

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

Beltrán B. Laura A. , Oscar F. Avilés S., Mauricio Mauledoux.  
U1801960, oscar.aviles, Mauricio.mauledoux@unimilitar.edu.co  
UMNG

*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.

*Índice de Términos*— prototipo, músculo, neumática, caracterización, movimiento, rotación , válvulas.

## I. INTRODUCCIÓN

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 biomecatrónicos 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?

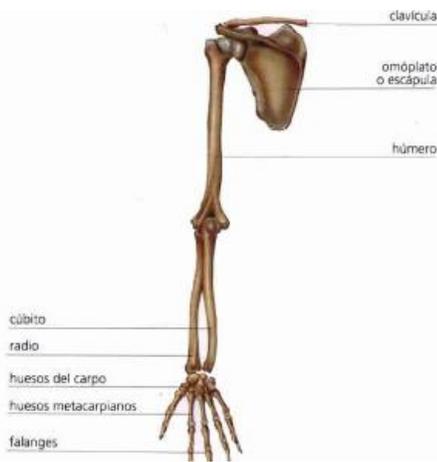
## II. MARCO TEÓRICO

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 [1], 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.

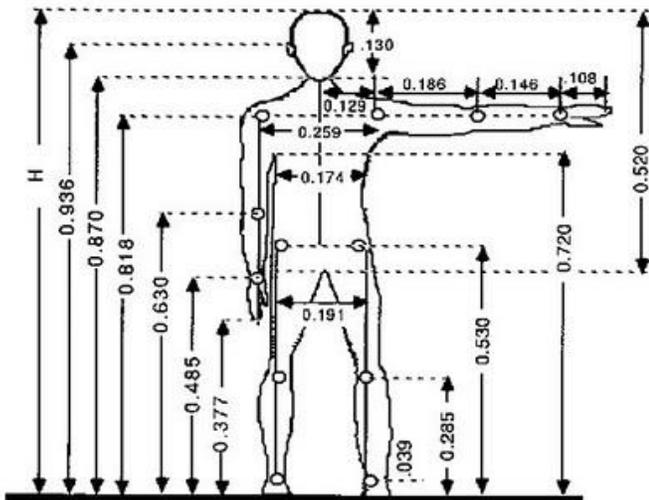
El brazo es un organo bastante util para actividades diarias que tienen que ver con fuerza física y ademas intervienen en las funciones del equilibrio. Los musculos de los brazos son de los mas potentes del cuerpo humano. Se definen como la extremidad que va desde la mano hasta el homoplato por el húmero [2].

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 1.



**Figura 1 Estructura ósea del brazo humano**

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 2, las medidas están dadas en metros.

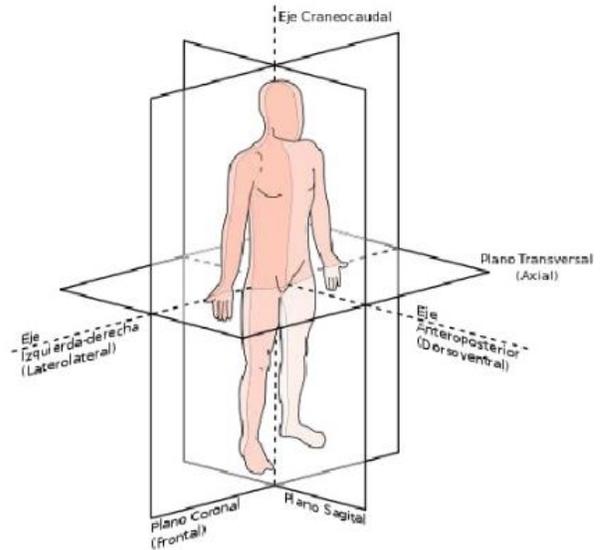


**Figura 2 Medidas Antropomorfas**

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

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.



