



Contenido disponible en <http://fcqi.tij.uabc.mx/usuarios/revistaaristas/>

Revista Aristas Investigación Básica y Aplicada



PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE CONTROL “BALL ON PLATE” UTILIZANDO LABVIEW Y ARDUINO.

López Ortega Filemón^a, Martha Cárdenas Maciel^b, Rogelio Serrano Zepeda^c, Cristina Danahe Ortega Rodríguez^d.

^a Ingeniero en Mecatrónica por la Universidad Tecnológica de Tijuana, filemon.lopez@uttijuana.edu.mx

^b Ingeniero en Sistemas Computacionales. Maestría en Ciencias (Sistemas Digitales) por el IPN. martha.cardenas@uttijuana.edu.mx

^c Ingeniero en Sistemas Computacionales. Maestría en Ciencias (Sistemas Digitales) por el IPN. rogelio.serrano@uttijuana.edu.mx

^d Técnico Superior Universitario en Mecatrónica. cristina.ortega@miutt.edu.mx

Información del artículo

Historia del artículo:

Recibido: 24 Julio 2015

Aceptado: 26 Noviembre 2015

Publicado: 17 Febrero 2016

Palabras clave: Ball on plate, Arduino, Control Automático, Visión artificial.

Datos de contacto del primer autor:

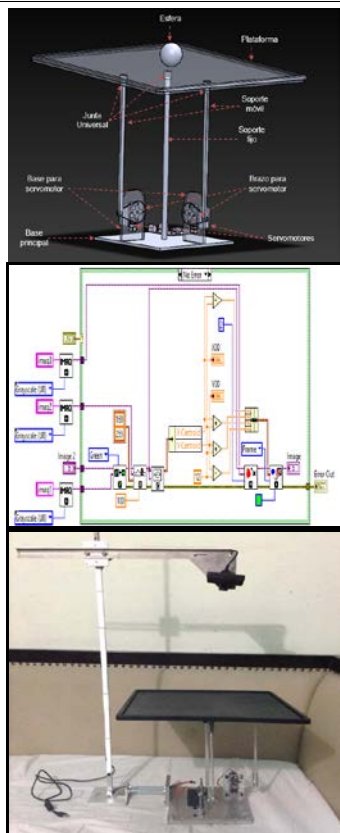
López Ortega Filemón

filemon.lopez@uttijuana.edu.mx

México

Resumen

El presente artículo describe la construcción, modelado, y experimentación de una plataforma de control ball on plate, utilizando visión artificial. En la etapa física se utilizaron servomotores, en la etapa de control la placa Arduino UNO; la etapa de visión se realizó mediante el software LabVIEW en donde se desarrolló una interfaz visual para la configuración de parámetros. El sistema localiza la posición de la pelota a través de una imagen procesada, y controla su posición mediante un sistema de control proporcional.



1. INTRODUCCIÓN

El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Además se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos, industriales y de manufactura.

Las plataformas didácticas ayudan a los estudiantes de ingeniería a comprender los sistemas de control de una forma práctica y relativamente simple, permitiendo la aplicación de técnicas de control clásicas y modernas en el aula.

En los casos típicos para demostración y aplicación de sistemas de control, se encuentra el sistema *ball on plate*, que es una versión didáctica y a la vez compleja, la cual consiste en controlar la posición de una pelota sobre una plataforma plana (2D), dicha plataforma cambia sus ángulos de inclinación para mantener la pelota en una posición específica.

Existen diversas implementaciones físicas para un sistema de control del tipo *ball on plate*, las cuales utilizan motores de corriente continua [1] y [2], o servomotores [3], la ventaja de utilizar estos últimos es el bajo costo, y la practicidad para su manejo. También se puede encontrar implementaciones con actuadores lineales magnéticos [4], entre otros.

En este proyecto se utiliza un sistema de control de dos ejes, como actuadores se manejan servomotores, y un acelerómetro para verificar la inclinación de la plataforma plana de contacto, el control se realiza a través de LabVIEW y el toolbox de Visión, utilizando una cámara web para la adquisición de la imagen de la plataforma y así determinar la posición de la esfera sobre ella. Se trabaja con la tarjeta Arduino UNO [5], para controlar los ángulos de inclinación de los servomotores.

