



Muy buen trabajo, un informe completo y el prototipo realiza las instrucciones básicas. Con mayo dedicación podrían haber logrado un sistema más robusto y eficiente.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN ANDRÉS TUXTLA

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA.

GRUPO:

802-B

MATERIAS.

INGENIERÍA DE CONTROL CLÁSICO Y SEMINARIO DE MECATRÓNICA

DOCENTE:

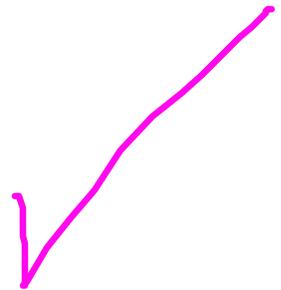
MII. BLANCA NICANDRIA RÍOS ATAXCA

PROYECTO:

CONTROL PID PARA UN SISTEMA BALL AND BEAM UTILIZANDO ARDUINO

INTEGRANTES:

JURIAN DÁVILA PALACIOS. 191U0111
IMANOL HERNÁNDEZ RAMÓN. 191U0122
BLAS ALEJANDRO LEAL LUNA. 191U0125
RODOLFO JARED MORALES HERNÁNDEZ. 191U0135
ROSA MARÍA PUCHETA REYES. 191U0143
AGUSTÍN ROSAS CAMPOS. 191U0149
LILIANA SEBA ORTIZ. 191U0150
JOSÉ ALEJANDRO XOLOT PIO. 191U0163



SAN ANDRÉS TUXTLA, VER; A 28 DE JUNIO DE 2023

ÍNDICE GENERAL.

I.	Generalidades.....	1
A.	DESCRIPCIÓN.....	1
B.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
C.	OBJETIVOS GENERAL Y ESPECIFICOS.....	2
1.	Objetivo General.....	2
2.	Objetivos específicos.....	2
D.	ALCANCE.....	2
E.	JUSTIFICACIÓN.....	2
II.	MARCO TEÓRICO.....	3
A.	MARCO HISTORICO.....	3
B.	MARCO CONCEPTUAL.....	4
1.	Definiciones de un Sistema de control.....	4
a)	Control automático.....	4
b)	Sensor.....	4
c)	Planta.....	4
d)	Función de transferencia.....	4
e)	Control proporcional integral derivativos (PID).....	5
2.	Definiciones del sistema bola y viga.....	5
3.	Servo motor.....	5
4.	Arduino.....	5
III.	METODOLOGÍA.....	6
A.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	6
B.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	6
C.	ACTIVIDADES REALIZADAS.....	6
IV.	DISEÑO Y DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO PARA EL SISTEMA BOLA Y BARRA.....	6
A.	SIMULACIÓN.....	6
	Se diseño el sistema de bola y para en el software AutoCAD para tener una vista previa antes de su elaboración.....	6
B.	CONTROL DEL SISTEMA.....	10
5.	Sistema de control en lazo cerrado para el sistema de barra y bola.....	10
C.	MODELO MATEMATICO.....	10
1.	Parámetros del sistema.....	10
2.	Ecuaciones del sistema.....	11
D.	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	11
E.	SIMULACIÓN EN SIMULINK MATLAB.....	12
1.	Simulink.....	12
2.	Sistema en lazo abierto.....	12
3.	Sistema en lazo cerrado.....	13
V.	construcción del prototipo ball & beam.....	14
A.	MATERIALES.....	14
B.	ESTRUCTURA Y MONTAJE DEL SISTEMA BOLA Y VIGA.....	16
VI.	RESULTADOS.....	25
VII.	CONCLUSIONES.....	30
VIII.	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	30

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Descomposición del diagrama de un sistema ball & beam.	1
Figura 2. Sistema de control en lazo cerrado	4
Figura 3. Sistema ball & beam. [12]	5
Figura 4. Placa Arduino Uno. [14].....	5
Figura 5. Diseño y medidas del sistema ball & beam. [Autoría propia].....	6
Figura 6. Sistema ball & beam diseñado en SolidWorks. [Autoría propia]	7
Figura 7. Diseño de la base del sistema. [Autoría propia].....	7
Figura 8. Disco diseñado en SolidWorks. [Autoría propia]	7
Figura 9. Base barra diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]	8
Figura 10. Biela diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]	8
Figura 11. Base lateral para el sensor diseñada en SolidWorks. [Autoría propia].....	8
Figura 12. Bola diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]	9
Figura 13. Base caja sensor parte inferior diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]	9
Figura 14. Tapa de la caja del sensor diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]	9
Figura 15. Sistema de control en lazo cerrado para el sistema de barra y bola. [Autoría propia].....	10
Figura 16. Diagrama de cuerpo libre de un sistema ball & beam,.....	10
Figura 17. Código de Matlab para obtención de la transferencia del sistema ball & beam. [Autoría propia]	12
Figura 18. Función de transferencia para el sistema ball & beam. [Autoría propia]	12
Figura 19. Diagrama de bloques en lazo abierto para el modelo de bola y barra. [Autoría propia]	12
Figura 20. Diagrama de bloques con un controlador proporcional – integral – derivativo. [Autoría propia].....	13
Figura 21. Parámetros del controlador PID [Autoría propia]	13
Figura 22. Placa Arduino Uno. [15].....	14
Figura 23. Sensor ultrasónico. [15]	14
Figura 24. Placa protoboard. [15]	14
Figura 25. Servo motor. [15].....	15
Figura 26. Placa de uniceL. [15]	15
Figura 27. Cables tipo Dupont. [15].....	15
Figura 28. Bola de uniceL. [15]	15
Figura 29. Corte de piezas de uniceL. [15].....	16
Figura 30. Unión de las piezas de uniceL. [15]	16
Figura 31. Conexión circuito electrónico. [Autoría propia]	21
Figura 32. Gráfica de respuesta del sistema en lazo abierto.[Autoría propia].....	25
Figura 33. Configuración del controlador para un sistema en lazo cerrado. [Autoría propia].....	25
Figura 34. Gráfica de respuesta del sistema en lazo cerrado. [Autoría propia]	26
Figura 35. ajuste manual de los parámetros PID. [Autoría propia]	26
Figura 36. Diferencia de la respuesta entre el controlador PID y la herramienta Tuner. [Autoría propia]	27
Figura 37. Update Block.....	27
Figura 38. Respuesta del sistema ball & beam.....	28

Control PID para un sistema ball and beam utilizando Arduino (Junio de 2023)

I. GENERALIDADES

A. DESCRIPCIÓN

Los sistemas ball-and-beam (más conocidos como bola y barra) son uno de los problemas más conocidos en los sistemas de control. Básicamente consiste en controlar la posición de una esfera colocada sobre una barra o viga y cambiar el ángulo de inclinación para mantener la esfera estable en una posición. Por esta razón, este sistema utiliza el ángulo del eje del motor como entrada y la posición de la bola como salida. Este es un sistema de un grado de libertad, ya que solo controlamos el ángulo de inclinación del haz.

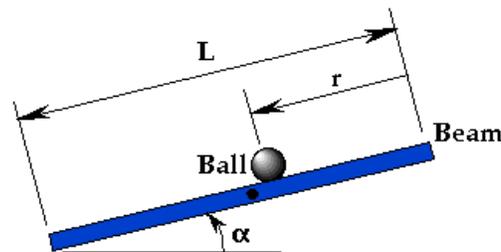


Figura 1: Descomposición del diagrama de un sistema ball & beam. [1]

Primero, identificamos y analizamos un modelo teórico del sistema con el que estamos trabajando, y usamos sus parámetros como referencia. Una vez obtenido, se comenzó a simular el sistema en Matlab/Simulink. Esta sección proporciona un análisis paso a paso del comportamiento del sistema en relación con varias señales de referencia y las diferencias con los sistemas reales más rápidos. Una vez obteniendo los resultados finales, pasamos a la sección de implementación y ensamblaje real para realizar pruebas y comparar con los resultados de la simulación para explorar posibles mejoras.

B. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

¿Es posible diseñar una estrategia de control PID para estabilizar un sistema no lineal formado por una barra y una bola?

Los procesos industriales deben implementar técnicas y modelos de control automatizado para lograr altos rendimientos a bajo costo y lograr mayores eficiencias. Las teorías de control comúnmente utilizadas son: La teoría de control clásica se refiere a un proceso en el que el sistema tiene una salida y una entrada (SISO).

La Teoría de Control Moderna se utiliza para gestionar la complejidad de las plantas de fabricación modernas que se caracterizan por ser sistemas de entrada/salida múltiple (MIMO). Esta teoría facilitó el diseño de varios sistemas de control.

La estabilidad del sistema de control está relacionada con el error entre el sistema o planta real y el sistema modelado, lo que sugiere que el modelo puede volverse inestable cuando se aplica a sistemas reales. La teoría de control robusto es una técnica que complementa la teoría moderna mediante el análisis de los límites del posible error. Esta teoría es matemáticamente muy compleja porque estos datos se utilizan para diseñar el controlador. [2]

Estas teorías utilizan algoritmos complejos para ejecutar tareas que implican mayor rigurosidad; la implementación de estrategias de control han brindado una suma de soluciones a procesos y sistemas que requerían más de un operario para finalizar labores tales como la supervisión, adquisición y control de datos en diferentes tareas como el control de flujo en sistemas de tuberías y otras técnicas de autonomía más avanzadas como el control de sistemas de suspensiones hidroneumáticas pilotadas, sistemas electromecánicos e hidráulicos.

Estos sistemas reales implican una relación no lineal entre sus variables, los procesos en sistemas de control no lineales suelen ser complejos ya que, al momento de tener múltiples entradas al sistema, estos carecen de obtener la salida total del sistema como la suma de las salidas parciales, que resultan de aplicar cada entrada por separado, haciendo las demás entradas ceros. Según Ogata, un estudio profundo de los sistemas físicos reveló que los sistemas lineales solo lo son en rangos limitados de operación.

Tener una planta física donde se puedan aplicar y experimentar estas técnicas de control mencionadas, ayuda a la comprensión de la teoría y se puede llevar a la práctica estos conceptos cabe destacar, que son limitadas las plantas en las que se pueden realizar aplicaciones de las estrategias de control para el aprendizaje ya que su construcción se considera dispendiosa, por lo tanto su estudio se limita a una simulación en software y no en una planta física que es donde se puede evidenciar los reales problemas de implementar una estrategia de control tales como tiempos de respuesta del actuador, perturbaciones y ruidos en el proceso de sensado. [3]

C. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECIFICOS.

1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de control PID para el modelo Bola y viga utilizando Arduino.

2. Objetivos específicos

- Diseñar una estrategia de control PID para el sistema Bola y viga.
- Desarrollar la estructura bola y viga para su control.
- Implementar la estrategia de control PID en el sistema Bola y viga.

D. ALCANCE

El presente proyecto pretende derivar en una aplicación didáctica para alumnos del ITSSAT y como apoyo para la división de ingeniería electromecánica en específico para la clase de control, para explicar de forma práctica conceptos como el control en lazo, función de transferencia o PID.

Por ello, el proyecto se va a desarrollar de una manera especialmente explicativa y visual para que se puedan comprender todos sus conceptos y la metodología seguida.

E. JUSTIFICACIÓN.

Los controles automatizados se han convertido en una parte importante e integral de los sistemas de naves espaciales, sistemas robóticos, procesos de fabricación modernos y cualquier operación industrial que requiera control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc.

En la práctica, muchos sistemas electromecánicos, hidráulicos y neumáticos contienen relaciones no lineales entre variables. Aquí la salida del componente puede verse abrumada por una gran señal de entrada. Puede haber una zona muerta que afecte a las señales pequeñas. Por lo tanto, el sistema se vuelve inestable durante la operación.

Entendiendo la aplicación de la teoría de control en la industria, las variantes desestabilizadoras del sistema y la necesidad de transferir la información estudiada, decidimos adoptar el control no lineal y la automatización como nuestro enfoque de investigación. Es una estrategia en un sistema de bola y barra de modelo no lineal y es un ejemplo de estudio teórico y práctico de sistemas dinámicos y matemáticos en la industria de la automatización.

