



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
EXOESQUELETO DE 6 GDL PARA POTENCIAR
LAS CAPACIDADES EN PERSONAS QUE HAN
PERDIDO LA MOVILIDAD PARCIAL DEL
MIEMBRO SUPERIOR DERECHO.



PROBLEMA

- Evaluando el problema en el país, se ha investigado de manera general las discapacidades que afectan a ciertas personas en el Ecuador; existe la necesidad de este grupo de personas, de contar con un sistema ó dispositivo capaz de reconstituir la movilidad parcial perdida en la extremidad superior.
- Para dar solución a este problema se plantea la construcción de un exoesqueleto en donde se requiere un mecanismo aplicable a personas con invalidez parcial, y el paciente que lo utilice esté habilitado para mover el brazo, puesto que sus músculos no responden a las señales del cerebro impidiendo el movimiento de la extremidad. El diseño no es una prótesis que reemplaza al miembro; sino una estructura que rodea el brazo y le ayuda a moverse.

JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

- La implementación del proyecto se justifica ya que personas con capacidades especiales podrán recuperar el movimiento parcial de su brazo, el cual se ha perdido debido a alguna enfermedad congénita o por algún evento inesperado ocurrido a lo largo de su vida, además ayudará a este tipo de personas a integrarse a la sociedad ayudando con su trabajo, mejorando su autoestima y su eficiencia en el aporte de sus capacidades.
- Este proyecto, es de gran interés e importancia debido a que en el Ecuador no existe ningún avance de este tipo y los resultados obtenidos permitirán desarrollar otras aplicaciones relacionadas con la biomédica de extremidades del paciente.

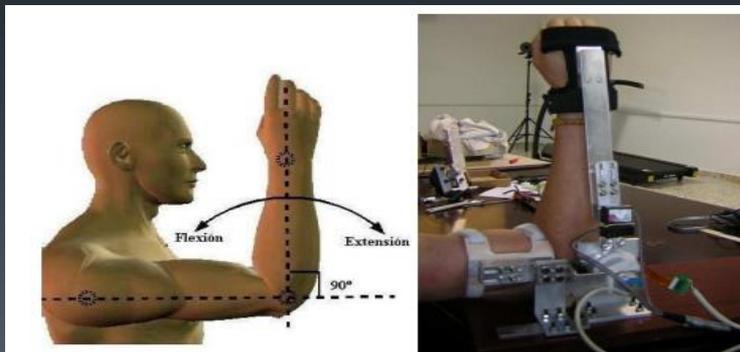
La construcción de este proyecto es muy relevante ya que los posibles beneficiarios serán:

- Personas con deficiencia muscular en el brazo.
- Personas con discapacidades físicas debido a enfermedades congénitas específicas.
- Personas con necesidad de compensación del movimiento en su extremidad superior.

IMÁGENES RELACIONADAS



WREX, Exoesqueleto para niña con artrogriposis congénita



Ejemplo de exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior.



DESCRIPCIÓN RESUMIDA DEL PROYECTO

- Para la construcción del exoesqueleto se tomarán en cuenta varias etapas resumidas a continuación:
- Adquisición de señales mioeléctricas.
- Procesamiento
- Actuadores

OBJETIVOS

- Diseñar y construir un exoesqueleto de 6 GDL para potenciar las capacidades en personas que han perdido la movilidad parcial del miembro superior derecho.
- Analizar el espectro de señales electromiográficas generadas por la contracción de los músculos del cuerpo y estudiar el comportamiento de las mismas.
- Diseñar un sistema mecánico resistente capaz de moverse con facilidad y cuyo material sea fuerte, ligero y flexible usando herramientas CAD CAM, considerando la seguridad del paciente.
- Seleccionar un sistema de actuadores eléctricos, para el exoesqueleto.
- Evaluar las señales emitidas por los músculos, para amplificar, acondicionar y adquirir datos.
- Implementar el sistema de control electrónico de movimiento del exoesqueleto.



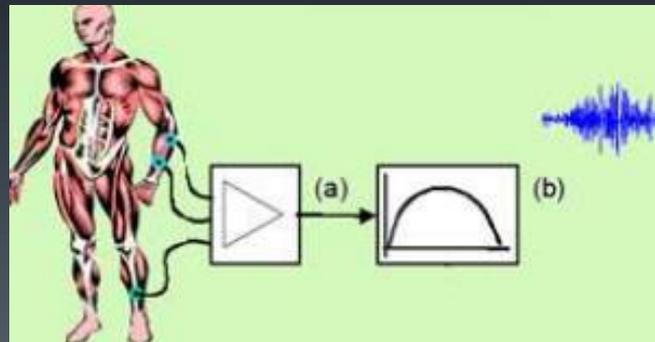
CAPÍTULO I

- GENERALIDADES

- ELECTROMIOGRAFÍA.- (EMG) es una técnica para la evaluación y registro de la actividad eléctrica producida por los músculos esqueléticos. La EMG se desarrolla utilizando un instrumento médico llamado electromiógrafo, para producir un registro llamado electromiograma. (Kamen, 2004)

SEÑALES ELECTROMIOGRÁFICAS

- Las señales electromiográficas, son aquellas que se producen al tensionar o distensionar un músculo, y resultan de la actividad química producida por una proteína. Al contraer los músculos, se genera una señal eléctrica de unos cuantos micro voltios, por lo que se hace necesario amplificar esta señal para poder utilizarla en algún dispositivo que se requiera. (Konrad, 2005).



Señales Electromiográficas

EXOESQUELETOS

- Exoesqueleto en el ámbito de la robótica es una máquina móvil que principalmente está compuesta de una estructura usada por una persona y una fuente de alimentación que suministra al menos una parte de la energía para el movimiento de las extremidades. En resumen, un exoesqueleto es una máquina portátil que ofrece una mayor capacidad humana física.



Exoesqueleto Hal

Partes constitutivas de un exoesqueleto

- De manera opuesta al esqueleto humano normal, el cual sostiene el cuerpo desde adentro, un exoesqueleto sostiene al cuerpo desde afuera. Los exoesqueletos usualmente son diseñados para permitir caminar o aumentar la fuerza y resistencia a las personas con desordenes de movilidad; los exoesqueletos tienen varios componentes clave como:
 - Estructura o marco
 - Baterías
 - Sensores
 - Controlador
 - Actuadores

Materiales

El exoesqueleto tendrá que ser hecho de materiales compuestos que sean fuertes, ligeros y flexibles, ya que el estudio de la ergonomía física determina que el sistema debe procurar el bienestar humano evitando la mala postura y el peso excesivo (Sociedad Internacional de Ergonomía, 2014).



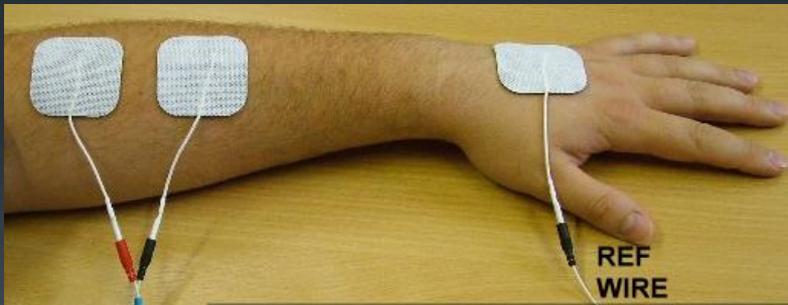
Baterías

- Se denomina batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, al dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad.
- Tipos:
 - Batería de níquel-cadmio (NiCd)
 - Batería de níquel e hidruro metálico (NiMH)
 - Batería de iones litio
 - Baterías de Li-Po



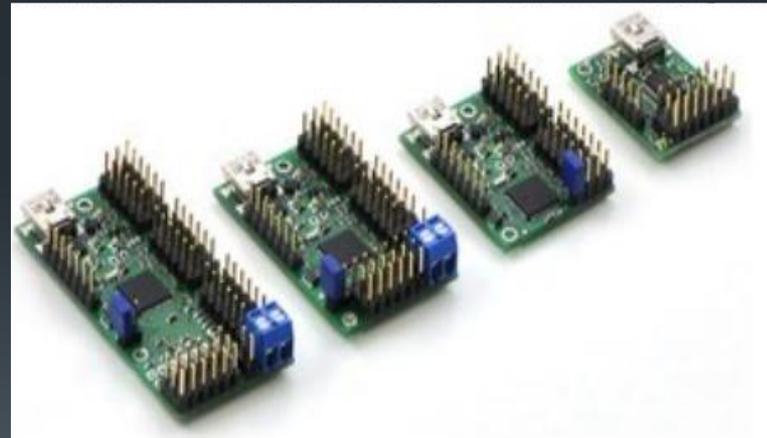
Sensores Musculares

- Los sensores pueden ser manuales, como una palanca, o pueden ser eléctricos y detectar los impulsos fisiológicos generados por el cuerpo, o a su vez pueden estar combinados con dispositivos como un control remoto y un detector de movimiento. La información capturada por los sensores es enviada a la computadora o el dispositivo de control para ser analizada.



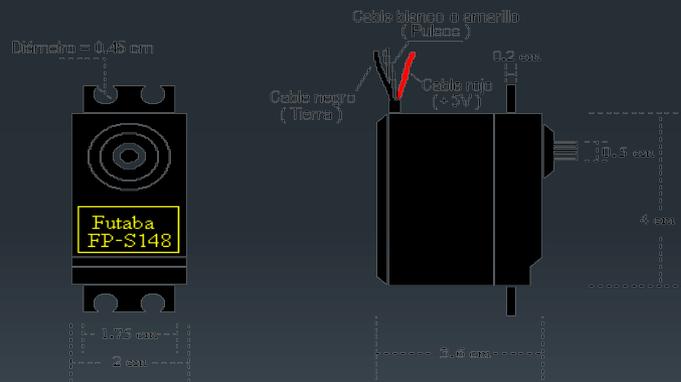
Controlador

- Actúa como el cerebro del dispositivo, el controlador es una computadora a bordo la cual toma la información capturada por los sensores y controla a los actuadores, coordina a los distintos actuadores en el exoesqueleto y permite al exoesqueleto y su usuario, moverse, subir o descender su brazo, etc.



Servomotores

- Un Servomotor es un dispositivo pequeño que tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada.





CAPÍTULO II

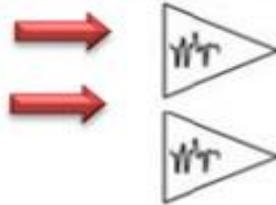
DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

- En la siguiente figura se puede observar el diagrama de bloques general del exoesqueleto de miembro superior que muestra cada una de las etapas a seguir en el desarrollo del presente proyecto.

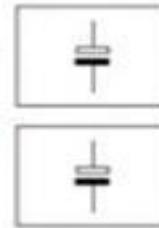
ADQUISICIÓN DE SEÑALES EMG



Sensado



Pre amplificación

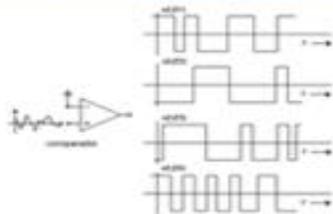


Filtrado



Amplificación

PROCESAMIENTO



Procesamiento



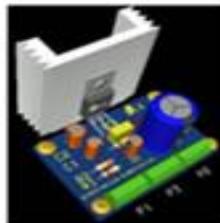
0100111100011010
1010101010000111
0111100001101010
0010101010100101

Conversión



Rectificación

CONTROL



Potencia



Movimiento

Diagrama de Bloques del Proyecto

DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO, ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

- Para el diseño de estos sistemas se toma en cuenta parámetros de diseño establecidos en base a los objetivos que se plantean para el desarrollo de este proyecto.

Parámetros Mecánicos

- Para definir el tamaño de la estructura se toma en cuenta los datos vistos anteriormente y proporcionados por los estudios biomecánicos, así se define diseñar en base a eslabones cada parte del brazo, haciendo que estos sean regulables permitiendo de esta manera adaptarse a cualquier estatura.
- Para el diseño mecánico se considera además establecer un peso máximo de una persona promedio de 60 Kg, analizando que el peso del brazo de una persona con capacidades especiales para las que aplica este proyecto no pesa mucho ya que la masa muscular ha disminuido por la falta de actividad en este miembro, esta definición se ha tomado en base a la consulta con varios especialistas que afirman este dato.
- Para darle una forma ergonómica a la estructura se procura la consulta con un médico especialista que guíe las partes del cuerpo a tomar en cuenta para procurar su protección, las cuales son: columna, espalda, articulaciones, además del peso del marco exoesquelético.

PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

- Para el presente proyecto se toma en cuenta que, el objetivo es que el exoesqueleto sea independiente por lo que se utilizan baterías de alta duración, además que la comunicación se realiza de manera convencional, es decir mediante cables además el control viene dado por la programación del microcontrolador que detecta la intención del paciente y controla los servomotores que funcionan como los músculos de la persona.
- Los parámetros electrónicos como la elección de componentes se dan conforme se realiza el estudio ya que al existir pocos desarrollos en la actualidad, como este, es difícil comparar y elegir componentes adecuados además que la limitación de tecnología en el país lo restringe en cierto nivel.
- Tomando en cuenta la alimentación de la tarjeta de adquisición de señales EMG y la de los servomotores; se planea realizar un conversor de voltajes que permita la alimentación adecuada de cada elemento tomando como referencia de 3 a 12V.
- Los puntos a tomar en cuenta en la selección de servomotores se basan en el valor del torque requerido para cada movimiento, de poco peso y dimensiones pequeñas, para de esta manera acoplarlos con facilidad a la estructura.

DISEÑO MECÁNICO

- En esta parte se analiza el diseño de cada pieza del exoesqueleto tomando en cuenta el estudio de varios software de diseño mecánico como Inspire de Hyperworks, Space Clean y Solidwork.
- Para proceder con el bosquejo de las piezas que forman parte de la estructura se toma como referencia el exoesqueleto Titan Arm que se presenta a continuación, este miembro robótico es eficiente, de bajo peso y sorprendentemente poderoso, ya que hace que la persona que lo usa pueda levantar hasta 40 libras extras de peso sin mucho esfuerzo.



Exoesqueleto Titan Arm

Partes constitutivas de la estructura

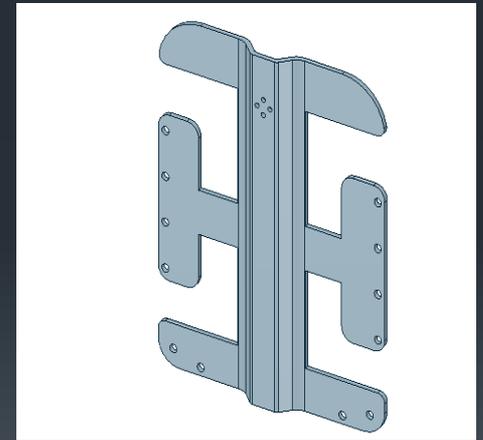
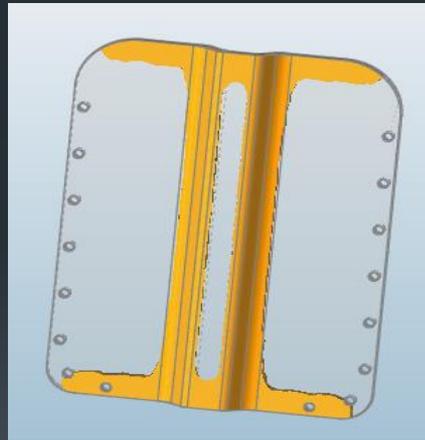
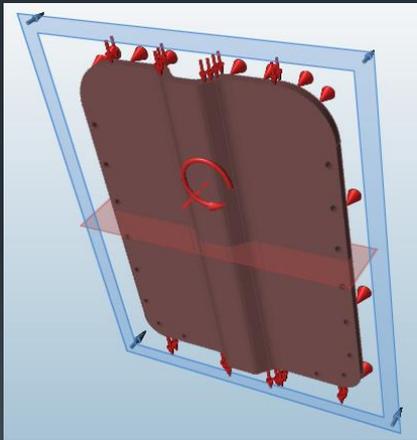
- En la tabla se muestran la cantidad de piezas y los datos considerados para el análisis, tomando en consideración que los pesos de las piezas han sido tomados de las características físicas calculadas por el software de diseño.

Elementos de la estructura del exoesqueleto diseñado

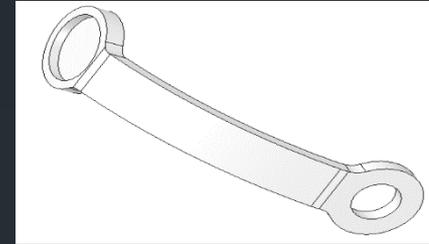
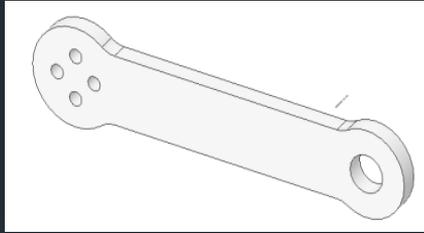
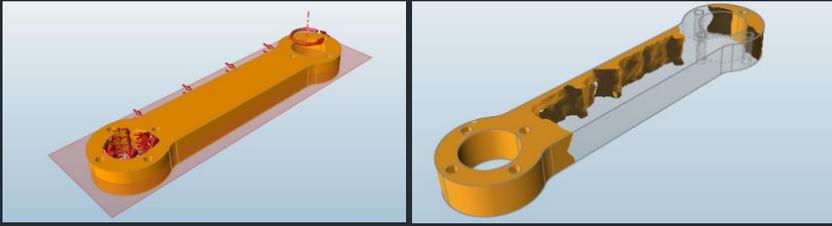
ELEMENTO ESTRUCTURA	CANTIDAD (UNI)	PESO (g)
Espaldar	1	1635.40
Unión espaldar-brazo	1	62.78
Unión espaldar-hombro	1	63.02
Unión hombro-brazo	1	43.37
Brazo regulable	2	119.64
Antebrazo regulable	2	89.31
Servomotores	4	220
TOTAL	12	2233.52

OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL EN INSPIRE

- En Inspire se procede a seleccionar el material a utilizar, el plano y posibles cargas a las que se expone, de esta manera se puede optimizar costos y tiempo de mecanizado de las piezas.

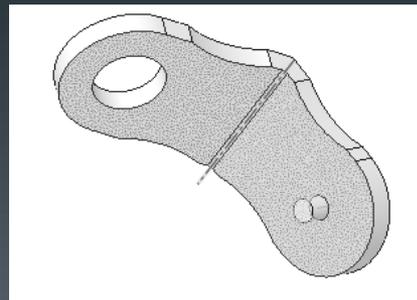
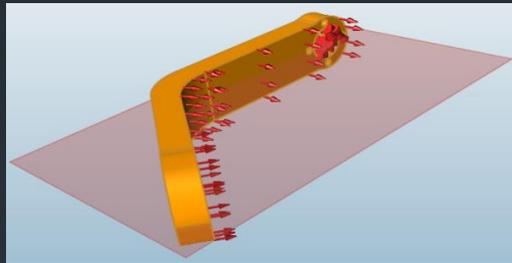


Optimización del espaldar.

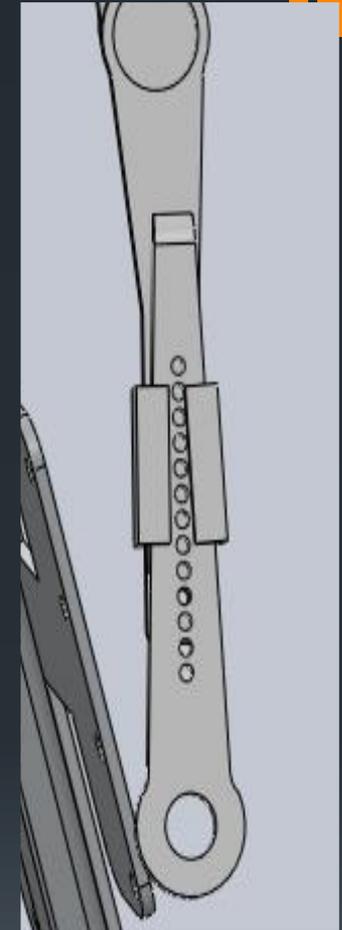
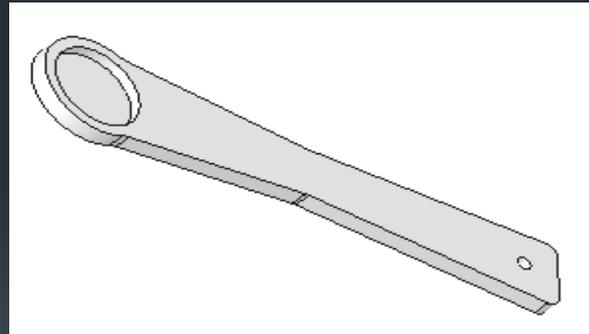
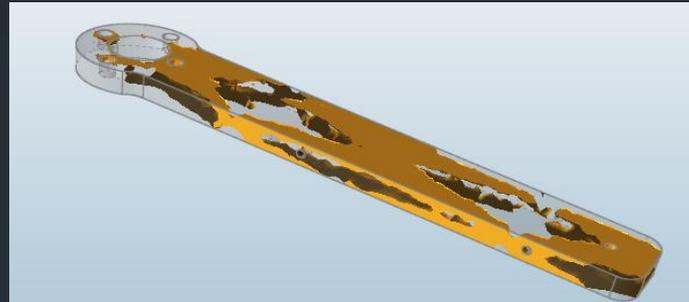
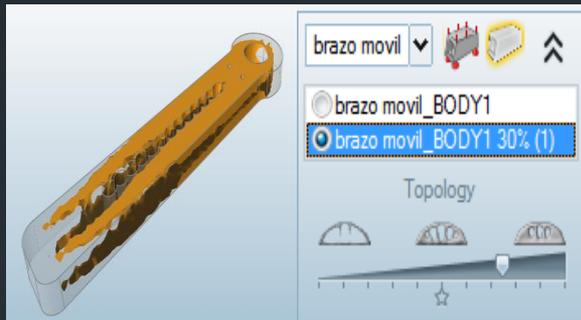
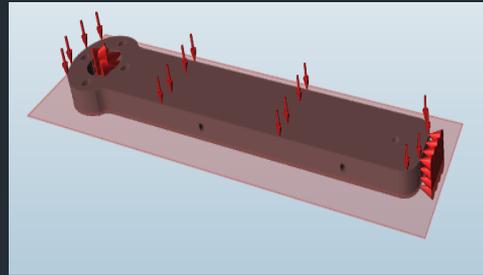
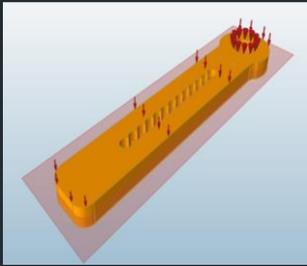


Unión espalar - hombro.

Unión espaldar - hombro

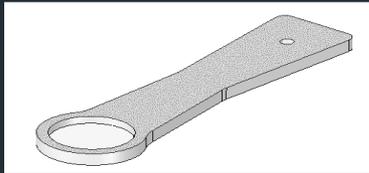
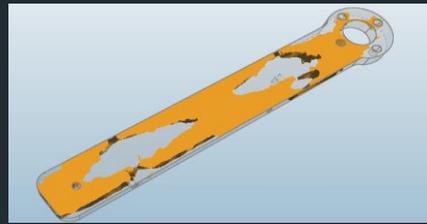
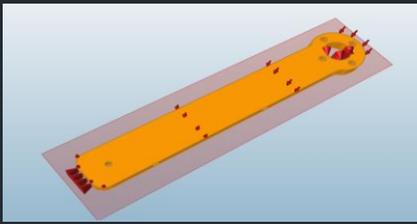


Unión hombro - brazo.

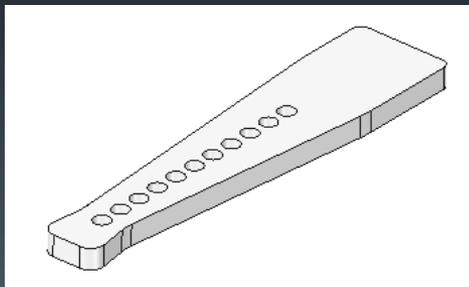
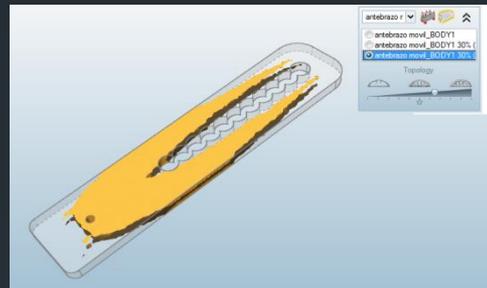
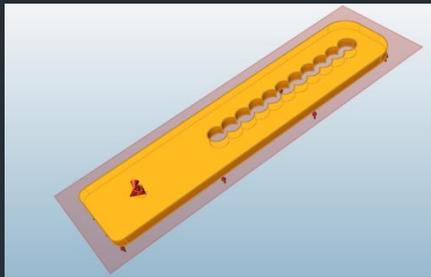


Pieza del brazo móvil y fijo .

