

Sistema de posicionamiento robótico para captura de señales de ultrasonido en END por el método de inmersión

Positioning robotic system for NDT ultrasonic signals acquisition by immersion method

Christian C. Escobar Arango

cea15@hotmail.com

Fredy F. Miramag Martínez

shiriuxzero@yahoo.es

Andrés D. Restrepo Girón, M.Sc

adareg378@gmail.com

John Jiménez Gómez, M.Sc

jojigo@gmail.com

*Grupo de Investigación en Instrumentación
Electrónica (GIE)*

Universidad Santiago de Cali

.....
Fecha de recepción: Octubre 15 de 2012

Fecha de aceptación: Diciembre 8 de 2012

Palabras clave

Plataforma robótica;
posicionamiento; ensayo no
destruccion; ultrasonido.

Keywords

Robotic platform; positioning;
non-destructive testing;
ultrasound.

**Colciencias
tipo 1**

Resumen

Las plataformas robóticas creadas para el posicionamiento de herramientas o de sensores constituyen sistemas eficaces para aplicar el control numérico a la automatización de tareas donde se requiere trasladar y ubicar con cierta precisión alguna acción determinada o desde donde se necesita adquirir algún tipo de variable física. En ese sentido, a lo largo de este artículo se describe la metodología desarrollada para el diseño e implementación de una plataforma mecatrónica para el posicionamiento automático o manual remoto de un transductor ultrasónico sobre una grilla de inspección, de tal manera que sea posible la captura de las señales de ultrasonido provenientes del estado de inspeccionar, y que contienen información del estado de ésta. El sistema diseñado logra asegurar una incertidumbre promedio en la posición del 1,1% y del 2% en los ejes X e Y, y entrega el banco de señales digitalizadas de ultrasonido en una hoja electrónica.

Abstract

Robotic platforms created to place devices or sensors at specific coordinates, are efficient systems for automation of positioning tasks when taking actions on or acquiring signals from an exact point, are needed. In that sense, the methodology of the design and implementation of a mechatronic platform to position an ultrasonic transducer over an inspection grid, in automatically or remote manual way, is described through this article. The reason for robotic positioning of this transducer is to acquire ultrasonic signals coming from a piece which is wanted to be evaluated, containing information from that piece. The designed system is able to ensure a mean uncertainty in the position measurement around 1.1% and 2% on axis X and Y, and to save the digitized ultrasonic signals in an electronic sheet.

I. Introducción

El *Ensayo No Destructivo (END)* es la aplicación de métodos físicos indirectos para verificar la calidad o desgaste de una pieza sin alterar sus características o durabilidad. Entre las técnicas más comunes, es posible mencionar: líquidos o tintas penetrantes, radiografía o gammagrafía industrial, partículas magnéticas, ultrasonido, corrientes de Eddy, termografía y emisión acústica, entre otras (Victoria, 2006).

Las técnicas de END por ultrasonido son bastante utilizadas actualmente; no requieren condiciones especiales de seguridad, permiten detectar discontinuidades superficiales, sub-superficiales e internas, medir espesores, caracterizar materiales como metales, plásticos, compuestos y solo requieren una superficie de contacto para realizar la inspección. El ultrasonido presenta una alta capacidad de penetración y los resultados de prueba son conocidos inmediatamente en diferentes tipos de visualización (Victoria, 2006).

La aplicación de ultrasonido para END contempla un rango de frecuencias desde 200KHz hasta los 150MHz. Existen dos configuraciones básicas para realizar el ensayo: la configuración *Transmisión-Recepción (TR)*, que utiliza dos sensores ultrasónicos, uno para transmitir y otro para recibir y que normalmente se encuentran enfrentados (Restrepo, 2008); y la configuración *Pulso-Eco (PE)* (Figura 1), que emplea un único sensor que transmite el pulso hacia el material, propagándose a través del mismo hasta que un cambio de impedancia acústica provoca su reflexión total o parcial, y es detectado por el mismo sensor (Gosálbez, Salazar, Miralles, Bosch, & Vergara, 2007).

La aplicación del END ultrasónico se presenta bajo dos estrategias: *el método por contacto directo y el método por inmersión*. El método por contacto directo se basa en que la pieza de inspección está en contacto físico con el transductor, haciendo que la energía de la onda recibida sea bastante alta para facilitar la interpretación del ensayo; sin embargo, su desventaja radica en que solo es posible llevarlo a cabo en piezas con

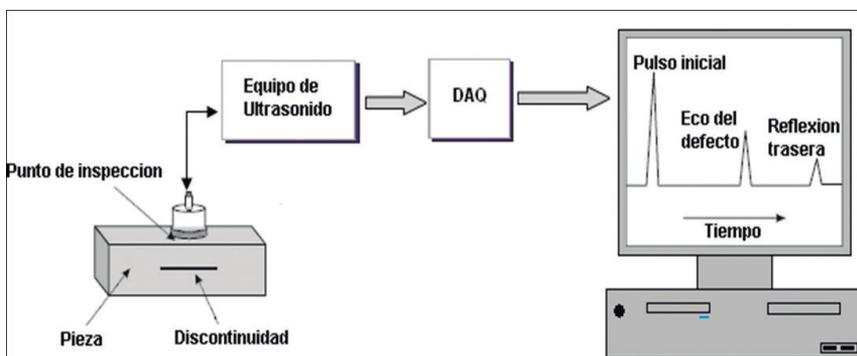


Figura 1. END por ultrasonido en configuración Pulso-Eco (Gosálbez et al., 2007)

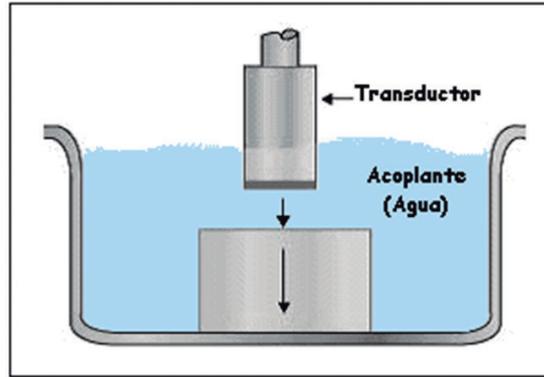


Figura 2. Método de ensayo por inmersión (Victoria, 2006)

.....
 superficies planas. Cuando se requiere inspeccionar piezas con superficies irregulares es preferible utilizar el método por inmersión (Jiménez & Loaiza, 2010) (Figura 2), que consiste en ubicar entre el transductor y la pieza de ensayo un acoplante como el agua, lo cual permite además usar frecuencias de ensayo más altas y facilitar la orientación del transductor, con la desventaja de obtener energías muy pequeñas para las ondas reflejadas.

El método de inmersión, aunque es muy útil, se dificulta en su montaje al tener que ubicar y mantener el transductor en una posición determinada. Generalmente se recomienda para ello, emplear sistemas como el de la Figura 3 que fundamentalmente consiste en una estructura cartesiana XY (Moon, 2008; Williams, Gossett, Blankenship, Spiller, Brokaw, & Hagene, 2010) que permite el desplazamiento del transductor a través de toda el área de un tanque, siguiendo una determinada trayectoria. Precisamente, el objetivo de este trabajo fue diseñar e implementar un sistema similar, con base en algunos trabajos previos realizados en la Universidad Santiago de Cali (Yunda,

.....

