

# Control de Señales EMG para el Movimiento de un Brazo Robótico de Tres Grados de Libertad

Gustavo Aguirre Vargas<sup>1</sup>, Ángel Flores Abad<sup>1</sup>, Noé Alba Baena<sup>1</sup>,  
Juan Carlos Acosta Guadarrama<sup>1</sup>, Ismael Canales Valdiviezo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

## Resumen

El área de investigación de los exoesqueletos es aún muy joven, y con muchas posibilidades de ampliar el conocimiento en cuanto al control de estos dispositivos, en la literatura se pueden encontrar diferentes formas de cómo realizar un control efectivo y una de estas es el realizado mediante lógica difusa. Este documento presenta un sistema de adquisición de señales electromiográficas, formado por 5 canales que por medio de electrodos colocados en la piel, mandan las señales provenientes de los músculos cuando existe un potencial de acción en ellos. Estas señales son amplificadas, filtradas y digitalizadas con el objetivo de analizar los resultados en una computadora. Por medio de un control difuso de 23 reglas basadas en valores lingüísticos, estas señales serán utilizadas para imitar el movimiento de flexión del brazo, flexión y abducción del hombro en un brazo robótico de 3 grados de libertad, probando que se puede obtener más del 90% de movimientos exitosos.

**Palabras clave:** Exoesqueleto, EMG, control, señales, fuerza.

## Introducción

Desde la antigüedad la ciencia se ha interesado en el diseño y desarrollo de máquinas con el objetivo de imitar movimientos y articulaciones de los diferentes seres vivos, principalmente las del ser humano.

Este particular interés y los grandes avances en tecnología que en los últimos años han avanzado exponencialmente, se ha podido incursionar en estudios relacionados a los exoesqueletos, aquellos dispositivos mecatrónicos formados por segmentos y articulaciones colocados en las extremidades

del cuerpo humano, lo que comúnmente se le llama “wearable robot” robot que se puede poner (Rocon & Ruiz, 2010).

Actualmente existen dos grandes ramas en el estudio de los exoesqueletos, los utilizados para el incremento de las funciones motoras del cuerpo humano, y aquellos enfocados a la medicina de rehabilitación.

La primer rama es comúnmente utilizada en áreas de investigación militar, ya sea en el aumento de fuerza, velocidad, o resistencia del usuario, es el caso del

exoesqueleto conocido como el HULC (Human Universal Load Carrier) capaz de levantar hasta 200 libras por grandes periodos sin afectar la resistencia del usuario (Mertz, 2012).

La segunda rama de estudio de los exoesqueletos son aquellos enfocados en la industria médica de rehabilitación, como el Exso Bionics uno de los últimos exoesqueletos comerciales, es un dispositivo que ayuda en el caminar de los individuos parapléjicos, actualmente puesto a disposición de las clínicas en Denver Colorado para su evaluación en pacientes inválidos (Mertz, 2012).

Es recomendable utilizar señales electro-miográficas (EMG) para el control de un exoesqueleto de manera no invasiva, ya que se obtendrá una señal directamente del músculo que se desea estudiar, utilizando información de importancia para el conocimiento de la fuerza ejercida por los músculos y el comportamiento de éste.

En la literatura se ha podido encontrar algunas alternativas en el control de exoesqueletos, no existe un procedimiento establecido para la adquisición de este tipo de señales, así que se encontraron algunos métodos con los que han logrado manipular los movimientos de brazos robóticos.

Ranathunga Arachilage utiliza un control difuso para el control de las señales EMG, implementado en un exoesqueleto conformado por la articulación de un brazo robótico de tres grados de libertad, asistido por la fuerza del antebrazo cuando las señales no es suficiente y los niveles EMG

son muy bajos. Su función es controlada por la adquisición de seis canales EMG y la señal de un sensor de fuerza en la muñeca, tiene una clasificación de 46 combinaciones para la correcta activación de los dispositivos con valores previamente definidos como positivo, bajo-positivo, alto-positivo, bajo-negativo y alto negativo (Arachilage, 2008).

