

Balancedora de Muela para Máquinas Rectificadoras con Microcontrolador

Ing. Paulo Andrés Biasutto
Especialidad en Sistemas Embebidos
Instituto Universitario Aeronáutico
Córdoba, Argentina
paulo.biasutto@gmail.com

Mg. Hector Riso
Especialidad en Sistemas Embebidos
Instituto Universitario Aeronáutico
Córdoba, Argentina
hriso@iua.edu.ar

Abstract—Este trabajo representa una solución para las pequeñas industrias que utilizan máquinas rectificadoras para realizar acabados superficiales y consiste en el desarrollo de un sistema embebido basado en un microcontrolador de 32 bits que realiza mediciones de señales de vibraciones y luego calcula el desbalance que posee la muela. El resultado del cálculo es mostrado en una interfaz visual que expresa la magnitud y la posición de la masa compensadora. Dependiendo de su configuración puede realizar cálculos de desbalance en un solo plano o en dos planos.

Keywords—Analizador de vibraciones; balancedora; máquina rectificadora; muela; desbalance.

I. INTRODUCCIÓN

Una máquina rectificadora es utilizada no solo para conseguir mecanizados de alta precisión, sino también para acabados superficiales. La calidad de la superficie se logra principalmente cuando la muela (disco abrasivo) se encuentra perfectamente balanceada [1]. El problema surge en el momento en que la muela comienza a desequilibrarse a razón del desgaste que va sufriendo en los mecanizados que realiza. El desequilibrio ocasiona la presencia de la vibración [2] que causa el defecto de los acabados superficiales.

El método principal para detectar las vibraciones producidas en este tipo de máquina es mediante analizadores de vibraciones. Estos equipos realizan un análisis espectral de las frecuencias de todas las vibraciones producidas por las partes mecánicas afectadas y son utilizados para detectar fallas y realizar mantenimientos preventivos. Se pueden utilizar analizadores como el propuesto por S.A. Ansari y R. Baig [3] basado en PC y el propuesto por G. Betta [4] basado en DSP para detectar la presencia del desbalance de la muela, pero no para obtener la magnitud y la posición de la masa necesaria para equilibrarla. Para esto se requiere de procedimientos y cálculos adicionales. Una opción para balancear la muela es la utilización de máquinas balancedoras aunque de esta manera la muela deberá ser extraída de la máquina rectificadora cada vez que se encuentre desbalanceada. Además, si la muela no es colocada perfectamente en eje del husillo de la máquina rectificadora el problema persistirá. Como solución a este problema se pueden utilizar las balancedoras presentadas por Li C. [5][6] y montarlas directamente en la rectificadora pero

para esto, se necesitaría colocar una PC y un monitor, lo cual implicaría un costo adicional al sistema.

El sistema embebido presentado en este trabajo consiste de una balancedora que es utilizada directamente en la máquina rectificadora. Este sistema detecta las vibraciones como cualquier analizador, selecciona únicamente la frecuencia que corresponde al giro del husillo, realiza el cálculo de la masa necesaria para equilibrar la muela y muestra el resultado en una interfaz visual del propio sistema embebido. El sistema se instala colocando uno o dos transductores, dependiendo si se quiere balancear en uno o en dos planos, un sensor de posición colocado en uno de los extremos del eje giratorio y el sistema embebido en un lugar visible para la operación de balanceo.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EMBEBIDO

El sistema embebido (en adelante sistema) de la balancedora de muela de la máquina rectificadora, fue diseñado con los componentes disponibles en el mercado local. Este sistema está constituido principalmente por dos transductores de vibración, un sensor de posición, dos pulsadores, un microcontrolador, un módulo LCD gráfico, una interfaz de conexión y un circuito de alimentación de energía. La Fig. 1 muestra un esquema general del sistema.