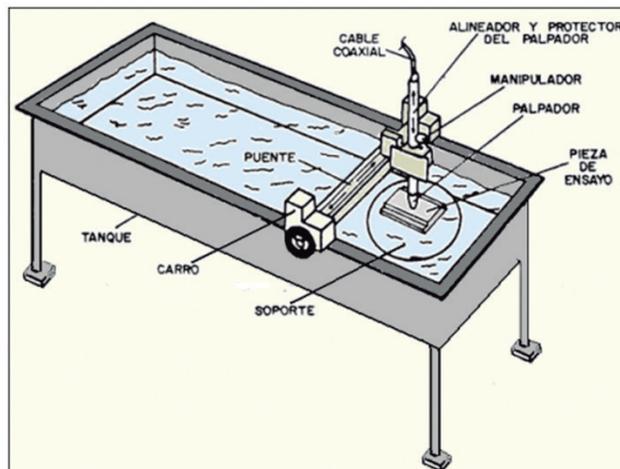


Figura 3. Sistema de inmersión en tanque (Manual de técnicas de NDT, 2007)

Rodríguez, Gómez, Maya, & Barrera, 2011), capaz de inspeccionar la pieza de interés, realizando todo el barrido necesario con el transductor y almacenando los resultados de la prueba en una hoja electrónica. Como desarrollo posterior se concebirá un sistema de procesamiento digital de señales e imágenes que permita mostrar los resultados de la inspección en forma gráfica.

II. Metodología de diseño e implementación

El desarrollo de este proyecto se dividió en dos partes fundamentales: la plataforma mecánica compuesta por una mesa coordenada XY, encargada de posicionar el transductor o palpador en el tanque, cuyo mecanismo utiliza servomotores acoplados a tornillos sin fin de manera que se pueda tener pequeños desplazamientos de fácil sentido y control; y el sistema de control basado en una topología maestro-esclavo, en donde el PC se encarga de coordinar la estrategia de control y un microcontrolador, de ejecutarla. La comunicación con el PC se realiza mediante la tarjeta de adquisición de datos NI-DAQ6009. La Figura 4 detalla el diagrama general del sistema realizado.

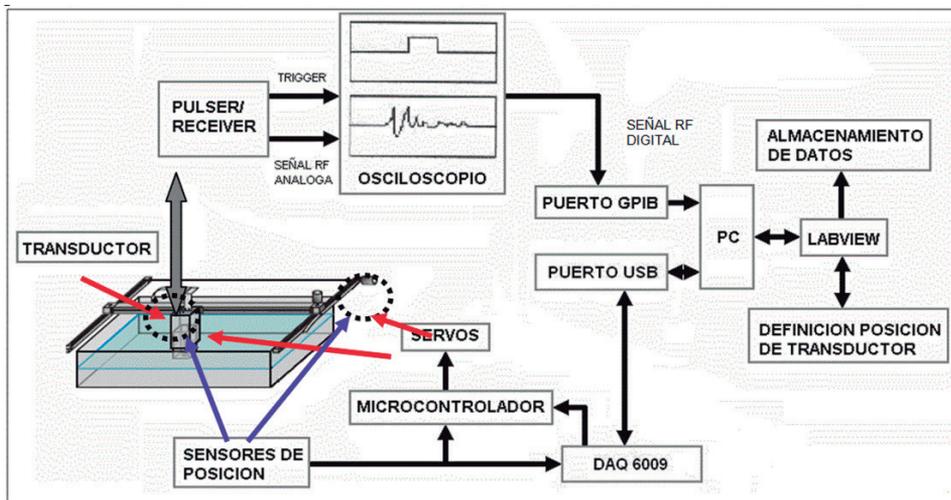


Figura 4. Estructura General del sistema

A. Elementos principales de hardware

1) Transductores

Los dos transductores de inmersión que se utilizaron en la prueba son de la marca Panametrics con frecuencias centrales de 1Mhz y 5Mhz.

2) Pulsar / Receiver

Se usó un Panametrics 5800PR, un equipo de uso general que se puede utilizar en una amplia gama de materiales, tales como metales, plásticos, cerámicos, compuestos y especímenes biológicos. Consta de parámetros variables como la energía, la frecuencia de repetición del pulso ultrasónico, el *damping* y la ganancia. También se puede utilizar como parte de un sistema de

prueba, ya que su capacidad de almacenar distintas configuraciones asegura la capacidad de repetición y la documentación exactas de los parámetros de prueba (Panametrics, 2006).

3) Osciloscopio

El osciloscopio Tektronix TDS 2022 es el encargado de digitalizar las señales analógicas que llegan del pulser/receiver. Tiene una velocidad de muestreo de 2GS/s y un ancho de banda de 200 MHz, y cuenta con un módulo de comunicación GPIB que le permite una velocidad de transferencia de 2 Mbyte/s.

4) Servomotores

Se utilizaron servomotores Futaba S3003, para los cuales la razón de trabajo de una onda PWM de 20ms de período establece el ángulo al que debe posicionarse el eje del motor. La Tabla 1 muestra valores ejemplo para esta relación.

Tabla 1. Estructura General del sistema

Razón o ciclo de trabajo para la señal PWM (%)	Ángulo (grados)
2	0
6	90
10.5	180

5) Microcontrolador

Se seleccionó el microcontrolador AT89C52, un dispositivo de gama media, con cuatro puertos de 8 bits y frecuencias de trabajo de hasta 24 MHz, con el fin de generar las diferentes señales PWM de los servomotores, codificando el sentido de giro de los motores en una señal de 4 bits. Con el DAQ6009 no era posible generar las señales PWM debido a que su *slew rate* no era suficiente para lograr ciclos de trabajo tan pequeños sin distorsionar la propia señal.

6) Optoacopladores

Los Optoacopladores usados son de tipo ranura, los cuales basan su funcionamiento en la obstrucción o el paso de un haz de luz infrarroja que emite un fotodiodo hacia un fototransistor; este último conducirá siempre que no se introduzca algún elemento que obture la ranura. La utilidad básica de este tipo de sensor es construir un codificador óptico o *encoder*, como el de la Figura 5 (Abad, 2006). Para el sistema de posicionamiento desarrollado en este proyecto, el conjunto de sensores ópticos y discos ranurados componen las variables de desplazamiento en ambos ejes.

B. Descripción de la plataforma mecánica

1) Estructura principal

La forma de la base de la estructura corresponde a la de una mesa hecha con ángulos de hierro, que debe encerrar las esquinas del tanque de inmersión sin tocarlas, reforzada con varillas en su parte inferior (Figura 6).

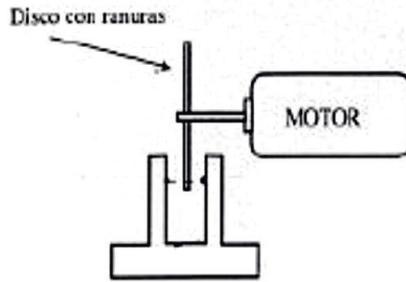


Figura 5. Codificador óptico basado en un optoacoplador (Abad, 2006)

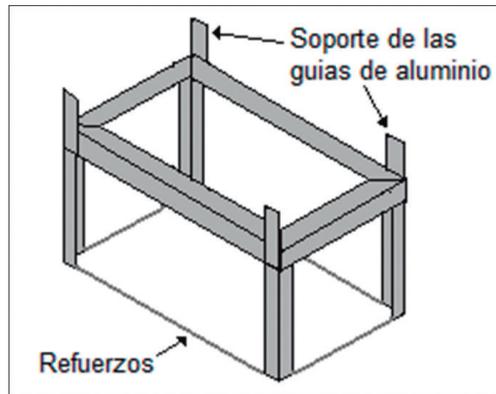


Figura 6. Diseño de la base en hierro

Para la realización del soporte horizontal se utilizaron dos perfiles contrapuestos con la forma presentada en la Figura 7, en la que se aprecia un canal en forma de “V” que sirve para mantener los rodamientos en una guía con cierta tolerancia lateral que no influye de manera significativa en el desempeño de todo el sistema, pero que asegura que el rodamiento sea en promedio lineal.

