

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE UN SISTEMA PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

DESIGN, CONSTRUCTION AND SIGNAL PROCESSING OF A SYSTEM FOR ANALYSIS OF VIBRATIONS

Jorge Alberto Del Carpio Salinas¹, Félix Martín Calderón Morocho²

RESUMEN

Uno de los factores que determinan la productividad dentro de una empresa es el estado de la maquinaria con la que se cuenta para la producción. Nuestro objetivo fue diseñar un sistema que permita a los ingenieros supervisar y evaluar el estado de la maquinaria que vibra, para que esta no solamente sea reparada cuando deje de funcionar, sino que se tenga la posibilidad de llevar un registro periódico del funcionamiento de la misma. Con ello, se lograra identificar las fallas de la maquinaria en sus diversas fases evolutivas. Esto permitirá realizar una adecuada corrección del problema disminuyendo el costo de mantenimiento y, por tanto, detener la maquinaria por un menor periodo de tiempo. El sistema que hemos diseñado está compuesto por una tarjeta de adquisición que permitirá captar y transferir las vibraciones mecánicas de la maquinaria a través de un software de análisis que permita a los ingenieros evaluar y diagnosticar las fallas mecánicas.

Palabras clave: Vibraciones mecánicas, Análisis, Transductores piezoeléctricos, Microcontroladores, Puerto paralelo, Aceleraciones, G, Conversores A/D, Filtros, RS232.

ABSTRACT

One of the factors that determine the productivity inside a company is the state of the machinery with which is counted for the production. Our objective was to design a system that allows the engineers to supervise and to evaluate the state of the machinery, so that this is not only repaired when it doesn't work, but rather one has the possibility to take a periodic registration of the operation of the same one. With it, it'll be possible to identify the flaws of the machinery in their diverse evolutionary phases. This will allow to carry out an appropriate correction of the problem diminishing the maintenance cost and, therefore, to stop the machinery for a smaller period of time. The system that we have designed is compound for a card of acquisition that will allow to capture and to transfer the mechanical vibrations of the machinery toward analysis software that allows the engineers to evaluate and to diagnose the mechanical flaws.

Key words: Mechanical vibrations, Analysis, Piezoelectric transducers, Microcontrollers, Parallel port, Acceleration, G, A/D converters, Filters, RS232.

INTRODUCCIÓN

En las tres últimas décadas, el análisis de las vibraciones mecánicas ha venido a ser uno de los métodos más efectivos para la detección de fallas en máquinas mecánicas. La industria ha visto

incrementar su rendimiento con la implementación de programas de mantenimiento predictivo. Es decir, el área de mantenimiento revisa periódicamente la maquinaria y de acuerdo al análisis obtenido se estima el estado de la maquinaria; esto se realiza durante

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 de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

el funcionamiento de la maquinaria y no es necesario detener la producción para realizar este tipo de análisis. En caso de que esta tenga fallas se estima el tiempo útil de funcionamiento, y se programa de acuerdo a esto una fecha específica para detener esa maquinaria y que la misma entre a reparación.

El análisis de las señales de vibraciones le permite al ingeniero conocer las fallas predominantes en la maquina. Este tipo de fallas va desde el desalineamiento de ejes, rajaduras en los cojinetes, desbalanceo, engranajes defectuosos, etc. Esto se consigue de manera efectiva con un conocimiento previo de la estructura interna de la maquinaria [6].

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El análisis de los requerimientos necesarios para este tipo de sistema nos ha permitido diseñar el diagrama de bloques que se observa en la Fig. 1, [9].

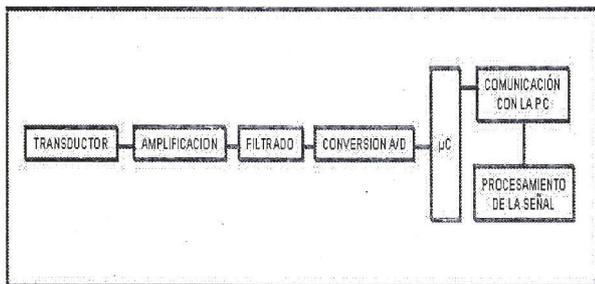


Fig. 1 Diagrama de bloques del sistema.

Componentes del sistema

- Un transductor (acelerómetro) el cual adquiere la intensidad de la aceleración y la convierte en niveles de voltaje analógicos.
- Una tarjeta de adquisición para el acondicionamiento de las señales de aceleración obtenidas del acelerómetro.
- Un conversor AD, para la conversión analógica-digital de la señal acondicionada para la conversión.
- Una computadora para la transferencia de datos tomados por la tarjeta de adquisición y el procesamiento de las señales obtenidas del acelerómetro.