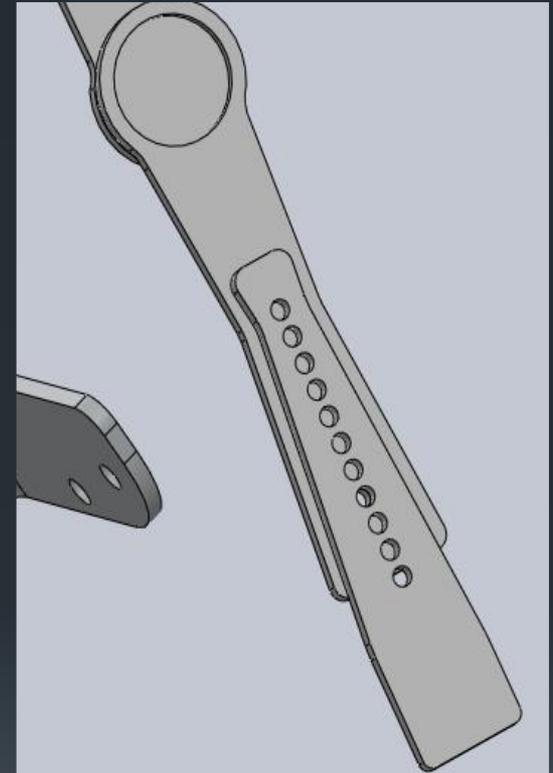
Ensamble brazo.



Pieza del antebrazo fijo.



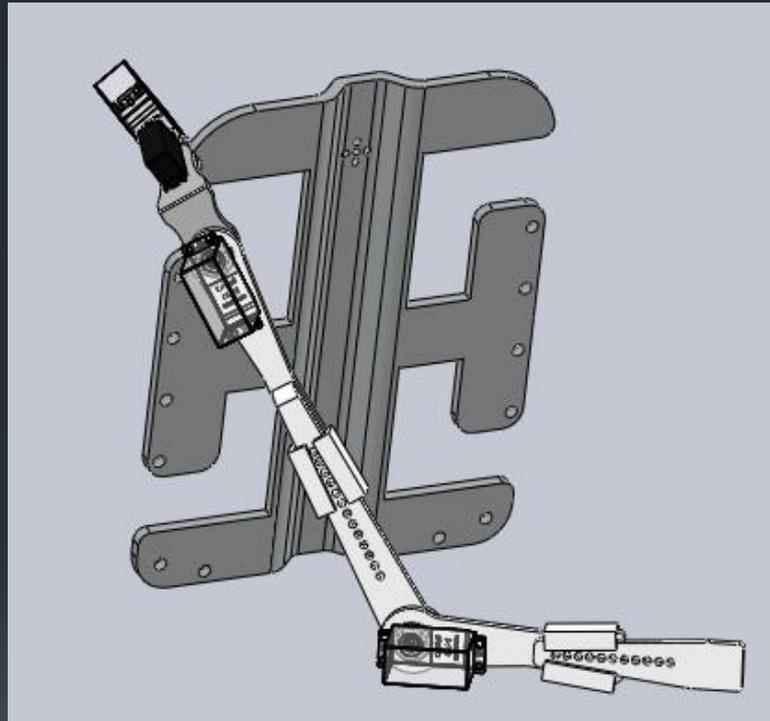
Pieza del antebrazo móvil.



Ensamble antebrazo .

Ensamble total de exoesqueleto

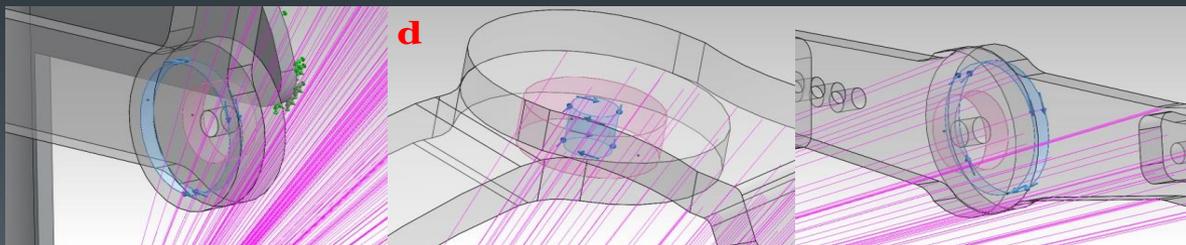
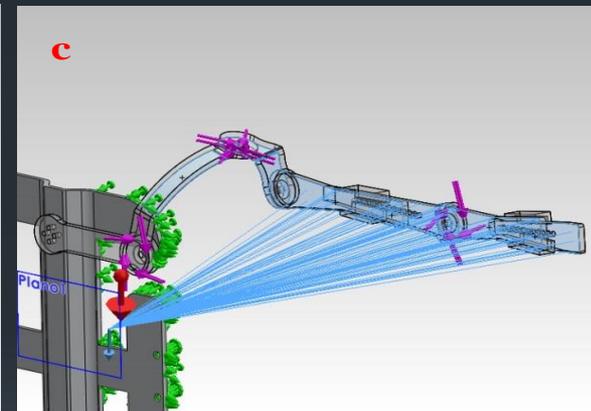
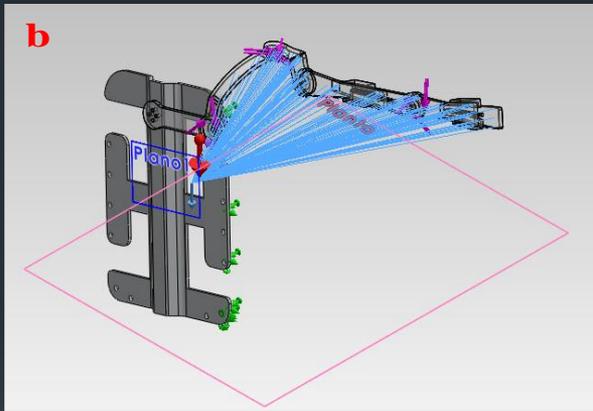
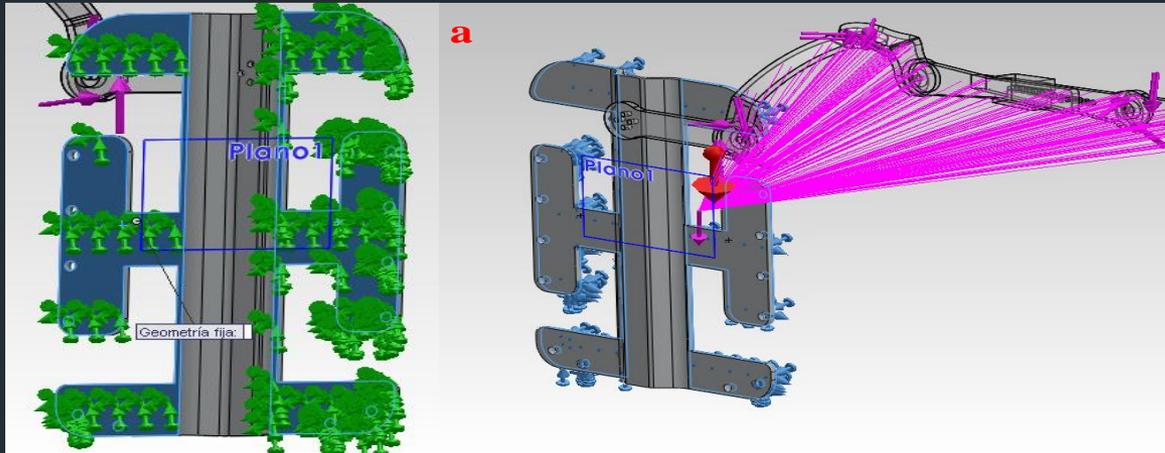
En la siguiente figura se presenta el ensamble total del diseño en solidworks.



Ensamble total con servomotores representativos.

ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA DEL EXOESQUELETO

- El análisis estático de la estructura se realiza con el fin de comprobar que el diseño realizado es el adecuado y cumple con los requerimientos necesarios de peso y soporta las fuerzas aplicadas en el mismo.
- Para realizar el análisis estático después de haber obtenido los datos necesarios se procede como primer paso, se sujeta la estructura fijándola en una parte, se procede a agregar la gravedad para que sea tomada en cuenta en el análisis, luego se agrega una carga remota que reemplaza el peso de los servos y del miembro superior de la persona, además de esto se ubican los torques básicos a los que se somete la estructura en su posición más crítica esto permite establecer que es lo que sucedería en el peor de los casos y así se califica con mayor precisión la validez del diseño.



Parámetros previos de análisis estático a) Geometría fija, b) Gravedad, c) Carga remota, d) Torques externos.

- Se obtiene la masa de segmentos corporales en base a un estudio realizado por Dempster (1955) y Clauser (1969), por desmembramiento de cadáveres.
- el peso de la estructura por segmento se obtiene de las propiedades de la pieza.
-

Pesos el brazo humano y de la estructura

Pesos aproximados para el cálculo de fuerzas.		
Segmento	Masa corporal (Kg)	Masa estructura (kg)
Brazo	1.56	0.128
Antebrazo	0.96	0.104
Miembro Superior	2.94	1.577

Mallado de la estructura

- Con todos los parámetros establecidos se procede a crear la malla, se debe considerar que mientras más fino el mallado se obtendrán mejores resultados de análisis ya que se consideran más nodos, claro que esto depende también del procesador del computador y de la geometría de la estructura; para el presente proyecto se toma el mallado más fino permitido que es de aproximadamente 2.33mm.

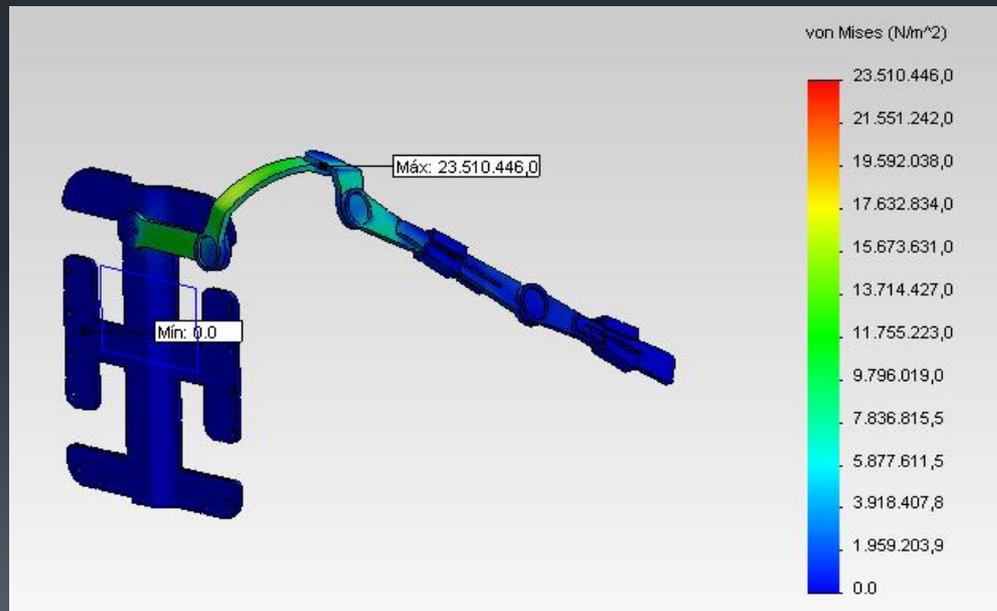


Mallado de la estructura del Exoesqueleto

Tensión de Von Mises

- En la figura se muestra el análisis de la tensión de Von Mises, el cual muestra que el valor máximo aplicado es de 23.51 [MPa]; aplicando la Ec. se demuestra que la estructura no sufre fallos.

$$\begin{aligned} & \sigma_{vonMises} \leq \sigma_{limite} \\ & 23.51 [MPa] \leq 41 [MPa] \end{aligned}$$



