ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Ingeniería en Mantenimiento Industrial



Proyecto Concurso de Tiro Parabólico

Integrantes y códigos

William Roberto Alvarado Concha · 3098

Daniela Estefania Balseca Toctaguano · 3077

Allison Briggitte Caiza Sisalema · 3102

Alex Wladimir Catota Pinanjota · 3103

Stiven Jheraldo Cujiguallpa Asto · 3105

Génesis Andrea Eugenio Tubón · 3131

Michael Alexander Macas Ortiz · 3112

Jhon Nicolás Pinduisaca Aucansela · 3117

Debora Silvana Quishpi Simbaña · 3124

Kevin Stalin Vivanco Chávez · 3073

Eliza Aracely Zavala Najera · 3123

Riobamba, Ecuador

Miércoles, 11 de noviembre de 2026

Índice

Resumen 3

1 Planteamiento y objetivos 4

2 Diseño de la catapulta 6

3 Física Mecánica 8

4 Cálculo de Varias Variables 14

5 Dibujo Técnico 19

6 Fundamentos de Programación 21

7 Química y selección de materiales 24

8 Inglés 2 33

9 Plan de medición y calibración 37

10 Conclusiones y recomendaciones 40

Referencias 41

Anexo A Planos de la propuesta 44

Resumen

Se estudia una catapulta manual de mesa para lanzar una pelota de tenis de mesa hacia un blanco situado entre 3 y 6 m. La propuesta utiliza un brazo corto de contrachapado, una cazoleta y un resorte angular sobre una base de 400 × 400 × 22 mm. El radio útil es 180 mm y el eje queda a 120 mm del apoyo. El trabajo integra Física Mecánica, Cálculo de Varias Variables, Dibujo Técnico, Fundamentos de Programación, Química e Inglés 2.

El cálculo relaciona la energía del resorte con la inercia del conjunto, la elevación de las masas y la resistencia del aire durante el vuelo. En el caso de control de 4 m, una salida de 30° requiere una carga calculada de 68,21° y una velocidad inicial de 7,59 m/s. Se emplean K = 1 N·m/rad y eficiencia de 0,70 como supuestos de diseño. La memoria de cálculo, los planos, la calculadora Python y el simulador permiten revisar esos supuestos. El avance queda pendiente de identificar el resorte comercial, medir su respuesta y verificar el desprendimiento de la pelota.

Palabras clave. Catapulta didáctica, energía angular, momento de inercia, curvas de nivel, calibración y materiales.

1 Planteamiento y objetivos

1.1 Problema de ingeniería

El concurso requiere que un mecanismo manual lance una pelota ligera hacia un recipiente cuya distancia se comunica antes del turno. El equipo debe transformar esa distancia en un ajuste verificable. La guía permite catapultas y brazos oscilantes, establece una base máxima de 40 × 40 cm, limita la altura a 50 cm y pide graduación angular fija. En el primer medio ciclo se entrega diseño, cálculo y algoritmo. La fabricación y la evaluación de tres lanzamientos corresponden al segundo medio ciclo (Proyecto Concurso de Tiro Parabólico, s. f.).

La pregunta de trabajo es qué carga angular y qué dirección de salida permitirían llegar a un blanco de 3 a 6 m con un brazo de 180 mm. Resolverla exige determinar la energía entregada durante el giro, descontar el trabajo de elevación y seguir el vuelo de una pelota cuya masa es pequeña frente a su área frontal. También exige indicar qué parámetro se propone y cuál se conoce por medición.

La justificación de la guía delimita el propósito educativo de la propuesta:

> El concurso de tiro parabólico permite a los estudiantes de PAO 2 aplicar conceptos de mecánica clásica y cinemática en un dispositivo tangible de bajo costo y manufactura propia. El reto consiste en construir un mecanismo sencillo (catapulta de mesa) que permita acertar a un blanco a una distancia determinada mediante cálculos de trayectoria, evitando el método de "ensayo y error". (Proyecto Concurso de Tiro Parabólico en Mantenimiento Industrial PAO 2, s. f., p. 1)

La propuesta usa una cazoleta que transporta la pelota. La separación se aproxima como tangencial y sin impulso adicional. Esta elección reduce las piezas móviles consideradas, pero hace necesario verificar el instante real de desprendimiento. El informe estudia esa hipótesis y entrega herramientas para sustituirla cuando exista un prototipo.

1.2 Objetivo general

Diseñar y evaluar una catapulta manual de brazo corto mediante un modelo interdisciplinario que permita calcular la carga angular necesaria para un blanco, documentar las piezas y preparar la medición del mecanismo real.

1.3 Objetivos específicos

Derivar el balance energético del brazo y el vuelo de la pelota, incluyendo pérdidas y altura de salida. Construir las curvas de nivel del alcance en función de carga y salida. Elaborar vistas, cotas y despiece editables. Implementar una calculadora con instrucciones básicas de Python y una interfaz de ventana. Justificar los materiales mediante composición, estructura, degradación y función. Redactar la nomenclatura y una guía de operación en inglés comprensible para el equipo.

1.4 Método y alcance

Se consultaron artículos científicos, materiales universitarios abiertos, documentación de fabricantes y fichas institucionales. La selección responde a preguntas de diseño: cómo representar la energía del brazo, qué efectos modifica el aire y qué información se necesita para elegir los materiales. Los antecedentes de aerodinámica se emplean dentro de lo descrito en sus resúmenes editoriales; no se presentan como una reproducción de sus simulaciones. Las fichas públicas de normas se usan para identificar su alcance. Las ecuaciones de esta geometría y los escenarios numéricos corresponden al desarrollo del equipo. Los datos de catálogo no se consideran certificados de las piezas que puedan adquirirse.

La investigación comprende un caso de control de 4 m y escenarios de 3, 5 y 6 m. Los resultados se registran como calculados. Las tablas de medición conservan vacía la columna real. La rigidez angular, la eficiencia y el coeficiente de arrastre se someten a exploración porque todavía no proceden de un ensayo del dispositivo.

2 Diseño de la catapulta

2.1 Componentes y dimensiones

El sistema propuesto tiene una base de MDF, dos soportes de contrachapado, un eje comercial, un brazo ligero, una cazoleta y un resorte torsional. El radio útil L se mide desde el centro del eje hasta el centro de la pelota. El brazo físico conserva una pequeña zona de fijación junto al eje y se representa dinámicamente como una distribución uniforme equivalente sobre L.

Tabla 1

Dimensiones y materiales propuestos

Elemento	**Datos de diseño**	**Estado**
Base	MDF 400 × 400 × 22 mm	Propuesto
Soportes	2 piezas de contrachapado de 12 mm	Propuesto
Eje	Tornillo comercial Ø8 × 160 mm	Por seleccionar
Brazo	200 × 20 × 8 mm; radio útil 180 mm	Propuesto
Cazoleta	Ø45 mm exterior; masa 4 g	Por medir
Resorte	K objetivo 1 N·m/rad; referencia q = 0	Por identificar
Pelota	Ø40 mm; 2,7 g	Nominal ITTF
Altura del eje	120 mm desde el apoyo	Propuesto
Pivote en planta	220 mm desde borde posterior; 200 mm lateral	Propuesto

La base y los soportes forman una referencia estable para el cuadrante angular. El eje se coloca a 220 mm del borde posterior y a 200 mm del borde lateral de la base. A carga máxima, el centro de la pelota queda a 40 mm del borde posterior. Considerando una cazoleta de 45 mm exteriores, se obtiene una reserva geométrica de 17,5 mm. El estudio adopta una envolvente vertical conservadora de 325 mm para el giro entre carga horizontal y referencia vertical.

2.2 Secuencia funcional

El operador coloca el dispositivo sobre un apoyo nivelado, registra la distancia del blanco desde el pie del eje y consulta el programa. El brazo se lleva al ángulo de carga indicado, la pelota se coloca en la cazoleta y el mecanismo libera el giro. En el modelo, la pelota se separa en la dirección tangente cuando el brazo alcanza el ajuste de salida. Un cuadrante visible permite relacionar ambos ángulos.

La retención, el límite de recorrido y la geometría de la cazoleta se deben cerrar después de comprobar el resorte comercial y el desprendimiento. El volumen reservado al muelle en las láminas no define diámetro de alambre, número de espiras ni esfuerzo admisible. Estas variables requieren información de proveedor y una revisión específica.

2.3 Antecedentes que orientan el estudio

Isomura et al. (2016) estudiaron el vuelo de una pelota de tenis de mesa con giro mediante herramientas de dinámica de fluidos. El antecedente muestra que la fuerza aerodinámica depende de más variables que la gravedad. Su contribución al proyecto es justificar la revisión del giro y del coeficiente aerodinámico, sin trasladar sus resultados a la cazoleta.

Ito y Kamijima (2022) construyeron un simulador tridimensional con coeficientes obtenidos mediante CFD. Incluyeron arrastre, efecto Magnus y momento aerodinámico. Aquí se implementa una aproximación bidimensional para aprender y calibrar con pocos parámetros. Los efectos laterales y el giro se examinarán mediante video si las pruebas muestran desviaciones sistemáticas.

Wang et al. (2024) analizaron contrachapado de abedul bajo distintas condiciones de humedad y orientación de carga. Charuk et al. (2024) estudiaron su respuesta dinámica. Ambos antecedentes apoyan la necesidad de identificar el tablero y su orientación. Sus valores de resistencia no se asignan al contrachapado comercial del proyecto.

3 Física Mecánica

3.1 Coordenadas y ángulos

Se coloca el origen horizontal bajo el eje y se toma el plano inferior de la base como y = 0. La altura del eje es h. El ángulo q se mide desde la vertical hacia la posición de carga. En el movimiento propuesto q disminuye durante el giro horario. La dirección de salida de la pelota es α, medida desde la horizontal. Ambos ángulos coinciden numéricamente en el instante ideal de liberación, pero describen orientaciones diferentes.

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + q, q_r = \alpha \quad (1)$$

Las coordenadas de salida se obtienen proyectando el radio del brazo. La separación entre componentes horizontal y vertical sigue el tratamiento de movimiento de proyectiles descrito por Moebs et al. (2016). Como la cazoleta está detrás del eje al liberar, la coordenada horizontal inicial es negativa. La velocidad tangencial apunta hacia delante y arriba. Esta convención permite medir el blanco desde una referencia fija y evita sumar arbitrariamente el largo del brazo al alcance.

$$x_0 = -L\sin(\alpha); y_0 = h + L\cos(\alpha) \quad (2a)$$

$$v_{0x} = v_0\cos(\alpha); v_{0y} = v_0\sin(\alpha) \quad (2b)$$

Los 40 mm y 2,7 g de la pelota se adoptan como valores nominales de reglamento. La ITTF especifica esas magnitudes para la pelota de tenis de mesa. Cada unidad real debe pesarse y medirse porque una especificación nominal no determina exactamente la muestra utilizada (International Table Tennis Federation, 2026).

3.2 Inercia y energía del conjunto móvil

Para una masa distribuida, el momento de inercia se obtiene integrando el cuadrado de la distancia al eje. El curso de mecánica del MIT presenta el desarrollo de la energía cinética rotacional y el caso de una varilla alrededor de un extremo. Esos principios se aplican al brazo uniforme equivalente de esta propuesta (Dourmashkin, 2016).

$$I = \frac{m_b L^2}{3} + (m_c + m)L^2 \quad (3)$$

En el modelo, m_b representa la masa equivalente del brazo, m_c la cazoleta y m la pelota. Con L = 0,180 m, m_b = 0,020 kg, m_c = 0,004 kg y m = 0,0027 kg se obtiene I = 0,00043308 kg·m². La contribución de la pelota es menor que la del conjunto de madera y cazoleta. Reducir la masa alejada del eje puede ser más importante que reducir una masa pequeña junto al apoyo.

La unión al eje, las arandelas y el acoplamiento del resorte también pueden girar. Su contribución debe incorporarse cuando se disponga de las piezas. Una forma de mejorar la inercia equivalente es medir el período de pequeñas oscilaciones de un péndulo físico con el resorte desconectado y su centro de masa conocido. Ese ensayo requiere corregir la fricción y la amplitud antes de usarlo como dato de identificación (Dourmashkin, 2016).

3.3 Resorte angular y energía residual

Se adopta una ley lineal $\tau = Kq$ con referencia q = 0 sin momento elástico. K expresa N·m por radián. La referencia del resorte no coincide necesariamente con la posición de equilibrio del conjunto sometido a gravedad. Los cálculos de muelles helicoidales de torsión deben considerar la flexión de las patas y del cuerpo. Tokai Spring distingue constantes por radián y por grado en su documentación técnica (Tokai Spring Industries, s. f.).

$$\tau = Kq \quad (4)$$

La energía entregada entre carga q_i y salida α se obtiene integrando el momento sobre el giro. La energía que permanece almacenada a la salida se resta explícitamente. Usar toda la energía de carga como si el resorte llegara a su referencia sobrestimaría la velocidad.

$$\Delta U_e = \frac{K}{2}({q_i}^2 - \alpha^2) \quad (5)$$

Para K = 1 N·m/rad y carga de 68,209°, el momento de carga es 1,190 N·m. La fuerza tangencial equivalente en el extremo del brazo sería aproximadamente 6,614 N si se aplica perpendicularmente a un radio de 180 mm. Es una conversión de momento a fuerza de referencia, no la fuerza de contacto entre la pelota y la cazoleta.

3.4 Elevación y pérdidas durante el giro

El centro de masa del brazo uniforme se sitúa a L/2, mientras que la pelota y la cazoleta se aproximan en L. Al girar desde q_i hasta α, las masas ascienden. El cambio de energía potencial se calcula con sus variaciones de altura (Dourmashkin, 2016).

$$\Delta U_g = gL(\frac{m_b}{2} + m_c + m)(\cos(\alpha) - \cos(q_i)) \quad (6)$$

Se introduce η como fracción de la energía elástica liberada que queda disponible después de las pérdidas rotacionales. El trabajo contra la gravedad se resta por separado. La eficiencia no debe volver a descontarse de la velocidad o de la energía de vuelo, pues eso contabilizaría dos veces las mismas pérdidas.

$$E_k = \eta \Delta U_e - \Delta U_g \quad (7a)$$

$$v_0 = L\sqrt{\frac{2E_k}{I}} \quad (7b)$$

Para el control de 4 m se liberan 0,571537 J del resorte. Al aplicar η = 0,70 quedan 0,400076 J antes de elevar el mecanismo. La elevación consume 0,014591 J y quedan 0,385485 J de energía cinética del conjunto. La velocidad de la pelota en la punta resulta 7,594636 m/s. La energía cinética de la pelota es solo una parte de la energía del brazo completo.

3.5 Separación y trayectoria

El vuelo comienza con las coordenadas de salida y las componentes de velocidad calculadas. Para el caso sin aire se obtiene una solución analítica que permite comprobar el programa. La altura de llegada puede diferir de la salida. El tiempo positivo se calcula mediante la raíz de la ecuación vertical y el alcance se mide desde el pie del eje (Moebs et al., 2016).

$$t = \frac{v_0 \sin(\alpha) + \sqrt{v_0{}^2 \sin(\alpha)^2 + 2g y_0}}{g} \quad (8a)$$

$$R = x_0 + v_0 \cos(\alpha) t \quad (8b)$$

El modelo con aire agrega una fuerza opuesta a la velocidad. Se adopta el área frontal de una esfera y un coeficiente constante Cd como aproximación de trabajo. El valor de 0,47 permanece como supuesto de exploración. No se atribuye a una medición de esta pelota, ni se usa como resultado de los artículos consultados. La densidad de 0,96 kg/m³ también es una

referencia de escenario que debe reemplazarse por condiciones ambientales verificadas. En la ecuación (9), v representa el vector velocidad y j la dirección vertical positiva.

NASA señala que el coeficiente debe acompañarse del área con la que se define. Aquí se usa el área frontal circular de la pelota. El valor constante de Cd simplifica el cálculo; no incorpora por separado la rotación ni los efectos laterales estudiados por Isomura et al. e Ito y Kamijima (Isomura et al., 2016; Ito & Kamijima, 2022; National Aeronautics and Space Administration, s. f.).

$$m\frac{dv}{\mathrm{dt}} = -\mathrm{mgj} - \frac{1}{2}\rho C_d A|v|v \quad (9)$$

Para integrar se utiliza Heun. Primero se calcula la aceleración con la velocidad actual. Luego se predice la velocidad al final del paso y se vuelve a evaluar la aceleración. La actualización promedia las pendientes. El paso base es 0,001 s. Si la altura cambia de signo, se interpola el punto de contacto con y = 0. El registro de la trayectoria se reduce a un punto cada diez pasos para dibujar sin almacenar todos los estados (Mathematics LibreTexts, s. f.).

3.6 Caso reproducible de cuatro metros

Tabla 2

Caso de control calculado para cuatro metros

Magnitud	**Valor**
Salida α	30°
Carga q_i	68.20916°
Velocidad	7.59464 m/s
Momento de carga	1.19047 N·m
Energía liberada del resorte	0.571537 J
Elevación gravitatoria	0.014591 J
Energía cinética del conjunto	0.385485 J
Altura inicial	0.27588 m
Tiempo de vuelo	0.78829 s
Altura máxima de pelota	0.89836 m
Alcance desde el eje	4,00000 m

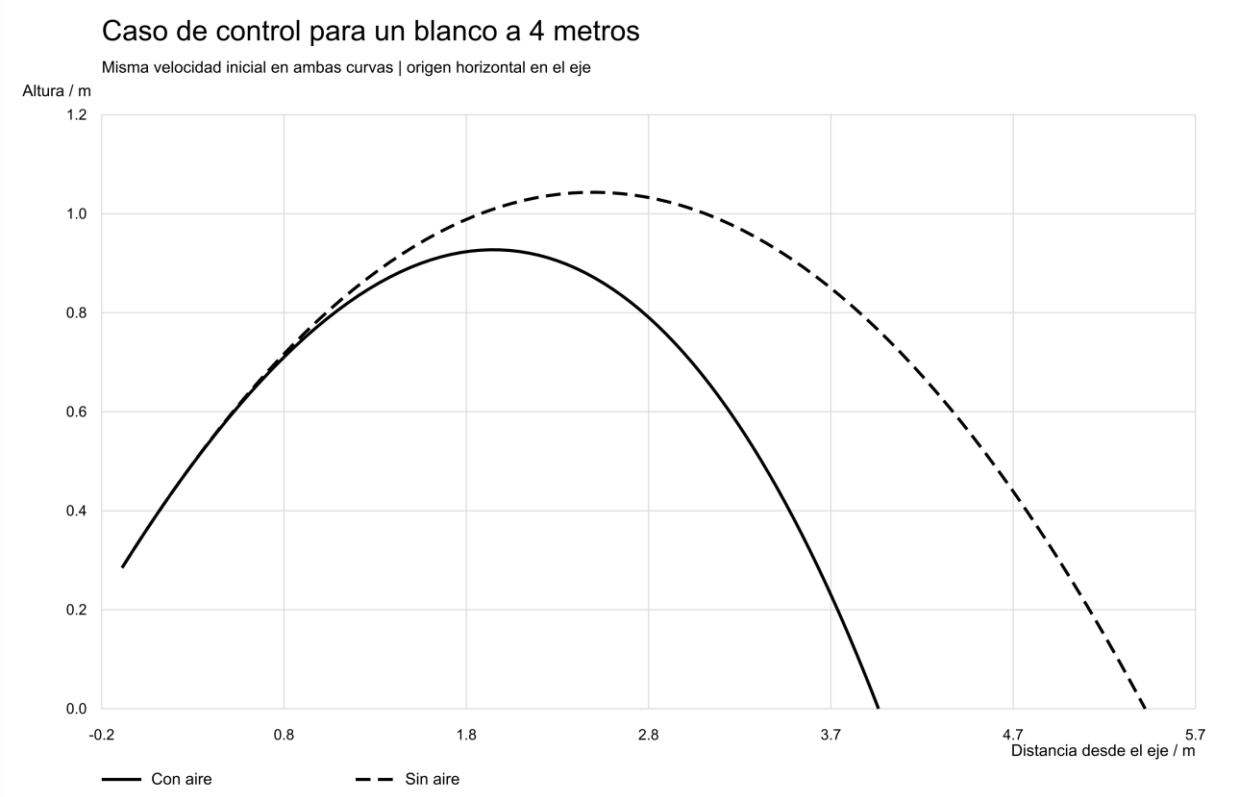


Figura 1. Trayectorias calculadas con y sin aire a igual velocidad inicial. Elaboración propia.

La comparación mantiene la misma velocidad de salida y cambia únicamente la presencia de arrastre. Así puede verse cuánto modifica el aire la trayectoria de este caso. Si se ajustara de nuevo la carga para cada curva, se estarían comparando dos velocidades distintas. La ecuación de arrastre utilizada se basa en la relación entre densidad, área frontal, coeficiente y velocidad descrita por NASA (National Aeronautics and Space Administration, s. f.).

4 Cálculo de Varias Variables

4.1 Función de alcance y dominio

El alcance puede escribirse como $R(\alpha, q_i; K, \eta, L, h, \text{masas}, \rho, Cd)$. En la superficie de estudio se dejan variar α y q_i, mientras que los otros parámetros se mantienen constantes. La restricción $q_i > \alpha$ corresponde a una descarga angular positiva. Se exploran salidas de 15° a 75° y cargas de hasta 90°. Los ángulos entran al motor en grados y se convierten a radianes antes de evaluar energía y trigonometría.

El alcance cambia al variar la carga o la salida. Las curvas de nivel permiten reunir ajustes que llegan a la misma distancia; una derivada parcial describe el efecto local de modificar solo una entrada. Se utilizan las definiciones de Feldman et al. y de Strang y Herman, aplicadas aquí a la función de alcance de la catapulta (Feldman et al., s. f.; Strang & Herman, 2016).

Se descartan los ajustes cuya energía disponible es cero o negativa: con ese balance el brazo no entrega la velocidad de salida requerida. El programa devuelve un mensaje de imposibilidad. Este recorte es una condición física del modelo, además de las restricciones matemáticas del dominio (Strang & Herman, 2016).

4.2 Curvas de nivel y selección de carga

Una curva $R = D$ representa las combinaciones de salida y carga que alcanzan una distancia D. En la figura se muestran las curvas para 3, 4, 5 y 6 m. Se calcularon resolviendo la carga necesaria a cada salida. Los intervalos sin curva indican que el blanco queda fuera del alcance permitido bajo los mismos parámetros (Strang & Herman, 2016).

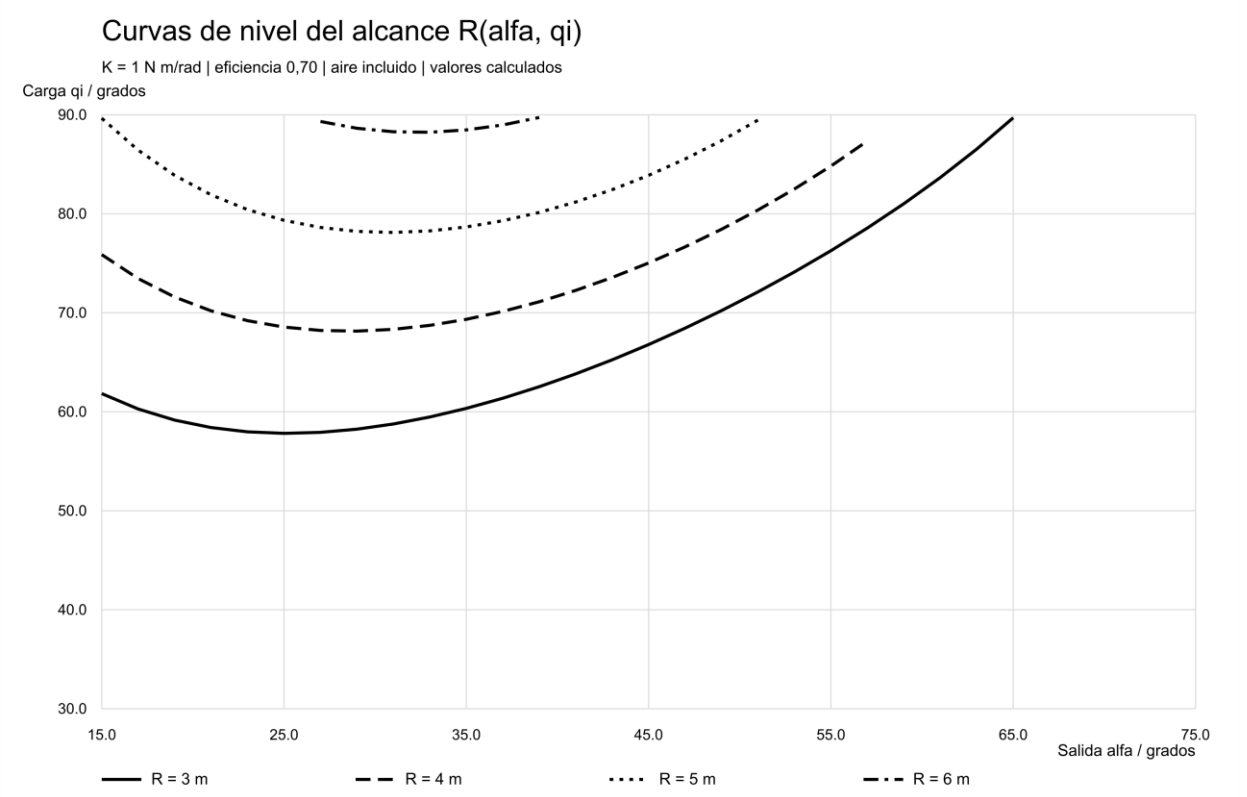


Figura 2. Curvas de nivel del alcance para cuatro distancias de concurso. Elaboración propia.

Para una distancia dada se puede minimizar la carga entre las cinco salidas disponibles o resolver un problema continuo. La comparación discreta identifica 30° para el caso de 4 m. Un barrido independiente con incrementos de un grado encuentra 29°, con aproximadamente 68,149° de carga. La diferencia frente a 68,209° a 30° es pequeña. El ajuste de 30° se conserva por su lectura sencilla en el cuadrante y por la resolución inicial del mecanismo. El barrido no acredita un mínimo global continuo.

4.3 Derivadas parciales de energía

Definiendo B = L(m_b/2 + m_c + m), la energía cinética disponible es una función diferenciable en los puntos interiores del dominio. Su derivada respecto a la carga es ηKq_i − gB sen(q_i). Respecto a la salida es −ηKα + gB sen(α). Estas expresiones usan radianes. Permiten estudiar cómo cambia la velocidad antes de resolver la trayectoria (Strang & Herman, 2016).

$$\frac{\partial E_k}{\partial q_i} = \eta K q_i - gB\sin(q_i) \quad (10)$$

La derivada se interpreta cerca del ajuste evaluado. No permite afirmar que cualquier aumento de carga sea admisible ni que el alcance crezca sin límite. La definición de derivada parcial mantiene fijas las otras entradas; los límites de giro se comprueban por separado (Strang & Herman, 2016).

4.4 Sensibilidad numérica del alcance

Las derivadas del alcance se aproximaron con diferencias centrales. Para α y q_i se usó un incremento de 0,1°. Para K y η se usó 0,001 en sus unidades respectivas. Para la masa del brazo se usó 0,0001 kg. Se recalculó el vuelo en cada perturbación manteniendo los otros parámetros fijos.

$$\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial q_i} \approx \frac{R(\alpha, q_i+\delta) - R(\alpha, q_i-\delta)}{2\delta} \quad (11)$$

Tabla 3

Sensibilidad local del alcance en el caso de control

Parámetro	**Derivada**	**Unidad**
Salida α	−0,00921	m/°
Carga q_i	0,10209	m/°
Rigidez K	2,90287	m/(N·m/rad)
Eficiencia η	4,14758	m por unidad
Masa del brazo	−72,94226	m/kg

En el caso de control, un grado adicional de carga modifica el alcance en aproximadamente 0,102 m según la linealización local. Un cambio de 0,01 N·m/rad en K equivale a unos 0,029 m. Una variación de 0,01 en eficiencia equivale a unos 0,041 m. Aumentar en 1 g la masa equivalente del brazo reduce el alcance en unos 0,073 m. Estas diferencias justifican pesar y calibrar antes de ajustar la graduación con décimas de grado.

4.5 Incertidumbre y repetibilidad

La ley de propagación por derivadas parciales aproxima cómo las incertidumbres de entrada se combinan en una salida calculada. NIST la describe mediante una expansión de Taylor de primer orden e incluye covarianzas cuando las entradas están relacionadas. El proyecto la aplica como esquema para planificar mediciones, sin asignar incertidumbres de instrumentos que aún no se han identificado (Taylor & Kuyatt, 1994).

Taylor y Kuyatt (1994) precisan que "the result is complete only when accompanied by a quantitative statement of its uncertainty" (sección 2.1). Esta cita breve, conservada en inglés, exige acompañar las futuras mediciones de una evaluación de incertidumbre. Por ahora, las cifras del programa describen un escenario calculado y no la precisión alcanzada por un equipo construido.

$$u^2(R) = \Sigma \left(\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial z_i}\right)^2 u^2(z_i) \quad (12)$$

La ecuación (12) corresponde a entradas independientes o de covarianza despreciable. Si la calibración produce parámetros correlacionados, deben añadirse los términos de covarianza descritos en la referencia de NIST antes de interpretar la incertidumbre del alcance (Taylor & Kuyatt, 1994).

Se proponen cinco lanzamientos por ajuste y se conservarán todos los alcances, incluidos los fallos. La media permitirá estimar el desplazamiento respecto al blanco y la desviación estándar describirá la dispersión observada. La caracterización de NIST distingue repetibilidad, estabilidad y calibración; por eso no basta con informar un solo acierto (Croarkin, 2003).

4.6 Viabilidad de la zona de concurso

Tabla 4

Ajustes calculados para la zona de concurso

Blanco	Salida	Carga	Velocidad
3 m	30°	58.48°	6.22 m/s
4 m	30°	68.21°	7.59 m/s
5 m	30°	78.13°	8.95 m/s
6 m	30°	88.42°	10.33 m/s

El caso K = 0,60 N·m/rad llega como máximo a unos 4,349 m a salida de 30° y carga de 90°. K = 0,90 alcanza aproximadamente 5,748 m. Con K = 1,00 se obtienen 6,150 m bajo el escenario nominal. El margen de 0,150 m sobre el blanco lejano es reducido. Una baja eficiencia o más masa puede eliminarlo. La selección de resorte se debe decidir con ensayo y margen dimensional, sin aumentar una carga real por encima de lo que autorice su especificación.

5 Dibujo Técnico

5.1 Referencias y organización de las láminas

El juego de doce láminas A3 comprende el conjunto, las vistas ortogonales y axonométrica, el despiece, los componentes y la envolvente de estudio. Se identifica como CP-01 a CP-12, revisión C. Las cotas se expresan en milímetros y cada hoja indica su escala.

ISO 128-2:2022 establece convenciones para líneas y referencias gráficas. ISO 129-1:2018 trata la presentación de dimensiones y tolerancias. Se consultaron las descripciones oficiales de alcance para orientar la organización, sin declarar una certificación de conformidad completa con normas cuyo texto íntegro no se ha utilizado (International Organization for Standardization, 2018; International Organization for Standardization, 2022).

5.2 Cotas funcionales

La altura del eje se mide desde el plano inferior de apoyo y no desde la cara superior del MDF. Con espesor de base de 22 mm, el centro del orificio queda a 98 mm sobre la cara superior. Esta relación se mantiene entre alzado y pieza aislada. El radio útil del brazo termina en el centro de la pelota, mientras que el largo físico propuesto de 200 mm incluye las zonas de fijación.

El espacio libre entre los soportes es 84 mm y su espesor propuesto es 12 mm por lado. El conjunto exterior ocupa 108 mm. El eje comercial se representa con 160 mm de longitud nominal. La selección de tuercas, separadores y superficies de giro puede modificar esta longitud. Se debe evitar que una zona roscada actúe como apoyo directo si genera juego y desgaste en el orificio.

5.3 Capas y edición del CAD

El DWG organiza las vistas en doce presentaciones A3. Separa contornos, ejes, referencias, cotas, textos, marco y cajetín en capas. La geometría de las vistas acotadas se edita en milímetros en el espacio modelo. El PDF independiente reúne las mismas doce hojas para impresión.

El DWG incluye 29 cotas lineales nativas y ventanas bloqueadas a las escalas indicadas. Las dimensiones son nominales del anteproyecto. La profundidad de la cazoleta, la unión al brazo y la referencia del eje requieren comprobación con las piezas reales.

5.4 Revisión geométrica

En la carga de 90°, el brazo útil queda horizontal hacia atrás. La cazoleta de 45 mm deja la reserva indicada de 17,5 mm dentro de la base. La posición vertical de referencia establece la máxima altura conservadora del extremo durante el recorrido previsto. La reserva hasta 500 mm supera 170 mm bajo las dimensiones nominales.

Esa revisión solo describe el recorrido estudiado. El tope debe impedir un giro posterior que invada zonas de apoyo o golpee la mesa. También debe revisarse el espacio lateral de la cazoleta frente a los soportes y la holgura del muelle cuando cambia su diámetro bajo carga. El material y la forma del tope se elegirán después de evaluar el movimiento real.

5.5 Lista de piezas y control del armado

La lista de componentes permite relacionar cada número de pieza con material, cantidad y medición requerida. Antes del armado se deben verificar perpendicularidad de soportes, alineación del eje, ausencia de rozamiento excesivo y fijación de la base. Una geometría correcta en CAD no determina el juego real de un tornillo comercial ni la calidad del tablero.

La prueba inicial se hace sin energía almacenada. Se recorre el arco a mano y se marcan posibles interferencias. Después se caracteriza el resorte por separado y se instala de acuerdo con su sentido de trabajo. La primera secuencia de ensayos debe verificar el desprendimiento y la repetibilidad antes de intentar el alcance lejano.

6 Fundamentos de Programación

6.1 Entradas y salidas

La calculadora pide distancia desde el eje, carga manual, salida, rigidez angular, eficiencia, radio útil, altura y masas. Todas las entradas muestran unidades. El usuario puede escribir punto o coma decimal en la ventana Python. El motor convierte milímetros a metros y gramos a kilogramos antes de calcular.

Las salidas principales son carga, velocidad, alcance y momento en el resorte. Los escenarios se clasifican como calculados o no alcanzables. El programa no llama tensión en newtons a un momento en N·m. Si se necesita fuerza de carga en una manija, debe dividirse el momento por el brazo de palanca perpendicular correspondiente.

6.2 Funciones y estructuras básicas

El archivo modelo_catapulta.py agrupa funciones de parámetros, validación, energía, trayectoria, cálculo directo, búsqueda de carga y comparación. La interfaz se encuentra en calculadora_catapulta.py. Esta separación permite ejecutar el modelo sin abrir la ventana y facilita contrastarlo con JavaScript.

Un diccionario guarda los parámetros por nombre. Las funciones reciben esos datos y devuelven los resultados de cada cálculo. El bucle for recorre las salidas disponibles y while hace avanzar el tiempo de vuelo. La secuencia if, elif y else clasifica el alcance respecto a la zona de 3 a 6 m. Se emplean las estructuras descritas en el tutorial oficial de Python (Python Software Foundation, s. f.-c).

La documentación de Python explica el manejo de excepciones. Aquí se utiliza try y except para transformar valores fuera de rango o datos no numéricos en mensajes comprensibles. La interfaz presenta el error sin modificar silenciosamente el valor introducido (Python Software Foundation, s. f.-b).

6.3 Búsqueda inversa

Para llegar a un blanco se calcula primero la velocidad necesaria. La trayectoria se evalúa con el valor medio de un intervalo de velocidades y se conserva el subintervalo que contiene la distancia objetivo. Después se busca la carga que entrega la energía cinética requerida. El recorrido de energía se revisa en pequeños incrementos para localizar el primer cruce antes de aplicar bisección.

La carga máxima es 90° dentro del estudio. Si la trayectoria calculada a ese límite queda corta, la función devuelve ausencia de solución para esa salida. Esa respuesta es tan importante como un número de carga. Permite decidir que debe revisarse el componente, la masa o la geometría antes de realizar otro intento.

6.4 Ventana y visualización

Tkinter proporciona los controles de ventana y ttk ofrece etiquetas, campos, botones y una tabla de resultados con apariencia integrada al sistema. La guía oficial distingue el comportamiento del control de su estilo. La implementación adopta una ventana sencilla con campos agrupados y un lienzo para la trayectoria (Python Software Foundation, s. f.-d).

El modo directo permite explorar qué sucede al cambiar carga y salida. El modo inverso compara las cinco salidas para la distancia introducida. El botón de exportación escribe CSV con la etiqueta calculado en cada fila. Se utiliza newline vacío al abrir el archivo y codificación UTF-8 con marca para facilitar su lectura en aplicaciones de hoja de cálculo (Python Software Foundation, s. f.-a).

El simulador web sincroniza la trayectoria con una gráfica de altura contra tiempo. El deslizador muestra el tiempo, la posición horizontal y la altura, y permite saltar a la salida, al punto más alto o al aterrizaje. La serie temporal se puede descargar en CSV como datos calculados.

6.5 Verificación del algoritmo

Se compara el vuelo sin aire contra la solución analítica de la ecuación vertical. Se reduce el paso temporal para comprobar convergencia. Se contrastan resultados de Python y JavaScript

en escenarios con diferentes K, eficiencias, masas y estados del aire. Se prueban entradas como texto, infinitos, una carga inferior a la salida y blancos fuera del intervalo admitido.

Hay dos comprobaciones pendientes de interpretar por separado. La comparación de programas revisa la implementación de las ecuaciones; los lanzamientos reales permitirán evaluar si esas ecuaciones describen el mecanismo. Que Python y JavaScript coincidan no confirma todavía la separación tangencial de la pelota.

6.6 Actividad de aprendizaje

Primero se ejecuta el caso de 4 m con los parámetros iniciales. Después se reduce K a 0,60 y se intenta alcanzar 6 m. El estudiante debe explicar por qué la función devuelve no alcanzable. Luego se restituye K, se aumenta la masa del brazo y se identifica qué parte del balance energético cambia.

Como extensión del ejercicio, el equipo puede añadir un registro de hora, identificación de pelota y número de ensayo al CSV. Estas columnas solo se llenarán durante las pruebas reales. El motor matemático debe conservar sus unidades SI aunque la interfaz permita otras unidades de presentación.

7 Química y selección de materiales

7.1 Función y estructura de los materiales

El resorte almacena energía; el brazo y la cazoleta deben mover la pelota sin añadir masa innecesaria. Los soportes mantienen la posición del eje y la base recibe las fijaciones. Se comparan los materiales según esas funciones. La distinción entre rigidez y límite elástico evita elegir un material solo porque resulte difícil deformarlo (Moebs et al., 2016).

En los metales, los electrones deslocalizados y la estructura cristalina permiten explicar conductividad y deformación. El comportamiento de un resorte depende además del procesamiento del alambre, la microestructura y los esfuerzos residuales. Una misma familia química puede ofrecer propiedades distintas después del trefilado o del tratamiento térmico. La geometría y el módulo elástico intervienen en la rigidez del muelle; los esfuerzos y el servicio esperado condicionan su selección (Moebs et al., 2016; Tokai Spring Industries, s. f.).

7.2 Acero propuesto para el elemento impulsor

La identificación química debe empezar por distinguir elemento, aleación y producto comercial. Fe es el símbolo del hierro; acero designa una aleación basada en hierro y carbono, con otros elementos según el grado. A228 identifica una especificación de alambre para resortes. Un acabado brillante, una capa de pintura o la palabra comercial cromado no demuestran que el núcleo sea acero inoxidable ni determinan su contenido de Cr. Para esta catapulta, el material del nuevo resorte se mantiene por identificar. La especificación A227 y la A228 no se consideran denominaciones intercambiables; debe identificarse el alambre del resorte adquirido (ASTM International, 2024).

ASTM A228/A228M describe alambre de calidad para resortes que pueden trabajar con esfuerzos altos o exigir propiedades de fatiga. La ficha pública de la norma indica el tipo de producto y la necesidad de cumplir requisitos químicos. La edición consultada es A228/A228M-18(2024)e1. Esta referencia orienta la identificación del proveedor y no certifica un muelle que todavía no se ha adquirido (ASTM International, 2024).

La ficha de Gibbs Interwire para music wire fosfatado presenta rangos de C, Mn y Si, límites máximos de P y S y Fe como resto. Su tabla de resistencia cambia con el diámetro del alambre. Por ello, asignar una sola resistencia a todo acero A228 ocultaría una variable del producto (Gibbs Interwire, s. f.).

Tabla 5

Porcentajes en masa de alambre A228 según ficha Gibbs

Elemento	**Símbolo**	**Rango o máximo**
Carbono	C	0,70–1,00 %
Manganeso	Mn	0,20–0,70 %
Silicio	Si	0,10–0,30 %
Fósforo	P	≤0,025 %
Azufre	S	≤0,030 %
Hierro	Fe	Resto

Nota. Rangos de especificación referenciales. La pieza real exige identificación del proveedor (Gibbs Interwire, s. f.).

El carbono interviene en la microestructura y en el equilibrio entre resistencia y ductilidad. Manganeso y silicio contribuyen al comportamiento del acero y a su procesamiento. Los contenidos de fósforo y azufre se limitan en el producto especificado. El hierro se expresa como resto porque los rangos de una especificación no describen una receta única que deba sumar exactamente 100 % con todos los máximos a la vez.

Como ejercicio de lectura de la tabla, una composición hipotética de C = 0,80 %, Mn = 0,45 %, Si = 0,20 %, P = 0,015 % y S = 0,020 % deja Fe = 98,515 % si se omiten otros constituyentes. Se obtiene restando 1,485 % a 100 %. Los valores elegidos están dentro de los intervalos de la ficha, pero la mezcla es un ejemplo aritmético del equipo: no es un análisis de laboratorio ni una formulación certificada del fabricante. Si existieran otros elementos, también tendrían que descontarse del resto.

7.3 Flexión del alambre y fatiga

El nombre torsional se refiere al momento que ejerce el muelle sobre el mecanismo. En un muelle helicoidal de torsión, la solicitación principal del alambre se estudia como flexión. Las patas del resorte también pueden deformarse. Para escogerlo se debe solicitar curva momento–ángulo, sentido de carga, ángulo máximo, diámetro interior bajo carga y especificación de vida o servicio (Tokai Spring Industries, s. f.).

La fatiga implica evolución del daño bajo ciclos, incluso si la pieza recupera aparentemente su forma en las primeras pruebas. La concentración de esfuerzos en un contacto, una marca superficial o una curva cerrada puede acelerar una falla. El plano mantiene el muelle como un componente por seleccionar y evita deducir su resistencia a partir del volumen reservado (Gibbs Interwire, s. f.).

7.4 Madera contrachapada y MDF

La madera reúne celulosa, hemicelulosas, lignina y otros constituyentes. Sus propiedades también dependen de cómo se organiza ese material. Stark y Cai distinguen tableros fabricados con chapas, partículas y fibras; esa diferencia permite entender por qué contrachapado y MDF no se intercambian en el diseño usando solo el mismo espesor (Stark & Cai, 2021).

El contrachapado alterna orientaciones de chapa y contiene adhesivo. Esa estructura permite distribuir direcciones resistentes, pero conserva anisotropía y dependencia de humedad. Wang et al. (2024) ensayaron distintas orientaciones y condiciones higrométricas en un producto identificado. En el proyecto se extrae la necesidad de controlar esas variables, sin adoptar una resistencia de abedul para un tablero desconocido.

El MDF se fabrica con fibras y un sistema aglutinante. Stark y Cai describen cómo la materia prima, la densidad y los adhesivos intervienen en los tableros compuestos. En la catapulta se reserva para la base de 22 mm; antes del armado se comprobarán el apoyo y la fijación de los tornillos. El trabajo de Charuk et al. sobre contrachapado se utiliza como antecedente de caracterización dinámica de un producto distinto, no como ensayo del MDF (Charuk et al., 2024; Stark & Cai, 2021).

Stark y Cai describen sistemas aglutinantes diferentes para los tableros, entre ellos resinas de urea-formaldehído, fenol-formaldehído, melamina-formaldehído e isocianatos. La clase de

adhesivo influye en la selección del producto. No se asignará uno de esos sistemas al MDF disponible sin una ficha que lo identifique (Stark & Cai, 2021).

7.5 Porcentajes elementales de polímeros

NIOSH identifica la fórmula de la unidad de celulosa como $C_6H_{10}O_5$. El cálculo estequiométrico se realiza con masas atómicas convencionales C = 12,011, H = 1,008 y O = 15,999. La masa de la unidad es 162,141 g/mol. Los porcentajes se obtienen dividiendo la masa de cada elemento por esa masa total (National Institute for Occupational Safety and Health, 2019).

$$w_C = \frac{6A_C}{6A_C+10A_H+5A_O} \times 100 \quad (13)$$

Tabla 6

Porcentajes elementales calculados en unidades repetitivas ideales

Unidad	**Elementos**	**Porcentaje en masa**
Celulosa $C_6H_{10}O_5$	C	44,45 %
Celulosa $C_6H_{10}O_5$	H	6,22 %
Celulosa $C_6H_{10}O_5$	O	49,34 %
PP C_3H_6	C	85,63 %
PP C_3H_6	H	14,37 %

Nota. Redondeo a dos decimales. Los porcentajes pertenecen a las unidades ideales y no incluyen aditivos, humedad ni adhesivos.

Los porcentajes calculados describen una unidad ideal de celulosa o de polipropileno. No representan la composición completa del MDF, del contrachapado ni de una pieza plástica con pigmento o carga mineral. La ficha de PubChem para polipropileno identifica su unidad repetitiva C_3H_6. Se propone estudiar PP para la cazoleta, pero la masa de 4 g sigue siendo una hipótesis de diseño (National Center for Biotechnology Information, s. f.).

7.6 Aluminio como alternativa para el brazo

El aluminio 6061 se compara como alternativa de brazo por su relación entre masa y rigidez, facilidad de obtener perfiles y resistencia a corrosión en aplicaciones comunes. La ficha de BlueScope proporciona rangos de composición y distingue estados térmicos del producto. El estado T6 y el estado T4 no deben tratarse como materiales con la misma resistencia aunque compartan la designación 6061 (BlueScope Distribution, s. f.).

Tabla 7

Composición referencial de aluminio 6061

Elemento	**Símbolo**	**% en masa**
Magnesio	Mg	0,8–1,2
Silicio	Si	0,4–0,8
Cobre	Cu	0,15–0,40
Cromo	Cr	0,04–0,35
Hierro	Fe	≤0,70
Manganeso	Mn	≤0,15
Zinc	Zn	≤0,25
Titanio	Ti	≤0,15
Aluminio	Al	Resto

Nota. Datos de catálogo de BlueScope Distribution (s. f.). Los máximos no se suman como composición de una única muestra.

La comparación debe hacerse entre piezas que satisfagan la misma función y no entre densidades aisladas. Un perfil de aluminio delgado puede reducir volumen frente a una pieza de madera, pero cambia el método de unión, la masa alrededor del eje y el costo. Para este avance se conserva el contrachapado por sencillez de montaje y se mantiene la alternativa como ejercicio de selección.

7.7 Corrosión y protección

AMPP describe la corrosión como un proceso de deterioro relacionado con la interacción del material y su entorno. En el acero expuesto, la humedad y el oxígeno permiten procesos electroquímicos. La inspección del alambre y del eje debe observar corrosión y daño superficial, especialmente en contactos donde puede desgastarse un recubrimiento (Association for Materials Protection and Performance, s. f.).

Cuando se combinan metales diferentes, la presencia de un electrolito puede favorecer corrosión galvánica. La elección de arandelas, separadores y protección requiere considerar el contacto entre materiales y las condiciones de almacenamiento. La propuesta prioriza guardar el dispositivo seco, limpiar residuos y evitar modificar el muelle comercial con calor o soldadura sin la especificación correspondiente.

7.8 Ficha comparativa del material impulsor

Tabla 8

Comparación funcional de elementos elásticos

Elemento	**Ventaja para el estudio**	**Variable por verificar**
Resorte angular de acero	Relación momento–ángulo y montaje junto al eje	K, referencia, giro admisible, fatiga
Liga o látex	Disponibilidad y montaje inicial sencillo	Histéresis, envejecimiento, fuerza y longitud
Lámina flexible	Menor número de uniones	Curvatura, rigidez y concentración de esfuerzos

Se mantiene como primera opción un resorte angular comercial porque puede caracterizarse mediante momento y ángulo. Tokai Spring proporciona relaciones para estudiar esa respuesta. La decisión exige después una referencia de compra y su giro admisible. La comparación con látex queda como alternativa de diseño, sin asignarle una curva elástica que no se ha medido (Tokai Spring Industries, s. f.).

7.9 Química de la corrosión del eje y del resorte

La corrosión del hierro puede interpretarse como un proceso de oxidación y reducción. Una zona pierde electrones mientras otra los consume. Flowers et al. (2019), en la sección 17.6, explican la participación del oxígeno y del agua y señalan que la herrumbre no forma una barrera protectora eficaz como algunas películas pasivas. Para relacionar ese fundamento con el dispositivo se presenta una representación simplificada en medio acuoso aproximadamente neutro:

Oxidación anódica: $Fe(s) \rightarrow Fe^{2+}(aq) + 2e^{-}$.

Reducción catódica: $O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}(aq)$.

Precipitación inicial idealizada: $Fe^{2+}(aq) + 2OH^{-}(aq) \rightarrow Fe(OH)_2(s)$.

Cada semirreacción conserva átomos y carga. Al multiplicar la oxidación por dos, los cuatro electrones producidos pueden compensar los consumidos en la reducción. Las transformaciones posteriores generan productos de corrosión cuya composición depende del ambiente. Por ello, el sólido real no se identifica como una sustancia pura mediante una fotografía. Estas ecuaciones explican un mecanismo químico; no predicen por sí solas la velocidad de corrosión del equipo (Flowers et al., 2019).

La aplicación al proyecto consiste en examinar el eje, los puntos de apoyo y las zonas de contacto del muelle. Una superficie húmeda o un recubrimiento dañado exige registrar la condición antes de comparar tiros. La pintura actúa como barrera mientras permanezca íntegra; el galvanizado utiliza zinc y puede aportar protección sacrificial. No se consideran tratamientos equivalentes ni se propone aplicar un proceso químico artesanal al resorte comprado (Flowers et al., 2019).

7.10 Diferenciar cambios químicos y daños mecánicos

Un alcance menor puede tener causas distintas. Si queda un cambio permanente de posición al descargar el brazo, se investigará deformación o asentamiento. Si aparecen grietas después de ciclos, se investigará fatiga. Si hay productos de oxidación, se investigará corrosión. Si el tablero aumenta de espesor después de exposición a humedad, se examinará su interacción

con agua y el estado de las uniones. Estas son hipótesis de diagnóstico para el proyecto; una observación aislada no permite demostrar la causa.

La relación entre las materias aparece al comparar la curva de carga con la de descarga. Una diferencia entre ambas puede representar energía disipada por fricción o por el comportamiento del conjunto. No demuestra por sí sola que exista una reacción química. De igual forma, recuperar la geometría durante algunos ciclos no prueba una vida útil indefinida. Tokai Spring aporta el modelo de cálculo del muelle; la validación del componente exige su especificación y mediciones de servicio (Moebs et al., 2016; Tokai Spring Industries, s. f.).

En la madera conviene distinguir la composición elemental de la arquitectura del tablero. Los porcentajes calculados para celulosa no indican cuánto adhesivo contiene el MDF, ni la especie o la orientación de las chapas. Wang et al. (2024) muestran experimentalmente la importancia de humedad y orientación en contrachapado identificado. Su estudio apoya controlar esas condiciones; sus resistencias no se asignan a un tablero local desconocido.

7.11 Protocolo de caracterización de los materiales

Se propone una ficha por componente con proveedor, referencia, material declarado, acabado, dimensiones, masa y evidencia disponible. La evidencia se clasificará como dato de fabricante, medición del equipo o supuesto. Para el resorte se pedirá la curva momento–ángulo y el giro autorizado. Para el tablero se registrarán tipo, espesor y orientación. Para la cazoleta se anotará la identificación del polímero cuando exista. Una marca de reciclaje orienta sobre la familia, pero no revela todos los aditivos.

La composición exacta de una pieza metálica requiere una técnica analítica adecuada. Si se accede a un laboratorio, la solicitud debe especificar los elementos de interés, especialmente carbono cuando se pretenda identificar un acero. El informe del laboratorio deberá indicar método y limitaciones. Una prueba con imán o una inspección visual no sustituye la determinación cuantitativa de los porcentajes. Mientras esa evidencia no exista, la tabla química conservará el carácter referencial.

La comparación de corrosión puede iniciarse con fotografías tomadas bajo iluminación semejante y con una escala, registrando lugar y tiempo de almacenamiento. Se anotarán manchas, desprendimiento del recubrimiento y cambios en las zonas de contacto. No se

provocará corrosión en el muelle de servicio para obtener una fotografía. Si se planifica un ensayo comparativo, se usarán probetas separadas e identificadas. La pérdida de masa solo se interpretará si existe un procedimiento de limpieza y pesaje controlado; el óxido adherido puede aumentar la masa antes de retirarlo (Association for Materials Protection and Performance, s. f.).

Para el tablero se medirán masa y espesor en puntos marcados antes de su uso y después del almacenamiento habitual. Esa comparación permite detectar cambios, pero no mide directamente contenido de humedad ni identifica la composición del adhesivo. Los resultados se registrarán junto con las condiciones observadas. Si se requiere humedad en base seca, se deberá aplicar un procedimiento gravimétrico apropiado al producto y a las instalaciones disponibles.

7.12 Conclusiones del análisis químico

La elección provisional combina un resorte comercial de acero identificado, contrachapado para el brazo y los soportes, MDF para la base y un polímero identificado para la cazoleta. La química contribuye al explicar composición, interacción con el ambiente y mecanismos de deterioro. La aceptación final también depende de masa, geometría, unión y comportamiento medido. Ningún porcentaje aislado demuestra que una pieza soporte el trabajo propuesto.

Las tablas de A228 y 6061 permiten comparar especificaciones; los porcentajes de celulosa y PP permiten practicar estequiometría. Son tipos de información diferentes. Se recomienda completar primero la trazabilidad del resorte y del tablero, registrar el acabado del eje y conservar el dispositivo seco. Después se contrastarán la curva elástica y la repetibilidad con los valores del programa. Esa secuencia permite revisar la selección sin presentar un material supuesto como si ya estuviera certificado.

8 Inglés 2

8.1 Propósito comunicativo

El componente de inglés permite explicar el mecanismo, distinguir unidades y seguir instrucciones breves. Se usa presente simple para describir el funcionamiento y forma imperativa para las acciones del operador. British Council presenta el presente simple para hechos y hábitos y explica que los imperativos usan la forma base del verbo. Los textos siguientes se redactaron específicamente para este diseño (British Council, s. f.-a; British Council, s. f.-b).

8.2 Project abstract

This project presents a small manual catapult for a table tennis ball. A short wooden arm rotates around a shaft. A spring stores angular energy and a light cup carries the ball. The model includes the moving parts, the rise of their centres of mass and air resistance during flight. A Python calculator receives the target distance and compares five launch angles. A web simulator shows the predicted path. The proposed arm radius is 180 millimetres and the shaft is 120 millimetres above the supporting plane. For a target at four metres, the reference calculation uses a launch angle of thirty degrees and a loading angle of about sixty-eight degrees. These are calculated settings. The team still needs to identify the spring, measure its rate and test the release mechanism. Real trials will be used to check accuracy and repeatability.

8.3 Parts and operation

The base supports the device. Two wooden plates hold the shaft. The arm turns around the shaft and moves the cup. The cup holds one table tennis ball. The spring applies a turning moment to the arm. A visible scale helps the operator read the loading angle. The target distance is measured from the point directly below the shaft.

The loading angle and the launch angle have different references. Measure the loading angle from the vertical. Measure the direction of the ball from the horizontal. In the current model, the ball leaves the cup in a tangent direction. The real release must be checked before the calculator is used for an official trial.

8.4 User guide for the prototype stage

Place the base on a stable surface. Check the shaft, the supports and the arm. Make sure that the spring is the specified component and that its allowed rotation is known. Check the visible scale and measure the target distance from the shaft reference. Enter the distance in the calculator. Read the proposed launch angle and loading angle.

Before a loaded test, move the arm slowly without stored energy. Check that the cup clears the supports. Check the stop and the release device. Keep the test area clear and point the mechanism towards the designated target. Use only the specified light ball. Keep your hands away from the moving arm and spring while releasing.

Record each trial. Write down the ball identification, the settings, the actual range and any unusual release. Do not erase a failed trial. If the cup holds the ball too long or the arm rubs against a support, stop and inspect the mechanism. Do not increase the load beyond the spring specification. After testing, remove the stored energy and store the device in a dry place.

8.5 Reading calculated results

The word calculated means that the value comes from the equations. The word measured means that the team obtained the value with an instrument or a trial. A predicted range of four metres does not prove that every ball will land at four metres. Changes in mass, spring rate, friction and air can change the result.

Compare the mean range with the target distance. Then look at the spread of the trials. A small spread means that the launches are similar. A consistent distance error may require a calibration change. An irregular spread may require a better release or a more stable support. Explain the observation before changing several settings at the same time.

8.6 Bilingual technical glossary

Tabla 9

Glosario mecánico aplicado a la catapulta

English	Español	Short definition
Arm	Brazo	The moving lever.
Shaft	Eje	The part that supports rotation.
Cup	Cazoleta	The part that holds the ball.
Base	Base	The support under the device.
Bearing surface	Superficie de apoyo	The contact that guides rotation.
Spring	Resorte	An elastic energy storage part.
Spring rate	Rigidez del resorte	Torque change per angular change.
Torque	Momento	A turning action about an axis.
Loading angle	Ángulo de carga	Arm angle before release.
Launch angle	Ángulo de salida	Direction of the initial velocity.
Release	Liberación	The start of free motion.
Range	Alcance	Horizontal distance to landing.
Target	Blanco	The intended landing area.
Trajectory	Trayectoria	The path of the ball.
Air drag	Resistencia del aire	An aerodynamic resisting force.
Gravity	Gravedad	The downward gravitational action.
Moment of inertia	Momento de inercia	Mass distribution about the axis.
Efficiency	Eficiencia	The retained energy fraction.
Calibration	Calibración	Comparison with measured references.
Repeatability	Repetibilidad	Similarity of repeated results.

English	Español	Short definition
Measured value	Dato medido	A value obtained from observation.
Calculated value	Dato calculado	A result from the model.
Clearance	Holgura	Free space between parts.
Stop	Tope	The part limiting travel.

8.7 Learning activities and answer key

Activity A. Translate into Spanish shaft, spring rate, loading angle, repeatability and air drag. Activity B. Complete the sentence with rotates, enter or record. The arm ___ around the shaft. ___ the target distance. ___ every trial. Activity C. Explain in one sentence the difference between a calculated value and a measured value. Activity D. Read the reference case and identify the launch angle and the loading angle.

Answer key. A. Eje, rigidez del resorte, ángulo de carga, repetibilidad y resistencia del aire. B. Rotates, enter, record. C. A calculated value comes from the model, and a measured value comes from an instrument or a trial. D. The launch angle is 30 degrees and the loading angle is about 68.21 degrees under the reference assumptions.

9 Plan de medición y calibración

9.1 Identificación del resorte

La primera medición caracteriza el momento angular. Se aplica una fuerza conocida a una distancia perpendicular conocida del eje y se obtiene $\tau = F\ r$. Se registran al menos cinco posiciones dentro del intervalo autorizado por el fabricante, tanto en carga como en descarga. No se utiliza el cálculo de alcance para decidir cuánto puede soportar el alambre (Tokai Spring Industries, s. f.).

Se ajusta una recta $\tau = \tau_0 + Kq$. La pendiente K se expresa por radián y la ordenada τ_0 permite identificar la referencia real de la pieza. Si la ordenada es apreciable, se actualizará la energía mediante la integral de esa recta. La calculadora inicial usa $\tau_0 = 0$ por elección de referencia. Una curva no lineal exige integrar los datos o emplear un modelo diferente.

9.2 Masas y geometría

Se pesa por separado el brazo, la cazoleta y los accesorios que giran. Se mide el radio hasta el centro de la pelota. La altura del eje se refiere al mismo plano que la distancia del blanco. Se registra el instrumento, su resolución y la repetición de la lectura. El equipo debe conservar la identificación de cada pelota para comprobar si una unidad introduce un comportamiento distinto.

9.3 Ensayos de vuelo

Se propone iniciar con una configuración corta y observar la liberación mediante video lateral con una escala en el plano de movimiento. La cámara debe situarse de forma que reduzca la perspectiva. Se marca la posición del eje y se registra la primera parte de la trayectoria para estimar la velocidad y el ángulo reales de salida.

La eficiencia puede estimarse al comparar la energía cinética identificada con la energía del resorte y la elevación. No conviene ajustar simultáneamente K, η y Cd con una sola distancia final, porque distintas combinaciones pueden producir el mismo alcance. Primero se mide K, luego se examina el giro y la liberación, y después se ajusta el vuelo con observaciones adicionales.

9.4 Cuadros de registro

Tabla 10

Datos de diseño y campos para medición

Nombre	Datos relativos	Datos reales
Radio útil	180 mm	
Altura del eje	120 mm	
Base	400 × 400 × 22 mm	
Masa del brazo	20 g equivalentes	
Masa de cazoleta	4 g	
Masa de pelota	2,7 g nominal	
Rigidez angular K	1 N·m/rad objetivo	
Eficiencia η	0,70 supuesta	
Ángulo real de salida	30° en control	
Giro admisible	Según proveedor	
Alcance del control	4 m calculados	

Las plantillas externas incluyen una tabla de momento–ángulo y otra de lanzamientos. En todas ellas los datos reales permanecen vacíos hasta la toma. Las cinco repeticiones de calibración por ajuste propuestas son independientes de los tres tiros oficiales previstos por la guía (Proyecto Concurso de Tiro Parabólico, s. f.).

9.5 Criterios para aceptar el avance y validar el prototipo

La memoria, el programa y los planos deben utilizar el mismo origen de distancias, las mismas unidades y los mismos parámetros. El caso de 4 m permite comprobar esa correspondencia: al cambiar una entrada, se actualizarán las salidas y quedará registrada la versión del cálculo. Una discrepancia entre archivos se resolverá antes de utilizar el ajuste durante un ensayo.

Tabla 11

Criterios de revisión del avance y del prototipo

Área	**Evidencia del avance**	**Comprobación siguiente**
Física	Balance de energía y caso de 4 m	Medir salida y alcance en video
Cálculo	Curvas de nivel y sensibilidad	Recalcular con parámetros medidos
Dibujo	Doce láminas A3 y DWG por capas	Cerrar retención, tope y uniones
Programación	Dos motores contrastados y ventana	Registrar resultados de ensayos reales
Química	Composición y mecanismos de deterioro	Identificar resorte, tablero y polímero
Inglés	Guía, resumen y glosario	Comprobar instrucciones con el equipo

La validación física se hará por etapas. Primero se verificará la geometría sin energía almacenada. Después se identificarán el resorte y las masas móviles. Se observará la separación de la pelota antes de comparar alcances. Con esos datos se repetirá la serie de calibración, conservando también los tiros fallidos. La media y la dispersión se informarán junto con las condiciones de prueba, siguiendo la distinción entre calibración y repetibilidad de Croarkin (2003). Un porcentaje de aciertos solo tendrá sentido acompañado del número de tiros y de las dimensiones del blanco.

El avance no define todavía una unión completa del resorte al eje, una retención fabricable ni el tope de giro. Estos detalles se cerrarán con las piezas comerciales disponibles. Tampoco se ha medido la estabilidad de la base bajo lanzamiento. El registro de pruebas incluirá cualquier deslizamiento o levantamiento del apoyo. La hoja de cálculo no sustituye esas comprobaciones del montaje.

10 Conclusiones y recomendaciones

La catapulta de brazo corto ofrece una alternativa con un solo giro principal y una geometría que cabe en la base y altura propuestas durante el recorrido estudiado. El modelo incluye la masa del mecanismo y la energía residual del resorte, por lo que el cálculo de carga está ligado a piezas concretas y a referencias de medición definidas.

El escenario nominal permite resolver blancos de 3 a 6 m con salida de 30° y cargas desde aproximadamente 58,48° hasta 88,42°. Para 4 m la carga calculada es 68,21° y la velocidad inicial 7,59 m/s. El extremo de 6 m tiene poco margen bajo los supuestos actuales y requiere especial atención a masa y eficiencia.

Las curvas de nivel y las derivadas parciales muestran que la masa del brazo y la calibración del momento tienen efectos relevantes sobre el alcance. El análisis justifica priorizar esas mediciones antes de presentar ajustes angulares finos. El mínimo entre cinco salidas no se confunde con un óptimo continuo.

La revisión de materiales distingue los rangos de composición de un metal y los porcentajes calculados para una unidad de polímero. Las fichas de Gibbs y BlueScope sustentan los primeros; Stark y Cai muestran por qué un tablero compuesto requiere además identificar fibras, chapas y aglutinante (BlueScope Distribution, s. f.; Gibbs Interwire, s. f.; Stark & Cai, 2021). En Inglés se prepararon instrucciones y vocabulario para explicar estas decisiones durante la defensa.

Para la siguiente etapa se recomienda identificar el resorte, completar la retención y la liberación, pesar el conjunto, revisar las holguras y realizar ensayos con registro completo. La comparación entre Python y JavaScript verifica la implementación matemática. La aceptación del diseño físico dependerá de las mediciones y del comportamiento del prototipo.

Referencias

Association for Materials Protection and Performance. (s. f.). *What is corrosion.* https://www.ampp.org/technical-research/what-is-corrosion

ASTM International. (2024). *Standard specification for steel wire music spring quality (ASTM A228/A228M-18(2024)e1) [Ficha pública].* https://store.astm.org/a0228_a0228m-18r24e01.html

BlueScope Distribution. (s. f.). *Aluminium 6061 data sheet.* https://www.bluescopedistribution.com.au/products/aluminium/aluminium-6061-data-sheet/

British Council. (s. f.-a). *Imperatives*. LearnEnglish Kids. https://learnenglishkids.britishcouncil.org/grammar-vocabulary/grammar-practice/imperatives

British Council. (s. f.-b). *Present simple*. LearnEnglish. https://learnenglish.britishcouncil.org/free-resources/grammar/english-grammar-reference/present-simple

Charuk, A., Gawdzińska, K., & Dunaj, P. (2024). Finite element modeling of the dynamic response of plywood. *Materials, 17*(17), 4358. https://doi.org/10.3390/ma17174358

Croarkin, C. M. (2003). *NIST/SEMATECH engineering statistics handbook, chapter 2: Measurement process characterization*. National Institute of Standards and Technology. https://www.nist.gov/publications/nistsematech-engineering-statistics-handbook-chapter-2-measurement-process

Dourmashkin, P. (2016). *Week 10 Rotational motion*. En 8.01SC Classical mechanics. MIT OpenCourseWare. https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/pages/week-10-rotational-motion/

Feldman, J., Rechnitzer, A., & Yeager, E. (s. f.). *CLP 3 Multivariable calculus*. University of British Columbia. https://personal.math.ubc.ca/~CLP/CLP3/

Flowers, P., Theopold, K., Langley, R., & Robinson, W. R. (2019). *Chemistry 2e*. OpenStax. Sección 17.6 Corrosion. https://openstax.org/books/chemistry-2e/pages/17-6-corrosion

Gibbs Interwire. (s. f.). *Phosphate coated music wire [Ficha técnica].* https://www.gibbswire.com/wp-content/uploads/2023/03/Gibbs-Datasheet-Wire-18-Phosphate-Coated-1.pdf

International Organization for Standardization. (2018). *Technical product documentation Presentation of dimensions and tolerances Part 1 General principles (ISO 129-1:2018) [Ficha pública].* https://www.iso.org/standard/64007.html

International Organization for Standardization. (2022). *Technical product documentation General principles of representation Part 2 Basic conventions for lines (ISO 128-2:2022) [Ficha pública].* https://www.iso.org/standard/83355.html

International Table Tennis Federation. (2026). *ITTF statutes 2026*. Sección 2.3 The ball. https://documents.ittf.sport/sites/default/files/public/2026-02/2026_Statutes_v1_consolidated_tc.pdf

Isomura, Y., Hayakawa, Y., Asai, T., & Ariizumi, R. (2016). Aerodynamic model of spinning table tennis ball. *Proceedings of the Japan Joint Automatic Control Conference, 59*, 621. https://doi.org/10.11511/jacc.59.0_621

Ito, K., & Kamijima, K. (2022). Three-dimensional flight trajectory simulation of a table tennis ball using the aerodynamic coefficient calculated by CFD analysis. *Transaction of the Japan Society for Simulation Technology, 14*(1), 36–42. https://doi.org/10.11308/tjsst.14.36

Mathematics LibreTexts. (s. f.). *Heun's method*. En Numerically solving ordinary differential equations (Brorson). https://math.libretexts.org/Bookshelves/Differential_Equations/Numerically_Solving_Ordinary_Differential_Equations_(Brorson)/04%3A_Predictor-corrector_methods_and_Runge-Kutta/4.01%3A_Heuns_method

Moebs, W., Ling, S. J., & Sanny, J. (2016). *University physics volume 1*. OpenStax. https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/1-introduction

National Aeronautics and Space Administration. (s. f.). *Drag equation*. Glenn Research Center. https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/

National Center for Biotechnology Information. (s. f.). *Polypropylene*. PubChem. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Polypropylene

National Institute for Occupational Safety and Health. (2019). *Cellulose*. NIOSH pocket guide to chemical hazards. Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0110.html

Proyecto Concurso de Tiro Parabólico en Mantenimiento Industrial PAO 2. (s. f.). [Guía del proyecto interdisciplinario proporcionada por el equipo].

Python Software Foundation. (s. f.-a). *csv CSV file reading and writing*. Python documentation. https://docs.python.org/3/library/csv.html

Python Software Foundation. (s. f.-b). *Errors and exceptions*. Python documentation. https://docs.python.org/3/tutorial/errors.html

Python Software Foundation. (s. f.-c). *More control flow tools*. Python documentation. https://docs.python.org/3/tutorial/controlflow.html

Python Software Foundation. (s. f.-d). tkinter.ttk Tk themed widgets. Python documentation. https://docs.python.org/3/library/tkinter.ttk.html

Stark, N. M., & Cai, Z. (2021). *Wood-based composite materials: Panel products, glued laminated timber, structural composite lumber, and wood–nonwood composites*. En Wood handbook—Wood as an engineering material (cap. 11, pp. 11-1–11-29, FPL-GTR-282). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. https://research.fs.usda.gov/treesearch/62258

Strang, G., & Herman, E. (2016). *Calculus volume 3*. OpenStax. https://openstax.org/books/calculus-volume-3/pages/4-1-functions-of-several-variables

Taylor, B. N., & Kuyatt, C. E. (1994). *Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results (NIST Technical Note 1297)*. National Institute of Standards and Technology. https://www.nist.gov/pml/nist-technical-note-1297/nist-tn-1297-appendix-law-propagation-uncertainty

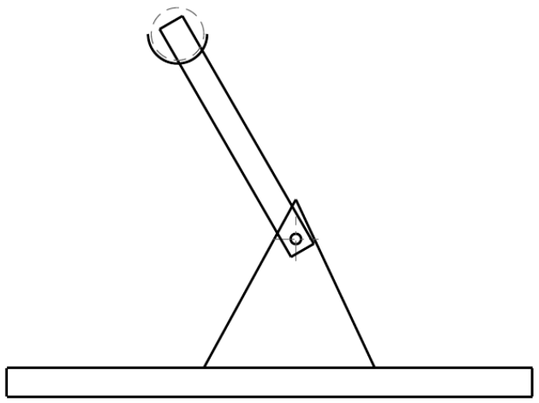
Tokai Spring Industries. (s. f.). *Torsion springs Calculation formulas.* https://www.tokaibane.com/en/spring-design/torsion-springs-formulas

Wang, Y., Wang, T., Crocetti, R., & Wålinder, M. (2024). Effect of moisture on the edgewise flexural properties of acetylated and unmodified birch plywood: a comparison of strength, stiffness and brittleness properties. *European Journal of Wood and Wood Products, 82*, 341–355. https://doi.org/10.1007/s00107-023-02014-6

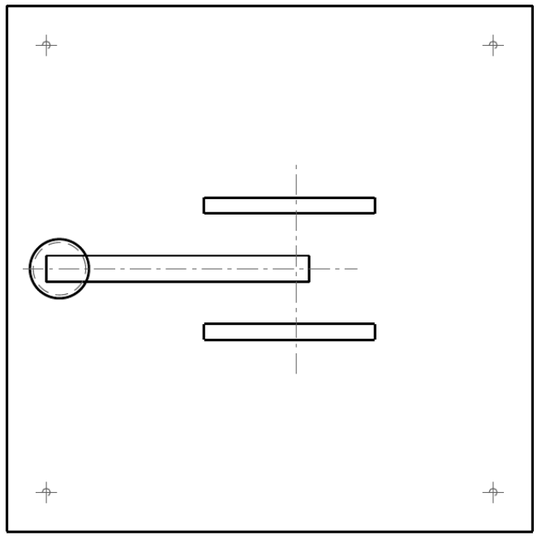
Anexo A Planos de la propuesta

El anexo reproduce las láminas CP-01, CP-06 y CP-12 del conjunto, el despiece y la envolvente. Para consultar e imprimir las doce hojas en A3 se incluye Planos_Catapulta.pdf. La carpeta AutoCAD contiene el DWG editable.

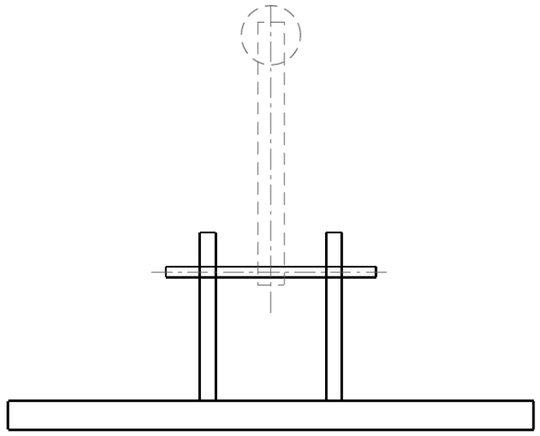
Conjunto general



Alzado lateral



Planta



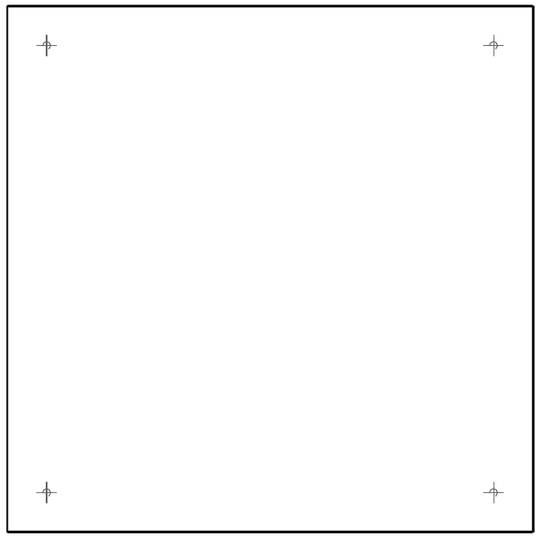
Alzado frontal

Base nominal	Altura eje	Radio útil del brazo	Pelota	Vistas	Piezas
400 × 400 × 22	120	180	Ø40 nominal	CP-02 a CP-05	CP-06 a CP-11

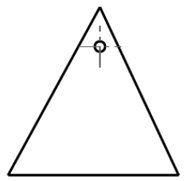
Vistas de estudio. Referencias de montaje según CP-02 a CP-06.

ESPOCH / INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL	TIPO Anteproyecto	ESCALA 1:4	FORMATO A3 horizontal	LÁMINA 01 de 12
Catapulta manual de brazo corto	Cotas en mm	Rev. C	11 nov 2026	**CP-01**

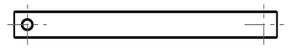
Despiece e identificación



P01 Base



P02 Soporte



P03 Brazo



P04 Cazoleta



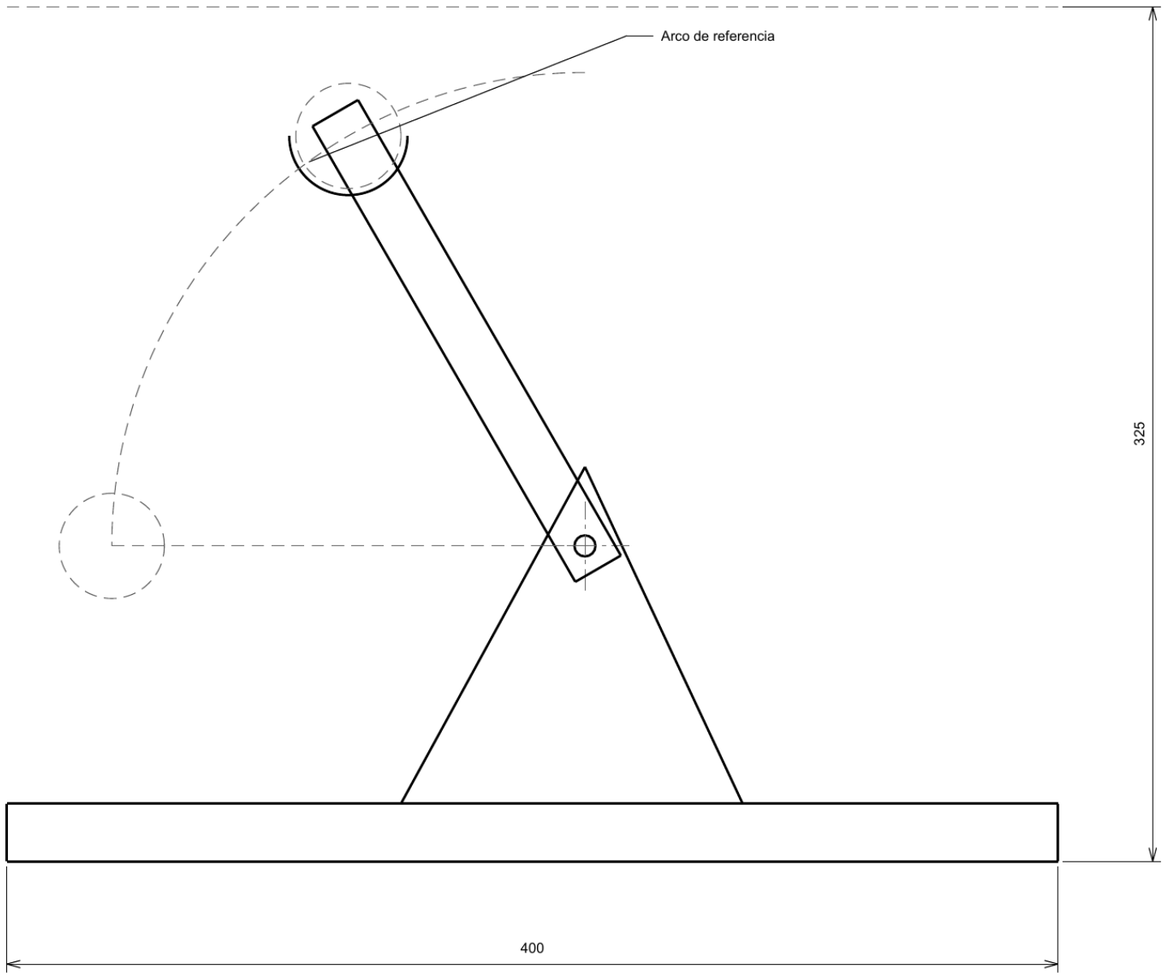
P05 Eje

Clave	Componente	Material propuesto	Cota principal	Cantidad	Detalle
P01	Base	MDF	400 × 400 × 22	1	CP-07
P02	Soporte	Contrachapado	Espesor 12	2	CP-08
P03	Brazo	Contrachapado	200 × 20 × 8	1	CP-09
P04	Cazoleta	Polímero	Ø45 exterior	1	CP-10
P05	Eje	Comercial	Ø8 × 160	1	CP-11

Contornos nominales. El resorte comercial queda pendiente de selección.

ESPOCH / INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL	TIPO	ESCALA	FORMATO	LÁMINA
	Anteproyecto	1:4	A3 horizontal	06 de 12
Catapulta manual de brazo corto	Cotas en mm	Rev. C	11 nov 2026	**CP-06**

Envolvente geométrica de estudio



El arco y los perfiles discontinuos representan posiciones de referencia.

Referencias geométricas

Altura de estudio: 325.

Radio del centro de pelota: 180.

Centro de giro a 120 sobre el origen.

Pelota representada: Ø40 nominal.

Verificación pendiente

Comprobar la envolvente en el montaje.

Contrastar cotas con piezas reales.

ESPOCH / INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL	**TIPO** Anteproyecto	**ESCALA** 1:2	**FORMATO** A3 horizontal	**LÁMINA** 12 de 12
Catapulta manual de brazo corto	Cotas en mm	Rev. C	11 nov 2026	**CP-12**