Los transductores convierten las vibraciones en señales eléctricas que luego son muestreadas y almacenadas en la memoria del microcontrolador. La determinación de los tipos de transductores que se necesitan para el sistema se basa en la frecuencia en que gira la muela de la rectificadora donde se va a montar el sistema. En general, en las rectificadoras sin centro, como el modelo RSC-127 [7], la velocidad de giro de la muela está definida entre 1500 rpm a 1800 rpm y por lo tanto la frecuencia de trabajo para los transductores es de 25 Hz a 30

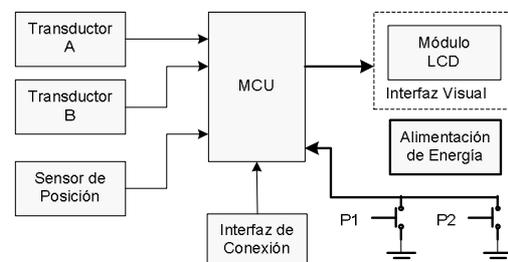


Fig. 1. Esquema general del sistema

Hz. En esta frecuencia se pueden utilizar transductores de desplazamiento, de velocidad, acelerómetros [8][10], o acelerómetros de capacidad variable con alta sensibilidad [11].

Con el sensor de posición, y a diferencia de los analizadores de vibraciones, la balanceadora conoce en qué posición se encuentra el eje y cuál es su velocidad de giro mediante el conteo del tiempo que demora en realizarlo. Esto se puede lograr utilizando un sensor óptico, cuyo circuito electrónico es simple y, con tan solo colocar una marca en el eje del husillo, se evita modificar las condiciones mecánicas de la máquina. La salida de este sensor se conecta a una entrada digital del microcontrolador que provoca una interrupción cada vez que se detecta el punto de referencia y realiza el conteo de tiempo entre vueltas.

Los pulsadores permiten seleccionar el modo de operación del sistema: estático o en un plano, dinámico o en dos planos, y calibración.

En la interfaz visual, que consiste de un módulo LCD gráfico, se muestran los resultados de las magnitudes del desbalance de la muela y las ubicaciones de las pesas compensadoras.

La interfaz de conexión se utiliza para realizar actualizaciones del firmware del sistema (como el diseño propuesto por D.G. Roca[12]) o algunas configuraciones adicionales. Debido a que no se requiere de una conexión permanente y a la posibilidad de acceder sin la necesidad de instalar algún controlador en la PC, se utiliza una interfaz RS232.

El microcontrolador realiza el procesamiento de las señales para determinar las magnitudes y las posiciones de desequilibrio y luego muestra los resultados en la interfaz visual. Se elige un microcontrolador que cuente con los siguientes requisitos:

- al menos 2 canales de conversores A/D para la lectura de transductores
- al menos 3 entradas digitales para el sensor óptico y los pulsadores
- un bus de 8 bits de datos y 5 bits de control para utilizar un módulo LCD gráfico con interfaz paralela.
- una interfaz UART para la conexión RS232
- al menos 32Kbytes de RAM para cálculo de FFT, cálculo de algoritmo, controladora de LCD y consola para la interfaz RS232

De todos los microcontroladores disponibles en el mercado, se elige trabajar con microcontroladores del fabricante Microchip Inc por estar familiarizado con los mismos, por sus bajos costos en las herramientas de desarrollos y la disponibilidad funcional completa del compilador en lenguaje C de MPLAB C. El microcontrolador que se utiliza para este sistema es el PIC32MX775F512H [13] de la familia PIC32 por su desempeño y por su costo, que está en el orden de la familia de PIC24 y dsPIC. Asimismo, utilizar este microcontrolador de 32 bits de arquitectura con capacidad de 64Kbytes de memoria RAM y 512Kbytes de memoria Flash, nos permite desarrollar un sistema con escalabilidad en futuros proyectos tales como

adicionar una interfaz Ethernet para un control del proceso de producción.

A. Firmware del Microcontrolador

El esquema general del firmware del microcontrolador está representado en la Fig. 2. Los pulsos emitidos por el sensor de referencia, que está conectado a una entrada con Notificación de Cambio (Change Notification)[14], son detectados por una rutina de interrupción que cuenta el tiempo que transcurre entre un pulso y otro utilizando como base el registro del Temporizador 1 (Timer1)[15]. Cuando se obtienen varias muestras iguales de tiempo, el eje de la máquina rectificadora se encuentra en velocidad de régimen. Luego, este tiempo es dividido por la cantidad de muestras que se desea por vuelta y, al resultado, se lo asigna al Temporizador 2:3 (Timer2:3)[15][16] para ser usado como intervalo de muestreo en el conversor A/D[16]. Si se tiene en cuenta que la máxima velocidad de giro del eje de la máquina es de 30 rps y que se obtienen 256 muestras por vuelta, el período de muestreo mínimo es 130µS por lo que no afecta a los tiempos de procesos del microcontrolador ya que el reloj del CPU opera en 80 Mhz. Además, con este método se independiza el sistema de la configuración de la frecuencia de giro.

