

Control de mano robótica usando señales electromiográficas superficiales (EMG'S)

Adrian Ibarra Fuentes¹; Alan Vega Espitia¹; Jorge L. Salazar Martínez¹; José L. Salcedo Ramírez¹; Juan Y. Becerra Montejano¹; María R. Camarena Vázquez¹

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Instituto Tecnológico de La Piedad, Av. Tecnológico, Meseta los Laureles, C.P. 59370, La Piedad, Michoacán, México

Correo de contacto: adrian.if@piedad.tecnm.mx

Área: Informática

RESUMEN

Este trabajo presenta un sistema de control para una mano robótica utilizando señales electromiográficas (EMG) una técnica utilizada en la rehabilitación y control de prótesis en Norteamérica, Europa y Asia desde los años 2000 para detectar los movimientos de la mano humana. El problema planteado es cómo replicar de manera eficiente los movimientos de abrir y cerrar la mano en una prótesis robótica, utilizando sensores de bajo costo y una configuración sencilla, así mismo el objetivo es desarrollar un método que permita controlar una mano robótica mediante la actividad muscular del antebrazo, utilizando solo tres electrodos superficiales y una unidad de medición inercial (IMU).

Los antecedentes teóricos que sustentan el uso de señales EMG se basan en la capacidad de estas señales para detectar la actividad eléctrica generada por los músculos durante la contracción. La metodología consistió en colocar dos electrodos en los músculos extensores de los dedos del antebrazo y un electrodo de referencia en el codo. Las señales EMG se capturaron a una frecuencia de 100 Hz y se procesaron para eliminar picos no deseados. Se estableció un umbral de activación que diferenciara entre los movimientos de abrir y cerrar la mano. Además, se empleó una IMU para la rotación de la mano.

Los resultados muestran que con esta configuración se pueden distinguir claramente dos gestos: mano abierta y cerrada. Al superar el umbral de señal EMG, la mano robótica replicó con precisión los movimientos de la mano humana. También se controló el giro del antebrazo con la IMU, logrando un control completo de la mano robótica.

En conclusión, el uso de tres electrodos y un umbral definido permitió replicar los movimientos básicos de la mano con un control eficiente, lo que demuestra que es posible desarrollar prótesis robóticas simples y accesibles basadas en señales EMG.

PALABRAS CLAVE: Electromiografía, Prótesis, Control

INTRODUCCIÓN

La EMG es una técnica que se utiliza para poder registrar y analizar la actividad eléctrica que se produce en los músculos esqueléticos durante la contracción, la actividad eléctrica se genera por la transmisión de impulsos nerviosos a través de las fibras musculares, lo que provoca la contracción (A. Raurale et al., 2020; Benalcazar et al., 2018), esta actividad eléctrica se conoce como potencial de acción, donde se genera un cambio de iones en las fibras musculares que alcanza un potencial de 30mV y cuando se disminuye logra alcanzar un nivel de hasta -70mV como se puede observar en la figura 1.

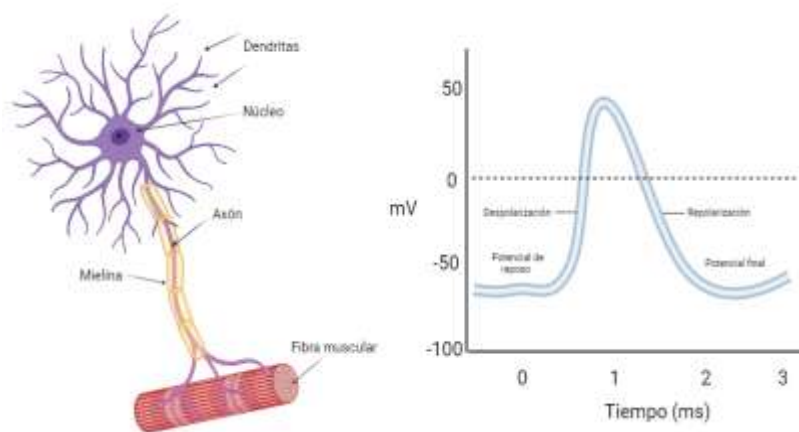


Figura 1. Unidad motora y su potencial de acción

Los músculos encargados de la flexión y extensión de los dedos de la mano se muestran en la figura 2, existen muchos otros músculos para diferentes movimientos de la mano (Torres et al., 2021; Zarco, 2005).