Un sistema de bola y viga es un mecanismo simple con dos grados de libertad. Una es la rotación sobre el eje de la viga y la otra es la rotación de la bola dentro de la viga. El mecanismo de bola y viga es un sistema cerrado y requiere tecnología de control para estabilizar el sistema. La posición de la pelota se determina utilizando un sensor en un extremo del haz. La inclinación del haz está controlada por un servomotor de CC que transmite el movimiento a través de un par de varillas. La implementación del sistema de control en el mecanismo de bola y viga es para garantizar que la posición de la bola se controle en la posición deseada y para eliminar posibles perturbaciones como impactos. B. Mueva la pelota, como con la mano de su sistema, y mida la velocidad del controlador para que pueda observar el comportamiento del controlador dentro de la instalación física.

II. MARCO TEÓRICO

A. MARCO HISTORICO.

El control por realimentación tiene una larga historia que comenzó con el deseo primordial de los seres humanos de dominar los materiales y las fuerzas de la naturaleza en su provecho.

El reloj de agua, inventado por ktesibios de Alejandría (Egipto, 260 a.c.) fue posiblemente el primer sistema realimentado creado por el hombre. Su finalidad es mantener el nivel de agua de un tanque constante.

Para controlar el nivel se emplea un flotador o válvula flotante. Cuando el nivel del agua disminuye, dicha válvula favorece un aumento del caudal que alimentaba a este depósito, posibilitando la subida del nivel del mismo, y cuando el nivel de agua aumentaba, la válvula limita el caudal. Así se conseguía que el nivel del tanque permanezca constante. De esta forma se creó también el primer controlador, la Válvula de flotador.

El control se hace muy importante a partir de la Revolución Industrial. En Europa supuso la aparición de las primeras máquinas que se movían solas: molinos, hornos, calderas, máquinas de vapor... Estos dispositivos no se podían controlar manualmente así que surgió la necesidad de nuevos dispositivos y de esta forma se desarrollaron los primeros reguladores de temperatura, presión, velocidad y nivel.

Hoy en día, cualquier planta moderna tiene innumerables y sofisticados controladores para regular sus procesos, pero esto no sería posible sin los avances del pasado.

El control automático ha sido el pilar de los sistemas en la industria aeronáutica, automovilística, naval, entre otros; se dice que el primer trabajo significativo del control automático fue desarrollado por James Watt, un regulador de velocidad centrífugo que permitió el control de la velocidad de una máquina de vapor, en el siglo XVIII. Otros protagonistas en esta historia como Nicolas Minorsky, Harry Nyquist, Harold Locke Hazen y otros, aportaron importantes trabajos en las etapas iniciales del desarrollo de la teoría de control. [4]

En 1922, Minorsky realizó un trabajo en controladores automáticos para ser utilizados en la guía de embarcaciones, y demostró que la estabilidad del sistema se puede determinar a partir de las ecuaciones diferenciales que lo describen, este trabajo con título "Directional Stability of Automatic Steered Boats" en 1922, reconoce la no linealidad de los sistemas y aplica la linealización mediante la aplicación de la serie de Taylor a sistemas no lineales que correspondían al movimiento angular de un buque; resumiendo, Minorsky estudia la estabilidad y los efectos de retrasos de la información sobre las salidas de los sistemas. Nyquist diseñó un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de sistemas en lazo cerrado, a partir de la respuesta en lazo abierto a entradas sinusoidales en estado estacionario. En 1934, Hazen, quien introdujo el término servomecanismos para los sistemas de control de posición, analizó el diseño de los servomecanismos con relé, capaces de seguir con precisión una entrada cambiante, todo esto visto en la publicación "Theory of Servomechanism", en donde Hazen estudia el funcionamiento de los servomecanismos utilizando para su análisis conceptual el concepto de entradas típicas de escalón y rampa. [4]

Los primeros controladores de temperatura dieron cabida a la implementación de los reguladores con acción proporcional, pero en estos reguladores se manifestaba claramente el dilema: "precisión frente a estabilidad". En los años 30 aparece el término acción integral, implementado en el regulador de temperatura Foxboro Stabilog planteado por Mason en 1931. A finales de los 30 se introdujo la acción derivativa dando así lugar al regulador PID de tres términos (Proporcional, Integral y Derivativa). [5]

A mediados de los años 40 se logró que los sistemas de lazo cerrado cumplieran sus requisitos de comportamiento, es en ese entonces cuando aparecen en las industrias los controladores PID para el control de temperatura, presión, locomoción, entre otros; para ello Ziegler y Nichols establecieron reglas para sintonizar controladores PID, las cuales son las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols, luego a finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta, se desarrolló por completo el método del lugar de las raíces propuesto por Evans. Las reglas dichas anteriormente conducen a sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario de requisitos de comportamiento.

Hacia 1960, debido a la disponibilidad de las computadoras digitales fue posible el análisis en el dominio del tiempo de sistemas complejos. La teoría de control moderna, basada en el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados, se ha desarrollado para manejar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requisitos cada vez más exigentes sobre precisión, peso y coste en aplicaciones militares, espaciales e industriales. [5]

Durante los años comprendidos entre 1960 y 1980, se investigó a fondo el control óptimo tanto de sistemas determinísticos como estocásticos, así como el control adaptativo y con aprendizaje de sistemas complejos. Desde la década de los ochenta hasta la de los noventa, los avances en la teoría de control moderna se centraron en el control robusto y temas relacionados. [4]

En la actualidad, la teoría de control robusto es el “padre de la era informática”; el desarrollo del control automático se ha convertido en el pilar funcional de la industria aeronáutica, espacial, automovilística y naval, todo esto encaminado a perfeccionar la operación de tal modo que se pueda brindar calidad en razón a un rendimiento óptimo, por lo que se supone la necesidad de abordar teórica y prácticamente sistemas con mayor complejidad, la cual se manifiesta en las descripciones matemáticas, criterios de comportamiento, así como en la elaboración y ejecución de acciones conducentes a alcanzar ese comportamiento deseado, basado en el diseño de controladores convencionales, adaptativos y evolutivos en la inteligencia artificial, entre otros, (Grajales et al., 2007), para ello hoy en día existen estrategia de control tales como: estrategias de control son G.P.I (control Proporcional Integral Generalizado), control de lógica difusa, LQR (Regulador Lineal Cuadrático) [6]

B. MARCO CONCEPTUAL.

1. Definiciones de un Sistema de control.

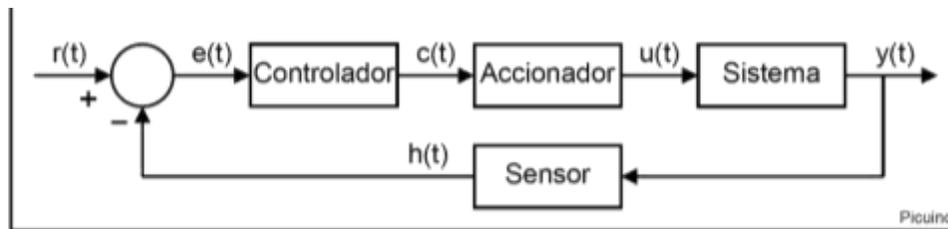


Figura 2. Sistema de control en lazo cerrado

a) Control automático.

“El control automático consiste en sustituir la acción del elemento humano por un dispositivo llamado controlador o regulador, el cual gobierna el elemento final de regulación” [7]

b) Sensor.

El término sensor se refiere a un elemento de medición que detecta la magnitud de un parámetro físico y lo cambia por una señal que puede procesar el sistema. Al elemento activo de un sensor se le conoce comúnmente como transductor. El diseño de sensores y transductores siempre involucra alguna ley o principio físico o químico que relaciona la cantidad de interés con algún evento medible. Los sistemas de monitorización y control requieren sensores para medir cantidades físicas tales como posición lineal, posición angular, desplazamiento, deformación, aceleración, presión, caudal, fuerza, velocidad lineal y velocidad angular, temperatura, intensidad lumínica, distancia y vibración. [8]

1) Sensores de proximidad ultrasónicos:

El principio de funcionamiento del sensor de proximidad ultrasónico se basa en la transmisión y recepción de ondas ultrasónicas de alta frecuencia de aproximadamente 200 kHz. El retorno de la onda puede detectar la presencia de un objeto y medir su distancia: su aplicación se da en sectores que requieran alta precisión en la medida como en proceso industriales especializados y en procesos médicos. [8]

c) Planta.

Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. Planta puede ser cualquier objeto físico que se va a controlar (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial). [4]

d) Función de transferencia.

En los sistemas de control, las funciones son utilizadas para caracterizar las relaciones de entrada-salida de los componentes de un sistema; matemáticamente, una función de transferencia es una ecuación diferencial definida como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero, todo lo dicho anterior es con el fin de representar la dinámica y comportamiento que tiene un sistema. [4]

e) *Control proporcional integral derivativos (PID).*

El control PID es la estrategia de control más usada en las aplicaciones industriales; se estima que más del 90% de los lazos de control utilizan control PID, dado que es una estrategia simple, efectiva y no requiere una gran fundamentación teórica para su utilización en los procesos cotidianos. Es por esto que, a pesar del desarrollo de estrategias de control más inteligentes y con mejores resultados experimentales, no se ha logrado desplazar al control PID de la aplicación en los procesos donde es deseable y a la vez suficiente que las operaciones que se realizan sean sencillas y sobre todo económicas, especialmente cuando se tienen limitaciones en la obtención de equipos para ejecutar estrategias más complejas o donde no se cuenta con operarios capacitados. El control PID proporciona un tratamiento tanto para la respuesta de estado estacionario como la respuesta transitoria, y ofrece una solución genérica y eficiente a los problemas de control del mundo real. Muchos ingenieros están familiarizados con el control PID, y su uso se ha convertido en una práctica estándar. En la actualidad, la introducción del control digital ha mejorado las capacidades del PID, como son la adaptación, la sintonización automática, y la planificación de ganancia, las cuales pueden ser fácilmente introducidas en el control PID. El diseño de controladores PID se puede lograr desde diferentes enfoques, que van desde métodos de ensayo y error, como acercamientos basados en el modelo del sistema. [10]

2. Definiciones del sistema bola y viga

El sistema de viga y bola es un importante y clásico modelo de laboratorio para enseñar ingeniería de control y sistemas. Es muy popular porque es un sistema simple y fácil de entender que puede ser utilizado para estudiar muchos de los métodos clásicos y modernos de diseño en ingeniería de control. Posee una propiedad muy interesante para el ingeniero de control: es inestable en lazo abierto. [11]

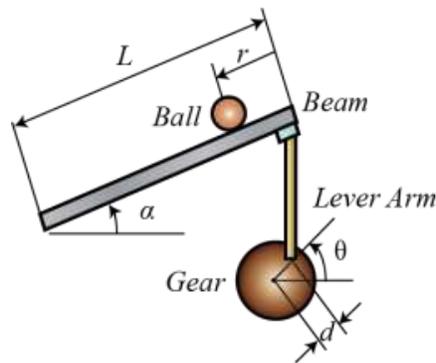


Figura 3. Sistema ball & beam. [12]

¡Bien!!

3. Servo motor.

Un servomotor (o servo) es un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ser controlado en posición. Es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación (generalmente de 180°) y mantenerse estable en dicha posición. Los servos se suelen utilizar en robótica, automática y modelismo (vehículos por radio-control, RC) debido a su gran precisión en el posicionamiento. [13]

4. Arduino.

Arduino es una plataforma open-hardware (diseño de libre distribución) basada en el diseño de una placa sencilla de entradas y salidas (analógicas y digitales) y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. Existen varias versiones de Arduino según la interfaz de conexión al PC: serie, USB, Bluetooth y ZigBee. Esta placa presenta una gran comunidad de desarrollo y permite la conexión de sensores y actuadores variados. [13]

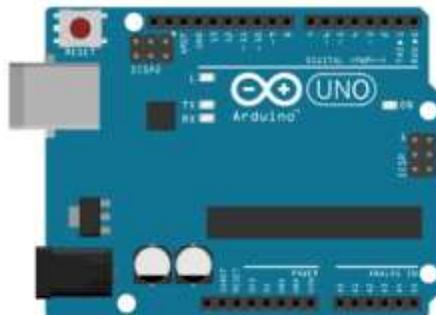


Figura 4. Placa Arduino Uno. [14]

III. METODOLOGÍA.

El proyecto ha sido desarrollando por etapas, cada etapa contiene una serie de actividades que se llevaron a cabo en la realización del proyecto de investigación para lograr cumplir los objetivos específicos.

