Eduardo R. Diez-Zaldívar, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIS), Santiago de Cuba, Cuba E-mail: diez@cenais.cu, diez@ictp.it.*

1. Introducción

Los terremotos tienen su origen en la liberación abrupta de la energía acumulada en el interior de la Tierra como resultado de los movimientos de las placas tectónicas que conforman la corteza terrestre, además de otros elementos como el vulcanismo y diversos fenómenos asociados a la geología y geofísica. Los estudios sobre la dinámica del planeta tienen, sin embargo, la particularidad de la inexistencia de métodos directos de análisis de su estructura interna derivados de la imposibilidad de realizar perforaciones que permitan identificar los diferentes estratos que conforman el planeta en profundidad y determinar sus características fundamentales.

En este sentido el terremoto es un fenómeno que se origina en una zona puntual y que genera ondas que se propagan en todas direcciones y con diferentes niveles de energía, incorporando durante su recorrido información acumulada sobre el medio a través del cual se propagan. Así, el análisis de las diferentes ondas, sus tiempos de llegada, rangos de amplitud-frecuencia y velocidades permiten inferir las características del medio de propagación y estudiar, por métodos indirectos, la estructura interna del planeta.

Es por tanto evidente que el análisis de las ondas sísmicas genera información útil en dos vertientes fundamentales, no solo del terremoto como fenómeno natural asociado a la dinámica terrestre que resulta en la obtención de datos necesarios para la determinación de sus parámetros fundamentales y de los efectos que este produce, sino también elementos que permiten caracterizar la estructura interna de la Tierra. De tal manera el registro de las ondas sísmicas asociadas a un terremoto es la herramienta fundamental para realizar las investigaciones que permiten conocer la evolución geólogo-geofísica de la Tierra y su efecto sobre la especie humana. Sin embargo, la tarea de llevar a cabo el sensado de estas ondas adolece de la imposibilidad de establecer un marco referencial adecuado, toda vez que el sensor es afectado por el propio movimiento que debe registrar. De la solución práctica empleada en este caso resultan los sensores inerciales, que efectúan la medición del movimiento del terreno de forma indirecta aprovechando, en la mayoría de los casos, el principio de la inercia de un cuerpo de gran masa suspendida, que tiende a mantener su estadio inicial de reposo ante un movimiento externo siempre y cuando haya aceleración.

Sin embargo el movimiento relativo de la masa y el del suelo no se relacionan de forma lineal sino que su comportamiento es similar al de un Sistema Lineal Invariante (LTI) en el tiempo, el cual puede ser descrito de formas diferentes; mediante una ecuación lineal diferencial de segundo orden, a través de la transformada de Fourier, usando la respuesta compleja o mediante la respuesta a impulso entre otras.

Actualmente, en el tratamiento de señales estos sensores son descritos mediante diferentes métodos; considerándolos como filtros recursivos (IIR) cuya teoría se puede encontrar en Oppenheim y Willsky (1983), para tratamiento analógico de estas señales y en Oppenheim y Schafer (1975) y Scherbaum (1996) para análisis digital. De igual forma los desarrollos matemáticos completos pueden ser encontrados en Scherbaum (1996) y Wiedlant (2002). Esta no-linealidad asociada a los sismómetros genera una respuesta diferente, ante una excitación, en dependencia de los valores de frecuencia que tenga esta incidiendo de manera notable en la calidad del registro de la señal sísmica. Los valores de esta respuesta en frecuencia instrumental deben ser establecidos mediante la calibración de los sismómetros.

De acuerdo a Buttkus (1986) y Bormann (2002) se aprecia en **la Fig. 1** que la influencia de la no linealidad adquiere un significado fundamental en el rango de frecuencias por debajo de 1 Hz, donde se observan señales correspondientes a ondas generadas por sismos lejanos, produciendo errores notables en la determinación de los parámetros dinámicos y energéticos de los terremotos.

