



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Ingeniería Mecatrónica

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

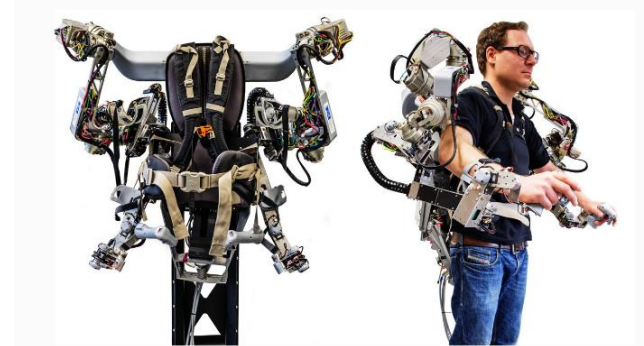
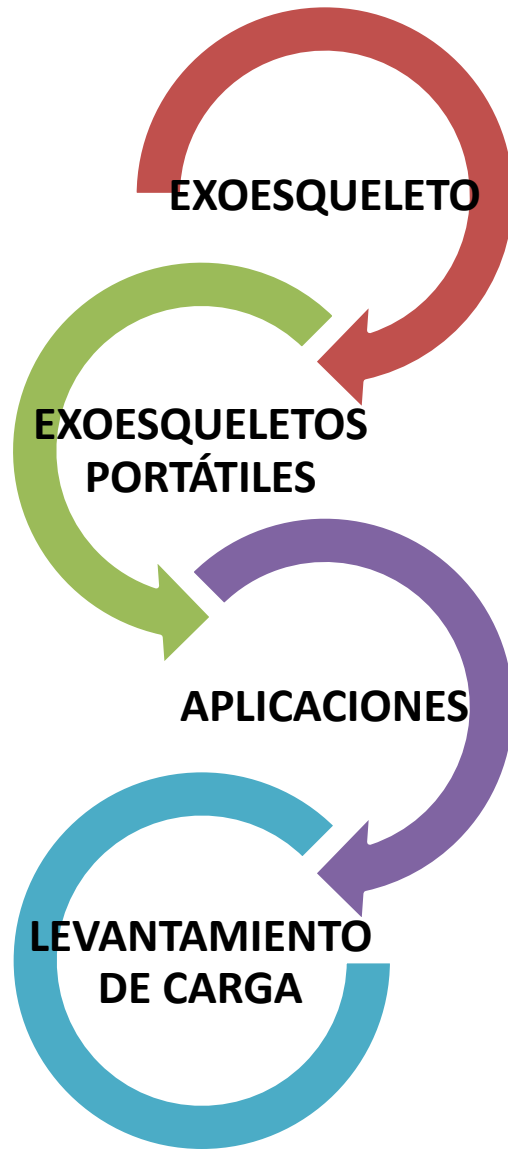
“INVESTIGACIÓN DE MECANISMOS MULTIPLICADORES DE FUERZA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXOESQUELETO ROBÓTICO DE EXTREMIDAD SUPERIOR PARA LEVANTAMIENTO DE CARGA .”

**ALEXIS GONZALO LAMINGO CAIZALUISA
LEOPOLDO JAVIER LOOR CEBALLOS**

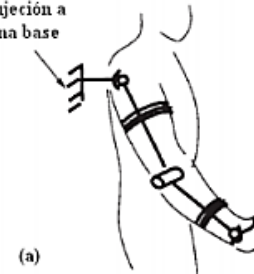
TUTOR: ING. OSCAR ARTEAGA.



INTRODUCCIÓN

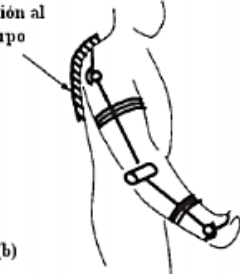


Sujeción a una base



(a)

Sujeción al cuerpo



(b)





ANTECEDENTES

TECNOLOGÍA ROBÓTICA

- Aplicación de órtesis y prótesis inteligentes

EL ESTUDIO DE EXOESQUELETOS

- Aprovechar las características de humanos y robots.

TAREAS

- Aplicación de grandes fuerzas de manera eficiente





DESCRIPCIÓN RESUMIDA

Exoesqueleto multiplicador de fuerza para extremidad superior con dos grados de libertad. Basado en la antropometría de la población ecuatoriana y la biomecánica humana, para el modelamiento del exoesqueleto se tomó como base el modelo matemático de su cinemática, además el diseño se validó con un software CAE, El sistema control usa sensores para determinar su posición y orientación para luego ejecutar los movimientos requeridos mediante una palanca de mando. La intención del dispositivo exoesquelético es implementarse en un entorno de trabajo industrial, ya que puede levantar y transportar cargas de hasta 120 Newtons.





OBJETIVOS

Objetivo general

- Investigar mecanismos multiplicadores de fuerza para el diseño y construcción de un exoesqueleto robótico de extremidad superior para levantamiento de carga.

Objetivos específicos

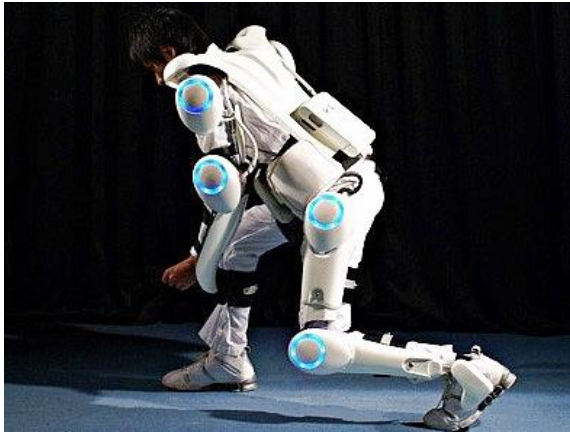
- Investigar los mecanismos multiplicadores de fuerza y seleccionar el más adecuado para el exoesqueleto.
- Diseñar un exoesqueleto de extremidad superior para generar una propuesta de funcionamiento.
- Construir el exoesqueleto diseñado y realizar el ensamblaje de sus componentes
- Desarrollar un sistema de control en base al estudio cinemático del movimiento del exoesqueleto robótico.
- Validar experimentalmente el diseño mecánico y de control con pruebas de movimiento y pruebas de carga.



TRABAJOS PREVIOS Y ACTUALES



HAL de Cyberdine (2012)



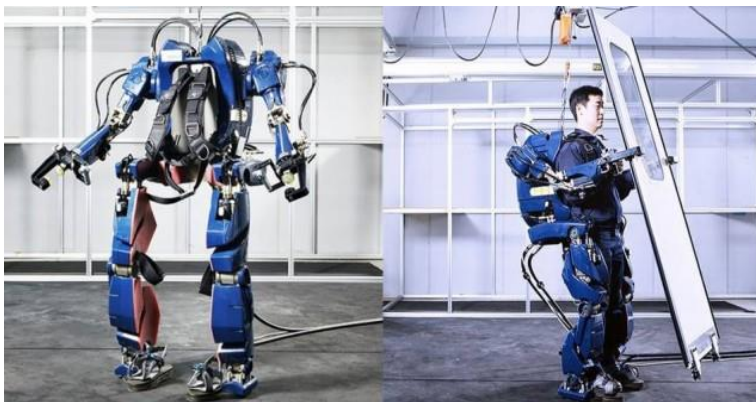
Titan Arm (2013)



Robo-Mate (2017)