2. MARCO TEÓRICO

En la implementación de un sistema de control, se utilizan diversas teorías que fundamentan las dinámicas del sistema, a continuación se mencionan algunas de las teorías básicas utilizadas para el presente proyecto.

Segunda Ley de Newton

La segunda ley de Newton se resume en: “La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él, e inversamente proporcional a su masa”, su forma es: $F = ma$. Es decir, en la primera ley de Newton se explica que para que un objeto se mueva tiene que ser impulsado por una fuerza.

La expresión de la segunda ley solo aplica en cuerpos cuya masa es constante, si la masa varía se definirá una magnitud física nueva, es decir, la cantidad de movimiento representado por p y que se define como: “el producto de la masa de un cuerpo por la velocidad”, su forma es: $p = mv$.

La segunda ley de Newton dice que la derivada de la cantidad de movimiento con respecto al tiempo es cero: $0 = \frac{dp}{dt}$, en caso de que se use el principio de cantidad de movimiento [6].

Transformada de Laplace

La transformada de Laplace es una integral que va desde menos infinito a más infinito, evaluada entre cero e infinito, como se muestra en la Ec. (1).

$$\mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} (e^{-st})f(t) dt \quad (1)$$

Como la Transformada de Laplace está definida por una integral impropia, cambia su función con una variable de entrada en otra función con otra variable, es decir, ésta cambia cuando lo requiere según su condición.

Transformada inversa de Laplace.

Sirve para determinar cómo se comporta una variable con respecto al tiempo [7].

Control de lazo cerrado.

El control de lazo cerrado [8] se usa para comparar el valor de entrada y la señal de retroalimentación (que puede ser la señal de salida), con el fin de que con el uso de una acción de control realimentado, se pueda reducir el error del sistema. Como se muestra en el diagrama de la figura 1.

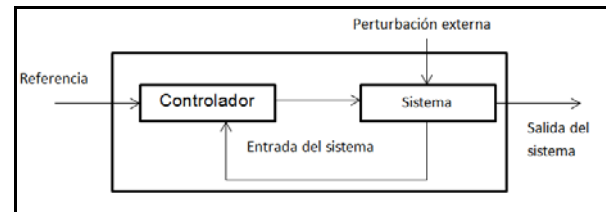


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de lazo cerrado.

3. DESARROLLO

En esta sección se describe el proceso para el desarrollo de la plataforma física, el modelado matemático y la programación.

Diagrama general del sistema

En la figura 2, se observa el diagrama general del sistema, el cual consta de cuatro elementos, cámara web para obtener la referencia de la posición de la pelota, etapa de procesamiento y control en LabVIEW, placa Arduino UNO que sirve como interfaz para comunicar LabVIEW con los actuadores, (servomotores) que realizan el movimiento de la plataforma.

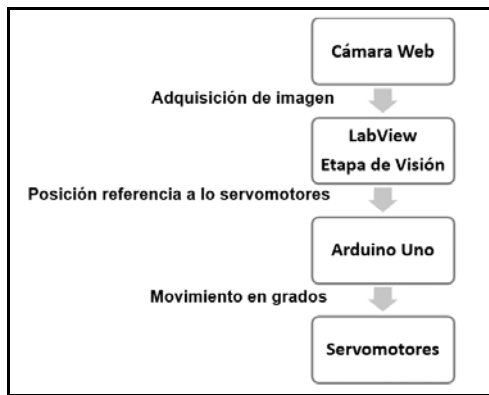


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema

Diseño

Para la construcción de la plataforma se realizó el diseño de cada elemento físico con las características que se mencionan a continuación:

1. **Soporte fijo:** Pieza de aluminio de 1 cm de diámetro y 30 cm de alto (Figura 4c).
2. **Superficie plana de contacto:** Pieza de acrílico con una dimensión de 40 x 40 cm.
3. **Junta universal:** Pieza de aluminio de 1.6 cm de largo y 7 mm de diámetro (Figura 3).
4. **Base de la plataforma:** Pieza de aluminio de 20 x 20 cm y un grosor de aproximadamente 0.5 cm.
5. **Brazo para servomotor:** Pieza de unión entre el servomotor y el soporte móvil, con una longitud de 5 cm (Figura 4a).
6. **Base para servomotor:** Pieza de acrílico de 6 cm de ancho x 9 cm de alto con un grosor de 0.538 cm (Figura 4b).
7. **Actuadores:** Servomotor Tower PRO modelo 996R, con un engranaje de 5.74 mm de diámetro, un aspa de 3.48 cm de alto x 0.635 cm de ancho.
8. **Soporte móvil:** Pieza de aluminio, con dimensiones de 25.5 cm de largo y diámetro de 1 cm.
9. **Esfera:** Diámetro de 4.45 cm y un peso de 360 g.

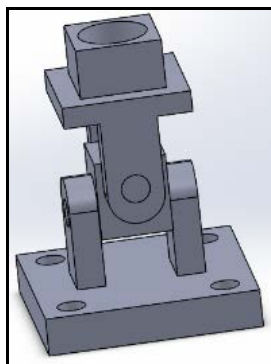


Figura 3. Junta universal

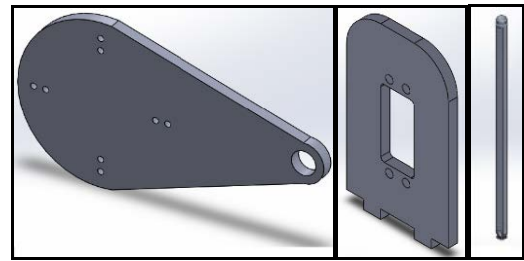


Figura 4. a) Brazo para servomotor, b) base para servomotor, c) soporte fijo.

El diseño completo de la plataforma en ambiente CAD se muestra en la figura 5.

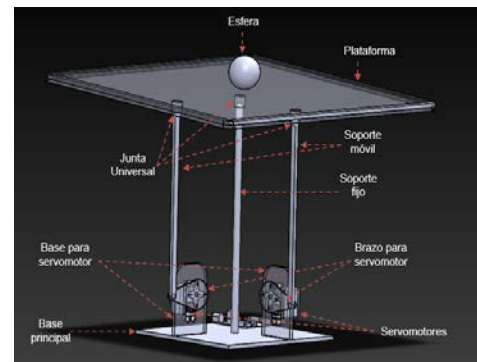


Figura 5. Diseño de la plataforma.

MODELADO MATEMÁTICO

Propiedades de la esfera

Se determinó el momento de inercia de una esfera sólida, para calcular su aceleración y velocidad.

Peso y Masa

$$W = mg$$

(2)

W = Peso

R = Radio = 0.02137 m

m = Masa = 0.04 kg

g = Fuerza de gravedad = 9.81 m/s²

$$W = 0.3924 \text{ N}$$

Momento de inercia de una esfera

El momento de inercia (J) de una esfera sólida, con respecto a un eje que pasa por el centro de su masa, se observa en la figura 6 y lo describe la Ec. (3).

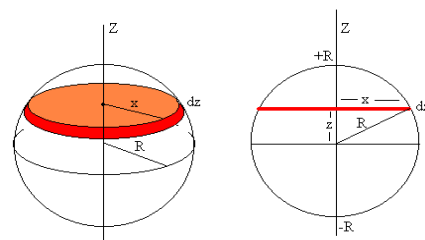


Figura 6. Representación de la esfera.

$$I = \frac{2}{5}MR^2 \quad (3)$$

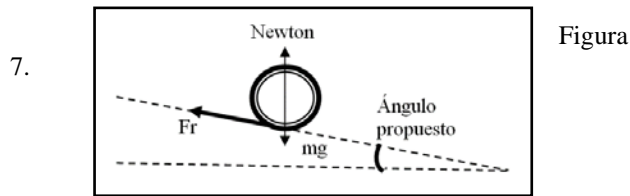
Para determinar el momento de inercia de la esfera se emplea la Ec. (3).

$$I = \frac{2}{5}(0.04\text{kg})(0.02137\text{m})^2$$

$$I = 0.00034192 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

Posición de una esfera

La posición de la esfera se determinó con el “Movimiento de rodar en un plano inclinado” (mostrado en la figura 7).



