

## Instrumentación Electrónica

# SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE MICROTREMBORES



### RESUMEN

El presente artículo resume el proceso de diseño y construcción de un sistema que permite captar vibraciones ambientales o microtemblores, utilizando tres transductores de velocidad o geófonos en un arreglo triaxial. Inicialmente, se realiza una breve introducción a la sismica y a los microtemblores, explicando las aplicaciones prácticas del uso de registros de microtemblores, con el objeto de entender la finalidad del proyecto. A continuación se explica el proceso de diseño y construcción de los módulos del sistema de adquisición de datos. Por último se enuncian los resultados de las pruebas realizadas al sistema de adquisición de datos con el objetivo de comprobar su desempeño ante señales reales.

### PALABRAS CLAVES

Microtemblores, vibración ambiental, efectos de sitio, geófono, adquisición de datos.

### ABSTRACT

This paper resumes the design and construction process of a microtremor data acquisition system, based on a triaxial arrangement of geophones.

**Jairo Augusto Cala Rodríguez.**  
Ingeniero Electrónico UIS.  
Estudiante de maestría en  
Ingeniería Electrónica UIS.

**Alfredo Rafael Acevedo Picón.**  
Ingeniero Electrónico UIS.  
Profesor auxiliar E3T UIS.  
Universidad Industrial de  
Santander. Colombia.

**Omar Leonardo Peña Galvis.**  
Ingeniero Electrónico UIS.  
Estudiante de maestría en  
Ingeniería Electrónica UIS.

Grupo de Investigación en  
Control, Electrónica, Modelado y  
Simulación CEMOS.

**Hermann Raúl Vargas Torres.**  
Doctor Ingeniero Electricista.  
Profesor Asociado Escuela de  
Ingenierías Eléctrica, Electrónica  
y de Telecomunicaciones UIS.

Grupo de Investigación en  
sistemas de energía eléctrica  
GISEL

First, a brief introduction to seismic and microtremors is made, explaining the practical applications of microtremors registers in order to understand the final purpose of this research. Then, the design and construction process of the data acquisition system modules is explained. Finally, the results of the tests conducted on the data acquisition system are shown, to verify the system performance to real world signals.

## KEYWORDS

Microtremors, environmental vibration, site effects, geophone, data acquisition, data- logger.

## 1. INTRODUCCIÓN

El área de la Ingeniería Sísmica, con el fin de llevar a cabo procesos de investigación en lo que respecta al análisis de suelos y de estructuras requiere, además del capital humano que posee, los elementos necesarios para llevar a cabo las pruebas de campo que complementen y validen los resultados de los estudios teóricos que se realicen.

Las señales de importancia a adquirir en tierra firme, se pueden dividir en movimientos fuertes, movimientos moderados o débiles, y vibraciones ambientales, también conocidas como microtemblores. El estudio de éstos últimos, presenta una ventaja comparativa importante, debido a la disponibilidad de datos, situación que convierte al análisis sísmico utilizando registros de microtemblores, en una alternativa económica y rápida, que brinda información referente a la condición y características de un suelo o de una estructura en cualquier momento, la cual permite la estimación de efectos locales o de sitio y además puede ser utilizada con fines de microzonificación sísmica.

En el mundo, a partir de la aceptación del método de Nakamura [1], para el estudio de las características dinámicas del suelo y de las estructuras usando microtemblores, es posible observar la tendencia a desarrollar equipos portátiles, con el fin de cubrir de cubrir grandes áreas con un único equipo, para evitar el gran costo en el que se habría que incurrir para montar una red sísmológica permanente. También se destaca la incorporación de software de procesamiento de señal, con el objeto de encontrar el espectro de las señales adquiridas y a partir de esto, factores de amplificación o frecuencias predominantes. Estos sistemas en

general, utilizan sensores de aceleración (acelerómetros) o de velocidad (geófonos).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Efectos locales o de sitio

La mayoría de los estudios sobre la distribución de las calamidades causadas por los sismos indican que las zonas de daños intensos están muy localizadas y que la envergadura de esos daños puede cambiar bruscamente en una distancia apenas de 0,5 a 1 kilómetro. Se ha observado que las intensidades de las sacudidas sísmicas varían considerablemente a distancias muy cortas. Esto ha llevado a pensar que el factor esencial para la evaluación del daño de las estructuras son las condiciones del subsuelo local, es decir, los efectos de sitio [2]. Por ejemplo, los basamentos sedimentarios están más propensos a las sacudidas de la tierra que los basamentos rocosos. Además de esto, cuando se produce un terremoto, los lugares ubicados en tierra tienden a exhibir una amplitud mayor del movimiento que los lugares ubicados en roca, llevando por ello a concluir que cada tipo de suelo, dependiendo de sus características, amplifica en mayor o menor medida el movimiento.

