



MODELO D+i  
FASE II : Diseño e implementación

**Integrantes del equipo**

*Manuel Morales Ruz*

*Álvaro Alfredo Ordoñez Dawn*

*Isabella Meijueiro Sauri*

*Jesús Adrián Tiburzio Hernández*

**Clave del proyecto: Equipo cocos**

**Idea del proyecto:**

El proyecto consiste en desarrollar una ballesta capaz de lanzar una pelota hacia un objetivo, con la posibilidad de ajustar el ángulo de disparo para realizar distintas pruebas. En la versión final se eliminó el sistema de deslizamiento del prototipo anterior y se sustituyó por un diseño donde las ligas quedan “flotando”, reduciendo por completo la fricción y mejorando la salida de la pelota.

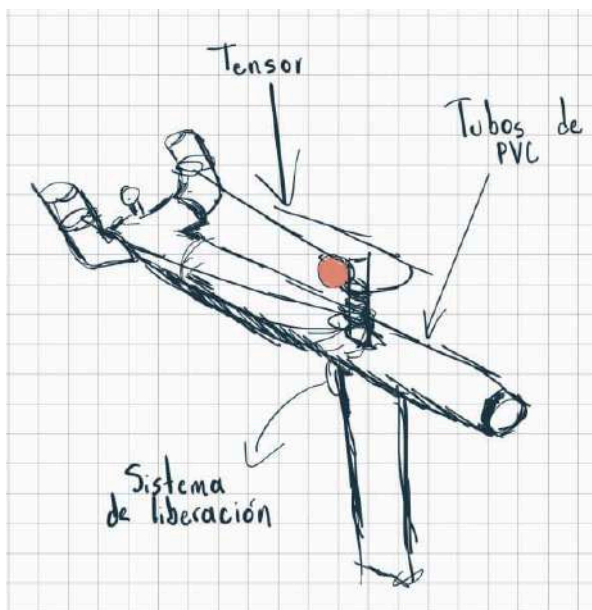
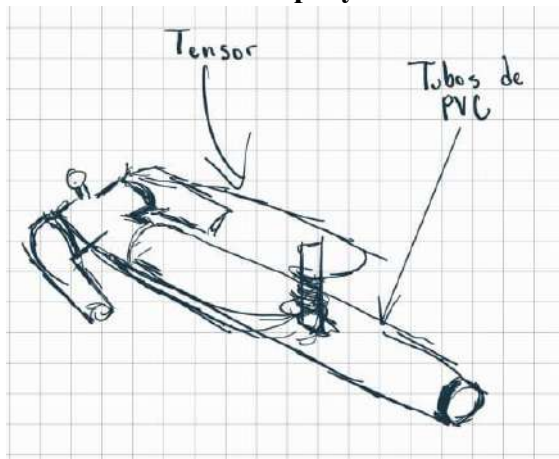
El soporte de la pelota también se modificó, reemplazando la pieza impresa en TPU por un cople de PVC más rígido y estable. El mecanismo de carga se simplificó utilizando una varilla que mantiene las ligas tensadas hasta el momento del disparo, haciendo el proceso más seguro y confiable.

La estructura conserva la base de madera y el eje que permite ajustar el ángulo, integrando piezas impresas en 3D y materiales comerciales para obtener un lanzador funcional, resistente y adecuado para las pruebas de alcance del proyecto.

**Objetivo:**

Diseñar, construir y evaluar un artefacto de lanzamiento tipo ballesta que permita proyectar objetos siguiendo una trayectoria parabólica, aplicando principios de física y matemáticas para lograr precisión, seguridad y funcionalidad en el reto “Calcula, lanza y acierta”.

## Primeros bocetos del proyecto



## Diseño del proyecto

El desarrollo del prototipo siguió un proceso basado en experimentación y análisis de referencias existentes. Inicialmente se estudió la estructura de la ballesta del profesor Willy y otros mecanismos de disparo similares para identificar principios funcionales aplicables al proyecto.