Para el desplazamiento sobre el perfil de aluminio en el eje horizontal se usaron rodachinas metálicas puesto que estas soportarían mayor cantidad de peso; el juego

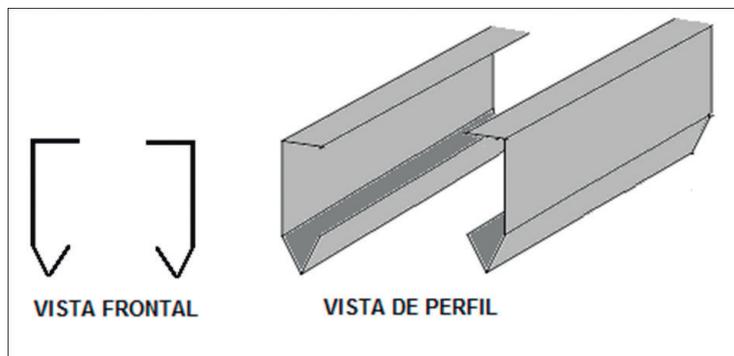


Figura 7. Lámina de soporte del sistema rotatorio para el eje X

de balines tiene muy buena lubricación y está diseñado para soportar hasta 15 Kg en cada rodachina, sin presentar fallas de agotamiento, garantizando la durabilidad del sistema. En cada uno de los soportes del eje se usaron tres rodachinas de este tipo para mantener la estabilidad del eje transversal, una justo debajo del centro de gravedad y las otras dos a 2.5 cm de esta última, adelante y atrás, asegurando un área base de soporte de 5 cm contra una altura de 9 cm, previendo que el desbalance de peso en el eje transversal fuese menor a 1 kg. En la gráfica de la Figura 8 se aprecia el diseño de la base de soporte y las fuerzas que soporta la estructura y que fueron tenidas en cuenta.

Para la implementación del eje vertical se hicieron ciertas variaciones con respecto a lo aplicado para el eje horizontal, entre las cuales está el perfil de aluminio usado con forma de “U” invertida y con terminaciones en “V” que sirven de canal para las rodachinas (Figura 9).

Para los rodamientos de este eje, se usó un juego de cuatro rodachinas plásticas montadas sobre una base metálica, hechas para este tipo de perfil; se le agregó un juego de dos ruedas de goma que hacen contacto con la cara superior interna del perfil, asegurando la estabilidad lateral con respecto al punto central de éste, del cual se fijó el

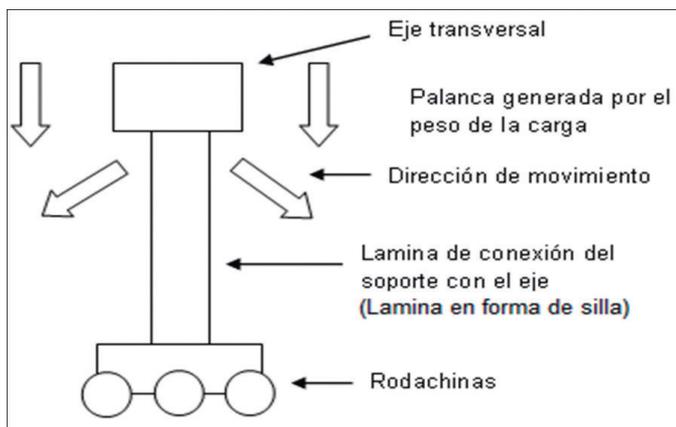


Figura 8. Soportes del eje transversal

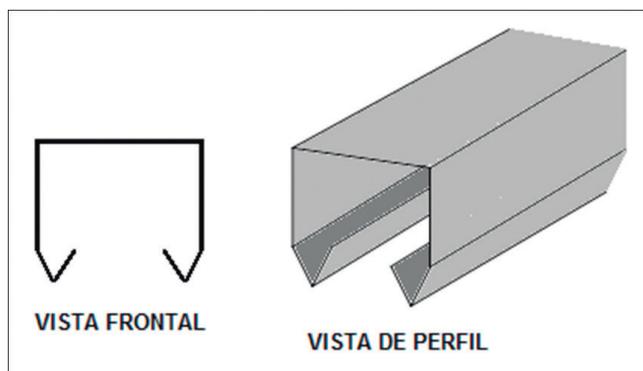


Figura 9. Lámina de soporte del sistema rotatorio para el eje Y

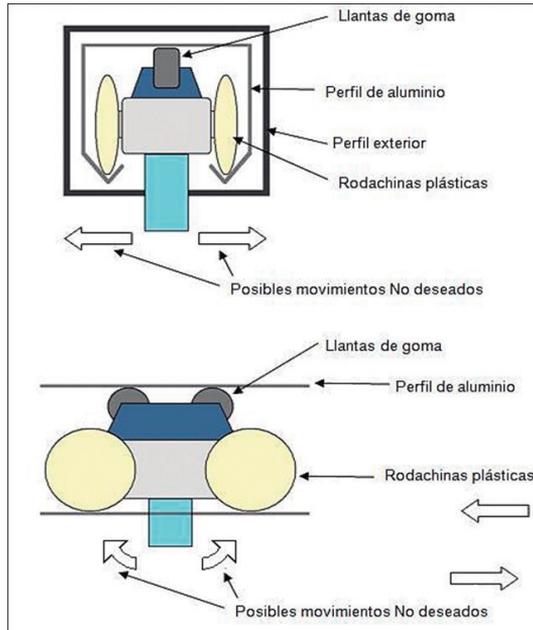


Figura 10. Rodamientos en el eje transversal

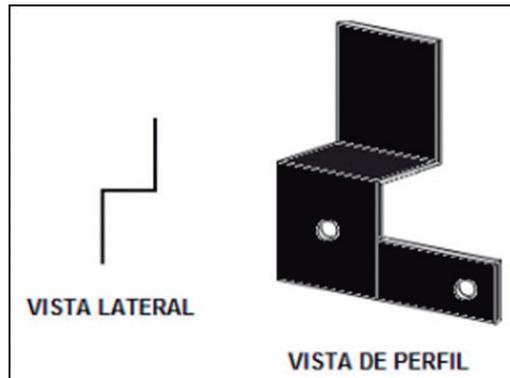


Figura 11. Lámina en forma de silla

perfil exterior que rodea al perfil de aluminio, puesto que esta pieza es la que se desplaza con el eje y sobre la cual se monta el sistema de sujeción del transductor (Figura 10).

Para soportar el eje vertical se diseñó una lámina metálica con un corte de sección con forma de silla, para diferenciarla de las otras. Así se une el eje horizontal a la lámina del eje vertical por el sistema rotatorio.

Tanto las láminas en forma de silla, como el perfil exterior del eje transversal están unidos a sus respectivos tornillos sin fin, a través de un sistema de anclaje implementado con un trozo de tornillo, dos tuercas de sujeción y una lámina con la forma de uña de martillo (Figura 12). Esta lámina se encuentra soldada a una tuerca de $\frac{1}{4}$ de pulgada, la cual es acoplada al tornillo sin fin y es la que realiza la conversión de movimiento angular a movimiento lineal.

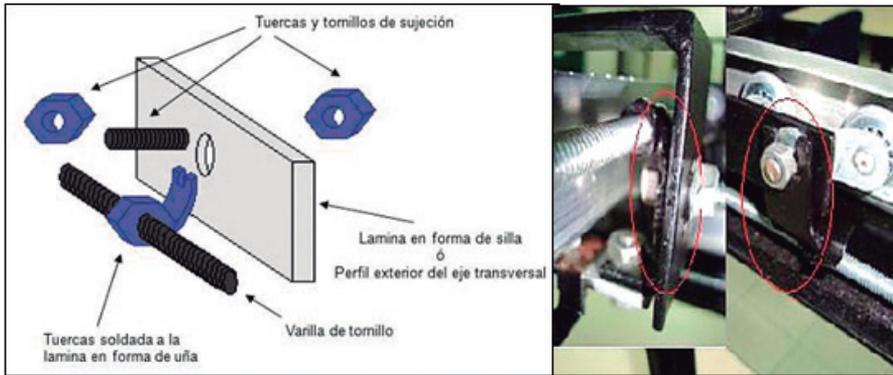


Figura 12. Sistema de anclaje

2) Servomecanismo

Para los actuadores de la estructura física, se definió que se trabajaría con tres bloques, cada uno compuesto de los siguientes elementos: servomotor, piñones de acople, tornillo sin fin, sensores de inicio y fin de carrera, y los sensores de posición, como se aprecia en la Figura 13.