Figura 2. Músculos de la parte posterior del antebrazo.

En la tabla 1 se muestran una breve descripción de la función que tiene cada uno de los músculos que se muestran en la figura 2.

Tabla 1. Función de los músculos de la parte posterior del antebrazo.

Músculo	Función
Braquiorradial	Este músculo flexiona el antebrazo a la altura del codo
Músculo extensor radial largo y corto del carpo	Este músculo ayuda a abducir y extender la mano en la articulación de la muñeca, flexión del codo
Músculo extensor común de los dedos	Este músculo hace la extensión de los 4 dedos medios
Músculo extensor propio del meñique	Este músculo extiende el dedo del meñique y contribuye a la extensión de la muñeca
Músculo extensor cubita del carpo	Este músculo hace la extensión y aducción de la muñeca
Músculo ancóneo	Este músculo extiende y estabiliza el codo, abducción del cúbito durante la pronación del antebrazo

Las señales electromiográficas superficiales (EMG's) son ampliamente utilizadas, ya sea para poder monitorear el rendimiento de deportistas, para detectar alguna anomalía en los músculos, para poder hacer rehabilitación de las extremidades humanas superior e inferior y también para poder hacer el control de prótesis humanas, esto representa un gran avance en lo que son las interfaces hombre – máquina (Correa-Figueroa et al., 2016; Sánchez-Velasco et al., 2020; Tavakoli et al., 2017; Visconti et al., 2018). Recientemente se han utilizado las señales electromiográficas superficiales (EMGs) para la adquisición de la actividad muscular para realizar el control de prótesis en lugar de la intramuscular debido a su facilidad de uso, ya que no se requiere de un gran conocimiento en anatomía (Anselmino et al., 2024; J. M. Dick et al., 2024).

La EMG's permite la detección de la actividad eléctrica producida por los músculos durante su contracción, pudiendo detectar las intenciones motrices del usuario que porta los sensores de EMG, dependiendo de la actividad a realizar se debería de colocar los sensores en puntos específicos del cuerpo humano (Hassan et al., 2020), para este proyecto como se pretende realizar el abrir y cerrar los dedos de una mano robótica, así como girarla hacia la izquierda y la derecha, solo se utilizarán 3 electrodos, ya que no se requiere una alta fidelidad en los movimientos.

En este contexto, el uso de las señales EMGs para controlar una mano robótica, abre las posibilidades para que las personas con discapacidad motora puedan utilizar esta tecnología para generar nuevamente las interacciones con una mayor precisión y naturalidad (Rascón-Madrigal et al., 2020) (Hassan et al., 2020), además de poder aprender a utilizar estas tecnologías y se puedan desarrollar algunos proyectos más complejos. Este artículo explora las bases teóricas y técnicas sobre el uso de las señales EMGs, detallando el proceso de colocación de los sensores en la parte del antebrazo, adquisición, procesamiento y aplicación de estas señales para el control eficiente de una pinza robótica y la utilización de la unidad de medición inercial para el control de la base de la pinza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Existen 2 tipos de electrodos, los electrodos los intramusculares y los superficiales, dentro de estos últimos tenemos los electrodos húmedos y los secos (Merletti & Farina, 2009; Meziane et al., 2013), en la figura 3 se muestra la colocación del electrodo y el contacto que hace con la piel para poder adquirir las señales EMG.

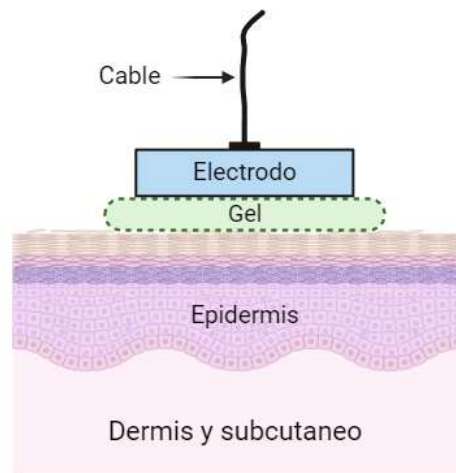


Figura 3. Colocación del electrodo en la piel.