Movimiento de rodar en un plano inclinado.

Para determinar el movimiento, la aceleración y la fricción que debe de tener la esfera, primero se debe de proponer un ángulo de inclinación θ (el cual será formado por el movimiento de los servomotores) y el momento de inercia de la esfera.

t = tiempo = 0.616956067 s

Ángulo $\theta = 10^\circ$

Momento de inercia (I_{CM}) = $0.00034192 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$

a = Aceleración

Fr = Fricción

$$a = \frac{g \sin \theta}{1 + \frac{I}{Mr^2}} \quad (4)$$

$$a = 2.101 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$Fr = \frac{2}{5} \cdot \frac{mg \sin \theta}{1 + \frac{I}{Mr^2}} \quad (5)$$

$$Fr = 0.060992 \text{ Nw}$$

Para calcular la velocidad de la esfera, primero se obtuvo la distancia, considerando la aceleración que se acaba de tomar, y se propone el tiempo que tarda la esfera en recorrer la plataforma. Partiendo del reposo se emplean las ecuaciones del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.

Distancia

Se despeja t de la Ec. (7) para obtener el tiempo.

$$d = \frac{1}{2}at^2 \quad (6)$$

La plataforma tiene una medida de 40 x 40 cm, de ésta medida, se toma como referencia 18 cm del punto central a uno de los extremos, ya que se eliminaron 4cm del borde de la plataforma, (2cm por cada lado), obteniendo el tiempo y distancia:

$$t = 0.4138667162 \text{ s}^2$$

$$d = 0.18 \text{ m}$$

Velocidad

La velocidad de la esfera se calcula utilizando la Ec. (7).

$$V = at \quad (7)$$

$$V = \left(2.101752141 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(0.4138667162\text{s})$$

$$V = 0.869845256 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Modelado del sistema de control

Para el modelado del sistema de control se consideran los siguientes factores.

m = Masa de la esfera.

r = Radio de la esfera.

I = Momento de inercia de la esfera.

x = Posición de la esfera.

g = Gravedad (9.81 m/s^2).

θ = Ángulo de la plataforma.

l = Longitud de la plataforma.

α o β = Ángulo de Servomotor.

La Ec. (8) describe el modelo matemático del comportamiento del sistema en las coordenadas (X y Y).

$$\left(m + \frac{I}{r^2}\right)\ddot{x}(t) - m \left[\tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{x}\right)\right] \dot{x}(t) + mg \sin \beta = 0 \quad (8)$$

Donde el ángulo β para el servomotor 1 es igual a:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{x}\right) + \frac{\pi}{2}$$

La función de transferencia para el sistema de control retroalimentado para el cambio del cociente entre la salida del sistema $Y(s)$ y la señal de error $U(s)$ se presenta en la Ec. (9)

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (9)$$

Esta función de transferencia se conoce comúnmente como la función hacia adelante, en virtud de que se consideran los bloques cuyas señales fluyen en ese sentido. De esta forma la expresión resultante se calcula como lo expresa la Ec. (10)

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) \quad (10)$$

Por lo tanto, la función de transferencia de control para las coordenadas (X y Y) resulta como se presenta en la Ec. (11).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{\left(m + \frac{J}{r^2}\right) s^2 + m \left[\tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{x} \right) + \frac{\pi}{2} \right] s + mg \sin \beta} \quad (11)$$

La simplificación de se puede observar en la Ec. (12).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{m(1+k)}}{s^2 + \left[\tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{x} \right) + \frac{\pi}{2} \right] s + \frac{mg \sin \beta}{1+k}} \quad (12)$$

La respuesta de un sistema de segundo orden puede establecerse al analizar la interacción de los coeficientes de amortiguamiento (ζ) y la frecuencia natural (ω_n) del sistema. Partiendo de la Ec. (12) obtenemos la Ec.(13).

