

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Diseño y construcción de un banco de pruebas para medir velocidad y torque en sistemas reductores Harmonic Drive de tipo flexible y por engranajes planetarios

Autores: Arguello Moreira, Cristhian Jefferson

Mendoza Quezada, Haminton Emanuel

Director: Ing. Olmedo Salazar, José Fernando

2023





CONTENIDO

- Antecedentes y justificación
- Fundamentación teórica
- Generación de conceptos
- Diseño y construcción
- Pruebas y resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones y trabajos futuros



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Objetivos

- General
 - Diseñar y construir un banco de pruebas para medir velocidad y torque en sistemas reductores Harmonic Drive y por engranajes planetarios, que permita elaborar una práctica de laboratorio para el aprendizaje de los mecanismos reductores no convencionales.
- Objetivos específicos
 - Diseñar y construir los mecanismos reductores de tipo Harmonic Drive y por engranajes planetarios, mediante el uso de software de diseño.
 - Diseñar y construir la estructura para el montaje de las partes que conforman el prototipo, considerando los esfuerzos provocados por los mecanismos.
 - Diseñar y construir el circuito de control, mediante el dimensionamiento y selección de los componentes electrónicos que permiten la correcta instrumentación.
 - Diseñar e implementar un algoritmo que permita ejecutar las pruebas de velocidad y torque, la acción de un botón de paro y el modo manual para ubicar los actuadores en la posición deseada para tareas de mantenimiento.



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Antecedentes

- Reductor Harmonic Drive
 - En 1955 Walt Musser desarrollo el reductor bajo el principio de un engranaje flexible que se desplaza sobre una corona rígida mediante el giro de una leva que deforma el elemento flexible.
 - Ventajas: diseño compacto, alta relación de reducción, alto torque (debido a que varios dientes están en contacto), no presenta backlash





Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Antecedentes

- Reductor por engranajes planetario o epicicloidal
 - Los trenes de engranajes planetarios o epicicloidales han sido ampliamente utilizados en la industria automotriz para las cajas de transmisión automática
 - Características: alta relación de reducción , concetricidad de entrada/salida, alto torque, tamaño compacto y la disposición permite un diseño modular para acoplar varios niveles de reducción





Antecedentes

Antecedentes y
justificación

- En Ecuador, estos mecanismos no se consideran de forma habitual para el desarrollo de proyectos, por lo que generalmente las máquinas o sistemas que se producen de forma local pueden llegar a ser bastante voluminosos. Por otra parte, suele limitarse la selección de actuadores a aquellos con una potencia elevada para suplir la demanda de torque.
- Como punto de partida, a nivel local se han encontrado investigaciones relacionadas únicamente con reductores planetarios en el área de ingeniería automotriz. En el caso de los mecanismos de tipo Harmonic Drive, no se han encontrado investigaciones previas relacionadas.

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros



Justificación e importancia

Antecedentes y justificación

- A pesar de que el uso de reductores compactos se ha extendido debido a la necesidad de reducir peso y espacio en campos como la robótica, equipos de ensamblaje y herramientas, estos mecanismos aún no se consideran de forma local como parte de la solución cuando se requiere un reductor.
- La importancia de difundir y expandir el conocimiento de mecanismos de reducción compactos radica en ampliar las posibilidades de desarrollar soluciones más adecuadas en el diseño de máquinas o mecanismos para la industria ecuatoriana, permitiendo un avance importante en la calidad de los productos desarrollados.

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Harmonic Drive

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros

Circular Spline



Flex Spline



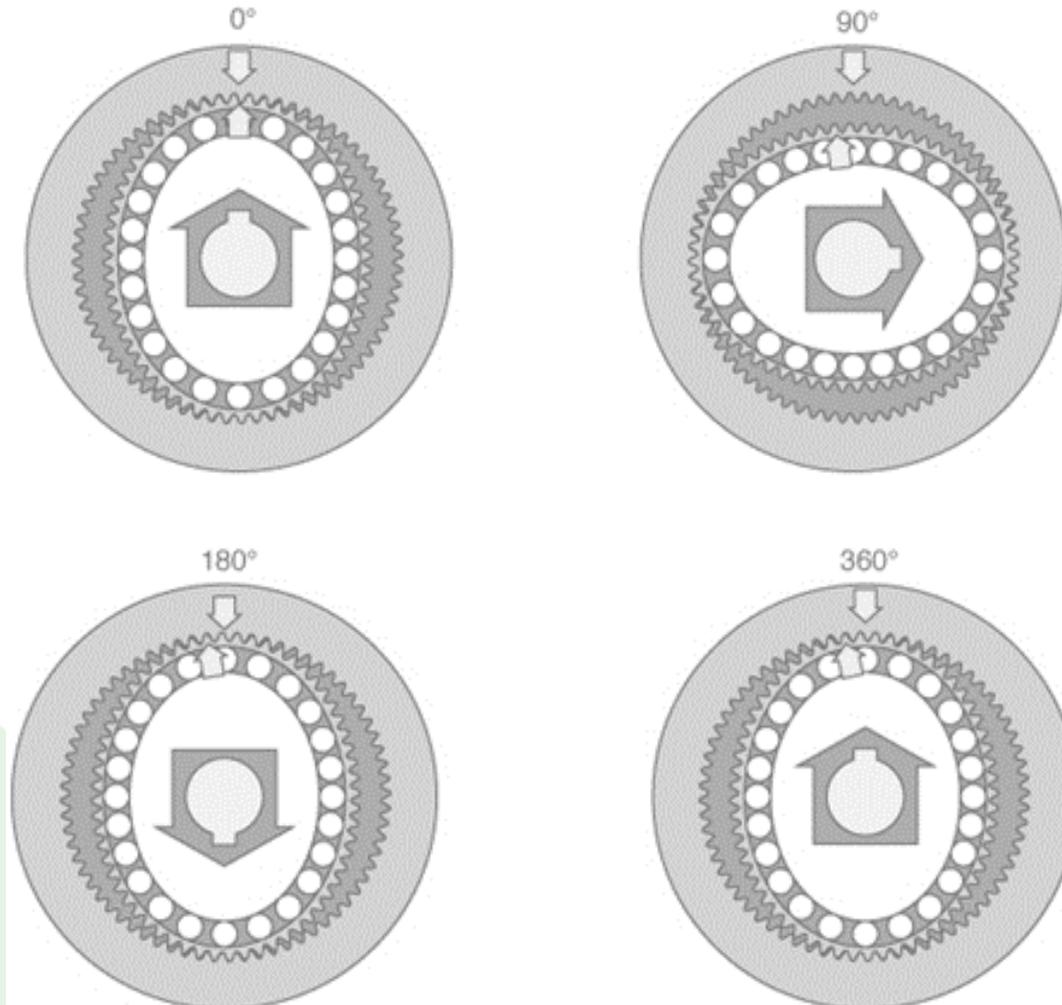
Wave Generator





Harmonic Drive

Avance angular progresivo del FlexSpline al completarse una revolución del Wave Generator



Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Reductor Planetario

Se compone de tres elementos que permiten el movimiento: engranaje solar, planetario que gira alrededor del sol y la corona, adicionalmente un brazo que mantiene en órbita al planeta

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

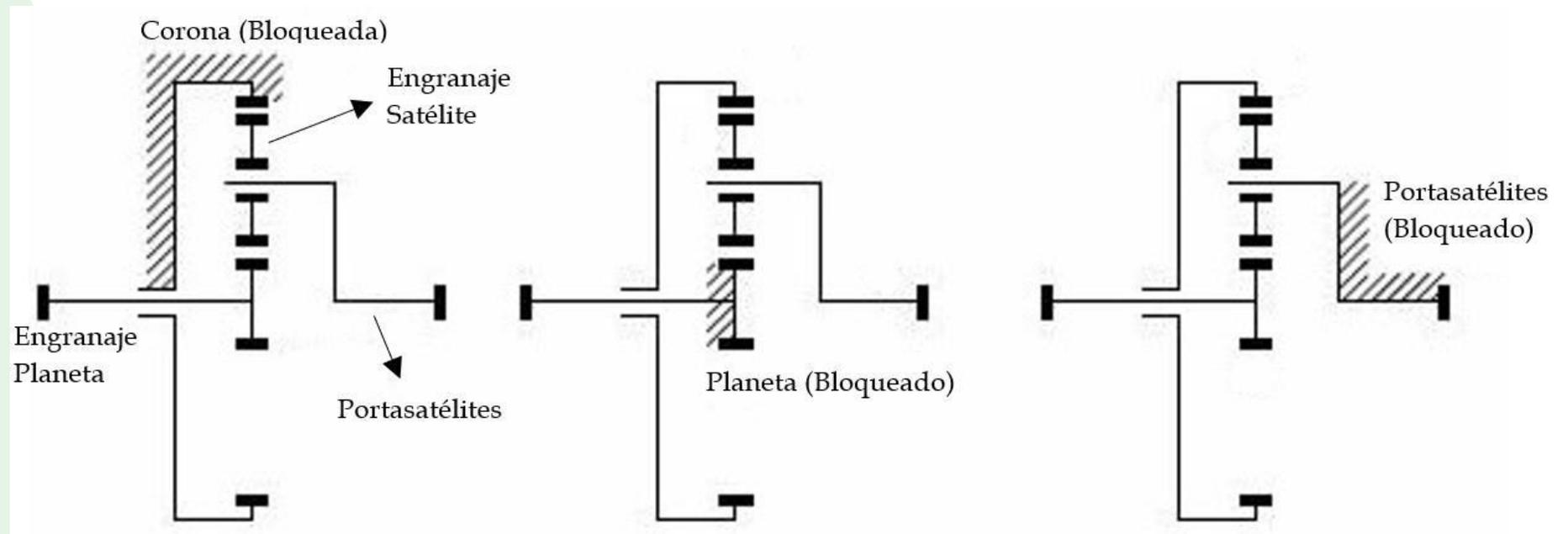
Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