Otros modelos han utilizado el control de extremidades robóticas por el método de redes neuronales, identificando el movimiento de flexión y extensión de los dedos de la mano, con la colocación de 3 sensores EMG en los músculos flexor profundo, flexor largo del pulgar y extensor común. El control de brazo robótico se basa en la lectura de las señales EMG y su clasificación basado en una red neuronal utilizando la transformada wavelet y entropía (Zhao, Xie, Jiang, Cai, Liu, & Hirzinger, 2006).

Panagiotis K. Artemiadis utiliza las señales EMG de los músculos de las extremidades superiores para el control de una interfaz entre el usuario y un brazo robótico, las señales son adquiridas desde electrodos superficiales colocados en la piel del usuario. Esta interfaz permite controlar en tiempo real un brazo robot antropomórfico en un espacio de tres dimensiones, robusto al cambio de los canales con respecto al tiempo, causado por la fatiga muscular o los ajustes de los niveles de contracción (Artemiadis, 2010).

Sebastiain Bitzer introdujo un método basado en el vector de soporte de máquina, una poderosa herramienta de clasificación de señal, detectando acciones

de abierto y cerrado de los dedos de la mano solo en base a los pulsos EMG. El método muestra ser robusto y no ser afectado por los movimientos del brazo, ya que el método fue adaptado al uso de varios vectores para obtener una clasificación multi-clase. Este criterio puede ser usado para dispositivos con más grados de libertad (Bitzer, 2006).

A partir del estudio realizado para obtener el grado de ingeniero mecatrónico de la Universidad Autónoma de Ciudad

Juárez, en mayo del 2010, donde se desarrolló una prótesis mecatrónica controlada por señales EMG, la cual asistía el movimiento del brazo izquierdo de un niño de 9 años de edad, el cual presentaba una restricción del movimiento de su brazo privándolo de la extensión de sus dedos y pronosupinación debido a una malformación del brazo ocasionado por un accidente, afectando el funcionamiento del nervio radial (Aguirre, 2010) .

## Planteamiento del problema

En la actualidad, el tema de los exoesqueletos es muy joven y con un amplia gama de posibilidades de investigación, la parte comercial en este tema carece de un control realizado por el usuario, y solo son dispositivos robotizados que siguen una programación establecida de acuerdo a la señal de entrada que las alimenta, esta señal si es creada por el usuario, pero carece de un control en el transcurso del movimiento.

Para poder llegar al punto de utilizar un exoesqueleto en el cuerpo humano, es necesario primero copiar los movimientos del usuario, para que exista una conexión en todo momento entre el exoesqueleto y la persona, y una vez imitado el movimiento se

podiera entonces aumentar sus capacidades motoras, como fuerza, resistencia y velocidad.

Dentro del área de investigación de este tema, las señales EMG son utilizadas mayormente solo para identificar la magnitud de fuerza que se está ejerciendo, y menormente consideradas para el movimiento, debido a que estas varían depende del usuario, sus niveles de energía, y que en cualquier movimiento tendremos señales EMG activándose en todo momento, el problema principal sería su clasificación de acuerdo al movimiento realizado y que esta se estandarizara para cualquier usuario.

## Objetivo general

Desarrollar un modelo de adquisición de señales EMG de cinco canales, controlado por lógica difusa, capaz de imitar el

movimiento del brazo humano en un brazo robótico de tres grados de libertad.

## Objetivos particulares.

- Desarrollar un sistema de adquisición de datos cinco canales.
- Diseñar el sistema de control utilizando lógica difusa.
- Diseñar y construir de extremidad superior del exoesqueleto.

## Hipótesis

Esta investigación pretende demostrar que con las señales obtenidas del cuerpo humano, es posible simular a un 95% de confianza, con un error máximo de 0.1, los

movimientos de un brazo de tres grados de libertad por medio de una programación con lógica difusa.