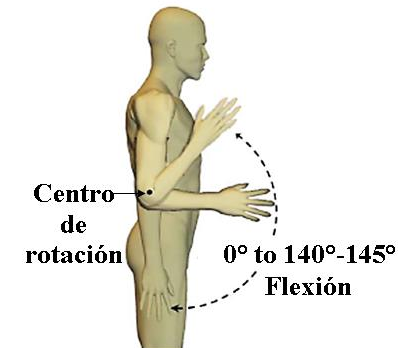
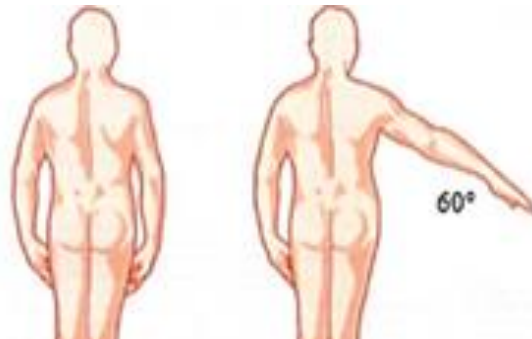
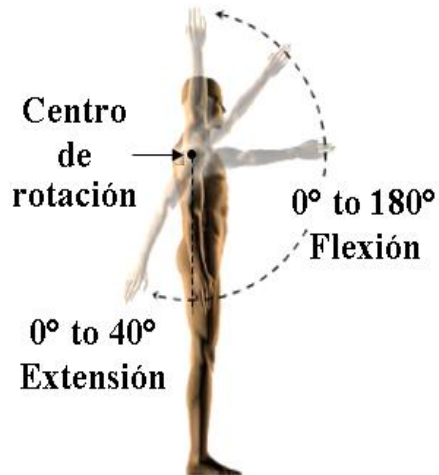
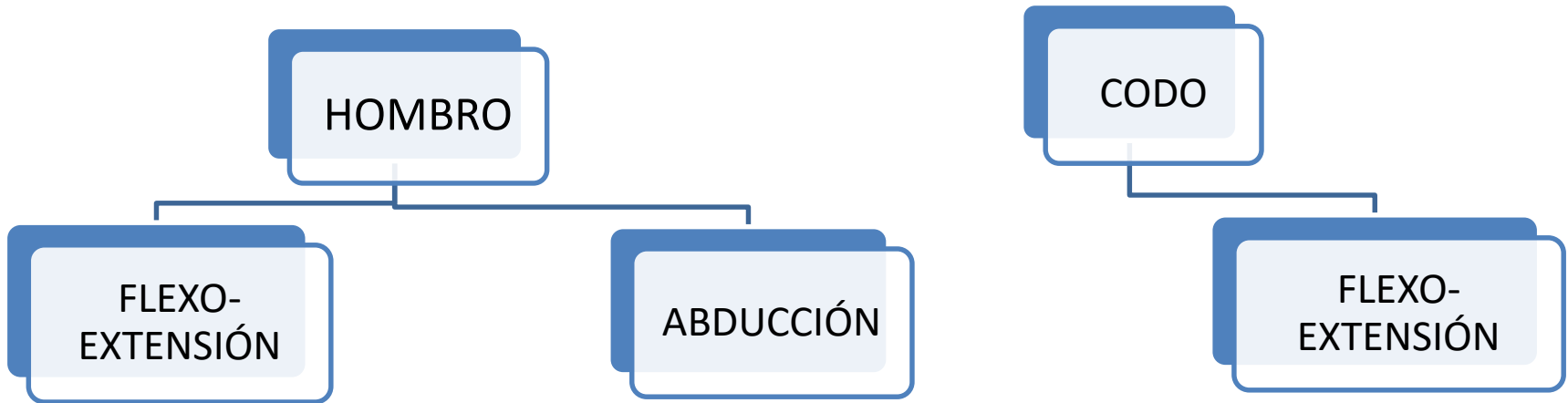
TH-Wex de Hyundai (2016)



Exoesqueleto EksoVest de Ford (2017)



BIOMECÁNICA

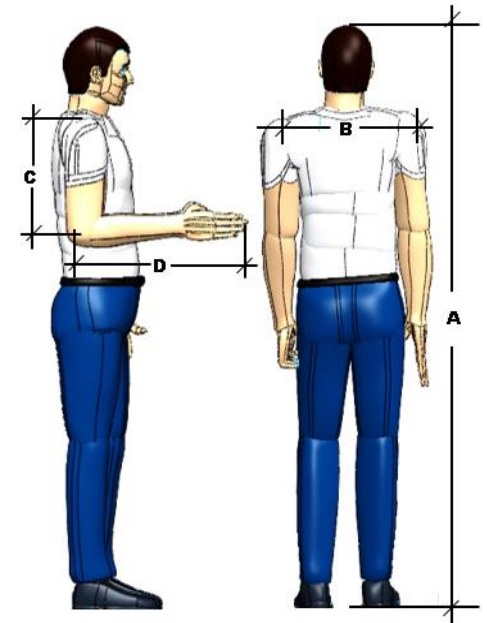




ANTROPOMETRÍA

N°	Medidas	5°	50°	95°
1	Altura Normal	1,6225	1,7239	1,825
2	Altura posición sentado normal	0,8472	0,8991	0,9490
3	Altura posición sentado relajado	0,8312	0,8809	0,9307
4	Altura de la rodilla	0,4743	0,5239	0,5735
5	Altura de la poplítea	0,3645	0,4145	0,4645
6	Altura del codo en posición sentado	0,1836	0,2322	0,2809
7	Grosor del muslo	0,0995	0,01320	0,01644
8	Longitud Glúteo-rodilla	0,5119	0,5711	0,6302
9	Longitud glúteo-poplítea	0,4001	0,4636	0,5271
0	Longitud codo-codo posición sentado	0,3802	0,4470	0,5138
1	Ancho de caderas posición sentado	0,3150	0,3562	0,3975
2	Longitud Hombro-Codo	0,3353	0,3632	0,3912
3	Longitud Codo-mano	0,4215	0,4608	0,5000

Medidas necesarias para el exoesqueleto



MECANISMOS MULTIPLICADORES DE FUERZA

TIPO DE
ACTUADORES

- ELÉCTRICO
- NEUMÁTICO
- HIDRÁULICO

ACTUADOR
ELÉCTRICO

- CC
- CA
- PASO A PASO

MECANISMO
MULTIPLICADOR
DE FUERZA

- ENGRANAJES
- CADENAS
- CORREAS



MECANISMOS MULTIPLICADORES DE FUERZA EN ROBÓTICA

CARACTERÍSTICAS NECESARIAS	ENGRANAJES	CADENAS	CORREAS DENTADAS
Rozamiento	Contacto directo	Directo	Directo
Rendimiento	Próximo al 100%	97-98%	98%
Ahorro del área de trabajo.	Excelente	Muy bueno	Bueno
Ruido/vibración	Bajo	Muy Alto	Alto
Soportar elevados torques puntuales.	Excelente	Muy bueno	Bueno
Reducción elevada de velocidad en un único paso.	Excelente	Muy bueno	Bueno
Lubricación	Si	Si	No
Relación de reducción/transferencia de par.	Alta	Media	Normal
Alineamiento de ejes entrada/salida.	Si	Si	Si
Antichoque.	Bajo	Bueno	Muy bueno
Torque de salida	Alto	Moderado	Moderado
Capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado.	Excelente	Muy bueno	Bueno
Larga vida de funcionamiento continua.	Excelente	Muy bueno	Bueno
Mantenimiento	Mínimo	Normal	Máximo

- Movimiento circular entrada- salida.
- Más idóneos: engranajes, correas y cadenas.
- Más confiable es el engranaje seguido de la cadena y finalmente la correa.