**Figura 3 Planos del cuerpo humano**

**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.

### FLEXIÓN Y EXTENSIÓN DEL BRAZO

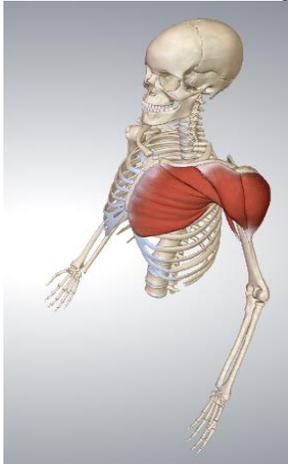
Intervienen: Bíceps contraído, Tríceps relajado como en la figura



**Figura 4** Músculos que intervienen en la Flexión del brazo

### FLEXIÓN Y EXTENSIÓN DEL HOMBRO

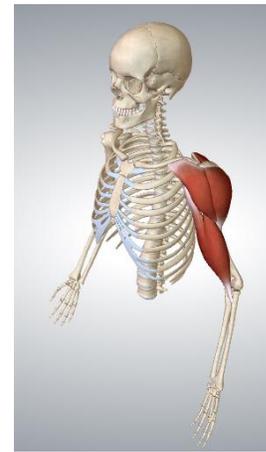
Deltoide anterior, Pectoral Mayor, bíceps y músculo coracobraquial, músculos mostrados en la figura



**Figura 5** Músculos que intervienen en la flexión del hombro

### ABDUCCIÓN Y ADUCCIÓN DEL HOMBRO

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



**Figura 6** Músculos que intervienen en la aducción del hombro

### MÚSCULO NEUMÁTICO

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).

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 7** Músculo Neumático Festo

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

### III. ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MÚSCULO NEUMÁTICO

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 8 Primer Prototipo de músculo Neumático**

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 “

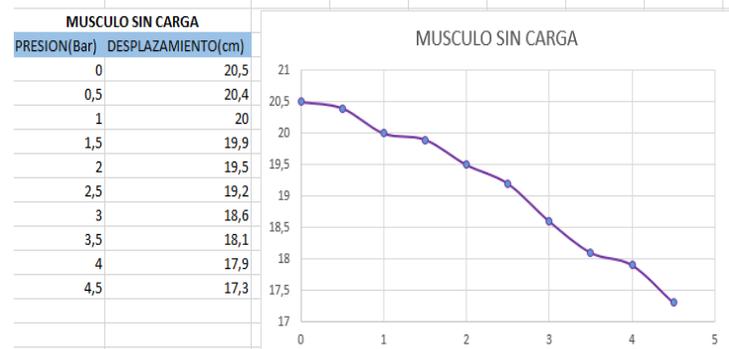
Para realizar este procedimiento, cabe destacar que se tomó como referencia un musculo con las siguientes dimensiones:

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 se muestra el músculo con carga y sin carga en montaje real.

**Tabla 1 Caracterización músculo sin carga**



Con los datos obtenidos en la tabla 1 se interpola para determinar la ecuación que define el comportamiento del músculo:

**Ecuación 1 Comportamiento del músculo sin carga**

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

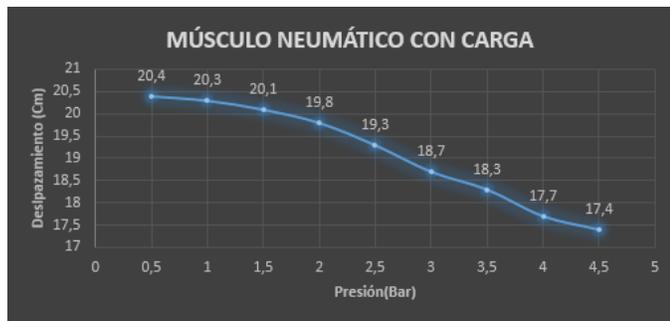


**Figura 9 Músculo Neumático Casero**

### CARACTERIZACIÓN MÚSCULO NEUMÁTICO

**Tabla 2 Caracterización músculo con carga**  
CARACTERIZACIÓN MÚSCULO CON CARGA

Presión (Bar)	DESPLAZAMIENTO(cm)	FUERZA EJERCIDA POR EL MÚSCULO (N)			
0	20,5	0			
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 10 Gráfica de caracterización**

**Ecuación 2 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 se observa el comportamiento del músculo con carga.

**IV. DISEÑO Y SIMULACIÓN MECÁNICA DEL BRAZO ANTROPOMÓRFICO**

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.