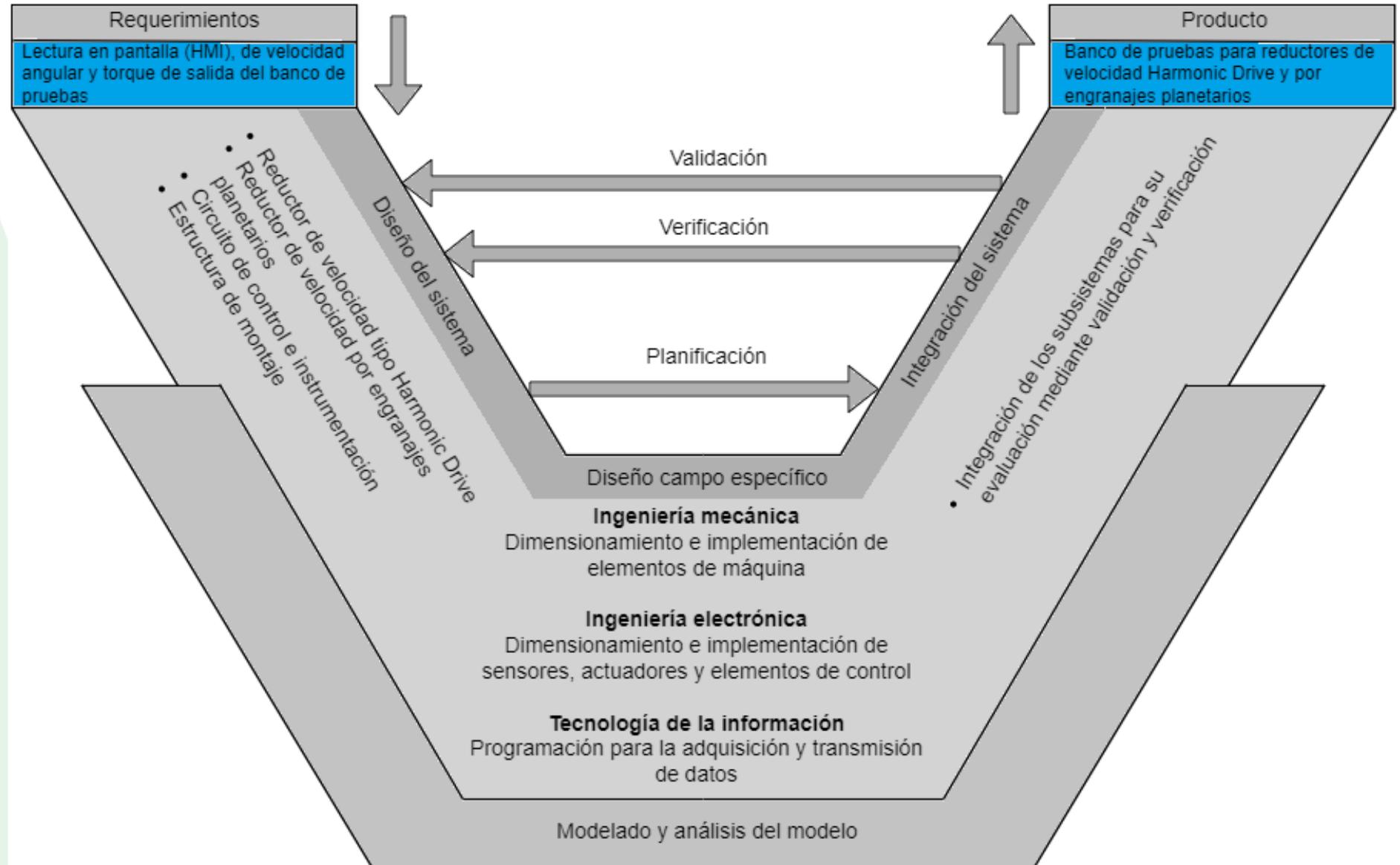
Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros





Metodología



Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Subsistemas del banco de pruebas

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

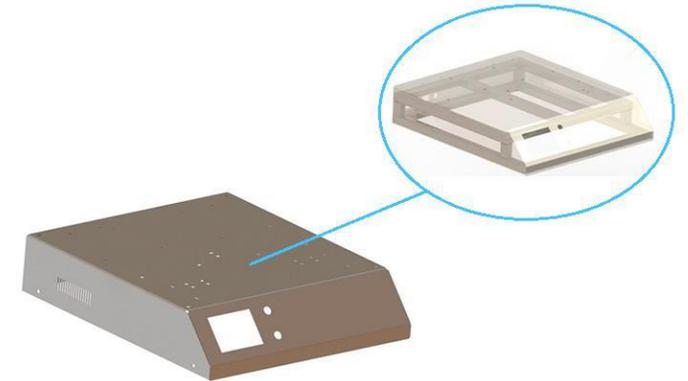
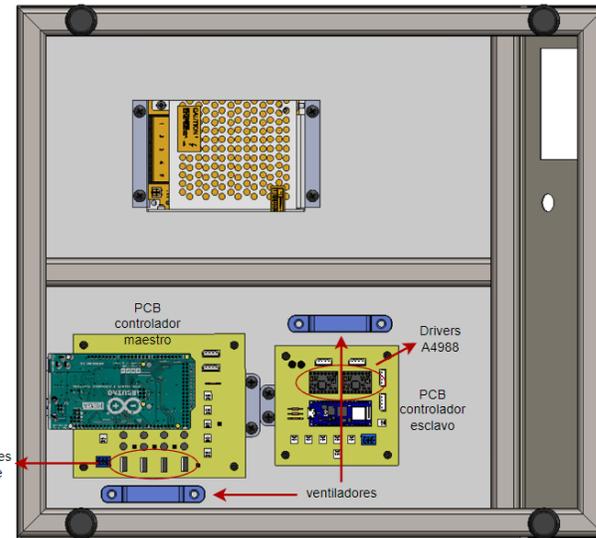
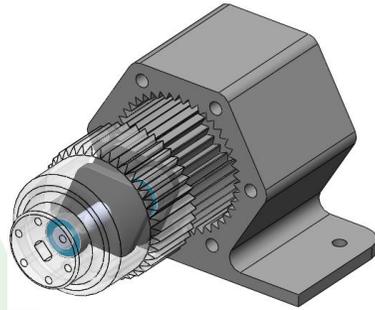
Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros

- Subsistema de reducción
- Subsistema de instrumentación
- Subsistema estructural





Selección del motor para los mecanismos reductores

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros

Criterio	Peso	Motor DC		Motor a pasos		Servomotor	
		Calif	Eval. ponderada	Calif	Eval. ponderada	Calif	Eval. ponderada
Costo (mayor costo/ menor calificación)	20%	3	0,6	2	0,4	1	0,2
Control	30%	1	0,3	3	0,9	3	0,9
Precisión	20%	1	0,2	3	0,6	3	0,6
Disponibilidad	10%	3	0,3	2	0,2	1	0,1
Espacio	20%	3	0,6	2	0,4	1	0,2
Suma	100%		2		2,5		2



Selección del material para la construcción de los mecanismos

Criterio	Peso	Material					
		PLA		PETG		ABS	
		Calif	Eval. ponderada	Calif	Eval. ponderada	Calif	Eval. ponderada
Resistencia a la tracción	30%	3	0,9	2	0,6	1	0,3
Temperatura de deflexión	10%	1	0,1	2	0,2	3	0,3
Resistencia al impacto	10%	1	0,1	3	0,3	2	0,2
Calidad del acabado	30%	3	0,9	2	0,6	2	0,6
Disponibilidad	20%	3	0,6	2	0,4	2	0,4
	100%		2,6		2,1		1,8

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Selección del controlador para el banco de pruebas

Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Criterios de selección	Peso	Concepto			
		Arduino		Raspberry Pi	
		Calif.	Eval. ponderada	Calif.	Eval. ponderada
Costo (mayor costo /menor calificación)	20%	3	0.6	2	0.4
Entorno de programación	20%	3	0.6	2	0.4
Robustez	20%	2	0.4	3	0.6
Multiplataforma	10%	3	0.3	1	0.1
Fiabilidad	15%	2	0.3	3	0.45
Disponibilidad	15%	3	0.45	2	0.3
	100%		2.65		2.25

- Controlador maestro: Arduino Mega 2560
- Controlador esclavo: Arduino nano



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Selección de la HMI



Pantalla TFT Nextion serie T

- Comunicación serial UART que facilita la comunicación con el controlador principal.
- Entorno de programación optimizada para la implementación de interfaces hombre-máquina (HMI).
- No requiere recursos del controlador, ya que cuenta con su propio procesador y memoria integrados.
- Amplia variedad de modelos y tamaños, lo que permite seleccionar la opción más adecuada para cada proyecto.



