

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR, PREVIO A LA OBTENCIÓN**

**DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**VALIDACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE MECANISMOS  
FLEXIBLES (COMPLIANT MECHANISM) USANDO LA SÍNTESIS DE  
REEMPLAZO DEL MODELO PSEUDORÍGIDO**

**AUTOR: BRITO LARA, CRISTIAN RAFAEL**

**DIRECTOR: MSc. OLMEDO SALAZAR, JOSÉ FERNANDO**





# CONTENIDO

- Generalidades
- Fundamentación teórica
- Diseño experimental
- Construcción del dispositivo
- Pruebas
- Validación de resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones





Generalidades

# Introducción

Los mecanismos flexibles (MFs) se han desarrollado en los últimos años como una alternativa para reemplazar a los mecanismos de cuerpo rígido ya que éstos presentan muchas limitaciones principalmente porque en su gran mayoría presentan juntas móviles que requieren de ensamble y lubricación para poder funcionar correctamente, por el contrario, los MFs pueden ser construidos en una sola pieza que puede tener una o varias juntas flexibles.



Figura 1  
Mecanismo flexible de una tijera

# Definición del problema

## Mecanismo de Hoeken

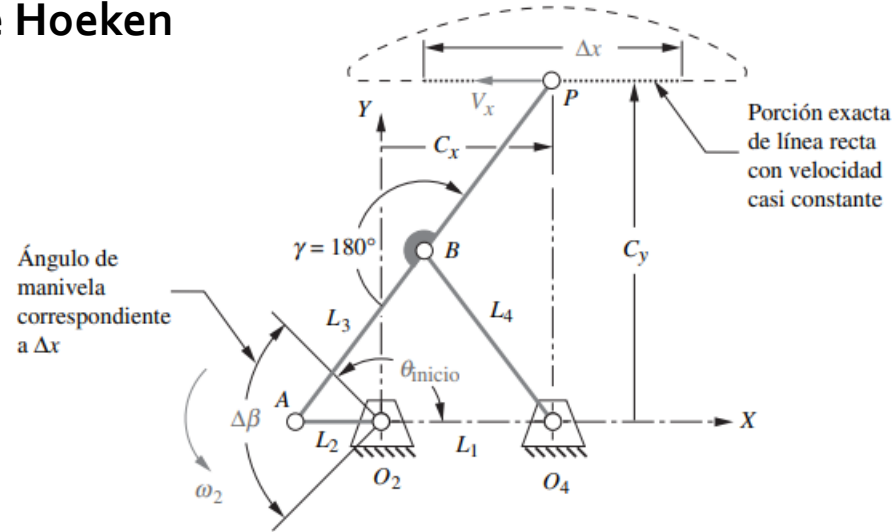


Figura 2  
Mecanismo de Hoeken tradicional

Juntas móviles

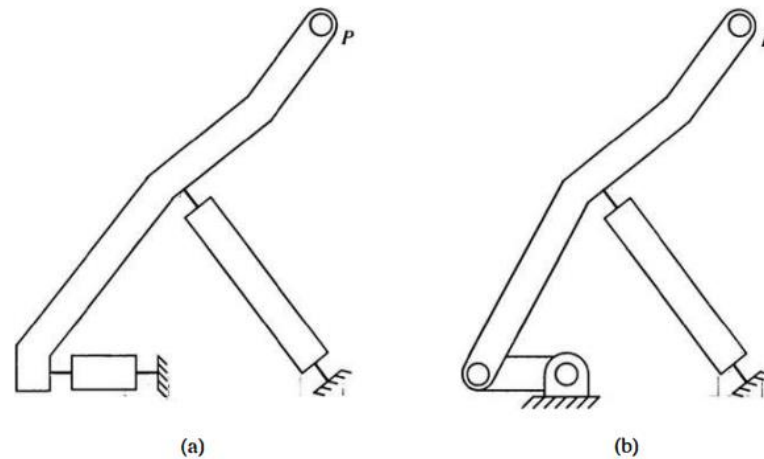


Figura 3  
Mecanismo flexible de Hoeken con cuatro y dos juntas flexibles

Juntas flexibles



Generalidades

# Objetivos

## *Objetivo general*

- Validar numérica y experimentalmente la precisión de la síntesis de un mecanismo flexible frente a un mecanismo convencional.





Generalidades

# Objetivos

## *Objetivos específicos*

- Obtener los mecanismos parcialmente flexibles equivalentes de los mecanismos convencionales para generación de función, movimiento y trayectoria por medio del desarrollo de las ecuaciones de síntesis de reemplazo y la respectiva validación numérica con software comercial finalmente se deberá construir el modelo experimental para efectuar las respectivas comparativas.
- Diseñar e imprimir prototipos del mecanismo flexible de Hoeken orientado a la síntesis del modelo pseudorígido.
- Construir un dispositivo que nos permita la validación experimental de un mecanismo flexible para efectuar las respectivas comparativas.





# Deflexión y flexibilidad

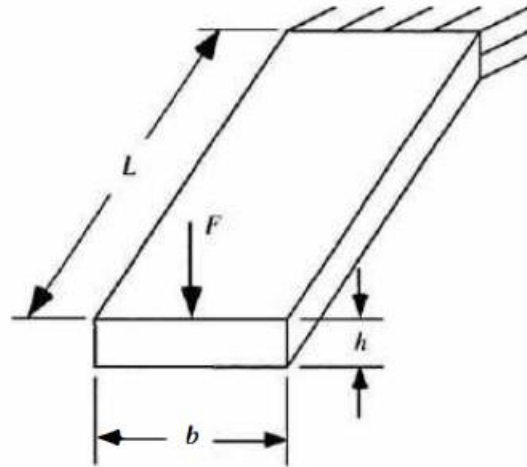


Figura 4  
Viga flexible en voladizo

$$F = \frac{S_y b h^2}{6L} \quad \delta_{max} = \frac{2 S_y L^2}{3 E h}$$

La relación  $S_y/E$  mientras mas grande permite que el elemento tenga una mayor deflexión antes de fallar, siendo estas las propiedades mecánicas a destacar en la selección del material. Además, la deflexión depende también de la geometría tal como muestra la ecuación.

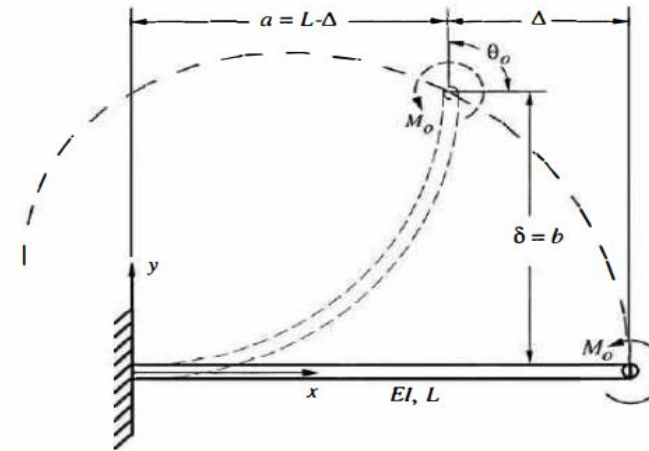


Figura 5  
Viga con momento en su extremo libre para análisis de grandes deflexiones

Considerando la ecuación de Euler – Bernoulli

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M_o}{EI}$$

$$\int_0^{\theta_o} d\theta = \int_0^L \frac{M_o}{EI} ds$$

$$\theta_o = \frac{M_o L}{EI}$$

$$\frac{M_o}{EI} = \frac{d\theta}{dy} \frac{dy}{ds} = \frac{d\theta}{dy} \sin(\theta)$$

$$\frac{M_o}{EI} = \frac{d\theta}{dx} \frac{dx}{ds} = \frac{d\theta}{dx} \cos(\theta)$$

$$\frac{b}{L} = \frac{1 - \cos(\theta_o)}{\theta_o}$$

$$\frac{a}{L} = \frac{\sin(\theta_o)}{\theta_o}$$

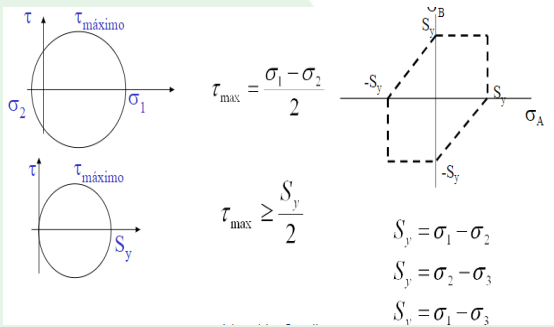
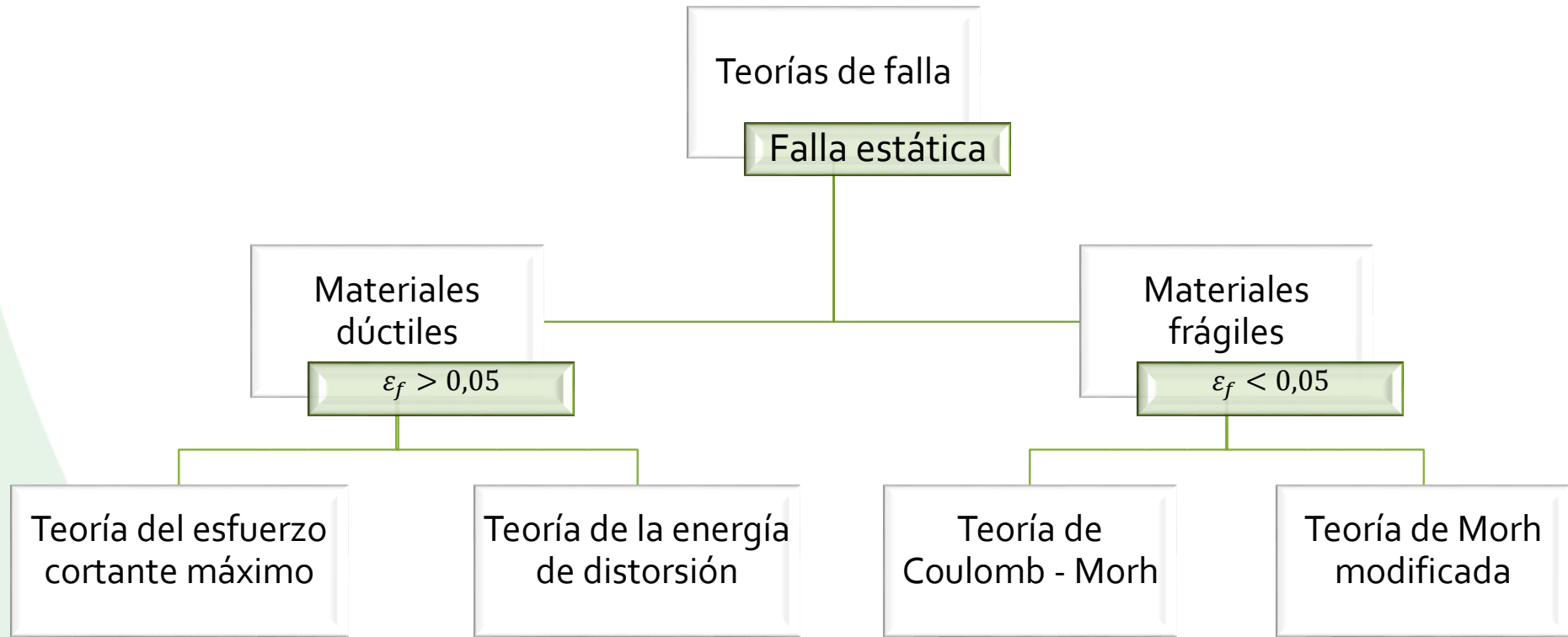