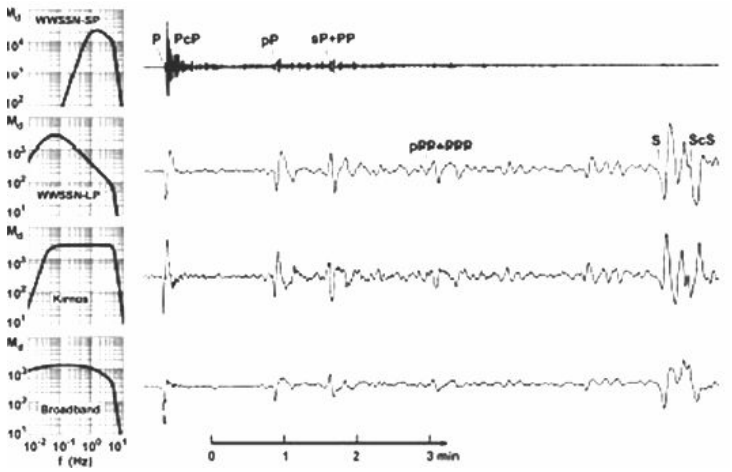


Fig. 1. Registro de un terremoto profundo (h=570 km, la señal está derivada mediante el filtrado de la señal de velocidad correspondiente a un registro digital con banda de paso entre 0,05 y 5 Hz. Se observa la influencia de la respuesta en frecuencia para 4 tipos distintos de sismómetros electromagnéticos según Buttkus (1986), gráfico extraído del NMSOP

De forma general, las ecuaciones que rigen el comportamiento de estos sistemas se describen a continuación como:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0{}^2 y = -a \frac{d^2x}{dt^2} \qquad (1)$$

$$Y(s) = \frac{a.\omega_0{}^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0{}^2} X(s) \qquad (2)$$

Aplicando la transformación de Laplace las ecuaciones se resumen de la forma siguiente:

$$F(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0{}^2} \qquad (3)$$

Para el caso específico de los sensores SM-3 de las redes telemétricas del CENAIS descritas en los trabajos de Diez (1999); Cutié *et al* (2001) describe el método usado hasta el presente. Al no estar dotados de una bobina adicional se calibran evaluando, en la ecuación característica de segundo orden del sismómetro, los parámetros mecánicos del mismo. El programa Calibrac.exe realiza el cálculo de la respuesta final del canal y entrega una curva normalizada de valores de este además del coeficiente de sensibilidad. Son hallados, por separado, los parámetros G, S, D_s y A a partir de datos suministrados por el fabricante y otros hallados experimentalmente. Luego es simulada la conexión de este al digitalizador y se halla la relación entre una señal de amplitud fija y frecuencia variable a su entrada y los counts efectivos del registro digital. El coeficiente es hallado de acuerdo a la expresión;

$$C_s(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} * \text{Ganancia del digitalizador} \quad (4)$$

donde $Y(f)$ es el valor pico (en counts) calculado a partir del registro digital para un valor de frecuencia f, y $X(f)$, se refiere al valor de velocidad para el mismo valor hallado mediante;

$$X(f) = E\sqrt{\frac{\left(1-\left(\frac{f_s}{f}\right)^2\right)^2 + 4D_s^2\left(\frac{f_s}{f}\right)^2}{S_s}} \qquad (5)$$

El método incurre en varios errores que no permiten hallar, de manera efectiva, los parámetros correspondientes a la respuesta a frecuencia de los sismómetros. Al aceptar los valores físicos extraídos de la documentación técnica proporcionada por el fabricante, no son tomadas en consideración las variaciones en los elementos que conforman el sistema mecánico por los efectos de envejecimiento del metal utilizado para la construcción de los resortes, láminas, etcétera durante años de almacenaje y posterior uso en condiciones de clima tropical húmedo. Además se hace un cálculo de la función de transferencia a partir de la expresión matemática del péndulo, que asume una serie de valores predefinidos minimizando en unos casos y despreciando en otros variables que ejercen influencia sobre esta respuesta.

Como se demostrará más adelante el por ciento de error introducido con este método hace poco confiable su uso. Finalmente, el uso del mismo fichero resultante para caracterizar todos los canales sismométricos de las estaciones digitales de corto período donde están instalados diferentes instrumentos, crea una falsa estandarización entre las curvas de respuesta teniendo en cuenta las diferentes características de los sismómetros.

