

# Diseño de un Brazo Robótico de bajo coste controlado por Sensores EMG Superficiales.

J.S. Artal-Sevil, A. Acón, J.L. Montañés y J.A. Domínguez.  
Dpto. Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA.  
Universidad de Zaragoza. Campus Río Ebro. María de Luna, 3.  
Edificio Torres Quevedo, 50018. Zaragoza, Spain.  
email: [jsartal@unizar.es](mailto:jsartal@unizar.es)

**Abstract**— El propósito del presente documento ha sido la construcción de una prótesis robótica de bajo coste y su control mediante la plataforma Arduino. La aplicación de sensores superficiales electromiográficos EMG/ECG ha permitido llevar a cabo el control del prototipo de una forma sencilla y eficaz, mediante el simple movimiento de la mano. Estos sensores sirven como puente para detectar los pequeños pulsos eléctricos producto de la actividad muscular y transformarlos en una señal analógica que el microprocesador es capaz de interpretar. Hoy en día los inminentes avances relacionados con la robótica y las técnicas modernas de control han provocado que estas disciplinas de conocimiento puedan ser usadas como complemento educativo en las enseñanzas básicas obligatorias. Por otra parte la técnica de impresión 3D ha permitido realizar el modelado y aplicarlo posteriormente a una prótesis robótica. El trabajo Fin de Grado (TFG) o Fin de Master (TFM) constituye una tarea académica que permite valorar las diferentes competencias y destrezas adquiridas por los estudiantes durante su periodo universitario. Desarrollar e implementar técnicas de control sobre diferentes elementos robóticos de forma local o remota es un claro ejemplo de actividad académica que siempre provoca una motivación adicional en los estudiantes de Ciencias, Tecnología o Ingeniería. Así en este documento se presenta una aplicación electrónica novedosa y de actualidad como es la construcción de una prótesis biónica. Al mismo tiempo se discuten los diferentes detalles de su implementación junto con los resultados experimentales obtenidos.

**Keywords**— *Robotic Arm, Surface EMG Sensor, Sensor based Medical Application, ECG/EMG signals, Low Cost, Arduino, Open Source Projects, Data Acquisition System, 3D Printer.*

## I. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Biomédica está desarrollando continuamente nuevos dispositivos y soluciones tecnológicas para ayudar a los seres humanos a recuperar sus funciones físicas perdidas o a mejorar los procesos de rehabilitación. Algunos grupos de investigación han dirigido su objetivo a la reducción del coste en la construcción de las prótesis inteligentes [1]. Para ello es posible utilizar sistemas mecánicos y de control fácilmente accesibles de forma comercial y por tanto con costes más reducidos [2], [3]. En general estos dispositivos mecánicos poseen una baja precisión, aunque permiten implementar fácilmente algoritmos de control sobre la estructura con objeto

de imitar o simular los diferentes movimientos de un brazo o una mano real.

Hoy en día existen varios proyectos sin ánimo de lucro y de código abierto, Open Source [4], que permiten desarrollar una prótesis impresa en tecnología 3D. La impresión 3D no es únicamente utilizada dentro de los sectores industriales o en el desarrollo de prototipos. La principal ventaja de esta técnica de impresión es que su coste no es muy elevado. Esta tecnología ha demostrado su diversidad en múltiples aplicaciones en el campo médico. Así en 2016, investigadores de la Universidad de Washington, consiguieron realizar una prótesis de mano robótica que imita por completo los huesos y tejidos de una mano. Es un dispositivo mecánico de alta precisión. Todos sus componentes imitan la estructura real de la mano, esqueleto, ligamentos, articulaciones, tendones y masa muscular.

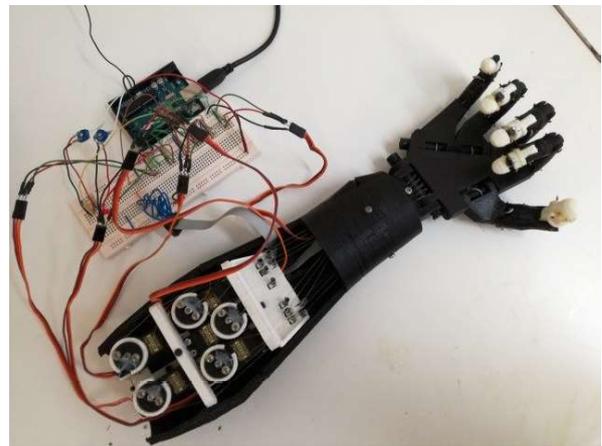


Fig. 1. Prototipo de brazo robótico desarrollado mediante impresión 3D. La imagen muestra los diferentes servomotores que actúan sobre cada uno de los dedos. El sistema de control está basado en el controlador Arduino Uno.

En este documento se presenta una aplicación electrónica novedosa y de actualidad, el desarrollo de una prótesis biónica y su control mediante sensores EMG/ECG. El objetivo ha sido mostrar la utilidad de la teoría con un caso práctico-real, al mismo tiempo que el estudiante desarrolla su TFG (Trabajo Fin de Grado). La utilización de la robótica en este tipo de actividades académicas universitarias puede ser una solución

viable y factible, ya que permite aglutinar a su vez varias tecnologías en una sola disciplina de conocimiento.

En el caso analizado en el presente documento, ver fig. 1, se han integrado varias tecnologías y dispositivos como la fabricación de elementos mediante técnicas de impresión 3D, el desarrollo de un sistema basado en la plataforma Arduino, el diseño de un sistema analógico que integra los sensores EMG/ECG y el control de los diferentes servos y actuadores que constituyen el prototipo.