### Prototipo 1

Sistema de resortes metálicos: Aprovechando materiales disponibles de proyectos anteriores (tubo de PVC), se diseñó un primer prototipo con configuración lineal utilizando resortes metálicos como sistema de almacenamiento de energía. La hipótesis inicial era que los resortes proporcionarían mayor confiabilidad y consistencia que las ligas tradicionales. Sin embargo, las pruebas experimentales revelaron que la capacidad energética de los resortes disponibles resultó insuficiente para alcanzar el objetivo de 20 metros. Aunque el sistema de resortes no cumplió las expectativas de alcance, la geometría lineal del diseño demostró ser estructuralmente viable, lo que permitió aprovechar este concepto en prototipos posteriores.

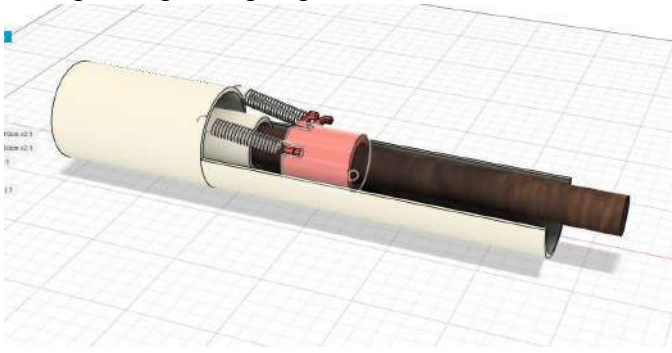


Fig. 1. Prototipo 1 con sistema de resortes de expansión

### Prototipo 2

Rediseño con sistema de ligas: Basándose en los resultados del Prototipo 1, se implementaron las siguientes modificaciones:

**1. Estructura de lanzamiento:** Se experimentó inicialmente con ranurado del tubo de PVC, pero esta modificación comprometió la integridad estructural. La solución adoptada consistió en cortar longitudinalmente el tubo a la mitad y acoplarlo a una estructura de madera, proporcionando resistencia mecánica para soportar impactos repetidos.

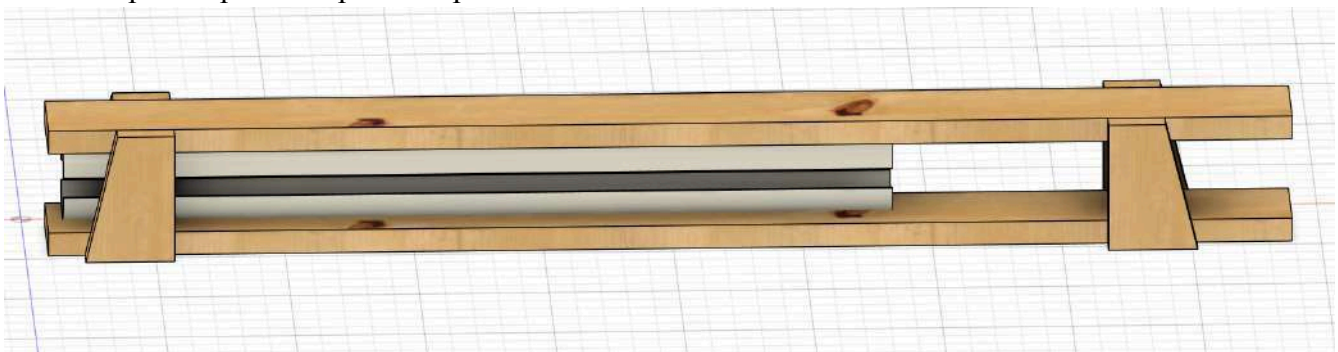


Fig 2. Chasis final de la ballesta

**2. Sistema elástico:** Los resortes metálicos fueron reemplazados por ligas de látex, ofreciendo mayor elasticidad y capacidad de almacenamiento energético.