2. Materiales y métodos

La esencia de la calibración mediante métodos armónicos consiste en la simulación, de forma externa, de un movimiento de excitación de amplitud y frecuencia controlada. Existen varios métodos para lograrlo aplicándose en este documento el uso de señales aleatorias de ruido blanco gaussiano convenientemente filtradas y adecuadas a la banda de interés desde el punto de vista sismológico.

La metodología usada para realizar la calibración armónica está asociada al uso de una mesa vibratoria mecánica y un sistema electrónico-digital para el control de esta, a la generación e inyección de señales convenientemente filtradas y ecualizadas, la digitalización en tiempo real y el cálculo de las funciones de transferencia de acuerdo a la expresión:

$$H(f) = \frac{Canal\ B(f)}{Canal\ A(f)} \qquad (6)$$

Entendiéndose por canal *B(f)* la señal correspondiente a la salida de los terminales de la bobina del sismómetro y *A(f),* la señal proveniente de un sensor láser del tipo interferométrico que garantiza la medición del desplazamiento efectivo de la carcasa del sismómetro con una precisión de 0.2 μm. Los cálculos matemáticos han sido efectuados mediante VIBROCALC que es un programa de computación diseñado para el análisis de señales y la determinación de funciones de transferencia concebido en el "Centro di Ricerche Sismologiche" como parte del proyecto de mesa vibratoria para calibración de péndulos inerciales. Está soportado en la plataforma MATLAB 7.5 e incorpora diversos métodos de cálculo asociados a la biblioteca de herramientas propias de esta plataforma, estando descritos los detalles de este método en los trabajos de Di Bartolomeo *et al.* (2002) y Zuliani *et al.* (2007).

Mediante las modificaciones descritas anteriormente se realizó el análisis de un sismómetro SM-3 con los siguientes datos suministrados por el fabricante:

- ✓ Sst (sensibilidad de la bobina de trabajo)= 17 [V/m/s]
- ✓ Ssa (sensibilidad de la bobina de amortiguamiento.)= 17 [V/m/s]
- ✓ Lo (longitud equivalente de péndulo)= .084 [m]
- ✓ Kf= .0085 [Kgm^2]
- ✓ Ra (Resistencia de la bobina de trabajo)= 59 [ohms]
- ✓ Amortiguamiento = 0.25
- ✓ To = período oscilaciones libres=1segundo.

De acuerdo a estas características se observan, como peculiaridades, la baja sensibilidad y bajo valor de constante de transducción electromagnética relacionada con el escaso valor óhmico de las bobinas y las limitaciones ferro-magnéticas del material empleado en la construcción de los imanes asociados a los transductores electromagnéticos, además de un amortiguamiento insuficiente (0,25 de 1 máximo) que causa un pico de resonancia indeseable en la

vecindad del período de oscilaciones libres del péndulo. Los resultados completos de este análisis pueden ser hallados en Diez *et al* (2006).

Unos de los métodos referidos en Mathworks (2000) es la herramienta TfeMod (método estándar modificado de MATLAB para cálculo de funciones de transferencia). Una vez obtenidas las curvas de respuesta en frecuencia, módulo y fase mediante esta, en la **Fig. 2**, se muestran, graficados, los valores finales, comparándoles con los hallados usando el método de evaluación teórica.

A primera vista se observa que las dos curvas difieren apreciablemente en sus valores de amplitud coincidiendo solamente en el pico de resonancia a la frecuencia de 1 Hz (1s), obviamente porque este parámetro no depende significativamente del método fijado sino de las características propias del sismómetro como péndulo mecánico y sistema de segundo orden. El coeficiente de multiplicación de la curva normalizada varía desde 27.85 a 29.20 respectivamente para cada uno de los métodos usados, al tiempo que la pendiente de caída de las curva es más abrupta para la curva de respuesta obtenida por el método experimental. Finalmente la diferencia entre el valor máximo de amplitud obtenido experimentalmente y la parte plana de la curva resulta alrededor de un 28 % mayor que los calculados teóricamente.