## Procedimiento

Primeramente es necesario censar la señal directamente del músculo, con ayuda de los electrodos de superficie, es necesario amplificar dicha señal, debido a que estos arrojan voltajes muy bajos, alrededor de los 500 micro volts, esta amplificación podría realizarse de dos formas, de manera física, dentro de la circuitería de las tablillas electrónicas y con ayuda de amplificadores instrumentales, o de manera digital, esto es, una vez sensada la señal del músculo, realizar la amplificación por medio de un software, ya sea Labview o Matlab, por nombrar algunos ejemplos, estos significa simplemente multiplicar por una escalar la señal introducida por los electrodos, claro que implicaría más trabajo en el procesamiento de la computadora.

Al llevar acabo la amplificación mencionada, un filtrado en la señal debe realizarse para poder limpiarla de aquellas frecuencias que implican sólo basura en las lecturas registradas, estos filtros, al igual que

la amplificación de la señal puede hacerse de manera digital, por medio de un software, claro que se obtiene una mejor respuesta si se hace directo con los componentes electrónicos.

Se lleva a cabo una segunda amplificación, se debe tener cuidado de no amplificar demasiado la señal y no saturar los amplificadores, ya que esto ocasionaría que nuestra señal no sea totalmente confiable.

Cuando la señal EMG sea capturada correctamente, por medio de una tarjeta de adquisición de datos, con el fin de introducir los datos a la computadora, comenzara entonces nuestra etapa de control utilizando lógica difusa. Pero antes de eso, se debe poder detectar que los niveles de voltaje son similares a los utilizados en la programación, si esto nos arroja un positivo, entonces comenzaremos con el análisis de la señal.

Antes de comenzar con el control difuso, es necesario convertir los valores negativos en positivos para poderlos utilizar en el análisis, existen diferentes formas de realizar este procedimiento, ya se integrando la función EMG, o utilizando el valor RMS.

Con los datos listos para utilizarse, se procederá entonces a introducirlos dentro del control difuso, este control se divide en tres partes importantes, la primera es llamada la fusificación de los datos, esto es tomar los valores obtenidos de las señales EMG y otorgarles valores difusos, los cuales se utilizarán para su análisis.

Estos valores serán valores lingüísticos los cuales se nombrarán de acuerdo a la experiencia y análisis de los primeros datos sensados, seguido de este paso, comenzará entonces la etapa de inferencia del control, esto se realiza con una serie de reglas difusas de las cuales se obtiene una salida determinada de acuerdo a

una combinación de entradas. Entre más reglas contenga nuestro control, más exacta podrá ser nuestra respuesta a los estímulos EMG.

Una vez que se cuenta con esta respuesta es necesario convertirla a valores numéricos que podamos utilizar, a esta etapa del control se le llama defusificación, en nuestro caso de estudio, estas respuestas serán los grados a los cuales se deberá mover nuestro sistema de potencia, y la dirección de que motor realizara este movimiento. Teniendo los datos de la respuesta de nuestro control, se podrán realizar movimientos en los servomotores, imitando los del usuario que utiliza el exoesqueleto. Un soporte adecuado según la mecánica del cuerpo humano, lo que significa un soporte para la columna vertebral y piernas, este proyecto solo se enfocará en la parte superior del cuerpo, dejando la parte inferior para investigaciones futuras.

## Resultados

### Circuito eléctrico

En primer lugar se utiliza un amplificador instrumental INA129PA, es un amplificador de tipo bipolar, el cual será alimentado por dos pilas de 9V conectadas entre sí para obtener un voltaje positivo y uno negativo. Se utiliza una resistencia de 5.49 k ohms, para obtener una ganancia de 10 en este circuito. En los pines 2 y 3 estarán conectados los electrodos que van puestos sobre la piel del usuario.

La salida del circuito mencionado está conectado a un amplificador TL074 para volver a amplificar nuestra señal con una ganancia nuevamente de 10, posteriormente la señal deberá ser filtrada de tal forma que sólo permita el paso a frecuencias mayores de 20 Hz y menores a 500 Hz. Se realiza entonces la configuración de un filtro pasa bandas a partir de dos filtros activos Butterworth de segundo orden conectados en cascada, es decir primero realiza el filtro de la señal dejando pasar todas las señales mayores de 20 Hz y posteriormente se filtrarán las frecuencias

mayores a 500 Hz, este arreglo de filtros es generado también por dos amplificadores TL074. A la salida de este circuito es

conectado otro amplificador para tener otro ganancia de 10, y con esto una ganancia final de 1000, Figura 1.