Tarjeta de adquisición del sistema para análisis de vibraciones

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

- Sección del Transductor
- Sección de Amplificación
- Sección de Filtrado
- Sección de Adquisición

Sección del transductor.- Se ha utilizado un acelerómetro piezoeléctrico. En conjunto presenta mejores características que cualquier otro tipo captador. Tiene una gama de frecuencias muy amplia y muy buena linealidad en todas ellas, tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del acelerómetro piezoeléctrico.

Modelo	M/AC122-1A
Sensitividad $\pm 10\%$	100mV/g
Rpta. En Frec. $\pm 3\text{dB}$	0,5-15000Hz
Rango dinámico	$\pm 50\text{g}$
Máximo impacto	5000g
Fuente de Voltaje	18-30V _{DC}
Corriente de excitación	2-10mA

Sección de amplificación.- El amplificador de instrumentación usado para el diseño es el AD627, es un amplificador de baja potencia y es un amplificador de alta precisión. Con una simple conexión de pines se configura la ganancia 5 V/V sin el uso de resistores externos.

El AD627 presenta un bajo voltaje de offset (25 μV), fluctuando entre (0.1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) y un alto CMMR (96dB con G=5-1000). El rango de temperatura para su uso es de -40°C a $+85^\circ\text{C}$.

Sección de filtrado.- Se utilizaron para esta etapa filtros Bessel de orden 6, este tipo de filtros presentan un retardo de tiempo máximamente

plano hasta la frecuencia de corte, lo cual nos garantiza que la forma de onda no será distorsionada en la banda de paso.

Estructura Sallen-Key.-

$$R = \frac{k_1}{CFc} \quad R_1 = R_2 \times k_2 \quad (1)$$

$$R_2 = 10k\Omega \quad C = 0.01\mu F$$

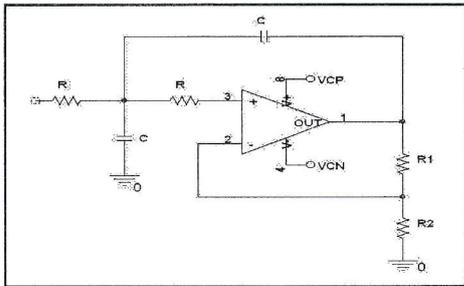


Fig. 2 Estructura Sallen-Key [2].

Tabla 2. Coeficientes para la estructura Sallen-Key.

# poles	Bessel	
	K ₁	K ₂
6 stage 1	0,0990	0,040
stage 2	0,0941	0,364
stage 3	0,0834	1,023

Para esta etapa se ha definido una frecuencia de corte de 1KHz, esto es debido a las limitaciones en la transmisión [3], Fig. 3.

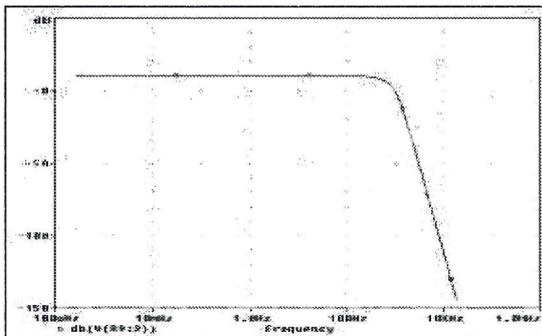


Fig. 3 Respuesta en frecuencia del filtro Bessel.

Sección de adquisición.- Para el control de la tarjeta de adquisición se ha utilizado un microcontrolador PIC16F877. Este tiene incorporado un conversor A/D de 10 bits, el cual es utilizado para la conversión de las señales

análogas y son transmitidas digitalmente hacia la computadora, [4, 7] Fig. 4.

Debido a las limitaciones en la velocidad de transmisión de datos este prototipo se diseño para que trabaje a una frecuencia de muestreo de 2KHz.

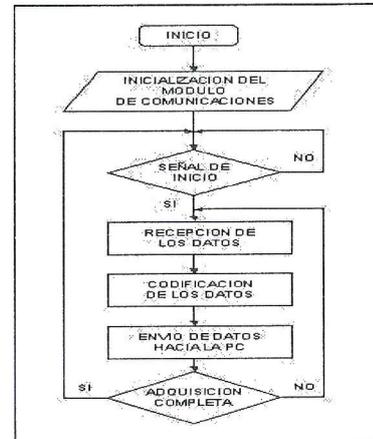


Fig. 4 Diagrama de flujo del sistema de adquisición.

Para la transmisión de datos de la tarjeta de adquisición se utilizo el protocolo RS-232, con una velocidad de 115200 baudios.

TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO CORTO (STFT)

El criterio para este tipo de análisis es la presunción de que las señales tienen una frecuencia variable en el tiempo. Es decir, son señales no estacionarias. Este modelo de señales es adecuada para describir señales de radares, sonar, voz y comunicación de datos.