A. TIPO DE INVESTIGACIÓN.

La investigación desarrollada en este proyecto será de tipo aplicada, ya que se busca la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos durante el curso de la materia Ingeniería de Control Clásico, ya que se desarrollará un prototipo con control PID para un sistema ball and beam haciendo uso de Arduino.

B. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.

Este proyecto se basa en literatura sobre el diseño de un controlador para sistemas de bola y viga. Además del trabajo relacionado con el diseño de la plataforma y el controlador, también se llevará a cabo el modelado del sistema y la selección de instrumentos para la instalación. Por lo tanto, se realizan pruebas para verificar el comportamiento del controlador en varios estados. Finalmente, se realiza un análisis comparativo entre el modelo y los datos adquiridos en planta física.

C. ACTIVIDADES REALIZADAS.

1. Recopilación de información científica
2. Revisión del estado del arte.
3. Clasificación de la información recopilada.
4. Estudio de estrategias de control existentes aplicadas al sistema bola y viga que puedan servir como punto de partida.
5. Familiarización con las herramientas de desarrollo y simulación a trabajar (hardware y software).
6. Diseño y modelamiento de la lógica y estructura física del sistema Bola y viga.

IV. DISEÑO Y DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO PARA EL SISTEMA BOLA Y BARRA.

A. SIMULACIÓN.

Se diseño el sistema de bola y para en el software AutoCAD para tener una vista previa antes de su elaboración.

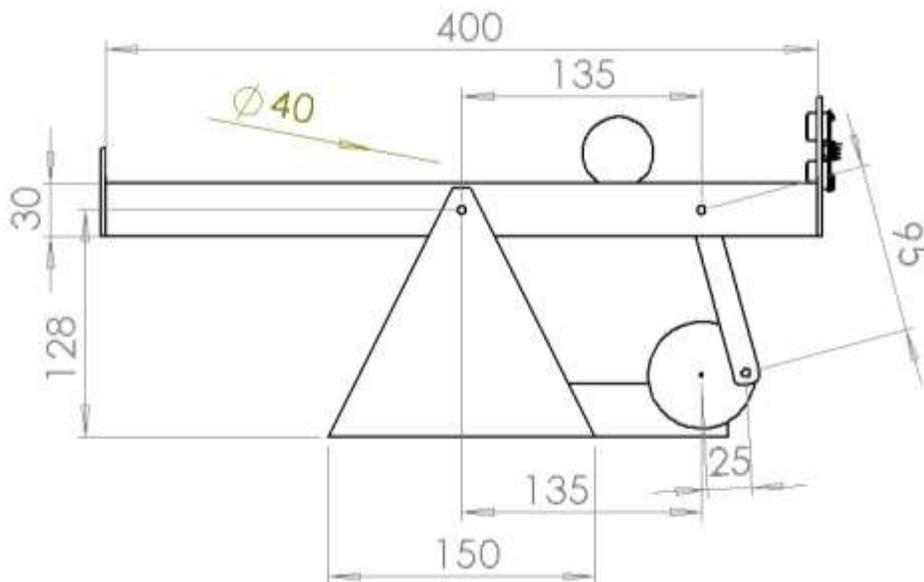


Figura 5. Diseño y medidas del sistema ball & beam. [Autoría propia]

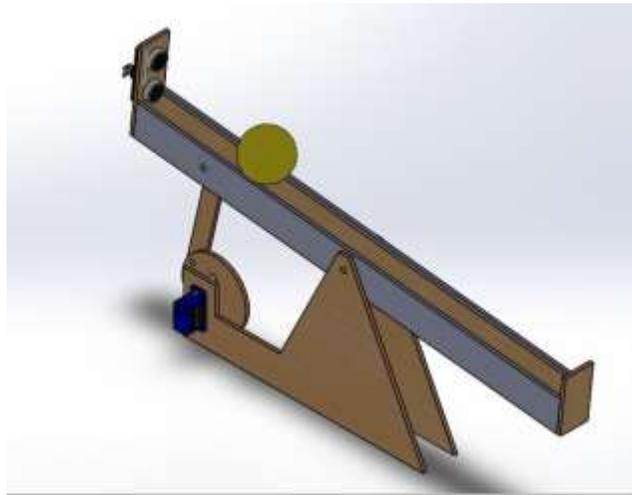


Figura 6. Sistema ball & beam diseñado en SolidWorks. [Autoría propia]

Diseño de piezas utilizando software SolidWorks

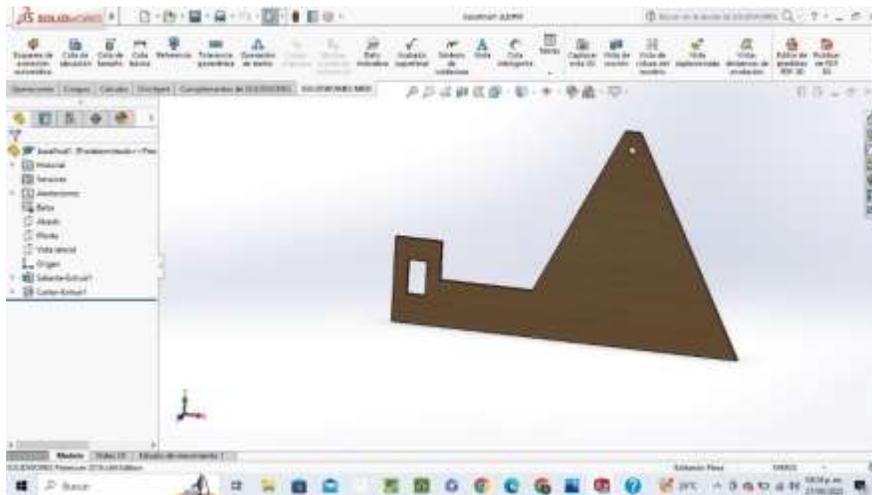


Figura 7. Diseño de la base del sistema. [Autoría propia]

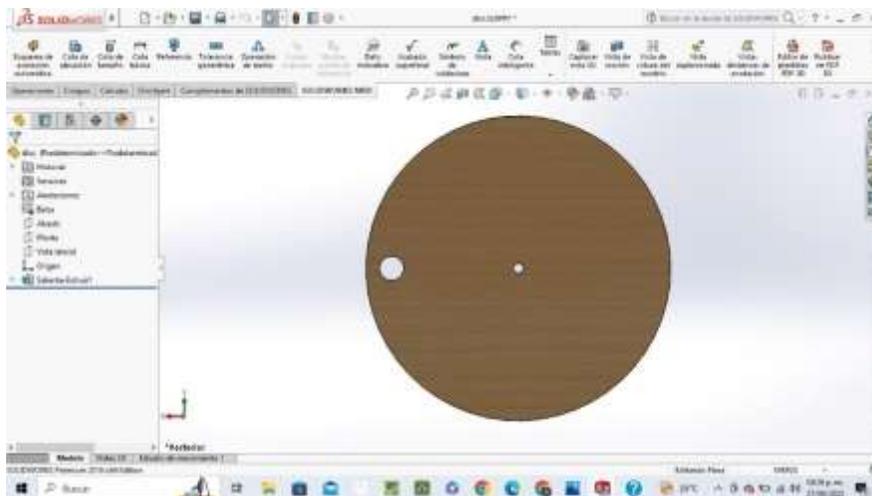


Figura 8. Disco diseñado en SolidWorks. [Autoría propia]

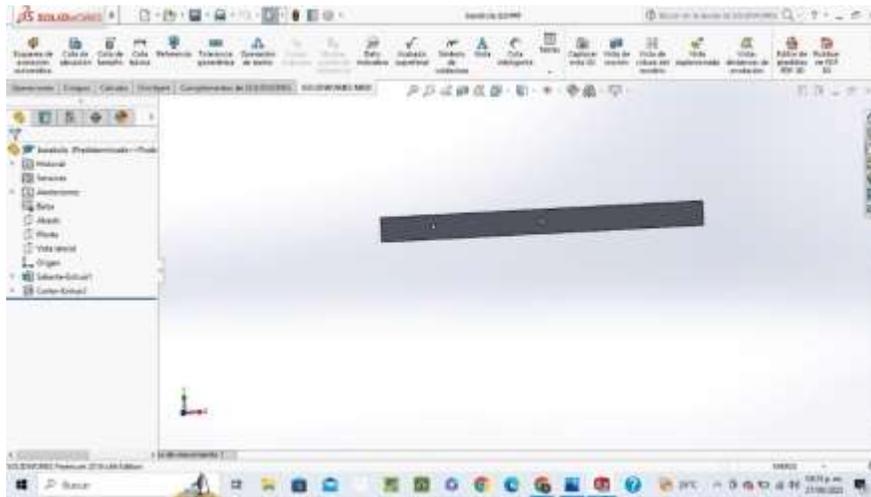


Figura 9. Base barra diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]

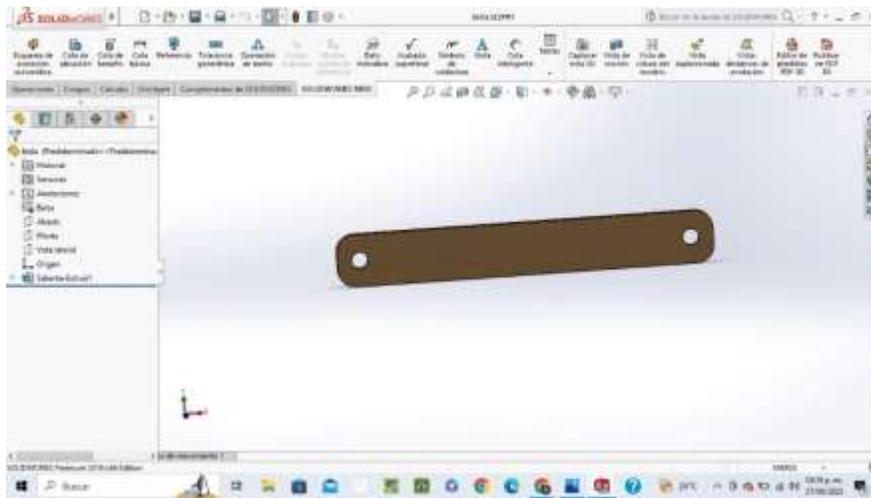


Figura 10. Biela diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]

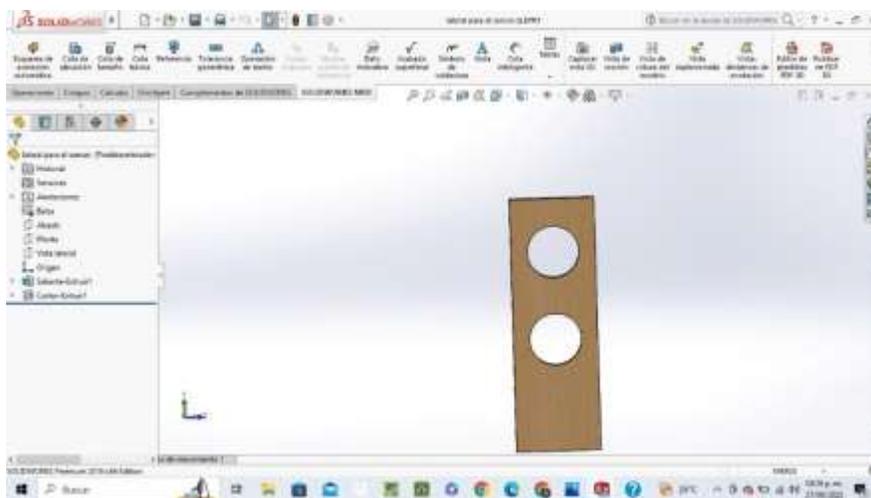


Figura 11. Base lateral para el sensor diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]

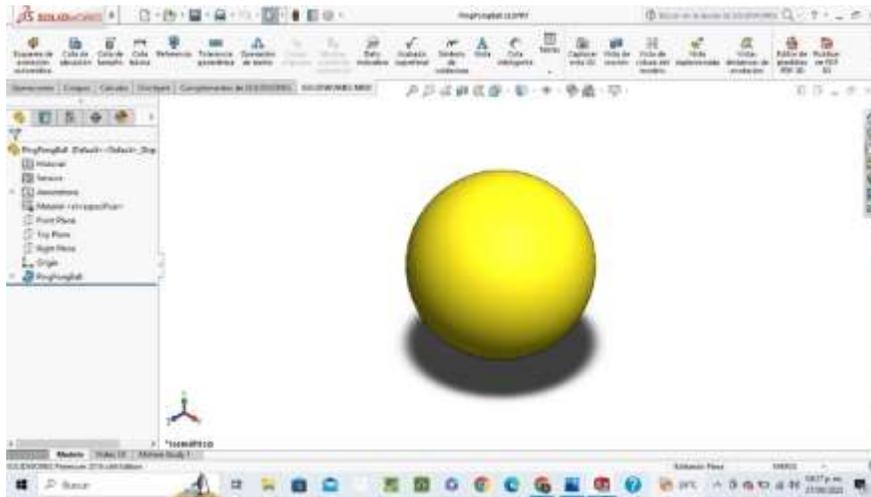


Figura 12. Bola diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]

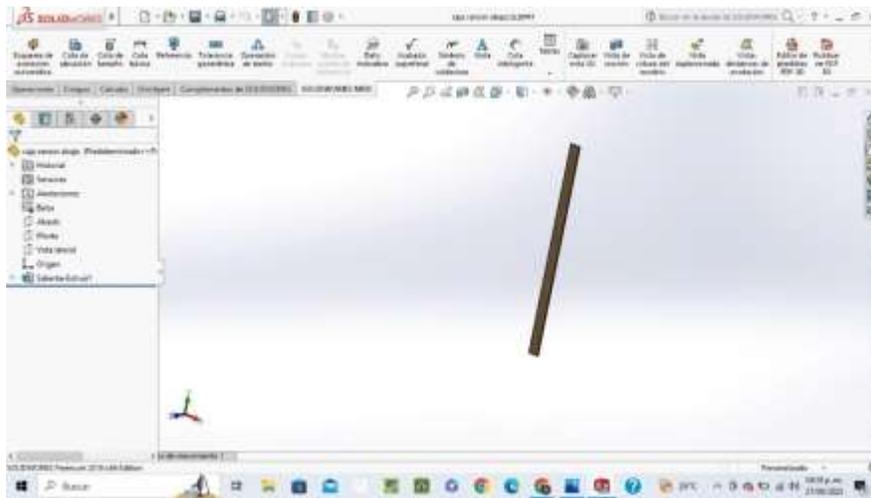


Figura 13. Base caja sensor parte inferior diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]

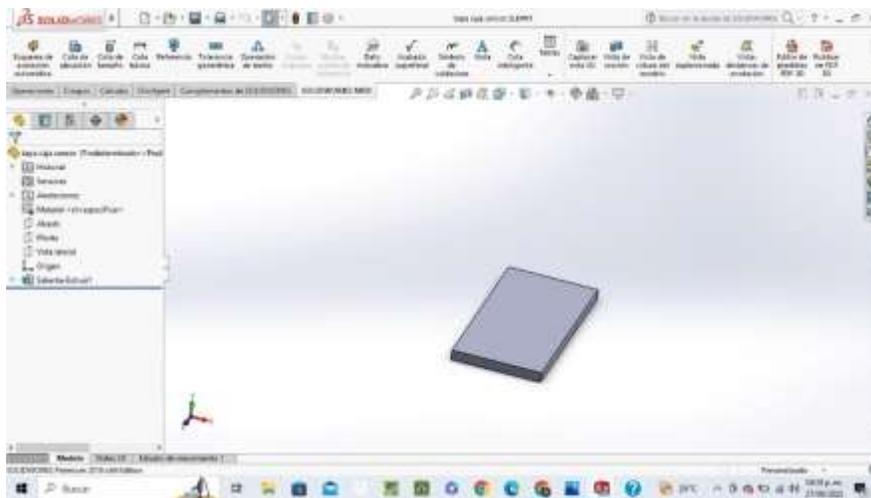


Figura 14. Tapa de la caja del sensor diseñada en SolidWorks. [Autoría propia]

B. CONTROL DEL SISTEMA

5. Sistema de control en lazo cerrado para el sistema de barra y bola

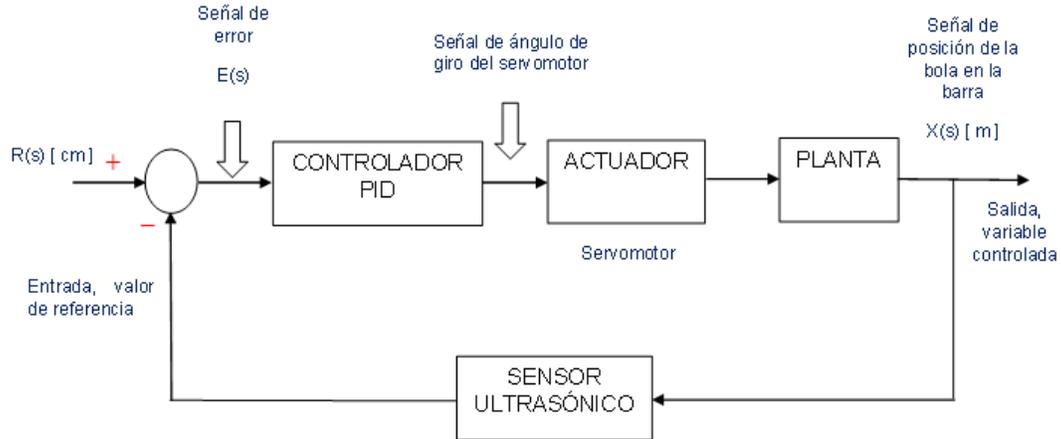


Figura 15. Sistema de control en lazo cerrado para el sistema de barra y bola. [Autoría propia]

C. MODELO MATEMATICO.

Se coloca una bola sobre una viga, vea la figura (...) a continuación, donde se le permite rodar con 1 grado de libertad a lo largo de la viga. Un brazo de palanca está unido a la viga en un extremo y un servoengranaje en el otro. A medida que el engranaje del servo gira en un ángulo θ , la palanca cambia el ángulo del haz en α . Cuando se cambia el ángulo de la posición horizontal, la gravedad hace que la bola ruede a lo largo de la viga. Se diseñará un controlador de este sistema para poder manipular la posición de la pelota.

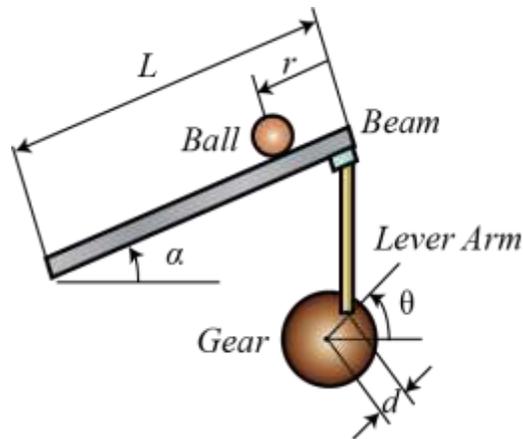


Figura 16. Diagrama de cuerpo libre de un sistema ball & beam,

1. Parámetros del sistema.

Para este problema, supondremos que la bola rueda sin deslizarse y que la fricción entre la viga y la bola es despreciable. Las constantes y variables para este ejemplo se definen de la siguiente manera:

m = masa de la pelota 0.11 kg

R = radio de la pelota 0.015 m

d = desplazamiento del brazo de palanca 0.03 m

g = aceleración gravitacional -9.81 m/s^2

L = longitud de la viga 0.2794 m

J = momento de inercia de la bola, sabiendo que para una esfera el momento de inercia con respecto al centro se expresa como:

$$J = \frac{2}{5} \times m \times R^2 = 9.9 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

r = coordenada de posición de la pelota (a la salida de la planta en “m”, a la hora de calcular el error, en “cm”).

α = coordenada del ángulo de inclinación de la barra.

θ = ángulo de giro del servomotor.

2. Ecuaciones del sistema

La segunda derivada del ángulo de entrada α en realidad afecta a la segunda derivada de r . Sin embargo, ignoraremos esta contribución. La ecuación lagrangiana de movimiento de la pelota viene dada por lo siguiente:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{r} + mg \sin \alpha - mr \dot{\alpha}^2$$

La linealización de esta ecuación sobre el ángulo del haz, $\alpha = 0$ nos da la siguiente aproximación lineal del sistema:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{r} = -mg \alpha$$

La ecuación que relaciona el ángulo del haz con el ángulo del engranaje se puede aproximar como lineal mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{d}{L} \theta$$

Sustituyendo esto en la ecuación anterior, obtenemos:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{r} = -mg \frac{d}{L} \theta$$

D. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.

Tomando la transformada de Laplace de la ecuación anterior, se encuentra la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) R(s) s^2 = -mg \frac{d}{L} \theta(s)$$

Reordenando encontramos la función de transferencia desde el ángulo del engranaje $\theta(s)$ a la posición de la bola $R(s)$.

$$P(s) \frac{R(s)}{\theta(s)} = -\frac{mgd}{L \left(\frac{J}{R^2} + m\right)} \cdot \frac{1}{s^2}$$

Cabe señalar que la función de transferencia de la planta es un integrador doble. Es marginalmente estable y proporcionará un problema de control desafiante.

La función de transferencia se puede implementar en MATLAB una vez teniendo los parámetros. Solo se colocan los datos en el script, compilamos y en automático sale la función de transferencia.

```

Editor - C:\Users\Chefe\Documents\MATLAB\CTRL_BALL.m
CTRL_BALL.m
1- m = 0.11; % kg
2- R = 0.015; % m
3- g = -9.81; % m/s^2
4- L = 0.2794; % m
5- d = 0.03; % m
6- J = 9.9e-6; % kg m^2
7
8- s = tf( 's' );
9- P_pelota = -m*g*d/L/(J/R^2+m)/s^2
10
11

```

Figura 17. Código de Matlab para obtención de la transferencia del sistema ball & beam. [Autoría propia]

Después de ejecutar el código, ahora se muestra la función de transferencia.

```

Command Window
>> CTRL_BALL

P_pelota =

    0.7524
    -----
         s^2

Continuous-time transfer function.

/ >>

```

Figura 18. Función de transferencia para el sistema ball & beam. [Autoría propia]

E. SIMULACIÓN EN SIMULINK MATLAB

1. Simulink.

Una vez al haber obtenido la función de transferencia, se puede analizar el sistema mediante la herramienta de Matlab Simulink. Se analiza el sistema en lazo abierto, y en lazo cerrado para observar el comportamiento con y sin el controlador.

2. Sistema en lazo abierto.

Para la creación del sistema en lazo abierto, solo es necesario colocar la entrada de referencia, en este caso, una entrada escalón unitario (Step), después el bloque de función de transferencia (Transfer Fcn), y por último un osciloscopio (Scope). Observe diagrama de la figura (...)

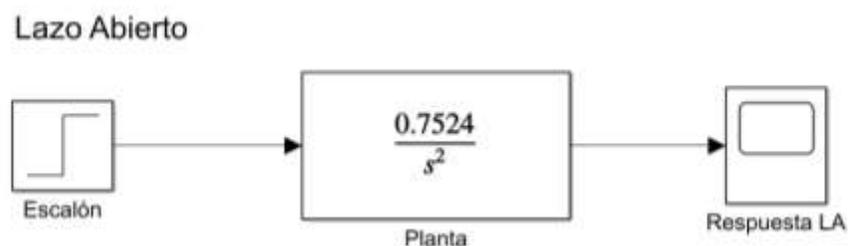


Figura 19. Diagrama de bloques en lazo abierto para el modelo de bola y barra. [Autoría propia]

3. Sistema en lazo cerrado.

Para la construcción del sistema en lazo cerrado es necesario colocar la entrada de referencia, en este caso, una entrada escalón unitario (step) acompañado de un bloque sumador (Sum), luego el bloque del controlador PID (PID Controller), después el bloque de función de transferencia (transfer fcn), y por último un osciloscopio (scope). Observe diagrama de la figura (...).