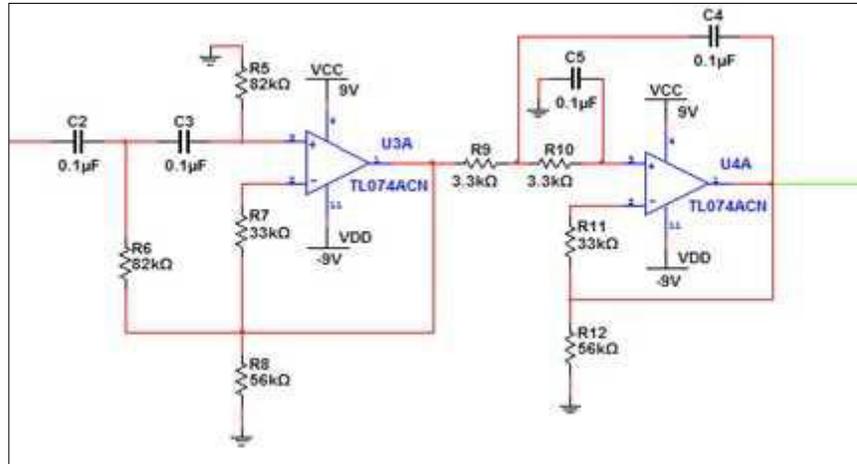


Figura 1. Circuito de los filtros utilizados en la adquisición de la señal

El circuito final cuenta con un arreglo de amplificadores conectados a las resistencias de la ganancia del INA129, y a la malla de los cables de los electrodos, que los envuelve para evitar las corrientes de fuga que pudieran aparecer entre los conductores de los electrodos.

### Sistema de cinco Canales

Se utilizaran electrodos de oro para una mejor recepción de la señal y un gel conductor para ayudar en la conectividad entre el electrodo y la piel del usuario. Los electrodos fueron modificados para poder proteger las señales y evitar que tuvieran pérdidas de frecuencias, los electrodos se colocaron dentro de un cable tipo malla de un 90%, la cual también está conectada a la tablilla electrónica.

Las cinco tablillas son comunicadas entre sí por cables justo a la mitad de las

tarjetas, teniendo un código de colores para su fácil ubicación, amarillo para el voltaje positivo, rojo para la tierra, negro para el voltaje negativo, y el verde son los cables que llevan la conexión del electrodo de referencia hacia cada uno de los circuitos, Figura 2.



Figura 2. Sistema de 5 canales de adquisición de señales EMG

Se realiza entonces el experimento para analizar las señales del cuerpo humano,

con los movimientos de flexión y abducción del hombro y la flexión del brazo, involucrando a los músculos bíceps, tríceps, deltoide, trapecio y flexor superior. La Figura 3 muestra la posición de los electrodos para realizar el experimento.

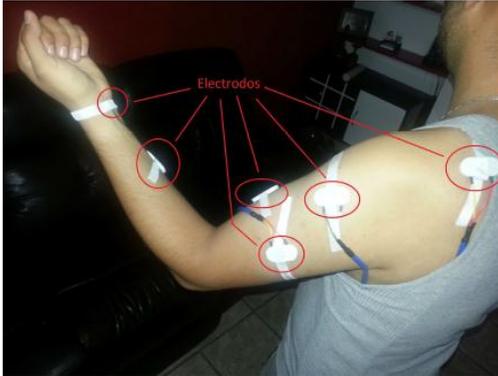


Figura 1 Posición de los electrodos para el experimento

### Control difuso

El análisis obtenido en el experimento, se utilizó para determinar los valores lingüísticos de nuestras variables de entrada, son los valores que utiliza la lógica difusa, para realizar su análisis y tomar decisiones de acuerdo a las funciones de membresía programadas.

Para este ejercicio los valores de los canales EMG variaran entre señal baja, mediana y alta, utilizando funciones triangulares y trapezoidales, y los valores de la salida, en ese caso los motores para mover el exoesqueleto, variaran entre 0 y 1. Se realiza entonces una serie de reglas difusas para determinar el comportamiento del sistema, dependiendo de qué músculos se encuentren en movimiento y cual sea el

valor de su amplitud, será la respuesta del sistema.

