

Introducción a los biopotenciales

Angie Triana, Erika Gómez, Ana Carolina Mejía.

Bioingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia Sede Medellín

Octubre 14, 2024

6.1 Realice un esquema donde se describan y expliquen las diferentes etapas del registro de biopotenciales, desde la generación de los potenciales de acción hasta su adquisición por el equipo. Adicionalmente, describa a grandes rasgos los componentes de un equipo de adquisición.

REGISTRO DE BIOPOTENCIALES



Componentes de un equipo de adquisición:

- **Electrodos:** Son los sensores que captan las señales bioeléctricas. Para poder llevar a cabo una medición bioeléctrica, el camino más simple consiste en conectar tres electrodos al sujeto y éstos al amplificador, dos electrodos son para recoger las señales biológicas, y el tercero provee un potencial de referencia [2].
- **Amplificadores:** Se usa para amplificar la señales biológicas, ya que estas son de muy baja amplitud. Con el fin de lograr una calidad óptima de la señal, el amplificador de biopotenciales debe ser adaptado a las especificaciones de la aplicación. Con base en los parámetros de la señal, el ancho de banda adecuado y el factor de ganancia [2].
- **Filtros:** Se usan para eliminar ruido innecesario y limpiar la señal, en este caso es normal el uso de filtro pasa altas y el filtro pasa bajas, que en conjunto conforman el Filtro PasaBanda, es la limitación del ancho de banda y la eliminación de las señales de interferencia [2].
- **Sistema de almacenamiento y procesamiento:** La señal obtenida debe de ser almacenada para posteriores análisis mediante gráficas, es decir un software especializado.

6.2 *Presente una tabla con las principales fuentes de ruido en el registro de biopotenciales. Determine ¿Cuáles de estas fuentes de ruido son estáticas o variantes en el tiempo? Indique qué estrategias se utilizan para controlar o eliminar dicha fuente de ruido.*

Tabla 1. Principales fuentes de ruido en el registro de biopotenciales. [4] [5] [6] [7].

Fuente de ruido	Clasificación (Variante/Estático)	Descripción	Estrategias para mitigar el ruido
Ruido fisiológico o por presencia de otros biopotenciales.	Ruido variante	Al momento de realizar la adquisición de biopotenciales de un sistema en específico (ECG, EMG, EEG), se pueden dar apariciones de biopotenciales o señales generadas por otros sistemas, por ejemplo por la respiración, ruido mioeléctrico o ruido cardíaco.	Para garantizar que durante la adquisición sólo se obtenga la señal de interés, se pueden emplear filtros, bien sea pasabandas (configurados con los rangos de la señal interés), pasa altas o pasa bajas, dependiendo de la señal que se requiera eliminar o filtrar. La presencia de otros biopotenciales podría reducirse en cierta medida colocando los electrodos en posiciones estratégicas. Sin embargo, es casi inevitable eliminarlas completamente.
Interferencias capacitivas por acoplamiento con el paciente	Ruido estático	Se dan a causa del acoplamiento entre el sistema de adquisición y la red de suministro eléctrico. Provocan la aparición sistemática de una señal de 50 Hz en los registros bioeléctricos. Este ruido es captado por los electrodos y produce el efecto más importante de todos los ruidos, ya que en ocasiones suele tener	Para reducirlo se utilizan electrodos de referencia. También se puede mitigar garantizando que la impedancia piel-electrodo sea menor, para una mejor transferencia de la señal que se desea captar.

		amplitudes elevadas, dificultando la visualización de la señal de interés.	
Movimiento de los electrodos o degradación del electrolito.	Ruido variante	En la adquisición de biopotenciales es común que se utilicen electrodos húmedos, donde se utiliza un gel electrolítico como conductor, generándose una interfaz electrodo-electrolito y electrolito-piel. El ruido aparece por las variaciones en la impedancia entre el electrodo y la piel del paciente, que puede verse afectada por el movimiento o degradación del electrolito cuando el tiempo de adquisición es extenso.	Se puede mitigar el ruido procurando que la impedancia electrodo-piel sean bajas, utilizando electrodos de buena calidad, geles conductores que permitan una captación óptima y haciendo una correcta preparación de la piel. También sería factible implementar el monitoreo de contacto.
Ruido externo o ruido del ambiente	Ruido variante	Se genera en un punto del sistema como consecuencia del acoplamiento eléctrico o magnético con otro punto del sistema. Aquí se incluyen las interferencias electromagnéticas y el ruido de interferencia de la red eléctrica, que en el caso de Colombia se encuentra en 60 Hz.	Generalmente se reduce minimizando el acoplo eléctrico o electromagnético a través de blindajes o con la orientación adecuada de los diferentes componentes y conexiones, o utilizando amplificadores de aislamiento en casos específicos.
Movimiento de los artefactos	Ruido variante	Durante la adquisición, los artefactos (como los cables y los dispositivos electrónicos pueden moverse) siendo posible que se experimenten conexiones inadecuadas que interfieren con la adquisición de la señal, golpes, vibraciones mecánicas, microinterrupciones.	Utilizar cables de alta calidad, garantizar que en el espacio de la adquisición no haya objetos que puedan ocasionar el movimiento de los artefactos y procurar que se mantengan en una posición estable.
Inherentes al equipo de adquisición (componentes electrónicos)	Ruido estático	Corresponde al ruido que se genera en los dispositivos electrónicos como consecuencia de su naturaleza física. Es de naturaleza aleatoria.	Uso de componentes electrónicos de alta calidad para realizar la adquisición de biopotenciales y diseños circuitales adecuados.

