

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE UN ACELEROGRAFO PARA LA RED DE ACELEROGRAFOS DEL CISMID

DESIGN, CONSTRUCTION AND SIGNAL PROCESSING OF AN ACCELEROGRAPH FOR THE ACCELEROGRAPHS NETWORK OF CISMID

Jorge Alberto Del Carpio Salinas¹, Félix Martín Calderón Morocho²,
Percy Kike Román Quispe³

RESUMEN

Nuestra ubicación en el mundo nos hace ser un país con un alto riesgo sísmico. Teniendo en cuenta que la información producida durante un evento sísmico es de vital importancia para el estudio que realiza la sismología se hace una necesidad utilizar el tipo de instrumentación adecuada para el registro de estos datos. En la actualidad la electrónica aporta la tecnología necesaria para el estudio de fenómenos de este tipo. El diseño y construcción de un Acelerógrafo Digital nos permitirá el estudio detallado de un movimiento sísmico y el efecto causado sobre la estructura de las edificaciones. Podemos, finalmente, decir que la construcción de un instrumento de este tipo a un bajo costo permitirá repotenciar y aumentar la red acelerográfica del CISMID y en general mejorar el conocimiento que se tiene a nivel nacional de los fenómenos sísmicos.

Palabras clave.- Acelerógrafo, Sismo, Vibraciones, Microcontroladores, I2C, Gal, Conversores A/D, Filtros, RS232, Coordenadas cartesianas, MODEM, GPS.

ABSTRACT

Our location in the world makes us be a country with a high seismic risk. Keeping in mind that the information taken place during a seismic event is of vital importance for the study that achieve the seismology a necessity it is made use the type of appropriate instrumentation for the registration of these data. At the present time the electronics contributes him necessary technology for the study of phenomena of this type. The design and construction of a Digital Accelerograph will allow us the detailed study of a seismic movement and the effect caused on the structure of the constructions. Finally we can say that the construction of a instrument of this type at a low cost will allow re-potentialize and to increase the network accelerographic of the CISMID and in general improving the knowledge that one has at national level of the seismic phenomena.

Key words.- Accelerograph, Tremor, Vibrations, Microcontrollers, I2C, Gal, A/D Converters, Filters, RS232, Cartesian coordinates, MODEM, GPS.

INTRODUCCIÓN

En el último siglo, el estudio de la geofísica ha

sido ayudado por sistemas con instrumentos sensibles para la medición de movimientos de la tierra. La instalación y supervisión de estaciones

¹Dr., Ing., Jefe del Centro de Investigación y Desarrollo del Área de Procesamiento de Señales y Sistemas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, ²Alumno del Centro de Investigación y Desarrollo del Área de Procesamiento de Señales y Sistemas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, ³Bachiller del Centro de Investigación y Desarrollo del Área de Procesamiento de Señales y Sistemas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

sismológicas, graban continuamente señales de movimientos causados por terremotos en todo el mundo. La alta sensibilidad de estos instrumentos no permite obtener datos útiles de los movimientos fuertes cercanos a terremotos, ya que los grabadores salen fuera de su escala. No se ha considerado esta limitación como de gran importancia por razones geofísicas ya que los terremotos cercanos son comparativamente raros.

El efecto del terremoto solo afecta cuantitativamente cuando son grabadas a grandes distancias, esta posición puede prevalecer todavía, pero por su naturaleza requiere de su estudio. La persecución de este estudio pronto llevó al desarrollo de una nueva clase de instrumentos de movimientos fuertes como son los sismógrafos.

Los sismógrafos de movimiento fuerte tienen que tener varios requisitos bastante especiales, el más importante es reducir su sensibilidad comparado con sus predecesores. La diferencia más significativa es dictada por la misma naturaleza de su tarea: dar una buena indicación de los diferentes efectos locales así como cubrir un área alrededor del epicentro del terremoto. Tener una probabilidad razonable de detectar terremotos cuando estos ocurren. Estos instrumentos deben ser numerosos, es por ello que deben ser relativamente económicos. Estos instrumentos deben ser extendidos en grandes áreas, pero no pueden ser supervisados continuamente y deben ser capaces de tener un funcionamiento automático fiable después de periodos largos de estar configurados para grabar movimientos.

Un paso importante en este desarrollo es la cinta magnética de grabación, la cual almacena los registros de los movimientos en el sistema. El avance tecnológico de estos equipos es constante, es por ello que el almacenamiento de los datos ahora es digital, estos datos son almacenados en bancos de memoria digitales y en algunos casos en discos duros, permitiendo almacenar numerosos eventos de los movimientos de la tierra.

