



TEMA: ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE EXOESQUELETO PARA MIEMBRO SUPERIOR UTILIZANDO MÚSCULOS ARTIFICIALES PARA DETERMINACIÓN DE LIMITACIONES DE LA TECNOLOGÍA DE ROBÓTICA BLANDA, EN MULTIPLICADORES DE FUERZA.

AUTOR:

ANDRÉS ELÍAS SALGUERO TACO

DIRECTOR:

ING. SYLVIA NATHALY REA MINANGO



Resumen	
Objetivos	
Fundamentación teórica	
Diseño del sistema mecánico, electrónico y sistema de control	
Pruebas y Resultados	
Video Demostrativo	
Conclusiones y Recomendaciones	



RESÚMEN

El presente trabajo de titulación realiza el estudio e implementación de un prototipo de exoesqueleto multiplicador de fuerza para miembro superior derecho, aplicando los conceptos de robótica blanda mediante la creación de músculos artificiales neumáticos. El proyecto está enfocado a facilitar el levantamiento y traslado repetido de cargas pesadas, para lo cual el movimiento del brazo cuenta con dos grados de libertad, comandados por sensores electro-miográficos, los mismos que captan la señal analógica enviada por los músculos del operario; esta señal es tratada por un circuito de disparo PWM amplificando el voltaje en un rango de 0 a 10 voltios, permitiendo la activación de las válvulas proporcionales que entregan la presión necesaria en un rango de 0 a 6 bares con la que se llenan los músculos neumáticos, ejerciendo la fuerza necesaria para el levantamiento de la carga. El exoesqueleto está diseñado con un factor de multiplicación de fuerza en el rango de 1.2 y 2. El prototipo fue sometido a pruebas usando diferentes cargas, dentro del rango establecido por la normativa ecuatoriana, lo cual permitió validar el rango de trabajo del mismo y concluir que la tecnología de robótica blanda permite al operario tener mejor movilidad y flexibilidad al realizar los movimientos de levantamiento. También, se realizó el análisis del uso de robótica blanda en multiplicadores de fuerza y su factibilidad a comparación de la robótica rígida, en base a una comparación con trabajos existentes.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar e implementar un exoesqueleto para miembro superior multiplicador de fuerza utilizando músculos artificiales para determinar las limitaciones de la tecnología de robótica blanda en este tipo de aplicaciones.

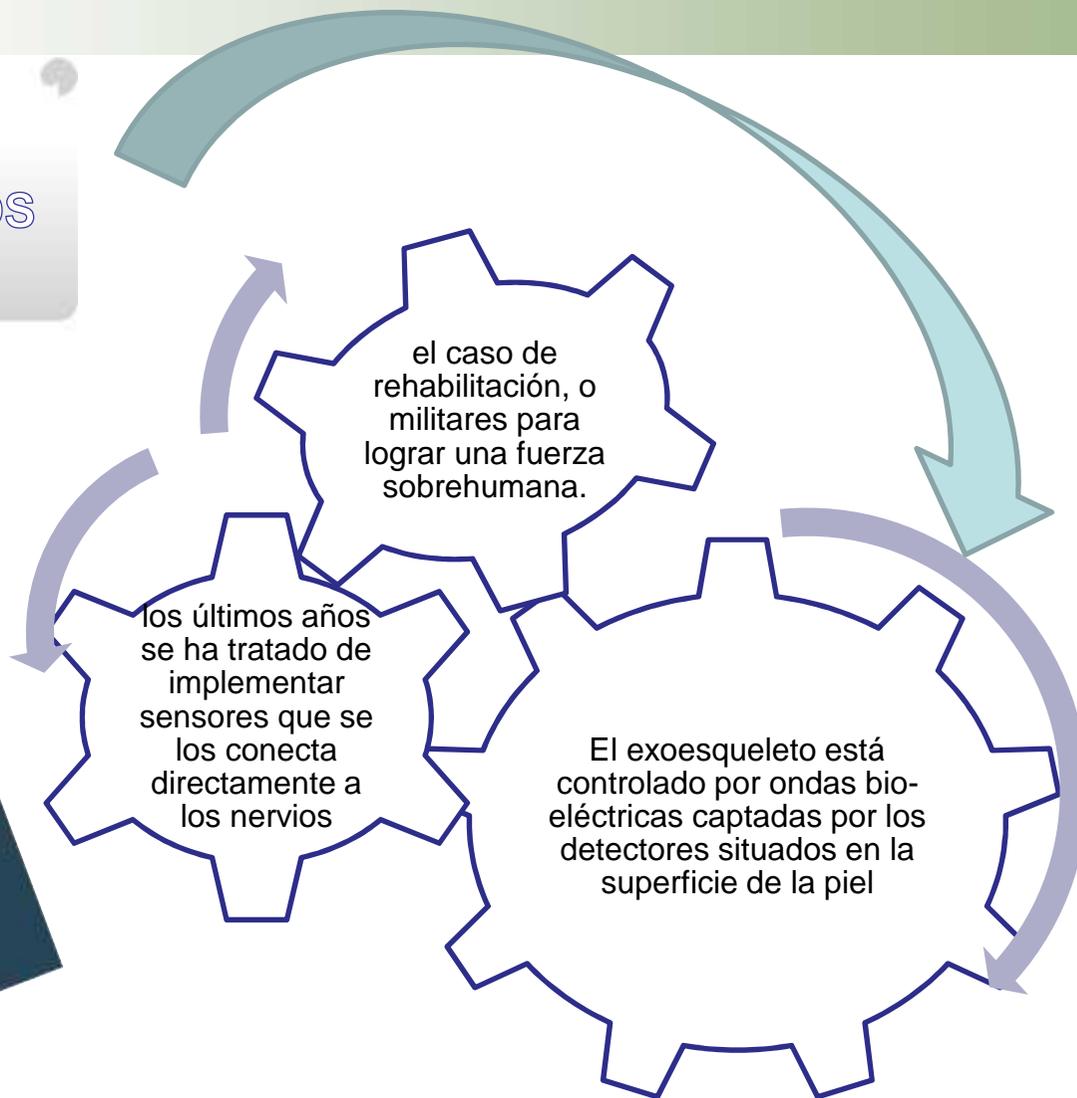
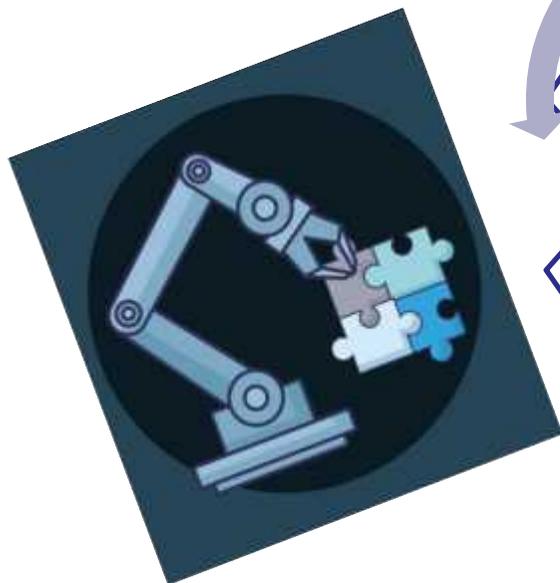
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y estudiar los tipos de mecanismos usados en exoesqueletos multiplicadores de fuerza y las formas del uso de robótica blanda.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar la estructura del exoesqueleto del brazo de acuerdo a parámetros anatómicos.
- Seleccionar los materiales, componentes y programas adecuados para la creación del exoesqueleto con robótica blanda.
- Construir el prototipo del exoesqueleto de brazo multiplicador de fuerza.
- Realizar las pruebas necesarias para el prototipo.
- Analizar las limitaciones que presenta la tecnología de robótica blanda aplicada en exoesqueletos multiplicadores de fuerza.

EXOESQUELETOS



Manual de cargas máximas permisibles en el ecuador

Decreto Ejecutivo 2393 Reglamento de Seguridad y Salud de los trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo, en el Artículo 128.



