

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR, PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**“ESTUDIAR LA COMBINACIÓN DE IMPRESIÓN 3D CON ACTUACIÓN DE
ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA”**

AUTOR: GORDÓN ROSERO, FREDDY ALEXIS

DIRECTOR: Ing. LARA PADILLA, HERNÁN VINICIO, PhD

2023 – 08 – 31





Antecedentes

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

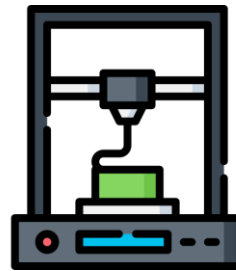
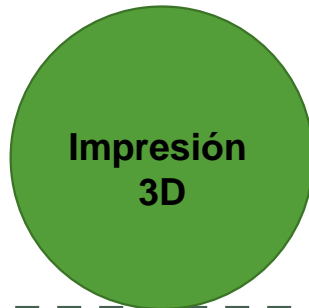
Manufactura Tradicional



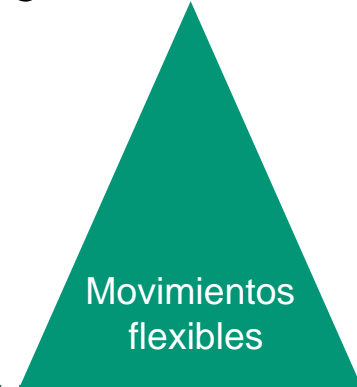
¿Limitaciones?



Manufactura Aditiva



¿Limitaciones?



Robótica Blanda



Estereolitografía (SLA)

Nitinol



Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

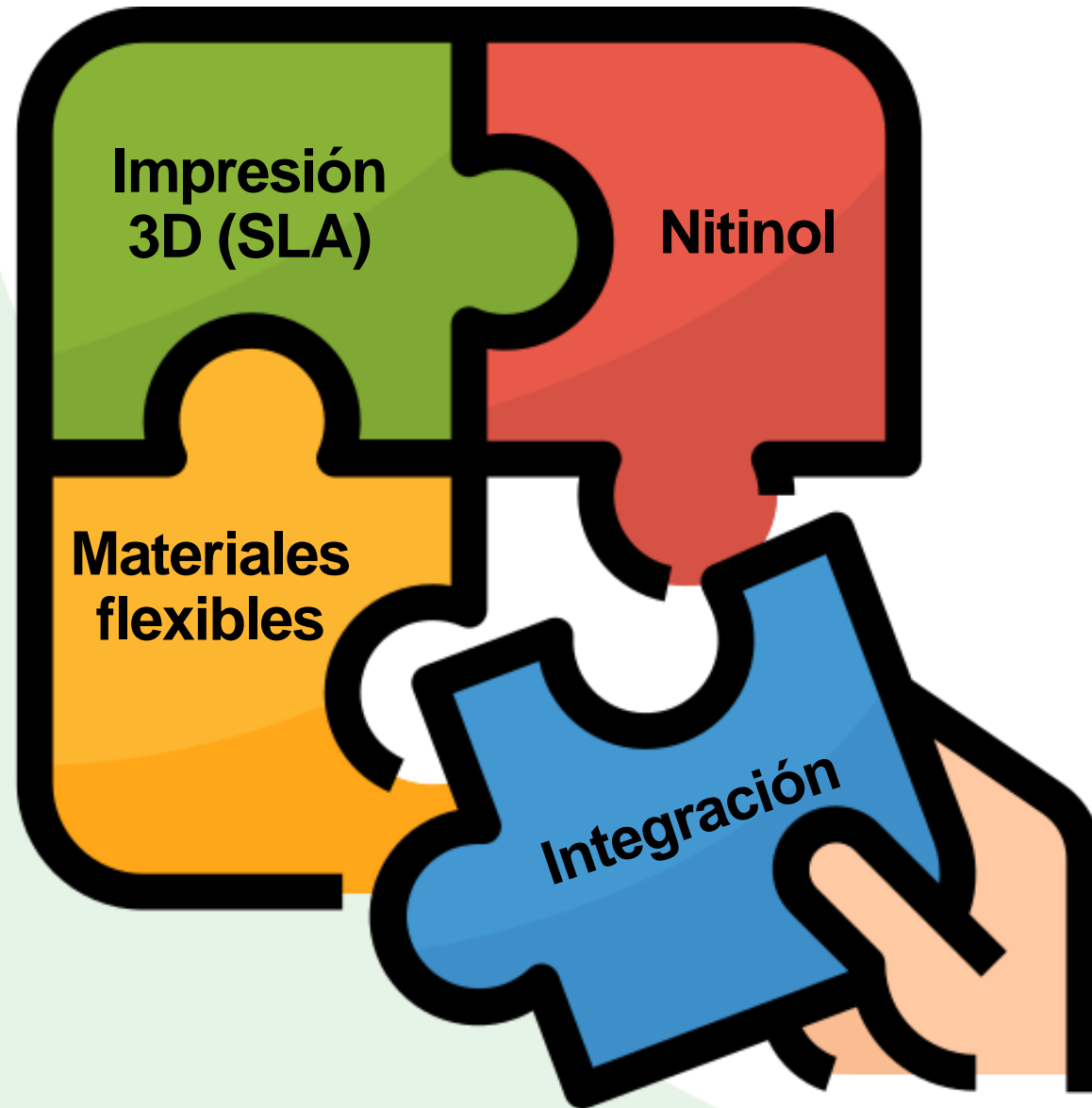
Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Objetivos



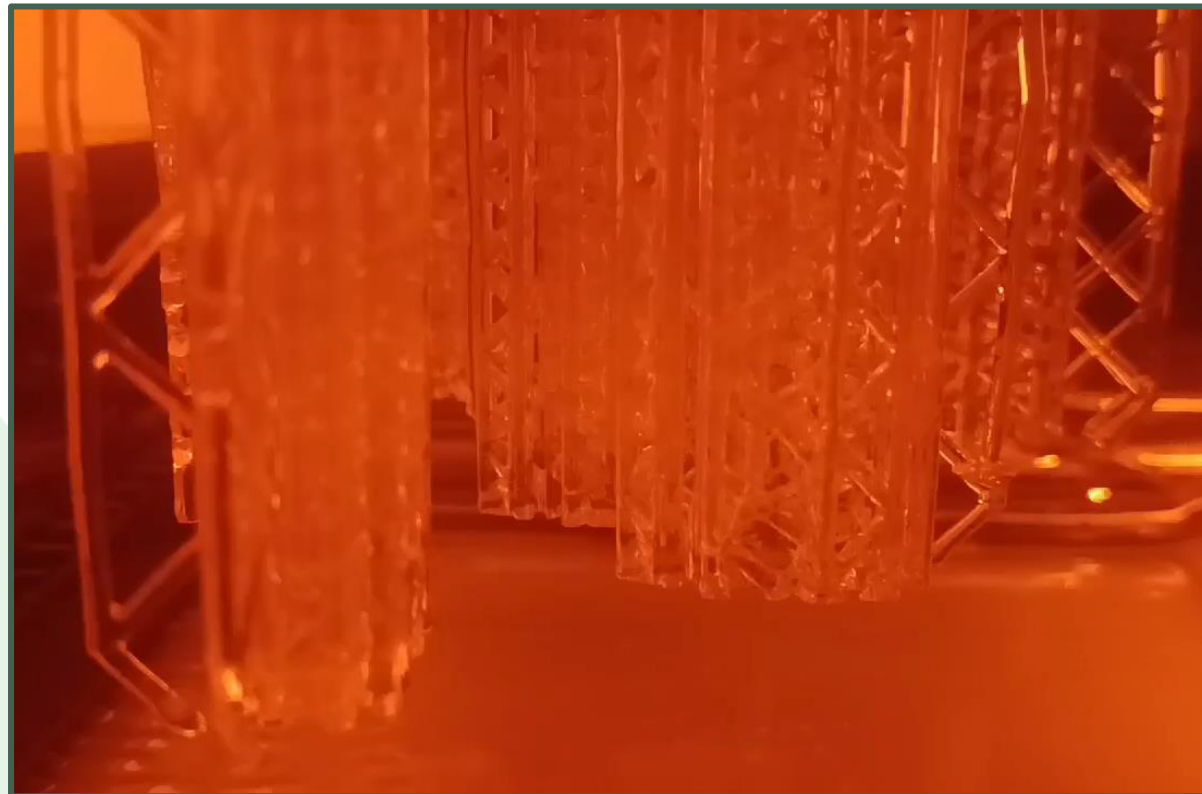
- Plataforma de productos
- Estructuras porosas tipo celosías
- Integración
- Pruebas y validación



Revisión de literatura

Impresión 3D (SLA)

- Uso de resina fotosensible
- Proyección luz UV
- Proceso de Poscurado



Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

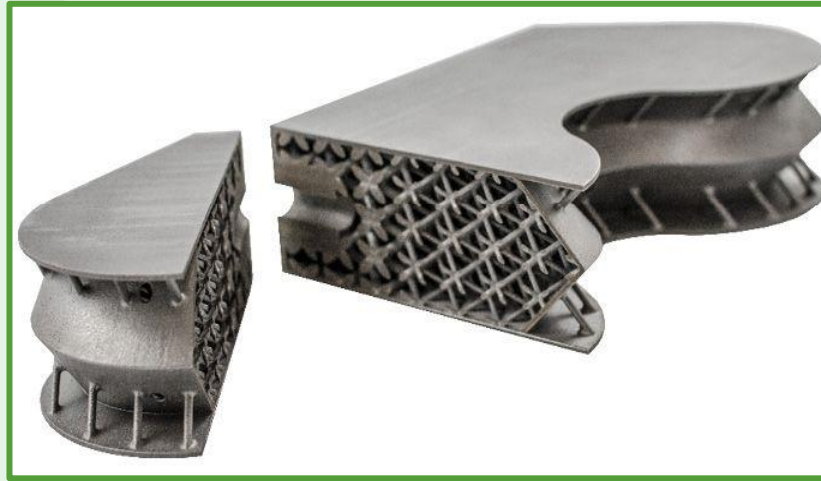
Trabajo Futuro



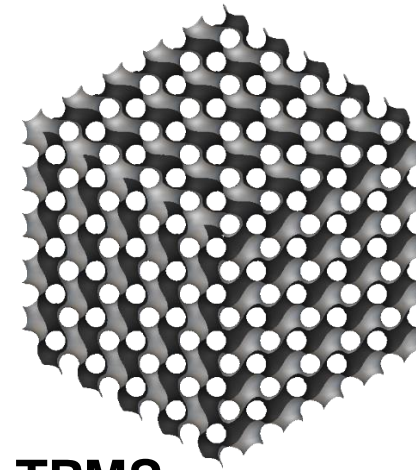
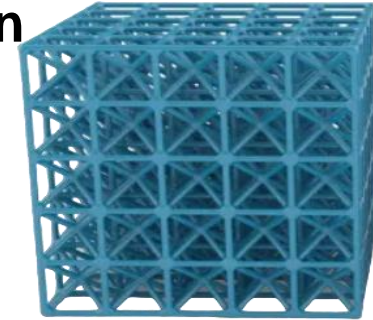
Celosías

Revisión de literatura

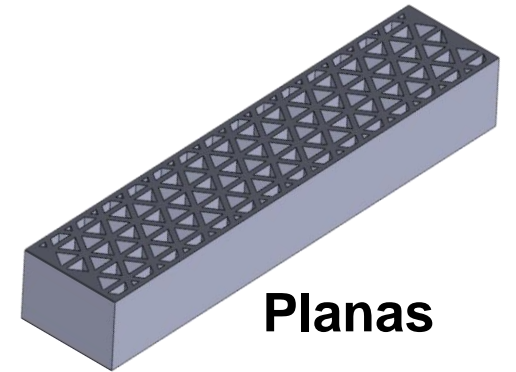
- Optimización de material



Basadas en puntales



TPMS



Planas

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

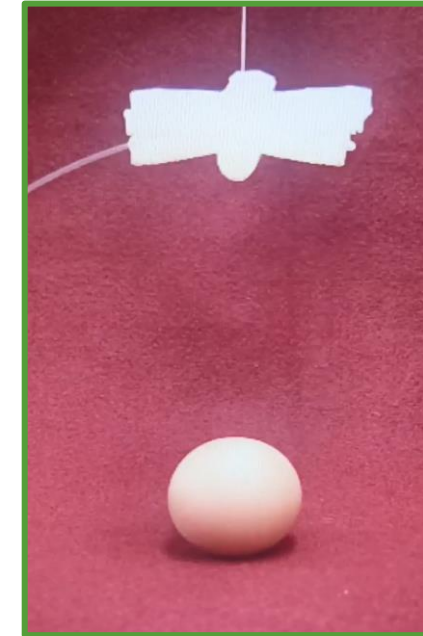
Trabajo Futuro



Revisión de literatura

Robótica Blanda

- Característica blanda o flexible
- Movimientos fluidos
- Deformación
- Bajo peso
- Mecanismos de actuación
 - Líquido
 - Aire
 - Aleaciones con memoria de forma



Soft Robotics: Robots Featuring Biological Movements. *Engineers Garage*.
<https://www.engineersgarage.com/soft-robotics-robots-featuring-biological-movements/>

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

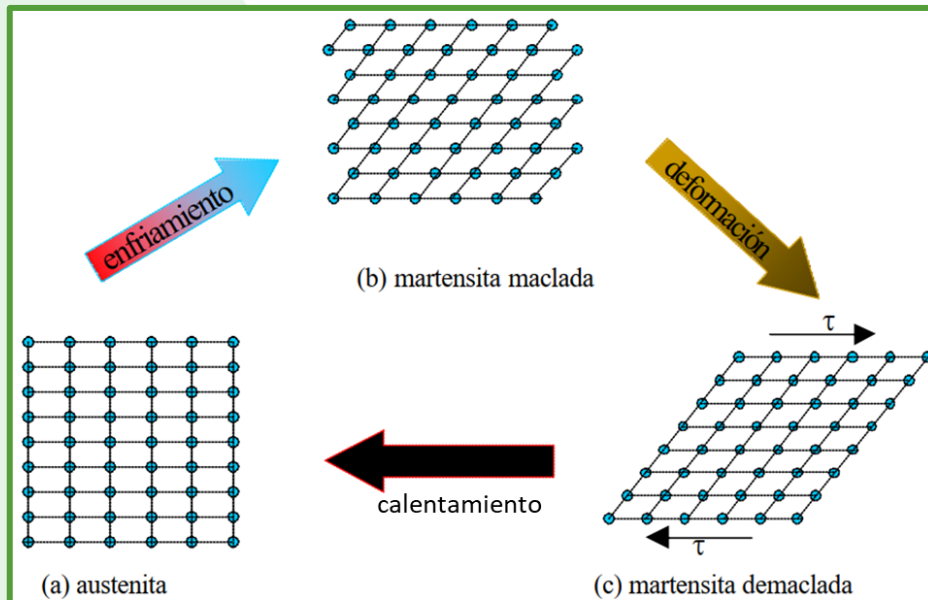
Trabajo Futuro



Nitinol

- Aleación Ni - Ti
- Memoria de forma
- Fase Martensita
- Fase Austenita
- Temperatura de transformación