Las señales EMG que se pueden adquirir van a depender del movimiento que se realiza, de la colocación de los electrodos, de la masa muscular de la persona, y de la impedancia de la piel, a la par estas señales son estocásticas, por lo que típicamente puede variar, aunque se realice el mismo movimiento, ya que entre más fuerza se realice la señal se puede intensificar más, en la figura 4 se puede observar una señal EMG de 8 canales del movimiento de un dedo(Reaz et al., 2006).

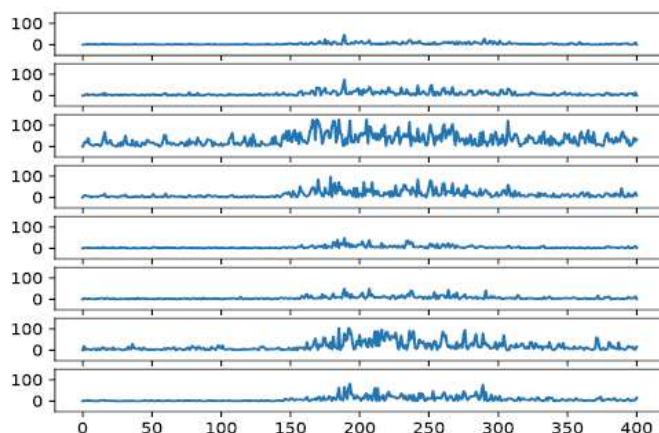


Figura 4. Señales EMG's para un arreglo de 8 electrodos.

La unidad de medición inercial (IMU) tiene en su interior un mecanismo de masa resorte con el cual es posible medir la aceleración y al mismo tiempo poder adquirir la posición en la que se encuentra el sensor, en la figura 5 se muestra un módulo IMU con sus respectivos ejes de medición.

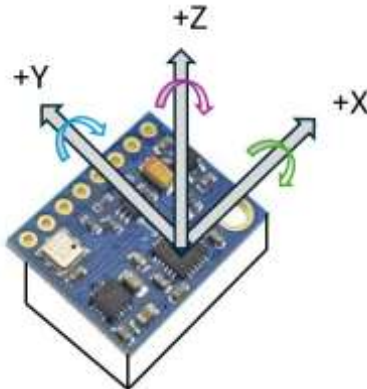


Figura 5. Unidad de medición inercial.

Para la obtención de las señales EMG's se utilizó una configuración de 3 electrodos húmedos, 2 de ellos se colocaron en la parte del antebrazo en donde se ubica el músculo extensor común de los dedos como se muestra en la figura 2, y un tercero que hace referencia al electrodo de tierra se colocó en la parte del codo ya que en ese punto no se genera tanta actividad muscular como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Colocación de los electrodos en el antebrazo.

Una vez que se colocaron los electrodos correspondientes, se procedió a mandar las señales EMG's a un microcontrolador para su adquisición, análisis y procesamiento, las señales se adquirieron a una frecuencia de 100Hz para poder obtener el tiempo de muestreo se aplica la fórmula 1.

$$T = \frac{1}{f}$$

Donde T [s] es el periodo o tiempo que tarda en realizar un ciclo completa una señal, f [Hz] es la frecuencia o número de ciclos que se repiten por segundo.

Entonces al adquirir las señales EMG's a una frecuencia de 100 Hz nos da el tiempo de muestreo de:

$$t_{\text{muestreo}} = \frac{1}{100\text{Hz}} = 10\text{ms}$$

Esto indica que cada 10 milisegundos se adquieren las señales EMG's correspondientes a los 3 electrodos en el antebrazo.

Para el procesamiento de las señales una vez adquiridas, se invirtió la parte negativa de la señal a positiva para poder realizar la sumatoria de las señales EMG's y además se suavizó para que no se

generaran picos tan grandes como se muestra en la figura 7, en esta misma se muestra el tiempo transcurrido y el potencial de acción de las señales.