Las muestras obtenidas por el conversor A/D, son almacenadas en un arreglo de 2048 datos para cada canal que equivale a 8 vueltas de 256 muestras. Con 8 vueltas se logra una resolución entre coeficientes espectrales de 3,5 Hz aproximadamente, pudiendo diferenciar las vibraciones generadas por otros factores tales como correa, motor o bomba hidráulica. La cantidad de 256 muestras por vuelta está determinada por la capacidad máxima de la memoria del microcontrolador. Una vez almacenadas las muestras de cada canal, se realiza la FFT y se obtienen los coeficientes espectrales de la serie discreta de Fourier[17] utilizando cada arreglo en la función *mips_fft16()* [18] provista por el compilador MPLAB C. El resultado de este cálculo es otro arreglo de vectores de números complejos en formato Q15 que representa a un espectro de frecuencias producidas por las vibraciones presentes en la máquina. Siguiendo con la idea de independizar al sistema de la velocidad de giro del husillo, se elige siempre el noveno vector o coeficiente. Dependiendo de la etapa del proceso en que se encuentra el sistema, se puede utilizar este vector para calcular el desbalance o para obtener los coeficientes de los transductores.

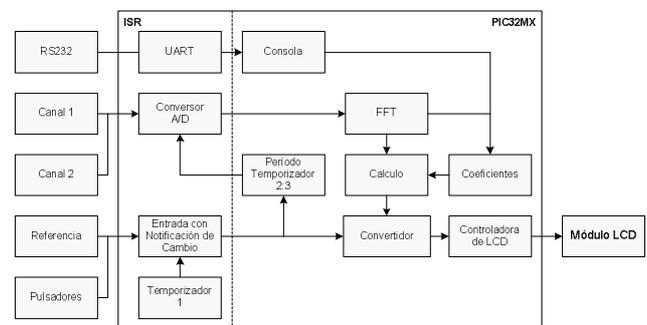


Fig. 2. Esquema general del firmware del microcontrolador

La elección del modo de cálculo dinámico depende de la estructura mecánica de la máquina y el lugar donde se colocan los transductores. Además, cuando la vibración obtenida en uno de los transductores, que se debe al desbalance de uno de los planos, es influenciado por el desbalance del otro plano, se podría utilizar el cálculo de modo dinámico [8]. Pero este método no puede ser utilizado en las rectificadoras RSC-127 o rectificadoras con una estructura mecánica similar porque no se cumple lo dicho anteriormente. A pesar de esta limitación, se implementó este modo de balanceo para que el sistema pueda ser utilizado en máquinas que poseen la mecánica adecuada.

Para conocer el valor y la posición de la masa compensadora, es necesario obtener previamente los coeficientes que determinarán las proporciones y las fases de las vibraciones leídas en la señal de los transductores. Estos coeficientes son vectores de número complejo obtenidos después de la FFT y de haber colocado una masa de prueba de peso conocido en un determinado lugar de la muela (procedimiento que se realiza durante la fase de calibración). Luego, estos coeficientes son utilizados dentro de la ecuación 1 y 2 que se muestran mas adelante.

$$M = \frac{MT \times S_A}{S_{TAI} - S_A} \quad (1)$$

Si el sistema está configurado para realizar balanceo en un solo plano y con un solo transductor utiliza la ecuación 1 [8], que mediante un cálculo vectorial entre el vector coeficiente adquirido en el proceso de calibración (S_{TAI}) con la masa de prueba (MT), y el vector de la señal adquirido en el proceso actual (S_A), se obtiene el resultado de la masa que compensará el desequilibrio (M).