El análisis de la operación del sistema de instrumentación es necesario para el almacenamiento de la información obtenida, la cual, es usada para dar una información. Los sistemas disponibles realizan la grabación de la aceleración en el tiempo y la respuesta espectral, los cuales son de gran valor en evaluar posibles

daños de las estructuras después de un terremoto, y para el uso en el criterio de diseño para nuevas estructuras en un área dada. Estos también pueden producir propiedades estadísticas los cuales son de valor, por ejemplo, en la definición del modelo de terremotos para estudios teóricos y experimentales de respuestas de estructuras. Estos sistemas realizan grabaciones de la “velocidad” en el tiempo y “desplazamiento” en el tiempo, los cuales son de valor en la ayuda de identificar el mecanismo de la fuerza del movimiento de la tierra.

Los términos velocidad y desplazamiento son de gran importancia. Los sistemas de instrumentación utilizados definen la velocidad y desplazamiento dentro de un periodo prolongado que puede ser corto como la mitad del tiempo de duración de grabación. Con esta información se obtienen las curvas de respuesta espectral, los cuales, determinan las respuestas de las estructuras diseñadas en ingeniería.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN SISMÓGRAFO

El instrumento tradicional, tal como se muestra en la Fig. 1, usado para registrar el movimiento de la tierra es un sistema con un solo grado de libertad, un dispositivo masa-resorte-amortiguamiento. La Fig. 2, muestra el sistema básico con su ecuación de movimiento.

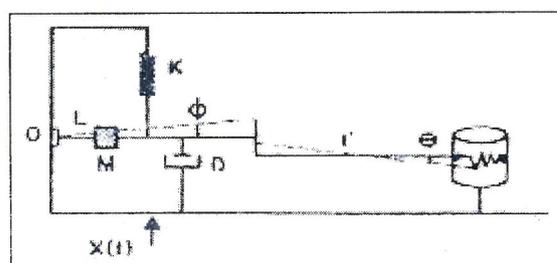


Fig. 1 Esquema básico de un sismógrafo.

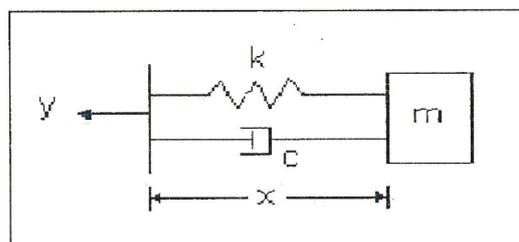


Fig. 2 Sistema masa-resorte-amortiguamiento.

$$\begin{aligned}
 m(\ddot{x} - \ddot{y}) + c\dot{x} + kx &= 0 \\
 \ddot{x} + 2\omega_0\zeta\dot{x} + \omega_0^2x &= \ddot{y}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

Donde:

m = Masa sísmica

k = Constante del resorte

c = Coeficiente de amortiguamiento

$\omega_0 = \sqrt{k/m}$ = Frecuencia natural (en radianes)

$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ = Coeficiente de amortiguamiento crítico

Para el inicio de la grabación en $t=0$, conociendo las condiciones iniciales la solución integral de esta ecuación es:

$$y(t) = y(0) + t\dot{y}(0) + x(t) + 2\omega_0\zeta \int x(\tau)d\tau + \omega_0^2 \int \int x(s)dsdt
 \quad (2)$$

En instrumentación sísmica, el movimiento “ y ” del apoyo es el movimiento de la tierra, y la medida del movimiento “ x ” es el desplazamiento relativo. Los instrumentos sísmicos caen en las tres categorías, dependiendo de la elección de ω_0 y ζ . Estas elecciones están reflejadas en la importancia relativa de los últimos tres términos de la (ecuación 2). Cuando el periodo del instrumento es mas largo que el periodo del movimiento “ y ”, el termino predominante es “ x ” (desplazamiento en metros). Cuando la frecuencia contenida en “ y ” es cercana a ω_0 y ζ es mucho mas grande que la unidad, el termino medio predomina (velocidad). Cuando la frecuencia contenida en “ y ” son menores a ω_0 , el ultimo termino predomina (aceleración). Son usados comúnmente, los instrumentos de medida de la fuerza de movimiento de terremotos siendo casi siempre del tipo de aceleración, donde los sismógrafos para telesismos usan el desplazamiento y la velocidad.

Ventajas de los acelerómetros para medir la fuerza del movimiento

- El elemento transductor tiene relativamente una alta frecuencia natural, esto hace que los acelerómetros sean pequeños, ligeros y rígidos que otros instrumentos que miden desplazamiento o velocidad.
- Los acelerómetros proveen grabaciones midiendo directamente la intensidad, la cual

es interesante para la ingeniería de terremotos. Además de la grabación de la aceleración en el tiempo, la curva de respuesta espectral puede ser calculada.

