

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS MICROSÍSMICOS

JAIRO AUGUSTO CALA RODRÍGUEZ

*Ingeniero Electrónico
Universidad Industrial de Santander
jcrv48@gorobotics.net*

ALFREDO RAFAEL ACEVEDO PICÓN

*Profesor Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Industrial de Santander
Grupo CEMOS (Control Electrónico, Modelamiento y Simulación)
aacevedo@uis.edu.co*

OMAR LEONARDO PEÑA GALVIS

*Ingeniero Electrónico
Universidad Industrial de Santander
omar_lpg@universia.net.co*

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

*Profesor Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Industrial de Santander
Grupo GISEL (Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica)
hrvargas@uis.edu.co*

RESUMEN

En el presente artículo se describe 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 sísmica 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 (analógico, digital, de alimentación y de visualización). Se incluyen los criterios de escogencia de los dispositivos, presupuestos de error individual de los dispositivos y análisis de ruido del sistema, con el objetivo de determinar la precisión del sistema desarrollado.

PALABRAS CLAVE: Microtemblores, vibración ambiental, efectos locales, geófono, adquisición de datos, data-logger.

ABSTRACT

This paper describes the design and construction process of a microtremor data acquisition system, using 3 velocity transducers or geophones built in a triaxial arrangement.

First, a brief introduction to seismic and microtremors is made, explaining the practical applications of the microtremor registers in order to understand the final purpose of this investigation. Then, the design and construction process of the data acquisition system modules is explained (analog, digital, power supply and visualization module). The choosing criteria for the devices employed, individual budget error analyses of the chips and noise analysis of the system are made to determine the system overall precision and performance.

KEYWORDS: Microtremor, ambient noise, site effects, geophone, data acquisition, data-logger.

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Electrónica actualmente, y desde hace varios años ha jugado un papel protagónico en el desarrollo de la ciencia, logrando mediante la investigación aplicada en otras áreas, un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, brindando herramientas cada vez mejores para maximizar las capacidades del capital humano en las distintas áreas del conocimiento.

A su vez, en el campo de la ingeniería sísmica se han realizado diversos tipos de trabajo con el fin de identificar las amenazas y distintas características del suelo. Algunos de estos trabajos se llevan a cabo en el área preventiva, donde se evalúan los diferentes comportamientos del suelo y de las estructuras construidas por el hombre.

Los movimientos sísmicos que ocurren en tierra firme pueden ser fuertes, moderados o débiles, y microtemblores, siendo éstos últimos los que tendrán mayor relevancia en el presente trabajo, y con los cuales es posible estimar efectos de sitio y se pueden trabajar con fines de microzonificación sísmica o análisis estructural.

MARCO TEÓRICO

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 muy pequeña. Se ha observado que las intensidades de los movimientos sísmicos varían considerablemente a distancias muy cortas, lo cual ha llevado a pensar que uno de los factores principales para la evaluación del daño de las estructuras son las condiciones del subsuelo local, es decir, los efectos de sitio [1].

El análisis de los efectos locales o de sitio es un componente muy importante en la evaluación del riesgo sísmico. La estructura geológica de una región determina que tanto la tierra se sacudirá ante un movimiento determinado. 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].

Análisis Estructural

Desde el punto de vista de la Ingeniería, lo más importante al llevar a cabo una obra, no es la belleza del diseño ni los acabados, lo realmente fundamental es saber si la estructura puede ser realizada de una manera eficiente y si seguirá en pie a pesar de las fuerzas y deformaciones a las que pudiera verse sometida en un futuro.

El análisis estructural consiste en determinar como una estructura reaccionará cuando se encuentre bajo el efecto de diferentes fuerzas. Estas fuerzas pueden ser de naturaleza mecánica o térmica, y las reacciones tienen que ver con la manera en que la estructura se desplazará en el espacio y como afectan éstas fuerzas a los componentes de la estructura, además que fuerzas se generarán o se deben generar para compensar estos efectos

Movimiento del suelo y frecuencias de resonancia

En cuanto a las características que presentan los movimientos del suelo que son importantes para caracterizar dinámicamente las estructuras se tienen: la duración del evento, la amplitud (del desplazamiento, velocidad y aceleración) y el contenido frecuencial del mismo.

Al presentarse el movimiento del suelo, la estructura construida sobre éste, comenzará también a vibrar como una superposición de vibraciones de diferentes frecuencias, centrándose sin embargo sobre una en particular conocida como la frecuencia natural o fundamental. La frecuencia natural de un edificio es inversamente proporcional a su altura [3]; el período natural es sencillamente el inverso de la frecuencia natural (Ver **Tabla 1**).