### 2.2 Microtemblores

Los microtemblores son vibraciones de muy baja intensidad, producidas por fuentes artificiales y que dependen principalmente de la actividad humana [3], por esta razón también son conocidos como ruido sísmico ambiental, vibración ambiental o ruido cultural. Los microtemblores son generalmente de período corto (1,0 segundos o menos), y algunas de sus posibles fuentes son: El tráfico, los trenes, plantas de energía, minería, equipos de construcción, etc.

La amplitud de los microtemblores es muy dependiente de las condiciones locales del suelo, por lo tanto es difícil estimar rangos exactos delimitar la amplitud de estos movimientos. Sin embargo, a partir de varias investigaciones anteriores como por ejemplo [2], en las cuales se delimita el nivel de las vibraciones entre  $\pm 10 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$ , se toman estos valores pico para utilizar como referentes para el desarrollo del sistema de adquisición de datos. El rango de frecuencias de estos movimientos se extiende desde los 0,1 Hz hasta los 100 Hz; este rango de

frecuencias incluye desde las vibraciones ambientales hasta algunas vibraciones industriales.

Como resultado de las mediciones de microtemblores se pueden conocer las características de vibración de varias capas del suelo, la frecuencia fundamental de vibración, el desplazamiento y la velocidad del mismo. Los microtemblores también se consideran herramientas adecuadas para evaluar efectos de sitio y predecir las características de movimientos fuertes [4].

Finalmente, en cuanto se refiere al análisis estructural, los principales objetivos del análisis de la respuesta dinámica de edificios usando vibración ambiental, se pueden resumir en los siguientes [5]:

- *Control de calidad de una obra.*
- *Control de daños causados por un sismo.*
- *Verificación de reparaciones o modificaciones*
- *Control de una estructura durante su vida útil.*

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

El equipo fue desarrollado en base a tres tarjetas principales o módulos del sistema; una tarjeta analógica o de acondicionamiento de señal, una tarjeta digital encargada de manejar la información proveniente del módulo analógico y una tarjeta de alimentación, encargada de suministrar la energía a los otros dos módulos del sistema.

Como transductor, se utilizó un arreglo triaxial de geófonos, los cuales son detectores de movimiento de tipo electromagnético pasivo, consistentes en un imán permanente y un arrollamiento de alambre (bobina) a su alrededor. Al presentarse un movimiento, se induce una tensión en la bobina que será proporcional a la velocidad relativa.

#### 3.1 Módulo Analógico

Las señales provenientes de los geófonos son captadas por el módulo analógico, en el cual se realiza una primera amplificación por medio de un amplificador de instrumentación (INA129), basado en topología de tres amplificadores. Es en este circuito donde se presenta el mayor error de resolución, debido al bajo nivel de la señal

proveniente del geófono y a los errores introducidos por el circuito integrado.

Realizar un presupuesto de error, consiste como su nombre lo indica, en encontrar los errores que se están generando dentro de un circuito, debido a las especificaciones del amplificador y las características del circuito en el que éste se encuentre. Estos errores pueden limitar la resolución del dispositivo (y por lo tanto la del sistema), debido a la incertidumbre que se le está agregando a la medición por causa de las características no ideales de los amplificadores.

A continuación se presentan las contribuciones al error (RTI) para el peor caso, en el circuito de preamplificación, normalizados por el valor de la señal de entrada.

$V_{os}$	$75\mu V \div 4,53mV$	16556 ppm
$I_{os}$	$625\Omega \times 5nA \div 4,53mV$	690 ppm
Error de Ganancia	0,4%	4000 ppm
No linealidad de Ganancia	0,002%	20 ppm
Ruido 0.1-10 Hz	$200nV \div 4,3mV$	46.5 ppm
<b>ERROR INICIAL (SIN AJUSTAR)</b>		<b>21312,5 ppm</b>

El error inicial, o error sin ajustar equivale a trabajar con una precisión de entre cinco y seis bits, razón por la cual se introduce un filtrado pasaltos al sistema para eliminar los errores causados por la corriente y por la tensión de offset; el error de ganancia debe ser corregido por software, para evitar colocar limitantes adicionales al sistema.