Como resultado se ha desarrollado el control de un prototipo robótico capaz de operar simulando los grados de libertad (6-DOF) de la mano humana, ver fig. 1. El propósito ha sido controlar los diferentes movimientos de la prótesis articulada (muñeca y cada uno de los dedos de la mano). Las señales EMG obtenidas en el antebrazo son utilizadas para determinar los movimientos de los diferentes elementos de la prótesis biónica, ver fig. 2.

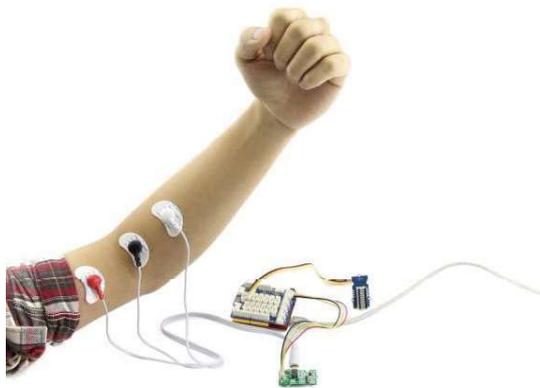


Fig. 2. Ejemplo de sensor EMG/ECG superficial utilizado para el control de la prótesis robótica. El sistema incluye los electrodos y la etapa analógica de instrumentación en modo diferencial.

Este documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 revisa el estado del arte de la tecnología utilizada, comparando algunos ejemplos. El epígrafe 3 muestra varios proyectos Open Source, indicando sus características más destacadas. También se presentan los diferentes parámetros y comandos relacionados con el movimiento de la prótesis biónica. Por otra parte la sección 4 expone el procesamiento de la información. El sistema basado en el sensor EMG también es analizado. Por último el ítem 5 indica las distintas ventajas e inconvenientes de la estrategia implementada.

## II. ESTADO DEL ARTE

Los sensores EMG/ECG son utilizados en estos últimos años como elementos para desarrollar subsistemas de control en brazos articulados [5]. Esta técnica permite la detección y medición de los biopotenciales eléctricos asociados al cuerpo humano. Actualmente la mayoría de las prótesis externas son controladas mediante las señales eléctricas que se producen cuando se contrae el músculo de forma voluntaria [6]. En el supuesto aquí planteado las bioseñales son adquiridas mediante los diferentes electrodos ubicados en la superficie del brazo.

Uno de los principales problemas que debe abordar el diseñador y programador de estos sistemas robóticos es el limitado número de ubicaciones destinadas al control muscular. Este motivo incrementa la complejidad en el diseño e implementación del sistema. De esta forma un hándicap de la investigación es la sincronización de todas estas señales EMG con la velocidad y par motor de la prótesis biónica, permitiendo su funcionamiento con el desplazamiento de la mano de una forma sencilla y natural.

En estos últimos años numerosos autores han publicado estudios de investigación centrados en el uso e interacción con esta tecnología. Así Saponara [7] presenta un prototipo destinado al control de los diferentes servomecanismos de un brazo robótico mediante sensores basados en tecnología EMG. El dispositivo posee 5 grados de libertad (5-DOF) y además dispone de almacenamiento de energía integrado. El ejemplo mostrado está planteado para aplicaciones robóticas destinadas a la rehabilitación. Shin et al. [8] proponen un sistema de reconocimiento de gestos para el control del movimiento en un robot móvil. Como sensores utilizan un IMU sensor (unidad de medición inercial ortogonal que contiene 3 giroscopios y 3 acelerómetros en su interior) y varios elementos EMG. La plataforma Arduino fue utilizada como controlador con objeto de facilitar la interacción con el robot. Los autores indican que la combinación de estos dispositivos ha mejorado la eficacia de las técnicas de reconocimiento de gestos y la precisión del sistema de control.

Por otra parte, Jiang et al. [9] proponen un algoritmo de control adaptativo destinado a un brazo articulado 6-DOF. El interface hombre-máquina está desarrollado mediante tecnología EMG. Varias pruebas experimentales fueron realizadas con la finalidad de analizar la relación señal-ruido. Diferentes tipos de electrodos, formas y tamaños son estudiados. Zhao et al. [10] presentan una prótesis biónica basada en este tipo de sensor. El control combina técnicas de redes neuronales con una tasa de aprendizaje variable (VLR) y un modelo paramétrico autorregresivo (AR). Los resultados presentados en el documento muestran una alta capacidad de reconocimiento y una rápida velocidad de aprendizaje. Mientras que Khanna et al. [11], Hu et al. [12] o Kutilek et al. [13] desarrollan una mano biónica con múltiples grados de libertad (DOF), activada en todos los casos mediante señales EMG. Los autores proponen diferentes técnicas de control con el objetivo de que el sistema interprete lo más fielmente los diferentes movimientos del usuario.

A su vez, Beneteau et al. [14] y Benatti et al. [15] describen la implementación de un sistema de bajo coste para la adquisición y procesamiento de señales EMG. Los equipos desarrollados son inalámbricos mientras que el procesamiento de la información es efectuado por un  $\mu\text{C}$  MSP430-TI o un ASIC, dependiendo del caso analizado. Los resultados experimentales muestran la efectividad del hardware, durante la adquisición de datos en los distintos sistemas propuestos, así como el reconocimiento de gestos en tiempo real. Los sistemas combinan la precisión de un interface analógico con la flexibilidad de un  $\mu\text{C}$  de baja potencia y un alto rendimiento en

el procesamiento. Mientras que Jianting et al. [16] desarrollan un sistema de propósito general para la interacción hombre-máquina en aplicaciones biomédicas. La unidad de adquisición y análisis de señales dispone de varios canales con una resolución de  $\mu\text{V}$ . Plantean nuevos algoritmos de control con objeto de predecir el gesto de la muñeca de la mano a partir de la señal EMG del antebrazo.