BBMGIF.COM

Un trabajador con preparación o capacitación previa evita y reduce la exposición a los accidentes laborales

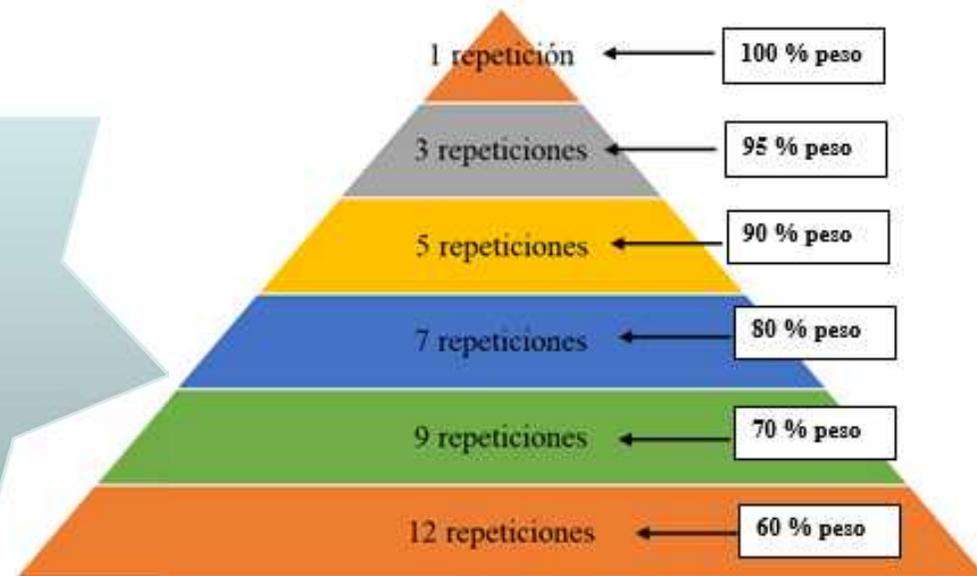
según Mital y Manivasgan (1983) determinan que el trabajador industrial masculino con experiencia puede en promedio trabajar con un peso de 6 kg más que el que no tiene experiencia.

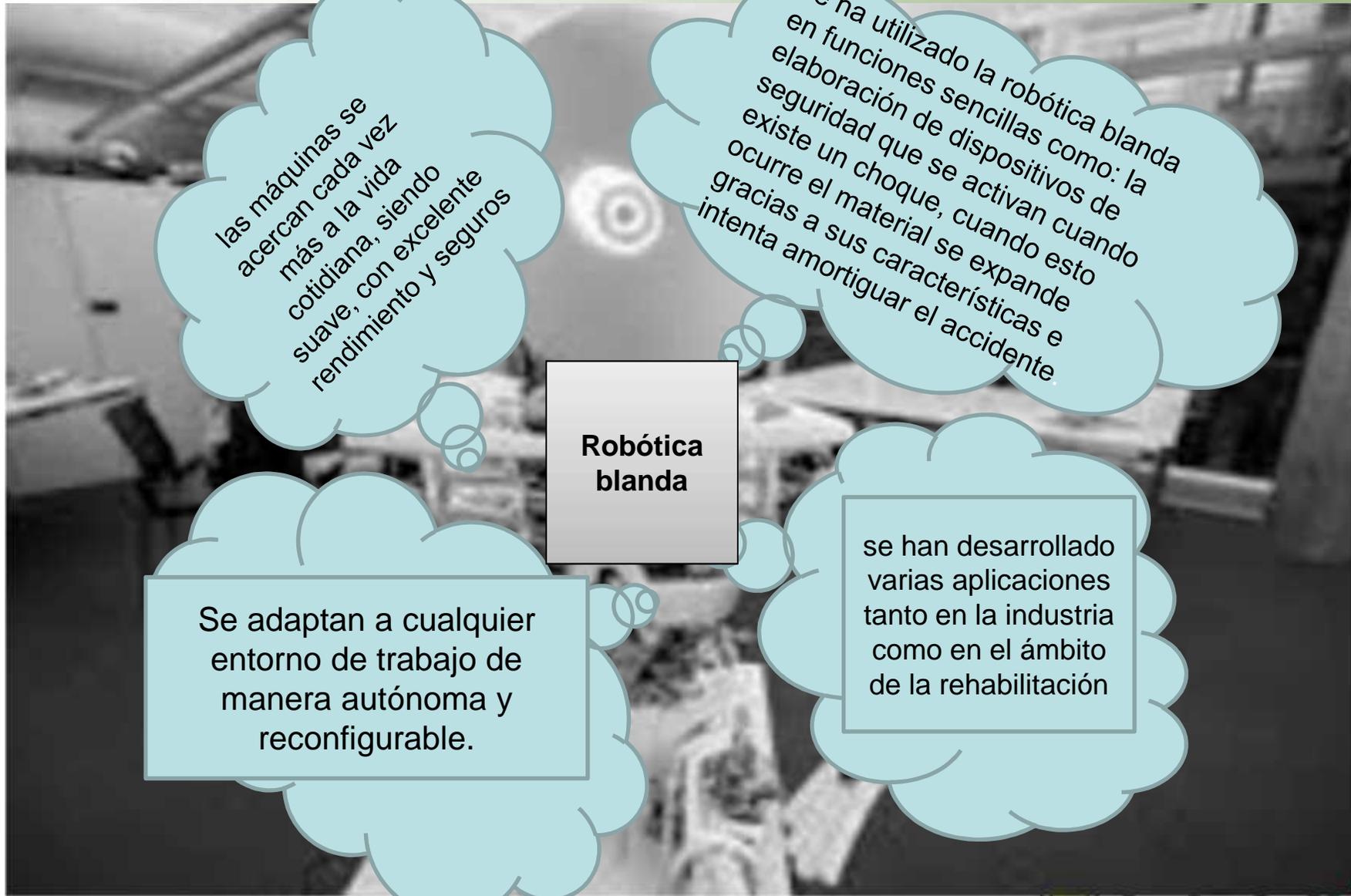
Depende también de la resistencia del trabajador para desempeñar una tarea manual determinada.

Pirámide de fuerza



método para ajustar el peso a ser levantado, la cual está diseñada para evitar lesiones, moderando la cantidad de peso.





las máquinas se acercan cada vez más a la vida cotidiana, siendo suave, con excelente rendimiento y seguros

Robótica blanda

se ha utilizado la robótica blanda en funciones sencillas como: la elaboración de dispositivos de seguridad que se activan cuando ocurre un choque, cuando esto sucede el material se expande gracias a sus características e intenta amortiguar el accidente.

Se adaptan a cualquier entorno de trabajo de manera autónoma y reconfigurable.

se han desarrollado varias aplicaciones tanto en la industria como en el ámbito de la rehabilitación



Aplicaciones de la robótica blanda



Músculos robóticos



Robots protésicos



Robots escaladores

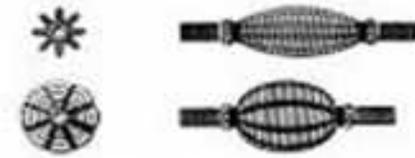


Robots comestibles



Wearable robots (robots vestibles)





genera una fuerza de tracción inicial más grande, su fuerza disminuye en el transcurso del movimiento de contracción

no tiene partes mecánicas móviles

trabaja como un cilindro de simple efecto que actúa contra una carga constante

Estructura robusta

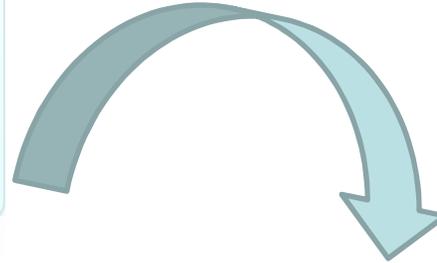
Actuadores de tracción que funcionan como un músculo humano

Músculos neumáticos

Hermético



DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO, ELÉCTRICO Y SISTEMA DE CONTROL



Selección del tipo de músculo artificial

Pruebas para determinar características con músculo armado

Parámetros de diseño de la estructura mecánica

Diseño y selección de componentes de la estructura mecánica

Sistema neumático

Sistema electrónico

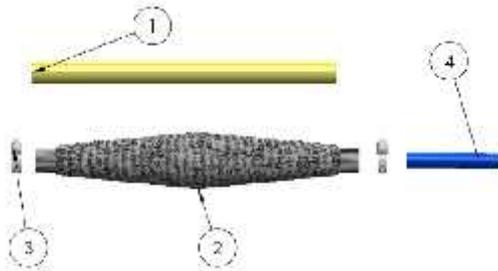
Programación



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SELECCIÓN DEL TIPO DE MUSCULO ARTIFICIAL