Revisión de literatura



Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Selección y Caracterización de resina

Metodología

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

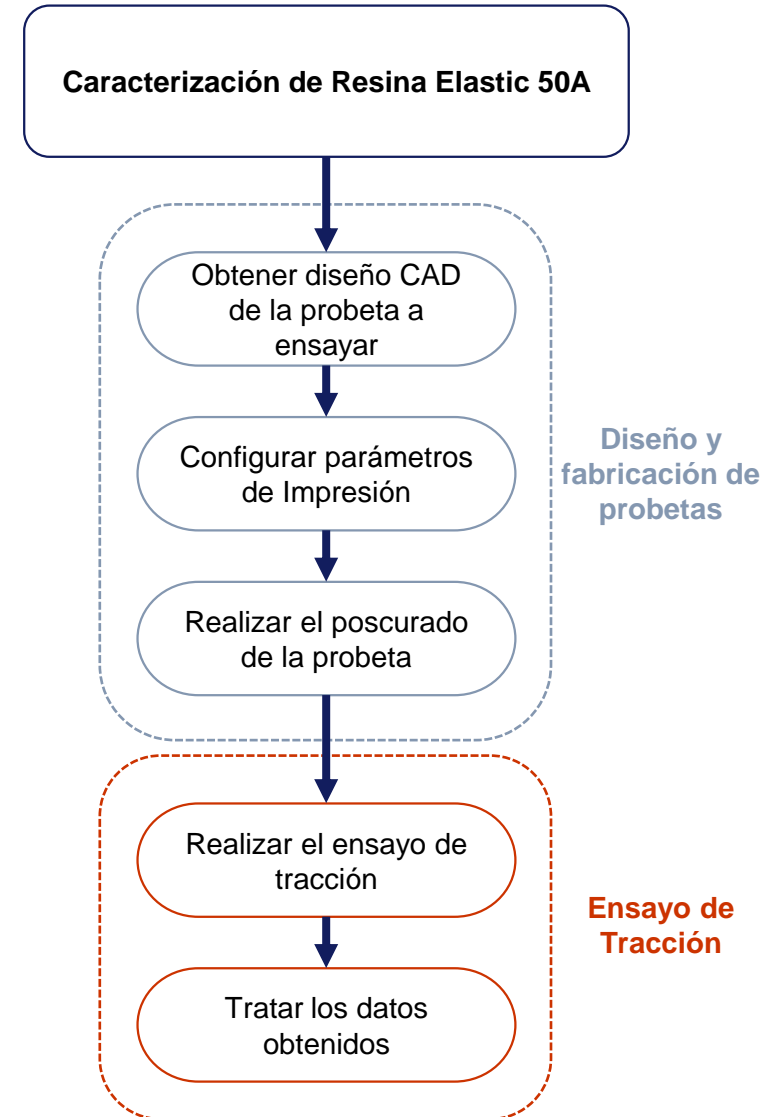
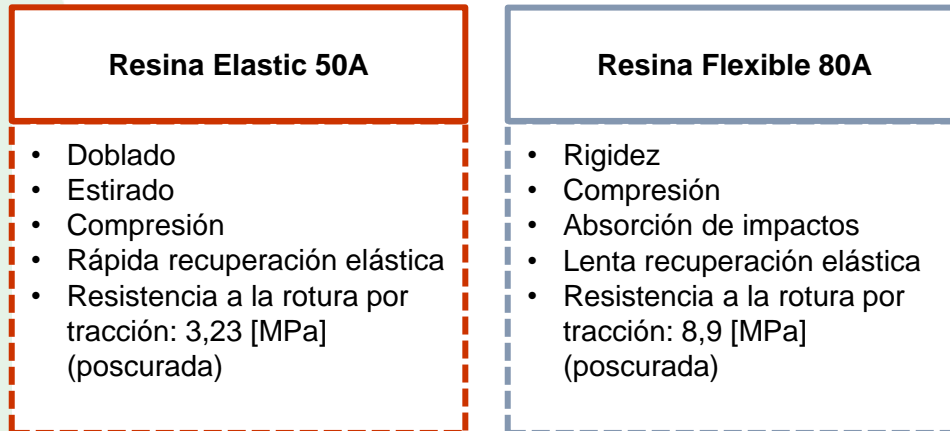
Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

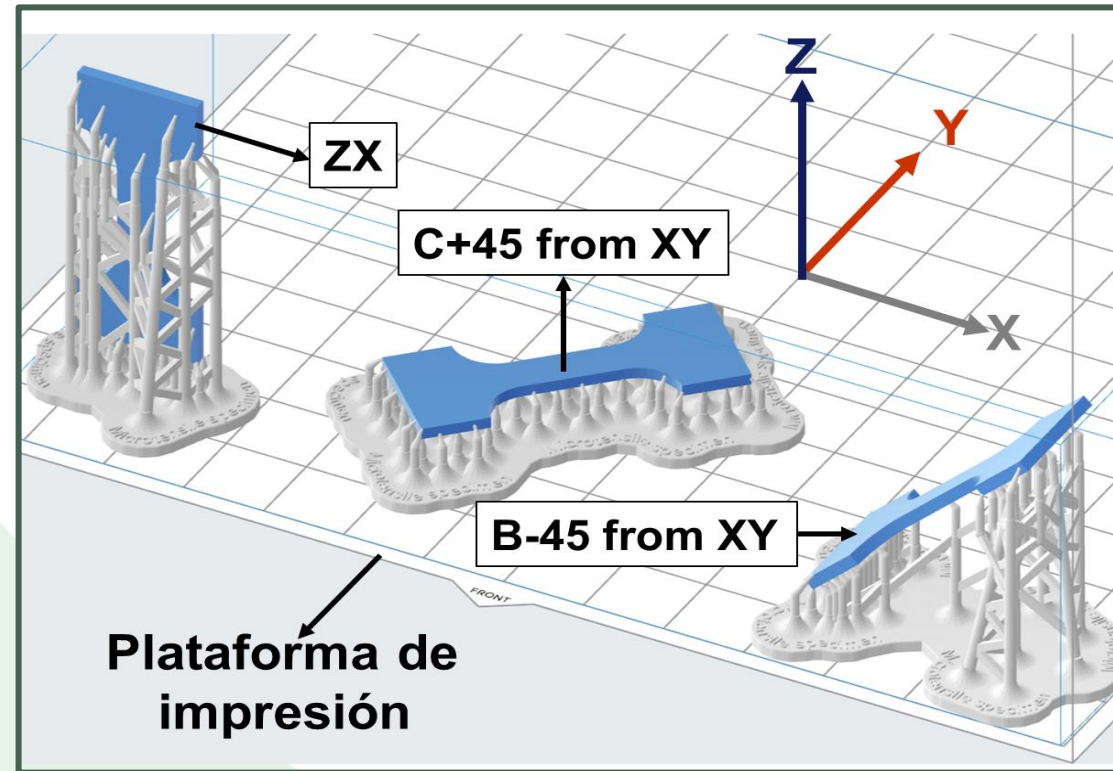
Trabajo Futuro





Selección y Caracterización de resina

- Orientaciones de impresión



Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Caracterización del Nitinol

Metodología

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

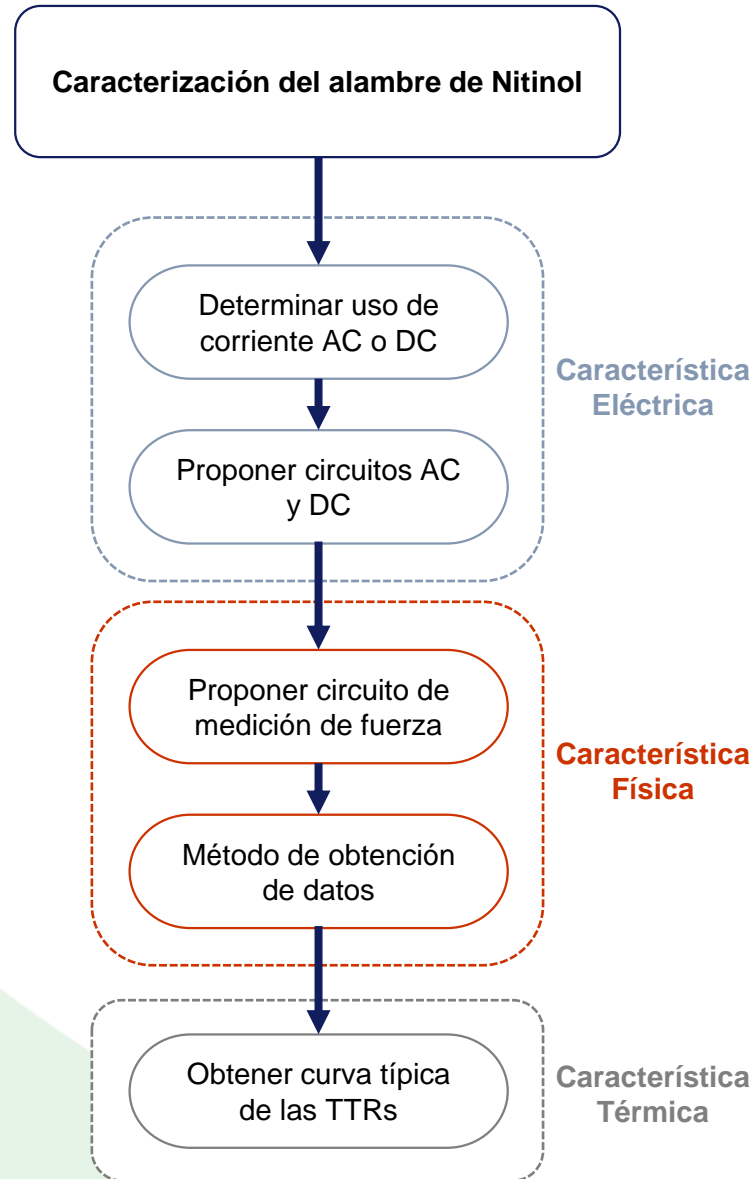
[Metodología](#)

[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

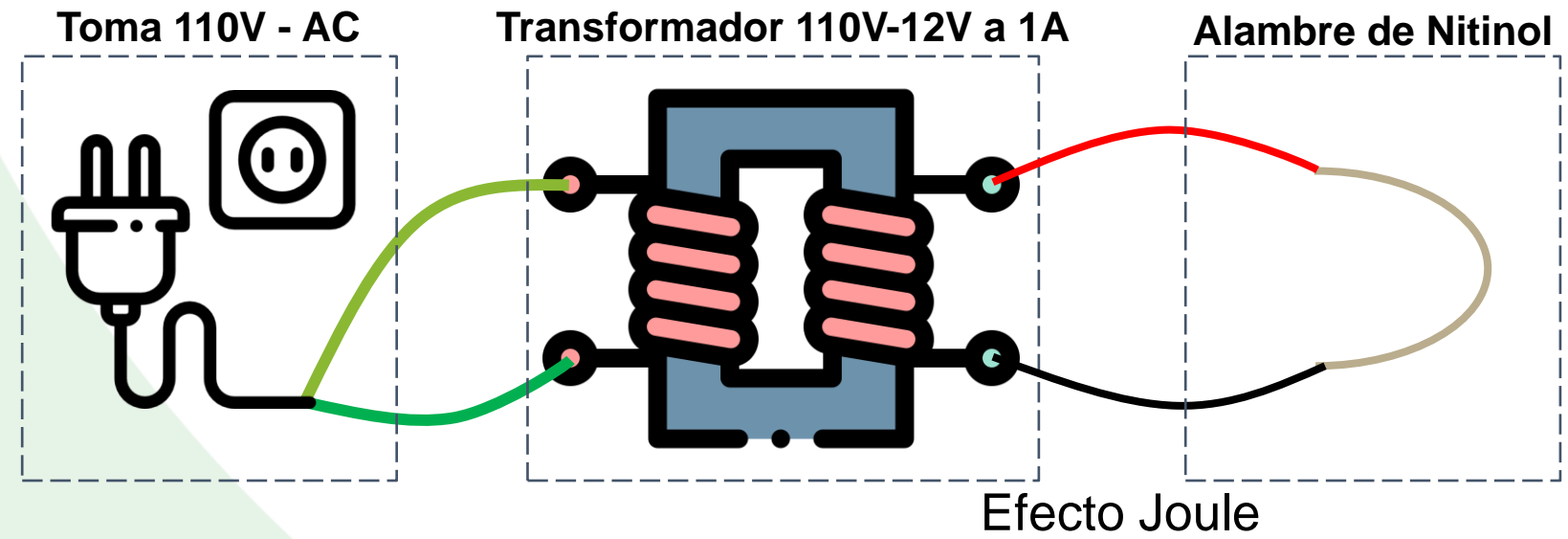
[Trabajo Futuro](#)





