



1859

unl

Universidad
Nacional
de Loja

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

“Elaboración, Control e Implementación de un sistema Ball & Beam”

Trabajo de Titulación,
previo a la obtención del título de
Ingeniero Electromecánico.

AUTOR:

Jefferson Michael Jiménez Quizhpe

DIRECTOR:

Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes. Mg. Sc.

LOJA - ECUADOR

2025

Educamos para Transformar

Certificación

Loja, 08 de agosto de 2024

Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes. Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del trabajo de titulación del grado titulado: **“ELABORACIÓN, CONTROL E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA BALL & BEAM.”** de autoría del estudiante **Jefferson Michael Jiménez Quizhpe**, previa a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes. Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **JEFFERSON MICHAEL JIMENEZ QUIZHPE**, declaro ser autor del presente trabajo de titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mí trabajo de titulación en el Repositorio Digital Institucional - Biblioteca Virtual.



Cédula de Identidad: 1150355343

Fecha: 10 de abril de 2025

Correo electrónico: jmjimenezq@unl.edu.ec

Celular: 0963982649

Carta de autorización

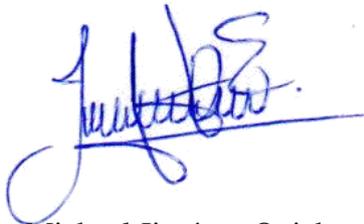
Yo, **JEFFERSON MICHAEL JIMENEZ QUIZHPE**, declaro ser autor del trabajo de titulación titulado: “**ELABORACIÓN, CONTROL E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA BALL & BEAM.**”, como requisito para optar al título de **INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**; autorizo al sistema bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización en la ciudad de Loja, a los diecisiete días del mes de marzo del dos mil veintitrés.

Firma:



Autor: Jefferson Michael Jiménez Quizhpe

Cédula: 1150355343

Dirección: Catamayo (Barrio. María Auxiliadora)

Correo electrónico personal: jmjimenez891@gmail.com

Correo electrónico institucional: jmjimenezq@unl.edu.ec

Teléfono: 07 2676268

Celular: 0963982649

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de tesis: Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes. Mg. Sc.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi familia de manera muy especial a mi hijo Ezequiel, mi mayor fuente de inspiración, espero que esta tesis te inspire a seguir tus propios sueños y a luchar por lo que quieres. Quiero que sepas que eres mi mayor logro y que todo lo que hago es por ti y por tu futuro, a mis padres Tiesman y Lupe, quiero agradecerles por haberme inculcado el valor del esfuerzo y la dedicación desde pequeño. Ustedes son mi inspiración y ejemplo a seguir, a mis docentes sus enseñanzas y dedicación han sido fundamentales en mi formación y en la culminación de esta tesis.

Jefferson M Jiménez

Agradecimientos

Mi principal agradecimiento es para Dios, por haberme dado el conocimiento y las habilidades requeridas para el desarrollo de esta investigación.

Quiero dedicar este espacio para agradecer de manera especial a mis padres, mi esposa, mis abuelos y mis hermanos por su incondicional apoyo en la realización de esta tesis.

Un agradecimiento especial para las autoridades de la Universidad Nacional de Loja, particularmente, para el personal de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, de la carrera de Ingeniería Electromecánica.

Al Ing. Cristian Vinicio Ortega Reyes. Mg. Sc., director del presente trabajo investigativo por su paciencia, dedicación y compromiso en este proceso. Gracias por guiarme en cada paso, por sus consejos y por compartir conmigo su experiencia y conocimientos.

A todos mis compañeros de estudios, quienes compartieron conmigo momentos de aprendizaje y esfuerzo.

Jefferson M Jiménez

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	II
AUTORÍA.....	III
CARTA DE AUTORIZACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIII
SIMBOLOGÍA.....	XIV
1. TÍTULO.....	1
2. RESUMEN / ABSTRACT	2
2.1 ABSTRACT.....	3
3. INTRODUCCIÓN	4
4. MARCO TEÓRICO.....	6
4.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL AUTOMÁTICO	6
4.1.1 Definición y conceptos básicos.....	6
4.1.2 Función del control automático.....	6
4.1.3 Componentes básicos de un sistema de control.....	7
4.1.4 Tipos de sistemas de control	7
4.1.5 Sistema de control de procesos	8
4.1.6 Sistemas de control automático.....	9
4.1.7 Controladores PID (proporcionales, integrales y derivativos).....	9
4.1.8 Control difuso	14
4.2 TIPOS DEL DISEÑO DE SISTEMA BARRA ESFERA	15
4.2.1 Esfera y viga modelo CE 106	15
4.2.2 Esfera viga ACROME	15
4.2.3 Esfera viga QUANSER.....	15

4.2.4	Modelado del experimento de esfera y viga	16
4.3	MODELADO DEL SISTEMA.....	17
4.3.1	Modelado teórico	17
4.4	SENSORES DE PROXIMIDAD	20
4.4.1	Sensor de proximidad inductivo	20
4.4.2	Sensor de proximidad capacitivo	21
4.4.3	Sensor ultrasónico.....	22
4.4.4	Sensor de proximidad óptico.....	24
4.4.5	Sensor de proximidad infrarrojo TOF 10120.....	24
4.4.6	Sensor Sharp GP2Y0A21YK0F.....	27
4.5	SERVOMOTORES	28
4.5.1	Diagrama de bloques de un servomotor.....	29
4.5.2	Consumo de energía.....	30
4.6	ARDUINO	31
4.6.1	Librerías Arduino.....	33
5.	METODOLOGÍA	34
5.1	ÁREA DE TRABAJO	34
5.2	MÉTODOS Y MATERIALES.....	34
5.2.1	Métodos.....	34
5.2.2	Materiales.....	37
5.3	PROCEDIMIENTO	38
5.3.1	Construir un prototipo del modelo "Ball & Beam"	39
5.3.2	Establecer un modelo matemático para describir el comportamiento dinámico del prototipo "Ball & Beam"	45
5.3.3	sistema de control clásico adecuado para el modelo desarrollado.....	53
6.	RESULTADOS	57
6.1	CONSTRUIR UN PROTOTIPO DEL MODELO "BALL & BEAM	57
6.1.1	Placa del circuito	57
6.1.2	Conexiones.....	57
6.1.3	Montaje completo del sistema Ball & Beam	58
6.2	ADQUISICIÓN DE DATOS	59
6.2.1	Modelo matemático.....	59
6.2.2	Controlador PID	60

6.2.3	Métodos de sintonización del PID	61
6.3	SISTEMA DE CONTROL CLÁSICO EN LABVIEW.....	64
6.3.1	Indicador de distancia	65
6.3.2	Indicador puerto serial	65
6.3.3	Controlador pin servo y sensor	65
6.3.4	Control de constantes PID.....	65
6.3.5	Panel de gráficos del sistema	66
6.3.6	Indicador de curvas	66
7.	DISCUSIÓN	67
8.	CONCLUSIONES	69
9.	RECOMENDACIONES	70
10.	BIBLIOGRAFÍA	71
11.	ANEXOS.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pines de conexión sensor TOF10120.....	26
Tabla 2. Lista de Materiales.....	37
Tabla 3. Parámetros del método basado en Ziegler-Nichols	53
Tabla 4. Parámetros del método basado en Cohen-Coon.	53
Tabla 5. Parámetros del método basado en Astrom-Hagglund.....	53
Tabla 6. Parámetros del método basado en Kaya and Scheib.....	53
Tabla 7. Parámetros del método basado en Smith-Corripio	53
Tabla 8. Métodos de sintonización Utilizados.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aplicación común del control automático.....	7
Figura 2. Componentes básicos de un sistema de control.	7
Figura 3. Sistema de control de lazo abierto.....	8
Figura 4. Sistema de control de lazo cerrado.....	8
Figura 5. Diagrama de bloques de un controlador PID.	10
Figura 6. Ejemplo de modelo experimental.....	17
Figura 7. Viga bola en movimiento.	18
Figura 8. Sensor de proximidad inductivo.....	20
Figura 9. Diagrama sensor general inductivo.	21
Figura 10. Sensor de proximidad capacitivo.	22
Figura 11. Sensor de proximidad ultrasónico.	23
Figura 12. Sensor de proximidad óptico.....	24
Figura 13. Sensor TOF 10120.....	25
Figura 14. Pines sensor TOF 10120.....	26
Figura 15. Conexión con sensor TOF10120 en Arduino.....	26
Figura 16. Servomotor.	28
Figura 17. Partes de un servomotor.	29
Figura 18. Diagrama de bloques de un servomotor.....	29
Figura 19. Curva torque característico de un servomotor.....	30
Figura 20. Partes de la placa Arduino.....	31
Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento del proyecto.	34
Figura 22. Diseño del sistema Ball & Beam.....	36
Figura 23. Base sensor TOF10120	39
Figura 24. Base Servomotor MG995	40
Figura 25. Base sujeción del servo.	40
Figura 26. Base de apoyo de la viga.	41
Figura 27. Biela.....	41
Figura 28. Manivela.....	41
Figura 29. Ensamble sistema Ball & Beam.	42
Figura 30. Eliminación de imperfecciones de las piezas 3D.....	43
Figura 31. Colocación del sensor en su debida base.....	43
Figura 32. Montaje de la Viga.	44
Figura 33. Montaje del sistema de transmisión.	44

Figura 34. Herramienta System Identification.....	49
Figura 35. Colocación de variables en Import Data.	50
Figura 36. Proceso de estimación de la Función de transferencia.	50
Figura 37. Funciones de transferencia representadas mediante gráfica.....	51
Figura 38. Poles and Zeros de la función de transferencia.	51
Figura 39. Mejores ajustes para el sistema.	52
Figura 40. Bloque de programación del sensor.	53
Figura 41. Bloque de programación del servo.	54
Figura 42. Bloque de lectura analógica Arduino.	54
Figura 43. Formula conversión de voltaje.	54
Figura 44. Bloque de parámetros P I D.	55
Figura 45. Bloque de programación del setpoint.	55
Figura 46. Bloque Waveform Chart.	55
Figura 47. Bloque Write to Measurement File.	56
Figura 48. Bloque de cierre de comunicación serial.....	56
Figura 49. Programación en bloques del sistema completa.....	56
Figura 50. Tarjeta de conexión de Arduino.	57
Figura 51. Diagrama multifilar	58
Figura 52. Sistema Ball y Beam construido.	58
Figura 53. Datos obtenidos del sensor de distancia y el servomotor.....	59
Figura 54. Ecuación de la función de transferencia.....	60
Figura 55. Diagrama de bloques sistema Ball y Beam.	60
Figura 56. Gráfica del sistema con un valor P.....	62
Figura 57. Gráfica del sistema con un valor PI.....	63
Figura 58. Gráfica del sistema con un valor PID.....	64
Figura 59. Interfaz del sistema de control.....	64
Figura 60. Indicador de distancia.....	65
Figura 61. Indicador del puerto serial.	65
Figura 62. Indicador del puerto serial.	65
Figura 63. Control de constantes PID.....	66
Figura 64. Panel de gráficos del sistema.....	66
Figura 65. Panel de gráficos del sistema.....	66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Costo de Materiales.....	75
Anexo 2. Datasheet Arduino Uno.....	76
Anexo 3. Datasheet sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK0F.....	77
Anexo 4. Datasheet servomotor MG995.	78
Anexo 5. Prácticas de Laboratorio.....	79
Anexo 6. Certificación de traducción del resumen.....	81

SIMBOLOGÍA

Masa: m	kg
Voltaje: V	V
Intensidad: I	A
Distancia: x	cm
Velocidad angular: ω	rad

1. Título

Elaboración, control e implementación de un sistema ball & beam.

2. Resumen / Abstract

Esta investigación desarrolla un sistema de control PID clásico para el modelo Ball & Beam, diseñado para estabilizar la posición de una pelota sobre una viga inclinada. Se construyó un prototipo de bajo costo, que integra siete piezas impresas en 3D y cuatro dispositivos electrónicos (Arduino UNO, sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK0F, servomotor MG995 y una fuente de alimentación). El modelo matemático se formuló utilizando el método de Lagrange y la función de transferencia se derivó mediante MATLAB y LabVIEW, logrando un ajuste del 97.28%.

El control PID fue implementado y ajustado mediante LabVIEW, utilizando bloques de programación para leer los datos del sensor, calcular los parámetros PID y controlar el servomotor. La interfaz incluyó herramientas para graficar datos en tiempo real y registrar mediciones en archivos Excel.

El sistema demostró ser estable y eficaz en pruebas reales, validando la función de transferencia derivada como una herramienta confiable para el diseño de estrategias de control. Este desarrollo integra diseño mecánico, modelado matemático, control automático y programación, ofreciendo una solución funcional y asequible para la educación

Palabras clave: Ball & Beam, prototipo, modelo matemático.

2.1 Abstract

This research presents the development of a classical PID control system for the Ball & Beam model, aimed at stabilizing the position of a ball on an inclined beam. A low-cost prototype was built, integrating seven 3D-printed components and four electronic devices: an Arduino UNO, a Sharp GP2Y0A21YK0F infrared sensor, an MG995 servo motor, and a power supply. The mathematical model was formulated using the Lagrangian method, and the transfer function was derived with MATLAB and LabVIEW, achieving a 97.28% fit.

The PID control was implemented and tuned using LabVIEW, through programming blocks that read sensor data, calculate PID parameters, and control the servo motor. The interface included tools for real-time data plotting and logging measurements to Excel files.

The system proved to be stable and efficient during real-world testing, validating the derived transfer function as a reliable tool for designing control strategies. This development integrates mechanical design, mathematical modeling, automatic control, and programming, offering a functional and affordable solution for educational purposes.

Keywords: Ball & Beam, prototype, mathematical model

3. Introducción

El sistema ball & beam es uno de los sistemas no lineales clásicos comúnmente empleados para el diseño, implementación y sintonización de leyes de control automático. En los últimos años una gran variedad de estrategias de control se ha aplicado sobre la plataforma experimental como lo indica (Hauser et al., 1992), que para la estabilización y seguimiento de trayectorias presenta un enfoque por realimentación linealizante. Por otro lado (Wang & Mendel, 1992), aplica una ley difusa para el control del sistema no lineal ball & beam en este enfoque los resultados se prueban mediante simulación. De otro modo en (Laukonen & Yurkovich, 1993), reporta resultados de identificación y control mediante la experimentación. Otro tipo de estrategias como el control robusto se han aplicado al sistema considerando que hay un problema de seguimiento de trayectorias como lo indica (Huang & Lin, 1995).

Investigaciones de la última década se presentan en (Chen et al., 2012) - (Maalini et al., 2016), en estos trabajos utilizan una forma distinta para obtener el modelo matemático que es por medio del formulismo Euler-Lagrange de igual manera que en (Vincenty & Beauchamp, 2014) – (Valluru et al., 2016), mediante la segunda ley de Newton se obtiene la dinámica del sistema.

En el ámbito de la aeronáutica se presenta comúnmente un problema que implica el control de un cohete al momento del despegue o liberación vertical. La inclinación del cohete de propulsión a chorro tiene que ser controlado de manera continua para evitar que el cohete se desplome. Si el control de retroalimentación no existiese resulta imposible estabilizar los movimientos por tal motivo no existirían cohetes espaciales (Campos et., al 2021).

Por lo tanto, a través de este ejemplo se puede observar que es necesario desarrollar un sistema de control que está dirigido generalmente a un proceso inestable y que requiere de una respuesta inmediata por parte de un controlador.

Una de las soluciones que existen actualmente es el uso del controlador PID cuyo beneficio radica en su sencilla implementación y es una excelente opción en aplicaciones donde no sea tan esencial el tiempo de respuesta, la limitación que presenta este tipo de controlador es que no es fácil sintonizar.

El sistema Ball & Beam o Bola y Viga es uno de los sistemas de control más conocidos y un desafío importante en este campo. Su objetivo es controlar la posición de una esfera que se ubica sobre una viga, donde el ángulo bajo de la viga es manipulado para controlar la posición de esta esfera para lograr que se estabilice en una de las posiciones deseadas. El sensor será definido como la entrada del sistema en este caso la distancia medida por el mismo y se considerará el ángulo de rotación del servomotor como la salida a controlar.

El sistema que se está estudiando tiene como motivo principal es controlar el ángulo de inclinación de la viga. Para llevar a cabo esta labor, se utiliza un servomotor de corriente continua, que será regulado mediante un controlador proporcional, integral y derivativo (PID). Además, para obtener la posición de la bola, se utiliza un sensor infrarrojo cuya función es obtener lecturas precisas de la posición de la bola en la viga.

Por ende, para estas razones se plantea el aporte de un sistema “Ball & Beam” y los objetivos a cumplir son:

Objetivo general

Desarrollar un sistema de control para un modelo Ball & Beam.

Objetivos específicos:

- Construir un prototipo del modelo "Ball & Beam".
- Establecer un modelo matemático para describir el comportamiento dinámico del prototipo "Ball & Beam".
- Plantear un sistema de control clásico adecuado para el modelo desarrollado.

4. Marco teórico

4.1 Introducción al Control Automático

4.1.1 Definición y conceptos básicos

La aplicación básica del control automático de procesos radica en la reducción de los costos relacionados con la operación industrial lo que cubre con creces el costo del equipo de control adquirido. Al mismo tiempo, existen beneficios intangibles importantes: en particular, la eliminación de la mano de obra pasiva crea una necesidad respectiva de ciertas habilidades; la creación de un grado de precisión y furor insalvable que está asociado con la eliminación de errores es otro carácter inherente del trabajo con el control automático (Fernández, 2020).

Por tanto, el control automático está basado en la idea de mantener un valor predefinido en un momento o condición particular. En otras palabras, el proceso tiene que ver con medir el valor actual, compararlo con el valor que se desea y utilizar la diferencia de los mismos para reducir la variable. Esto significa un circuito cerrado de acciones y reacciones sin necesidad de intervención humana.

4.1.2 Función del control automático

La manera más sencilla de entender la idea de lazo realimentado de control es imaginando qué es lo que un operador tendría que hacer si el control automático no existiese.

La **Figura 1** muestra un intercambiador de calor como se encuentra típicamente en varias instalaciones industriales. Utiliza vapor para calentar agua fría. Cuando se opera de manera manual, la cantidad de vapor que entra en el intercambiador de calor se regula por la presión de aire que actúa en la válvula que lo controla. La temperatura también se controla de manera manual: el operador observa la señal de temperatura y, comparándolo con el valor que desearía tener, ajusta la válvula para permitir más o menos vapor en el intercambiador. Cuando alcanza la temperatura deseada, el operador gira la válvula hasta dicha posición y espera hasta que finalice el ciclo.

En cambio, con el control automatizado, el regulador de la temperatura desempeña el mismo rol. La información de medición que proviene del sensor de temperatura o del transmisor se coteja de manera constante con el valor de consigna que se ha introducido en el actuador. El controlador automático, al comparar las señales, establece si la señal de medición supera o supera el valor de consigna y ajusta la ubicación de la válvula. Estos procedimientos se realizan de manera constante hasta que la medición de temperatura se transforma en la última medición de la carrera, lo que ofrece un control seguro y automatizado del intercambiador de calor.

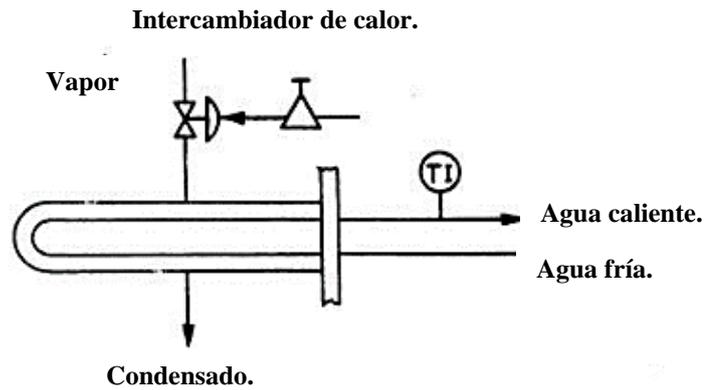


Figura 1. Aplicación común del control automático.
Fuente: (Fernández, 2020).

4.1.3 Componentes básicos de un sistema de control

Dentro de los componentes básicos de un sistema de control se puede tener en cuenta los siguientes:

- Objetivos de control.
- Componentes de sistema de control.
- Salidas o resultados.



Figura 2. Componentes básicos de un sistema de control.
Fuente: (Gómez, 2015)

4.1.4 Tipos de sistemas de control

Un sistema de control está definido como una disposición de elementos conectados que conforman una estructura conocida como sistema, lo que permite que la disposición resultante tenga la capacidad de regularse de forma autónoma (Hernández, 2010).

4.1.4.1 Sistemas de lazo abierto y lazo cerrado

Una táctica frecuentemente empleada en la revisión de sistemas es a través de la ilustración de los componentes del sistema en vez de un esquema de bloques. Este tipo de ilustración es una serie visual que evidencia la secuencia lógica de las operaciones, lo que simplifica la simulación del sistema y simplifica la detección de posibles fallos de diseño. Como se ilustra en la **Figura 3**, se presenta el esquema de bloques conocido como circuito de control, el cual explica la forma en que los bloques que sujetan los elementos de control se

entrelazan. El ciclo de control es comúnmente conocido como un bucle de control "abierto", o en otras palabras, un sistema de control sin retroalimentación.

Dicho de otra manera, la salida no causa perturbación directamente a la entrada o al controlador en lugar de eso, la entrada del sistema afecta directamente al controlador, y el controlador llega a afectar a la salida controlada a través de un actuador.

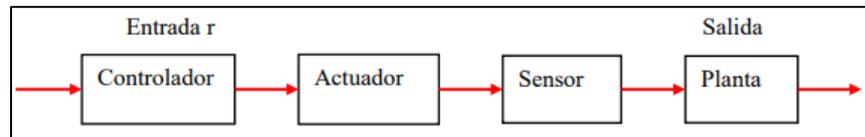


Figura 3. Sistema de control de lazo abierto.

Una manera de ilustrar un sistema de control diferente se muestra en la **Figura 4** (lazo de control cerrado) y es común en una variedad de campos, ya sea de sistemas de control de vehículos así como también dentro de procesos industriales. Dentro de los sistemas de control vehicular se incluye, vehículos aéreos, automóviles y navales. Por otra parte, los sistemas de control de lazo cerrado se encargan de la toma de decisiones de control mediante el uso de sensores para brindar retroalimentación y ajustar el control.

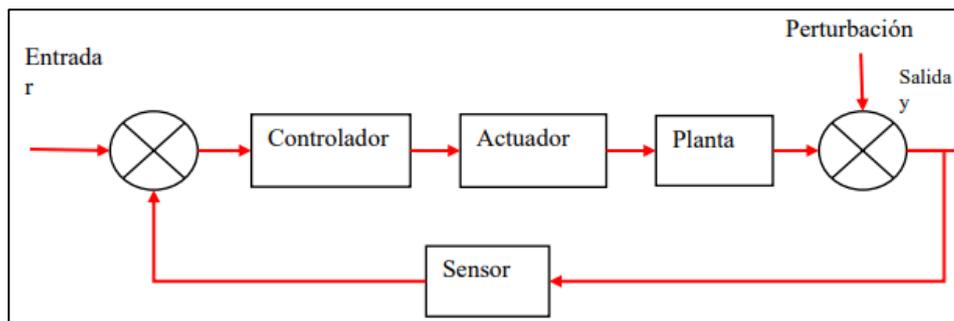


Figura 4. Sistema de control de lazo cerrado.

4.1.5 Sistema de control de procesos

El conjunto de técnicas y herramientas que facilitan el control y monitoreo de un proceso, dispositivo o máquina de manera automática se define como un sistema de control de procesos automatizados. Para elegir el tipo de mecanismo se debe tener en cuenta que este depende en gran parte de objetivos concretos que se necesitan alcanzar (AUTYCOM, 2023).

Sin embargo, no es posible construir un sistema de control únicamente a partir de estos dispositivos; debe seguir la lógica de al menos tres elementos básicos.:

- Qué variable se va a controlar.
- Un mecanismo.
- Un set-point o punto de referencia.