Figura 6  
Esfuerzo cortante máximo

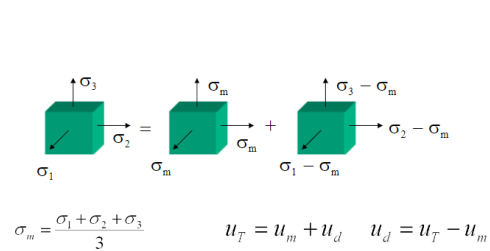


Figura 7  
Esfuerzo de energía de distorsión

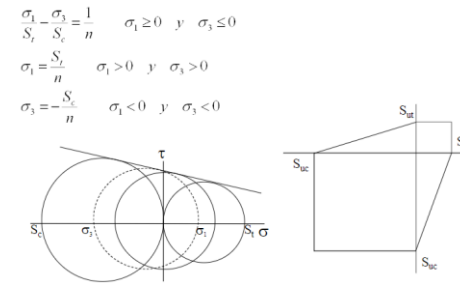


Figura 8  
Esfuerzo de Coulomb - Morh

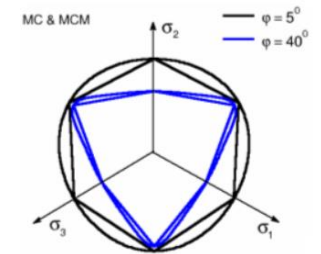


Figura 9  
Esfuerzo de Morh modificado



# Modelos Pseudorígidos

## Pivote de flexión de corta longitud

El pivote de flexión de corta longitud es un mecanismo diseñado para proporcionar una mayor flexibilidad en la dirección de rotación de un objeto. Según (Howell, 2001), este mecanismo se compone de dos piezas articuladas y una barra flexible, la cual actúa como un resorte y permite el movimiento en ambas direcciones de rotación. El valor del torque para mover el eslabón pseudorígido:

$$T = K\Theta$$

Para este caso  $\Theta = \theta_o$ .

$$\theta_o = \frac{M_o l}{(EI)_l}$$

$$M_o = \frac{(EI)_l}{l} \theta_o$$

$$M = T, \theta_o = \Theta$$

$$K = \frac{(EI)_l}{l}$$

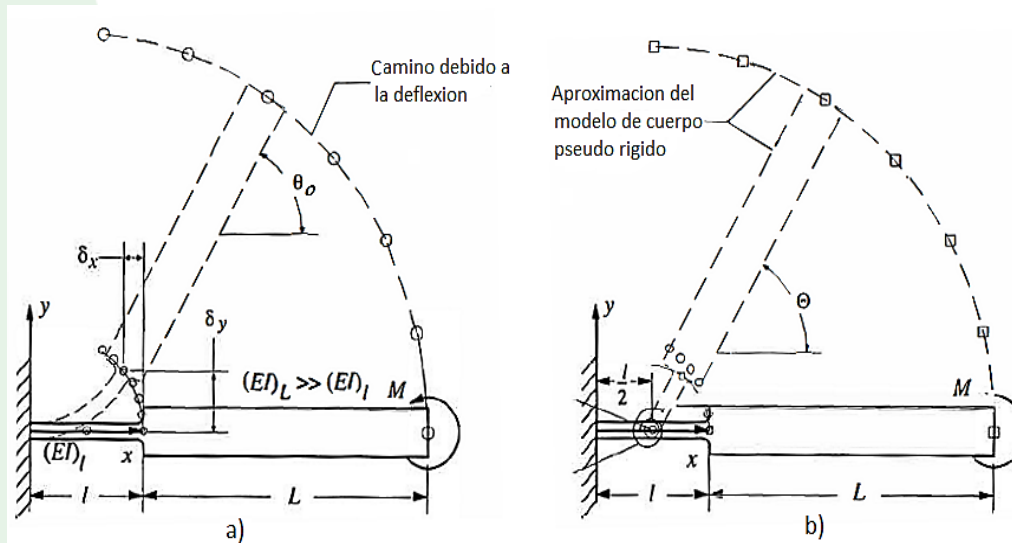


Figura 10  
a) Pivote de flexión de corta longitud. b) Su modelo de cuerpo pseudo rígido.  
Tomado de *Compliant Mechanism*, por Larry Howell, 2001.



# Modelos Pseudorígidos

## Viga en voladizo con una fuerza en el extremo libre

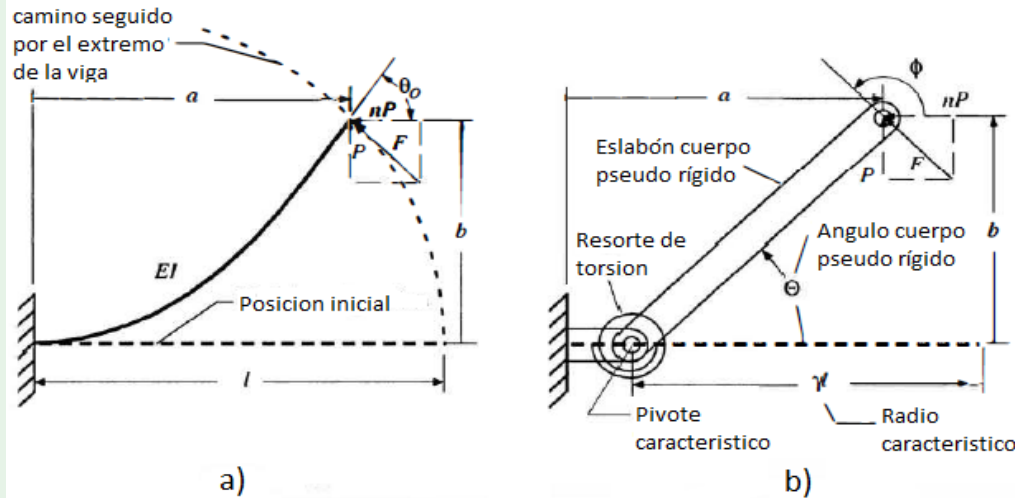


Figura 11  
 a) Viga flexible con fuerza en su extremo. b) Su modelo de cuerpo pseudo rígido.  
 Modificado de *Compliant Mechanism*, por Larry Howell, 2001.

$$F = P\sqrt{n^2 + 1} \quad \phi = \text{atan} \frac{1}{-n}$$

Se puede calcular el pivote característico, que es la distancia desde el soporte fijo hasta la línea de acción de la fuerza en el extremo libre, el pivote característico es determinado desde el extremo de la viga como una fracción de su longitud ( $\gamma l$ ), donde  $\gamma$  es el *factor del radio característico*.

$$\frac{a}{l} = 1 - \gamma(1 - \cos\theta) \quad \frac{b}{l} = \gamma \sin\theta$$

El factor de radio característico ( $\gamma$ ) se puede calcular mediante:

$$\gamma = \begin{cases} 0.841655 - 0.0067807n + 0.000438n^2 & (0.5 < n < 10) \\ 0.852144 - 0.0182867n & (-1.8316 < n < 0.5) \\ 0.912364 + 0.0145928n & (-5 < n < -1.8316) \end{cases}$$

Para determinar el valor de K se utilizan las siguiente ecuaciones

$$\begin{aligned} T &= K\Theta \\ T &= F_t \gamma l \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \frac{F_t l^2}{EI} = K_\Theta \Theta$$

Para este caso  $\theta_0 = c_\theta \Theta$

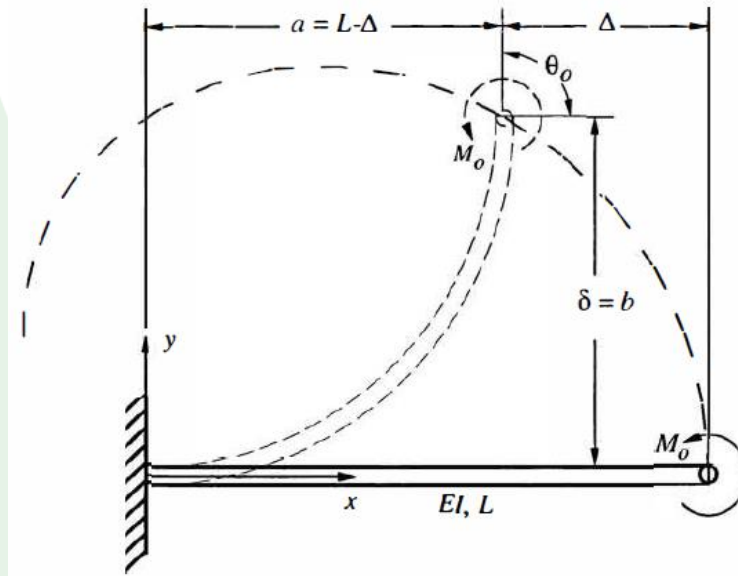
$$K = \gamma K_\Theta \frac{EI}{l}$$

$K_\Theta$  se calcula con la expresión:

$$\begin{aligned} K_\Theta &= 3.024112 + 0.121290n + 0.03169n^2 & (-5 < n \leq -2.5) \\ K_\Theta &= 1.967647 - 2.616021n - 3.738166n^2 - 2.649437n^3 & (-2.5 < n \leq -1) \\ &\quad - 0.891906n^4 - 0.113063n^5 \\ K_\Theta &= 2.654855 - 0.509896 \times 10^{-1}n + 0.126749 \times 10^{-1}n^2 & (-1 < n \leq 10) \\ &\quad - 0.142039 \times 10^{-2}n^3 + 0.584525 \times 10^{-4}n^4 \end{aligned}$$

# Modelos Pseudorígidos

## Segmento cargado con momento en su extremo



(Howell, 2001), afirma que se puede encontrar el modelo del cuerpo pseudorígido considerando la figura 12 de una viga en voladizo cargada con una fuerza en su extremo libre, para lo cual se utiliza un método similar que permite evaluar el segmento cargado con momento en su extremo y se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\gamma = 0.7346$$

$$\theta_{o \max} = 124.4^\circ$$

$$c_\theta = 1.5164$$

$$K_\theta = 2.0643$$

$$K = \gamma K_\theta \frac{EI}{l}$$

Figura 12  
a) Viga flexible con fuerza en su extremo. b) Su modelo de cuerpo pseudo rígido.  
Modificado de *Compliant Mechanism*, por Larry Howell, 2001.