PARAMETROS DE DISEÑO

CARGA

- 12 KILOGRAMOS

GRADOS DE LIBERTAD

- 2 GDL
- CODO (0-120) Y HOMBRO (0-100)
- MOVIMIENTO ADUCCIÓN

TIEMPO

- 1,5 Seg CODO
- 2,5 Seg HOMBRO

ANTROPOMETRIA

- PERCENTIL 5
- 60 KG

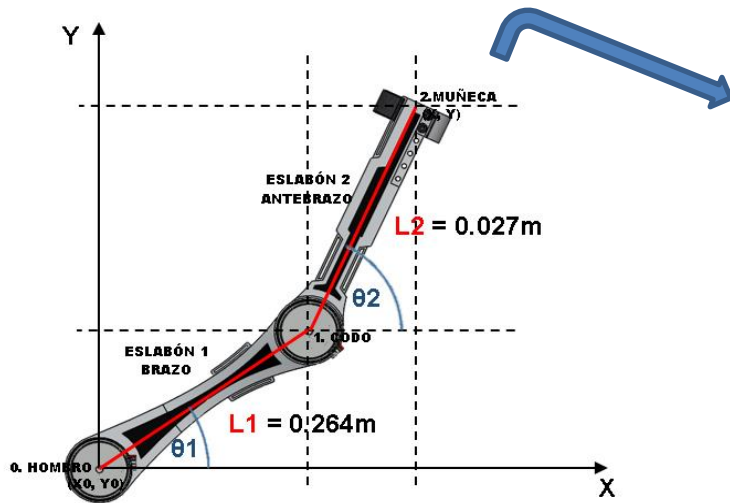
ERGONOMIA

- LIGERO
- COMODO
- SEGURO Y CONFIABLE





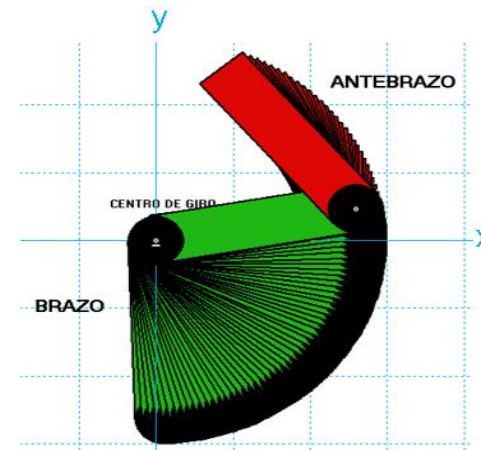
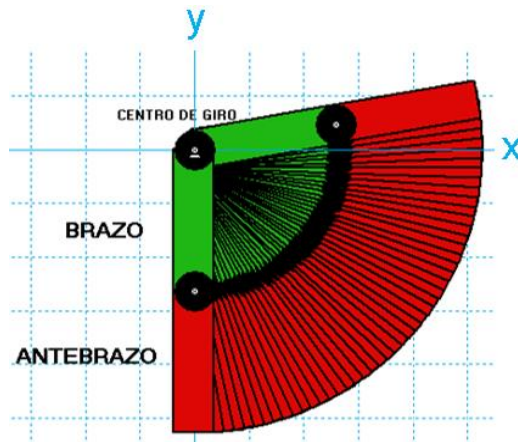
CINEMATICA



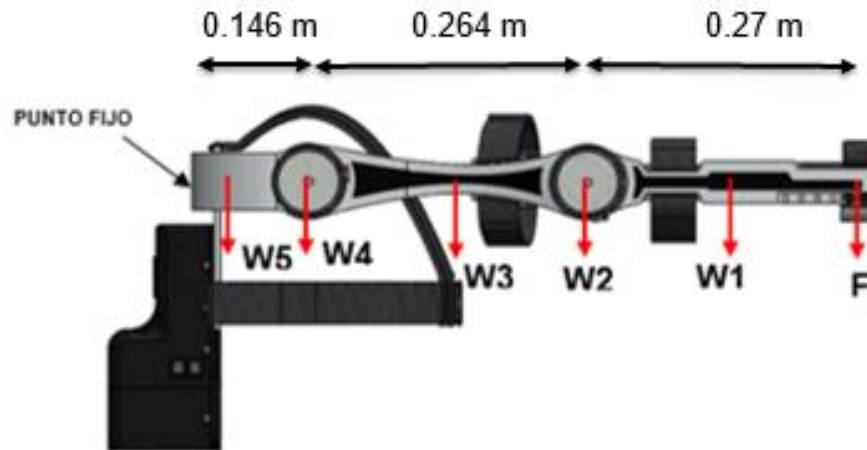
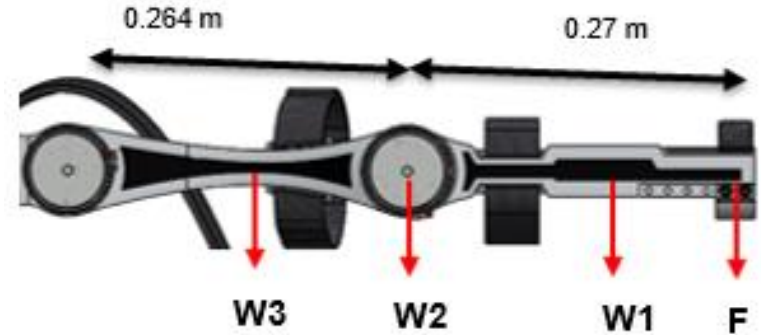
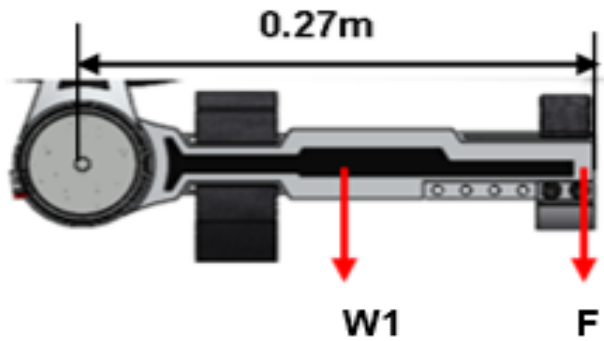
$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\cos(0^\circ) * \text{Sen}\theta_1 & \text{Sen}(0^\circ) * \text{Sen}\theta_1 & 0,264 * \text{Cos}\theta_1 \\ \text{Sen}\theta_1 & \cos(0^\circ) * \text{Cos}\theta_1 & -\text{Sen}(0^\circ) * \text{Cos}\theta_1 & 0,264 * \text{Sen}\theta_1 \\ 0 & \text{Sen}(0^\circ) & \text{Cos}(0^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\cos(0^\circ) * \text{Sen}\theta_2 & \text{Sen}(0^\circ) * \text{Sen}\theta_2 & 0,27 * \text{Cos}\theta_2 \\ \text{Sen}\theta_2 & \cos(0^\circ) * \text{Cos}\theta_2 & -\text{Sen}(0^\circ) * \text{Cos}\theta_2 & 0,27 * \text{Sen}\theta_2 \\ 0 & \text{Sen}(0^\circ) & \text{Cos}(0^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,264 * \cos(\theta_1) + 0,27 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 0,264 * \sin(\theta_1) + 0,27 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$



TORQUES



SELECCIÓN DE MOTOREDUCTORES



MOTOREDUCTOR CODO

$$T_{Motor\ codo} = 33,22\ N\ m$$

$$n_{Motor\ codo} = 1,38\ rad/seg$$

$$P_{Motor\ codo} = 45,84\ W$$

MOTOREDUCTOR HOMBRO

$$T_{Motor\ hombro} = 73\ N\ m$$

$$n_{Motor\ hombro} = 0,678\ rad/seg$$

$$P_{Motor\ hombro} = 49,49\ W$$

	Características	MAXON Motor EC 60 FLAT (brushless)	Motor ROBODRIVE ILM 50x 14	PRINTED Motor WORKS IR9 009088 (brushless)
Valores a tensión nominal	Potencia	100 W	180 W	148 W
	Tensión nominal	24 V	48V	42 V
	Velocidad nominal	3740 rpm	3500 rpm	800 rpm
	Par nominal (máx. par en continuo)	289 mNm	500mNm	1300 Nm
	Par de arranque	4180 mNm	1400mNm	1880 Nm
	Máx. rendimiento	86 %	90 %	90%
	Velocidad máxima	6000 rpm	3500 rpm	1295 rpm
	Corriente nominal (máx. corriente en continuo)	5,47 A	5 A	7 A
Dato s térmico	Temperatura ambiente	-40...+100 °C	40...+125 °C	-15...+125 °C
	Máx. temperatura de bobinado	+125 °C	+125 °C	+125 °C
Datos mecánico s	Peso	470 g	135 g	2940 g
	Longitud	43 mm	22,8 mm	68 mm
	Diámetro	68 mm	50 mm	108 mm





Características	CODO REDUCTOR PLANETARIO GP 52 C MAXON	HOMBRO REDUCTOR PLANETARIO GP 52 B MAXON
Relación de reducción	156:1	353:1
Peso y tamaño	0,77 kg	0,92 kg
Momento de inercia	9,1 g cm ²	9,4 g cm ²
Velocidades de entrada máxima	6000 rpm	6000 rpm
Torque de salida máximo	45 Nm	500 Nm
Torque en continuo máximo	30 Nm	200 Nm
Rendimiento	80%	84%

$$P_{real} = 68,8 W$$

$$P_{real} = 31 Nm$$

$$n_{real} = 16,49 rpm$$

$$P_{real} = 72,24 W$$

$$P_{real} = 73,8 Nm$$

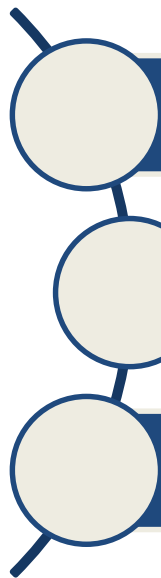
$$n_{real} = 7,65 rpm$$





SELECCIÓN DE MATERIAL

Propiedades	Aluminio 7021	Acero 1020	Titanio
Densidad (g/m ³)	2,8	7,9	4,5
Maquinabilidad	Muy bueno	Bueno	Malo
Módulo de elasticidad (GPa)	70	207	103
Tensión de fluencia (MPa)	325	296	275
Tensión de tracción	370	393	345
Alargamiento	8%	36%	20%
Dureza HB	117	140	200



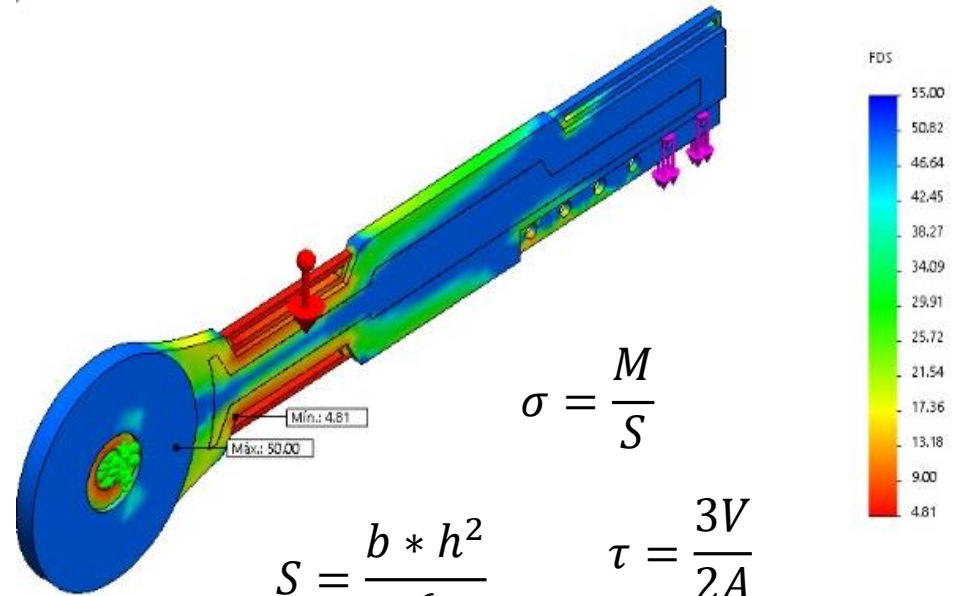
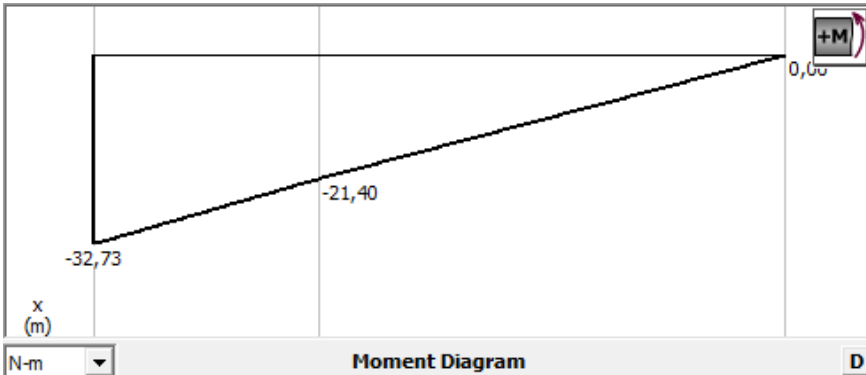
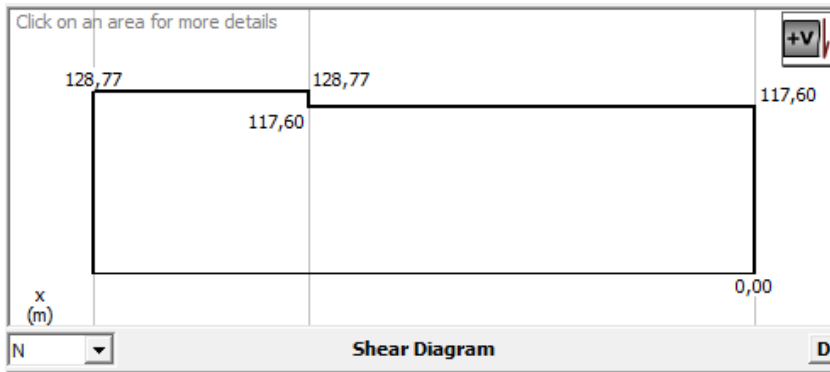
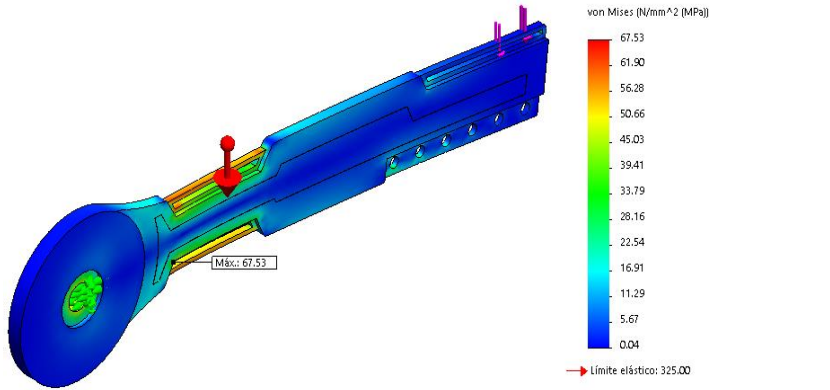
Mecanizado 5 veces mas rápido que el acero

- 40% más liviano que el titanio y un 65% más liviano que el acero.

- Después de que se daña su superficie forma una capa protectora contra la oxidación algo que no ocurre con el acero.