4.1.6 *Sistemas de control automático*

Según Mandado, et al., (2009) en un sistema de control automático el comportamiento de las variables de salida será en base a las órdenes dadas por las variables de entrada.

En las diversas industrias es necesario gestionar diversas variables al mismo tiempo, por lo que se requiere su control para preservar los valores necesarios para los procesos industriales. De ahí, la relevancia de los sistemas de control automático (Hernandez, 2010).

Los elementos clave de un sistema de control permiten el manejo de los siguientes elementos:

- **Sensor:** Facilita la recolección de valores de variables relevantes del sistema bajo análisis.
- **Detector de errores o Comparador:** Comparan la señal de referencia que se introduce a la planta con la señal de retroalimentación que proviene de la planta, y luego contrastan este error o diferencia entre el operando anticipado y su valor real en el sistema. Al hacer esto con una señal de error, el sistema finalmente llega al estado deseado.
- **Accionador o actuador:** Es un dispositivo que capta energía eléctrica y, a través de eso, multiplica la energía (por ejemplo, en el caso de actuadores hidráulicos con motores); su funcionamiento produce algún efecto real en un proceso. Un actuador recibe una señal de su controlador y luego, en base a ellas, impulsa un elemento de control final como una válvula.

4.1.7 *Controladores PID (proporcionales, integrales y derivativos)*

Cada PID es un elemento de control tradicional compuesto por tres componentes:

- Proporcional.
- Integral.
- Derivativo.

Aunque las tres condiciones no son absolutamente necesarias para que todos los controladores estén presentes al mismo tiempo, todavía hay lugares donde se pueden encontrar controladores PI o PD.

Es un dispositivo simple que también es fácil de construir. Como este tipo de controlador está relacionado con la retroalimentación de la planta, al rectificar señales siempre en tiempo real, debería dar respuestas satisfactorias; sin embargo, las cosas son diferentes con él. Es un elemento de control estable; no es necesario conocer su funcionamiento interno (Mazzone, 2002).

Es muy importante contar con un controlador PID en la ingeniería de control ya que generalmente es utilizado para garantizar que el sistema o planta funcionan según lo planificado y examinan varias funciones, seguidamente se ilustra en la **Figura 5**. La popularidad del controlador PID principalmente está basada en su solidez, efectividad y facilidad, factores que lo hacen un elemento esencial para la ingeniería y la automatización (Cienciasfera, 2022).

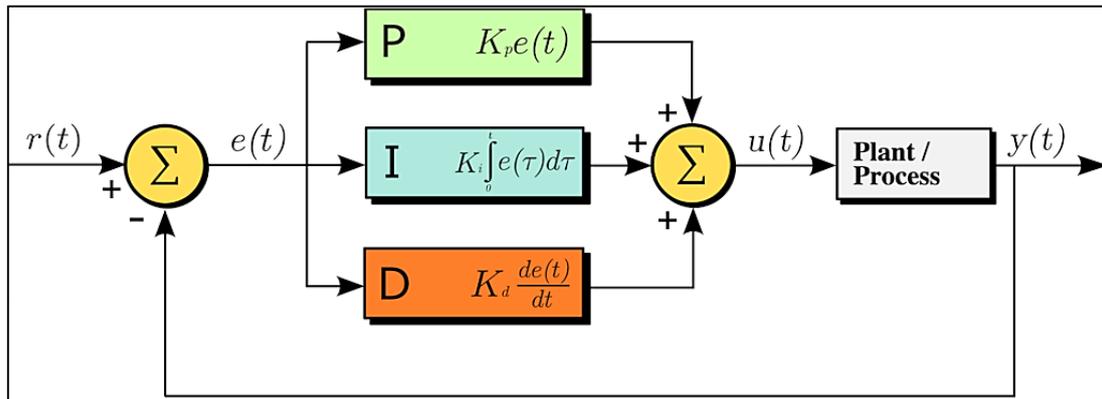


Figura 5. Diagrama de bloques de un controlador PID.

Fuente: (Smith, 2024).

El objetivo principal de un controlador PID es disminuir el error en fase estacionaria de una planta mediante el ajuste de tres parámetros que son; proporcional, integral y derivativo. Estas ganancias se ajustan tomando en cuenta el estudio de la respuesta en base a la frecuencia y ubicación de las raíces del sistema a controlar. Por seguidamente, se da a conocer los conceptos específicos para utilizar un controlador PID en un prototipo Ball y Beam:

- **Acción Proporcional.** Esta acción de control, como su nombre lo menciona, es proporcional a la señal de error $e(t)$. Esta acción proporcional es la que se encarga de multiplicar internamente la señal de error por una constante K_p misma que se encarga de establecer la cantidad de acción proporcional que el controlador va a tener. Esta técnica de control trata de reducir al mínimo el error del sistema. Cuando el error es grande, la acción de control es considerable y trata de reducir el error. Si se incrementa la acción proporcional K_p ocasiona los siguientes efectos: la rapidez de reacción del sistema aumenta, suele incrementar el error del sistema, puede modificar la estabilidad del sistema.
- **Acción integral.** Esta acción de control es la encargada de calcular la integral de la señal de error $e(t)$ multiplicarla por la constante K_i . Se puede observar la integral como la suma de la señal de error. Según el tiempo va transcurriendo, los pequeños errores aumentan para hacer que la acción integral cada vez sea

más grande. Esto ayuda a disminuir el error de la planta en régimen permanente. Una de las desventajas de utilizar la acción integral está basada en que esta añade cierta inercia a la planta y, en consecuencia, aumenta la inestabilidad del sistema.

Si se llega a incrementar la acción integral K_i produce los siguientes efectos: la falla del sistema en el sistema permanente aumenta, actúa en la inestabilidad de la planta, la velocidad del sistema aumenta levemente.

- **Acción Derivativa.** Esta acción de control es ajustada a la derivada de la señal de error $e(t)$ y es multiplicada por la constante K_d . El error derivado es otra designación para la "velocidad" del error. Seguidamente, se expresará por qué resulta muy importante determinar esta velocidad. Incrementar la constante de control derivada K_d produce los siguientes efectos: la solidez del sistema regulado va a aumentar, la velocidad del sistema tendrá una reducción leve, el error en el sistema seguirá siendo igual.

Recurrir a un controlador PID en un sistema ball y beam resulta ser una alternativa viable, ya que principalmente su función es facilitar el control de manera estable y exacta en un sistema que es inestable. Tomar en cuenta el uso de las acciones proporcional, integral y derivativa facilita las acciones del sistema con la disminución de errores. De tal manera que se genera un sistema donde la bola se puede mantener en la posición deseada de manera fiable.

4.1.7.1 Aplicaciones comunes del controlador PID

Según Smith (2024), en el sitio web DEWESoft menciona que los controladores PID se utilizan en sistemas de bucle cerrado donde se requiere un control preciso de los procesos. Algunas de las principales aplicaciones incluyen:

- Los reguladores PID se emplean ampliamente para controlar la temperatura, que incluye sistemas de calefacción, refrigeración y HVAC. En estos, contribuyen a conservar temperaturas exactas en ambientes como procesos industriales, edificaciones y sistemas de control climático.
- Los reguladores PID son esenciales en la automatización industrial para regular parámetros como la presión, el flujo, el nivel y el pH en procesos productivos como el tratamiento químico, el tratamiento del agua y la elaboración de alimentos.
- En sistemas de control de movimiento y robótica, los controladores PID controlan la velocidad del motor, la posición y el par, garantizando un movimiento preciso y suave

en usos como máquinas CNC, brazos robóticos y vehículos automatizados guiados (AGV).

- Varios programas de control de procesos emplean controladores PID para controlar la presión, el nivel y la composición en sistemas tales como refinerías de petróleo, plantas energéticas y plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Las aplicaciones electrónicas emplean controladores PID para funciones como la regulación del voltaje, la gestión de motores y la transformación de energía en usos que abarcan desde fuentes de energía hasta reguladores de motores.
- Los sistemas de automoción utilizan controladores PID para controlar el motor, controlar el cruce, los sistemas de frenos antibloqueo y controlar la transmisión automática, mejorando así la seguridad, la eficiencia del combustible, las emisiones y el desempeño del automóvil.
- En el ámbito de la automatización agrícola, los controladores PID se emplean para la regulación del clima en invernaderos, la administración del riego y los sistemas de nutrición del ganado, garantizando condiciones ideales de crecimiento y uso de recursos.
- Los reguladores PID se emplean en la ingeniería biomédica y múltiples aparatos médicos para administrar fármacos, controlar la temperatura del paciente y regular la glucosa en la sangre en bombas de insulina, incubadoras y dispositivos de anestesia.

4.1.7.2 Ajuste de parámetros PID

En la actualidad, más de la mitad de los controladores empleados en el sector industrial son de tipo PID. Antiguamente, gran cantidad de estos controladores eran analógicos; no obstante, gran cantidad de los controladores contemporáneos emplean señales digitales y ordenadores. Cuando se cuenta con un modelo matemático de un sistema, es posible establecer de manera explícita los parámetros del controlador. No obstante, cuando no se dispone de un modelo matemático, los parámetros deben establecerse de manera experimental. El proceso de sintonización del controlador consiste en establecer los parámetros del controlador que generan la salida requerida. La modificación del controlador facilita la mejora de un proceso y reduce la discrepancia entre la variable del proceso y su punto de ajuste.

Tomando como referencia un motor, para describir un motor, se necesita entender cómo cambia su velocidad al aplicar un voltaje u otro, y cuán velozmente se altera la velocidad frente a las variaciones de voltaje. Esta parte debe realizarse con un sistema lo más próximo al final si no es posible hacerlo con el verdadero. En otras palabras, si nuestro motor será el que mueva

un siguelíneas, los resultados serán más similares a la realidad si se efectúan moviendo el mismo siguelíneas o un peso similar en lugar de mover el motor en vacío (Picó, 2023).

4.1.7.2.1 Método Ziegler-Nichols

Los métodos de ajuste del controlador comprenden el método de prueba y error, así como los métodos de curva de reacción del procedimiento. Los métodos más habituales para sintonizar controladores son los de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon. Frecuentemente, estos procedimientos se emplean cuando el modelo matemático del sistema no está accesible. El procedimiento Ziegler-Nichols puede aplicarse tanto en sistemas de bucle cerrado como abierto, en cambio, el procedimiento Cohen-Coon suele ser utilizado en sistemas de bucle abierto. Un sistema de control de ciclo cerrado es un sistema que emplea el control de feedback. En un sistema de ciclo abierto, no se compara la entrada con la salida (Bhasin et al., 2023).

La **Ecuación (1)** muestra el algoritmo PID.

$$u(t) = K_c \left(\epsilon(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t \epsilon(t') dt' + \tau_d \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right) + b \quad (1)$$

Donde:

u es la señal de control.

ϵ es la diferencia entre el valor actual y el punto de ajuste.

K_c es la ganancia para un controlador proporcional.

τ_i es el parámetro que escala el controlador integral.

τ_d es el parámetro que escala el controlador derivado.

t es el tiempo necesario para la medición de errores.

b es el valor de punto de ajuste de la señal, también conocido como sesgo o offset.

4.1.7.2.2 Método Cohen y Coon

Se resume como un método de ajuste para los controladores PID que es sugerido por investigadores cuya meta principal es encontrar un ajuste para procesos con retrasos más grandes.

Dicho de otra manera, con un factor de incontrolabilidad (σ/τ) mayor a 0.3, tal como se puede analizar en el método de Ziegler y Nichols. Esta forma de ajuste tiene como fin conseguir una configuración óptima para procesos que presenten retrasos mayores (Cohen & Coon, 1953).

Este método se puede describir como una técnica de ajuste que fue creada para procesos con grandes retrasos, y es generalmente es utilizado en los controladores P, PI y PID. Este método es una adaptación para sistemas de primer orden frente a variaciones sensibles, lo que

puede facilitar y dar una mejora a la curva de respuesta que se encontraba en el método Ziggler y Nichols. El controlador PID es un diseño en el que el mecanismo debe facilitar los valores pertinentes cuando el evento lo estime apropiado. Para el requisito de diseño, posee una razón de declinación de $1/4$ y un factor de inflexibilidad entre 0.6 y 4.5. Para conseguir una respuesta moderada del proceso, este factor se puede sacar de la correlación entre el retraso y la constante de empleo, este procedimiento no tiene permitido ser relacionado con un sistema de primer orden ya que las oscilaciones y error mínimo deben ser nulas. Es de suma importancia mencionar que este método tiene un ajuste sólido para valores inferiores a 2, ya que el método de Cohen y Coon fue analizado para sistemas de retraso mayor, fundamentándose en una curva de respuesta con menor perturbación, tal como se produce en el método de Ziggler y Nichols (Bhasin et al., 2023).

La propuesta de Cohen y Coon es reducir la ganancia proporcional al sistema, con el aumento del tiempo integral y hacer una reducción al tiempo derivativo. Esto se realiza para que el sistema de nuestro proceso tenga una respuesta pausada. Por tal motivo, al hacer estas alteraciones, las ganancias en función de las condiciones que se desea que se encuentre el proceso se irán incrementando.

4.1.8 Control difuso

Una particularidad del control difuso es que ha revolucionado el diseño del sistema de control mejorando la precisión en la automatización durante varios años. Este método fue establecido con el fin de manejar la incertidumbre y la imprecisión de sistemas confusos. El control difuso está basado en el concepto de utilizar datos imprecisos para la toma de decisiones de forma similar a la forma en que los seres humanos realizan la toma de decisiones. Este método es efectuado en una gran diversidad de aplicaciones, desde la gestión de procesos industriales, hasta los vehículos autónomos (Serrano, 2018).

El control difuso es una práctica del Control Inteligente que realiza la toma de sus decisiones por medio de un sistema de inferencia basado en lógica difusa. Es un controlador Difuso que es de carácter no lineal y existen varios tipos, normalmente se puede establecer un conjunto de combinaciones elementales cuya conducta es similar a la de los controladores habituales de tipo Proporcional (P), Integral (I) o Derivativo (D). Estos controladores se fundamentan en el proceso que se lleve a cabo sobre la señal de error anterior a su ingreso al sistema de inferencia difuso.

4.2 Tipos del diseño de sistema barra esfera

Hay variedad de opciones de modelo para el diseño del sistema de Ball & beam en el área de los sistemas de control automático. En el siguiente apartado, se muestran algunas de los diferentes modelos de diseño más comunes:

4.2.1 Esfera y viga modelo CE 106

La máquina induce una plataforma inclinada para una bola en un lado, y un mecanismo de inclinación está instalado en el otro extremo. Para iniciar un péndulo mucho más grande, los servomecanismos proporcionados por el motor también se utilizan en la comunicación y control del equipo binario. El dispositivo de esfera y viga revela algunos de los desafíos de control para sistemas inestables como un cohete o un misil en lanzamiento, lo que requiere este tipo de esfuerzo para evitar que se salga de equilibrio o se vuelque.

Para evitar que esto ocurra en un cohete moderno o en una nave espacial, es inevitable, pero explícito desde la teoría. Este dispositivo consta de una esfera de acero que se mueve sobre dos vigas paralelas, ubicadas en una base que rota en su centro. El ángulo de la viga es controlado por un servomotor; y los sensores calculan el ángulo de las vigas, así como las posiciones de todas las esferitas debajo de ellas. El desafío del diseño del Controlador Principal así es el resultado de regular el ángulo para mantener la bola en su lugar.

4.2.2 Esfera viga ACROME

En otro invento, el actuador pasivo esférico y la autoridad del haz establecen una distribución continua que transporta la fuerza de lado a lado. La inclinación del haz es controlada por un servomotor, que es responsable del movimiento de la esfera. Este sistema permite construir un bucle de prueba de control basado en él. En un entorno tridimensional así, la esfera se mueve tanto hacia adelante como hacia atrás a lo largo de la capa superior de esta construcción alargada, mientras que un servo se utiliza para controlar su ángulo de deflexión. Este diseño particular de la configuración esfera y haz nos permite experimentar con teorías de control en un ciclo cerrado. Este motor emplea, en lugar de dispositivos mecánicos, electrónica ordinaria para el control. (ACROME, 2022).

4.2.3 Esfera viga QUANSER

Se ha propuesto como una herramienta adecuada para la realización de algunas estrategias de diseño de control en el momento en que el sistema de lazo cerrado no está cerrado o es inestable. Se utiliza para demostrar los desafíos en el control del mundo real, como la estabilización de aeronaves. El módulo de Bola y Viga, unido a una unidad principal de servo rotatorio, tiene una barra de acero larga dispuesta paralela a un resistor de alambre enrollado.

La esfera de metal puede deslizarse a lo largo de este resistor para crear un camino. (QUANSER, 2022).

4.2.4 Modelado del experimento de esfera y viga

La esfera es introducida en la viga mediante un sistema nombrado esfera-viga, que está basado en la dinámica del movimiento de la bola en el plano horizontal. Este enfoque es utilizado comúnmente en el campo de los sistemas de control cuya finalidad es explicar principios teóricos y realizar experimentos prácticos, como se representa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Este sistema permite que la bola ruede a lo largo de la viga con un grado de libertad en el punto de impacto. Se adjunta una palanca a un extremo de la viga, que transmite la fuerza al otro extremo. Cuando el servo gira al ángulo θ , el brazo cambia el ángulo del haz a α . Este cambio de ángulo con respecto a la vertical hace que la pelota se mueva a lo largo de la raqueta bajo la influencia de la gravedad. El controlador desarrollado para este sistema tiene la capacidad de controlar la posición de la pelota (Ortiz, 2004).

Según Buza et al., (2020) la conceptualización del modelo de prueba que involucra una esfera y una viga es llevado a cabo a través de la aplicación de los principios de la mecánica y la dinámica. Los elementos clave que desempeñan un papel esencial en este modelo son los siguientes:

- **Esfera:** Se refiere a una masa en movimiento en un radio, considerando su posición y velocidad como factores esenciales en el sistema. Las fuerzas que afectan la esfera comprenden la gravedad, la fricción y la fuerza ejercida en una dirección determinada.
- **Viga:** Se refiere a la estructura horizontal que permite el movimiento de la esfera. En el modelado, elementos tales como la radio y la masa de la viga son esenciales. Además, el radio puede tener restricciones físicas, tales como limitaciones en su movimiento o en el sentido en el que la esfera se mueve.
- **Actuador:** Este elemento se encarga de ejercer la autoridad sobre el sistema. Puede ser un motor, un electroimán u otro aparato que pueda afectar el movimiento de la esfera.
- **Sensor:** Realiza el papel de cuantificar tanto la ubicación como la velocidad de la esfera. Es un aparato como un sensor de ubicación, un sensor de ángulo u otro dispositivo que puede registrar variables significativas del sistema.

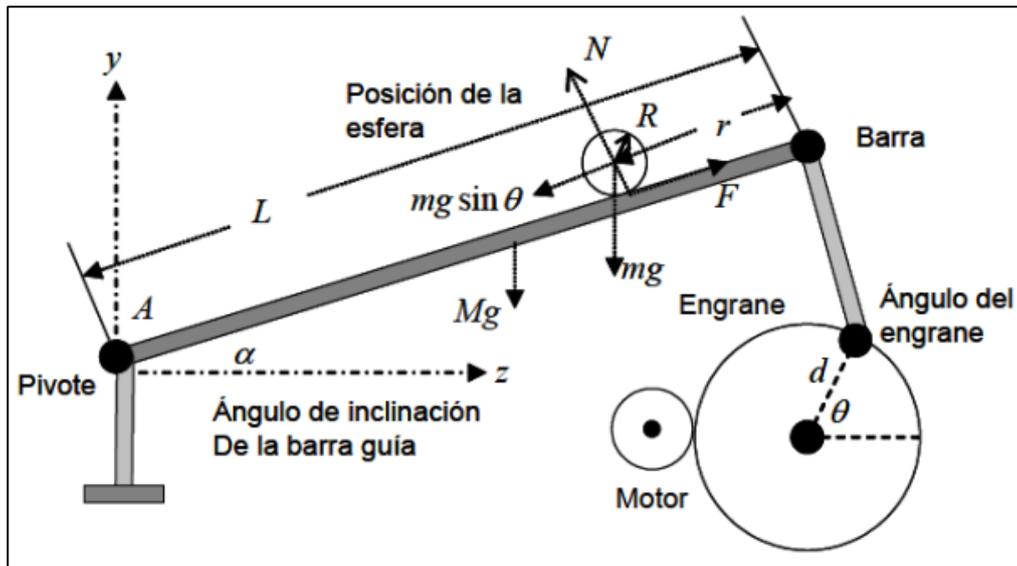


Figura 6. Ejemplo de modelo experimental.
Fuente: (Vivanco, 2022).

4.3 Modelado del sistema

4.3.1 Modelado teórico

4.3.1.1 Modelado matemático del sistema Ball & Beam

El sistema Ball & Beam es un problema de control tradicional en el que el objetivo es mantener el balance de una bola sobre una viga a través de la modificación del ángulo de inclinación de la misma. Para lograrlo, este modelado matemático se fundamenta principalmente en la señal de entrada que emite el sensor (distancia), una señal de salida que emite el servomotor (ángulo de inclinación) y la masa de la pelota. Para estudiar la dinámica del sistema, es vital establecer las ecuaciones que explican el movimiento de la bola ante variaciones en el ángulo de la viga y la distancia de la bola a su punto de equilibrio.

El motivo por el cual se utiliza la fórmula lagrangiana para desarrollar las ecuaciones de movimiento está basado en las ventajas que facilita ésta frente a las ecuaciones de Newton. Por definición, la diferencia entre las energías cinética y potencial representan la lagrangiana de un sistema, considerándose por tanto un escalar (Obando & Romero, 2010).

Además, mientras que con el procedimiento de Newton se coloca la atención sobre el agente externo que actúa sobre el objeto (la fuerza), con el de Lagrange se operan magnitudes ligadas al cuerpo (energías cinética y potencial). Este hecho es principalmente importante por variedad de motivos. Como primer punto, hace que la lagrangiana de un sistema no tenga variabilidad ante los cambios de coordenadas. Lo cual permite pasar del espacio ordinario (donde las ecuaciones de movimiento pueden llegar a ser muy complicadas) a un espacio de configuraciones elegido de tal forma que se puede llegar a una simplificación máxima. Como

segundo punto, es necesaria establecer de forma clara las fuerzas que actúan sobre el objeto, cosa que a veces resulta imposible (Villafuerte et al., (2018).

Según Obando y Romero (2010), para el modelo del sistema ball and beam, se usa la ecuación de Lagrange. Dado que el actuador del sistema es un servomotor y no hay elasticidad, no hay energía potencial en el sistema. Por lo tanto, la lagrangiana está compuesta únicamente por la energía cinética, y se expresa como:

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

Dado que los sensores del sistema miden la posición traslacional de la esfera x y la posición angular ω , es necesario representar el modelo del sistema utilizando estas dos variables. Por lo tanto, es esencial establecer las relaciones entre r , ω y x . A partir de estas relaciones, se puede expresar la distancia recorrida mediante:

$$x = r\varphi \quad (2)$$

Donde:

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

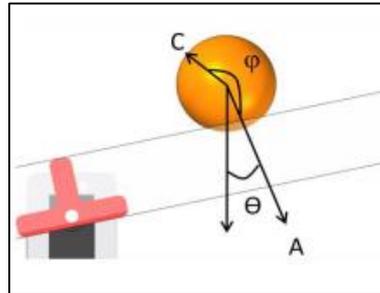


Figura 7. Viga bola en movimiento.
Fuente: (Smith, 2024).