- Los instrumentos que miden la intensidad de los desplazamientos tienen la dificultad de que el movimiento de la tierra cerca del epicentro de los terremotos algunas veces alcanza amplitudes de algunas yardas. Tal longitud relativa de desplazamiento no puede ser acondicionada en un instrumento por razones de tamaño.
- La sensibilidad de los instrumentos que miden la velocidad es crítica dependiendo del valor de ξ , mientras que los acelerómetros dependen solamente de ω_0 . Donde es comprendido un rango de temperatura, el control preciso de ω_0 es relativamente fácil, donde una correspondiente precisión en el control de ξ es mucho mas difícil.

Unidad de medida de la intensidad de la aceleración

La unidad “gal” es una medida que indica la intensidad de la aceleración del movimiento sísmico, y se cuantifica de la siguiente forma: La aceleración de la gravedad es de 9.81 m/s^2 ó igual a $981 \text{ cm/s}^2 = 981 \text{ gal}$, es decir $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$.

Para tener una idea de la magnitud de estos valores debemos indicar que el terremoto sucedido en Lima el año 1974, tuvo una intensidad de aceleración de 300 gal , es decir, casi un tercio de la aceleración de la gravedad.

Transductor piezoeléctrico

El transductor consiste de sensores piezoeléctricos, amplificadores de carga y amplificadores de salida. Los sensores utilizados en el acelerógrafo emplean el efecto piezoeléctrico del zirconio y titanio de plomo. Cuando un esfuerzo externo es aplicado al elemento piezoeléctrico, se genera una carga eléctrica en la superficie del elemento (electrodos). Esta carga es proporcional al esfuerzo aplicado o a la fuerza externa aplicada al elemento (aceleración). Ver Fig. 3.

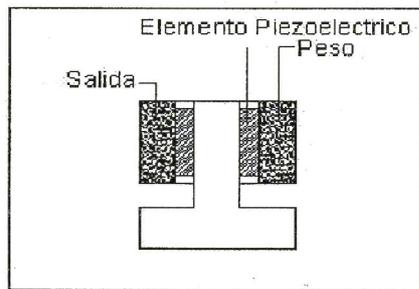


Fig. 3 Principio de construcción de un sensor piezoeléctrico.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ACELEROGRAFO DIGITAL

Se han analizado las deficiencias de los Acelerógrafos existentes instalados y se ha diseñado un diagrama de bloques que soluciona en gran parte estas deficiencias. Fig. 4.

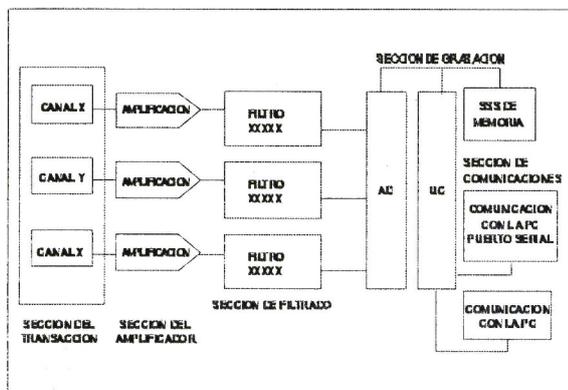


Fig. 4 Diagrama de bloques del acelerógrafo.

Como se observa en la Fig. 4, esta solución está compuesta por cinco etapas definidas de la siguiente manera:

- La primera etapa es la del transductor, el cual adquiere las intensidades de aceleraciones sísmicas y las convierte a niveles de voltaje, este transductor consta de sensores piezoeléctricos, amplificadores de carga y amplificadores de salida.
- Debido a que los niveles de la señal son muy débiles se continua con una sección de amplificación la cual ha sido implementada con amplificadores de instrumentación para elevar el nivel de voltaje así como para eliminar parte del ruido de entrada ya que este

amplificador es un amplificador diferencial, la ganancia del amplificador de instrumentación se ha diseñado de tal manera de captar la mínima señal que adquiere el transductor y que a la vez no sature el amplificador para un nivel de entrada dado [1].