**3. Soporte del proyectil:** Se diseñó e imprimió en 3D un cople en PETG, ajustado a las dimensiones exactas de la pelota de goma para asegurar posicionamiento preciso y liberación controlada.

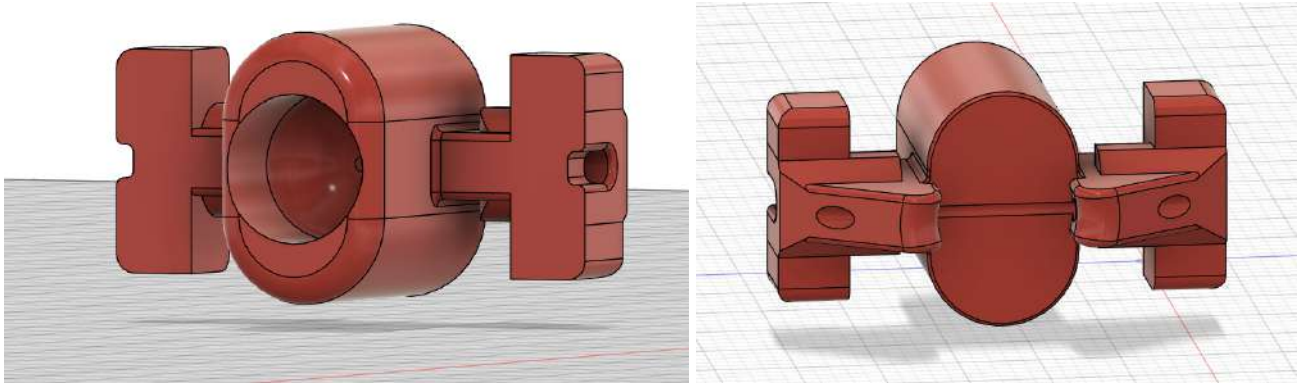


Fig 3. Diseño CAD del cople nuevo

**4. Mecanismo de carga:** Se implementó un sistema inspirado en mecanismos de remolque tipo winch. El diseño integra:

- Engranaje impreso en 3D con filamento PLA.

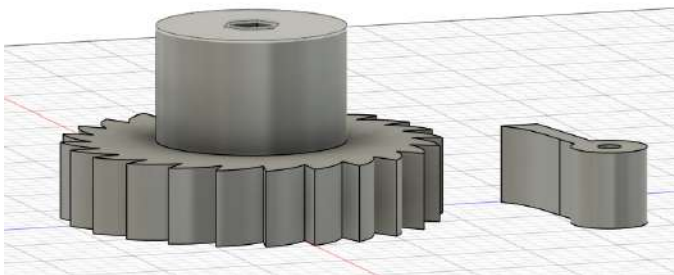


Fig 4. Engranaje utilizado

- Eje híbrido impreso en 3D con núcleo de varilla de acero para distribución óptima de fuerzas y resistencia a torsión.