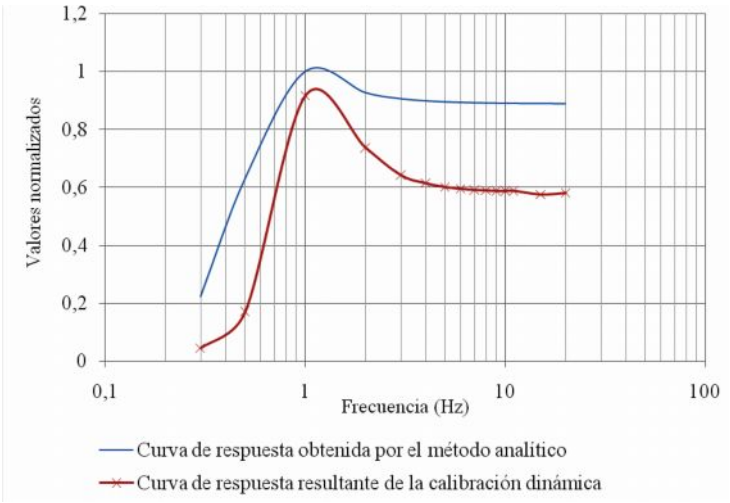


Fig. 2: Curvas de respuesta en frecuencia para un sismómetro SM-3 típico, con valores de Sst=17V/m/s, Ssa=13.2V/m/s, L0=0.084m, Kf=0.00893Kgm2, Ra=50 ohms y Ds=0.2286, en color azul, obtenida por métodos analíticos y en color rojo, la curva resultante mediante la calibración armónica

Estas diferencias evidencian la no correspondencia entre la respuesta a frecuencia de un sismómetro sometido a años de explotación bajo condiciones de clima tropical, con alta temperatura y humedad que deriva en las consiguientes variaciones de su estructura mecánica y el aumento de las tolerancias de los componentes electromagnéticos que lo forman. Sin embargo, el elemento con mayor incidencia negativa resulta el aumento excesivo de los valores de amplitud en la vecindad del período de oscilaciones libres del sismómetro, imposible de limitar usando solo las relaciones de flujo electro-magnético de las bobinas que forman parte del sensor.

3. Resultados y discusión

Analizamos las dos variantes para convertir el péndulo oscilante en un sistema críticamente amortiguado, la primera provocando un corriente y flujo magnéticos inversos mediante el corto-circuito de los terminales de la bobina auxiliar del SM-3 usando diferentes valores de resistencia óhmica y la segunda, usando técnicas de realimentación activas mediante un circuito electrónico que simula impedancias negativas en los terminales de la bobina auxiliar y permite alcanzar valores de amortiguamiento cercanos a 0.7 teniendo en cuenta que, en estos sistemas, el amortiguamiento es una variable a-dimensional cuyo valor oscila entre 0,1-0,2 (sistema sub-amortiguado) y 1 (sobre-amortiguado).

La primera variante presentó, como desventaja fundamental, el poco incremento del coeficiente de amortiguamiento obtenido reflejado en el aplanamiento insuficiente del pico de resonancia. Como resultado negativo adicional, se obtenía una reducción del valor de la constante de transducción electromagnética, ya inicialmente bajo,

en la parte plana de la curva de respuesta en frecuencia. Además, el uso de resistencias óhmicas está limitado porque su valor, en ningún caso, puede arribar a cero ohmios por cuanto se debe extraer señal de esta bobina y en consecuencia el corto circuito provoca la imposibilidad del uso del transductor electromagnético.

El segundo método parte de tener en cuenta la existencia de una bobina auxiliar donde es posible realimentar sus terminales a través de un circuito electrónico activo que simule una impedancia cuya componente real sea de valor negativo, sin disminuir la ganancia del sistema. De acuerdo a la documentación técnica obtenida de Lennartz (2000; 2003) y partiendo de esta premisa se adaptó, un circuito electrónico basado en amplificadores operacionales y otros elementos pasivos a las características del sensor SM-3, a saber, resistencia óhmica de la bobina, razón de flujo del imán permanente, impedancia de acoplamiento.

Mediante la interconexión de este circuito y el ajuste de la resistencia que limita la corriente que se inyecta en la bobina auxiliar, se logran diferentes valores de amortiguamiento hasta alcanzar el valor de 0,7 deseado. Con el script

VIBROCALC se realizaron varias calibraciones para una misma señal de entrada y mediante el método de ajuste y comprobación, finalmente se obtuvo la curva de respuesta en frecuencia mostrada en color rojo en la Fig. 3. La fotografía del sismómetro SM-3 con el circuito de compensación y el esquema eléctrico general de este se muestran en las Figs. 4 y 5 respectivamente.

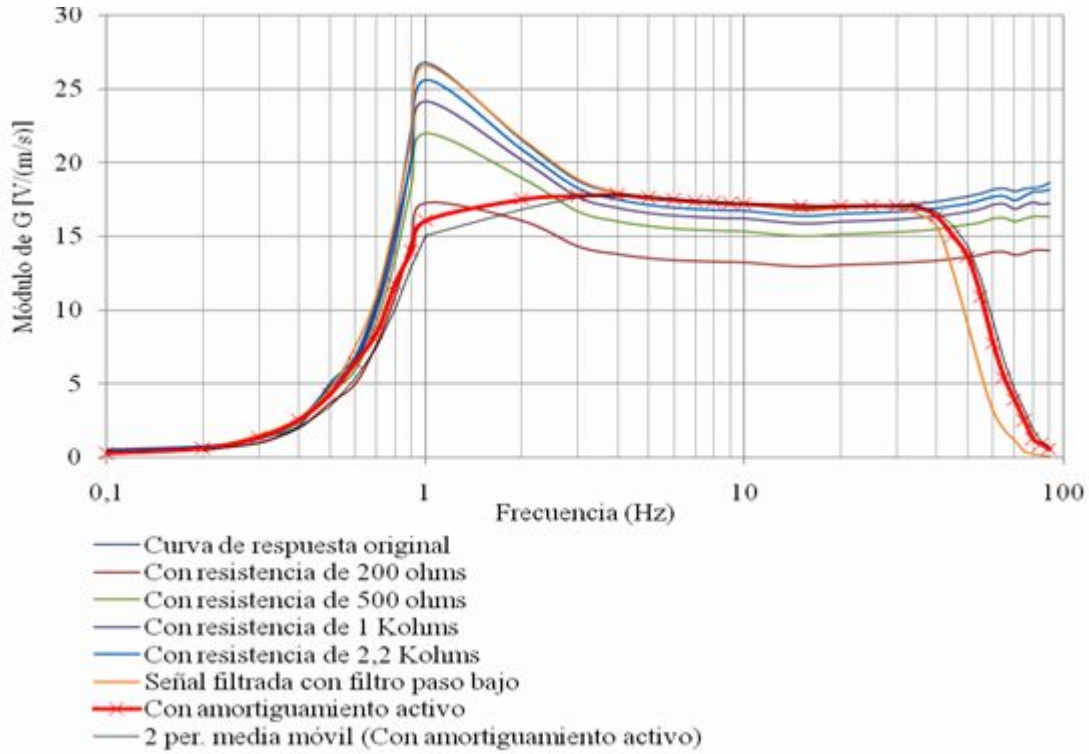


Fig. 3. Curvas de respuesta en frecuencia para un sismómetro SM-3 típico, se observan las variaciones de la curva para diferentes valores de resistencia óhmica, usando el método de resistencia pasiva, la línea gruesa en color rojo muestra la curva final obtenida mediante la realimentación activa propuesta