DISEÑO DE ESTRUCTURA

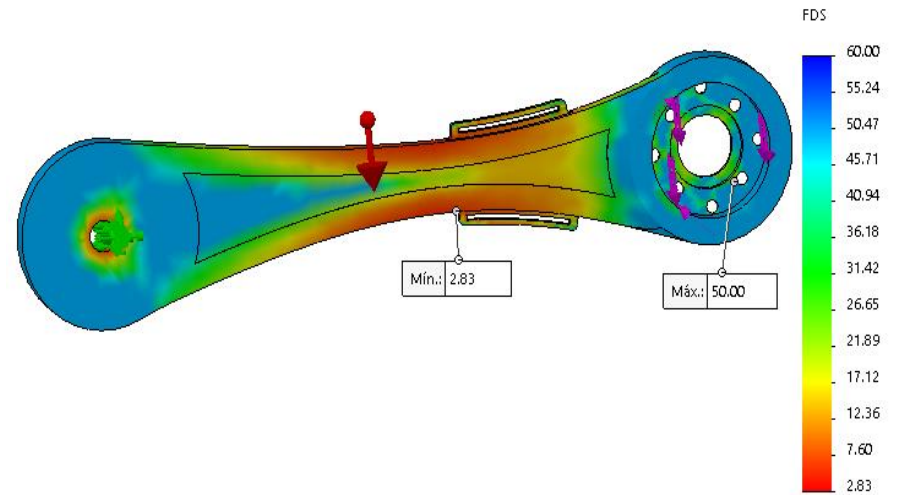
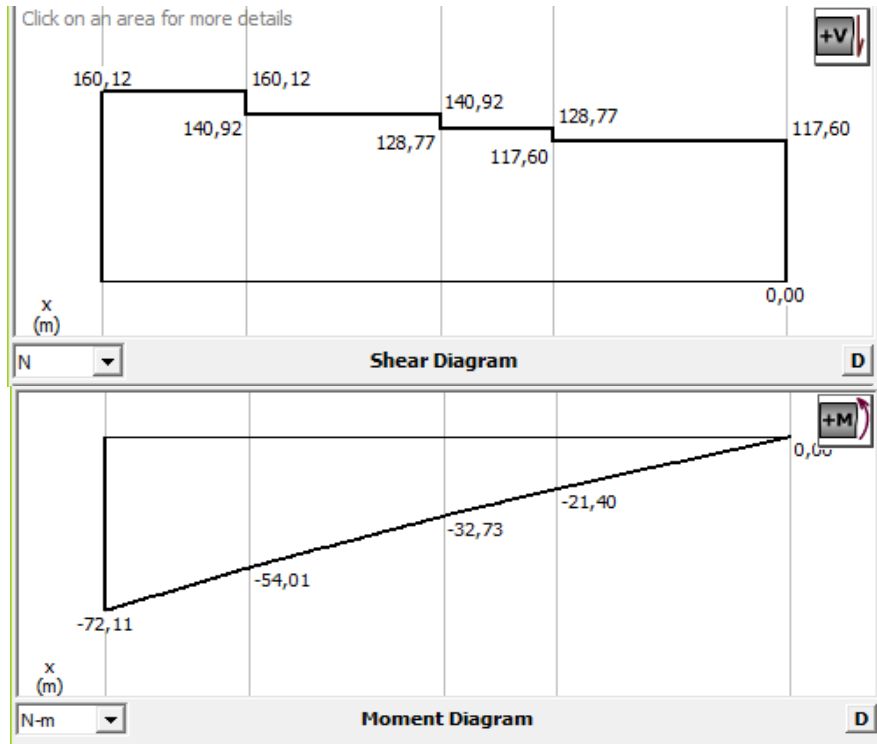


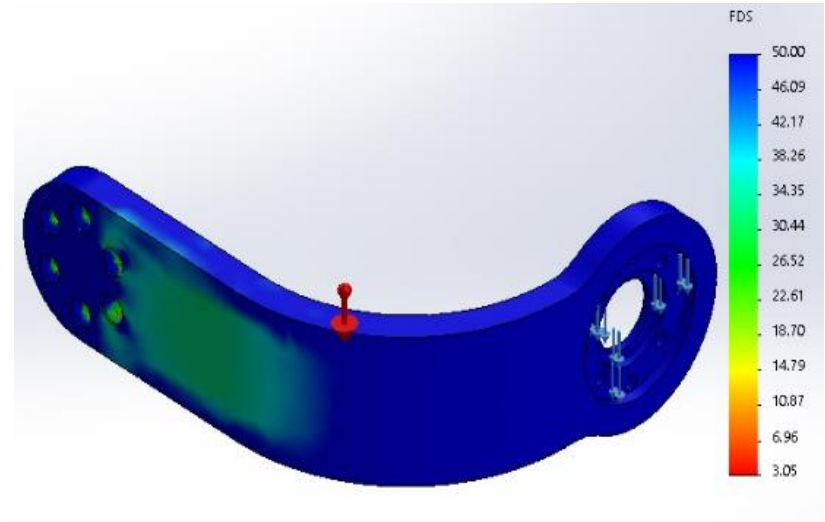
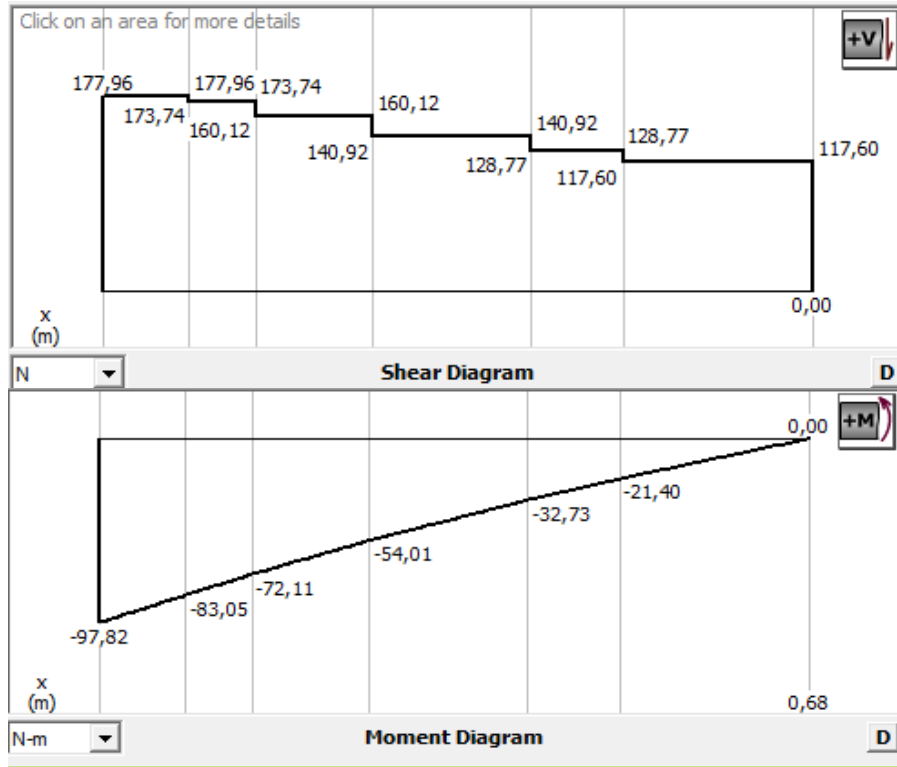
$$\sigma = \frac{M}{S}$$