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Diseño mecánico

• Harmonic Drive (Diseño geométrico y mecánico de los engranajes)

• Corona

- Módulo: $m = 1.25 \text{ mm}$
- Número de dientes: $N_R = 42$
- Diámetro primitivo: $D_R = 52.5 \text{ mm}$

$$\tau = 1.6 \frac{T_o}{r^2 \cdot B} = 1.456 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \cdot \tau = 2.52 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} = 3.41$$

• Engranaje flexible

- Módulo: $m = 1.25 \text{ mm}$
- Número de dientes: $N_E = 40$
- Diámetro primitivo: $D_E = 50 \text{ mm}$

$T_o = 10 \text{ [Nm]}$: torque de salida

$r = 23.44 \text{ [mm]}$: radio del anillo

$B = 20 \text{ [mm]}$: ancho de cara

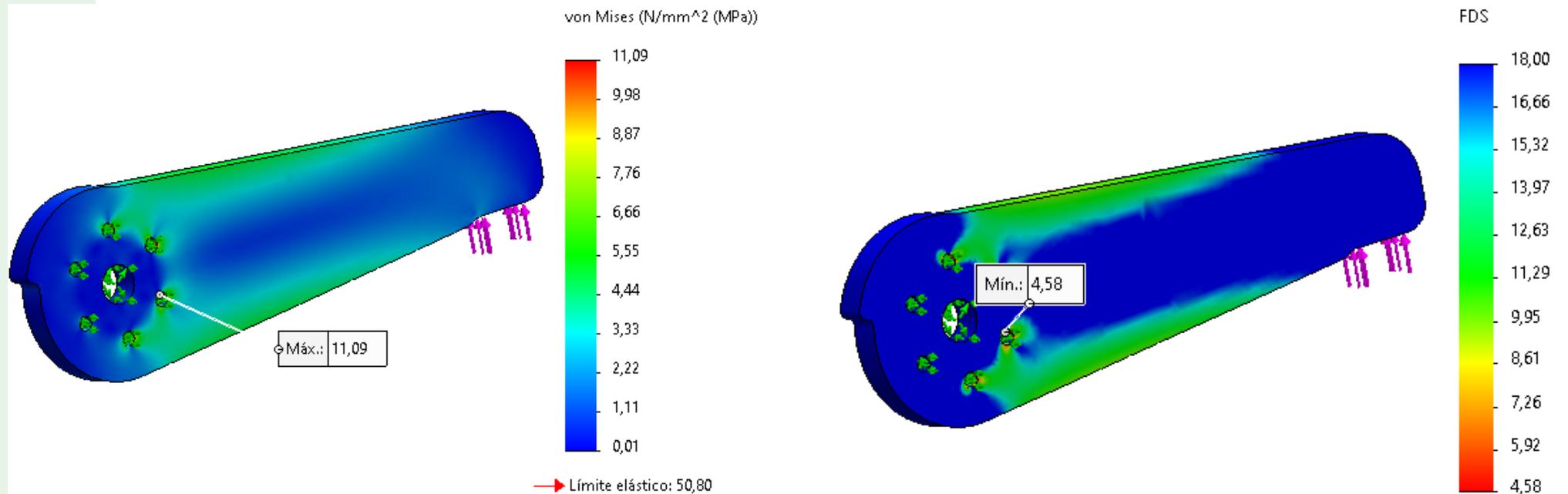


Diseño mecánico

- Harmonic Drive (Diseño del brazo de salida)

Tomando en cuenta el torque de salida (10 Nm) se determina la fuerza aplicada al extremo del brazo

$$F_b = \frac{T_o}{d_b} = 100 \text{ N}$$



Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Diseño mecánico

- Harmonic Drive (Diseño del brazo de salida)

El gráfico de convergencia empleando el mallado adaptativo h, con una precisión del 99%

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

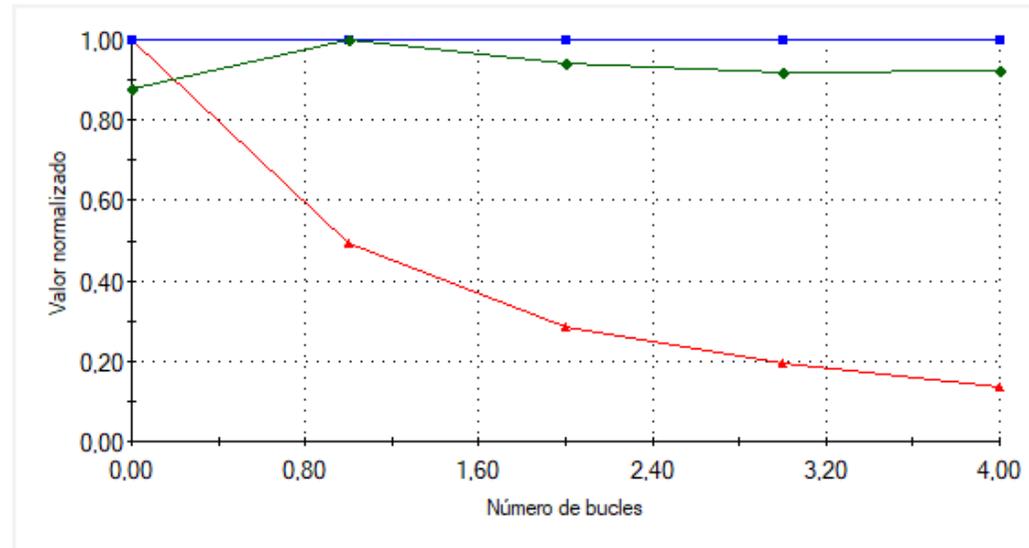
Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros

Gráfico de convergencia de método h



Criterio global: Error total de norma de energía de deformaciones unitarias relativa < 0.834028%

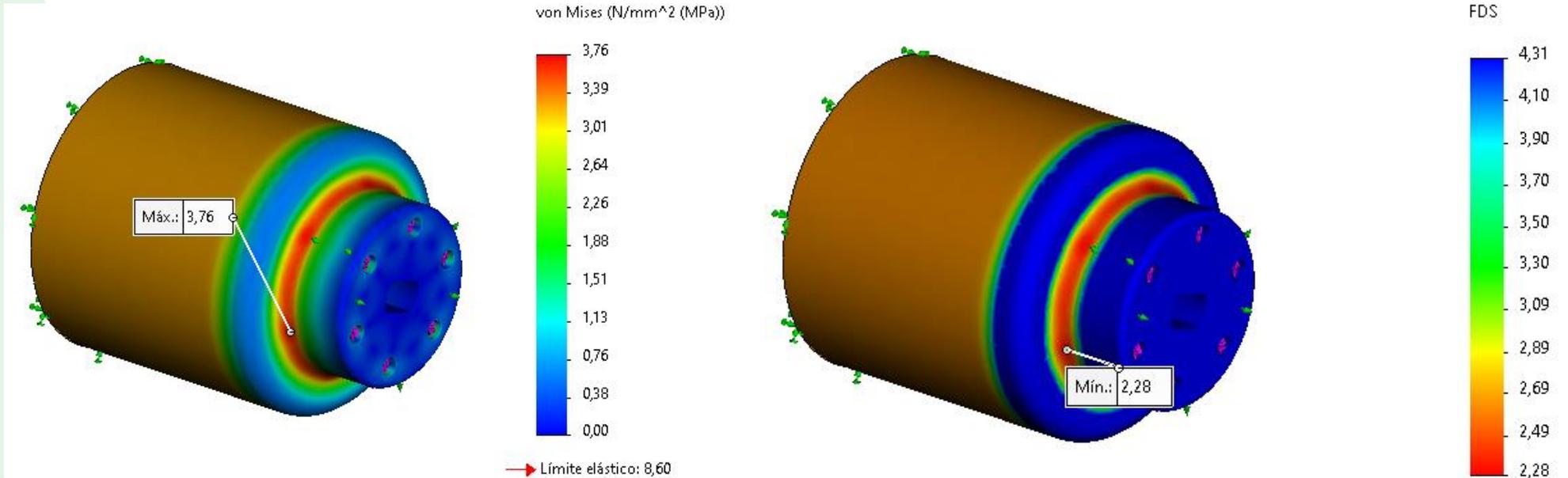
—▲— Nivel de precisión —■— Desplazamiento resultante máximo —●— Máxima tensión de von Mises



Diseño mecánico

- Harmonic Drive (engranaje flexible)

Se realizó el análisis de tensiones del engranaje flexible de la segunda etapa debido a que dicha etapa es aquella que soporta mayores esfuerzos.



Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Diseño mecánico

- Reductor planetario (Diseño de engranajes)

$$F_t = \frac{2 \cdot T_s}{D_{ps}} = 50 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{F_t}{F \cdot m \cdot J} \cdot K_o \cdot K_m \cdot K_s \cdot K_b \cdot K_v$$

F_t : fuerza tangencial

F : ancho de cara

J : factor geométrico

K_o : factor de sobrecarga

K_m : factor de distribución de carga

K_s : factor de tamaño

K_b : factor de espesor del aro

K_v : factor dinámico

$$\sigma = 12.04 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{S_{yPLA}}{\sigma} = 4.22$$

Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

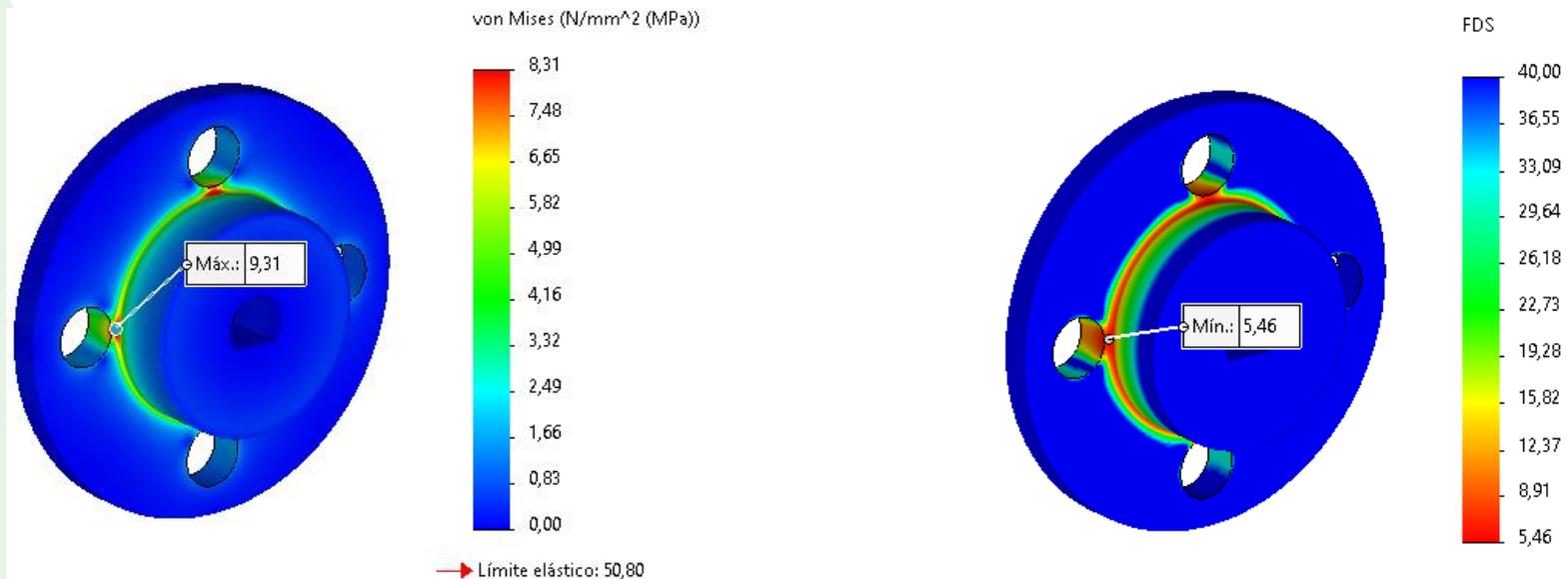
Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros



Diseño mecánico

- Reductor planetario (Porta planetas de la etapa 3)



Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Diseño mecánico

- Reductor planetario (Brazo de salida)

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

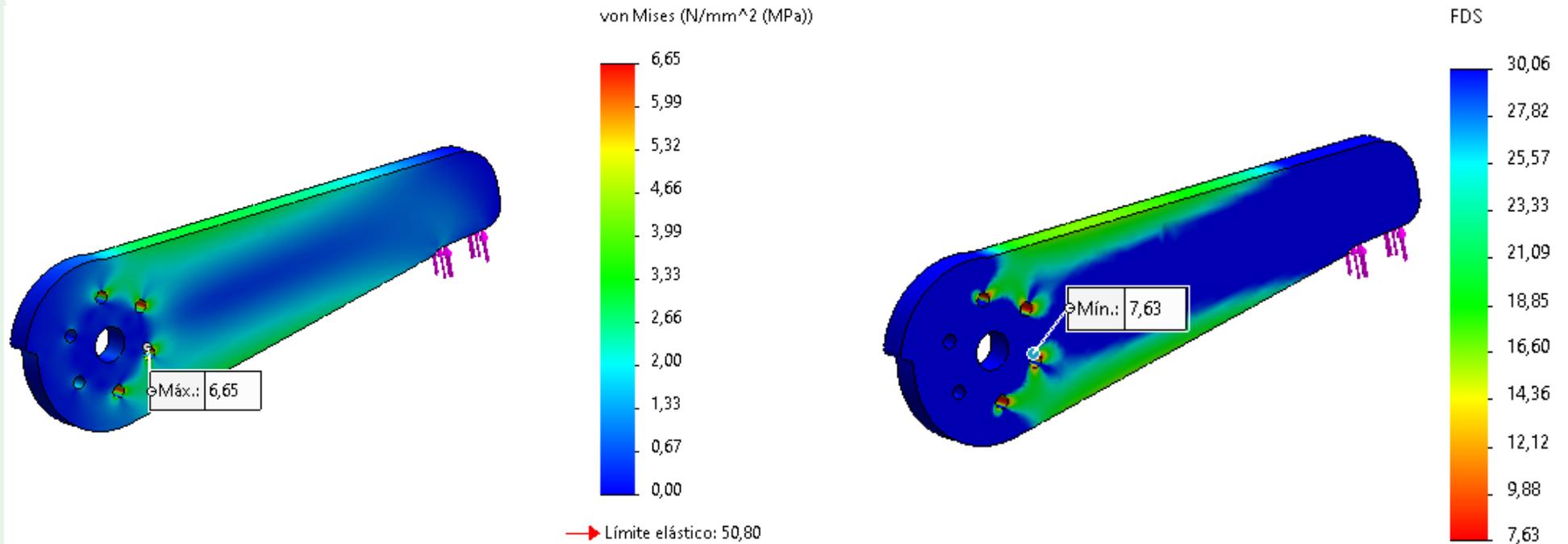
Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

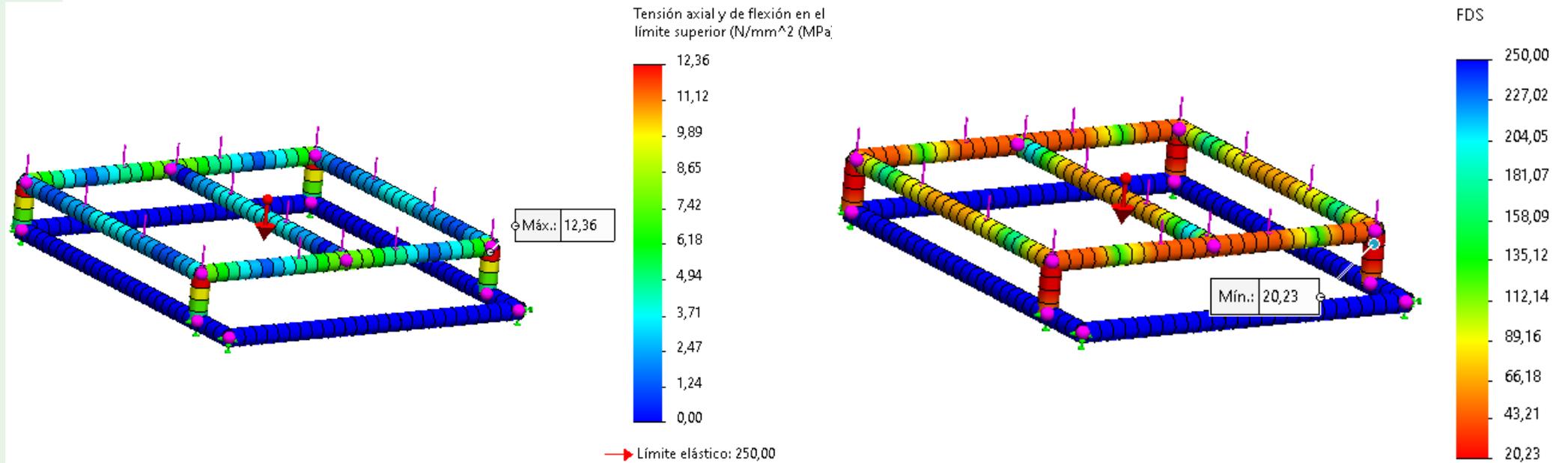
Recomendaciones y trabajos futuros





Diseño mecánico

•Estructura de montaje



Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Diseño electrónico

•Placas PCB

Para el diseño de las placas, se han tenido en cuenta las recomendaciones proporcionadas por la norma IPC-2221.

Cálculo de ancho de pista:

$$A = \left(\frac{I}{k \cdot \Delta T^b} \right)^{\frac{1}{c}}$$

I : corriente máxima

ΔT : aumento de temperatura

$k = 0.048$, $b = 0.44$ y $c = 0.725$ (constantes para pistas en capas externas)