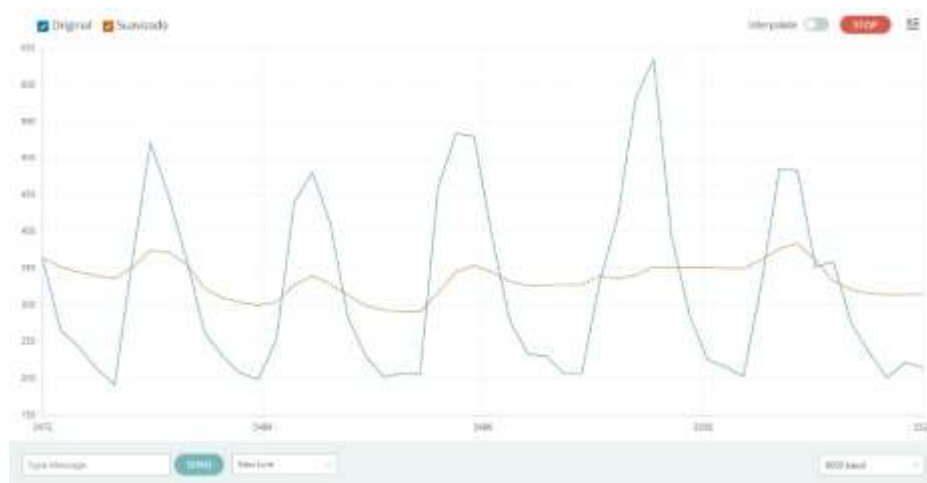


Figura 7. Señal EMG's procesada.

A través de las señales EMG's se realizó el control de una mano robótica, donde se realizaron 2 gestos, que es la mano abierta donde se genera una señal tenue y la mano cerrada donde se aplica más fuerza y por ende la señal incrementa, una vez adquiridas estas señales se realizó una sumatoria y el resultado se compararía con un umbral que el usuario definió.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las señales EMG's se utilizaron para poder realizar el movimiento de una mano robótica, esta mano cuenta con 6 grados de libertad, donde 5 corresponden a la flexión y extensión de cada uno de los dedos y el otro grado de libertad corresponde al movimiento de la muñeca a través del IMU.

En la figura 8 se muestran las señales EMG's que se adquirieron cuando la mano se encuentra abierta, como se puede observar es una señal que está cerca de las 180 unidades de potencial de acción, por tal motivo no supera el umbral de 220 que sería el punto donde al incrementar ese valor indicaría que se está realizando otro movimiento.

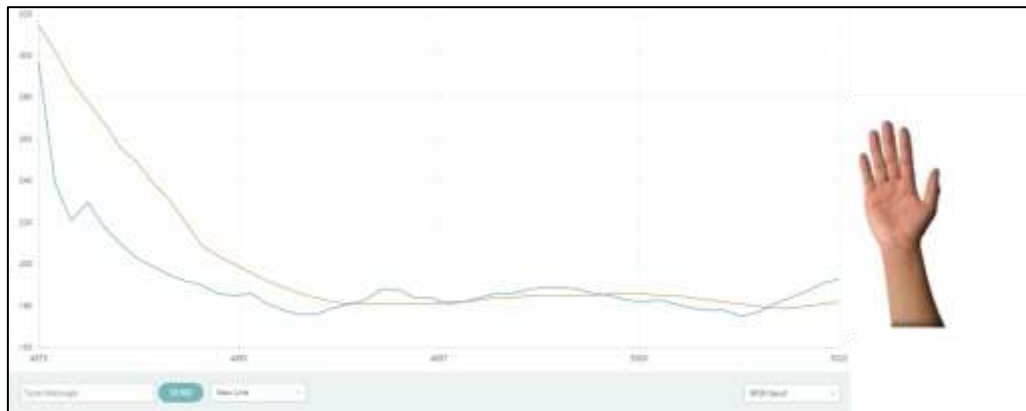


Figura 8. Señal EMG's del movimiento de la mano abierta.

En la figura 9 se muestra la señal EMG's que se generó al realizar el movimiento de puño de la mano humana, en este caso supero el umbral de 220 antes predispuesto, lo que da la pauta para que se pueda generar otro movimiento en la mano robótica.