Caracterización del Nitinol

- Característica Eléctrica



Circuito – AC

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

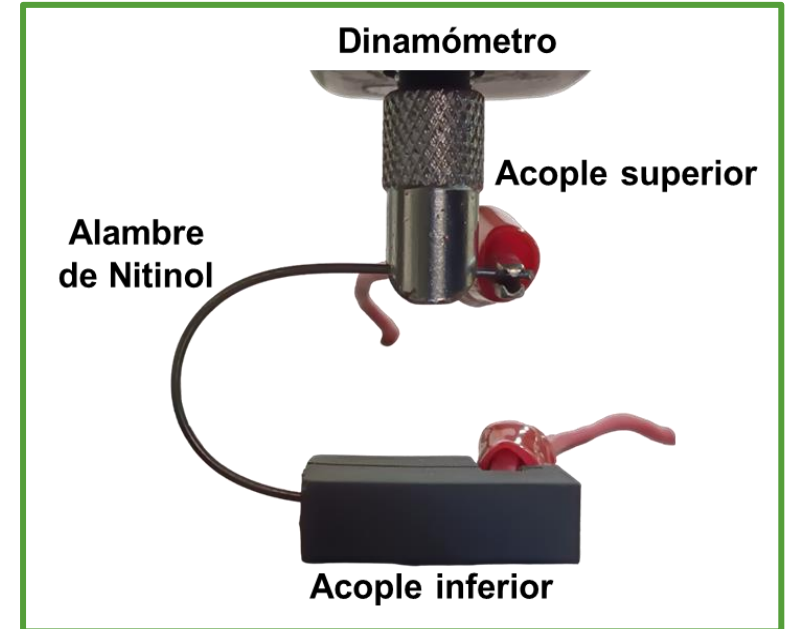
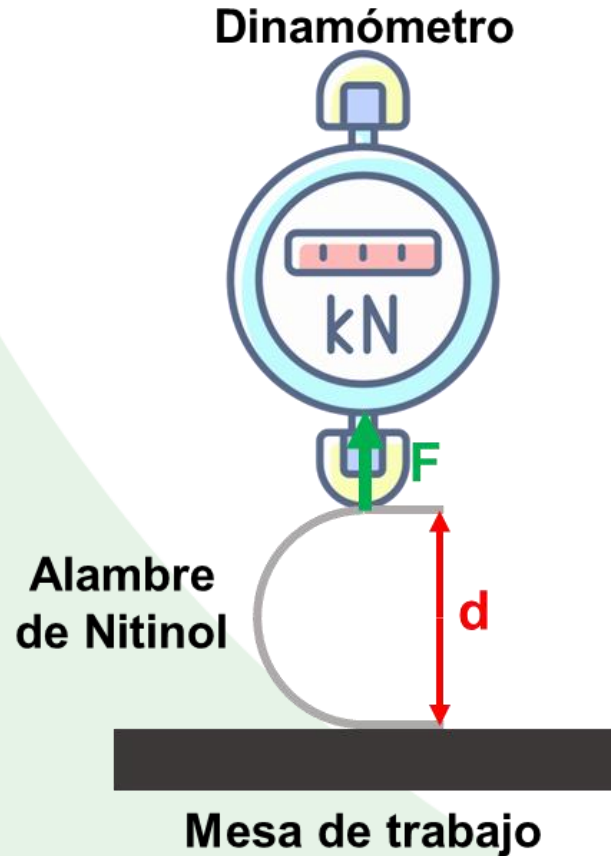
[Trabajo Futuro](#)



Caracterización del Nitinol

Metodología

- Característica Física



[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)

Caracterización del Nitinol

- Característica Térmica

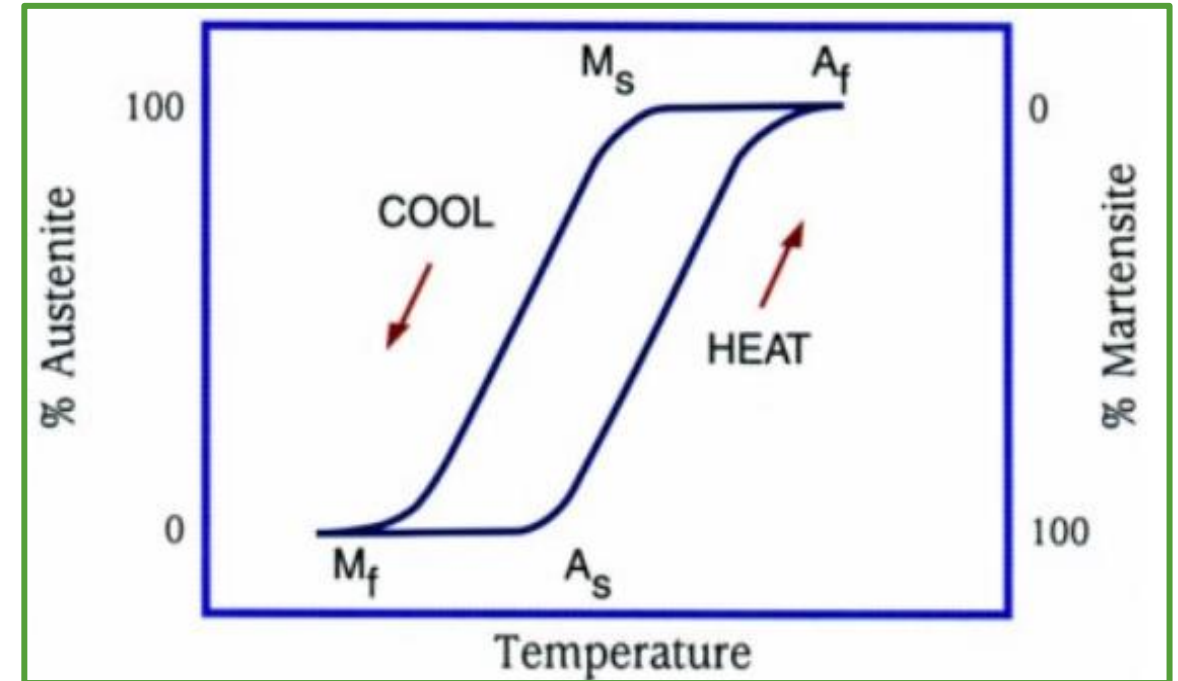
Método 1: Deformación del material con variación de temperatura.

Limitación: Máquina de ensayos con cámara de control de temperatura

Método 2: Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC).

Limitación: Equipo

Método 3: Calentamiento en un baño de agua y medición del ángulo de deformación.



Ms: Inicio Fase Martensita

Mf: Final Fase Martensita

As: Inicio Fase Austenita

Af: Final Fase Austenita

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

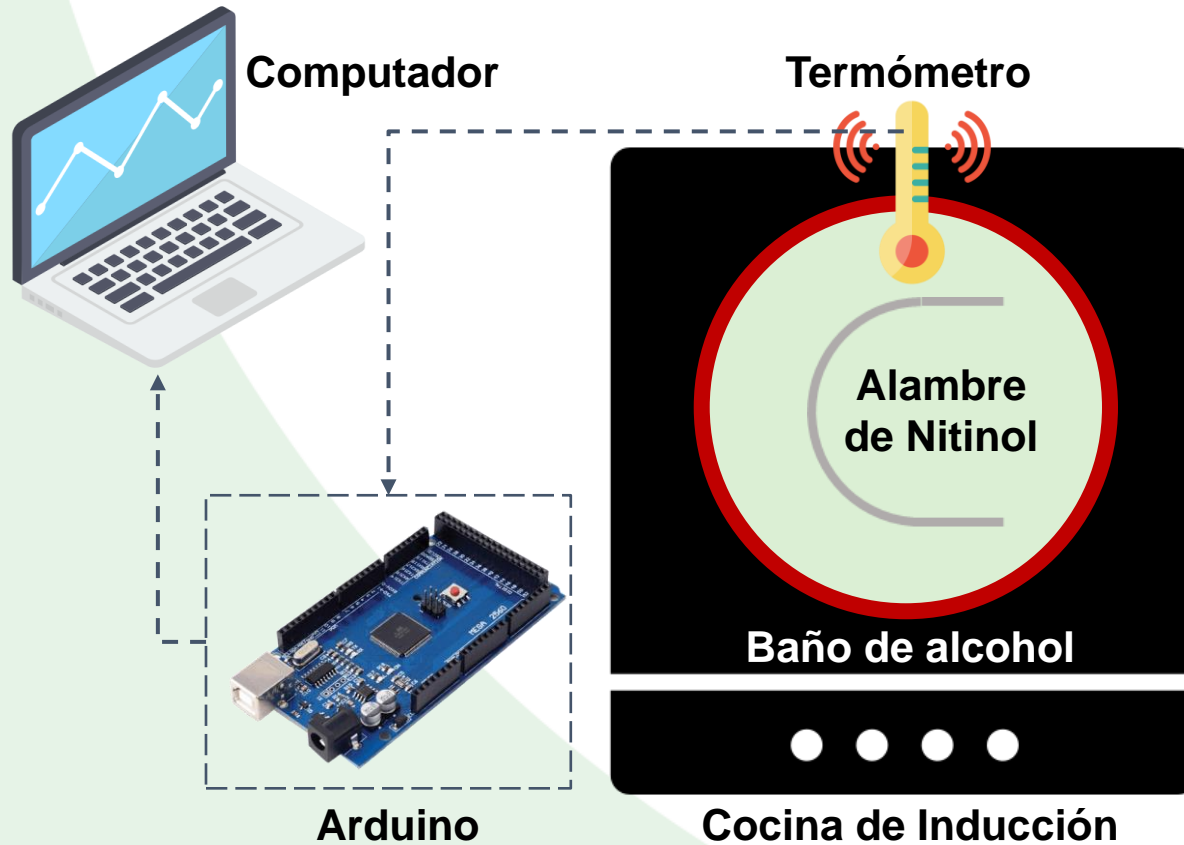
Recomendaciones

Trabajo Futuro



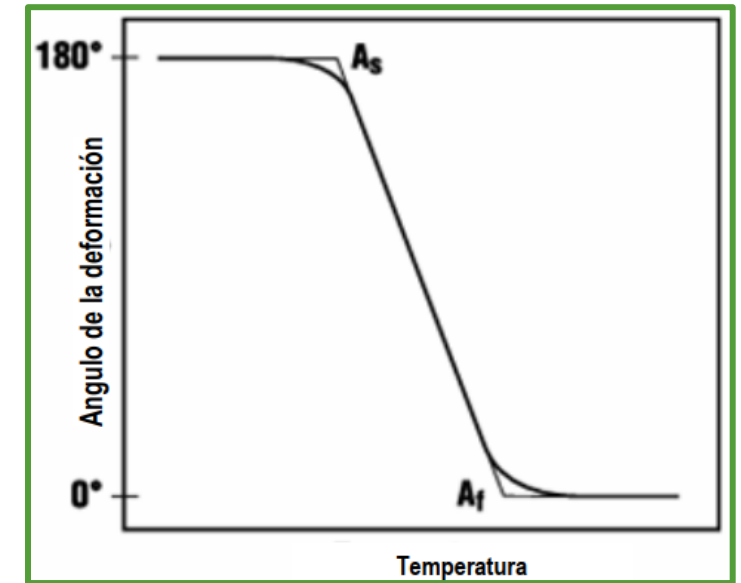
Caracterización del Nitinol

- Característica Térmica



Metodología

Curva TTRs



Método 3

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

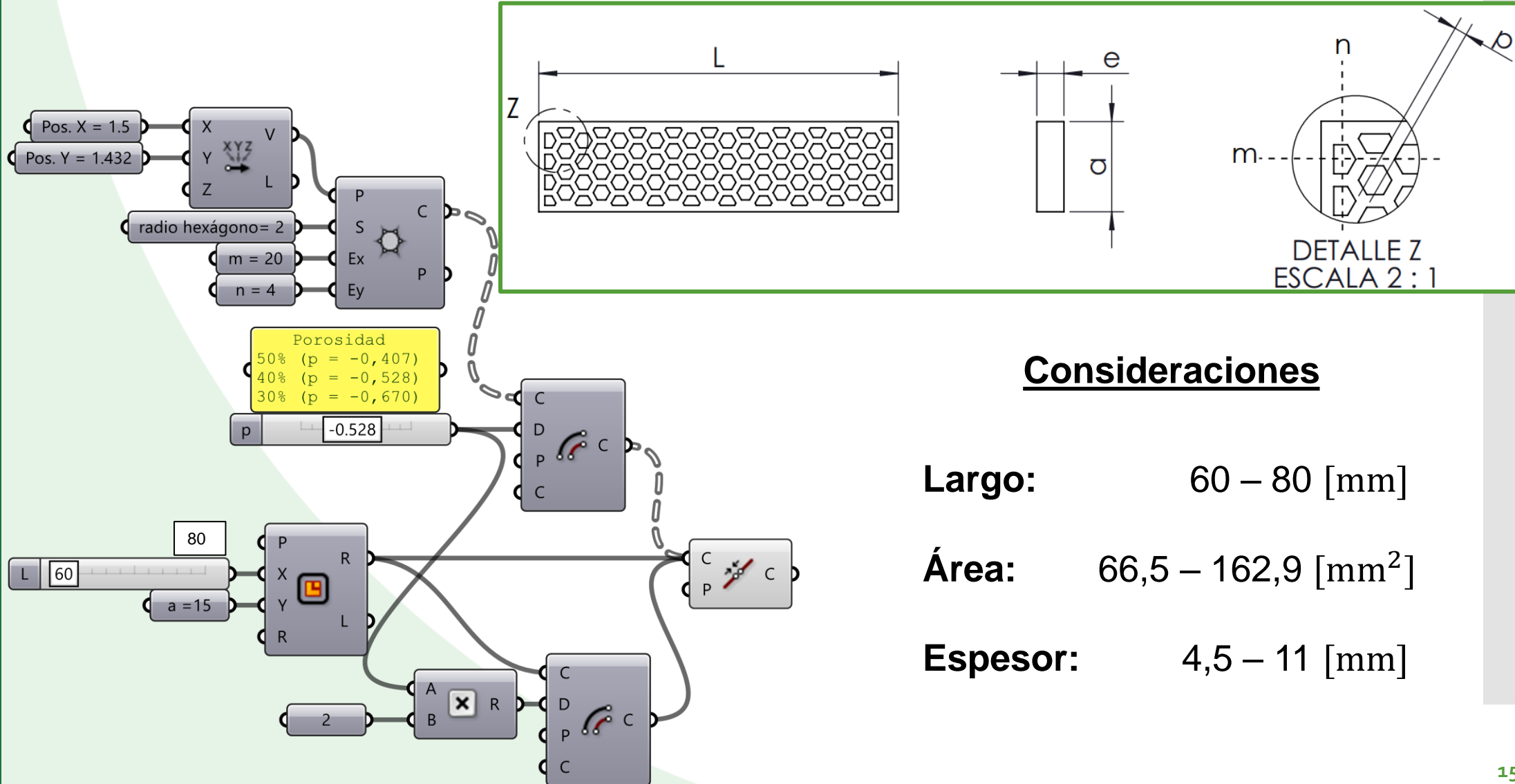
Recomendaciones

Trabajo Futuro



Metodología

Tabla de diseño



Consideraciones

- Largo:** 60 – 80 [mm]
- Área:** 66,5 – 162,9 [mm²]
- Espesor:** 4,5 – 11 [mm]

