

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

Ing. Marco Singaña– Director, Ing. Félix Manjarrés – Codirector, Molina Mena Mariela Anabel Sacho Culcay Johana Jazmina

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas EPE Extensión Latacunga.

msingania@gmail.com , javier.manjarres@gmail.com, maryanabel2@hotmail.com, joyspiu@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad el 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, mejorando su estilo de vida en el desarrollo de sus actividades. Un exoesqueleto en el ámbito de la robótica es una máquina móvil que está compuesta de una estructura mecánica como marco y una fuente de alimentación que suministra la energía para el movimiento de la extremidad. Un exoesqueleto es, una estructura diseñada para ser usada sobre el cuerpo humano como una prenda de vestir, sirve de apoyo y es usado para asistir movimientos o aumentar la fuerza en un ser humano. Para la construcción se toma en cuenta la adquisición de señales electromiográficas, el procesamiento de las mismas, y el control de los actuadores. 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, y así procesarlas obteniendo una señal de control del servomotor en tiempo real acorde a la magnitud de la intención del paciente. Esta iniciativa, es de gran interés debido a que en el Ecuador no existen proyectos de este tipo y los resultados obtenidos permitirán desarrollar otras aplicaciones relacionadas con la biomecánica de extremidades, aportando en gran parte el desarrollo de nuevas tecnologías en el país e incluso una nueva competencia en el mercado, a nivel nacional e internacional.

Palabras Clave:

Electromiografía, Exoesqueleto, Biomecánica, Mecatrónica

La preocupación del ser humano por mejorar la calidad de vida de las personas que, por accidentes o por alguna enfermedad congénita han perdido la movilidad o la capacidad de manipular objetos, esto ha llevado a que se creen a lo largo de la historia diferentes dispositivos que pueden aliviar en parte distintos tipos de discapacidades.

Un exoesqueleto en la medicina está diseñado básicamente para asistir a la persona cubriendo todas las necesidades que normalmente no podrían hacer, con un estudio adecuado de los movimientos del cuerpo.

Una de las mayores limitantes de los seres humanos para realizar tareas físicas es la fuerza de los músculos, que puede disminuir considerablemente como resultado de un daño neuromuscular, de una atrofia muscular o por una distrofia muscular en personas discapacitadas.

Para dar solución a este problema se plantea la construcción de un exoesqueleto en donde se requiere un mecanismo aplicable a personas con invalidez total o 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.

A. El Brazo Humano

En la Fig. 1 se muestra un brazo humano junto con los movimientos que puede realizar representados por los ángulos θ_1 a θ_7 . Los rangos de movilidad se muestran en la Tabla 1 (Hernández, C. 2007).

I. INTRODUCCIÓN

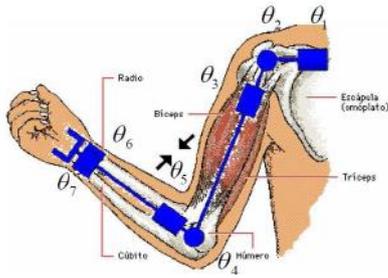


Figura 1: Biomecánica del Brazo Humano

TABLA 1.
Rangos de movilidad del brazo humano (°)

	Θ_1	-180 a 50
Hombro	Θ_2	-90 a 90
	Θ_3	-90 a 0
	Θ_4	0 a 145
Codo	Θ_5	-90 a 90
	Θ_6	-55 a 25
Muñeca	Θ_7	-70 a 90

El músculo humano es el elemento encargado de generar los movimientos, se une a las articulaciones de los huesos por medio de los tendones. Por ejemplo, si el músculo bíceps se contrae, se genera un movimiento giratorio en el codo tal y como lo muestra la Fig. 2. El músculo tríceps se relaja en el movimiento.



Figura 2: Movimiento de flexión y extensión del codo

Por otro lado, las dimensiones estándar de las diferentes partes del cuerpo humano son función de la altura del individuo y se muestra en la Fig.3 (Guzmán, A. 2011).

Si un individuo tiene una altura H de 185 centímetros, la distancia de su hombro al codo es de $0.186H$ y que es igual a 34.41 centímetros.