Cuando el contenido frecuencial del movimiento del suelo está centrado alrededor de la frecuencia natural del edificio o estructura, se dice que el suelo y la estructura se encuentran en resonancia uno con el otro, produciendo esto que se incremente o amplifique la amplitud del movimiento.

Tabla 1. Período natural según la altura del edificio.

Altura del edificio	Período fundamental
2 pisos	0,2 segundos
5 pisos	0,5 segundos
10 pisos	1,0 segundos
20 pisos	2,0 segundos
30 pisos	3,0 segundos

Microtemblores.

Los microtemblores son vibraciones del suelo producidos por fuentes artificiales y que dependen principalmente de la actividad humana, por lo que también se conocen como ruido sísmico ambiental [4].

La amplitud de estos movimientos depende de las condiciones de la geología local por lo cual es muy difícil establecer rangos máximos y mínimos de amplitud. En este trabajo se utilizan sensores de velocidad (geófonos) y se establecen rangos de amplitud de entre +10 y -10, el rango de frecuencias comprende desde 0,07 hasta 100 Hz.

Aplicaciones del estudio de microtemblores

Algunas de las aplicaciones basadas en el estudio de los registros de microtemblores son:

La determinación de las características de vibración de varias capas del suelo, el período predominante, el desplazamiento y la velocidad del mismo.

La experiencia y las investigaciones realizadas han dado como resultado la aplicabilidad de la medición y del análisis de microtemblores para inferir las propiedades del suelo, y por tanto se consideran herramientas adecuadas para evaluar efectos de sitio y predecir las características de movimientos fuertes [2].

Además, otros estudios han encontrado que los microtemblores son útiles como diferenciadores de las condiciones del suelo y del efecto de la geología superficial en el movimiento sísmico, y por tanto podrían contribuir a las normas de diseño sismorresistente [4].

En cuanto se refiere al análisis estructural, los principales objetivos del análisis de la respuesta dinámica de edificios usando vibración ambiental, son los siguientes [3]:

- 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.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

A continuación se abordará el tema del diseño e implementación de las tarjetas de adquisición de datos del sistema (tanto la analógica, la digital y la de alimentación),

observando un orden secuencial similar al que sigue la señal física desde el momento en el que se adquiere hasta el momento en que se visualiza.

Transductor

El transductor utilizado en este proyecto se denomina geófono. Un geófono es un instrumento pequeño y de bajo costo que como su nombre lo indica se utiliza para medir movimientos del suelo.

El transductor utilizado es un detector de movimiento de tipo electromagnético pasivo (no necesita alimentación), consistente en un imán permanente y un arrollamiento de alambre (bobina) a su alrededor. Al presentarse un movimiento, la bobina se mueve en el campo del imán permanente; una fuerza electromotriz se genera por el movimiento relativo entre la bobina y el imán induciendo una tensión en la bobina que es proporcional a la velocidad relativa.

Módulo analógico o de acondicionamiento de señal

El acondicionamiento de la señal es uno de los componentes más importantes de cualquier sistema de adquisición de datos. Es la interfaz entre los fenómenos físicos o señales analógicas presentes en el mundo real y el resto del sistema.

Si por alguna razón el acondicionamiento de la señal y las conexiones no se realizan apropiadamente, el sistema de adquisición de datos entregará muy seguramente información errada y sin ninguna importancia para el usuario.

Para ésta aplicación se tiene una señal de tensión que por su bajo nivel se encuentra muy expuesta al ruido y que además no posee la amplitud suficiente para trabajar adecuadamente con el rango de entrada del conversor analógico-digital. Por ésta razón es necesario llevar a cabo procesos de amplificación y filtrado con el fin de entregar al conversor una señal que presente ciertas características que permitan aprovechar al máximo las potencialidades de un conversor de dieciséis bits como el que se utiliza.

Presupuestos de error

Una vez se ha definido el acondicionamiento de la señal, es necesario entrar a justificar la escogencia de los dispositivos empleados, asegurando que tengan un desempeño que cumpla con lo estipulado en el diseño inicial y que además no limiten la resolución del conversor analógico-digital con el que se va a trabajar.

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 circuito integrado (C.I) y las características de la configuración en la 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.

Al realizar el presupuesto de error, se encuentran dos tipos de error: el error inicial (sin realizar ajustes) y el error de resolución.

El error inicial se refiere a la incertidumbre que presenta el dispositivo en el circuito que se está trabajando, debido a las características del amplificador que se utiliza. Algunos de los componentes de este error pueden ser ajustados mediante calibración, compensación o filtrado, ya sea por hardware y/o por software. El error de resolución es parte del error inicial, y se refiere a los errores que no pueden ser mejorados por medio de la calibración del sistema y por lo tanto, producen un error de resolución en el circuito que impone limitantes al sistema, a este error contribuyen la no-linealidad de ganancia y el ruido en la banda de 0,1 a 10 Hz (la banda de mayor interés en la instrumentación).

