

**DESARROLLO DE UN SISTEMA BALL AND BEAM, PARA
IMPLEMENTAR ESTRATEGIAS DE CONTROL MEDIANTE LABVIEW**

**OSCAR ALIRIO OBANDO CORREA
HECTOR ROMERO BRAND**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMAMGA
2010**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA BALL AND BEAM, PARA
IMPLEMENTAR ESTRATEGIAS DE CONTROL MEDIANTE LABVIEW**

**OSCAR ALIRIO OBANDO CORREA
HECTOR ROMERO BRAND**

**Proyecto presentado como requisito para optar al
Título de Especialista en Control e Instrumentación Industrial**

**Director
LUIS ANGEL SILVA
Ing. Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
2010**

DEDICATORIA

Héctor Romero Brand.

En memoria a mi padre Héctor Aurelio Romero, como homenaje a su amor, a su amistad, a sus enseñanzas, al esfuerzo que día a día realizaba por verme siempre alegre. Él, un hombre de bien, laborioso, humilde y generoso, pero sobre todo un ejemplo de fortaleza y dignidad.

Oscar Obando Correa.

A mis padres José Oscar Obando y Olga Lucia Correa, a mis hermanos Sindy, Katherin y Nicolás, por su apoyo y confianza depositada en mi incondicionalmente, a Deissy Cardona por su gran motivación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. DESARROLLO DE UN SISTEMA BALL AND BEAM, PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIAS DE CONTROL MEDIANTE LABVIEW	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2. JUSTIFICACIÓN	14
1.3. OBJETIVOS	14
1.3.1. Objetivo General	14
1.3.2. Objetivos Específicos	14
2. MARCO TEORICO	15
2.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS BALL AND BEAM	15
2.1.1. Sistema de Sensado	16
2.1.1.1. Uso de Cámara CCD	16
2.1.1.2. Uso de Resistencias en el Carril	16
2.1.2. Sistemas Comerciales	16
2.1.2.1. Entrenador CE106 de TQ	16
2.1.2.2. Entrenador RT 121 de Gunt	17
2.1.2.3. Sistema SRV02 de Quanser	18
3. SISTEMA BALL AND BEAM	19
3.1. MODELO DEL SISTEMA	19
3.1.1. Modelo Ball and Beam	19
3.1.2. Modelo del Servo	23
3.2. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	25
3.2.1. Selección de los componentes	25
3.2.2. Diseño y construcción de la estructura	25
3.2.3. Diseño y construcción del sistema electrónico	28
3.2.3.1. Tarjeta de adquisición de datos (TAD)	28
3.2.3.2. Tarjeta electrónica	29
3.3. DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE USUARIO	30
3.4. ACONDICIONAMIENTO SEÑALES DE ENTRADA	32

3.5. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA	36
3.6. DISEÑO DEL CONTROLADOR	38
3.6.1. Control PID	42
3.6.1.1. Sintonización Manual	43
3.6.1.2. Sintonización Automática	47
3.7. VALIDACIÓN DEL CONTROLADOR	50
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFIA	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Selección de Componentes	25
Tabla 2. Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (segundo método)	43
Tabla 3. Formula Sintonización bajo Control P (rápido)	54
Tabla 4. Formula Sintonización bajo Control P (normal)	54
Tabla 5. Formula Sintonización bajo Control P (lento)	54
Tabla 6. Formula Sintonización bajo Control PI o PID (rápido)	55
Tabla 7. Formula Sintonización bajo Control PI o PID (normal)	55
Tabla 8. Formula Sintonización bajo Control PI o PID (lento)	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema Ball and Beam	13
Figura 2. Entrenador CE106	17
Figura 3. Entrenador RT 121	18
Figura 4. Entrenador SRV02	18
Figura 5. Trazado del Sistema	21
Figura 6. Circuito equivalente de un servomotor controlado por armadura	24
Figura 7. Diagrama del servomotor cc controlado por armadura	24
Figura 8. Soporte de Servomotor	26
Figura 9. Base del Sistema	26
Figura 10. Vistas de la Estructura	27
Figura 11. Sistema Ball and Beam Construido	27
Figura 12. Tarjeta TAD	28
Figura 13. Esquema Tarjeta Electrónica	29
Figura 14. Tarjeta Electrónica	29
Figura 15. Mensaje 1 – HMI	30
Figura 16. Interfaz de Usuario	31
Figura 17. Señal de Setpoint	31
Figura 18. Mensaje 2 - HMI	32
Figura 19. Sensor GP2D120	33
Figura 20. Voltaje Sensores vs. Posición	33
Figura 21. Curvas Sensores – Curvas Ecuaciones	34
Figura 22. Ruido Señal Entrada	35
Figura 23. Error de Posición debido al ruido	35
Figura 24. Señales para identificar el sistema	36
Figura 25. Resultado del Modelo Estimado	37
Figura 26. Respuesta al escalón, sistema en lazo abierto	38
Figura 27. Diagrama de bloques del sistema.	38
Figura 28. LGR, planta Ec. (15), controlador P, $K_p = 1$	39
Figura 29. Respuesta escalón unitario, planta Ec. (15), controlador P, $K_p = 1$	40
Figura 30. LGR, planta Ec. (15), controlador P, $K_p = 0.3$	40
Figura 31. Respuesta escalón unitario, controlador P, $K_p = 0.3$	41
Figura 32. Control PID de una planta	43
Figura 33. LGR, planta Ec. (15), controlador Ec. (19)	44
Figura 34. Respuesta escalón unitario, controlador PID; $K_p = 0.3016$, $T_i = 1.6023$, $T_d = 0.4006$	45
Figura 35. Respuesta escalón unitario, planta Ec. (15), controlador Ec. (20)	46

Figura 36. Respuesta escalón de magnitud 10, controlador Ec. (21)	47
Figura 37. Proceso bajo Control PID con relevo de Setpoint.	48
Figura 38. Respuesta escalón de magnitud 10, sintonización automática	49
Figura 39. Respuesta escalón, sintonización manual y automática.	50
Figura 40. Variable de Proceso y Setpoint, sintonización automática	51
Figura 41. Acción de Control correspondiente a la figura 40	51

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Formulas Sintonización	54

GLOSARIO

HMI. Interfaz Maquina Hombre.

PID. (Proporcional Integral Derivativo), es un mecanismo de control por retroalimentación que se utiliza en sistemas de control industriales.

Servomotor. Motor de CC y un sistema de control de posición.

Setpoint. Punto de ajuste de la variable.

TAD. Tarjeta de Adquisición de Datos.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: Desarrollo de un sistema Ball and Beam, para implementar estrategias de control mediante Labview

AUTOR(ES): Oscar Alirio Obando Correa
Héctor Romero Brand

FACULTAD: Esp. en Control e Instrumentación Industrial

DIRECTOR: Luis Ángel Silva

RESUMEN

En este proyecto se presenta la construcción de un sistema Ball and Beam, para validar estrategias básicas de control tipo P, PI y/o PID, además de una interfaz de usuario desarrollada en Labview donde el usuario puede interactuar con el sistema y realizar la autosintonización del controlador.

Se muestra el modelado matemático de un sistema Ball and Beam convencional, la construcción de un prototipo, el desarrollo de la interfaz de usuario, el acondicionamiento de las señales de entrada, el diseño del controlador y la validación del mismo.

PALABRAS CLAVES:

Ball and Beam, Control PID, Labview, Servomotor, Sensor Infrarrojo, TAD.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE

TITLE: Desarrollo de un sistema Ball and Beam, para implementar estrategias de control mediante Labview

AUTHOR(S): Oscar Alirio Obando Correa
Héctor Romero Brand

FACULTY: Esp. en Control e Instrumentación Industrial

ADVISER: Luis Ángel Silva

ABSTRACT

This project presents the construction of a Ball and Beam system, to validate basic control strategies such P, PI and/or PID, also a user interface developed in Labview where the user can interact with the system and perform the autotune the controller.

Shows the mathematical model of a Ball and Beam conventional, the construction of a prototype, the development of user interface, the conditioning of the input signals, the controller design and validation.

KEY WORDS:

Ball and Beam, Control PID, Labview, Servomotor, Infrared Sensor, TAD.

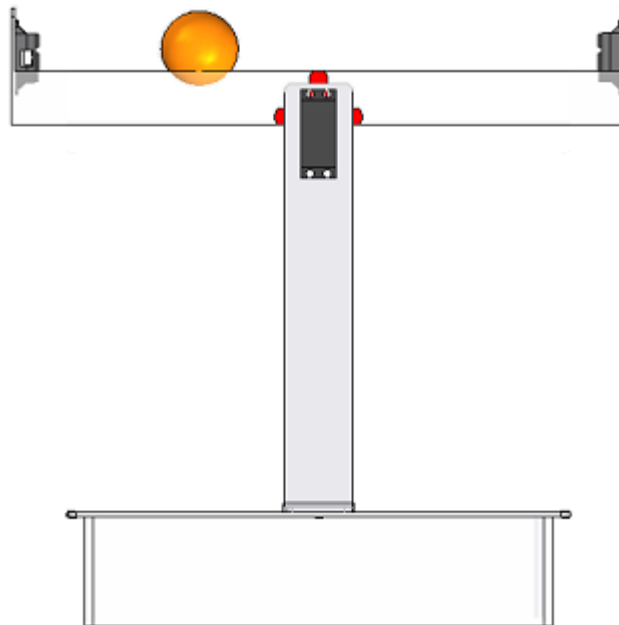
INTRODUCCIÓN

Partiendo de la necesidad de implementar un sistema demostrativo de control, se inició la investigación sobre diferentes prototipos, llegando a la conclusión de realizar un sistema a lazo cerrado denominado “Ball & Beam”.

El sistema Ball and Beam es un importante y clásico modelo de laboratorio para enseñar ingeniería de control. Es muy popular por lo que es un sistema simple y fácil de entender que puede ser utilizado para estudios de muchos de los métodos clásicos y modernos de diseño en ingeniería de control.

En la figura 1 se muestra el sistema. El control del sistema consiste en mover la esfera hasta una posición deseada cambiando el ángulo de la barra. Esta acción de control se consigue a través de un servomotor.

Figura 1. Sistema Ball and Beam



Fuente: Autores / Solid Edge

1. DESARROLLO DE UN SISTEMA BALL AND BEAM, PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIAS DE CONTROL MEDIANTE LABVIEW

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la enseñanza de ingeniería de control posee pocos sistemas físicos que permitan la retroalimentación visual, para que de esta forma el operario evidencie la correcta implementación del lazo de control, debido a que los equipos comerciales existentes son muy costosos.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El sistema “Ball and Beam” es una excelente herramienta para demostrar las ideas del control moderno ya que su dinámica, aunque es simple, es muy cercana a la dinámica real encontrada en sistemas aero-espaciales.

El sistema “Ball and Beam” no es un modelo de un sistema real en la forma que otros equipos demostrativos de laboratorio lo son, sino que su dinámica es semejante a la encontrada en muchos sistemas que desafían el control moderno. Por ende es una herramienta de aprendizaje de vital importancia para estudiantes y profesionales.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Diseñar y construir un módulo de entrenamiento, para implementar estrategias de control mediante Labview.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un sistema “Ball and Beam”.
- Desarrollar una HMI en Labview para manipular el sistema.
- Diseñar una estrategia de control para el sistema.

2. MARCO TEORICO

Antes de anotar cualquier especificación conviene empezar definiendo el propio sistema Ball & Beam. Éste simplemente consiste en el movimiento de una bola por el interior de una viga en forma de carril sujeta al eje de un motor eléctrico que le permite girar alrededor de su eje (Figura 1). El objetivo que se pretende es controlar la posición de la bola cambiando el ángulo de inclinación de la viga. Esta tarea es supervisada por un controlador que, basado en medidas, genera una señal eléctrica que controla el motor a través de su voltaje (señal de control o actuación). Las medidas usadas como referencia para llevar a cabo tal acción de control (variables controladas) son el ángulo de la viga, dado por un encoder incremental, y la posición de la bola, obtenida mediante un sensor situado generalmente en uno de los extremos de la barra.

La estabilización de la bola en el punto referenciado, normalmente el centro, es difícil de conseguir debido a que ésta se mueve sobre la barra con una aceleración que es proporcional a la inclinación de la viga. Además, se tiene el inconveniente de que el sistema es inestable a lazo abierto, pues la posición de la bola se incrementa sin límites a partir de un determinado ángulo. Por tanto, se debe usar un control realimentado para mantener la bola en la posición deseada. Una ventaja del uso de este control en lazo cerrado es que la respuesta del sistema se vuelve relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema.

2.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS BALL AND BEAM

Este sistema se ha posicionado desde hace tiempo como un referente en el estudio de sistemas dinámicos no lineales a nivel docente e investigador. Por este motivo existen diversos modelos desarrollados de distintas dimensiones y características.

Básicamente, las diferencias principales entre un modelo y otro, si únicamente atendemos a los elementos integrantes, radican en la forma de medir la posición de la bola, lo que conlleva también un cambio en las características geométricas del mecanismo.

Desde un punto de vista del control, existe una amplia diversidad sobre todo en lo referente al método de sensado y forma de los algoritmos de control. A continuación se mostraran algunos ejemplos atendiendo al tipo de sensor

usado para medir la posición de la bola y diferentes sistemas existentes en el mercado.

2.1.1. Sistema de Sensado

2.1.1.1. Uso de Cámara CCD

Para medir la posición de la esfera se usa una cámara CCD (Charge-Coupled-Device), la cual se caracteriza por tener muy buena resolución, operar en condiciones de poca luz y presentar pocas aberraciones geométricas. Tiene el inconveniente de los reflejos y del posterior tratamiento de imágenes.

2.1.1.2. Uso de Resistencias en el Carril

Se trata de colocar un cable resistivo a uno y otro lado del carril que forma la viga, de tal forma que la bola cierre el circuito averiguándose la posición a través de la tensión. No deja de ser un potenciómetro lineal.

$$V = R * i = \frac{L * \rho}{s} * i \quad (1)$$

Presenta el inconveniente de que el contacto entre la bola y el carril no siempre es el adecuado, perdiéndose la medida de la posición en muchos momentos.

2.1.2. Sistemas Comerciales

2.1.2.1. Entrenador CE106 de TQ

El CE106 es el entrenador de Ball and Beam manufacturado por TQ (Figura 2), sus elementos principales de construcción son:

- Una barra, con dos cables en paralelo sobre los cuales rueda la pelota.
- Un servomotor, que controla el ángulo de la barra.
- Un sensor del ángulo de inclinación.
- Un sensor de posición de la pelota en la barra.

El sistema de control del entrenador CE106 tiene dos partes. La primera es el control del ángulo de la barra. El voltaje de control del motor cambia la velocidad del motor y un lazo de control de posición es utilizado para

controlar el ángulo de la barra. El sistema utiliza un simple control proporcional para el control de posición. El verdadero problema de control es entonces usar una referencia para el ángulo de la barra como entrada para el controlador de la posición de la pelota en la barra.

Figura 2. Entrenador CE106



Fuente: www.tecquipment.com/Datasheets/CE106_0808.pdf

2.1.2.2. Entrenador RT 121 de Gunt

Este equipo de ensayo pertenece a una serie de kits didácticos desarrollados en cooperación con la Universidad Politécnica de Harz, Departamento de Automatización e Informática (Figura 3). El RT 121 permite una introducción a la regulación digital rápida en tiempo real por medio de métodos difusos. Un modelo de balancín con bola sirve de sistema mecánico de una variable. Por medio de un control difuso se intenta mantener la bola en una posición determinada inclinando el balancín, incluso cuando la posición de la bola es modificada por intervenciones externas.

La posición de la bola se mide por medio de un sistema de medición resistivo. Un potenciómetro registra la inclinación del balancín. Estos transductores envían señales exactas al regulador difuso. Allí las señales se transforman e infieren en valores de entrada difusos, y por último se vuelven a transformar en un valor de salida exacto. Un servomotor con biela de empuje modifica la inclinación del balancín y funciona como actuador.

En primer lugar, en el software de desarrollo FSHShell, de manejo agradable para el usuario, se diseñan algoritmos de regulación y se traducen a un código de microcontrolador. Esta estrategia de regulación se puede optimizar más tarde. El sistema se puede controlar manualmente por medio de un joystick. Así se puede valorar muy bien el grado de dificultad del proceso de regulación.

Figura 3. Entrenador RT 121



Fuente: www.gunt.de/download/intro_automation_spanish.pdf

2.1.2.3. Sistema SRV02 de Quanser

La planta consta de un motor de corriente continua en un marco de aluminio sólido (Figura 4). El motor está equipado con una caja de cambios que impulsa engranajes externos. Todos los modelos SRV02 están equipados con un potenciómetro para medir la salida de posición angular de carga.

Figura 4. Entrenador SRV02



Fuente: www.quanser.com/english/.../SRV02_BallBeam_PIS_031108.pdf

3. SISTEMA BALL AND BEAM

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se siguió la siguiente metodología. En la sección 3.1 se presenta una descripción matemática del sistema físico y las ecuaciones que describen su comportamiento. En la sección 3.2 se muestra como se llevó a cabo la construcción del prototipo. En la sección 3.3 se presenta la interfaz de usuario desarrollada. En la sección 3.4 se muestra el acondicionamiento que se llevó a cabo sobre las señales de entrada del sistema. En la sección 3.5 se presenta una identificación del modelo del sistema. En la sección 3.6 se realizó el diseño del controlador. Y finalmente en la sección 3.7 se validó el sistema de control.

3.1. MODELO DEL SISTEMA

Para diseñar e implementar con éxito un controlador que gobierne un sistema de forma satisfactoria, es favorable disponer de un modelo matemático que reproduzca fielmente el comportamiento del sistema. Esto facilitará en tiempo y precisión su controlabilidad al usarse técnicas más sencillas y fiables, y por otro lado hará que el sistema se estabilice sin complicaciones.

Un modelo matemático de un sistema dinámico se puede definir como el conjunto de ecuaciones, generalmente diferenciales, que representan la dinámica del sistema en cuestión con bastante precisión. Este modelo matemático no será único, sino que dependiendo del sistema del que se trate y de las circunstancias específicas, un modelo será más conveniente que otros. Así por ejemplo, en problemas de control óptimo, es provechoso usar representaciones en el espacio de estados. En cambio, para los análisis de la respuesta transitoria o en frecuencia de sistemas lineales con una entrada y una salida invariantes con el tiempo, la representación mediante función de transferencia puede ser más conveniente que cualquier otra. En la obtención de un modelo matemático se debe establecer un equilibrio entre la simplicidad del mismo y la precisión de los resultados del análisis.

3.1.1. Modelo Ball and Beam

La elección de la formulación lagrangiana para desarrollar las ecuaciones de movimiento se fundamenta en las ventajas que introduce ésta frente a las ecuaciones de Newton. Por definición, la lagrangiana de un sistema es la

diferencia entre las energías cinética y potencial, siendo por tanto un escalar. Así, mientras que con el procedimiento de Newton se coloca el énfasis sobre el agente exterior que actúa sobre el cuerpo (la fuerza), con el de Lagrange se manejan magnitudes asociadas al cuerpo (energías cinética y potencial). Este hecho es especialmente importante por diversos motivos. En primer lugar, hace que la lagrangiana de un sistema sea invariante ante los cambios de coordenadas. Esto permite pasar del espacio ordinario (en el que las ecuaciones de movimiento pueden ser muy complicadas) a un espacio de configuraciones elegido de tal forma que de una simplificación máxima. En segundo lugar, no es necesario establecer de forma explícita las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, cosa que a veces ni siquiera es posible.

Entonces el modelo del sistema Ball and Beam, se consigue al aplicar la ecuación de Lagrange. Debido a que el actuador del sistema es un servomotor, no existe elasticidad, y por lo tanto no existe energía potencial en el sistema. Siendo así, el Lagrangiano está compuesto por energía cinética y se expresa como:

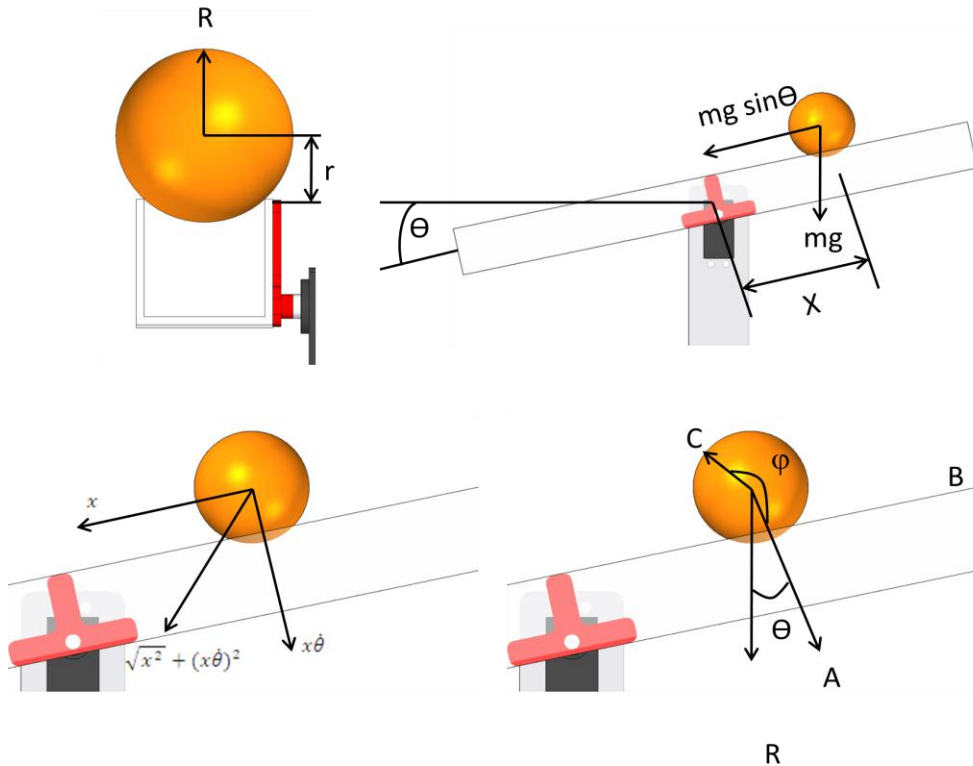
$$U = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I_b \omega^2 + \frac{1}{2} I_a \theta^2 \quad (2)$$

Donde m es la masa de la esfera, v es la velocidad translacional de la esfera, ω es la velocidad angular de la esfera, θ es el ángulo de la barra con respecto al eje del motor, I_a es el momento de inercia de la barra, e I_b es el momento de inercia de la esfera. Como los sensores del sistema miden la posición translacional de la esfera x y la posición angular ω , es necesario representar el modelo del sistema en términos de estas dos variables, por lo tanto ahora se encuentran las relaciones entre r , ω y x . De eso se puede observar que la distancia recorrida se encuentra expresada por;

$$x = r\varphi \quad (3)$$

Donde φ es el ángulo rotacional de la esfera con respecto al eje del motor y r es el radio efectivo de la esfera.

Figura 5. Trazado del Sistema



Fuente: Autores / Solid Edge

El ángulo total de la esfera es la suma del ángulo de la esfera con respecto al eje de la barra φ , y el ángulo de la barra θ . La velocidad rotacional de la esfera está dada por;

$$\omega = \varphi + \theta = \frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \quad (4)$$

La velocidad transnacional de la esfera está dada por;

$$v = \sqrt{(\dot{x})^2 + (x\dot{\theta})^2} \quad (5)$$

Al utilizar las ecuaciones para la velocidad rotacional y transnacional en el Lagrangiano, se obtiene;

$$L = \frac{1}{2} \left((\dot{x}^2 + (x\dot{\theta})^2) + I_b \left(\frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \right)^2 + I_a \dot{\theta}^2 \right) \quad (6)$$

La ecuación de Lagrange para el sistema Ball and Beam;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d}{dx} L \right) - \frac{d}{dx} L = mg \sin \theta \quad (7)$$

Desarrollando la ecuación anterior se obtiene;

$$\left(m + \frac{I_b}{r^2} \right) \ddot{x} + \left(\frac{I_b}{r^2} \right) \ddot{\theta} - mx\dot{\theta}^2 = mg \sin \theta \quad (8)$$

Que es el modelo no lineal para el sistema Ball and Beam.

A partir del modelo no lineal de la planta se hacen cero las derivadas con respecto al tiempo de forma que;

$$0 = mg \sin \theta$$

Donde la solución de la ecuación anterior es $n\pi$ con $n = 0, 1, 2, \dots$. Debido a que la barra del modelo físico solo rota en el intervalo $\left[\frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$, se toma como solución el ángulo para $n = 0$. Además se puede observar que la solución no depende de la posición de la bola.

A partir del punto de equilibrio y linealizando alrededor de los puntos cercanos a este, se tiene;

$$\theta \rightarrow 0, \text{ entonces } \sin \theta \rightarrow 0$$

Por lo que las derivadas de orden superior de esta variable se hacen despreciables, obteniendo la ecuación de diferencia.

$$\ddot{x} = \frac{mg\theta}{m + \frac{I_b}{r^2}} \quad (9)$$

Aplicando la transformada de Laplace y con condiciones iniciales iguales a cero, se tiene;

$$\frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{mg}{\left(m + \frac{I_b}{r^2} \right)^2} \quad (10)$$

Donde se dice que el sistema puede ser considerado como un integrador doble. Reemplazando datos;

$$I_b = \frac{2}{5}mR^2 \quad (11)$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{mg}{m + \frac{2}{5}\frac{mR^2}{r^2}} \frac{1}{s^2} = \frac{g}{1 + \frac{2}{5}\left(\frac{R}{r}\right)^2} \frac{1}{s^2} \quad (12)$$

Cabe hacer notar que entre más aproximado sea el modelo con respecto al sistema real, es necesario añadir más parámetros físicos que representan características del sistema, cuyas variables, traducidas como parámetros de las ecuaciones diferenciales del modelo del sistema aumentan la complejidad del mismo, lo cual la mayoría de las veces resulta inapropiado.

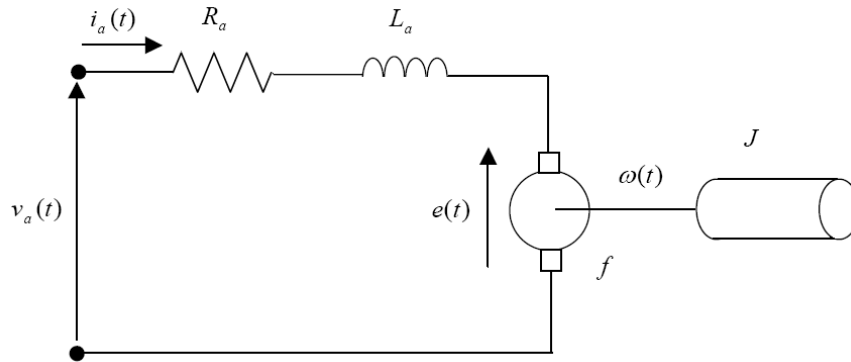
3.1.2. Modelo del Servo

Se puede obtener un modelo matemático para el servomotor cc controlado por armadura considerando el circuito equivalente de la figura 6, donde $V_a(t)$ e $I_a(t)$ representan, respectivamente, la tensión de entrada y la corriente en el circuito de armadura, $\omega(t)$ es la velocidad de giro y J y f son, respectivamente, la inercia de carga y la fricción.

$$\Omega(s) = \frac{\frac{K_m}{R_a f}}{(\tau_e s + 1)(\tau_m s + 1) + \frac{K_e K_m}{(R_a f)}} V_a(s) - \frac{\frac{(\tau_e s + 1)}{f}}{(\tau_e s + 1)(\tau_m s + 1) + \frac{K_e K_m}{(R_a f)}} T_d \quad (13)$$

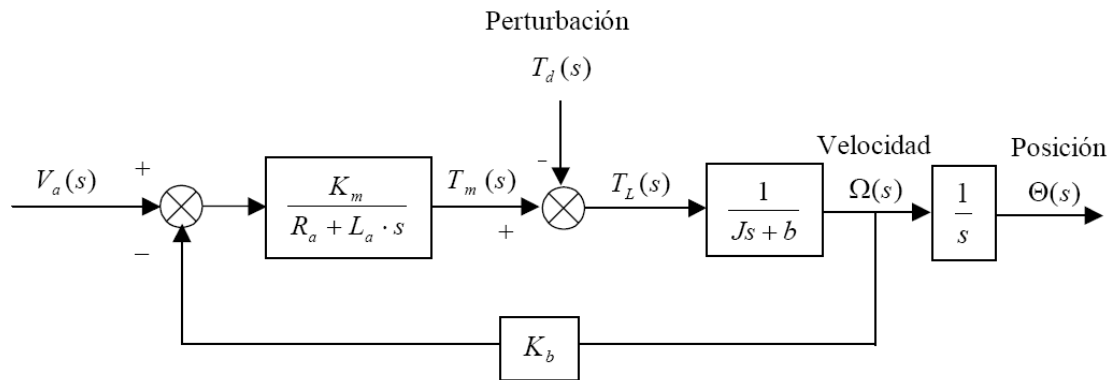
Donde $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$, $\tau_m = \frac{J}{f}$, K_m es el par constante, y T_d representa el par de perturbación. La modelización se puede simplificar al diagrama de bloques mostrado en la figura 7.

Figura 6. Circuito equivalente de un servomotor controlado por armadura



Fuente: Autores

Figura 7. Diagrama del servomotor cc controlado por armadura



Fuente: Autores

Por tanto, $G(s) = \frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(R_a + L_a s)[(J s + b) + K_b K_m]}$, sin embargo para la mayoría de servomotores cc, la constante de tiempo de la armadura $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$ es despreciable, y por tanto, $G(s) = \frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m / (R_a b + K_b K_m)}{(T_s + 1)}$, donde la constante de tiempo es $\tau = R_a J / (R_a b + K_b K_m)$.

Finalmente, un modelo más simple del sistema puede ser;

$$\Omega(s) = \frac{K_a}{\tau s + 1} V_a(s) - \frac{K_d}{\tau s + 1} T_d(s) \quad (14)$$

3.2. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

3.2.1. Selección de los componentes

La selección de componentes de este proyecto se restringió al mercado local. En la tabla 1 figuran los componentes seleccionados con su respectivo criterio de selección.

Tabla 1. Selección de Componentes

Elementos	Referencia	Descripción	Criterio de Selección
Servomotor	HS-322HD	Servo analógico estándar.	Velocidad, Torque.
Sensores	GP2D120	Sensor medidor de distancia por infrarrojo.	Precisión, distancia, salida.
Fuente	NES-15-12	Fuente conmutada de 15W a 12V.	Tamaño, potencia, voltaje.
Micro	PIC18F2550	Microcontrolador de Microchip.	Tamaño, resolución ADC, ICSP.
Reguladores	LM78xx	Reguladores de Voltaje.	Voltaje, Potencia.
Amplificador	LM324	Amplificador Operacional.	Single Supply.

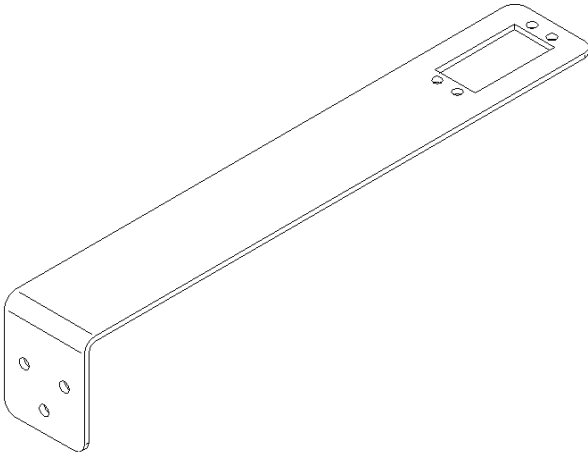
Fuente: Autores

3.2.2. Diseño y construcción de la estructura

Con la ayuda del software CAD Solid Edge V18, se diseñó las piezas de la estructura y se ensamblaron teniendo así una visión final de la forma del modulo.

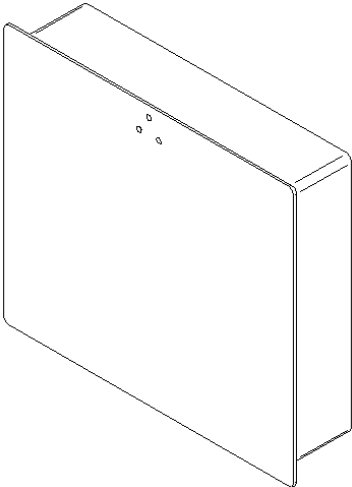
A continuación se muestran las piezas más importantes que componen el modulo.

Figura 8. Soporte de Servomotor



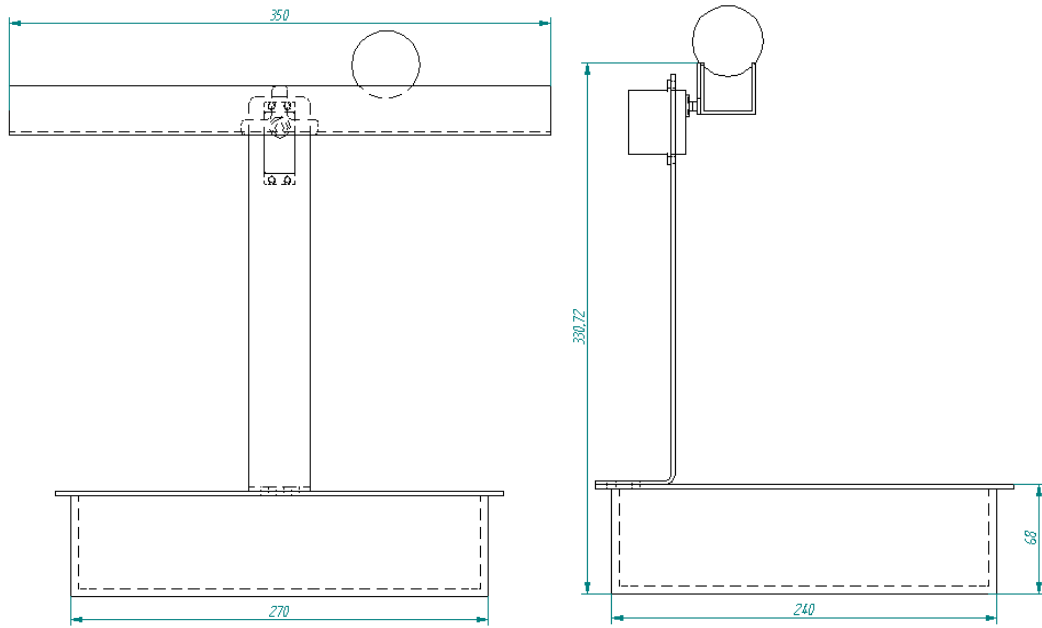
Fuente: Autores / Solid Edge

Figura 9. Base del Sistema



Fuente: Autores / Solid Edge

Figura 10. Vistas de la Estructura



Fuente: Autores / Solid Edge

Finalmente se construyó dicho modulo, obteniendo el prototipo mostrado en la figura 11.

Figura 11. Sistema Ball and Beam Construido



Fuente: Autores

El modulo de entrenamiento de la figura 11 presenta las siguientes características físicas:

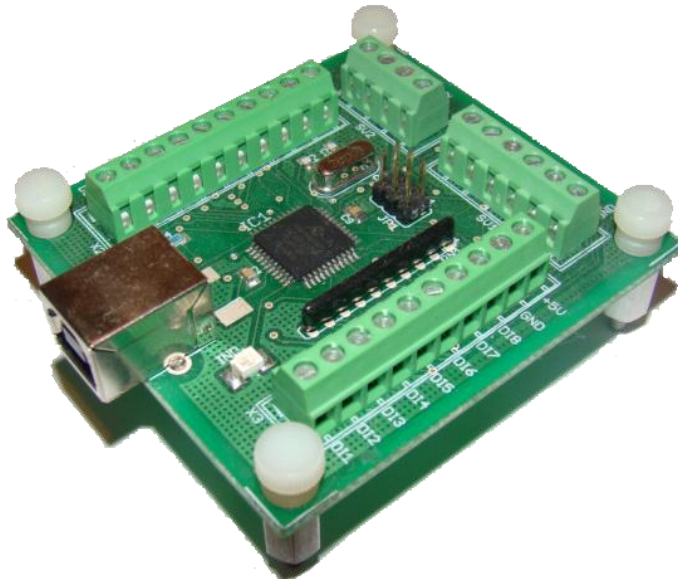
<i>Ancho máximo:</i>	350 mm
<i>Alto máximo:</i>	330 mm
<i>Largo máximo:</i>	240 mm
<i>Material de construcción:</i>	Aluminio y Acrílico
<i>Peso:</i>	1100 gr

3.2.3. Diseño y construcción del sistema electrónico

3.2.3.1. Tarjeta de adquisición de datos (TAD)

Se utilizó la tarjeta suministrada por la universidad, la cual fue diseñada y elaborada por PROYMELEC (Figura 12), ya que se ajustaba a las necesidades del proyecto, pues posee 2 canales de entrada analógicos, 1 canal de salida analógico y su conectividad es USB.

Figura 12. Tarjeta TAD



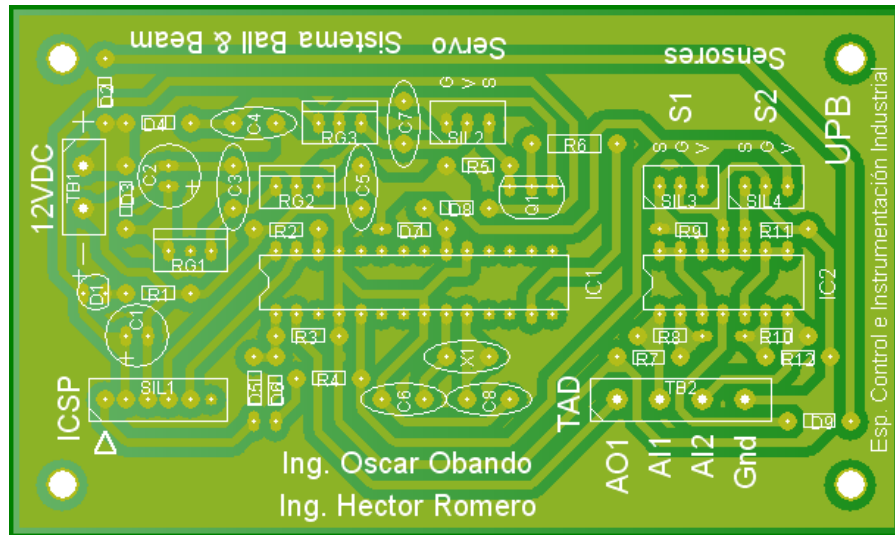
Fuente: Autores

Los canales de entrada analógicos se destinaron para enviar las señales provenientes de los sensores y el canal de salida analógico se destinó como la señal de salida de control.

3.2.3.2. Tarjeta electrónica

Se diseñó y desarrolló una tarjeta electrónica que alberga los circuitos de adaptación de las señales. En la figura 13 se encuentra el esquema diseñado.

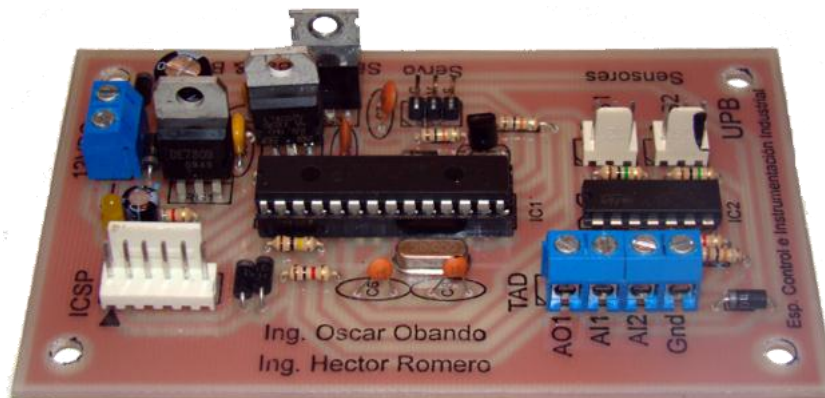
Figura 13. Esquema Tarjeta Electrónica



Fuente: Autores / PCBWizard

En la figura 14 se puede observar la tarjeta desarrollada en fibra de vidrio.

Figura 14. Tarjeta Electrónica



Fuente: Autores

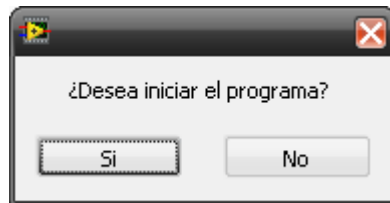
El circuito de la figura 14, por medio del Microcontrolador PIC18F2550, convierte la señal de control de la TAD a PWM, cuya señal es de voltaje y

varía en el rango de 0 a 5V, posicionando el servo en el rango de -10° a $+10^\circ$ respectivamente. El circuito también amplifica en 1.56 las señales de los sensores mediante un amplificador operacional configurado en modo no inversor. Además posee conexión ICSP para futuras modificaciones.

3.3. DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

Con la ayuda del software de programación Labview, se desarrollo la interfaz de usuario para interactuar con el sistema, en la cual al ejecutar el programa saldrá inicialmente el mensaje mostrado en la figura 15, donde se le pregunta al usuario si desea iniciar el programa.

Figura 15. Mensaje 1 – HMI



Fuente: Autores / Labview

Al iniciar el programa se habilita la aplicación mostrada en la figura 16, mediante la cual el usuario podrá manipular el sistema.

En la figura 16 se muestran las variables de proceso en forma de slider, “SP” corresponde al setpoint, “PV” a la variable de proceso, y “CV” a la salida de control.

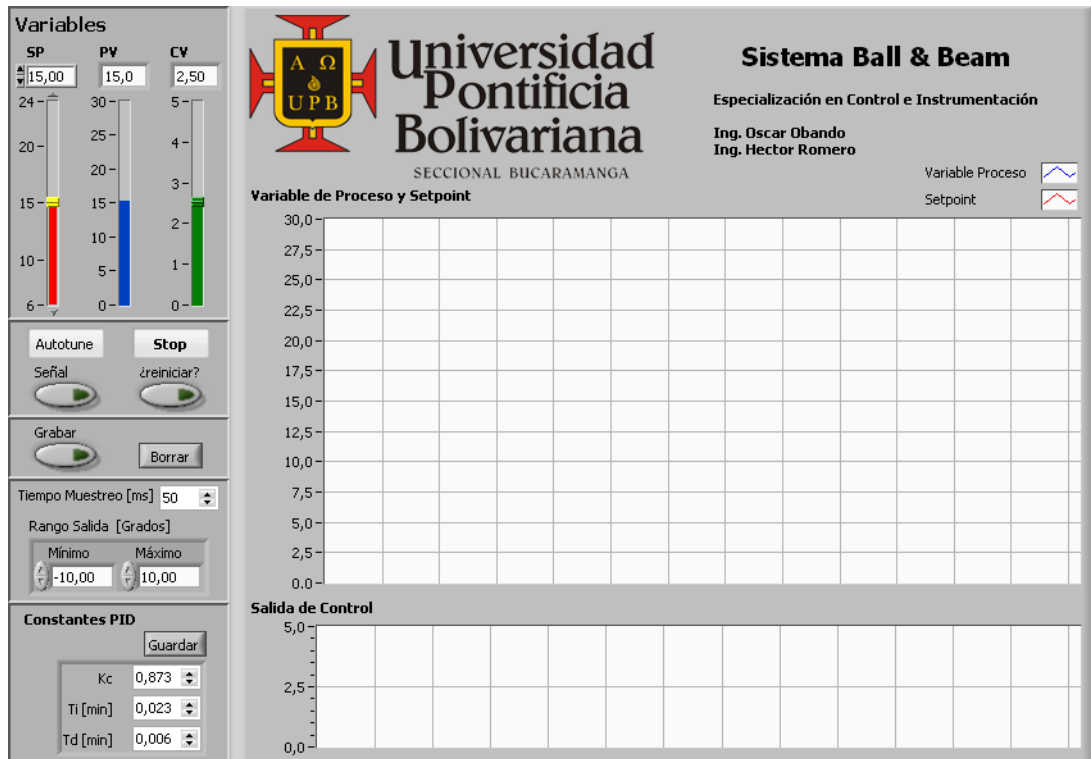
El botón “Autotune” inicia el procedimiento de autotuning e invoca el asistente autotuning con el que se pueden obtener las constantes de control.

El botón “Stop” finaliza el programa.

El botón “Señal” habilita la señal periódica mostrada en la figura 17, la cual se envía a la variable de setpoint.

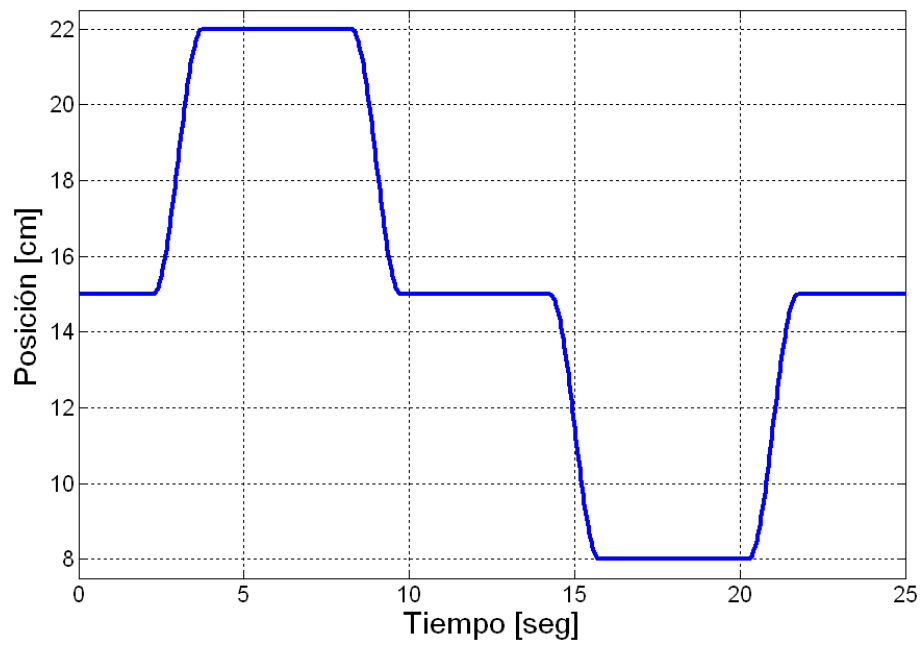
El botón “¿reiniciar?” reinicia los parámetros internos del control PID, tales como el error integrado.

Figura 16. Interfaz de Usuario



Fuente: Autores / Labview

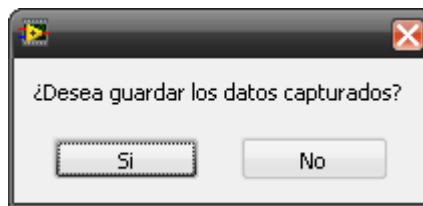
Figura 17. Señal de Setpoint



Fuente: Autores / Matlab

El botón “Grabar” habilita la captura de los datos correspondientes a las 3 variables, el botón “Borrar” suprime los datos que se hayan capturado hasta ese momento. Si al finalizar el programa se han capturado datos aparecerá el mensaje mostrado en la figura 18, el cual le pregunta al usuario si desea guardar los datos capturados, de ser así, le preguntará en que ubicación desea hacerlo. Los datos guardado toman el formato “.lvm”, el cual es un formato de Labview (dicho archivo se puede abrir desde Excel).

Figura 18. Mensaje 2 - HMI



Fuente: Autores / Labview

Si el nombre asignado al archivo que guardará los datos existe en la ubicación especificada, se le agregará una extensión a dicho nombre.

La variable numérica “Tiempo Muestreo [ms]” corresponde al periodo de muestreo y esta definida en milisegundos.

La variable “Rango Salida [Grados]” limita la salida de control equivalente a la posición en grados mínima y máxima que puede tomar el servomotor.

La variable “Constantes PID” contiene las constantes de control, Kc (Ganancia Proporcional), Ti (Tiempo Integral) y Td (Tiempo Derivativo). El botón “Guardar” guarda dichas constantes.

La gráfica “Variable de Proceso y Setpoint” visualiza dichas variables, donde la señal azul corresponde a la variable de proceso y la señal roja al setpoint.

La gráfica “Salida de Control” visualiza la señal enviada a la TAD expresada en voltios.

3.4. ACONDICIONAMIENTO SEÑALES DE ENTRADA

La retroalimentación de la posición de la bola se realizó por medio de dos sensores GP2D120 (Figura 19), que proporcionan mediante una salida analógica la distancia medida. La tensión de salida varía cuando se detecta un objeto en una distancia entre 4 y 30 cm. La salida está disponible de forma continua y su valor es actualizado cada 39 ms aproximadamente.

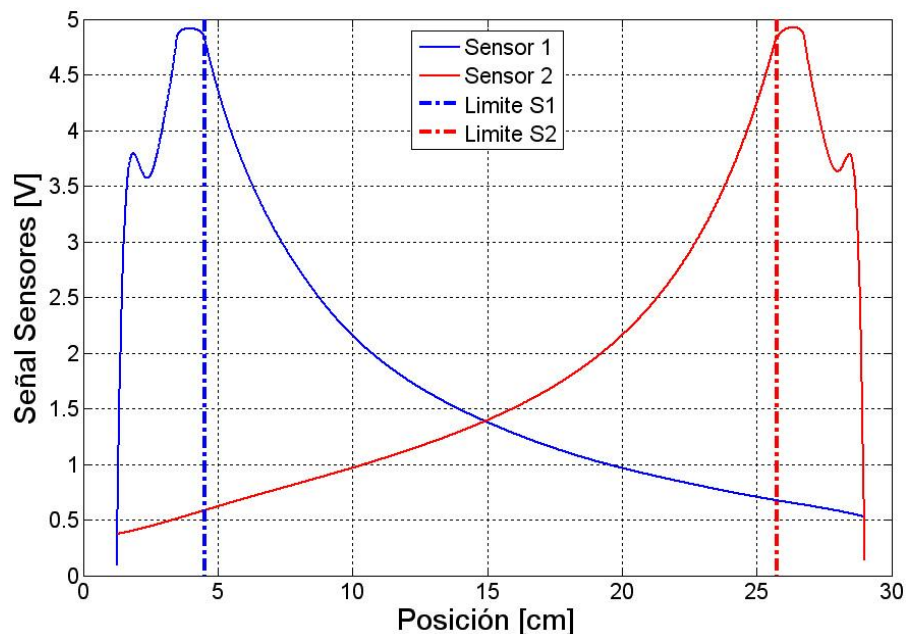
Figura 19. Sensor GP2D120



Fuente: http://www.me.ucsb.edu/~me170c/Sensors/Range_SHARPGP2D120.pdf [3]

Debido a que la tensión máxima que entrega este sensor es de cerca de 3V y la TAD adquiere datos en el rango de 0 a 5 VDC, se amplificó dicha señal para mejorar la resolución de los datos, obteniendo los valores de voltaje correspondientes a las diferentes posiciones de la bola como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Voltaje Sensores vs. Posición



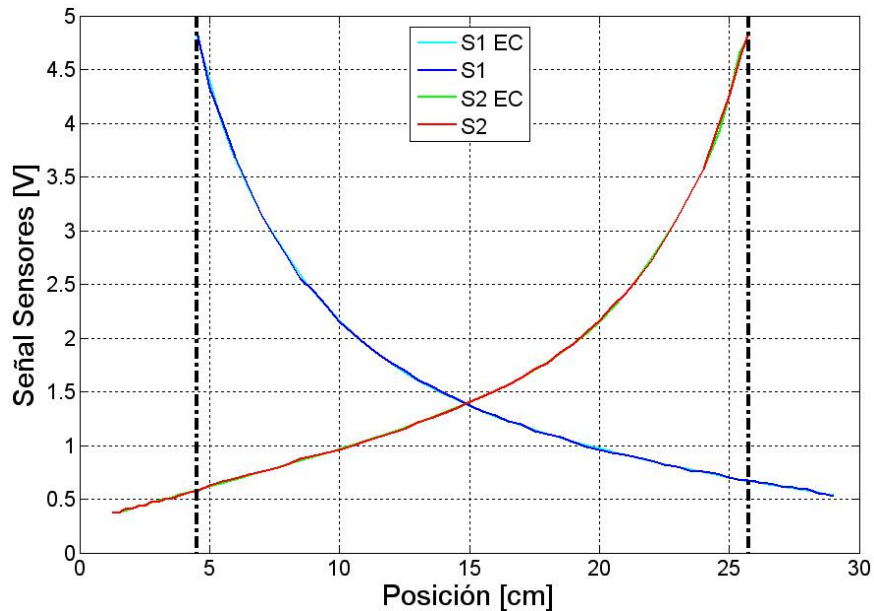
Fuente: Autores / Labview / Matlab

En la figura 20 se muestra los valores de voltaje obtenidos de la tarjeta electrónica, cuyas variables corresponden a las señales de los sensores de distancia.

Como se puede observar la tensión varía de forma no lineal, por lo cual se optó por limitar el rango de distancia de cada sensor como lo muestran las

líneas verticales de la figura 20 y adecuar una ecuación que se ajustara a dicha curva como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Curvas Sensores – Curvas Ecuaciones



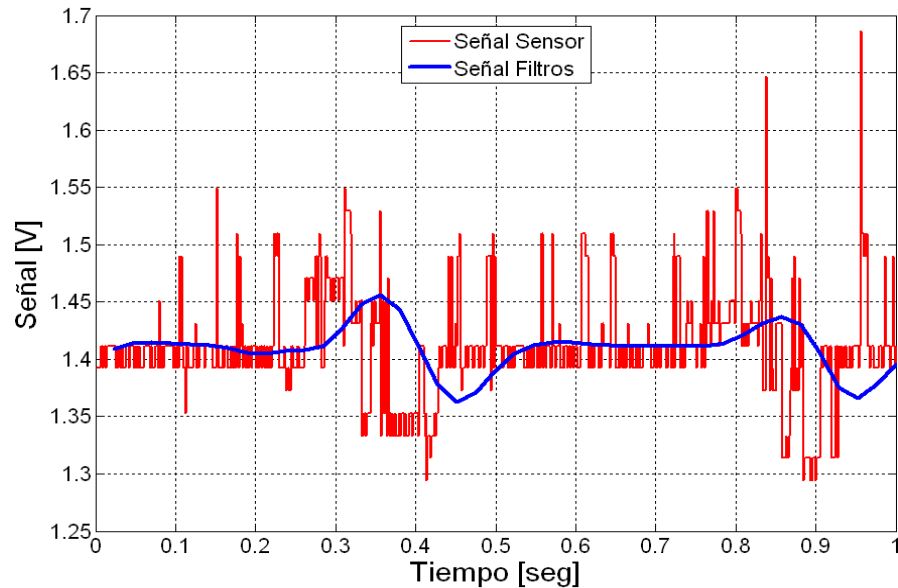
Fuente: Autores / Matlab

En la figura 21 se comparan las señales obtenidas experimentalmente (línea azul y roja) con las señales obtenidas a partir de las ecuaciones halladas (líneas cian y verde). Dichas ecuaciones son de sexto orden y tienen un error máximo de 3mm, donde dicho error se debe a la precisión de la toma experimental de los datos.

Los datos presentan un ruido como se puede observar el figura 22 (línea roja) por lo cual se implementaron dos filtros en cascada, filtro de mediana y filtro Butterworth de LabVIEW, disminuyendo el ruido como se puede observar en la figura 22 (línea azul) alrededor de un 64%.

Los datos de la figura 22 fueron capturados estando inmóvil la bola en la posición de 15 cm. El ruido varía dependiendo del material de la esfera debido a la posición en la que se encuentran los sensores (de frente), afectándose entre ellos.

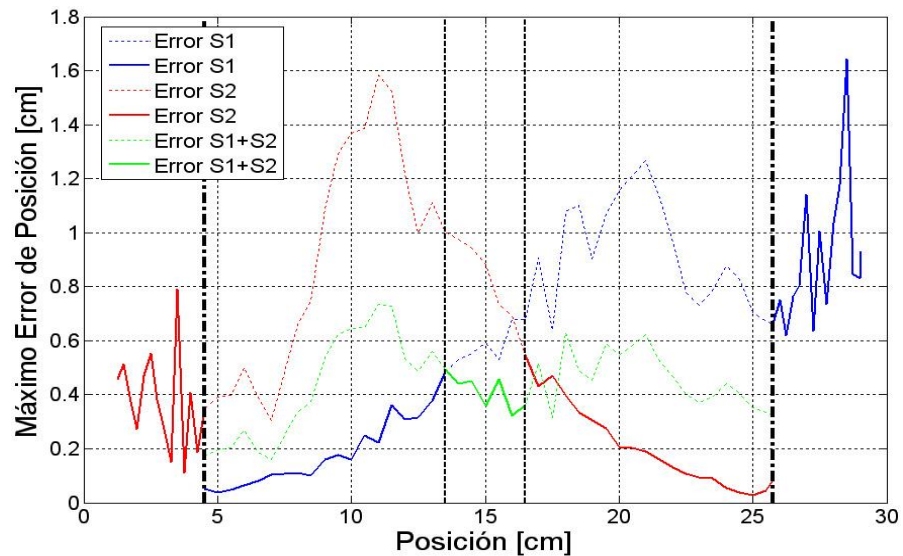
Figura 22. Ruido Señal Entrada



Fuente: Autores / Labview / Matlab

En la figura 23 se graficó el máximo error que se puede llegar a obtener debido al ruido presente dependiendo de la posición en que se encuentre la bola.

Figura 23. Máximo Error de Posición debido al ruido



Fuente: Autores / Matlab

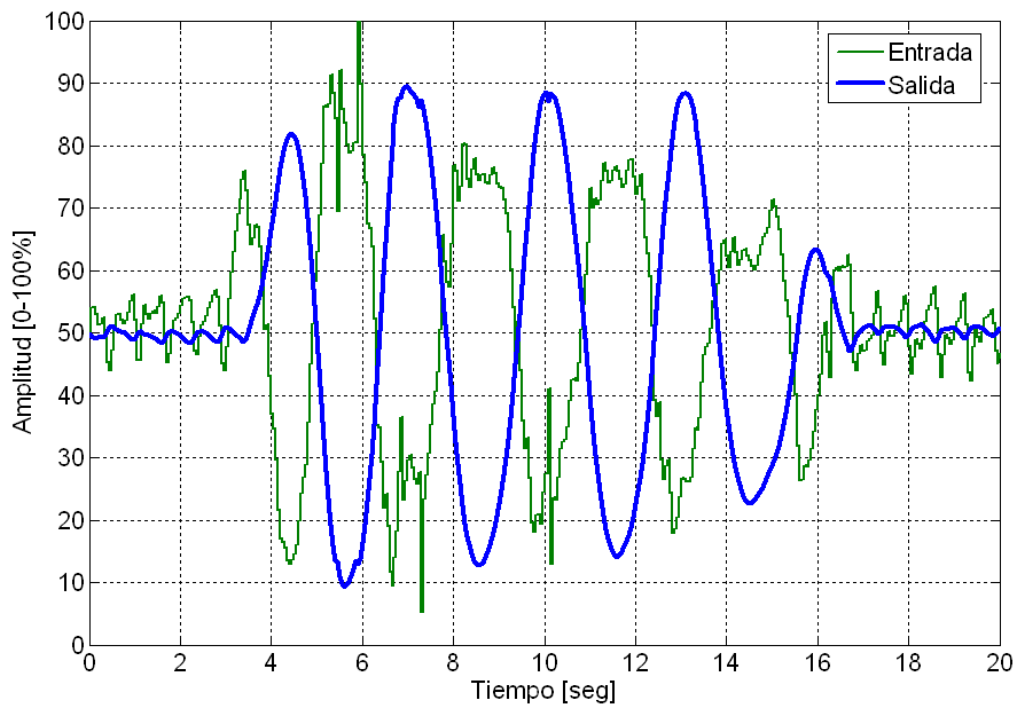
En la figura 23 se observó que el error es menor cuando la bola se encuentra más cerca al sensor, por tanto se optó por tomar la posición obtenida del sensor 1 cuando la bola se encontraba más cerca al sensor 1 y viceversa

con el sensor 2, cuando se encuentre en el intermedio de la barra (de 13.5 a 16.5 cm) se tomará el promedio de la posición obtenida de los dos sensores, pero en los extremos de la barra se tomará la posición obtenida del sensor contrario debido a la zona muerta que presentan los sensores como se puede observar en la figura 20. En pocas palabras el error máximo que se puede presentar en la lectura de la posición corresponde al mostrado en la figura 23 marcado con las líneas continuas.

3.5. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

Para identificar el modelo del sistema se puso a oscilar la bola alrededor de la mitad de la barra, como se muestra en la figura 24, siendo el 50% la mitad de la barra. Las señales de la figura 24 están normalizadas al 100%, siendo el 0% el mínimo valor posible y el 100% el máximo. La señal azul corresponde a la posición y la señal verde corresponde a la salida de control enviada al servomotor cuya magnitud equivale al ángulo deseado de la barra.

Figura 24. Señales para identificar el sistema



Fuente: Autores / Labview / Matlab

Estas señales se importaron a la herramienta “Ident” de Matlab, donde se obtuvo de forma iterativa el modelo más representativo para el sistema, partiendo de la forma obtenida en los modelos matemáticos (ecuación 12 y

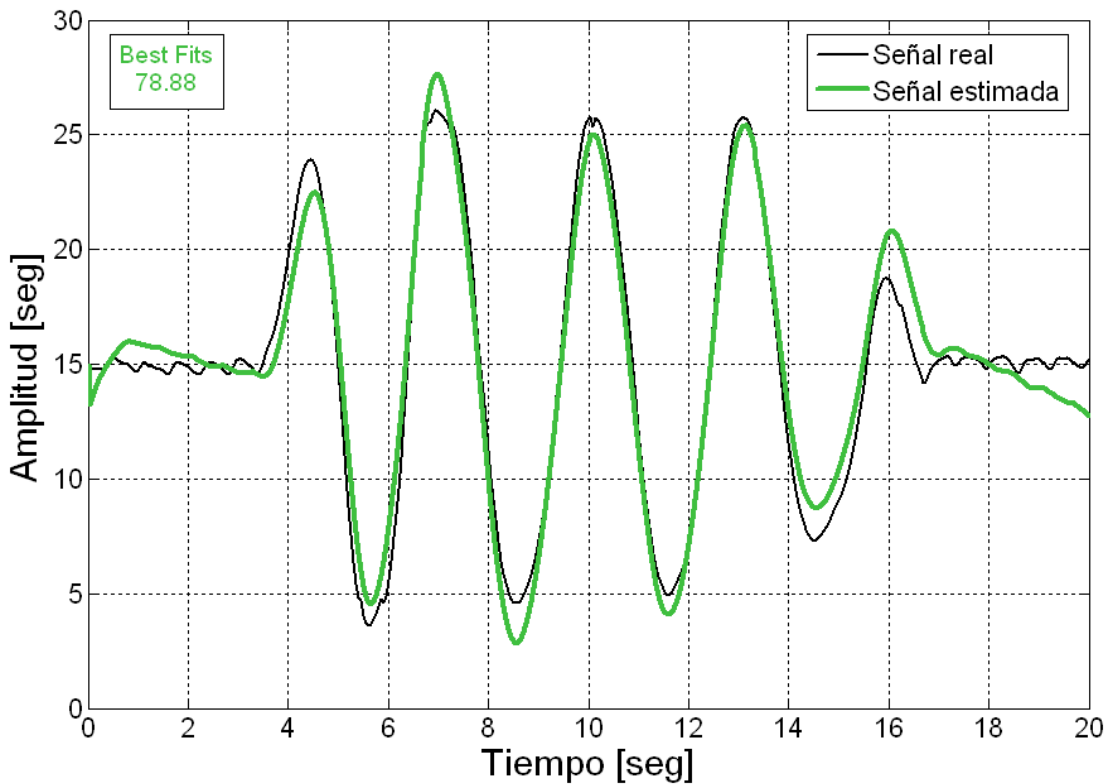
14), consiguiendo la función de transferencia mostrada en la siguiente ecuación, con una aproximación del 78.88% al comportamiento real.

$$-9.7601 \frac{(s - 5.857)(s + 0.04923)}{s^2(s + 5.857)(s + 1.557)} \quad (15)$$

Como podemos observar el modelo contiene el doble integrador que se había obtenido en la ecuación (12), un polo y un cero que corresponden al servo y además un retardo representado por un polo y un cero de igual magnitud pero diferente signo que se debe a la fricción estática que posee la esfera que no se había tenido en cuenta.

En la figura 25 se compara la “señal real” que corresponde a la señal “Salida” de la figura 24, con la “señal estimada” obtenida por medio del modelo de la ecuación (15), cuya entrada correspondió a la señal “entrada” de la figura 24.

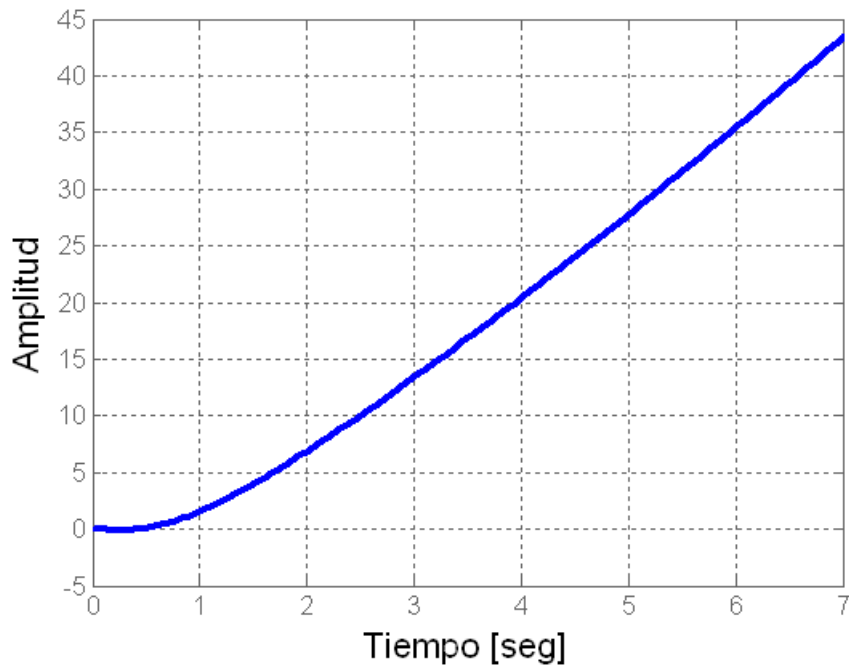
Figura 25. Resultado del Modelo Estimado



Fuente: Autores / Matlab

En la figura 26 se puede observar la respuesta al escalón del sistema en lazo abierto.

Figura 26. Respuesta al escalón, sistema en lazo abierto



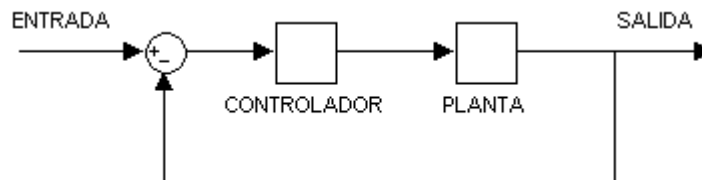
Fuente: Autores / Matlab

Como puede verse en la figura 26 el sistema es inestable en lazo abierto y la bola rueda hacia el exterior de la barra.

3.6. DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para hacer estable el sistema se implemento el lazo cerrado correspondiente al diagrama de la figura 27.

Figura 27. Diagrama de bloques del sistema.



Fuente: Autores

Donde la “entrada” corresponde a la variable de setpoint, la “salida” a la variable de proceso, la “planta” al modelo que representa el sistema (Ecuación 15), y el “controlador” será el encargado de manipular el sistema.

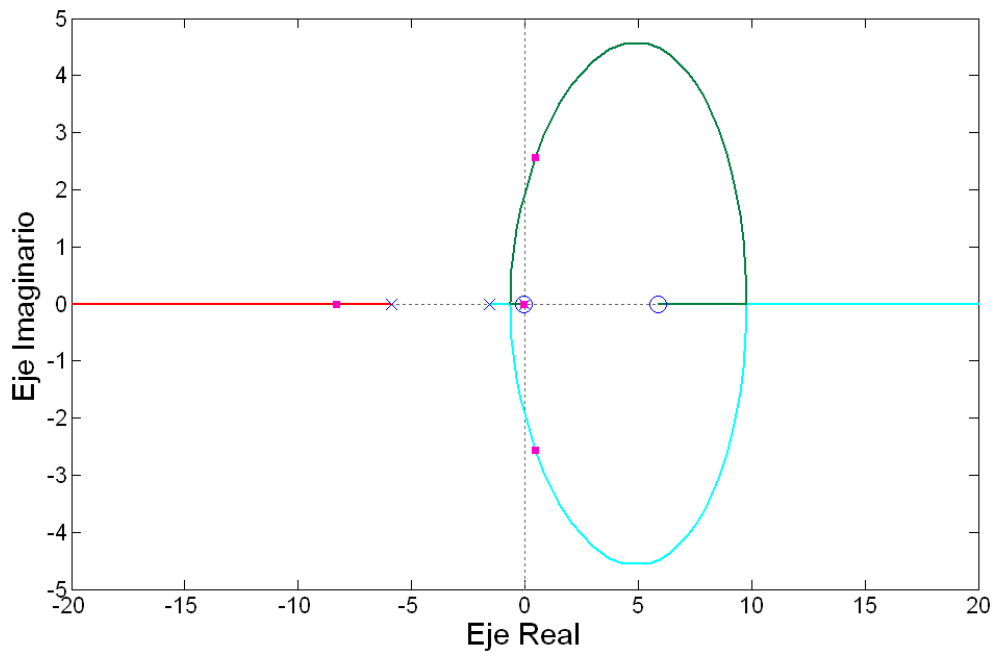
En la figura 28 se muestra el lugar geométrico de las raíces (LGR) del diagrama de la figura 27, donde el “controlador” es de tipo P (proporcional), y cuya respuesta al escalón unitario corresponde a la mostrada en la figura 29.

```

z = [5.857; -0.04923];
p = [0; 0; -5.857; -1.557];
k = -9.7601;
Gs = zpk(z, p, k)
sisotool(Gs, 1)

```

Figura 28. LGR, planta Ec. (15), controlador P, $K_p = 1$

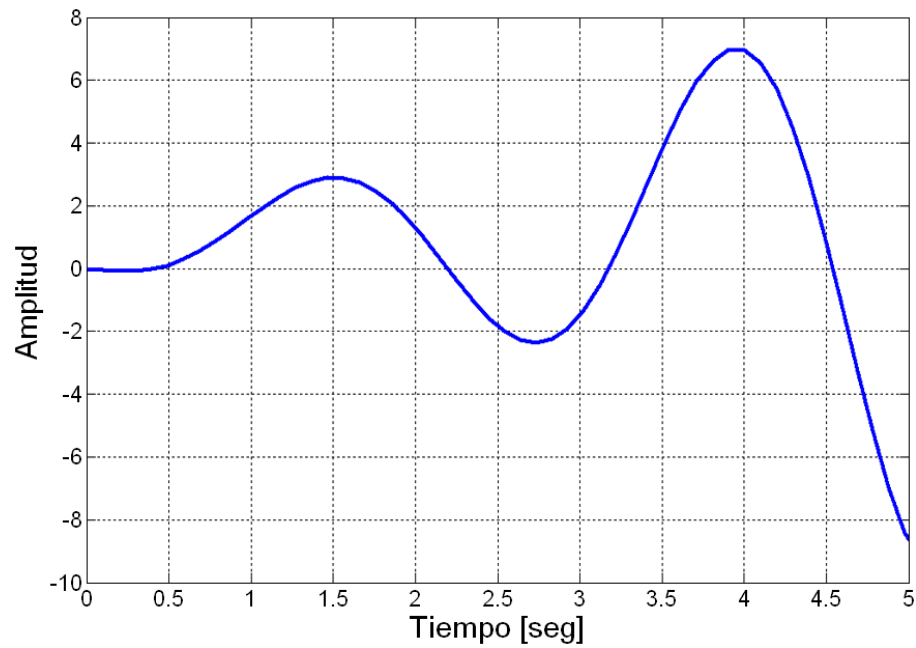


Fuente: Autores / Matlab

Como se puede observar en la figura 29 el sistema es oscilante e inestable para $K_p = 1$, debido a que los polos en lazo cerrado se encuentran ubicados en el semiplano derecho (Figura 28).

Para lograr estabilizar el sistema se deben mover dichos polos hacia el semiplano izquierdo, como se puede observar en la figura 30. Es decir el sistema es estable dependiendo de la ubicación de los polos en lazo cerrado.

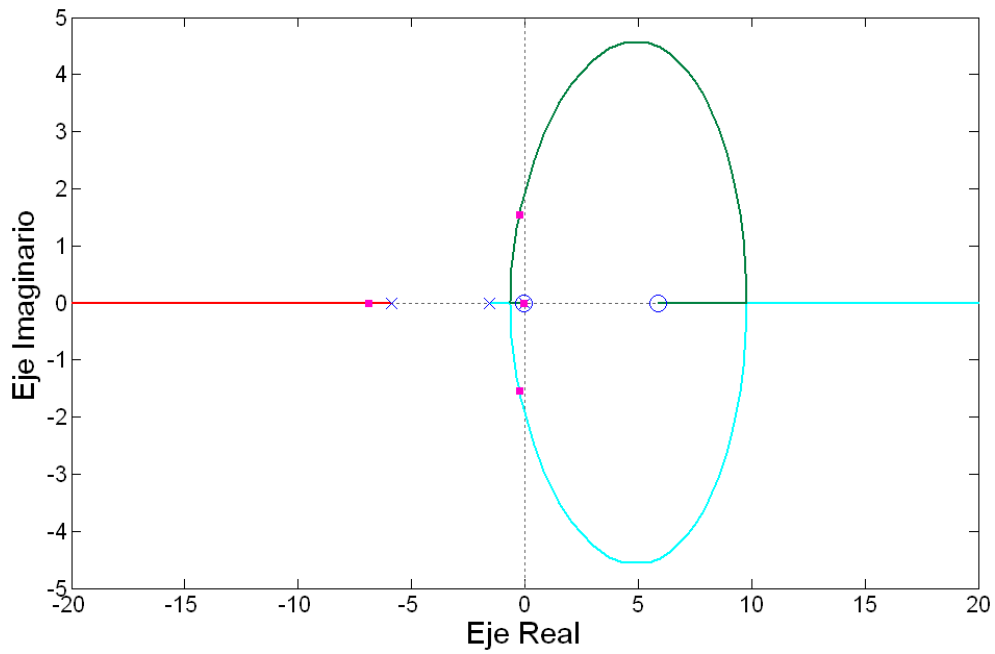
Figura 29. Respuesta escalón unitario, planta Ec. (15), controlador P, $K_p = 1$



Fuente: Autores / Matlab

sisotool(Gs, 0.3)

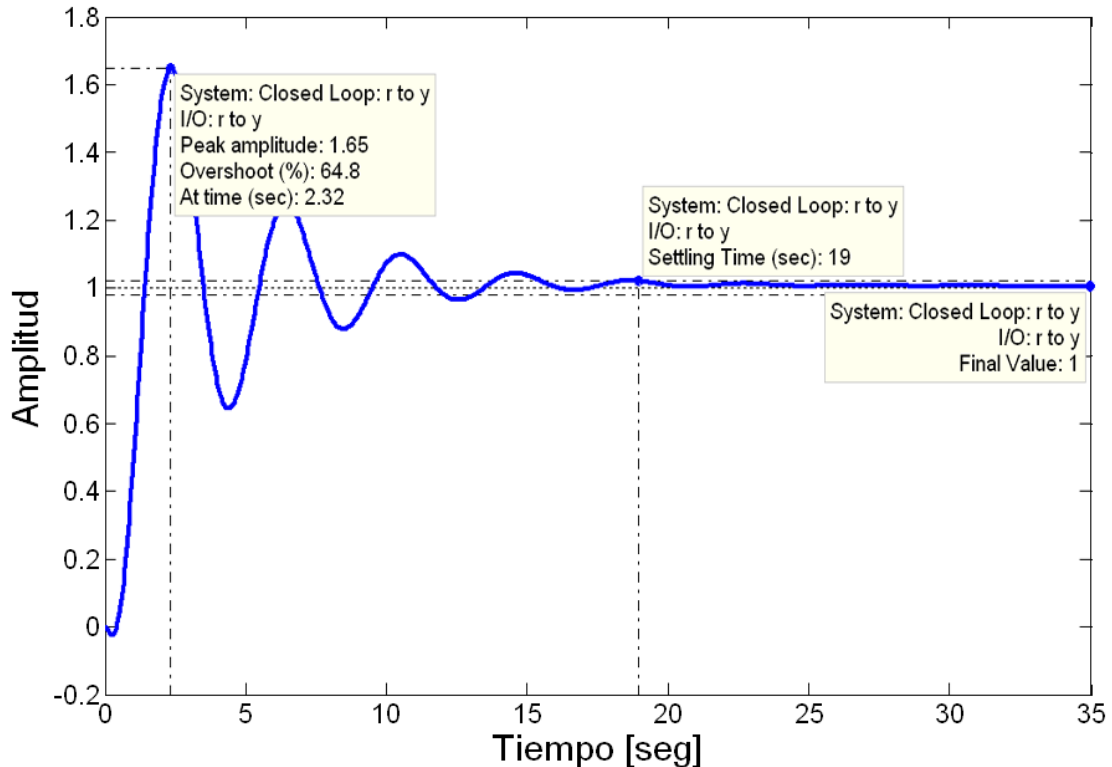
Figura 30. LGR, planta Ec. (15), controlador P, $K_p = 0.3$



Fuente: Autores/Matlab.

La figura 31 muestra la respuesta al escalón unitario del sistema en lazo cerrado con un control proporcional con $K_p = 0.3$. Donde el sistema se estabiliza después de 19 segundos y presenta un overshoot del 64.8%.

Figura 31. Respuesta escalón unitario, controlador P, $K_p = 0.3$



Fuente: Autores / Matlab

Se determinó manualmente la ganancia crítica K_{cr} para el controlador proporcional, llevando los polos en lazo cerrado al eje imaginario del plano s. Obteniendo:

$$K_{cr} \cong 0.503$$

Es decir la constante del controlador podría variar así: $0 < K_p < K_{cr}$. Al hacer la constante proporcional mas pequeña, teóricamente el sistema respondería mas rápido y con menor overshoot, pero realmente el sistema no responde quedándose la esfera estancada en un punto del cual el error de posición no es el suficiente para hacerla mover, esto es debido a la fricción estática que presenta la esfera.

Por ello se trató de diseñar un controlador PI para que la sacara de dicha posición, pero la respuesta era relativamente lenta y podía llegar a hacerse oscilatorio el sistema.

Se decidió diseñar un controlador PID, aprovechando que Labview poseía esta función a la que se le debe ingresar dentro de sus parámetros las constantes K_c , T_i y T_d .

La función de transferencia del bloque PID de Labview esta dada por:

$$H_{(s)} = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (16)$$

Cuya función de transferencia es similar al esquema utilizado en la academia, mostrado en la ecuación (17).

$$C_{(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (17)$$

La diferencia radica en que la constante $K_c = K_p$, y las constantes T_i y T_d se deben ingresar en minutos.

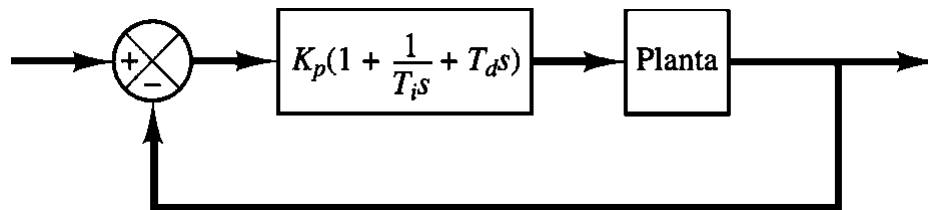
3.6.1. Control PID

La figura 32 muestra el control PID de una planta. Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, debemos recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID. [4]

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño se conoce como sintonización del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron más reglas para sintonizar los controladores PID (lo cual significa establecer valores K_p , T_i y T_d) con base en las respuestas escalón experimentales o basadas en el valor de K_p que se produce en la estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional. [4]

Las reglas de Ziegler-Nichols son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas, pero también se aplican al diseño de sistemas con modelos matemáticos conocidos.

Figura 32. Control PID de una planta



Fuente: Ingeniería de Control Moderna - Katsuhiko Ogata (3ra Edición)

[4]

3.6.1.1. Sintonización Manual

Debido a que el modelo obtenido del sistema (Ecuación 15) posee integrador se sintonizo el controlador basándose en el segundo método de Ziegler-Nichols. Calculando la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} por medio de Matlab, así:

$$[Gm, Pm, Wcg, Wcp] = margin(Gs);$$

$$Kcr = Gm$$

$$Pcr = 2 * pi / Wcg$$

Obteniendo:

$$K_{cr} = 0.50278$$

$$P_{cr} = 3.20469$$

Y a partir la fórmula que aparece en la tabla 2, se establecen los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d .

Tabla 2. Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (segundo método)

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: Ingeniería de Control Moderna - Katsuhiko Ogata (3ra Edición)

[4]

Donde el controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

(18)

$$C_{(s)} = 0.6K_{cr} \left[1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right]$$

Reemplazando K_{cr} y P_{cr} en la fórmula de la tabla 2;

$$\begin{aligned} K_p &= 0.6 * K_{cr} \\ T_i &= 0.5 * P_{cr} \\ T_d &= 0.125 * P_{cr} \end{aligned}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (17);

$$\begin{aligned} s &= tf('s'); \\ Cs &= Kp*(1+1/(Ti*s)+Td*s); \\ zpk(Cs) \end{aligned}$$

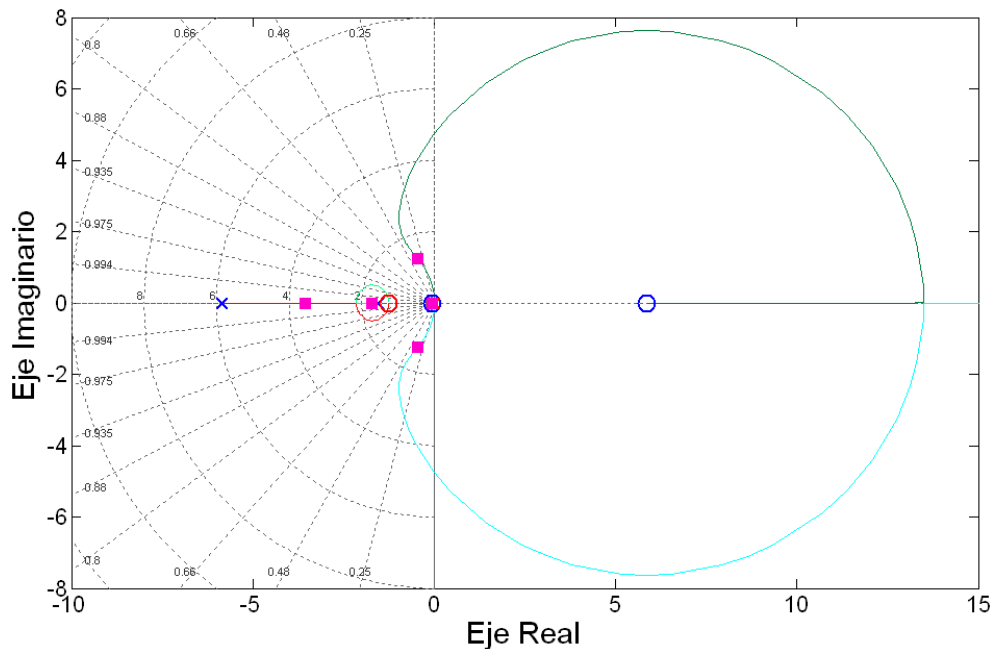
Se obtiene:

$$C_{(s)} = 0.12084 \frac{(s + 1.248)^2}{s} \quad (19)$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y cero doble en $s = -4/P_{cr}$. Redibujando el lugar geométrico de las raíces (LGR) con este nuevo controlador, se obtiene:

$$sisotool(Gs,Cs)$$

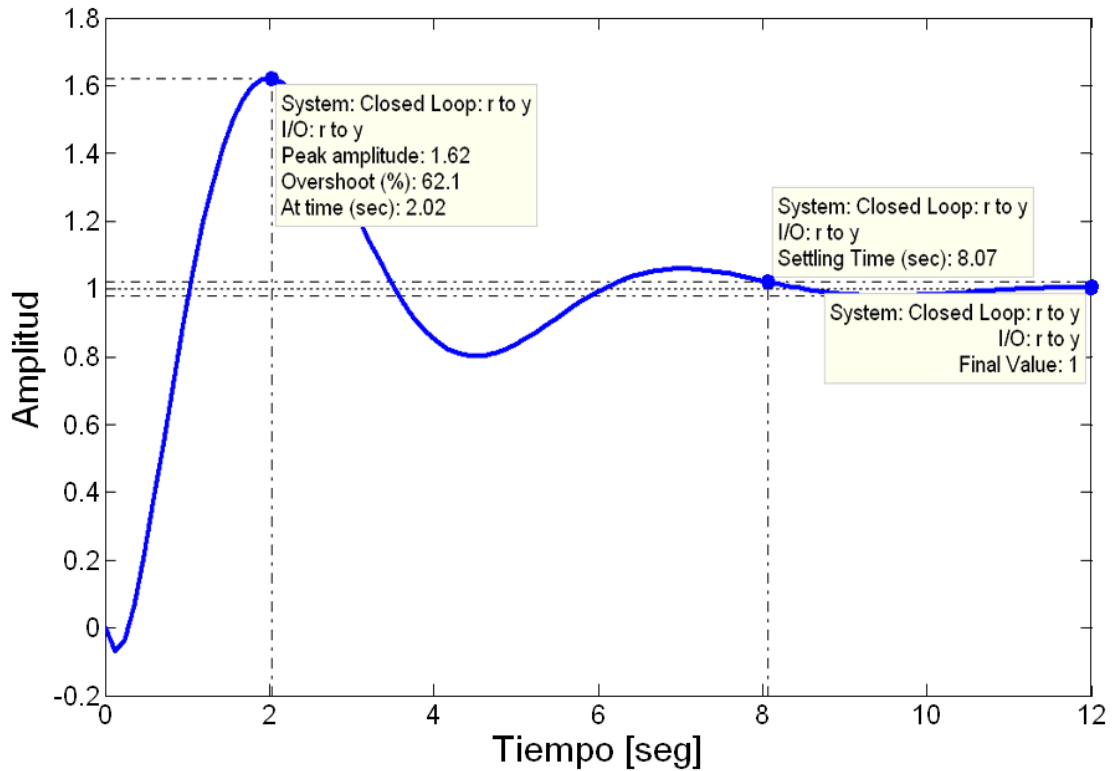
Figura 33. LGR, planta Ec. (15), controlador Ec. (19)



Fuente: Autores / Matlab

La figura 34 muestra la respuesta al escalón unitario del sistema en lazo cerrado con el controlador de la ecuación (19). Donde el sistema se estabiliza después de 8 segundos y presenta un overshoot del 62.1%.

Figura 34. Respuesta escalón unitario, controlador PID; $K_p = 0.3016$, $T_i = 1.6023$, $T_d = 0.4006$

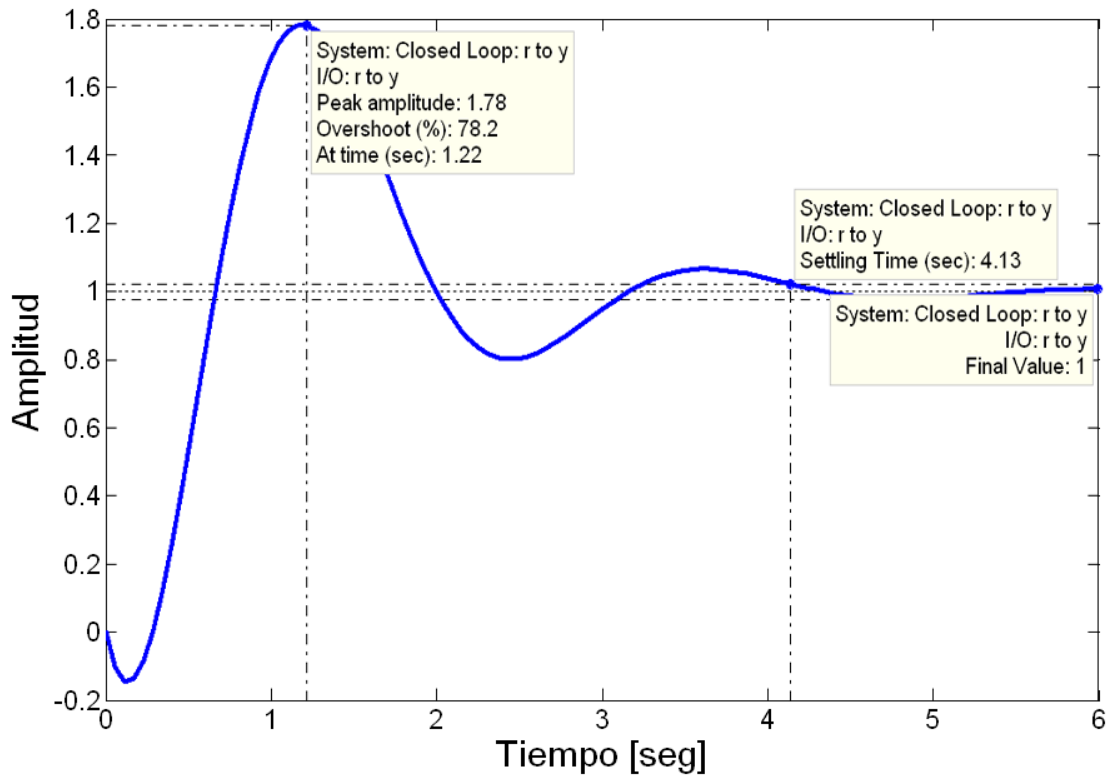


Fuente: Autores / Matlab

Manipulando la constante K_p del controlador de la ecuación (19) desde el LGR mostrado en la figura 33, se logró disminuir el tiempo de establecimiento a 4.13 segundos, pero el overshoot se incrementó llegando al 78.2%, como se muestra en la figura 35.

Nota: La prioridad en el diseño del controlador fue reducir el tiempo de establecimiento.

Figura 35. Respuesta escalón unitario, planta Ec. (15), controlador Ec. (20)



Fuente: Autores / Matlab

Cambiando la forma del controlador, así;

$$C_{(s)} = 0.23683 \frac{(s + 1.248)^2}{s} \quad (20)$$

Ajustando la ecuación (20) a la forma dada en la ecuación (17), se tiene;

$$C_{(s)} = 0.5912 \left[1 + \frac{1}{1.6023s} + 0.4006s \right] \quad (21)$$

Obteniendo de la ecuación (21) las constantes a implementar en Labview, cumpliendo con la forma dada en la ecuación (16), se tiene;

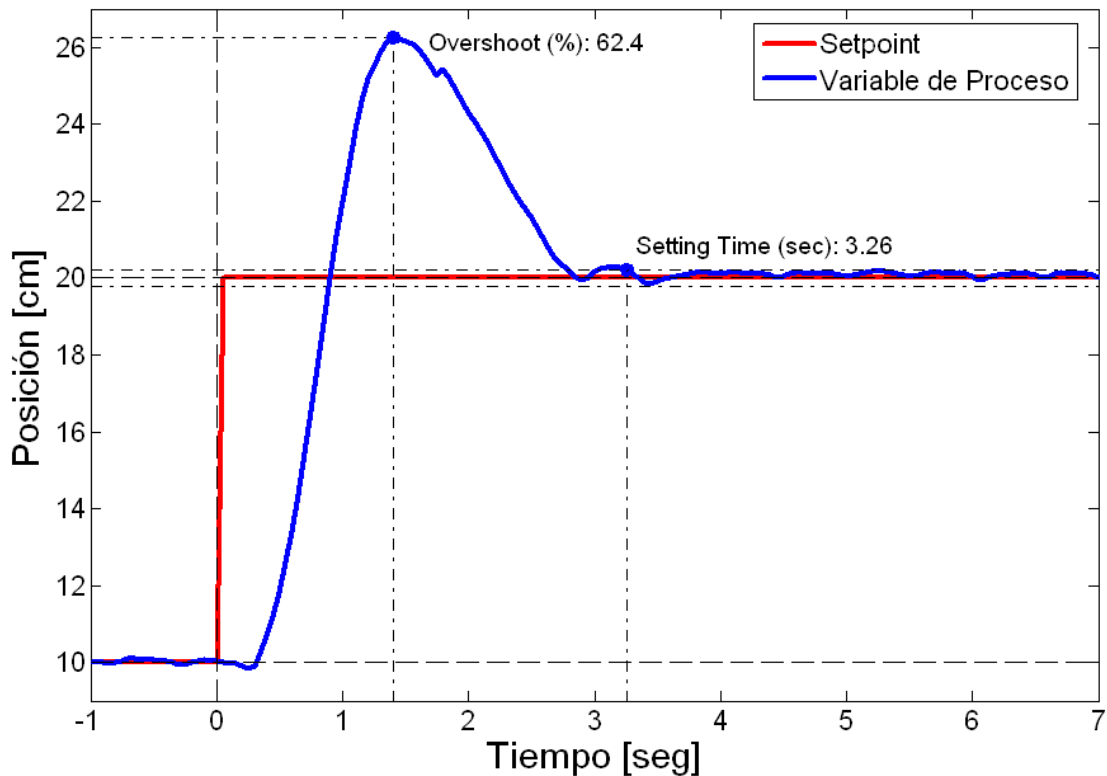
$$\begin{aligned} K_c &= 0.5912 \\ T_i &= 1.6023/60 \\ T_d &= 0.4006/60 \end{aligned}$$

Así:

$\begin{aligned} K_c &= 0.5912 \\ T_i &= 0.026705 \\ T_d &= 0.006677 \end{aligned}$

Al implementar estas constantes al sistema real se obtuvo la respuesta al escalón mostrada en la figura 36.

Figura 36. Respuesta escalón de magnitud 10, controlador Ec. (21)



Fuente: Autores / Labview / Matlab

En la figura 36 se muestra la respuesta al escalón de magnitud de 10 cm con valor inicial de posición de 10 cm. El tiempo de establecimiento apreciado fue de 3.26 segundos, y el overshoot de 62.4%.

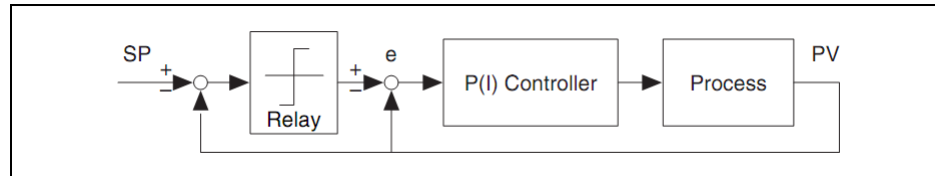
El comportamiento real del sistema (Figura 36) se diferencia del estimado analíticamente (Figura 35) debido al error presente en la identificación del modelo de la planta (Figura 25).

3.6.1.2. Sintonización Automática

Aprovechando la función de autotuning que posee el bloque de función PID de Labview, se sintonizó mecánicamente el controlador del sistema, donde se debió establecer un control estable antes de comenzar dicha sintonización, para lo cual se implementaron las constantes obtenidas de la ecuación (21).

La figura 37 ilustra el procedimiento de autotuning excitado por el relevo de setpoint, que une un relevo y una señal de retroalimentación adicional con el setpoint. Este ajuste automático del PID lo lleva a cabo esta función. El controlador existente permanece en el lazo.

Figura 37. Proceso bajo Control PID con relevo de Setpoint.



Fuente: <http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>

[5]

Para la mayoría de los sistemas, la característica del relevo no lineal genera un ciclo límite, de lo cual el algoritmo de ajuste automático identifica la información necesaria para la sintonización del PID. Si el controlador existente sólo es proporcional, el algoritmo identifica la ganancia crítica K_u y período crítico T_u . Si el modelo existente es PI o PID, el algoritmo identifica el tiempo muerto τ y la constante de tiempo T_p , que son dos parámetros del siguiente modelo;

$$G_p(s) = \frac{e^{-\tau s}}{T_p s} \quad (22)$$

Esta función utiliza el método Ziegler y Nichols para la determinación de los parámetros de un controlador PID. Cuando se va a sintonizar el controlador, se debe seleccionar uno de los siguientes tres tipos de rendimiento del lazo: rápido (1/4 el factor de amortiguamiento), normal (algo de overshoot) y lento (poco overshoot). En el anexo 1 se referencian las tablas donde se encuentran las fórmulas de ajuste para cada tipo de rendimiento.

El procedimiento detallado del método de autosintonización del controlador PID puede ser encontrado en la referencia [5].

El bloque PID de Labview dispone de entradas para el setpoint, la variable del proceso, las constantes del PID, el periodo de muestreo, el rango de salida y reiniciar. Las constantes del PID son un conjunto de tres valores: ganancia proporcional, tiempo integral, y tiempo derivativo.

El sistema “ball and beam” se adecuó a esta función precisando como rango de salida el ángulo de la viga desde -10° hasta 10° respectivamente, y un periodo de muestreo igual a 50 milisegundos que es el periodo mínimo requerido por la tarjeta electrónica para la generación del PWM, cuya

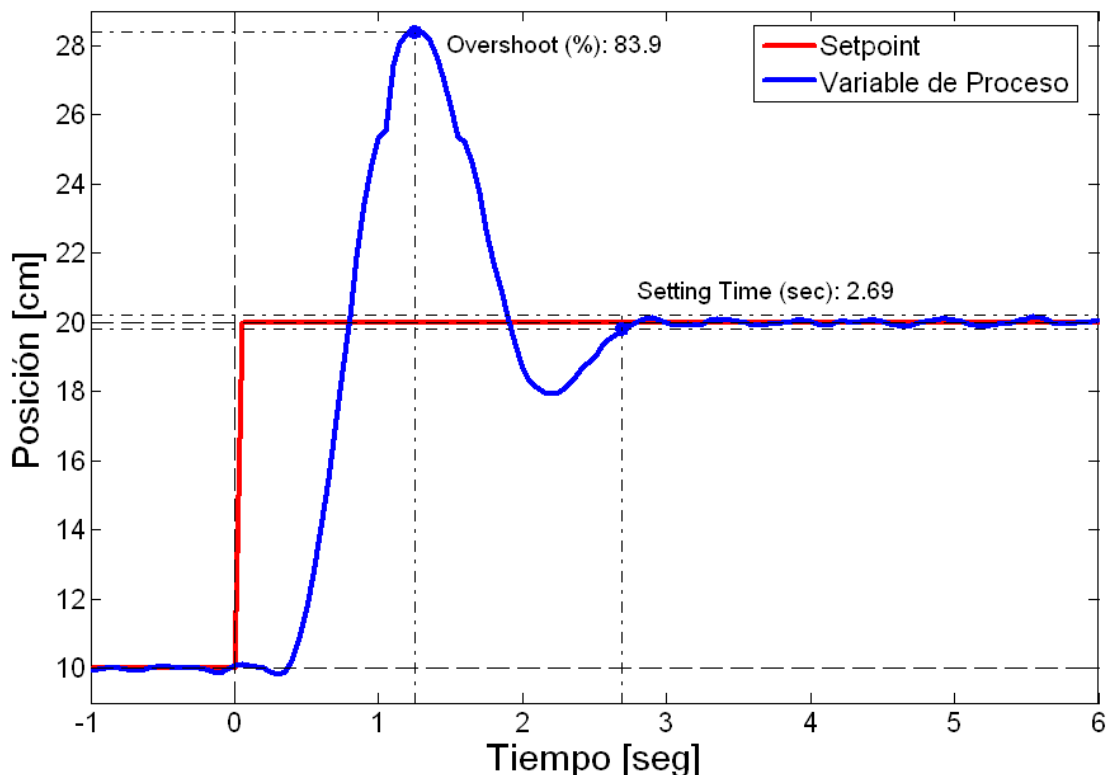
variable corresponde a la acción de control que se ve reflejada en el ángulo de posición de la viga obtenido por medio del servomotor.

Se sintonizó el controlador del sistema iterativamente con rendimiento del lazo rápido, logrando obtener las siguientes constantes:

Ganancia Proporcional	Kc	0.873413
Tiempo Integral	Ti (min)	0.022988
Tiempo Derivativo	Td (min)	0.005747

Se validaron dichas constantes colocando como entrada al sistema una acción tipo escalón como se puede observar en la figura 38.

Figura 38. Respuesta escalón de magnitud 10, sintonización automática



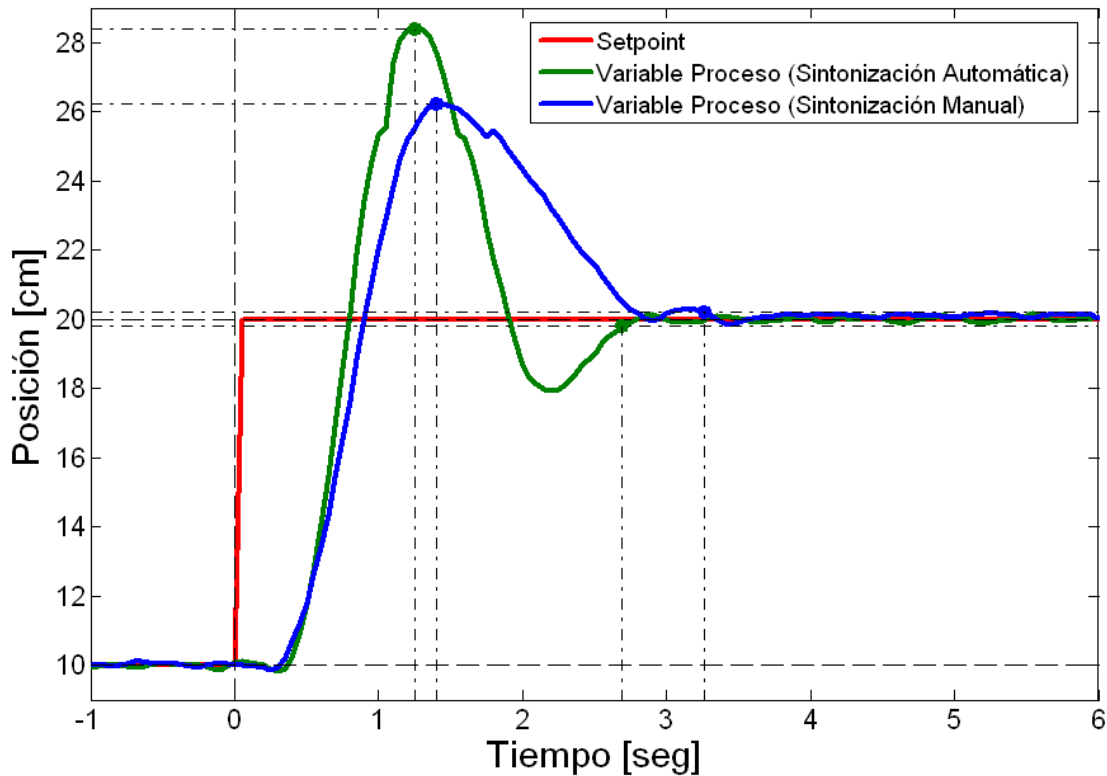
Fuente: Autores / Labview / Matlab

En la figura 38 se muestra la respuesta al escalón de magnitud de 10 cm con valor inicial de posición de 10 cm. El tiempo de establecimiento apreciado fue de 2.69 segundos, y el overshoot de 83.9%.

Si se deseara disminuir el overshoot se puede optar por sintonizar el controlador con rendimiento en el lazo normal o lento.

Al comparar estos resultados con los obtenidos de la sintonización manual (Figura 36) se observa que se redujo el tiempo de establecimiento pero se aumento el overshoot (Figura 39).

Figura 39. Respuesta escalón, sintonización manual y automática.



Fuente: Autores / Labview / Matlab

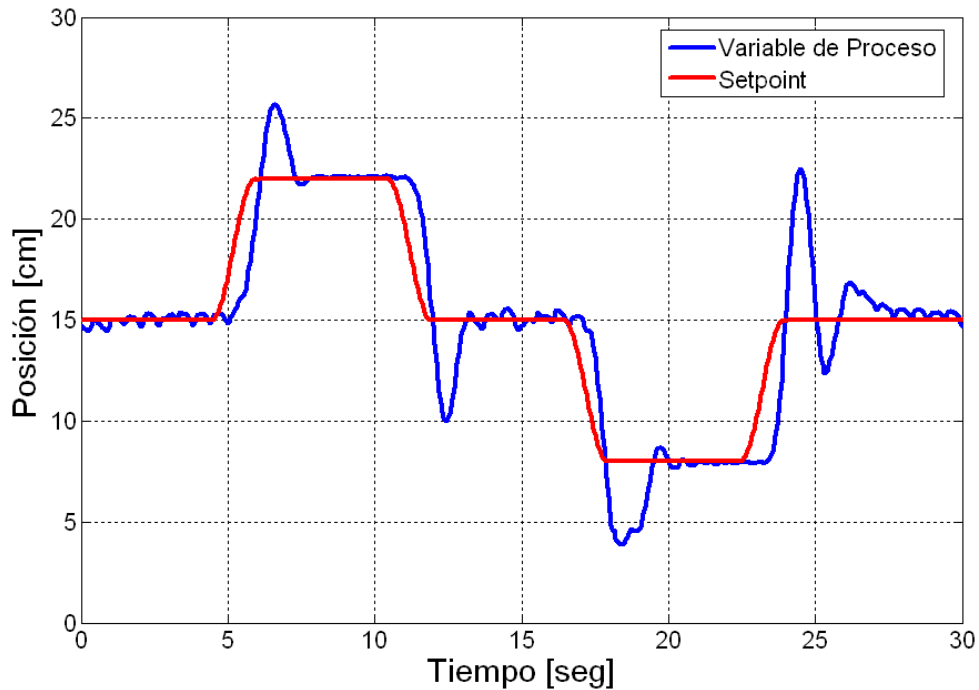
3.7. VALIDACIÓN DEL CONTROLADOR

Para validar el sistema de control se utilizó la señal periódica de la figura 17 como entrada al sistema, se implementaron las constantes del PID obtenidas en la sintonización automática, y se obtuvo la respuesta mostrada en la figura 40.

En la figura 40 se puede observar que la posición de la bola (línea azul) logra llegar a la posición de los estados estables de la señal de setpoint (Figura 40 línea roja), como se había demostrado en el proceso de sintonización ante una entrada tipo escalón (Figura 39). La señal de setpoint cambia de posición cada 6 segundos.

De esta forma se demostró que el sistema es estable y controlable en lazo cerrado.

Figura 40. Variable de Proceso y Setpoint, sintonización automática

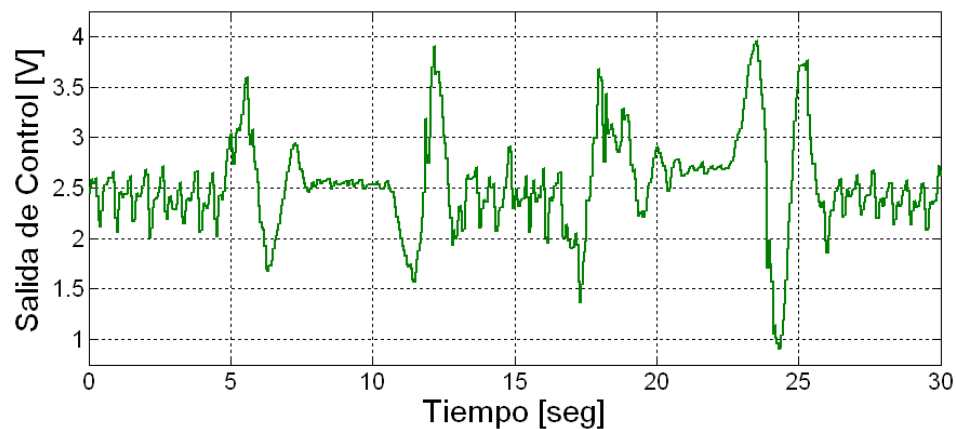


Fuente: Autores / Labview

Se puede observar que en la posición de 15 cm la bola supuestamente es un poco oscilante, pero realmente esto es debido al ruido presente en la señal de posición (Figura 23).

La acción de control correspondiente a la figura 40 es la mostrada en la figura 41. Donde se puede observar que dicha salida de control no llega a sus límites [0 5]V.

Figura 41. Acción de Control correspondiente a la figura 40



Fuente: Autores / Labview

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema “Ball and Beam” es una excelente herramienta para demostrar las ideas de control moderno, ya que su dinámica, aunque es simple, es muy cercana a la dinámica real encontrada en sistemas aero-espaciales.

Al implementar el lazo de control sobre el sistema se concluyó que el sistema es controlable.

La señal de los sensores de posición puede llegar a variar dependiendo del color, material o diámetro de la esfera.

El overshoot que presenta el sistema con el controlador en lazo cerrado se puede variar en el momento de la sintonización automática seleccionado el rendimiento del lazo bien sea de forma rápida, normal o lenta.

Se recomienda mejorar el sistema de lectura de posición disminuyendo el ruido sin importar el tipo de esfera.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. BALL AND BEAM, disponible en:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3953/fichero/Memoria+PFC%252F03-CAPITULO+2.pdf>
- [2]. Módulos Comerciales, disponible en:
http://www.tecquipment.com/Datasheets/CE106_0808.pdf
- [3]. Datasheet GP2D120, disponible en :
http://www.me.ucsb.edu/~me170c/Sensors/Range_SHARPGP2D120.pdf
- [4]. Katsuhiko Ogata. Ingeniería de Control Moderna, 3ra Edición, Prentice Hall.
- [5]. Labview. PID Control Toolset, User Manual.
<http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>

ANEXOS

ANEXO 1. FORMULAS SINTONIZACIÓN

Tabla 3. Formula Sintonización bajo Control P (rápido)

Controlador	Kc	Ti	Td
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	-
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

Fuente: <http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>

[5]

Tabla 4. Formula Sintonización bajo Control P (normal)

Controlador	Kc	Ti	Td
P	$0.2K_u$	-	-
PI	$0.18K_u$	$0.8T_u$	-
PID	$0.25K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

Fuente: <http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>

[5]

Tabla 5. Formula Sintonización bajo Control P (lento)

Controlador	Kc	Ti	Td
P	$0.13K_u$	-	-
PI	$0.13K_u$	$0.8T_u$	-
PID	$0.15K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

Fuente: <http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>

[5]

Tabla 6. Formula Sintonización bajo Control PI o PID (rápido)

Controlador	Kc	Ti	Td
P	T_p/τ	-	-
PI	$0.9T_p/\tau$	3.33τ	-
PID	$1.1T_p/\tau$	2.0τ	0.5τ

Fuente: <http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>

[5]

Tabla 7. Formula Sintonización bajo Control PI o PID (normal)

Controlador	Kc	Ti	Td
P	$0.44T_p/\tau$	-	-
PI	$0.4T_p/\tau$	5.33τ	-
PID	$0.53T_p/\tau$	4.0τ	0.8τ

Fuente: <http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>

[5]

Tabla 8. Formula Sintonización bajo Control PI o PID (lento)

Controlador	Kc	Ti	Td
P	$0.26T_p/\tau$	-	-
PI	$0.24T_p/\tau$	5.33τ	-
PID	$0.32T_p/\tau$	4.0τ	0.8τ

Fuente: <http://www.ni.com/pdf/manuals/322192a.pdf>

[5]

Nota: Durante la sintonización, el proceso permanece bajo control PID en lazo cerrado. No es necesario apagar el controlador existente, ni realizar el experimento en condiciones de lazo abierto. En el experimento de relevo de setpoint, la señal de SP refleja el SP para el controlador PID.