Una vez corregidos los errores, se tendrá el error de resolución del circuito de preamplificación, dado por los errores que no permiten calibración ni mejora:

No linealidad de ganancia	0,002%	20 ppm
Ruido 0.1-10 Hz	$200nV \div 4,3mV$	46.5 ppm

#### **ERROR DE RESOLUCIÓN 66,5 ppm**

Lo anterior significa que la precisión alcanzada en el circuito de preamplificación es de aproximadamente 14 bits, lo que de antemano condiciona la resolución del sistema de adquisición

de datos. Los errores de las etapas subsiguientes, son menores, debido a que el tamaño de la señal será progresivamente mayor, a medida que pase por el circuito de preamplificación y luego por el de amplificación, haciéndose más inmunes a los errores introducidos por las no idealidades de los amplificadores.

Luego de la preamplificación, las señales se limitan las señales en banda por un filtro Butterworth de cuarto orden, implementado mediante topología Sallen-Key para obtener la mayor exactitud a ganancia unitaria, posteriormente amplificadas en configuración inversora, asegurando una diferencia entre la ganancia del amplificador a circuito abierto ( $A_{VOL}$ ), y la ganancia del circuito de amplificación ( $A_{CL}$ ) de aproximadamente 70 dB a la máxima frecuencia de interés de la aplicación, con el fin de reducir el error de ganancia a menos del 0,0002%. Por último las señales son digitalizadas por un convertor de aproximaciones sucesivas de cuatro canales de 16 bits para entregarlas al módulo digital.

En este punto es necesario entrar a definir la resolución del sistema de adquisición de datos, por medio de un análisis de ruido del sistema, que es tanto o más importante que el presupuesto individual de error de los dispositivos empleados. Realizar este análisis de ruido es importante, ya que es donde se aprecia el nivel de ruido que el hardware de acondicionamiento de señal entrega al convertor analógico-digital y por tanto, es éste análisis el que permite encontrar el rango dinámico del sistema de adquisición de datos.

Efectuando el análisis de ruido correspondiente, se encontró un ruido relativo a la salida (RTO) de  $524,8448517 \mu V_{rms}$ , a la entrada del convertor, el cual junto con los valores de entrada de señal al convertor, permiten encontrar el rango dinámico del sistema:

$$DR = 20 \log_{10} \frac{\text{máximo nivel rms de entrada}}{\text{nivel de ruido rms}} \quad [dB]$$

$$20 \log_{10} \frac{19,784 / 6,6}{524,8448517 \cdot 10^{-6}}$$

$$DR = 75,134 \text{ dB}$$

La señal de entrada es dividida por un factor de 6,6, debido a que es una señal que presenta un comportamiento de ruido blanco gaussiano, el cual

relaciona el valor pico a pico de la señal con el valor rms por el factor anteriormente mencionado. El rango dinámico de la tarjeta es de algo más de 75 dB, lo que equivale a un número efectivo de bits de algo más de doce (12), que se convierte en la resolución efectiva del sistema de adquisición de datos.

### 3.2 Módulo Digital

Los datos provenientes del convertor, son manejados por el microcontrolador presente en la tarjeta digital. El módulo digital tiene cuatro tareas básicas: adquirir las señales digitalizadas, almacenarlas, suministrar base de tiempo y transmitir por puerto serie los datos. La premisa fundamental sobre la que se basó el diseño del módulo digital, es la de brindarle autonomía suficiente al equipo con el fin de evitar involucrar al computador en tareas referentes a la adquisición de los datos.

El diseño de este módulo permite al usuario elegir entre dos posibilidades de trabajo al momento de realizar las pruebas de campo. La primera, denominada modo continuo, consiste en utilizar el equipo para adquirir datos "on-line", con la ayuda de un computador como elemento de almacenamiento y visualización. La segunda posibilidad consiste en utilizar el equipo en un modo denominado "data-logger" en el cual las pruebas son adquiridas independientes del PC, haciendo uso del banco de memorias, el cual almacena las pruebas junto con la fecha y hora en que fueron tomadas, hasta el momento en el que el usuario decida descargarlas para su posterior visualización. La comunicación se realiza por puerto serie a 57.600 bps en cada uno de los dos modos de trabajo del sistema.