# Error de rectitud del mecanismo de Hoeken

Un estudio reveló los errores de rectitud fracciones de  $\Delta\beta$  del ciclo de la manivela como función de las relaciones de los eslabones. Según (Norton, 2013), el error estructural de posición (de rectitud),  $\varepsilon_S$ , se define como:

$$\varepsilon_S = \frac{MAX \sum_{i=1}^n (C_{y_i}) - MIN \sum_{i=1}^n (C_{y_i})}{\Delta x}$$

(Norton, 2013), afirma que para un estudio más preciso se calcularon los errores de posición (rectitud) por separado para cada uno de los rangos de ángulo de la manivela  $\Delta\beta$  de 20° a 180°.

Fundamentación teórica

Rango de movimiento			Optimizado para rectitud					
$\Delta\beta$	$\theta_{inicio}$	% de ciclo	% de $\Delta C_y$		Relaciones de eslabones			
			máximo	$\Delta V\%$	$Vx$	$L_1/L_2$	$L_3/L_2$	$\Delta x/L_2$
20	170	5.6%	0.00001%	0.38%	1.725	2.975	3.963	0.601
40	160	11.1%	0.00004%	1.53%	1.717	2.950	3.925	1.193
60	150	16.7%	0.00027%	3.48%	1.702	2.900	3.850	1.763
80	140	22.2%	0.001%	6.27%	1.679	2.825	3.738	2.299
100	130	27.8%	0.004%	9.90%	1.646	2.725	3.588	2.790
120	120	33.3%	0.010%	14.68%	1.611	2.625	3.438	3.238
140	110	38.9%	0.023%	20.48%	1.565	2.500	3.250	3.623
160	100	44.4%	0.047%	27.15%	1.504	2.350	3.025	3.933
180	90	50%	0.096%	35.31%	1.436	2.200	2.800	4.181



# Diseño mecanismo flexible de Hoeken

## Dimensionamiento mecanismo

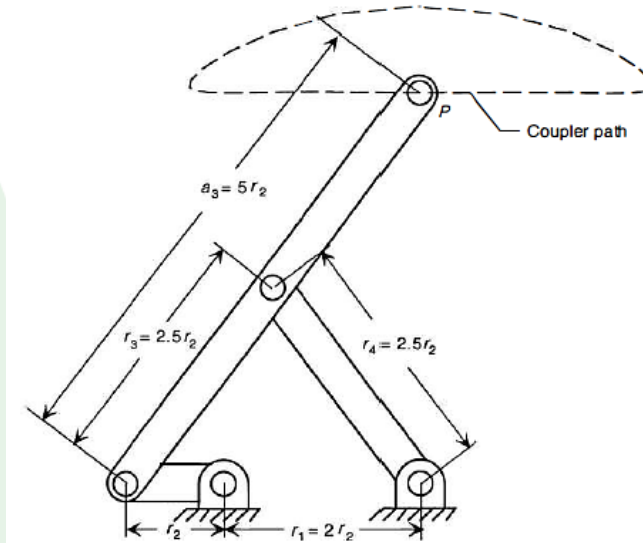


Figura 13  
Mecanismo de Hoeken con sus dimensiones en función de la manivela  $r_2$ .

$$r_2 = 30 \text{ mm}$$

$$r_1 = 60 \text{ mm}$$

$$r_3 = 75 \text{ mm}$$

$$r_4 = 75 \text{ mm}$$

$$a_3 = 150 \text{ mm}$$

## Consideraciones generales

Material a utilizarse para construcción de mecanismo flexible

- PLA (ácido poliláctico)

Características de impresora ENDER 5 (Proceso de manufactura aditiva FDM)



Figura 14  
Impresora ENDER 5 (FDM).

### Especificaciones ENDER 5

Temperatura máxima Hot-end	260°C
Temperatura máxima cama	110°C
Velocidad máxima de impresión	180 mm/s
Velocidad recomendada	80 mm/s
Precisión máxima eje Z	0,1 mm
Volumen de precisión	220x220x300mm
Materiales	PLA, PET-G, ABS, exóticos, madera



# Diseño mecanismo flexible de Hoeken

## Caracterización del material

Ensayo de flexión de 3 puntos norma ASTM D790

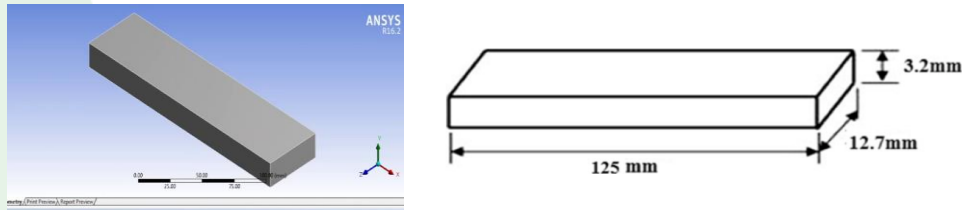


Figura 15  
a) Prototipo de PLA diseñado en SOLIDWORKS b) Prototipo de dimensiones según norma ASTM D790

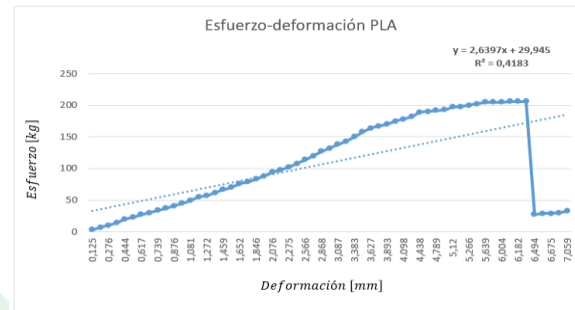


Figura 16  
a) Máquina de ensayo de flexión laboratorio de mecánica de materiales ESPE  
b) Curva esfuerzo – deformación de probeta de PLA

Propiedades mecánicas del material PLA (ácido poliláctico)

PLA	
Módulo de elasticidad (E)	636,15 MPa
Esfuerzo de fluencia ( $S_y$ )	56,48 MPa
Esfuerzo último a la tracción (Sut)	60,51 MPa

## Pre dimensionamiento de las juntas flexibles

Para las juntas flexibles fabricadas mediante los procesos FDM y SLA es recomendable usar espesores en el rango 0.4 y 0.8 mm, y longitudes de hasta 15 mm para garantizar su buen comportamiento (Flores, 2022). Bajo esta premisa que ya ha sido estudiada previamente se ha decidido establecer un espesor de 0.8 mm y una longitud de 8mm y 15 mm.

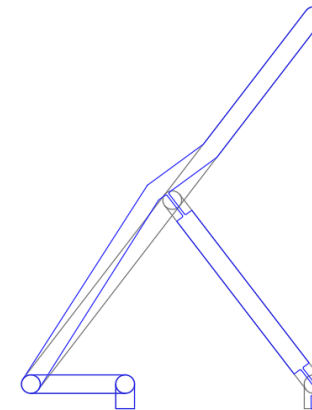


Figura 17  
En color gris se muestra el mecanismo de Hoeken tradicional con juntas móviles, como guía para ubicar los puntos de pivote y construir el mecanismo flexible. En color azul se muestra el mecanismo de Hoeken con sus miembros flexibles.

Diseño experimental







# Diseño mecanismo flexible de Hoeken

Factor de seguridad manual

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M_o}{EI}$$

$$\int_0^{\theta_o} d\theta = \int_0^L \frac{M_o}{EI} ds$$

$$\theta_o = \frac{M_o L}{EI}$$

$$\sigma = \frac{M_{max} C}{I}$$

$$\sigma = \frac{\theta_o EC}{L} = 15.1 \text{ Mpa}$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma}$$

$$S = \frac{56.48 \text{ Mpa}}{15.1 \text{ Mpa}} = 3.74$$

Diseño  
experimental



# Diseño mecanismo flexible de Hoeken

## Esfuerzos en la juntas flexibles y factor de seguridad (Software ANSYS)

El análisis se hace para la entrada de movimiento en el eslabón 2 (manivela) para una vuelta completa. El análisis se hace en la opción *static structural* del *workbench* de ANSYS, se introduce las propiedades mecánicas del PLA estudiado y se establece las condiciones de análisis.

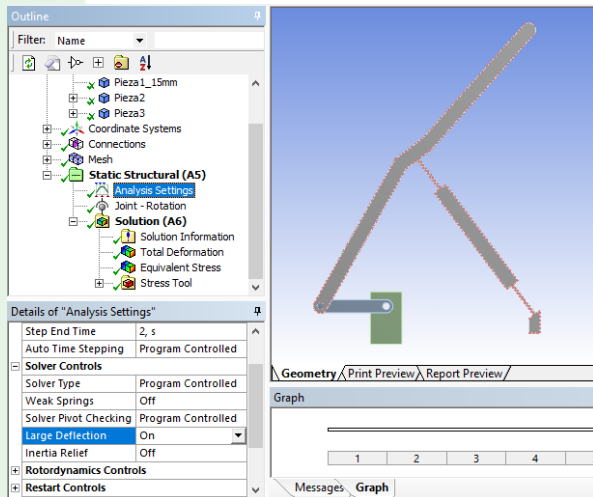


Figura 18  
Mecanismo flexible de Hoeken simulado en software ANSYS

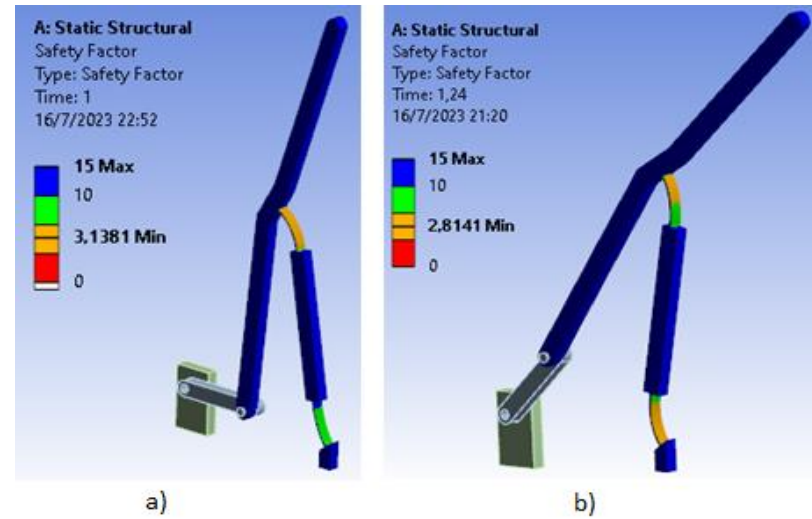


Figura 19  
Se muestra en color naranja la superficie externa de las juntas, que es donde el factor de seguridad es menor, en a) se muestra con la manivela a 0° y en b) con la manivela a aproximadamente 45°.