6.3 Describa ¿Cuál es la problemática asociada al acoplamiento piel-electrodo? ¿Cuáles estrategias se utilizan para mejorarla? Además, responda ¿Por qué el acoplamiento piel-electrodo constituye la etapa más crítica en el registro de señales de superficie (sEMG, EEG, ECG)?

La interfaz piel-electrolito-electrodo transforma la conducción iónica en conducción eléctrica. Tanto la piel

son electrolíticos, esto ocasiona una diferencia de potencial por las concentraciones de iones. En esta interfaz ocurren dos tipos de reacciones: Una reacción de oxidación en el metal y una reacción de reducción en los electrones. El proceso que sucede es la migración de iones por la región, formando dos capas paralelas de iones con cargas opuestas, nombradas doble capa. Estas diferencias iónicas son la fuente del potencial del electrodo. Al capturar los biopotenciales, es importante la hora de elegir los materiales de los electrodos, ya que una elección inadecuada puede provocar un corrimiento de offset que afecte la señal. Un electrodo no reversible es aquel en el que no se produce transferencia de carga a través de la interfaz, mientras que un electrodo reversible permite una transferencia de carga libre entre el metal y el electrolito. Para asegurar una captación adecuada de los biopotenciales, se deben seleccionar electrodos reversibles, como los de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl) [2].

A los electrodos se le asocian muchos problemas de la amplificación de señales bioeléctricas, esto es debido a que hay mucha impedancia la conexión piel-electrolito-electrodo que causan distorsión, también añaden componentes DC que hacen interferencia, para poder superar estos efectos se usan estas estrategias:

- Uso de amplificador : Se puede usar un amplificador diferencial DC, esto con ayuda del uso de los electrodos que deberán ser idénticos para que sus potenciales se tomen como de modo común y que puedan ser cancelados a la salida. La parte negativa es que la alta ganancia requerida para procesar las señales de bajo nivel, puede amplificar las pequeñas diferencias entre los potenciales de los electrodos.
- Cancelación de corrimiento de voltaje: Se puede implementar una etapa para la cancelación del corrimiento de voltaje, debido a que las señales son cercanas a la DC, además que el movimiento de los cables de los electrodos pueden promover el corrimiento de voltaje sobre la línea base, por esto se debe compensar.
- Evitar la unión rígida entre el cable y el electrodo.
- Mantener una densidad de corriente baja en la interfase del electrodo-electrolito.
- Regiones de aislamiento cambiantes según su proximidad con el electrodo.

El acoplamiento piel-electrodo constituye la etapa más crítica en el registro de señales de superficie debido a que la piel presenta una alta impedancia de la piel, y su baja conductividad eléctrica dificulta la adquisición de los biopotenciales. Es por esta razón que se implementan los geles conductores, como se mencionó anteriormente, para mejorar la transmisión de la señal y el contacto entre electrodo-piel. No obstante, es fundamental asegurarse de que el acoplamiento piel-electrodo sea adecuado y se procure que se mantenga lo más estable posible, pues las fluctuaciones producidas por variaciones en el mismo (por movimiento de los electrodos, degradación del gel conductor) afectarán directamente la calidad de la señal mediante la variación de la resolución, presencia de artefactos y la captación de ruido, ya que un acoplamiento inadecuado facilita la captación de interferencias por ruido externo [6] [7].

6.4 Consulte tres aplicaciones clínicas del uso de ECG y EMG (seis aplicaciones en total, tres por cada tipo de señal), el tipo de registro y procesamiento que se utiliza en cada una de ellas.