Diseño del músculo artificial mckibben



Selección de vejiga interna elastómera

LATEX



SILICONA



FOURTERANO



Selección de malla exterior trenzada



Pinzas finales o abrazaderas

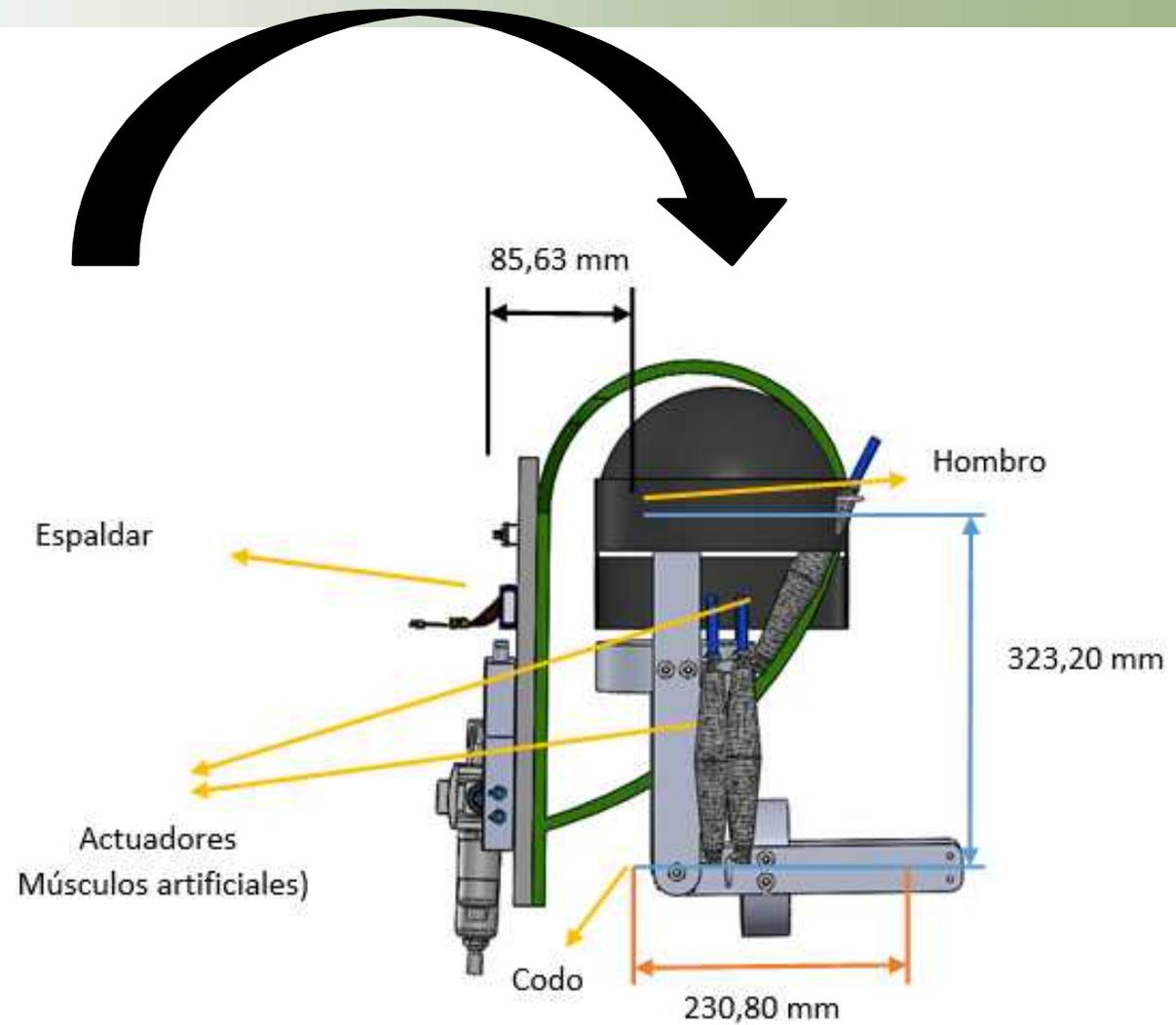


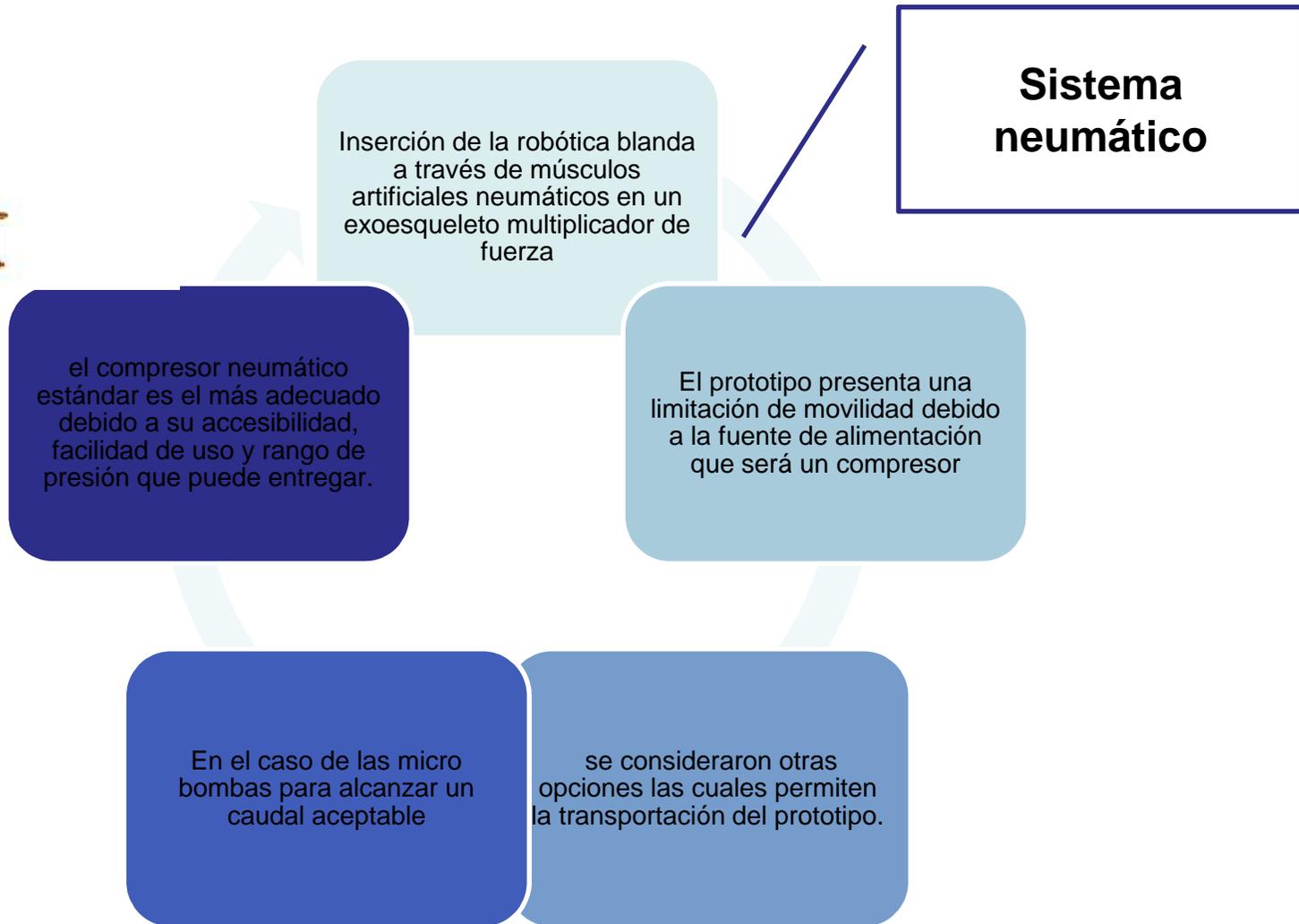
Selección de tubo flexible



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Diseño y
selección de
componentes de
la estructura
mecánica**

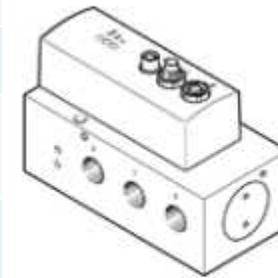




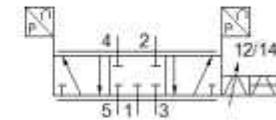
Selección de válvulas

Válvulas Proporcionales

Criterios de selección	Peso	MPYE-5-3/8-010-B		VEMP-BS-3-16-D7-F-28T1-P30		VPWP-10-L-5-Q-10-EG-EX1	
		Calif.	Evaluación Ponderada	Calif.	Evaluación Ponderada	Calif.	Evaluación Ponderada
Activación eléctrica	10%	5	0,5	5	0,5	5	0,5
Dirección de flujo no reversible	10%	5	0,5	5	0,5	5	0,5
Gran caudal nominal	20%	5	1	1	0,2	5	1
Presión laboral hasta 6 bar	10%	4	0,4	1	0,1	5	0,5
Setpoint con poco voltaje	10%	5	0,5	2	0,2	2	0,2
Peso	20%	3	0,6	5	1	2	0,4
Bajo Costo	20%	2	0,4	1	0,2	2	0,2
Total, de puntos			3,9		2,7		3,3
	Lugar		1		3		2
			Seleccionado				