- La siguiente sección es la del filtrado analógico la cual nos permite limitar el ancho de banda de la señal a adquirir, para eliminar las perturbaciones del medio ambiente y artificiales, así como evitar el efecto de aliasing al momento del muestreo de la señal [1].
- Debido a que el transductor posee tres canales de la señal, dos horizontales (X, Y) y una vertical (Z), las tres etapas descritas anteriormente se deben realizar a los tres canales de entrada al sistema (X, Y, Z). El modulo de control del sistema recibirá estas tres señales tanto para la activación como para detener la grabación del movimiento sísmico, esto significa controlar el inicio y la finalización de la conversión analógica-digital y también para controlar el almacenamiento de los datos digitales que se almacenan en los bancos de memoria diseñados para esta tarea.
- Así también el modulo de control controla la comunicación entre el acelerógrafo y la computadora a través de la comunicación serial asíncrona usando el protocolo RS-232. La comunicación entre el sistema y la computadora permitirá enviar los datos almacenados en las memorias seriales del acelerógrafo hacia la computadora, también se enviara los datos obtenidos del GPS (Global Positioning System) como son la hora exacta, fecha y ubicación geográfica del equipo (longitud y latitud).

Partes del acelerógrafo digital

Para el funcionamiento del sistema se requiere:

- Un transductor (acelerómetro), el cual adquiere la intensidad de la señal sísmica y la convierte en niveles de voltaje analógicos.
- Un conversor AD, para la conversión analógica-digital de la señal una vez acondicionada para la conversión.

- Una tarjeta de adquisición de las señales sísmicas obtenidas del transductor y su respectivo dispositivo de almacenamiento.
- Un GPS para registrar la hora exacta, fecha y ubicación geográfica cuando se inicia el registro del movimiento sísmico.
- Una computadora para realizar la comunicación con el sistema, para la transferencia de los datos almacenados en la memoria del sistema.

Tarjeta de adquisición

La tarjeta de adquisición diseñada e implementada para este Acelerógrafo Digital consta de las siguientes secciones:

- Sección del Transductor
- Sección de Amplificación
- Sección de Filtrado
- Sección de Control
- Sección de Grabación
- Sección de Comunicaciones

Sección del transductor.- Las características del transductor utilizado para este prototipo podemos observarlas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del transductor piezoeléctrico utilizado en el acelerógrafo.

Modelo	PV-20
Acelerómetro piezoeléctrico	Tri-axial
Sensibilidad	$0.1V/(m/s^2) =$ $1mV/(cm/s^2) =$ $1mV/gal$
Máxima aceleración	+/- 50 m/s^2 (alrededor de +/-5G)
Frecuencia	0.1 a 100Hz (+/- 10%)
Impedancia de Salida	Alrededor de 200 Ω
Máximo impacto de aceleración	3000 m/s^2

Las señales de cada eje que se obtienen del transductor son independientes, y es por ello que su conexión hacia la tarjeta de adquisición nos

permite el almacenar de manera individual cada canal de adquisición.

Sección de amplificación.- Debido a que las señales adquiridas del transductor son muy pequeñas, es necesario amplificarlas para poder ser registradas por el conversor AD, tal como se muestra en la Tabla 2. Para este fin se ha utilizado un Amplificador Diferencial de Instrumentación INA2141, esto es debido a que este tipo de amplificador elimina parte del ruido introducido al sistema debido a su alto CMRR.

Tabla 2 Niveles de amplificación del acelerógrafo.

Entrada (gal)	Salida (voltios)	Amplificación x5
1 gal	1m Voltio (mínimo)	5m Voltio (mínimo)
1000 gal	1 Voltio (máximo)	5 Voltio (máximo)

Sección de filtrado.- Para esta etapa se ha utilizado dos filtros activos Bessel de 4 polos, ver Tabla 3. Se ha seleccionado la estructura Sallen Key para estos filtros, (según se observa en la Fig. 5), debido a que se utiliza capacitores, resistencias y amplificadores. Los valores de estos componentes son determinados en base a la frecuencia de corte [3].

a) Estructura Sallen-Key:

$$R = \frac{k_1}{CFc} \quad R1 = R2 \times k_2$$

$$R2 = 10k\Omega \quad C = 0.01\mu F$$

Tabla 3. Parámetros para el filtro de orden 4.

# Polos	Bessel		
	K1	K2	
4	1 estado	0.1111	0.084
	2 estado	0.0991	0.759

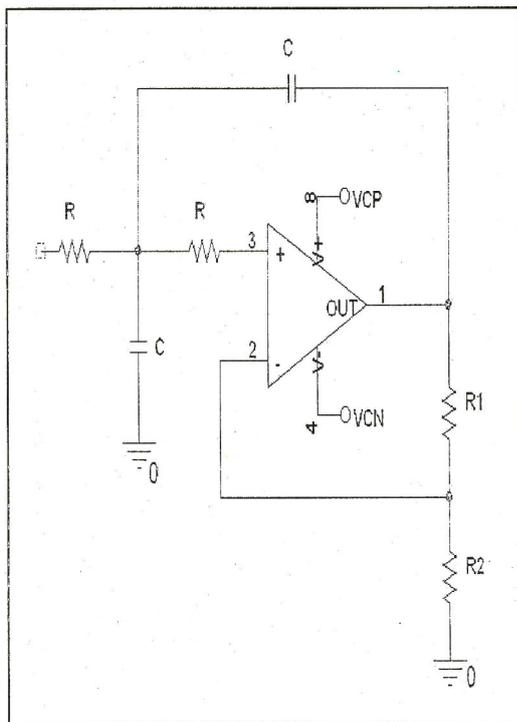


Fig. 5 Estructura Sallen-Key.