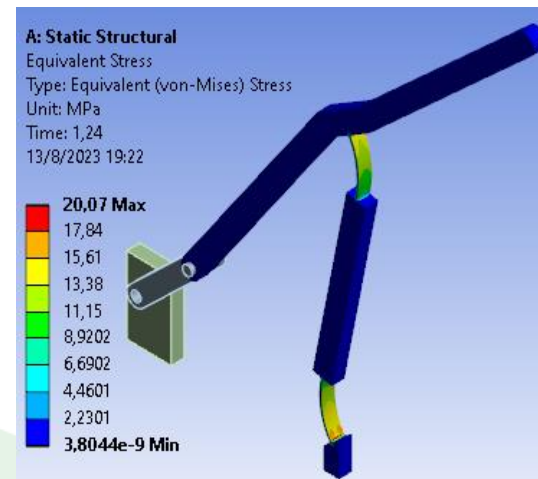


Figura 20  
Se muestra en color verde – amarillo las juntas flexibles sometidas a los esfuerzos a los que esta sometidos las mismas. (Esfuerzo de Von-Mises)

Diseño experimental





# Análisis cinemático

## Análisis de posición

Para el análisis de posición se tiene que resolver el sistema para  $\theta_3$  y  $\theta_4$ , se tiene

$$\theta_3 = 2 \arctan \left( \frac{K_2 + \sqrt{K_1^2 + K_2^2 - K_3^2}}{K_1 + K_3} \right)$$

$$\theta_4 = 2 \arctan \left( \frac{K_2 + \sqrt{K_1^2 + K_2^2 - K_{3-}^2}}{K_1 + K_{3-}} \right)$$

$$K_1 = r_1 \cos(\theta_1) - r_2 \cos(\theta_2) \quad K_2 = r_1 \sin(\theta_1) - r_2 \sin(\theta_2)$$

$$K_3 = \frac{r_3^2 - r_4^2 + K_1^2 + K_2^2}{2r_2} \quad K_{3-} = \frac{r_3^2 - r_4^2 - K_1^2 - K_2^2}{2r_4}$$

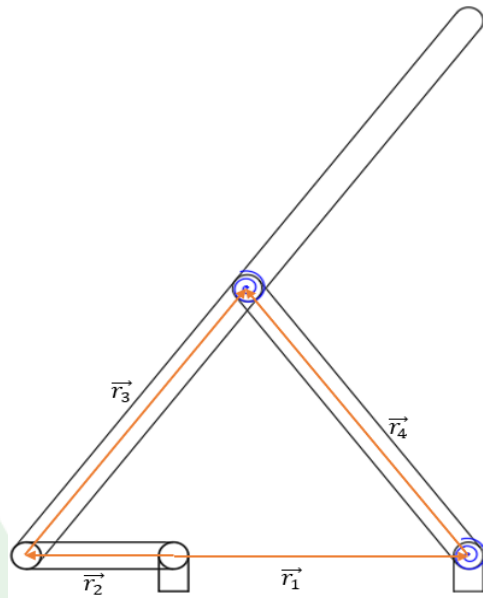


Figura 21  
Modelo de cuerpo pseudorígido del mecanismo Hoeken flexible

$$r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3} - r_1 e^{i\theta_1} - r_4 e^{i\theta_4} = 0 + i0$$

Aplicando la equivalencia de Euler  $e^{i\theta} = \cos(\theta) + i * \sin(\theta)$ , separando en la parte real y la compleja se genera el siguiente sistema de ecuaciones:

$$r_3 \cos(\theta_3) - r_4 \cos(\theta_4) = r_1 \cos(\theta_1) - r_2 \cos(\theta_2)$$

$$r_3 \sin(\theta_3) - r_4 \sin(\theta_4) = r_1 \sin(\theta_1) - r_2 \sin(\theta_2)$$

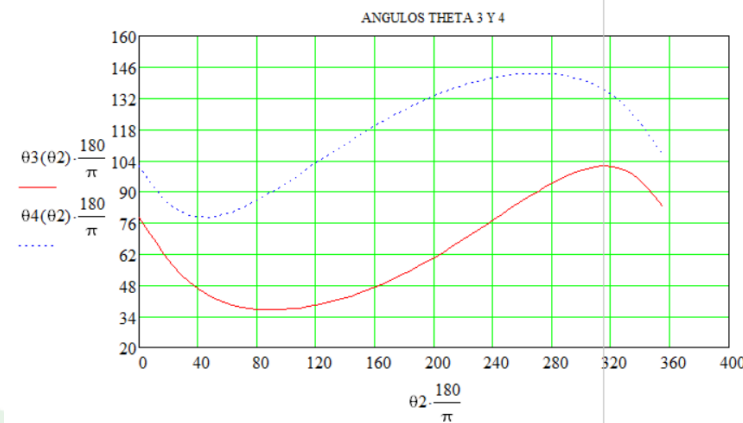


Figura 22  
Gráficas de los ángulos  $\theta_3$  y  $\theta_4$  durante el movimiento de la manivela



# Análisis cinemático

## Análisis de velocidad

Se derivan las ecuaciones del lazo vectorial respecto del tiempo, dando lugar a las siguientes ecuaciones:

$$-r_3 w_3 \sin(\theta_3) + r_4 w_4 \sin(\theta_4) = r_2 w_2 \sin(\theta_2) \qquad r_3 w_3 \cos(\theta_3) - r_4 w_4 \cos(\theta_4) = -r_2 w_2 \cos(\theta_2)$$

$$w_3 = -\frac{r_2 w_2 \sin(\theta_2 - \theta_4)}{r_3 \sin(\theta_3 - \theta_4)}$$

$$w_4 = -\frac{r_2 w_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)}$$

Diseño experimental

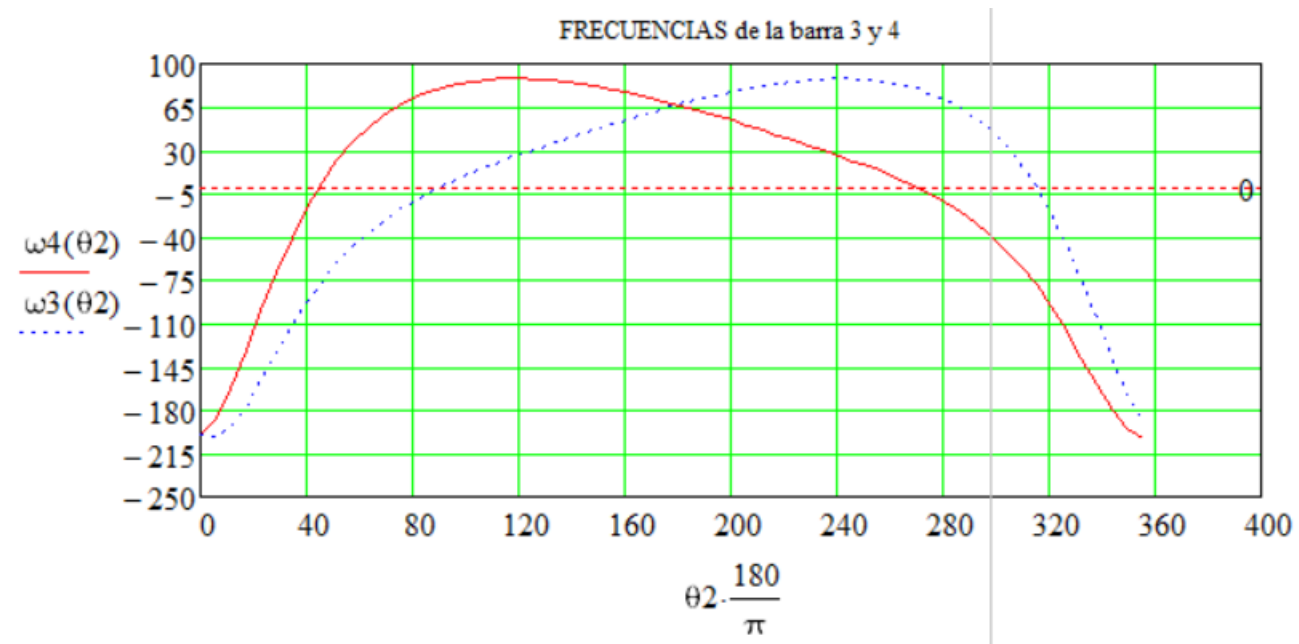


Figura 23  
Gráficas de las velocidades angulares  $\omega_3$  y  $\omega_4$  durante el movimiento de la manivela