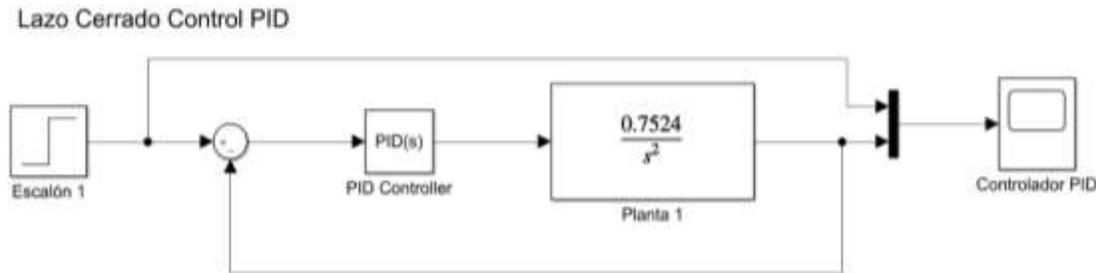


Figura 20. Diagrama de bloques con un controlador proporcional – integral – derivativo. [Autoría propia]

Antes de observar el comportamiento del sistema, es necesario configurar los parámetros del controlador. Para en el caso del sistema ball and beam, se colocaron valores aleatorios para K_p , K_i , y K_d , en este caso para el sistema se tiene un valor proporcional (P) = 15, un valor integral (I) = 0.02, y un valor derivativo (D) = 20. Todo esto como prueba, debido a que Matlab Simulink cuenta con una herramienta llamada PID TUNER, la cual es utilizada en el control automático para ajustar y sintonizar los parámetros de un controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo).

El PID Tuner permite encontrar los valores óptimos de los coeficientes del controlador PID, es decir, los valores de ganancia proporcional, tiempo integral y tiempo derivativo que mejor se adapten a un sistema específico. Estos parámetros determinan como el controlador responde a las desviaciones de la variable de proceso y cómo ajusta la salida para corregir el error.

Observe la configuración de los parámetros del controlador PID (figura ...).

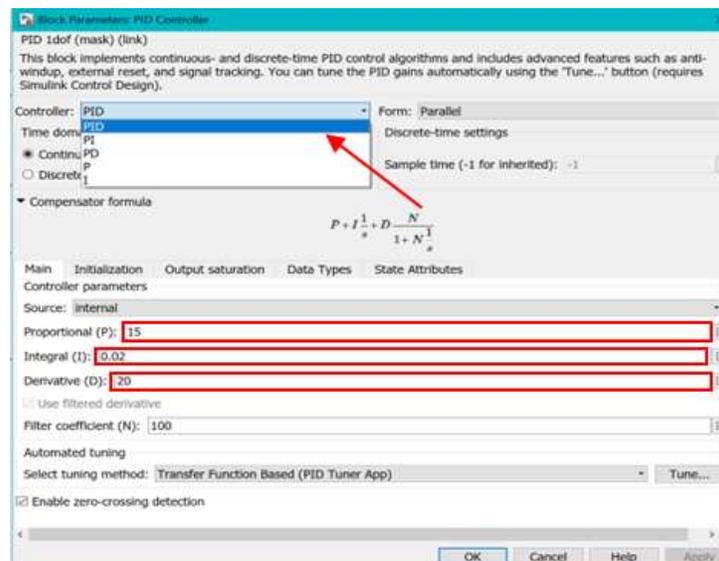


Figura 21. Parámetros del controlador PID [Autoría propia]

V. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO BALL & BEAM

A. MATERIALES.

1. Placa Arduino Uno



Figura 22. Placa Arduino Uno. [15]

1. Sensor ultrasónico



Figura 23. Sensor ultrasónico. [15]

1. Protoboard

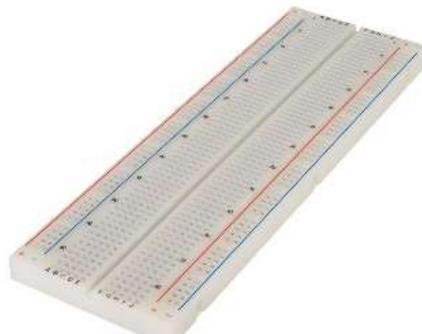


Figura 24. Placa protoboard. [15]

1. Micro-Servo motor



Figura 25. Servo motor. [15]

1. Placa de unicel, cartón o regifoam



Figura 26. Placa de unicel. [15]

1. Cables Tipo Dupont

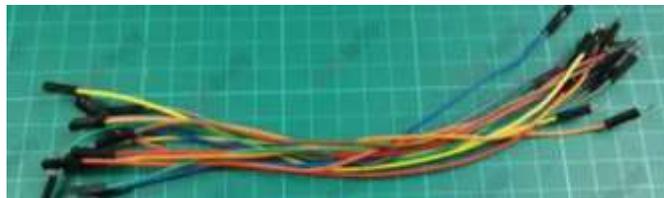


Figura 27. Cables tipo Dupont. [15]

1. Bola



Figura 28. Bola de unicel. [15]

B. ESTRUCTURA Y MONTAJE DEL SISTEMA BOLA Y VIGA.

Para la elaboración del prototipo ball & beam se presentan los siguientes pasos a seguir para su construcción.

- 1- Se identifican los componentes a utilizar para su montaje.
- 2- Se cortan dos piezas de unicel de la siguiente manera.

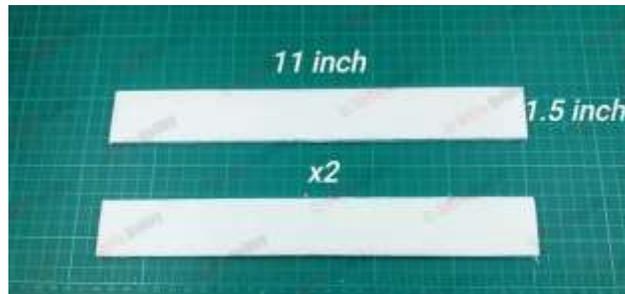


Figura 29. Corte de piezas de unicel. [15]

- 3- Se procede a pegar las piezas cortadas anteriormente.



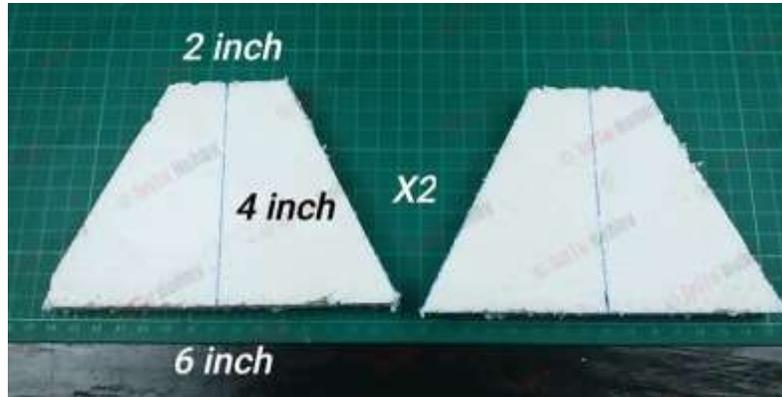
Figura 30. Unión de las piezas de unicel. [15]

- 4- Se pega un trozo unicel en la esquina de la pieza unida anteriormente.



- 5- Luego, se cortan piezas de los siguientes tamaños. Después, se procede a pegarlos.





Quedando finalmente de la siguiente manera



- 6- Para el caso del portabola que se hizo inicialmente, se le pegara un pequeño trozo de tubería con un corte en el medio.

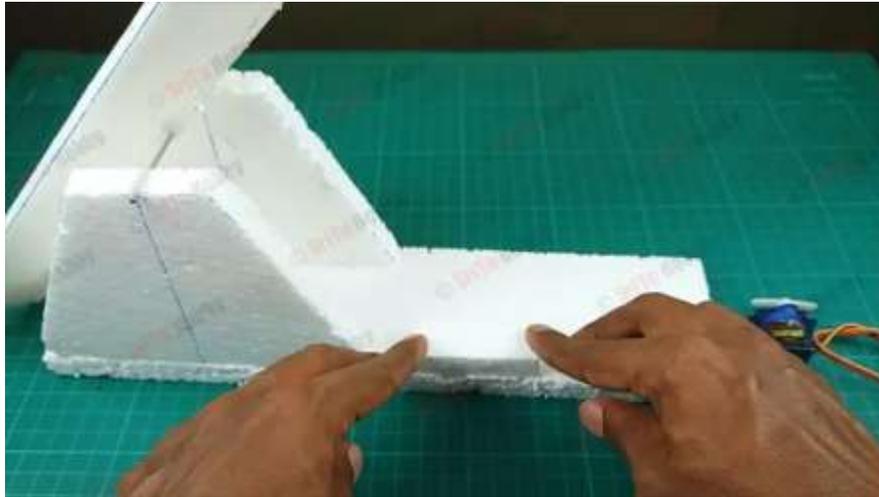
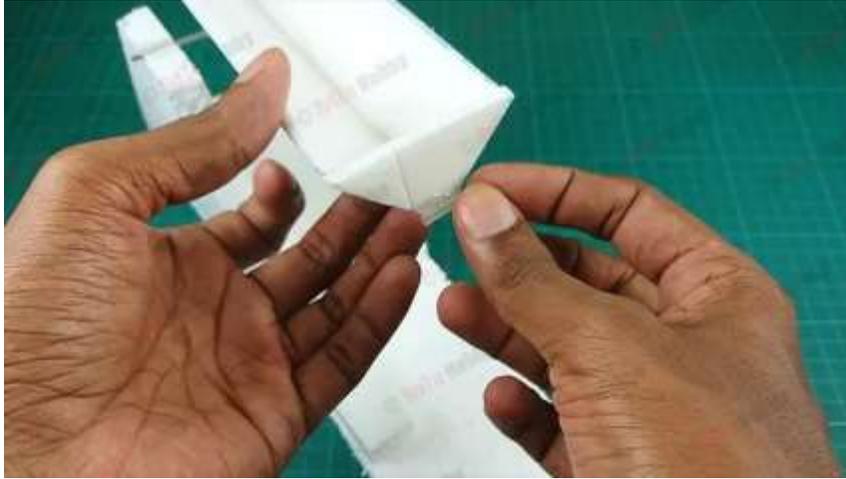


- 7- Se fija el soporte de la pelota con un palo de hierro.

8-



9- Luego se pega la pieza de tubería pequeña y el servomotor de la siguiente manera.



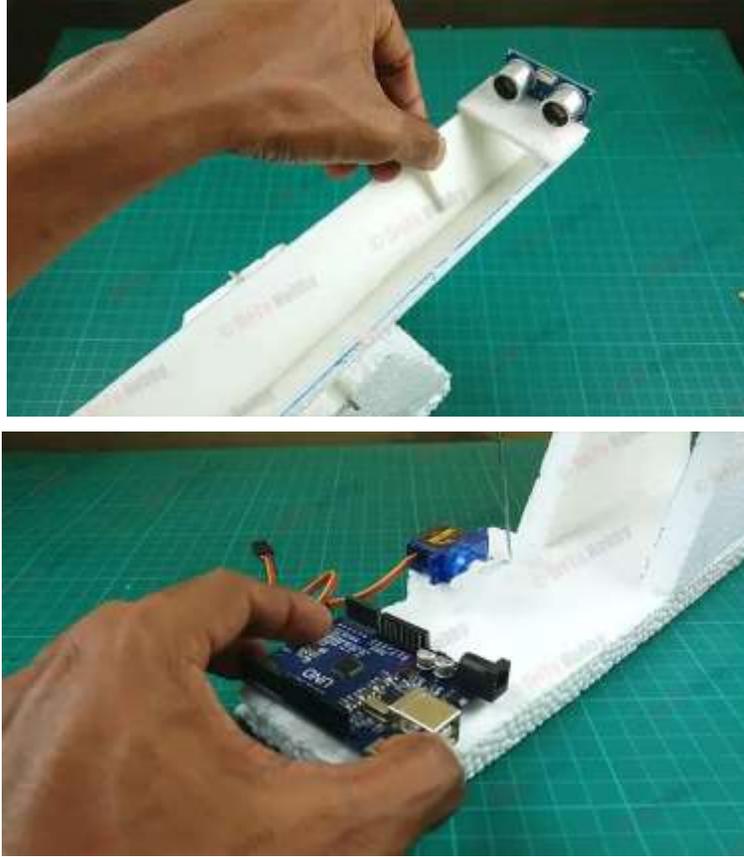
10- Ahora se toma la varilla de hierro y se coloca de la siguiente manera conectándola al soporte de la bola y al servomotor.