Análisis de ruido del sistema

En el momento en el que ya se ha definido la resolución individual de los dispositivos usados y cuando se han acoplado dentro del diseño, es necesario entrar a definir la verdadera resolución del sistema realizando un análisis de ruido del sistema que es tanto o más importante que el anterior presupuesto de error. A partir de éste análisis se encuentran valores de ruido relativo a la entrada (RTI) y relativo a la salida (RTO) de los dispositivos. El primero permite tener una idea del nivel de ruido comparado con el nivel de la señal, mientras el segundo muestra el comportamiento general del circuito en donde la señal es aplicada.

Realizar un análisis de ruido es importante porque permite apreciar el nivel de ruido que el hardware de acondicionamiento de señal entrega al convertor analógico-digital y por tanto, es éste análisis el que facilita encontrar el rango dinámico de la tarjeta de adquisición de datos y la resolución a la que se está trabajando, la cual se puede encontrar a partir de las siguientes ecuaciones:

$$DR = 20 \log_{10} \frac{\text{máximo nivel rms de entrada}}{\text{nivel de ruido rms}} \quad [dB] \quad [1]$$

$$n = \frac{DR - 1,76}{6,02} \quad [bits] \quad [2]$$

Donde DR es el rango dinámico y n es el número de bits efectivos a los que se trabaja.

Conversión analógica-digital

Teniendo en cuenta el resultado de los análisis teóricos que indicaron que los dispositivos empleados tienen una resolución igual o mayor a 14 bits en los circuitos donde están siendo empleados y que el hardware presenta una resolución de algo más de 12 bits, se justifica el uso de un convertor de 14 o 16 bits por razones de desempeño.

Con los resultados anteriores se escoge el tipo de convertor que se desea utilizar para la aplicación, teniendo en cuenta factores como la arquitectura, velocidad, capacidad de varios canales, INL, DNL, SINAD, etc.

En este proyecto se utilizó un convertor analógico-digital de aproximaciones sucesivas (SAR) cuyo número interno en Texas Instruments es el ADS7825, teniendo en cuenta el rango de frecuencias que se va a trabajar, el número de bits de resolución (16), la capacidad para trabajar con entradas multiplexadas, la rapidez de transmisión de datos, el costo y las especificaciones concretas mencionadas en la hoja de datos del dispositivo.

Módulo digital

El módulo digital diseñado 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 basa el diseño del módulo digital, es 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 en forma continua 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.

Módulo de alimentación

Se utiliza un regulador conmutado (ISR) debido a que la portabilidad es una de las características importantes del sistema a desarrollar. El dispositivo empleado además de tener una eficiencia alta (85%), entrega tensiones complementarias de a la salida, a partir de una entrada unipolar mayor a 4,5V. Debido al ruido de conmutación generado por el ISR, se hace necesaria la implementación de un filtro LC, el cual reduce el ruido a la salida en un 94%.

Módulo de visualización

Para la visualización y almacenamiento de los datos adquiridos, se desarrolla una aplicación en Labview que permite una comunicación serial con el prototipo para realizar la descarga de datos, los cuales podrán ser visualizados en gráficas tanto en el dominio del tiempo como su espectro en potencia.

PRUEBAS

Para verificar el adecuado funcionamiento del sistema desarrollado, se llevan a cabo pruebas para demostrar el comportamiento esperado, tanto de las tarjetas de adquisición de datos como del software de visualización. Se realizan pruebas eléctricas (usando como entrada señales provenientes de un generador de señales), y pruebas de campo empleando el sistema completo.

Inicialmente, se tomaron medidas de las frecuencias fundamentales de oscilación, utilizando como patrón el acelerómetro del laboratorio de vibraciones de la escuela de Ingeniería Mecánica. Estas medidas mostraron en todos los casos errores inferiores al 1% (Ver Figura 1)

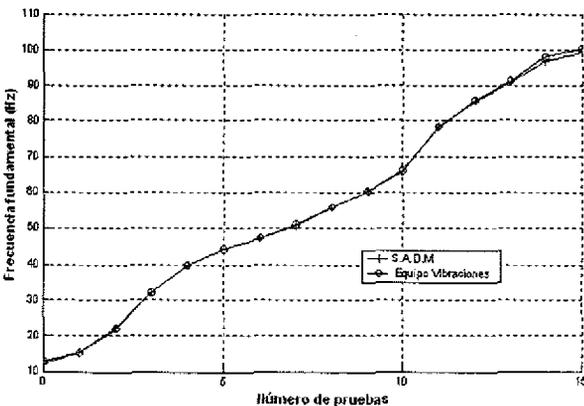


Figura 1. Comparación para frecuencias fundamentales.