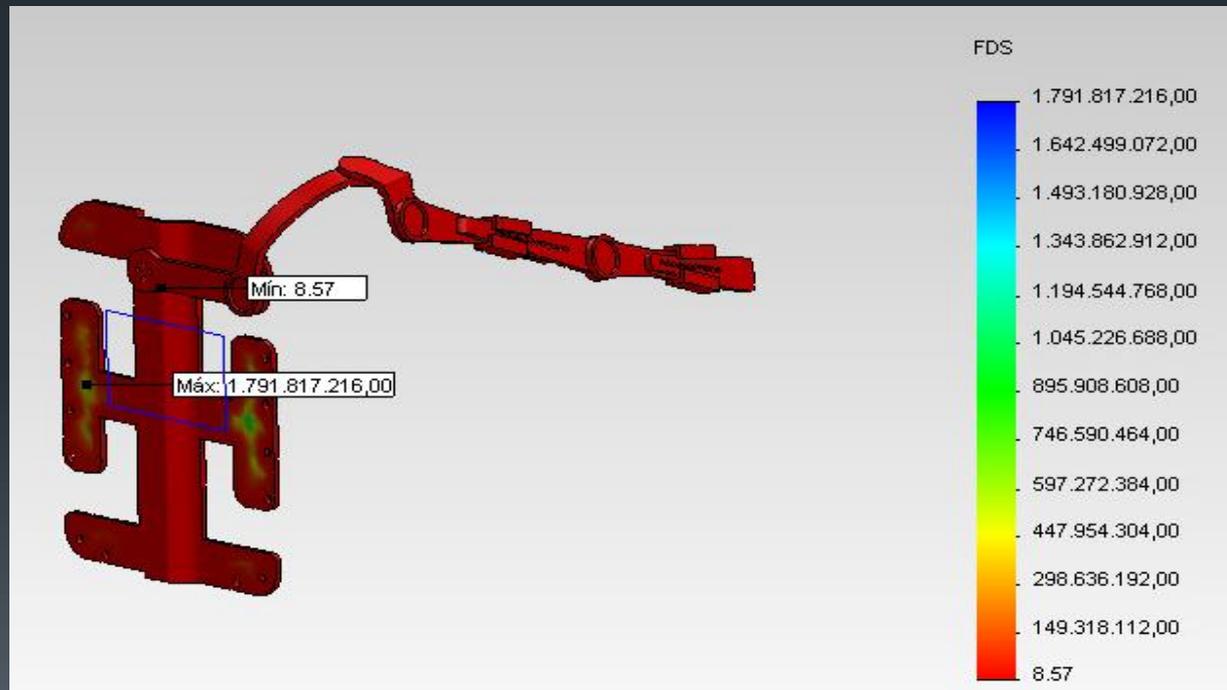
Tensión de Von Mises en la estructura del Exoesqueleto

FACTOR DE SEGURIDAD

- Si se tiene que evitar una falla estructural, las cargas que una estructura es capaz de soportar deben ser mayores que las cargas a las que se va a someter cuando este en servicio.
- La relación de la resistencia real entre la resistencia requerida se llama factor de seguridad n (Scribd, 2011).

$$\text{Factor de seguridad } n = \frac{\text{resistencia real}}{\text{resistencia requerida}}$$

- Tomando en cuenta este concepto se puede observar que el factor de seguridad obtenido en el análisis realizado en Solidworks es de 8.6 valor que supera las expectativas, ya que un valor de 1 o mayor representa que la estructura es factible para la aplicación lo que significa que es un diseño muy seguro para la aplicación en estudio.



Factor de Seguridad del Exoesqueleto de Miembro Superior

CINEMÁTICA DEL EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR

- La cinemática estudia los movimientos de los cuerpos independientemente de las causas que lo producen. Se representan gráficas que describen el movimiento de una partícula.
- La interpretación de las gráficas, posición-tiempo, velocidad-tiempo y aceleración-tiempo, se presentan en la siguiente tabla.

La articulación del hombro es una enartrosis que es un tipo de articulación formada por una superficie cóncava y otra de convexa. La enartrosis permite una gran movilidad en todos los sentidos como flexión, extensión, rotación, abducción y aducción, lo que implica gran capacidad de movimiento. En la tabla siguiente se presenta los ángulos permisibles a los que puede alcanzar el hombro.

Grados de movilidad de la articulación del hombro.

GRADOS DE MOVILIDAD.		
MOVIMIENTO	GRADOS DE NORMALIDAD	GRADOS FUNCIONALES
Flexión	Normal 180 °	Funcional 120°
Extensión	Normal 60 °	Funcional 40°
Abducción	Normal 180 °	Funcional 120°
Aducción	Normal 45 °	Funcional 30°
Rotación interna	Normal 80 °	Funcional 45°
Rotación externa	Normal 90 °	Funcional 45°

El codo es una articulación en bisagra y pivote, la principal función del codo es situar la mano en la situación más adecuada para sus actividades, es una articulación sinovial compuesta de libre movimiento en la que las superficies óseas contiguas están cubiertas por cartílago articular y unidas por ligamentos revestidos de membrana sinovial.

Grados de movilidad de la articulación del codo.

GRADOS DE MOVILIDAD DEL CODO		
MOVIMIENTO	GRADOS DE NORMALIDAD	GRADOS FUNCIONALES
Flexión	0° a 140 °	Funcional 100°
Extensión	0° a 140 °	Funcional 100°
Pronación	85 °	Funcional 50°
Supinación	85 °	Funcional 50°

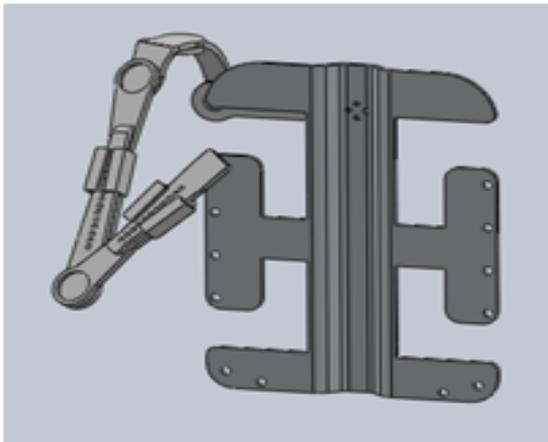
Análisis de Movimiento del exoesqueleto

MOVIMIENTO

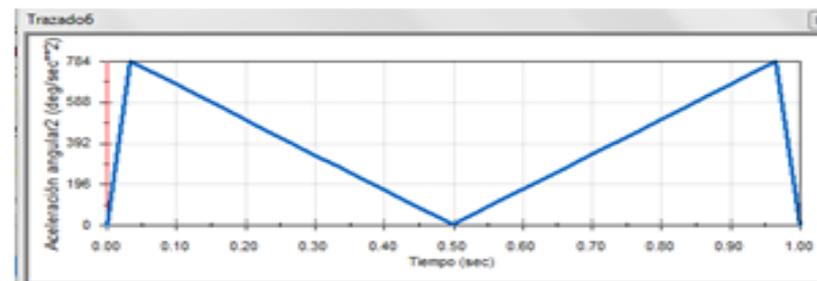
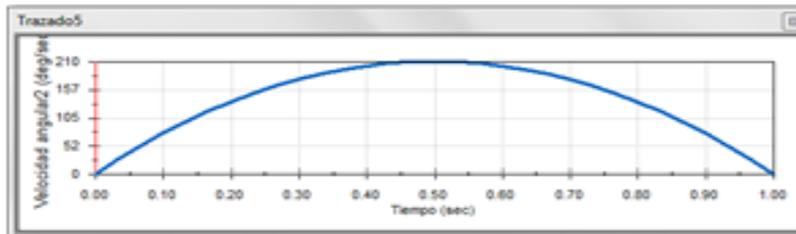
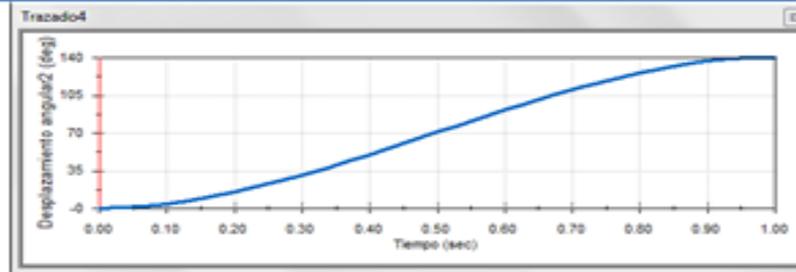
FLEXION CODO (DISEÑO 140°)

- Flexión-Extensión del codo: 0° a 140°

0

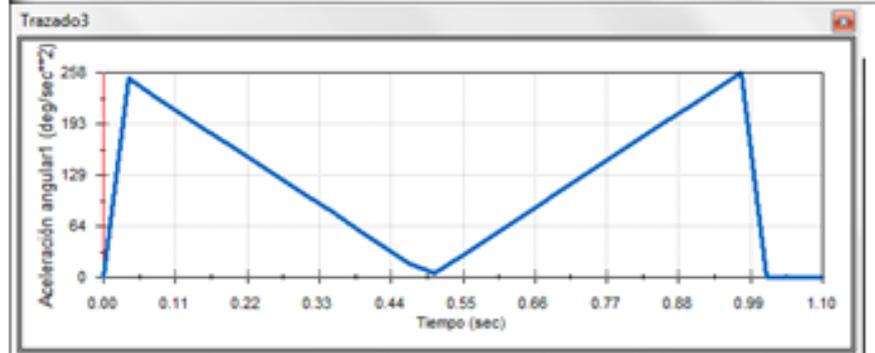
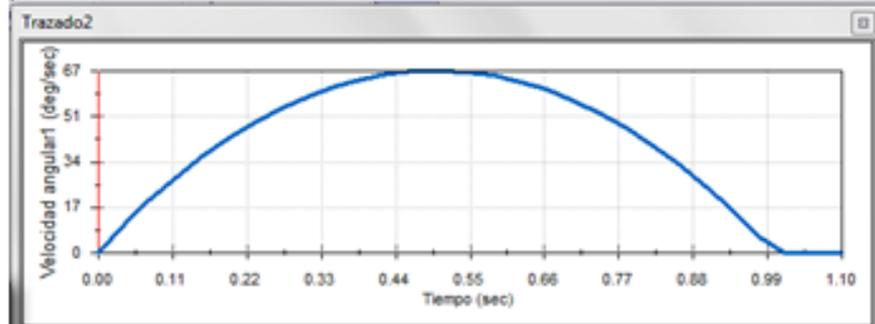
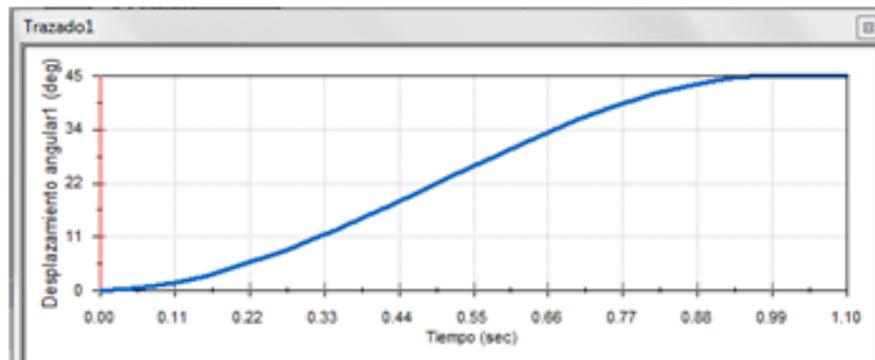
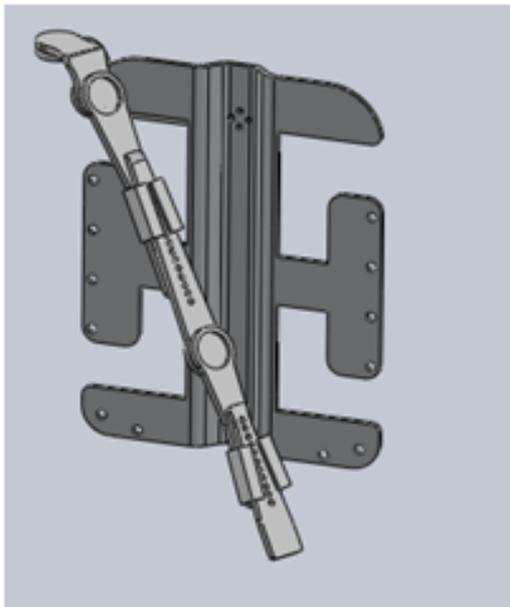