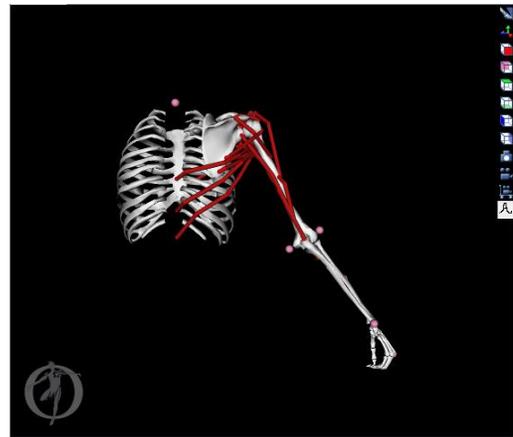
Se exportó a SolidWorks para trabajar el brazo con Simmechanics y poder controlar los ángulos de rotación de cada una de las articulaciones desde Matlab, cabe destacar que el modelo que se realizó en Maya guarda las características de diseño al exportarlo a SolidWorks como se observa en la figura



**Figura 11 Diseño CAD en SolidWorks**

**A. 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



Teniendo el punto de referencia como el tórax, 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° a 130°,

la elevación del hombro (flexión) se maneja de 0° a 180° ( movimiento del hombro de arriba abajo) en orientación perpendicular al eje del toráx, la rotación del hombro se encuentra entre -90° a 20°. Los cuales están definidos en la figura 35.

En el caso del brazo, para la flexión se maneja un rango de 0° a 130°.

A continuación se mostrarán en las figuras 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.

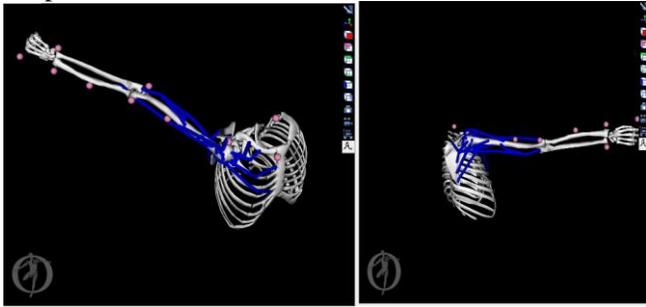


Figura 12 Movimiento Flexión Hombro

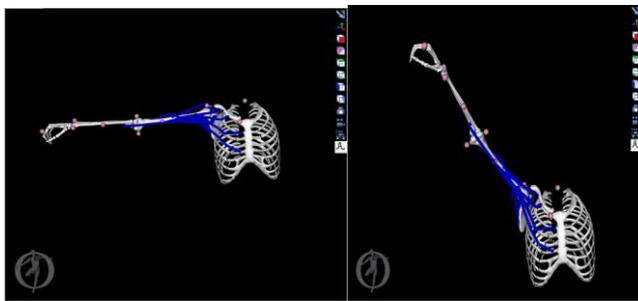


Figura 13 movimiento Aducción Hombro

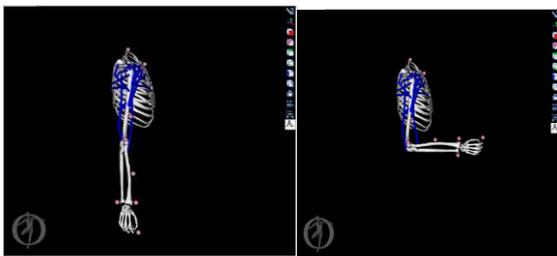


Figura 14 Movimiento flexión Codo

MOVIMIENTO FLEXION CODO

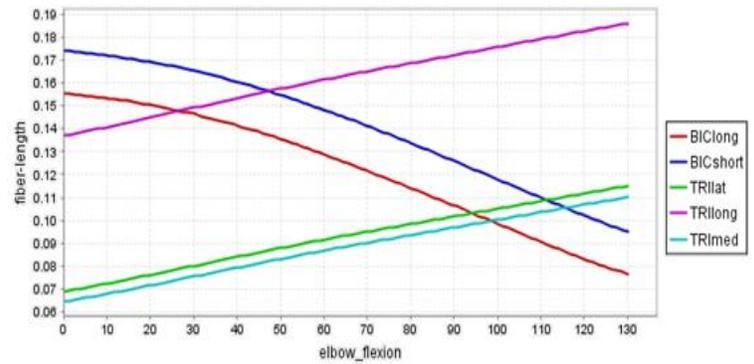


Figura 15 Grafica Flexión OpenSim

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.