El ángulo completo de la esfera es la suma del ángulo de la esfera respecto al eje de la barra (ϕ) y el ángulo de la barra (θ). La velocidad de rotación de la esfera está dada por la siguiente fórmula (Ortiz, 2004):

$$\omega = \varphi + \dot{\theta} = \frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \quad (3)$$

La velocidad traslacional de la esfera está dada por;

$$v = \sqrt{(\dot{x})^2 + (x\dot{\theta})^2} \quad (4)$$

Utilizando las ecuaciones para la velocidad rotacional y traslacional en el Lagrangiano, se obtiene,

$$L = \frac{1}{2}m \left((\dot{x}^2 + (x\dot{\theta})^2) + \frac{1}{2}I_b \left(\frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \right)^2 + \frac{1}{2}I_a \dot{\theta}^2 - mgx \sin \theta \right) \quad (5)$$

Entonces la ecuación de Lagrange para el sistema Ball and Beam;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d}{dx} L \right) - \frac{d}{dx} L = mg \sin \theta \quad (6)$$

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene:

$$\left(m + \frac{I_b}{r^2} \right) \ddot{x} + \left(\frac{I_b}{r^2} \right) \ddot{\theta} - mx\dot{\theta}^2 = -mg \sin \theta \quad (7)$$

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

Partiendo del modelo no lineal del sistema se convierten en cero las derivadas con respecto al tiempo de forma que:

$$0 = mg \sin \theta \quad (8)$$

La solución de la ecuación anterior es $n\pi$ con $n=0,1,2,\dots$. Dado que la barra del modelo físico solo puede rotar en el intervalo $[-\pi, \pi]$, se toma como solución el ángulo para $n=0$. Además, es importante observar que la solución no depende de la posición de la bola.

A partir del punto de equilibrio y linealizando alrededor de las proximidades de este punto, obtenemos;

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

Por lo tanto, las derivadas de orden superior de esta variable se consideran despreciables, de tal manera se sigue con la obtención de la ecuación de diferencia:

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

Al aplicar la transformada de Laplace y considerando que las condiciones iniciales son cero, se obtiene:

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

Donde se dice que el sistema se puede considerar como un integrador doble. Al reemplazar los datos, se pudo obtener:

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

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

Es importante mencionar que cuanto más preciso sea el modelo en relación con el sistema real, será necesario agregar más parámetros físicos para representar las características del sistema. Estas variables, que se traducen en parámetros de las ecuaciones diferenciales del modelo, aumentan la complejidad del mismo, lo cual en muchas ocasiones resulta inapropiado (Ortiz, 2004).

4.4 Sensores de proximidad

Un sensor de proximidad es un aparato capaz de identificar la cercanía o la existencia de objetos próximos sin requerir interacción física. Incorpora variedades como sensores inductivos, capacitivos, fotoeléctricos y magnéticos, todos ellos operan a partir de distintos fundamentos como la inductancia y la producción de corrientes parásitas. Posteriormente, se describen los tipos de sensores de proximidad que existen (GEYA, 2022).

4.4.1 Sensor de proximidad inductivo

Un sensor de proximidad inductivo puede llegar a detectar objetos metálicos que se aproximan al sensor, sin tener contacto físico con el mismo. Los sensores de proximidad inductivos están clasificados más o menos en los siguientes tres tipos, de acuerdo con su principio de funcionamiento: el tipo magnético que emplea un imán; el tipo de capacitancia; y el tipo de oscilación de alta frecuencia que utiliza la inducción electromagnética que aprovecha los cambios en la capacidad eléctrica (KEYENCE, 2023). En la **Figura 8** se muestra el sensor de proximidad inductivo .



Figura 8. Sensor de proximidad inductivo
Fuente: (GEYA, 2022)

Cabe mencionar que los sensores inductivos sobresalen por su destreza para realizar su función en entornos desfavorables, ya que manifiestan una notable capacidad para resistir la

presencia de aceite, suciedad y humedad. Es por ello que son ampliamente utilizados en distintas áreas como: la industria, el sector automotriz y en maquinaria industrial.

4.4.1.1 Tipos principales

4.4.1.1.1 *Sensor general inductivo*

Según la información obtenida por Keyence 2023, se menciona que la bobina L en el circuito de oscilación generará un campo magnético de alta frecuencia. Cuando un objeto esté cerca del campo magnético, se inducirá una corriente inducida (corriente parásita). el objeto debido a la inducción. inducción electromagnética. Cuando un objeto se acerca al sensor, la corriente inducida aumenta, provocando un aumento en la carga en el circuito oscilador. Esto da como resultado una reducción o amortiguación de las oscilaciones. El sensor utiliza un circuito de detección de amplitud para detectar cambios en la vibración y envía una señal de detección.

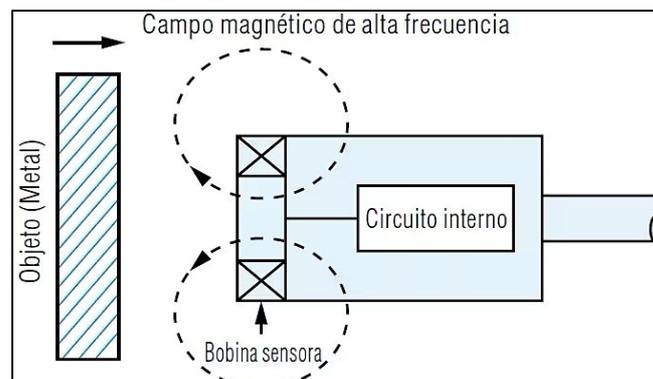


Figura 9. Diagrama sensor general inductivo.

Fuente: (KEYENCE, 2023).

4.4.1.1.2 *Tipo metal no ferroso*

El tipo de metal no ferroso se incluye en el tipo de oscilación de alta frecuencia mismo que tiene un circuito de oscilación, en donde se puede notar la pérdida de energía que es causada por la corriente de inducción que circula en el objeto, afecta en el cambio de la frecuencia de oscilación. Cuando un objeto de metal no ferroso (tal como el aluminio o cobre) se aproxima al sensor, la frecuencia de oscilación aumenta. Por otro lado, cuando un objeto de metal ferroso (tal como el hierro) se acerca al sensor, la frecuencia de oscilación disminuye. Cuando la frecuencia de oscilación se vuelve mayor que la de referencia, el sensor emite una señal de detección.

4.4.2 *Sensor de proximidad capacitivo*

Los sensores de proximidad capacitivos son dispositivos electrónicos que se activan cuando algún objeto, ya sea vidrio, granos o incluso líquidos, se aproximan en su área de

detección, lo que ocasiona una alteración en su estado lógico **Figura 10**. A pesar de ser similares a los sensores de proximidad inductivos, su distinción radica en su principio de funcionamiento, que se fundamenta en la modificación de la capacitancia de la placa sensora ubicada en la región designada como área sensible (Weg, 2023).



Figura 10. Sensor de proximidad capacitivo.
Fuente: (GEYA, 2022).

Es importante mencionar que los sensores de proximidad capacitivos tienen aplicación en un sinnúmero de ámbitos, incluyendo desde procesos de producción de alimentos y bebidas, el manejo de materiales, el monitoreo de niveles, hasta los sistemas de control de automatización y variedad de medios industriales. Dentro de la electrónica, este tipo de sensor de proximidad se emplea en diferentes funciones, así como la detección en dispositivos móviles o tabletas.

4.4.3 Sensor ultrasónico.

Un sensor ultrasónico se define como un componente electrónico que puede capturar y generar ondas sonoras de frecuencia ultrasónica, es decir, estas ondas se encuentran fuera del alcance auditivo humano. Estas ondas generadas se llegan a propagar a través del aire y, al localizar un objeto, estas se reflejan de vuelta hacia el sensor. Para luego mediante un análisis del tiempo que el sensor tarda en recibir este eco, este puede calcular la distancia al objeto que se requiere (Pérez & Roldan, 2017).



Figura 11. Sensor de proximidad ultrasónico.

Fuente: (Leantec, 2019).

En diversos campos como la robótica, sistemas de detección y evasión de obstáculos, sensores de estacionamiento y automatización industrial, entre otros se puede llegar a utilizar sensores de proximidad ultrasónicos. Su principal característica se destaca en la capacidad para detectar oscilaciones, lo que los convierte en una opción factible para aplicaciones de monitoreo de oscilaciones.

4.4.3.1 Especificaciones técnicas

Voltaje de Operación: 5 V DC.

Corriente de reposo: < 2 mA.

Corriente de trabajo: 15 mA.

Rango de medición: 2 cm a 450 cm.

Precisión: +- 3 mm.

Ángulo de apertura: 15°.

Frecuencia de ultrasonido: 40 kHz.

Duración mínima del pulso de disparo TRIG (nivel TTL): 10 μ S.

Duración del pulso ECO de salida (nivel TTL): 100-25000 μ S.

Dimensiones: 45×20×15 mm.

Tiempo mínimo de espera entre medida y el inicio de otra 20 ms (recomendable 50 ms).

4.4.3.2 Conexión.

VCC (+5 V DC).

TRIG (Disparo del ultrasonido).

ECHO (Recepción del ultrasonido).

GND (Tierra: 0 V).

Cuando se necesita revelar la presencia de un objeto que se encuentra en movimiento en un entorno sin obstáculos, este sensor tiende a mostrar resultados más precisos. El ángulo

de propagación de las ondas de sonido que este emite se aproxima a los 30 grados. Pero surge un inconveniente, si en el área de detección del sensor existieran otros objetos presentes, el sensor mostraría problemas para distinguir el objeto que se está detectando. Este problema se presenta comúnmente con las barras del sistema "ball and beam" que se ha construido, en cierto modo las ondas de ultrasonido tienden a rebotar en los primeros centímetros de las vigas, esto significa un problema de gran magnitud al momento de intentar detectar con precisión la posición de la bola. Por tal razón, se decide descartar el uso de este dispositivo.

4.4.4 Sensor de proximidad óptico

Los sensores opto electrónicos (**Figura 12**), utilizan elementos fotoeléctricos emisores para generar luz, mientras que los componentes fotoeléctricos receptores se encargan de captar estas emisiones de luz (Torres & Fernández, 2020).



Figura 12. Sensor de proximidad óptico.
Fuente: (GEYA, 2022).

Es de suma importancia tener en cuenta que este tipo de sensores ópticos de proximidad presentan una variedad de aplicaciones en las que incluyen la medición de nivel en líquidos, la determinación de la posición en máquinas y procesos automatizados. También, son utilizados para detectar metales en sistemas de seguridad y dispositivos de control de acceso. Asimismo, este tipo de sensor se han llegado a implementar en sistemas de navegación para drones y vehículos.

4.4.5 Sensor de proximidad infrarrojo TOF 10120

El sensor TOF10120 (**Figura 13**) es caracterizado por ser un dispositivo que proporciona una medición de distancia de largo alcance y precisa, utiliza luz infrarroja como recurso principal para calcular distancias con suma precisión. La función principal de este sensor es emitir pulsos de luz infrarroja, los mismos que son reflejados por el objeto y regresan al sensor, de este modo procede a calcular la distancia basándose en el tiempo que tarda el pulso de luz de ida y vuelta. Este sensor es reconocido por su exactitud y fiabilidad, el

TOF10120 es utilizado en una variedad de campos, en la que se incluye la detección de objetos y la navegación de sistemas autónomos como robots y drones.



Figura 13. Sensor TOF 10120.

Fuente: (Amazon , 2023).

Acerca del sensor:

En el sitio web Amazon (2023), se da a conocer información de suma importancia acerca del sensor TOF 10120:

- El sensor TOF10120 es capaz de realizar mediciones precisas a largas distancias y está diseñado específicamente para el enfoque automático (AF) de alta velocidad. Su innovadora tecnología de tiempo de vuelo asegura un rendimiento constante, sin importar la reflectancia del objeto.
- Este sensor utiliza la tecnología de detección de tiempo de vuelo con SPAD (Diodos de Avalancha de Fotón Único) originales de Sharp, implementados en un proceso CMOS estándar y de bajo costo. Esto garantiza resultados de rango precisos, mayor inmunidad a la luz ambiental y una robustez superior ante interferencias ópticas, como la diafonía en vidrios de cobertura, gracias a su diseño óptico especializado.
- Sus aplicaciones son variadas, incluyendo AF de alta velocidad, AF continuo para vídeo, detección de usuarios en dispositivos informáticos como computadoras personales, portátiles y tabletas, así como en robótica para la detección de obstáculos. También se emplea en la detección automática de electrodomésticos como grifos y refrigeradores.
- Este sensor funciona con una única fuente de alimentación y cuenta con una interfaz UART I2C para el control de dispositivos y la transferencia de datos. Además, cumple con los estándares de protección ambiental sin plomo y es compatible con RoHS.

El sensor TOF 10120 tiene seis pines de conexión que se muestran en la **Figura 14**.

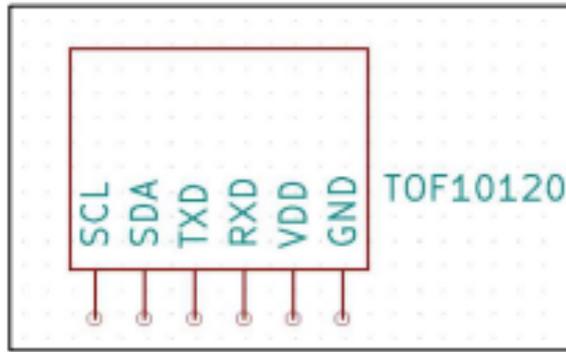


Figura 14. Pines sensor TOF 10120.
Fuente: (Vivanco, 2022).

La tabla muestra los pines de conexión del sensor y la función que cumple cada uno.

Tabla 1. Pines de conexión sensor TOF10120

PIN	NOMBRE DEL PIN	FUNCIÓN
1	GND	Tierra de energía
2	VDD	Fuente de alimentación positivo 3-5 V
3	RXD	Salida serie TTL del nivel RXD de la entrada del puerto TTL de la entrada de la entrada de RXD
4	TXD	Salida TXD salida de puerto serie TTL nivel TXD OUTPUT TTL
5	SDA	Entrada SDA/salida de datos TTL nivel I2C TTL de entrada de SDA/salida de datos TTL de entrada I2C
6	SCL	Salida SCL SALIDA I2C datos TTL nivel I2C CLK OPUTPUT TTL

Fuente: (Vivanco, 2022)

Seguidamente, en la **Figura 15** se muestra la conexión del sensor TOF10120 en la placa de Arduino.

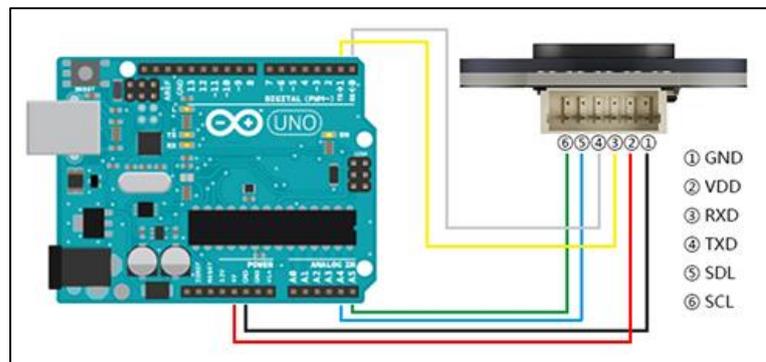


Figura 15. Conexión con sensor TOF10120 en Arduino.
Fuente: (Amazon, 2018).

Características:

- Láser de 940 nm.

- Pequeño paquete de cerámica (20×13.2×2.0.000 pulgadas)-
- Medición de rango absoluto de largo alcance hasta 5.9 pies con un 5% de precisión en interiores.
- El rango informado es independiente de la reflectancia del objetivo.
- Funciona en altos niveles de luz ambiental infrarroja.
- Compensación óptica avanzada de conversación cruzada.
- Velocidad máxima de respuesta de 30 ms.
- Compatible con el proceso de soldadura estándar de reflujo.
- Fuente de alimentación única.
- Interfaz UART I2C para el control del dispositivo y la transferencia de datos.

Protocolo de comunicación:

- Bits por segundo: 9600.
- Bits de datos: 8.
- Paridad: Ninguno.
- Puntas de parada: 1.
- Control de flujo: Ninguno.

El sensor TOF10120 se podría haber seleccionado como la solución preferida debido a que no tiene componentes expuestos que puedan ser afectados por la acumulación de polvo, además conforme a lo documentado, este sensor destaca por su fiabilidad en las mediciones y su capacidad para abarcar amplios rangos de distancia, desde 4 cm hasta 2 m aproximadamente.

4.4.6 Sensor Sharp GP2Y0A21YK0F

El sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK0F es un detector de objetos a distancia que se encarga de medir la distancia entre el objeto y el sensor mediante un haz de luz constante. El rango de medición o detección del sensor es de 10 cm a 80 cm y tiene una salida de datos analógica. Este sensor se puede conectar a un microcontrolador o a una placa compatible con Arduino.

¿Para qué sirve?

Para proyectos que necesitan medir distancias, como cuando un robot detecta un objeto delante de él, ya sea para esquivarlo o chocarlo, detecta a alguien y acciona una bomba de agua o una luz para iluminar el camino.

Especificaciones técnicas.

- Rango de medición de distancia: 10 a 80 cm.
- Voltaje de alimentación: 4.5 V a 5 V DC.

- Voltaje de salida(analógico): 1V a 3.3 V.
- Corriente de entrada: 30 mA.
- Temperatura de operación: -10 C a +60 C.
- Dimensiones: 29.5 mm × 13 mm × 13.5 mm.

4.4.6.1 Funcionamiento

Utiliza un circuito procesador de señales, un detector sensitivo de posición (PSD) y un diodo emisor de infrarrojos (IRED). El voltaje proporcionado por el dispositivo se corresponde con la distancia de detección.

También se puede usar como un sensor de proximidad mediante software o un comparador. Debido al método de detección utilizado basado en triangulación, las variaciones en la reflectividad de los materiales y la temperatura de funcionamiento no tienen un impacto significativo en cómo funciona este sensor.

$$\text{Distancia (D)} = 27.86 * (\text{lectura en Voltios})^{-1.15}.$$

$$D = 12343.85 * (\text{lectura de un ADC de 10 bits})^{-1.15}.$$

$$D = 4 * 12343.85 * (\text{lectura de un ADC de 8 bits})^{-1.15}.$$

4.5 Servomotores

Un servomotor (**Figura 16**) es un tipo específico de motor diseñado para controlar la posición precisa del eje en un momento dado. Está configurado para girar hasta una cierta cantidad de grados y luego mantenerse estable en esa posición (González, 2016).



Figura 16. Servomotor.
Fuente: (González, 2016).

El motor ubicado dentro de un servomotor es un motor de corriente continua estándar. Su eje está conectado a una caja de engranajes similar a una transmisión, lo que amplifica el torque del motor y posibilita mantener una posición estable cuando sea necesario. Al igual que en un automóvil, a mayor velocidad, menor torque. El circuito electrónico controla el movimiento y la posición del motor.

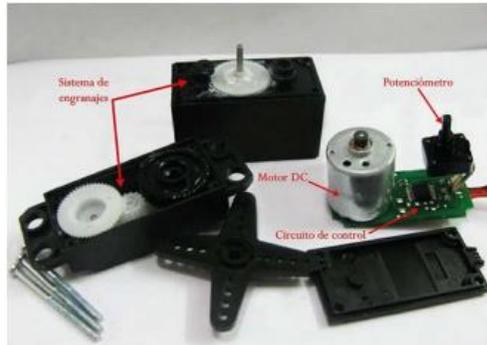


Figura 17. Partes de un servomotor.
Fuente: (González, 2016).

La presencia del sistema de engranajes, como se ilustra en la **Figura 17**, produce una inercia significativamente mayor al mover el eje del motor en comparación con un motor convencional. Al observar las imágenes proporcionadas, se hace evidente que un servomotor no es simplemente un motor por sí solo, sino un conjunto de componentes, incluyendo un motor, que forman un sistema integrado. Los servomotores se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, como la industria, la robótica, impresoras, máquinas CNC, entre otros. En este contexto, nos centraremos en los servomotores utilizados en modelos de robótica, dejando de lado los servomotores de tipo industrial.

4.5.1 Diagrama de bloques de un servomotor

En la **Figura 18** se muestra el diagrama de bloque del servomotor mismo que proporciona una representación visual del servomotor como un sistema integrado. El circuito electrónico recibe la señal PWM y la convierte en movimiento del motor de corriente continua (DC). El eje del motor DC está conectado a un potenciómetro, que actúa como un divisor de voltaje. La salida del divisor de voltaje varía según la posición del eje del motor DC (González, 2016).

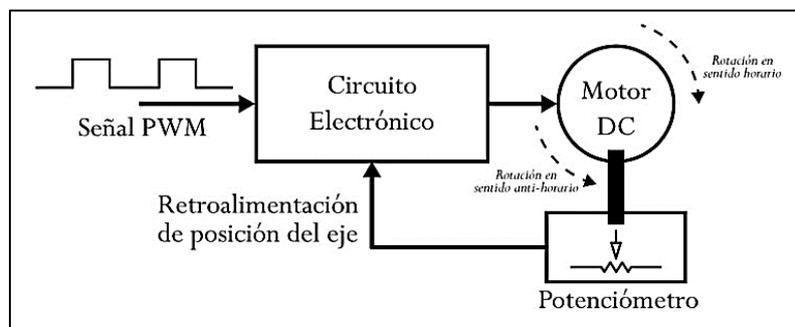


Figura 18. Diagrama de bloques de un servomotor.
Fuente: (González, 2016).

Cuando se trata de controlar servomotores, una pregunta común es cómo indicarles la posición deseada y la velocidad requerida. Existen varios métodos de control, siendo el más común y sencillo el control por pulso y frecuencia.

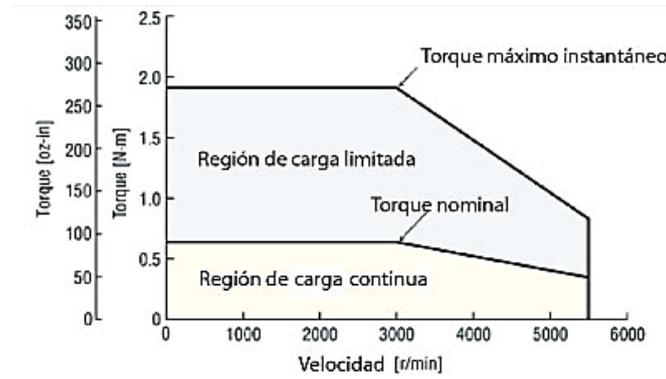


Figura 19. Curva torque característico de un servomotor.
Fuente: (AADECA, 2017).

4.5.2 Consumo de energía

La energía que una carga eléctrica consume se calcula multiplicando la potencia (que resulta del voltaje y la corriente que ingresa a la carga) por el tiempo de funcionamiento del motor. Como los servomotores generalmente reciben energía de voltajes de 4 a 6 voltios, se podría interpretar que el voltaje de alimentación para la mayoría de los modelos es casi invariable. No obstante, la variación entre distintos modelos de servomotores radica en el consumo de energía (González, 2016).

La demanda de corriente de un servomotor se basa en varios factores:

- El fabricante y modelo del servo.
- La inercia asociada al eje del motor, que abarca tanto la inercia del sistema de engranajes como la de la carga conectada al motor.
- La velocidad de rotación aplicada al eje del servo.

Conforme aumente el consumo de energía de un servomotor, incrementará la necesidad de potencia y, consiguientemente, aumentará el consumo de energía. Esto resulta esencial al manejar este tipo de motores mediante un microcontrolador. El uso de energía por parte de un servo generalmente supera la capacidad máxima del microcontrolador, razón por la cual se aconseja el uso de fuentes de energía externas.

4.6 Arduino

Arduino es un aparato de control (**Figura 20**) compuesto por una placa o tarjeta que dispone de una diversidad de conexiones de entrada y salida. Se implementa empleando un lenguaje de programación mediante una computadora.