11- Se pega el sensor ultrasónico a la otra esquina del portabolas.



12- Se pegan dos piezas de unicel para bloquear la pelota. Después, se pega la placa Arduino UNO.



13- ahora se conectan los componentes a la placa Arduino. Para eso, se utiliza el diagrama de circuito a continuación.

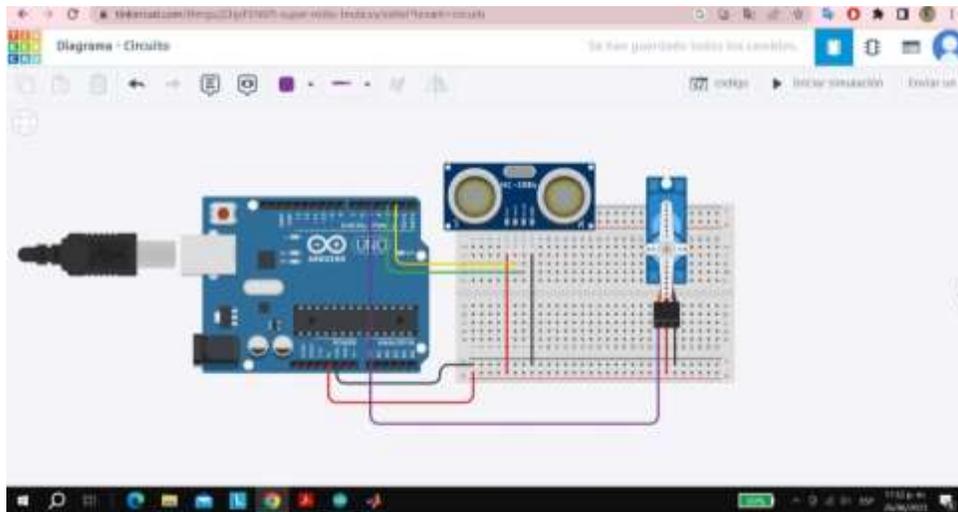
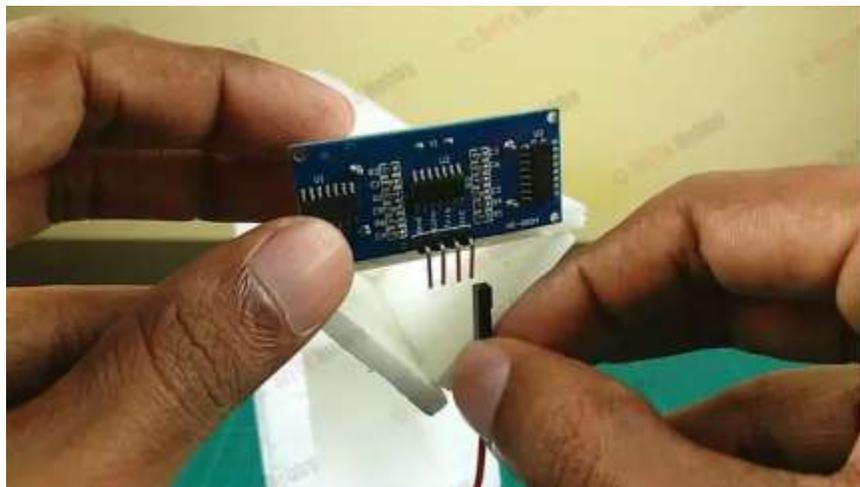
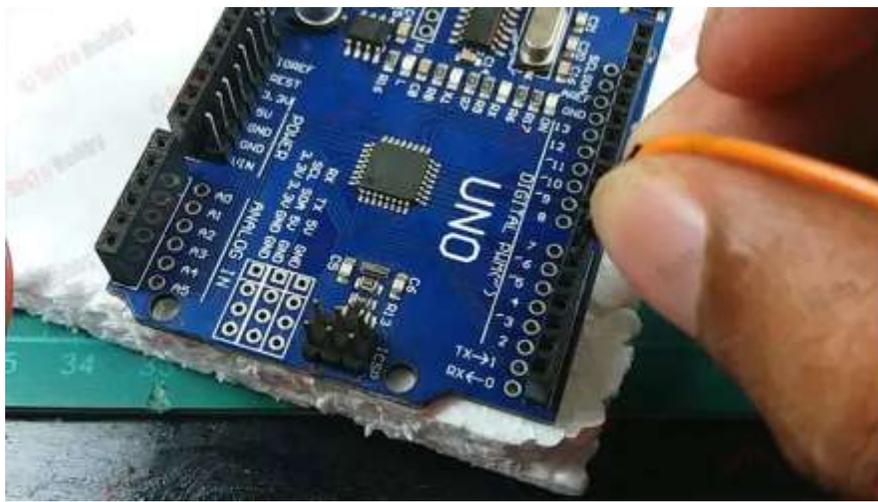
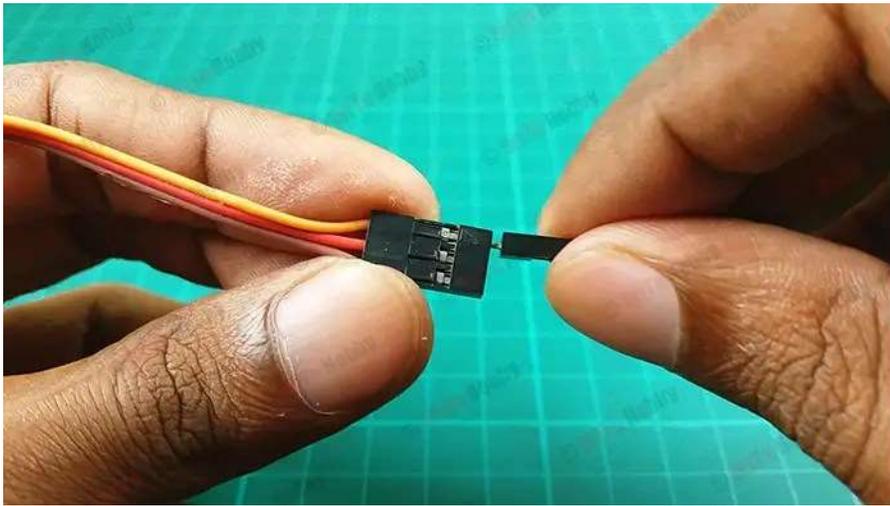
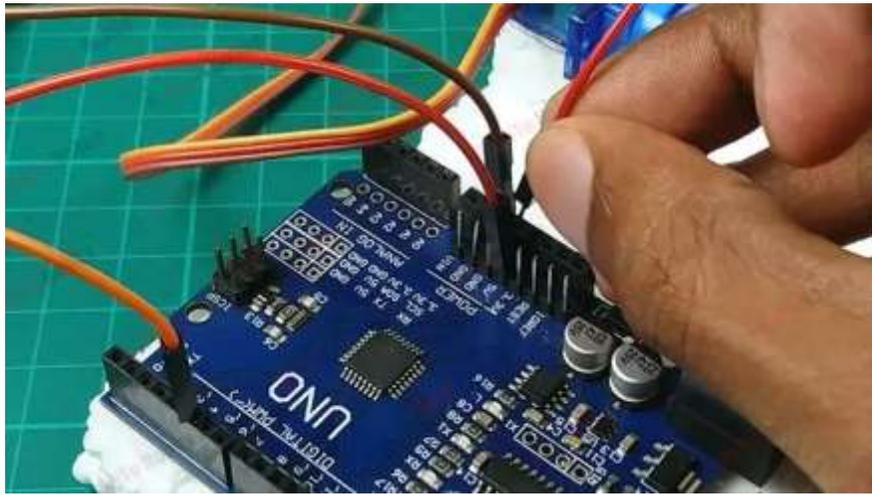


Figura 31. Conexión circuito electrónico. [Autoría propia]





14- A continuación, se conecta este proyecto a la computadora.



Se procede a grabar el código de programación que se deja a continuación.

```

1 /*PID controller system with Arduino.
2 * https://srituhobby.com
3 */
4
5 #include <Servo.h>
6 Servo servo;
7
8 #define trig 2
9 #define echo 3
10
11 #define kp 0
12 #define ki 0
13 #define kd 0
14
15 double priError = 0;
16 double toError = 0;
17
18 void setup() {
19   pinMode(trig, OUTPUT);
20   pinMode(echo, INPUT);
21   servo.attach(5);

```

```

22 Serial.begin(9600);
23 servo.write(50);
24
25 }
26 void loop() {
27   PID();
28   // int a = distance();
29   // Serial.println(a);
30 }
31
32 long distance () {
33   digitalWrite(trig, LOW);
34   delayMicroseconds(4);
35   digitalWrite(trig, HIGH);
36   delayMicroseconds(10);
37   digitalWrite(trig, LOW);
38
39   long t = pulseIn(echo, HIGH);
40   long cm = t / 29 / 2;
41   return cm;
42 }
43
44 void PID() {
45   int dis = distance ();
46
47
48   int setP = 15;
49   double error = setP - dis;
50
51
52   double Pvalue = error * kp;
53   double Ivalue = toError * ki;
54   double Dvalue = (error - priError) * kd;
55
56   double PIDvalue = Pvalue + Ivalue + Dvalue;
57   priError = error;
58   toError += error;
59   Serial.println(PIDvalue);
60   int Fvalue = (int)PIDvalue;
61
62
63   Fvalue = map(Fvalue, -135, 135, 135, 0);
64
65
66   if (Fvalue < 0) {
67     Fvalue = 0;
68   }
69   if (Fvalue > 135) {
70     Fvalue = 135;
71   }
72
73   servo.write(Fvalue);
74 }

```

Por ultimo una vez cargado el código en la placa de Arduino se coloca la bola en el soporte y está listo. A continuación, se deja la liga de un video para apoyo en la construcción de este sistema. *Ball balance project with Arduino PID controller system*
<https://www.youtube.com/watch?v=YOPTksabdbM>

VI. RESULTADOS.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a lo largo de la realización de este proyecto.

Primeramente, se muestran los resultados del control en el sistema Bola y viga con las constantes PID obtenidas del diseño en la aplicación PID TUNER de Matlab.

Para un sistema en lazo abierto, la respuesta se refiere al comportamiento del sistema sin retroalimentación o corrección. En este tipo de sistema, la salida o respuesta del sistema no tiene influencia ni control sobre la entrada o referencia del sistema. La respuesta de un sistema en lazo abierto puede ser predecible si se conocen las características del sistema y la entrada aplicada. Sin embargo, este tipo de sistema es susceptible a errores y perturbaciones externas, ya que no hay un mecanismo de retroalimentación para corregir posibles desviaciones entre la salida deseada y la salida real del sistema. Observe gráfica de la figura (32)

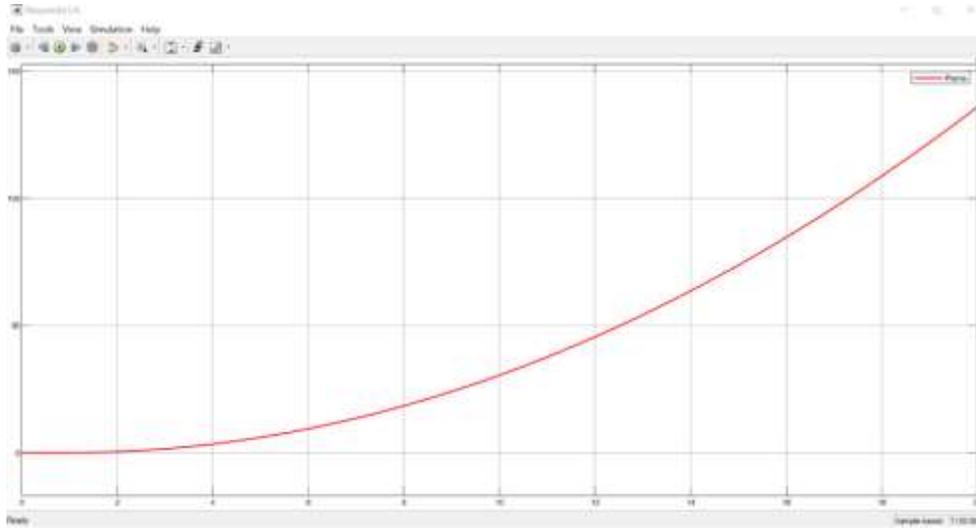


Figura 32. Gráfica de respuesta del sistema en lazo abierto. [Autoría propia]

Es importante tener en cuenta que, en un sistema en lazo abierto, la gráfica solo muestra la relación directa entre la entrada y la salida, sin proporcionar información sobre la estabilidad, la precisión o la capacidad de respuesta del sistema. Para abordar estas características y obtener un control más preciso, es necesario utilizar un sistema en lazo cerrado que incorpore retroalimentación.