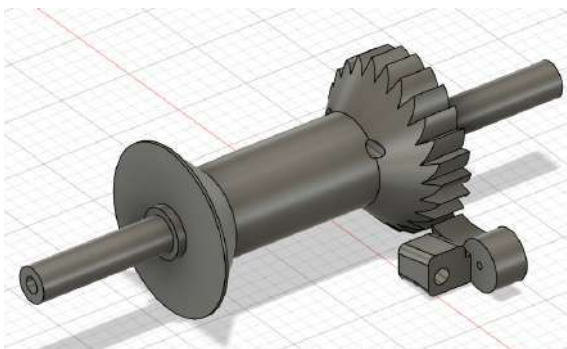


Fig 5. Diseño del engranaje

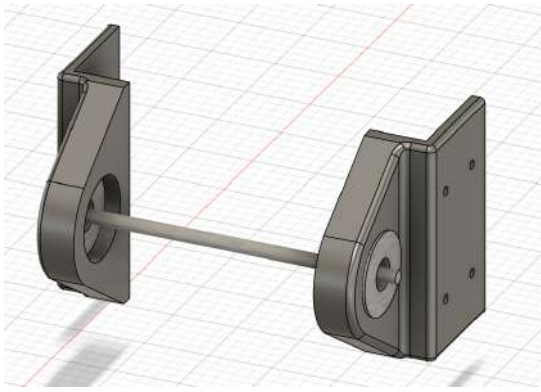


Fig 6. Soporte de eje

- Colchones amortiguadores impresos en TPU para absorber impacto y proteger componentes estructurales.

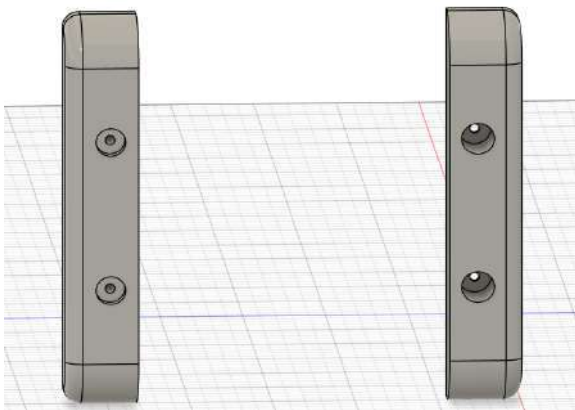


Fig 7. Colchones para los puntos de impacto

## 5. Ajuste del ángulo

Para resolver la limitación del ángulo fijo identificada en el Prototipo 2, se diseñó e implementó un sistema de ajuste angular automatizado que permite modificar la inclinación de lanzamiento de forma precisa y controlada.

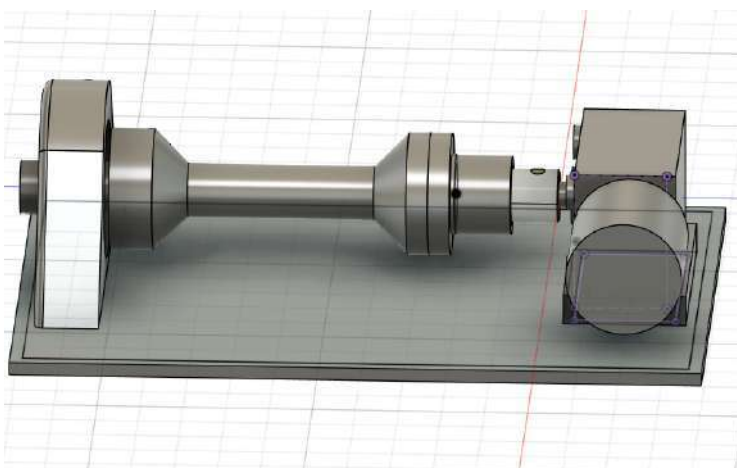


Fig 8. Diseño del sistema de ajuste de ángulo

El sistema integra los siguientes componentes:

### **Actuador motorizado con autobloqueo**

Se utiliza un motor con sistema de engranaje tipo tornillo sin fin integrado, que proporciona dos ventajas fundamentales:

- Reducción mecánica que multiplica el torque disponible, permitiendo sostener el peso de la estructura de lanzamiento.
- Autobloqueo irreversible: una vez posicionado el ángulo deseado, el mecanismo no permite retroceso por acción de fuerzas externas, manteniendo la posición incluso con el motor desenergizado.

Esta característica elimina la necesidad de sistemas de freno adicionales y garantiza estabilidad angular durante el disparo.

### **Sistema de medición mediante giroscopio**

Se incorporó un sensor giroscopio que mide la inclinación en tiempo real respecto a la horizontal. El giroscopio proporciona retroalimentación continua del ángulo actual de la estructura.