FLEXION HOMBRO

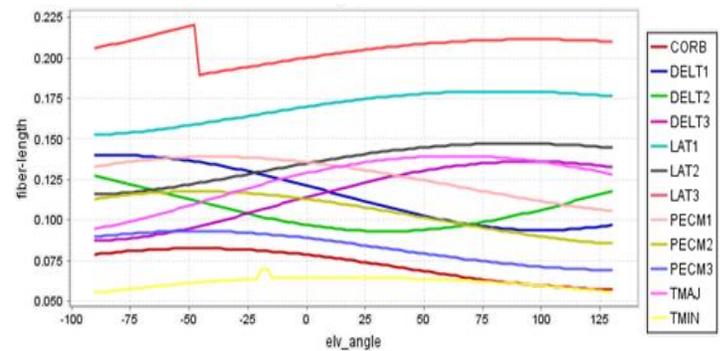


Figura 16 Grafica Flexión Hombro OpenSim

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.

ADUCCIÓN HOMBRO

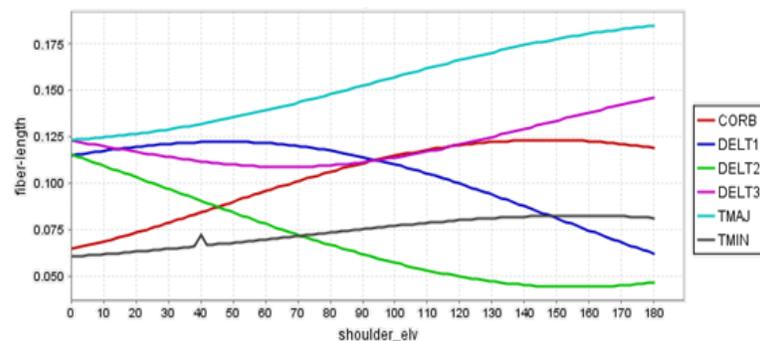
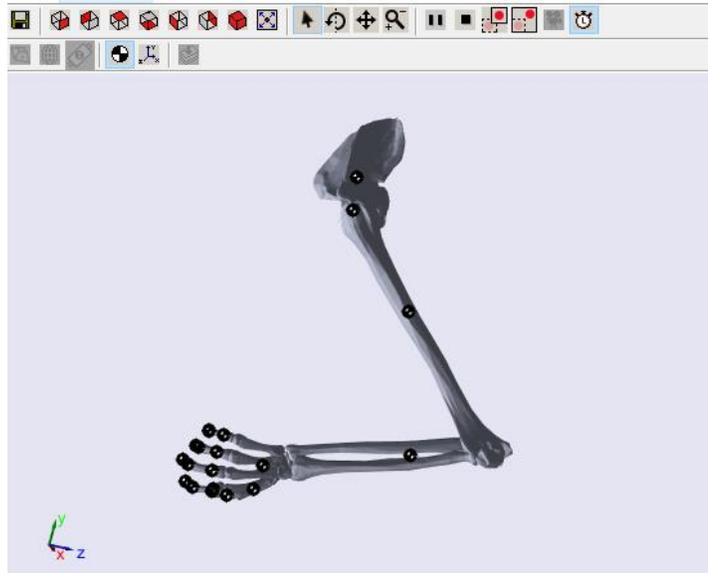