$$S = \frac{b * h^2}{6} \quad \tau = \frac{3V}{2A}$$

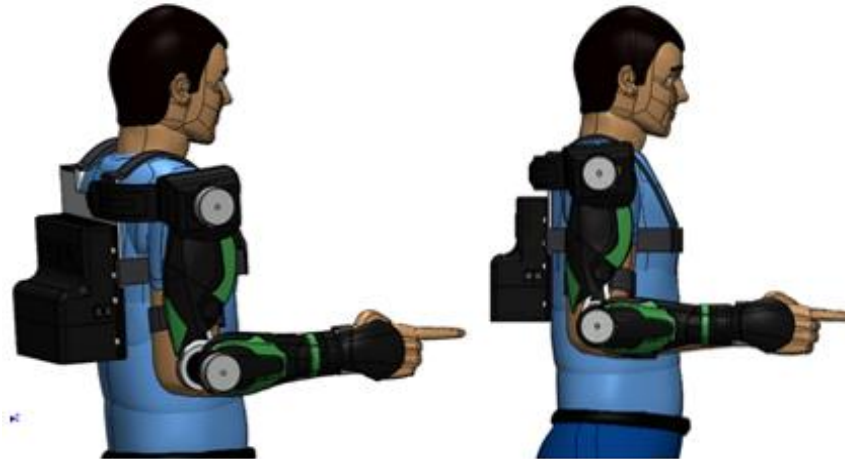
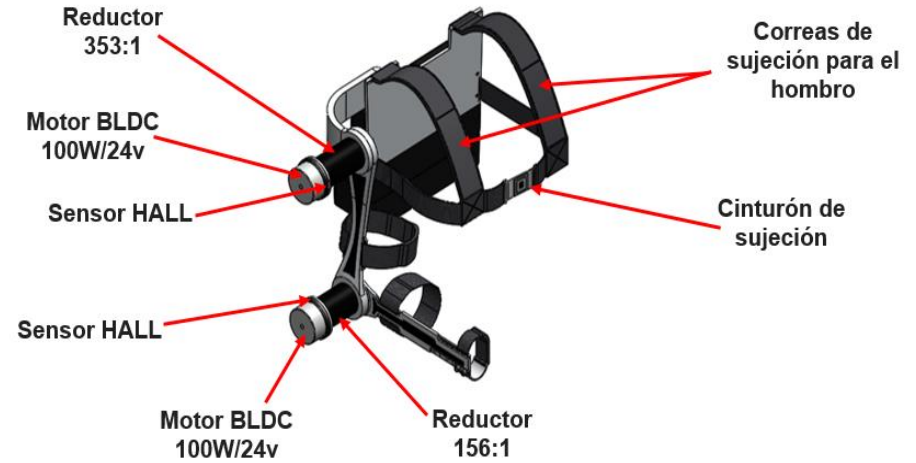
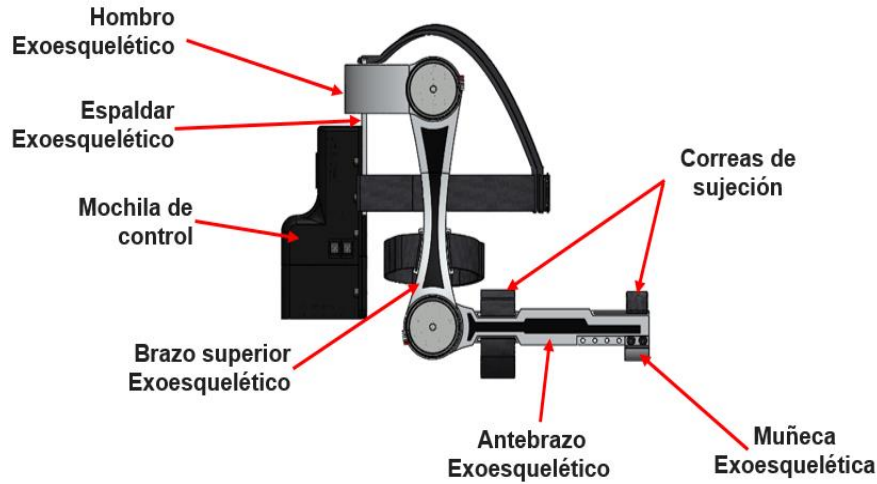
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau^2)}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{eq}}$$





DISEÑO FINAL





DISEÑO ELECTRONICO

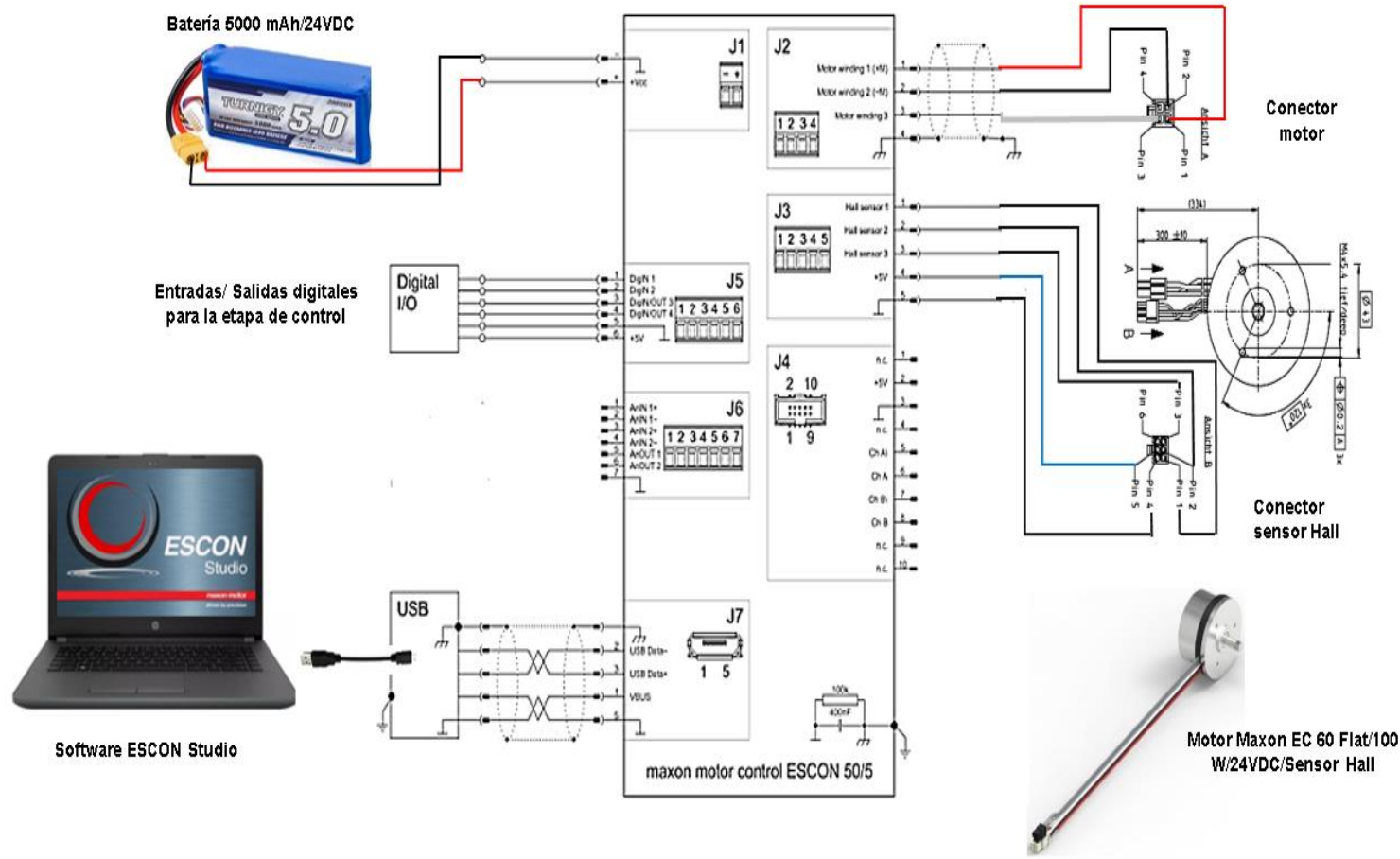
SERVOCONTROLADORA



CARACTERISTICAS	ESCON 50/5	ESCON 70/10
Potencia	250W/750W	700W/2100W
Voltaje Nominal	10-50 VDC	10-70 VDC
Max. Corriente	15 ^a	30A
Corriente nominal	5 ^a	10A
Eficiencia	95%	98%
Máxima velocidad	150000 rpm	150000 rpm
Peso	204 g	259 g
Dimensiones	115X75,5X24 mm	125X78,5X27 mm
Temperatura de operación	-30...+45°C	-30...+45°C