Para el eje horizontal se utilizaron dos servomecanismos (dos bloques), para equilibrar la carga, agregar más torque en cada punta del eje transversal y evitar perder la verticalidad de dicho eje debido al coeficiente de fricción presente entre las rodachinas de metal y el canal en “V”. En el eje vertical se usa un servomecanismo para el movimiento del transductor por medio del perfil exterior. En cada uno de los bloques, el servomotor es acoplado al tornillo sin fin a través de dos piñones de plástico, uno a la salida del eje del servomotor y otro acoplado al tornillo con una tuerca fijada en uno de los extremos de éste. Además, el piñón del tornillo posee ocho agujeros para ser utilizados con el sensor de posición.

3) Brazo de extensión (control de altura) y pinza mecánica

Para tener un control total de toda el área del tanque de inmersión se diseñó un

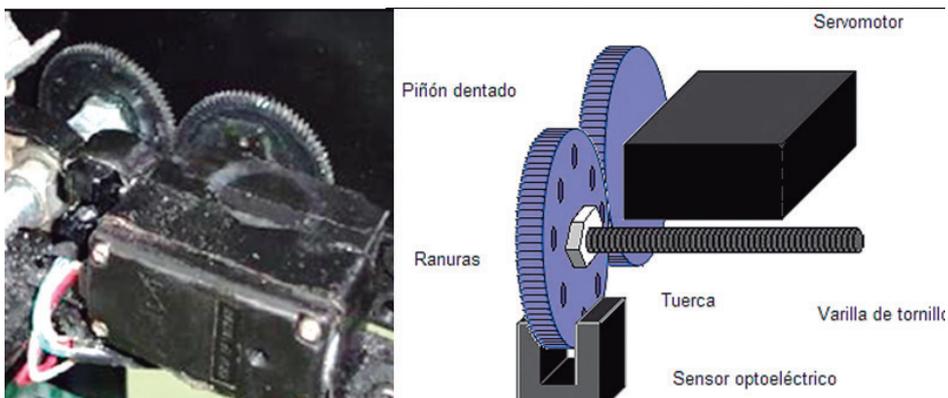


Figura 13. Bloque servo-mecánico

brazo construido en material metálico, como el resto de la plataforma, para garantizar su rigidez, estabilidad y durabilidad. Este brazo contiene en su interior un sistema corredizo que le proporciona movilidad en los dos sentidos necesarios: hacia arriba y hacia abajo, abarcando así tanto los ejes de las coordenadas X y Y, como el eje Z.

La función principal de este sistema mecánico es permitir al usuario realizar un ajuste mecánico manual de la distancia a la que desee fijar el transductor con respecto al fondo del tanque; además, en la parte inferior del brazo se acopló una pinza mecánica para sujetar el transductor, construida en material acrílico blanco con la rigidez suficiente para sostener con fuerza el palpador, aplicando la presión necesaria para que quede estable en un solo punto, sin llegar a dañar el equipo de escaneo y sin comprometer el peso que pudiera soportar el servomotor.

C. Circuitería de control

Durante la etapa de diseño del hardware del sistema, se decidió trabajar con sensores ópticos basados en fototransistores trabajando en corte y saturación, y manipular las señales de control de los servomotores directamente con uno de los puertos del microcontrolador, tomando como entrada un valor en otro puerto donde dicha señal tendría la codificación de los sentidos de giro, las entradas de los sensores de inicio y fin de carrera y una señal especial que tiene dos funciones: paro de emergencia y habilitador de giro para desenclavar los motores.

Se incluyó también un control externo con el cual se puede *hacer* mando a la estructura, deshabilitando la entrada de información desde el PC, para la realización de pruebas, calibración y para futuras aplicaciones conceptuales de la estructura bajo requerimientos diferentes a la aplicación actual. En el diagrama de la Figura 14 se muestra el flujo de señales de control entre los bloques funcionales de la circuitería.

Los sensores ópticos empleados en la construcción del sistema robótico, se pueden clasificar en 2 grupos: *sensores de tope* (inicio y fin de carrera del eje) y *sensores de posición* (ver figuras 15 y 16).

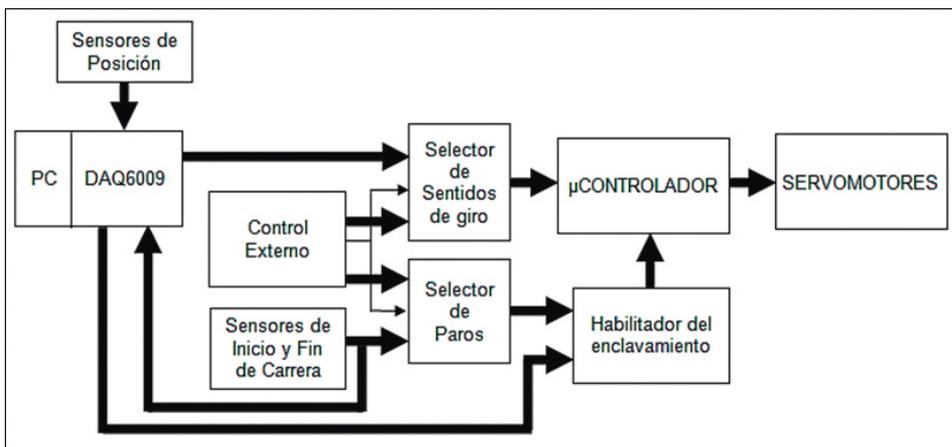


Figura 14. Bloque servo-mecánico

Los sensores de tope adquieren su denominación debido a su ubicación dentro de la estructura, puesto que se sitúan en los límites de recorrido de cada eje y son los que indican la llegada del movimiento a los límites mecánicos. Los sensores de posición describen indirectamente el recorrido lineal del transductor a lo largo del eje, puesto que la variable directamente medida es el desplazamiento angular del piñón de acople del tornillo sin fin (ver Figura 13).

Para realizar la medición de la variable, el piñón y el sensor óptico trabajan como un encoder, generando un tren de pulsos de lógica inversa correspondientes al paso de los agujeros en el piñón cuando éste se mueve. Para obtener la distancia recorrida a lo largo del eje, se tiene en cuenta que:

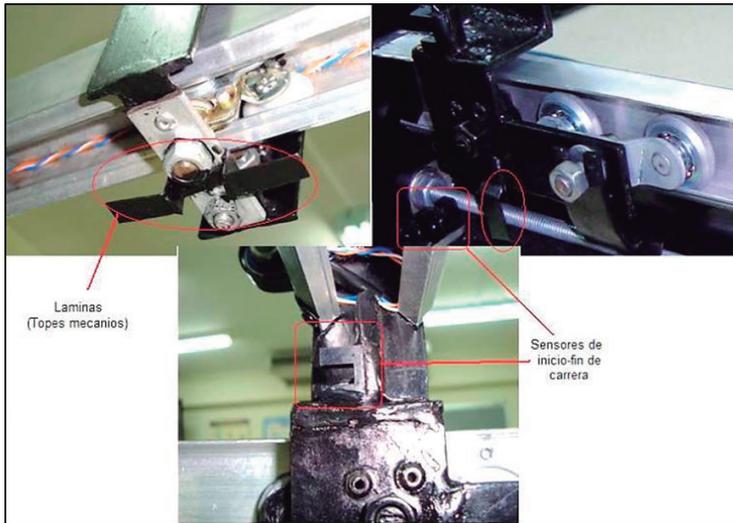


Figura 15. Sensores de inicio-fin de carrera y láminas de activación

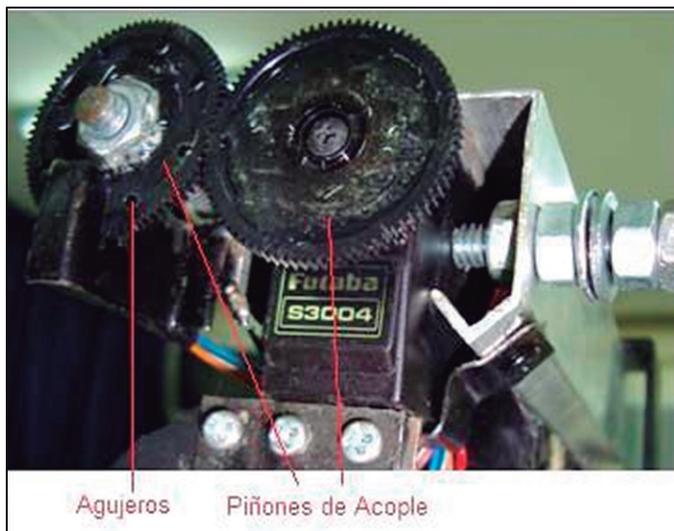


Figura 16. Piñones de acople y agujeros de los sensores de desplazamiento

- » Una vuelta del tornillo equivale a 1,25 mm de recorrido en el eje.
- » El piñón tiene 8 agujeros equidistantes uno del otro a 45°.

De acuerdo con las anteriores consideraciones se puede deducir que:

$$x = \frac{1.25mm}{8} = 0.15625mm$$

donde x es la distancia mínima de sensado entre un punto y el siguiente.

Para la implementación de la circuitería de control y la comunicación con los tres bloques funcionales (DAQ6009, proceso, control externo), se utilizaron tres puertos diferentes para asegurar la correcta conexión de cada uno en el lugar respectivo: para la conexión con el proceso (Estructura física) se utilizó un DB 15 de dos filas; para la conexión con la tarjeta DAQ6009 se utilizó un DB 15 de tres filas; para la conexión del control externo se utilizó un DB 9.

D. Cableado

Para mantener la estética y la funcionalidad de la estructura electromecánica, se usó cable UTP trenzado para conectar cada sensor y motor. El cableado en los bloques 1 y 2 se ocultó en la cara interior del marco hecho en perfil de hierro, las trenzas de hilos de cobre que conectan los sensores se ocultaron en la cara interior del perfil de aluminio para el cableado en el eje transversal. También se implementó un sistema de *oruga* como guía de la trenza de hilos de cobre, desarrollado en material plástico, lo que le da flexibilidad y resistencia y le agrega poco peso a la estructura y a la carga de los motores del eje horizontal que son los que mueven este sistema.

E. Software y firmware

El desarrollo del software de control del dispositivo se fragmentó en dos bloques funcionales que cumplen tareas específicas individuales de manera coordinada. El primero es el firmware del controlador hardware (el programa del microcontrolador) y el software de control y monitoreo de la estructura mecánica (en LabView), además de acoplar la interfaz con el usuario y la generación de la ruta del transductor.

1) Firmware

El código del microcontrolador tiene como finalidad generar las tres señales de PWM de control de los servomotores y para ello se basa en una secuencia de comparaciones de los primeros 7 bits de entrada de uno de sus puertos, en los cuales se codificaron todas las posibles opciones de movimiento de la estructura servo-mecánica. En la Tabla 2 se observa la respectiva equivalencia de cada bit: los cuatro primeros definen los sentidos de giro de los servomotores y los últimos tres deshabilitan dicha señal reteniendo el servomotor por software.

Las señales de paro de cada bloque se utilizan, como paro de emergencia y como señales de retención y calibración dinámica del desfase que pueda presentarse entre los dos servomotores del eje X en la medida de su avance de un punto a otro, logrando así mantener los ejes X-Y completamente perpendiculares.

Tabla 2. Valores de entrada al puerto del microcontrolador

Bit	Descripción
LSB Bit 0	Movimiento hacia +X (hacia la derecha)
Bit 1	Movimiento hacia -X (hacia la izquierda)
Bit 2	Movimiento hacia +Y (hacia arriba)
Bit 3	Movimiento hacia -Y (hacia abajo)
Bit 4	Paro del bloque 1 (X1)
Bit 5	Paro del bloque 2 (X2)
Bit 6	Paro del bloque 3 (Y)
MSB Bit 7	No se tuvo en cuenta

Como se observa en la Tabla 2, cada motor tiene tres opciones, lo que se traduce en tres señales de PWM con ciclo de trabajo diferente. Dichas señales corresponden a 0°, 90° y 180°, debido al enclavamiento del servo, en el cual la referencia interna está fija a 90°, lo que permite usar la referencia PWM de esa posición como señal de retención del motor, y las otras dos como señuelo para hacer girar indefinidamente el servomotor hasta encontrar la condición de parada indicada por software desde el PC o hasta encontrar un sensor de inicio o fin de carrera.

Debido a que el programa funciona en un bucle indefinido, realizando las comparaciones al inicio y terminando en el momento en el cual la señal de PWM de 50Hz debe repetirse, el microcontrolador hace 50 lecturas por segundo del valor de entrada del puerto de las señales codificadas. Las comparaciones tienen como prioridad los valores de los paros. En caso de estar habilitados, descartan el valor de los sentidos de giro y guardan en memoria el valor múltiplo de la unidad de tiempo base; en caso contrario, realizan la comparación de los bits de sentido de giro para X y Y, y ponen en memoria para cada señal el valor múltiplo de la unidad de tiempo base equivalente a la señal de giro correspondiente a cada caso. La unidad de tiempo base tiene un valor de 100µs, logrado con una rutina de tiempos.

Para el desarrollo del algoritmo se tomó como referencia el concepto *Time Division Multiplexing* [TDM] para elaborar la estrategia de manipulación de las señales dentro de un rango de tiempo predefinido por el periodo de la señal de PWM, manipulando individualmente cada una de las tres señales solo en el tiempo en el cual la señal tiene un estado alto. La Figura 17 muestra el esquema de tiempos implementado que permite que, con este algoritmo, se puedan manipular ocho señales de este tipo.

2) Software de control (LabView)

La estrategia de control de posición implementada en la plataforma LabView tiene por objetivo la correcta ubicación del transductor en una serie de puntos de la grilla de inspección, que es automáticamente generada de acuerdo con la información entregada por el usuario acerca del área donde se ubica la pieza en el tanque de inmersión. Con esta estrategia se logra posicionar el transductor en los puntos específicos con una