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

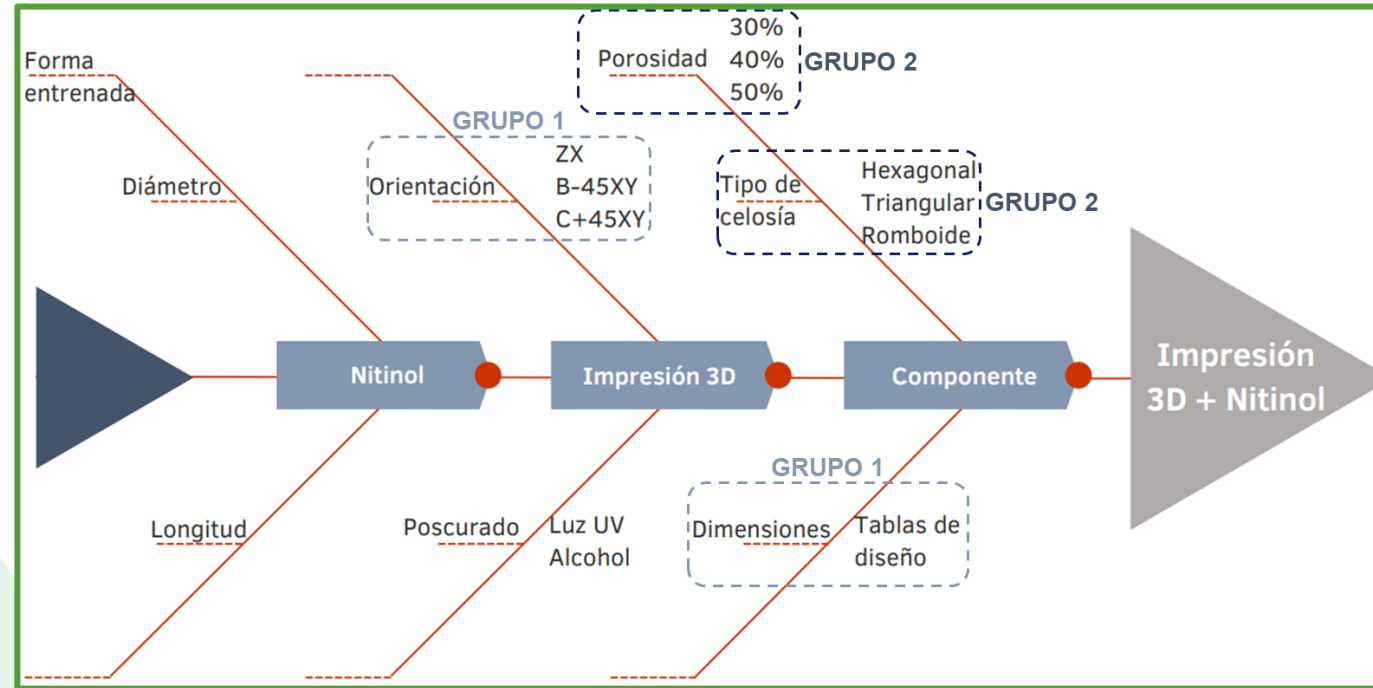
Recomendaciones

Trabajo Futuro



Diseño Experimental

- Niveles y Factores



Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Tipo de Celosía Plana	Hexagonal	Romboide	Triangular
Porcentaje de Porosidad	30%	40%	50%

Taguchi L9

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

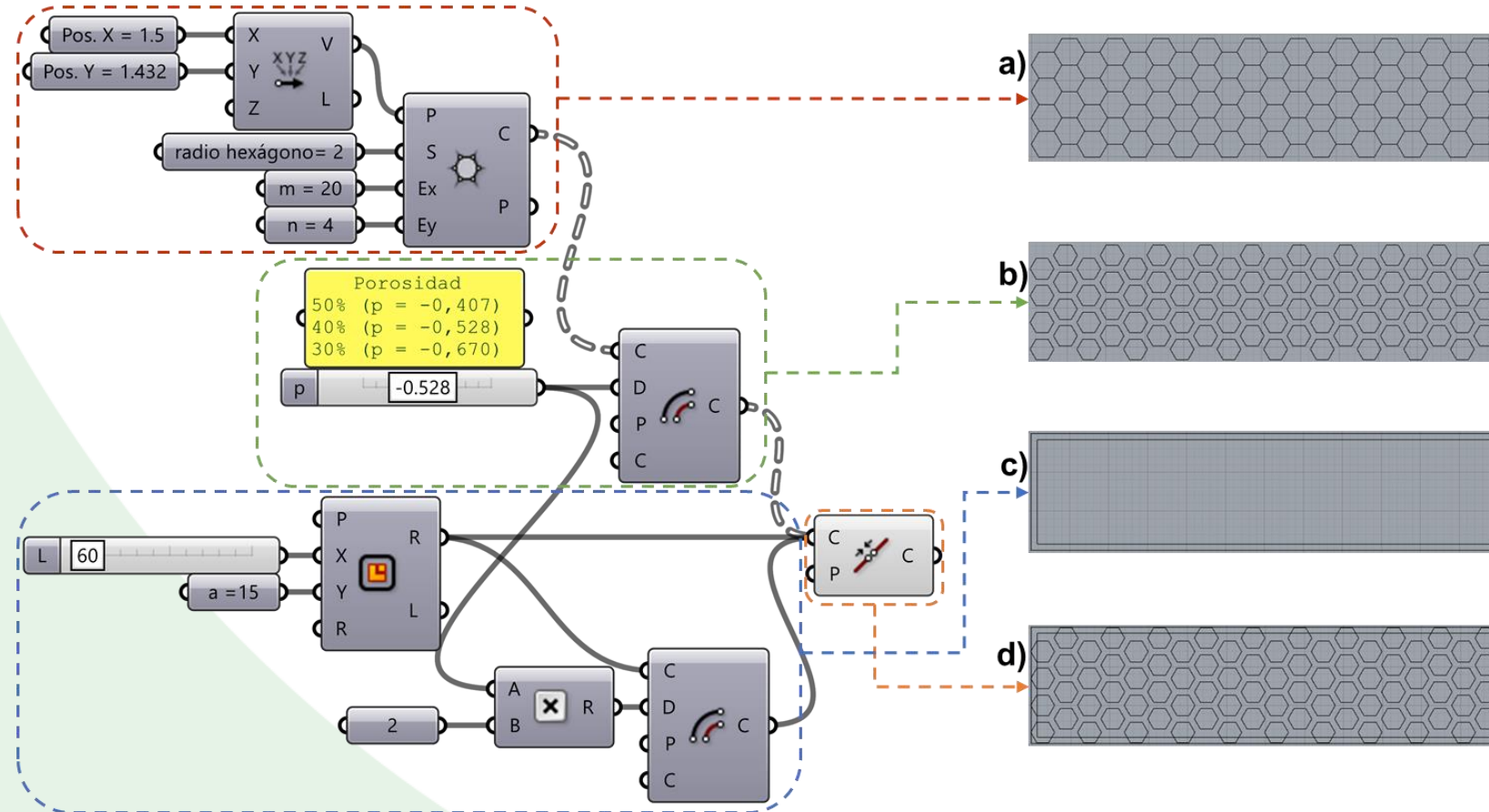
Recomendaciones

Trabajo Futuro



Diseño Experimental

- Diseño de estructuras porosas tipo celosías



Hexagonal

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Diseño Experimental

- Diseño de estructuras porosas tipo celosías

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

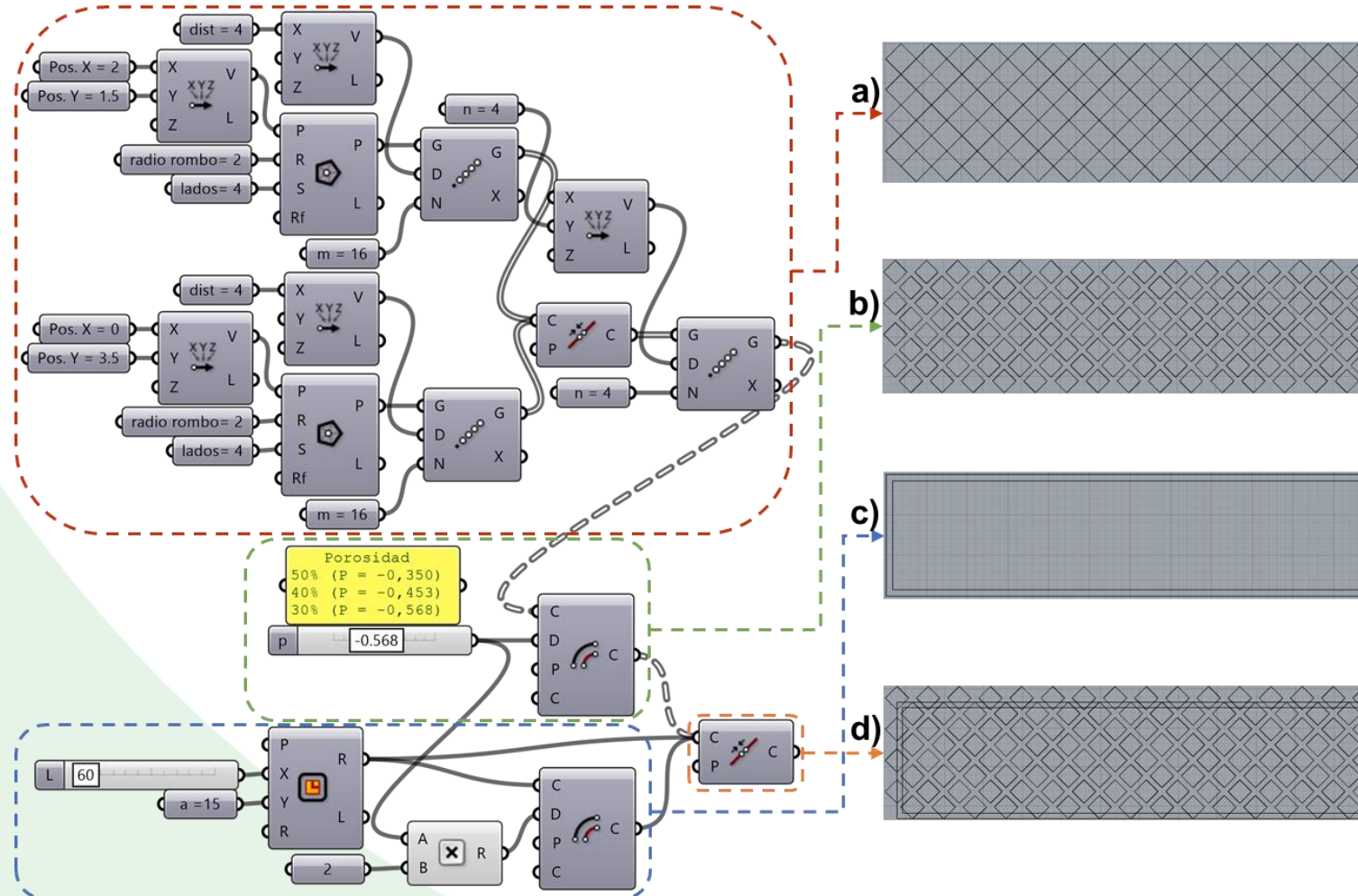
Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