Para un sistema en lazo cerrado después de aplicar las configuraciones pertinentes al controlador obtenemos lo siguiente. Configuración de los parámetros del controlador PID (figura 33).

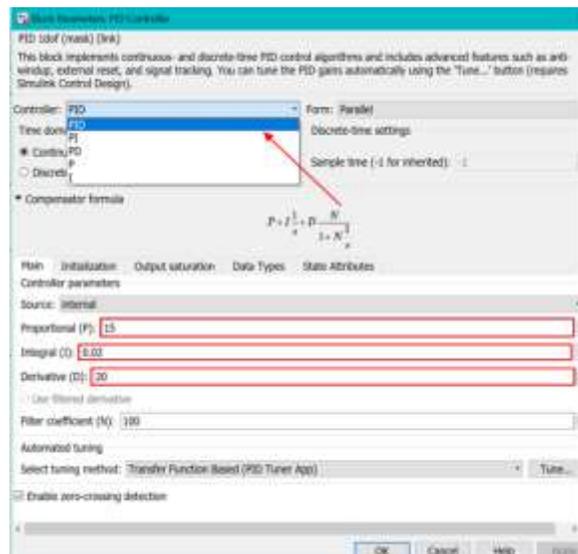


Figura 33. Configuración del controlador para un sistema en lazo cerrado. [Autoría propia]

Una vez configurado el valor de los parámetros del controlador se puede observar la gráfica para el comportamiento del sistema (figura 34).

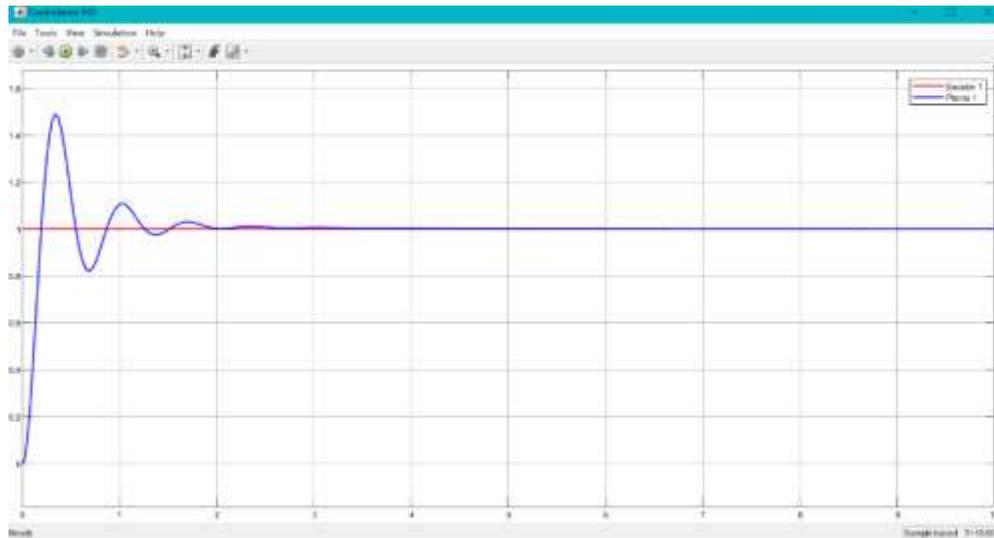


Figura 34. Gráfica de respuesta del sistema en lazo cerrado. [Autoría propia]

Como se puede observar en la gráfica, al inicio la función de planta controlada presenta oscilaciones o perturbaciones, pero rápidamente logra ajustarse a la referencia. Como se sabe, la finalidad principal de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) en un sistema es regular y estabilizar la respuesta del sistema para que siga un valor deseado o setpoint. El controlador PID ajusta continuamente la señal de control en función de la diferencia entre el valor medido y el setpoint, con el objetivo de minimizar ese error y mantener la variable controlada en el valor deseado.

El ajuste manual de los parámetros PID puede ser un proceso complejo y requiere experiencia y conocimientos específicos. El PID Tuner automatiza este proceso al realizar experimentos y análisis en tiempo real para encontrar los valores más adecuados. A menudo, utiliza métodos de optimización para buscar la mejor configuración de los parámetros PID y así optimizar el rendimiento del sistema de control. Esta parte como ya se mencionó, se puede realizar en Matlab. Observe figura (35).

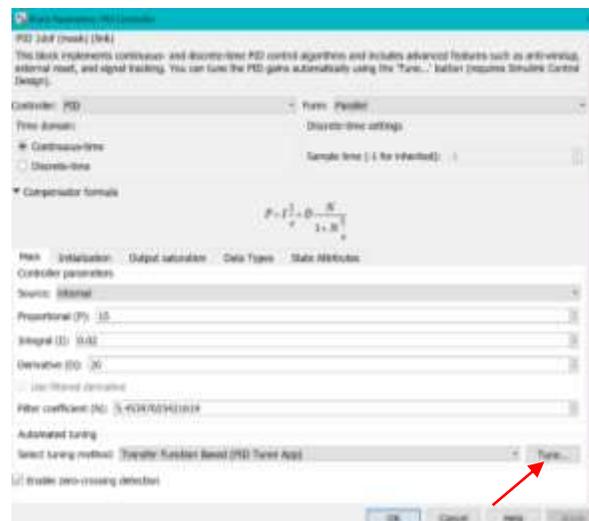


Figura 35. ajuste manual de los parámetros PID. [Autoría propia]

Al seleccionar la herramienta PID Tuner, se habrá otra ventana de Matlab, en la cual se muestran gráficas para observar la diferencia de la respuesta que está entregando el controlador PID, y de la respuesta que se está alcanzando utilizando la herramienta PID Tuner. Observe figura ...

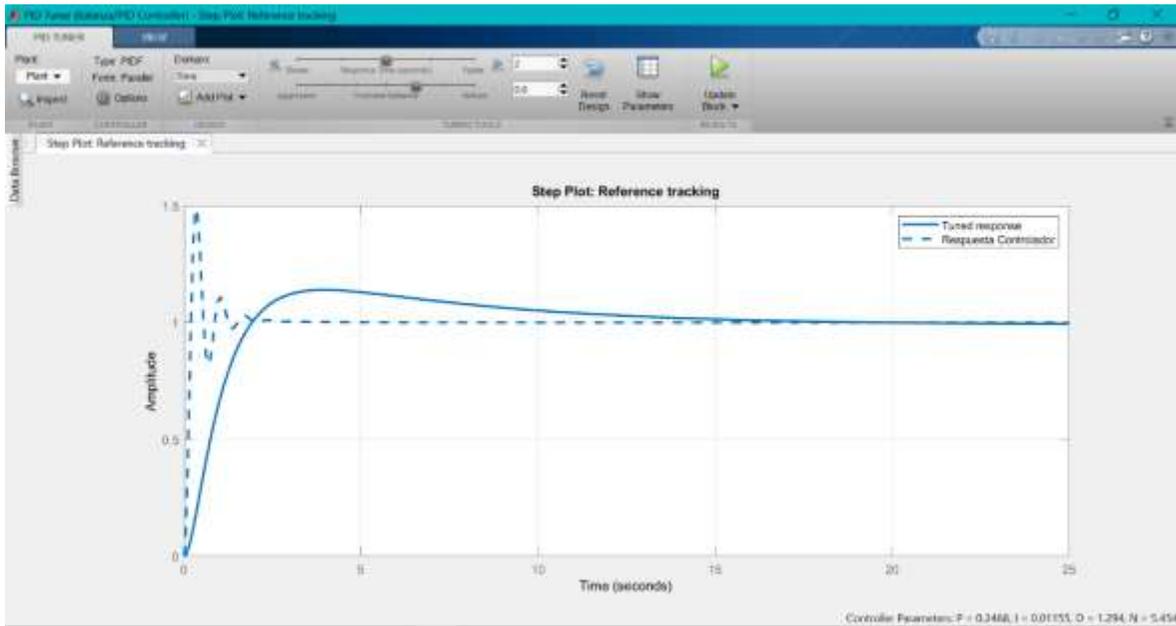


Figura 36. Diferencia de la respuesta entre el controlador PID y la herramienta Tuner. [Autoría propia]

Al seleccionar Update Block se configuran los parámetros de los controladores automáticamente. Observe figura ...

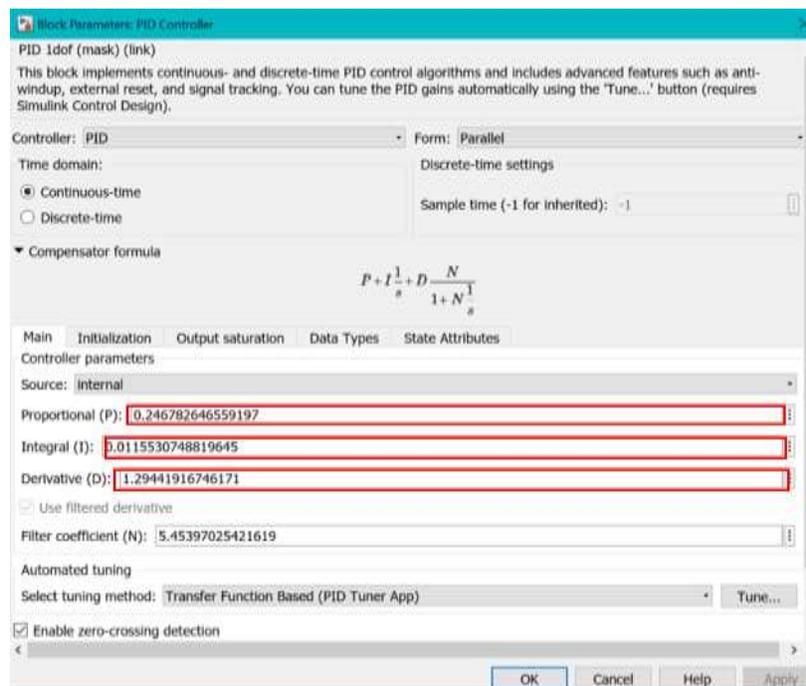


Figura 37. Update Block

Ahora si se observa su comportamiento, se puede observar cómo se presenta el sistema con menos oscilaciones, pero la respuesta es más lenta al alcanzar la referencia. Observe figura 38

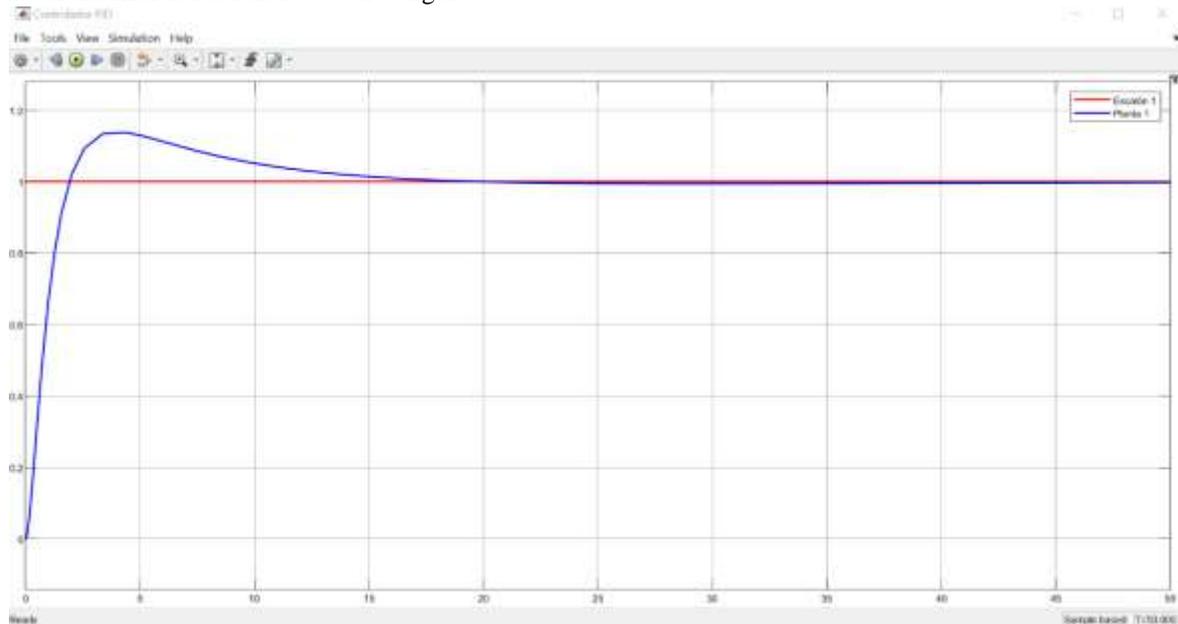
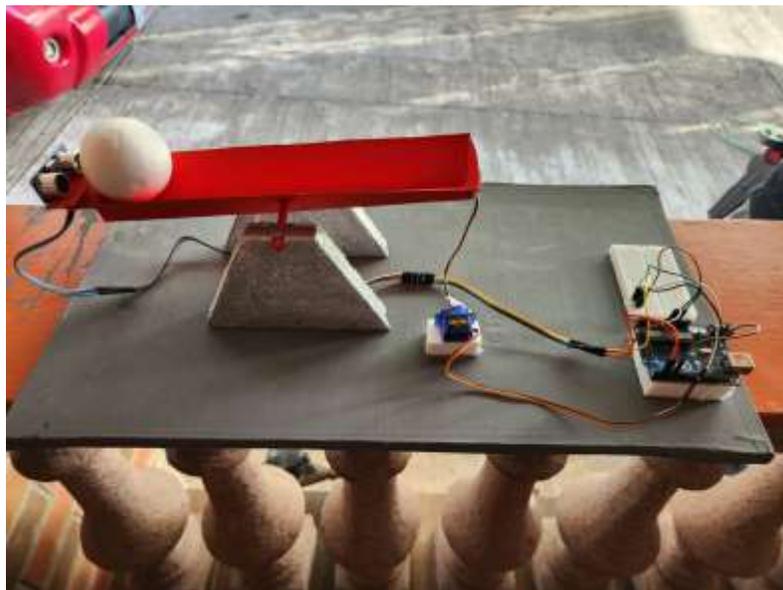
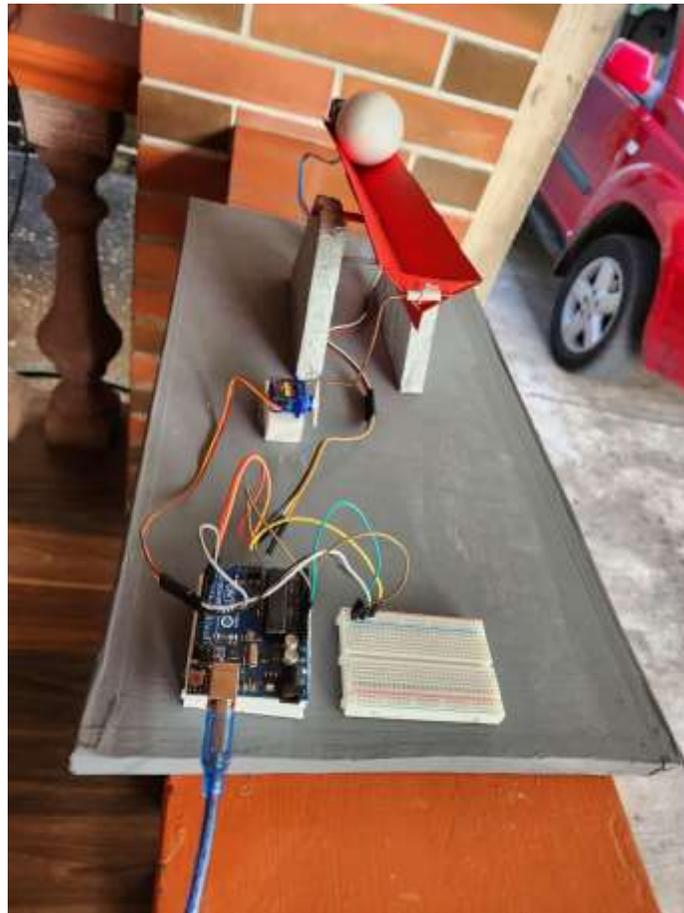


Figura 38. Respuesta del sistema ball & beam.

Después de esto, es necesario tener en cuenta que una ganancia alta en un controlador puede resultar en una respuesta más rápida y agresiva del sistema. Puede ayudar a reducir el error de seguimiento y mejorar la capacidad de respuesta frente a perturbaciones o cambios en el sistema. Sin embargo, las ganancias altas también pueden aumentar el riesgo de oscilaciones, inestabilidades y amplificar el ruido. Un ajuste inadecuado de las ganancias altas puede llevar a un control inestable y resultados insatisfactorios. Por el contrario, una ganancia baja en un controlador puede proporcionar una respuesta más suave y estable. Puede reducir el riesgo de oscilaciones y inestabilidades, lo que puede ser beneficioso para sistemas con comportamientos no lineales o ruido significativo. Sin embargo, las ganancias bajas pueden resultar en una respuesta más lenta y menos sensible a las perturbaciones. Si las ganancias son demasiado bajas, el controlador puede tener dificultades para alcanzar los valores deseados o mantener el sistema dentro de los límites requeridos.

Por otra parte, mostramos los resultados finales de la creación del prototipo, así como un link en donde se puede mostrar este en ejecución.





SISTEMA BALL AND BEAM: https://drive.google.com/file/d/1QVK4QsgGm2vVdjetyo3ckuynS_qFVgoa/view?usp=sharing

VII. CONCLUSIONES.

Este proyecto consistió en un sistema bola y barra o viga trata de una bola de radio R la cual rueda libremente con 1 grado de libertad sin deslizarse a lo largo una viga compuesta por dos rieles puestos en paralelo y que están separados a una distancia menor que 2 veces R .

La bola tiene dos puntos de contacto con la viga, por lo tanto, hay dos fuerzas de rozamiento F_r y dos reacciones N del riel, la fuerza de rozamiento F_r tiene la dirección del riel, la reacción N es perpendicular al riel pasando por el centro de la bola.

Con el prototipo físico del sistema bola y barra se logró realizar diferentes pruebas para la implementación de la estrategia de control PID, iniciando por los valores obtenidos por medio de la simulación del modelo matemático del sistema en MATLAB, con los cuales se pudo observar que el comportamiento del sistema en la planta física difiere de los resultados obtenidos con la simulación, ya que en la simulación no se tienen en cuenta todos los factores que están presentes en el sistema, , tales como el modelo matemático del servomotor, fluctuaciones en los voltajes, ruido en el actuador y sensor, e imperfecciones del mecanismo, basado en esos valores iniciales se realizó una variación de la constante K_p , K_d y K_i , donde se pudo evidenciar el efecto que genera cada una de las constantes en la planta física, llegando a unos valores con los cuales se logró obtener resultados satisfactorios para el sistema, con un buen comportamiento del controlador PID, llevándolo al punto de referencia aun cuando se le aplica perturbaciones externas.

VIII. FUENTES DE INFORMACIÓN.

- [1] FBSwiki, 29 Septiembre 2003. [En línea]. Available: https://www.cds.caltech.edu/~murray/amwiki/index.php/Ball_and_beam_system.
- [2] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna Quinta Edición, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010.
- [3] C. F. E. C. S. D. S. & D. K. R. Ionescu, «A Remote Laboratory as an Innovative Educational Tool for Practicing Control Engineering Concepts,» 2013. [En línea]. Available: 10.1109/TE.2013.2249516.
- [4] K. Ogata, Ingeniería de control moderna: Vol. I (S. Dormino & R. Dormino, Trads.; Quinta)., PEARSON Educación S.A., 2010.
- [5] R. P. Moreno, Evolución Histórica de la Ingeniería de Control., 1999.
- [6] J. D. L. D. F. M. J. E. & M. R. Grajales, «Control en cascada por métodos difusos.,» *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, p. 181–193., 2007.
- [7] A. Roca, Control automatizado de procesos industriales., 2014.
- [8] Sensores., «Mecatrónica LATAM,» 06 Junio 2020. [En línea].
- [9] D. Tonsuk, «Sistema de almacenamiento.,» 2011. [En línea]. Available: <https://doi.org/1059/g4.2011.07.016>.
- [10] L. R. L. & G. D. Lozano, «Diseño, implementación y validación de un controlador PID autosintonizado,» *Tecno Lógicas*, p. 33–53., 2012.
- [11] M. Oporto, «Diseño de control para una planta Bola y Viga,» 2015.
- [12] «MATLAB,» 2022. [En línea]. Available: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=BallBeam§ion=SystemModeling>.
- [13] F. & C. J. Candelas, «Servomotores,» 2007.
- [14] «Arduino,» 2020. [En línea]. Available: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>.
- [15] «Sritu Hobby,» 2023. [En línea]. Available: <https://srituhobby.com/what-is-a-pid-controller-and-how-does-it-work-with-an-arduino/>.

Proyecto Ing. Control Bola / Balancín

68

CRITERIO	Ing. Electromecánica EXCELENTE	802 B LOGRO ESPERADO	SEMINARIO DE MECATRÓNICA EN PROCESO	JUNIO 28 DEL 2023 DESEMPEÑO INSUFICIENTE	PUNTAJE OBTENIDO
Aplicación del conocimiento científico	La explicación demuestra un claro entendimiento de los principios científicos aplicados en la construcción de su prototipo. ✓	La explicación demuestra un entendimiento relativo de los principios científicos aplicados en la construcción de su prototipo.	La explicación ilustra algún principio científico aplicado en la construcción de su prototipo.	La explicación no ilustra principios científicos aplicados en la construcción	
Incluye conceptos de tipo mecánico, electrónico o eléctrico	El diseño del prototipo, responde a los parámetros establecidos ✓	El diseño del prototipo sólo considera a algunos de los parámetros establecidos.	El diseño del prototipo toma en cuenta parámetros no establecidos.	El diseño del prototipo no considera ningún parámetro.	
Herramientas de diseño	Utiliza herramientas matemáticas así como software para diseño y de esta forma se refleja en un modelo eficiente, bien dimensionado ✓	Utiliza herramientas ya sea matemáticas o software para diseño y de esta forma realizar un modelo eficiente.	Se observa el uso de alguna herramienta no formal para el diseño, más bien es un diseño al azar.	No utiliza alguna herramienta para diseño por lo que no se observa un prototipo formal ni con conceptos mínimos de ingeniería.	
Materiales	Los materiales utilizados han sido cuidadosamente seleccionados en función de sus propiedades mecánicas, eléctricas y/o electrónicas. ✓	Los materiales utilizados fueron seleccionados, solo tomando en cuenta algunas de sus propiedades.	Los materiales fueron utilizados, sin tomar en cuenta las propiedades.	Los materiales utilizados no responden a la naturaleza del prototipo.	
Funcionamiento	Explica con detalle los procedimientos de la construcción y funcionamiento de su prototipo. ✓	Explica los procedimientos de construcción, así como su funcionamiento del prototipo, pero sin una secuencia lógica.	Explica el funcionamiento, pero no detalla cómo se construyó el prototipo.	No explica ni los procedimientos, ni cómo funciona el prototipo construido	
Presentación	El prototipo está presente de modo que la estructura es aseada, atractiva y refinada. ✓	El prototipo está presente de modo que la estructura tiene alguna de las siguientes etapas: aseada, atractiva o refinada.	El prototipo está presente pero la estructura carece de aseado, no es atractiva ni refinada.	El prototipo no está presente de modo que no se observa una estructura es aseada, atractiva y refinada.	
Puntualidad	Entregó en fecha y hora señalada ✓	Entregó en fecha y no en hora señalada ✓	Entregó en fecha posterior y hora señalada ✓	No entregó en fecha ni hora señalada	
TOTAL				NA	

28/06/2023

[Handwritten signature]