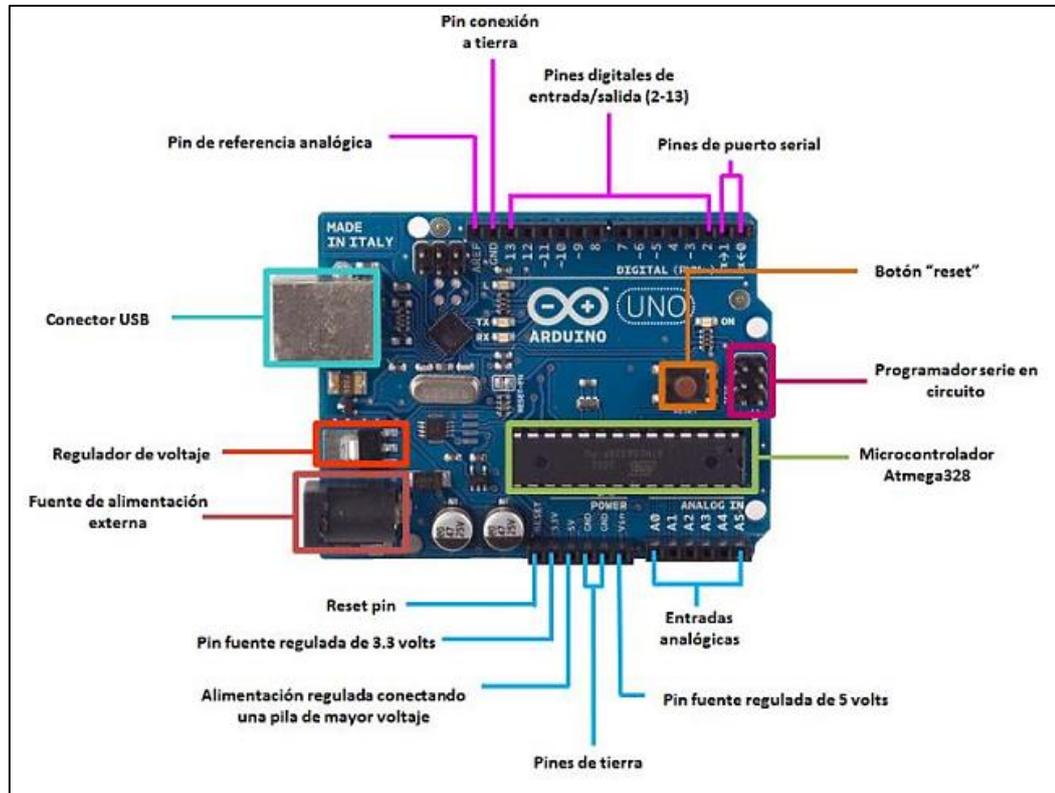


Figura 20. Partes de la placa Arduino.

Fuente: (Navarro & Cartagena, 2022).

Alimentación: La placa Arduino puede ser alimentada mediante dos vías:

- Conexión USB (proporciona 5 V).
- El pin de alimentación, básicamente una batería de 9 V o una fuente de energía, se sugiere que tenga un voltaje de entre 7 y 12 V.

Los **pines de alimentación** tienen la función de suministrar energía a los circuitos de la placa del prototipo, que se conoce como protoboard:

- La fuente de **3.3 V** ofrece una tensión de 3.3 voltios y puede suministrar una corriente máxima de 50 mA.
- La fuente de **5 V** ofrece una tensión de 5 voltios y puede suministrar una corriente máxima de 300 mA.
- El pin **GND**, también conocido como "ground", representa la conexión a tierra o referencia de nivel 0 V.

- **Vin** es aquel que proporciona la tensión máxima con la que está alimentado la placa de Arduino.

Valores de entrada y de salida: dependen del uso que se haga del pin, por lo que tendremos:

- **Entrada y salida digital:** Las salidas pueden presentar valores de 0 V (LOW) o 5 V (HIGH), en tanto que una entrada de 0 a 2 V se considerará como LOW y una de 3 a 5 V se considerará como HIGH.
- **Output analógico:** Las entradas pueden oscilar entre 0 V y 5 V en un espectro de 0 a 255 (con una precisión de 8 bits), presentando valores intermedios.
- **Entrada analógica:** Las entradas tienen un rango de 0 a 5 V (con una precisión de 10 bits), incluyendo valores intermedios.

La **intensidad máxima** de todos estos pines es de 40 mA.

Arduino es una plataforma de código abierto que combina hardware y software sencillo de manipular cuyo fin es la construcción de proyectos electrónicos. Este se compone por una placa de circuito programable (generalmente conocida como microcontrolador) y un software o entorno de desarrollo integrado (IDE) que se instala en la computadora para escribir y cargar el código en la placa física.

Las placas de Arduino tienen la capacidad de leer entradas (como la luz de un sensor o la pulsación de un botón) y convertirlas en salidas (ya sea encender un motor o una luz LED).

En pocas palabras, se le puede decir a la placa qué hacer enviándole instrucciones mediante el lenguaje de programación de Arduino (que está basado en Wiring) y el software de Arduino (IDE, basado en Processing).

Los orígenes de Arduino se remontan al Instituto de Diseño de Interacción de Ivrea, donde se creó como una herramienta sencilla para el prototipado rápido dirigida a estudiantes sin experiencia en electrónica y programación.

Sin embargo, al llegar a una comunidad más amplia, Arduino comenzó a evolucionar para adaptarse a nuevas necesidades y desafíos, diversificando su oferta desde simples placas de 8 bits hasta productos enfocados en el Internet de las cosas (IoT), dispositivos portátiles, impresión 3D y sistemas embebidos. En resumen, Arduino es una tarjeta de desarrollo ideal para proyectos de hardware y de automatización programable que te permite llevar a cabo ideas tanto personales como industriales, haciendo accesible su uso a cualquier persona.

4.6.1 Librerías Arduino

Las librerías son sets de código configurados previamente que facilitan la conexión de dispositivos a Arduino, incluyendo servomotores, pantallas LCD, una gama de sensores, teclados, entre otros. Pese a que el ambiente de desarrollo de Arduino ya cuenta con algunas librerías básicas como Servo y LiquidCrystal, existen numerosas otras que se pueden descargar de manera sencilla desde la red. Estas librerías extra incrementan las capacidades de Arduino al aportar funciones particulares para diversos dispositivos y sensores, posibilitando a los usuarios sacar el máximo provecho a su plataforma de programación (Navarro & Cartagena, 2022).

Una librería es un archivo comprimido tipo ZIP que incluye los siguientes archivos:

- Un archivo .cpp (código de C++).
- Un archivo .h (encabezado de C).
- Un archivo Keywords.txt.
- Una carpeta de ejemplos.
- Muy posiblemente un archivo Readme con información adicional sobre la librería.

4.6.1.1 Librería wire.h

La librería "Wire.h" es una herramienta muy importante en el entorno de Arduino, que fue diseñado con el fin de habilitar la comunicación entre dispositivos mediante el uso del protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit). Con esta herramienta se puede llegar a simplificar la interacción entre periféricos tales como: sensores, pantallas entre otros microcontroladores, que hacen posible el intercambio de datos en ambas direcciones con la utilización de únicamente dos cables de comunicación: SDA (Serial Data Line) y SCL (Serial Clock Line). Gracias a la integración de la librería "Wire.h", los desarrolladores pueden integrar con facilidad la comunicación I2C en sus proyectos de Arduino, obteniendo así acceso a una amplia gama de dispositivos periféricos compatibles con este tipo de comunicación.

4.6.1.2 Librería servo.h

Para controlar que el servomotor se mueva al ángulo que queremos, vamos a usar la biblioteca "Servo.h", que ya está incluida en el programa de Arduino IDE. Esta biblioteca nos deja crear un objeto llamado "Servo", que vamos a llamar "myservo" en el código, y así podemos controlarlo con funciones que ya vienen definidas. Aunque la biblioteca tiene muchas opciones, solo vamos a usar dos de sus funciones, ya que la idea es usar solo lo necesario y hacer el resto del código a mano.

5. Metodología

5.1 Área de trabajo

Este proyecto consistió en la construcción y control de un prototipo denominado Ball & Beam, que está compuesto de un servomotor, un sensor infrarrojo Sharp, una placa Arduino UNO y un sistema de control clásico programado en LabVIEW.

El objetivo fue equilibrar una pelota sobre una viga, tarea que presentó un alto nivel de dificultad.

El servomotor ajustó el ángulo de la viga en función de la posición de la pelota. Posteriormente, un sensor infrarrojo detectó cada movimiento de la pelota en tiempo real y envió estos datos al Arduino, donde son procesados. La placa también se comunica con el software LabVIEW y un algoritmo de control clásico (basado en PID), el cual ajusta la respuesta del sistema para así asegurar que la respuesta del sistema pueda permanecer estable y equilibrada.

5.2 Métodos y materiales

5.2.1 Métodos

Se ha establecido un procedimiento para la ejecución y desarrollo del proyecto mismo que se ha resumido en un diagrama de flujo que se muestra en la **Figura 21**.

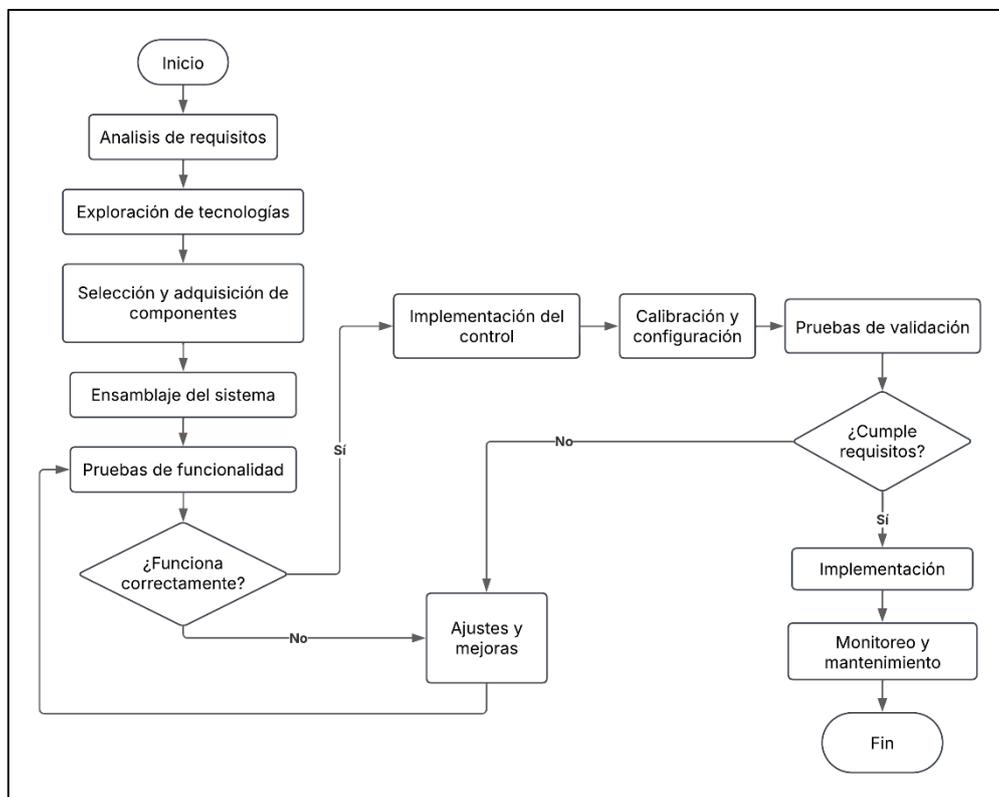


Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento del proyecto.

En el presente diagrama de flujo se representa el procedimiento para el desarrollo del sistema ball & beam mismo que se divide en fases clave. Se empieza con el análisis de requisitos donde se analizan e identifican las necesidades y especificaciones del sistema; seguidamente en la fase de exploración de tecnologías se realiza una indagación completa acerca de sensores, actuadores y métodos de sintonización y control adecuados para el desarrollo del proyecto. Posteriormente se continúa con la selección y adquisición de componentes cerciorando que sean accesibles y funcionen correctamente. Luego, en la fase de ensamblaje se construye el sistema. Por consiguiente, se realizan pruebas funcionales para la detección de posibles fallas, si se detectan errores se procede con la fase de ajustes y mejoras hasta lograr obtener un óptimo rendimiento. Seguidamente se implementa un sistema de control que consta de un controlador PID para continuar con la calibración y configuración con la finalidad de conseguir precisión y estabilidad. A continuación, en la siguiente fase se realizan pruebas de validación en condiciones reales con el fin de corroborar que el sistema cumple con los requisitos para seguir con la fase de implementación. Finalmente, se realiza la fase de monitoreo y mantenimiento para garantizar su correcto funcionamiento conforme transcurre el tiempo.

5.2.1.1 Construir un prototipo del modelo “Ball & Beam.”

Se llevó a cabo la construcción de este prototipo mediante la planificación del diseño mecánico teniendo en cuenta que este debe tener un eje en este caso en una esquina y un sistema de biela y manivela que será el encargado de transmitir movimiento rotativo en una inclinación positiva y negativa en la barra donde la bola rodara y dado que el servomotor que se utilizó es de 180 grados, la posición de 90 grados establecerá la barra de forma horizontal de tal modo que la mínima inclinación se presenta en la posición cero del servomotor, barra horizontal en 90 grados y la inclinación máxima en 180 grados.

5.2.1.1.1 *Diseño del sistema*

Componentes principales

1. **Base sensor:** Se realiza el diseño de la base del sensor donde ira montado el sensor Sharp GP2Y0A21YK0F **Figura 23**.
2. **Base servo:** Se realiza el diseño de la base del servo misma que es donde el servomotor MG995 ira montado como se muestra en la **Figura 24**.
3. **Base principal:** Se realiza el diseño de la base que servirá de pivote o eje además de sostener el mecanismo como se ilustra en la **Figura 25**.
4. **Base biela:** Se realiza el diseño de la base de biela misma donde ira montado el brazo de biela **Figura 26**.

5. **Biela y manivela:** Se realiza el diseño del sistema de transmisión del movimiento que genera el servomotor **Figura 27** y **Figura 28**.
6. **Viga.** Se realiza el diseño de 2 tubos macizos que servirán como la viga donde la bola realizara su recorrido.

Diseño en software CAD.

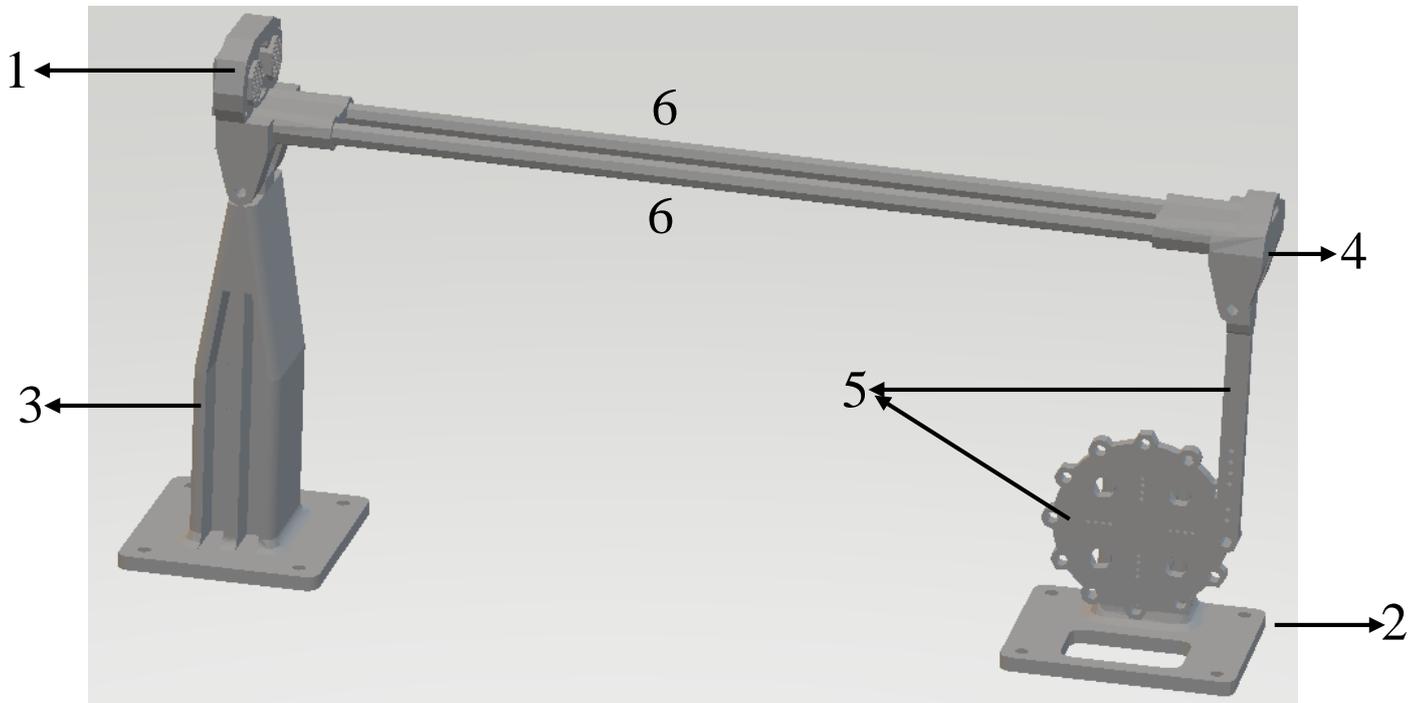


Figura 22. Diseño del sistema Ball & Beam.

Se realiza el diseño y modelado de las piezas mencionadas anteriormente mediante el uso de un software especializado como solidworks, al momento de imprimir las piezas se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tolerancias adecuadas para el momento de ensamblar
- Realizar ranuras para sensores y actuadores.
- Realizar orificios para asegurar bases de montaje.

Impresión 3D de los componentes.

Se realiza la impresión de todas y cada una de las piezas que se describió con anterioridad: Base principal, base servo, base sensor, base biela y biela y manivela.

5.2.1.2 Establecer un modelo matemático para describir el comportamiento dinámico del prototipo "Ball & Beam"

Para poder modelar matemáticamente el sistema Ball & Beam utilizaremos el método de Lagrange como se muestra en el acápite 4.3.1, que es un método que nos permite obtener las ecuaciones de movimiento a partir de la energía del sistema (energía cinética y energía

potencial) y que nos permite trabajar con coordenadas generalizadas y no con las fuerzas directamente.

Una vez realizado el análisis previo se procede a obtener la función de transferencia con la ayuda de dos softwares especializados cuyos nombres se mencionan seguidamente: LABVIEW y MATLAB® mismos que será de gran ayuda tanto como para la obtención de datos y procesamiento de los mismos, en acápite posteriores se muestra el procedimiento que se realiza para llegar a la función de transferencia como lo es el acápite 5.3.2.

5.2.2 Materiales

Tabla 2. Lista de Materiales.

Software	Equipos
Arduino	Placa de Arduino UNO
LabVIEW	Características: <ul style="list-style-type: none"> • Microcontrolador: ATmega328P. • Velocidad de reloj: 16 MHz. • Voltaje de trabajo: 5V. • Voltaje de entrada: 7,5 a 12 voltios. • Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 6 pines analógicos. • 1 Puerto serie por hardware. • Memoria: 32 KB Flash (0,5 para bootloader), 2KB RAM y 1KB Eeprom.
	Sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK0F Características: <ul style="list-style-type: none"> • Rango de medición de distancia: 10 a 80 cm. • Voltaje de alimentación: 4.5 V a 5 V DC. • Voltaje de salida(analógico): 1V a 3.3V. • Corriente de entrada: 30 mA. • Temperatura de operación: -10 C a +60 C. • Dimensiones: 29.5 mm x 13 mm x 13.5 mm.
	Servomotor MG995 Características: <ul style="list-style-type: none"> • Par de arranque: 4.8V: 130,5 oz-in (9,40 kg-cm) 6.0V: 152.8 oz-in (11,00 kg-cm) • Rotación: 180 grados • Soporte del eje: Cojinete • Tensión de funcionamiento: 4.8 V to 7.2 V • Peso: 1,94 oz (55,0 g)
	Impresora 3D

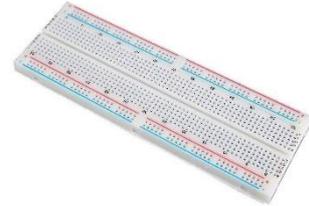


Computador



Protoboard

- Características:
- Puntos: 830 puntos.
- Color: Blanco.
- Material: Plástico ABS.
- Longitud: 16.5 cm.
- Ancho: 5.5 cm.
- Altura: 1 cm.
- Autoadherible.



Fuente de alimentación 9V



Modulo fuente 5/3.3V

5.3 Procedimiento

Análisis de Requisitos: Revisar en profundidad lo que el sistema "Ball & Beam" necesita para funcionar, incluyendo los objetivos principales y los detalles técnicos.

Exploración de Tecnologías: Buscar las tecnologías que existen actualmente para sistemas "Ball & Beam", especialmente en métodos de control, sensores de posición y motores disponibles.

Selección de Componentes: Escoger los componentes más importantes para construir el sistema, teniendo en cuenta si son accesibles tanto en precio como en disponibilidad.

Adquisición de Componentes: Comprar los componentes elegidos, asegurándose de que cumplan con la calidad y funcionen correctamente para realizar la construcción de sistema.

Ensamblaje del Sistema: Montar los componentes para construir el sistema "Ball & Beam" siguiendo el diseño establecido previamente, cuidando que exista una conexión y alineación correcta de todos los elementos.

Pruebas de Funcionalidad: Realizar pruebas básicas para asegurarse que el sistema tiene un funcionamiento correcto y detectar posibles fallos o ajustes necesarios.

Ajustes y Mejoras: Hacer los cambios que se necesiten para que el sistema funcione de la mejor manera y cumpla con lo esperado.

Implementación del Control: realizar la implementación un sistema de control que permita regular la posición de la bola en la viga del sistema "Ball & Beam", mediante el uso de métodos como el controlador PID.

Calibración y Configuración: Calibrar y configurar el sistema de control para asegurar una respuesta precisa y estable del sistema "Ball & Beam".

Pruebas de Validación: Realizar pruebas en condiciones reales para validar su funcionamiento y garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos.

Implementación en Entorno de Uso: Implementar el sistema "Ball & Beam" en el entorno de uso previsto, proporcionando la formación necesaria al personal encargado de su operación y mantenimiento.

Monitoreo y Mantenimiento: Establecer un sistema de monitoreo y mantenimiento regular para garantizar el correcto funcionamiento y prolongar la vida útil del sistema "Ball & Beam".

5.3.1 Construir un prototipo del modelo "Ball & Beam"

5.3.1.1 Construcción de un prototipo "Ball & Beam" de bajo costo.

Dado que la precisión juega un papel crucial en este tipo de prototipos, se ha optado por diseñarlo con la ayuda del software CAD SolidWorks. En el siguiente apartado, se presentan cada una de las partes que conforman el prototipo.

5.3.1.1.1 Base del sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK0F.

En la **Figura 23** se observa la base sobre la cual se coloca el sensor infrarrojo que permitirá obtener la lectura de la distancia a la que se desplaza la esfera.

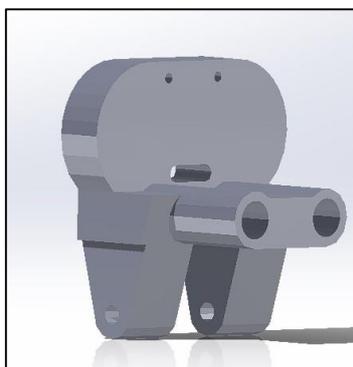


Figura 23. Base sensor TOF10120

5.3.1.1.2 Base del Servomotor MG995

En la **Figura 24** se observa la base sobre la cual se coloca el servomotor que permitirá modificar el ángulo de inclinación de la viga

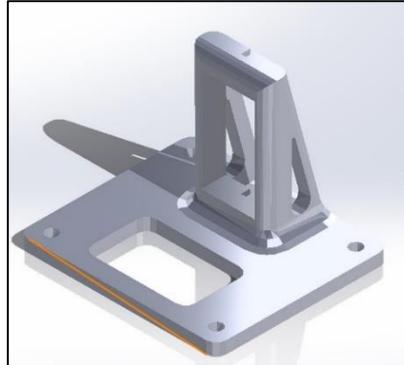


Figura 24. Base Servomotor MG995

5.3.1.1.3 Base principal

En la **Figura 25** se observa la basa donde ira montada la base del sensor infrarrojo misma que será sujeta por un pasador.

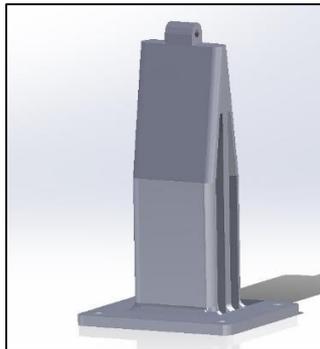


Figura 25. Base sujeción del servo.