Diagnóstico de arritmias cardíacas

Para el diagnóstico de patologías como la arritmia, se realiza un electrocardiograma (ECG) para registrar la actividad eléctrica del corazón. Una herramienta de monitoreo importante es el Holter o registro electrocardiográfico ambulatorio, que permite un seguimiento continuo del ECG durante un período prolongado, generalmente entre 24 y 48 horas, e incluso hasta 7 días. El ECG de 12 derivaciones es el más común, en el cual se colocan electrodos en el pecho y extremidades del paciente.

El procesamiento de la señal comienza con un filtrado digital, generalmente utilizando software como MATLAB. Primero, se aplica un filtro pasa banda entre 5 y 15 Hz, lo que ayuda a reducir falsas detecciones

debido a interferencias en la señal. Luego, se emplea un filtro derivador para diferenciar las ondas R de las ondas T y P, obteniendo así información sobre la pendiente de la señal. Posteriormente, se eleva al cuadrado la señal, convirtiéndola en positiva, y se utiliza un integrador para identificar los máximos del complejo QRS.

Después del filtrado, la señal es procesada por una FPGA (Field-Programmable Gate Array) para la detección de los complejos QRS mediante el algoritmo de Pan y Tompkins. Finalmente, en una fase de decisión, la FPGA evalúa si el ECG muestra un ritmo cardíaco normal o la presencia de una arritmia [8].

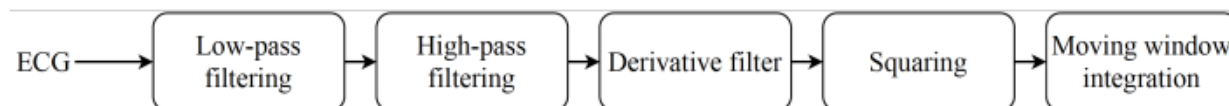


Figura 1. Etapas del algoritmo Pan y Tompkins (Diagrama de bloques).

Detección de isquemia de miocardio

La isquemia de miocardio es una de las principales causas que puede conducir a infarto, arritmias y, en algunos casos, a la muerte. El electrocardiograma de alta resolución (HR-ECG) es un tipo especial de ECG registrado con equipos de características avanzadas, que permite detectar eventos cardíacos que no son visibles en un ECG convencional. En el análisis de esta señal, se evalúa la pendiente y el desplazamiento de la onda ST, utilizando técnicas de procesamiento de señales como la transformada de Fourier para identificar signos tempranos de isquemia [9].

Monitor Holter

Un monitor Holter es un dispositivo capaz de adquirir y almacenar información útil del ECG durante más de 6 horas, manteniendo una buena morfología de la señal incluso en presencia de movimientos. Los electrodos se colocan en el pecho del paciente, y el dispositivo registra los datos de manera continua. En cuanto al procesamiento de la señal, el sistema cuenta con un circuito de adquisición que incluye un amplificador de instrumentación y un filtro pasa banda activo de primer orden (1 Hz a 90 Hz), con una ganancia de 500, lo que permite obtener una amplitud media del ECG de 1 V. Además, se utiliza un offset de 1.5 V para garantizar una adecuada adquisición de datos en dispositivos digitales, como Arduino. Los datos se almacenan en una tarjeta SD a través de un módulo específico. Por último, se implementa un algoritmo de detección de complejos QRS basado en una ventana derivativa, y el procesamiento de la señal permite calcular la frecuencia cardíaca, evaluándose tanto en condiciones simuladas como en un sujeto de control [10].

Diagnóstico de trastornos neuromusculares

La adquisición convencional de EMG se realiza con electrodos de aguja que captan la actividad de las fibras musculares (FMs) en un radio de 2.5 mm alrededor de la punta. Se registra el potencial en reposo, durante una contracción leve y durante una contracción voluntaria máxima. Dado que las señales bioeléctricas son muy débiles, es necesario amplificarlas entre 50 y 250,000 veces para obtener una representación legible, con valores entre 1 y 10 V, que es el rango adecuado para los microprocesadores. Luego, se filtra la señal para eliminar frecuencias ajenas a la señal fisiológica: inferiores a 2-5 Hz (por movimientos de la aguja) y superiores a 10 kHz (ruido técnico). También se emplea un filtro notch para eliminar la interferencia de la red eléctrica a 50 Hz (o 60 Hz en América). Los filtros pueden ser analógicos o digitales, y posteriormente se digitaliza la señal mediante conversores analógico-digitales [11].

Prótesis controlada por EMG

Las señales de EMG se utilizan para controlar prótesis electrónicas y dispositivos de rehabilitación, especialmente en prótesis de miembros superiores. En el caso de una prótesis controlada por señales de electromiografía para una desarticulación de muñeca, la adquisición de la señal EMG se realiza mediante el sistema Biopac MP36® y un circuito impreso diseñado específicamente para el control de la prótesis. Los electrodos se colocan en un arreglo bipolar, uno sobre el músculo flexor radial del carpo (músculo flexor) y otro sobre el músculo extensor de los dedos (músculo extensor), mientras que los electrodos de referencia se ubican en el codo, como se muestra en la Figura 2.

