

# Brazo Robótico Actuado por Músculos Neumáticos

Aguirre Cerrillo Fabio Abel, Villarreal Gutiérrez Mario Raúl,  
 Bautista Quintero Ricardo y Santiesteban Cos Raúl

Departamento de Metal-Mecánica, Instituto Tecnológico de Culiacán  
 Juan de Dios Batiz s/n, Col. Guadalupe, C.P. 80220, Culiacán, Sinaloa, México  
 Tel (667)7133804, E-mail: [fabio.aguirre@itculiacan.edu.mx](mailto:fabio.aguirre@itculiacan.edu.mx)

## Resumen

*En este trabajo se presenta la construcción de un brazo robótico de 2 grados de libertad para ser usado como prototipo de equipo didáctico. Se describe el funcionamiento de los actuadores utilizados en el movimiento del prototipo, esto es, músculos neumáticos. Se muestra la construcción del prototipo y la forma en que realiza los movimientos, flexión y extensión. El músculo neumático es controlado por medio de válvulas neumáticas proporcionales. El sistema de control es por retroalimentación y se utiliza un control del tipo PID.*

**Palabras clave:** Brazo robótico, músculo neumático, movimientos, control PID.

## 1. Introducción

Desde las eras primitivas que se tiene registro, el ser humano siempre ha tenido un gran interés por el conocimiento. Los principios físicos, químicos, el universo, la biología, entre otros muchos más. El cuerpo humano no es la excepción y siempre se ha querido emular los movimientos, características y funcionalidad de todas y cada una de sus partes.

En la mecatrónica y en la robótica se ha aprovechado todo el conocimiento posible para lograr similitudes con el ser humano al inspirarse en la naturaleza. Robots antropomórficos como Zwei Arm Roboter (ZAR) de la Universidad Técnica de Berlín [1] y el Airic's\_arm de Festo [2] son solo algunos ejemplos que abre nuevas posibilidades de desarrollo.

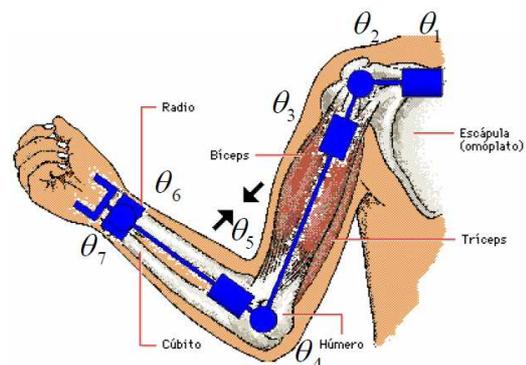
La Robótica es una tecnología multidisciplinaria. Hace uso de todos los recursos de vanguardia de otras ciencias afines, que soportan una parcela de su estructura. Destacan las siguientes: Mecánica, Cinemática, Dinámica, Matemáticas, Automática, Electrónica, Informática, Energía y actuadores eléctricos, neumáticos e hidráulicos.

Significa entonces que es sumamente importante que las instituciones de educación superior formen alumnos altamente competentes para afrontar la vida profesional. Para que los alumnos sean un capital humano de calidad es indispensable que las instituciones cuenten con equipo didáctico para trabajar en los laboratorios.

El presente trabajo presenta la construcción de un brazo robótico que tiene dimensiones antropomórficas con movimientos de flexión y extensión para ser utilizado como equipo didáctico.

## 2. El brazo humano

En la figura 1 se muestra un brazo humano junto con los movimientos que puede realizar representados por los ángulos  $\theta_1$  a  $\theta_7$ . Los rangos de movilidad se muestran en la tabla 1 [3].



**Figura 1. Movimientos del brazo humano.**

Tabla 1. Rangos de movilidad del brazo humano (°).		
Hombro	$\theta_1$	-180 a 50
	$\theta_2$	-90 a 90
	$\theta_3$	-90 a 0
Codo	$\theta_4$	0 a 145
	$\theta_5$	-90 a 90
Muñeca	$\theta_6$	-55 a 25
	$\theta_7$	-70 a 90

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

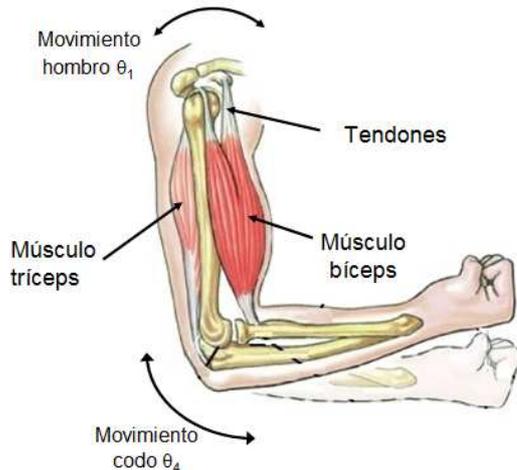


Figura 2. Movimiento de flexión y extensión del codo.

Por otro lado, las dimensiones estándar de las diferentes partes del cuerpo humano son función de la altura del individuo y se muestra en la figura 3 [4]. Si un individuo tiene una altura  $H$  de 185 centímetros, la distancia de su hombro al codo es de  $0.186H$  y que es igual a 34.41 centímetros.

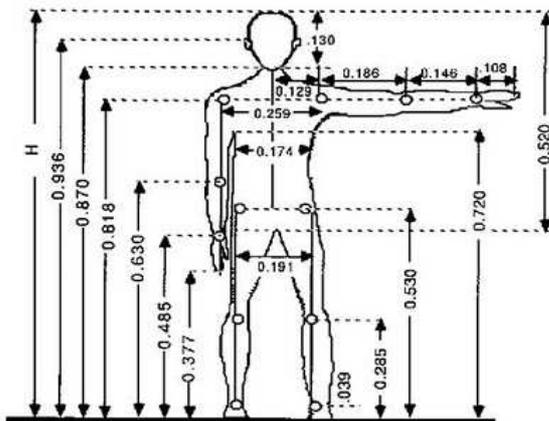


Figura 3. Dimensiones del ser humano [4].

### 3. El músculo neumático

El músculo neumático es un actuador de tracción que imita la funcionalidad de un músculo humano; consiste en una membrana flexible y resistente a la tracción accionada por aire, otros gases

o líquidos, su forma es cilíndrica y la relación entre la fuerza y la masa es de aproximadamente 400:1 [5].

Generalmente, el músculo neumático está compuesto por un tubo flexible contráctil. El tubo flexible está formado por una goma estanca y resistente a la presión. Además tiene una capa de fibras altamente resistentes como lo muestra la figura 4. Las fibras están dispuestas en forma de rombos formando una estructura reticulada tridimensional [2].



Figura 4. Forma reticular del músculo neumático [3].

Aplicando una presión interior, la periferia se dilata (aumenta el diámetro del músculo), con lo que se obtiene una fuerza de tracción y un movimiento de contracción a lo largo del músculo neumático. La fuerza de tracción es máxima al principio del movimiento de contracción y disminuye al aumentar la carrera. El músculo reacciona a un cambio pequeño de la presión en su interior para obtener un cambio pequeño en la contracción y trabaja desde 0 kPa hasta una presión máxima (regularmente de 600 kPa a 800 kPa que equivale a 6 a 8 bar, respectivamente).

El accionamiento de los músculos neumáticos es muy sencillo y se pueden controlar con una válvula neumática 3/2 vías para un control de todo o nada. En la figura 5 se muestra una fotografía de un músculo para dos condiciones diferentes, una de ellas sin presión y la otra con el músculo presurizado.

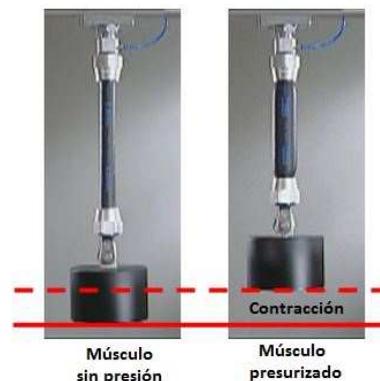


Figura 5. Contracción del músculo neumático.

La contracción del músculo neumático es de hasta un 25% de su longitud nominal aunque para aplicaciones dinámicas se recomienda utilizar sólo un 10% de contracción. Por no contener partes móviles, el músculo neumático tiene nulo mantenimiento.

El tamaño de los músculos esta dado por la longitud y el diámetro interior. La longitud es configurable. En el diámetro los hay de 10, 20 y 40 mm, comercialmente hablando [6].

## 4. El brazo robótico

### 4.1 Diseño del brazo

Para la diseño del prototipo en el presente trabajo se considera solamente el movimiento de dos ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , mostrados en la figura 2 antes mencionada. El ángulo  $\theta_2$  en lo sucesivo se le denomina  $\theta_2$ .