5.3.1.1.4 Base de sujeción de la biela

En la **Figura 26** se muestra la base que sostendrá el otro extremo de la viga y será ensamblada con la biela.

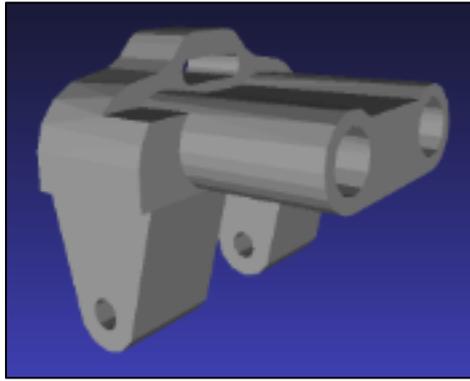


Figura 26. Base de apoyo de la viga.

5.3.1.1.5 *Biela y manivela*

Finalmente, en la **Figura 27** y **Figura 28** se observa el sistema de transmisión de movimiento que está compuesto por una biela y una manivela, mediante este sistema es posible que la viga tenga el mismo ángulo de inclinación que el servomotor.

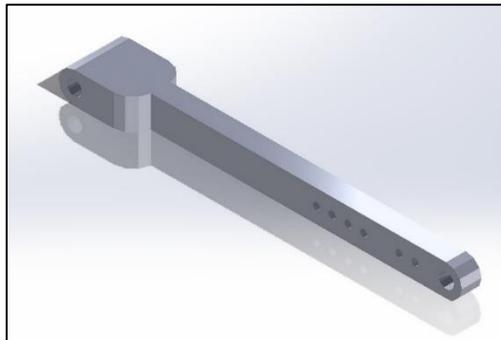


Figura 27. Biela

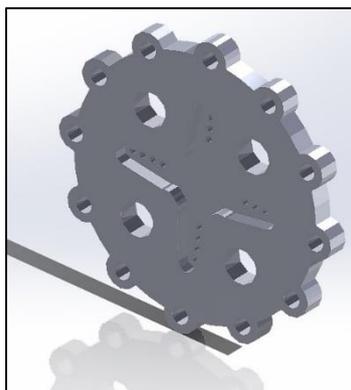


Figura 28. Manivela

5.3.1.1.6 *Sistema completo*

Para finalizar esta sección sobre el diseño en 3 dimensiones de componentes, se sugiere la inclusión de una representación integral en 3D del sistema "Ball & Beam", que no solo

contemple las piezas a imprimir, sino también las barras, el servomotor. Esta adición se propone con el fin de ofrecer una representación visual completa y fiel al sistema físico.

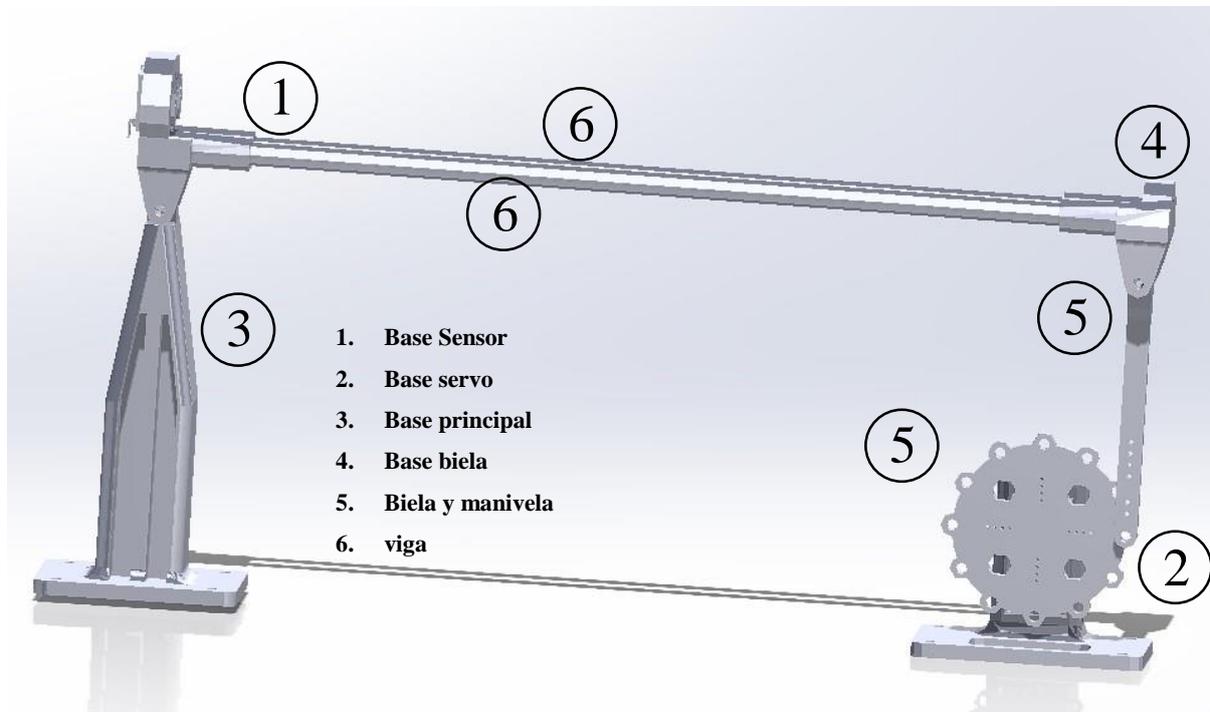


Figura 29. Ensamble sistema Ball & Beam.

5.3.1.2 Impresión 3D

Una vez que se han diseñado todas las piezas en CAD Solidworks, el siguiente paso es exportarlas individualmente al formato STL, el cual es el estándar más utilizado en el ámbito de la impresión 3D. Posteriormente, estos archivos se procesan a través de un software de laminado, el cual se carga directamente en la impresora 3D.

5.3.1.3 Guía de montaje

Una vez descritos todos los componentes que conforman el sistema, se procede a indicar los pasos necesarios para el montaje del Ball & Beam.

5.3.1.3.1 *Remoción de rebabas y corrección de imperfecciones*

En determinadas piezas, debido a su complejidad geométrica, resulta inevitable la necesidad de emplear soportes durante el proceso de impresión 3D. En otras ocasiones, pueden surgir pequeñas irregularidades o rebabas. Por consiguiente, antes de proceder con el ensamblaje de la estructura, se requerirá llevar a cabo un tratamiento superficial en dichas piezas.

- Para retirar los soportes, se empleará una pequeña cuchilla o cutter, siendo esencial manipularla con precaución para evitar dañar la integridad de la pieza.
- En cuanto a la eliminación de rebabas no deseadas y el alisado de superficies ásperas, se recomienda el uso de papel de lija.



Figura 30. Eliminación de imperfecciones de las piezas 3D.

5.3.1.3.2 Montaje del sensor infrarrojo

Esta base ha sido diseñada de tal manera que, una vez colocado el sensor, haya una distancia entre el sensor y el principio de la barra (lugar hasta el que puede llegar la bola) de dos centímetros. Esta distancia no es casual, se trata de la distancia mínima que requiere el sensor para que su medición sea fiable.

Una vez conseguido, se colocará el sensor en el lugar destinado para ello como se puede ver en la **Figura 31**.



Figura 31. Colocación del sensor en su debida base.

5.3.1.3.3 Montaje de la viga

El montaje de la viga consiste en ubicar en los orificios que presenta la base del sensor y la base de sujeción de la biela como se presenta en la **Figura 32**.



Figura 32. Montaje de la Viga.

5.3.1.3.4 Montaje del sensor y mecanismo de biela y manivela

En este último paso del montaje de la estructura debe cumplirse que el ángulo formado entre la manivela y la biela sea de 90° . Para ello realizaremos las siguientes acciones:

Inicialmente, con el servomotor suelto de su soporte, mediante un esquema de Arduino, procedemos a buscar la posición de 90° de giro. Esta posición se considera como su posición central, dado que el rango de giro del servo va de 0 a 180° , lo que nos garantiza el mismo recorrido del eje del servo en ambas direcciones.

Luego, se procede al ensamblaje encajando la pieza biela en el servomotor y asegurándola en su soporte utilizando los pequeños tornillos proporcionados en la caja del servomotor. El soporte está diseñado con agujeros a diferentes alturas para asegurar la posibilidad de formar un ángulo de 90° entre la manivela y la biela. Inicialmente, se recomienda colocar el soporte en el tercer agujero contando desde arriba para garantizar una correcta alineación.

Posteriormente, se inserta a presión la pieza plástica en la cavidad de la biela destinada para ello, y se fija la misma al servomotor utilizando un tornillo pequeño similar al utilizado anteriormente.

La biela se asegurará en un extremo al riel a través del agujero presente en la pieza de soporte del sensor y en el otro extremo a la manivela. Se empleará un tornillo de métrica 3 con una longitud de 16 mm en ambas conexiones. Estas uniones deben garantizar que la biela y la manivela puedan girar libremente sin experimentar un roce excesivo.

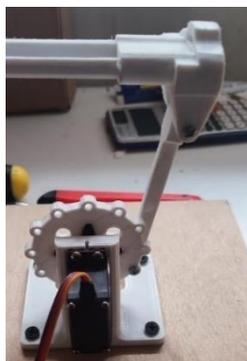


Figura 33. Montaje del sistema de transmisión.

5.3.2 Establecer un modelo matemático para describir el comportamiento dinámico del prototipo "Ball & Beam"

Se utiliza el análisis dinámico basado en la ecuación de Lagrange ya que es un método que tiene ventajas frente a las ecuaciones de Newton ya que la ecuación Lagrangiana de un sistema se basa principalmente en la diferencia de las energías cinética y potencial, a diferencia del método de Newton que hace énfasis en las fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo, de tal manera dado que existe una variedad de agentes externos que actúan sobre el objeto (Fuerzas) puede presentar dificultad al momento de obtener la función de transferencia.

El lagrangiano se compone por energía cinética y se expresa como (Obando & Romero, 2010):

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

Donde:

U : energía cinética.

m : masa de la esfera.

v : velocidad traslacional de la esfera.

ω : velocidad angular de la esfera.

$\dot{\theta}$: velocidad angular de la barra.

I_a : momento de inercia de la barra.

I_b : momento de inercia de la esfera.

$$x = r\varphi$$

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

$$\omega = \dot{\varphi} + \dot{\theta} = \frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta}$$

La velocidad transnacional de la esfera está dada por;

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

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

$$L = \frac{1}{2}m \left((\dot{x}^2 + (x\dot{\theta})^2) + \frac{1}{2}I_b \left(\frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \right)^2 + \frac{1}{2}I_a\dot{\theta}^2 - mgx\sin\theta \right)$$

La ecuación de Lagrange para el sistema Ball and Beam;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{x}} L \right) - \frac{\partial}{\partial x} L = -mg \sin \theta$$

Desarrollando la ecuación anterior se obtiene;

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

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;

$$0 = mg \sin \theta$$

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.

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

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

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

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

$$I_b = \frac{2}{5} mR^2$$

Finalmente:

$$G(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{g}{\left[1 + \frac{2}{5} * \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right] * S^2}$$

5.3.2.1 Adquisición de datos

5.3.2.1.1 Verificación de estado, conexión del prototipo

El análisis del estado y la conexión del sistema "ball and beam" constituye un procedimiento esencial e indispensable en el ámbito de la ingeniería de control. Este proceso abarca una variedad variada de técnicas y estrategias creadas para analizar, monitorear y

garantizar el desempeño óptimo de un sistema que se compone de una esfera moviéndose sobre una viga en respuesta a señales de control determinadas.

Se realiza una valoración del estado del sistema para ello se implica un estudio detallado de varios elementos del sistema "ball and beam, la precisión del sensor y actuador, la consistencia de los algoritmos de control aplicados y la fiabilidad de la comunicación entre los diferentes componentes del sistema.

Para hacer esta valoración de forma adecuada, es importante seguir algunos pasos básicos. Primero, se hacen pruebas sencillas para asegurarse de que las partes mecánicas del sistema, como el servomotor MG995, la viga y las bases tanto como del sensor Sharp y biela estén funcionando correctamente. Esto incluye realizar una revisión minuciosa para cerciorarse que no haya piezas desgastadas o flojas que puedan afectar el funcionamiento del sistema.

Luego, se realiza pruebas para comprobar que el sensor que mide la posición y velocidad de la bola, así como el que controla la inclinación de la viga, estén trabajando de forma precisa y confiable. Para esto, se comparan los valores que los sensores dan con los que se esperan, para corroborar si son estables y consistentes en diferentes condiciones.

También se prueba el actuador, como el servomotor, que es el encargado de controlar el movimiento del sistema de transmisión (biela y manivela) y la posición de la bola. Es importante que estos respondan bien a las señales de control y muevan todo correctamente y a tiempo.

Un aspecto clave es revisar cómo funcionan los algoritmos de control, ya que son los que mantienen la bola en su lugar y estabilizan el sistema. Aquí se prueba si el algoritmo puede corregir posibles errores y adaptarse a cualquier cambio en el sistema o el entorno.

Por último, se revisa toda la comunicación entre el sensor, el actuador y el controlador, para asegurarse de que los datos y las órdenes se transmitan correctamente y que el sistema pueda detectar y solucionar cualquier problema de comunicación.

5.3.2.1.2 Adquisición de datos mediante LabVIEW 2021

Después de establecer la comunicación, el siguiente paso consiste en llevar a cabo experimentos para recopilar datos. Esta tarea se puede realizar seleccionando la opción de clic derecho en la interfaz gráfica del VI para exportar los datos a un archivo de Excel. Tanto la información del sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK0F como la del servomotor se registran en este archivo, mostrando tanto los datos de entrada como los de salida del sistema.

Esta fase experimental es esencial para adquirir información detallada sobre el comportamiento del sistema en diversas condiciones y escenarios. La recopilación de datos proporciona una base sólida para el análisis posterior y la mejora del rendimiento del sistema.

Además, permite detectar posibles discrepancias entre los datos esperados y los reales, lo cual es fundamental para ajustar y calibrar adecuadamente el sistema.

En resumen, la experimentación y recopilación de datos constituyen pasos cruciales en el proceso de desarrollo y optimización de sistemas de control, ya que proporcionan información valiosa para comprender su comportamiento y mejorar su funcionamiento.

5.3.2.2 Obtención de la función de transferencia del sistema

5.3.2.2.1 *System Identification mediante el software MATLAB*

Después de exportar los datos, se procede a almacenarlos en dos vectores dentro del entorno de MATLAB®. Por consiguiente, se utiliza la herramienta "ident" mediante la ejecución del comando "systemIdentification" en la ventana de comandos, lo que abre una interfaz para importar los datos. Posteriormente, se selecciona la opción "Import data" y se recurre a la herramienta "Time domain data" para representar gráficamente estos valores.

Este procedimiento en MATLAB® es esencial para el análisis y la identificación de sistemas, ya que facilita la manipulación eficiente de los datos recopilados y la aplicación de herramientas específicas para su visualización y análisis. La herramienta "ident" permite identificar modelos de sistemas basados en los datos recopilados, mientras que la visualización en el dominio del tiempo proporciona una representación gráfica clara y comprensible de los valores almacenados en los vectores.

En resumen, el uso de MATLAB® y sus herramientas especializadas, como "ident" y "Time domain data", es crucial para el procesamiento y análisis de datos en el contexto de la identificación de sistemas y el diseño de control. Estas herramientas permiten una manipulación eficiente de los datos y una visualización clara, facilitando así el análisis y la toma de decisiones en ingeniería de control y sistemas dinámicos. Como la **Figura 34** lo ilustra.

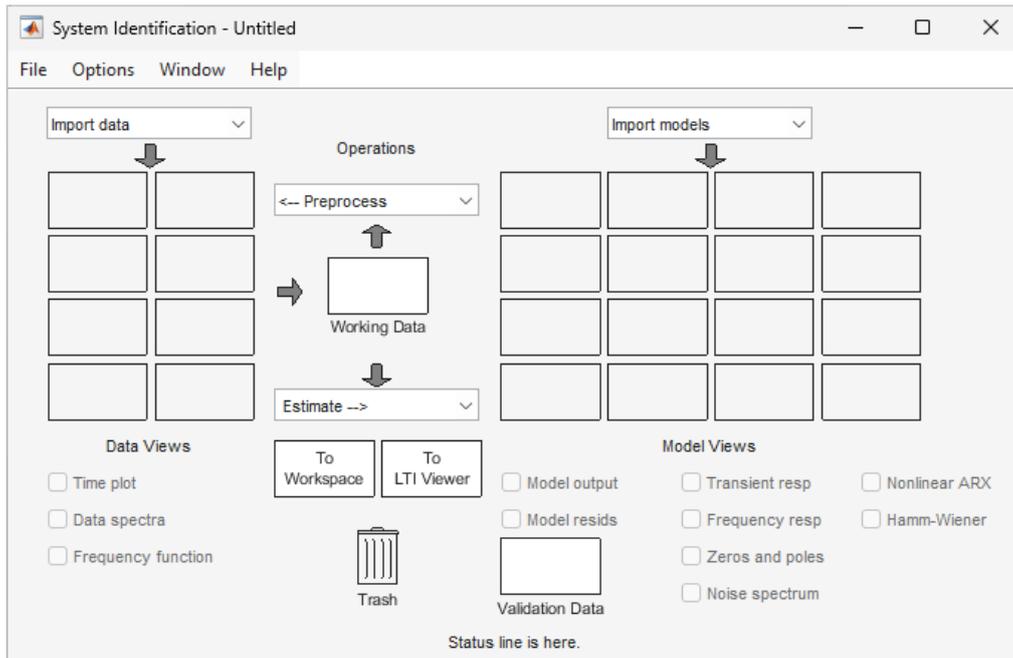


Figura 34. Herramienta System Identification.

Posteriormente en la **Figura 35** se puede visualizar la interfaz donde se importan los datos, eligiendo la opción de importación. Se muestra un gráfico con los valores cargados. Seguidamente, se accede a la opción "Process Models" en la barra de herramientas "Estimate". Al abrir esta ventana, se configura la estimación del modelo, considerando la inclusión de componentes como Zero (cero en el denominador), Delay (para añadir un retraso) o Integrator (para incorporar un proceso de autorregulación). Conforme se realicen múltiples estimaciones con diferentes configuraciones, los modelos de transferencia se actualizarán y podrán ser observados en la **Figura 36**. Este proceso es esencial para el análisis y la creación de modelos que representen fielmente el comportamiento del sistema. La selección adecuada de los componentes del modelo permite una mejor comprensión de la dinámica del sistema y facilita la toma de decisiones en el diseño de estrategias de control.

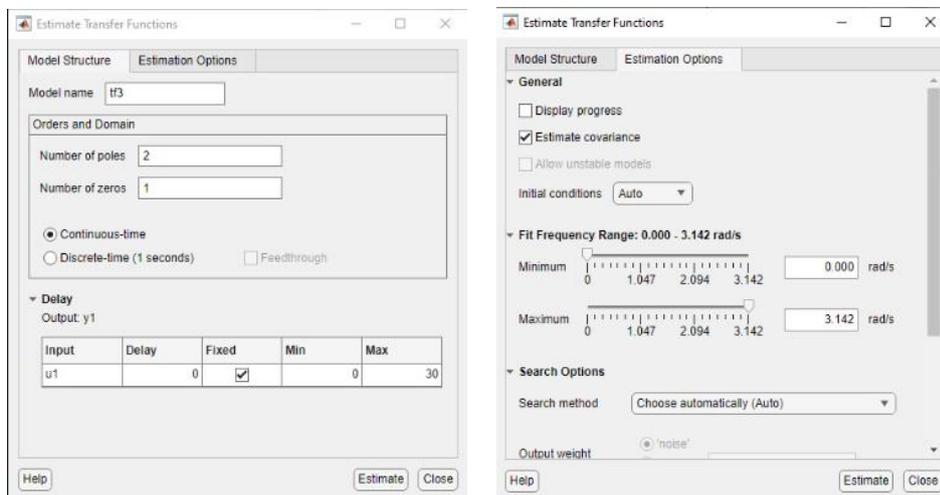


Figura 35. Colocación de variables en Import Data.

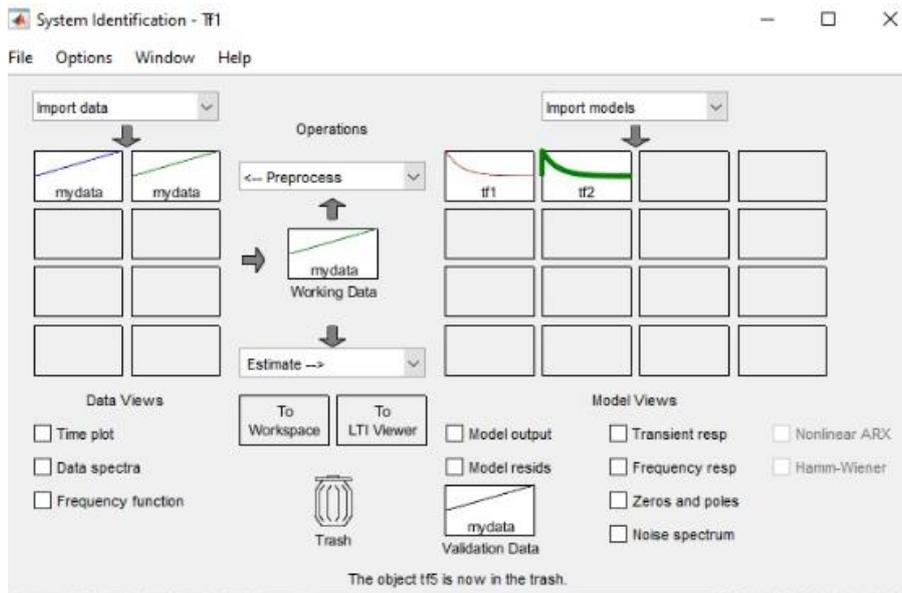


Figura 36. Proceso de estimación de la Función de transferencia.

Para visualizar de manera gráfica las funciones obtenidas en las diversas estimaciones y demostrar su similitud, se emplea la función "Model output". Se establece que la función de transferencia debe alcanzar al menos un 90% de semejanza para considerarse óptima. Una vez generada la representación gráfica, se muestran tanto los datos reales como el porcentaje de similitud con respecto a la función obtenido, lo cual se ilustra en la **Figura 37**.

Este proceso es crucial para evaluar la calidad y la precisión de las funciones estimadas. Al comparar los datos reales con las predicciones del modelo, se puede determinar su capacidad para capturar la dinámica del sistema de manera efectiva. Un porcentaje de similitud del 90% o superior indica un buen ajuste de la función de transferencia y una representación confiable del comportamiento del sistema en cuestión.

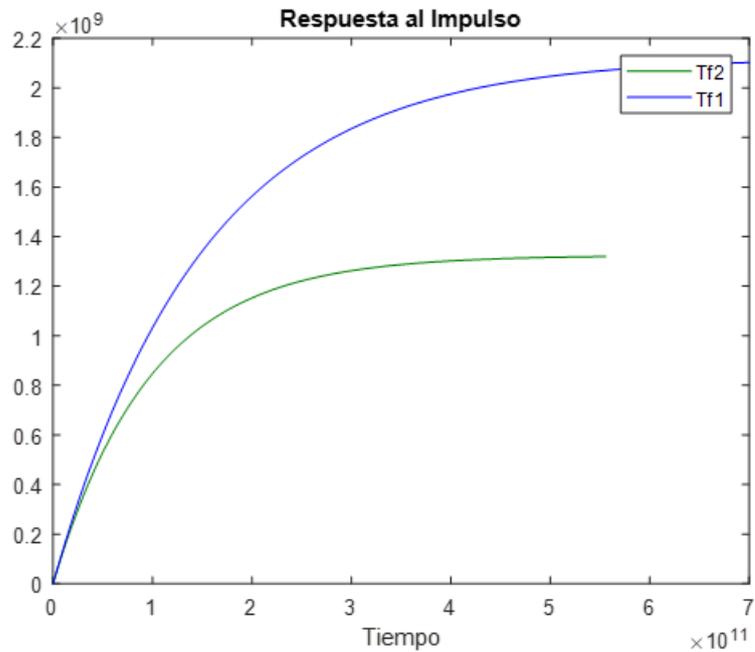


Figura 37. Funciones de transferencia representadas mediante gráfica.