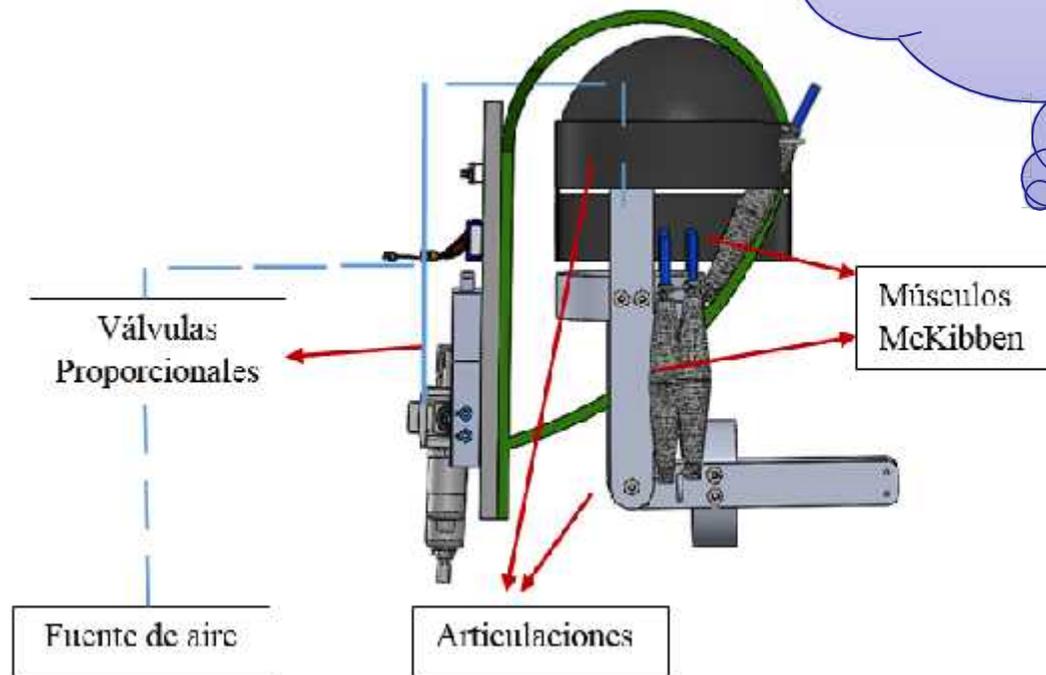
a)

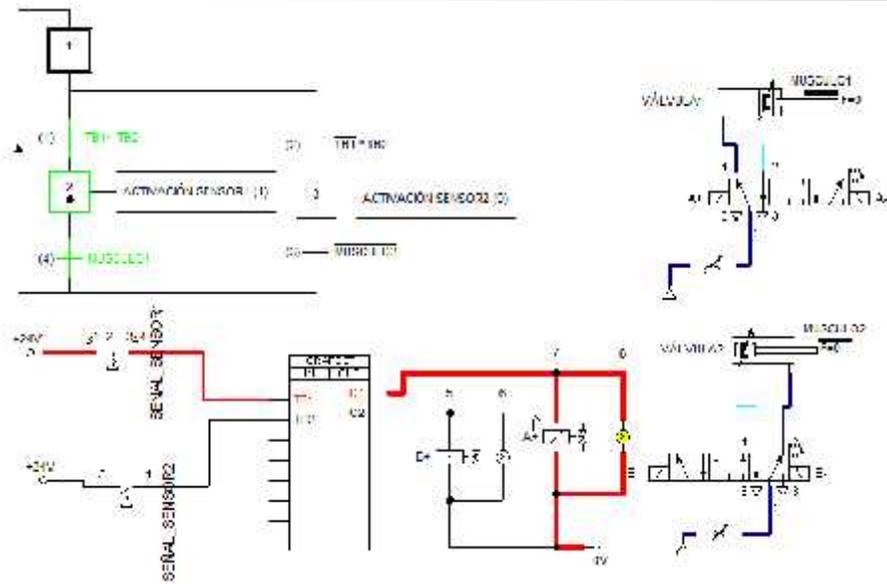


b)



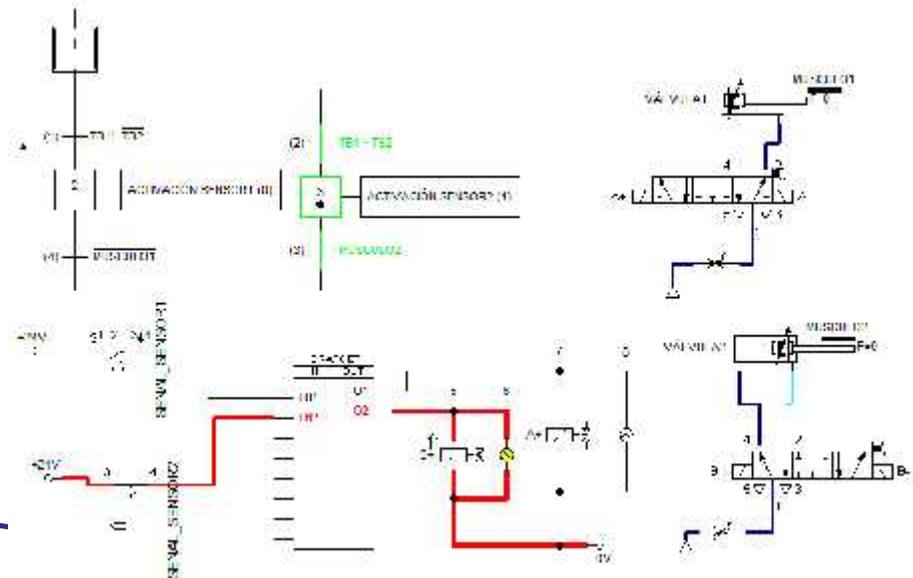
Configuración de circuito neumático





Activación de músculo neumático 1

Activación de músculo neumático 2



Sistema electrónico

El tipo de control eléctrico utiliza corriente eléctrica para el accionamiento de los músculos artificiales tipo de señal aceptada por el controlador es llamada módulo de ancho de pulso (PWM)

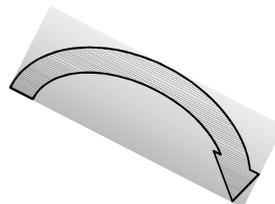
la cual mediante las etapas de filtrado y amplificación son enviadas a las válvulas.

Las válvulas deben ser alimentadas por una fuente externa de 24 [V], sin esta alimentación el solenoide no se activa y por ende no se controla de manera proporcional la válvula.

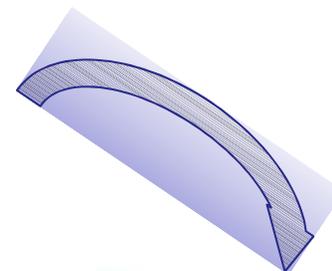
Dependiendo del voltaje enviada por el controlador la válvula permite el paso del aire de manera proporcional.

Selección de sensores

Sensor Muscular Advancer Technologies V3



Sensor Mieléctrico MyoWare



Conexión sensor electromiográfico
Fuente



Alimentación

Los elementos eléctricos deben ser ubicados en el espaldar a manera de mochila

es imperativo usar baterías para la alimentación del circuito.

Para el circuito de potencia se necesita una corriente de 500mA.

Se tilizo lipo-baterías, capaces de proporcionar el amperaje necesitado y cuentan con la ventaja de ser recargables.

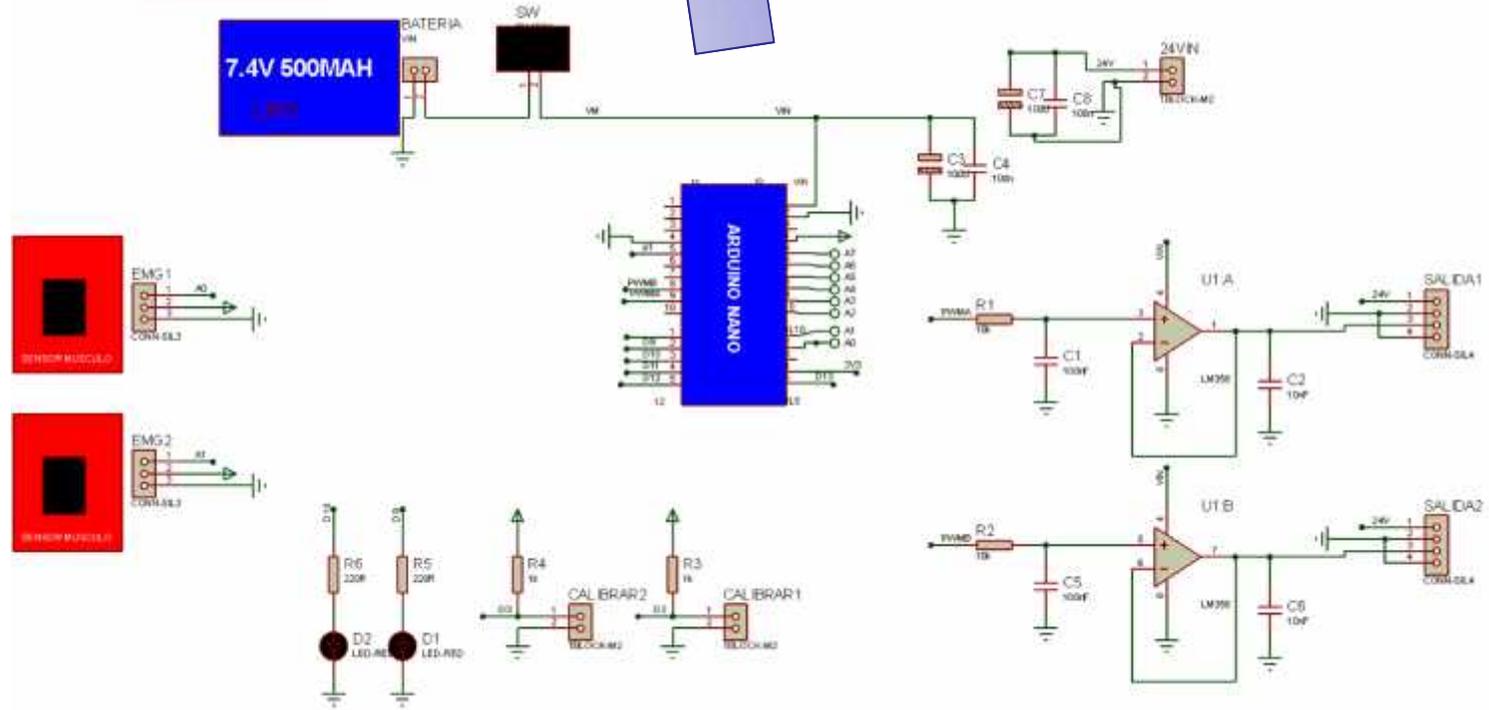
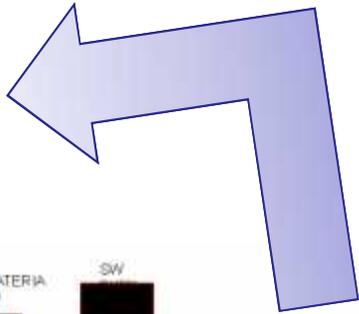
Las baterías adquiridas para las pruebas del prototipo son de 3 Ah.