# Análisis dinámico (Relación fuerza - deflexión)

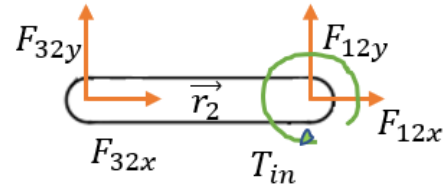


Figura 24  
Diagrama de cuerpo libre de eslabón 2

$$F_{32y} + F_{12y} = 0$$

$$F_{32x} + F_{12x} = 0$$

$$T_{in} + F_{32y}r_2 \cos(\theta_2) + F_{32x}r_2 \sin(\theta_2) = 0$$

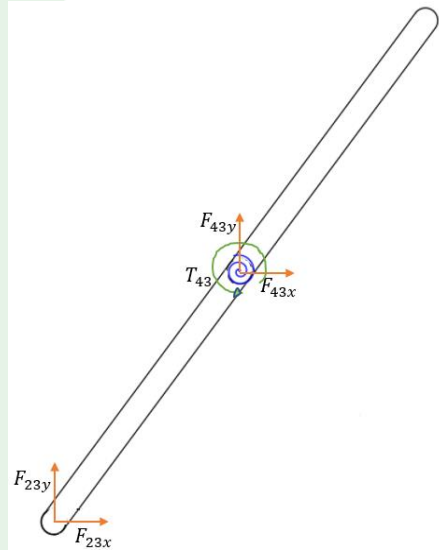


Figura 25  
Diagrama de cuerpo libre de eslabón 3

$$F_{23y} + F_{43y} = 0$$

$$F_{23x} + F_{43x} = 0$$

$$T_{43} + F_{23y}r_3 \cos(\theta_3) + F_{23x}r_3 \sin(\theta_3) = 0$$

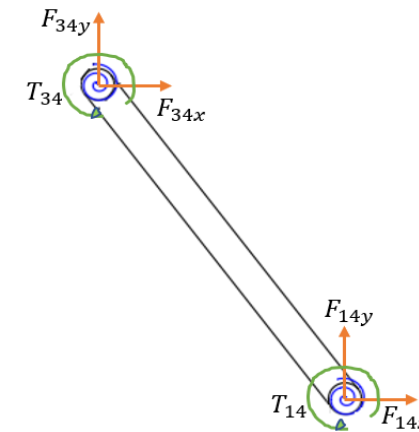


Figura 26  
Diagrama de cuerpo libre de eslabón 4

$$F_{34y} + F_{14y} = 0$$

$$F_{34x} + F_{14x} = 0$$

$$T_{34} + T_{14} + F_{34y}r_4 \cos(\theta_4) + F_{34x}r_4 \sin(\theta_4) = 0$$



# Evaluación de cargas

De las ecuaciones anteriores se establece:

$$F_{12y} = -F_{32y} = F_{23y} = -F_{43y} = F_{34y} = -F_{14y}$$

$$F_{12x} = -F_{32x} = F_{23x} = -F_{43x} = F_{34x} = -F_{14x}$$

Se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones

$$F_{32y} = \frac{T_{43}r_4 \sin(\theta_4) - (T_{43} - T_{14})r_3 \sin(\theta_3)}{r_4r_3 \cos(\theta_3) \sin(\theta_4) - r_4r_3 \sin(\theta_3) \cos(\theta_4)}$$

$$F_{32x} = \frac{(T_{43} - T_{14})r_3 \cos(\theta_3) - T_{43}r_4 \cos(\theta_4)}{r_4r_3 \cos(\theta_3) \sin(\theta_4) - r_4r_3 \sin(\theta_3) \cos(\theta_4)}$$

Del análisis cinemático se conoce los ángulos  $\theta_3$  y  $\theta_4$ , entonces para conocer los valores de  $T_{43}$  y  $T_{14}$  que corresponden a las juntas flexibles se debe calcular la constante  $K$  del resorte, para esto se asume que en las juntas dominan los efectos de la flexión lo que permite usar el modelo del elemento cargado con un momento en su extremo

$$K = \gamma K_{\theta} \frac{EI}{l}$$

Coefficiente de endurecimiento  $K_{\theta} = 2.0643$

Factor de radio característico  $\gamma = 0.7346$

Módulo de elasticidad  $E = 636,15 \text{ MPa}$

Inercia  $I = 0.171 \text{ mm}^4$

Longitud de la junta  $l = 15 \text{ mm}$

$$T_{43} = -K(\theta_4 - \theta_{40} - \theta_3 + \theta_{30})$$

$$T_{14} = K(\theta_{40} - \theta_4)$$

Cuando  $\theta_2 = 45^\circ$ .

$$T_{43} = 11 \text{ Nmm} \left( 51^\circ * \frac{\pi}{180} \right) = 9.79 \text{ N} - \text{mm}$$

$$T_{14} = 11 \text{ Nmm} \left( 48.38^\circ * \frac{\pi}{180} \right) = 9.29 \text{ N} - \text{mm}$$

$$T_{in} = \frac{(T_{43} - T_{14})r_2r_3 \sin(\theta_3 - \theta_2) + T_{43}r_2r_4 \sin(\theta_2 - \theta_4)}{r_4r_3 \sin(\theta_4 - \theta_3)}$$

$$T_{in} = 4.027 \text{ N} - \text{mm}$$

Diseño  
experimental





# Falla por fatiga

Según los resultados de esfuerzo von mises obtenidos en la simulación, el esfuerzo varía desde cero hasta el máximos de  $20.07 \text{ Mpa}$  (figura 43), entonces el criterio de Goodman modificado podrían ser utilizado. Entonces se puede encontrar los esfuerzos medio y alternante:

$$\sigma_m = \frac{20.07 \text{ Mpa} + 0}{2} = 10.035 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{20.07 \text{ Mpa} - 0}{2} = 10.035 \text{ MPa}$$

Según (Howell, 2001), el  $S_e$  en los polímeros toma un valor en el rango  $0.2S_{ut} - 0.4S_{ut}$ , aplicando el criterio de Goodman modificado con

$$S_e = 0.3S_{ut} = 0.3 * 60.51 \text{ Mpa} = 18.153 \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{SF} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}$$

$$\frac{1}{SF} = \frac{10.035 \text{ MPa}}{18.153 \text{ MPa}} + \frac{10.035 \text{ MPa}}{60.51 \text{ MPa}} = 0.72$$

$$SF = 1.4$$

Diseño  
experimental





# Parámetros de impresión 3D (Proceso FDM)

Las piezas se configuran en el software Ultimaker Cura son:

- Mecanismo Flexible de Hoeken
- Excéntrico
- Tuerca hueca
- Soporte de motor paso a paso

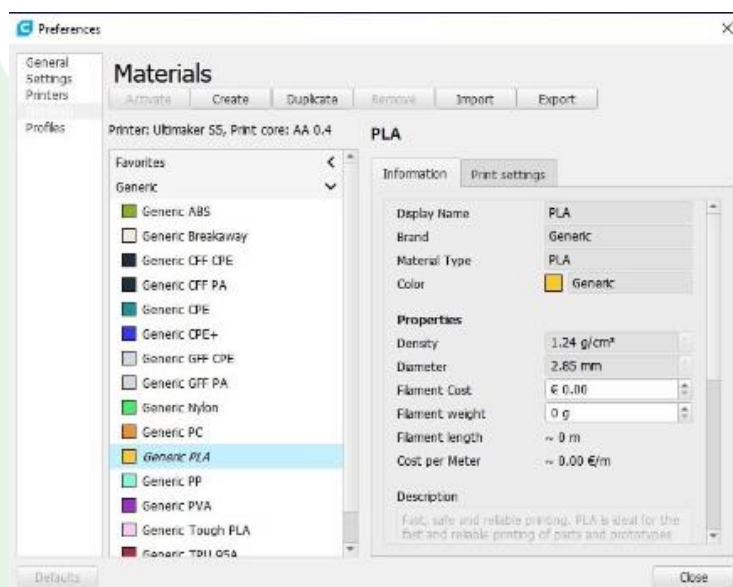


Figura 27  
Los parámetros que se encuentran precargados en el software Ultimaker Cura para el material PLA

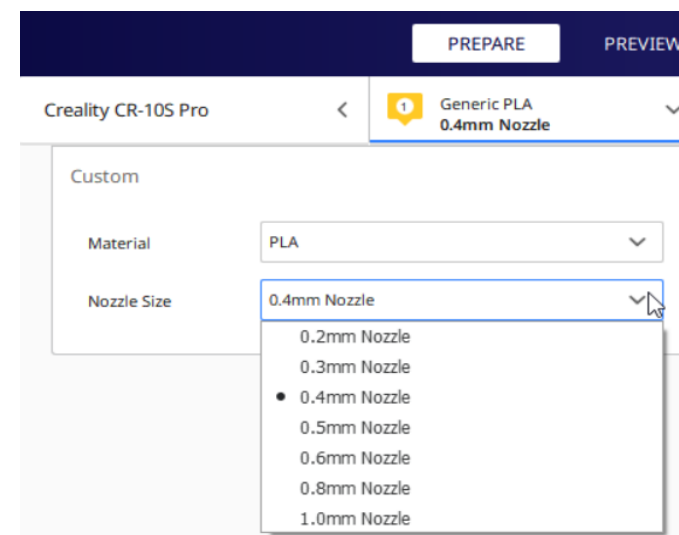


Figura 28  
Se selecciona el diámetro de boquilla del extrusor de 0,4mm para una correcta construcción de las juntas flexibles y eslabones del mecanismo.

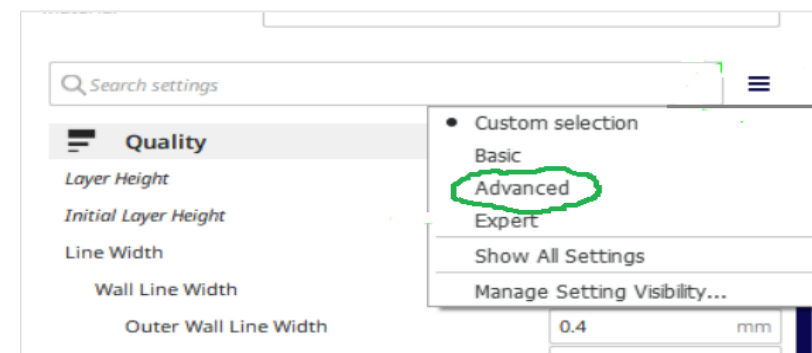


Figura 29  
Se selecciona la opción Advanced para establecer parámetros de retracción y lograr que las juntas flexibles se impriman con la mejor calidad.

Construcción del dispositivo





# Parámetros de impresión 3D (Proceso FDM)

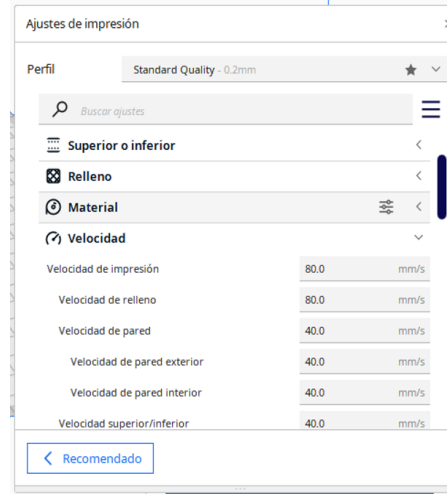


Figura 30  
Ajustes de impresión para la velocidad de impresión en software Ultimaker Cura

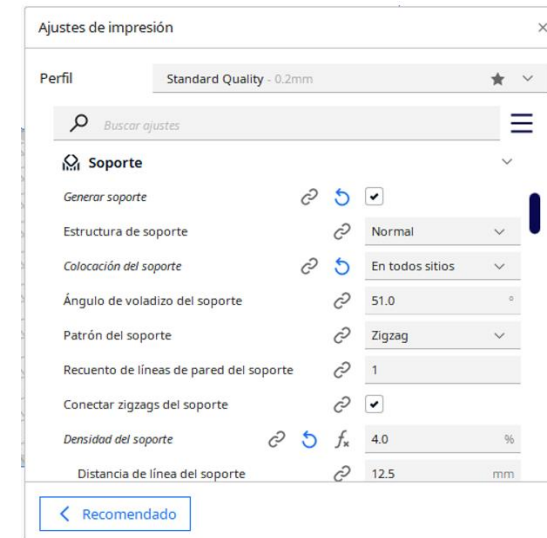


Figura 32  
Selección de los ajustes de impresión para el material de soporte seleccionamos el patrón de soporte zigzag

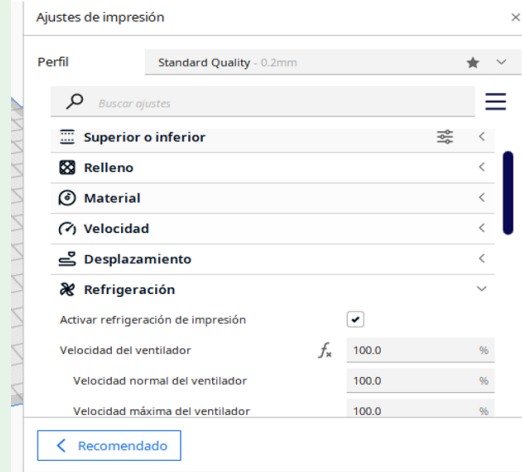


Figura 31  
Selección de los ajustes de impresión para los parámetros de refrigeración al 100%.