Para validar la ecuación derivada de la gráfica, se realiza un análisis de estabilidad del modelo mediante la herramienta Poles and Zeros, que localiza las raíces en un plano cartesiano. La estabilidad del sistema se determina por la presencia de raíces en el semiplano izquierdo; si no hay raíces en el semiplano derecho, el sistema es estable; de lo contrario, es inestable. La representación gráfica del resultado de estabilidad se encuentra en la **Figura 38**.

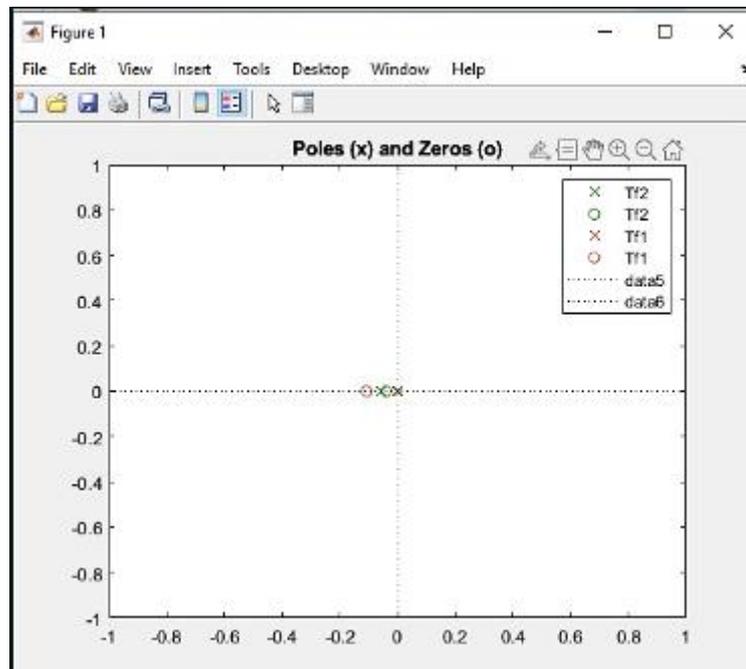


Figura 38. Poles and Zeros de la función de transferencia.

Una vez realizado el procedimiento anterior se procede a buscar los mejores ajustes para el sistema en la **Figura 39** se muestran los best fits para el prototipo.



Figura 39. Mejores ajustes para el sistema.

En MATLAB®, "best fits" se refiere al proceso de encontrar los parámetros óptimos de un modelo matemático que se ajusten de manera precisa a un conjunto de datos observados, comúnmente utilizado en el ajuste de curvas o modelado de datos experimentales. El objetivo es minimizar la discrepancia entre los datos reales y el modelo ajustado, empleando técnicas de optimización para reducir medidas de error como el error cuadrático medio o el error absoluto medio. Esto implica iteraciones para ajustar los parámetros del modelo hasta obtener la mejor coincidencia posible con los datos observados, utilizando herramientas como la función "fit" de MATLAB®.

SOPDT

Un sistema lineal de segundo orden con retraso de tiempo es una descripción empírica común de muchos procesos dinámicos estables. Se diferencia de la FOPDT que poseen dos polos dando como resultado más estabilidad al sistema. (Bakerey, et al, 2016)

$$\frac{K}{(1 + Tp1s) (1 + Tp2s)} e^{-Tds}$$

Donde:

K es la ganancia del proceso: el valor final de la respuesta para un cambio de paso unitario en la entrada.

Tp es la constante de tiempo.

Td es el retardo o tiempo muerto.

Métodos de sintonización de Controladores PID.

Tabla 3. Parámetros del método basado en Ziegler-Nichols

Tipo de Controlador	K_i	T_i	T_d
PID	$\frac{k}{1.7}$	$\frac{T_m}{2}$	$\frac{T_m}{8}$

Tabla 4. Parámetros del método basado en Cohen-Coon.

Tipo de Controlador	K_i	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{T_m}$		

Tabla 5. Parámetros del método basado en Astrom-Hagglund.

Tipo de Controlador	K_i	T_i	T_d
PID	$\frac{0.94\tau}{kT_m}$	$2T_m$	$0.5T_m$

Tabla 6. Parámetros del método basado en Kaya and Scheib

Tipo de Controlador	K_i	T_i	T_d
PID	$\frac{0.98089}{k} \left(\frac{\tau}{T_m}\right)^{0.76167}$	$\frac{T_m}{0.91032} \left(\frac{T_m}{\tau}\right)^{1.05221}$	$0.59974T_m \left(\frac{\tau}{T_m}\right)^{0.89819}$

Tabla 7. Parámetros del método basado en Smith-Corripio

Tipo de Controlador	K_i	T_i	T_d
PID	$\frac{\tau}{kT_m}$	τ	$0.5T_m$

5.3.3 sistema de control clásico adecuado para el modelo desarrollado

5.3.3.1 Diseño de la interfaz del sistema de control en LabVIEW 2021

En este bloque mediante la librería LINX, se realiza la comunicación serial entre LabVIEW y Arduino, seleccionando el puerto y el pin donde está conectado el sensor que mide la distancia como se muestra en la *Figura 40*.

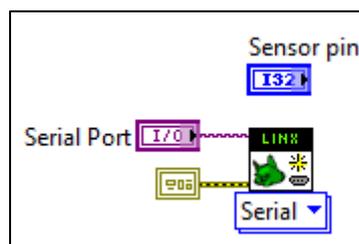


Figura 40. Bloque de programación del sensor.

En este bloque mediante la librería LINX, se realiza la comunicación serial entre LabVIEW y Arduino, seleccionando el pin donde está conectado el servo **Figura 41**.

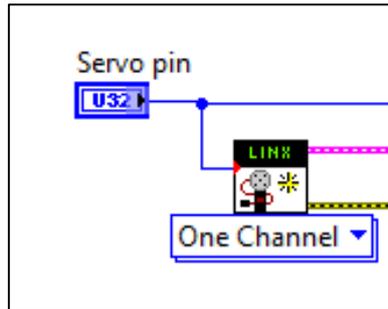


Figura 41. Bloque de programación del servo.

En este bloque mediante la librería LINX, se realiza la lectura la entrada analógica del Arduino **Figura 42**.

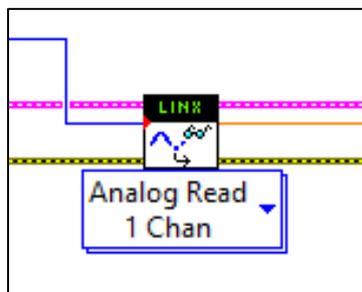


Figura 42. Bloque de lectura analógica Arduino.

Los bloques de imagen anterior se los utiliza para convertir del voltaje del sensor en distancia, primero a la señal de entrada se multiplica por valor constante de 205 y se le aplica un filtro para obtener su valor de mediana, este resultado ingresa al bloque de fórmula, donde se le aplica la fórmula para cambiar de voltaje a distancia y se presentan los datos en los indicadores.



Figura 43. Formula conversión de voltaje.

En el bloque que se presenta seguidamente se construye el PID con sus parámetros P; I; D, para luego ser utilizada por el siguiente bloque

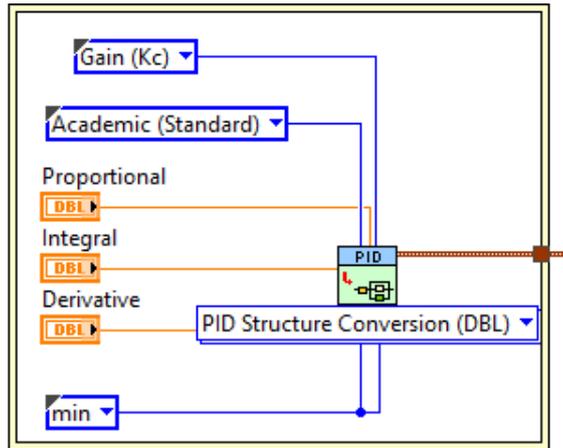


Figura 44. Bloque de parámetros P I D.

Una vez el PID construido, se ingresa el Setpoint para que el sistema empiece a controlar el proyecto, la salida de este bloque es en grados, en cambio al servo motor se lo controla por medio de una señal PWM, entonces se tiene que hacer el cambio de grados a una señal periódica, para ello se utiliza por fórmula que se presenta dentro del bloque de fórmula, enviando una señal de salida cada 80ms, porque el sensor toma una medida a ese mismo valor.

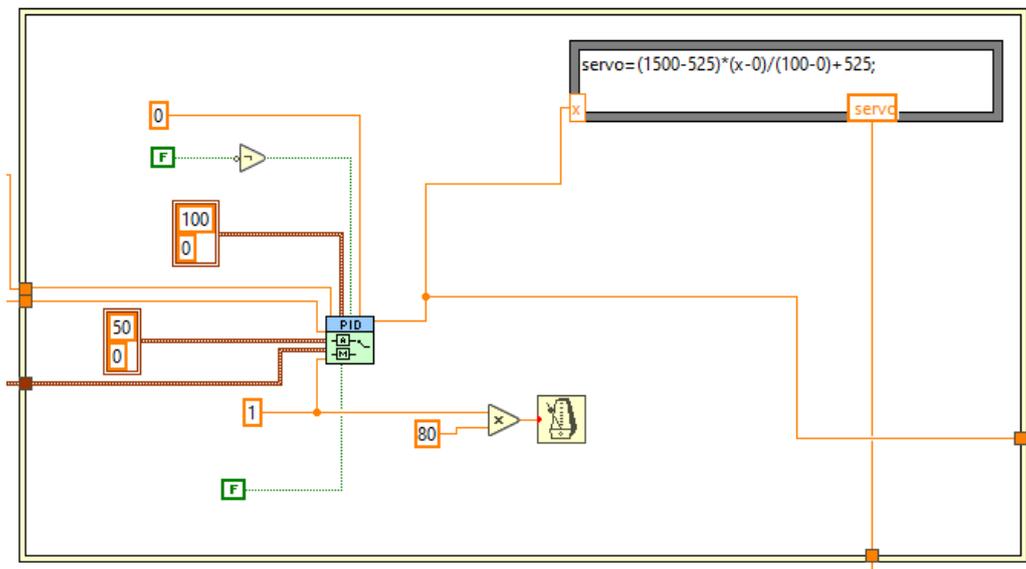


Figura 45. Bloque de programación del setpoint.
El Waveform Chart permite graficar la señal de la distancia y del setpoint

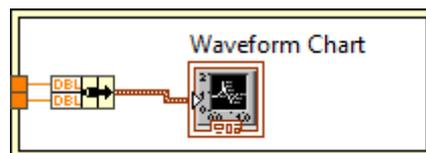


Figura 46. Bloque Waveform Chart.

Con el bloque de Write to Measurement file, se genera un archivo en Excel para ir guardando todos los datos del proyecto como son los de distancia y el ángulo en que gira el servo.

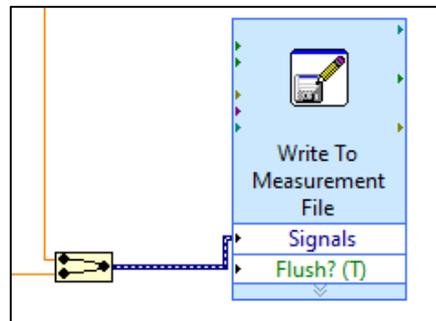


Figura 47. Bloque Write to Measurement File.

Y finalmente se cierra la comunicación serial ente Arduino y LabVIEW



Figura 48. Bloque de cierre de comunicación serial.

Programación en bloques mediante LabVIEW completa.

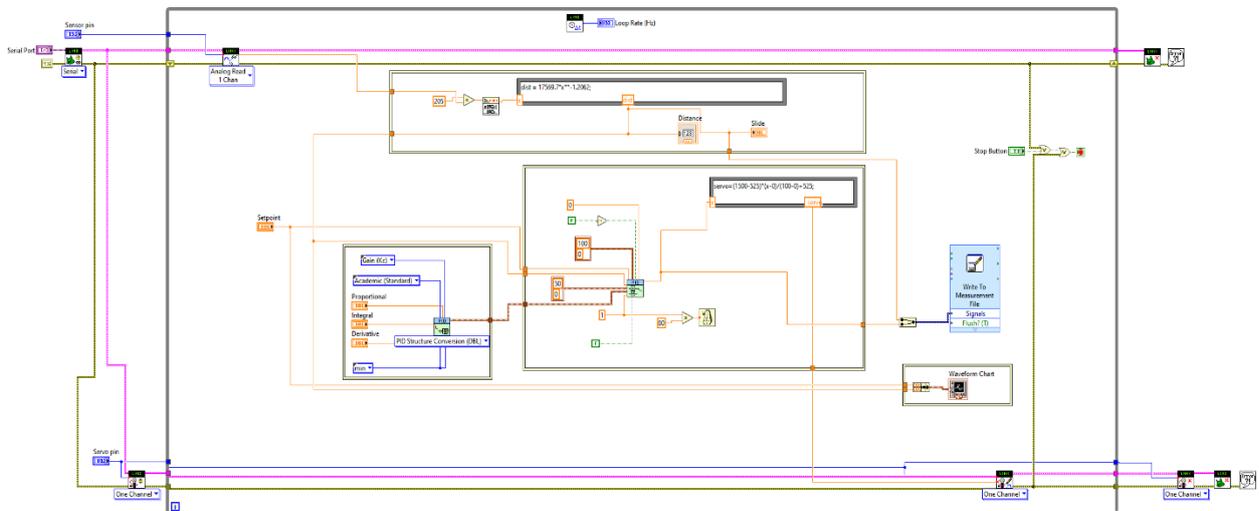


Figura 49. Programación en bloques del sistema completa.

6. Resultados

El propósito principal de este estudio es desarrollar un modelo de un sistema "Ball & Beam" para ser utilizado en prácticas y ensayos de algoritmos de control. Se busca crear un prototipo que permita la experimentación y validación de diversas estrategias de control en un ambiente controlado. El enfoque se centra en la construcción de un sistema funcional y adaptable que sirva como recurso educativo para estudiantes y como plataforma de pruebas para investigadores en el área del control automático.

6.1 Construir un prototipo del modelo "Ball & Beam"

6.1.1 Placa del circuito

La tarjeta donde está conectada la placa arduino UNO se muestra a continuación.

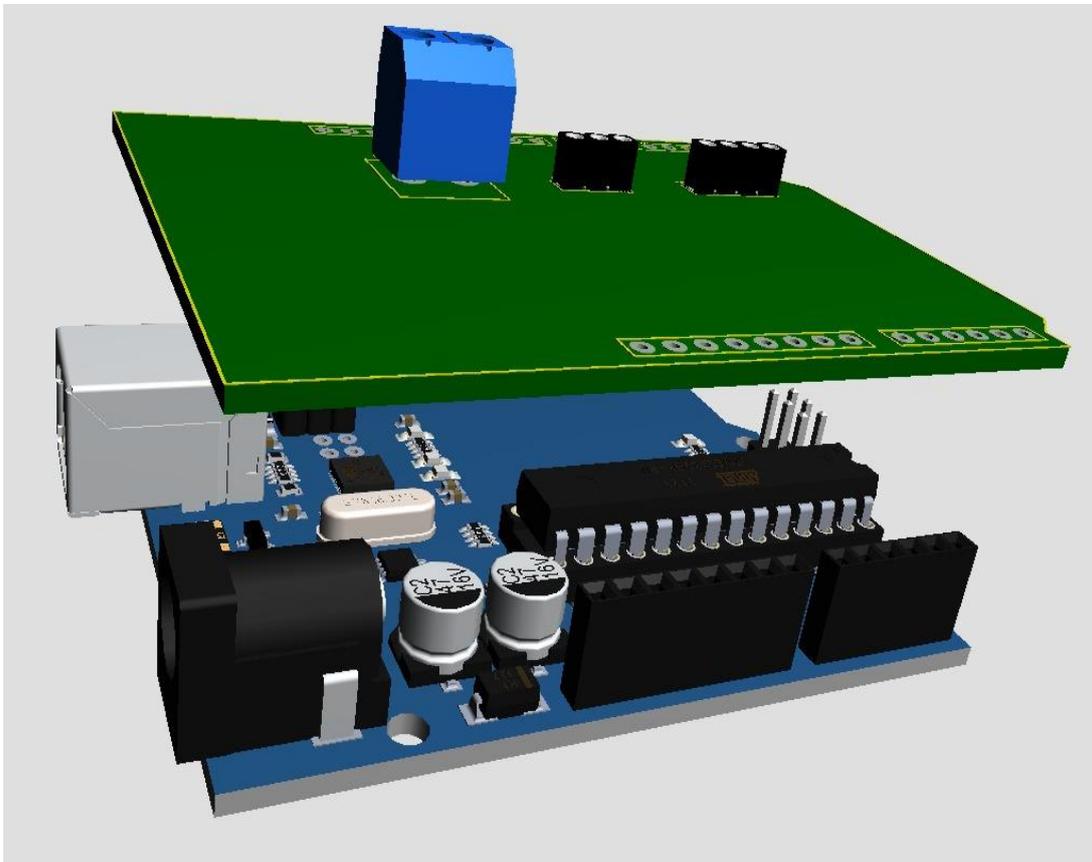


Figura 50. Tarjeta de conexión de Arduino.

6.1.2 Conexiones

A continuación, se presenta el diagrama multifilar de control del prototipo.

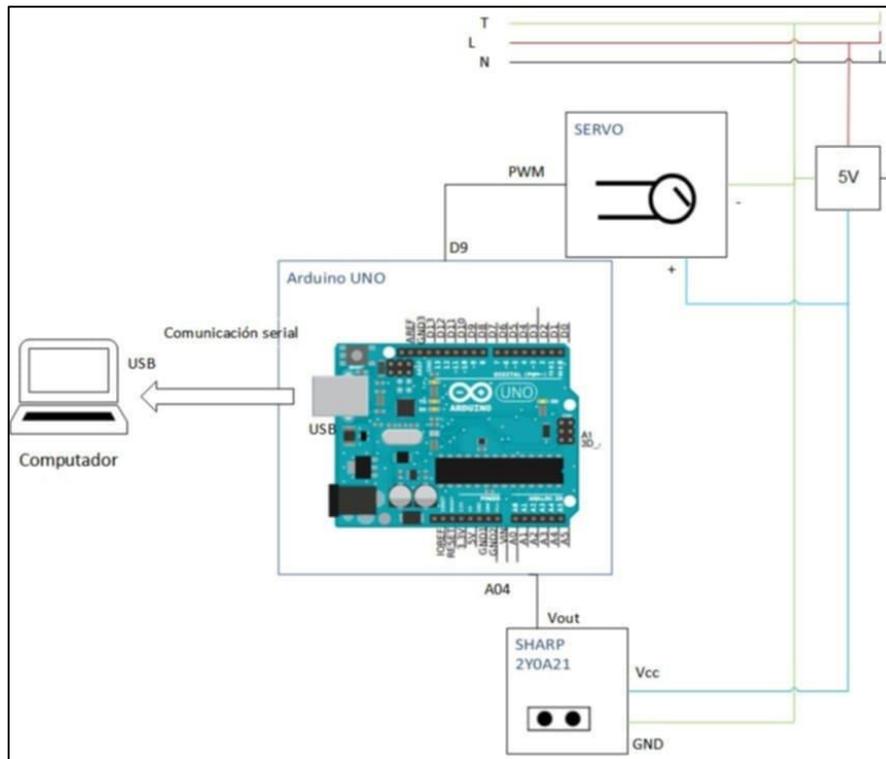


Figura 51. Diagrama multifilar

6.1.3 Montaje completo del sistema Ball & Beam

Una vez concluidos los pasos mostrados en el primer objetivo mismo que indica una guía de montaje detallada del sistema Ball & Beam en la **Figura 52** se muestra el sistema construido en su totalidad.

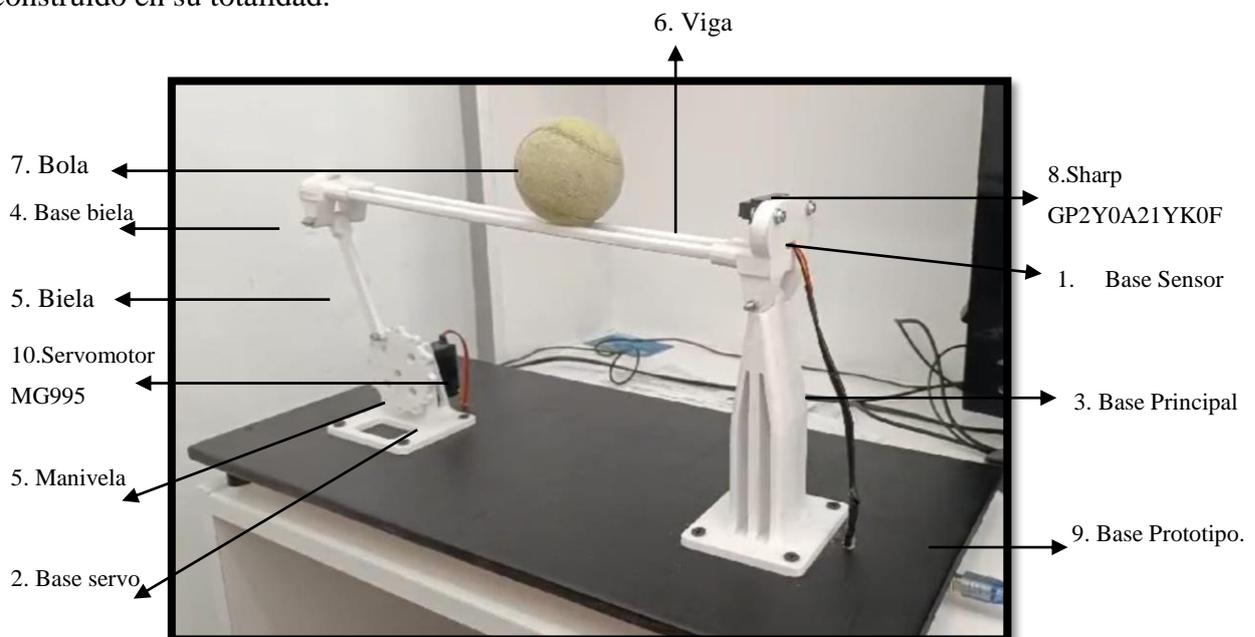


Figura 52. Sistema Ball y Beam construido.

6.2 Adquisición de datos

Durante la fase posterior, se adquirieron diversos conjuntos de datos del sistema mediante pruebas de medición, con el propósito de buscar un modelo matemático adecuado. Estos conjuntos de datos se condensan en dos vectores separados (entrada y salida), cuya representación gráfica ejemplar se visualiza en la **Figura 53**. Además, para una mayor comprensión y manejo de los datos, se utilizó el software Excel, cuyo formato se ilustra seguidamente.

t	Dis	Ang
1	20,3	95
1,5	20,1	155
2	20,6	95
2,5	20,2	155
3	20,6	155
3,5	21,1	95
4	20,2	95
4,5	19,4	95
5	19,3	155
5,5	19,9	95
6	19,4	95
6,5	18,3	155
7	19,3	95
7,5	19,3	95
8	19,3	95
8,5	19,3	95
9	19,1	155
9,5	19,7	155
10	20,9	95
10,5	20,7	155
11	22,3	155
11,5	23,4	95
12	22,5	95
12,5	22	87
13	22	87
13,5	22	87
14	22	95
14,5	20,8	155
15	21,1	95
15,5	20,5	155
16	20,8	95
16,5	20,5	155
17	21,3	155
17,5	21,7	155
18	22,5	155
18,5	22,9	155
19	25	155
19,5	25,4	155

Figura 53. Datos obtenidos del sensor de distancia y el servomotor.