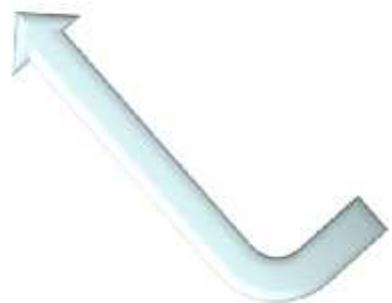
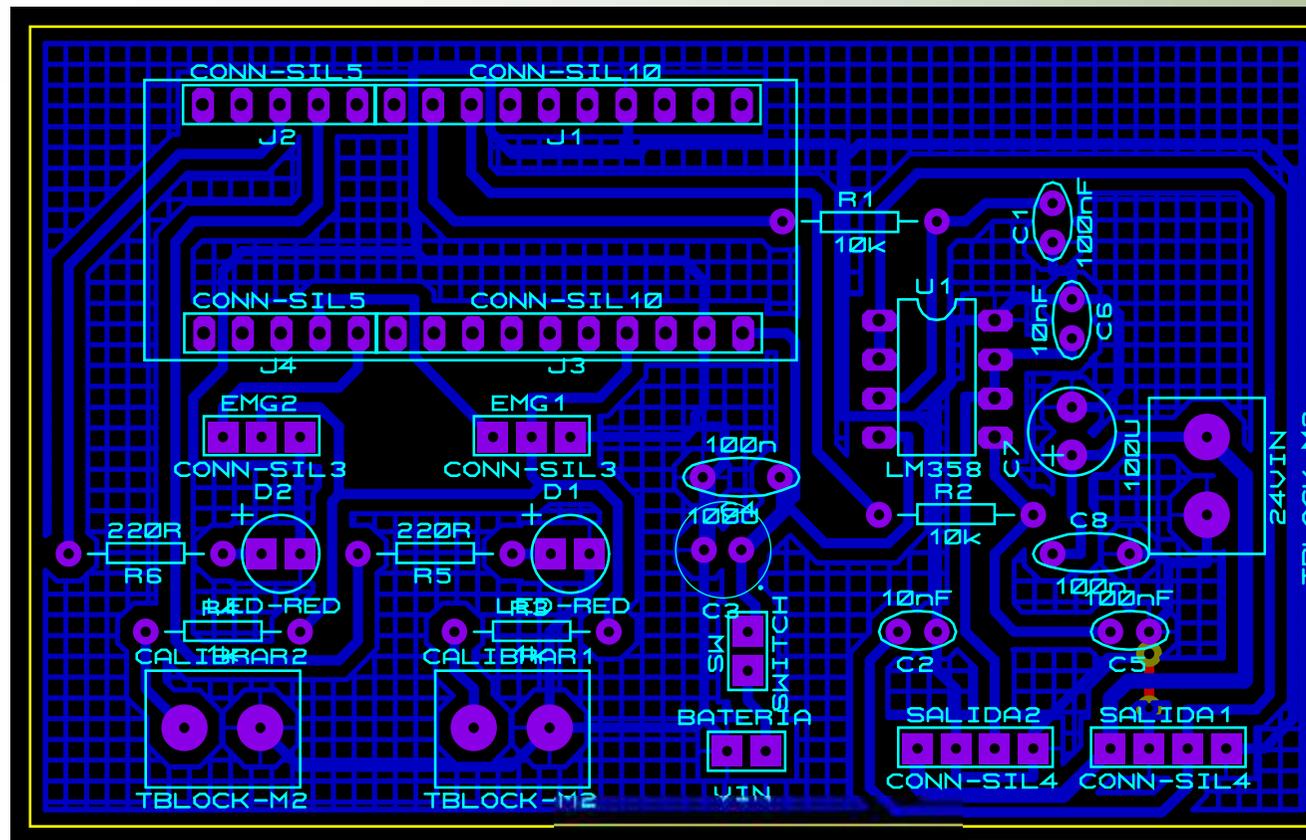
$$\text{tiempo de activación por hora} = 12 * 1\text{min} = 12\text{min}$$

$$\text{amperaje consumido por hora} = \frac{12\text{min} * 5\text{ A}}{60\text{ min}} = 1\text{ A}$$

$$\text{tiempo de vida de batería} = \frac{3\text{ Ah}}{1\text{ A}} = 3\text{ horas}$$