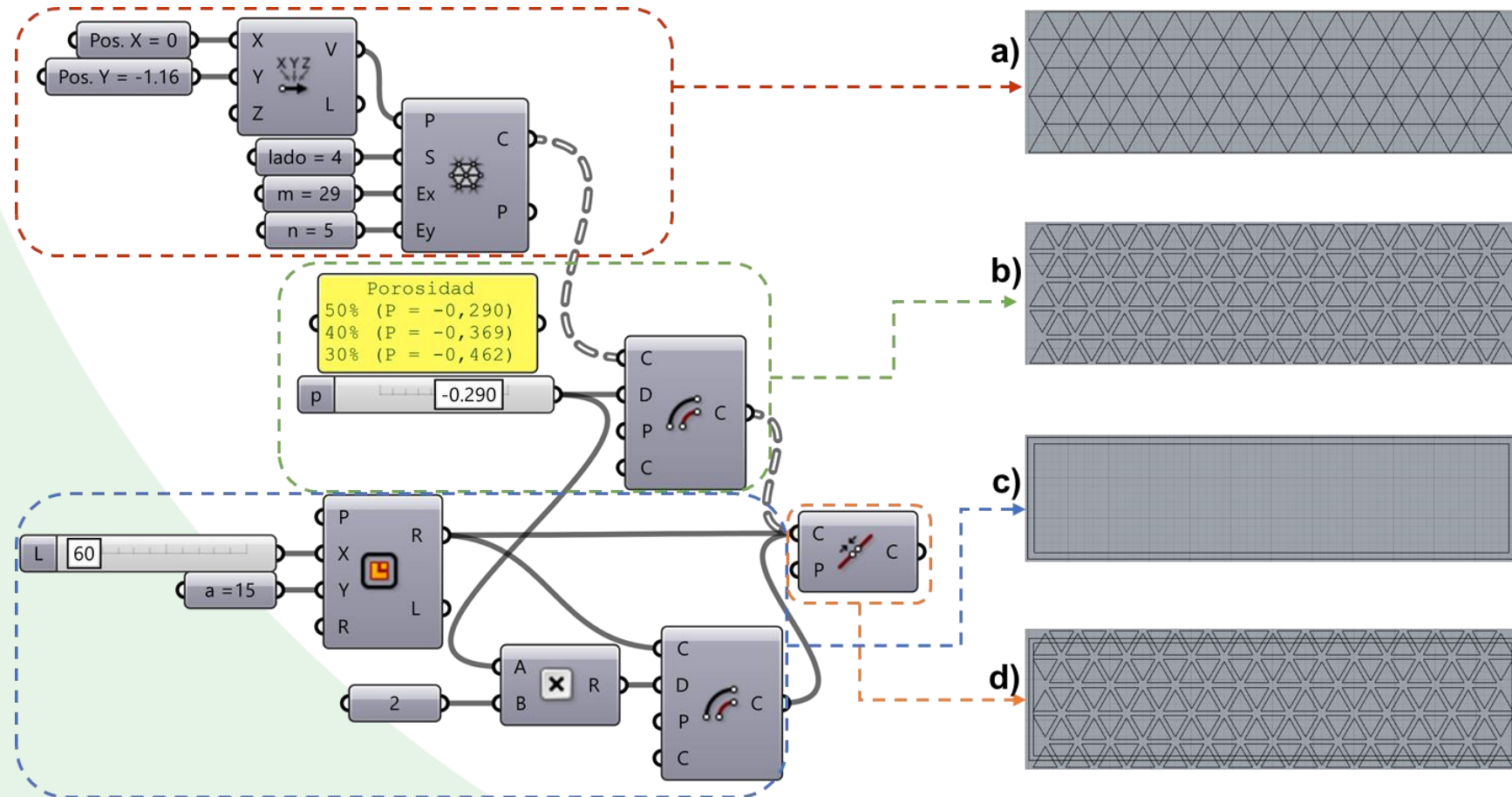


Romboide



Diseño Experimental

- Diseño de estructuras porosas tipo celosías



Triangular

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Entrenamiento del Nitinol

Metodología

Antecedentes

- Memoria de forma de 1 camino

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

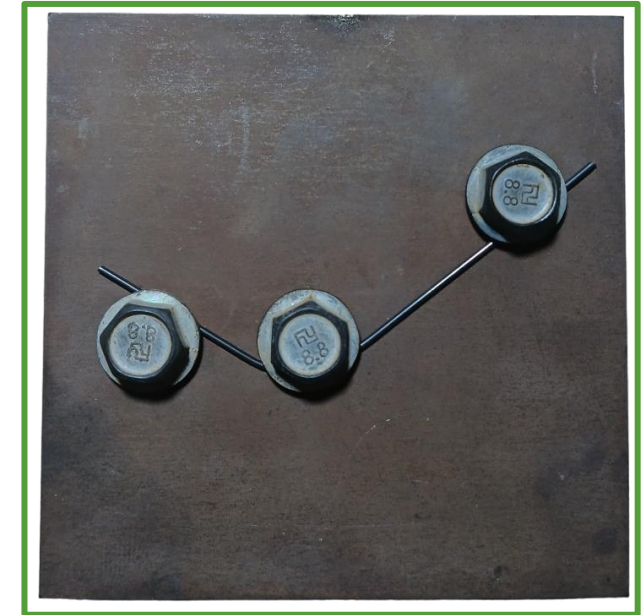


Original



Nueva

Cocción a 500°C
45 minutos



Enfriamiento rápido y lento



Entrenamiento del Nitinol

- Memoria de forma de 2 caminos

- Método Pasivo

Inducir Fuerza

$T > 40^{\circ}\text{C}$

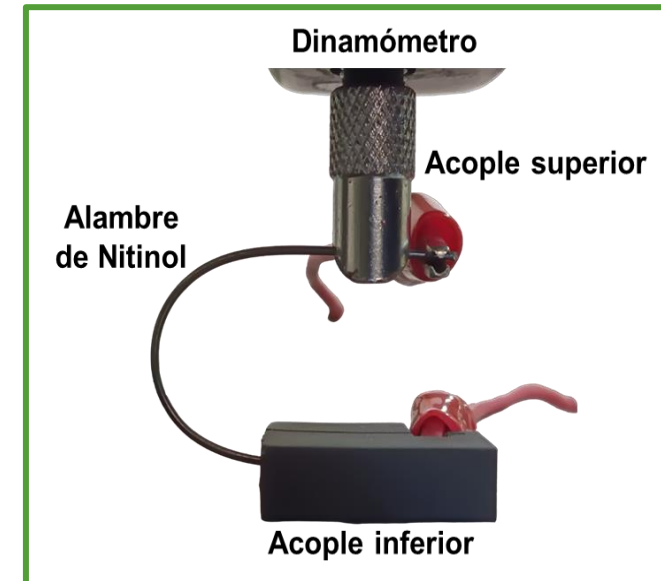
Calentamiento



T ambiente

Enfriamiento

(repetir 20 veces)



Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Integración

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

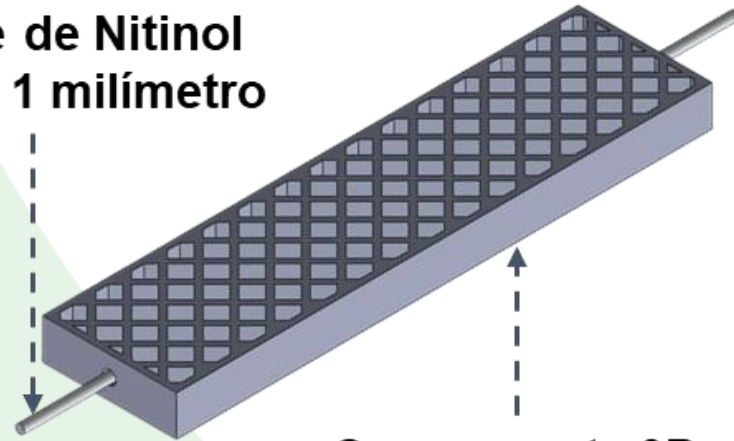
[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)

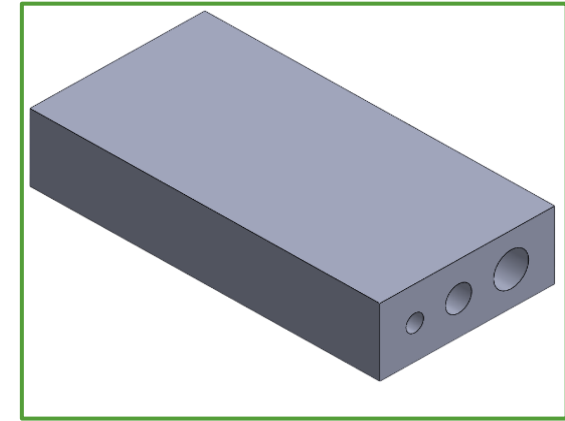
**Alambre de Nitinol
diámetro 1 milímetro**



**Componente 3D
60x15x4,5 milímetros**

Metodología

Diámetro de agujero

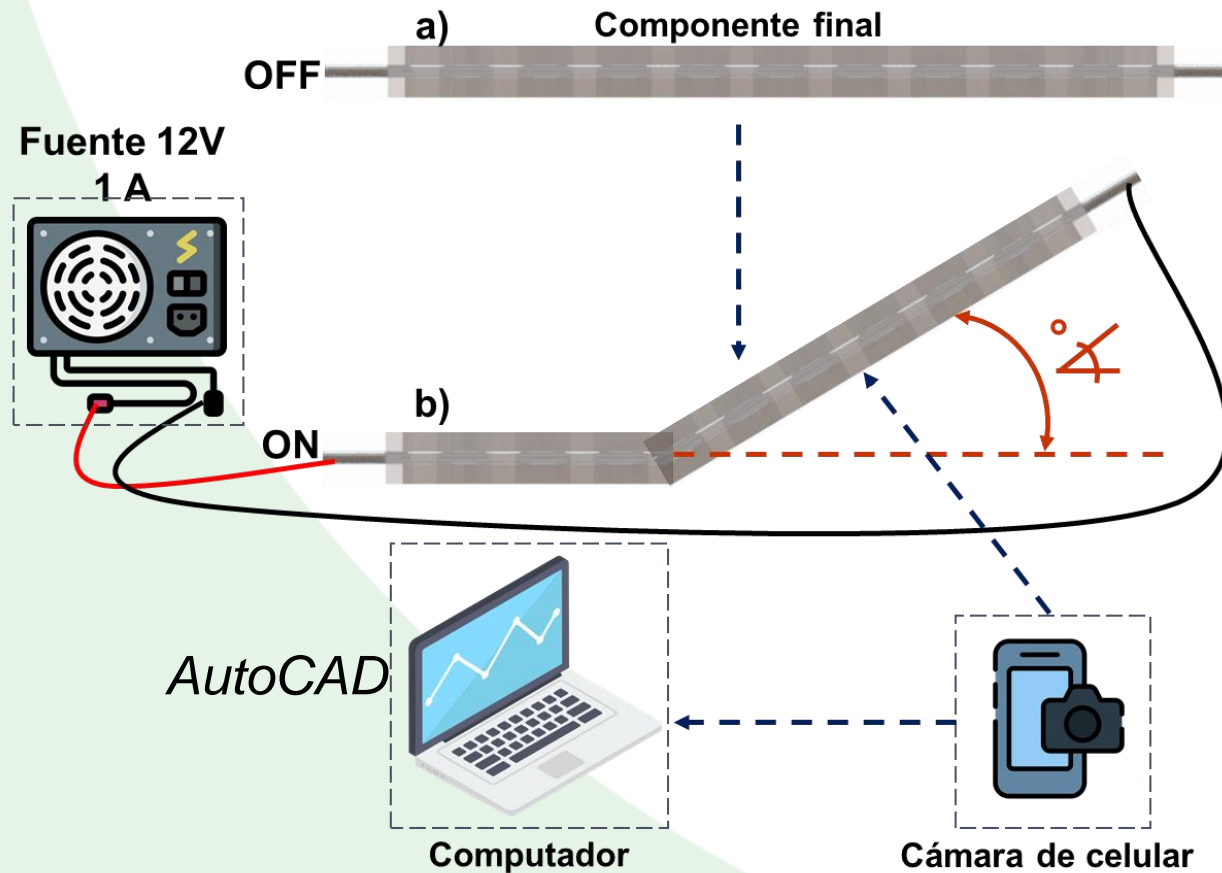


- 1 [mm]
- 1,5 [mm]
- 2 [mm]



Método de actuación

- Evaluación del diseño experimental



- Ángulo de inclinación [°]
- Tiempo [s]

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

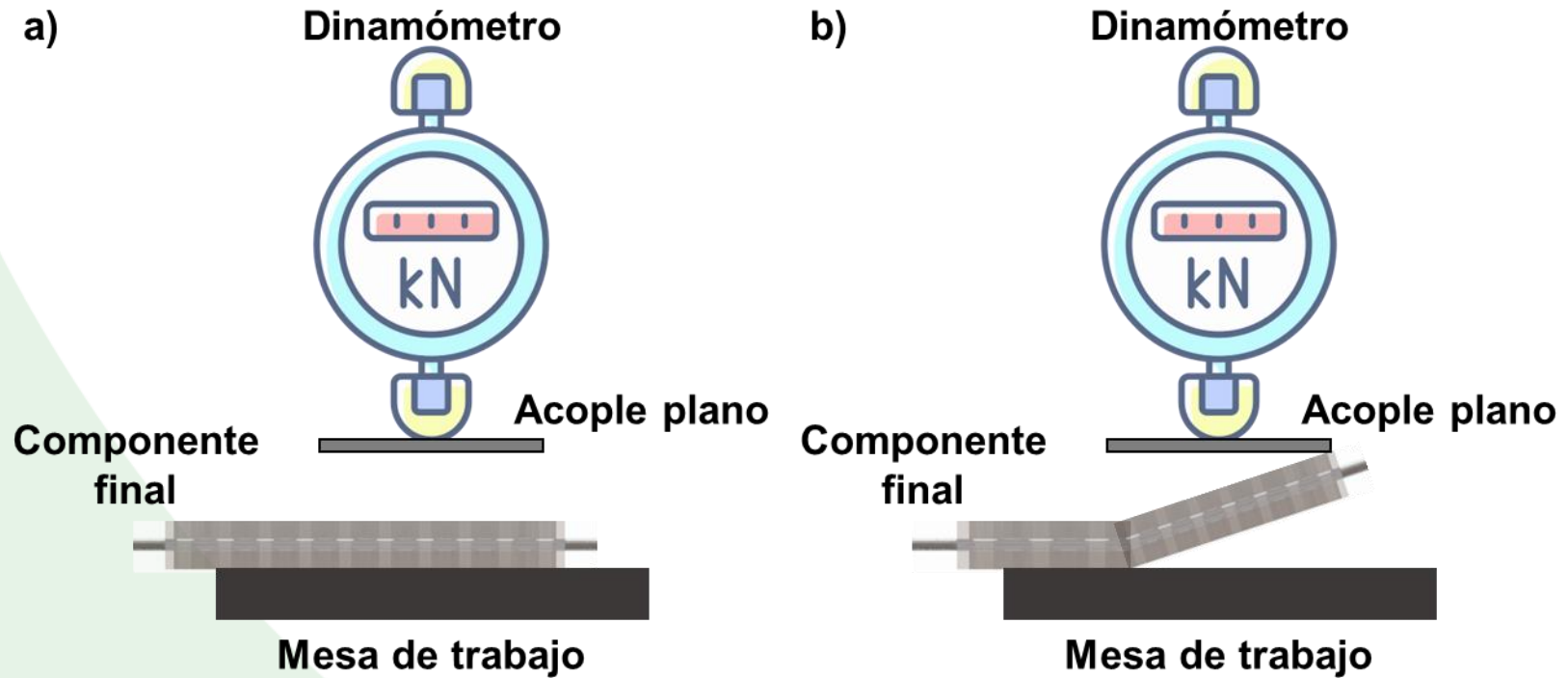
Recomendaciones

Trabajo Futuro



Validación

- Diseñar dedo como propuesta de prótesis



Fuerza máxima

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)