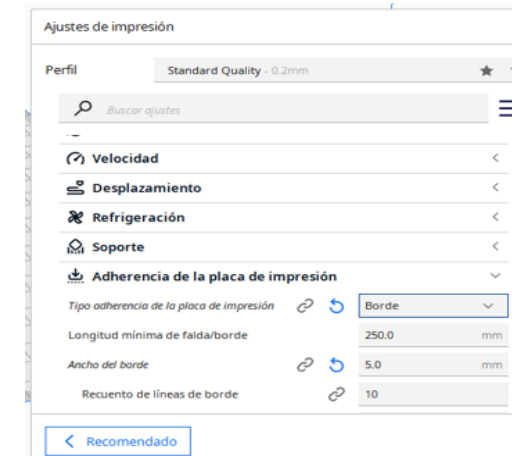


Figura 33  
Selección de los ajustes de impresión para la adherencia de la placa de impresión, se establecen las longitudes de la placa de impresión.

Construcción del dispositivo







# Piezas impresas en PLA (ácido poliláctico)

## Mecanismo flexible de Hoeken

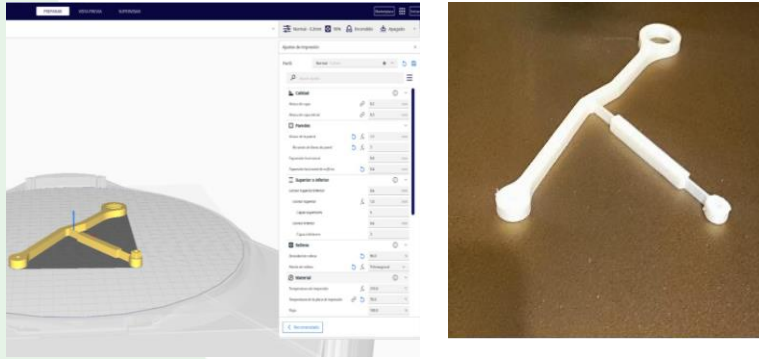


Figura 34  
a) Impresión de mecanismo flexible de Hoeken en software Ultimaker Cura b) Mecanismo flexible de Hoeken impreso en PLA

## Tuerca para rotulador

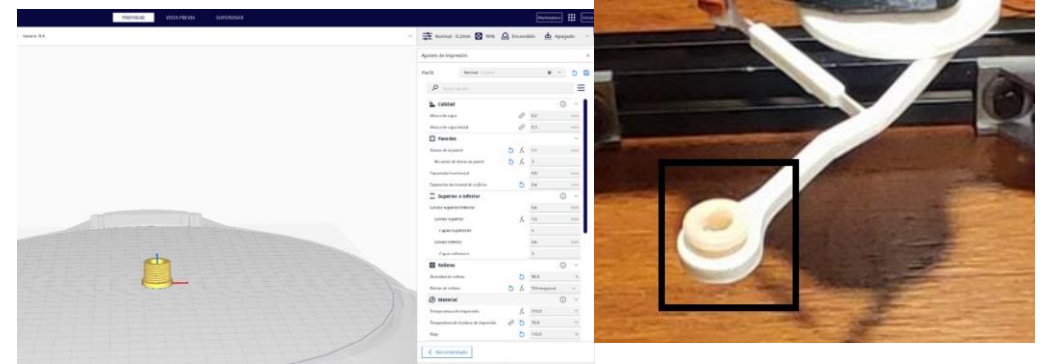


Figura 36  
a) Impresión de tuerca hueca de PLA en software Ultimaker Cura b) Tuerca hueca para acoplador de PLA

## Excéntrico (manivela)

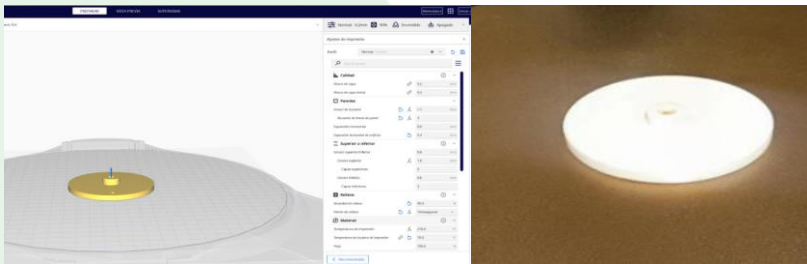


Figura 35  
a) Impresión de manivela excéntrica en software Ultimaker Cura b) Manivela excéntrica de PLA

## Soporte para motor paso a paso

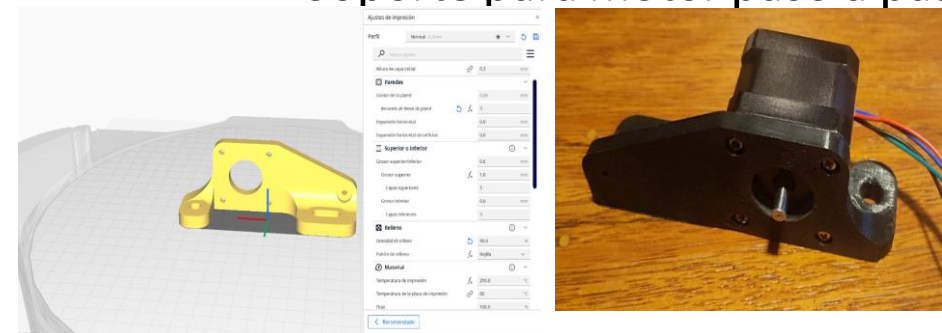


Figura 37  
a) Impresión soporte de PLA en software Ultimaker Cura b) Soporte de motor paso a paso de PLA.

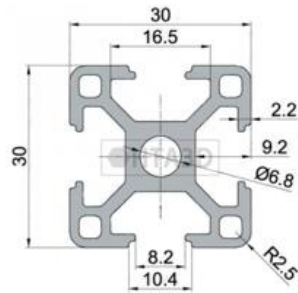




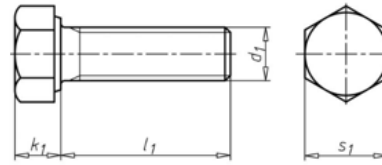
# Dispositivo para trazar curvas de acoplador

Insumos necesarios para la construcción del dispositivo

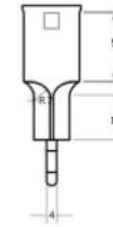
Perfil de aluminio estructural (30x30x58)mm



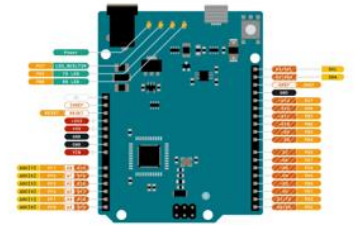
Perno hexagonal G2 UNC 1/2" x 1/4"



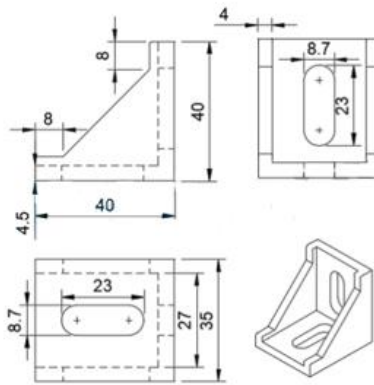
Rotulador punta fina



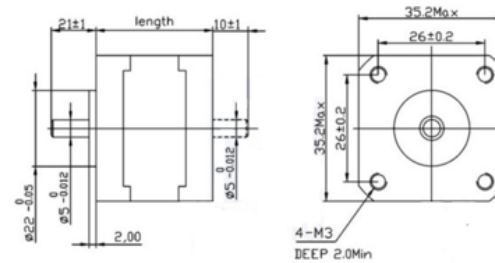
Arduino Leonardo



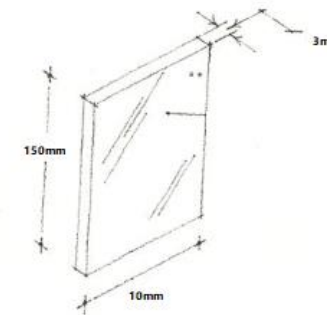
Ángulo de unión 90° (40x40x35)mm



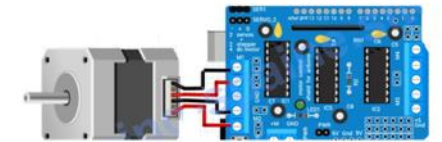
Motor paso a paso NEMA 14



Vidrio templado



Controlador L239D



Construcción del dispositivo

Figura 38

Insumos necesarios de adquirir para la construcción del dispositivo para trazar curvas de acoplador.