Circuito eléctrico





Diseño de PCB
del circuito de
control
Fuente propia



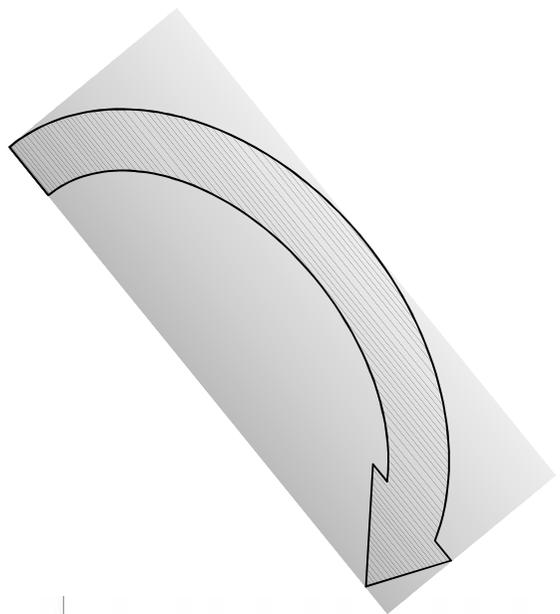
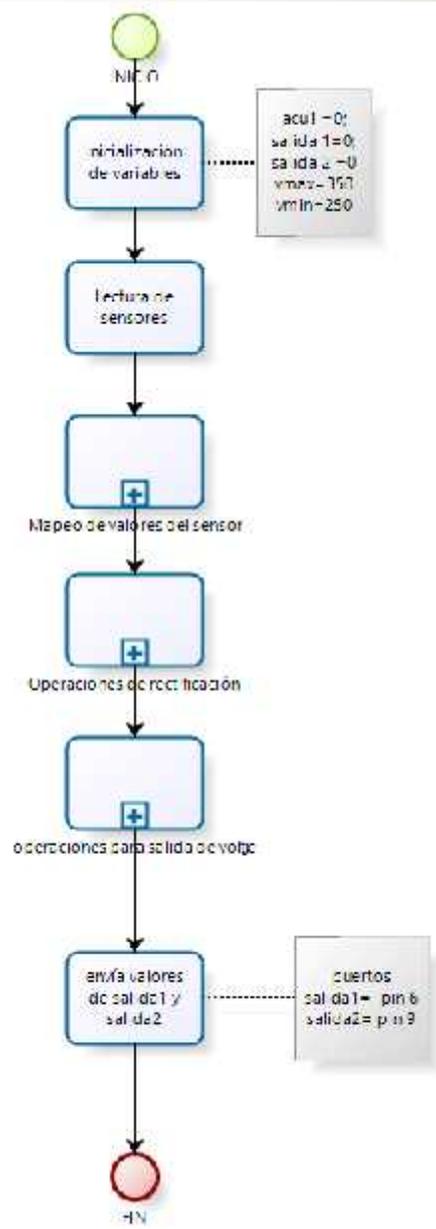
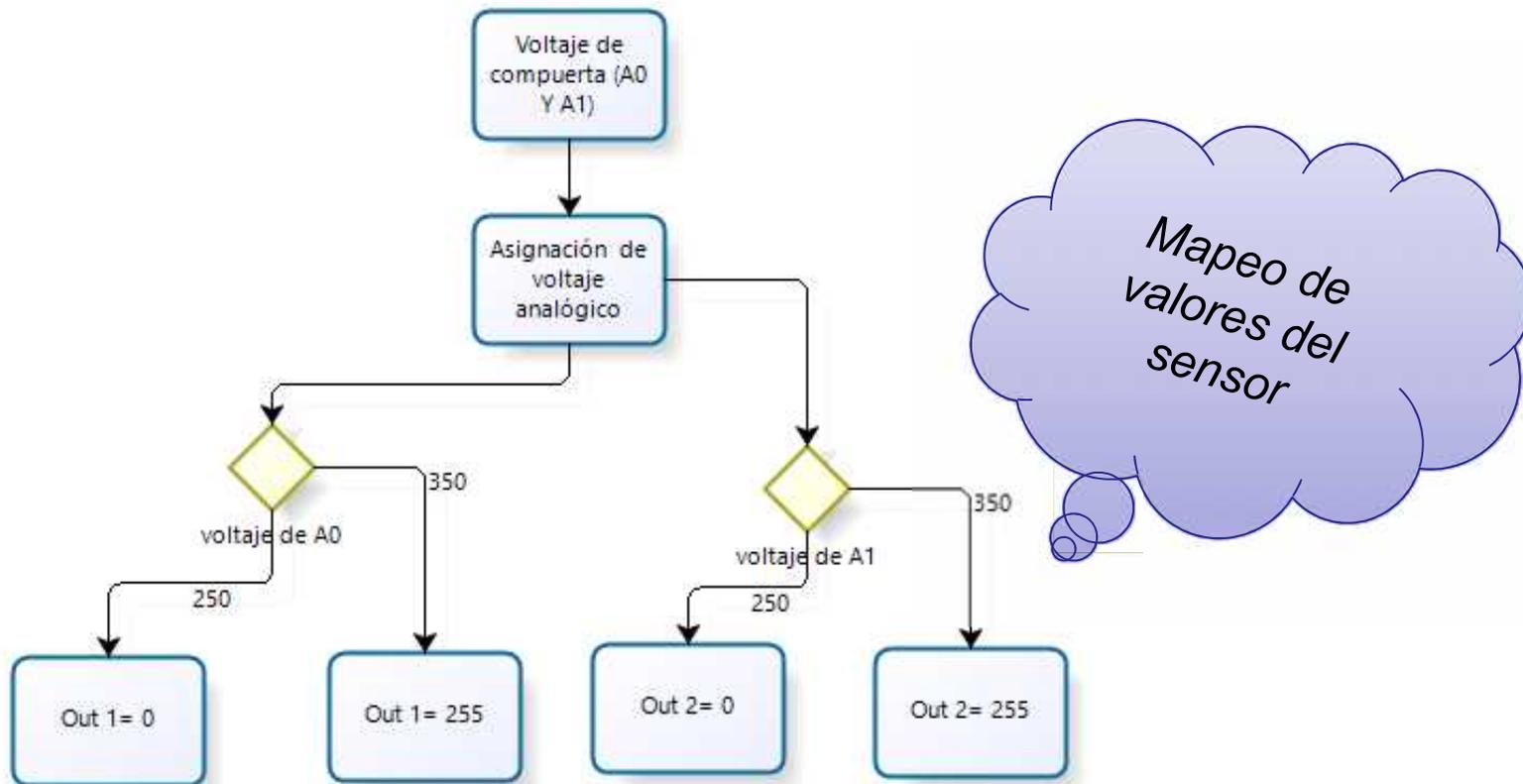
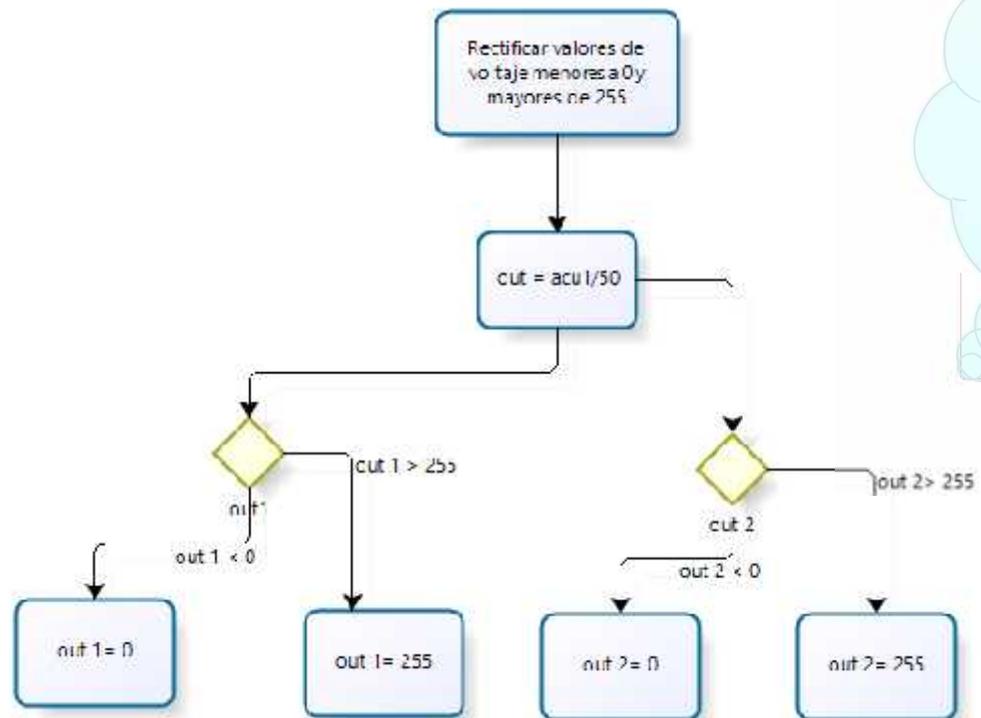
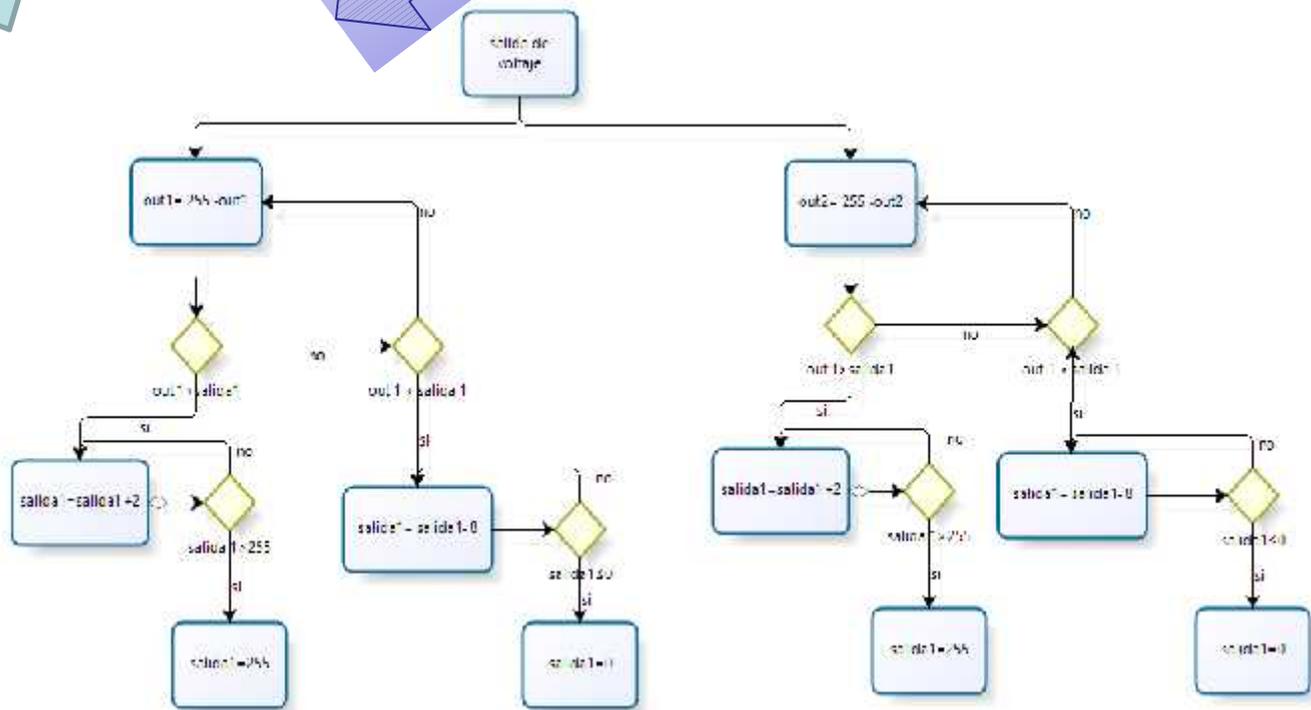
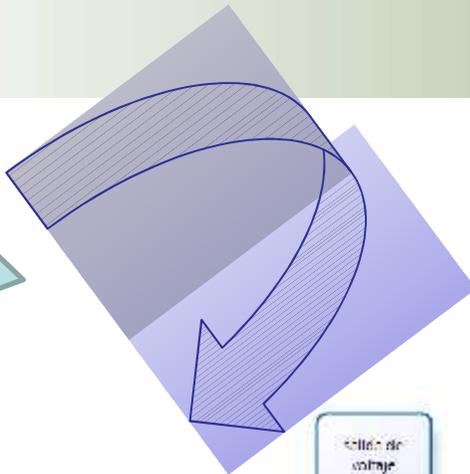