GRÁFICAS DE RESPUESTA



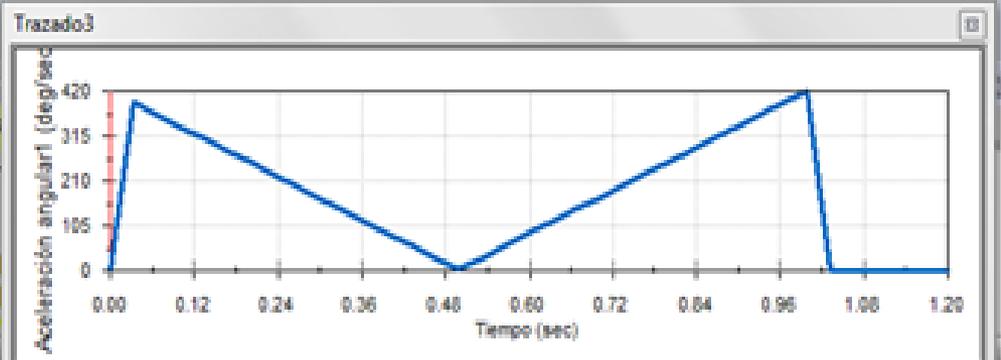
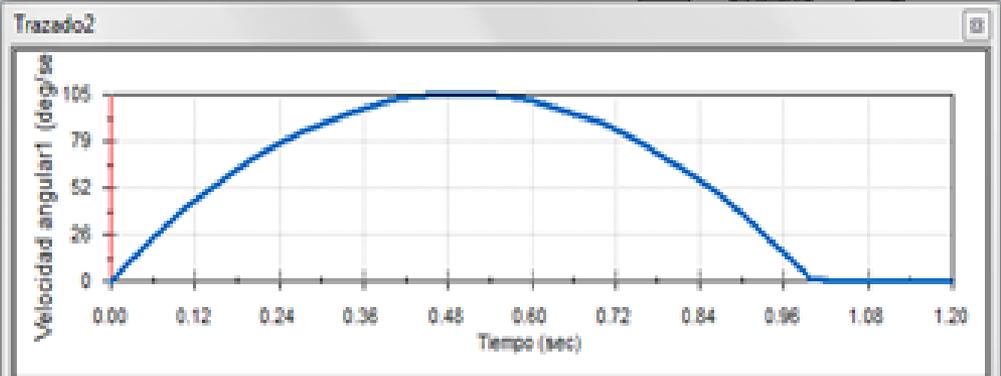
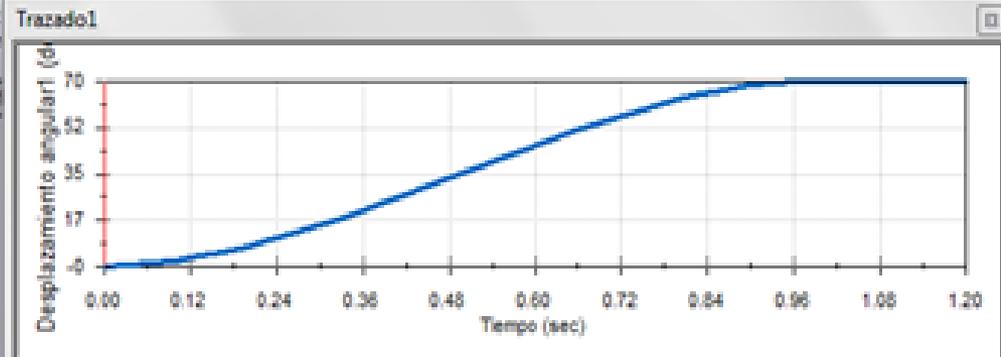
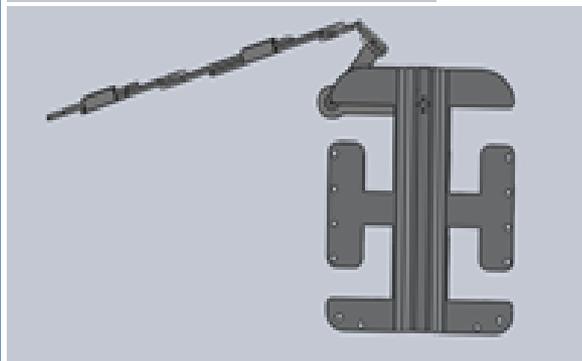
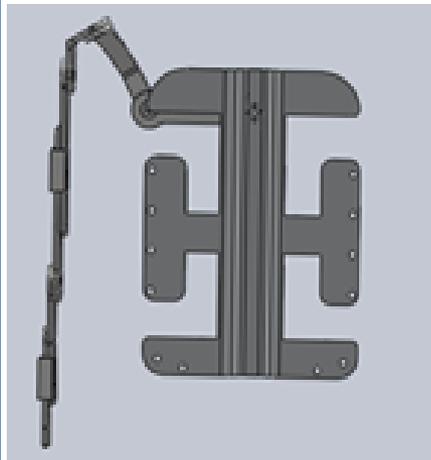
HOMBRO

Aducción del hombro:
>30° a <45°



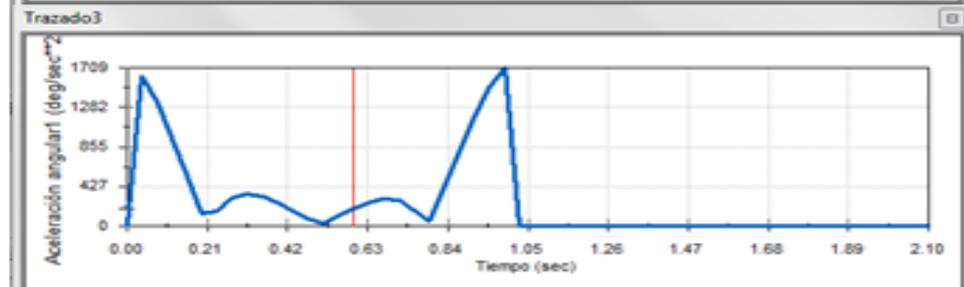
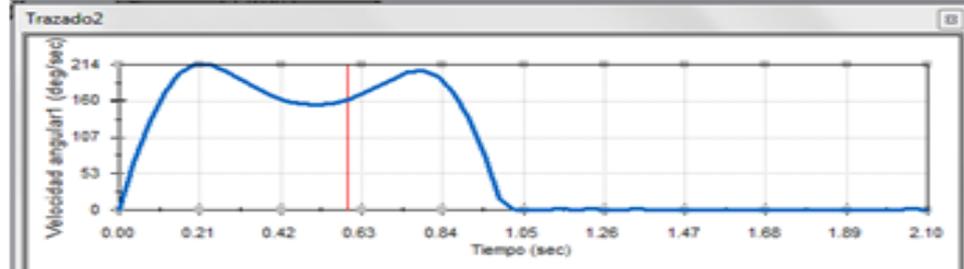
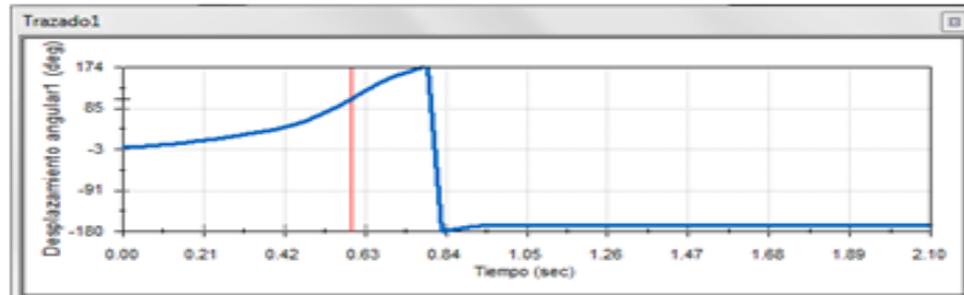
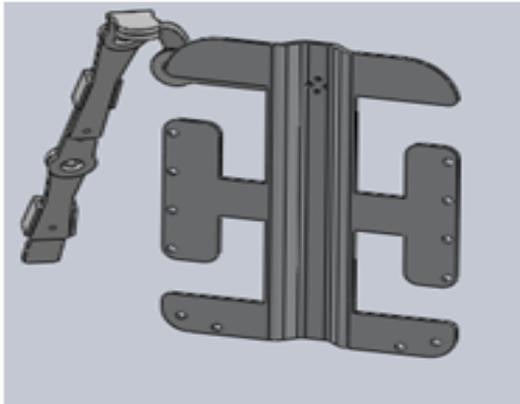
ABDUCCION HOMBRO (DISEÑO 70°)

- Flexión del Hombro: 0° a <math>< 180^\circ</math>

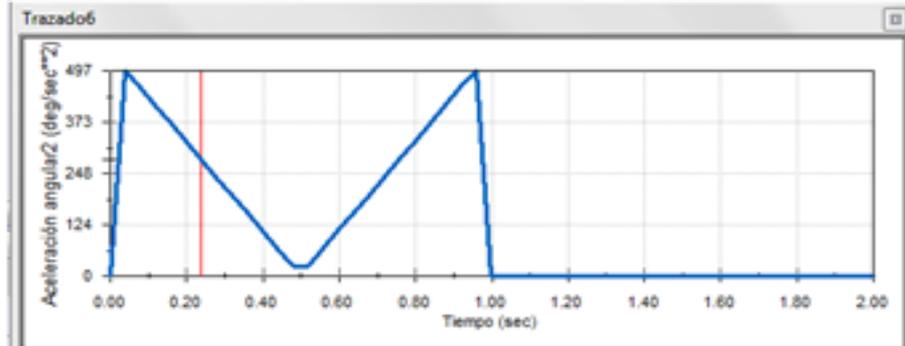
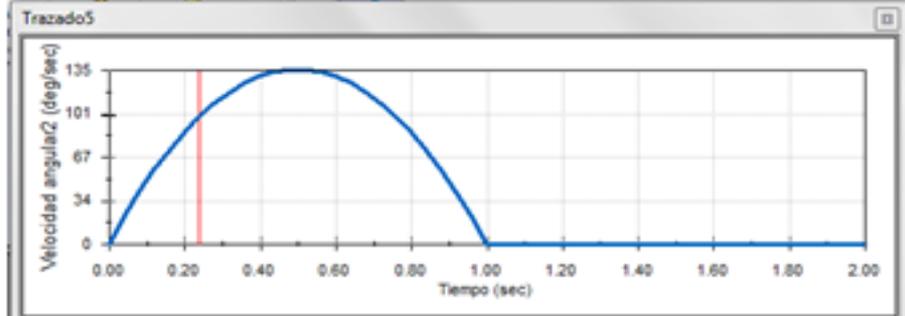
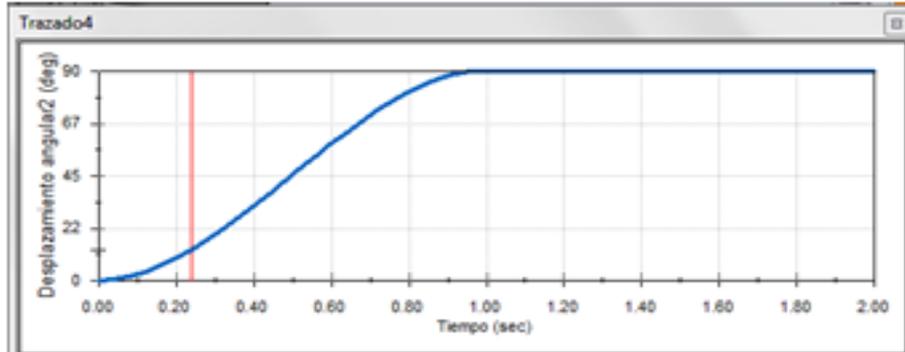
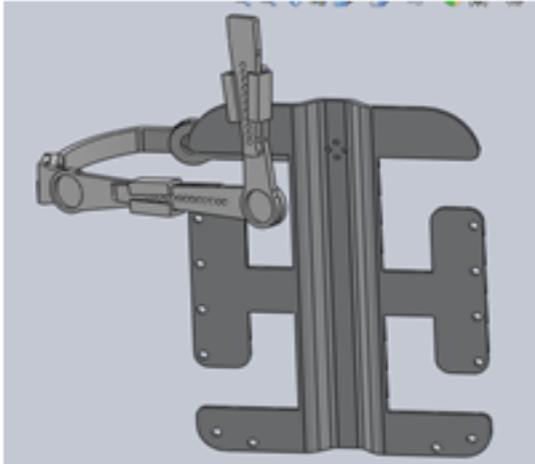


EXTENSION (DISEÑO 150°)

- **Abducción del hombro: 0° a <180°**

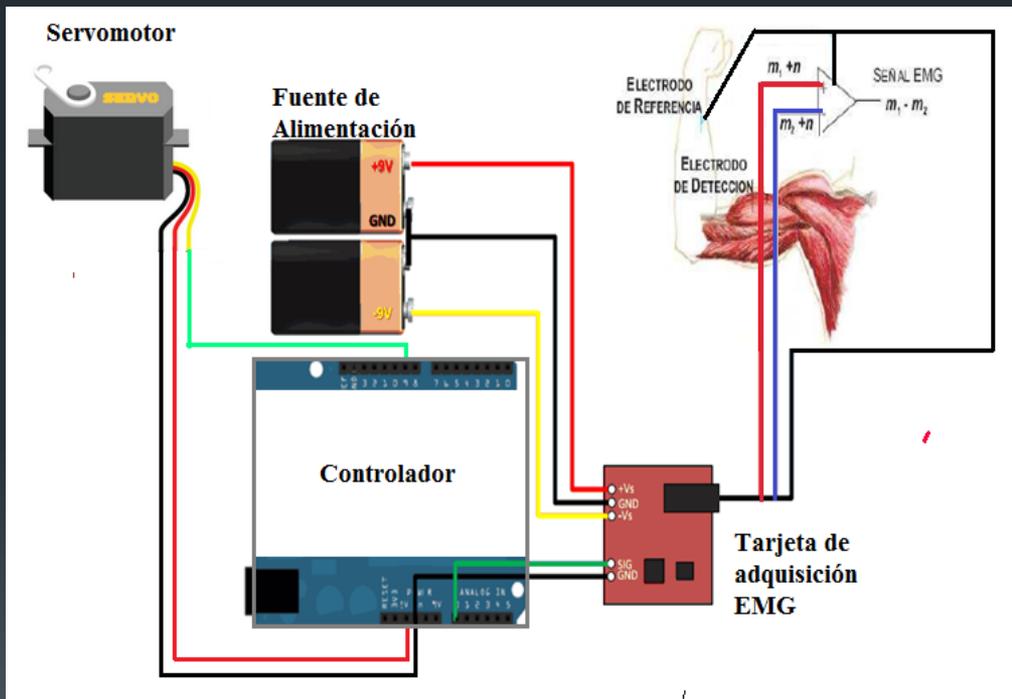


ROTACIÓN



DIÑO ELECTRÓNICO

- Tomando como referencia el diagrama de bloques general del sistema, a continuación se presenta un esquema del funcionamiento de la parte electrónica.