Por otro lado, Krausz et al. [17] presentan el diseño y desarrollo de una mano biónica con 6-DOF. Este proyecto es Open Source, gratuito y de código abierto. El documento muestra el diseño de cada uno de los mecanismos de accionamiento de los dedos, así como los distintos elementos utilizados. Los autores consideraron que tanto el aspecto como las dimensiones de la mano biónica fuesen lo más parecido posible a un supuesto real. El prototipo presentado fue testeado y posteriormente fabricado con la finalidad de probar “in-situ” diferentes estrategias de control. Mientras que Yoshikawa et al. [18] presentan una estrategia de reconocimiento de gestos centrada en el cálculo vectorial. Un sistema híbrido de sensores es utilizado para determinar la información relativa a los diferentes desplazamientos de la mano. El sensor híbrido consiste en un sensor EMG y un sensor de distancia óptico. El objetivo es poder controlar un brazo robótico de forma sencilla. De acuerdo a los resultados proporcionados por los autores, el método propuesto es más fiable y preciso que el sistema basado simplemente en sensores EMG.

Otros autores como Azulay et al. [19] o Chen et al. [20] muestran la aplicación de un brazo robótico experimental, controlado por tecnología EMG, como herramienta educativa para su uso en el laboratorio de electrónica. El diseño del hardware junto con el pre/post-procesado de las bioseñales son descritas. El objetivo ha sido promover e integrar diferentes conocimientos y habilidades en el desarrollo curricular de ingeniería. El diseño simple usado en el brazo articulado limita los movimientos a emular, al mismo tiempo que muestra las diferentes posibilidades de la Ingeniería Biomédica.

A su vez Pradhan et al. [21] y Rechy-Ramírez et al. [22] exponen el sistema electrónico desarrollado para la captación de señales musculares mediante sensores EMG. De igual forma se revisa el estado de desarrollo de las bioseñales y su sistema de control. En ambos documentos se propone el diseño de un amplificador de biopotenciales EMG basado en AO's de instrumentación. Del mismo modo indican las pautas para su adecuado dimensionamiento. El sistema propuesto es testeado mediante el análisis de diferentes tipos de movimientos de la mano. Las señales son post-procesadas mediante LabVIEW y MATLAB.

### III. PROYECTOS OPEN SOURCE

El diseño y desarrollo de prótesis biónicas se encuentra en continua evolución desde sus primeras aplicaciones. Las nuevas tecnologías y los avances en diferentes disciplinas de conocimiento han permitido la construcción de múltiples prótesis con funciones y movimientos muy variados. La robótica y la impresión 3D han supuesto una gran influencia en

su diseño e implementación, ver fig. 3. Todo ello ha permitido revolucionar la industria consiguiendo geométricas de alta calidad y resistencia a bajo coste.

En esta última década los grandes avances tecnológicos han permitido fabricar prótesis altamente funcionales y estéticas. Como resultado de este desarrollo, en el mercado internacional pueden encontrarse distintas marcas comerciales de prótesis de mano desarrolladas por diferentes fabricantes. Así la tabla I muestra un ejemplo de las especificaciones de algunos diseños de manos biónicas comerciales. Las prótesis analizadas reflejan una estabilidad tecnológica que se mantiene en la mayoría de los prototipos. Estas prótesis robóticas se basan en funcionalidades básicas de las manos como el agarre por medio de articulación de los dedos. Además todas ellas cuentan con una completa articulación de 5 dedos con movimientos de flexión-extensión y oposición del dedo pulgar. Sus principales sistemas de control se encuentran basados en sensores EMG superficiales mediante electrodos musculares.

TABLA I. Especificaciones y características de diferentes manos biónicas comerciales.

Hands	Number of Digits	Number of Joint	Degrees of Freedom	Number of Actuators	Power Transmission	Coupled Finger Joints
Dextrus	5	15	5	4	Cables	MCP, PIP & DIP
InMoov	4	11	5	5	Gears	MCP, PIP & DIP
iLimb	5	11	6	5	Worm Gears	MCP & PIP
beBionic	5	11	6	5	Gears	MCP & PIP
Vicent	5	11	6	6	Gears	MCP & PIP
Michelangelo	5	6	2	2	Gears	MCP & PIP
Vanderbilt	5	9	4	4	Cables	MCP & PIP
iCub	5	19	12	9	Cables	PIP & DIP

En la actualidad existen distintas empresas y universidades que desarrollan proyectos biónicos incorporando mejoras. Una de ellas es la adaptación de la impresión 3D al diseño de diferentes prótesis biomecánicas en proyectos de código abierto (Open Source) y sin ánimo de lucro. De este modo la información es de fácil acceso (puede obtenerse en la web) y además permite ajustarse a las necesidades de cada individuo. Por el contrario la adquisición de una prótesis inteligente es un privilegio que muy pocos pueden permitirse.

En este momento uno de los tipos de prótesis que más está avanzando y evolucionando son las prótesis mioeléctricas. Los progresos en robótica y diferentes tecnologías protésicas han permitido conseguir sistemas de control dirigidos por el cuerpo y no por un sistema externo al usuario. Estas prótesis son

TABLA II. Comparación de diferentes proyectos Open Source correspondiente a manos biónicas.