b) Filtro Bessel: ($F_C=50\text{Hz}$):

Las señales de salida de este filtro de 50Hz tendrán dos tareas, la primera esta de generar las señales de inicio y final de adquisición y la segunda es como señales de entrada al conversor analógico digital [2].

- Valores para el primer estado
 $R = 222.2 \text{ k}\Omega$
 $R1 = 840 \Omega$
- Valores para el segundo estado
 $R = 198.2 \text{ k}\Omega$
 $R1 = 7.59 \text{ k}\Omega$

c) Filtro Bessel: ($F_C = 10\text{Hz}$):

Es la entrada al sistema para la generación de las señales de inicio y final de la adquisición por parte del conversor análogo digital [2].

- Valores para el primer estado
 $R = 1.111 \text{ M}\Omega$
 $R1 = 840 \Omega$
- Valores para el segundo estado
 $R = 991 \text{ k}\Omega$
 $R1 = 7.59 \text{ k}\Omega$



Fig. 6 Tarjeta de adquisición del acelerógrafo.

Sección de control.- El módulo de control del Acelerógrafo Digital es controlado por un microcontrolador PIC16F877 de la familia Microchip, el cual, trabaja con un cristal de 20Mhz [6]. La lógica de este sistema esta basado en las fases que componen un movimiento sísmico (Ver figura 7).

El microcontrolador nos da muchas características interesantes para la comunicación entre los componentes de la tarjeta de adquisición, pero se necesitó implementar una interfase de comunicación entre el microcontrolador y el GPS debido a que es necesario multiplexar las líneas de comunicación del microcontrolador con la computadora y el GPS.

Se han utilizado las siguientes funciones de este microcontrolador para este modulo:

- Modulo de comunicación serial USART (RS232) para la comunicación con la PC y el GPS.
- Modulo de comunicación serial I²C para el almacenamiento de los datos en memorias seriales.
- Modulo de conversión A/D de 10 bits de resolución.

Sección de grabación.- El microcontrolador PIC16F877 se encarga de monitorear permanentemente las señales adquiridas del transductor, verificar si el nivel de las mismas son mayores a la del nivel de disparo. El nivel de disparo puede ser modificado por el usuario desde

el programa de adquisición en la computadora [6]. El microcontrolador controla la tarjeta de adquisición en base al diagrama de flujo de la Fig. 7.

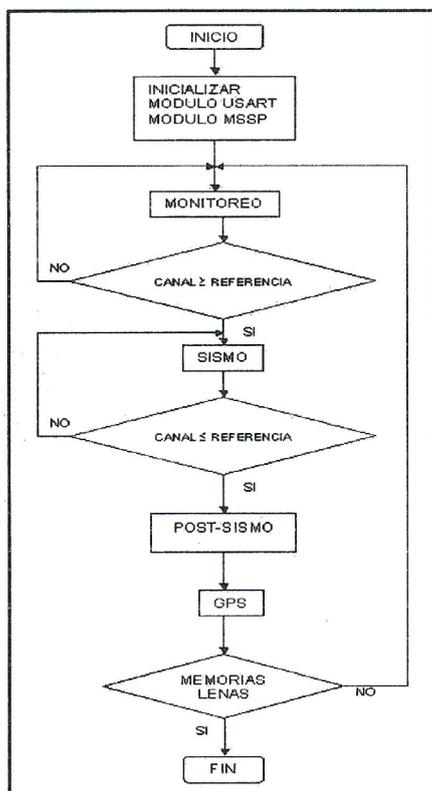


Fig. 7 Diagrama de flujo del sistema de adquisición para el microcontrolador.

Este sistema esta compuesto de cinco módulos:

- Inicialización del módulo de Configuración.
- Etapa de Monitoreo
- Etapa de almacenamiento del Sismo
- Etapa de almacenamiento del Post-Sismo
- Adquisición de los datos del GPS

El microcontrolador realiza cada una de las etapas de manera secuencial, durante cada una de las etapas, el sistema esta almacenando las señales adquiridas por el transductor en las memorias seriales disponibles. El sistema se encarga de verificar el direccionamiento adecuado de las señales digitalizadas dentro de las memorias seriales [8].