Donde:
 m es la señal EMG
 n representa el ruido existente.
Línea roja: Voltaje positivo
Línea negra: tierra
Línea amarilla: Voltaje negativo
Línea verde: Señal de control

Diagrama del Sistema Electrónico del Exoesqueleto

ADQUISICIÓN DE SEÑALES

- Las señales EMG son generadas por la contracción muscular, por lo que su adquisición requiere de una correcta identificación de las regiones musculares comprometidas en la ejecución de los movimientos. Para el sensado de las señales electromiográficas se utiliza el Muscle Sensor V3 de Advancer Technologies.



Muscle Sensor V3

Con esta tarjeta se puede quitar interfaces intermedias para controlar lo deseado directamente por la señal eléctrica producida por los músculos.

PROCESAMIENTO

- El procesamiento analógico de las señales mioeléctricas estará basado en el filtraje de frecuencias no deseables.
- Esto lleva el uso de filtros análogos de topologías que implique dispositivos activos, que son los amplificadores Operacionales.

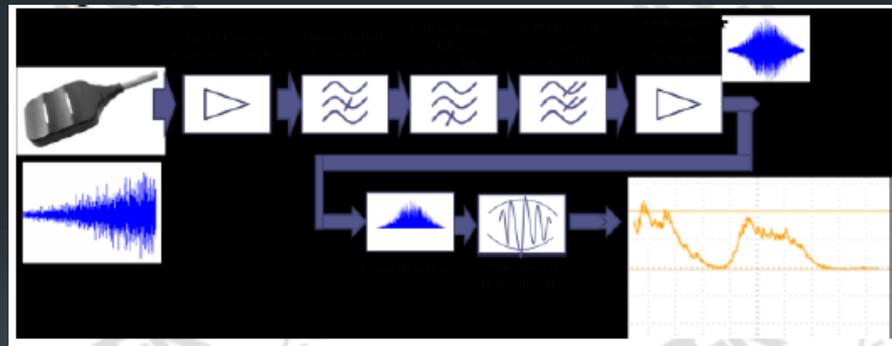
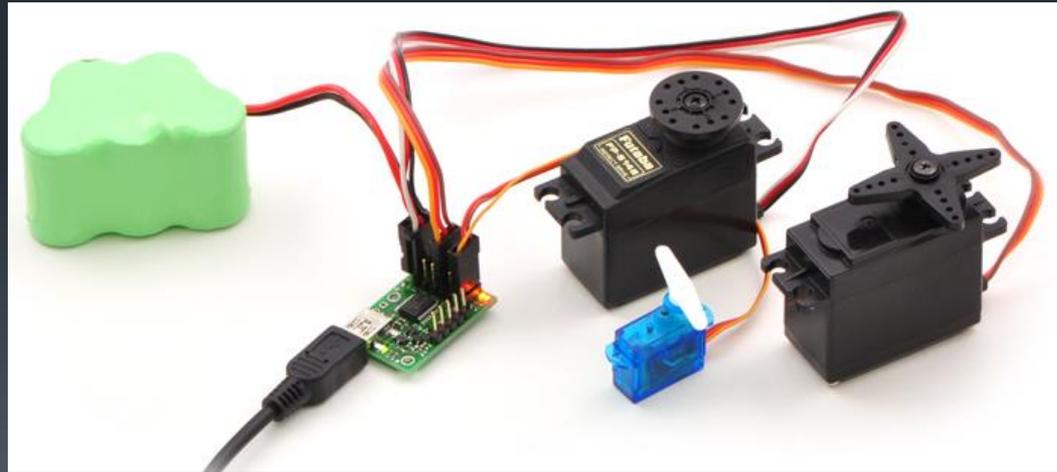


Diagrama de Bloques del Procesamiento

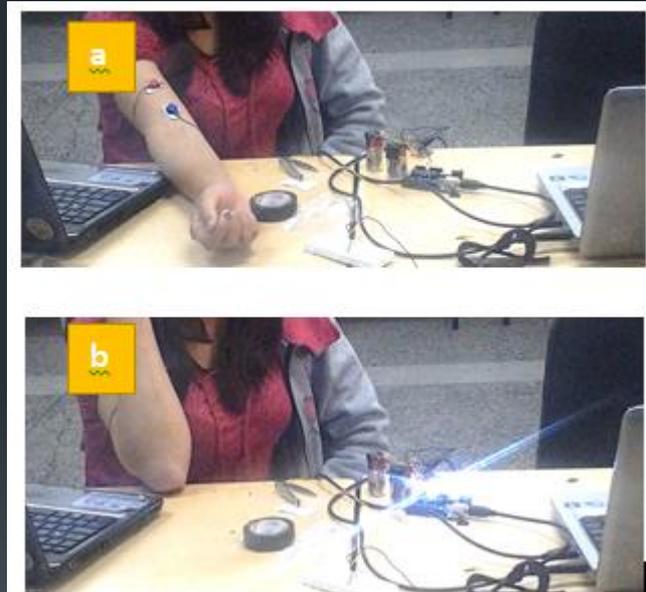
SISTEMA DE CONTROL

- El sistema de control está diseñado para utilizar las señales mioeléctricas musculares, se esperan niveles de señales bajos y comportamientos diferentes en el funcionamiento de los músculos de cada individuo, por lo que el sistema de procesamiento de la señal se enfoca en emparejar primero las señales electromiográficas que se crean convenientes utilizar, para luego procesarlas y lograr una señal de control del servomotor, utilizando la tarjeta servo master controller.



Control de servomotores

- El control de ancho de pulso y control de frecuencia se da mediante la programación de la tarjeta Arduino y servo master controller, con ayuda de un led, se observa los cambios que se produce en la señal al momento que el sensor detecta la intención de movilidad de la persona, eso se evidencia en las figuras.



Control de Frecuencia y Ancho de Pulso



SELECCIÓN DE ELEMENTOS Y/O DISPOSITIVOS.

- Para la selección de materiales se toma en cuenta los requerimientos descritos anteriormente en base a los parámetros de diseño.

Selección del Material de la estructura.

Tabla Características comparativas entre Materiales

	Plásticos			Metales	
	ABS	TEFLÓN	NYLON	ALUMINIO	TITANIO
Densidad	Baja			Alta	
Precio	Bajo			Alto	
Mecanizado	Fácil			Difícil	
Flexibilidad	Alta y Baja			Rígido	
Conducción de Electricidad	Aislante			Alta	
Módulo de Elasticidad (GPa)	1.4 - 3.1	0.4	2-4	69	105-120
Resistencia a la Tracción (MPa)	40	586	45-90	110	900
Elongación	20 %	300-500 %	90%	6 %	20 %
Densidad	1.0-1.05 g/cm^3	2,20 g/cm^3	1,1 g/cm^3	2700 Kg/m^3	4507 Kg/m^3

Selección de Servomotores

Fabricante	Hitec	Pololu	Seiko	Vigor		
						
Interfaz	Protocolo HMI (Hitec Multi Protocol Interface Cable)	Interfaz estándar servo controlado por radio	Radio - Control	Servo-controlador		
Modelo		i00600 Torxis	HD 1235-MG	Power Servo 050	Power Servo 105 VSD-11YMB MG/HV	
Velocidad	140 °/0.48s	90°/1,5 s	60°/0.18 s	60°/0.29s	60°/0.6s	60/0.92 s
Torque (Kg. cm)	24 – 30	115	40	91.5	120	30 - 40
Voltaje	6V – 7,4V	12 V	7.4 V	4.8V-8.4V	12 V	6.0V~7.2V
Dimensiones	39.88 x19.81 x 36.83	139.7 x 60.96 x 118.364 mm.	59,5 x 29,5 x 54,3 mm	100 x 44 x 92.7mm	118.4 x 132 x 50mm	60.0 x 29.1 x 54.3 mm
Peso	68 gramos	1,07 Kg	170 g	280g	780g	150g

Selección de baterías

Tabla Selección de Baterías

Tipo	Energía /peso	Tensión (V)	Duración (# de recargas)	Tiempo de carga	Autodescarga por mes (% del total)
Plomo	30-50 Wh/kg	2 V	1000	8-16h	5 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1.25 V	500	10-14h	30 %
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2-4h	20%
Li-Ion	110-160 Wh/kg	3,16 V	4000	2-4h	25 %
Li-po	100-130 Wh/kg	3,7 – 14,8V	5000	1-1,5h	10 %

Selección del dispositivo de adquisición de Señales



Sistema de Adquisición de Señales EMG

Kit Muscle Sensor V3

Myo

<p>Marca</p>		
<p>Tipo</p>	<p>Tarjeta Electrónica que proporciona actividad eléctrica filtrada y rectificada de un músculo</p>	<p>Sensor de movimiento muscular que permite controlar dispositivos electrónicos.</p>
<p>Estructura Física</p>	 <p>Tarjeta pequeña con cable y electrodos superficiales incorporada.</p>	 <p>Tiene sensores de gestos y movimiento</p>
<p>Alimentación</p>	<p>+9V y -9V</p>	<p>Batería de iones de litio recargable</p>
<p>Montaje Conexión</p>	<p>Sistema de Control Mediante Arduino</p>	<p>Actividad muscular propia (EMG), los sensores, procesador ARM, una unidad de medición inercial 9 ejes (IMU) y un dispositivo de carga micro USB</p>
<p>Tamaño</p>	<p>2,54 cm x 2,54 cm</p>	<p>Menos de 95 gr y se compara con un ligero reloj de pulsera.</p>
<p>Comunicación</p>	<p>Diseñada especialmente para microcontroladores</p>	<p>Incluye una conexión Bluetooth</p>

Selección del Controlador del sistema

ARDUINO UNO

Pololu Maestro servo control



Microcontrolador	ATmega328	Tres métodos de control: USB, TTL (5 V) serie y con scripts internos.
Voltaje de operación	5V	5V – 16V
Digital I/O Pines	14(de los cuales 6 proporcionan salida PWM)	6-12 dependiendo del mini maestro a utilizar(6,12,18,24 canales)
Pines de entrada analógica	6	
Memoria flash	32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB utilizado por gestor de arranque	1-8 KB
Software	Compatible con Windows, Mac OS X, Linux	Compatible con Windows 7, Windows 8, XP,
Aplicaciones	<p>El módulo Arduino ha sido usado como base en diversas aplicaciones electrónicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Xoscillo: Osciloscopio de código abierto. • Ardupilot: software y hardware de aeronaves no tripuladas. • ArduinoPhone: un teléfono móvil construido sobre un módulo Arduino. • Impresoras 3D. • Control de Servomotores 	<ul style="list-style-type: none"> • Controlador multiservo serie. • Interfaz entre sensores y otra electrónica: • Lectura de giro o acelerómetros desde PC para nuevas presentaciones • Expansión de I/O en el área proyectos de micros • Programación de efectos luminosos que respondan a diferentes sensores • Test de servos.



CAPÍTULO III

- MONTAJE DEL EXOESQUELETO

Una vez que se tiene la seguridad que la estructura soporta las cargas a aplicarse, y que el material a emplear cumple con los requerimientos necesarios para la estructura, se procede con el montaje y acoplamiento del sistema mecánico y electrónico

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

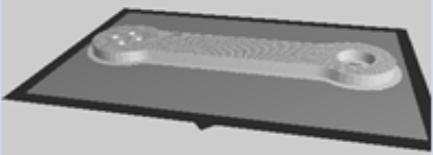
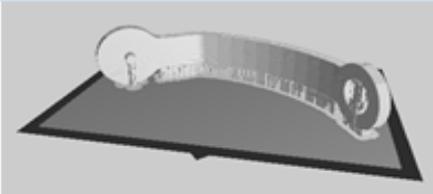
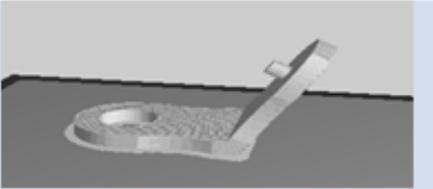
- Concluida la parte del diseño se procede con la construcción del mecanismo, para esto se utiliza la impresora Cincel 3D extrusor doble como la que se muestra en la figura.