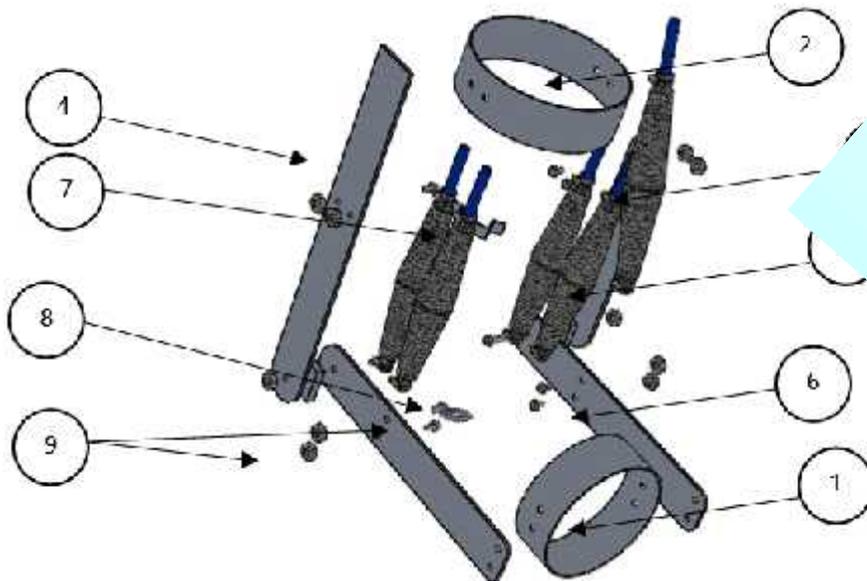
Diagrama de flujo general





Operaciones para salida de voltaje

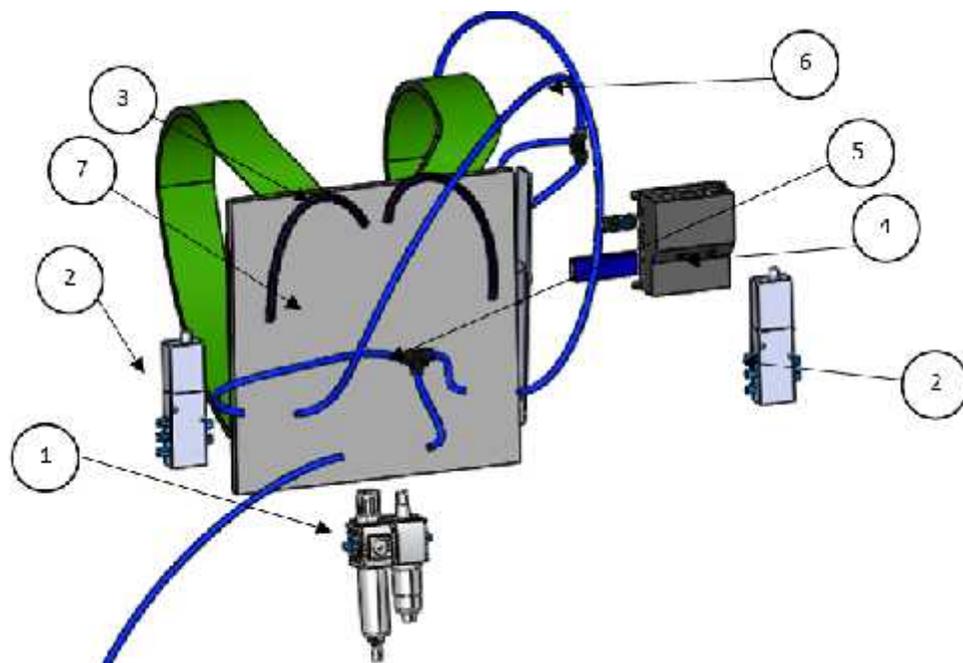




construcción

PIEZAS

Número	Nombre	Cantidad
1	Agarre circular de brazo	1
2	Agarre circular de antebrazo	1
3	Placa hombro-codo interno	2
4	Placa hombro-codo externo	1
5	Músculo neumático hombro - biceps	5
6	Placa codo-mano	2
7	Plaquita de aluminio en C	3
8	Anillo de acero	4
9	Juego de perno y tuerca 3/16"	14



PIEZAS		
Número	Nombre	Cantidad
1	Unidad de mantenimiento	1
2	Válvula proporcional	2
3	Cable conector	2
4	Caja de elementos eléctricos	1
5	Manguera neumática	5 [m]
6	Racor en T 3/8"	2
7	Placa de dura aluminio	3

Construcción de exoesqueleto

Para la sujeción de los eslabones en codo y hombro se utilizó una combinación de perno, tuerca y arandelas, la cual permite la transmisión de movimiento por los actuadores



soporte con correas juntamente con el brazo para una sujeción más segura



cuenta con un seguro ajustable evitando un malestar al momento de levantar peso



Construcción de los músculos artificiales



Se realiza el mismo procedimiento para los 4 músculos artificiales con medida de 18cm

Se corta la manguera de látex con medida de 20,5cm



ingresa la manguera cortada en la malla trenzada



Sellar evitando fugas de aire

Se coloca en uno de los extremos el tubo de aire de medida 8mm



Ajustar el extremo conjuntamente con la manguera de látex y la malla trenzada

Instalación de músculos artificiales

Los músculos artificiales son colocados de dos en dos, cada par es instalado en los costados de la estructura con ayuda del aro de 1



los músculos artificiales para el movimiento del hombro son colocados en el juego de correas que sostiene la estructura de aluminio

Se sujeta al agarre de aluminio, para lograr el movimiento de músculo

Se realizo estos pasos para la instalación en los dos costados de la estructura



Construcción de soporte de espaldar y hombro

El espaldar se lo realiza de duraluminio con espesor de 8mm, estas piezas se las corta a la medida con ayuda de una cierra circular



Soporte para el espaldar



Faja de seguridad

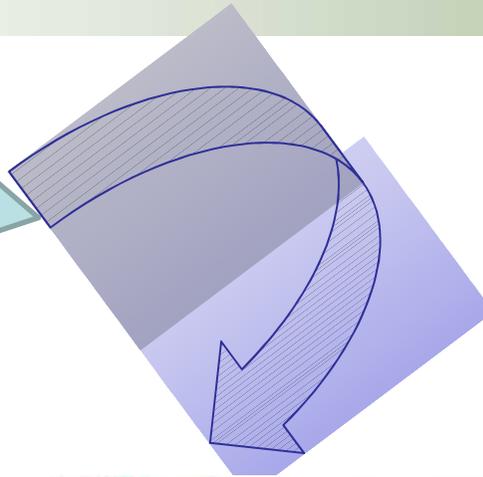


implementación de los elementos eléctricos, válvulas y de control en la parte del espaldar



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Construcción de circuito de disparo



Conectores de válvulas

Alimentación de válvulas



Conectores de sensores



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Implementación de control proporcional neumático con exoesqueleto

conexión en las válvulas proporcionales, su alimentación parte del abastecimiento regulado por la unidad de mantenimiento

Alimentación a válvulas proporcionales



Alimentación a músculo neumático

Conexión a la unidad de mantenimiento

Conexión a la unidad de mantenimiento



Alimentación de aire comprimido

Alimentación a músculo del hombro



Alimentación a músculo del torso



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

$$\bar{T} \geq \mu_0 \text{ o } T > t_{\alpha/2}$$

VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis planteada es la siguiente:

La hipótesis planteada en el proyecto es:

¿Es factible la utilización de la tecnología de robótica blanda en la implementación de exoesqueletos para miembro superior con un factor de multiplicación de fuerza en un rango de 1,2 a 2?