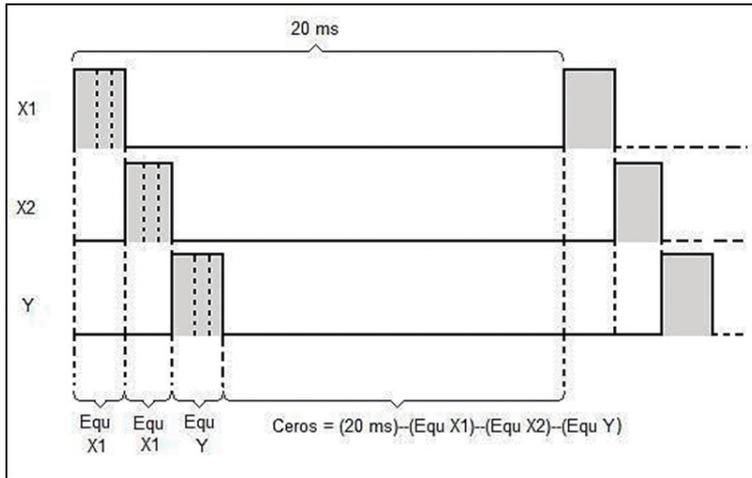


Figura 17. Esquema de tiempos de las señales de PWM

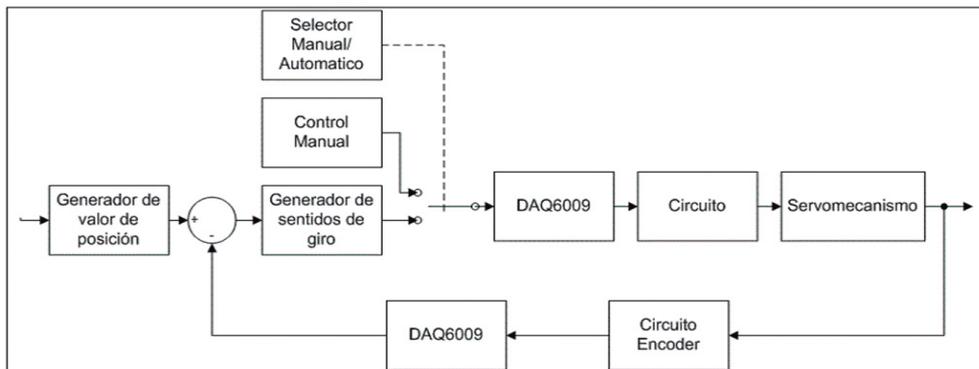


Figura 18. Esquema del control de posición

desviación en la posición menor a los $156\mu\text{m}$, sin llegar a presentar error acumulativo. Para el diseño de la estrategia de control software (Figura 18) se tuvo en cuenta que los elementos de entrada al sistema de referencia son los sentidos de giro, los topes físicos y la señal de realimentación que es generada por el *encoder*, la cual indica la distancia recorrida de cada eje.

De manera general, el programa se ocupa de recibir los datos digitados por el usuario a través de la interfaz gráfica en LabView, identificando el delta de desplazamiento y el área efectiva de la grilla coordenada en la que se encuentra ubicada la pieza metálica. Lleva a las coordenadas (0,0) todo el sistema (reinicio del sistema) para luego moverse hasta la coordenada inicial de la trayectoria, cerca de la pieza a inspeccionar, y comienza a hacer un barrido sobre la misma -con respecto al delta seleccionado por el usuario- en forma de *zig-zag*, deteniéndose en cada punto de escaneo (en cada delta se detiene para capturar las señales ultrasónicas en dicho punto, recibir la información y prepararla para ser almacenada). Cuando ha llegado al último punto de escaneo y toma la última

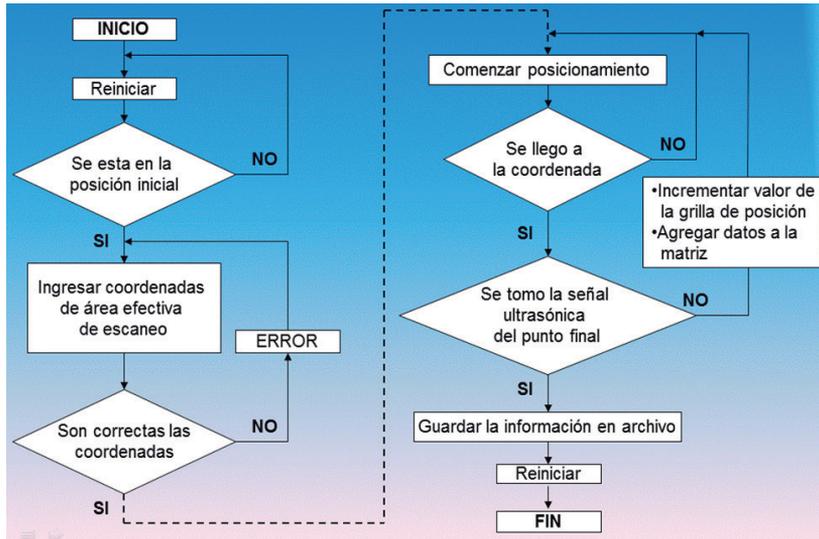


Figura 19. Esquema de tiempos de las señales de PWM

muestra se le pide al usuario que guarde esa información en un archivo de Excel en la ruta predefinida o en una deseada; por último, el sistema se reinicia. La figura 19 presenta el diagrama de flujo que corresponde a la operación de la plataforma.

III. Pruebas y resultados

Se establecieron dos tipos de prueba: una de exactitud en la posición final del transductor y otra que tiene que ver con el tiempo. Para la prueba de precisión, se adoptaron coordenadas equivalentes a una línea horizontal o vertical con pasos (deltas), primero, de 10 mm en un recorrido de 38 cm a lo largo del eje X y de 19cm a lo largo del eje Y; luego, de 1mm sobre un recorrido de 2 cm en ambos ejes (tanto los datos ingresados al programa, como los representados en las tablas, están en milímetros). Para obtener la información de comparación con los datos ingresados al software de control se dibujaron marcas guía sobre los rieles de aluminio y se realizó el conteo de vueltas de las varillas de tornillo para cada caso. En el primer caso, para el eje X y el eje Y se obtienen los resultados de las Tablas 3 y 4; para el segundo caso, los de las Tablas 5 y 6.

Como se aprecia, la exactitud promedio es de 1.1% en X y de 2% en Y; no obstante, en casos puntuales, se deteriora hasta 1,8% y 4,5% respectivamente. Los bloques en la Tabla 3 se refieren a los bloques servo-mecánicos moviéndose de manera sincronizada a lados opuestos del tanque de inmersión, para mantener al eje Y perpendicular al eje X.

Las Figuras 20 y 21 muestran el comportamiento del paso diferencial (promediado entre los dos bloques servo-mecánicos), idealmente de 10 mm, para el caso de los recorridos largos; el paso entre un punto y otro se calcula restando entre sí las distancias recorridas medidas en esos dos puntos.

Tabla 3. Mediciones de las guías en el eje X para recorrido largo

Esperado	Valor [mm]		Desviación [mm]		Incertidumbre Promedio %
	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 1	Bloque 2	
10	10	9,7	0	-0,3	1,5%
20	20,05	19,85	0,05	-0,15	0,5%
30	30,2	30,05	0,2	0,05	0,4%
40	40,3	40,32	0,3	0,32	0,8%
50	50,2	50,2	0,2	0,2	0,4%
60	60,2	60,1	0,2	0,1	0,3%
70	70,45	70,35	0,45	0,35	0,6%
80	80,95	80,85	0,95	0,85	1,1%
90	91,15	91,05	1,15	1,05	1,2%
100	101,45	101,35	1,45	1,35	1,4%
110	111,55	111,45	1,55	1,45	1,4%
120	122,05	121,95	2,05	1,95	1,7%
130	132,45	132,35	2,45	2,35	1,8%
140	142,2	142,1	2,2	2,1	1,5%
150	152,2	152,1	2,2	2,1	1,4%
160	162,3	162,25	2,3	2,25	1,4%
170	172,15	172,1	2,15	2,1	1,3%
180	182,35	182,25	2,35	2,25	1,3%
190	192,05	191,85	2,05	1,85	1,0%
200	202,35	202,15	2,35	2,15	1,1%
210	212,75	212,65	2,75	2,65	1,3%
220	222,65	222,45	2,65	2,45	1,2%
230	232,9	232,7	2,9	2,7	1,2%
240	242,6	242,4	2,6	2,4	1,0%
250	252,75	252,5	2,75	2,5	1,1%
260	262,85	262,7	2,85	2,7	1,1%
270	273,25	273,2	3,25	3,2	1,2%
280	283,55	283,5	3,55	3,5	1,3%
290	293,4	292,95	3,4	2,95	1,1%
300	303,1	302,65	3,1	2,65	1,0%
310	313,15	312,9	3,15	2,9	1,0%
320	322,95	322,55	2,95	2,55	0,9%
330	333,35	332,95	3,35	2,95	1,0%
340	343,45	343,1	3,45	3,1	1,0%
350	353,45	353,2	3,45	3,2	0,9%
360	363,4	362,95	3,4	2,95	0,9%

Tabla 3. Mediciones de las guías en el eje X para recorrido largo (cont.)