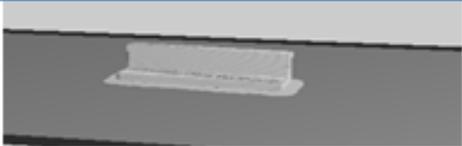
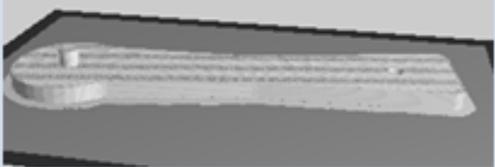
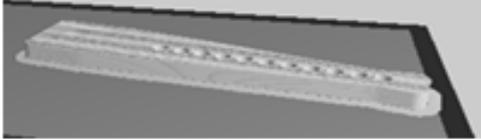
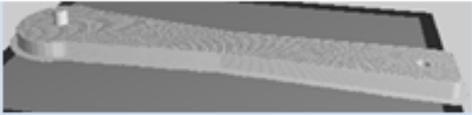
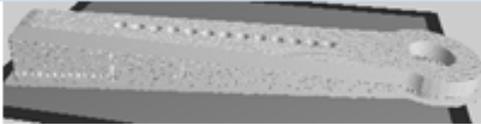


Impresora Cincel 3D

- El programa a utilizarse es MakerWare que es el software con el cual trabaja la impresora y permite la configuración de cada objeto. En la tabla se muestra el tiempo y la cantidad de material necesarios para cada una, tomando en cuenta que la impresión se realiza al 50 % de relleno.

Tabla Tiempo y uso de material de impresión 3D

Pieza	Ejemplares	Tiempo de impresión	Uso de material	Figura
Espaldar - Brazo	1	5.5 Horas	47 gr	
Espaldar Hombro	1	6.5 Horas	41 gr	
Hombro- Brazo	1	4 Horas	31 gr	

Sujeción	4	70 Min	9 gr	
Antebrazo Fijo	1	5.5 Horas	44 gr	
Antebrazo móvil	1	4 Horas	30 gr	
Brazo Fijo	1	6 Horas	51 gr	
Brazo Móvil	1	8 Horas	63 gr	

Una vez generado el archivo se procede con la impresión.



Piezas impresas

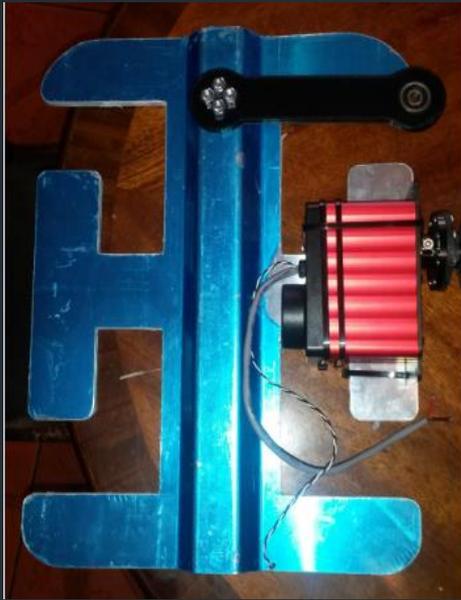
ENSAMBLE DEL EXOESQUELETO

- Al concluir con la impresión, se procede con el ensamble de la estructura, con la ayuda de tornillos, tuercas y rodamientos se une las piezas y los servomotores, con el afán de tener un buen acople se coloca todos los accesorios que tienen los servos, así de esta manera se asegura que montaje y desmontaje del exoesqueleto.

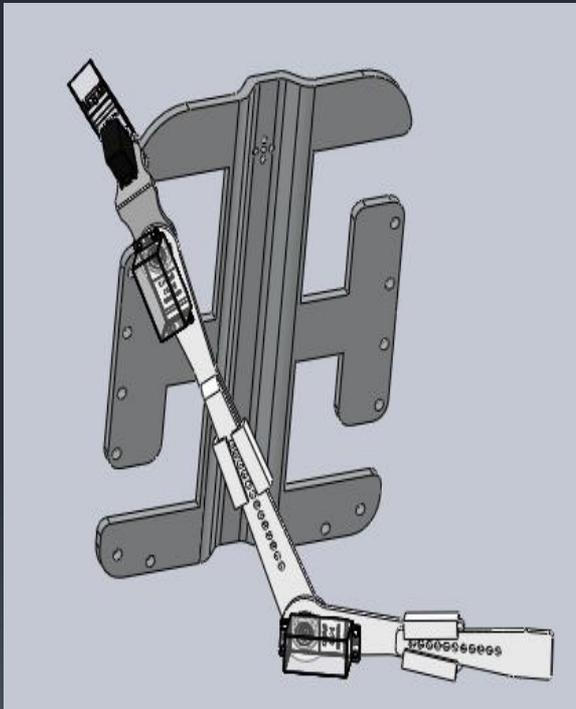


Ensamble de eslabones impresos.

MONTAJE DE SERVOMOTORES



Ensamble total



Vista de exoesqueleto con servomotores.

PROGRAMACIÓN DE TRAYECTORIAS

- Para poder justificar los movimientos realizados por el exoesqueleto, se toma en consideración la tabla de verdad de los sensores detallada en la Tabla , siendo S1 para flexión - extensión del codo, S2 extensión lateral del brazo, S3 abducción -aducción del brazo, y s4 flexión - extensión frontal.

Tabla de verdad de movimientos

S1	S2	S3	S4	MOVIMIENTO
0	0	0	0	NO
0	0	0	1	SI
0	0	1	0	SI
0	0	1	1	NO
0	1	0	0	SI
0	1	0	1	NO
0	1	1	0	SI
0	1	1	1	NO
1	0	0	0	SI
1	0	0	1	SI
1	0	1	0	SI
1	0	1	1	NO
1	1	0	0	SI
1	1	0	1	NO
1	1	1	0	SI
1	1	1	1	NO



CAPÍTULO IV

- PRUEBAS Y RESULTADOS

- El presente capítulo trata de pruebas generales del sistema mecánico, electrónico, de alimentación y control de servomotores, detallados a continuación.

PRUEBAS DEL SISTEMA MECÁNICO

- Para conocer la resistencia que soporta el ABS, material seleccionado para la construcción del exoesqueleto, se procede con la realización de pruebas de tracción a probetas impresas según lo estipulado en la Norma ASTM D638-10, la cual exige la realización de 3 ensayos como mínimo.



Probetas para el ensayo

- Con la ayuda de la máquina universal se procede a realizar el ensayo de tracción de las probetas, se va a realizar la prueba con piezas impresas al 75 % y al 100 %.



Máquina Universal para ensayo de tracción

En la Tabla se procede a anotar las medidas de cada una de las probetas y la fuerza a la cual se produce la ruptura.

Probeta	# de Probeta	a (mm)	e (mm)	A (mm ²)	F (Kgf)	F (N)
75 %	1	13,37	3,08	41,18	118,0	1156,4
	2	13,33	3,11	41,46	108,0	1058,4
	3	13,32	3,03	40,36	121,0	1185,8
100%	1	13,33	3,12	41,59	175,0	1715,0
	2	13,38	3,47	46,43	170,0	1666,0
	3	13,36	3,37	45,02	165,0	1617,0

Donde, (a) Ancho, (e) Espesor, (A) Área, (F)

Fuerza.

- Finalmente para hallar el Módulo de Young del material se hace la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Tabla Parámetros calculados en el ensayo

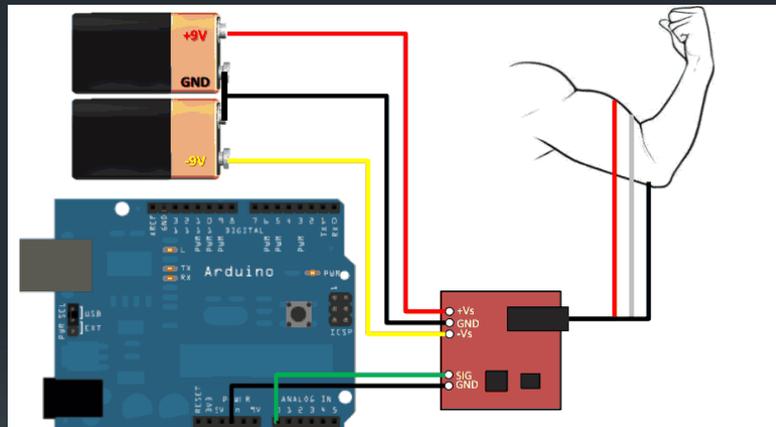
Color de Probeta	# de Probeta	σ (MPa)
75 %	1	28,08
	2	25,52
	3	29,38
100 %	1	41,23
	2	35,88
	3	35,91

Al analizar los resultados calculados en la tabla se puede observar que el material utilizado en el presente proyecto soporta grandes esfuerzos por lo tanto es el idóneo para la construcción del exoesqueleto.

34,96 MPa Esfuerzo del ABS

Pruebas de obtención de señales electromiográficas

- Para las pruebas del sistema electrónico y de control, se procede con el sensado de las señales electromiográficas.



Conexión de electrodos a la tarjeta Arduino

- **Flexión del codo: 0° a <math><140^\circ</math>**
- Para realizar el movimiento de flexión del codo se toma señales del músculo tríceps ubicado en el brazo de la persona, colocando los electrodos tal como se muestra en la Figura.

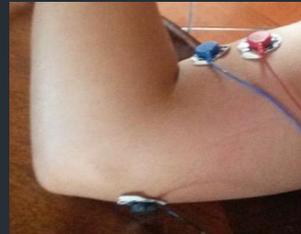


Figura Aplicación de electrodos músculo tríceps

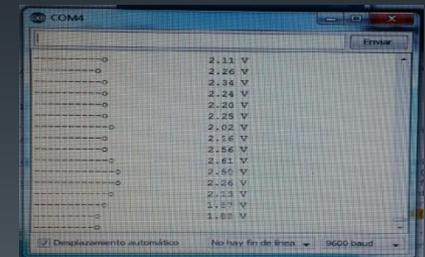
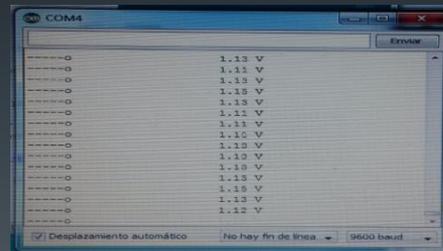
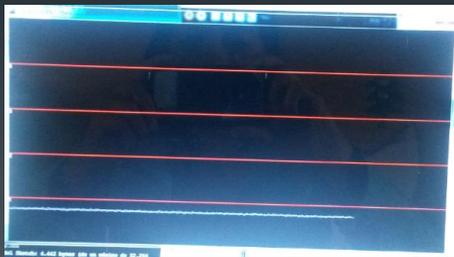


Figura Músculo tríceps en reposo y en contracción.

- Flexión lateral del hombro $>0^\circ$ a $<90^\circ$
- Para lograr los movimientos flexión – extensión lateral del hombro se toman señales del músculo deltoides medio y supraespinoso, la colocación de electrodos se presenta en la Figura.



Figura Aplicación de electrodos músculo supraespinoso



Figura 4 Músculo supraespinoso en reposo y en contracción

- **Abducción – aducción del hombro $>0^\circ$ a $<180^\circ$**
- Para el movimiento de abducción y aducción del hombro se usan el músculo deltoides y la pectoral mayor, los electrodos se colocan tal como se observa en la Figura .



Figura Aplicación de electrodos en el músculo deltoides.

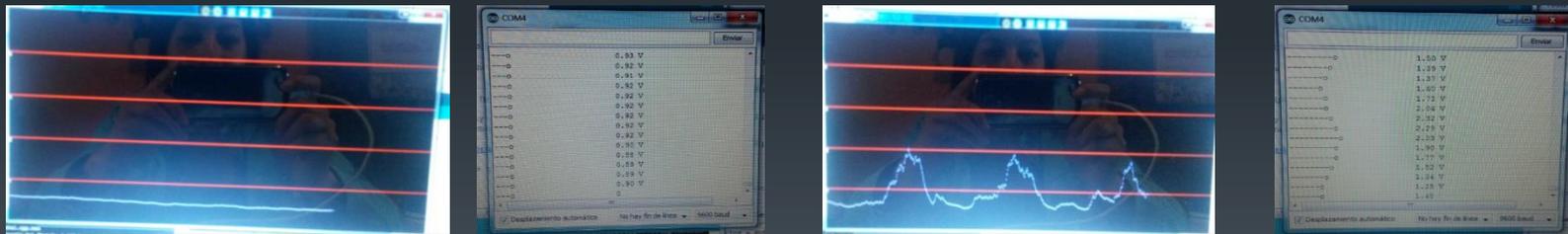


Figura Músculo deltoides en reposo y contracción

Flexión del hombro $>0^\circ$ a $<180^\circ$

Para el movimiento de flexión y extensión del hombro se usan el músculo tensor de dedos, los electrodos se colocan tal como se observa en la Figura .