# Dispositivo para trazar curvas de acoplador

Diseño mecánico del dispositivo

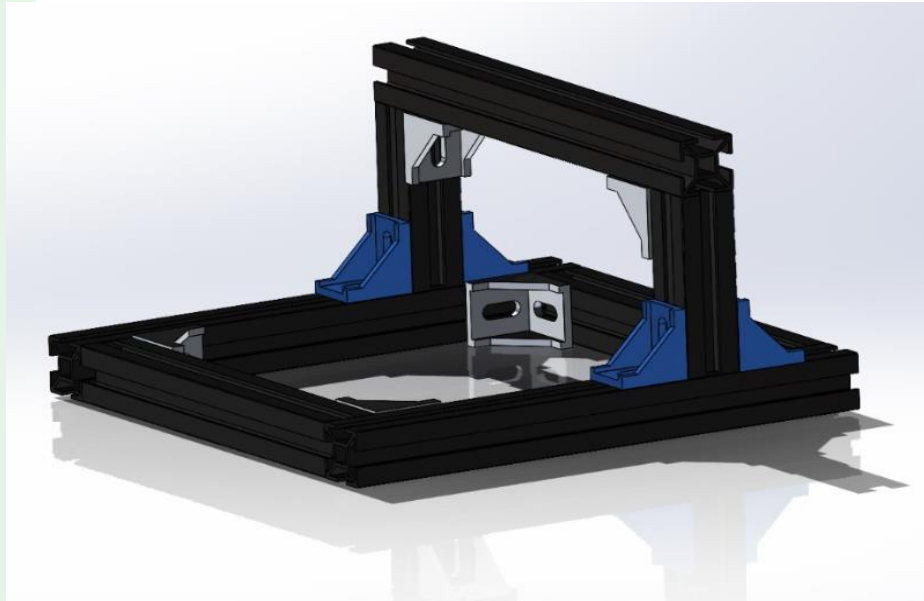


Figura 39  
Bastidor del dispositivo

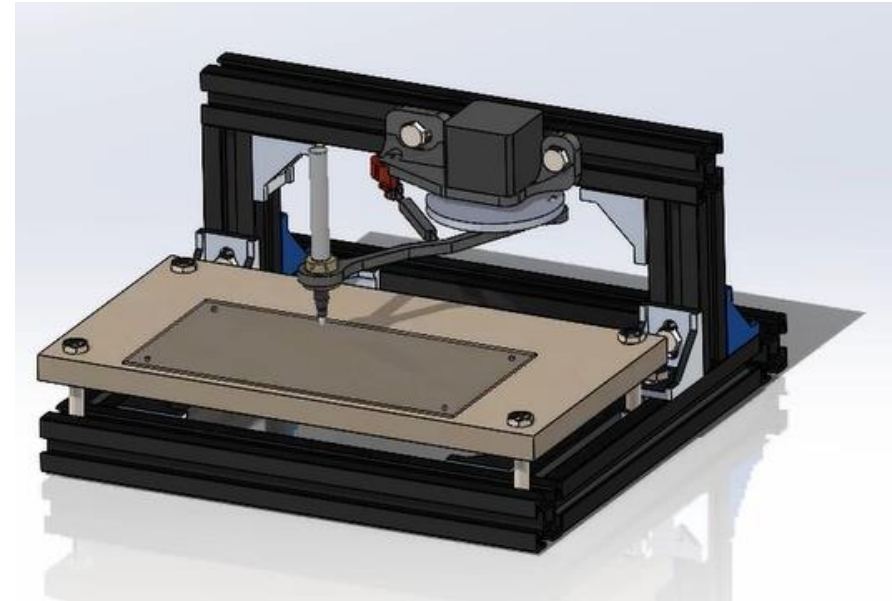


Figura 40  
Dispositivo con todos sus componentes ensamblados

Construcción del  
dispositivo



# Dispositivo para trazar curvas de acoplador

## Programación de motor paso a paso NEMA 14

```
pasopaso.ino
1 // Definimos los pines que conectan el registro de desplazamiento 74HCT595N al Arduino
2 const int SER_Pin = 8; // Pin SER del registro
3 const int OE_Pin = 7; // Pin OE del registro
4 const int RCLK_Pin = 12; // Pin RCLK del registro
5 const int SRCLK_Pin = 4; // Pin SRCLK del registro
6 const int EN_M1 = 11; // Pin ENABLE del M1
7 const int EN_M2 = 3; // Pin ENABLE del M2
8
9 // Definimos los valores de los registros para el motor 1
10 byte MA1 = 0b0000100; // Registro para polarizar a modo derecho
11 byte MA2 = 0b0001000; // Registro para polarizar a modo inverso
12
13 // Definimos los valores de los registros para el motor 2
14 byte MB1 = 0b0000010; // Registro para polarizar a modo derecho
15 byte MB2 = 0b0001000; // Registro para polarizar a modo inverso
16
17 float angulo_paso = 1.8; // Ángulo de paso en grados
18 float frecuencia_pulsos = 100; // Frecuencia en Hz
19
20 void setup() {
21 // Configuramos los pines como salidas
22 pinMode(SER_Pin, OUTPUT);
23 pinMode(OE_Pin, OUTPUT);
24 pinMode(RCLK_Pin, OUTPUT);
25 pinMode(SRCLK_Pin, OUTPUT);
26 pinMode(EN_M1, OUTPUT);
27
28 // Habilitamos el pin OE de los registros
29 digitalWrite(OE_Pin, HIGH);
30
31
32
33 }
```

```
34
35 void loop() {
36 //Codigo a modificar segun los requerimientos tiempo y rpm
37 girarMotor(5,60); // Valor1 tiempo de vueltas, valor2 la velocidad en rpm
38
39 delay(2000); // Tiempo de espera entre cada orden
40
41 }
42
43 void girarMotor(int duracionSegundos,int rpm){
44
45 float duracionVuelta = 60.0 / rpm * 1000.0;
46 float duracionPaso = duracionVuelta / 200.0;
47 int duracionPasoMicros = (int) (duracionPaso * 1000)/4; // se divide para 4 porque son cuatro pasos
48
49 unsigned long tiempoInicio = millis();
50 unsigned long duracionMs = duracionSegundos * 1000;
51
52 while(millis() - tiempoInicio < duracionMs) {
53
54 digitalWrite(EN_M1, HIGH);
55 digitalWrite(EN_M2, HIGH);
56
57 enviarRegistro(MA1|MB1); // Paso 1
58 delayMicroseconds(duracionPasoMicros);
59 enviarRegistro(MA2|MB1); // Paso 2
60 delayMicroseconds(duracionPasoMicros);
61 enviarRegistro(MA2|MB2); // Paso 3
62 delayMicroseconds(duracionPasoMicros);
63 enviarRegistro(MA1|MB2); // Paso 4
64 delayMicroseconds(duracionPasoMicros);
65 }
```

```
65
66 digitalWrite(EN_M1, LOW);
67 digitalWrite(EN_M1, LOW);
68
69 }
70 enviarRegistro(0b00000000); //desactiva el motor
71 }
72
73
74 void enviarRegistro(byte valor) {
75 digitalWrite(OE_Pin, LOW); // Habilitamos las salidas
76 shiftOut(SER_Pin, SRCLK_Pin, MSBFIRST, valor);
77 digitalWrite(RCLK_Pin, LOW);
78 digitalWrite(RCLK_Pin, HIGH);
79 }
```

Construcción del dispositivo



Figura 40

Programa de arduino para programar motor paso a paso NMEA 14



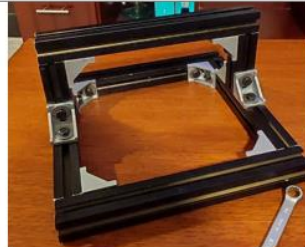
# Dispositivo para trazar curvas de acoplador

## Proceso de construcción

1. Corte de perfiles de aluminio de aluminio 3030



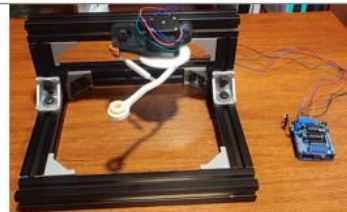
2. Ensamble de uniones perfiles y pernos para formar bastidor



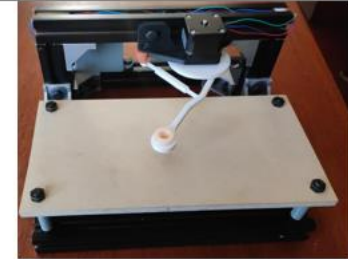
3. Acople de motor paso a paso previamente programado con arduino leonardo



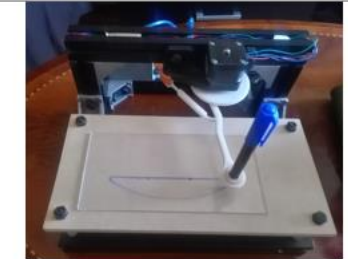
4. Unión y ensamble de mecanismo flexible de Hoeken (excéntrico, mecanismo y base)



5. Colocación de base de madera para vidrio



6. Implementación de vidrio para trazar curva de acoplador



7. Adaptación del rotulador para trazado de curva de acoplador

Construcción del dispositivo



# Pruebas

Curva de acoplador mecanismo de Hoeken tradicional (software Mathcad)

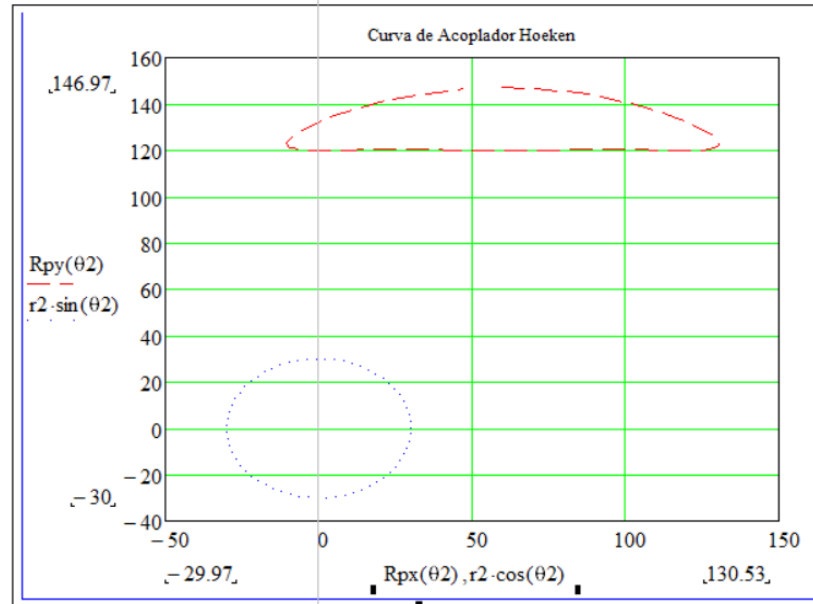


Figura 41  
Curva de acoplador del eslabón acoplador y manivela mecanismo tradicional de Hoeken en Mathcad.