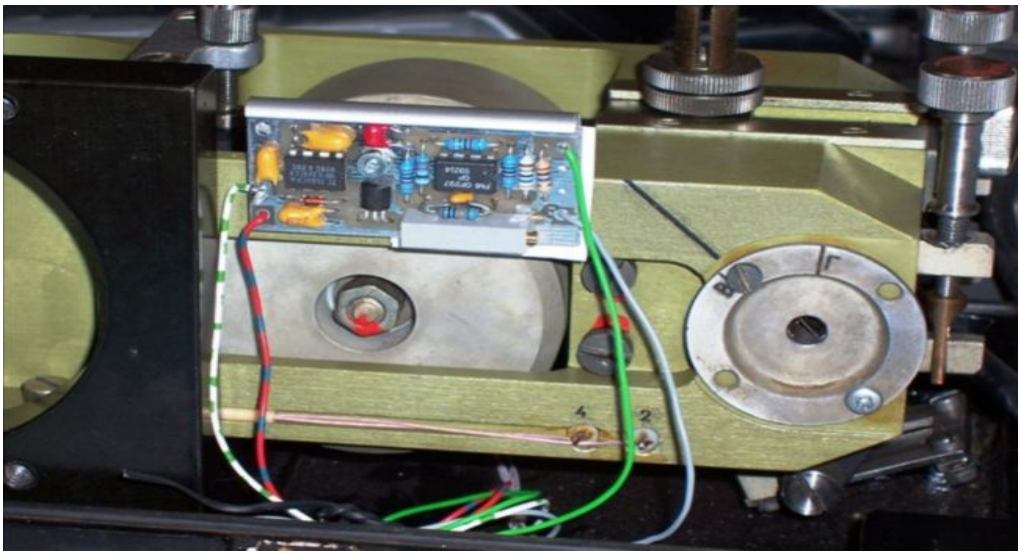


Fig.4. Fotografía del sismómetro SM-3 analizado en este documento, la tarjeta electrónica observada corresponde al circuito de realimentación activo para el ajuste de la curva

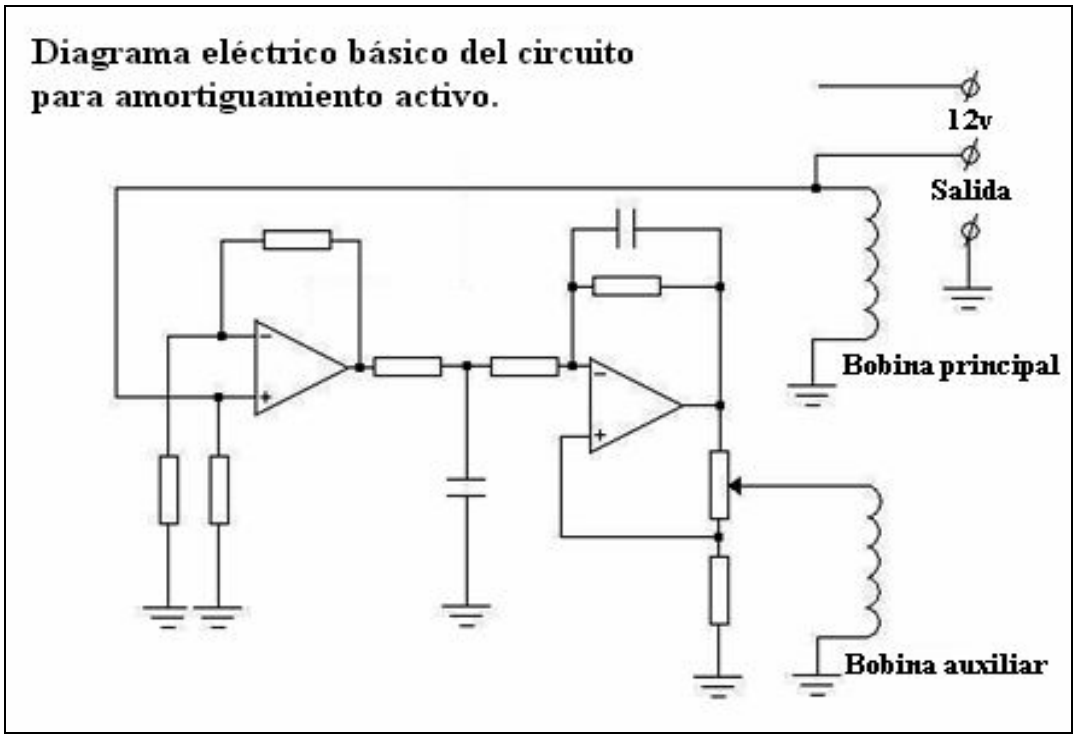


Fig.5. Esquema general del circuito electrónico propuesto para la corrección de la respuesta instrumental del sismómetro SM-3, el diseño inicial se obtuvo de la Lennartz Electronic, GmbH, los valores de los componentes(omitidos por derechos de copia), se hallaron por vías experimentales de acuerdo a las características del sensor estudiado