A : área de la sección de la pista

$$W = \frac{A}{t \cdot 1.378}$$

$$W = 22.56 \text{ [mil]}$$



Diseño electrónico

- Placas PCB

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

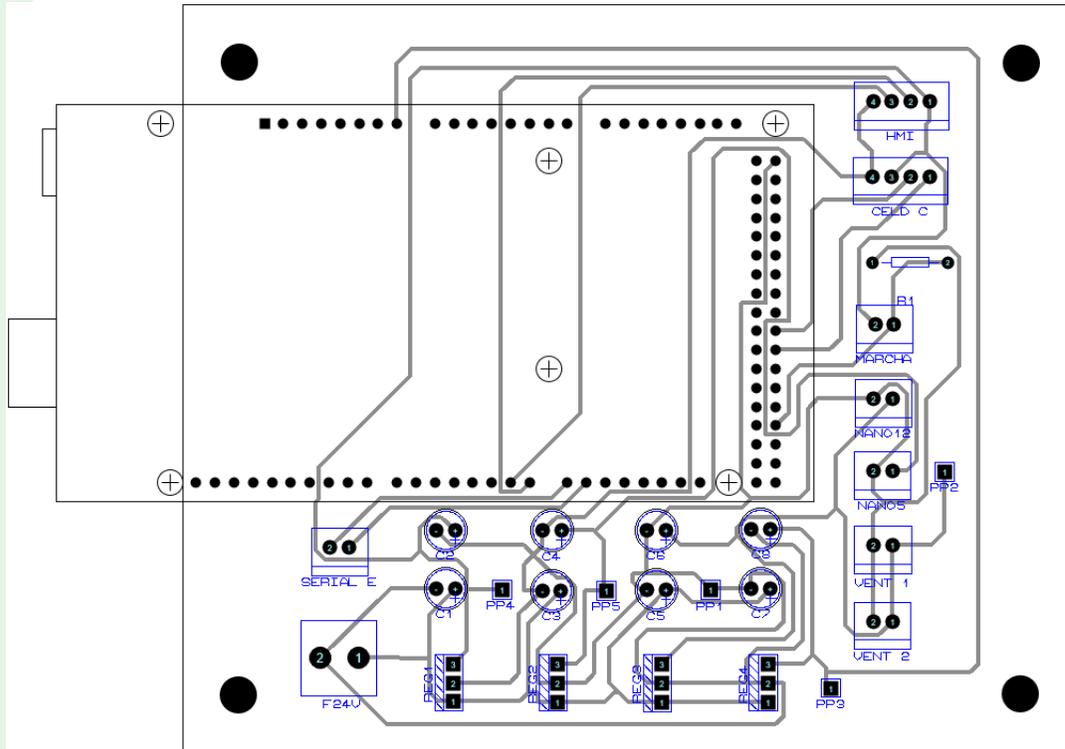
Diseño y construcción

Pruebas y resultados

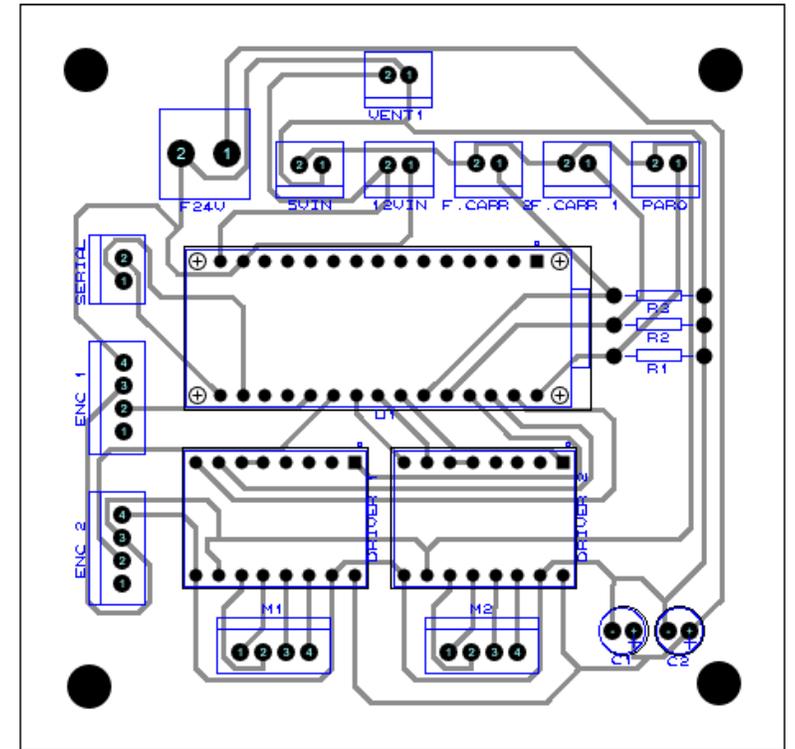
Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros

PCB Maestro



PCB Esclavo





Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

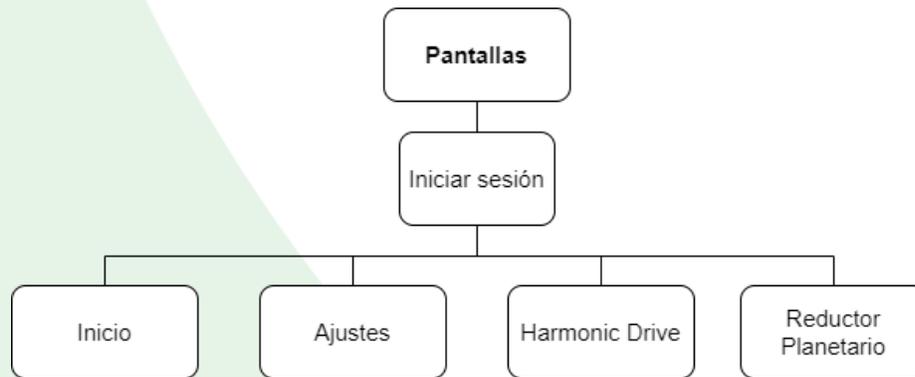
Pruebas y resultados

Conclusiones

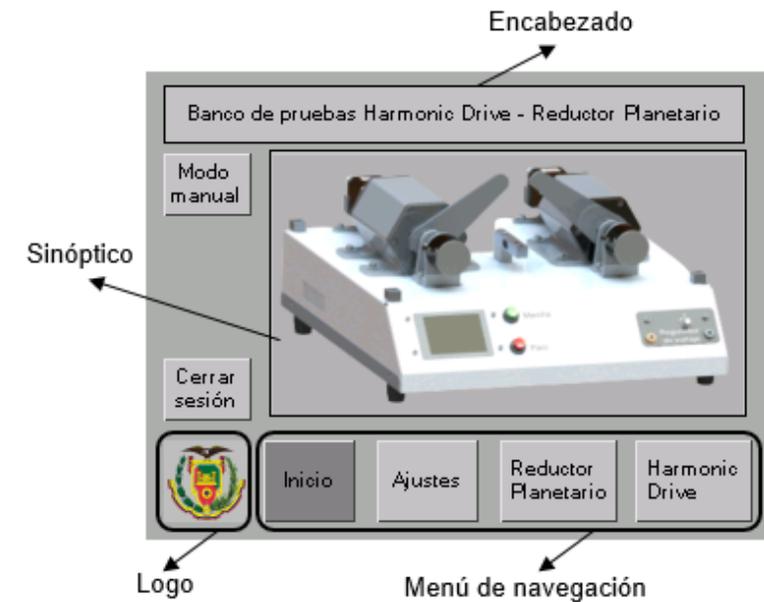
Recomendaciones y trabajos futuros

Diseño de la HMI

Arquitectura



Distribución de pantalla





Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros

Diseño de la HMI

Inicio de sesión

Banco de pruebas Harmonic Drive - Reductor Planetario

Ingrese su usuario y contraseña

Usuario

Contraseña

Iniciar sesión

Inicio

Banco de pruebas Harmonic Drive - Reductor Planetario

Modo manual

Cerrar sesión

Inicio Ajustes Reductor Planetario Harmonic Drive

Modo manual

Banco de pruebas Harmonic Drive - Reductor Planetario

Reductor Planetario Harmonic Drive

Giro horario Giro antihorario

Inicio

Ajustes

Banco de pruebas Harmonic Drive - Reductor Planetario

Velocidad de entrada Reductor Planetario (rpm)

100 150 200

Velocidad de entrada Harmonic Drive (rpm)

100 150 200

Inicio Ajustes Reductor Planetario Harmonic Drive

Reductor planetario

Banco de pruebas Harmonic Drive - Reductor Planetario

Reductor Planetario

Entrada Salida

Torque: Consultar anexo A Torque [Nm]

Velocidad [rpm] Velocidad [rpm]

Inicio Ajustes Reductor Planetario Harmonic Drive

Harmonic Drive

Banco de pruebas Harmonic Drive - Reductor Planetario

Harmonic Drive

Entrada Salida

Torque: Consultar anexo A Torque [Nm]

Velocidad [rpm] Velocidad [rpm]

Inicio Ajustes Reductor Planetario Harmonic Drive



Integración de sistemas

La integración de sistemas consiste en combinar los elementos mecánicos, electrónicos, de instrumentación y control en un único conjunto para crear el banco de pruebas.

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros





Integración de sistemas

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

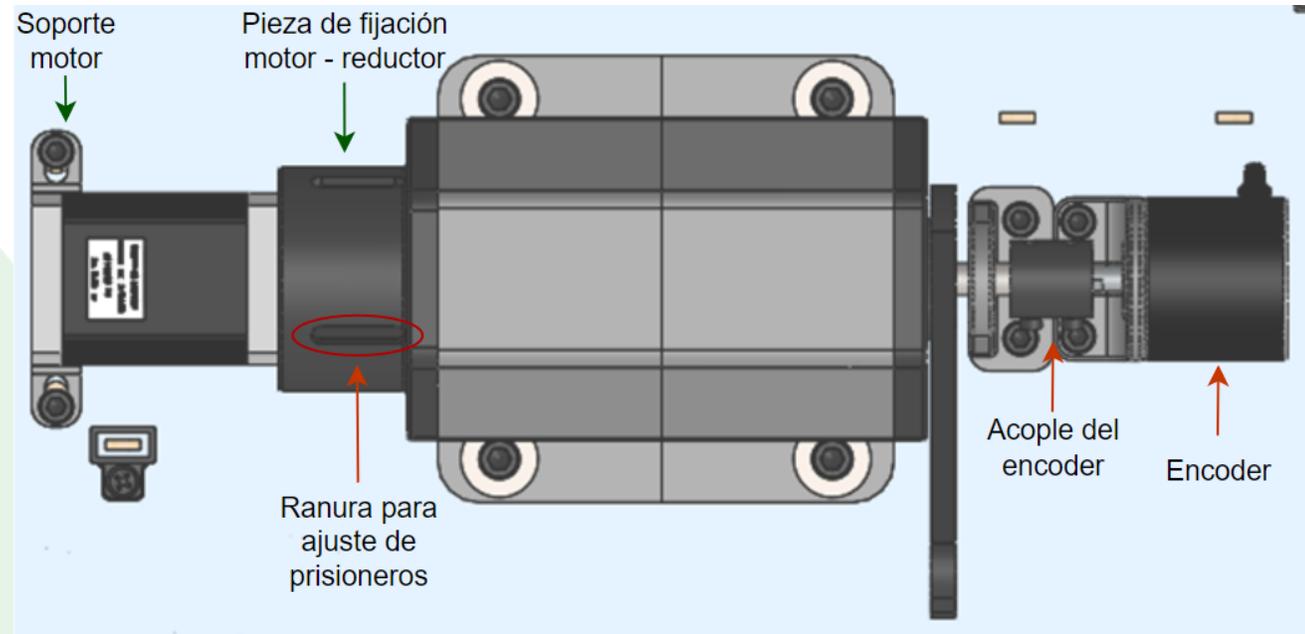
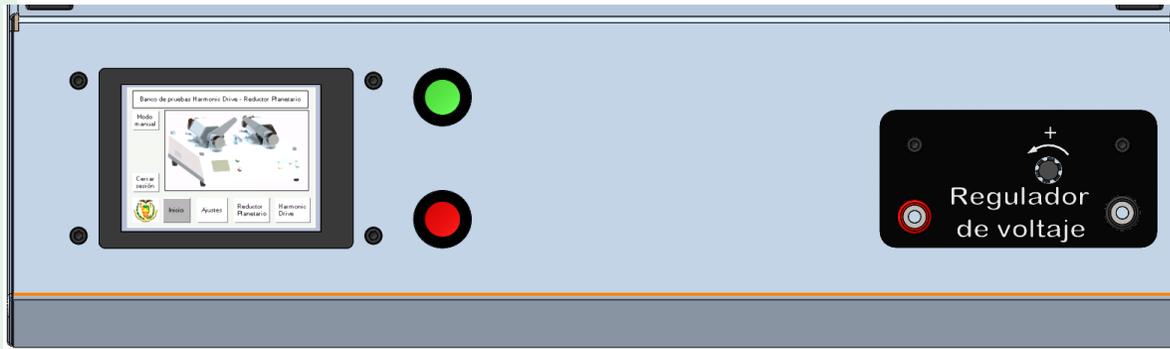
Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros





Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

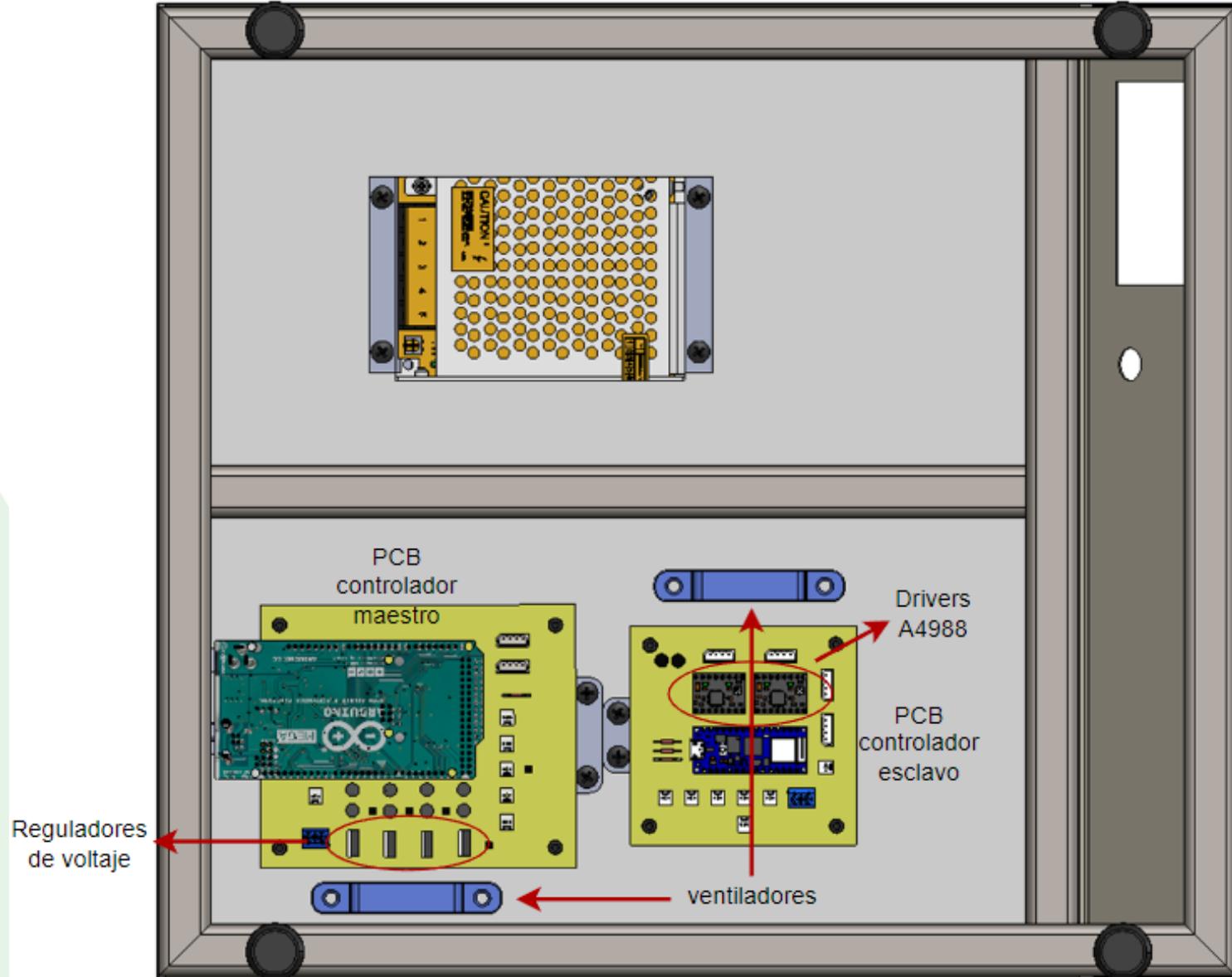
Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros

Integración de sistemas





Construcción

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros





Construcción

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

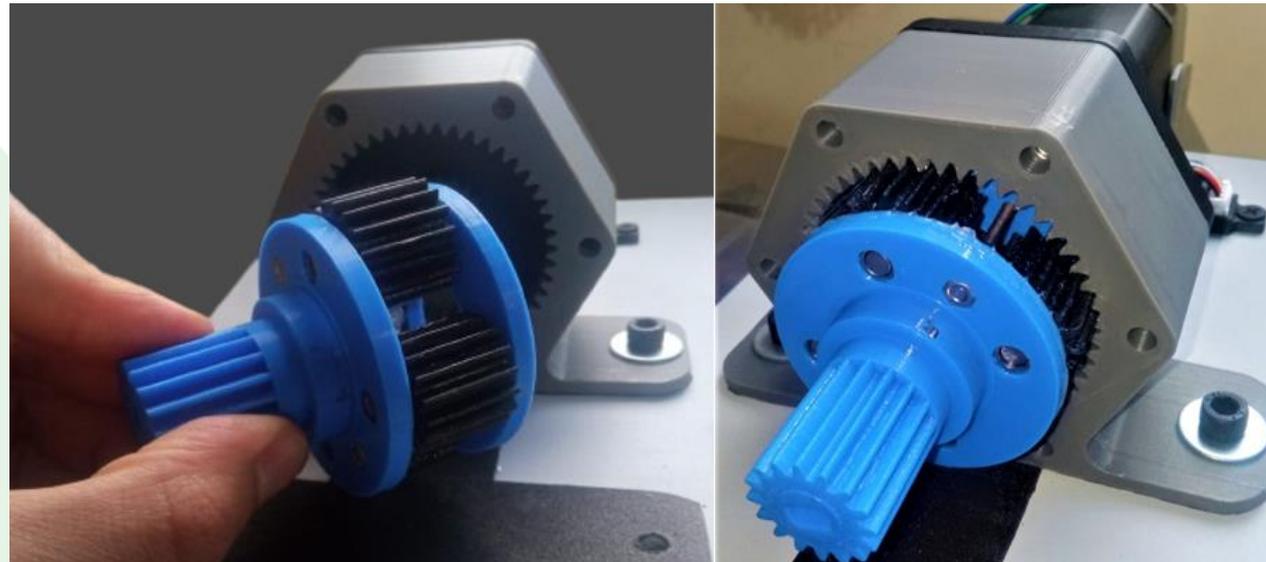
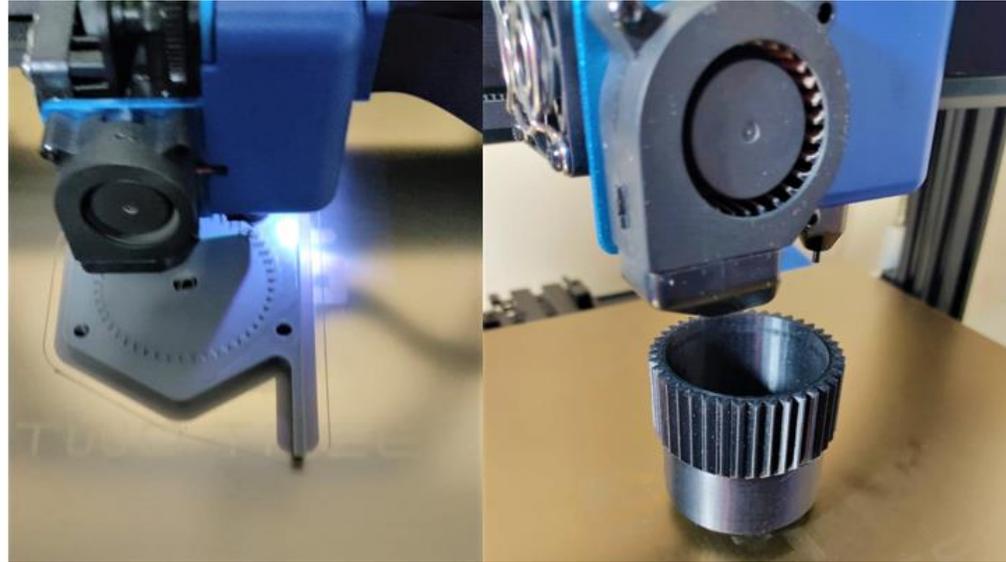
Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros





Construcción

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

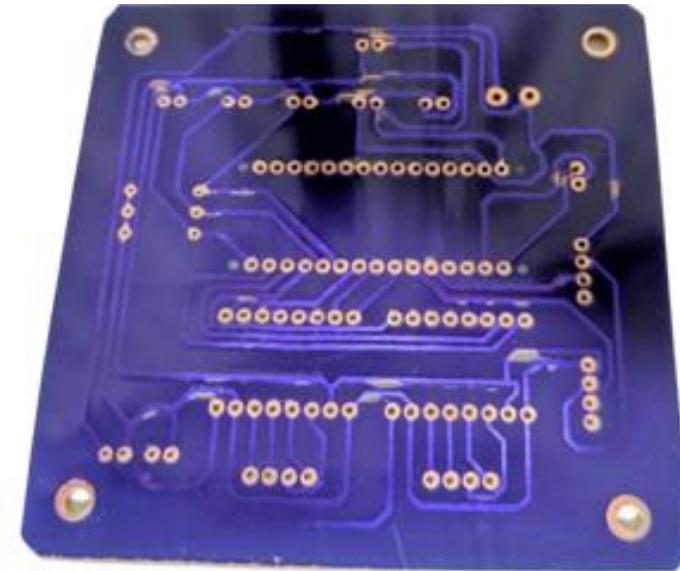
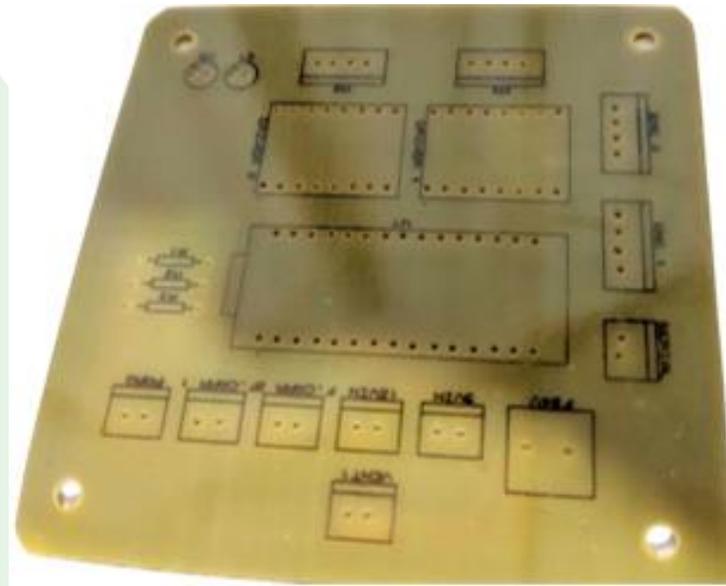
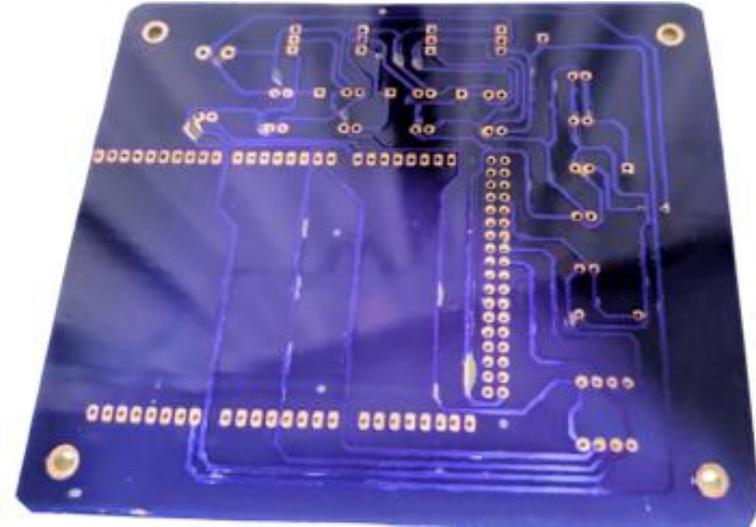
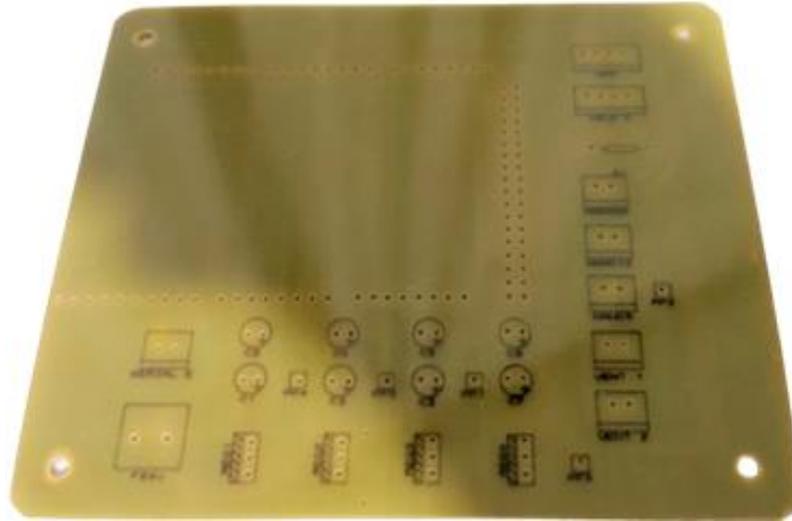
Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros





Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

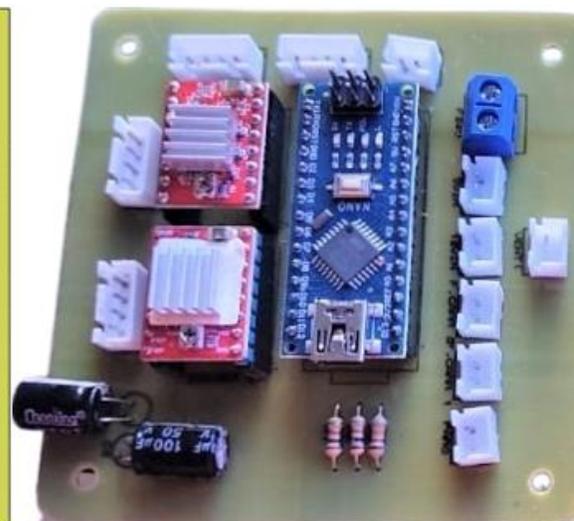
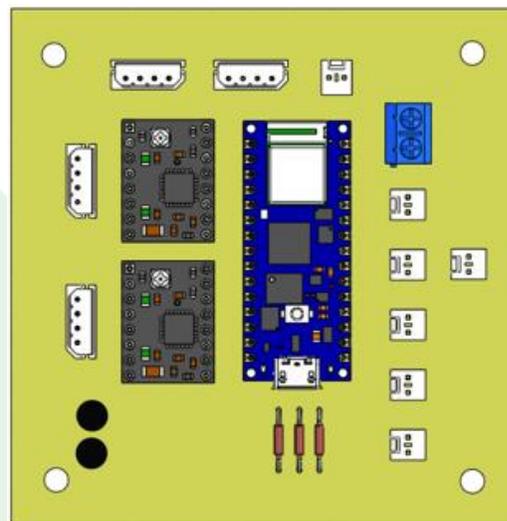
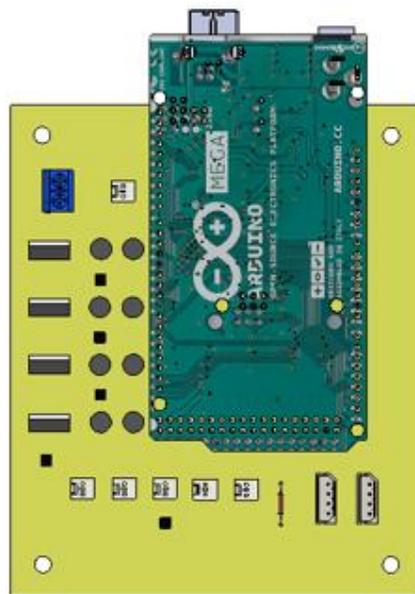
Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Construcción