Este tipo de almacenamiento es completamente electrónico y se realiza a través del modulo de comunicación serial I²C. El bus I²C permite

trabajar con una transferencia mínima de 100Kbits/s y soporta cualquier tipo de dispositivos (NMOS, CMOS, bipolar, etc.).

Está implementado sobre dos líneas físicas, una de datos SDA (Serial Data Line), y una de reloj SCL (Serial Clock Line). Este tipo de transmisión síncrona le permite realizar un AND en ambas líneas para poder validar un byte de datos [7].

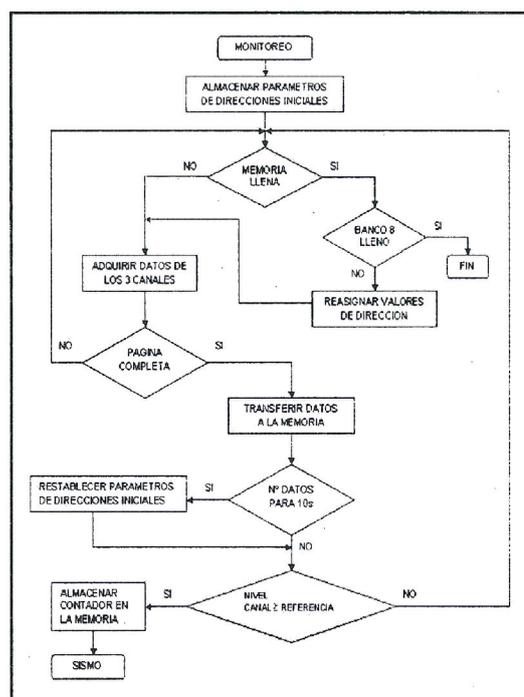


Fig. 8 Diagrama de flujo del modulo de monitoreo.

Se ha considerado para el diseño de este sistema un tiempo de almacenamiento de 10 segundos para la etapa de monitoreo y, 10 segundos para la etapa de almacenamiento del post-sismo. Esto es, debido a que el estudio de las señales adquiridas antes y después del sismo permitirá observar el incremento y la atenuación de las señales sísmicas.

Este sistema luego de adquirir las señales sísmicas toma los datos del GPS (fecha y hora), para almacenarlos en la memoria serial disponible.

Una vez completado este proceso se reinicia el proceso de monitoreo a la espera de otro evento sísmico. Cuando se ha alcanzado el limite de almacenamiento de las memorias seriales, el sistema desactiva el modulo de monitoreo y no permite la grabación de evento sísmico alguno.

El sistema esta a la espera que el usuario conecte el acelerógrafo a una computadora para leer los eventos sísmicos almacenados, una vez realizada esta operación el usuario puede borrar la información almacenada en las memorias seriales y reiniciar el sistema de adquisición.

Sección de comunicaciones.- El microcontrolador tiene incluido un modulo de comunicación serial USART, con este modulo podemos conectar el acelerógrafo con la computadora para enviar los eventos sísmicos almacenados y el usuario pueda interactuar con las opciones que le permite el sistema de adquisición como el borrado de las memorias seriales y el cambio del nivel de disparo [4].

Para adquirir los datos del GPS se debió diseñar una interfase que multiplexe las señales que ingresaban al USART del microcontrolador, esta interfase es controlada por el microcontrolador activando el modulo respectivo, ver Fig. 9.

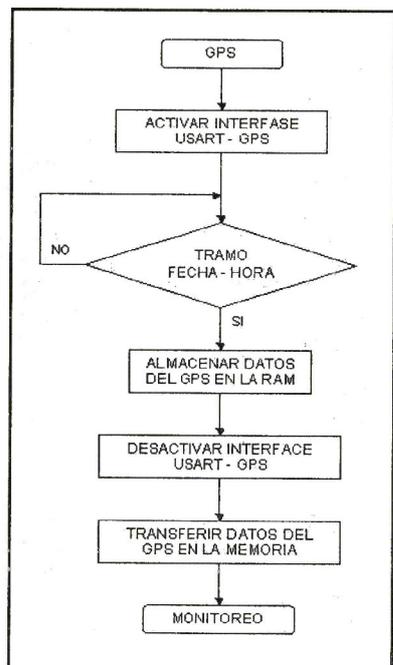


Fig. 9 Diagrama de flujo del modulo de Adquisición de datos del GPS.

El GPS esta permanentemente enviando datos en formato NMEA, pero solo hay una trama donde se encuentran los datos que se desean, es por eso que por el método de poleo, el sistema de adquisición del acelerógrafo capta la trama deseada y la almacena al final del evento sísmico almacenado.

Una vez terminado este proceso se desactiva la interfase y se retorna al modulo de monitoreo para la grabación de posteriores eventos sísmicos.

SOFTWARE DE ADQUISICIÓN SASS-CID-FIEE

La finalidad del diseño y construcción de un Acelerógrafo Digital, es darnos la posibilidad de analizar las señales del evento sísmico almacenados en las memorias seriales del acelerógrafo. Para cumplir con este objetivo se ha diseñado un programa de adquisición, este fue programado en Visual C++ 6.0, y utiliza el UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) de la computadora. Este programa le permite al usuario una conexión de 9600 o 19200 baudios (estándar RS232) con el acelerógrafo, ver Fig. 10 [5, 9].

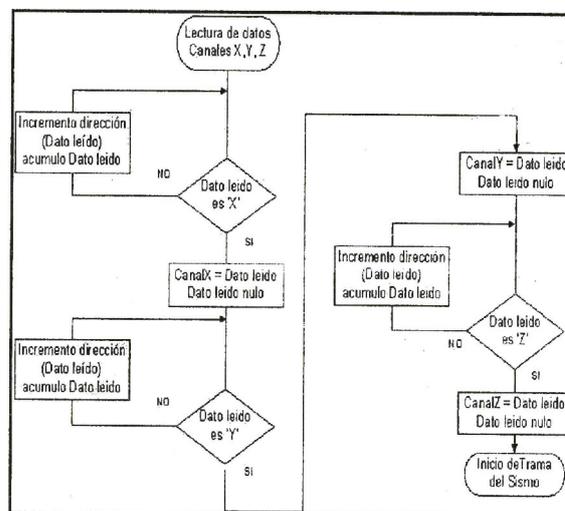


Fig. 10 Diagrama de flujo de la lectura de datos del Programa de Adquisición SASS-CID-FIEE.

Luego de configurar y establecer la conexión con el acelerógrafo digital, el programa de adquisición envía una petición al acelerógrafo para que inicie el proceso de lectura de los eventos sísmicos almacenados en las memorias seriales.

La transmisión de los datos almacenados en las memorias seriales hacia la computadora se realizan en formato ASCII. Los datos enviados hacia la computadora desde el acelerógrafo corresponden a las tres señales del transductor piezoeléctrico. Este formato le va a permitir al programa de adquisición convertir la información enviada en

niveles de voltaje a su correspondiente escala en gals.

Una de las principales características de este programa, es la posibilidad de que el usuario modifique el nivel de disparo del acelerógrafo. Son mucho más comunes los sismos de nivel bajo, es por ello que el usuario puede escoger entre los tres niveles de disparo disponibles en el programa de adquisición. Ver Fig. 11.

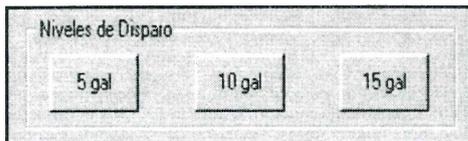


Fig. 11 Niveles de disparo disponibles para el usuario en el programa de adquisición.

El programa de adquisición le permite al usuario observar las señales sísmicas almacenadas en las memorias del acelerógrafo al mismo tiempo que se reciben y almacenan en la computadora, para verificar el funcionamiento de la tarjeta de adquisición se simuló un sismo manualmente, las señales que se almacenaron en las memorias del acelerógrafo y que posteriormente fueron recuperadas se pueden observar en la Fig. 12.

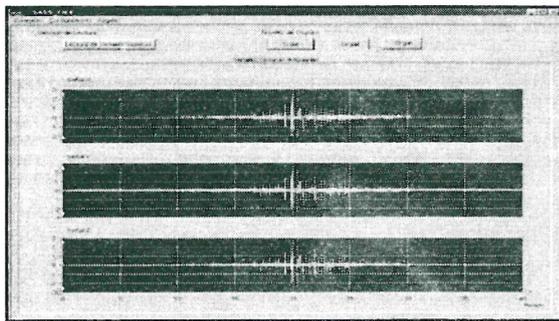


Fig. 12 Visualización de las señales sísmicas almacenadas en el acelerógrafo.

El resultado final del programa de adquisición es un archivo de texto independiente para cada evento sísmico, ver Fig. 13 con la siguiente información:

- Fecha y Hora del evento sísmico.
- Columna con el tiempo del evento sísmico.
- Columna con la información adquirida del eje X del transductor durante el evento sísmico.

- Columna con la información adquirida del eje Y del transductor durante el evento sísmico.
- Columna con la información adquirida del eje Z del transductor durante el evento sísmico.