Se obtuvo una curva final con comportamiento semi-plana a partir de 1 Hz y con una caída de 3dB alrededor de 0,7-0,8 Hz, estos valores se consideran aceptables para la construcción de un canal sismométrico de corto período, manteniendo el valor de constante de transducción electromagnética G igual a 17. Las curvas finales de respuesta en amplitud y fase se muestran en la **Fig. 6. (ver anexos)**

Conclusiones

Como conclusiones fundamentales de este trabajo se pueden enumerar las siguientes:

- ✓ Los métodos analíticos usados en la calibración de los sismómetros SM-3 empleados en la red sismo-telemétrica del Servicio Sismológico Nacional de Cuba, no consiguen reproducir, de manera fiel, la curva de respuesta instrumental de estos, provocando errores en la determinación de los parámetros energéticos y dinámicos de los terremotos detectados por esta red.
- ✓ El método propuesto garantiza, la correcta determinación de los valores de las curvas de respuesta en módulo de la constante de transducción electromagnética G y de la fase.
- ✓ El sismómetro SM-3, es un sismómetro de corto período que tiene como limitaciones fundamentales una baja sensibilidad y un coeficiente de amortiguamiento insuficiente para la eliminación del pico resonante en el período de oscilaciones libres del péndulo, esto provoca que los valores de amplitud de una señal que contenga componentes armónicos en la vecindad de este período, se obtengan distorsionados de manera inutilizable para posteriores análisis.
- ✓ El método de aumentar el amortiguamiento de manera pasiva, no reporta resultados eficientes en la normalización y estandarización de la curva de respuesta de estos sismómetros.
- ✓ El uso de realimentación activa, a través de la bobina auxiliar, provoca la eliminación del pico resonante, manteniendo inalterable el valor de la constante de transducción electromagnética; de esta forma se obtiene una curva de respuesta estándar y similar a los modelos usados internacionalmente.

Referencias

Bormann (2002): IASPEI Manual of Seismological Observatory Practice, NMSOP, Potsdam.

Buttkus, B. (1986): Ten years of the Graefenberg array, vol 35 of Geologisches Jahrbuch Reihe E. Bundesanstalt fuer Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Cutié, M., E. Diez y M. Serrano (2001): Metodología para la calibración de los canales sismométricos de las redes telemétricas de corto período en el sistema de Servicio Sismológico Nacional, "Red de estaciones e Investigaciones Sismológicas de Cuba", Editorial Academia, ISBN 959-02-0244-6.

Di Bartolomeo, P., F. Ponton, C. Urban y D. Zuliani (2005): Relazione tecnica relativa al metodo diretto di calibrazioni di sensori sismometrici tramite tavola vibranti, Rapporto tecnico di Centro di Ricerche Sismologiche, Istituto Nazionale de Oceanografia e di Geofisica Sperimentale. OGS-11/2005/CRS-3.

Diez, E. (1999): Cuban National Seismo-telemetric network, Abdus Salam Internacional Centre for Theoretical Physics (ICTP), Preprint 1999038

----------, D. Zuliani y F. Ponton (2006): Cuban seismic network short period seismometer calibration, Abdus Salam Internacional Centre for Theoretical Physics (ICTP), Internal report, IC/IR/2006/006.

Lennartz Electronics GmbH. (2000): Seismometers, General description.

Lennartz Electronics GmbH. (2003): LE-3Dlite Seismometer.

Mathworks (2000): Signal processing toolbox for use with MATLAB. User's guide version 5, The Math Works, Inc., USA.

Oppenheim, A. V. y R. V. Schafer (1975): Digital Signal Processing, Prentice-Hall International, Englewood Cliff, London, NJ, pp 530.

---------- y A. S. Willsky (1983): Signals and Systems, Prentice-Hall, New Jersey, USA.

Scherbaum, F. (1996): Of Poles and Zeros, Fundamentals of Digital Seismology, Kluwer Academic Press, ISBN 0-7923-6834-7, The Netherlands.

Wielandt, E. (2002): IASPEI Manual of Seismological Observatory Practice, NMSOP, charter 5, Seismic sensors and their calibration, Potsdam, Germany.

Zuliani, D., E. Diez y F. Ponton (2007): Vibrocalc, seismometer frequency response elaboration software, Abdus Salam Internacional Centre for Theoretical Physics (ICTP), internal report, IC/IR/2007/006.