Construcción

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

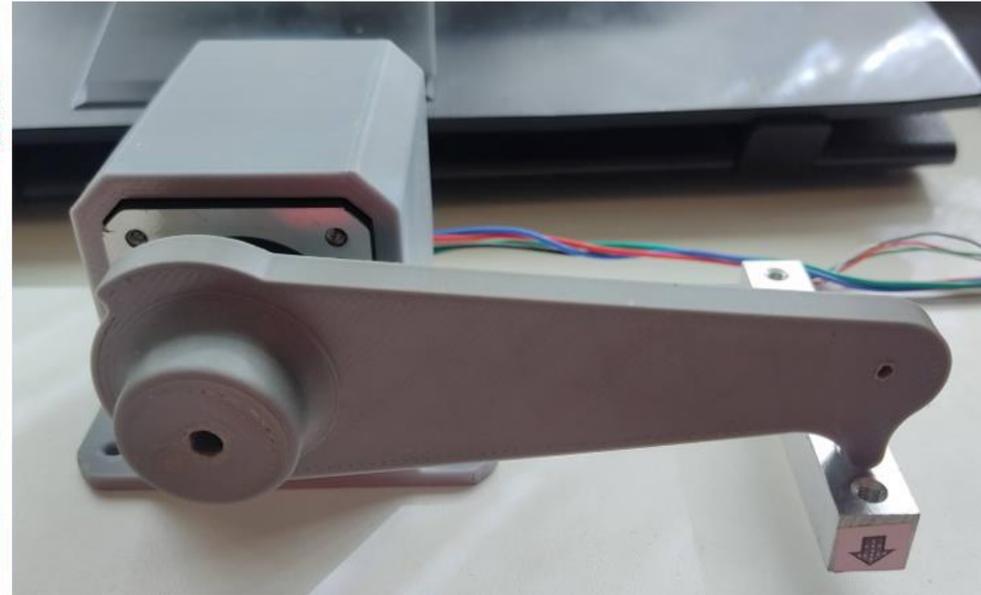
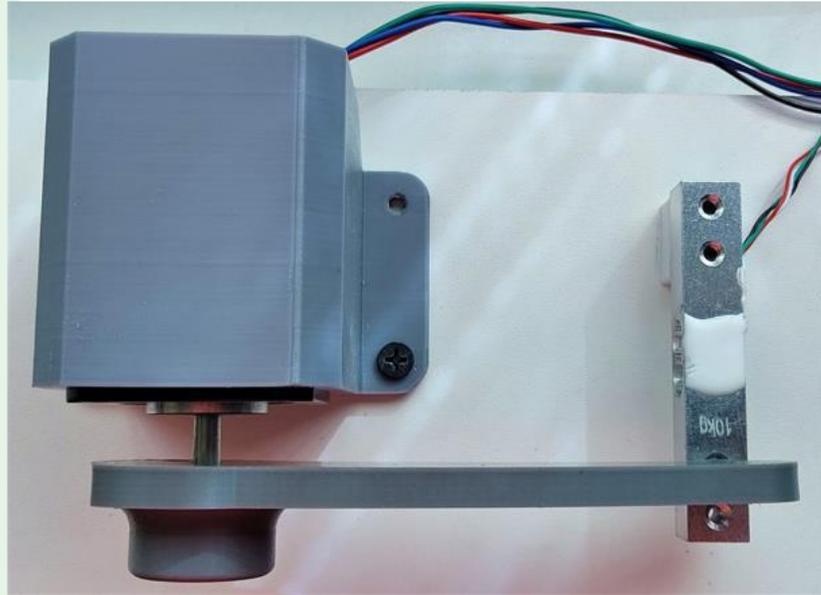
Recomendaciones y trabajos futuros





Pruebas y Resultados

- **Montaje para medir torque de entrada**



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Pruebas y Resultados

- Pruebas de torque (reductor planetario)

Voltaje de entrada = 12.03 [V], Voltaje en la bobina 341 [mV]				
No.	Torque de entrada [mN·m]	Torque de salida teórico [Nm]	Torque de salida medido [Nm]	Eficiencia [%]
1	108.04	6.914	6.24	90.24
2	108.10	6.918	6.21	89.76
3	108.96	6.973	6.25	89.63
4	108.73	6.958	6.22	89.38
5	109.09	6.981	6.23	89.23
6	109.17	6.986	6.22	89.02
7	109.58	7.013	6.24	88.98
8	108.92	6.097	6.21	89.08
9	108.26	6.992	6.22	88.95
10	109.73	7.022	6.23	88.71



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Pruebas y Resultados

- Resumen de pruebas de torque (reductor planetario)

Voltaje de entrada	Torque de salida	Eficiencia	Desviación estándar
[V]	[Nm]	[%]	[mN· m]
12.03	6.227	89.30	13.4
20.02	5.846	90.50	11.7

- Resumen de pruebas de torque (reductor Harmonic Drive)

Voltaje de entrada	Torque de salida	Eficiencia	Desviación estándar
[V]	[Nm]	[%]	[mN· m]
12.04	9.379	27.90	40.4
20.01	8.996	30.91	20.7



Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros

Pruebas y Resultados

- Pruebas de velocidad (reductor planetario)

No.	Entrada: 100 [rpm]	Entrada: 150 [rpm]	Entrada: 200 [rpm]
	Salida [rpm]	Salida [rpm]	Salida [rpm]
1	1.55	2.35	3.14
2	1.56	2.35	3.16
3	1.57	2.36	3.15
4	1.56	2.35	3.14
5	1.57	2.35	3.15
6	1.56	2.36	3.15
7	1.55	2.35	3.15
8	1.55	2.35	3.16
9	1.57	2.36	3.15
10	1.56	2.37	3.16



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Pruebas y Resultados

- Resumen de pruebas de velocidad (reductor planetario)

Velocidad de entrada [rpm]	Velocidad de salida teórica [rpm]	Velocidad de salida [rpm]	Desviación estándar [rpm]	Error [%]
100	1.56	1.562	0.0078	0.12
150	2.34	2.355	0.0070	0.64
200	3.12	3.151	0.0073	1.00

- Resumen de pruebas de velocidad (reductor Harmonic Drive)

Velocidad de entrada [rpm]	Velocidad de salida teórica [rpm]	Velocidad de salida [rpm]	Desviación estándar [rpm]	Error [%]
100	0.25	0.246	0.0051	1.60
150	0.37	0.372	0.0042	0.54
200	0.50	0.483	0.0048	3.40



Pruebas y Resultados

• Evaluación de usabilidad SUS

- Creo que usaría este sistema con frecuencia
- Encuentro el sistema innecesariamente complejo
- Considero que el sistema es fácil de usar
- Creo que necesitaría el apoyo de una persona con experiencia para utilizar el sistema
- Encuentro que las diferentes funciones del sistema están bien integradas
- Experimentaste problemas mientras usaste el equipo
- La información mostrada te indica claramente los resultados de la prueba
- Encuentro que el sistema es muy engorroso de utilizar
- Te parece que el botón de paro de emergencia es confiable y actúa de forma oportuna
- Necesitaría aprender muchas cosas nuevas antes de poder utilizar el sistema

Usuario	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	SUS
1	4	2	4	2	5	1	4	2	5	3	80.0
2	5	3	5	3	4	2	5	2	5	4	75.0
3	5	1	5	1	5	1	4	1	5	1	97.5
4	4	3	5	2	5	1	5	1	5	2	87.5
5	4	1	3	1	5	2	4	3	3	4	70.0
6	5	4	5	2	5	1	5	1	5	2	87.5
7	2	3	4	3	4	1	5	2	4	2	70.0
8	4	3	5	3	4	1	4	2	4	3	72.5
9	4	1	5	5	4	3	2	1	5	3	70.0
10	4	1	5	2	5	1	5	1	5	1	95.0
Promedio											80.5

Antecedentes y justificación

Fundamentación teórica

Generación de conceptos

Diseño y construcción

Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y trabajos futuros



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Conclusiones

- Se diseñó y construyó el banco de pruebas para medir velocidad y torque con los sistemas Harmonic Drive de tipo flexible y por engranajes planetarios, cumpliendo con los requerimientos de diseño mínimo establecidos, alcanzando un torque de 6.22 [Nm] con una reducción de 64:1 en el reductor planetario y un torque de 9.37 [Nm] con una reducción de 400:1 en el reductor Harmonic Drive con un torque de entrada inferior a 0.11 [Nm].
- Se diseñó y construyó los mecanismos reductores del banco de pruebas. Para ello, se consideraron las recomendaciones de diseño de diferentes autores. Como resultado, se logró que el banco de pruebas sea modular, agrupando los elementos como planetas y portaplanetas con sus respectivos elementos complementarios, lo que facilita las reparaciones y el mantenimiento en caso de ser necesario. Además, el método de manufactura utilizado en su construcción permite fabricar piezas de reemplazo en poco tiempo y con un costo accesible.



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Conclusiones

- Se diseñó y construyó la estructura de montaje del banco de pruebas teniendo en cuenta todas las cargas que actúan sobre ella. Se logró un factor de seguridad superior a 20, lo que garantiza que la estructura pueda soportar tanto las cargas propias de los mecanismos como posibles cargas externas aplicadas durante la manipulación del banco de pruebas. Además, cumpliendo con los requerimientos planteados, el peso del banco de pruebas es de 9.3 [kg] y tiene un tamaño de 37 x 42 x 25 [cm].
- Se diseñó y construyó el circuito de control utilizando la configuración Maestro – esclavo en los controladores, además se dimensionaron de forma adecuada todos los componentes electrónicos del banco de pruebas, lo que permitió medir las variables de interés con una resolución de 0.01 [Nm] para el torque y 0.01 [RPM] para la velocidad.



Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

Recomendaciones

- Se recomienda considerar métodos de fabricación que proporcionen una mejor resolución (como la impresión 3D en resina), especialmente para el mecanismo Harmonic Drive, lo cual permite trabajar con módulos menores al utilizado para obtener una mayor eficiencia y reducir el torque de arranque requerido.
- Se recomienda tener en cuenta la simplicidad de las geometrías al diseñar los elementos, así como la disposición de las piezas al crear los archivos G-code para la impresión 3D. La orientación de las capas es de suma importancia para el rendimiento mecánico de la pieza, especialmente al considerar que la resistencia será menor para esfuerzos en el sentido perpendicular a la orientación de las capas.
- Se recomienda la implementación de sensores de torque dinámico para obtener mediciones más adecuadas y precisas del torque. Al incorporar dichos sensores, será posible medir en tiempo real tanto el torque de entrada como el de salida. Además, permitirá llevar a cabo pruebas con diferentes tipos de motores y caracterizar el comportamiento de los reductores en cuanto al torque de entrada requerido.



Trabajos futuros

Antecedentes y
justificación

Fundamentación
teórica

Generación
de conceptos

Diseño
y construcción

Pruebas
y resultados

Conclusiones

Recomendaciones y
trabajos futuros

- Se propone el diseño de un subsistema que permita realizar la regulación electrónica del voltaje para los motores. De esta manera, esta variable podrá ser integrada en el algoritmo y controlada electrónicamente.
- Se propone llevar a cabo estudios para optimizar el diseño del perfil del diente del mecanismo Harmonic Drive, ya que la información pública disponible se limita al diseño original proporcionado en la patente del modelo.

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



GRACIAS POR SU ATENCIÓN