En caso de que el sistema utilice dos transductores y dos planos de balanceo se procede de manera similar a lo dicho anteriormente con la diferencia de que se coloca la masa de prueba en los dos planos de manera alternada.

$$\begin{Bmatrix} S_A \\ S_B \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_D \\ M_I \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= (S_{A1} - S_{A0}) / MT_D & \alpha_{21} &= (S_{B1} - S_{B0}) / MT_D \\ \alpha_{12} &= (S_{A2} - S_{A0}) / MT_I & \alpha_{22} &= (S_{B2} - S_{B0}) / MT_I \end{aligned} \quad (3)$$

Donde (S_{A1}) y (S_{B1}) son las señales obtenidas en los transductores A y B cuando la masa de prueba (MT_1) es colocada en el lado izquierdo de la muela y, (S_{A2}) y (S_{B2}) cuando (MT_D) es colocado en el lado derecho. En las ecuaciones 3, (α) representa a los coeficientes de influencia que son utilizados luego para calcular los desbalances correspondientes. De la ecuación 2 [9], que se basa en el principio de balanceo de rotores rígidos, se despeja la matriz ($M_D M_I$) para obtener los resultados vectoriales de ambas masas compensadoras.

En ambos casos, cuando se calcula el valor de la masa compensadora, el resultado representa una proporción del valor de la masa utilizada en el momento de calibrar el sistema y es independiente a la unidad en que se trabaja.

El convertidor adapta el resultado del desbalance a la controladora del display LCD, quien luego se comunica con el módulo LCD gráfico formando la imagen correspondiente en la pantalla.

Finalmente, el sistema cuenta con una consola o terminal RS232 para el acceso desde una PC.

B. Proceso de Balanceado de Muela

Durante el funcionamiento normal de la máquina rectificadora, el sistema visualiza en forma permanente el resultado del desbalance de la muela. En la Fig. 3 se muestra, en forma simplificada, el proceso que realiza el firmware del sistema para visualizar el resultado del desbalance.