Caracterización Resina

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

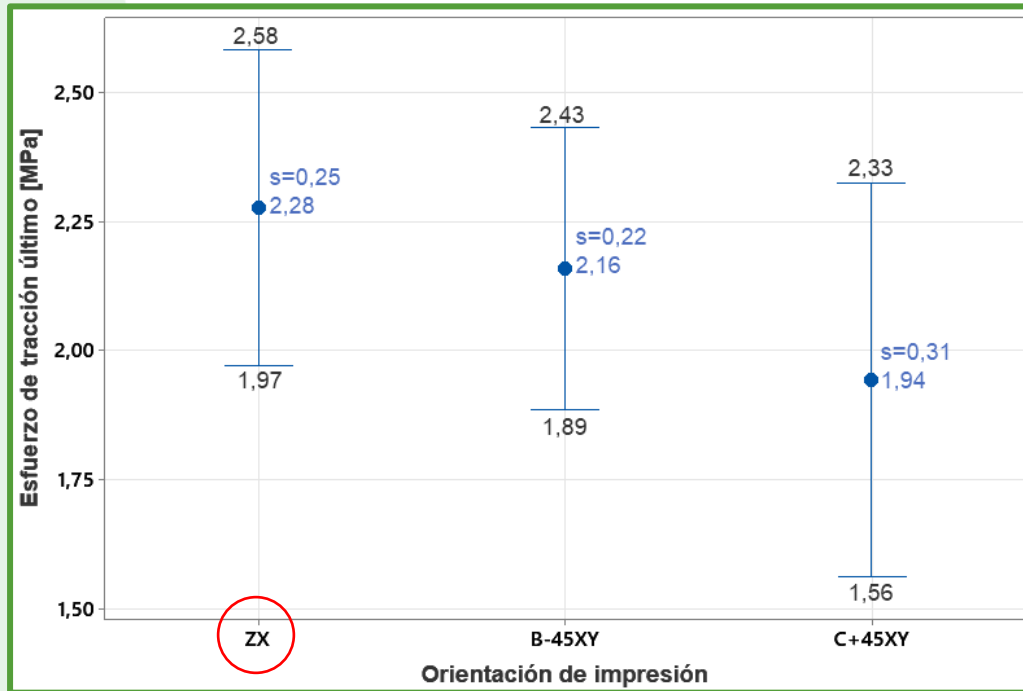
Resultados

Conclusiones

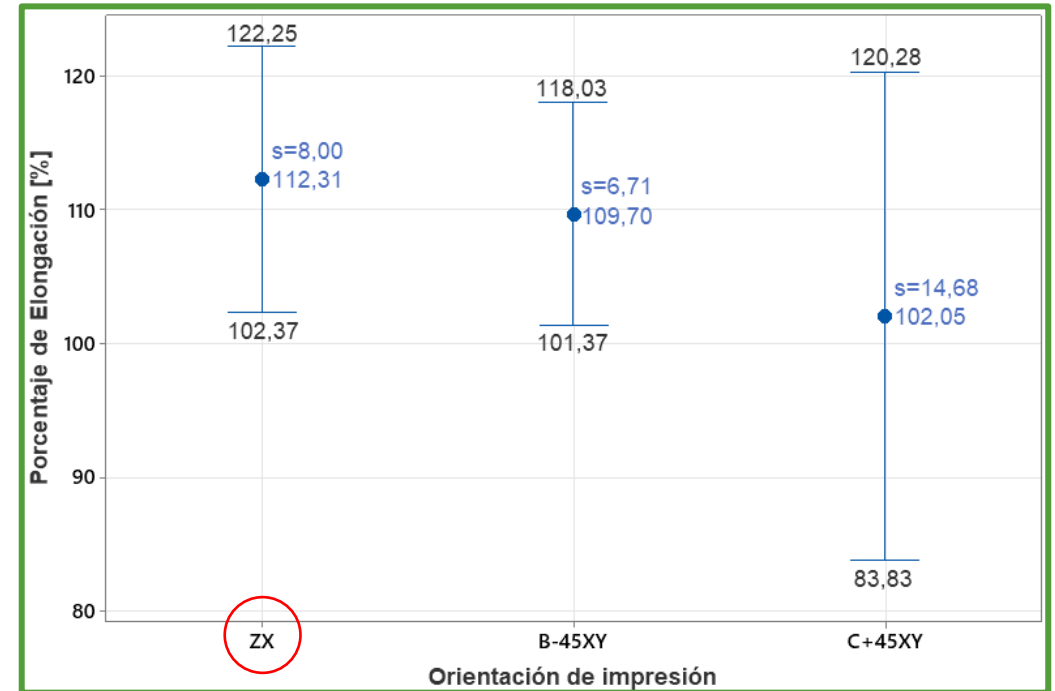
Recomendaciones

Trabajo Futuro

Esfuerzo de tracción último



Porcentaje de Elongación



Orientación ZX



Caracterización Nitinol

Característica eléctrica

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

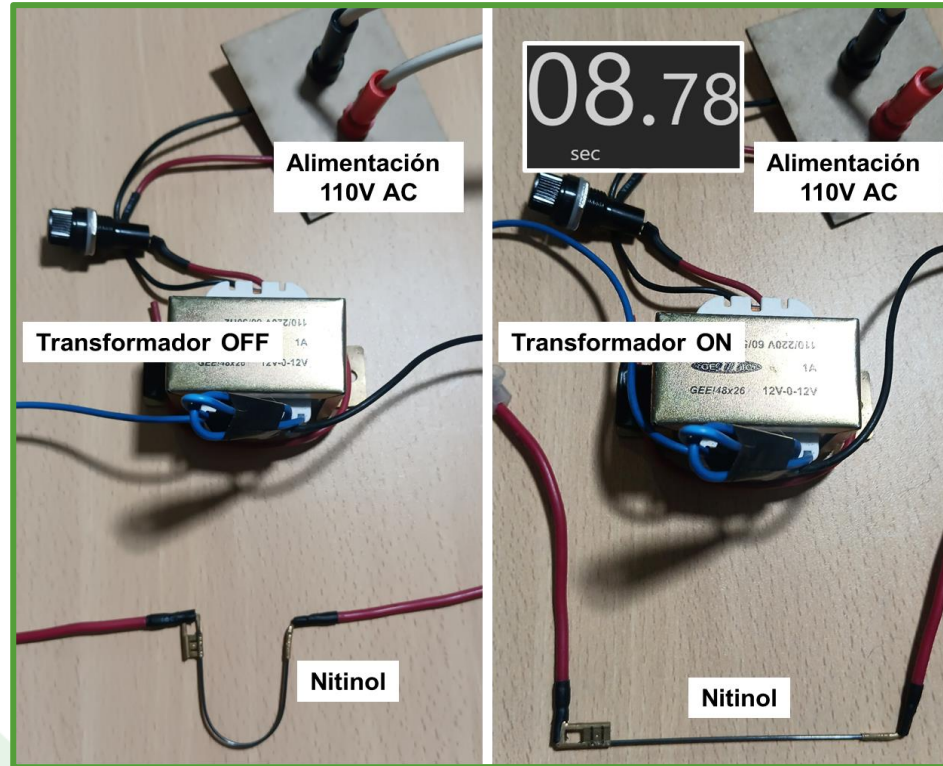
[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)

Resultados



Circuito AC



Caracterización Nitinol

Resultados

Característica eléctrica

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

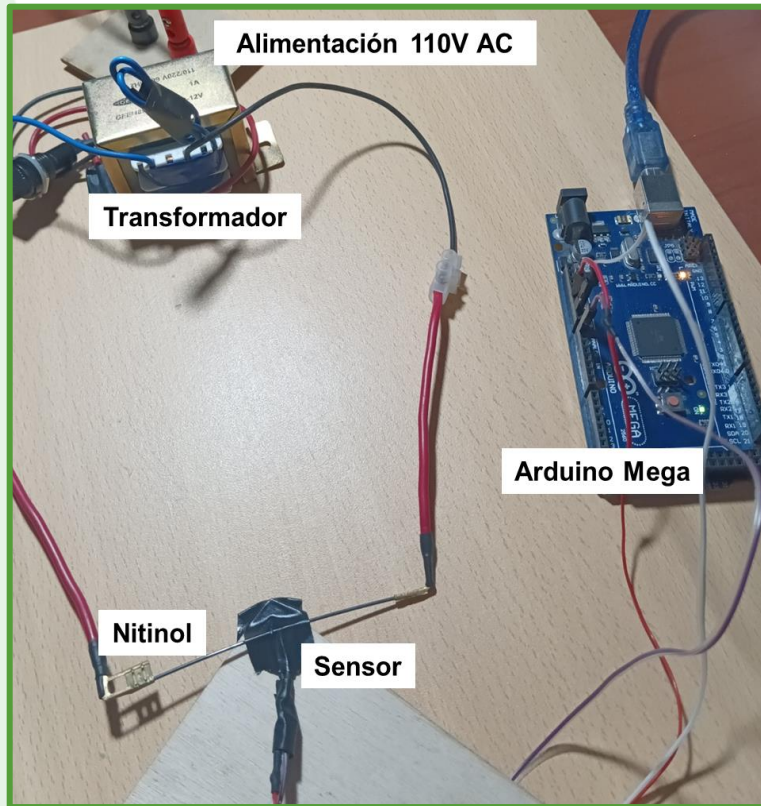
Metodología

Resultados

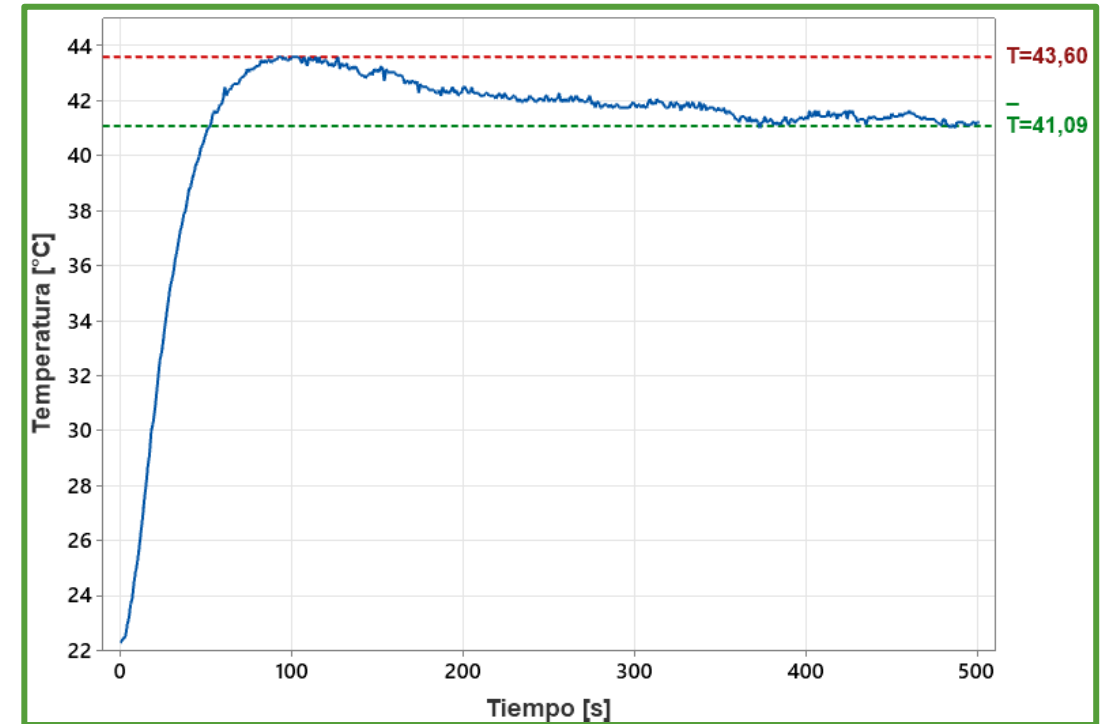
Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Curva Temperatura vs Tiempo



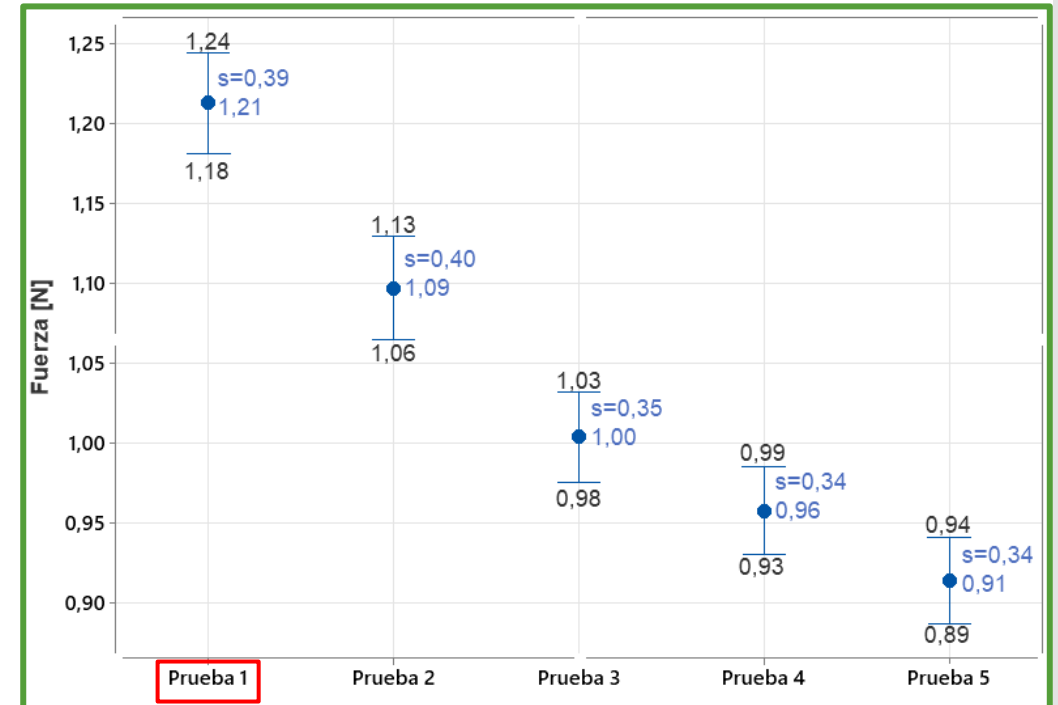
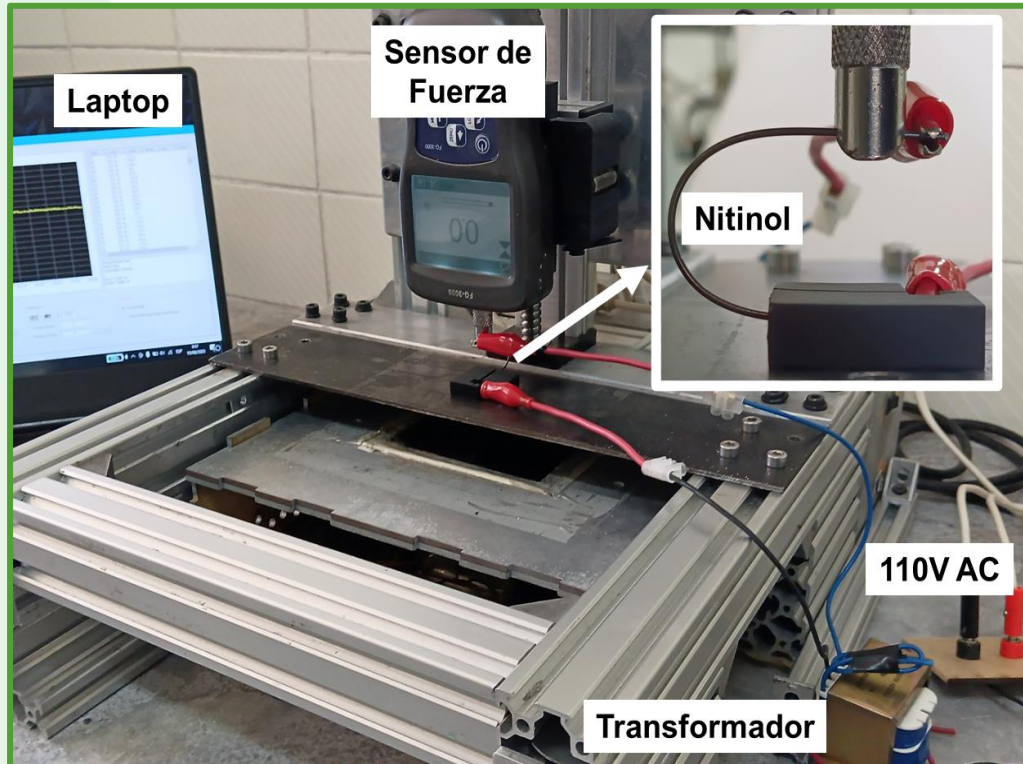
- T máxima = 43,6 [°C]
- Tiempo = 7,5 – 8 [min]