En la Tabla 1, se muestran las reglas difusas, indicándose las reglas y sus consecuencias: las siglas utilizadas significan: Bi=Biceps, Tri=Triceps, Tra=Trapecio, Del=Deltoide, Bra=Brazo, (movimiento del motor que controla la flexión del brazo, Hom=Hombro, (movimiento del motor que controla la flexión del hombro, Abd=Abducción, (movimiento del motor que controla la abducción del hombro, B=bajo, M=Media, A=Alto.

### Exoesqueleto

Se modeló un prototipo de la idea del brazo robótico de acuerdo a las medidas del brazo de una persona adulta. Se utilizó el software NX para el modelado de las partes, de tal manera que el ensamblaje se realizara de la manera menos complicada posible. El modelo cuenta con tres grados de libertad que equivalen a los ejes necesarios para realizar los movimientos que se analizaron en la sección pasada. Estos ejes lo forman tres servomotores de alto consumo de corriente. En la Figura 4 se muestra el diseño virtual y el real del exoesqueleto.

Se procede entonces a realizar otro experimento, pero ahora evaluando 72 eventos, 24 para cada uno de los movimientos analizados en esta investigación, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2. Este experimento da un total de 6 eventos de falla, obteniendo más del 90% de éxito, tal como se esperaba.

Tabla 1. Reglas difusas

Reglas Difusas				
Reglas				Concecuencia
Bi = B	Tri = B	Tra = B	Del = B	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 0
Bi = M	Tri = M	Tra = B	Del = B	Bra = 1 Hom = 0 Abd = 0
Bi = A	Tri = M	Tra = B	Del = B	Bra = 1 Hom = 0 Abd = 0
Bi = M	Tri = A	Tra = B	Del = B	Bra = 1 Hom = 0 Abd = 0
Bi = A	Tri = A	Tra = B	Del = B	Bra = 1 Hom = 0 Abd = 0
Bi = M	Tri = B	Tra = B	Del = B	Bra = 1 Hom = 0 Abd = 0
Bi = A	Tri = B	Tra = B	Del = B	Bra = 1 Hom = 0 Abd = 0
Bi = M	Tri = M	Tra = M	Del = M	Bra = 0 Hom = 1 Abd = 0
Bi = A	Tri = M	Tra = M	Del = M	Bra = 0 Hom = 1 Abd = 0
Bi = M	Tri = B	Tra = M	Del = M	Bra = 0 Hom = 1 Abd = 0
Bi = A	Tri = B	Tra = M	Del = M	Bra = 0 Hom = 1 Abd = 0
Bi = A	Tri = A	Tra = A	Del = A	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = A	Tri = A	Tra = A	Del = M	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = A	Tri = A	Tra = M	Del = A	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = M	Tri = A	Tra = A	Del = A	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = M	Tri = A	Tra = M	Del = A	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = M	Tri = A	Tra = A	Del = M	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = A	Tri = M	Tra = A	Del = A	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = A	Tri = M	Tra = M	Del = A	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = A	Tri = M	Tra = A	Del = M	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = M	Tri = M	Tra = A	Del = A	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = M	Tri = M	Tra = M	Del = A	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1
Bi = M	Tri = M	Tra = A	Del = M	Bra = 0 Hom = 0 Abd = 1