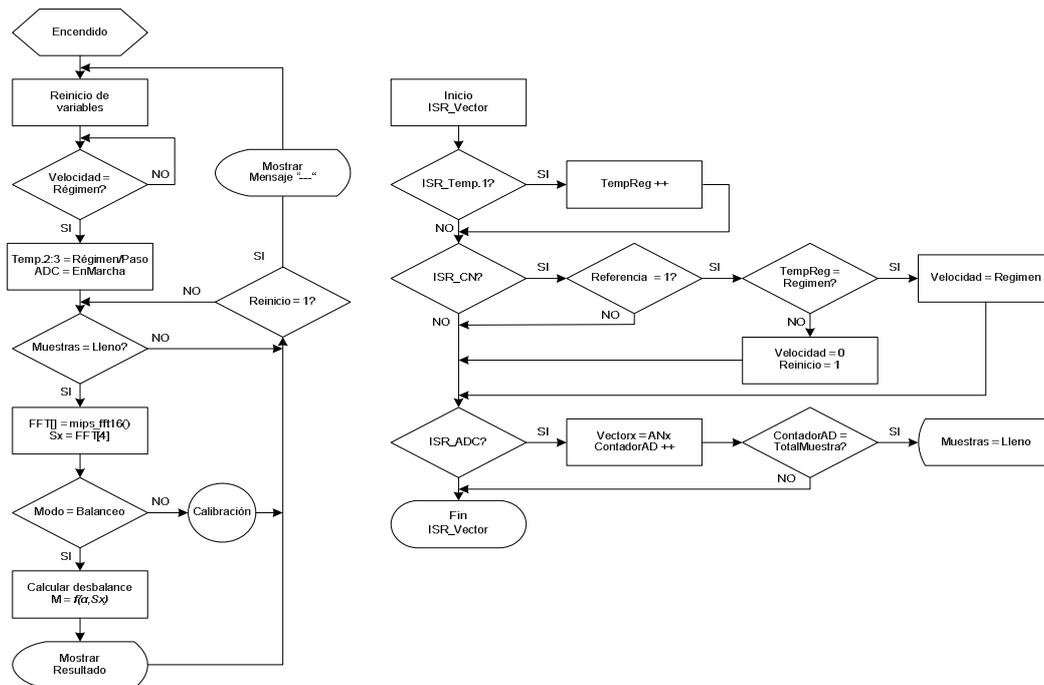


Fig. 3. Diagrama de flujo de datos del proceso de balanceo

Una vez encendido el sistema y de haber reiniciado todas sus variables, el proceso principal queda en un bucle esperando que el giro de la muela haya obtenido una velocidad de régimen de trabajo mayor a cero. En el servicio de interrupciones del microcontrolador (ISR), el Temporizador 1 [15] incrementa el registro TempReg cada un tiempo definido de al menos 1000 veces menor que al de una vuelta. Cuando el eje de la muela se encuentra en la posición de referencia, se activa el ISR_CN de Notificación de Cambio (Change Notice) [14] y compara el valor del TempReg con el valor anterior y, si ambos son iguales, la velocidad está en régimen.

Una vez obtenida la velocidad régimen, el proceso principal calcula el período para el muestreo de los canales A/D escribiendo el resultado en el registro del Temporizador 2:3 (Timer2:3) [15][16] y luego activa el servicio de interrupciones del ADC. En este momento el proceso queda a la espera de que se almacene el total de muestras, mientras que el ISR_ADC captura cada una de ellas. Cuando las conversiones hayan completado el total de muestras, se procede a calcular la FFT de cada canal y obtener los vectores correspondientes a la frecuencia de giro de la muela. Cada vector es luego utilizado para obtener el desbalance y finalmente el resultado es ingresado a una función que lo muestra.

Es importante que el desbalance sea considerado cuando la muela no esté realizando el mecanizado para evitar lecturas erróneas por el contacto con la pieza o por cambios en la velocidad de giro. Si este último sucediera, el sistema se recuperará al estado inicial desactivando el ISR_ADC y mostrando en la interfaz visual un mensaje nulo.

Cuando se detiene el giro de la muela, el sistema muestra el resultado del último proceso realizado para que la muela sea balanceada. El usuario deberá girar el eje hasta obtener una imagen “en posición” en la interfaz visual, luego colocará la masa correspondiente en la posición marcada y finalmente procederá con la operación normal de la máquina con la muela balanceada.

C. Calibración del Sistema

La calibración del sistema se debe realizar para obtener los coeficientes de los transductores de vibración con respecto a una masa conocida de prueba. En el diagrama de la Fig. 3 se indica un proceso de calibración que se activa cuando se selecciona el modo de calibración y consiste en ejecutar uno o dos pasos adicionales al proceso de balanceo dependiendo si se trabaja en uno o dos planos.

Una vez iniciado el modo de calibración, el sistema realiza el mismo proceso que se utiliza para el balanceo hasta obtener los vectores de las señales de los transductores. Para ello, antes de poner en marcha el giro de la muela, el usuario deberá colocar la masa de prueba en el plano izquierdo en la misma posición que marca la referencia del eje, encender el giro y esperar a que el sistema muestre el mensaje correspondiente en la interfaz visual. Luego el usuario procede a realizar el siguiente paso de la misma forma pero moviendo la masa de prueba al plano derecho y desfasada a 180 grados. Finalmente se extrae la masa de prueba y se enciende el giro de la muela. El sistema obtiene los vectores actuales de los transductores, calcula la matriz de coeficientes y conmuta al modo de balanceo de muela mostrando el resultado en la interfaz visual.

Todas las muelas utilizadas en una máquina rectificadora utilizan las mismas bridas para sujetarse al eje del husillo, por lo tanto si se cambia de muela una vez calibrado el sistema, el sistema permanecerá calibrado debido a que las condiciones físicas para el balanceo no se modificaron.

III. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA

Antes de completar el diseño se hicieron evaluaciones experimentales para comprobar la funcionalidad del proceso de muestreo y la veracidad de los resultados en los procesos de cálculos. Estas evaluaciones fueron realizadas en 3 etapas:

A. Muestreo en sistema embebido y simulación de los algoritmos de cálculos

En esta etapa se utilizó el mismo sistema embebido para realizar los muestreos necesarios de las señales de los transductores. Esto consistió en implementar el diagrama de flujo de la Fig. 3 hasta la condición “Muestras = Lleno”, luego las muestras almacenadas de ambos transductores se transmitieron por RS232 a una PC. Finalmente, el sistema embebido fue colocado y puesto en marcha en la rectificadora junto con el sensor óptico, un transductor y la PC.