					
Nombre	Brunel	Ada hand v1.2	Dextrus	Dextra	Inmoov
Grados de libertad	9-DOF	5-DOF	6-DOF	6-DOF	6-DOF
Tipo de proyecto	Open source	Open source	Open Source	Open Source Myoelectric	Open Source
Compatibilidad	Arduino IDE	Arduino IDE	Arduino IDE	Arduino IDE	Arduino IDE
Programación	Programable por USB	Programable por USB	Programable por USB y SD	PC Interface	Programable por USB
Peso	371 g	380 g	393 g	405 g	475 g
Dimensiones	198 x 127 x 66 mm	215 x 118 x 58 mm	210 x 159 x 59 mm	196 x 125 x 45 mm	
Materiales	PLA plastic, TPU	Impresión 3D	ABS	Impresión 3D, PLA o ABS	Impresión 3D ABS
Fuente de alimentación	+6/12V	+12V	+9V	+9V	+6V
Actuadores	IMU integrado de 9 ejes	5 actuadores lineales PQ12-30-12-P	5 motores Adafruit Shield	5 pololu Micro Metal Gearmotor 1000:1	5 servos HK1598B y 1 servo MG996r
Microcontrolador	SAMD21G18	ATMEGA2560	ATMEGA2560	Teensy 3.1	
PCB	Chestnut v1.0	Almond v1.2	Chestnut v1.2	Simple PCB	Nervo Board InMoov

controladas por medio de las bioseñales EMG, las cuales interpretan los diferentes movimientos musculares.

Con el fin de analizar la situación actual se ha recopilado información de diferentes proyectos Open Source. El objetivo es mostrar sus detalles, características y especificaciones más relevantes. Estos proyectos permiten fabricarse su propia prótesis a cualquier usuario e interactuar fácilmente con ella. La Tabla II presenta una comparación entre diferentes tipos de proyectos Open Source, gratuitos y de código abierto. A su vez, todos ellos son compatibles con el controlador Arduino. La finalidad es dar a conocer esta tecnología.

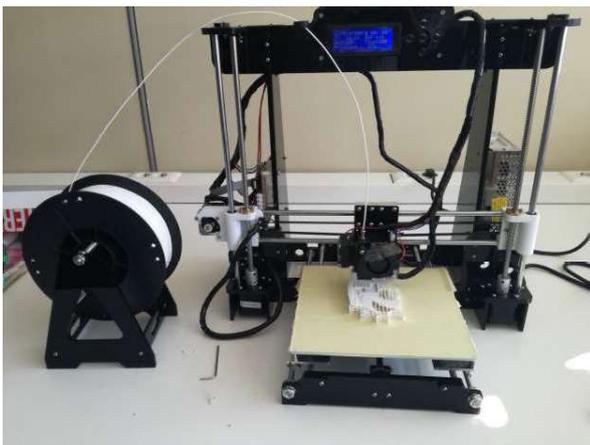


Fig. 3. Construcción de diferentes piezas del brazo biónico mediante técnicas de impresión 3D (proyecto Open Source).

La impresión 3D ha sido una tecnología que ha permitido revolucionar la industria y más concretamente la construcción de prototipos. Permitiendo diseñar elementos y productos que de otra manera serían mucho más complicados y costosos de fabricar. En el campo de la biomecánica ha sido una tecnología que ha modificado por completo el proceso de diseño y desarrollo, ver fig. 3. La impresión 3D ha permitido construir modelos complejos de una manera más sencilla y rápida, además de reducir sus costes. Así en estos últimos años han aparecido diversos proyectos a nivel internacional que utilizan esta innovadora tecnología para crear sus propios diseños. La fig. 4 muestra un detalle de los diferentes elementos que componen las articulaciones de un dedo.

#### A. Diseño del Brazo Robótico

En el documento aquí presentado se ha tomado como referencia el modelo InMoov, proyecto francés, basado en el desarrollo de un robot humanoide impreso en tecnología 3D, <http://inmoov.fr>. Este proyecto es un desarrollo Open Source que permite incorporar actualizaciones y modificaciones con objeto de mejorar el diseño. De esta forma es posible encontrar en la web multitud de recursos asociados al desarrollo de este proyecto.

El mecanismo para ejercer el movimiento de los diferentes dedos está basado en cables y muelles colocados a modo de tendones. Estos cables son activados a su vez por una polea incorporada sobre un servo Futaba S3003. El desplazamiento angular de cada accionamiento es controlado por la señal PWM proporcionada por la plataforma Arduino, ver fig. 5. También

se ha incorporado un pequeño pulsador en el extremo de cada dedo. Su propósito ha sido obtener una señal de feedback que proporcione información respecto al agarre de los diferentes objetos o el momento en el cual se ha cerrado la mano por completo.

Así pues cada uno de los dedos son accionados mediante poleas de modo que ceden o recogen cable en función del giro realizado. La principal ventaja del prototipo es su simplicidad de diseño, montaje y ensamblaje. Por el contrario el giro de la muñeca es llevado a cabo por medio de un engranaje solidario al servo. El máximo giro se corresponde con 180°, al igual que el desplazamiento del brazo humano. En la fig. 5 se aprecia un detalle de la prótesis robótica. En la imagen se observan los diferentes cables, muelles y poleas que componen el prototipo desarrollado.

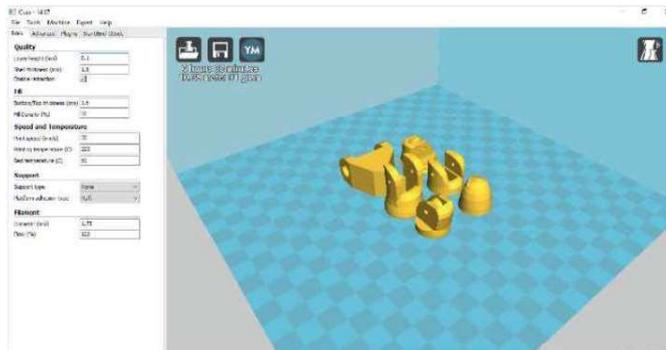


Fig. 4. Detalle y reconstrucción de los diferentes elementos que componen las uniones en uno de los dedos.