6.2.1 Modelo matemático

En la selección de la fórmula que represente a la planta se realiza por la comprobación de Poles y Zeros y además del porcentaje de ajuste del modelo sea superior al 90%, los distintos experimentos se realiza una comparación de resultados, resumiendo que la función de transferencia 1 (TF1) tiene un ajuste de 97.28 %,

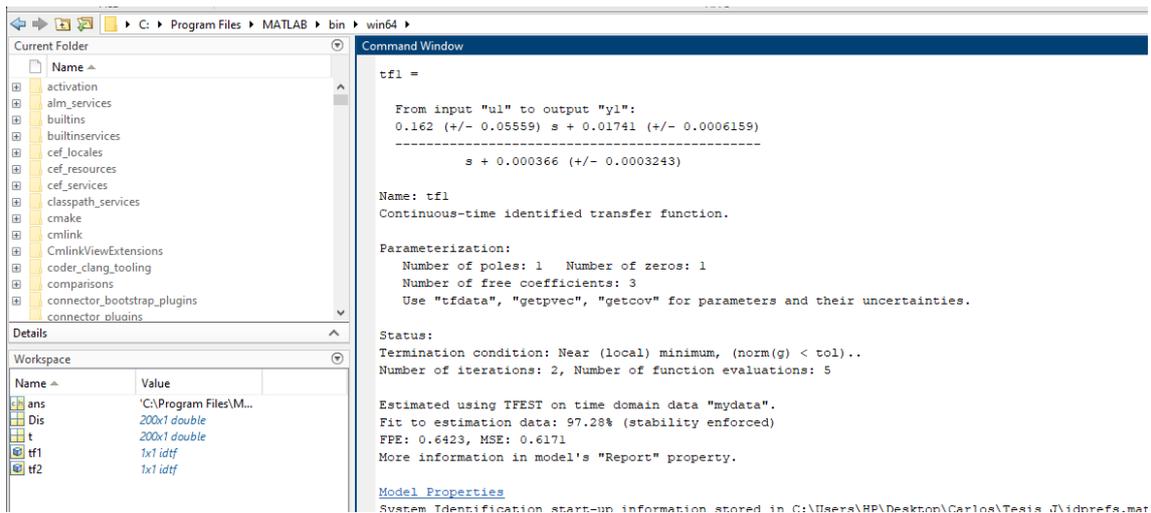


Figura 54. Ecuación de la función de transferencia.

Dos polos y dos zeros con retraso (con peso).

$$Tf2 = e^{-s} \frac{0,02s + 0,0008025}{s^2 + 0,05578s + 1,115E-14}$$

La función de transferencia de la planta, se encuentra representada con un sistema lineal de primer orden, se define por:

$$\frac{0,882}{684,3s + 1} * e^{-120.26s}$$

6.2.2 Controlador PID

Seguidamente, en la **Figura 55** se muestra el diagrama de bloques que corresponde al prototipo Ball & Beam:

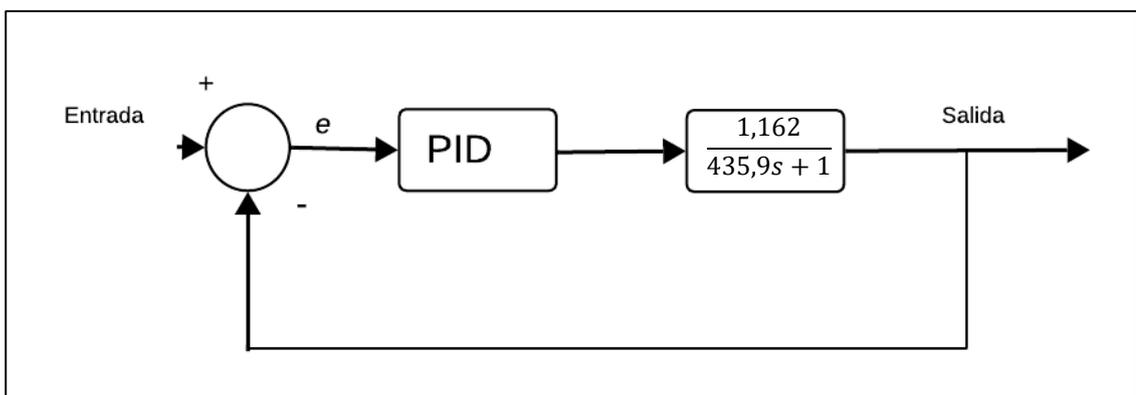


Figura 55. Diagrama de bloques sistema Ball y Beam.

Donde la entrada se refiere a la variable set point, la salida corresponde a la variable de proceso, la planta al modelo que representa el sistema, y el controlador es el que se encarga de la manipulación del sistema.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al implementar un controlador PID en el sistema Ball and Beam. El objetivo del controlador es mantener la bola en una posición deseada sobre la viga mediante la regulación precisa del ángulo de la viga.

6.2.3 Métodos de sintonización del PID

Tabla 8. Métodos de sintonización Utilizados.

Regla	T de Controlador	Kc	Ti	Td
Ziegler - Nichols	Pzn	0,441		
	PIzn	0,401	100,217	
	PIDzn	0,519	60,130	15,033
Cohen - Coon	Pcc	5,690		
	PIcc	5,121	40,087	
	PIDcc	6,828	240,520	60,130
Astrom-Hagglund	PIDah	6,064	240,520	60,130
Smith and Corripio	PIDsc	6,451	684,300	62,535
Kaya and Scheib	PIDks	8,18523406	0,27179727	3063,72986

6.2.3.1 Configuración del controlador PID

6.2.3.1.1 Controlador Proporcional (P)

Parámetros utilizados:

- Ganancia Proporcional (K_p).

Se tomará un controlador proporcional (P), el sistema mostró una respuesta que fue insuficiente. Aunque la bola intentó alcanzar la posición deseada, el control proporcional solo proporcionó una corrección basada en el error instantáneo, lo que resultó en una respuesta lenta y una estabilización en la posición deseada que mantuvo un error residual. La *Figura 56* ilustra la respuesta del sistema bajo control proporcional.

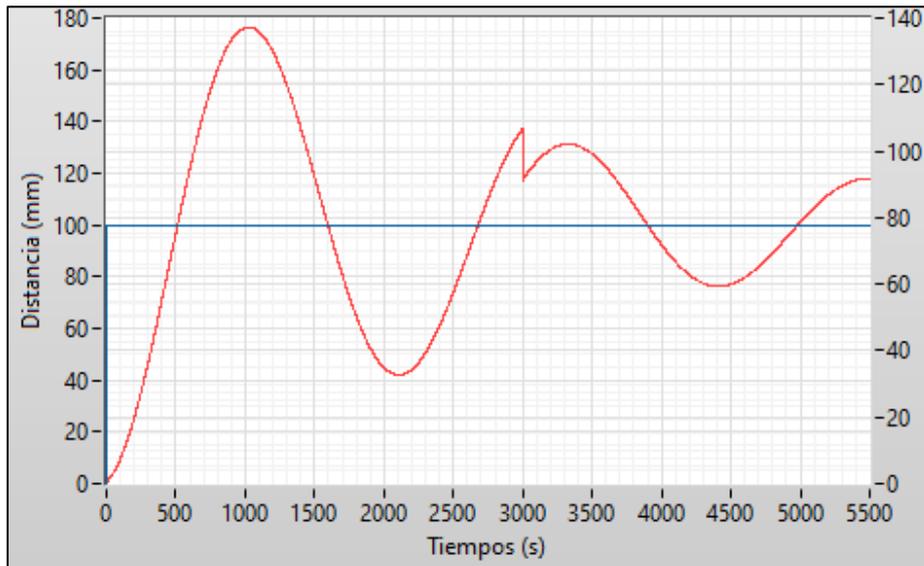


Figura 56. Gráfica del sistema con un valor P.

El controlador proporcional, a pesar de ajustar el ángulo de la viga en función del error, mostró limitaciones en la eliminación completa del error de estado estacionario y en la reducción de oscilaciones. La bola a menudo no se estabilizaba adecuadamente y la respuesta en general fue ineficiente, mostrando que el control proporcional por sí solo no es suficiente para mantener la bola en la posición deseada con precisión.

6.2.3.1.2 Controlador Proporcional-Integral (PI)

Parámetros utilizados:

- Ganancia Proporcional (K_p).
- Ganancia Integral (K_i).

Con la incorporación del término integral, el controlador PI mejoró un poco el desempeño del sistema. La bola busco estabilizarse en la posición deseada con una reducción notable del error residual, pero sin éxito, y el sobre impulso se redujo. La **Figura 57** muestra una respuesta más precisa y estable en comparación con el controlador P.

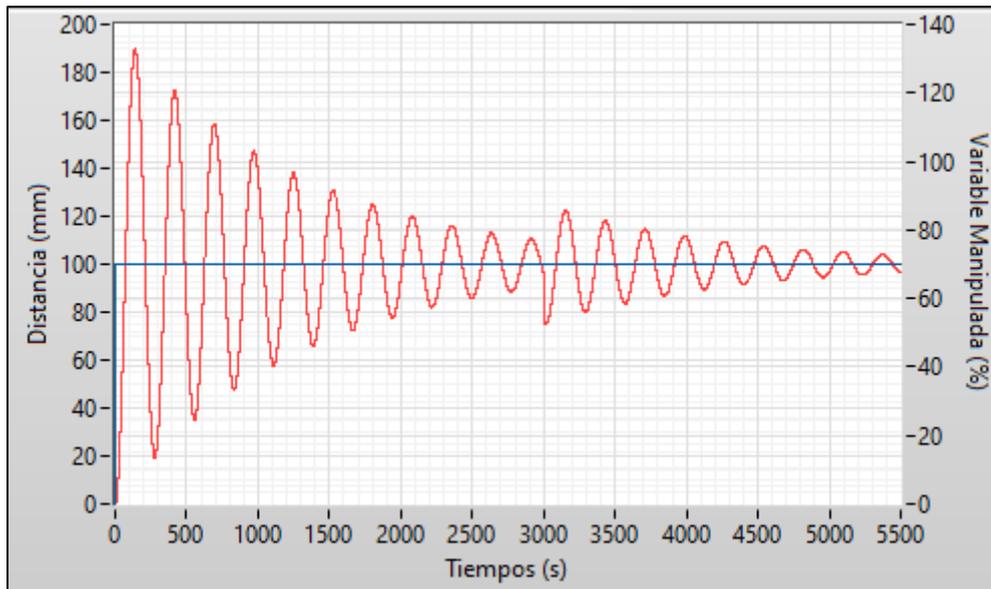


Figura 57. Gráfica del sistema con un valor PI.

El término integral del controlador PI ayudó a eliminar el error de estado estacionario y proporcionó una respuesta más estable. La combinación de los términos proporcional e integral permitió al sistema casi alcanzar la posición deseada con mayor precisión y reducir las oscilaciones en comparación con el controlador P.

6.2.3.1.3 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Parámetros utilizados:

- Ganancia Proporcional (K_p).
- Ganancia Integral (K_i).
- Ganancia Derivativa (K_d).

La implementación del controlador PID proporcionó la respuesta más efectiva del sistema. La bola se estabilizó en la posición deseada con mínimo sobre impulso y una respuesta rápida, con un tiempo de establecimiento de 30 s. La **Figura 58** muestra una respuesta óptima con una corrección eficiente y mínima desviación.

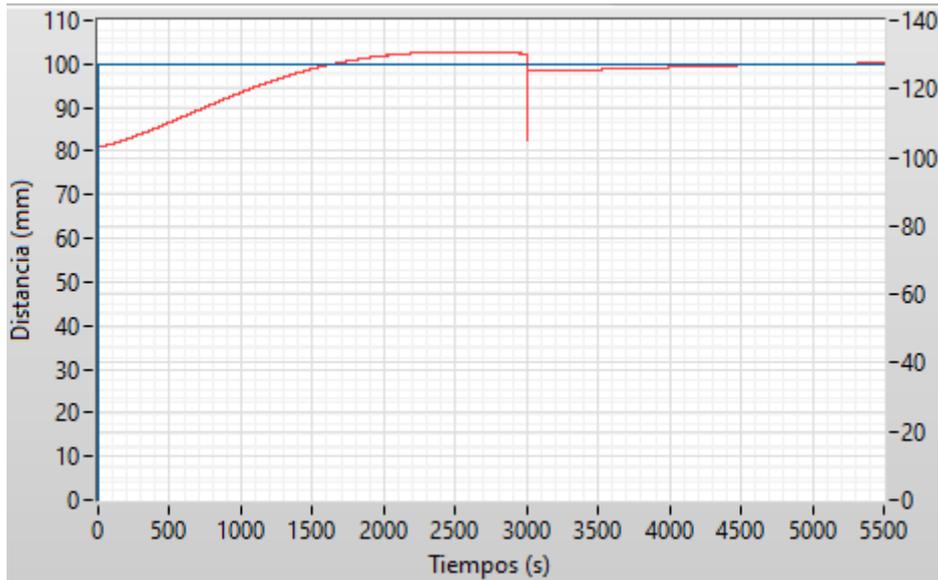


Figura 58. Gráfica del sistema con un valor PID.

El controlador PID combinó de manera efectiva los términos proporcional, integral y derivativo, resultando en una respuesta altamente precisa y estable. El término derivativo ayudó a reducir las oscilaciones y a mejorar la estabilidad general del sistema. El controlador PID proporcionó la mejor combinación de precisión y estabilidad, superando significativamente al controlador P y al controlador PID.

6.3 Sistema de control clásico en LabVIEW

A continuación, en la **Figura 59** se muestra el diseño del sistema de control clásico (PID) para el sistema Ball & Beam.

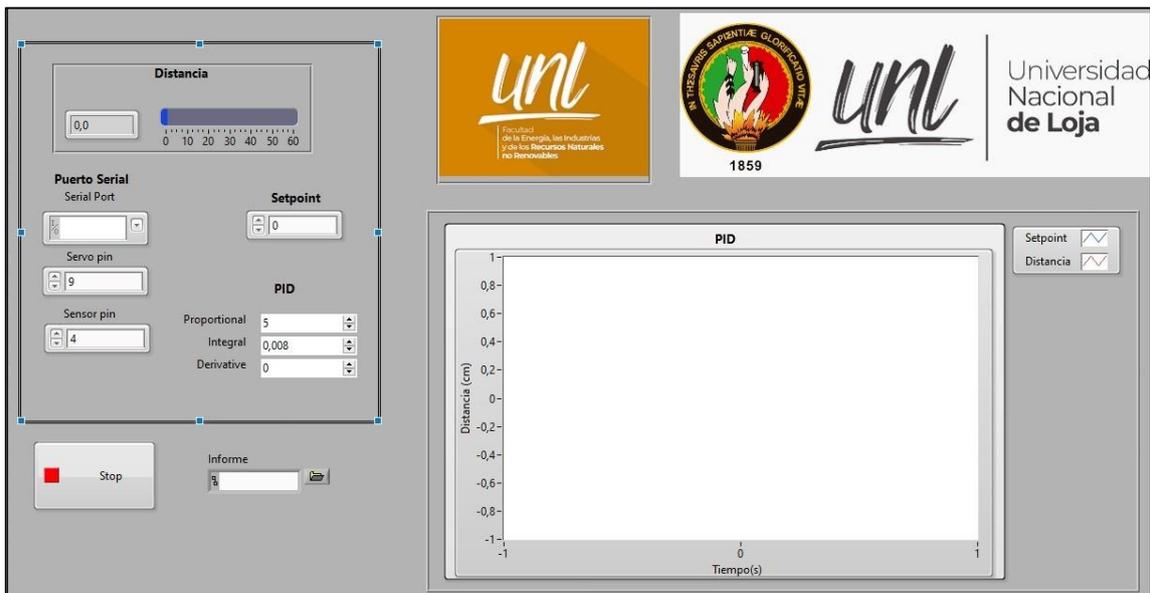


Figura 59. Interfaz del sistema de control.

6.3.1 *Indicador de distancia*

Se encarga de mostrar las lecturas de distancia que mide el sensor infrarrojo como se muestra en la **Figura 60**.

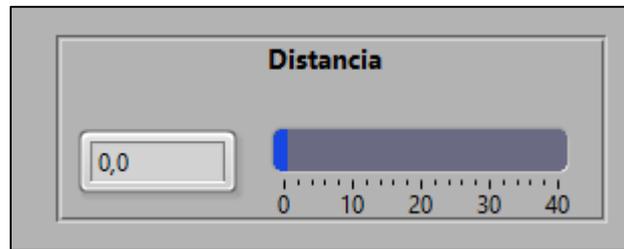


Figura 60. Indicador de distancia.

6.3.2 *Indicador puerto serial*

Se encarga de mostrar en que puerto de comunicación serial que se utiliza para comunicar LABVIEW y el sistema Ball & Beam como se ilustra en la **Figura 61**.

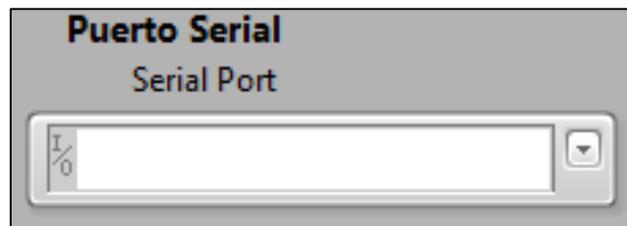


Figura 61. Indicador del puerto serial.

6.3.3 *Controlador pin servo y sensor*

Se encarga de controlar en que pines están conectados el sensor infrarrojo y el servomotor como se ilustra en la **Figura 62**.

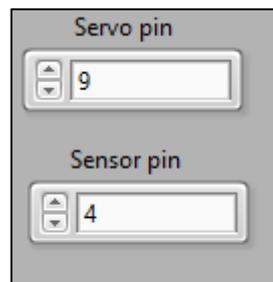


Figura 62. Indicador del puerto serial.

6.3.4 *Control de constantes PID*

Sirve para ingresar las constantes proporcional integral y derivativa con las que el prototipo se estabiliza correctamente en la **Figura 63** se ilustra.

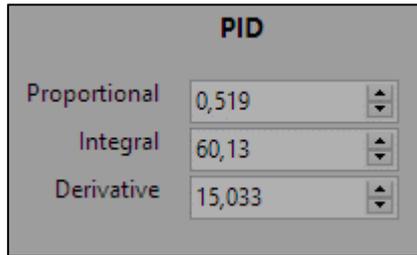


Figura 63. Control de constantes PID.

6.3.5 Panel de gráficos del sistema

Se encarga de mostrar las perturbaciones del sistema mediante curvas que relacionan el set point y la distancia como se muestra en la **Figura 64**.

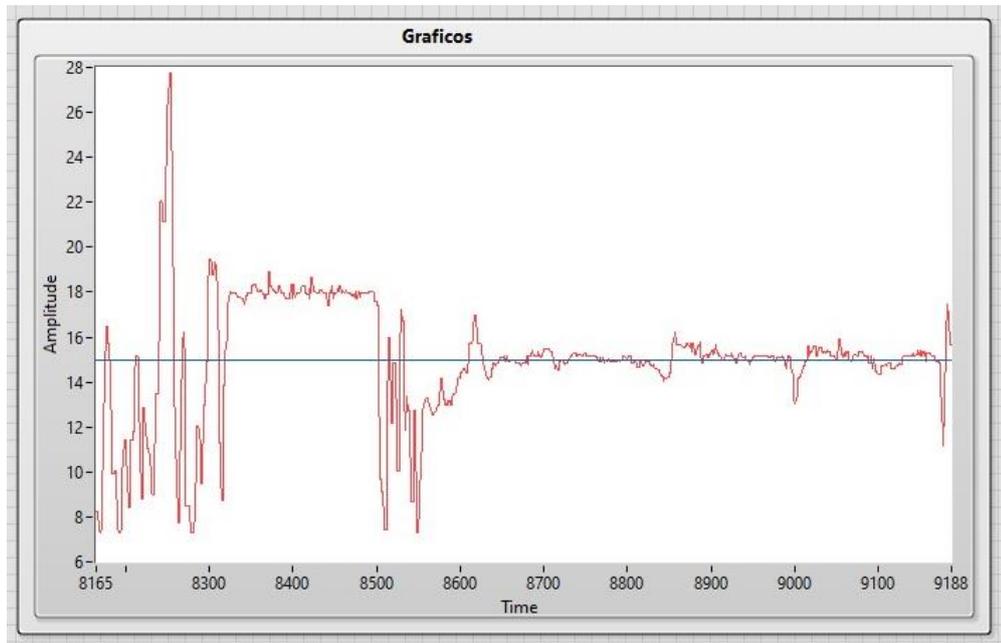


Figura 64. Panel de gráficos del sistema.

6.3.6 Indicador de curvas

Cada color que se muestra en la **Figura 65** representa las curvas que se muestran en el panel de gráficos del sistema en este caso la curva de color azul indica el setpoint seleccionado y la curva de color rojo es la distancia que recorre la pelota hasta estabilizarse con el setpoint.

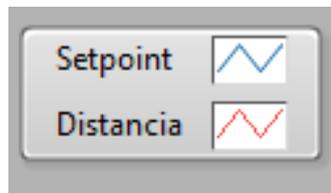


Figura 65. Panel de gráficos del sistema.

7. Discusión

Se pudo lograr la construcción e implementación de este prototipo mismo que está construido principalmente mediante impresión 3D, componentes electrónicos de bajo valor y materiales reciclados lo cual lo hace un sistema económico y accesible a diferencia de Araujo (2018) que utiliza elementos más costosos como lo es estructura de aluminio, así como componentes electrónicos de mucho más valor económico por ejemplo la tarjeta para adquisición de datos que utiliza es Raspberry Pi 4 Modelo B 2019 que es significativamente más costosa que la Arduino UNO que se utilizó en el prototipo desarrollado, en este caso el tiempo de estabilización de la pelota será notablemente menor en el prototipo más costoso la diferencia del tiempo de estabilización entre ambos prototipos está estimado en 4,13 s.

Se planteó la implementación y elaboración de un sistema Ball & Beam. Para alcanzar este propósito, se realizaron una serie de tareas concretas detalladas en el estudio. Se llevó a cabo un reconocimiento experimental de sistemas con el objetivo de conseguir un modelo matemático exacto. Esta etapa implicó la recopilación de datos a través de pruebas realizadas con el programa LabVIEW, que dispone de un archivo VI para la recopilación de datos. Después, se utilizó el instrumento "ident" de MATLAB para efectuar estimaciones y verificar el modelo que mejor se acoplaría a la planta. Se consiguió una función de transferencia con un porcentaje de corrección del 97.28%. En contraste, Obando et al. (2016) lograron un modelo matemático de primer orden mediante una modificación del ajuste del modelo 85.33%, mientras que Gomez (2016) desarrollaron un modelo matemático de segundo orden con un ajuste del 89.43%.

Los estudios realizados en investigaciones anteriores y la investigación actual, determinan que un modelo con un ajuste que supera el 90% se considera lo suficientemente exacto para usos prácticos. Además, es vital que el modelo sea estable para asegurar su eficacia en ambientes cambiantes. El modelo matemático adquirido en este estudio satisface ambas limitaciones, dado que consiguió un ajuste del 97.28%, excediendo de esta manera el límite del 80%, y ha evidenciado estabilidad en las pruebas efectuadas. Así pues, se verifica que el modelo es adecuado para su aplicación en el sistema de control sugerido. Este hallazgo corrobora la eficacia del método empleado y propone que el sistema de control inteligente diseñado podrá funcionar de forma exacta y estable en la medición y control de presión.

Respecto al manejo del sistema, los resultados logrados evidencian la efectividad del método clásico utilizado. La aplicación de algoritmos de control (PID) ha facilitado el control y la estabilidad del movimiento de la bola sobre la viga, ofreciendo una respuesta dinámica gratificante ante alteraciones externas. Además, la combinación del software Arduino,

LABView y MATLAB® ha simplificado la comunicación y la representación visual de los datos, lo que ha favorecido un entendimiento y estudio más profundo del funcionamiento del sistema en tiempo real.

Sin embargo, es importante destacar que este estudio también ha identificado áreas de mejora y posibles limitaciones. Por ejemplo, se observó que ciertas condiciones ambientales o variaciones en los parámetros del sistema (variaciones de luz en el entorno) en caso del uso de un sensor ultrasónico (factores climáticos como el viento) podrían afectar su desempeño, lo que sugiere la necesidad de investigaciones adicionales para optimizar su adaptabilidad. Además, la complejidad del control del prototipo Ball & Beam podría requerir la exploración de enfoques más avanzados en futuras investigaciones, como el control no lineal o el aprendizaje automático.