### **Control automatizado de posicionamiento**

El sistema opera mediante el siguiente protocolo:

- El usuario ingresa el ángulo deseado.
- El giroscopio mide el ángulo actual de la ballesta.
- Un controlador calcula la diferencia entre el ángulo objetivo y el ángulo medido.
- El motor ajusta la posición hasta que el giroscopio confirma que se ha alcanzado el ángulo programado.

## **6. Base**

Para permitir el movimiento angular controlado de la ballesta, se diseñó una estructura de base que combina estabilidad estructural con libertad de rotación en un eje horizontal.

Configuración estructural: La base consiste en un sistema de tres componentes principales:

### **Estructura paralela principal**

Dos tableros de madera dispuestos verticalmente en configuración paralela funcionan como montantes laterales. Estas piezas proporcionan la altura necesaria para el rango de movimiento angular y soportan las cargas verticales generadas durante el disparo.

### **Sistema de rotación**

Entre los tableros paralelos se instaló un tablón transversal que sirve como punto de anclaje de la ballesta. Este elemento incorpora una varilla de acero que atraviesa ambos tableros, funcionando como eje de rotación. La varilla permite el movimiento libre de la ballesta en el plano vertical mientras restringe otros grados de libertad.

La ballesta se fija mediante tornillos al tablón transversal, transmitiendo todo el conjunto de fuerzas de disparo a través del eje de acero hacia los montantes laterales.

### **Refuerzos de estabilidad**

Aunque la configuración paralela básica proporciona estabilidad estructural adecuada debido a la geometría y distribución de cargas, se incorporaron refuerzos adicionales para garantizar rigidez durante operación:

- Travesaños laterales: tableros instalados en ambos costados de la estructura, conectando los montantes paralelos y previniendo deformación lateral.
- Refuerzo frontal: tablero en la parte anterior de la base que incrementa la resistencia a momentos generados durante el disparo.

Estos refuerzos transforman la estructura de un sistema de dos piezas paralelas a un marco tridimensional rígido, eliminando vibraciones y movimientos no deseados durante la operación.

### Prototipo 3

Optimización del sistema de lanzamiento: A partir de las limitaciones observadas en el prototipo 2, principalmente la fricción generada por el cople deslizándose dentro del tubo, se implementaron modificaciones orientadas a reducir pérdidas de energía y mejorar la eficiencia del disparo.

#### 1. Sistema elástico flotante:

Se reemplazó el mecanismo de guiado mediante tubo por un sistema donde las ligas quedan suspendidas (“flotan”) sin contacto con superficies rígidas durante el desplazamiento. Al eliminar el rozamiento entre cople y tubo, se reducen significativamente las pérdidas de energía, permitiendo alcanzar mayores distancias con la misma tensión aplicada.

#### 2. Nuevo portapelotas:

Se utilizó un cople de PVC, el que utilizamos para el segundo prototipo en la etapa de pruebas antes de pasar al cople impreso.

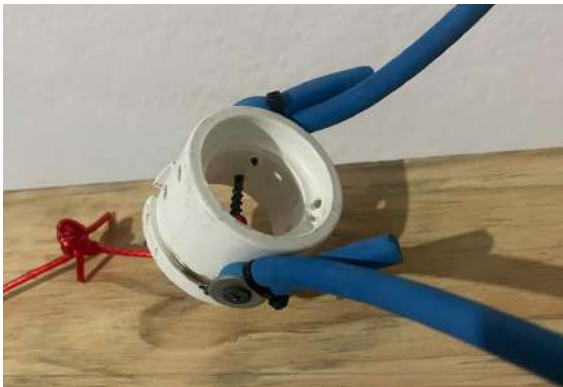


Fig 9. Nuevo cople

#### 3. Mecanismo de carga con retención mecánica

En este prototipo se implementó un sistema de bloqueo mediante una varilla que asegura la posición de carga. Esta varilla mantiene el sistema en tensión hasta el momento exacto del disparo y permite una liberación controlada sin depender de fricción interna. La modificación mejora tanto la seguridad como la consistencia entre disparos.

#### 4. Reducción de fricción y mejora en transmisión de energía

La eliminación del tubo guía y el rediseño del portapelotas atienden directamente el problema



identificado en pruebas previas: la fricción excesiva impedía alcanzar la distancia requerida. Con el nuevo arreglo, el sistema permite un recorrido libre de interferencias, maximizando la transferencia de energía almacenada en las ligas hacia el proyectil.

#### **5. Compatibilidad con el sistema de ajuste de ángulo existente:**

La estructura base y el mecanismo de ajuste angular se mantuvieron sin cambios. Gracias a esto, el Prototipo 3 sigue permitiendo controlar con precisión la inclinación de lanzamiento, conservando la capacidad de operar con distintos ángulos según la distancia y trayectoria deseada.



## Cálculos realizados

Para optimizar el desempeño del sistema y permitir ajuste predictivo de configuraciones, se desarrolló un modelo matemático basado en las ecuaciones del tiro parabólico que considera las condiciones reales del proyecto.

### Sistema de referencia y variables

El sistema opera con las siguientes variables principales:

- Altura de la ballesta: 1.25 m
- Altura del blanco: 0.56 m
- Altura del láser de referencia: 0.99 m
- Distancia horizontal al blanco (d)
- Ángulo de lanzamiento ( $\theta$ )
- Velocidad inicial ( $v_0$ )
- Gravedad ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ )

### Cálculo de distancia con ángulo de depresión

Para determinar la distancia horizontal al blanco cuando se utiliza un láser de referencia con ángulo de depresión conocido:

$$d = (h_{\text{laser}} / \tan(\theta_{\text{dep}})) + d_{\text{offset}}$$

Donde:

- $\theta_{\text{dep}}$ : ángulo de depresión del láser respecto a la horizontal
- $d_{\text{offset}}$ : distancia horizontal entre el láser y la ballesta (0.22 m)

Esta ecuación permite posicionar el sistema a una distancia específica del objetivo utilizando el láser como guía de alineación.

### Cálculo de ángulos óptimos de lanzamiento

Para calcular los ángulos de lanzamiento que permiten alcanzar un blanco ubicado a distancia y altura, se utiliza la ecuación general del alcance con diferencia de altura:

$$\tan(\theta) = (v_0^2)/(g \cdot d) \cdot [1 \pm \sqrt{1 - (2g/v_0^2) \cdot ((g \cdot d^2)/(2v_0^2) + h_{\text{ballesta}} - h_{\text{blanco}})}]$$

Esta ecuación cuadrática genera dos soluciones (ángulo bajo y ángulo alto) que permiten alcanzar el mismo punto:

$$\theta_1 = \arctan[(v_0^2)/(g \cdot d) \cdot (1 + \sqrt{1 - (2g/v_0^2) \cdot ((g \cdot d^2)/(2v_0^2) + \Delta h)})]$$

$$\theta_2 = \arctan[(v_0^2)/(g \cdot d) \cdot (1 - \sqrt{1 - (2g/v_0^2) \cdot ((g \cdot d^2)/(2v_0^2) + \Delta h)})]$$

Donde  $\Delta h = h_{\text{ballesta}} - h_{\text{blanco}}$

Conversión a grados:  $\theta_{\text{grados}} = (180/\pi) \cdot \theta_{\text{radianes}}$

## **Determinación de velocidad inicial mediante pruebas experimentales**

La velocidad inicial del proyectil se determina experimentalmente mediante medición de alcance horizontal con ángulo conocido. Para cada configuración de tensión de las ligas, se realizan múltiples lanzamientos y se calcula:

$$v_0 = \sqrt{[(g \cdot d^2) / (2 \cdot a)]}$$

Donde a es la altura de la ballesta.

Protocolo de medición:

- Se definen tres niveles de tensión del sistema elástico (configuraciones de ligas)
- Para cada nivel se realizan 6 lanzamientos con ángulo y distancia medidos
- Se determina el promedio y desviación media
- Se determina la velocidad inicial

## **Determinación de la velocidad necesaria para 20 metros**

El objetivo final del sistema es alcanzar una distancia horizontal de 20 m. La velocidad inicial requerida depende del ángulo de lanzamiento:

### **1. Condición ideal (mejor caso)**

$$v=14.01 \text{ m/s}$$

Energía requerida:

$$E=1.55 \text{ J}$$

Usando un estiramiento máximo de 0.46 m, la constante elástica equivalente necesaria es de:

$$k=14.7 \text{ N/m}$$

La fuerza máxima ejercida por la liga sería aproximadamente:

$$F=6.7 \text{ N}$$

### **2. Disparo horizontal (0°) desde**

$$h=1.075 \text{ m}$$

Tiempo de caída:

$$t=0.468 \text{ s}$$

Velocidad necesaria para recorrer 20 m en ese tiempo:

$$v=42.7 \text{ m/s}$$

Energía requerida  
 $E=14.43 \text{ J}$

Constante elástica equivalente

$k=136.4 \text{ N/m}$

$F=62.7 \text{ N}$ .

Disparar horizontal desde 1.075 m requiere aproximadamente 9.3 veces más energía que un lanzamiento óptimo a 45°. Por ello el sistema se caracterizará experimentalmente usando los ángulos reales de prueba y los datos de alcance para obtener la constante elástica efectiva de las ligas.

## Pruebas

Nivel	Lanzamientos	Distancia promedio	Desviación media	Velocidad inicial
1	6	3.081	0.12111	6.57
2	6	4.42	0.2	9.44
3	6	5.96	0.18	12.73

## Evidencia fotográfica





## **Ajustes respecto al parcial anterior**

A partir de la retroalimentación y los resultados experimentales obtenidos en la Fase II, se implementaron las siguientes mejoras al prototipo:

### **1. Optimización del sistema de tensión elástica**

El uso de ligas se mantuvo, dado su buen desempeño respecto a los resortes metálicos. Sin embargo, se rediseñó su posición para operar en configuración “flotante”. En este arreglo, las ligas ya no se deslizan dentro de un tubo ni interactúan con superficies rígidas, lo que elimina prácticamente toda la fricción durante el disparo y permite una transferencia de energía más eficiente.

### **2. Reestructuración del sistema de guiado y eliminación del tubo**

El tubo de PVC empleado en el diseño anterior generaba pérdidas significativas por rozamiento entre el cople y las paredes internas. Para resolver esta limitación, el tubo fue retirado completamente del mecanismo. Con ello, el proyectil y las ligas se desplazan libremente sin superficies de contacto, reduciendo la variabilidad en la distancia y mejorando la repetibilidad en las pruebas.

### **3. Rediseño del soporte del proyectil**

El nuevo cople mejora el ajuste a la pelota, reduce deformaciones durante la aceleración y facilita la liberación del proyectil debido a su menor fricción y mayor adaptabilidad.

### **4. Mecanismo de carga con bloqueo por varilla**

Aunque se conservó el método general de carga implementado en el Prototipo 2, se incorporó una varilla de retención que mantiene el sistema en tensión hasta el momento del disparo. Este mecanismo ofrece mayor seguridad, elimina el retroceso involuntario y permite liberar la energía de forma más controlada y precisa.

### **5. Sistema de ajuste angular**

El prototipo del parcial anterior operaba con ángulo fijo, lo que representaba su limitación principal e impedía cumplir el objetivo de encestar con precisión.

Para resolver esta deficiencia, se diseñó e implementó desde cero un sistema completo de ajuste angular automatizado:

- Motor con engranaje tipo tornillo sin fin (autobloqueo mecánico)
- Giroscopio para medición en tiempo real del ángulo
- Controlador automatizado
- Estructura de base reforzada para diferentes configuraciones angulares

Este sistema proporciona precisión  $<1^\circ$ , repetibilidad para pruebas sistemáticas, y operación automatizada sin intervención manual continua.

### **6. Implementación de estructura de base**

El prototipo anterior carecía de base estructural, requiriendo soporte manual e imposibilitando la integración de un sistema de ajuste angular.

Se diseñó y construyó desde cero una base completa:

- Marco de madera con montantes paralelos verticales.
- Eje de rotación mediante varilla de acero entre montantes.
- Ballesta atornillada a tablón transversal sobre el eje.
- Refuerzos laterales y frontales para rigidez estructural.

## Materiales

Material	Precio
Filamentos para impresión 3D	\$300
Lubricante de baleros	\$78.33
Varillas de prueba	\$19.29
Varilla 8	\$9.6
Varilla 10	\$12.86
Varilla 12	\$14.12
Cuerda	\$39
Baleros	\$80
Discos 40	\$36
Discos 80	\$36
Discos 120	\$36
Liga de látex	\$100
Madera	Ya contábamos con este material
Pantalla LED	Ya contábamos con este material
Tornillos	Ya contábamos con este material
Puente h	Ya contábamos con este material
Arduino	Ya contábamos con este material
Teclado	Ya contábamos con este material
Cables	Ya contábamos con este material
Tubo PVC	Ya contábamos con este material
<b>TOTAL</b>	<b>\$761.2</b>



## **Bitácora**

### **2 de septiembre**

Se inició la fase de investigación, recopilando información sobre mecanismos de lanzamiento tipo ballesta y analizando referencias para el diseño inicial.

### **25 de septiembre**

Se elaboraron los primeros bocetos y se realizaron los primeros modelos CAD basados en las ideas iniciales de diseño.

### **26 de septiembre**

Se construyó el primer prototipo y se efectuaron pruebas preliminares. El sistema, basado en resortes metálicos, presentó baja potencia y un alcance máximo aproximado de 5 metros. Se observó pérdida de fuerza en los resortes y limitaciones mecánicas del diseño.

### **Entre septiembre y octubre**

Se analizaron posibles mejoras, evaluando cambios en materiales, geometría y sistema de tensión para incrementar el rendimiento.

### **20 de octubre**

Se construyó el segundo prototipo de la ballesta, incorporando una base de madera y un rediseño general para mejorar rigidez y estabilidad.

### **27 de octubre**

Se refinó la estructura del chasis, lijando y ajustando piezas para mayor precisión. Además, se rediseñó e instaló un nuevo soporte para el proyectil.

### **2 de noviembre**

Se integraron las piezas del mecanismo de gatillo y se realizaron mejoras menores en el ajuste y funcionamiento general.

### **4 de noviembre**

Se realizaron nuevas pruebas de funcionamiento. Varias piezas fallaron debido al esfuerzo, por lo que fue necesario reforzar componentes, reimprimir piezas dañadas y efectuar reparaciones.

### **14 de noviembre**

Se armó la base final del sistema y se instaló el medidor de ángulo para las pruebas de ajuste y medición.

### **17 de noviembre**

Primero se integró la parte electrónica al prototipo y se realizaron pruebas para medir la velocidad inicial en los tres niveles de tensión. A partir de esos resultados se identificaron pérdidas por fricción, por lo que se rediseñó por completo el sistema de lanzamiento: se eliminó el tubo de PVC, las ligas quedaron en configuración flotante y se sustituyó el cople por un porta pelotas de TPU. También se implementó un nuevo sistema de carga con varilla de retención. Este rediseño mejoró la liberación del proyectil y la consistencia del disparo.

## Evidencia de reuniones