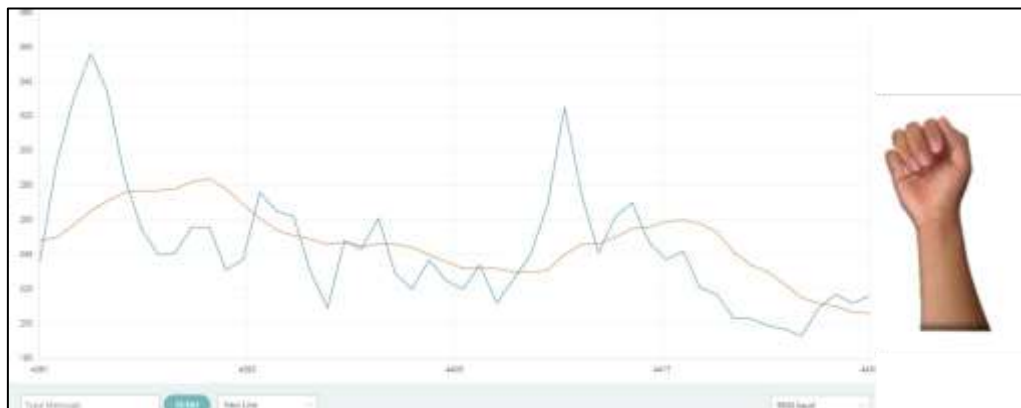


Figura 9. Señal EMG's del movimiento de la mano cerrada.

Una vez que se realizó la calibración para poder obtener nuestro límite de umbral cuando la mano está abierta y cuando está cerrada, se conectaron las salidas del microcontrolador a la mano robótica para

poder reproducir los dos movimientos de la mano humana. En la figura 10 se muestran los movimientos reproducidos en la mano robótica.

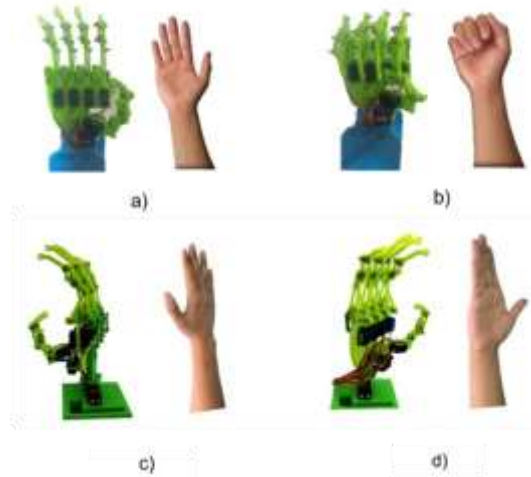


Figura 10. Movimientos reproducidos de la mano humana en una mano robótica, a) mano en reposo, b) mano cerrada, c) giro a la izquierda, d) giro a la derecha.

DESARROLLO DEL TEMA (para contribuciones de divulgación)

La tecnología ha revolucionado muchas áreas de nuestras vidas, y la robótica es uno de los campos más fascinantes y prometedores. Una de las aplicaciones más innovadoras es el uso de señales electromiográficas (EMG), que permiten a las personas controlar dispositivos robóticos a través de la actividad muscular. En este artículo, te acercamos a esta emocionante tecnología, explicada de manera accesible para todos los lectores, y cómo su desarrollo en el Tecnológico Nacional de México contribuye a un México más innovador y sostenible.

¿Qué son las señales electromiográficas?

Las señales electromiográficas (EMG) son impulsos eléctricos generados por los músculos cuando se contraen. Estas señales son captadas por sensores llamados electrodos, que se colocan sobre la piel en puntos específicos del cuerpo. A través de estas señales, se puede detectar la actividad muscular

y convertirla en acciones para controlar diferentes dispositivos, como prótesis robóticas (A. Raurale et al., 2020; Benalcazar et al., 2018).

¿Cómo funcionan en el control de prótesis?

En los últimos años, el uso de EMG ha sido clave para el desarrollo de prótesis robóticas, que permiten a personas con discapacidades motoras recuperar movilidad. Mediante la colocación de unos pocos electrodos en el brazo o la pierna, es posible captar la intención del usuario y traducirla en movimientos de una prótesis, ya sea para cerrar una mano robótica o mover un brazo. Esto mejora la calidad de vida de muchas personas, permitiéndoles realizar actividades cotidianas de manera más autónoma (Correa-Figueroa et al., 2016; Sánchez-Velasco et al., 2020; Tavakoli et al., 2017; Visconti et al., 2018).

Innovación accesible: prótesis robóticas de bajo costo

Uno de los mayores retos es hacer esta tecnología accesible para la mayoría de las personas. Aunque las prótesis robóticas comerciales pueden ser costosas, el uso de sensores EMG y componentes de bajo costo ha permitido desarrollar soluciones más económicas sin sacrificar la funcionalidad. Estas prótesis, controladas con la actividad muscular, permiten a las personas realizar movimientos básicos de la mano, como abrir y cerrar los dedos, de manera sencilla.

Tecnológico Nacional de México y la Agenda Estratégica

El Tecnológico Nacional de México (TecNM), institución que lidera la innovación en tecnología y educación en el país, está comprometido no solo con la formación de ingenieros, sino también con el desarrollo de tecnologías que contribuyan al bienestar social. Los proyectos relacionados con el uso de señales EMG y la robótica, desarrollados en sus laboratorios, son un ejemplo de cómo el TecNM está a la vanguardia en el avance de tecnologías de rehabilitación.

Contribución a la autosuficiencia alimentaria y el rescate del campo mexicano

El trabajo del TecNM también juega un papel importante en la Agenda Estratégica de Autosuficiencia Alimentaria y Rescate del Campo Mexicano. La investigación en robótica y señales

EMG, aunque inicialmente dirigida a prótesis, tiene aplicaciones que pueden beneficiar a la agricultura. Por ejemplo, robots controlados por señales EMG podrían utilizarse para desarrollar maquinaria adaptable para personas con limitaciones físicas que trabajan en el campo. Así, se facilita su integración en actividades productivas, promoviendo la inclusión y mejorando la eficiencia en la producción agrícola.

Además, el desarrollo de tecnologías accesibles y de bajo costo tiene el potencial de generar herramientas que optimicen el trabajo en el campo, haciendo el proceso más eficiente y menos dependiente de insumos externos, contribuyendo directamente a la autosuficiencia alimentaria del país.

Un futuro más inclusivo gracias a la robótica y el TecNM

La robótica, impulsada por señales EMG, no solo ofrece soluciones para la movilidad de personas con discapacidades, sino que también abre puertas a nuevas posibilidades en diversos campos, como la agricultura. El Tecnológico Nacional de México se mantiene a la vanguardia en el desarrollo de estas tecnologías, buscando siempre mejorar la vida de las personas y contribuir al desarrollo sostenible de México.

CONCLUSIONES

Con la configuración de 3 electrodos en la parte del antebrazo se pueden clasificar 2 movimientos de la mano humana, siempre y cuando se coloquen en la parte del antebrazo, ya que ahí es donde se encuentran los músculos encargados de realizar el movimiento de los dedos de la mano. También hay que tomar en cuenta el umbral ya que se debe de analizar bien la fuerza que se aplica al realizar los movimientos quedando entre el esfuerzo con mucha fuerza y el de menor fuerza. Todo esto para poder proporcionar un buen control de la prótesis robótica, ya que dependerá de cada uno de los usuarios el umbral que se requiera, debido a que cada una de las señales EMG's son diferentes en cada persona y éstas al ser estocásticas deben de capturarse para cada usuario.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México, cuyo apoyo y recursos fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Agradezco profundamente a mis profesores y compañeros por su invaluable guía y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Año 1, No. 2, Enero-Abril 2025

Fecha de Recepción: 08/01/2025 Fecha de Aceptación: 15/01/2025

Página **29**

Asimismo, extendiendo mi gratitud a mis familiares y amigos por su constante aliento y apoyo incondicional, que me han motivado a lo largo de este camino. Sin su confianza y respaldo, este logro no habría sido posible, y a Brenda Paola Valadez Zendejas por siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Raurale, S., McAllister, J., & Del Rincon, J. M. (2020). Real-Time Embedded EMG Signal Analysis for Wrist-Hand Pose Identification. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 68(April), 2713–2723. <https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2985299>
- Anselmino, E., Mazzoni, A., & Micera, S. (2024). EMG-based prediction of step direction for a better control of lower limb wearable devices. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 254, 108305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108305>
- Benalcazar, M. E., Motoche, C., Zea, J. A., Jaramillo, A. G., Anchundia, C. E., Zambrano, P., Segura, M., Benalcazar Palacios, F., & Perez, M. (2018). Real-time hand gesture recognition using the Myo armband and muscle activity detection. *2017 IEEE 2nd Ecuador Technical Chapters Meeting, ETCM 2017, 2017-Janua*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ETCM.2017.8247458>
- Correa-Figueroa, J. L., Morales-Sánchez, E., Huerta-Ruelas, J. A., González-Barbosa, J. J., & Cárdenas-Pérez, C. R. (2016). Sistema de adquisición de señales SEMG para la detección de fatiga muscular. *Revista Mexicana de Ingenieria Biomedica*, 37(1), 17–27. <https://doi.org/10.17488/RMIB.37.1.4>
- Hassan, H. F., Abou-Loukh, S. J., & Ibraheem, I. K. (2020). Teleoperated robotic arm movement using electromyography signal with wearable Myo armband. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(6), 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.05.001>
- J. M. Dick, T., Tucker, K., Hug, F., Besomi, M., van Dieën, J. H., Enoka, R. M., Besier, T., Carson, R. G., Clancy, E. A., Disselhorst-Klug, C., Falla, D., Farina, D., Gandevia, S., Holobar, A., Kiernan, M. C., Lowery, M., McGill, K., Merletti, R., Perreault, E., ... Hodges, P. W. (2024). Consensus for experimental design in electromyography (CEDE) project: Application of EMG to estimate muscle force. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 102910. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2024.102910>
- Merletti, R., & Farina, A. (2009). Analysis of Intramuscular electromyogram signals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1887), 357–368. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0235>
- Meziane, N., Webster, J. G., Attari, M., & Nimunkar, A. J. (2013). Dry electrodes for electrocardiography. *Physiological Measurement*, 34(9). <https://doi.org/10.1088/0967-3334/34/9/R47>

- Rascón-Madrigal, L. H.; Sinecio-Sidrian, M. A.; Mejía-Muñoz, J. M.; Díaz-Román, J. D.; Canales-Valdiviezo, I.; Botello-Arredondo, A. I. (2020). *View of Estimación en la Intención de Agarres_ Cilíndrico, Esférico y Gancho Utilizando Redes Neuronales Profundas.pdf*. 41(1), 117–127. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-95322020000100117
- Reaz, M. B. I., Hussain, M. S., & Mohd-Yasin, F. (2006). Techniques of EMG signal analysis: Detection, processing, classification and applications. *Biological Procedures Online*, 8(1), 11–35. <https://doi.org/10.1251/bpo115>
- Sánchez-Velasco, L. E., Arias-Montiel, M., Guzmán-Ramírez, E., & Lugo-González, E. (2020). A Low-Cost EMG-Controlled Anthropomorphic Robotic Hand for Power and Precision Grasp. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40(1), 221–237. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2019.10.002>
- Tavakoli, M., Benussi, C., & Lourenco, J. L. (2017). Single channel surface EMG control of advanced prosthetic hands: A simple, low cost and efficient approach. *Expert Systems with Applications*, 79, 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.03.012>
- Torres, J. A. G., Fuentes, A. I., Sánchez, E. M., & Zavala, A. H. (2021). Prediction of flexion and extension movements of 4 fingers of the hand using a new labeled method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2008/1/012015>
- Visconti, P., Gaetani, F., Zappatore, G. A., & Primiceri, P. (2018). Technical features and functionalities of Myo armband: An overview on related literature and advanced applications of myoelectric armbands mainly focused on arm prostheses. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 11(1), 1–25. <https://doi.org/10.21307/ijssis-2018-005>
- Zarco, L. A. (2005). Bases neurofisiológicas de la conducción nerviosa y la contracción muscular y su impacto en la interpretación de la neuronografía y la electromiografía. *Guía Neurológica* 7, 1–7.