Hipótesis alternativas	Condición de validación
$\mu > \mu_0$	$T > t_{\alpha}$
$\mu < \mu_0$	$T < -t_{\alpha}$
$\mu = \mu_0$	$T < -t_{\alpha/2} \text{ o } T > t_{\alpha/2}$

T: Es el valor de distribución calculada

: Es el valor de distribución obtenido

VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Para la validación de la hipótesis se consideró que el exoesqueleto multiplicador de fuerza debe levantar peso con un factor de multiplicación en rango de 1.2 a 2



Peso inicial	Factor de multiplicación	Peso final para levantar con exoesqueleto
6.084 [kg]	1.2	7.3 [kg]
6.084 [kg]	1.3	7.91 [kg]
6.084 [kg]	1.4	8.52[kg]
6.084 [kg]	1.5	9.13 [kg]
6.084 [kg]	1.6	9.73[kg]
6.084 [kg]	1.7	10.3 [kg]
6.084 [kg]	1.8	10.9 [kg]
6.084 [kg]	1.9	11.55 [kg]
6.084 [kg]	2	12.17 [kg]

Alcances y limites

En lo referente al exoesqueleto: diferentes elementos en una sola estructura, requiere más tiempo debido a las diferentes conexiones

La colocación de los sensores musculares es un factor clave, dependen de su ubicación para que estos capten una señal adecuada del músculo humano

El ángulo final máximo alcanzado por el antebrazo es de 40° , levantando un peso de 14 kg

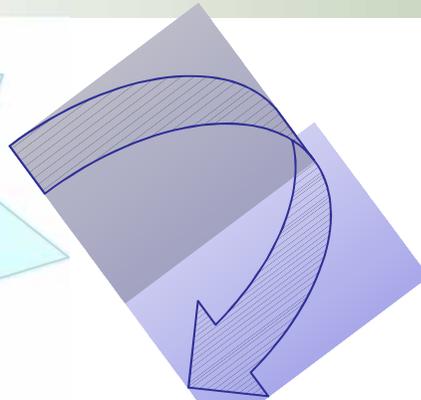
Se requiere tecnología más liviana en las válvulas proporcionales pero que aporten las mismas características, para disminuir su peso.

El peso de la estructura del brazo es de apenas 0.5 kg, mientras que el espaldar, debido a los componentes neumáticos, pesa más de 3 kg.

El ángulo máximo que alcanza el músculo neumático del hombro es de 30° por el limitado espacio en el brazo.



Comparación con exoesqueleto de robótica rígida



MULTIPLICADORES DE FUERZA DE EXTREMIDAD SUPERIOR DERECHA		
Característica	Robótica Blanda	Robótica Rígida (Lamingo y loor, 2018)
Peso de la estructura del brazo	0.2 kg	4 kg
Torque codo	53,32 [N.m]	33.22 [N.m]
Torque hombro	57,84 [N.m]	73 [N.m]
Control de movimientos	Presenta autonomía generado por los sensores musculares	Mando mecánico por joystick
Configuraciones previas	Calibración de sensores musculares	Servocontroladora ESCON 50/5
Tarjeta de adquisición de datos	Tarjeta Arduino nano	Tarjeta Arduino uno
Tiempo de reacción máxima	Reacción casi inmediata	Promedio de reacción máxima igual a 3.3 seg
Rango de movimiento	Flexión codo = 90° Flexión hombro = 30°	Flexión codo = 120° Flexión hombro = 100°
Prueba de carga sin usuario	Carga máxima = 10 kg	Carga máxima 12 kg



CONCLUSIONES

-) Los productos obtenidos con más dificultad de adquirir son las válvulas proporcionales y sus respectivos conectores ya que al ser distribuidos por un enfoque en específico deben ser adquiridos mediante previo pedido, también, los materiales necesarios para la creación de músculos neumáticos son casi inaccesibles por el poco conocimiento de estos en el mercado del país. Tanto los materiales para la construcción de la estructura del brazo y espaldar son de fácil acceso.
-) El sensor mioeléctrico envía un voltaje analógico diferente en cada movimiento ejercido por el usuario, el microcontrolador, al captar este voltaje analógico permite la intervención del circuito de disparo PWM para el funcionamiento de las válvulas proporcionales. La ubicación de los sensores mioeléctricos provocan variaciones en la señal que se envía, variando estos de 1,5 [V] hasta 3 [V]. A pesar de tener cada sensor una etapa de rectificación incorporado, varios factores externos ya sean estos de la piel o la cantidad de masa muscular del usuario influyen para obtener una lectura correcta de los datos a la tarjeta de control.

CONCLUSIONES

- El peso de la estructura del brazo es de 0.5kg por lo que es un peso relativamente bajo a comparación del exoesqueleto diseñado con robótica rígida siendo de 4kg, los componentes más pesados para el funcionamiento del exoesqueleto con robótica blanda son las válvulas proporcionales y su unidad de mantenimiento con regulador, pesando entre estos 3 componentes 3kg.
- El exoesqueleto multiplicador de fuerza ayuda al usuario para levantamientos de cargas hasta 14kg, no se sobrepasa de este peso debido a la deficiencia que adquiere. Su posicionamiento final es muy inferior a comparación de levantar pesos entre 1 y 6kg, por mantener la seguridad del operador se procura no sobrepasar dicho límite de carga.
- Los materiales para la creación de los músculos neumáticos pueden variar tanto en su composición o forma de acuerdo con la carga que se requiera levantar, en este proyecto se diseñan los músculos teniendo en cuenta la región en donde se los utiliza y la factibilidad de encontrar los materiales requeridos.

CONCLUSIONES

- La precisión de los músculos neumáticos es variante por el hecho de que depende de la señal electromiográfica de los sensores y estos dependen de la masa muscular del operario, también por la fricción generada en los músculos neumáticos cambiando la elasticidad del Latex y variando la fuerza con la que se infla la malla trenzada.
- La eficacia de la robótica blanda enfocados en los multiplicadores de fuerza es del 87%, levantando pesos hasta 14 kg, con posibilidad de mejoras. El desempeño que realiza el multiplicador de fuerza es el esperado de acuerdo con el diseño realizado, con la finalidad de corroborar los datos consultados se realizaron pruebas únicas con diferentes dimensiones de músculos neumáticos encontrando sus variantes y seleccionando el que mejor cumpla con las necesidades del proyecto.
- El músculo McKibben seleccionado cumple con una capacidad de elongación del 22.727% a su longitud nominal, con un músculo neumático de 20 cm se logra un desplazamiento lineal de 5 cm, aprovechando esta distancia para el cálculo de su ubicación. Colocándolo muy cerca del eje sacrificando el mecanismo de palanca para lograr una rotación en codo de 90°.

CONCLUSIONES

- Al colocar los músculos McKibben en paralelo generan una mayor fuerza, pero también ocupan mayor espacio en la estructura, exponiendo los demás elementos a fricción y por ende a desgaste del propio músculo neumático perdiendo las capacidades elásticas del Latex, por este motivo el diseño previene un desgaste excesivo del músculo neumático, siendo suficiente abastecerlo de aire comprimido a una presión máxima de 5 bares cumpliendo de manera efectiva el objetivo planteado.
- El exoesqueleto con robótica blanda permite mejor movilidad al brazo a diferencia de utilizar robótica rígida en la que se establece una posición de inicio y fin permaneciendo inmóvil el brazo hasta desempeñar el levantamiento de pesos. La robótica blanda permite un amplio rango de movilidad ya que los músculos neumáticos son completamente flexibles antes de realizar el levantamiento de peso.
- El mayor costo de la robótica blanda recae en sus elementos neumáticos, valorados cerca de \$2000 en las dos válvulas proporcionales más la unidad de mantenimiento, que sin estos dos elementos sería imposible el funcionamiento del presente proyecto.

RECOMENDACIONES

-) Para la creación de los músculos artificiales usar elementos existentes en la región donde se los fabrique, ya que en el país es casi inexistente este tipo de materiales lo que limita en gran medida al desarrollo de nuevas tecnologías.
-) Usar una malla trenzada de tecnología Techflex, ya que este material presta las características necesarias en la creación de músculos artificiales McKibben, brindando una amplia variación de medidas.
-) Recalibrar el sensor mioeléctrico por 5 segundos en cada uso, ejerciendo fuerza en este lapso de 5 segundos, también tomar en cuenta que los electrodos pierden su adherencia con la piel, enviando señales mio-eléctricas diferentes para cada usuario.
-) Utilizar válvulas con diferente tecnología más livianas con el fin de disminuir el peso de la estructura y que con estos favorezca a la ergonomía del diseño.

RECOMENDACIONES

-) Se recomienda no utilizar más de tres veces consecutivas el mismo electrodo del sensor mioeléctrico, debido a un factor de electrostática generada por la fricción de la piel y el electrodo, aumentando el valor de resistencia.
-) Colocar en otras posiciones el músculo neumático para generar mayores fuerzas en el levantamiento de cargas pesadas.
-) Como recomendación no trabajar con presiones mayores a 6 bares, ya que a estas presiones el latex genera mayor fricción provocando mayor desgaste en el Latex.