Se realizaron 10 capturas de 2048 muestras para las diferentes situaciones simuladas con una masa de prueba. Mediante un software implementado en Java™ se empaquetaron en archivos con formato soportados para MATLAB® las muestras recibidas desde el sistema embebido.

Para comprobar la funcionalidad del proceso de muestreo, mediante MATLAB® y luego de implementar la Transformada de Fourier, se compararon los resultados de las 10 capturas de cada situación y se verificó la repetibilidad, dejando como consecuencia la aprobación de este proceso. Seguido a esto, se realizaron las simulaciones de los algoritmos de cálculos implementando la ecuación 1.

En la simulación del balanceo en un solo plano se utilizaron las muestras de 3 situaciones: sin masa de prueba para obtener el desbalance de la muela, masa de prueba colocada a 0° para obtener la posición y los gramos de la masa compensadora y masa de compensación de 15 gr colocada en la posición calculada para balancear la muela. El resultado del desbalance de la muela sin masa y con masa compensadora se observa en la Tabla 1.

De la misma manera se realizaron capturas de muestras sobre otra estructura mecánica que permitía obtener información con 2 transductores y con 2 planos de balanceo. En ambos casos los resultados de las simulaciones quedaron aprobados para continuar con las siguientes etapas.

B. Transformada de Fourier en sistema embebido

En esta etapa simplemente se adicionó en el firmware del sistema embebido el proceso de la Transformada de Fourier que continúa luego de la condición “Muestras = Lleno” de la Fig. 3 y, posteriormente, se transmitieron los coeficientes

TABLA I. SIMULACIÓN DE BALANCEO EN UN SOLO PLANO

Sin masa compensadora	16.2603 gr < 232.78°
Con masa compensadora 15 gr	1.5254 gr < 197.05°

TABLA II. SIMULACIÓN DE BALANCEO EN UN SOLO PLANO DESPUÉS DE APLICAR FFT

Sin masa compensadora	16.3545 gr < 235.08°
Con masa compensadora 15 gr	1.3897 gr < 224.75°

correspondientes por la interfaz RS232. Por último, los coeficientes fueron procesados y simulados de la misma manera que en la etapa anterior, dando como resultado la Tabla 2 donde el valor residual, al colocar la masa compensadora, es levemente diferente debido a la pérdida de precisión que se tuvo cuando se transformaron los datos en cadena de caracteres para transmitirlos a la PC. Este proceso quedó aprobado.

C. Implementación de algoritmos de cálculos en sistema embebido

En esta otra etapa fueron implementados los algoritmos simulados anteriormente dentro del sistema embebido. La comprobación de la veracidad de los resultados se llevó a cabo insertando en el código del firmware los mismos coeficientes de la FFT anteriormente calculados, luego el sistema realizó el cálculo correspondiente y se compararon los resultados dejando como consecuencia valores similares. Esto se muestra en la Tabla 3.

IV. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este sistema embebido se logró automatizar el balanceado de la muela directamente en la máquina minimizando las vibraciones presentes en la superficie de la pieza rectificadora durante el proceso de mecanizado. De esta manera se resolvió una necesidad concreta para las pequeñas y medianas industrias, teniendo en cuenta las limitaciones del entorno local.

Luego de evaluar las diferentes alternativas que existen se observó que para realizar un balanceo mediante analizadores de vibraciones se requiere de conocimientos adicionales, tales como el significado de cada componente de frecuencia o el uso de cálculos vectoriales para determinar el peso de la masa que se colocará en la muela. Asimismo, si se desea utilizar alguna máquina balanceadora, se necesita extraer la muela desde la máquina rectificadora, balancearla y nuevamente colocarla para continuar con el trabajo, aunque este procedimiento demandaría más tiempo en la producción. Por lo tanto, se puede observar que el sistema embebido presentado en este trabajo permite que su uso sea sencillo y que, una vez calibrado, el operario de la máquina solo necesite colocar la pesa en el lugar adecuado. Por otra parte, con el ejemplo descrito en la evaluación experimental, se pudo determinar la veracidad de los resultados tanto en lo analítico como en lo práctico, es así como este trabajo alcanza la solución al problema planteado.