En la figura 6 se muestra el diseño mecánico del brazo robótico realizado con SolidWorks. Sobre una mesa se tiene una especie de T, la cual sirve de base para el montaje del brazo. Se tienen dos poleas, una en el hombro y otra en el codo. Cada uno de los músculos se conecta a las poleas por medio de un cable tensor. El músculo del hombro tiene 800 mm de longitud y 20 mm de diámetro interior (DMSP-800-20 ... de FESTO). El músculo del codo tiene 120 mm de longitud (DMSP-140-20 ... de FESTO) [6]. El músculo se contrae al suministrarle aire a presión y el movimiento lineal se transforma en un movimiento angular. La presión en el interior del músculo se gobierna por medio de una válvula proporcional de presión (VPPM-6L-L-1-G18-OL-10H-V1-P-S1 de FESTO) [6].

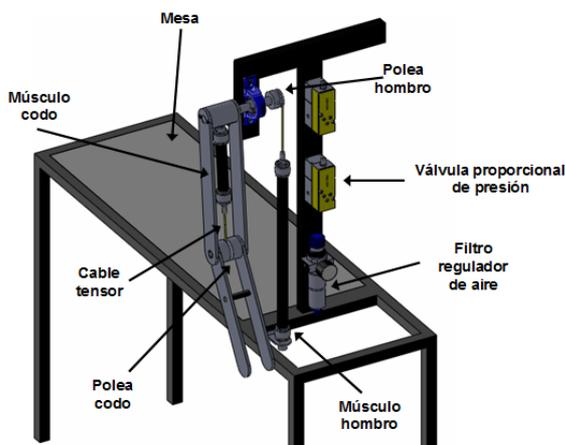


Figura 6. Diseño mecánico del brazo robótico.

Las longitudes y ángulos del brazo robótico se muestran en la figura 7. El movimiento del hombro  $\theta_1$  es de 0 a 135° y para el codo  $\theta_2$  es de 0 a 90°.

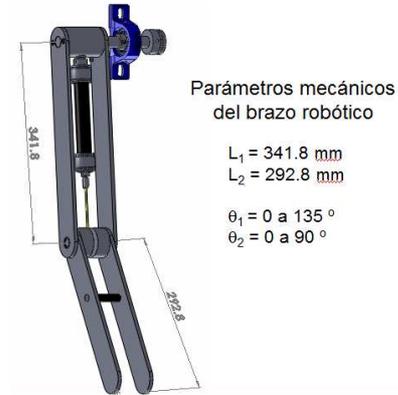


Figura 7. Parámetros del brazo.

Para obtener el ángulo de giro del hombro y del codo se ha montado un sensor efecto Hall. El sensor es el EM-3242 de GMW (ver figura 8). En el eje se incrusta un imán. Al girar el eje, gira el imán y el sensor de efecto hall detecta un cambio de las líneas de campo magnético entregando un voltaje de salida analógico proporcional de 0.5 a 4.5 VCD para un giro de 0 a 360 grados. El sensor se alimenta con un voltaje de 5 VCD.

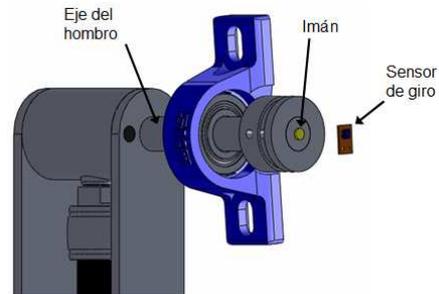


Figura 8. Montaje del sensor de giro.

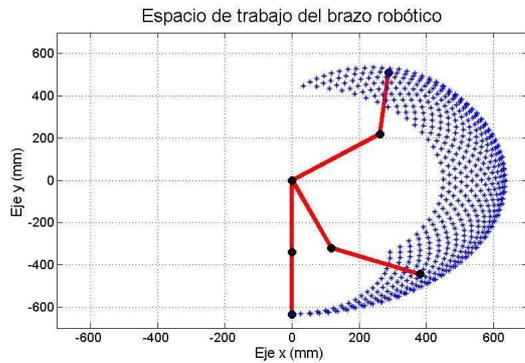
### 4.2 Cinemática directa y espacio de trabajo

Una vez definido el diseño y conociendo los parámetros del prototipo es posible obtener el espacio de trabajo. La cinemática directa del brazo esta dada por las ecuaciones (1.1) [7].

$$\begin{aligned} P_x &= L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ P_y &= -L_1 \cos(\theta_1) - L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (1.1)$$

Significa que es posible conocer los puntos finales  $P_x$  y  $P_y$  conociendo las longitudes  $L_1$ ,  $L_2$  y los ángulos de giro  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ .

Con ayuda de Matlab y utilizando las ecuaciones (1.1) se ha graficado el espacio de trabajo mostrado en la figura 9. Nótese que se han graficado la posición de los eslabones para tres puntos finales distintos de  $P_x$  y  $P_y$ .



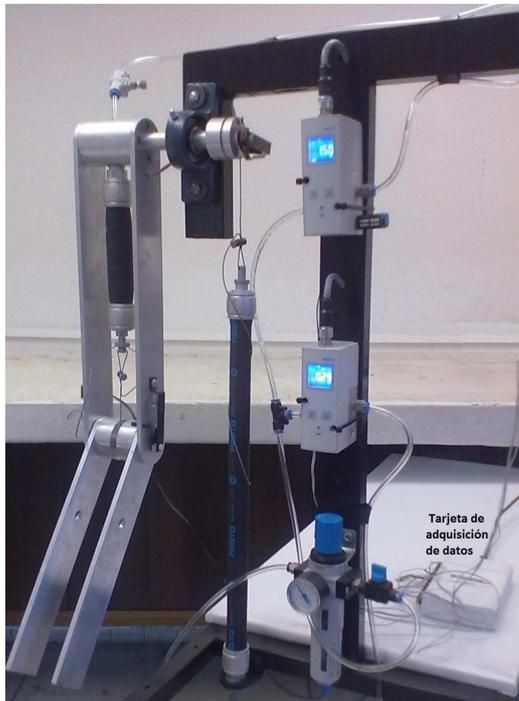
**Figura 9. Parámetros del brazo.**

#### 4.3 Construcción del brazo

En la figura 10 y 11 se puede ver la construcción final del brazo. Se puede ver que por cada movimiento se tiene un músculo neumático, un cable tensor, una válvula de presión proporcional y un sensor de giro de efecto hall.



**Figura 11. Hombro y codo flexionado del brazo.**



**Figura 10. Brazo robótico (codo flexionado).**



**Figura 12. Hombro del brazo.**



**Figura 13. Codo del brazo.**

En la figura 12 y 13 se muestra la parte del hombro y codo, respectivamente, del brazo.

## 5. Resultados

Para llevar el hombro o el codo a una posición angular deseada se ha implementado un control proporcional, integral y derivativo (PID). En la figura 14 se muestra el flujo de las señales. Por medio del sensor se obtiene el valor del ángulo y el dato es enviado a la tarjeta de adquisición de datos (NI-USB 6211 de Nacional Instruments [8]), para su ingreso a la computadora vía USB. En función de la señal de entrada y un programa que contiene el control PID, se genera una señal de salida que va a la válvula proporcional. La válvula genera una presión determinada para incrementar o decrementar la presión de aire en el interior músculo y generar el movimiento de giro deseado. El programa ha sido realizado con LabVIEW [9] y [10].

La válvula proporcional de presión tiene una señal de salida que proporciona el valor de presión de salida y por tanto el músculo.



Figura 14. Flujo de señales para el control.

En la figura 15 se muestra la respuesta del hombro para diferentes valores de  $\theta_1$ . Los valores son: 45, 60, 30, 70, 50 y 0 grados. Todas las posiciones se han alcanzado después de la respuesta transitoria.

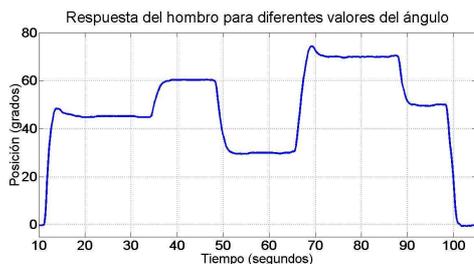


Figura 15. Respuesta del hombro  $\theta_1$ .

Para el codo, en la figura 16 se muestra la respuesta para diferentes valores de  $\theta_2$ . Los valores son: 45, 15, 60, 30, 90 y 0 grados.

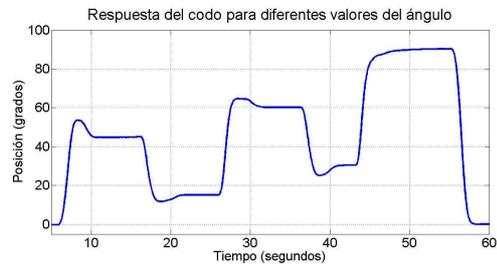


Figura 16. Respuesta del codo  $\theta_2$ .

En la figura 17 se muestra la presión de aire interna del músculo del hombro para diferentes posiciones  $\theta_1$ . Parte de  $20^\circ$ , luego es llevado a  $75^\circ$  para terminar en  $30^\circ$ .