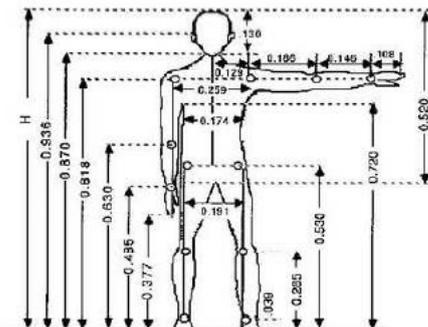


Figura 3: Dimensiones del ser humano

B. Señales Electromiográficas

Las señales electromiográficas, son aquellas que se producen al tensionar o distensionar un músculo, y resultan de la actividad química producida por la proteína fibrosa miosina. Al contraer los músculos, se genera una señal eléctrica de unos cuantos micro voltios como se presenta en la Fig.4, por lo que es necesario amplificar esta señal para poder utilizarla en el control.

La generación de señales mioeléctricas, tiene como base la unidad motora, que muestra la actividad funcional en el músculo y está formada por una motoneurona y fibras musculares inervadas en ellas.

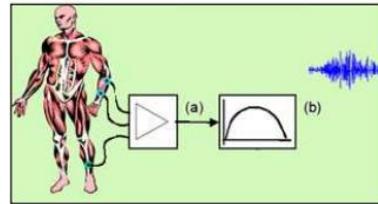


Figura 4: Señales mioeléctricas generadas al contraer o distensionar los músculos.

C. Elementos del Exoesqueleto

Sensores

Estos capturan la información sobre como el usuario desea moverse. Los sensores pueden ser manuales, como una palanca, o pueden ser eléctricos y detectar los impulsos fisiológicos generados por el cuerpo, o pueden estar combinados con dispositivos como un control remoto y un detector de movimiento que permite a quien lo usa cambiar la acción de caminar a subir gradas. La información capturada es enviada a la computadora para ser analizada.

Marco

Usualmente hecho de materiales ligeros, el marco debe ser lo suficientemente fuerte para sostener el peso del cuerpo así como el peso del exoesqueleto y sus componentes. También debe sostener el cuerpo en su lugar de una manera segura sin el riesgo que quien lo usa se caiga. El marco usualmente tiene una serie de uniones las cuales coinciden con las del cuerpo, en la cadera, la rodilla y tobillo.

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. La computadora coordina a los distintos actuadores en el exoesqueleto y permite al usuario, pararse, caminar, subir o descender.

Actuadores

Si el marco es como los huesos del cuerpo y el controlador el cerebro, entonces los actuadores son los músculos que

ejercen el movimiento. Los actuadores son usualmente motores eléctricos o hidráulicos. Usando la energía de las baterías y la información enviada por la computadora.

Baterías

Deben dar funcionalidad al exoesqueleto la mayor parte del día o ser fáciles de reemplazar para que las baterías agotadas puedan quitarse fácilmente y ser cambiadas con baterías cargadas durante el día. Deben ser ligeras y pequeñas para que el exoesqueleto no sea ni pesado ni voluminoso. También deben ser de recarga rápida para que el exoesqueleto esté listo en un par de horas.

II. DESARROLLO

El desarrollo del proyecto se divide en tres etapas, para su análisis y comprensión, detalladas a continuación:

A. ADQUISICIÓN DE SEÑALES

Para la adquisición de señales musculares se utilizan electrodos EMG (Electromiográficos), puesto que se necesita conocer la posición de cada articulación, con el fin de asignar la nueva posición del exoesqueleto.

El diagrama de bloques que se presenta en la Fig. 5 representa el sistema de adquisición de señales musculares para el control del exoesqueleto.

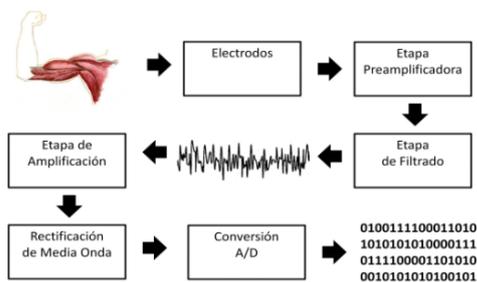


Figura 5: Diagrama a bloques del sistema de adquisición de EMG

B. DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño mecánico busca acoplar la cinemática del exoesqueleto a la cinemática del cuerpo humano, para determinar el rango de movimiento de las articulaciones.

Para el diseño se toma en cuenta diferentes consideraciones:

- Seguridad del paciente
- Grados de Libertad
- Posicionamiento de sensores
- Posicionamiento de actuadores
- Rangos de Movimiento
- Debe ser ajustable al brazo.
- Topes mecánicos por adaptación del sistema mecánico y electrónico o de control

Además para el diseño estructural se utiliza como herramientas de análisis el software de diseño SolidWorks, ANSYS, Inspire, Space Clean, para determinar esfuerzos, cargas, puntos críticos y comprobar que la selección de material es el adecuado.

En Inspire se procede a seleccionar el material a utilizar, el plano y posibles cargas a las que se expone cada pieza sobredimensionando los valores para así analizar un factor de seguridad mayor tal como se muestra en la siguiente Fig.6, el uso de esta herramienta computacional se debe a la optimización de recursos, ya que nos permite quitar material de exceso y así se reducen costos en la construcción.

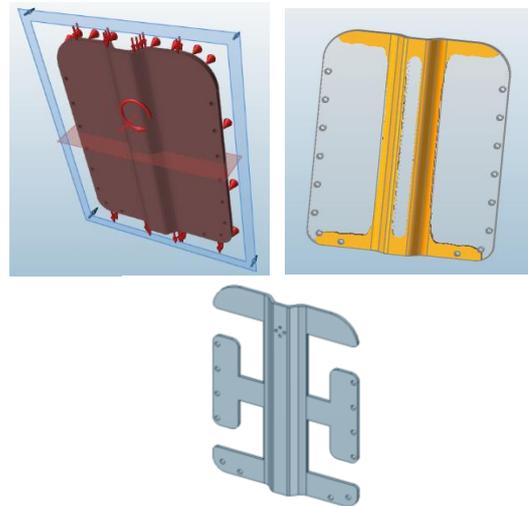


Figura 6: Optimización de piezas en Inspire

Una vez terminado el diseño se procede con el análisis del sistema, calculando el factor de seguridad de las piezas y la estructura.

Para esto se procede con el mallado (figura 7), obteniendo el más fino posible para que los resultados sean más exactos.

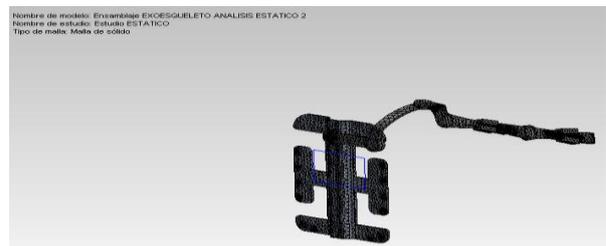


Figura 7. Mallado de la estructura

Para el presente proyecto se toma el mallado más fino permitido que es de aproximadamente 2.33mm.

En la figura 8 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 Ecu.1 se demuestra que la estructura no sufre fallos.

$$svonMises \leq slimite \quad \text{Ecu. 1}$$

$$23.51MPa \leq 34.96 [MPa]$$

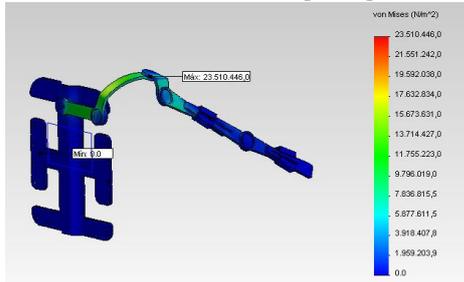


Figura 8. Tensión de Von Mises en la estructura

A continuación se presenta un análisis de una de las piezas diseñadas para el exoesqueleto en COMSOL Multiphysics que es una plataforma de software de propósito general, basado en métodos numéricos avanzados, para el modelado y la simulación de problemas basados en la física.

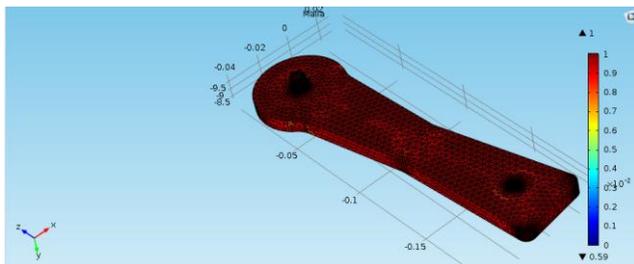


Figura 9. Análisis en Comsol

Malla completa consiste en 2170 elementos Calidad mínima: 0.1484, calidad media: 0.6291.

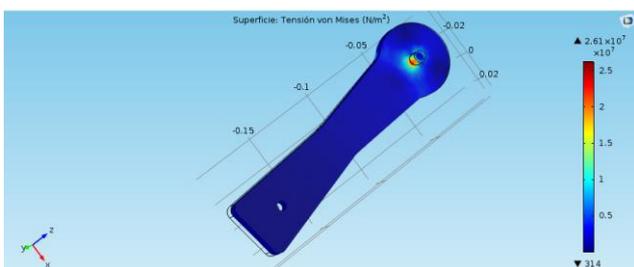


Figura 10. Tensión de Von Mises en Comsol

Tomando en cuenta el valor de la resistencia a la fluencia del material (S_y) que es de 34,96 MPa se calcula el FDS tomando en cuenta la Ecu. 2.

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad \text{Ecu. 2}$$

Factor de seguridad resultante: 1.339

C. CONTROL

El control del exoesqueleto es una de las partes más importantes debido a que el acople entre esta y el diseño mecánico representan la eficiencia del mecanismo.

Para el caso de un exoesqueleto autónomo es importante conocer términos como baja impedancia, señal de retroalimentación, señal de salida, diferencia de potencial entre otras, debido a que el humano provee las señales de control para el exoesqueleto mientras los actuadores bajo el efecto de control proveen la potencia y la señal correcta necesaria para realizar una tarea específica.

El control realizado en este trabajo depende de las señales obtenidas del músculo amplificadas y controladas por el dispositivo microcontrolador Arduino, en el cual dependiendo de la diferencia de potencial que circule por el músculo va a activar los servomotores que controlan el exoesqueleto, logrando así solventar la perdida de movilidad parcial de la extremidad.

III. PROCEDIMIENTO

A. Sistema de Adquisición.

El sistema de adquisición está compuesto por tres partes fundamentales que se observan en la figura 11.

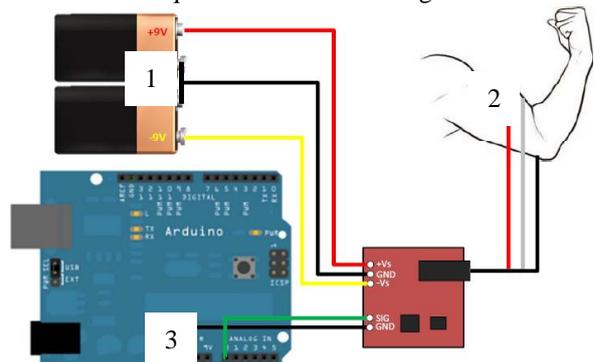


Figura 11: 1. Alimentación 2. Sensado 3. Salida de señal rectificada.

Los sensores musculares están diseñados para utilizarse directamente con microcontrolador. Por lo tanto son sensores que obtienen una señal amplificada, rectificada y filtrada que trabaja bien con un convertor ADC (Análogo a Digital), como se presenta en la figura 12.

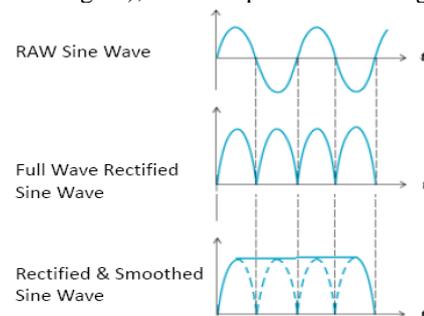


Figura 12 Forma de Señal Adquirida y Rectificada
Fuente: Advancer Technologies

B. DISEÑO MECÁNICO

Para el diseño mecánico se utiliza el software SolidWorks que permite analizar los movimientos del exoesqueleto y definir los grados de libertad para cada articulación.

En el diseño se puede observar la adaptabilidad del exoesqueleto para los diferentes tamaños de extremidades de una mujer o un hombre, como se muestra en la Fig.13.

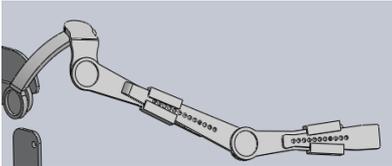


Figura 13: Brazo y Antebrazo Regulables

Además se puede observar la seguridad del paciente con la adaptación para sujeción de elementos en el espaldar construido (Fig. 14).

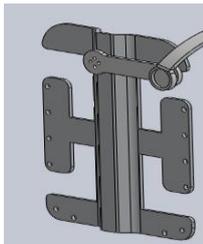


Figura 14: Espaldar de sujeción de Elementos

Otra característica principal del diseño del exoesqueleto observada en la Fig.15, es el sistema de habilitación de los movimientos del hombro cuidando la seguridad del usuario y su estabilidad.

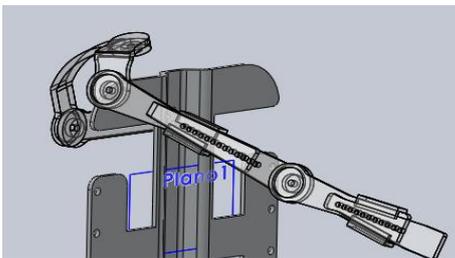


Figura 15: Acople Espalda-Hombro

En la Fig.16 se presenta el diseño y la construcción total del exoesqueleto de miembro superior.

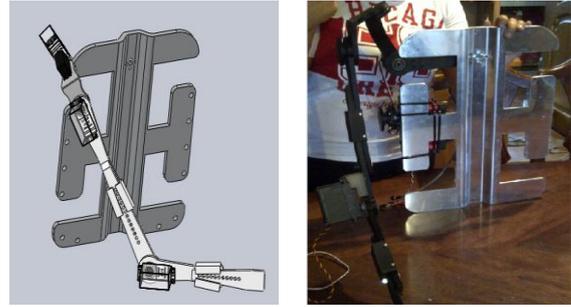


Figura 16: Construcción mecánica del exoesqueleto

C. CONTROL

El control inicia a partir de la entrada a la tarjeta Arduino, ya que con el microcontrolador incorporado en ella se realiza la programación de los movimientos del exoesqueleto a partir de la energización de los servomotores.

En la Fig.17 se observa la colocación de los electrodos y el conexionado con la tarjeta Arduino UNO.

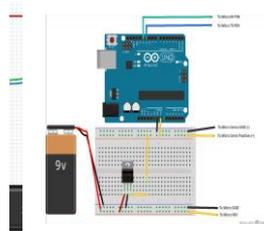


Figura 17: Etapa de Control

Las pruebas previas son realizadas verificando el control de ancho de pulso y control de frecuencia mediante la programación de la tarjeta Arduino y la verificación con ayuda de un led, estas pruebas se observan en la Fig. 18 a y b.

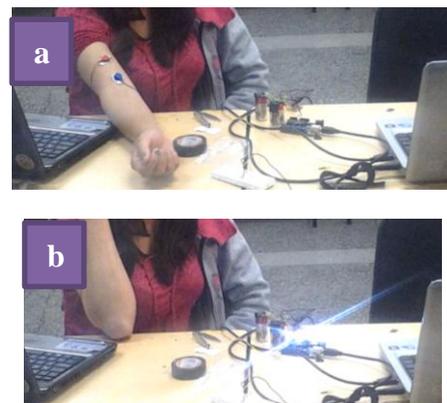


Figura 18: Control de Frecuencia y Ancho de Pulso

IV. PRUEBAS

Pruebas de obtención de señales EMG.

Para realizar el movimiento de flexión del codo se toma señales electromiográficas del músculo bíceps braquial

ubicado en el brazo de la persona, colocando los electrodos tal como se muestra en la Fig.19.

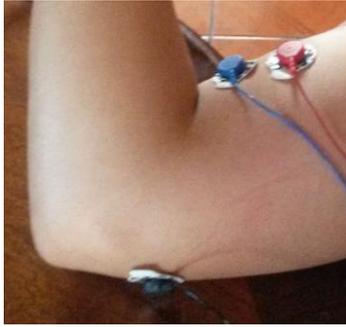


Figura 19. Aplicación de electrodos músculo bíceps

La Fig. 20 presenta las señales obtenidas con el músculo en relajación y contracción.

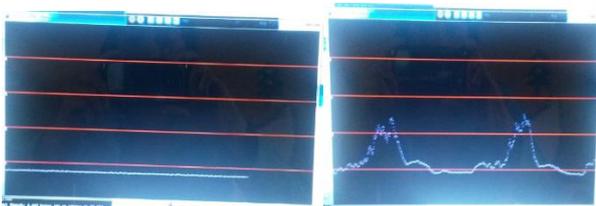


Figura 20 Señales del músculo bíceps.

Las pruebas se las realiza en una persona que tuvo un accidente años atrás, debido a esto tiene debilidad en sus músculos, el objetivo es ampliar la fuerza en su brazo y detectar los movimientos y así, transmitirlos en tiempo real a la estructura.

Pruebas del exoesqueleto sin carga

En las figuras se presenta las pruebas realizadas en donde el exoesqueleto es capaz de replicar los movimientos que realiza la persona.

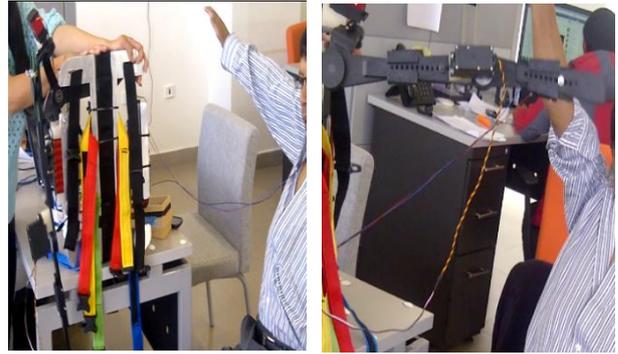


Figura 21. Pruebas generales del exoesqueleto

Pruebas del exoesqueleto con carga

Una vez que se tiene la certeza, que el exoesqueleto es seguro para la persona, porque éste se encuentra ya calibrado con los valores correctos se realiza la prueba, que consiste en amplificar la fuerza en los movimientos del brazo del paciente.

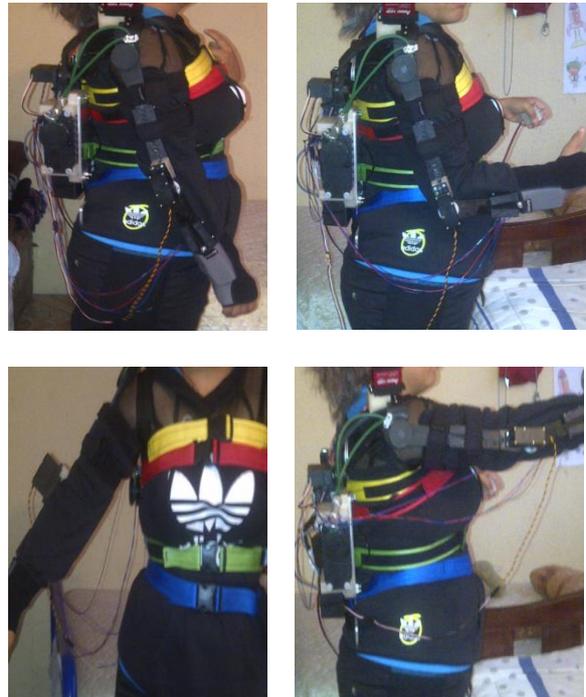


Figura 22 Pruebas generales del exoesqueleto con carga.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las pruebas realizadas al exoesqueleto, tomando en consideración control y movimiento.