**B. Sistema de Control del servo mediante Arduino.**

El microcontrolador Arduino Uno es utilizado para controlar los diferentes servos Futaba S3003 del prototipo. El código implementado está basado en un mapeo realizado en la señal de entrada. Esta señal puede variar entre los valores 0 y 1023. A su vez los servos permiten un desplazamiento angular entre 0 y 180°, por lo que se ha estimado una constante de conversión. A modo de ejemplo, se muestra a continuación algunas de las líneas de código destinadas al accionamiento de uno de los dedos.

```
//Accionamiento del servo.
#include <Servo.h>
Servo miservo;
const int pinServo = 9;
const int pinPotenciometro = A0;
int valPot = 0;
int angulo = 0;
void setup() {
  miservo.attach(pinServo);
}
void loop() {
  valPot = analogRead(pinPotenciometro);
  angulo = map(valPot, 0, 1023, 0, 180);
  miservo.write(angulo);
  delay(1500);
}
```

**C. Control Manual por Teclado.**

Se ha incorporado un modo de operación manual, haciendo uso del propio teclado, para comprobar el funcionamiento adecuado del prototipo. De este modo se han utilizado los pulsos sobre las diferentes teclas para variar la consigna de posición. A continuación a modo de ejemplo se muestran varias líneas de código correspondientes a la lectura del servo en cada dedo. También se indica como modificar la consigna de posición mediante teclado.

```
//Lectura de posición de los actuadores
void loop() {
  if(input == 'r'){return;}
  int tPos = thumbServo.read();
  int iPos = indexServo.read();
  int mPos = majeureServo.read();
  int rPos = ringfingerServo.read();
  int gPos = bicepServo.read();
  int hPos = shoulderServo.read();
}
```

```
//Modificar posición dedo mediante teclado
switch(input){
  case 't':
    tPos += stepSize;
    break;
  case 'g':
    tPos -= stepSize;
    break;
  ... }
... }
```

**IV. RECONOCIMIENTO DE GESTOS MEDIANTE SENSOR EMG**

Recientemente, en esta última década, el desarrollo de aplicaciones biomédicas y tecnologías robóticas asistidas, basadas en sensores EMG, han recibido la especial atención de los investigadores. Esto puede atribuirse a las ventajas que ofrecen este tipo de señales sobre otras bioseñales. Algunos artículos de investigación [22], [23] recogen el uso de estas señales electromiográficas (EMG) o electroencefalográficas (EEG) en el control de las prótesis biónicas.



Fig. 5. Detalle de los diferentes servos, cables y muelles destinados al accionamiento de cada uno de los dedos y muñeca. El control de la prótesis es realizado por medio del controlador Arduino, quien proporciona la señal PWM para el accionamiento de los diferentes elementos.

Las técnicas electromiográficas permiten la adquisición y el análisis de los distintos impulsos bioeléctricos obtenidos como consecuencia de la actividad muscular. Ahora bien, para poder utilizar estos pequeños pulsos eléctricos resulta necesario efectuar un proceso de acondicionamiento de la señal. El propósito es inmunizar frente al ruido. De este modo es recomendable un subsistema que incorpore los siguientes bloques: pre-amplificación, filtrado para eliminar el ruido y rectificación de señal.

A. Sensores EMG Superficiales

El sensor EMG superficial es un transductor que detecta biopotenciales mediante el uso de electrodos colocados en la piel. Actualmente los electrodos Ag/AgCl son ampliamente utilizados en hospitales y laboratorios. Estos electrodos utilizan un gel electrolítico para incrementar la conductividad entre la piel y el electrodo. A pesar de su baja impedancia, este tipo de electrodos son desechables y no adecuados para mediciones a largo plazo.

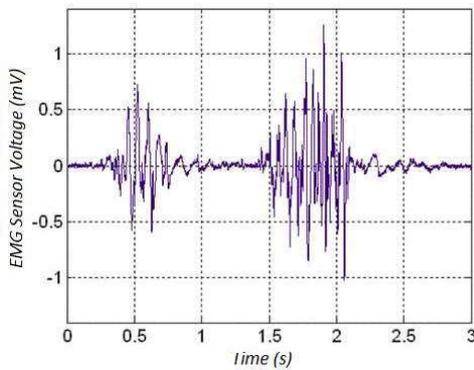


Fig. 6. Ejemplo de bioseñal EMG registrada con electrodos de Ag/AgCl en el músculo bíceps durante dos breves contracciones intermitentes.

La amplitud de los potenciales bioeléctricos varía desde los  $\mu\text{V}$  hasta valores del orden de los 10mV, ver fig. 6. De esta forma es necesario utilizar amplificadores de instrumentación. La señal EMG mostrada en la figura se obtuvo colocando los electrodos en los bíceps del brazo derecho y realizando una secuencia de contracción-relajación-contracción. El ruido suele acompañar a la señal obtenida y puede superarla en varios órdenes de magnitud. Un amplificador diferencial puede neutralizar buena parte del ruido ya que mide la diferencia de tensión entre los electrodos activos con respecto al considerado como referencia. Los potenciales detectados por los electrodos son posteriormente amplificados y filtrados. Por lo general en estos sistemas de acondicionamiento de señal, la ganancia del bloque amplificador es superior a 1000. El circuito PCB diseñado debe encontrarse lo más próximo posible al contacto eléctrico de los electrodos con objeto de evitar la introducción de ruido y EMI dentro del sistema.

El amplificador de instrumentación seleccionado es el INA128 (Texas Instruments), al cual se le añade un filtro paso bajo en el lazo de realimentación con objeto de eliminar la componente continua de salida, ver fig. 7. Este dispositivo posee un CMRR alto,  $\text{CMRR} > 120\text{dB}$  y un bajo voltaje de

offset  $< 50\mu\text{V}$ . Además este dispositivo es recomendado por el fabricante para su uso en aplicaciones médicas. De acuerdo a las pruebas experimentales se adopta un ancho de banda de 20Hz a 500Hz. De este modo se considera una frecuencia de corte  $f_c < 1\text{kHz}$ . Con objeto de alcanzar los niveles de amplitud requeridos se añade una nueva etapa de amplificación. La ganancia es seleccionada para maximizar el rango dinámico a la entrada del convertor analógico digital.

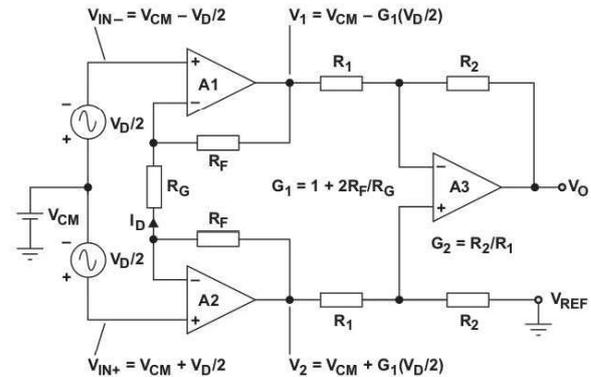


Fig. 7. Estructura y ganancia del amplificador EMG. La señal obtenida por parte de los sensores EMG posee una magnitud del orden de los mV.

La resistencia  $R_G$  permite modificar la ganancia de la etapa amplificadora. Mientras que su salida está referenciada sobre el terminal de referencia (Ref), siendo normalmente masa ( $V_{REF}$ ). El voltaje aplicado sobre el terminal Ref es sumado a la salida. Aunque la mayoría de las aplicaciones no requieren ajuste de offset externo. El fabricante en su datasheet recomienda para este tipo de aplicaciones biomédicas el circuito opcional mostrado en la fig. 8. Este circuito incluye un filtro RC paso bajo para ajustar la tensión de offset.

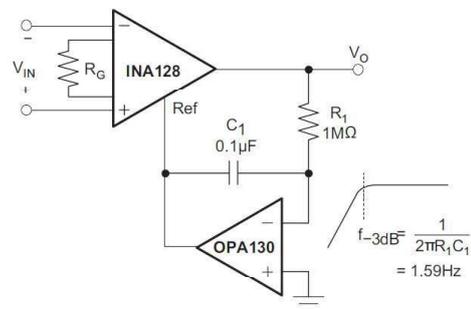


Fig. 8. Circuito recomendado por Texas Instruments para aplicaciones de bajo voltaje. La topología incluye el filtro RC asociado al terminal de referencia.

En la fig. 9 se muestra el diagrama esquemático para el procesamiento de la señal procedente del sensor EMG superficial. La señal obtenida, una vez filtrada y amplificada, es rectificada mediante un rectificador de precisión con objeto de cuantificar la intensidad de la señal proveniente del músculo. Esta tensión es leída por el convertor analógico-digital del Arduino. Una vez procesada esta información, el controlador genera la señal PWM destinada a cada servomecanismo para proporcionar el desplazamiento angular necesario.

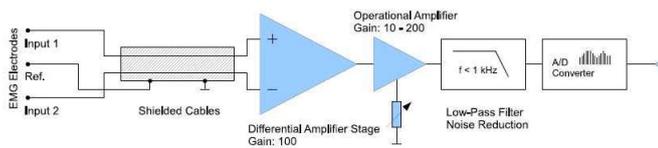


Fig. 9. Diagrama de bloques del sensor superficial EMG junto con el sistema de procesado de señal.

Al adquirir las señales bioeléctricas, uno de los mayores inconvenientes ha sido la existencia de ruido; ya que como se ha comentado, presenta amplitudes comparables con la señal EMG a medir. Ello ha dificultado el procesamiento de la información, generando en ocasiones señales no deseadas en la prótesis biónica. Por esta razón, resulta necesario minimizar o eliminar las señales indeseadas superpuestas a la tensión diferencial del amplificador, que por lo general son aleatorias y degradan su respuesta ideal, ver fig. 8.

El controlador Arduino realiza el muestreo de la tensión resultante “*analogRead(pin)*” y aplica el algoritmo de control. Los datos obtenidos por el conversor ADC son valores comprendidos entre 0 y 1023. De este modo se ha utilizado como parámetro de control la media aritmética de los datos obtenidos durante la secuencia de contracción muscular. Por otra parte, la frecuencia de muestreo ha quedado limitada por la frecuencia del  $\mu C$  y por el tiempo de ejecución de los comandos. Esta serie de limitaciones han condicionado la sensibilidad del prototipo desarrollado. Como posible mejora del sistema es posible incorporar un  $\mu C$  DSP, proporcionando más velocidad de procesamiento, y la implementación de un filtro digital en tiempo real (tipo FIR o IIR).

Para la adquisición de señales EMG es necesario utilizar al menos 3 electrodos, ver el diagrama de la fig. 10. Uno se utiliza como potencial de referencia (comúnmente va ubicado en un lugar con ausencia de musculo), los otros dos electrodos se colocan sobre las zonas musculares donde se desea medir los potenciales bioeléctricos. Pueden pertenecer al mismo músculo o diferentes, la única condición para la correcta captura de los datos es que la distancia entre los electrodos debe ser superior a > 2cm.

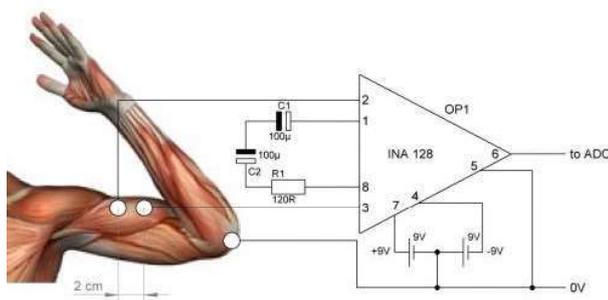


Fig. 10. Circuito de conexión del sensor EMG.

**B. Ubicación de sensores EMG**

Los sensores EMG pueden ser colocados en diferentes ubicaciones del brazo, aumentando la precisión. La fig. 11

muestra su posición en el antebrazo derecho del usuario. Se pueden elegir diferentes grupos musculares para colocar los electrodos EMG. En el caso presentado es necesaria la combinación de 5 canales. De este modo es posible descifrar las distintas señales implicadas en el movimiento individual de cada dedo. Los sensores EMG al ser dispositivos no invasivos son ideales en aplicaciones como entrenamiento, rehabilitación y control de prótesis biónicas activas.

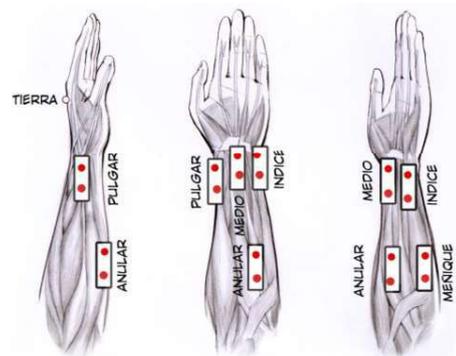


Fig. 11. Alternativas para la colocación de los diferentes sensores EMG superficiales en el antebrazo humano, [24].

**C. Control del brazo robótico mediante sensor EMG**

A modo de ejemplo se muestran algunas líneas del código asociado al desplazamiento del dedo pulgar (thumb) e índice (index) de la mano.

```
//Asignación variables
int thumbpin = 0; // analog pin for thumb sensor
int indexpin = 1; // analog pin for index sensor
...
int val1,val2,val3,val4,val5; // variable to read the value from analog

void loop()
{
    val1 = analogRead(thumbpin); // reads the value of EMG sensor
    (value between 0 and 1023)
    val1= map(val1, 768, 853, 0, 179); // scale it to use it with the servo
    (value between 0 and 180)
    thumbservo.write(val1); // sets the servo position according to the
    scaled value
    val2 = analogRead(indexpin); // reads the value of EMG sensor
    (value between 0 and 1023)
    val2= map(val2, 768, 853, 0, 179); // scale it to use it with the servo
    (value between 0 and 180)
    indexservo.write(val2); // sets the servo position according to the
    scaled value
    ...
}
```

**V. CONCLUSIONES**

En este documento se ha presentado el desarrollo y construcción de una prótesis biónica mediante un sistema de sensores EMG. Estos elementos han permitido optimizar la capacidad de control y facilitar su manejabilidad. Aunque su implementación ha resultado más compleja de lo esperado. El ruido ha sido uno de los mayores inconvenientes en esta aplicación. Actualmente existen en la web gran cantidad de

proyectos Open Source que permiten desarrollar prototipos de brazos articulados mediante técnicas de impresión 3D.

La realización de trabajos académicos TFG/TFM en el contexto de ciencias, tecnologías o ingenierías, ha permitido la evaluación de las competencias adquiridas por los estudiantes durante su proceso de formación universitaria. Además la construcción de pequeños proyectos ha permitido incrementar el grado de motivación e implicación del estudiante. Los objetivos iniciales se han resuelto de manera satisfactoria, obteniendo como resultado un prototipo que ha superado las expectativas iniciales y con un coste reducido.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad de Zaragoza para el desarrollo del presente trabajo, a través del Programa de Innovación e Investigación Educativa (PIIDUZ 2017/18). Referencia de Proyecto: PIIDUZ\_17\_059.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Fajardo, A. Lemus and E. Rohmer. "Galileo bionic hand: sEMG activated approaches for a multifunction upper-limb prosthetic". *IEEE Central American and Panama Convention (CONCAPAN 2015)*. *IEEEExplore Digital Library*. Tegucigalpa, Honduras. November '15, pp.: 1 to 6.
- [2] R. Ismail, M. Ariyanto, W. Caesarendra and A. Nurmiranto. "Development of robotic hand integrated with SimMechanics 3D animation". *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications ISITIA'16*. *IEEEExplore Digital Library*. 28-30 July 2016, Lombok, Indonesia; pp.: 629 to 634.
- [3] H. Martin, J. Donaw, R. Kelly, Y.J. Jung and Jong-Hoon Kim. "A novel approach of prosthetic arm control using computer vision, biosignals, and motion capture". *IEEE Symposium on Computational Intelligence in Robotic Rehabilitation and Assistive Technologies, CIR2AT'14*. *IEEEExplore Digital Library*. 9-12 December 2014. Orlando, USA. pp.: 26 to 30.
- [4] J.K. Paik, B.H. Shin, Y.B. Bang and Y.B. Shim. "Development of an Anthropomorphic Robotic Arm and Hand for Interactive Humanoids". *Journal of Bionic Engineering*. *Elsevier ScienceDirect*. Volume: 9, Year 2012; pp.: 133 to 142.
- [5] Kobayashi F., Okamoto K. and Kojima F. "Robot-human handover based on position and posture of human hand". *15th International Symposium on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS'14) and 7th International Conference on Advanced Intelligent Systems (ISIS'14)*. *IEEEExplore Digital Library*. Volume 33, Issue 4, 3-6 December 2014, Kitakyushu (Japón), pp 918 to 921.
- [6] J. Cannan and H. Hu. "A Multi-sensor armband based on muscle and motion measurements". *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics ROBIO'12*. *IEEEExplore Digital Library*. December 2012. Guangzhou, China; pp.:1098 to 1103.
- [7] S. Saponara. "An actuator control unit for robotized prosthetic arm with embedded energy storage". *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC'15*. *IEEEExplore Digital Library*. 10-13 June 2015. Rome, Italy; pp.: 2115 to 2118.
- [8] Seong-Og Shin; Donghan Kim; Yong-Ho Seo. "Controlling Mobile Robot Using IMU and EMG Sensor-Based Gesture Recognition". *Ninth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*. *IEEEExplore Digital Library*. November '14. Guangdong, China; pp.: 554 to 557.
- [9] Y. Jiang, S. Sakoda, S. Hoshigawa, H. Ye, Y. Yabuki, T. Nakamura, M. Ishihara, T. Takagi, S. Takayama and H. Yokoi. "Development and evaluation of simplified EMG prosthetic hands". *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO'14*. *IEEEExplore Digital Library*. December 2014. Bali, Indonesia; pp.: 1368 to 1373.
- [10] J. Zhao, Z. Xie, L. Jiang, H. Cai, H. Liu and G. Hirzinger. "A Five-fingered Underactuated Prosthetic Hand Control Scheme". *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, BioRob 2006*. *IEEEExplore Digital Library*. Pisa, Italy, 20-22 February 2006; pp.: 995 to 1000.
- [11] P. Khanna, K. Singh, K.M. Bhurchandi and S. Chiddarwar. "Design analysis and development of low cost underactuated Robotic hand". *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO'16*. *IEEEExplore Digital Library*. December 2016. Qingdao, China; pp.: 2002 to 2007.
- [12] X.L. Hu, K.Y. Tong, X.J. Wei, W. Rong, E.A. Susanto and S.K. Ho. "The effects of post-stroke upper-limb training with an electromyography (EMG) driven hand robot". *Journal of Electromyography and Kinesiology*. *Elsevier ScienceDirect*. Volume: 23, Year 2013; pp.: 1065 to 1074.
- [13] P. Kutilek, J. Hybl, J. Kauler and S. Vitekova. "Prosthetic 6-DOF arm controlled by EMG signals and multi-sensor system". *Proceedings of 15th International Conference MECHATRONIKA*. *IEEEExplore Digital Library*. December 2012. Prague, Czech Republic; pp.: 1 to 5.
- [14] A. Beneteau, G. Di Caterina, L. Petropoulakis and J.J. Soraghan. "Low-cost wireless surface EMG sensor using the MSP430 microcontroller". *6th European Embedded Design in Education and Research Conference, EDERC'14*. *IEEEExplore Digital Library*. 11-12 September 2014. Milano, Italy; pp.: 264 to 268.
- [15] S. Benatti, F. Casamassima, B. Milosevic, E. Farella, P. Schönle, S. Fateh, T. Burger, Q. Huang and L. Benini. "A Versatile Embedded Platform for EMG Acquisition and Gesture Recognition". *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. *IEEEExplore Digital Library*. October 2015. Volume 9, issue: 5; pp.: 620 to 630.
- [16] Jianting Fu, Jian Chen, Yizhi Shi and Yao Li. "Design of a low-cost wireless surface EMG acquisition system". *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER'13*. *IEEEExplore Digital Library*. November 2013. San Diego, California; pp.: 699 to 702.
- [17] N.E. Krausz, R.A.L. Rorrer and R.F. Weir. "Design and Fabrication of a Six Degree-of-Freedom Open Source Hand". *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. *IEEEExplore Digital Library*. Volume: 24, issue: 5, pp.: 562 to 572.
- [18] M. Yoshikawa, Y. Taguchi, N. Kawashima, Y. Matsumoto and T. Ogasawara. "Hand motion recognition using hybrid sensors consisting of EMG sensors and optical distance sensors". *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. *IEEEExplore Digital Library*. September 2012. Paris, France; pp.: 144 to 149.
- [19] M.D. Azulay, M.I. Pisarello and J.E. Monzón. "Electromyographic control of a robotic arm for educational purposes". *3rd Middle East Conference on Biomedical Engineering, MECBME'16*. *IEEEExplore Digital Library*. 6-7 October 2016, Beirut, Lebanon; pp.: 129 to 132.
- [20] Xiang Chen, Xu Zhang, Zhang-Yan Zhao, Ji-Hai Yang, Vuokko Lantz and Kong-Qiao Wang. "Hand Gesture Recognition Research Based on Surface EMG Sensors and 2D-accelerometers". *11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*. *IEEEExplore Digital Library*. 11-13 October 2007, Boston, MA, USA. pp.: 11 to 14.
- [21] Ashirbad Pradhan, Suraj K. Nayak, Karan Pande, Sirsendu S. Ray, Kunal Pal, Biswajeet Champaty, Arfat Anis and D.N. Tibarewala. "Acquisition and classification of EMG using a dual-channel EMG biopotential amplifier for controlling assistive devices". *IEEE Annual India Conference, INDICON'16*. *IEEEExplore Digital Library*. December 2016. Bangalore, India; pp.: 1 to 5.
- [22] E.J. Rechy-Ramirez and H. Hu. "Bio-signal based control in assistive robots: a survey". *Digital Communications and Networks*. *Elsevier ScienceDirect*. Volume: 1, Year 2015; pp.: 85 to 101.
- [23] M.I. Rusydi, M. Sasaki, S. Huda, F. Rusydi and R.A. Putra. "Robot manipulator control using absolute encoder and electromyography signal". *Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, ACIRS'16*. *IEEEExplore Digital Library*. 20-22 July 2016. Tokyo, Japan; pp.: 109 to 113.
- [24] Información obtenida en la siguiente dirección web (Febrero 2018): <http://www.backyardbrains.cl/experiments/RobotHand>