### 3.3 Módulo de Alimentación

El tercer módulo del sistema, el de alimentación, se encuentra basado en un ISR (Integrated Switching Regulator), el cual, a partir de una alimentación unipolar superior a 4,75 V, entrega tensiones complementarias ajustables por una resistencia entre  $\pm 7$  y  $\pm 20V$ , trabajando a una frecuencia de conmutación de 657 kHz según hoja de datos. Además posee una eficiencia de 85%, lo que lo hace ideal para cuando el sistema se encuentre trabajando con el arreglo de baterías recargable.

El ruido de conmutación generado por este regulador, es eliminado por un filtro LC, el cual fue implementado con elementos que tuvieran muy

baja resistencia serie equivalente (ESR) para evitar pérdidas indeseables. Este filtro reduce la componente fundamental de ruido en la frecuencia de conmutación de 20 mV, a menos de 1,2 mV, entregando por consiguiente una fuente de alimentación DC estable, para alimentar los circuitos de precisión del módulo analógico, los cuales además, cuentan con un excelente rechazo a cambios en la fuente de alimentación (PSRR).

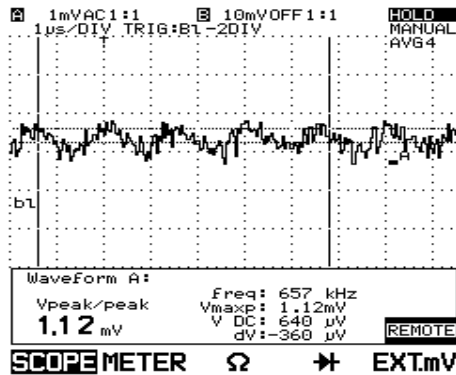


Figura 1. Tensión de rizado con filtro LC.

### 3.4 Módulo de Visualización

Por último, se implementó un módulo de visualización en Labview, desarrollando una aplicación que permite una comunicación serial con el prototipo para realizar la descarga de datos, los cuales pueden ser visualizados en gráficas tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, utilizando la FFT.

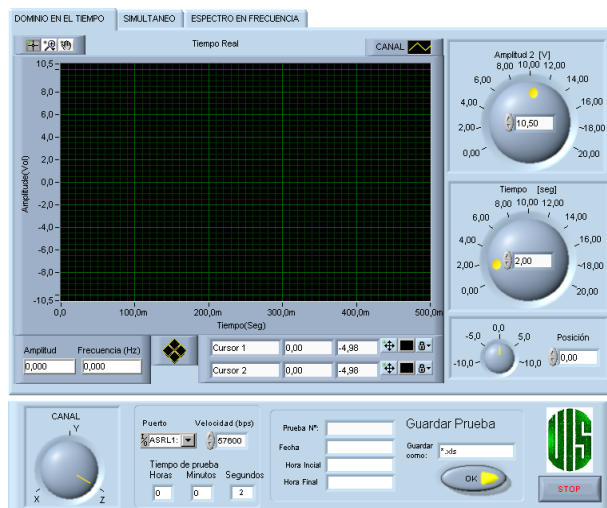


Figura 2. Panel frontal para el modo continuo

## 4. VALIDACIÓN DE LA RESPUESTA DEL EQUIPO

Una vez realizadas las pruebas a los componentes del sistema desarrollado, se hacía necesario implementar pruebas físicas que permitieran conocer el desempeño real del equipo, ante verdaderas señales de vibración. Con este fin, se tomaron pruebas en el Laboratorio de Vibraciones de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, utilizando como sistema patrón un acelerómetro con posibilidad de mostrar la amplitud espectral de la velocidad relativa del movimiento.

Se realizaron pruebas de magnitud y de frecuencia, alcanzando en las pruebas para cálculo de la frecuencia fundamental de vibración errores inferiores al 1%. Como método de validación de la respuesta en amplitud del S.A.D.M, se tomó el espectro en frecuencia de la señal, ya que en ésta respuesta se encuentran diferenciadas las aportaciones individuales de las componentes frecuenciales, contenidas dentro de la vibración medida, y se encontraron errores inferiores al 2%.