$$[s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2]Y(s) = [k\omega_n^2]U(s) \quad (13)$$

El cálculo de la función de transferencia de la Ec. (13) en el dominio de Laplace es por tanto:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (14)$$

La función de transferencia del sistema de control del *ball on plate* partiendo de la Ec.(12) en el dominio de Laplace. Donde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{mg \sin \beta}{1+k}}$$

$$\zeta = \frac{\left(\tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{x} \right) + \frac{\pi}{2} \right)}{2 \left(\sqrt{\frac{mg \sin \beta}{1+k}} \right)}$$

Diseño eléctrico

Para el circuito eléctrico solo se requiere de los dos servomotores de 10 kg, una fuente de alimentación para los actuadores (se utilizó una fuente de 6 volts) y la placa Arduino UNO como se muestra en la figura 8.

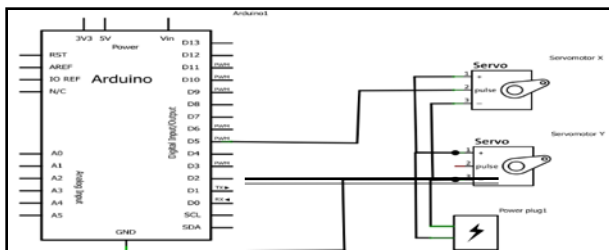


Figura 8. Diagrama eléctrico.

Programación

La programación se llevó a cabo en el ambiente de desarrollo gráfico LabVIEW. El programa detecta la pelota utilizando las herramientas de Visión para determinar su posición exacta en la plataforma.

Adquisición de imagen.

Para obtener la imagen desde la cámara web se utilizó el asistente *Vision Acquisition* (figura 9). La imagen se procesa en un subVI para obtener la posición X y Y de la pelota.

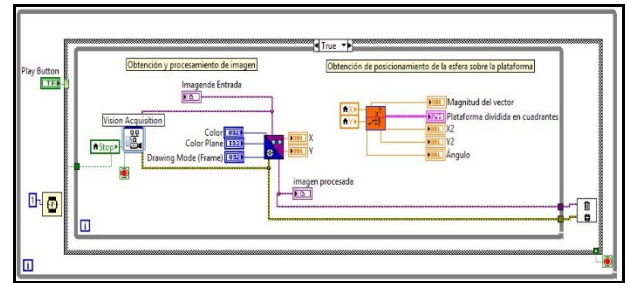


Figura 9. Adquisición de la imagen.

Procesamiento de la imagen.

En esta etapa se utilizaron las funciones *Extract Single Color Plane*, *Threshold*, *Centroid* para acondicionar la imagen, después se aplicó el filtro *Remove Particle*, por último se utilizó la función *Overlay Oval* para obtener las coordenadas del objeto en movimiento. En la figura 10 se muestra parte del diagrama de bloques para el procesamiento de la imagen.

Se determinaron las coordenadas, el vector y el ángulo de la esfera con las Ec. (15) y (16).

$$VR = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (15)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (16)$$

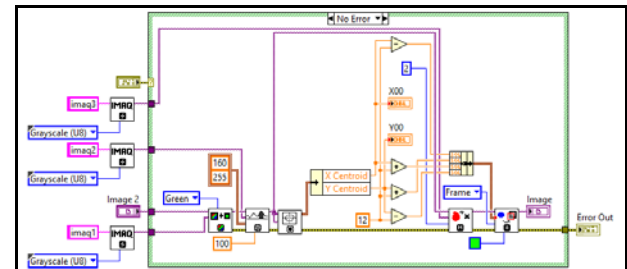


Figura 10. Código del programa en LabVIEW.

Etapa de control.

En la figura 11 se muestra el diagrama a bloques de la función de transferencia obtenida en la Ec. (13).

Recordando que la función de transferencia es la misma para la posición X y Y.

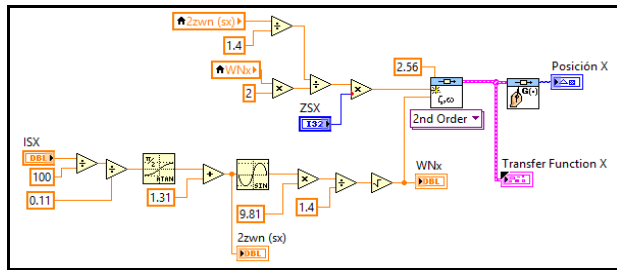


Figura 11. Función de transferencia en LabVIEW.

El programa principal se muestra en la figura 12, en el se toma en cuenta el *Factor de Amortiguamiento*, *Set Point*, y *Ganancia de cada Servomotor*. La comunicación de LabVIEW con la placa Arduino UNO se llevó a cabo con ayuda del paquete LINX a través de comunicación serial.

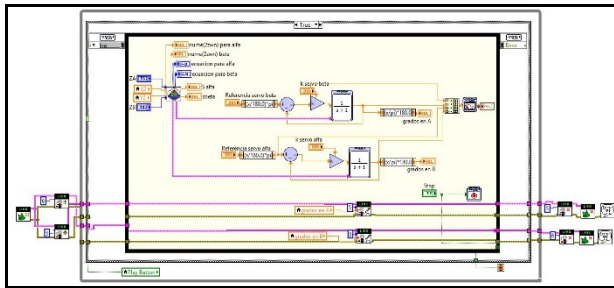


Figura 12. Programa principal.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La plataforma física para pruebas de sistemas de control se muestra en la figura 13.

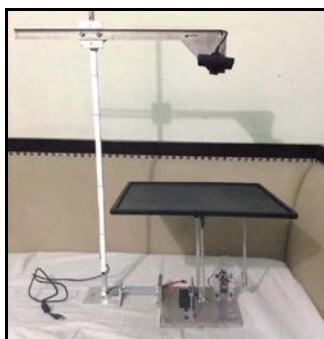


Figura 13. Plataforma física

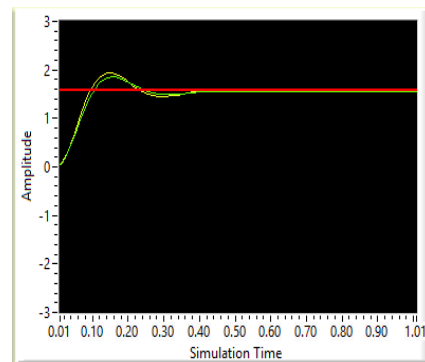
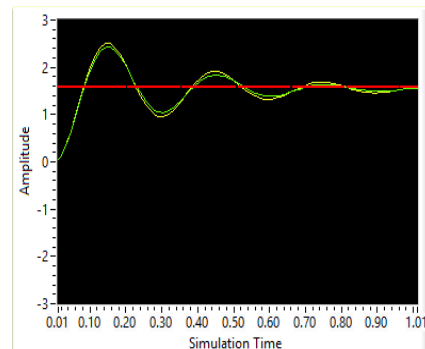
Se tiene el control para el funcionamiento de la plataforma *ball on plate*. El mecanismo estará en su estado normal cuando la esfera se encuentre en la posición cero, es decir en el centro de la plataforma, la variable que perturbará el estado de equilibrio de la plataforma, será el desplazamiento de la esfera en las coordenadas (X y Y): el *Factor de Amortiguamiento* ayuda al sistema a reducir la energía cinética por el

impulso que sufre el mecanismo cuando hay una perturbación. La *Ganancia* (K) reduce el error de la salida con respecto a la entrada y el *Set Point* es el punto de referencia o el punto de consigna que se controlará.

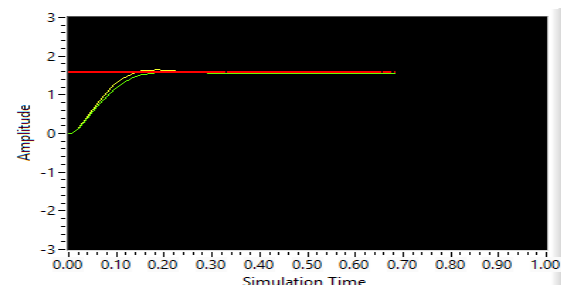
Para las pruebas experimentales realizadas se consideraron los siguientes datos:

$$\begin{aligned} \text{Ganancia} &= k = 25, \\ \text{factor de amortiguamiento} &= \zeta = 5, 15, 25 \\ \text{Set Point} &= \frac{\pi}{2} \\ \text{Posición} &= x = 8, 3, 7. \\ \text{Posición} &= y = 5, 2, 10. \end{aligned}$$

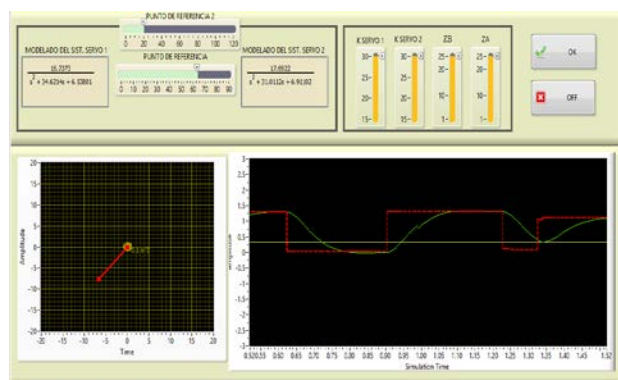
En la figura 14 se aprecia las señales obtenidas cuando $\zeta = 5$ con $k = 25$, el mecanismo logra su estabilidad después de un segundo.



En la figura 15 la señal logra su estabilidad a partir de 0.4 segundos, para esto se consideró el valor de $\zeta = 15$. Cuando $\zeta = 25$ como se ilustra en la figura 16 el mecanismo se estabiliza después de 0.15 segundos.



Se aplicó un sistema de control Proporcional debido a que el tiempo de respuesta de los servomotores es relativamente lento (170 ms por cada 60°), el cual evitó la aplicación de un sistema de control PID. La interfaz gráfica de la aplicación (panel frontal) se muestra en la figura 17, mediante un vector se muestra la posición de la esfera, el comportamiento de los servomotores, así como los controles para manipular los *set points* a la posición deseada, el factor de amortiguamiento y las ganancias para cada servomotor.



5. CONCLUSIÓN Y TRABAJO A FUTURO

Conclusiones. Se logró la construcción de la plataforma *ball on plate* para controlar la posición de una esfera. El sistema localiza la posición de la pelota a través de una imagen obtenida por una cámara web, se logró controlar la posición de la esfera implementando un sistema de control proporcional utilizando LabVIEW con la placa Arduino UNO.

Trabajo a futuro. Se continuará con la experimentación incorporando el acelerómetro como sensor adicional al sistema.

Debido al tiempo de respuesta de los servomotores utilizados, se requiere cambiarlos por motores con mayor velocidad, y así experimentar con otros sistemas de control más robustos.

6. REFERENCIAS

- [1] Andrews, G., Colasuonno, C. and Herrmann, A. (2004). Ball on plate balancing system, Technical report, Rensselaer Polytechnic Institute.
- [2] Wang, H., Tian, Y., Sui, Z., Zhang, X. and Ding, C. (2007). Tracking control of ball and plate system with a double feedback loop structure, Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 2007, pp. 1114–1119.
- [3] Zia, A. (2011). Polar and polygon path traversal of a ball and plate system, Proceedings of the International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, China, 2011, pp. 4005–4009.

[4] Ker, C. C., Lin, C. E. and Wang, R. T. (2007). Tracking and balance control of ball and plate system, Journal of the Chinese Institute of Engineers 30(3): 459–470.

[5] Arduino. (2005). Arduino HOME. Recuperado el 20 de Mayo de 2015, de <https://www.arduino.cc/>

[6] Andrés Cabrerizo, D. M., Barrio Pérez, J., Antón Bozal, J. L. (2008). Física y Química 4 ESO. Editorial Editex.

[7] Ogata, K. (1998). Ingeniería de Control Moderna. Calle 4 No. 25- 2° piso.

[8] Karl, J., Aström, T. H. (2009). Control PID avanzado. Madrid, España: Pearson, Prentice Hall.