Esperado	Valor [mm]		Desviación [mm]		Incertidumbre Promedio %
	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 1	Bloque 2	
370	373,5	373,15	3,5	3,15	0,9%
380	383,4	383	3,4	3	0,8%
	Promedio		2,19	2,00	1,1%

Tabla 4. Mediciones de las guías en el eje Y para recorrido largo

Esperado	Valor [mm]		Desviación [mm]	Incertidumbre %
	Real			
10	10,3		0,3	3,0%
20	20,9		0,9	4,5%
30	31,15		1,15	3,8%
40	41,15		1,15	2,9%
50	50,8		0,8	1,6%
60	61,2		1,2	2,0%
70	71,5		1,5	2,1%
80	81,5		1,5	1,9%
90	91,3		1,3	1,4%
100	101		1	1,0%
110	111,2		1,2	1,1%
120	121,25		1,25	1,0%
130	131,35		1,35	1,0%
140	141,95		1,95	1,4%
150	152,05		2,05	1,4%
160	163,05		3,05	1,9%
170	173,35		3,35	2,0%
180	183,35		3,35	1,9%
190	193,45		3,45	1,8%
	Promedio		1,67	2,0%

Tabla 5. Mediciones de las guías en el eje X para recorrido corto

Esperado	Valor [mm]		Desviación [mm]		Incertidumbre Promedio %
	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 1	Bloque 2	
1	1	1	0	0	0,0%
2	2	2	0	0	0,0%
3	2,98	3	-0,02	0	0,3%
4	4	4,1	0	0,1	1,3%
5	4,9	5	-0,1	0	1,0%

Tabla 5. Mediciones de las guías en el eje X para recorrido corto (cont.)

Esperado	Valor [mm]		Desviación [mm]		Incertidumbre Promedio %
	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 1	Bloque 2	
6	6	6	0	0	0,0%
7	7	7	0	0	0,0%
8	8,02	8,07	0,02	0,07	0,6%
9	9	9	0	0	0,0%
10	10	10	0	0	0,0%
11	11	11	0	0	0,0%
12	12,2	12,13	0,2	0,13	1,4%
13	13	13	0	0	0,0%
14	14	14	0	0	0,0%
15	15	15	0	0	0,0%
16	16	16	0	0	0,0%
17	16,98	17,3	-0,02	0,3	0,9%
18	18	18	0	0	0,0%
19	19	19,1	0	0,1	0,3%
Promedio			0,00	0,04	0,3%

Tabla 6. Mediciones de las guías en el eje Y para recorrido corto

Esperado	Valor [mm]		Desviación [mm]	Incertidumbre %
	Real			
1	1		0	0,0%
2	2		0	0,0%
3	3		0	0,0%
4	4,02		0,02	0,5%
5	5		0	0,0%
6	6		0	0,0%
7	7,1		0,1	1,4%
8	8		0	0,0%
9	9		0	0,0%
10	10		0	0,0%
11	11		0	0,0%
12	12,2		0,2	1,7%
13	13		0	0,0%
14	14		0	0,0%
15	15		0	0,0%
16	16		0	0,0%
17	17		0	0,0%

Tabla 6. Mediciones de las guías en el eje Y para recorrido corto (cont.)

Valor [mm]		Desviación [mm]	Incertidumbre %
Esperado	Real		
18	17,9	-0,1	0,6%
19	19	0	0,0%
Promedio		0,01	0,2%

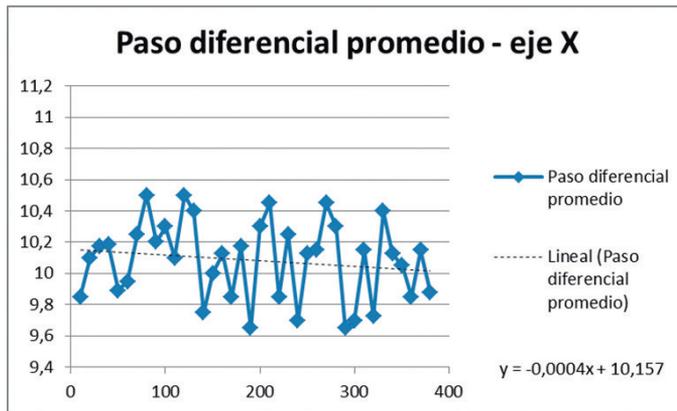


Figura 20. Variabilidad en el paso diferencial del eje X

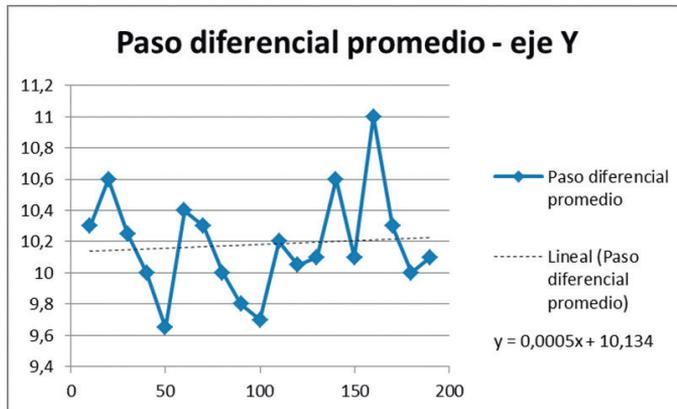


Figura 21. Variabilidad en el paso diferencial del eje Y

Se observa en el paso diferencial que la precisión en el paso del eje Y es menor a la del paso del eje X, lo que explica en principio que la incertidumbre sea mayor para el eje X que para el eje Y. En ambas gráficas es claro que el promedio del paso en ambos ejes es ligeramente superior al ideal.

Para las pruebas de recorrido corto, la incertidumbre promedio es 0.1% en X y 0.2% en Y; no obstante para casos puntuales se deteriora hasta 1,4% y 1,7% respectivamente. De aquí se puede establecer que en los recorridos con pasos más grandes hay una mayor incertidumbre en la posición final, debido tal vez a que con recorridos mayores

las irregularidades del sistema servo-mecanismo – guía introducen desviaciones que se añaden en mayor número hasta llegar a la posición destino.

En el segundo tipo de prueba se pretendía conocer el tiempo promedio de recorrido entre los puntos de inspección, obtener la velocidad de trabajo de cada motor y realizar una comparación entre tiempos para cada eje, con el fin de concluir cuánto se demora el proceso de captura y ordenamiento de la información. Para ello se implementó la misma prueba de recorrido largo para el eje X y para el eje Y, llevando a cabo un desplazamiento desde la coordenada inicial hasta la coordenada final del eje X, ejecutando inspecciones cada 10 mm, para luego retornar el transductor a la coordenada inicial.