Caracterización Nitinol

Característica física

Fuerza [N]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Máxima	1,50	1,40	1,30	1,20	1,20



Fuerza máxima 1,5 [N]

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

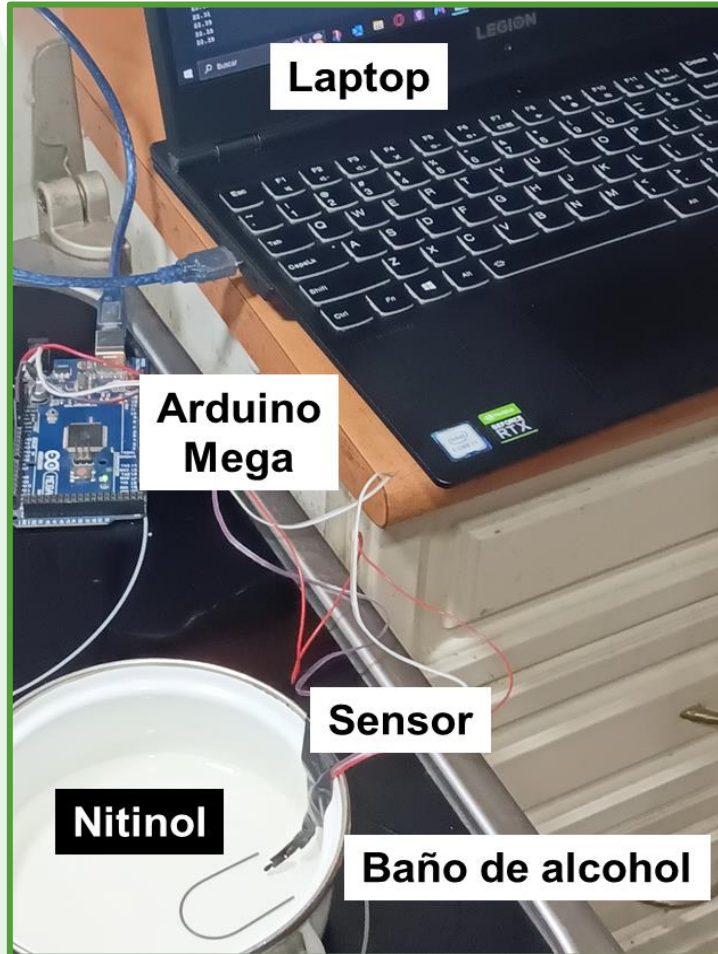
Recomendaciones

Trabajo Futuro

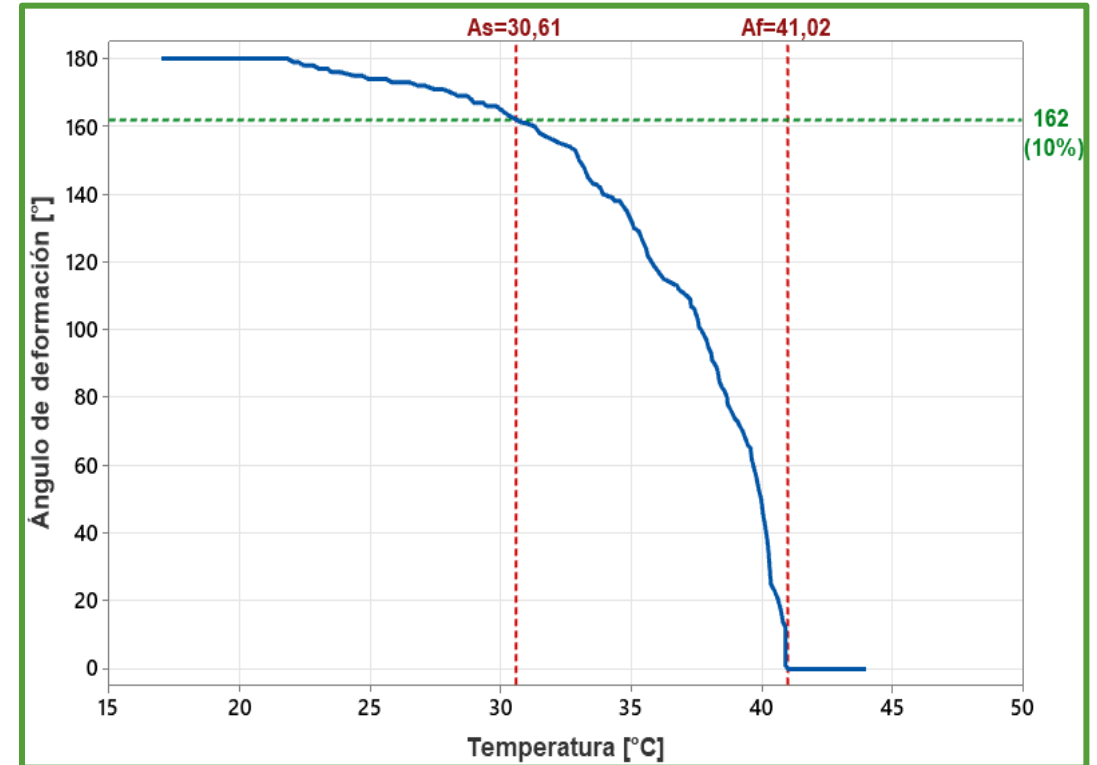


Caracterización Nitinol

Característica térmica



Curva de las TTRs



- $A_s = 30,61 [^{\circ}\text{C}]$
- $A_f = 41,02 [^{\circ}\text{C}]$

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Entrenamiento Nitinol

1 camino

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

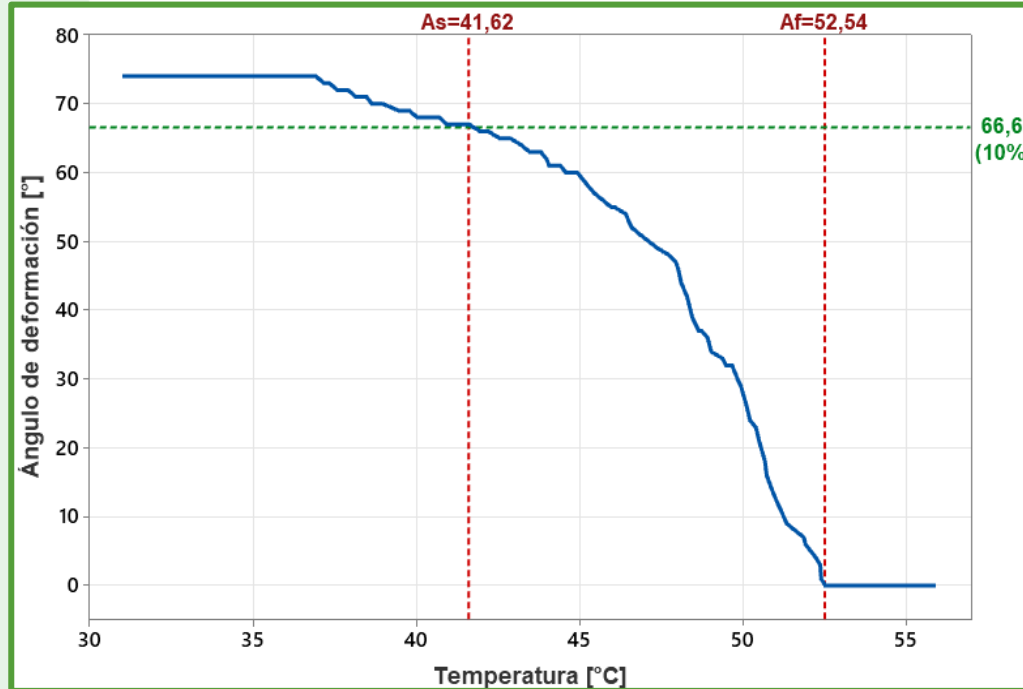
[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

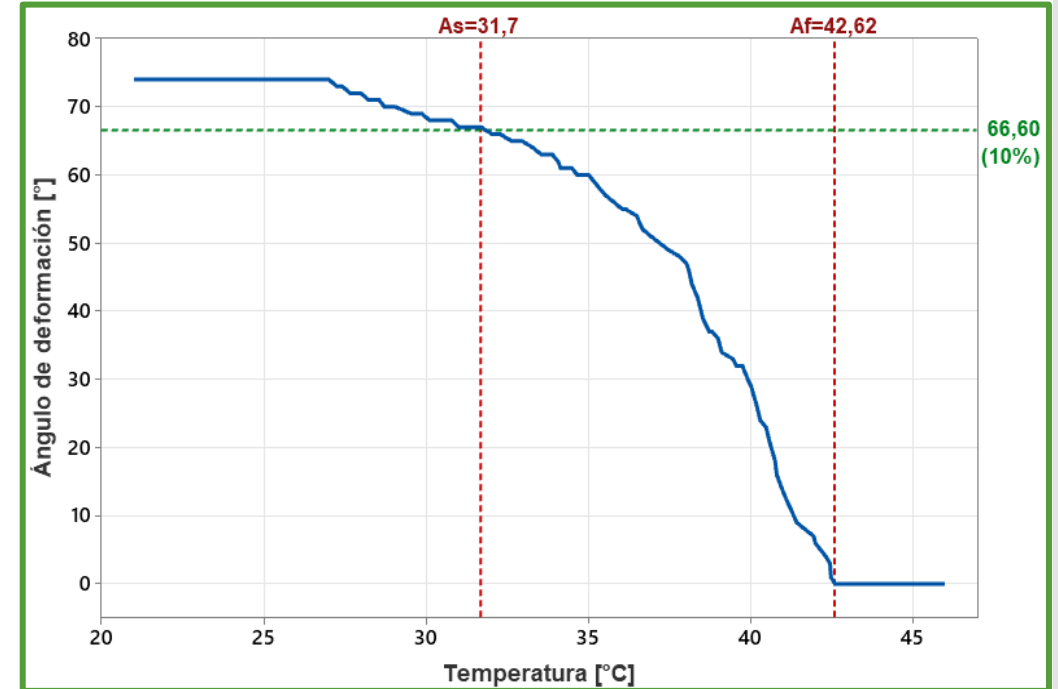
[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)

Enfriamiento rápido



Enfriamiento lento



Nitinol	Temperatura As [°C]	Temperatura Af [°C]
No entrenado	30,61	41,02
Entrenado (enfriamiento rápido)	41,62	52,54
Entrenado (enfriamiento lento)	31,70	42,62

Enfriamiento lento



Entrenamiento Nitinol

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

1 camino

2 caminos





Integración y pruebas de funcionamiento

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

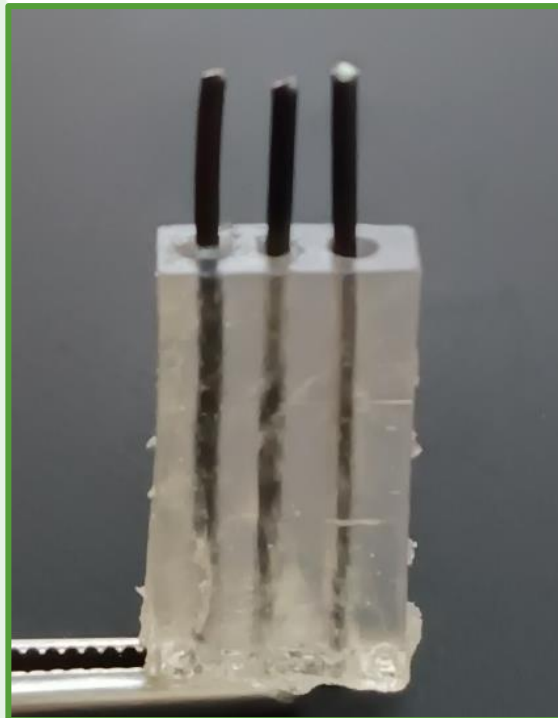
[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)

∅ Agujero



∅ 1,5 [mm]

Funcionamiento



AC: 12 [V] 1 [A] ; t = 40 [s]



Diseño experimental

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

[Resultados](#)