Es claro que una DFT (Transformada Discreta de Fourier) no sería suficiente para describir este tipo de señales, debido a que durante la fase promedio de espectros se pierde información sobre la variación de la frecuencia en el tiempo. Es por ello que llegamos al concepto de Transformada de Fourier dependiente del tiempo denominada también *Transformada de Fourier de Tiempo Corto* [1].

La Transformada de Fourier dependiente del Tiempo de una señal $x[n]$ se define como:

$$X[n, \lambda] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[n+m]w[m]e^{-j\lambda m} \quad (2)$$

Siendo $w[m]$ una secuencia de ventana. En la representación de Fourier dependiente del tiempo, la secuencia unidimensional $x[n]$, función de una única variable discreta, se convierte en una función bidimensional de la variable temporal n , que es discreta, y de la variable de frecuencia λ , que es continua.

Muestreo en el tiempo y frecuencia

El cálculo de $X(n,\lambda)$ se puede realizar solo sobre un conjunto finito de valores de λ , lo que corresponde a muestrear la transformada de Fourier dependiente del tiempo en el dominio de la frecuencia.

$$w[m] = 0, \text{ para } 0 \leq m \leq L-1 \quad (3)$$

donde es necesario una secuencia de ventana $w[n]$ de longitud finita igual a L .

El uso de una ventana no causal en la (ecuación 3) simplemente es más conveniente para nuestro análisis, ya que conduce de forma natural a la interpretación de la transformada de Fourier dependiente del tiempo muestreada como la DFT de la secuencia enventanada que comienza en la muestra n .

Para comprender mejor como funciona este procedimiento podemos darle una nueva notación a la secuencia de la señal original (ecuación 4). Esta notación implica expresamente que la transformada de Fourier dependiente del tiempo muestreada es simplemente una secuencia de DFT de N puntos de los segmentos de la señal enventanada.

$$x_r[m] = x[rR + m]w[m] \quad (4)$$

para $-\infty \leq r \leq \infty, 0 \leq m \leq L-1$

Donde la posición de la ventana se mueve en saltos de R muestras en el tiempo.

SOFTWARE DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES -ESNS

La implementación de la Transformada de Fourier dependiente del tiempo se ha realizado bajo el entorno de programación Visual C++ 6.0. Estos algoritmos están basados en las ecuaciones

matemáticas descritas en la sección anterior, [5] Fig. 5.

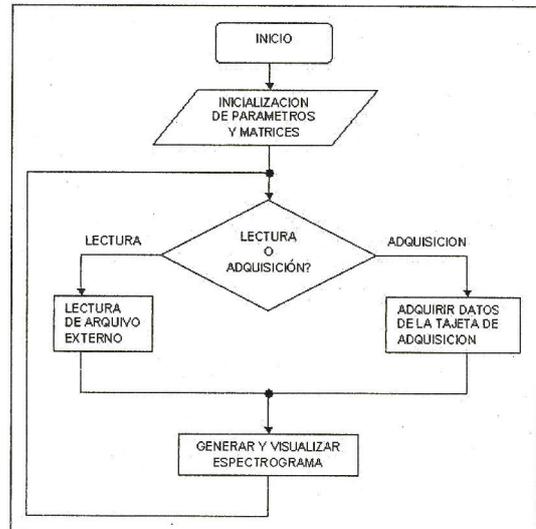


Fig. 5 Diagrama de flujo del software ESNS.

Adquisición de datos de la tarjeta de adquisición

Como se describió en la sección de control, este software está conectado con la tarjeta de adquisición a través del puerto serial, se utiliza el protocolo RS-232, con una velocidad de transmisión de 115200 baudios [8].

Lectura de un archivo externo

Este software le permite al usuario la lectura de un archivo de texto con datos tomados desde cualquier otro equipo o simplemente señales producto de simulaciones.

Este software está diseñado para cualquiera de estas dos funciones. Además de darle la opción al usuario de almacenar los datos tomados de la tarjeta de adquisición para un posterior análisis.

RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Tarjeta de adquisición

El prototipo desarrollado en el CID-FIEE-UNI, cumple con los requerimientos básicos para una primera experiencia en el área de análisis de vibraciones. Nuestra meta con este prototipo es diseñar nuestros propios equipos de adquisición, y

este diseño nos permite conocer y experimentar con este tipo de hardware de tanta demanda en el mercado de procesamiento de señales. Fig. 6.

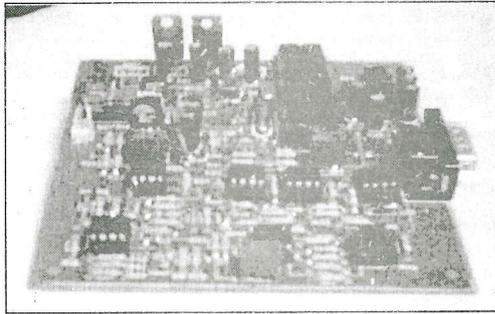


Fig. 6 Tarjeta de adquisición para el análisis de vibraciones.