Para el eje X se obtienen los siguientes resultados:

- » El tiempo del recorrido fue de 7' 59" y el tiempo de retroceso fue de 7' 8"; la diferencia entre los dos es de 51 segundos, que son los utilizados por el bloque de captura y organización de la información. Así, en promedio, en cada punto de inspección el programa se demora 1,378 segundos realizando la calibración dinámica del desfase de los motores, la captura y organización de la información desde el osciloscopio.
- » El tiempo neto promedio en recorrer 1 cm y realizar la captura de la información en cada punto es de 12,95 segundos.
- » En el análisis del retroceso se observó que en un recorrido largo sin paradas intermedias los bloques del eje X se desfasan en una vuelta cada 13 cm aproximadamente, pero dicho error es corregido por la rutina de compensación realizada en LabView.
- » De los datos obtenidos en la prueba de retroceso se infiere que la velocidad promedio de todo el conjunto del eje X es de aproximadamente 0,888 mm/s, equivalente a 0,711 revoluciones por segundo de los motores.

Para el eje Y se obtienen los siguientes resultados:

- El tiempo total del recorrido fue de 3' 22" y el tiempo de retroceso fue de 3' 16"; la diferencia entre los dos es de 2 segundos, tiempo utilizado por el bloque de captura y organización de la información. Así que en promedio, en cada punto de inspección el programa se demora 0,105 segundos realizando la captura y organización de la información desde el osciloscopio.
 - » El tiempo neto promedio en recorrer 1 cm y realizar la captura de la información en cada punto es aproximadamente de 11,22 segundos.
 - » De los datos obtenidos durante el retroceso se infiere que la velocidad promedio del eje Y es aproximadamente 0,964 mm/s, equivalente a 0,771 revoluciones por segundo del motor.

Posteriormente, se llevó a cabo una inspección real de una pieza de hierro de aproximadamente 13 x 9 cm con un delta de desplazamiento de 1 cm, y se verificó la generación del archivo de texto correspondiente. Con los datos ingresados al programa se debían inspeccionar 13 puntos en X por 8 puntos en Y, para un total de 104 puntos de inspección. Este fue el resultado obtenido:



Figura 22. Imagen de la plataforma desarrollada

- » • El tiempo total de la prueba fue de 21' 40" segundos, lo que indica un tiempo promedio entre puntos de 11,71 segundos.
- » • La velocidad promedio de todo el proceso fue de 0,854 mm/s.

Para terminar, la Figura 22 presenta una perspectiva de la plataforma desarrollada, con todos sus accesorios.

Conclusiones y trabajo futuro

Se ha desarrollado un sistema robótico para la captura de señales de ultrasonido por el método de inmersión, mediante el posicionamiento de un transductor, ya sea de forma automática –a lo largo de una trayectoria pre-establecida– o manual y remota, de acuerdo con las necesidades del usuario, logrando un nivel adecuado de incertidumbre (i.e., 1.1% y 2% en promedio, para los ejes X y Y, respectivamente). El sistema está diseñado para que sea modular, lo que facilita su ensamblaje, calibración y mantenimiento.

La forma de su estructura mecánica permite que el dispositivo sea de fácil almacenaje, puesto que se diseñó como parte complementaria de un tanque de inmersión usado en el Laboratorio de Ultrasonido de la USC. El software de control del sistema permite al usuario el cambio de los parámetros de calibración dinámica y la corrección de errores sin tener que modificar todo el código, sino sólo cambiando los valores de las variables involucradas.

Los resultados obtenidos en las inspecciones son correctos; una revisión manual de los archivos de Excel creados permite medir los tiempos de vuelo, los cuales son coherentes con los espesores medidos en los diferentes puntos de las piezas inspeccionadas.

Comparado con sistemas similares disponibles en el mercado, que tienen mayor envergadura y un número mayor de funciones especializadas, la plataforma implementada presenta como ventaja su bajo costo y la versatilidad del hardware que le permite al usuario manipularlo de acuerdo con sus necesidades y modificarlo, si es necesario, para llevar a cabo aplicaciones diferentes a la de inspección ultrasónica.^{58†}

Referencias bibliográficas

- Abad, G. (2006). Sensores en robótica [trabajo presentado en el Seminario “Diseño y Construcción de microrrobots”]. Universidad de Alcalá, España. recuperado de <http://www.alcabot.com/alcabot/seminario2006/Trabajos/GuillermoAbadCarton.pdf>
- Gosálbez, J; Salazar, A; Miralles, R; Bosch, I; & Vergara, L. (2007). Mejora de la detección y caracterización de materiales con un sistema automático de ultrasonidos. Universidad Politécnica de Valencia. Artículo consultado en Julio de 2008. http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos_gandia_2005/articulos/PS3/646.pdf.
- Jiménez, J. & Loaza, H. (2010). Detección y Caracterización de Defectos en Tuberías Metálicas en Pruebas ultrasónicas por Inmersión. *El Hombre y la Máquina*, 34, 56-67
- Manual de técnicas de NDT (2007) [Curso de ultrasonido para ensayos no destructivos de materiales]
- Moon, A. (2008). *Design and installation of inkjet printing system on a flatbed router* [report]. Faculty of Engineering, University of Waterloo: Ontario, Canadá
- Olympus (2008). *Características técnicas del Pulser/Receiver 5800PR*. Disponible en <http://www.olympus-ims.com/en/5800pr/>
- Panametrics (2006). *Ultrasonic Principles, Technical Notes*. Recuperado de <http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/UT-technotes.en.pdf>
- Restrepo, A., (2008). Generalidades de los ultrasonidos. *Ingenium*, 3(6), 20-27
- Victoria, S. (2006). *Diseño e implementación de un sistema para la inspección de tuberías basado en técnicas de ultrasonido* [Tesis]. Universidad Santiago de Cali.
- Williams, J., Gossett, S., Blankenship, E., Spiller, E., Brokaw, P., & Hagene, B. (2010). *Low Cost CNC Machine Design*. Southern Illinois University, 2010.
- Yunda, L., Rodríguez, S., Gómez, L., Maya, O., & Barrera, O. (2011). *Sistema de microscopía robotizada para diagnóstico y confirmación de diagnóstico a distancia*. *Ingenium*, 5(10), 39-46. Disponible en <http://revistas.usc.edu.co/index.php/Ingenium/article/view/48>

Currículum vitae

Christian C. Escobar Arango

Ingeniero Electrónico (2009) de la Universidad Santiago de Cali. Durante el desarrollo del proyecto fue estudiante del Grupo de Investigación en Instrumentación Electrónica (GIE).

Sus áreas de interés se centran en la instrumentación electrónica, la robótica y el diseño electrónico digital y microcontrolado.

Fredy F. Miramag Martínez

Ingeniero Electrónico (2009) de la Universidad Santiago de Cali. Durante el desarrollo del proyecto fue estudiante del Grupo de Investigación en Instrumentación Electrónica (GIE).

Sus áreas de interés se centran en la instrumentación electrónica, la robótica y el diseño electrónico digital y microcontrolado.

Andrés David Restrepo Girón, Ph.D.(c).

Ingeniero Electrónico (1999), Magíster en Automática (2005) y candidato a Doctor en Ingeniería de la Universidad del Valle, asociado al Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes (PSI). Profesor de la Facultad de Ingeniería y Director del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santiago de Cali, vinculado al Grupo de Investigación en Instrumentación Electrónica (GIE) de la Universidad Santiago de Cali. Sus áreas de interés son la instrumentación electrónica, los sistemas digitales microcontrolados y el procesamiento de señales e imágenes.

John Jiménez Gómez, M.Sc.

Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle (1997), Especialista en Docencia para la Educación Superior de la Universidad Santiago de Cali (1999), Especialista en Electromedicina y Gestión Tecnológica Hospitalaria de la Universidad Autónoma de Occidente (2003), y Magíster en Electrónica de la Universidad del Valle (2008). Profesor de la Facultad de ingeniería y Director del programa de Bioingeniería de la Universidad Santiago de Cali, vinculado al Grupo de Investigación en Instrumentación Electrónica (GIE). Sus áreas de interés son la instrumentación electrónica para NDT y el procesamiento de señales e imágenes.