POTENCIA →

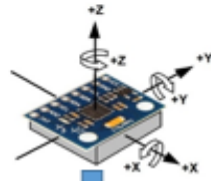


PERCEPCIÓN DEL ENTORNO

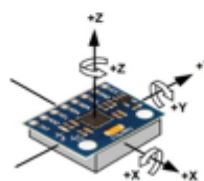


PALANCA DE MANDO

ACELERÓMETRO
POSICIÓN Y ORIENTACIÓN
BRAZO



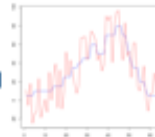
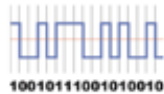
ACELERÓMETRO
POSICIÓN Y ORIENTACIÓN
ABTEBRAZO



PROCESADO E INTERPRETACION DE LOS DATOS

SIGNAL ANALOGICA

TARJETA
ARDUINO UNO



EJECUCION DE LA ACCIÓN



MOTORES BLDC
100W/24V

SENSOR HALL

SENSOR HALL



SERVOCONTROLADORA
ESCON 50/5

SENSOR HALL

SENSOR HALL

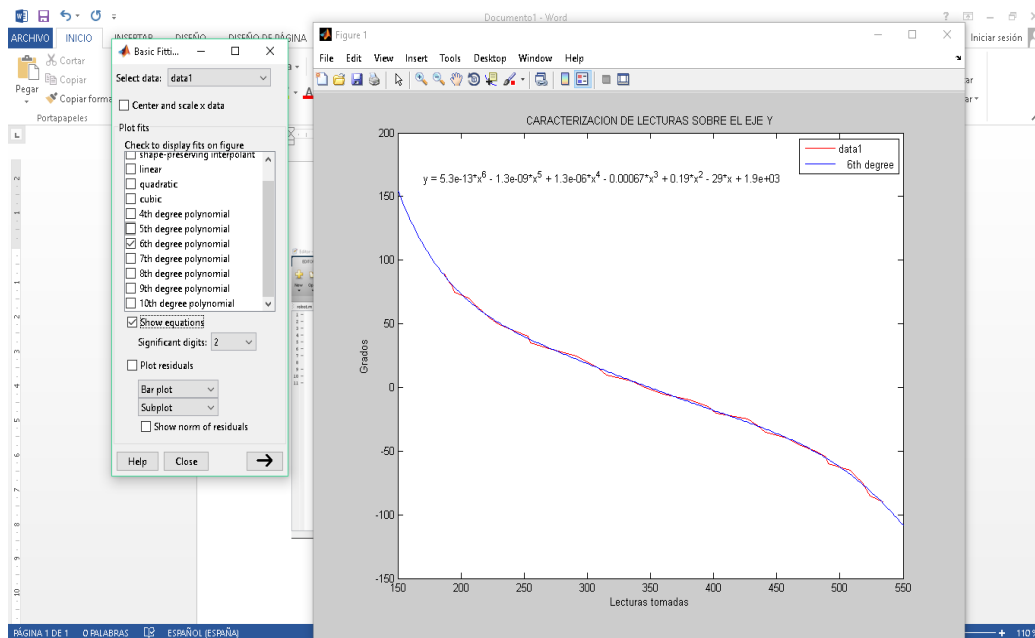
MANDO MANUAL

CONTROL DE POSICION

SENSOR ACELEROMETRO



CARACTERIZACION DEL SENSOR ACELEROMETRO



The "Basic Fitting - 1" dialog box shows the following settings and results:

- Select data: data1
- Center and scale x data
- Plot fits:
 - Check to display fits on figure
 - shape-preserving interpolant
 - linear
 - quadratic
 - cubic
 - 4th degree polynomial
 - 5th degree polynomial
 - 6th degree polynomial
 - 7th degree polynomial
 - 8th degree polynomial
 - 9th degree polynomial
 - 10th degree polynomial
 - Show equations
 - Significant digits: 2
 - Plot residuals
 - Bar plot: Subplot
 - Show norm of residuals
- Numerical results:
 - Fit: 6th degree polynomial
 - Coefficients and norm of residuals:
$$y = p1*x^6 + p2*x^5 + p3*x^4 + p4*x^3 + p5*x^2 + p6*x + p7$$
 - Coefficients:
 - p1 = 5.2573e-13
 - p2 = -1.299e-09
 - p3 = 1.2932e-06
 - p4 = -0.00066944
 - p5 = 0.19134
 - p6 = -29.169
 - p7 = 1922.2
 - Norm of residuals =
 - Save to workspace...

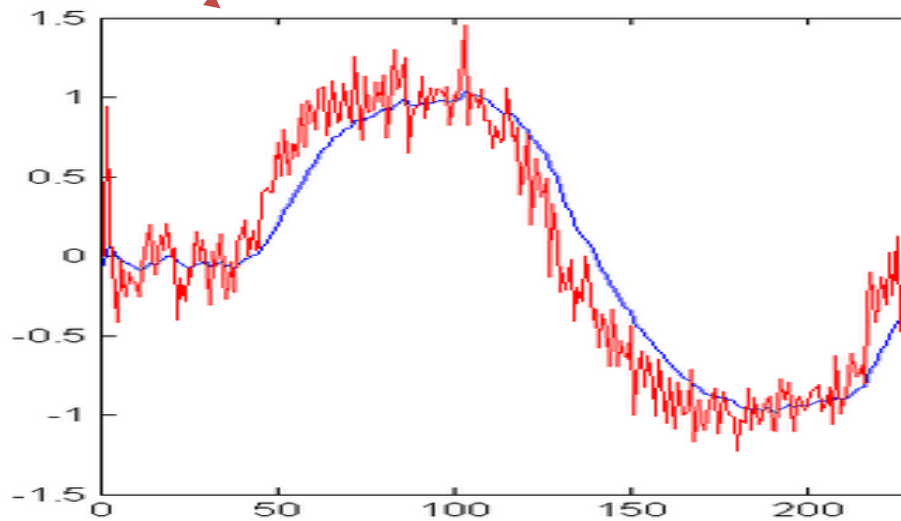




$$H(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}$$

FILTRADO

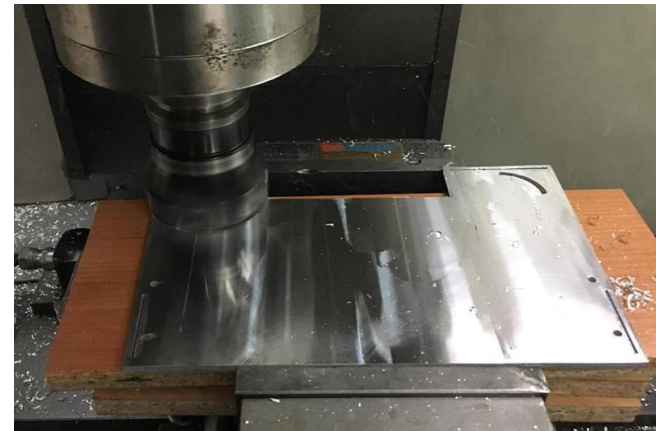
$$y[n] = (1 - \alpha)x[n] + \alpha y[n - 1]$$





CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION

MECANIZADO





PULIDO



RECUBRIMIENTO



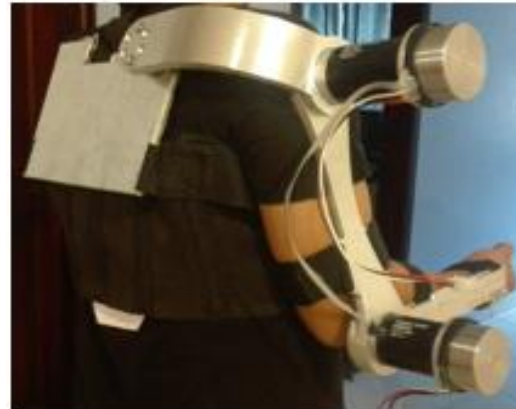
SUJECCIÓN



IMPRESIÓN 3D



ENSAMBLE





ENSAMBLE FINAL





CARGA	CODO		HOMBRO	
	ÁNGULO	TIEMPO	ÁNGULO	TIEMPO
1 kg	30°	0,56 Seg	25°	0,81 Seg
	60°	1,14 Seg	50°	1,62 Seg
	90°	1,65 Seg	75°	2,43 Seg
	120°	2,25 Seg	100°	3,25 Seg
	ÁNGULO	TIEMPO	ÁNGULO	TIEMPO
3 kg	30°	0,58 Seg	25°	0,81 Seg
	60°	1,16 Seg	50°	1,63 Seg
	90°	1,68 Seg	75°	2,47 Seg
	120°	2,28 Seg	100°	3,28 Seg
	ÁNGULO	TIEMPO	ÁNGULO	TIEMPO
6 kg	30°	0,6Seg	25°	0,84 Seg
	60°	1,2 Seg	50°	1,66 Seg
	90°	1,74 Seg	75°	2,49 Seg
	120°	2,3 Seg	100°	3,3 Seg
	ÁNGULO	TIEMPO	ÁNGULO	TIEMPO
9 kg	30°	0,6 Seg	25°	0,86 Seg
	60°	1,22 Seg	50°	1,69 Seg
	90°	1,75 Seg	75°	2,52 Seg
	120°	2,32 Seg	100°	3,3 Seg
	ÁNGULO	TIEMPO	ÁNGULO	TIEMPO
12 kg	30°	0,63 Seg	25°	0,86 Seg
	60°	1,25 Seg	50°	1,71 Seg
	90°	1,8 Seg	75°	2,54 Seg
	120°	2,4 Seg	100°	3,36 Seg

PRUEBAS Y RESULTADOS

PRUEBA DE TIEMPO DE LEVANTAMIENTO



PRUEBA DE MOVIMIENTO



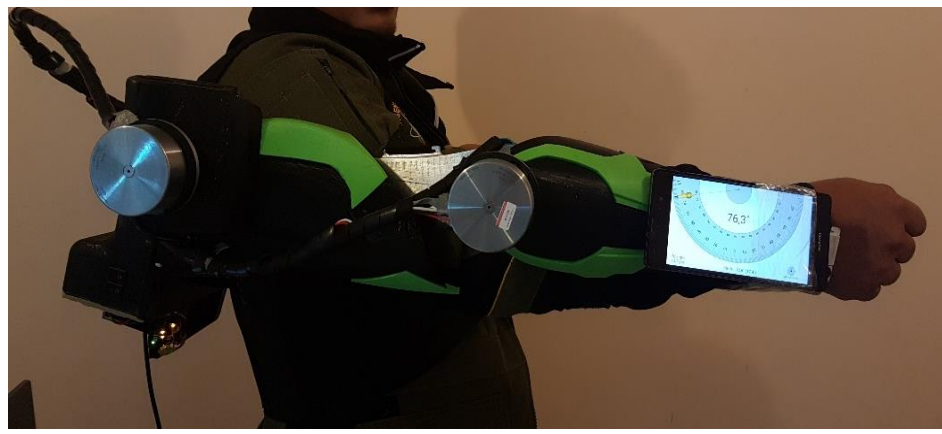
ÁNGULO	FLEXIÓN CODO		ÁNGULO	FLEXIÓN HOMBRO	
0-120°	1	119,95°	0-100°	1	99,81°
	2	119,95°		2	98,20°
	3	119,84°		3	99,62°
	4	119,84°		4	99,81°
	5	119,70°		5	99,61°
	P	119.84°		P	99.694

ÁNGULO	EXTENSIÓN CODO		ÁNGULO	FLEXIÓN HOMBRO	
			O		
120° - 0°	1	0,75°	100°- 0°	1	0,61°
	2	0,75°		2	0,61°
	3	0,84°		3	0,00°
	4	0,84°		4	0,61°
	5	1,00°		5	0,2°
	P	0,804°		P	0,414°



ÁNGULO	CODO		ÁNGULO	HOMBRO	
De 0° a 30°	1	30,84°	De 0° a 25°	1	25,00°
	2	30,84°		2	25,00°
	3	30,84°		3	24,61°
	4	29,95°		4	25,00°
	5	30,84°		5	24,61°
	P	30,662°		P	24,844°
De 30° a 60°	1	60,95°	De 25° a 50°	1	49,24°
	2	60,95°		2	49,24°
	3	61,00°		3	49,61°
	4	60,95°		4	50,00°
	5	60,95°		5	50,00°
	P	60,96°		P	49,618°
De 60° a 90°	1	89,95°	De 50° a 75°	1	75,00°
	2	89,95°		2	75,61°
	3	90,84°		3	75,24°
	4	90,84°		4	76,30°
	5	90,84°		5	75,00°
	P	90,484°		P	75,692°
De 90° a 120°	1	120,84°	De 75° a 100°	1	98,21°
	2	120,84°		2	99,24°
	3	120,84°		3	99,24°
	4	120,84°		4	99,24°
	5	120,84°		5	99,76°
	P	120,84°		P	99,418°

PRUEBA DE MOVIMIENTO



CONCLUSIONES



- A pesar de que el exoesqueleto se diseñó para levantar 12 kilogramos se puede alcanzar 13 kilogramos sin ningún tipo de problema en su estructura y en su funcionamiento.
- En los parámetros de diseño se estableció que la velocidad más conveniente para trabajo de flexo-extensión en el codo es $38,30^\circ/s$ y en el hombro $16,92^\circ/s$, y se comprueba que estas velocidades se mantienen constantes debido a que es una velocidad establecida en la configuración de las servocontroladoras el parámetro que sufre mínimas variaciones es el tiempo de acuerdo a la carga aplicada por efectos del arranque y frenado
- Los resultados obtenidos luego de hacer el análisis estadístico se ve que en el movimiento de flexo-extensión del codo la precisión es $\pm 0,7365^\circ$ que representa el 98,946 % de confiabilidad. En el movimiento de flexo-extensión del hombro la precisión es $\pm 0,643$ que representa el 97,428 % de confiabilidad.



CONCLUSIONES



- Se diseñó e implemento un exoesqueleto para extremidad superior capaz de levantar y transportar una carga de hasta 120 Newtons con un esfuerzo mínimo dentro de los entornos de trabajo. La estructura se basó en datos antropométricos de la población ecuatoriana y en su biomecánica. Estos aspectos fueron fundamentales para que el exoesqueleto sea ergonómico y cómodo para el usuario.
- El exoesqueleto es capaz de moverse en dos grados de libertad. El primero, un movimiento de flexión-extensión en la coyuntura del codo en un rango de 0 a 120 °. Y el segundo en la coyuntura del hombro para un movimiento de flexo-extensión de 0 a 100°.
- El exoesqueleto cumple con todos los parámetros de requerimientos que se establecieron para el diseño con lo cual el dispositivo es seguro confiable y no sufrirá fallas.



RECOMENDACIONES



- A pesar de que el exoesqueleto cumple de forma adecuada con la mayoría de los parámetros de diseño requerido para multiplicar la fuerza se recomienda la implementación del otro miembro superior para incrementar la aplicabilidad del exoesqueleto dentro de la industria.
- El peso final del exoesqueleto se encuentra dentro de los rangos de peso manejados por los exoesqueletos comerciales, sin embargo se recomienda investigar e implementar materiales más resistentes y sobre todo más livianos que permitan construir una estructura mucha más ligera.
- Para optimizar el funcionamiento del exoesqueleto a futuro se debería investigar, diseñar y probar distintas formas de control que se adapte a las condiciones físicas de las personas dentro de un ambiente industrial, para que el exoesqueleto trabaje en paralelo con los movimientos del cuerpo, por ejemplo se podría emplear señales neuromotoras en tiempo real.



RECOMENDACIONES



- Por motivos de la gran energía que requiere la puesta en marcha del exoesqueleto, se generan inconvenientes como el tiempo de duración y peso de las baterías, por lo cual se recomienda buscar otro tipo de fuentes de voltaje que optimicen su capacidad y peso en mayor capacidad.





GRACIAS