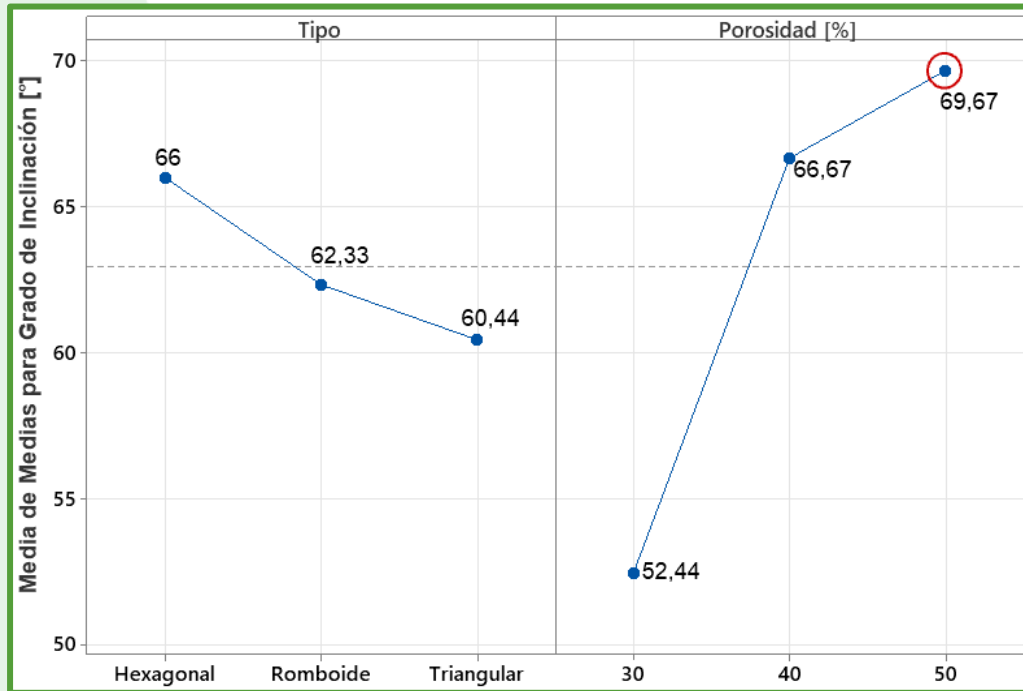
[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

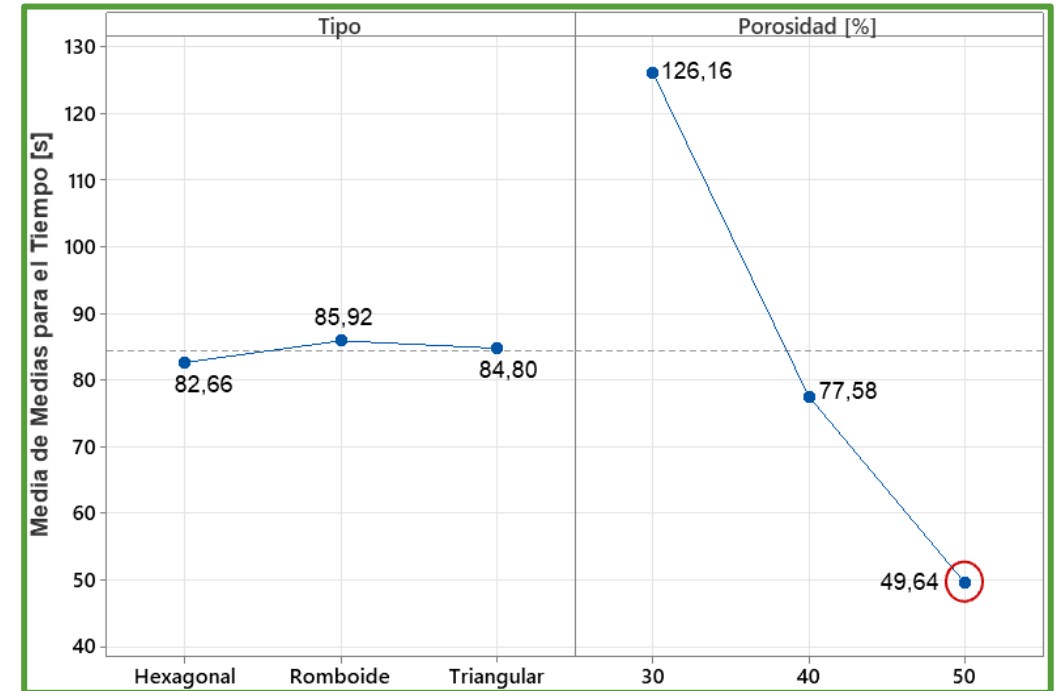
[Trabajo Futuro](#)

Gráfica de efectos principales (medias)

Grado de inclinación alcanzado



Tiempo



Más grande mejor

Porosidad 50%

Más pequeño mejor



Diseño experimental

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

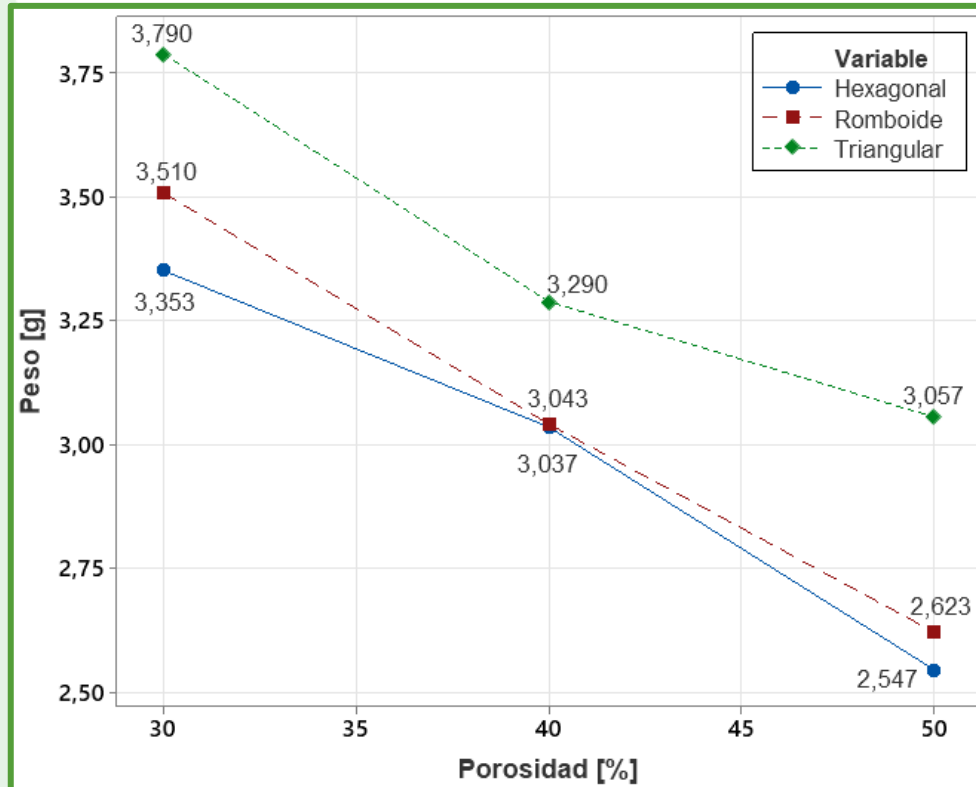
[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

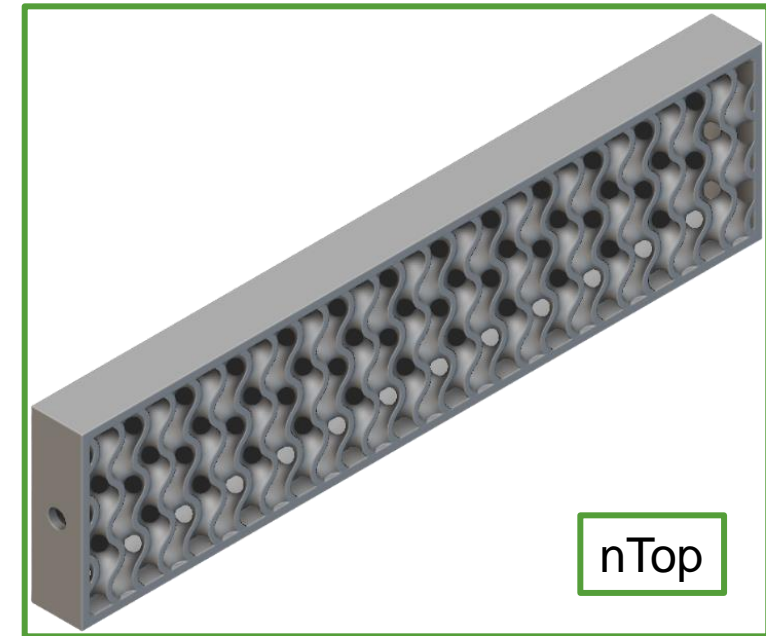
[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)

Tipo de Celosía



Nueva propuesta



Celosía Gyroid 50%



Diseño experimental

- Porosidad 50%

[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)

Grado de inclinación alcanzado

N° réplica	Gyroid	Hexagonal	Triangular	Romboide
1	70	70	69	70
2	70	70	69	70
3	70	70	69	70
Media	70	70	69	70

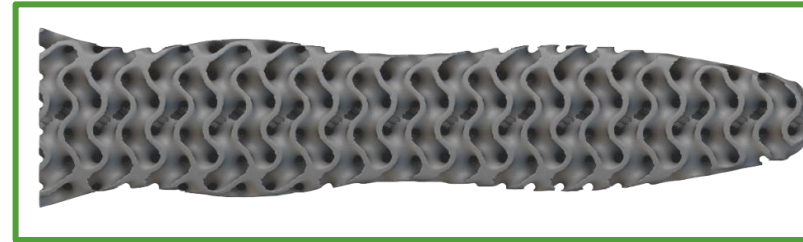
Tiempo

N° réplica	Gyroid	Hexagonal	Triangular	Romboide
1	40,75	42,90	57,23	49,15
2	41,27	42,31	56,29	49,79
3	40,82	41,28	55,89	51,89
Media	40,95	42,16	56,47	50,28
Desviación estándar	0,282	0,82	0,688	1,433

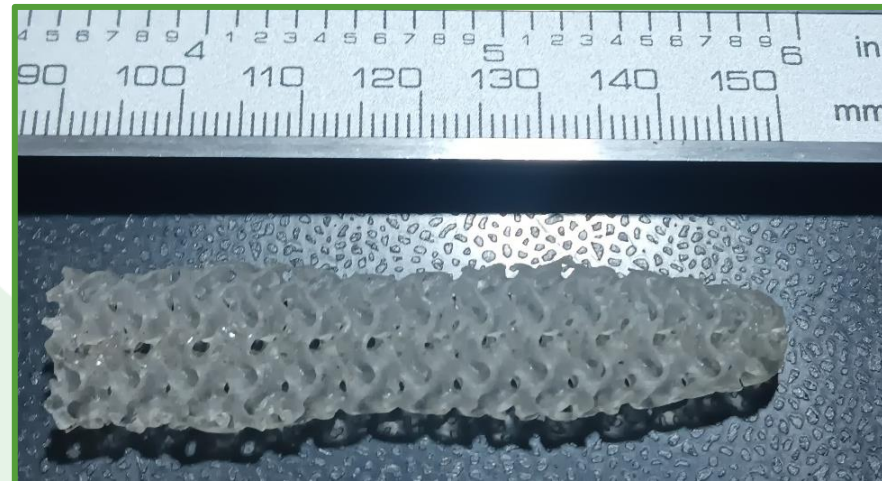


Prototipo propuesto

- Aplicación de un dedo en una prótesis / pinza o garra de sujeción



Celosía Gyroid 50%



[Antecedentes](#)

[Objetivos](#)

[Revisión de literatura](#)

[Metodología](#)

[Resultados](#)

[Conclusiones](#)

[Recomendaciones](#)

[Trabajo Futuro](#)



Pruebas de funcionamiento

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



N° Réplica	Ángulo de inclinación [°]	Tiempo [s]
1	70,00	39,17
2	70,00	38,40
3	70,00	38,85
Media	70,00	38,81
Desviación estándar	0,00	0,38



Fuerza de agarre

Antecedentes

Objetivos

Revisión de literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Medición de Fuerza



Fuerza [N]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Media	0,276	0,271	0,243	0,239	0,190
Máxima	0,300	0,300	0,300	0,300	0,200
Desviación estándar	0,048	0,058	0,078	0,070	0,041

- Aplicación de un dedo en una prótesis / pinza o garra de sujeción



$$F_{max} = 0,6 [N]$$

$$F = m * 9,81 [m/s^2]$$

$$m = 61,16 \approx 60 [g]$$



ECUADOR

Antecedentes

Objetivos

Revisión de
literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Conclusiones

- El uso del alambre de Nitinol como aleación de memoria de forma a través de un circuito de corriente AC permitió desarrollar un prototipo para robótica blanda en conjunto con un componente flexible impreso en 3D mediante estereolitografía el cual tiene una estructura porosa tipo celosía. El movimiento se genera mediante calor por Efecto Joule mediante corriente AC con valores de 12 [V] y 1 [A], haciendo posible una acción mecánica sin actuadores mecánicos.
- El mejor resultado para lograr un entrenamiento de memoria de forma de 1 camino en el alambre de Nitinol fue calentarlo en un horno a 500°C durante 45 minutos y realizar un enfriamiento lento para no causar un choque térmico ni afectar en las TTRs propias del material, las cuales resultaron en $A_s = 30,61$ [°C] y $A_f = 41,02$ [°C].



Conclusiones

Antecedentes

Objetivos

Revisión de
literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

- El estudio de la integración de celosías en el componente flexible permitió determinar que el tipo de celosía no afecta en la capacidad de actuación del prototipo, sin embargo, la porosidad si influye directamente, el mejor porcentaje de porosidad para garantizar una buena actuación mecánica fue del 50%.
- El prototipo final obtuvo una fuerza de agarre de 0,3 [N] lo cual garantiza que en una aplicación de pinza o dedos de una prótesis se pueda levantar objetos de hasta 60 [g].



Antecedentes

Objetivos

Revisión de
literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Recomendaciones

- Realizar la obtención de las TTRs del alambre de Nitinol mediante el uso del Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC) para comparar los resultados con el método realizado en este estudio.
- Implementar un programa de visión artificial para calcular de manera automática los ángulos de inclinación del prototipo reduciendo el tiempo en el procesamiento manual de dichos datos.



Trabajo Futuro

- Con el estudio realizado de la integración de un componente flexible impreso en 3D y el alambre de Nitinol, se propone como trabajo futuro diseñar y fabricar una garra mecánica flexible para una aplicación de recolección de objetos frágiles y comparar con una ventosa, mostrando las ventajas de usar una aleación de memoria de forma como actuador mecánico.

Antecedentes

Objetivos

Revisión de
literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro



Antecedentes

Objetivos

Revisión de
literatura

Metodología

Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Trabajo Futuro

Gracias por su atención