Una característica importante que posee este sistema

TABLA III. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE CÁLCULOS EN SISTEMA EMBEBIDO

	<i>Resultados en Simulación</i>	<i>Resultados en Firmware</i>
Sin masa compensadora	- 9.3608 - 13.4106i 16.3545 gr < 235.08°	- 9.3587 - 13.4106i 16.3534 gr < 236°
Con masa compens. 15 gr	- 0.9869 - 0.9784i 1.3897 gr < 224.75°	- 0.9867 - 0.9784i 1.3896 gr < 225°

embebido es que puede ser utilizado en otras máquinas rotativas que requieran balancear un disco, una rueda u otra máquina con una mecánica similar con tan solo elegir el transductor adecuado y adaptarlo a la interfaz del conversor analógico/digital.

La interfaz RS232, además de ser utilizada para acceder a configuraciones extras y obtener datos desde una consola, fue pensada para darle escalabilidad al sistema con la posibilidad de actualizar el firmware mediante un puerto de comunicaciones serial de una PC.

Una alternativa de mejora para este diseño en el futuro sería extender la funcionalidad del sistema agregando una interfaz que permita establecer los parámetros dimensionales del elemento a balancear y, mediante un algoritmo de cálculo adecuado, poder balancear diferentes tipos de discos o ruedas. Del mismo modo y, si la mecánica de la máquina permitiera adaptar otro tipo de sensor de posición, se podría mejorar la precisión de cálculo implementando la detección de las posiciones del eje giratorio, lo que a su vez facilitaría al usuario la colocación exacta de la masa compensadora.

REFERENCIAS

- [1] W. B. Rowe, "Principles of Modern Grinding Technology", Elsevier, 2009.
- [2] V. Wovk, "Machinery Vibration, Balancing", McGraw-Hill Professional, 1998.
- [3] S. A. Ansari, R. Baig, "A PC-Based Vibration Analyzer for Condition Monitoring of Process Machinery", IEEE Trans. Instrum. Meas., 1998, vol. 47, pp. 378-383.
- [4] G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo, A. Pietrosanto, "A DSP-Based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis", IEEE Trans. Instrum. Meas., 2002, vol. 51, pp. 1316-1322.
- [5] C. Li, Y. Wang, "A Novel Design of Electric Measurement System for Balancing Machine", IEEE, 2010.
- [6] C. Li, T. Z. Qi, Z. Zhang, J. Ni, "A Novel Design of a Hard-bearing Dynamic Balancing Machine", 15th International conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2008.
- [7] Alercia Hnos., "Rectificadoras sin centros. Características Técnicas Modelo RSC-127", <http://www.alerciahnos.com.ar>.
- [8] C. Scheffer, P. Girdhar, "Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance", Newnes, Elsevier, 2004.
- [9] R. Tiwari, "Dynamic Balancing Of Rotors. Theory & Practice of Rotor Dynamics", 2008
- [10] S. Goldman, "Vibration spectrum analysis: a practical approach", Industrial Press Inc., 1999.
- [11] B. Lent, "Simple Steps to Selecting the Right Accelerometer", Endeavor Corp., 2009.
- [12] G. D. Roca, "Diseño de un sistema de actualización de firmware para un sistema embebido", CASE 2011, pp. 140-145.
- [13] Microchip Technology, "PIC32MX5XX/6XX/7XX Family Data Sheet", DS61156D Rev. D, 2010.
- [14] Microchip Technology, "PIC32 Family Reference Manual, Sect. 12 IO Ports", DS61120D Rev. D, 2008.
- [15] Microchip Technology, "PIC32 Family Reference Manual, Sect. 14 Timers", DS61105D Rev. D, 2008.
- [16] Microchip Technology, "PIC32 Family Reference Manual, Sect. 17 10-Bit A/D Converter", DS61104D Rev. D, 2008.
- [17] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, S. Hamid Nawab, "Señales y Sistemas", Prentice Hall, Segunda Edición, pag.213, 1997.
- [18] Microchip Technology, "32-Bit Language Tools Libraries", DS51685D Rev. D, pag.111, 2009.