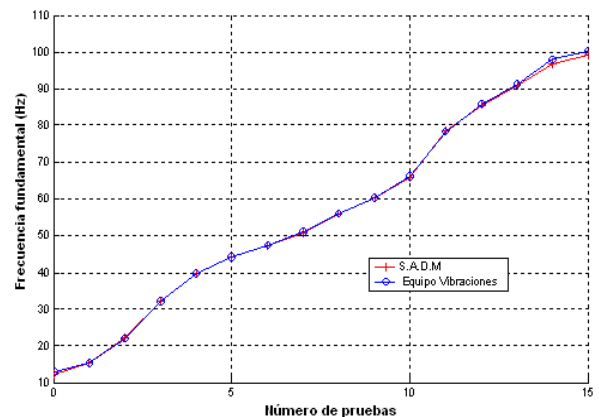


Figura 3. Resultado de la prueba para frecuencia fundamental de vibración.

## 5. CONCLUSIONES

- ✓ Se logró diseñar un equipo autónomo y portátil, operado ya sea con baterías o con alimentación de la red eléctrica, especialmente diseñado para la medición de vibraciones ambientales o microtemblores.
- ✓ Tomando como base los análisis teóricos realizados, se concluye que debido a los niveles de amplificación empleados, no es

posible implementar para ésta aplicación una tarjeta de adquisición de datos que tenga una resolución superior a 14 bits, sin el uso de sistemas en un chip ("system on a chip").

- ✓ Se presentaron dificultades en el momento de validar la respuesta del instrumento diseñado debido a la dificultad de generar vibraciones a una frecuencia y amplitud conocidas que no saturaran al equipo. Debido a esto se optó por utilizar como equipo patrón, el acelerómetro del Laboratorio de Vibraciones de la escuela de Ingeniería Mecánica, con el inconveniente de la desincronización entre los equipos al momento de adquirir las pruebas.
- ✓ El sistema de adquisición de datos presenta buen desempeño según los resultados obtenidos. Las tarjetas de adquisición de datos del sistema desarrollado mostraron el comportamiento esperado, debido a lo cual, cualquier error que se presentara podría ser atribuido al transductor empleado. Sin embargo, en la prueba desarrollada teniendo como patrón el equipo del laboratorio de vibraciones, se obtuvieron resultados dentro de los rangos de error permitidos, ya que el error en la medición de la frecuencia fundamental, necesaria para la implementación del método de Nakamura, es del 1% máximo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] NAKAMURA, Yukata. Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications, *Procc. 12WCEE 2000*.
- [2] TORRES M, Gilbert Francisco. Importancia de la microzonificación sísmica de las principales ciudades del estado de Veracruz. (Xalapa, Veracruz).
- [3] MORENO, L Y A. ALFARO (2000) De los Microsismos a los Microtemblores- Investigaciones en el Instituto Geofísico. Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá. Pp 2.55-2.66. <http://metis.javeriana.edu.co>
- [4] GIRALDO, et al. Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores. Barcelona, España. 1999.
- [5] ESPINOZA B, Fortunato. Determinación de características dinámicas de estructuras. Barcelona, España 1999.
- [6] ANALOG DEVICES. Practical Design Techniques for sensor signal conditioning. USA. 1999. [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [7] ANALOG DEVICES. Practical Analog Design Techniques. U.S.A 1997. [www.analog.com](http://www.analog.com)

## AUTORES



**Jairo Augusto Cala Rodríguez.**  
Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander (2004). Actualmente estudiante de maestría en Ingeniería Electrónica en la UIS. Áreas de interés: Sistemas de adquisición de datos, caracterización y modelado de estructuras. E-mail: [jairoacala@hotmail.com](mailto:jairoacala@hotmail.com)



**Omar Leonardo Peña Galvis.**  
Ingeniero Electrónico UIS (2004). Actualmente estudiante de maestría en Ingeniería Electrónica en la UIS. Áreas de interés: Control de sistemas digitales. E-mail: [omar\\_lpg@universia.net.co](mailto:omar_lpg@universia.net.co)



**Alfredo Rafael Acevedo Picón.**  
Ingeniero Electrónico UIS 2000. Profesor Auxiliar E3T UIS. Área de interés: Diseño de sistemas electrónicos. E-mail: [aacevedo@uis.edu.co](mailto:aacevedo@uis.edu.co)



**Hermann Raúl Vargas Torres.**  
Ingeniero Electricista UIS (1985). Doctor en Ingeniería Eléctrica Universidad Pontificia Comillas de Madrid (2002). Áreas de Interés: Control y estabilidad de sistemas dinámicos de gran tamaño. E-mail: [hvargas@uis.edu.co](mailto:hvargas@uis.edu.co)