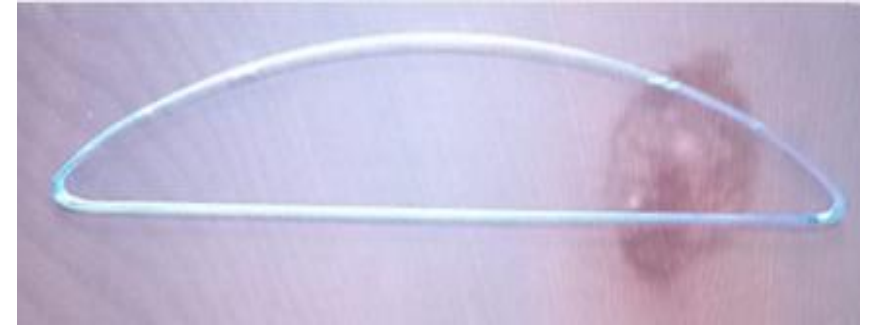


Figura 42  
La curva de acoplador está realizada con tecnología de grabado láser en vidrio.

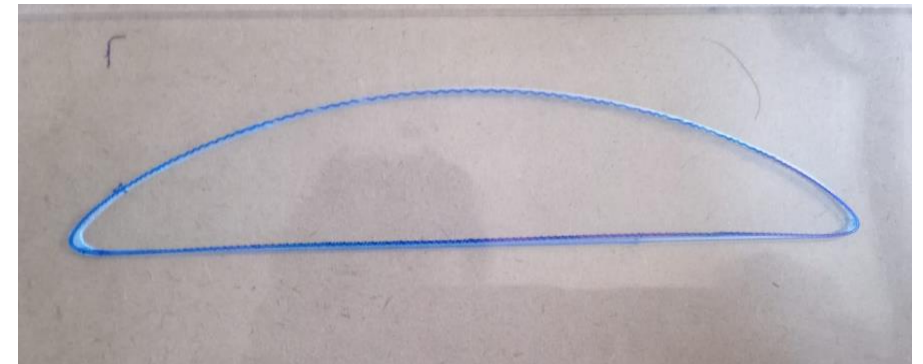


Figura 43  
La curva de color blanco representa la curva de acoplador del mecanismo tradicional de Hoeken y la curva en azul es la generada por el mecanismo flexible de Hoeken.



# Análisis de resultados

## Curva de acoplador mecanismo flexible de Hoeken

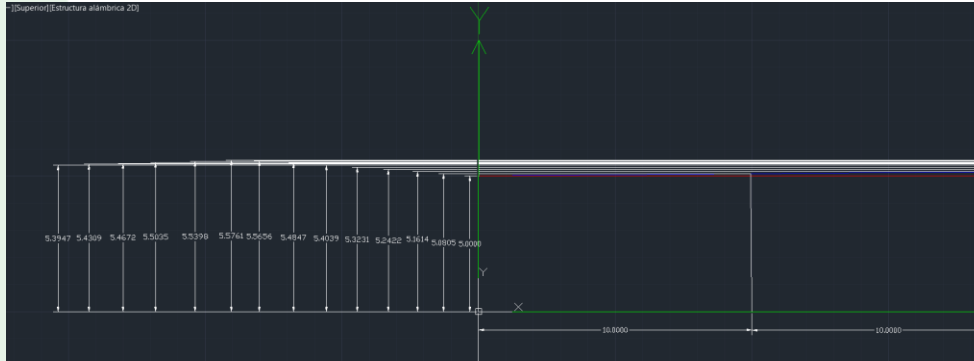


Figura 44

En la imagen se muestra los valores en el eje de coordenadas X cada 10mm hasta llegar a la longitud de 130mm y en el eje de coordenadas Y se muestran los valores donde la rectitud de la curva son diferentes a 5mm.

$$\sum_{i=1}^{14} Xi = 910 [mm]$$

$$\bar{X} = \frac{910[mm]}{N} = \frac{910[mm]}{14} = 65[mm]$$

$$\sigma_{x^2} = \frac{\sum Xi^2}{N} - \bar{X}^2 = 1625[mm^2]$$

$$Y = 0,0033X + 5,15$$

Curva de MF de Hoeken

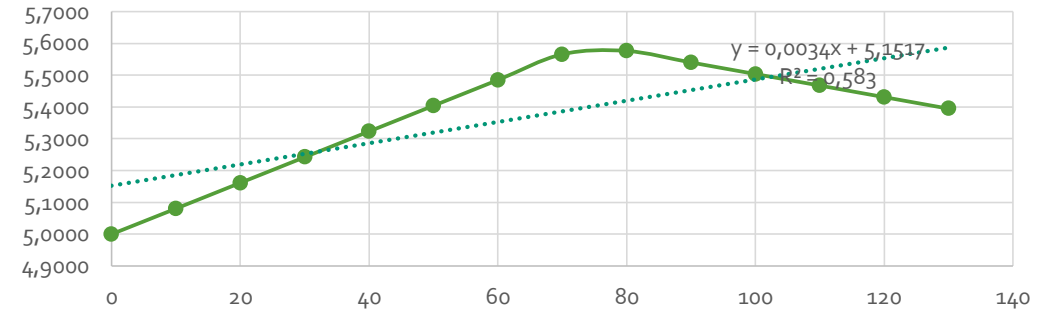


Figura 45

Curva de mecanismo flexible representada en software EXCEL, con mejor precisión que software CAD.

$$N = 14$$

$$\sum_{i=1}^{14} Yi = 75,1736 [mm]$$

$$\bar{Y} = \frac{75,1736[mm]}{N} = \frac{75,1736[mm]}{14} = 5,3695[mm]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum Xi * Yi}{N} - \bar{X} * \bar{Y} = 5,4484[mm^2]$$

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum e^2}{\sum (Yi - \hat{Y})^2} \right) \rightarrow R^2 = 1 - \left( \frac{0,1829}{0,4382} \right) = 0,5827$$

Validación de resultados





# Análisis de resultados

## Error de rectitud del mecanismo tradicional de Hoeken

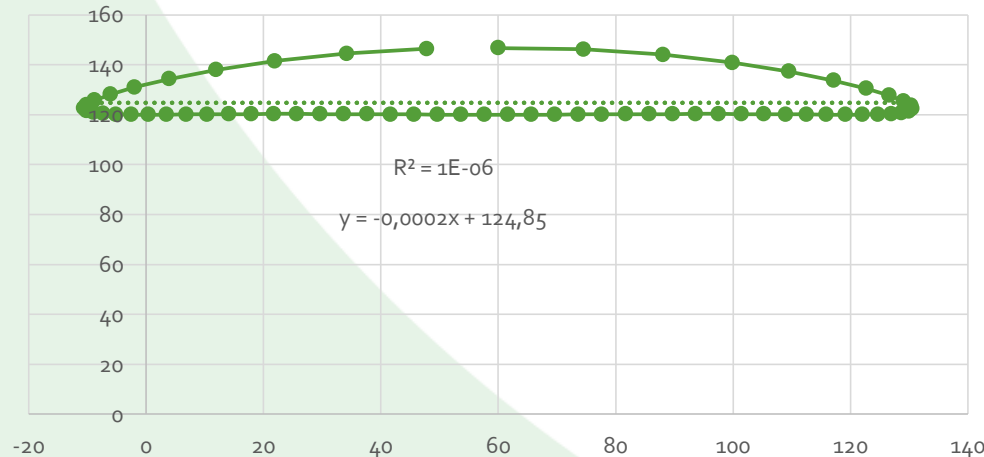
$$\frac{\Delta x}{L_2} = \frac{130mm}{30mm} = 4,33$$

La extrapolación se realiza en base a los valores de la tabla 4, es un método muy sencillo que se realiza de la siguiente manera:

$$\frac{x - 160}{4,33 - 3,933} = \frac{4,181 - 3,933}{180 - 160} = 160,004^\circ$$

## Curva de acoplador mecanismo de Hoeken tradicional

Curva de Hoeken tradicional



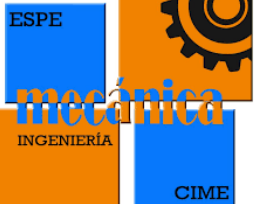
$$y = -0.0002x + 124.85$$

$$R^2 = 1 * 10^{-6}$$

Figura 46

Se muestra la curva de mecanismo tradicional de Hoeken en color verde, en color amarillo verdoso se muestra la recta de regresión junto con la ecuación que describe su comportamiento y el valor del coeficiente de determinación  $r$  cuadrado.

Validación de resultados





# Conclusiones

- Aplicar el modelo del cuerpo pseudorígido para el mecanismo de Hoeken permitió obtener resultados concretos para evaluar un mecanismo de línea recta y cómo varía la trayectoria del acoplador aplicando juntas flexibles (segmento cargado con momento en su extremo), con un factor de seguridad de 3,74 calculado de forma manual, y en la simulación ANSYS un factor de seguridad de 2,8141 cuando la manivela está a 45° en ambos casos.
- Evaluar las propiedades mecánicas del material mediante el ensayo ASTM D790 para el análisis de fatiga del material arrojó un factor de seguridad de 1,4 que es valor aceptable, experimentalmente se verificó el material sometiendo a varios ciclos trazando la curva de acoplador del mecanismo flexible y no presentó fallas por fatiga e igualmente la simulación presentó que las juntas flexibles por ser elementos delgados sometidos a grandes deflexiones estaban diseñadas correctamente.
- El material PLA utilizado para la construcción del mecanismo flexible resultó ser idóneo para el trazado de la curva de acoplador del MF de Hoeken, por su resistencia mecánica y las propiedades de impresión aplicadas en la impresora ENDER 5 mediante el programa Ultimaker Cura, así como la flexibilidad presentada en las juntas del mecanismo que permitieron la diferenciación de ambos mecanismos.
- Los valores obtenidos de R-cuadrado para el mecanismo de Hoeken y el mecanismo flexible de Hoeken son 0,0001% y 58,27% respectivamente, siendo como se esperaba un valor de R<sup>2</sup> mínimo para el mecanismo tradicional pero presentando un error de rectitud de 0,047% cuando la manivela está a 160°, para el mecanismo flexible tenemos un valor de R<sup>2</sup> mayor ya que debido a las inercias generadas por las juntas flexibles en el dispositivo se producen estas variaciones en las gráficas especialmente cuando se realiza el trazado de la línea recta.

Conclusiones







# Recomendaciones

- Es importante seleccionar las propiedades de impresión adecuadas como la velocidad de impresión, la calidad de impresión y refrigeración para obtener un mecanismo flexible resistente y con flexibilidad, ya que al utilizar PLA se puede correr el riesgo de presentar juntas flexibles no aptas para ser sometidas a esfuerzos debido al movimiento de la manivela, en casos de ciclos repetitivos recomendable usar resinas.
- El dispositivo de trazado de la curva de acoplador no solo está diseñado para el mecanismo de Hoeken sino también se puede adaptar mediante su estructura para la evaluación de la curva de acoplador de otros mecanismos flexibles en trabajos futuros y funcionar como un banco de pruebas para las dimensiones máximas donde se puede evaluar los mismos.

Recomendaciones



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN