



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE UN MIEMBRO SUPERIOR  
HUMANO ACCIONADO POR MÚSCULOS NEUMÁTICOS**

Autor:  
LAURA ANDREA BELTRÁN BELTRÁN

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA MECATRONICA  
BOGOTÁ D.C  
2017



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE UN MIEMBRO SUPERIOR  
HUMANO ACCIONADO POR MÚSCULOS NEUMÁTICOS**

Autor:  
LAURA ANDREA BELTRÁN BELTRÁN

Trabajo de Grado para Optar al título de  
INGENIERO EN MECATRÓNICA

Director:  
Dr. Oscar Avilés

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA MECATRONICA  
BOGOTÁ D.C  
2017

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. Febrero de 2017

## DEDICATORIA

*“Sólo dos legados duraderos podemos dejar a nuestros hijos: uno, raíces; otro, alas.”*

*A mis padres, Elber y Ana, por darme las raíces necesarias para poder crecer personal y profesionalmente, por su ejemplo, amor y comprensión.*

*A David y Daniel por su compañía, ayuda y alegría.*

*A mi familia, los que están cerca y los que no tanto, por su confianza, interés y compañía que siempre tengo presente.*

*A Mauricio, por su especial compañía y apoyo para lograr lo que me proponga.*

*A mis amigos, por todos los momentos que a lo largo de este tiempo me dieron la fortuna de compartir*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a la Universidad Militar Nueva Granada por estos años de formación académica.*

*Agradezco de manera muy especial a mi Director de tesis, el Ingeniero Oscar Avilés, no sólo por su guía y conocimiento brindado para el correcto desarrollo del proyecto, sino por ser un maestro amigo, que, en su rol de profesor, no sólo forma Ingenieros, con su enseñanza forma personas integra.*

*Agradezco a toda la planta de profesores de la facultad de Ingeniería Mecatrónica, porque cada uno aportó a mi formación y de alguna manera u otra fue partícipe de mi crecimiento personal y profesional.*

*De corazón, mil gracias.*

## INDICE

RESUMEN .....	12
ABSTRACT .....	13
1. INTRODUCCIÓN .....	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.2. OBJETIVOS .....	14
1.2.1. GENERAL.....	14
1.2.2. ESPECIFICOS .....	14
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.4. ALCANCE.....	15
1.5. ANTECEDENTES .....	16
2. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DEL BRAZO HUMANO .....	21
2.1. DEFINICIÓN.....	21
2.2. MEDIDAS ANTROPOMÓRFICAS.....	22
2.3. MOVIMIENTOS DEL HOMBRO Y BRAZO .....	23
2.3.1. ANATOMIA DEL BRAZO .....	24
2.3.2. ANATOMIA DEL CODO.....	25
2.3.3. ANATOMIA DEL HOMBRO .....	26
2.3.4. MÚSCULOS QUE INTERVIENEN EN LOS MOVIMIENTOS PRINCIPALES.....	27
3. DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÚSCULO NEUMÁTICO.....	30
3.1. TIPOS DE ACTUADORES.....	30
3.2. MÚSCULO NEUMÁTICO.....	31
3.2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	31
3.2.2. VENTAJAS .....	31
3.2.3. APLICACIONES .....	32
3.2.4. FABRICACION DE MÚSCULO NEUMÁTICO CASERO .....	32
3.2.5. CARACTERISTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES IMPLEMENTADOS EN LA ELABORACIÓN DEL MÚSCULO.....	33
3.2.6. PRUEBA DEL MÚSCULO NEUMÁTICO. ....	34
3.2.7. MODELADO ESTÁTICO DEL MÚSCULO NEUMÁTICO.....	39
3.2.8. MODELO DINÁMICO DEL MÚSCULO NEUMÁTICO.....	40
4. DISEÑO Y SIMULACIÓN MECÁNICA DEL BRAZO ANTROPOMÓRFICO .....	42
4.1. DISEÑO DEL MODELO EN MAYA AUTODESK.....	42
4.2. DISEÑO DEL BRAZO EN SOLIDWORKS .....	42
4.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MUSCULAR POR OPENSIM .....	43

4.3.1. Movimiento de Flexión y Extensión del Brazo .....	47
4.3.2. Movimiento de Flexión y Extensión del Hombro .....	48
4.3.3. Movimiento de Abducción y Aducción del Hombro .....	52
4.4. SIMULACIÓN Y COMPROBACIÓN DE MOVIMIENTOS POR EL SOFTWARE MATLAB .....	53
4.4.1. SIMULACIÓN POR SIMMECHANICS .....	54
4.4.2. DESARROLLO INTERFAZ GRÁFICA GUIDE .....	55
5. CONSTRUCCIÓN Y COMPARACIÓN MODELO FISICO CON SIMULACIÓN DEL BRAZO ANTROPOMÓRFICO.....	61
5.1. CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN .....	61
5.2. PRUEBAS DE MOVIMIENTO REAL Y EN SIMULACIÓN .....	62
6. CONCLUSIONES .....	66
7. TRABAJOS FUTUROS.....	67
8. REFERENCIAS .....	68

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Mano accionada por músculos artificiales (Polimeros). Tomada de [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2 Diseño Nanotubos de carbono. Tomada de [2].....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3 Mano y antebrazo de alt-Ruppin [4].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4 Prótesis Peter Beil [5].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5 Robot paralelo para simular articulación del hombro.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6 Robot ZAR.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7 Brazo Robótico accionado por poleas.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 8 Huesos del Brazo [9].....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 9 Antropometría del Cuerpo en Metros[9].....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10 Alcance funcional del brazo máximo.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11 Altura Codos- antebrazo.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 12 Plano cartesiano para análisis del cuerpo.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 13 Anatomía del Brazo[12].....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14 Anatomía del Codo[12].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15 Anatomía del hombro.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 16 Músculos que intervienen en la Flexión y extensión del brazo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17 Músculos que intervienen en la abducción del brazo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 18 Músculos que actúan en la flexión del hombro.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 19 Músculos que intervienen en la extensión del hombro.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 20 Músculos que intervienen en el movimiento de aducción.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 21 Actuador Piezo-Eléctrico.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 22 Aleación de forma.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 23 Músculo Neumático FESTO [3].....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 24 Primer Prototipo músculo Neumático casero en estado normal y con presión.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 25 Prototipo músculo neumático final en prueba de presión.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 26 Montaje Caracterización del resorte.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 27 a) Músculo sin carga ni presión b) Músculo sin carga con presión.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 28 Gráfica de comportamiento de datos adquiridos (Tabla 3).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 29 Gráfica Fuerza vs Presión.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 30 a) Músculo con carga y presión b) Músculo con carga sin presión.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 31 circuito análogo del comportamiento del músculo neumático.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 32 Diseño Brazo antropomórfico en MAYA AUTODESK.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 33 Brazo antropomórfico software SolidWorks.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 34 a) Vista posterior estructura OpenSIm b) Vista Frontal estructura OpenSIm.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 35 Control de grados de libertad de cada movimiento.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 36 Eje de coordenadas de la estructura.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 37 a) Elevación Hombro (Flexión) -75° b) Elevación Hombro a 55°(Extensión).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 38 a) Elevación lateral a 90° (Aducción) b) Elevación a 150°(Abducción).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 39 a) Rotación hombro -90° b) Rotación hombro 20°.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 40) a)Extensión Brazo 0° b) Flexión Brazo 90°.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 41 Gráfica movimiento Flexión Opensim.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 42 Ángulo vs elongación a)Biceps b) Triceps.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 43 Grafica Movimiento Flexión Hombro.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 44 Ángulo vs Elongación a)Coracobranquial b)Deltoides.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 45 Ángulo vs Elongación Deltoides.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 46 Ángulo vs Elongación Latissimus.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 47 Ángulo vs Elongación Latissimus y Pectoral.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 48 Ángulo vs Elongación Pectoral.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 49 Ángulo vs Elongación Trapecio.....</i>	<i>51</i>

Figura 50 Gráfica movimiento de Abducción-Aducción.....	52
Figura 51 Ángulo vs Elongación coracobranquial y deltoide.....	52
Figura 52 Ángulo y Elongación Deltoides .....	53
Figura 53 Ángulo y elongación Trapecio .....	53
Figura 54 Diagrama de Bloques Simulink.....	54
Figura 55 Brazo Antropomórfico Simulink.....	55
Figura 56 Presentación de interfaz Gráfica .....	55
Figura 57 Interfaz Gráfica del brazo Antropomórfico.....	56
Figura 58 Gráficas elongación y Presión Biceps .....	56
Figura 59 Elongación y Presión del triceps .....	57
Figura 60 Demostración Gráfica del análisis de la gráfica .....	57
Figura 61 Graficas Elongación y Presión Biceps a 45° .....	57
Figura 62 Grafica Elongación y Presion de Triceps a 45° .....	58
Figura 63 Demostración Gráfica de rotación de Codo a 45° .....	58
Figura 64 Elongación y Presión de Deltoides para movimiento de Flexión de 60° .....	59
Figura 65 Demostración gráfica de flexión del hombro .....	59
Figura 66 Abducción Angulo 60°.....	59
Figura 67 Diagrama de abducción a 30° del hombro .....	60
Figura 68 Modelo Esqueletico implementado.....	61
Figura 69 Terminales del músculo Neumático.....	62
Figura 70 Distribuidor Festo [22].....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 71 Flexión y Enxtensión Codo Prototipo .....	64

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Datos obtenidos para constante K</i> .....	35
<i>Tabla 2 Caracterización músculo sin carga</i> .....	36
<i>Tabla 3 Caracterización músculo con carga</i> .....	37
<i>Tabla 4 Fuerza vs Presión</i> .....	38

## ECUACIONES

<i>Ecuación 1 Fuerza del resorte</i> .....	34
<i>Ecuación 2 Comportamiento del músculo sin carga</i> .....	36
<i>Ecuación 3 Comportamiento músculo con carga</i> .....	37
<i>Ecuación 4 Fuerza vs Presión</i> .....	38
<i>Ecuación 5 Fuerza del resorte</i> .....	38
<i>Ecuación 6 Relación Fuerza, área y presión</i> .....	39
<i>Ecuación 7 Modelo estático derivado ecuación 6</i> .....	39
<i>Ecuación 8 Ecuación Final Modelo estático del músculo</i> .....	40
<i>Ecuación 9 Ecuación en diferencias de modelo del músculo no lineal</i> .....	40
<i>Ecuación 10 Elongación Biceps y triceps</i> .....	48
<i>Ecuación 11 Elongación Coracobranquial y deltoides</i> .....	49
<i>Ecuación 12 Elongación Deltoides</i> .....	49
<i>Ecuación 13 Elongación Latissimuss</i> .....	50
<i>Ecuación 14 Elongación Latisimuss 3</i> .....	50
<i>Ecuación 15 Elongación Pectoral</i> .....	51
<i>Ecuación 16 Elongación Trapecio</i> .....	51
<i>Ecuación 17Elongación Coracobranquial y Deltoide</i> .....	52
<i>Ecuación 18 Elongación deltoides</i> .....	53
<i>Ecuación 19 Elongación Trapecio</i> .....	53

## **RESUMEN**

En el siguiente documento se dará a conocer a manera detallada el proceso de diseño, construcción y funcionamiento aplicando un sistema mecatrónico a un brazo accionado con músculos neumáticos. El brazo cuenta con 3 grados de libertad a través de los cuales se generan los movimientos de Flexión, extensión, aducción y abducción principalmente, los cuales serán descritos en el interior del documento.

El prototipo diseñado implementa un desarrollo mecánico, electrónico y computacional manejando un nivel intermedio de programación. En el diseño mecánico se tiene en cuenta la morfología del brazo humano promedio para desarrollar un prototipo similar, los movimientos que se es capaz de realizar y los grados de libertad delimitados por los ángulos de rotación, por último la parte computacional involucra la simulación en CAD del sistema , junto con la simulación de movimiento a partir de un software especializado para comprobar a manera general el comportamiento de cada uno de los movimientos, además del código de programación para configurar la simulación de los distintos software que se implementaron y el manejo de las ecuaciones que definen el comportamiento de los actuadores , quienes son los encargados de monitorear y configurar el funcionamiento del prototipo, asignando las posiciones de referencia para cada articulación.

## **ABSTRACT**

In this document will be released to detail the process of design, construction and operation applying a mechatronic system powered with pneumatic arm muscles. The arm has 6 degrees of freedom through which the movements of flexion, extension, adduction and abduction, which will be described within the document.

The prototype designed implements a mechanical, electronic and computer development driving an intermediate level of programming. In the mechanical design takes into account the morphology of the average human arm to develop a similar prototype, the movements can be performed, and the degrees of freedom defined by rotation angles, finally computational part involves the CAD simulation from specialized software to check for general behavior of each of the movements, its function is to monitor and configure the operation of the prototype, assigning the reference positions for each joint.

To demonstrate and validate the correct operation of each of the parts of the project the built physical prototype is made.

# 1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo uno se muestra de manera metódica el problema a abordar que se estudió para el desarrollo del proyecto. A partir de un análisis de objetivos, antecedentes, limitaciones y el estudio de los estados del arte se dará más claridad acerca de los temas involucrados y de la organización en la que se trabaja la tesis.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cifra de personas que al año en Colombia pierden un miembro superior por causas como una enfermedad, un accidente o como consecuencia del conflicto armado según la Asociación Colombiana de Medicina Física y Rehabilitación es de aproximadamente 200 a 300 personas por cada 100 mil habitantes (EL TIEMPO, 2012), razón por la cual surge la necesidad de reemplazar los miembros faltantes mediante elementos biomecátrónicos que asemejen miembros reales ya sea para suplir la pérdida o para el reemplazo de labores peligrosas donde sea necesario aplicar un movimiento. En el mercado a nivel Colombia el uso de implementos robóticos se ve limitada por los altos costos y por características físicas de las mismas, es así como se genera la necesidad de un mecanismo que cumpla con los dos principales problemas anteriormente descritos.

Se plantea la posibilidad de generar un brazo específicamente, el cual sea accionado por músculos artificiales neumáticos, diseñado bajo fundamentos de cinemática que generalmente son usados en la caracterización de robots industriales que sean una opción alternativa al uso de mecanismos que actualmente se manejan en el país.

¿Cómo generar movimientos antropomórficos en la articulación del hombro mediante el uso de músculos artificiales tipo McKibben?

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. GENERAL

Realizar el movimiento de la articulación del hombro en un brazo artificial con músculos neumáticos.

### 1.2.2. ESPECIFICOS

1. Identificar y caracterizar músculos artificiales del tipo neumáticos (McKibben) para ser implementados en el movimiento de un brazo artificial.
2. Realizar simulaciones en ambiente CAD del mecanismo de un brazo artificial con características antropomórficas actuado de manera neumática, para evidenciar su similitud con un brazo biológico.
3. Validar experimentalmente y en ambiente de simulación el desempeño de los sistemas propuestos

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

En Colombia, según estadísticas del censo realizado por el DANE en el año 2005 se registra que de cada 100 colombianos, 14,7 tienen limitaciones físicas relacionadas con el miembro superior, brazos y/o manos, estas limitaciones son debidas a pérdida de alguno de los miembros por accidente laboral, accidente cerebro vascular (ACV) o enfermedades del músculo en sí (miopatías) ocasionando problemas a nivel motor y por tanto de autonomía para la realización de tareas cotidianas así como de ambiente laboral.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la salud se define como “un estado de perfecto (completo) bienestar físico, mental y social, y no sólo la ausencia de enfermedad”, para la ingeniería, la salud ha sido uno de los fundamentos de la investigación aplicada. Desde la de prevención, se encuentran elementos tales como el diseño y uso de tecnologías que permiten controlar variables que afectan la salud del ser humano.

Por otra parte, se encuentra el diseño y uso de tecnologías de control como apoyo a las ciencias de la salud. Un claro ejemplo de esto es el avance en equipos de diagnóstico y monitoreo, prótesis y órtesis, dispositivos de terapia, entre otros. Este campo de aplicación lo han desarrollado la ingeniería biomédica y la bioingeniería, principalmente. Además, programas como las ingenierías electrónica, mecánica y mecatrónica han desarrollado un aporte significativo en términos de desarrollos instrumentales como apoyo para la salud. Otro caso particular, está asociado a las tecnologías de la información y la comunicación, las cuales, a través de desarrollos de software, han permitido tener sistemas de control y el manejo de información de la salud.

Es deber del Ingeniero utilizar de la tecnología con el fin de mejorar la calidad de vida del ser humano, y en razón al elevado número de personas portadoras de discapacidad en miembro superior, sigue vigente necesidad de implementar dispositivos que sean de utilidad para mejorar las condiciones de vida de personas portadoras algún tipo de deficiencia en brazos o manos.

Durante el desarrollo de este proyecto se busca realizar un prototipo de un brazo mecatrónico accionado a partir de músculos neumáticos, incursionando en el campo de la mecatrónica aplicada a la bioingeniería, en este trabajo se pretende que el brazo sea controlado por procesos desarrollados en el software MATLAB® y se comporte de la manera como se maneja por simulación, teniendo en cuenta las limitaciones de un brazo real y los sentidos de rotación de las dos articulaciones que participan en el proceso.

El proyecto se desarrolla con el fin de ser base de futuros tecnológicos cada vez más adaptables en términos ergonomía y funcionalidad al cuerpo humano, para que sean implementados a personas con limitaciones mejorando así calidad de vida.

### 1.4. ALCANCE

Se espera que el brazo diseñado sea capaz de moverse dentro del rango de movimiento que es capaz de maniobrar un brazo antropomórfico. Para generar este movimiento, tiene que ser programado cada uno de los músculos, de manera que se genere la contracción o elongación de cada uno necesaria para accionar correctamente el brazo. Según la cantidad de trabajo y el proceso del cronograma, se espera presentar el trabajo final a principios de Febrero, teniendo el tiempo necesario para completar todo el proceso y asimismo corregir errores.

## 1.5. ANTECEDENTES

A través de los años, varias compañías, universidades y demás sitios especializados de investigación han incursionado en materiales y diseños que tengan un comportamiento funcional y estructural muy similar a miembros del cuerpo humano, en este caso, al brazo. Asimismo, se han logrado grandes avances en el campo de rehabilitación, desarrollos de prótesis que han sido implementadas para suprimir trabajos riesgosos para el hombre, o para suplantar un miembro perdido.

Entre los actuadores que han sido muy trabajados para simular movimientos y comportamientos de locomoción están los músculos artificiales entre ellos hay varios tipos como los desarrollados a través de polímeros los cuales poseen características esenciales como elasticidad, deformación y recuperación de forma que permiten imitar el comportamiento de un músculo natural. A continuación, a manera general se realizará un estudio de las principales investigaciones que se han trabajado en torno a los músculos artificiales.

Ingenieros de la Universidad de Singapur desarrollaron un tipo de músculo artificial elaborados de un plástico flexible ver Figura 1. que es activado por pulsaciones eléctricas permitiendo que el robot se comporte de manera muy similar a un músculo biológico ya que responde rápidamente a impulsos eléctricos, la característica fundamental de este actuador es el peso que puede levantar y la velocidad de respuesta, lo que lo hace más eficiente a un actuador neumático y/o hidráulico. [1] Actualmente están trabajando en lograr que el músculo se estire aproximadamente 10 veces su tamaño original.

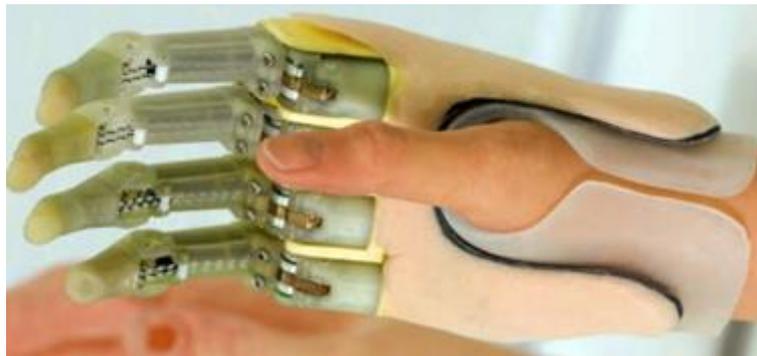


Figura 1 Mano accionada por músculos artificiales (Polimeros). Tomada de [1]

En la Universidad de Texas se desarrolló un músculo artificial a partir de Nanotubos de carbono, el cual supera ampliamente las capacidades del músculo biológico son capaces de extenderse (Relajación) y Contraerse más del doble de su extensión en un tiempo bastante corto, soportan altas temperaturas, esto se logró a partir del estudio de materiales por nanotecnología, donde enlazaron fibras de nanotubos de carbono formando nano-polímeros, en la figura 2 se muestra la estructura de los nanotubos. La tasa de elongación que manejan es del 220% por segundo y la temperatura a la que operan es entre 80-1900 grados Kelvin, en el interior de las fibras contiene un electrolito el cual es el que controla el movimiento a través de voltaje, al transferir iones del electrolito a la fibra, incrementa su volumen y provoca la torsión, haciendo así que la longitud de la fibra se contraiga. [2]

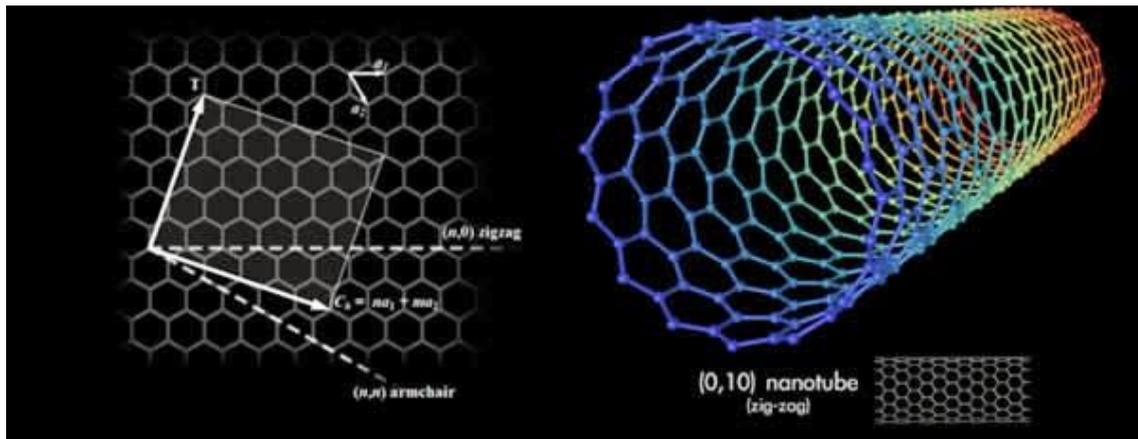


Figura 2 Diseño Nanotubos de carbono. Tomada de [2]

Uno de los músculos artificiales que más se ha trabajado han sido los músculos McKibben desarrollado en los años 1950, estos musculos de aire se contraen cuando son activados, se componen de un tubo en latex forrado por una malla flexible, en un extremo es sellado y el otro tiene una manguera para introducir aire.

Este prototipo ha sido implementado para gran cantidad de trabajos de investigación y prototipos. Uno de ellos es el desarrollado por la marca FESTO que diseño pequeños tubos de hule que se conectan y son capaces de realizar movimientos con gran rapidez y fuerza, manejan dos tipos de actuadores , uno (DMSP) de tamaño variable entre 5 a 40 mm con fuerzas de 140 a 6000 N y el otro (MAS) variable de 10 a 40 mm con fuerzas de 480 a 6000 N , la diferencia entre ellso es que el DMSP tiene conexiones prensadas esto permite procesos más optimos, además de menos peso y mas compacto. [3]

En cuanto al avance de las prótesis de miembro superior (Brazo) ha estado ligado al desarrollo tecnológico, nuevos materiales y entendimiento de la biomecánica del cuerpo humano.

La primera prótesis de miembro superior de la que se tiene conocimiento data del año 2000 a.C, la prótesis estaba sujeta al antebrazo de una momia egipcia a través de un cartucho que fue adaptado al cuerpo.

En la era de los metales, el hombre comienza a construir elementos con materiales como hierro para que pudieran soportar cargas pesadas, el General Romano Marcus Sergius fabrico una mano de hierro para el con la que portaba la espada, durante la segunda guerra Púnica que se registra fue en los años 218 a 202 a.C.

Ya en el año 1400 aproximadamente se creó la mano y antebrazo de *alt-Ruppin* el cual se muestra en la figura 3, esta posee los 5 dedos que podían ser flexionados y tenían un mecanismo para hacer la muñeca movable, también fabricada en hierro. [4]



Figura 3 Mano y antebrazo de alt-Ruppin [4]

En el siglo XVI el médico militar francés Ambroise Paré, desarrolla el primer brazo artificial móvil a nivel del codo, llamado Le petit Lorain, constaba de una palanca que permitía al brazo realizar la flexión o extensión a nivel del codo.

En el siglo XIX se comienza a emplear el cuero, los polímeros naturales, la madera y los resortes en la fabricación de prótesis, entre los diseños relevantes de la época se encuentra la del alemán Peter Beil mostrada en la figura 4, quien diseñó inicialmente una mano que cierra y abre los dedos, pero que es controlada por los movimientos que genera el hombro y el tronco dando origen a las prótesis autopropulsadas. Otro diseño es realizado por el Conde Beafort quien desarrolla un brazo con flexión del codo al presionar una palanca contra el tórax. [5]

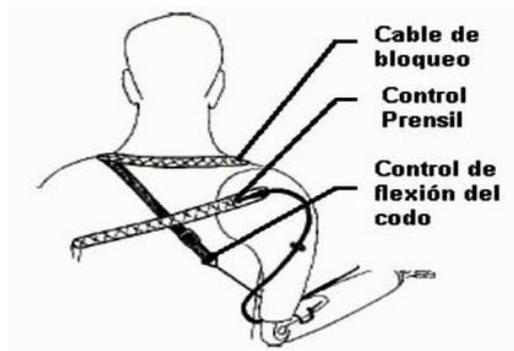


Figura 4 Protesis Peter Beil [5]

En el siglo XX, el médico francés Gripoulleau, realiza diferentes accesorios como anillos, varillas, ganchos y distintos elementos metálicos que brindaban la capacidad de realizar trabajos de fuerza y precisión.

Las prótesis activadas por actuadores, y más explícitamente por músculos, comienzan a surgir en Alemania gracias a Sauerbruch quien logra conectar los músculos flexores con el mecanismo artificial a través de varillas de marfil que pasaba a través de túneles cutáneos, haciendo que la prótesis se mueva en relación a las señales musculares.

Ya en el año 1946 es cuando se comienza a trabajar con sistemas de propulsión asistida, dando origen a las prótesis neumáticas y eléctricas. Y en el año 1960 se da origen a prótesis con mando mio-eléctrico.

En el estudio de estados del arte, se desarrolla el análisis anatómico del hombro, los músculos que intervienen en su movimiento, las rotaciones y los grados de libertad que posee.

#### *ULTIMOS AVANCES*

Para el análisis del modelo dinámico, la Universidad de Texas con colaboración de IBM realizaron un robot en paralelo que describe los tres grados de libertad del hombro simulando una cinemática paralela, tal como se da a conocer en la figura 5, que tiene señalados los grados de movimiento. Se describe como un mecanismo que realiza el movimiento relacionando dos cuerpos a través de una combinación de actuadores accionados de forma alterna. [6]

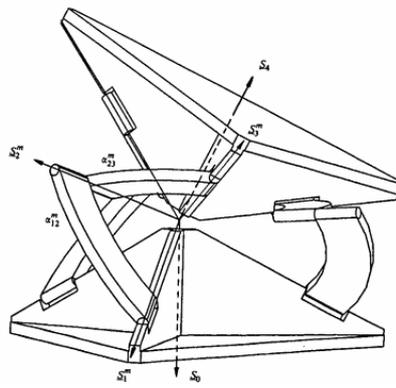


Figura 5 Robot paralelo para simular articulación del hombro

En la Universidad de Aeronáutica y Astronáutica en China se realizó un trabajo en el que se manejan 3 grados de libertad del hombro bajo el mecanismo de 3 RRR explicado a manera general anteriormente, pero el movimiento es accionado con músculos neumáticos y el objetivo del mismo es optimizar el algoritmo de control de movimiento mediante algoritmos adaptativos, genéticos, y por enjambre de partículas. [7]

En la Universidad Técnica de Berlín en compañía con Festo desarrollaron el robot ZAR5 uno de los prototipos se muestra en la figura 6, es el diseño de un torso humano, con brazos, manos y dedos (Figura 7) que desarrollan bastante similitud con el humano, es de 190 cm de alto y pesa 45 kg, la empresa Festo proporcionó los músculos neumáticos para el movimiento del mismo. Para la rotación del hombro, hicieron una réplica del grupo de músculos que cubren la articulación, mantienen el hombro en posición y permiten el movimiento del brazo, ellos dividieron un conjunto de articulaciones con distintos grados de libertad las cuales se extienden por un plano 2D para asegurar un control más sencillo debido a que esta es una de las articulaciones más complicadas en cuanto a movimiento de diseñar. [8]



Figura 6 Robot ZAR

En el instituto Tecnológico de Culiacán se diseñó un prototipo de brazo robótico con dos poleas para simular la articulación Hombro- Codo, mostrado a continuación en la figura 7, se conectan músculos neumáticos a las poleas mediante un cable tensor y se establecen los ángulos de rotación de las articulaciones, para el control del movimiento implementan Sensores de Efecto Hall [6].



Figura 7 Brazo Robótico accionado por poleas

## 2. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DEL BRAZO HUMANO

El sistema de locomoción del cuerpo humano se compone de huesos, músculos, articulaciones y tendones, que, en conjunto, funcionan como soporte y protección de los demás órganos del cuerpo lo cual permite al ser humano interactuar con el medio que lo rodea. A grandes rasgos los huesos son los encargados de mantener la estructura y proteger los demás órganos del cuerpo, es un tejido resistente, que permite el movimiento, sostén y equilibrio [9], los músculos son tejidos contractiles que generan desplazamientos al contraerse y/o extenderse, están unidos a los huesos a través de los tendones.

Cada una de las partes del cuerpo esta compuesta por mecanismos que proporcionan la capacidad de movimiento, tal como las piernas, pies, brazos , manos , cadera , cabeza y hombros.

### 2.1. DEFINICIÓN

El brazo es un organo bastante util para actividades diarias que tienen que ver con fuerza física y ademas intervienen en las funciones del equilibrio. Los musculos de los brazos son de los mas potentes del cuerpo humano. Se definen como la extremidad que va desde la mano hasta el homoplato por el húmero [10].

Los huesos que componen el brazo son el humero, el cual articula con la escapula (hombro) , el cubito y el radio (Antebrazo) que se pueden identificar en la figura 8.

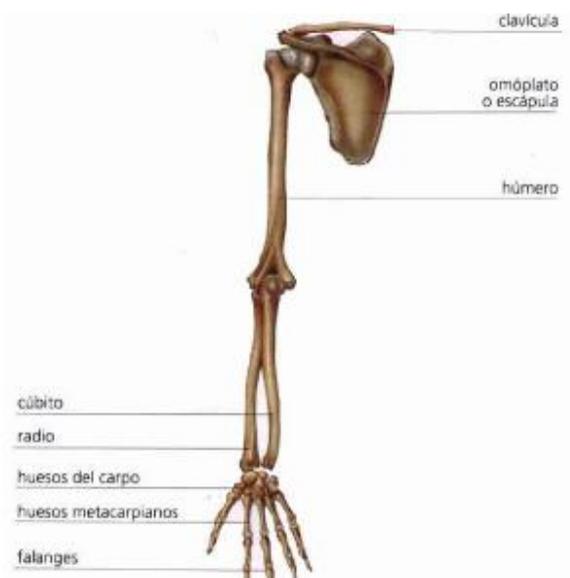


Figura 8 Huesos del Brazo [9]

Las articulaciones que componen al brazo son distribuidas en el hombro y en el codo, los puntos donde se genera movimiento, en el hombro estan: la acromioclavicular entre el acromion y la

clavicula reforzada por ligamentos, esternoclavicular, escapulohumeral y escapulotorácica. En el codo estan: la articulacion radiocubital distal y otras dos procedentes del húmero, el radio y el cúbito.

## 2.2. MEDIDAS ANTROPOMÓRFICAS

Las medidas antropomorfas generales que maneja un brazo humano se definen a partir de su longitud total con los dedos de la mano extendidos llega hasta la mitad del muslo. La articulación del codo se queda en la tercera cabeza, (contando desde arriba) junto al ombligo y la muñeca queda justo donde termina el hueso de la cadera y empiezan los genitales, tal como se ve en la figura 9, las medidas están dadas en metros. [11]

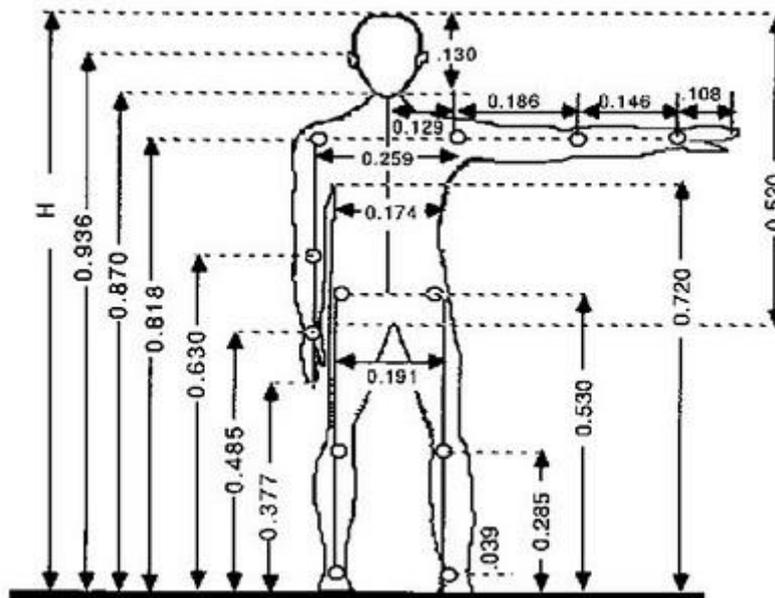


Figura 9 Antropometría del Cuerpo en Metros[9]

Las variables antropométricas que se tienen en cuenta para el análisis estructural del brazo son: [12]

Alcance hacia adelante movimiento mostrado en la figura 10 (hasta el puño , con el sujeto de pie, erguido y contra una pared)

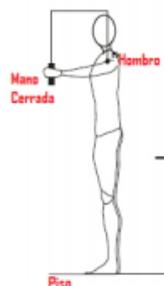


Figura 10 Alcance funcional del brazo máximo

Longitud del antebrazo medida como se muestra en la figura 11 ( de la parte posterior del codo doblado al eje del puño)

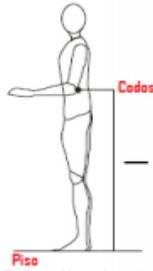


Figura 11 Altura Codos- antebrazo

### 2.3. MOVIMIENTOS DEL HOMBRO Y BRAZO

Los movimientos básicos que puede realizar un brazo humano son: Abducción, Aducción, Flexión, Extensión y rotación. [13]

Para explicar los tipos de movimientos es necesario definir los planos en los que cada uno se ejecuta ya que como se tiene conocimiento el ser humano puede moverse en tres dimensiones, pero generalmente cada uno de los movimientos que tiene el brazo se ejecuta en dos dimensiones, además de los elementos que intervienen en él y generan el movimiento como los son los huesos, músculos y articulaciones.

Los planos anatómicos son referencias espaciales que toman como ejes de referencia el plano cartesiano a través de los cuales permiten describir la posición de los diferentes órganos y sistemas.

Se consideran tres ejes en el espacio:

El eje vertical va de arriba abajo (Cabeza a pies), el transversal va de un lado al otro (Brazo a brazo) y el anteroposterior va de adelante atrás (Cola- Pelvis).

El plano transversal es perpendicular al eje vertical, y divide al cuerpo en una parte inferior (podálica o caudal) y en otra parte superior (craneal ocefálica).

El plano sagital se llama así por la sutura sagital del cráneo con la que son paralelos. Está formado por los ejes anteroposterior y vertical. Este plano divide al cuerpo en dos mitades simétricas, derecha e izquierda (es el único plano que lo hace), en la figura se puede ver más explícitamente. [14]

El plano coronal o frontal está formado por los ejes transversal y vertical y divide al cuerpo en una parte anterior y posterior.

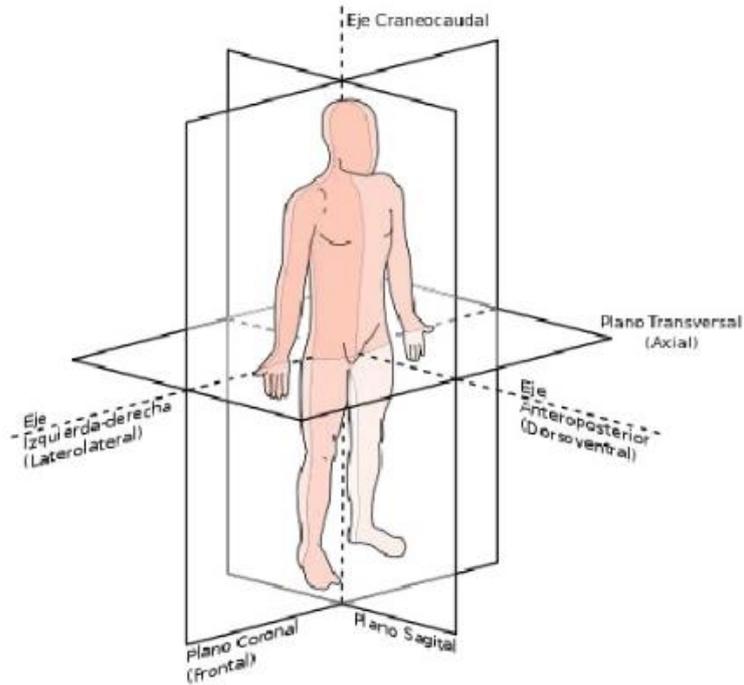


Figura 12 Plano cartesiano para análisis del cuerpo

### 2.3.1. ANATOMIA DEL BRAZO



Figura 13 Anatomía del Brazo[12]

El brazo se compone de tres huesos principales, Húmero, cúbito, radio, los músculos que lo componen son bíceps, tríceps, vasto externo, branquiorradial, flexores de la mano, extensores de la mano, romboide y deltoides, articulaciones del hombro y del codo que son más claros en la figura 13.

### 2.3.2. ANATOMIA DEL CODO



Figura 14 Anatomía del Codo[12]

La articulación del codo colabora con el hombro en la aplicación de fuerza y control de movimiento facilitando la versatilidad como se muestra en la figura 14. [15]

Lo componen tres articulaciones:

Articulación humero-cubital.

- Articulación humero-radial.
- Articulación radio-cubital proximal.

La articulación Humero-radial se encarga de la Flexión y extensión del codo, además soporta y absorbe la compresión durante lanzamientos y movimientos rápidos del brazo, mientras que el ligamento lateral interno absorbe la tracción.

La situación de máxima congruencia de las diferentes articulaciones no se consigue en la misma del codo:

- Articulación humero-radial: 80° de flexión y semipronación.
- Articulación humero-cubital: extensión total.
- Articulación radio cubital proximal: semipronación.

#### 2.3.2.1. Flexión del Codo

Los músculos que intervienen en el movimiento de flexión de Codo poseen componentes asociados de movimiento:

- Bíceps braquial: flexión + componente de supinación.

- Braquial anterior: flexión + componente de pronación.
- Supinador largo: flexión + supinación (en pronación máxima) y flexión + pronación (en supinación máxima). En posición neutra es flexor puro.

### 2.3.2.2. Extensión del Codo

Participan las articulaciones humero-radial y humero-cubital. Los músculos que participan en el movimiento son: el tríceps braquial que es el músculo más potente y resistente del antebrazo. Con 20-30 de flexión tenemos su posición de máxima ventaja mecánica. Con flexión máxima de codo y hombro el tríceps braquial tiene la mejor posición para actuar de acuerdo con la Ley de Starling., la cual hace referencia a que si el músculo es grande aumenta la fuerza de contracción del mismo.

### 2.3.3. ANATOMIA DEL HOMBRO

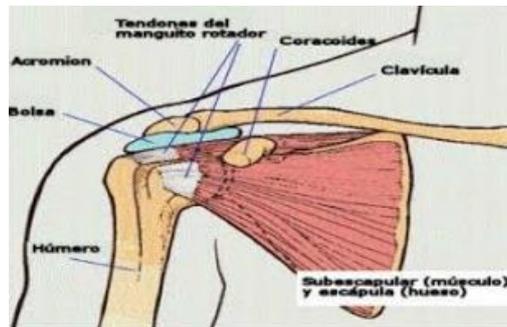


Figura 15 Anatomía del hombro

Entre los elementos que intervienen en el movimiento del hombro encontramos la clavícula, la espátula y el húmero y los músculos que participan en el movimiento son: Redondo Mayor, Manguito rotador, Deltoides, músculo dorsal, Músculo pectoral, músculo infraespinoso los cuales están señalados en la figura 16.

#### 2.3.3.1. Movimientos del Hombro

**Flexión:** Se realiza en tres tiempos, el primero alcanza los 60°, y está dado por el deltoides, el coracobraquial y el pectoral, el segundo alcanza los 120° e interviene el trapecio y el tercero llega a los 180° con la colaboración del raquis. Este movimiento tiene lugar alrededor del eje transversal y describe el movimiento cuando se eleva el brazo hacia adelante. En el hombro, se mide con el valor del ángulo que se crea entre el brazo y el eje longitudinal en el plano de Flexión-Extensión.

**Extensión:** Alcanza los 50° Grados en un solo tiempo, los músculos que intervienen en este movimiento son el redondo, el deltoides y el dorsal ancho. Este movimiento se opone a la flexión, también tiene lugar en el eje transversal, si el brazo está en flexión, es el movimiento que lo retorna al cuerpo de nuevo.

**Abducción:** Al igual que en la flexión se realiza el giro de 180° en tres tiempos, primero a 60° donde intervienen el deltoide y supraespinoso, el segundo a 120° interviene el trapecio y el tercero el raquis. Tanto la Abducción como la Aducción, tienen lugar alrededor del eje antero-posterior y sucede cuando el brazo se aleja del cuerpo.

**Aducción:** Alcanza los 30°, intervienen los músculos: dorsal ancho, redondo mayor, subescapular y pectoral. Tiene lugar cuando el brazo se acerca al cuerpo. En el hombro se miden con el ángulo que se forma entre el brazo y el eje longitudinal

**Rotación:** El hombro rota exteriormente 80° grados intervienen infraespinoso y redondo mayor e interiormente 30° intervienen dorsal, redondo, subescapular y pectoral. Tiene lugar en el eje longitudinal del miembro, es la rotación del miembro sobre su propio eje. [16]

## 2.3.4. MÚSCULOS QUE INTERVIENEN EN LOS MOVIMIENTOS PRINCIPALES

### 2.3.4.1. FLEXIÓN DEL BRAZO

Intervienen: Biceps contraído, Triceps relajado como en la figura 17.

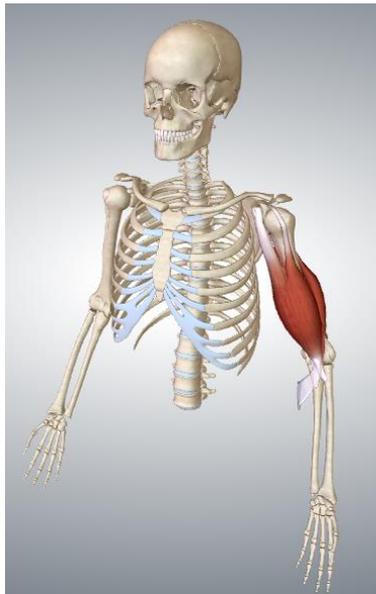


Figura 16 Músculos que intervienen en la Flexión y extensión del brazo

### 2.3.4.2. EXTENSIÓN DEL BRAZO

Intervienen: Biceps relajado, Triceps contraído, músculos que se muestran en la figura 17.

### 2.3.4.3. ABDUCCIÓN Y ADUCCIÓN DEL BRAZO

Intervienen: Deltoides, trapecio, supraespinoso, músculos mostrados en la figura 18.

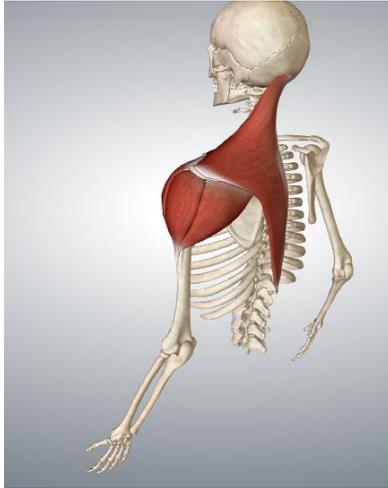


Figura 17 Músculos que intervienen en la abducción del brazo.

#### 2.3.4.4. *FLEXIÓN DEL HOMBRO*

Intervienen: Deltoide anterior, Pectoral Mayor, bíceps y músculo coracobraquial, músculos mostrados en la figura 19.

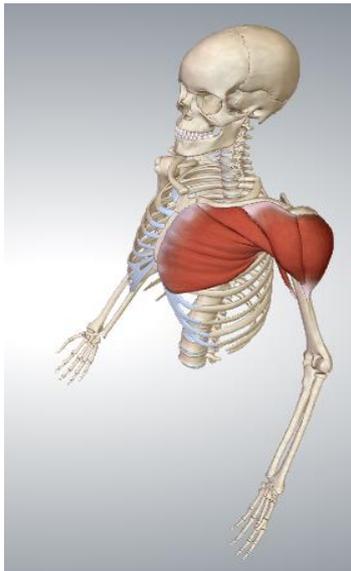


Figura 18 Músculos que actúan en la flexión del hombro

#### 2.3.4.5. *EXTENSION DEL HOMBRO*

Intervienen: Deltoide Posterior, tríceps, latissimus dorsi, teres mayor, músculos mostrados en la figura 20.

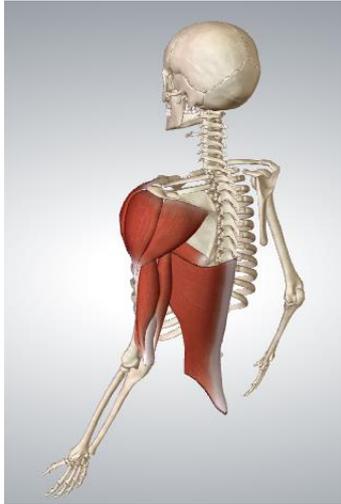


Figura 19 Músculos que intervienen en la extensión del hombro.

#### 2.3.4.6. *ABDUCCIÓN DEL HOMBRO*

Intervienen: Deltoide, bíceps, supraespinoso, músculos mostrados en la figura 21.

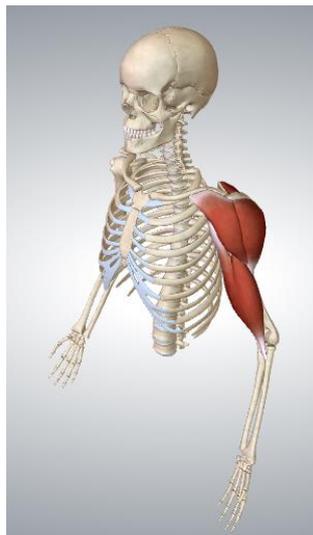


Figura 20 Músculos que intervienen en el movimiento de aducción

### 3. DISEÑO, CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÚSCULO NEUMÁTICO

#### 3.1. TIPOS DE ACTUADORES

Un actuador se define como un dispositivo mecánico capaz de generar una fuerza para lograr un desplazamiento, la fuerza que provoca el actuador. Entre los convencionales se puede encontrar de tipo neumático, hidráulico y motriz- eléctrica.

El actuador más común es el actuador humano, pero se vio la necesidad de automatizar los procesos por tanto se hizo conveniente la creación de estos dispositivos.

Pueden ser de dos tipos: Lineales (Fuerza línea recta) o Rotatorios (Motor).

Entre los actuadores no convencionales se implementan efectos piezoeléctricos, que se muestran en la figura 22, los cuales tienen la característica de producir cambios de posición muy finos, los pequeños cambios en el voltaje de operación se convierten en movimientos suaves, además puede generar una fuerza de miles de Newtons, ofrecen un tiempo de respuesta más rápido y sin desgastes, se implementan en microelectrónica, en medicina y tecnologías de medición. [17]



Figura 21 Actuador Piezo-Eléctrico

Las aleaciones con memoria de forma se caracterizan por asumir diversas formas a diferentes temperaturas, que recuperan su forma original al ser enfriadas, entre los más usados está el Nitinol, el cual en ocasiones sustituye motores debido a su menor masa. En la figura 23 se aprecia el comportamiento de la aleación en proceso de expansión [17]

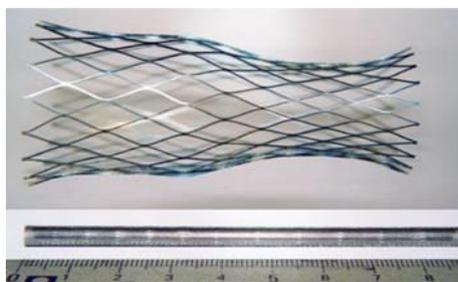


Figura 22 Aleación de forma

El polímero gel contráctil, es compuesto por un material capaz de sufrir una deformación razonable mediante la aplicación de un estímulo externo, que puede ser térmico, químico o eléctrico y que tiene la particularidad de presentar grandes cambios de volumen. [7]

El músculo neumático tiene su origen gracias al físico Joseph McKibben, busca emular el musculo biológico inyectando aire comprimido al musculo neumático originando una contracción y al ejercer una fuerza, en la figura 24 se da a conocer el músculo con presión y sin ella y si diferencia de posición lineal, está compuesto de un tubo de caucho cubierto por una capa de fibras trenzadas de forma helicoidal, cerrado a los extremos, sus características son el comportamiento dinámico, la ligereza, el costo reducido, gran fuerza inicial y versatilidad.



Figura 23 Músculo Neumático FESTO [3]

## 3.2. MÚSCULO NEUMÁTICO

El músculo neumático se define como un actuador de tracción que tiene la función de simular el comportamiento de un músculo humano, su característica principal es generar una fuerza de tracción inicial grande, la cual disminuye en el transcurso del movimiento de contracción. El músculo neumático está compuesto por un tubo interno de caucho, el cual contiene aire a presión, recubierto por una malla trenzada, uno de los extremos del músculo está cerrado mientras que el otro sitúa una válvula con la que se introduce presión contrayendo o retornando el músculo a su tamaño original. Haciendo un adecuado proceso de control se puede manejar la posición nominal suavemente. [18]

### 3.2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Al introducir aire a presión a través del tubo de caucho este se infle, expandiéndose en sentido transversal, lo cual hace que la malla genere una tensión en sentido tangencial al tubo y ortogonal al eje de rotación, lo cual se traduce en un desplazamiento y fuerza axial.

La longitud nominal del musculo se define estando sin presión ni carga, esta corresponde al largo del tubo de caucho.

El músculo se expande al ser sometido a una fuerza de tracción. Cuando se aplica presión se produce contracción disminuyendo su longitud. [18]

### 3.2.2. VENTAJAS

- Gran fuerza
- Ausencia de tirones en el movimiento
- Regulación de posición a través de la presión
- Buena relación peso-Rendimiento
- Robusto (Soporta condiciones extremas)

- Liviano y sin fugas

### 3.2.3. APLICACIONES

Los músculos neumáticos tienen gran campo de acción en robótica, bio-robótica, biomecánica como un reemplazo de miembros, además en la industria

- Mesas de montaje
- Levantamiento de peso
- Movimientos oscilatorios
- Duplicación de pesos
- Sistemas de posicionamiento
- Tensores

### 3.2.4. FABRICACION DE MÚSCULO NEUMÁTICO CASERO

En el mercado actual existen gran cantidad de músculos neumáticos, pero son bastante costosos y en ocasiones por sus características no se ajustan a una aplicación específica. Por este motivo se construyó un prototipo de músculo neumático con propiedades únicas, el cual más adelante se caracteriza de una manera manual ya que para este caso no se necesita un estudio a profundidad. Los músculos que se realizaron varían en tamaño dependiendo de la longitud del musculo a simular. A continuación, se describe el procedimiento y los dos prototipos que se plantearon para la construcción de músculo.

Para el primer prototipo de prueba se buscó la posibilidad de simular el mecanismo de contracción, se usaron como materiales un preservativo que tiene una elasticidad apropiada para la aplicación que se busca, y una malla de fruta tal como se aprecia en la figura 25.

Respecto a este sistema, la presión que requiere el mecanismo para contraerse es mínima, por tanto, la fuerza que ejerce también, además la malla no funcionaba correctamente para hacer el movimiento de contracción, así que se descarto.

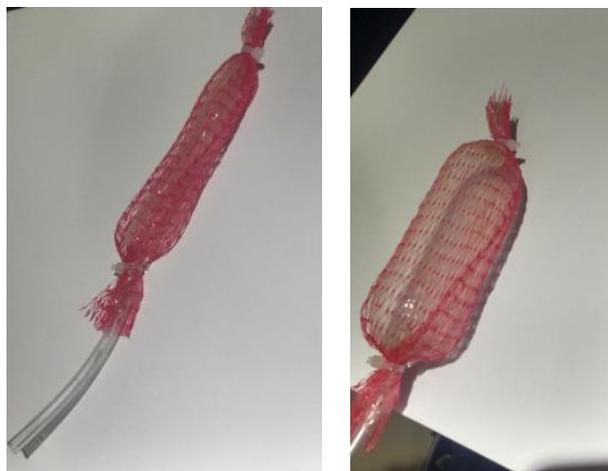


Figura 24 Primer Prototipo músculo Neumático casero en estado normal y con presión

Para la construcción del prototipo 2 se tuvo en cuenta los materiales más técnicos y resistentes que cumplieran con las características de elasticidad, fuerza y desplazamiento adecuadas para que se lograra la contracción a partir de una presión establecida.

Los materiales que se implementaron son:

- Manguera de Látex que se usa como conducto de gas en laboratorios.
- Malla trenzada para recubrir cables
- Amarraderas.
- Manguera de Presión FESTO ¼ “

El proceso para construir el músculo neumático consiste en cortar la manguera y la malla con la longitud deseada, luego introducir la manguera por la malla, seguidamente aplicar calor en los extremos de la malla para que no se desarme y finalmente cerrar los extremos con las amarraderas teniendo en cuenta que uno de ellos va cerrado por completo y el otro tiene la manguera de presión introducida, para ser la entrada del sistema. El prototipo del músculo neumático final se aprecia en la figura 26



Figura 25 Prototipo músculo neumático final en prueba de presión

### 3.2.5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES IMPLEMENTADOS EN LA ELABORACIÓN DEL MÚSCULO

El látex es un material natural que se obtiene de la savia extraída del árbol de caucho, a través de un proceso de manufactura se consigue este material. Su densidad es de  $75 - 80 \text{ kg/m}^3$

Entre sus características principales se tienen:

- Gran elasticidad y adaptabilidad
- Permite una buena transpiración
- Durabilidad de 17 a 20 años
- Es biodegradable

Entre las características mecánicas del látex cabe destacar [19]:

- Módulo elástico  $0.0015-0.0025 \text{ Gpa}$  lo cual indica una alta resistencia a la deformación.
- Coeficiente de Poisson  $0.499-0.5$
- Resistencia mecánica a la tracción y compresión  $22- 33 \text{ MPa}$
- Comportamiento a tracción es de  $500 \text{ a } 760 \%$

En cuanto a la malla que rodea la manguera de látex es una malla de nylon trenzada, el diámetro es de  $3\text{mm}$  y se puede expandir hasta 4 veces su tamaño original.

### 3.2.6. PRUEBA DEL MÚSCULO NEUMÁTICO.

Para realizar la identificación del funcionamiento del músculo neumático se implementó un montaje sencillo, en el cual estaba amarrado el musculo, junto con un resorte previamente caracterizado, se le aplica presión a través de un compresor y se mide cuanto se deforma respecto a la presión aplicada, también se realiza la prueba sin carga variando las presiones, con lo cual se indica la distancia que varía, y haciendo un proceso matemático se identifica la fuerza del actuador.

#### 3.2.6.1. CARACTERIZACION DE RESORTE

Para determinar la fuerza que actúa en el musculo neumático de acuerdo al montaje que se realizara, se procede a caracterizar el resorte implementado para determinar su constante de elasticidad según los parámetros de la Ley de Hooke.

Para ello disponemos de un resorte metálico, un conjunto de discos con masas determinadas, y un soporte, de 10 g, en el que se colocan las masas, en la figura 27 se muestra el montaje implementado. El resorte se coloca en posición vertical y se fija por su parte superior colgando una masa en su extremo inferior. Por acción del peso de la masa el resorte se estira hasta que alcanza la posición de equilibrio en la que se iguala el peso y la fuerza recuperadora elástica. Siempre que no se supere el límite de elasticidad del resorte los alargamientos producidos en el resorte son proporcionales a las fuerzas aplicadas.



Figura 26 Montaje Caracterización del resorte

La longitud inicial del resorte es de 8,3 cm, se calcula las longitudes del resorte estirado con los distintos pesos.

Se halla K teniendo en cuenta los datos de la tabla 1:

*Ecuación 1 Fuerza del resorte*

$$F = -k * \Delta x$$

Tabla 1 Datos obtenidos para constante K

MEDIDA (m)	MASA (kg)	PESO (N)	DX (L-LO)	K(F/DX)
0,083	0	0	0	0
0,084	0,1	0,98	0,001	980
0,086	0,3	2,94	0,003	980
0,087	0,5	4,9	0,004	1225
0,087	0,7	6,86	0,004	1715
0,087	1	9,8	0,004	2450
0,087	1,3	12,74	0,004	3185
0,088	1,5	14,7	0,005	2940
0,092	1,8	17,64	0,009	1960
0,097	2,1	20,58	0,014	1470
0,101	2,4	23,52	0,018	1306,666667
0,106	2,7	26,46	0,023	1150,434783
0,111	3	29,4	0,028	1050
0,116	3,3	32,34	0,033	980
0,122	3,6	35,28	0,039	904,6153846
0,128	3,9	38,22	0,045	849,3333333
0,132	4,2	41,16	0,049	840
0,137	4,5	44,1	0,054	816,6666667

K	1458,983343
---	-------------

$$K=1,45 \text{ KN/m}$$

### 3.2.6.2. CARACTERIZACIÓN ACTUADOR SIN CARGA

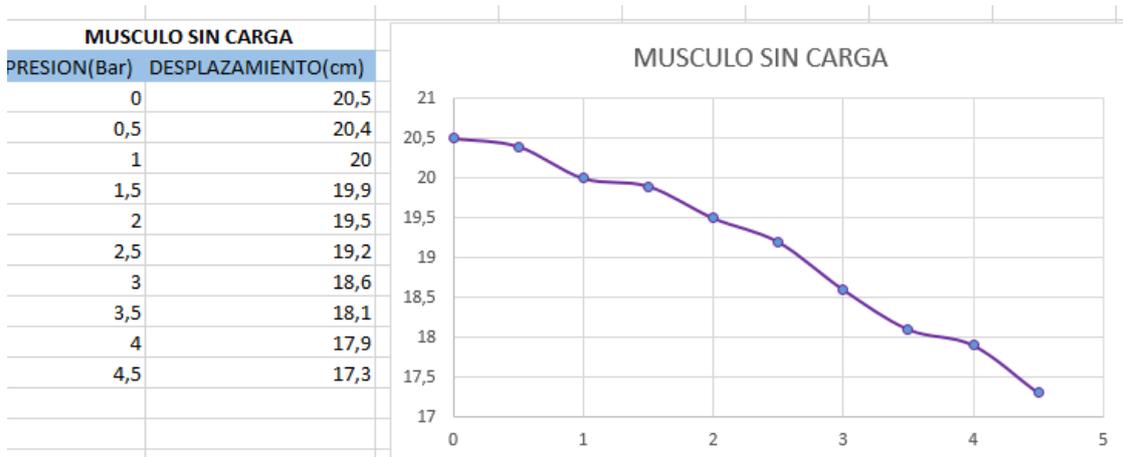
Para realizar este procedimiento, cabe destacar que se tomó como referencia un musculo con las siguientes dimensiones:

Longitud: 20.5 cm

Diámetro de la manguera: 1cm

Se realiza una variación de presión de 0 Bar a 4.5 Bar, debido a que es la máxima presión que ofrece el compresor de aire del laboratorio de Control y Automatización de la Universidad Militar Nueva Granada, lugar donde se desarrolló la prueba. En la figura 28 se muestra el músculo con carga y sin carga en montaje real.

Tabla 2 Caracterización músculo sin carga



Con los datos obtenidos en la tabla 2 se interpola para determinar la ecuación que define el comportamiento del músculo:

Ecuación 2 Comportamiento del músculo sin carga

$$y = -0,7273x + 20,776$$

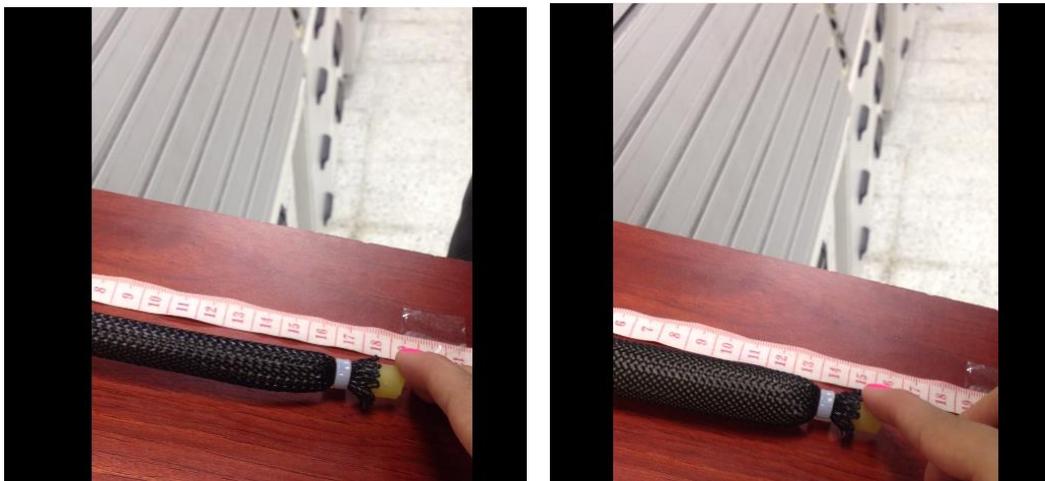


Figura 27 a) Músculo sin carga ni presión b) Músculo sin carga con presión

### 3.2.6.3. CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR CON CARGA

Como ya se definió antes, la carga que se va a implementar es la del resorte, hallando la constante K y teniendo la deformación del mismo, podemos hallar la fuerza aplicada que se le está ejerciendo, que a su vez será la misma del músculo por la Ley de Acción y Reacción, seguidamente, se le aplicará la variación de presión del caso anterior de 0 a 4,5 Bar para obtener la gráfica de Presión vs Desplazamiento.

La constante K que calculamos es de 1,45 KN/m de acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 3.

Tabla 3 Caracterización músculo con carga

CARACTERIZACIÓN MÚSCULO CON CARGA			FUERZA EJERCIDA POR EL MÚSCULO		
PRESION (Bar)	DESPLAZAMIENTO(cm)		En m	Fuerza	
0	20,5	Deformación			
0,5	20,4	-0,1	-0,001	-1,4	
1	20,3	-0,2	-0,002	-2,8	
1,5	20,1	-0,4	-0,004	-5,6	
2	19,8	-0,7	-0,007	-9,8	
2,5	19,3	-1,2	-0,012	-16,8	
3	18,7	-1,8	-0,018	-25,2	
3,5	18,3	-2,2	-0,022	-30,8	
4	17,7	-2,8	-0,028	-39,2	
4,5	17,4	-3,1	-0,031	-43,4	

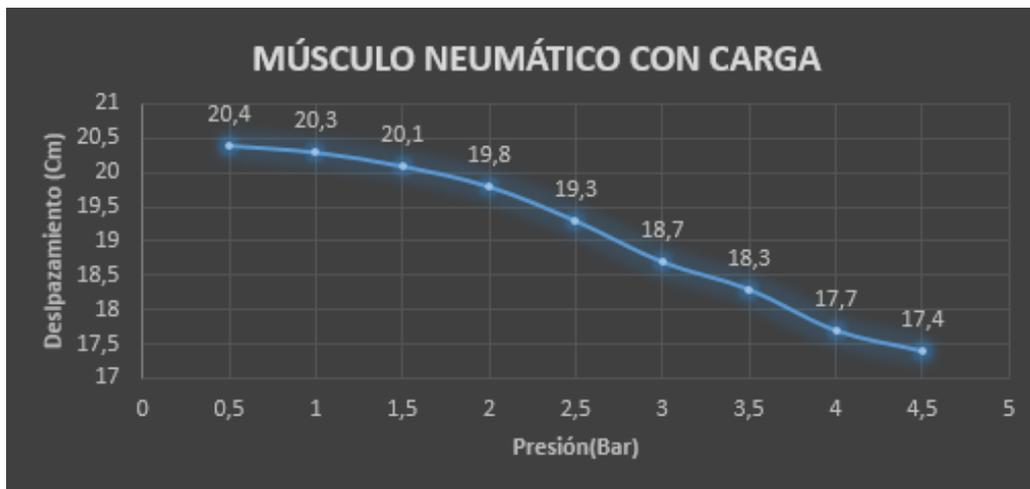


Figura 28 Gráfica de comportamiento de datos adquiridos (Tabla 3)

La ecuación que describe el comportamiento de la gráfica que se observa en la figura 28 es:

Ecuación 3 Comportamiento músculo con carga

$$y = 0,064x^3 - 0,5807x^2 + 0,6984x + 20,163$$

Al realizar la caracterización del músculo neumático con una carga determinada, el resorte, se puede determinar que el desplazamiento evidentemente se reduce, la fuerza aplicada depende del desplazamiento del músculo al introducir presión, en la figura 30 se observa el comportamiento del músculo con carga.

Con los datos obtenidos de presión y desplazamiento, hallamos la fuerza que realiza el músculo como se ve en la Tabla 4.

Tabla 4 Fuerza vs Presión

Fuerza (N)	PRESION(Pa)
0	0
1,4	500000
2,8	1000000
5,6	1500000
9,8	2000000
16,8	2500000
25,2	3000000
30,8	3500000
39,2	4000000
43,4	4500000



Figura 29 Gráfica Fuerza vs Presión

La ecuación(4) que describe la gráfica de Fuerza vs Presión mostrada en la figura 29 es:

Ecuación 4 Fuerza vs Presión

$$y = 489265x^{0,5832}$$

Para hallar la fuerza que ejerce el músculo se despeja de la siguiente ecuación:

Ecuación 5 Fuerza del resorte

$$F = -K * \Delta X$$

Donde K es la constante de valor 1,45 KN/m y  $\Delta X$  el desplazamiento del músculo al variar.



Figura 29 a) Músculo con carga y presión b) Músculo con carga sin presión

En este caso se analiza y se identifica el músculo comportándose como un conjunto biológico donde se implementan músculos antagonicos para generar un movimiento. Para este desarrollo se caracteriza un potenciómetro que con una polea sostiene dos músculos, mientras uno se contrae el otro se estira de manera cómo se genera un movimiento real.

### 3.2.7. MODELADO ESTÁTICO DEL MÚSCULO NEUMÁTICO

Para el modelado estático del músculo hay que tener en cuenta que se desarrolla como un sistema no lineal debido a que cuando se infla, tiene un comportamiento similar al de un resorte, al variar la presión en el músculo, según la propuesta generada por Robert Pack y Kazuhiko Kawamura en su artículo “A Rubbertuator-Based Structure- Climbing Inspection robot” [20] aplican una fórmula para analizar la contracción estática del músculo artificial de McKibben, que en teoría es el mismo principio implementado para la construcción de estos, donde se tiene en cuenta la fuerza máxima y la contracción máxima para analizar los estados del músculo.

Ecuación 6 Relación Fuerza, área y presión

$$F = A * P$$

Partiendo de la ecuación (6) de relación de presión se tiene en cuenta para hallar la fuerza del sistema, el área superficial que, en este caso, un cilindro, el área sería un círculo, la presión a la que se somete, pero se le agrega una constante a la presión donde se incluye la contracción del músculo.

El modelo estático que proponen los autores es el siguiente:

Ecuación 7 Modelo estático derivado ecuación 6

$$F(\varepsilon, P) = (\pi r_0^2) * P[a(1 - \varepsilon)^2 - b]$$

Donde  $r_0$ , es el radio nominal inicial,  $a$  y  $b$  son constantes que dependen del Angulo de las fibras trenzadas de la malla,  $\varepsilon$  es la constante de contracción y  $\alpha$  el ángulo de las fibras.

$$a = \frac{3}{\tan^2(\alpha)} \quad b = \frac{1}{\sin^2(\alpha)}$$

$$\varepsilon = \frac{(l_0 - l)}{l_0}$$

Al evaluar la función sin contracción, la fuerza se hace máxima, quedando la función:

$$F_{max} = (\pi r o^2) P [a - b] \quad \varepsilon = 0$$

Cuando se evalúa la función en contracción máxima la fuerza aplicada es nula.

Ecuación 8 Ecuación Final Modelo estático del músculo

$$\varepsilon_{max} = 1 - \sqrt{\frac{a}{b}} \quad F = 0$$

### 3.2.8. MODELO DINÁMICO DEL MÚSCULO NEUMÁTICO

Para el análisis del comportamiento dinámico del músculo neumático se tuvo en cuenta las consideraciones que presentan Chou y Hannaford en su artículo citado [21] en donde desarrollan un prototipo de carácter no lineal, haciendo una analogía con un sistema masa-resorte-amortiguador tal como se muestra en la figura 31.

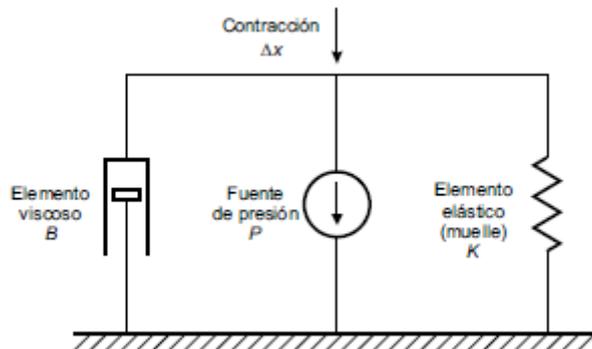


Figura 30 circuito análogo del comportamiento del músculo neumático

En el sistema se considera el elemento viscoso B como dependencia de la velocidad de contracción, el resorte K como la contracción, y la entrada del sistema es la fuerza generada por la presión a la que va alimentado el músculo.

Ecuación 9 Ecuación en diferencias de modelo del músculo no lineal

$$m(t)\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = d + u$$

En la ecuación (9) se muestra el modelo dinámico del sistema teniendo en cuenta que m es la masa que se desea mover con el músculo, b el coeficiente de viscosidad, K el coeficiente de contracción, u la entrada del sistema y d como las distintas perturbaciones al sistema.

Cada uno de los coeficientes, se toman como no lineales según consideraciones publicadas en el artículo de Repperger [22]. Para el análisis del mismo, se expresa la ecuación de la Place en variables de estado.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m(t)} [u - Kx_1 - Bx_2] \end{aligned}$$

Los coeficientes de la ecuación se son no lineales, se aproximan mediante una ecuación de segundo grado, quedando de la forma:

$$K = b_2x_1^2 + b_1x_1 + b_0$$

$$B = a_2x_2^2 + a_1x_2 + a_0$$

Donde los coeficientes varían dependiendo de la masa sobre la que actúa el músculo.

## 4. DISEÑO Y SIMULACIÓN MECÁNICA DEL BRAZO ANTROPOMÓRFICO

### 4.1. DISEÑO DEL MODELO EN MAYA AUTODESK

Maya es un Software bastante reconocido debido a su gran poder en el desarrollo de modelado 3D, renderizado, efectos especiales y demás. El software trabaja con un sistema de superficies donde incluye la posibilidad de convertir todo a varios tipos de geometrías, como polígonos y NUBS (Figuras con curvas), siendo los primeros los más básicos al manejar [23].

Mediante este software se permite crear casi cualquier elemento real o imaginario gracias a su flexibilidad en el diseño, partiendo de figuras geométricas básicas como cilindros, esferas y cubos se es capaz de generar superficies irregulares, complejas, con textura etc.

Para el diseño del brazo antropomórfico se tuvo en cuenta su construcción en este software para que sea lo más similar a un elemento real, desarrollando superficies que asemejen el tejido óseo humano se puede observar en la figura 32, esto con el fin de generar en el usuario un mejor impacto y acople al brazo, además se tuvo en cuenta las medidas antropomórficas del brazo de una persona de 1,60m.

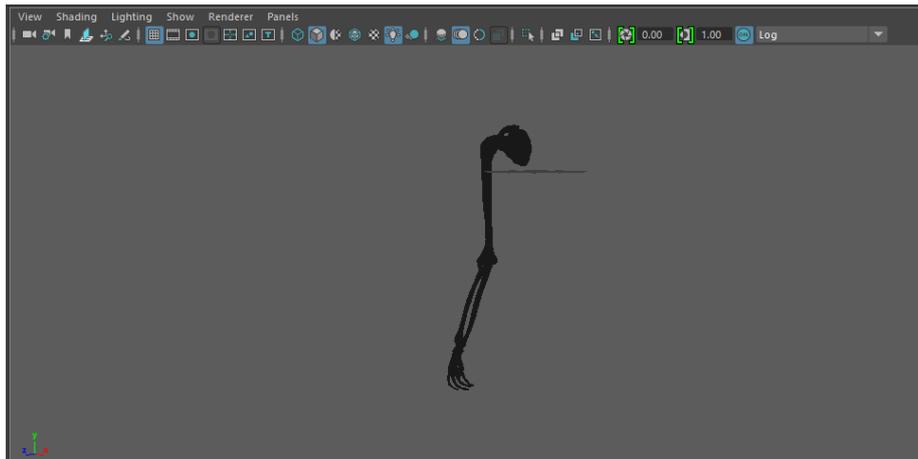


Figura 31 Diseño Brazo antropomórfico en MAYA AUTODESK

### 4.2. DISEÑO DEL BRAZO EN SOLIDWORKS

Para la realización del modelo CAD del brazo se tuvo en cuenta la estructura ósea del mismo, ya que esta va a ser el soporte de los músculos, tal como se maneja en el ambiente real.

Se exportó a SolidWorks para trabajar el brazo con Simmechanics y poder controlar los ángulos de rotación de cada una de las articulaciones desde Matlab, cabe destacar que el modelo que se realizó en Maya guarda las características de diseño al exportarlo a SolidWorks como se observa en la figura 33.

En el caso de exportar el diseño a Solidworks se tiene que activar el complemento Scanto3D, en el cual el programa reconoce el mallado con el que viene la figura y lo reconstruye al formato admitido por este software, este proceso puede ser bastante complejo para la máquina.

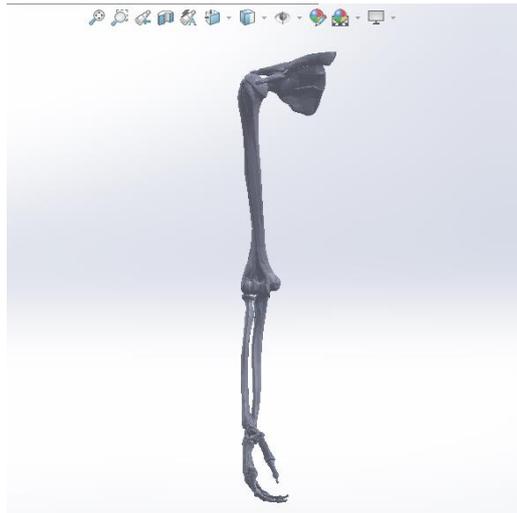


Figura 32 Brazo antropomórfico software SolidWorks

Para el desarrollo del movimiento en Solidworks se tuvo que partir las piezas del brazo en mano, antebrazo, brazo, y hombro, con el fin de generar el movimiento en las dos articulaciones que se está manejando. Seguidamente, se realizaron las relaciones de posición correspondientes para lograr los tres movimientos que se analizan en el brazo, la rotación del codo, y las dos rotaciones que existen en el hombro.

#### 4.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MUSCULAR POR OPENSIM

Opensim es un Software de código abierto que permite construir y analizar modelos del sistema músculo-esquelético del ser humano, además de las simulaciones dinámicas de los movimientos, cuenta con una interfaz gráfica de usuario donde se visualiza el trabajo que se esté realizando. Se implementa en gran cantidad de aplicaciones como la investigación biomecánica, diseño de dispositivos médicos, ortopedia, rehabilitación, análisis ergonómico, investigación robótica y educación principalmente. [24]

El software está escrito bajo el lenguaje de programación C++ y la interfaz gráfica es desarrollada en Java.

Tiene características bastante útiles para el desarrollo de lo mencionado anteriormente como:

Hacer películas de animación de movimiento, análisis de cinemática inversa para calcular ángulos, momentos y fuerzas, y análisis de simulaciones dinámicas.

Para el desarrollo de la simulación por OpenSim se parte de un modelo base en donde se muestran la estructura ósea de la parte superior de un cuerpo humano junto con la simulación de sus músculos respectivos y sus articulaciones, sobre el cual se van a analizar los grupos musculares que en el caso correspondiente son los que generan los movimientos mencionados al inicio del documento.

Los músculos que se van a simular a través del Software OpenSim y que a su vez serán construidos son:

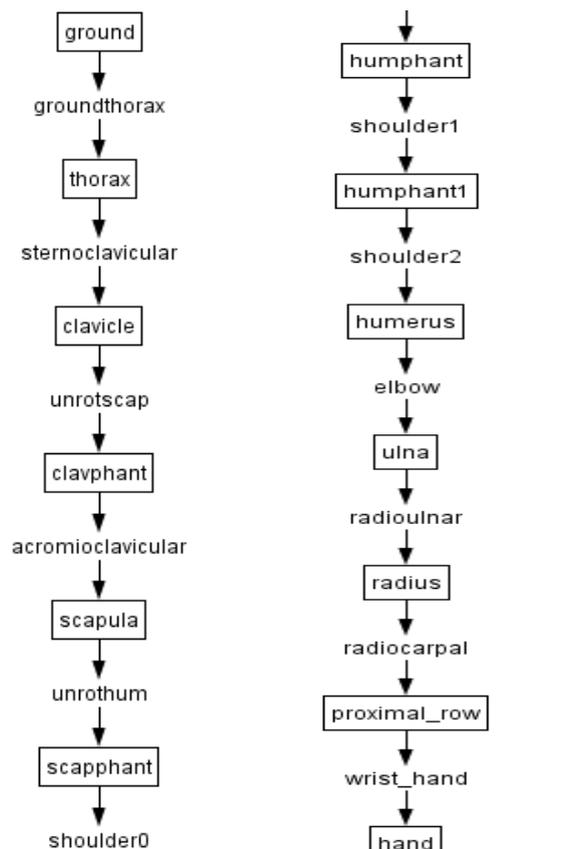
- Biceps
- Triceps
- Deltoides ( superior, posterior y frontal)
- Trapecio (menor y mayor )

- Supraespinoso
- Pectorales ( 3 músculos)
- Coracobranquial



Figura 33 a) Vista posterior estructura OpenSim b) Vista Frontal estructura OpenSim

Se genera un diagrama de flujo que da a conocer la organización de la estructura ósea a la que van fijados los músculos como se puede observar en la figura 34.



Se establece la región del torác como tierra debido a que los movimientos que se van a realizar están apoyados en esta estructura, y el brazo se mueve respecto al plano del torác.

Teniendo el punto de referencia como el toráx, se procede a definir los movimientos que va a realizar el hombro y el brazo, teniendo en cuenta los grados de libertad que un brazo humano es capaz de rotar y/o trasladarse.

Para el movimiento adelante-atrás (aducción) del hombro, se toman los grados de libertad de  $-90^{\circ}$  a  $130^{\circ}$ , la elevación del hombro (flexión) se maneja de  $0^{\circ}$  a  $180^{\circ}$  ( movimiento del hombro de arriba abajo) en orientación perpendicular al eje del toráx, la rotación del hombro se encuentra entre  $-90^{\circ}$  a  $20^{\circ}$ . Los cuales están definidos en la figura 35.

En el caso del brazo, para la flexión se maneja un rango de  $0^{\circ}$  a  $130^{\circ}$ .

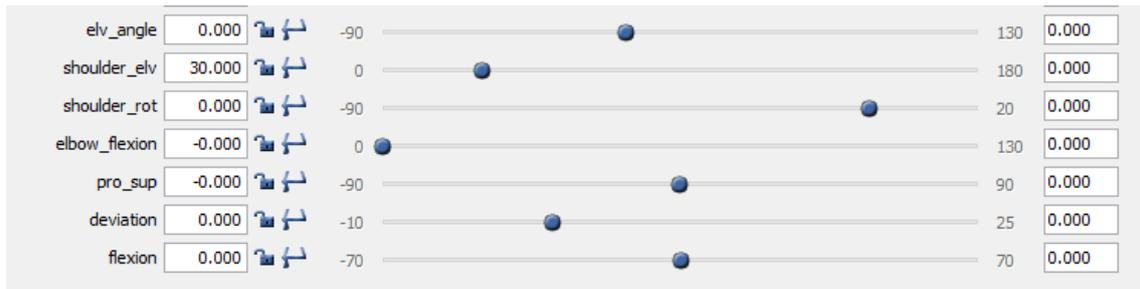


Figura 34 Control de grados de libertad de cada movimiento

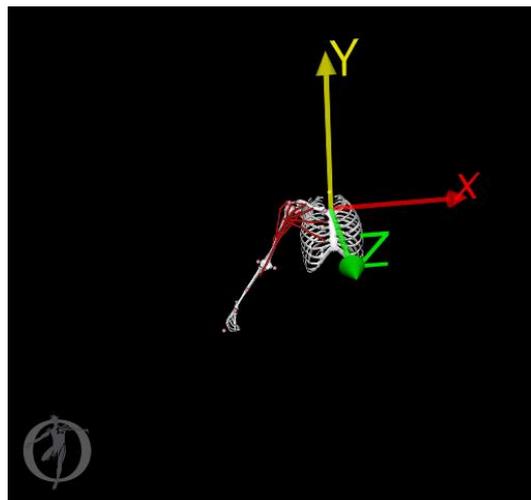


Figura 35 Eje de coordenadas de la estructura

Se define el plano de coordenadas bajo el cual se generará el movimiento y la dirección de cada una de ellas, como se señala en la figura 36.

A continuación se mostrarán en las figuras 37, 38, 39 y 40 como a partir del software, los movimientos realizados por el hombro y codo, además de dar a conocer la forma como irán acoplados los músculos a la estructura ósea.

## HOMBRO

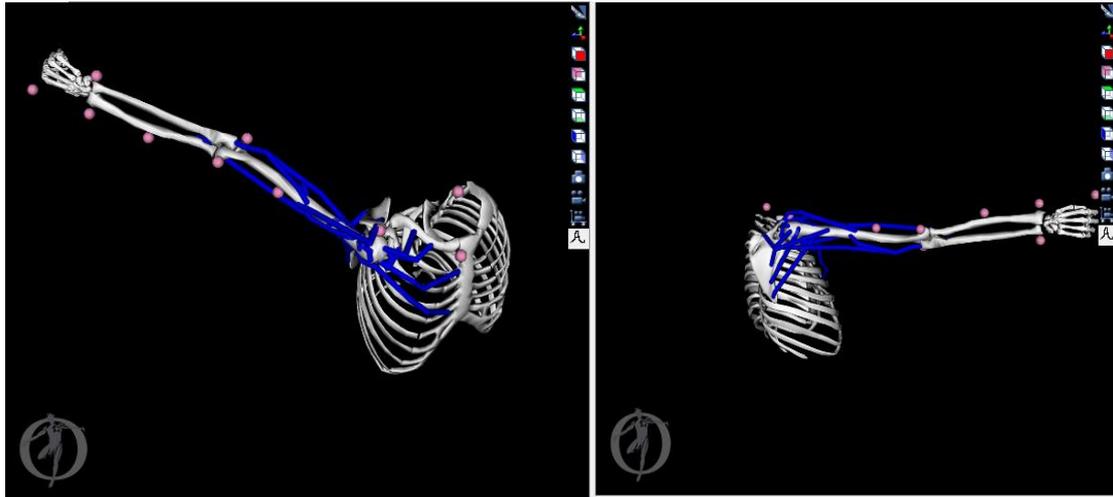


Figura 36 a) Elevación Hombro (Flexión)  $-75^{\circ}$  b) Elevación Hombro a  $55^{\circ}$ (Extensión)

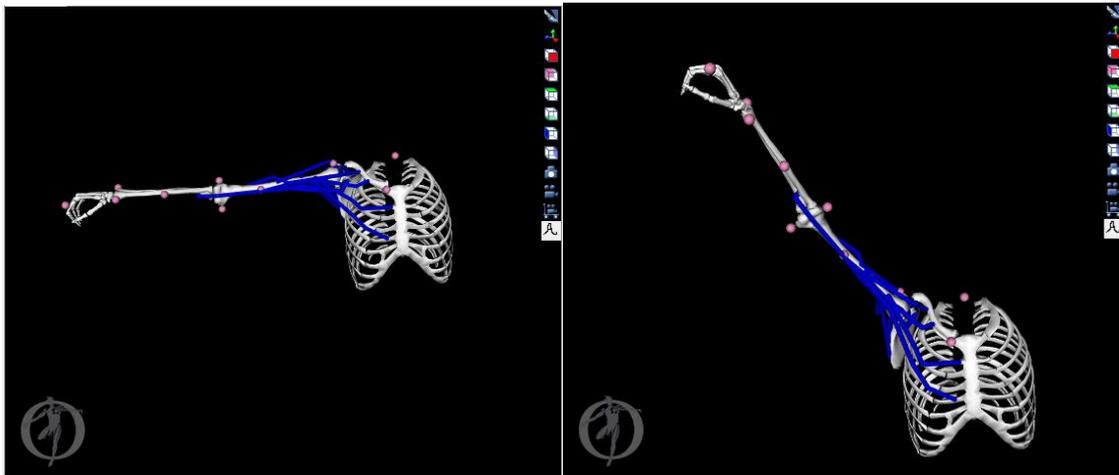


Figura 37 a) Elevación lateral a  $90^{\circ}$  (Aducción) b) Elevación a  $150^{\circ}$ (Abducción)

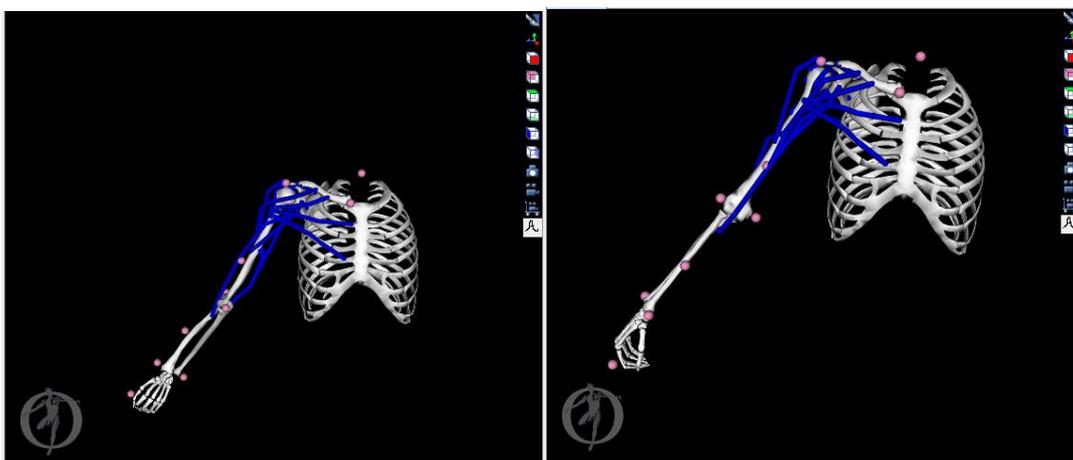


Figura 38 a) Rotación hombro  $-90^{\circ}$  b) Rotación hombro  $20^{\circ}$

## BRAZO

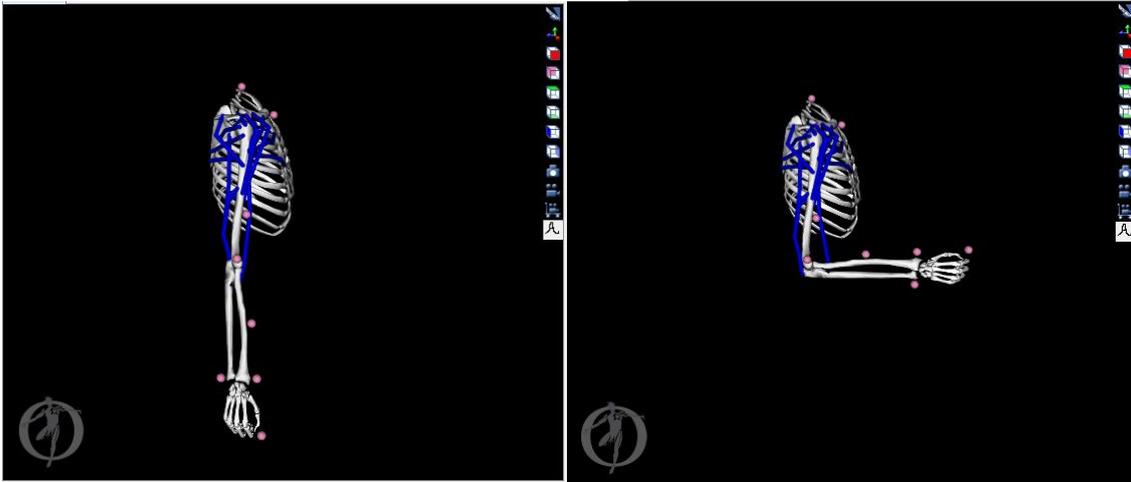


Figura 39) a) Extensión Brazo 0° b) Flexión Brazo 90°

De acuerdo a los movimientos mostrados en las figuras 37,38,39 y 40, se analiza mediante una gráfica, la elongación de cada uno de los músculos respecto al ángulo de movimiento, para determinar la exigencia de cada uno de ellos.

### 4.3.1. Movimiento de Flexión y Extensión del Brazo.

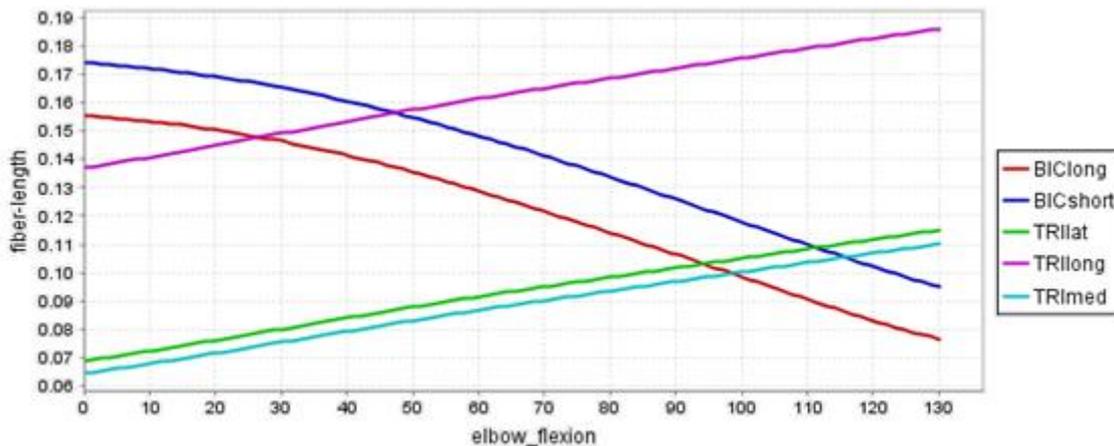


Figura 40 Gráfica movimiento Flexión Opensim

En la figura 41 se muestra la gráfica del comportamiento de los músculos que intervienen en el movimiento de flexión, como lo son bíceps y tríceps, para la toma de las curvas se determinó la posición del brazo a 130° el cual es el máximo ángulo de flexión. Se puede observar que en el movimiento del brazo flexionado, el músculo tríceps se elonga aproximadamente 4 mm, mientras que el bíceps se contrae 7mm.

Se exportan los datos a Excel, para establecer la ecuación que determina el comportamiento de cada músculo.

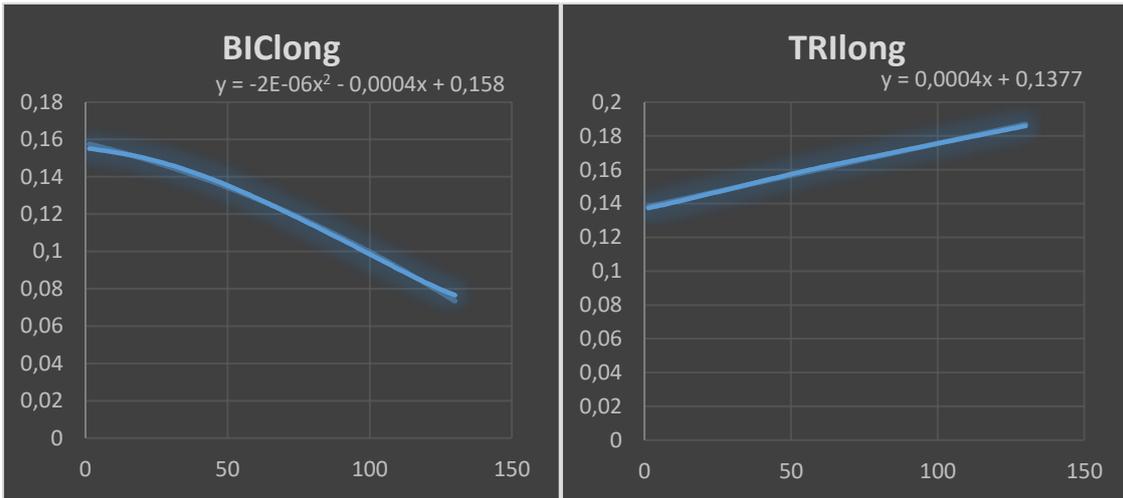


Figura 41 Angulo vs elongación a)Biceps b) Triceps

El músculo Biceps se define por la ecuación  $y = -2E-06x^2 - 0,0004x + 0,158$  y el músculo tríceps por:

Ecuación 10 Elongación Biceps y triceps

$$y = -2E-06x^2 - 0,0004x + 0,158$$

$$y = 0,0004x + 0,1377$$

#### 4.3.2. Movimiento de Flexión y Extensión del Hombro

Para el análisis de movimiento de flexión y extensión del hombro se tienen en cuenta los siguientes músculos:

Deltoide anterior y posterior, Pectoral Mayor, músculo coracobraquial, latissimus dorsi, teres mayor.

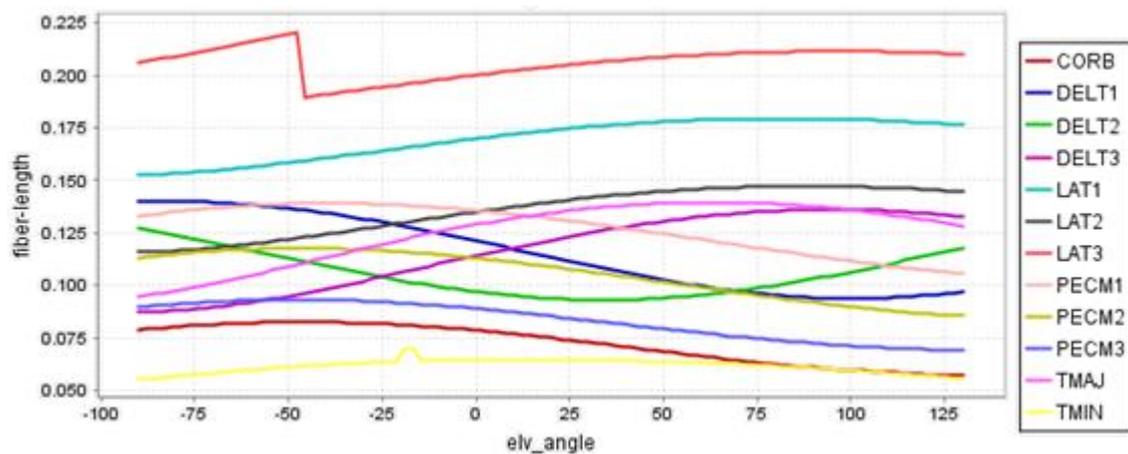


Figura 42 Grafica Movimiento Flexión Hombro

En la figura 42 se da a conocer todos los músculos que se mencionaron anteriormente, cabe destacar que depende de la posición donde el brazo se encuentre, si está en flexión o extensión, sus grupos musculares se extienden o contraen según el caso.

Cada uno de ellos se define a continuación por su ecuación característica.

**CORACOBANQUIAL**

**DELTOIDES ANTERIOR**

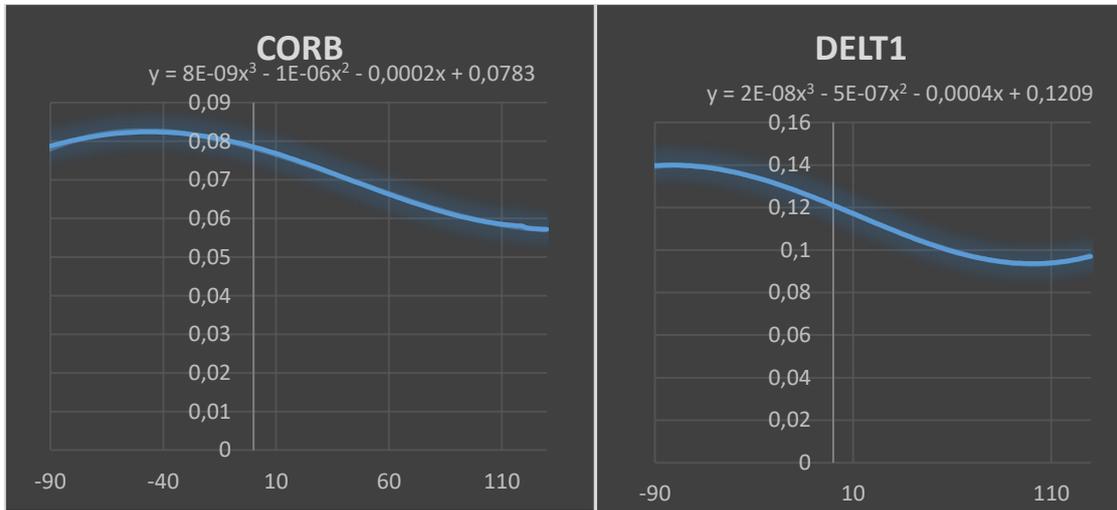


Figura 43 Angulo vs Elongación a)Coracobranquial b)Deltoides

Ecuación 11 Elongación Coracobranquial y deltoides

$$y = 8E-09x^3 - 1E-06x^2 - 0,0002x + 0,0783$$

$$y = 2E-08x^3 - 5E-07x^2 - 0,0004x + 0,1209$$

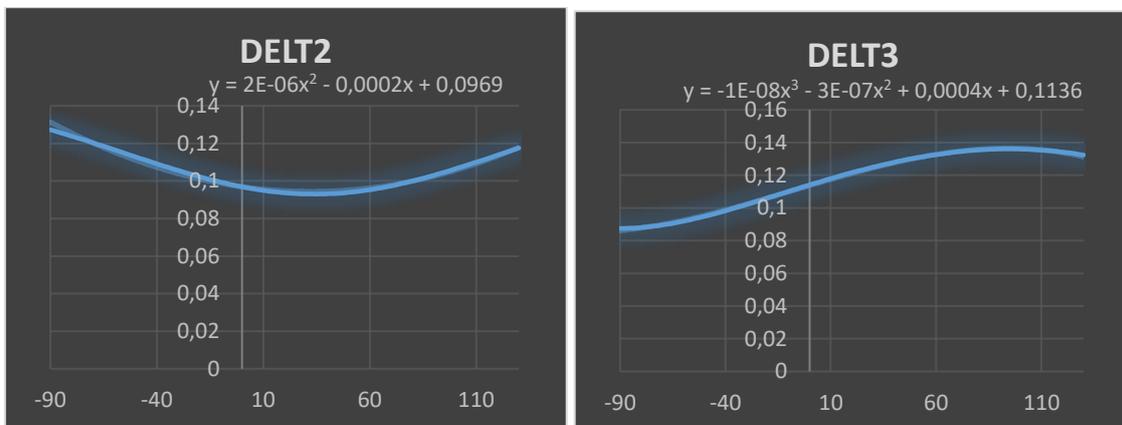


Figura 44 Angulo vs Elongación Deltoides

Ecuación 12 Elongación Deltoides

$$y = 2E-06x^2 - 0,0002x + 0,0969$$

$$y = -1E-08x^3 - 3E-07x^2 + 0,0004x + 0,1136$$

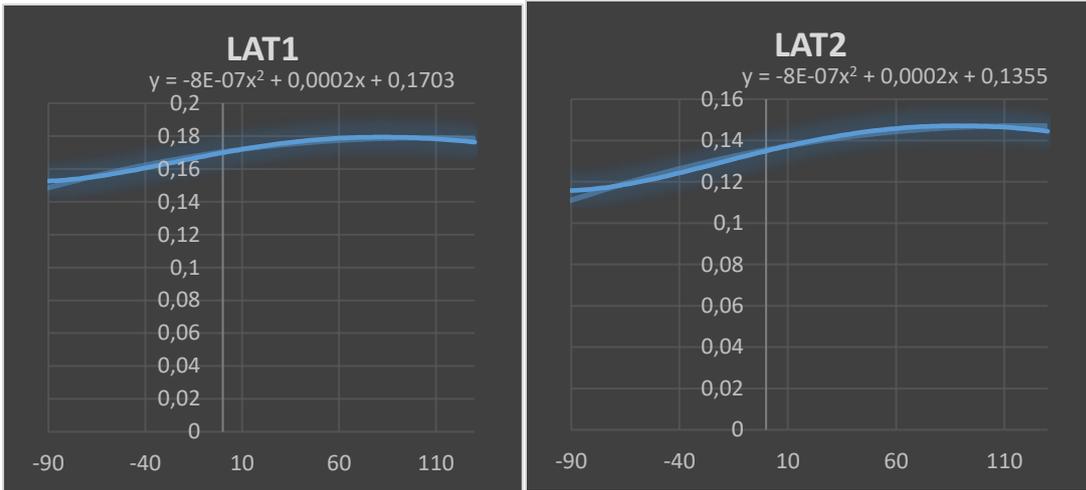


Figura 45 Ángulo vs Elongación Latissimus

Ecuación 13 Elongación Latissimuss

$$y = -8E-07x^2 + 0,0002x + 0,1703$$

$$y = -8E-07x^2 + 0,0002x + 0,1355$$

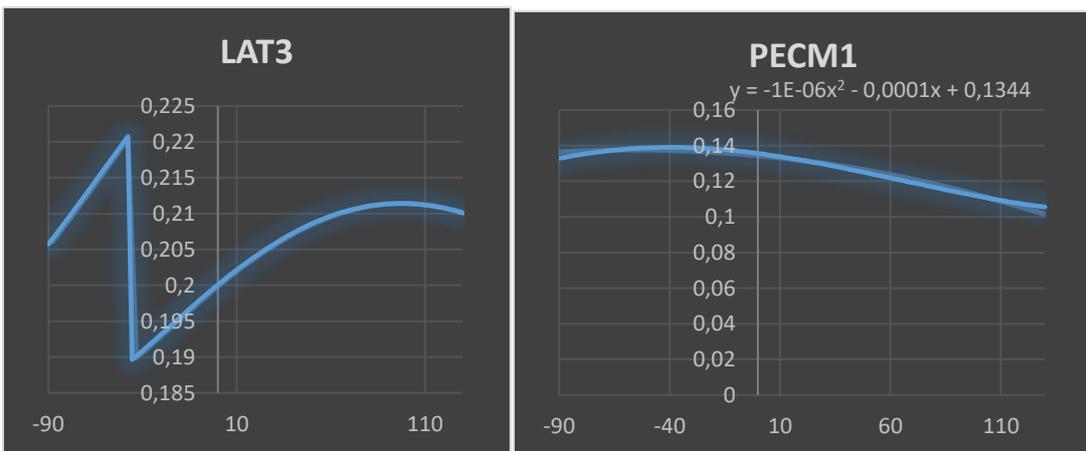


Figura 46 Ángulo vs Elongación Latissimus y Pectoral

Ecuación 14 Elongación Latisimuss

$$y = -1E-06x^2 - 0,0001x + 0,1344$$

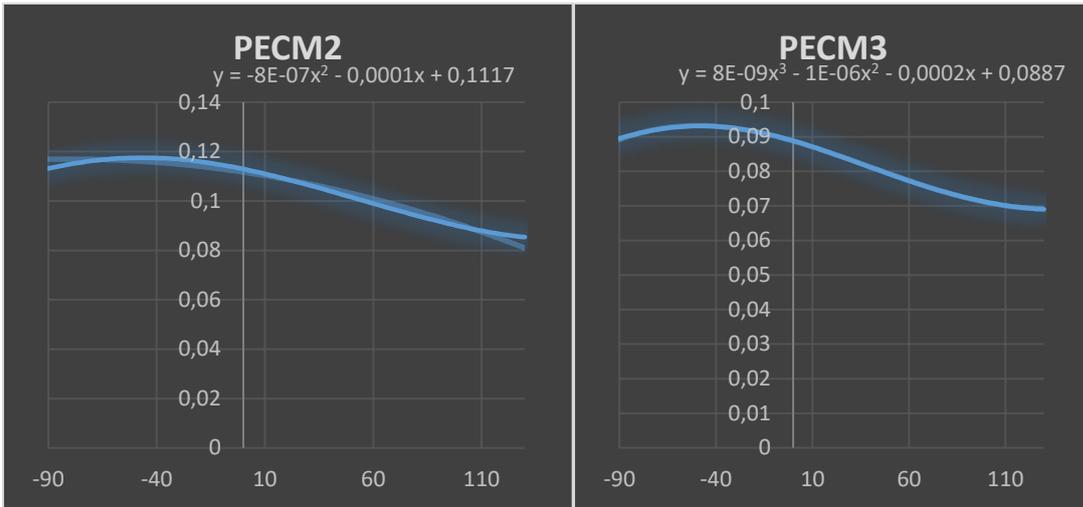


Figura 47 Ángulo vs Elongación Pectoral

Ecuación 15 Elongación Pectoral

$$y = -8E-07x^2 - 0,0001x + 0,1117$$

$$y = 8E-09x^3 - 1E-06x^2 - 0,0002x + 0,0887$$

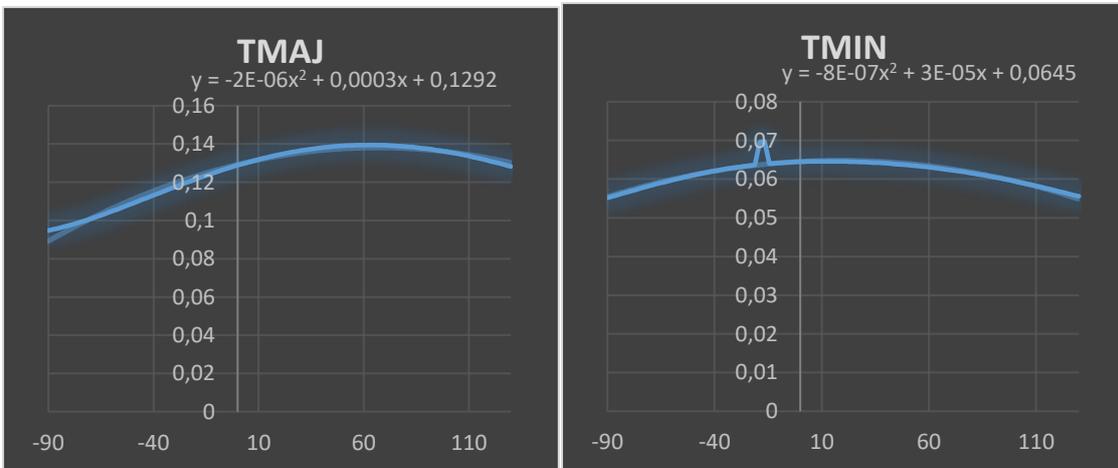


Figura 48 Ángulo vs Elongación Trapecio

Ecuación 16 Elongación Trapecio

$$y = -2E-06x^2 + 0,0003x + 0,1292$$

$$y = -8E-07x^2 + 3E-05x + 0,0645$$

Con relación a las gráficas presentadas, se puede observar que al realizar el movimiento de flexión extensión del hombro, los músculos que son antagonistas son: Coracobranquial, deltoides 1 , pectorales y latissimus se acortan cuando el movimiento angular aumenta, mientras que deltoides 2 , 3 y trapecio aumentan su elongación.

### 4.3.3. Movimiento de Abducción y Aducción del Hombro

Para el análisis de los movimientos mencionados, se tiene en cuenta el conjunto de músculos Deltoides y el músculo Coracobranquial

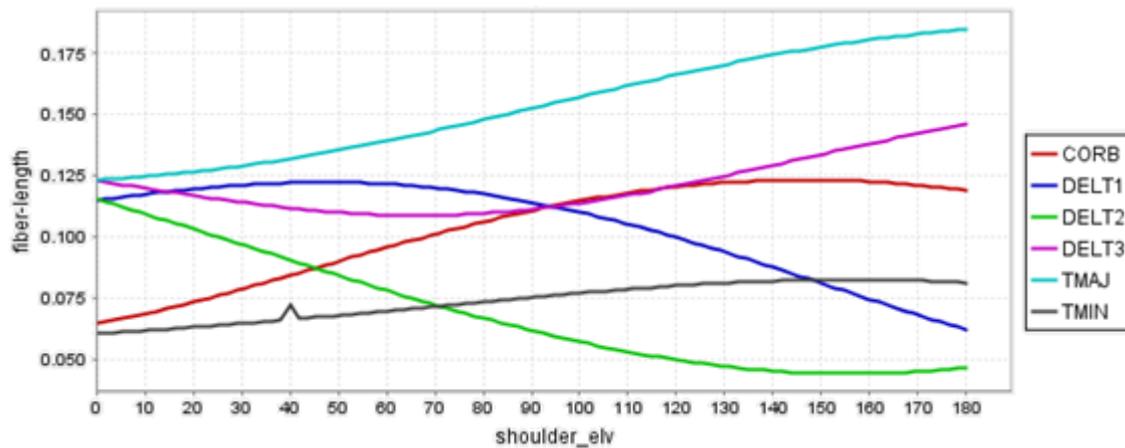


Figura 49 Gráfica movimiento de Abducción-Aducción

### CORACOBANQUIAL

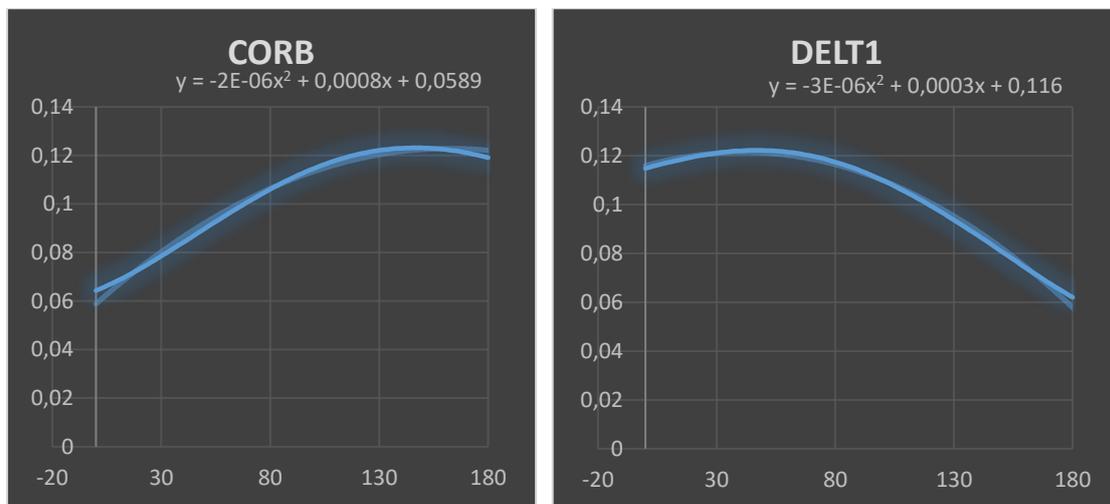


Figura 50 Ángulo vs Elongación coracobranquial y deltoide

Ecuación 17 Elongación Coracobranquial y Deltoide

$$y = -2E-06x^2 + 0,0008x + 0,0589$$

$$y = -3E-06x^2 + 0,0003x + 0,116$$

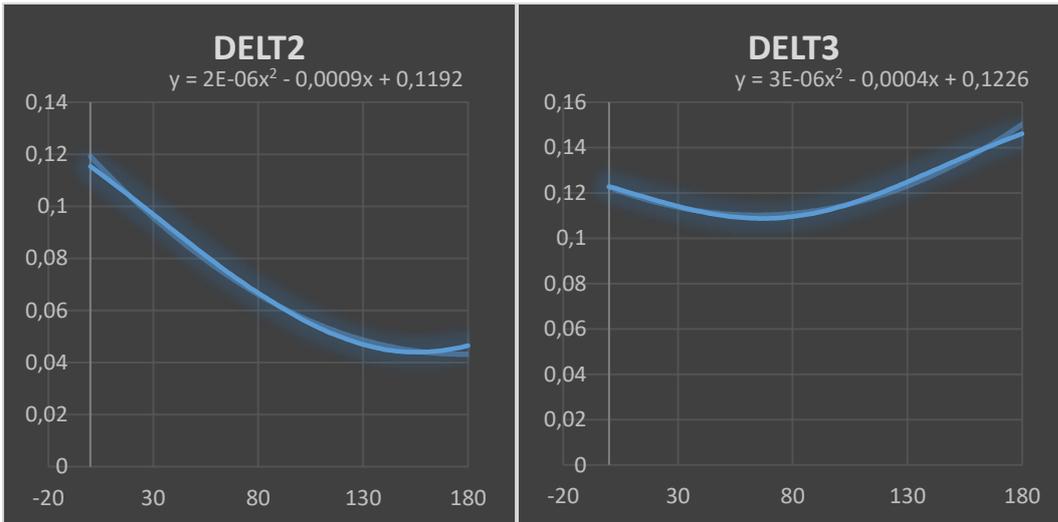


Figura 51 Ángulo y Elongación Deltoides

Ecuación 18 Elongación deltoides

$$y = 2E-06x^2 - 0,0009x + 0,1192$$

$$y = 3E-06x^2 - 0,0004x + 0,1226$$

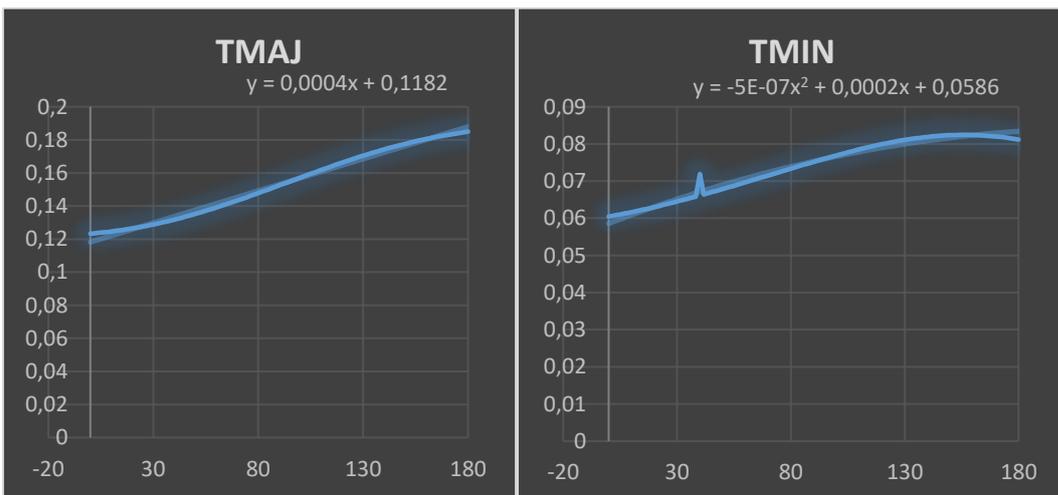


Figura 52 Ángulo y elongación Trapecio

Ecuación 19 Elongación Trapecio

$$y = 0,0004x + 0,1182$$

$$y = -5E-07x^2 + 0,0002x + 0,0586$$

#### 4.4. SIMULACIÓN Y COMPROBACIÓN DE MOVIMIENTOS POR EL SOFTWARE MATLAB

A partir del Software MATLAB, se realiza la simulación en tiempo real de los movimientos propuestos anteriormente, bajo la herramienta de GUIDE, se desarrolló la interfaz gráfica que une las ecuaciones del estudio mecánico de movimiento realizado por OpenSim, la ecuación del músculo neumático ya caracterizado, los grados de libertad que poseen cada una de las tres rotaciones y su visualización por Simulink.

#### 4.4.1. SIMULACIÓN POR SIMMECHANICS

Para poder implementar el modelo CAD desarrollado en MATLAB, es necesario el uso de Simmechanics, el modelo de SolidWorks se exporta en formato XML, seguidamente tras haber instalado los complementos necesarios, se abre en Matlab el cual lo convierte a formato SLX (Simulink). Bajo los diagramas de bloques que se generan, se trabajan y manipulan las rotaciones y movimientos enlazados a la interfaz de GUIDE.

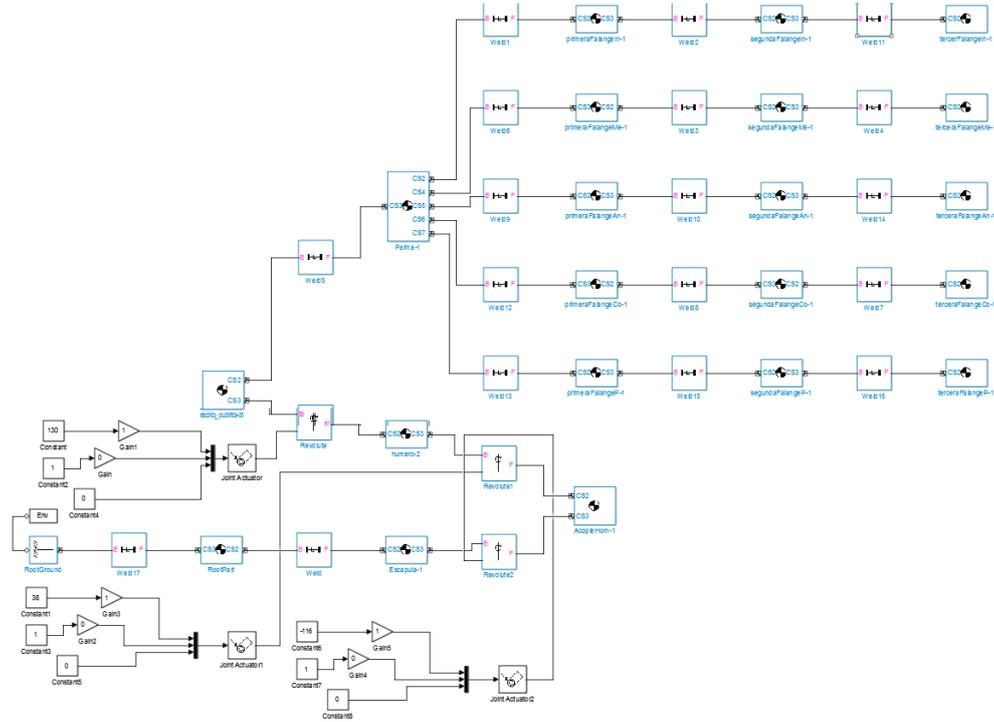


Figura 53 Diagrama de Bloques Simulink

En la figura 54 se observa el diagrama de bloques implementado al exportar el modelo CAD del brazo antropomórfico, donde se incluye el modelo completo de la mano, muñeca, antebrazo, brazo y escapula. Cabe destacar que el desarrollo de la mano y muñeca es estético, las rotaciones que se van a manejar son la del codo que en este caso es Húmero junto con Radio-Cubito Hombro con escapula y hombro con húmero, se usa el bloque Joint Actuator para controlar el Angulo de juntura de cada uno de ellos.

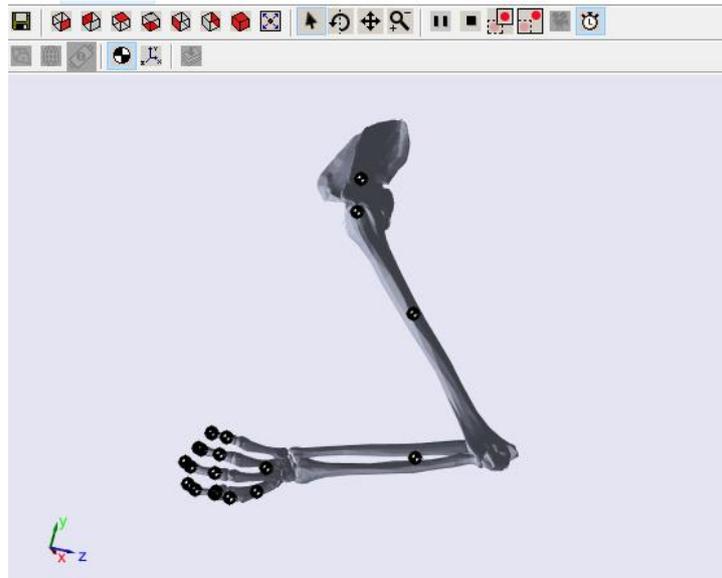


Figura 54 Brazo Antropomórfico Simulink

#### 4.4.2. DESARROLLO INTERFAZ GRÁFICA GUIDE

Para el desarrollo de la interfaz se implementaron tres sliders que varían el ángulo de las tres rotaciones; Flexión de Codo, y Rotación arriba- abajo e izquierda-derecha del hombro.

En la interfaz se muestra el valor de la elongación de cada músculo implementado para los movimientos, además del estado en el que se encuentra, por ejemplo, si el brazo está disminuyendo el ángulo quiere decir que está en extensión mientras que si aumenta está en flexión, y finalmente, según las ecuaciones, se determina la presión necesaria para que el músculo sea capaz de moverse hasta el ángulo deseado.

En el panel de inicio, se hace la presentación respectiva.



Figura 55 Presentación de interfaz Gráfica

Al oprimir el botón movimientos brazo se procede al segundo panel donde está programado todo el control mencionado anteriormente.

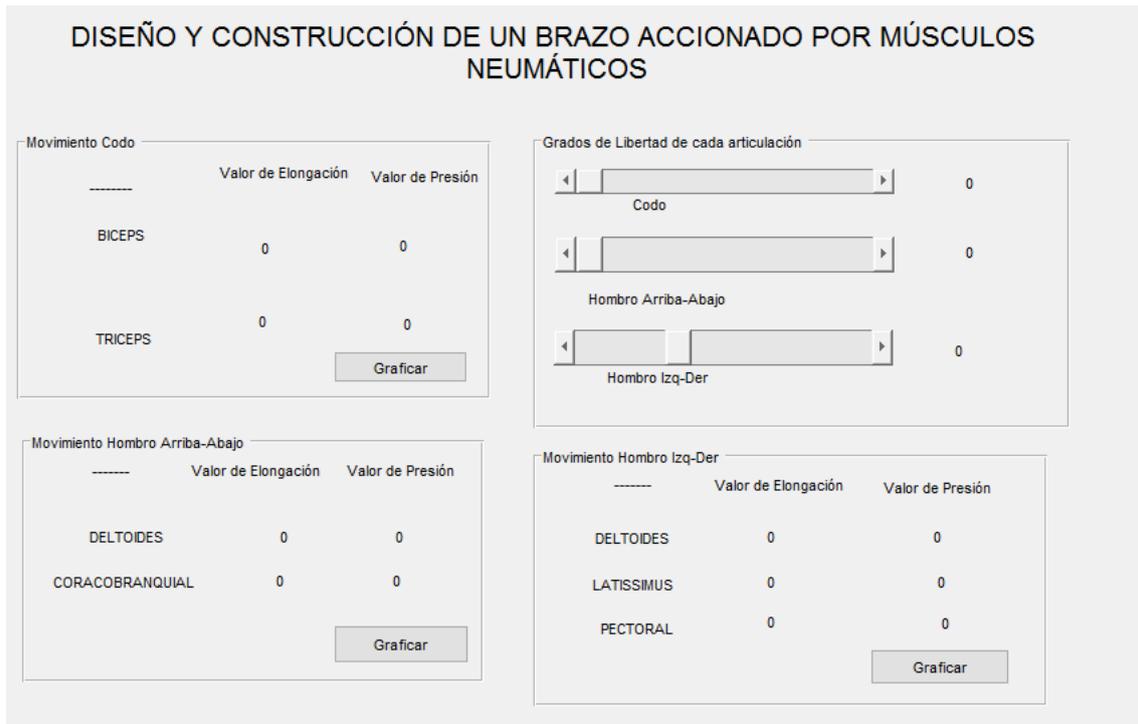


Figura 56 Interfaz Gráfica del brazo Antropomórfico

Para el cálculo de movimiento del músculo bíceps y tríceps, se usó la ecuación (10) donde se determina el comportamiento del músculo ante un cambio de ángulo en su rotación, luego se usó la ecuación (3) para establecer el comportamiento del músculo con carga a cambios de elongación, y así determinar la presión requerida para lograr el movimiento deseado.

Finalmente, cada uno de los movimientos tiene un botón para graficar y analizar la deformación en cuanto al ángulo y la presión en cuanto a la deformación del músculo.

Se analiza el músculo Biceps y Triceps en el ángulo de 90°. Para el movimiento de Flexión y Extensión del Codo

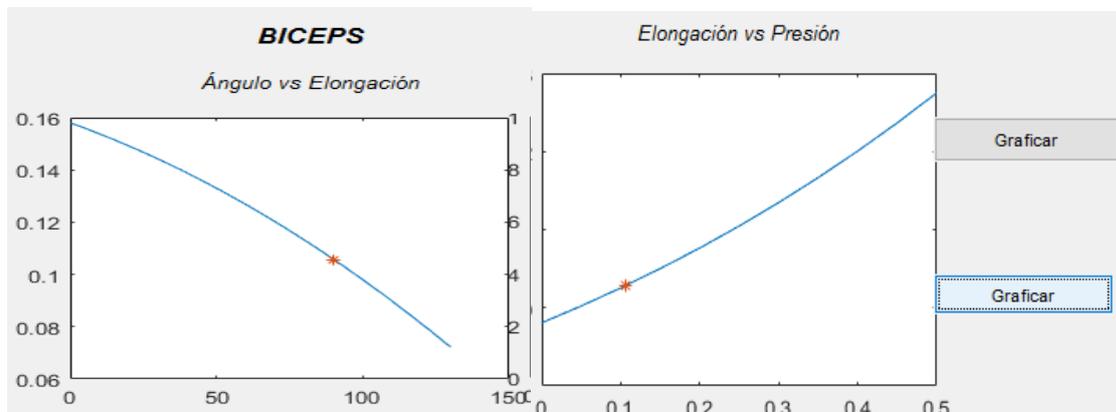


Figura 57 Gráficas elongación y Presión Biceps

Para el ángulo establecido, según se observa en la figura, el músculo bíceps está 0.11 cm aproximadamente alargado, a medida que el delta de elongación disminuye, la presión disminuye debido a que el músculo está en proceso de estiramiento.

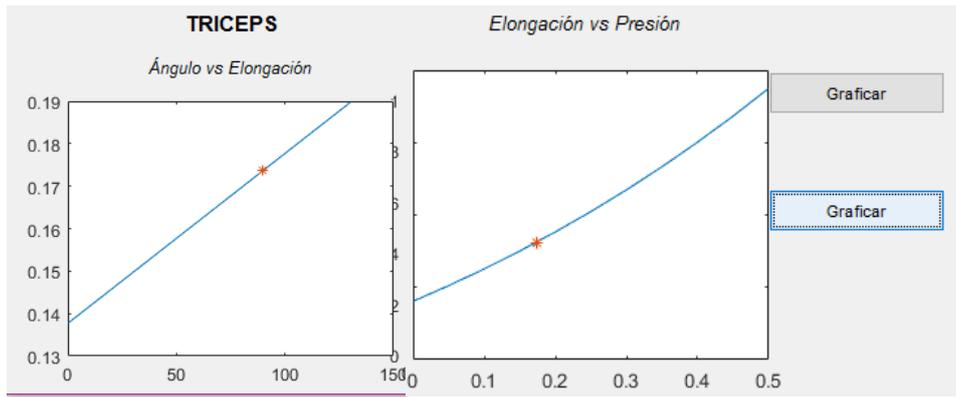


Figura 58 Elongación y Presión del triceps

En el caso del Triceps a  $90^\circ$  el músculo se encuentra elongado aproximadamente 0.175 cm, a medida que la elongación aumenta, la presión aumenta debido a que el músculo está en contracción.

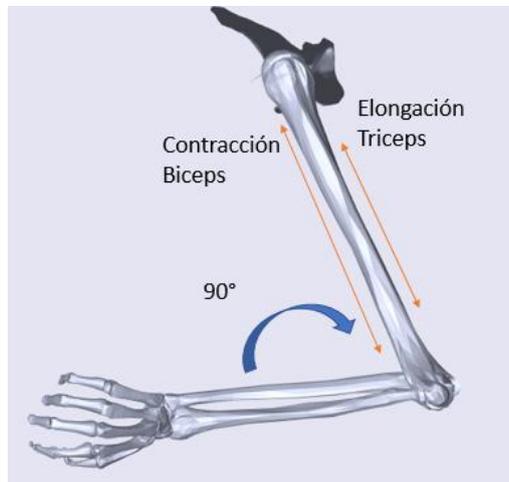


Figura 59 Demostración Gráfica del análisis de la gráfica

Se desarrolla el análisis en el ángulo de  $45^\circ$  para el mismo movimiento

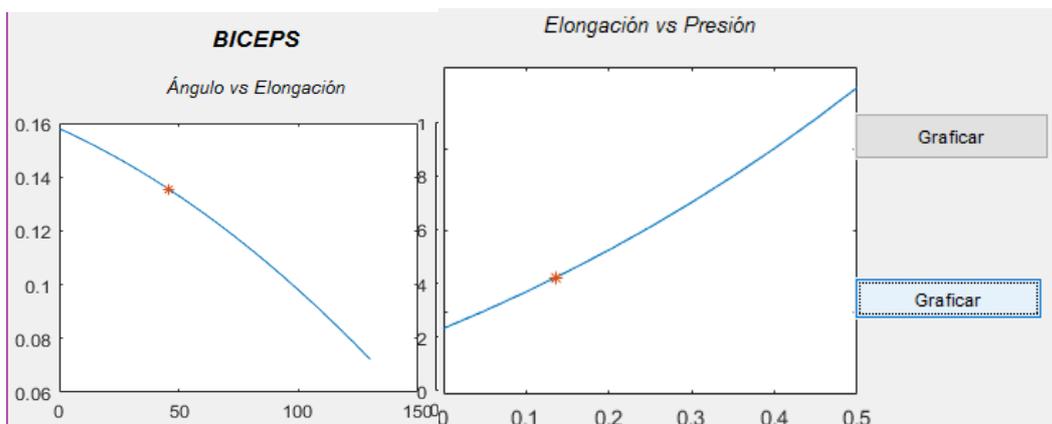


Figura 60 Graficas Elongación y Presión Biceps a  $45^\circ$

Para el ángulo de  $45^\circ$  el músculo de bíceps está más elongado debido a que al pasar de  $90^\circ$  a  $45^\circ$  se presenta extensión, el valor de la presión en este caso disminuye, por tanto en el músculo tríceps, al ser su antagonico aumenta.

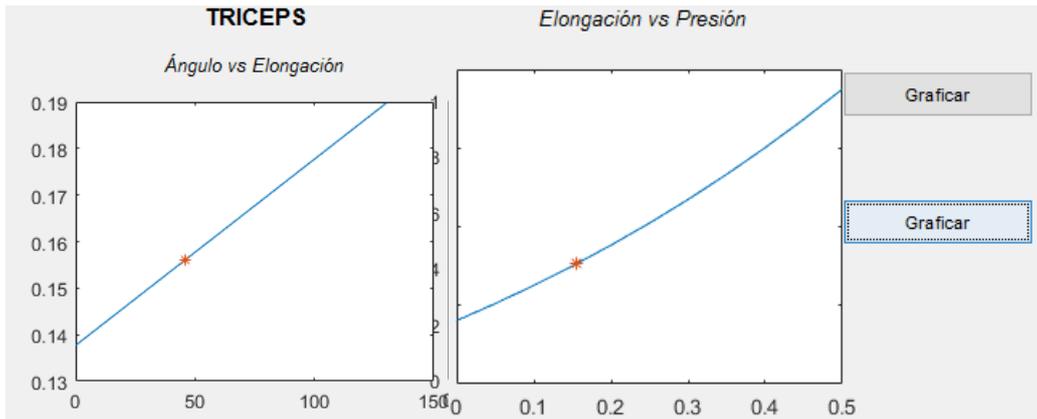


Figura 61 Grafica Elongación y Presion de Triceps a 45°

A diferencia del ángulo de 90 ° se puede observar que el músculo está en contracción porque está realizando el movimiento de Extensión, la presión a diferencia del ángulo anterior no varía notablemente, ya que los valores de contracción muscular pasan de 0.175 a 0.155.

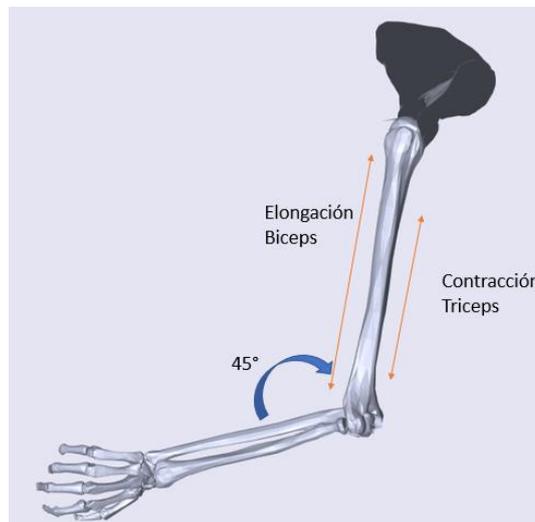


Figura 62 Demostración Gráfica de rotación de Codo a 45°

Para la simulación de la Abducción y Aducción de hombro se implementó la ecuación (11) junto con la caracterización del músculo (3), se establece la relación entre los músculos que se elongan y contraen de acuerdo al ángulo de movimiento en el que se encuentren. Asimismo, las diferencias de presión se expresan en la gráfica.

Se realiza en análisis para un ángulo de Abducción de 60°, al realizar este movimiento, se expresa la curva característica de cada músculo evaluada en el punto del ángulo.

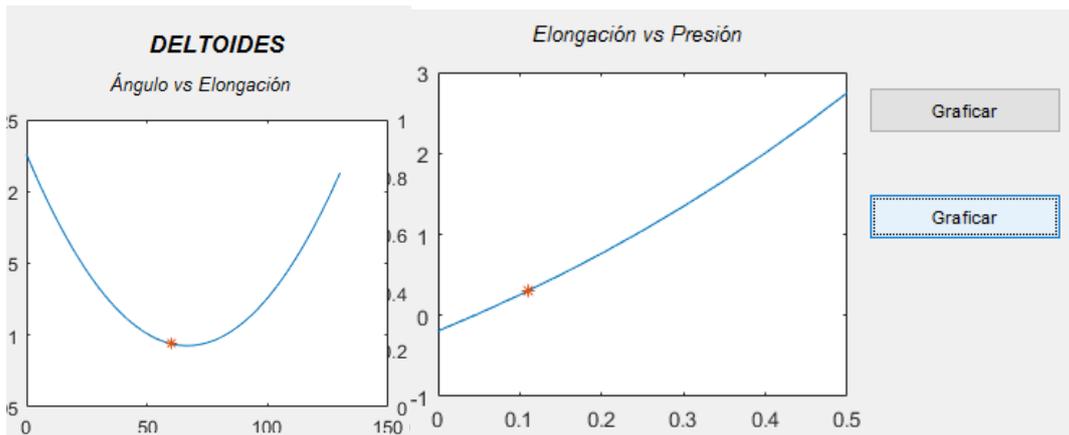


Figura 63 Elongación y Presión de Deltoides para movimiento de Flexión de 60°

En el punto de 60° el músculo de deltoide está llegando a su posición mínima, la presión del mismo está en un punto bajo.

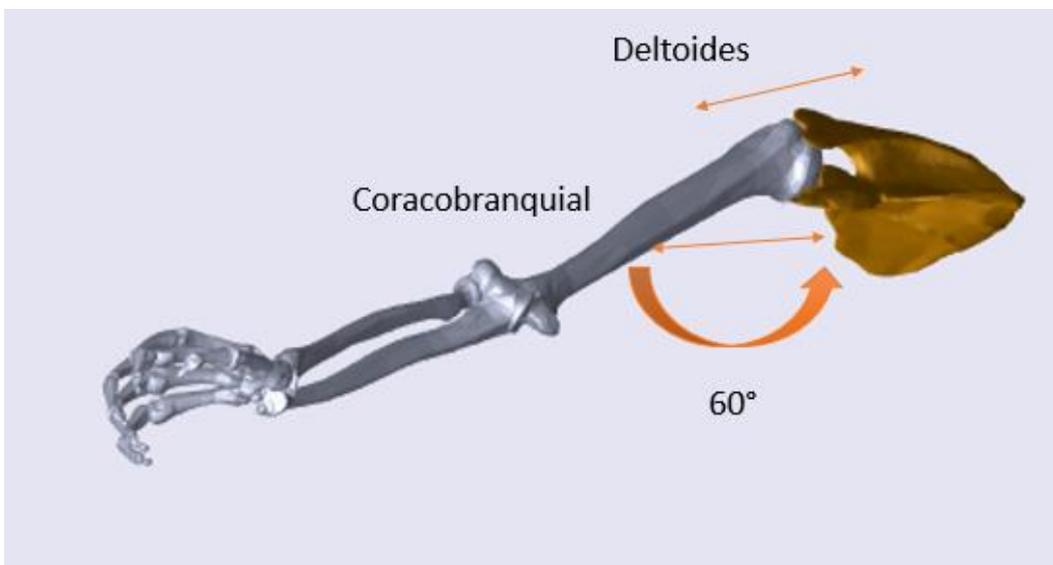


Figura 64 Demostración gráfica de flexión del hombro

En el caso del músculo coracobraquial, responde de la siguiente manera

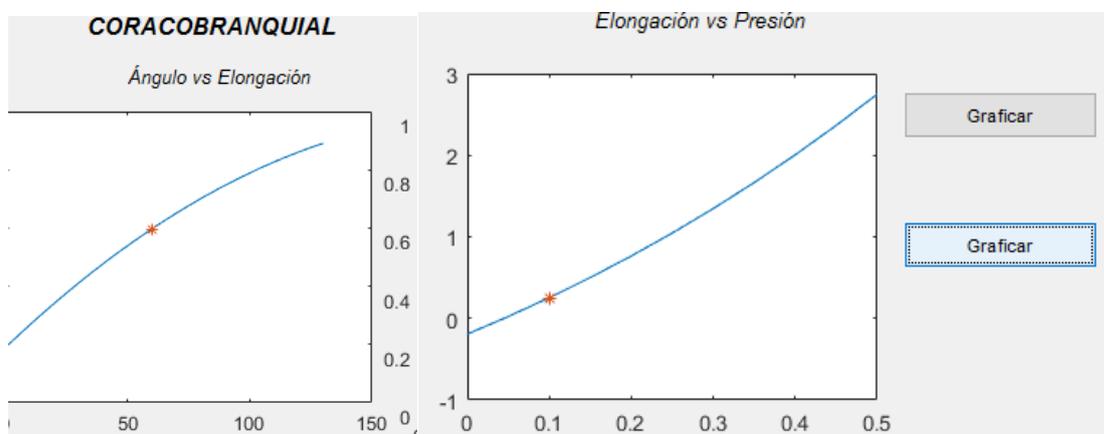


Figura 65 Abducción Angulo 60°

En el caso del músculo coracobraquial, y según el movimiento que se está aplicando a medida que el ángulo aumenta la elongación también, y asimismo la presión en este punto comienza a aumentar.

Se hace el análisis para un ángulo de  $30^\circ$  por tanto, como se disminuye el ángulo generando el movimiento de Abducción, el músculo que se contrae es el coracobraquial mientras que el deltoides se elonga.

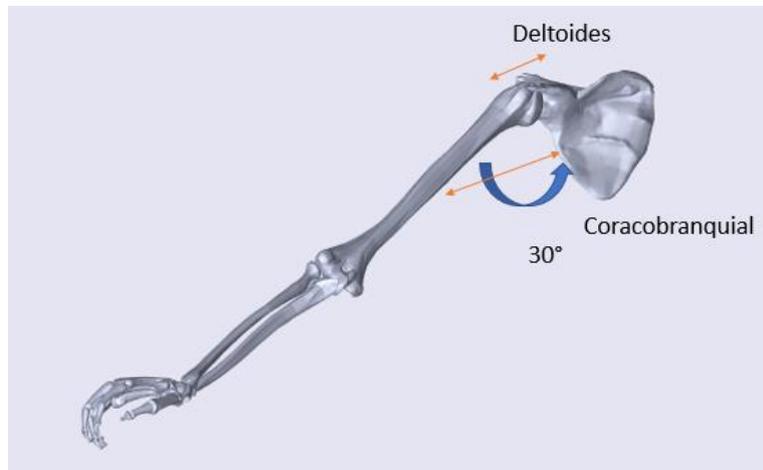


Figura 66 Diagrama de abducción a  $30^\circ$  del hombro

## 5. CONSTRUCCIÓN Y COMPARACIÓN MODELO FÍSICO CON SIMULACIÓN DEL BRAZO ANTROPOMÓRFICO

### 5.1. CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN

Para la construcción del brazo antropomórfico se estableció antes que tenía las medidas del cuerpo de una persona de 1.60 metros de estatura, por tanto, sus dimensiones son: Del húmero, del radio-cubito, y altura de tronco. En el modelo de OpenSim se estableció el toráx como tierra y se definieron los movimientos en torno a su eje, en este caso también la región toraxica funciona como base del sistema. El modelo físico cuenta con cabeza, región Toraxica, y ambos brazos, pero solo en uno de ellos va implementado el sistema muscular como comprobación.



*Figura 67 Modelo Esqueletico implementado*

El diseño de los músculos neumáticos pasó por varias etapas de mejora, ya que, al manejarse con aire, es muy propenso a las fugas del mismo. El primer modelo ver figura 67 se implementó un preservativo junto con una malla de fruta para emular el comportamiento del músculo, pero este primer prototipo no tenía la fuerza suficiente para generar un movimiento. El segundo prototipo elaborado con la manguera de látex y la malla trenzada, generó el comportamiento de elongación esperado, actuando bajo cargas controladas, sin embargo, al ser bastante artesanal presenta fugas de aire debido a la alta presión, por último, el tercer prototipo se vio la necesidad de usar racores y tapones para lograr un sistema completamente sellado, más estético y más funcional.



Figura 68 Terminales del músculo Neumático

Finalmente, el modelo final cuenta con los grupos musculares mencionados en el documento, un músculo compone el triceps, otro el bíceps, otro el grupo muscular pectoral, el dorsal, el Latissimuss y el trapecio, cada uno fue implementado de a uno para que caractericen el movimiento expresado.

## 5.2. PRUEBAS DE MOVIMIENTO REAL Y EN SIMULACIÓN

### 5.2.1. CIRCUITO NEUMÁTICO DE ACTIVACIÓN DE LOS MÚSCULOS

Para el circuito Neumático se implementa el software FluidSim.

Para el movimiento de Flexión y Extensión del codo se implementan dos músculos, Biceps y Triceps, el circuito está conectado al compresor de aire del laboratorio de automatización de la Universidad Militar Nueva Granada alimentado con 4 Bar de presión o 60 lb.

#### MOVIMIENTO DE FLEXIÓN Y EXTENSIÓN CODO

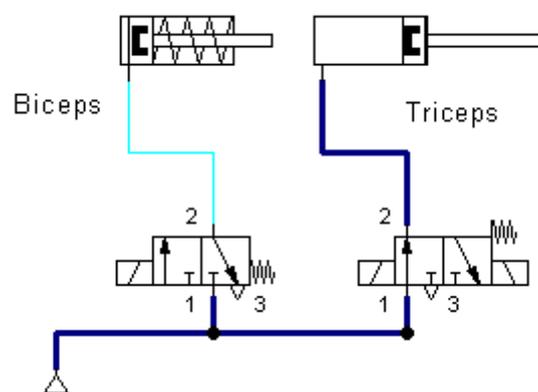


Figura 69 Circuito Neumático Flexión Extensión codo

Mientras un músculo está en reposo, en este caso Biceps, el otro tiene presión, por tanto, se contrae, deduciendo así que se está realizando el movimiento de extensión.

Para el movimiento de Flexión y Extensión del hombro se implementan en el montaje físico los músculos coracobraquial y Deltoides.

### MOVIMIENTO DE FLEXIÓN Y EXTENSIÓN HOMBRO

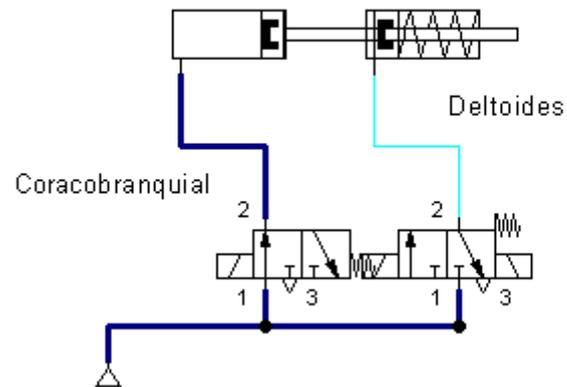


Figura 70 Circuito Neumático de activación para movimiento de Flexión del hombro

Para el movimiento de abducción y aducción del hombro se activan los músculos deltoides, latissimus y pectoral.