Asimismo, podemos observar las características de la tarjeta de adquisición en la tabla 3.

Tabla 3. Características de la tarjeta de adquisición.

Ancho de Banda	1KHz
Resolución	10 bits
Amplitud máxima	$\pm 35g$

Software de adquisición y procesamiento de señales –ESNS

El software desarrollado nos ha permitido observar como hay ciertas características que se pierden en el transcurso del tiempo en señales de vibraciones tanto en motores [6] como en señales de movimientos sísmicos, tal como se puede observar en la Fig. 7 y 8.

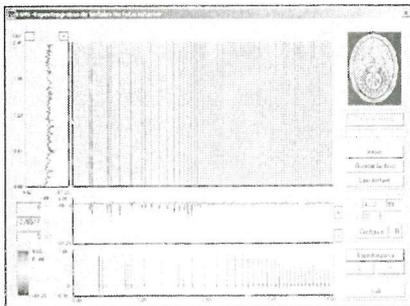


Fig. 7 Espectrograma generado de las señales obtenidas durante del arranque del motor de un automóvil.

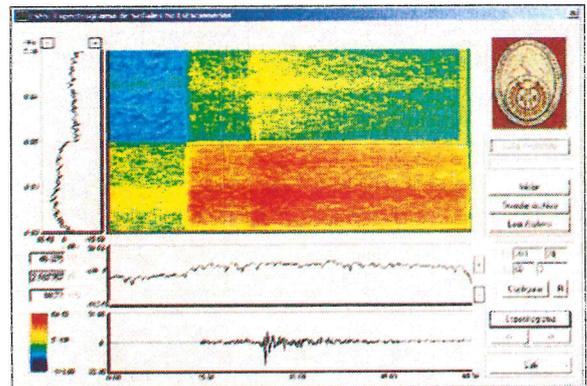


Fig. 8 Espectrograma generado de la lectura de un acelerograma.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha podido verificar las simulaciones realizadas durante la etapa de diseño de la tarjeta de adquisición, la construcción de este prototipo nos ha permitido verificar un funcionamiento adecuado de los filtros y el acondicionamiento de la señal obtenida del acelerómetro.

Una limitación de este prototipo es el ancho de banda de las señales. Es por ello que este prototipo ha sido diseñado con un ancho de banda de 1KHz. Cabe recalcar que este limite del ancho de banda solamente nos limita el tipo de falla a analizar, no obstante, podemos analizar fallas que requieran este tipo de ancho de banda.

Una limitación importante para este prototipo es el uso de un convertor AD de 10 bits, esto es debido a que se debió de aprovechar el convertor AD incluido dentro del microcontrolador. Es deseable para este tipo de señales el uso de un AD de mayor resolución ya que al ser señales de bajos valores con un convertor de este tipo se pueden obtener valores muy cercanos a los reales.

Finalmente, cabe decir que este tipo de desarrollo ha permitido un amplio conocimiento del manejo del hardware y software para el análisis de vibraciones. Es por ello que estamos en la capacidad de realizar pruebas y crear base de datos históricos de fallas en la maquinaria seleccionada para este fin. Esta experiencia ha permitido visionar un prototipo con características aun mayores que las obtenidas con esta, y en un futuro la construcción de un laboratorio de análisis de

vibraciones con equipos diseñados en el Centro de Investigación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto de Investigación de la Facultad de 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, Steven W.**, "The Scientist and Engineer's Guide To Digital Signal Processing", California Technical Publishing.
3. **Rashid, M. H.**, "Circuitos Microelectrónicos Análisis y Diseño", International Thomson Editores.
4. **Angulo, J. M.**, "Microcontroladores PIC. Diseño Practico de Aplicaciones", Ed. Mc Graw Hill.
5. **Cevallos, Fco. J.** "Microsoft Visual C++, Aplicaciones para WIN32", Editorial RA-MA.
6. <http://www.bksv.com>, "Measuring Vibrations", Brüel & Kjaer.
7. <http://www.microchip.com>, "Datasheet PIC16F877", Microchip Technology Inc.
8. <http://www.microsoft.com> "MSDN", Microsoft Corp.
9. **Del Carpio Salinas, J. A., Calderón Morocho, F. M., Román Quispe, P. K.** Diseño, Construcción y Procesamiento de Señales de un Acelerógrafo para la Red de Acelerógrafos del CISMID. Facultad de Electricidad y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, 2004.

Correspondencia: jdelcarpio@uni.edu.pe

Recepción de Originales: Setiembre 2005

Aceptación de Originales: Diciembre 2005