Observe que la gráfica de posición y de presión son semejantes en forma. Esto sucede que a mayor presión se tiene una mayor contracción y por tanto un mayor ángulo de giro. A menor presión se tiene una menor contracción y un menor ángulo de giro. La misma situación se observa en el movimiento del codo  $\theta_2$  tal y como lo muestra la figura 18.

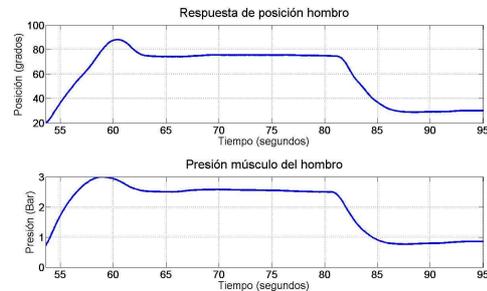


Figura 17. Posición hombro y su presión en el músculo.

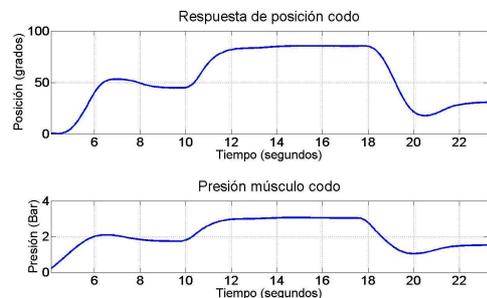


Figura 18. Posición codo y su presión en el músculo.

## 6. Conclusiones

Se ha construido un brazo robótico de 2 grados de libertad actuado por músculos neumáticos. Se ha mostrado que es posible controlar la posición del ángulo por medio de un control PID y los resultados motivan el desarrollo de otros trabajos utilizando el aire comprimido.

Como trabajos futuros, se pretende generar material didáctico para utilizarlo en la formación de la Robótica y de la Mecatrónica. Es necesario trabajar con la cinemática directa e inversa y además, generar trayectorias dentro del espacio de trabajo para analizar el comportamiento del brazo robótico.

Las señales y el hardware tienen una estructura abierta por lo que es posible utilizar sistemas embebidos para el control del brazo robótico. De igual forma, se pueden implementar diferentes esquemas y leyes de control.

Aunque el objetivo del presente trabajo es utilizarlo como equipo didáctico, los resultados se pueden utilizar para extrapolarlos y analizar su aplicación en sistemas de rehabilitación en extremidades del cuerpo humano

## Agradecimientos

Un agradecimiento al Ing. Manuel de Jesús Barrantes Beltrán del laboratorio de Ingeniería Industrial y al Ingeniero José Valerio Quintero Ramírez del Departamento de Metal-mecánica, ambos del Instituto Tecnológico de Culiacán, por su ayuda en la construcción mecánica.

## Referencias

- [1] Technische Universität Berlin, “*FG Bionik und Evolutionstechnik & EvoLogics GmbH*”, F&E Labor Bionik, Berlin, Germany.2006. [www.zar-x.de](http://www.zar-x.de)
- [2] Stoll, W., “*Airic’s\_arm Robot Arm with fluid muscle*”, Info 50115 Festo Ag & Co. Kg, Alemania, 2007.
- [3] Hernández, Carlos Santos y Montaya, Carlos Francisco García, “*Diseño de un Sistema Emulando el Movimiento Articulado de una*

*mano, brazo y antebrazo.*”, Tesis de maestría Ingeniería Mecatrónica CENIDET, Cuernavaca México, 2007.

- [4] Guzman, Arturo, “*Unidad 6 Antropometría aplicada*”, Agosto 2011. <http://ergonomia2010.wordpress.com>
- [5] Hesse, Stefan, “*El músculo neumático y sus aplicaciones*”, Blue Digest on Automation, Festo AG & Co, Esslingen, Alemania, 2003.
- [6] FESTO, “*Catálogo de Productos DKI Versión 9*”, Festo AG & Co, Esslingen, Alemania, 2008. [www.festo.com.mx](http://www.festo.com.mx).
- [7] Kelly, Rafael y Santibáñez, Victor “*Control de Movimientos de Robots Manipuladores*”, Editorial Pearson Educación SA, Madrid, 2003
- [8] National Instruments, “*NI USB-621x Specifications*”, National Instruments Corporation , 2006.
- [9] National Instruments , “*Getting Started with LabVIEW*”, Versión 8.20 Austin Texas, USA, 2006.
- [10] Lajara, José Rafael Vizcaíno y Pelegrí, José Sebastián, “*LabVIEW Entorno gráfico de programación*”, Alfaomega, México, 2007.