Según Suarez et., al (2023) en su artículo denominado Comparativa de Control PID vs Control por Redes Neuronales Artificiales menciona que “En la implementación del control PID, se emplea MATLAB® y Simulink para diseñar y ajustar los parámetros del controlador, asegurando un seguimiento óptimo de la velocidad y posición del motor. Por otro lado, se utiliza una aproximación de Redes Neuronales Artificiales para modelar y controlar el sistema, permitiendo una adaptación dinámica y no lineal.”

Este tipo de control puede ser utilizado en diversas ramas de la ingeniería un claro ejemplo es en la automatización industrial en una fábrica al momento de controlar temperatura de un horno o una caldera, un sensor de temperatura por ejemplo (RTD) se encarga de medir la temperatura y enviar los datos al controlador, este se encarga de comparar la temperatura media con el valor deseado o setpoint y calcula si se debe aumentar o disminuir la temperatura para ello utiliza un PID para generar la señal de control que va hacia el actuador (resistencia eléctrica, ventilador, compresor, etc.) el cual ajusta la temperatura en función de la señal que recibió desde el controlador.

8. Conclusiones

- El diseño del sistema Ball and Beam, se compone de 11 piezas, de las cuales 7 de ellas fueron construidas en impresión 3D (Base del sensor infrarrojo, base del servomotor, base principal, base de sujeción de biela, biela y manivela, viga) lo que ayudo a reducir el costo del prototipo, el cual es de \$87.80 y 4 son dispositivos electrónicos (Arduino Uno, sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK0F, servomotor MG995, y una fuente de alimentación).
- Mediante la toma de datos y analizarlos en MATLAB y LabVIEW, se seleccionó la función de transferencia más adecuada para representar la planta, considerando la comprobación de Polos y Ceros y un porcentaje de ajuste superior al 90%. Tras comparar distintos modelos, se obtuvo la función de transferencia 2 (TF2) con un ajuste del 97,28%, lo que la convierte en una herramienta confiable para el diseño de estrategias de control.
- Al sistema obtenido se le aplicó un control clásico PID en el prototipo *Ball & Beam* para demostrar la aplicación del control automático; el sistema logró estabilizarse y controlarse con precisión según el comportamiento del prototipo en tiempo real, con los parámetros $K_p= 8,185$; $K_i= 0,271$ y $K_d= 3063,723$; La función de transferencia de la planta, se encuentra representada con un sistema lineal de primer orden.
- La implementación del control PID demostró su efectividad para estabilizar el prototipo *Ball & Beam*, permitiendo un control preciso en tiempo real y validando la viabilidad del diseño con un modelo matemático confiable y una función de transferencia adecuada.

9. Recomendaciones

- Ante la complejidad dinámica del sistema Ball & Beam, es conveniente sugerir la investigación constante de otros métodos de control. Esto hace énfasis a la exploración de enfoques como el control no lineal, inteligencia artificial, etc., como redes neuronales o algoritmos de aprendizaje automático. Este punto de vista busca optimizar la precisión y la capacidad de adaptación del sistema frente a condiciones variables y desafiantes.
- Es fundamental continuar refinando el diseño mecánico y estructural del prototipo Ball & Beam para optimizar su rendimiento y eficiencia. Esto implica emplear técnicas avanzadas de modelado y simulación, así como explorar nuevos materiales y métodos de fabricación para construir un sistema más resistente, liviano y fácil de mantener.
- Para verificar la eficacia y la utilidad del sistema Ball & Beam, es recomendado realizar experimentos con métodos de control diferentes como por ejemplo con control difuso entre otros. El uso de diferentes métodos de control ayudará a verificar la precisión y la confiabilidad del sistema, así como a identificar posibles áreas de mejora y optimización para su implementación en aplicaciones industriales o educativas.
- Al momento de obtener las constantes k_p , k_i , k_d es recomendable utilizar dos o más métodos de sintonización ya que existe una variedad de los mismos ya que de esta manera se puede obtener constantes que optimicen de mejor manera el sistema en términos de tiempo de estabilización y reducción de error.

10. Bibliografía

- AADECA. (2017). *Servomotores: control, precisión y velocidad*. AADECA REVISTA.
- Alfaro, V. (2002). MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO REGULADORES. *Revista de la universidad de Costa Rica*, 12(1,2), 21-36.
- Amazon . (15 de 08 de 2023). *amazon*. Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/HUABANTOF10120-medición-distancia-2-0-70-9/dp/B089SLWYZ9>
- Amazon. (26 de 11 de 2018). Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/Taidacent-3-937-70-866-TOF10120-proximidad-distanciamiento/dp/B07KW1XN5X>
- Aplicaciones PID. (2021). *Aplicaciones de controladores PID*.
- Åstroöm, J., & Hägglund, T. (1995). *Pid controllers: theory, design, and tuning*. New York: Research Triangle Park, NC.
- AUTYCOM. (2023). *AUTYCOM: Innovación Inteligente*. Obtenido de <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-de-control/>
- Bhasin, Ajay; Bennett, James; Grant, Jamila; Chung Lim, Wen . (2023). *LibreTexts Español*. Obtenido de [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingeniería_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Dinámica_y_Control_de_Procesos_Químicos_\(Woolf\)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_\(PID\)/9.03%3A_Afinación_PID_a_través_de_métodos_clásicos](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingeniería_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Dinámica_y_Control_de_Procesos_Químicos_(Woolf)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_(PID)/9.03%3A_Afinación_PID_a_través_de_métodos_clásicos)
- Blas Sánchez, L. A., Martínez Fuentes, O., Montesinos García, J. J., Solís Cervantes, C. U., & Malo Tamayo, A. J. (2015). *El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de Robotica*.
- Buza, G., Milton, J., Bencsik, L., & Insperger, T. (2020). Establishing metrics and control laws for the learning process: ball and beam balancing. *114*, 83-90. doi:<https://doi.org/10.1007/s00422-020-00815-z>
- Campos, F., Ochoa, S., & Saavedra, A. (2021). *BALL AND BEAM CONTROL SYSTEM*. Santiago de Surco: Universidad Ricardo Palma.
- Castaño, S. A. (2023). *Método Cohen y Coon de Sintonía para Control PID*.
- Chen, W., Sui, X., & Xing, Y. (2012). Modeling and modulation of nonlinear ball- beam system controller based on matlab. *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery* (págs. 2388–2391). Chongqing, China: IEEE.
- Cienciasfera. (2022). Obtenido de <https://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema14/index.html>

- Cohen, G., & Coon, G. (1953). Theoretical Investigations of Retarded Control Trans ASME. 827.
- Departamento de Tecnología IES. (2019). *Arduino*. Aguañac.
- Dulhoste, J.-F. (2020). *Ajuste de Controladores*.
- Fernández, D. (2020). *Fundamentos Del Control Automático Industrial*. Valparaíso. Obtenido de <https://pastranamoreno.files.wordpress.com/2011/03/tema-2-leer-antes-de-la-clase.pdf>
- GEYA. (11 de 10 de 2022). Obtenido de <https://www.geya.net/es/different-types-of-proximity-sensors/>
- Gómez, L. (2015). *Fundamentos de Control Automatico*. Maturín EDO. Monagas.
- González, A. G. (2016). *¿Qué es y cómo funciona un servomotor?* Panama Hitek.
- Hauser, J., Sastry, S., & Kokotovic, P. (1992). Nonlinear control via approximate input-output linearization: the ball and beam example. *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control*, (págs. 392–398.). Tampa, FL, USA: IEEE.
- Hernandez, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. Mexico: PEARSON EDUCACIÓN. Obtenido de <https://www.tecnologias-informacion.com/control-procesos.html>
- Hernández, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. PEARSON EDUCACIÓN.
- Huang, J., & Lin, C.-F. (1995). Control no lineal robusto del sistema de bola y viga. *Actas de la Conferencia Americana de Control de 1995 - ACC'95* (págs. 306-310). Seattle: IEEE.
- KEYENCE. (10 de 12 de 2023). Obtenido de <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/proximity/info/>
- Laukonen, E., & Yurkovich, S. (1993). Un Banco de pruebas de bola y viga para la identificación difusa y el diseño de control. *1993 American Control Conference* (págs. 665-669). San Francisco CA: IEEE.
- Leantec. (2019). *Datasheet HC-SR04*. El Salvador.
- Maalini, P., Prabhakar, G., & Selvaperumal, S. (2016). Modelling and control of ball and beam system using pid controller. *2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)* (págs. 322-326). Ramanathapuram, India: IEEE.
- Mandado, E., Marcos, J., Fernandez, C., & Anesto, J. (2009). *AUTÓMATAS PROGRAMABLES Y SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN*.
- Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*. Quilmes.

- Navarro, N. S., & Cartagena, Y. G. (2022). *Aprendizaje basado en proyectos con ARDUINO*. Chile: Universidad Central.
- NaylampMechatronics. (2022). Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>
- Obando, O., & Romero, H. (2010). *DESARROLLO DE UN SISTEMA BALL AND BEAM, PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIAS DE CONTROL MEDIANTE LABVIEW*. BUCARAMANGA.
- Ortiz, F. (2004). *Modelado y control PD-difuso en tiempo real para el sistema barra-esfera*.
- Pérez, E. M., & Roldan, A. M. (2017). *SENSORES DE ULTRASONIDOS*. Pontevedra.
- Picó, L. (01 de 10 de 2023). Obtenido de <https://www.libreservo.com/es/articulo/como-ajustar-correctamente-pid>
- Pozo, C. M., Catuto, K. A., Loor, A. J., Yagual, M. G., & Enderica, C. A. (2023). COMPARATIVA DE CONTROL PID VS CONTROL POR REDES NEURONALES ARTIFICIALES. *Revista Científica Multidisciplinaria “EcoSur - Innovación, Tecnología y Desarrollo Sostenible de América Latina”*, 2-3.
- RevistaSeguridad360. (13 de 06 de 2023). Obtenido de https://revistaseguridad360.com/noticias/que-es-un-sensor-ultrasonico/#¿Que_es_un_sensor_ultrasonico_y_que_tipos_existen
- Serrano, E. (2018). *Diseño de un control automatico para la reducción de vibraciones en ductos de transporte de fluidos*.
- Smith, M. (19 de 06 de 2024). *DEWESoft*. Obtenido de <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-controlador-pid>
- Torres, F., & Fernández, C. (2020). *Sensores y Detectores*. Universitat D` Alacant.
- Valluru, S., Singh, M., & Singh, S. (2016). Prototype design and analysis of controllers for one dimensional ball and beam system. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)* (págs. 1-6). Delhi, India: IEEE.
- Villafuerte, R., Vite, L., Cabrera, A. C., & Lopez, A. (2018). Diseño, construcción y estabilización de un sistema Bola-Balancín. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 5.
- Vincenty, C., & Beauchamp, G. (2014). Modelado del sistema de bolas y vigas a partir de la mecánica newtoniana y de los métodos de Lagrange. *Duodécima Conferencia Latinoamericana y del Caribe de Ingeniería y Tecnología (LACCEI'2014)*.

- Vivanco, M. A. (2022). DISPOSITIVO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE PALLETS DE MADERA DE Balsa POSTERIOR AL PROCESO DE SECADO. 53.
- Wang, L., & Mendel, J. (1992). Funciones de base difusas, aproximación universal y aprendizaje de mínimos cuadrados ortogonales. *Transacciones IEEE sobre redes neuronales*, 3, 807-814.
- Weg. (2023). Obtenido de https://www.weg.net/catalog/weg/AR/es/Seguridad-de-Máquinas%2C-Sensores-Industriales-y-Fuentes-de-Alimentación/Sensores-Industriales/Sensores-de-proximidad-capacitivos/Sensores-de-proximidad-capacitivos/p/MKT_WDC_GLOBAL_CAPACITIVE_SENSORS

11. Anexos

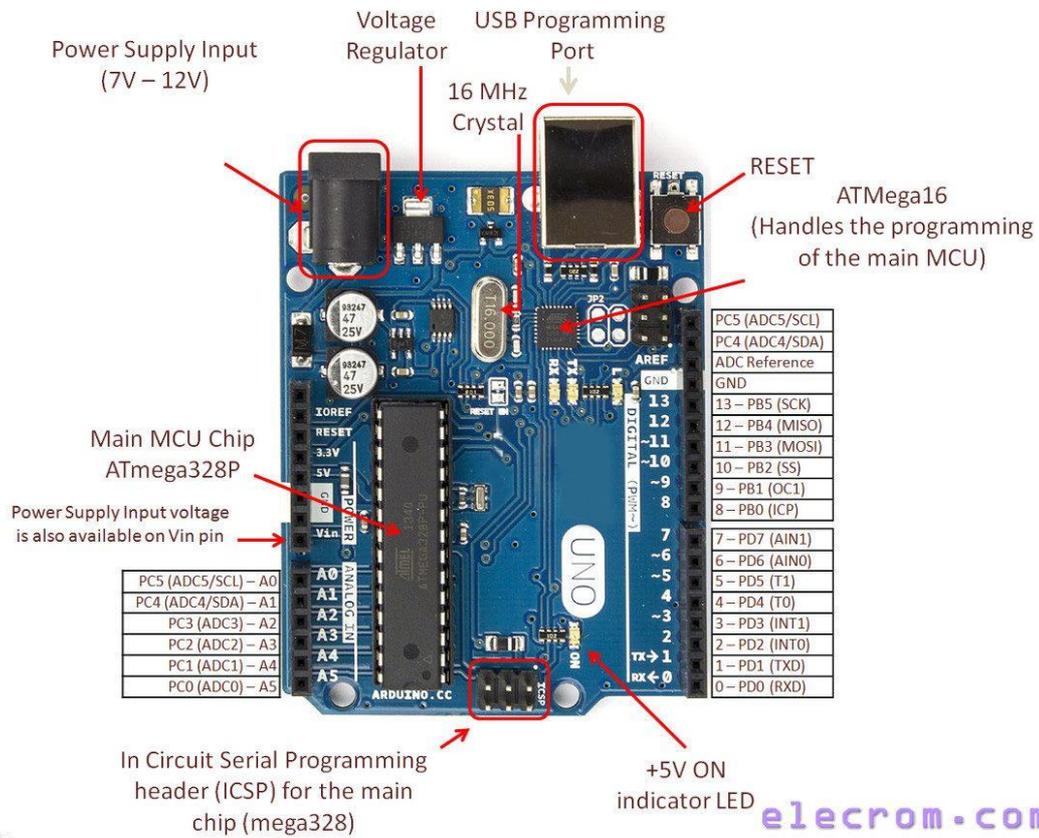
Uno de los objetivos de este proyecto es que el sistema fuese de bajo coste. Vamos a ver en detalle cual es el gasto en el que hay que incurrir para replicar este “Ball and Beam”. En primer lugar, se va a estudiar cual es el precio de las piezas impresas en 3D que forman la estructura del sistema. Teniendo en cuenta que una bobina de filamento ABS para la impresora utilizada es de 800 gramos y su precio aproximado es \$35, podemos concluir que el coste por gramo de material es de 0.044 \$/g.

Las piezas impresas y sus precios son los siguientes:

Anexo 1. Costo de Materiales.

Componentes	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Arduino uno	1	\$15	\$15
Protoboard	1	\$2	\$2
Sensor infrarrojo Sharp	1	\$17	\$17
Servomotor	1	\$8	\$8
Base de madera	1	\$5	\$5
Tornillos métrica 3	8	\$0.1	\$0.80
Fuente de alimentación 9V	1	\$5	\$5
Rollo de Filamento	1	\$35	\$35
		Precio total	87.8

Anexo 2. Datasheet Arduino Uno.



elecom.com

Anexo 3. Datasheet sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK0F.

SHARP

GP2Y0A21YK0F

■ **Absolute Maximum Ratings** (T_a=25°C, V_{CC}=5V)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	-0.3 to +7	V
Output terminal voltage	V _O	-0.3 to V _{CC} +0.3	V
Operating temperature	T _{op}	-10 to +60	°C
Storage temperature	T _{stg}	-40 to +70	°C

■ **Electro-optical Characteristics** (T_a=25°C, V_{CC}=5V)

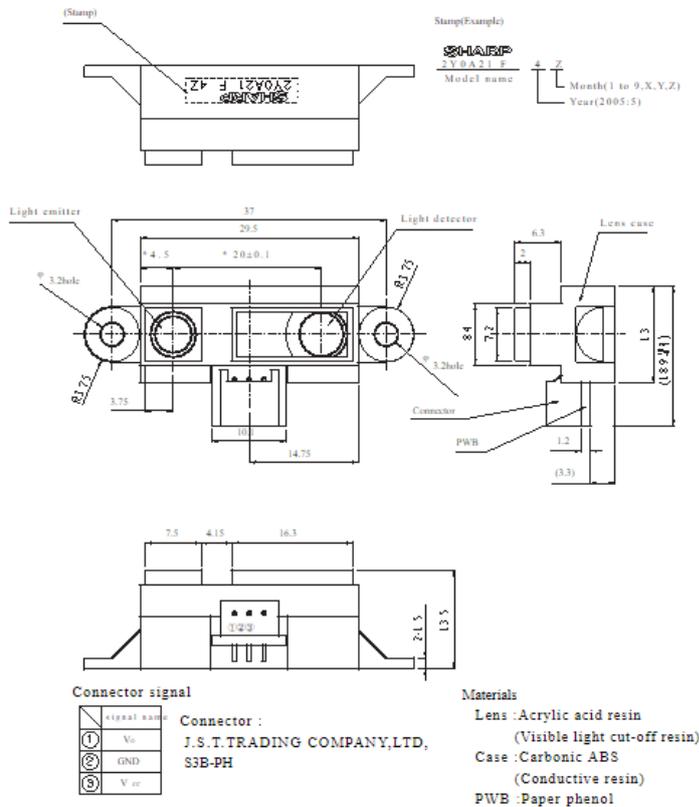
Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Average supply current	I _{CC}	L=80cm (Note 1)	—	30	40	mA
Distance measuring	ΔL (Note 1)		10	—	80	cm
Output voltage	V _O	L=80cm (Note 1)	0.25	0.4	0.55	V
Output voltage differential	ΔV _O	Output voltage difference between L=10cm and L=80cm (Note 1)	1.65	1.9	2.15	V

* L : Distance to reflective object

Note 1 : Using reflective object : White paper (Made by Kodak Co., Ltd. gray cards R-27 · white face, reflectance; 90%)

■ **Recommended operating conditions**

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	4.5 to 5.5	V

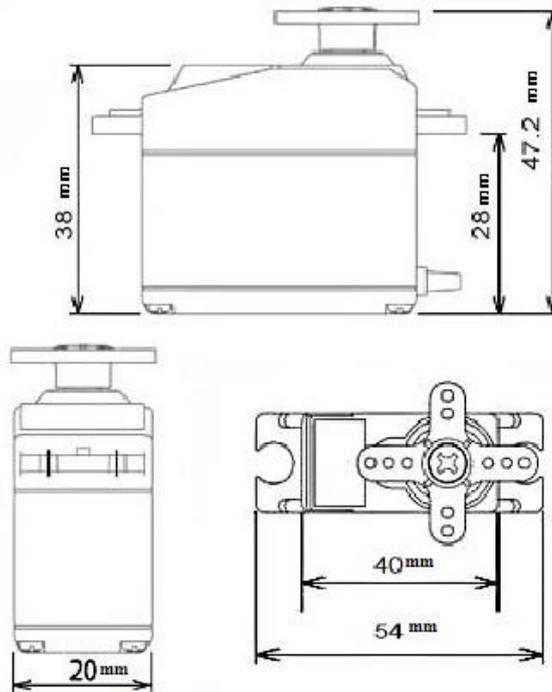


Anexo 4. Datasheet servomotor MG995.



YELLOW	Signal wire/PWM
RED	Positive Pole(+)
BROWN	Negative Pole/GND(-)

Dimension	40x19x43mm/1.57x0.74x1.69in
Connector Wire Length	290mm/11.4 in
Weight	56g
Operating Speed	0.17sec / 60° (4.8V no load) 0.13sec / 60° (6.0V no load)
Stall Torque	9.4 kg-cm (4.8V) 12 kg-cm (6V)
Operation Voltage	4.8 - 7.2Volts
Stall Torque	9.4 kg-cm (4.8V) 12 kg-cm (6V)
Operation Voltage	4.8 - 7.2Volts
Operation Voltage	4.8 - 7.2Volts



Anexo 5. Prácticas de Laboratorio

Práctica de Laboratorio 1: Calibración de Sensores y Actuadores

Objetivo

- Aprender y aplicar técnicas de calibración para el Sharp GP2Y0A21YK0F y el servomotor.

Materiales

- Planta física (barra inclinada con Sharp GP2Y0A21YK0F y servomotor)
- Esfera
- Regla o cinta métrica
- Software MATLAB

Procedimiento

1. Configure el sistema asegurándose de que todos los componentes estén conectados correctamente.
2. Realice una serie de mediciones para calibrar el sensor Sharp GP2Y0A21YK0F utilizando una regla o cinta métrica para verificar las lecturas del sensor.
3. Establezca una relación lineal entre el ángulo de rotación del servomotor y el ángulo de inclinación de la barra.
4. Utilizando el software MATLAB, realice pruebas para verificar la precisión de la calibración.

Preguntas de Reflexión

- ¿Cuál es la importancia de calibrar correctamente los sensores y actuadores en un sistema de control?
- ¿Cómo afectan los errores de calibración al rendimiento del sistema?

Práctica de Laboratorio 2: Diseño y Ajuste de un Controlador PID

Objetivo

- Diseñar y ajustar un controlador PID para controlar la posición de la esfera en la barra inclinada.

Materiales

- Planta física (barra inclinada con Sharp GP2Y0A21YK0F y servomotor)
- Esfera
- Software MATLAB.

Procedimiento

1. Establezca un modelo matemático del sistema utilizando las ecuaciones de movimiento.
2. Diseñe un controlador PID inicial utilizando el método de Ziegler-Nichols.
3. Implemente el controlador en Simulink y realice simulaciones para validar su diseño.
4. Ajuste los parámetros del controlador PID basándose en las respuestas del sistema obtenidas durante las simulaciones y las pruebas experimentales.

Preguntas de Reflexión.

- ¿Cómo afecta cada parámetro (K_p , K_i , K_d) al rendimiento del controlador?
- ¿Qué técnicas adicionales podrían utilizarse para sintonizar el controlador PID de forma más efectiva?

Práctica de Laboratorio 3: Validación Experimental

Objetivo

- Validar el modelo del sistema y el controlador PID diseñado mediante experimentación práctica.

Materiales

- Planta física (barra inclinada con Sharp GP2Y0A21YK0F y servomotor)
- Esfera
- Software MATLAB.

Procedimiento

1. Realice experimentos prácticos utilizando la planta física para validar el modelo del sistema y el controlador PID diseñado.
2. Compare los resultados experimentales con las predicciones teóricas y los resultados de simulación.
3. Identifique y analice cualquier discrepancia entre los resultados experimentales y las predicciones/simulaciones.

Preguntas de Reflexión

- ¿Los resultados experimentales validaron efectivamente el modelo y el controlador?
- ¿Qué factores podrían haber contribuido a cualquier discrepancia observada entre los resultados experimentales y las predicciones/simulaciones?

Estas prácticas de laboratorio están diseñadas para brindar una comprensión práctica y profunda de los conceptos involucrados en el control de sistemas dinámicos.

Ramiro Junior Dominguez Viteri

EFL Teacher

Certificación de traducción al Idioma Inglés

Ramiro Junior Dominguez Viteri
Licenciado en Pedagogía del Idioma Inglés

CERTIFICA:

Que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés, del resumen del trabajo de integración curricular titulado: **Elaboración, Control e implementación de un sistema Ball & Beam**, de autoría de el estudiante **Jefferson Michael Jiménez Quizhpe**, con número de cédula **1150355343**, egresado de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja. Lo certifico en honor a la verdad, y autorizo hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.

Loja, 08 de agosto de 2024



Ramiro Junior Dominguez Viteri
Licenciado en Pedagogía del Idioma Inglés
C.I: 1150058772
Registro Senecyt: 1008-2024-2904407