Figura 17 Grafica Aducción Hombro OpenSim

**B. DESARROLLO DE INTERFAZ EN MATLAB**

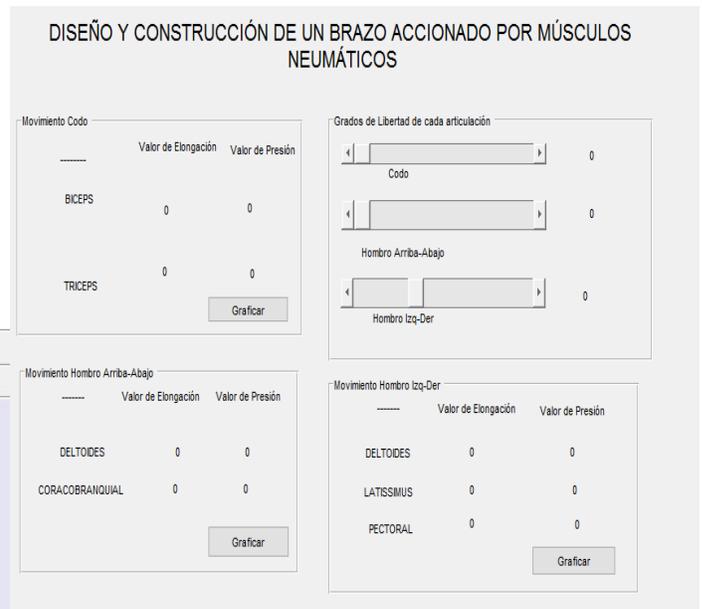
Para poder implementar el modelo CAD desarrollado en MATLAB, es necesario el uso de Simmechanics, el modelo de SolidWorks se exporta en formato XML, seguidamente tras haber instalado los complementos necesarios, se abre en Matlab el cual lo convierte a formato SLX (Simulink). Bajo los diagramas de bloques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



**Figura 18 Modelo Simmechanics MATLAB**

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.

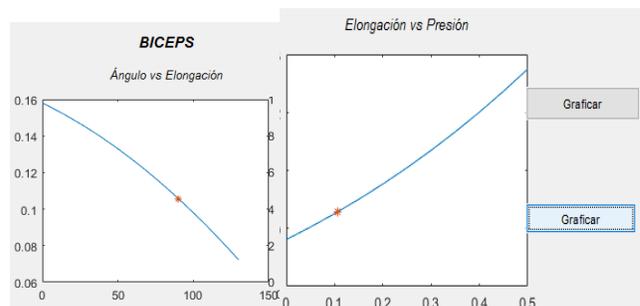
En la interfaz se muestra el valor de la elongación de cada músculo implementado para los movimientos, además del estado en el que se encuentra, por ejemplo, si el brazo está disminuyendo el ángulo quiere decir que está en extensión mientras que si aumenta está en flexión, y finalmente, según las ecuaciones,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



**Figura 19 Interfaz Gráfica Matlab**

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.

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



**Figura 20 Gráfica de Elongación- presión**

En el caso del Triceps a 90° 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 21 Variación de ángulo en simulación**

## V. CONSTRUCCIÓN Y COMPARACIÓN MODELO FISICO CON SIMULACIÓN DEL BRAZO ANTROPOMÓRFICO

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.

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.



**Figura 22 Racores músculo Neumático**

Finalmente, el modelo final cuenta con los grupos musculares mencionados en el documento, un músculo compone el tríceps, 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.

### A. PRUEBAS DE MOVIMIENTO REAL Y EN SIMULACIÓN

En el laboratorio de automatización de la Universidad Militar Nueva granada se realizó el montaje del prototipo, se implementó un distribuidor de aire de Festo.



**Figura 23 Multiplexor Neumático**

### FLEXIÓN Y EXTENSIÓN DEL CODO



**Figura 24 Flexion Extension Prototipo**

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° 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°, 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 25 Flexion Extensión Hombro Prototipo**

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 26 Aducción Hombro Prototipo**

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

## VI. 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.

Otro de los aspectos que cabe destacar en cuanto a precisión es mencionado anteriormente, la falta de músculos para lograr un movimiento más estable y similar.

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, claramente es necesario 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 a

mi parecer una de las más importantes, el acople al sistema óseo.

*Memorias del XV Congreso Internacional anual de la SOSIM, Sonora, México, 2009.*

#### 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 Dymanic 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 Universitat 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 Palastsga, 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 Anátomo 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

[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.