Así mismo, se realizaron pruebas para comprobar la amplitud de los movimientos, tomando como base la magnitud del espectro de potencia de la componente fundamental. En las Figuras 2 y 3 se observa la respuesta del acelerómetro del laboratorio de vibraciones y del sistema de adquisición de datos microsísmicos (S.A.D.M.) desarrollado.

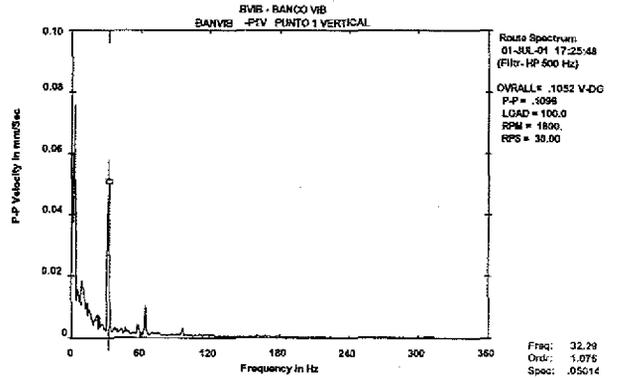


Figura 2. Respuesta del acelerómetro del laboratorio de vibraciones.

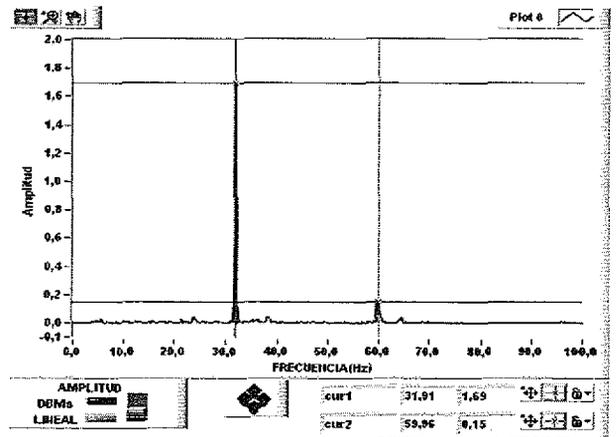


Figura 3. Respuesta del S.A.D.M.

El error máximo encontrado para la magnitud de la componente fundamental es el siguiente:

CONCLUSIONES

Se logró diseñar un equipo autónomo y portátil, operado 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").

- ✓ La precisión del sistema desarrollado es limitada por la utilización de elementos discretos como resistencias y condensadores cuya precisión individual es muy baja comparada con la de los circuitos integrados que se utilizaron.
- ✓ La transmisión de datos se hace de manera serial, para permitir la posibilidad de implementar a futuro una red de equipos con el objeto de realizar análisis estructural. Debido a la velocidad alcanzada en la transmisión de datos por puerto serial (57600 bps), es posible la implementación del modo continuo, debido a que el sistema tiene la velocidad suficiente para convertir datos y transmitirlos inmediatamente después de que fueron tomados.
- ✓ En las pruebas desarrolladas teniendo como patrón el equipo del laboratorio de vibraciones, se obtuvieron resultados para la frecuencia fundamental de vibración, con un error máximo del 1%, el error en la amplitud de la componente fundamental de vibración fue del 2,25% máximo.

- [5] NAKAMURA, Y., Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, No. 0084, pp 8, Auckland, New Zealand 2000
- [6] ANALOG DEVICES. Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning. U.S.A. 1999. e-book. www.analog.com.
- [7] ANALOG DEVICES. Practical Analog Design Techniques. U.S.A. 1999. e-book. www.analog.com.
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. Amplifiers and Bits: An Introduction to Selecting Amplifiers for Data Converters. Applications Report. 2001. www.ti.com
- [9] CALA J. y Peña O. Diseño y construcción de un sistema de adquisición de datos microsísmicos. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2004.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] TORRES G. Importancia de la microzonificación sísmica de las principales ciudades del estado de Veracruz. Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana. México. [www.smsp.org.mx/rhigiene/docs/Importancia de la Microzonificacion \(TorresMorales\).doc](http://www.smsp.org.mx/rhigiene/docs/Importancia%20de%20la%20Microzonificacion%20(TorresMorales).doc). Consultada en el año 2003.
- [2] GIRALDO V., Alfaro A., Pujades L. y Canas J. Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores. Monografía, Universidad Politécnica de Cataluña, ISBN: 84-89925-52-6, España 1999.
- [3] ESPINOZA F., Determinación de características dinámicas de estructuras. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, ISBN: 84-699-9543-X. España 1999.
- [4] MORENO L. y Alfaro A. De los Microsismos a los Microtemblores. Memorias del VIII Congreso colombiano de Geotecnia. pp 2.55- 2.66, Bogotá. 2000.