Tabla 2.
Resumen de pruebas realizadas con exoesqueleto

Movimiento	Si	No	Total
Control			
Si	205	42	247
No	218	55	273
TOTAL	423	97	520

V. 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.

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.

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.

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.

VI. BIBLIOGRAFÍA

HERNÁNDEZ, Carlos Santos y Montaya, Carlos Francisco García (2007), "Diseño de un Sistema Emulando el Movimiento Articulado de una mano, brazo y antebrazo.", Tesis de maestría Ingeniería Mecatrónica CENIDET, Cuernavaca México.

GUZMAN, Arturo (Agosto 2011), "Unidad 6 Antropometría aplicada".

Gary, K.. (2004), Kinesiología Electromiográfica, Métodos de Investigación en Biomecánica. DGE.

Hernández, S.(2007).Tesis de maestría Ingeniería Mecatrónica."Diseño de un Sistema Emulando el Movimiento Articulado de una mano, brazo y antebrazo.". México: CENIDET.

En P. D. Dr. Donoso Garrido. (1997), Kinesiología Básica y Kinesiología Aplicada. Quito: EDIMEC.

Nigg B.M. (1999), Biomechanics of the Muscle - Skeletal system (pág. 349). Wiley.

Sira. (2009).El robot traje HAL se comercializa en Japón. Recuperado el 02 de octubre de 2013, de <http://www.tecnologiablog.com/post/406/el-robot-traje-hal-ya-se-comercializa>

Arevalo, F. (mayo de 2010). Análisis de Electromiograma. Recuperado el 01 de agosto de 2013, de <http://www.monografias.com/trabajos82/analisis-electromiograma/analisis-electromiograma2.shtml>

Alejo, C. (2010).Ergonomía.Recuperado el 02 de agosto de 2013, de <https://ergonomia2010.wordpress.com/>

Fernández, A. (abril de 2011). Goniometría Buenas Tareas. Recuperado el 20 de septiembre de 2013, de <http://www.buenastareas.com/ensayos/Goniometria/2030340.html>

Capa, G. (27 de agosto de 2011).Músculos Antebrazo. Recuperado el 12 de septiembre de 2013, de <http://www.slideshare.net/opazomed/musculos-antebrazo>

Carrasco, F. (06 de diciembre de 2011). Músculos del miembro superior. Recuperado el 10 de agosto de 2013, de <http://www.slideshare.net/333333333/musculos-del-miembro-superior-10489289>

Pololu Corporation. (20 de octubre de 2014). Guía de usuario Pololu. Obtenido de <https://www.pololu.com/file/0J510/PololuMaestroGuiDeUsuario.pdf>

BIOGRAFIA.



Marco Singaña, nació en Latacunga provincia de Cotopaxi, Ecuador. Graduado de la Escuela Politécnica Nacional en Electrónica y Control, cuenta con un Diplomado Superior en Redes digitales Industriales, un Masterado en Redes y Telecomunicaciones, está cursando un Masterado en Diseño, Producción y Automatización Industrial en la Escuela Politécnica Nacional. Director del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas Extensión Latacunga.



Félix Manjarrés, Nació en Guayaquil, Ecuador, es Tecnólogo aeronáutico mención motores, Ingeniero Automotriz e Ingeniero Industrial, Egresado de la Escuela Politécnica Nacional en el programa de maestría en Diseño, Producción y Automatización Industrial. Docente tiempo parcial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Es consultor de proyectos de ingeniería mecánica e industrial.



Mariela Molina, nació en la ciudad de Saquisilí – Ecuador el 17 de mayo de 1991. Estudio Ingeniería Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas Extensión – Latacunga.



Johana Sancho, nació en Ambato, Ecuador. Estudio Ingeniería Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas Extensión Latacunga - Latacunga, prestó sus servicios profesionales en la empresa Consorcio Consermín Procopet.