### MOVIMIENTO DE ABDUCCIÓN Y ADUCCIÓN DEL HOMBRO

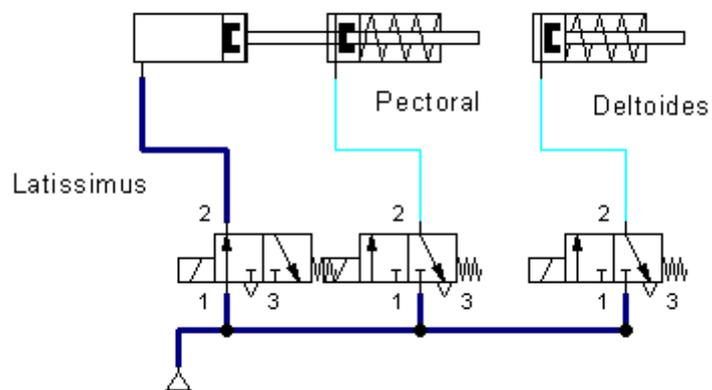


Figura 71 Conexión Neumática de aducción Hombro

## FLEXIÓN Y EXTENSIÓN DEL CODO

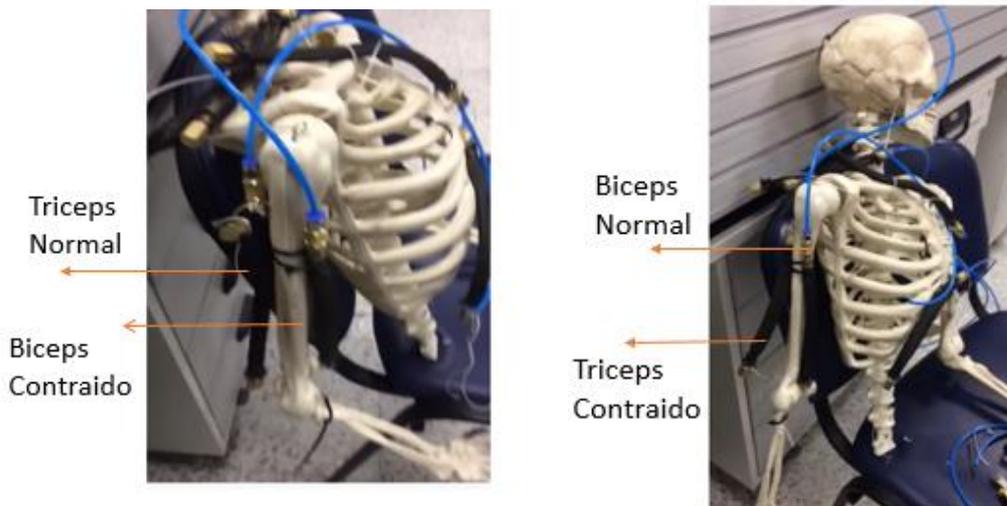


Figura 72 Flexión y Extensión Codo Prototipo

En la figura 72 se muestra el prototipo diseñado para comprobar los movimientos del brazo implementando músculos neumáticos, en cuanto a este primer movimiento, el brazo no alcanza el nivel de flexión de  $130^\circ$  debido a que es necesaria la elaboración de más músculos complementarios al sistema, que por cuestiones de presupuesto no fue posible desarrollar, el brazo alcanza una flexión máxima de  $90^\circ$ , en cuanto a la extensión del mismo se desarrolla en un tiempo rápido y al momento de la activación del músculo, el movimiento es inmediato.

## FLEXION Y EXTENSION DEL HOMBRO

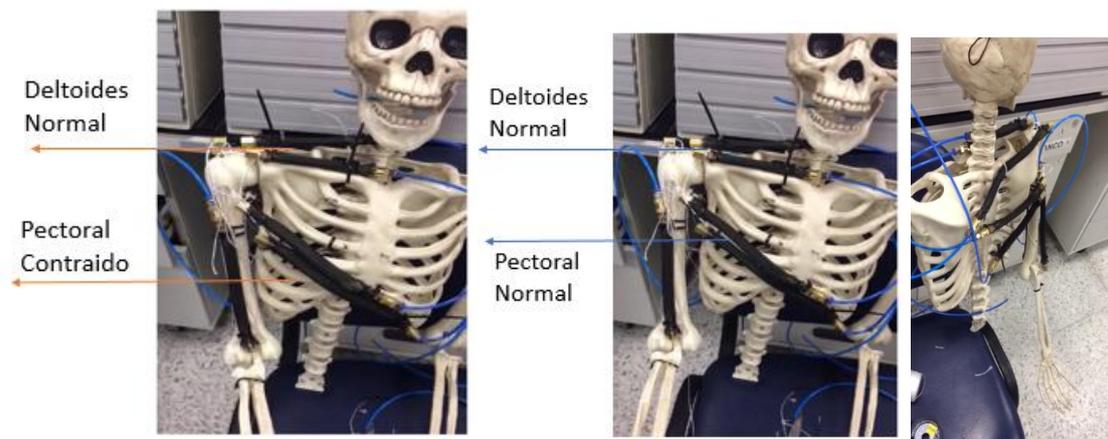


Figura 73 Movimiento Flexión Extensión Hombro

En la figura 73 se aprecia de manera mínima los movimientos de flexión (Izquierda) el estado del brazo normal (centro) y la extensión hacia atrás (Derecha), el ángulo de flexión es aproximadamente  $20^\circ$  como máximo debido al diseño del prototipo, con el que se buscó simular un grupo muscular como pectoral, que es un músculo grande en tamaño, en dos tiras musculares, cosas que influyeron en el manejo de las posiciones del mismo.

## ADUCCIÓN Y ABDUCCIÓN DEL HOMBRO

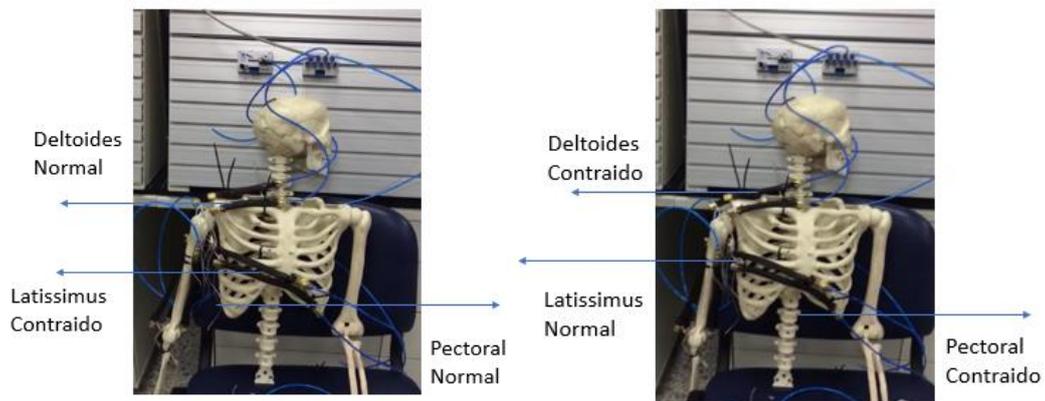


Figura 74 Abducción y Aducción Hombro

Finalmente, en la figura 73 se muestra la manera como se logró de manera reducida hacer la aducción y seguidamente abducción del hombro, el Angulo de elevación fue  $30^\circ$ , recalcando el problema mencionado anteriormente en cuanto a la estructura.

## 6. CONCLUSIONES

El desarrollo de un músculo neumático casero como actuador es una solución muy viable si se busca fuerza y economía, su construcción es elemental para su correcto funcionamiento, ya que hay que tener en cuenta las menores pérdidas de presión para que el músculo sea capaz de hacer más recorrido, al momento de su caracterización se deben tener en cuenta los valores de longitud, área transversal, presión y la carga que van a manejar, haciendo pruebas con fuerza máxima, y mínima necesaria para que el músculo se contraiga.

Al implementarlo como un conjunto muscular que simula los movimientos del brazo humano, no es muy exacto en cuanto a los requerimientos de posición, se debe a la manera como se acoplaron los músculos, su acople fue realizado con un hilo llamado Hactan, el cual es bastante rígido, en primera medida se realizó el acople con Nylon, pero como el músculo genera una fuerza aproximada de 10 N se alcanzaba a ceder. Con el hilo, el movimiento se generaba, pero era bastante brusco y no muy exacto.

Se diseñó y construyó un prototipo de robot antropomórfico con tres grados de libertad y articulaciones rotativas con el fin de mostrar a manera general la aplicación de los músculos neumáticos para este fin. Además de esto se desarrolló una herramienta de análisis y simulación que permite comprobar los fundamentos matemáticos con la aplicación real.

El análisis desarrollado por OpenSim, fue necesario para definir el comportamiento de cada músculo con los respectivos movimientos, además de los grupos musculares necesarios para cada uno de los movimientos que se permitieron en el brazo, flexiones, extensiones, abducciones y aducciones.

El desarrollo de la simulación bajo el Software MATLAB cuenta con las indicaciones necesarias para poder comprender como se desarrolla el movimiento del brazo, cuales son los músculos antagonistas y las presiones necesarias para lograr, bajo unas condiciones ideales, el control de posición angular, además de una retroalimentación visual para identificar la posición a la que el brazo lleva con la variación de los ángulos.

De acuerdo al análisis de estados del arte, el brazo antropomórfico desarrollado cuenta con ligereza, fuerza y economía a los desarrollados anteriormente, para futuros trabajos sería pertinente hacer del modelo algo más estable, es un primer prototipo de una excelente opción para trabajar como prótesis o como manipulador distante.

Finalmente, cabe destacar las diferencias existentes entre el músculo neumático al real, las principales son la rapidez del movimiento, la elongación de cada uno y el acople al sistema óseo.

## **7. TRABAJOS FUTUROS**

Dando paso a futuros trabajos, cabe destacar las falencias y/o inconvenientes que tuvo el primer prototipo. Los inconvenientes mencionados y que es necesario reconocer es la forma como están acoplados los músculos a la estructura ósea, la inexactitud de la posición y deformación de cada uno de los músculos.

El prototipo de brazo antropomórfico puede ser controlado a partir de sensores de presión como entrada , y como actuador implementar Servo-Válvulas, que permitan controlar el paso de aire para cada músculo, siendo esto más ideal para acercarse al modelo del brazo humano.

Para el desarrollo de los acoples, identificar un material que asimile el comportamiento de un tendón, tenga algún porcentaje de elasticidad sin alterar la elongación es vital para lograr un movimiento más suave, se podría plantear el uso de resortes como tendones.

## 8. REFERENCIAS

- [1] National University of Singapore, «Robotic Muscles lift 80 times own material weight,» p. 1, 2013.
- [2] Texas University, «Torsional Carbon Nanotube Artificial Muscles,» *Science*, vol. 334, pp. 494-496, 2011.
- [3] FESTO, «Músculo neumático DMSP,» [En línea]. Available: [https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/12361/PSI\\_501\\_2\\_es.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/12361/PSI_501_2_es.pdf).
- [4] UNAM, «Reseña histórica de las prótesis,» *revista UNAM*, 2010.
- [5] Universidad UCES, «De la mecánica a la robótica: Protésis Bionicas,» 2011.
- [6] D. T. Daniel J. Cox, «The Dynamic Model of a three degree of Freedom Parallel Robotic Shoulder module,» Texas, 1999.
- [7] G. Z. X. J. G. B. W. Y. Z. D. Liu Kai\*, «Kinematic Optimization of Bionic Shoulder Driven by Pneumatic Muscle Actuators Based on particle Swarm Optimization».
- [8] Technische Universität Berlin, «FG Bionik und Evolutionstechnik & EvoLogics GmbH,» Berlin, Germany, 2006.
- [9] Morfología Humana: Generalidades y Sistemas, Cuba: bvscuba, 2009.
- [10] «Anatomía-Humana,» [En línea]. Available: [www.anatomia-humana.com](http://www.anatomia-humana.com). [Último acceso: Agosto 2017].
- [11] A. Juquilpan, «Antropometría y Ergonomía,» México, 2010.
- [12] ECI (Escuela Colombiana de Ingeniería), «Laboratorio de Antropometría,» Bogotá D.C.
- [13] D. F. Nigel Palastanga, ANATOMÍA Y MOVIMIENTO HUMANO. ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO.
- [14] I. LELOIR, «Fundamentos de Biomecánica Articular,» [En línea]. Available: [http://imedleloir.com.ar/documentos/Biomecanica\\_articular.pdf](http://imedleloir.com.ar/documentos/Biomecanica_articular.pdf).
- [15] R. Tosi, «Análisis de movimiento de la flexión del antebrazo sobre el brazo desde la perspectiva Anatómo Funcional,» 1998.
- [16] D. F. R. S. Nigel Palastanga, Anatomía y movimiento humano, estructura y funcionamiento, Paidotribo, 2007.
- [17] J. D. Gonzalz, «MECANISMOS DE TRANSMISIÓN Y ACTUADORES UTILIZADOS EN PRÓTESIS DE MANO,» de *Memorias del XV Congreso Internacional anual de la SOSIM*, Obregón, Sonora, México, 2009.
- [18] N. Imani, «El músculo neumático,» 2002.
- [19] Universitat de Barcelona, «Materials,» Barcelona, España.

- [20] K. K. Robert Pack, «A Rubbertuator-Based Structure-Climbing Inspection robot,» *IEEEExplore*, 1997.
- [21] B. H. Chou, «Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles,» *IEEE*, 1996.
- [22] D. R. y. C. P. K.R. Johnson, «A VSC position tracking system involving a large scale pneumatic muscle actuator,» *IEEE*, vol. 4, 1998.
- [23] Autodesk, «AUTODESK MAYA,» [En línea]. Available: <http://latinoamerica.autodesk.com/products/maya/overview>. [Último acceso: Octubre 2016].
- [24] Stanford University, «OpenSim Documentation,» [En línea]. Available: <http://simtk-confluence.stanford.edu/>. [Último acceso: Octubre 2016].
- [25] festoDidactic, «Multiplexor Neumático,» [En línea]. Available: <http://www.festo-didactic.com/mx-es/servicios/printed-media/data-sheets/neumatica/distribuidor-de-aire-152896.htm?fbid=bXguZXMuNTY0LjE0LjMyLjEwODcuNTE1OQ>.
- [26] [En línea]. Available: <http://kaf.com.mx/home/font-styles-mainmenu-54>.
- [27] [En línea]. Available: <https://ceipntrasradelapiedad.wordpress.com/2010/08/17/la-funcion-de-relacion-el-aparato-locomotor/>.
- [28] R. N. Tosi, «Análisis del movimiento de la Flexión del Antebrazo sobre el Brazo desde la perspectiva Anátomo Funcional.,» 1998.

## ANEXO A

Código de MATLAB que une las ecuaciones obtenidas por OpenSim y la caracterización del músculo.

```
function varargout = InterfazControl(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @InterfazControl_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @InterfazControl_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
global t
% End initialization code - DO NOT EDIT
t=0;

% --- Executes just before InterfazControl is made visible.
function InterfazControl_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = InterfazControl_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)

varargout{1} = handles.output;

function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global valcodol posAnt Bic Pres codol AntCodo
codol = get(hObject, 'Value');
valcodol =round(codol);
set(handles.text6, 'String', valcodol);
set_param('ArmShoulderAss/Constant', 'Value', num2str(valcodol));

valcodol

if codol~=AntCodo;%Biceps Aumenta Flexion
    if codol>AntCodo;%Flexion
set(handles.text15, 'String', 'FLEXION');
%Biceps
Bic=(-2e-6) * (codol)^2- (0.0004*codol)+0.158; %Elongación Músculo
0.029282-0.0484
```

```
Pres=(-1)*(-0.124*Bic^4 - 1.0253*Bic^3 - 2.8884*Bic^2 - 4.1684*Bic + 0.1928);
```

```
set(handles.text18,'String',Bic);  
set(handles.text22,'String',Pres);
```

```
end  
if codol<AntCodo;  
set(handles.text15,'String','EXTENSIÓN');  
%Triceps  
Trip=(0.0004*codo1)+0.1377;  
PresT=(-1)*(-0.124*Trip^4 - 1.0253*Trip^3 - 2.8884*Trip^2 - 4.1684*Trip + 0.1928);  
set(handles.text19,'String',Trip)  
set(handles.text23,'String',PresT)  
end  
end  
AntCodo=codo1;
```

```
function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);  
end
```

```
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
global valhombrol Delt Crbr hombrol AntHombrol  
hombrol = get(hObject,'Value');  
valhombrol = round(hombrol);  
%auxvalhom =valhombro2+100;  
set(handles.text7,'String',valhombrol);  
set_param('ArmShoulderAss/Constant1','Value',num2str(valhombrol))
```

```
valhombrol
```

```
if hombrol~=AntHombrol;%Aduccion  
if hombrol>AntHombrol;
```

```
set(handles.text24,'String','ADUCCION');  
%Deltoides  
Delt=(3e-06)*(hombrol^2) - 0.0004*hombrol + 0.1226;  
PresD=(-1)*(-0.124*Delt^4 - 1.0253*Delt^3 - 2.8884*Delt^2 - 4.1684*Delt + 0.1928);
```

```
set(handles.text30,'String',Delt);  
set(handles.text36,'String',PresD);
```

```
end  
if hombrol<AntHombrol;  
set(handles.text24,'String','ABDUCCION');  
%Coracobranquial  
Crbr = (-2e-06)*hombrol^2 + 0.0008*hombrol +0.0589;  
Prescr=(-1)*(-0.124*Crbr^4 - 1.0253*Crbr^3 - 2.8884*Crbr^2 - 4.1684*Crbr + 0.1928);  
set(handles.text37,'String',Crbr)  
set(handles.text39,'String',Prescr)
```

```

        end
    end
    AntHombro1=hombro1

function slider2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on slider movement.
function slider3_Callback(hObject, eventdata, handles)

global valhombro2 AntHombro2 hombro2
hombro2 = get(hObject,'Value');
valhombro2 = round(hombro2)-100;
%auxvalhom =valhombro2+100;
set(handles.text8,'String',valhombro2);
set_param('ArmShoulderAss/Constant6','Value',num2str(valhombro2))

valhombro2

if hombro2~=AntHombro2;%Flexion
    if hombro2>AntHombro2;
set(handles.text44,'String','FLEXION');
%Deltoides
Delt2=(-1e-08)*(hombro2^3) - (3e-07)*(hombro2^2) + 0.0004*hombro2 +
0.1136;
PresD2=(-1)*(-0.124*Delt2^4 - 1.0253*Delt2^3 - 2.8884*Delt2^2 -
4.1684*Delt2 + 0.1928);

set(handles.text47,'String',Delt2);
set(handles.text49,'String',PresD2);
    end
    if hombro2<AntHombro2;
set(handles.text44,'String','EXTENSION');
%Latissimus
Lat =(-8e-07)*(hombro2^2) + 0.0002*hombro2 + 0.1703;
PresLat=(-1)*(-0.124*Lat^4 - 1.0253*Lat^3 - 2.8884*Lat^2 - 4.1684*Lat
+ 0.1928);
set(handles.text48,'String',Lat)
set(handles.text50,'String',PresLat)

%Pectoral
Pec =(-1e-06)*hombro2^2 - 0.0001*hombro2 + 0.1344;
PresPec=(-1)*(-0.124*Pec^4 - 1.0253*Pec^3 - 2.8884*Pec^2 - 4.1684*Pec
+ 0.1928);
set(handles.text52,'String',Pec)
set(handles.text53,'String',PresPec)
end
end
AntHombro2=hombro2;
function slider3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```
% hObject    handle to slider3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on button press in MovCodo.

% --- Executes on button press in pushbutton7.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
open('FlexExtenCodo.fig'); % open GUI_2 and save the handle
```

## ANEXO B

### Código Fuente del diseño de la simulación en OpenSim

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<OpenSimDocument Version="30000">
  <Model name="MoBL_ARMS_Upper_Limb_Model_OpenSim-scaled">

    <length_units>meters</length_units>
    <force_units>N</force_units>
    <!--Acceleration due to gravity.-->
    <gravity> 0 -9.80665 0</gravity>
    <!--Bodies in the model.-->
    <BodySet>
      <objects>
        <Body name="ground">
          <mass>0</mass>
          <mass_center> 0 0 0</mass_center>
          <inertia_xx>1</inertia_xx>
          <inertia_yy>1</inertia_yy>
          <inertia_zz>1</inertia_zz>
          <inertia_xy>0</inertia_xy>
          <inertia_xz>0</inertia_xz>
          <inertia_yz>0</inertia_yz>
          <!--Joint that connects this body with the parent body.-->
          <Joint />
          <VisibleObject>
            <!--Set of geometry files and associated attributes, allow .vtp, .stl, .obj-->
            <GeometrySet>
              <objects />
              <groups />
            </GeometrySet>
            <!--Three scale factors for display purposes: scaleX scaleY scaleZ-->
            <scale_factors> 1 1 1</scale_factors>
            <!--transform relative to owner specified as 3 rotations (rad) followed by 3 translations rX rY rZ tX tY tZ-->
            <transform> 0 0 0 0 0 0</transform>
```

```

          <Joint />
          <VisibleObject>
            <!--Set of geometry files and associated attributes, allow .vtp, .stl, .obj-->
            <GeometrySet>
              <objects />
              <groups />
            </GeometrySet>
            <!--Three scale factors for display purposes: scaleX scaleY scaleZ-->
            <scale_factors> 1 1 1</scale_factors>
            <!--transform relative to owner specified as 3 rotations (rad) followed by 3 translations rX rY rZ tX tY tZ-->
            <transform> 0 0 0 0 0 0</transform>
            <!--Whether to show a coordinate frame-->
            <show_axes>false</show_axes>
            <!--Display Pref. 0:Hide 1:Wire 3:Flat 4:Shaded Can be overridden for individual geometries-->
            <display_preference>4</display_preference>
          </VisibleObject>
          <WrapObjectSet>
            <objects />
            <groups />
          </WrapObjectSet>
        </Body>
        <Body name="thorax">
          <mass>0</mass>
          <mass_center> 0 0 0</mass_center>
          <inertia_xx>0</inertia_xx>
          <inertia_yy>0</inertia_yy>
          <inertia_zz>0</inertia_zz>
          <inertia_xy>0</inertia_xy>
          <inertia_xz>0</inertia_xz>
          <inertia_yz>0</inertia_yz>
          <!--Joint that connects this body with the parent body.-->
          <Joint>
```