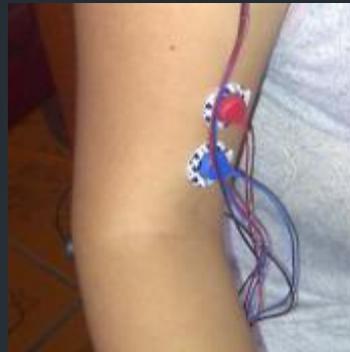


Figura Aplicación de electrodos músculo tensor de los dedos

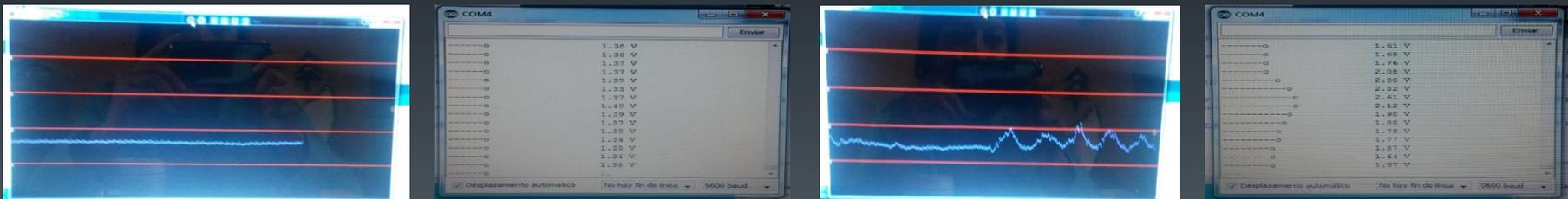


Figura Músculo tensor de dedos en reposo y contracción

EQUIPAMIENTO DEL EXOESQUELETO EN EL PACIENTE.

- Como primer punto se tiene la colocación de electrodos en el paciente como se muestra en la Figura, para lo cual se localiza los músculos que actúan en cada movimiento.

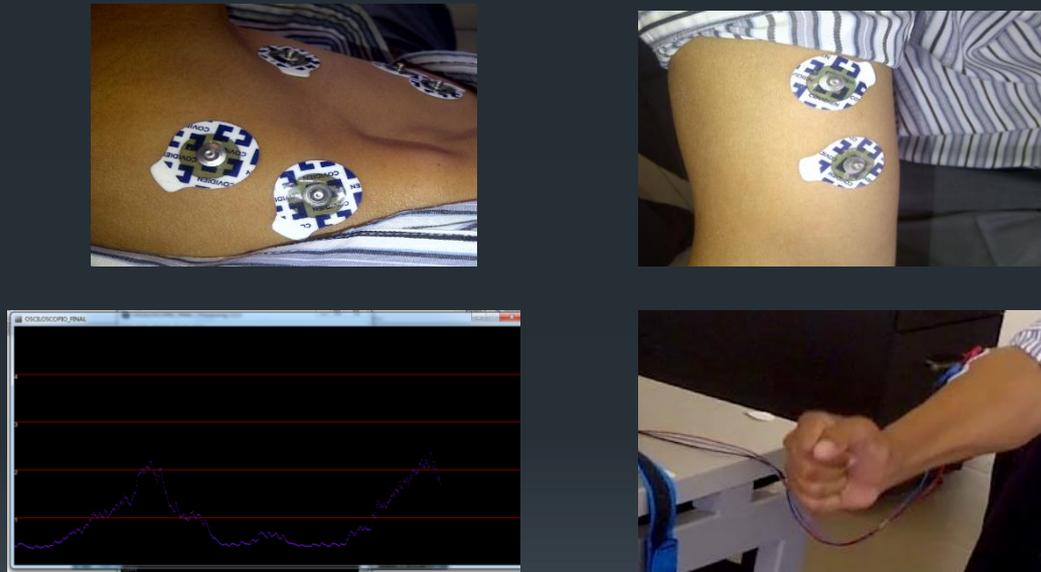


Figura Colocación de electrodos y toma de señales en el paciente.

Montaje de la estructura en el paciente

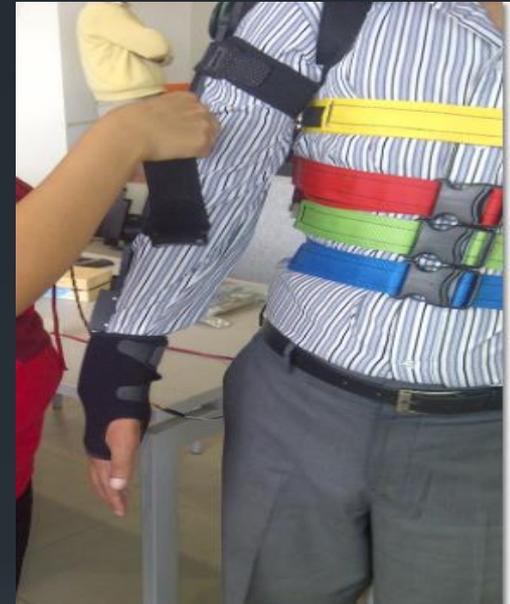
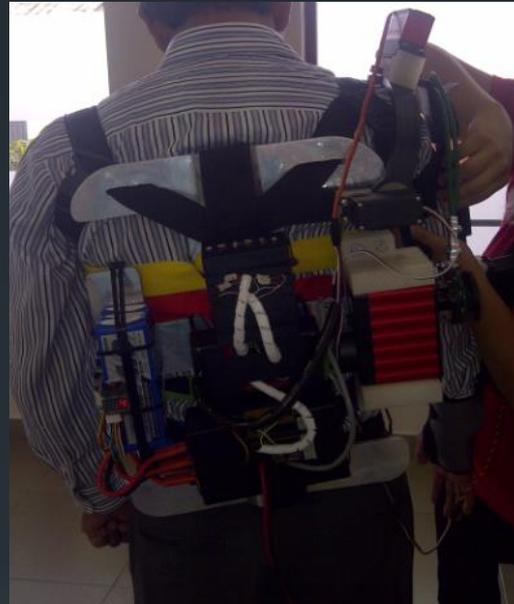


Figura Equipamiento del paciente



Figura Vistas del exoesqueleto

Pruebas del exoesqueleto sin carga

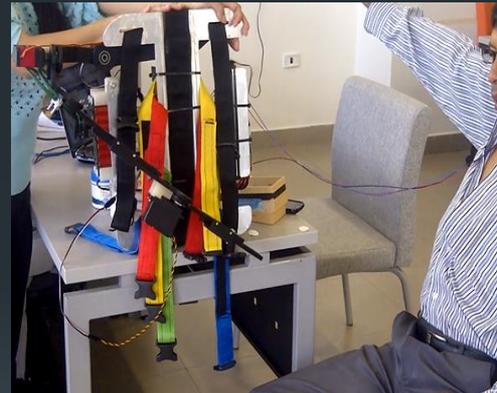


Figura pruebas generales del exoesqueleto

Pruebas del exoesqueleto con carga



Figura Movimientos realizados por el exoesqueleto



CAPÍTULO V

- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Para el presente proyecto se diseñó, construyó e implementó un exoesqueleto de 6 GDL para potenciar las capacidades en personas que han perdido la movilidad parcial del miembro superior derecho, de un peso aproximado de 4 Kg.
- Para el desarrollo del exoesqueleto es esencial estudiar los músculos del miembro superior con la finalidad de conocer sus grados de libertad, y límites de movilidad es decir en la ergonomía, biomecánica y limitación médica del brazo.
- Con la herramienta SolidWorks se desarrolla el diseño mecánico, mientras que con Ansys y Comsol se realiza el análisis de esfuerzos del exoesqueleto y a la vez se determina el material para la construcción del mismo; siendo este el ABS.
- Se seleccionó Aluminio como material para la construcción del espaldar debido a que en el país no existe un material tipo polímero en dimensiones que permitieran maquinar dicho espaldar.
- El diseño mecánico de la estructura del exoesqueleto es el correcto, debido a que cumple con los requerimientos de ergonomía, transporte, movilidad y peso, que se plantearon en los objetivos y metas a cumplir de este proyecto.

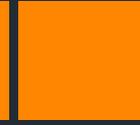
- 
- Se obtuvo una estructura resistente y ligera capaz de adaptarse a la cinemática del miembro superior del usuario, y de esta manera se habilita los movimientos especificados en el planteamiento de la tesis.
 - Para este proyecto se utilizó la tarjeta Arduino y la controladora de servomotores de marca Pololu que, conjuntamente con su código de programación han sido de gran ayuda en la calibración de los movimientos deseados, control del exoesqueleto y cumplimiento de los objetivos planteados.
 - Los servomotores utilizados poseen buenas características para el desarrollo del proyecto, basta con leer cuidadosamente sus especificaciones puesto que las características que poseen cada uno son muy importantes para generar el código de funcionamiento, además de sus características físicas que permiten el acople de los mismos al exoesqueleto.
 - Las señales que se obtienen de los músculos son de alta frecuencia casi imperceptible a un osciloscopio electrónico, por lo que se diseña con la ayuda del software Processing un osciloscopio que permita observar la señal obtenida de los músculos, de esta manera se puede analizar la verdadera señal que sirve para el control, de esto se puede concluir que es necesario equipo médico específico para el análisis de las señales del cuerpo humano.

- La señal obtenida en cada músculo es de tipo analógico y oscila entre 0 V y 5V dependiendo del paciente y de la fuerza de la señal que envía cada uno al realizar los movimientos.
- El rango de control de la señal es de 0.03V a 0.8V, para lograr una mayor sensibilidad además de una mejor velocidad de respuesta del exoesqueleto; este rango puede cambiar en cada paciente y depende de las características físicas del mismo como la masa corporal, que aumenta la resistencia de la piel.
- En rangos de movimientos de las articulaciones se obtuvo para flexión lateral y frontal del brazo un rango de $0^\circ < \alpha < 70^\circ$, para abducción del hombro y aducción del hombro un rango de $0^\circ < \alpha < 45^\circ$, y para flexión-extensión del codo un rango de $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, datos obtenidos con la ayuda de un médico Fisioterapeuta y la herramienta Goniometro.
- El paciente que utilice el exoesqueleto debe poseer el miembro superior además, debe enviar señales musculares ya sea por un mínimo movimiento o por la contracción del músculo debido a la intención de mover el miembro.
- Al realizar las pruebas generales del exoesqueleto en diferentes personas se pudo observar que su comportamiento es distinto, debido a que las señales obtenidas no son las mismas por que difieren en los rangos de voltaje, por esta razón se debe calibrar los valores para cada individuo.

RECOMENDACIONES

- Antes de colocar los electrodos es importante limpiar la zona de contacto de la piel con los sensores, a continuación es recomendable aplicar un gel conductor, para de esta manera poder obtener mejores resultados en la adquisición de señales.
- Antes de iniciar con la construcción del exoesqueleto, se debe estudiar cuidadosamente los resultados obtenidos en el análisis realizado en Ansys, para evitar que el equipo falle debido a problemas en la mecánica del mismo, e incluso realizar las pruebas físicas del material con el fin de salvaguardar la seguridad del paciente.
- En la construcción del exoesqueleto, se debe considerar un material resistente, duradero y sobretodo liviano, es por esto que para la fabricación del espaldar se recomienda reemplazar el aluminio por un material similar al ABS.
- Al fabricar los accesorios para sujetar los servomotores se sugiere que éstos sean de metal, puesto que al ser de plástico los engranes se desgastan con mayor facilidad y esto genera problemas con la transmisión de movimiento.
- Se recomienda mejorar el diseño de las articulaciones con el fin de aumentar el rango de movimiento de las articulaciones habilitadas.
- Se recomienda analizar las señales musculares de cada usuario para el exoesqueleto, ya que si éstas son muy débiles requieren ser amplificadas a la necesidad de cada individuo o a su vez ser reemplazadas por señales de intención de otro músculo.

- 
- En el momento de programar los movimientos, es aconsejable realizarlo uno por uno, y así ir incorporándolos para evitar ciertos tipos de interferencia, ya que los sensores detectan la mínima señal enviada por el usuario.
 - Al finalizar con el proyecto se observa que el equipo presenta ciertas interferencias y retardo en la respuesta de los servomotores, por lo que se recomienda el uso de otros sensores musculares como la pulsera llamada Myo que se desarrolló el año pasado y está por salir a la venta, así se evitaría el uso de electrodos alambrados y desechables ya que presentan inconvenientes una vez que la persona los usa por mucho tiempo.
 - Se recomienda utilizar instrumentación específica de análisis biomédico y además generar trayectorias dentro del espacio de trabajo para analizar el comportamiento del exoesqueleto, procurando mejorar el estilo de vida de las personas además de la versión del exoesqueleto desarrollado.
 - Se recomienda además el estudio de redes neuronales para la detección anticipada del movimiento y de esta manera mejorar el control y la respuesta del exoesqueleto.
 - Es recomendable que el usuario reciba rehabilitación en su brazo, antes de usar el exoesqueleto, ya que requiere un entrenamiento general de como enviar los pulsos desde sus músculos hacia la placa de adquisición de señales, mismos que sirven para el control del exoesqueleto.



GRACIAS