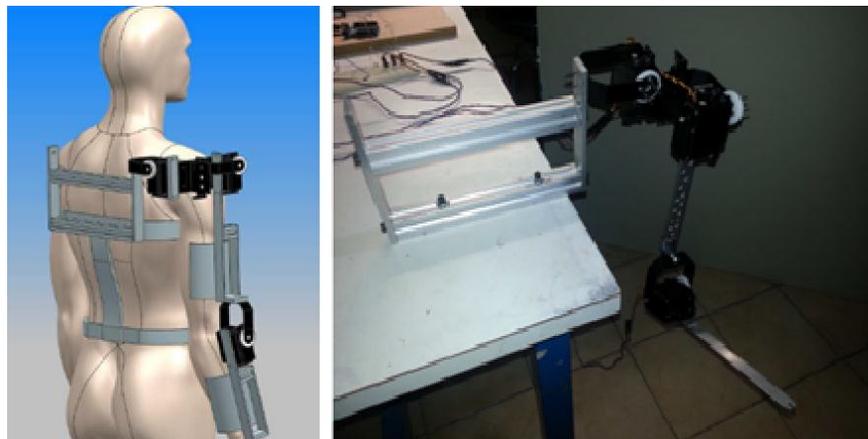


Figura 2 Diseño de Exoesqueleto

Tabla 2. Resultados de éxito

Resultados de éxito			
Movimiento	N# de eventos	N# de éxitos	Porcentaje
Flexión del brazo	24	22	91 %
Flexión del Hombro	24	21	87 %
Abducción del Hombro	24	23	95 %

## Conclusiones

En esta investigación se desarrolló un sistema de adquisición de datos que consta de cinco canales de lectura, capaces de tomar las señales de los músculos y acondicionarlas para analizar su comportamiento, acto seguido fueron digitalizadas e introducidas en la computadora por medio de una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.

La tablilla de cinco canales está formada por un arreglo de amplificadores que hace posibles el filtrado y la amplificación de las señales de entrada, tomadas desde unos electrodos superficiales que están en constante contacto con la piel. Estos sensores fueron agrupados en pares para tener un total de 10 electrodos que pudieran censar 5 músculos en tiempo real, y un electrodo de referencia colocado en el cartílago de la muñeca.

Los datos obtenidos fueron graficados y analizados para entender el comportamiento de las señales de los músculos cuando era realizado algún movimiento, en este caso se analizaron 3 movimientos diferentes, flexión del brazo, flexión del hombro y abducción del hombro, los tres realizados con el brazo izquierdo de una persona completamente sana de 28 años de edad.

Estos datos fueron introducidos en un arreglo de 23 reglas difusas para su control, y con esto lograr imitar los movimientos del brazo humano en un dispositivo de prototipo. Como entrada de este control contábamos con los datos arrojados por los músculos bíceps, tríceps, deltoides, trapecio y flexor superior, y como salida la posición de los motores tanto de izquierda a derecha, según corresponda del eje que se va a rotar.

Este dispositivo cuenta con tres servomotores que funcionan como las articulaciones del hombro y codo, haciendo posible realizar los movimientos antes mencionados. A la altura del hombro se colocaron dos de los servomotores para hacer posible el movimiento de flexión y abducción del hombro, fueron colocados a la misma altura entre sí, y el tercer motor fue el responsable del movimiento de flexión del brazo, simulando la acción del bíceps, flexionando y extendido los eslabones del brazo según fuera el caso.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, con una confiabilidad del 95 % se logró un porcentaje mayor al 90 % de éxito en los eventos evaluados al imitar el movimiento del brazo del usuario, utilizando únicamente el sistema de adquisición de cinco canales EMG.

## Referencias

Aguirre, G. (2010). Desarrollo de ortesis mecatrónica controlada por señales Electromiográficas. Ciudad Juárez, Mexico: UACJ.

Arachchilage, R. (2008). EMG Based Control of an Exoskeleton Robot for Human Forearm. USA: IEEE.

Artemiadis, P. K. (2010). An EMG-Based Robot Control Scheme Robust to Time-Varying EMG Signal Features. MIT: IEEE volume 14.

Bitzer, P. v. (2006). Learning EMG control of a robotic hand: Towards Active Protheses. Orlando Florida: IEEE.

Rocon, E. & Ruiz, A. F. (2010). *Exoskeletons for Rehabilitation and*. Madrid España: Instituto de Autonomia Industrial.

Zhao, J., Xie, Z., Jiang, L., Cai, H., Liu, H., & Hirzinger, G. (2006, October). EMG control for a five-fingered underactuated prosthetic hand based on wavelet transform and sample entropy. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 3215-3220). IEEE.

Mertz., L. (2012). *The next generation of Exoskeletons*. IEEE Exoskeletons.