TIEMPO	EJE_X	EJE_Y	EJE_Z
0.000000	0.008905	0.008905	0.008905
0.005000	0.008905	0.008905	0.008905
0.010000	0.008905	0.008905	0.008905
0.015000	0.008905	0.008905	0.008905
0.020000	0.008905	0.008905	0.008905
0.025000	0.008905	0.008905	0.008905
0.030000	0.008905	0.008905	0.008905
0.035000	0.008905	0.008905	0.008905
0.040000	0.008905	0.008905	0.008905
0.045000	0.008905	0.008905	0.008905
0.050000	0.008905	0.008905	0.008905
0.055000	0.008905	0.008905	0.008905
0.060000	0.008905	0.008905	0.008905
0.065000	0.008905	0.008905	0.008905
0.070000	0.008905	0.008905	0.008905
0.075000	0.008905	0.008905	0.008905
0.080000	0.008905	0.008905	0.008905
0.085000	0.008905	0.008905	0.008905
0.090000	0.008905	0.008905	0.008905
0.095000	0.008905	0.008905	0.008905
0.100000	0.008905	0.008905	0.008905
0.105000	0.008905	0.008905	0.008905
0.110000	0.008905	0.008905	0.008905
0.115000	0.008905	0.008905	0.008905
0.120000	0.008905	0.008905	0.008905

Fig. 13 Archivo de texto con la información de un evento sísmico.

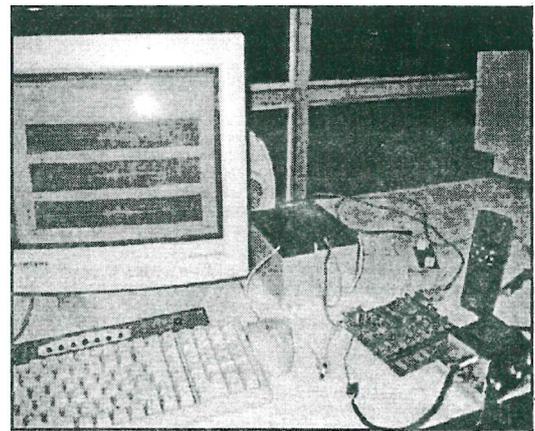


Fig. 14 Sistema de adquisición del acelerógrafo Digital.

CONCLUSIONES

Un punto importante de este proyecto es el haber construido un acelerógrafo digital a un bajo costo y que puede ser utilizado en nuestro país.

El diseño y construcción de este prototipo es un gran aporte para la sismología en el país debido al elevado costo de los acelerógrafos digitales existentes en el extranjero.

El tiempo de almacenamiento alcanzado en este prototipo es el suficiente para almacenar 10 sismos de 30 segundos de duración.

Una opción adicional para el usuario es el poder utilizar una computadora para el almacenamiento de las señales sísmicas, al mismo tiempo el programa de información le permitirá al usuario el poder ver en tiempo real las señales sísmicas del transductor y procesadas en la tarjeta de información del acelerógrafo.

La tarjeta de información construida en este proyecto nos ha permitido experimentar de manera suficiente con señales sísmicas, aunque es claro que este tipo de tarjeta de información no solamente servirá para el almacenamiento de eventos sísmicos, sino que puede ser utilizada en la información de estructuras u otros eventos.

El programa de información es el punto de inicio para el procesamiento de las señales sísmicas. El procesamiento de estas señales dependerá del tipo de información que los sismólogos deseen extraer de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres -CISMID, por la información técnica brindada durante el desarrollo de este proyecto y al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Electricidad y Electrónica FIEE de la

Universidad Nacional de Ingeniería - UNI por haber financiado este proyecto.

REFERENCIAS

1. **Oppenheim, A. V., Schafer, R. W.**, "Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto", 2da Edición Prentice Hall Iberia, Madrid, 2000.
2. **Smith, S. W.**, "The Scientist and Engineer's Guide To Digital Signal Processing", California Technical Publishing, 1997.
3. **Rashid, M. H.**, "Circuitos Microelectrónicos Análisis y Diseño", International Thomson Editores, México 1999.
4. **Angulo, J. M.** "Microcontroladores PIC. Diseño Practico de Aplicaciones", Ed. Mc Graw Hill, Madrid 2000.
5. **Cevallos, Fco. J.**, "Microsoft Visual C++, Aplicaciones para WIN32", Editorial RA-MA, Madrid 1999.
6. <http://www.microchip.com>, "Datasheet PIC16F877", Microchip Technology Inc.
7. <http://www.philips.com>, "The Bus I2c and How to Use it", Philips Semiconductor.
8. <http://www.microchip.com>, "Datasheet Serial EEPROM 24LC256", Microchip Technology Inc.
9. <http://www.microsoft.com>, "MSDN", Microsoft Corp.

Correspondencia: jdelcarpio@uni.edu.pe

Recepción de originales: diciembre 2005
Aceptación de originales: febrero 2006