Anexos

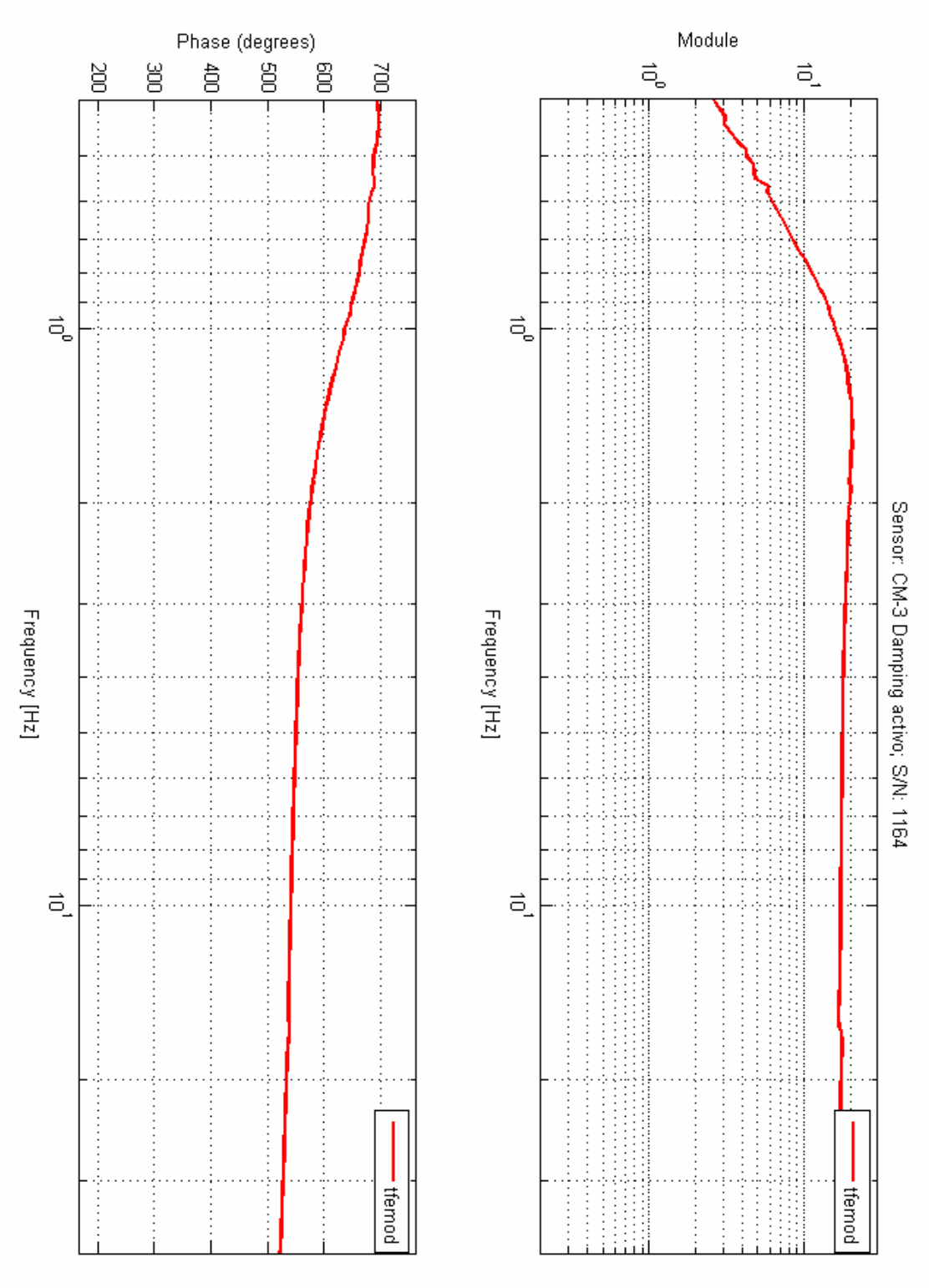


Fig. 6. Curvas de respuesta, en módulo de G y en Fase del sismómetro SM-3 con corrección electrónica del coeficiente de amortiguamiento