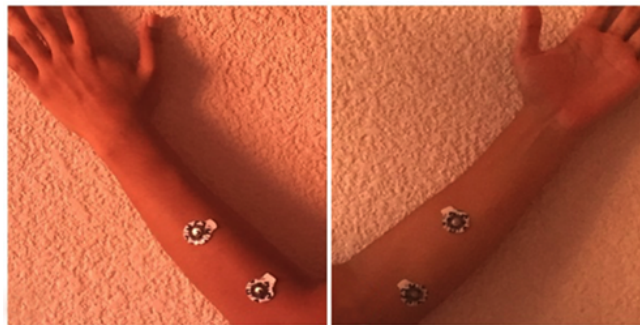


Figura 2. Colocación bipolar de electrodos del músculo extensor (a) y músculo flexor (b).

El procesamiento de la señal EMG se realiza en cinco etapas. Primero, se amplifica la señal con un amplificador de instrumentación AD620 con una ganancia de 495. En la segunda etapa, se aplican dos filtros de ganancia unitaria: un filtro pasa-bajas con una frecuencia de corte de 500 Hz y un filtro pasa-altas de 20 Hz. La tercera etapa consiste en la rectificación de precisión de la señal, seguida de un segundo filtro pasa-bajas con una frecuencia de corte de 12.2 Hz para suavizar la señal rectificada (envolvente). Finalmente, en la quinta etapa, se amplifica la señal con una ganancia de 5 [12].

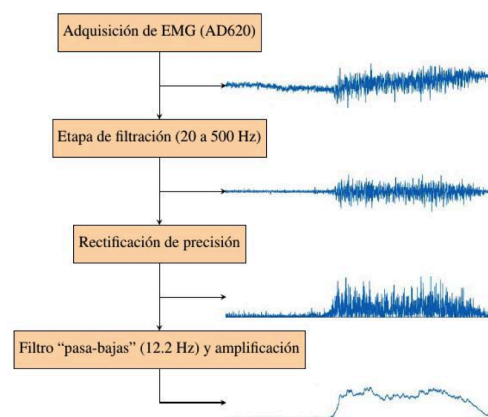


Figura 3. Diagrama de flujo para el procesamiento analógico de la señal de EMG para control de prótesis.

Detección de Fatiga Muscular

La adquisición de señales EMG para la detección de fatiga muscular se realiza con electrodos superficiales de AgCl. El procesamiento comienza con una amplificación mediante un amplificador diferencial INA114, un dispositivo de bajo costo que ofrece alta precisión y una ganancia ajustable de 1 a 10,000. Luego, se filtra la señal EMG en la banda de 20 Hz a 300 Hz utilizando un filtro pasa-bajas integrador y un filtro pasa-altas derivador de primer orden. Para la adquisición de datos, se emplea el sistema compactDAQ de National Instruments junto con el módulo de entradas analógicas NI-9205. Finalmente, se utiliza software de análisis desarrollado en LabVIEW y Matlab para procesar y analizar las señales SEMG [13].

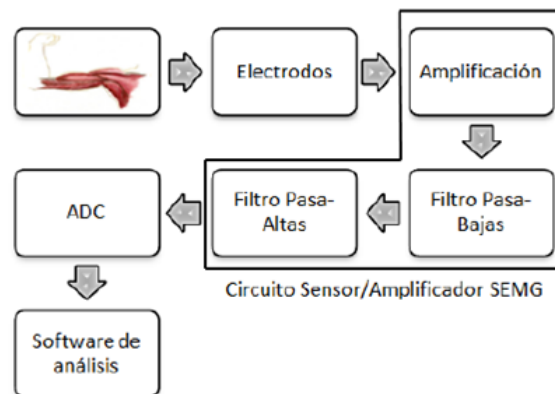


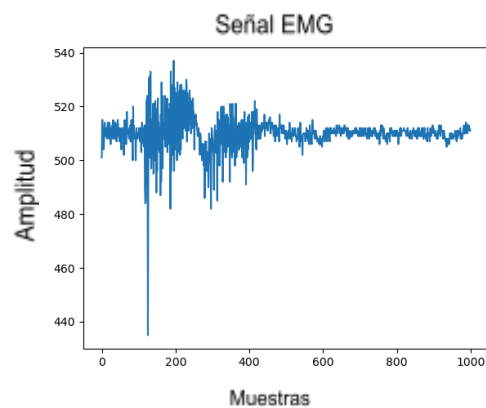
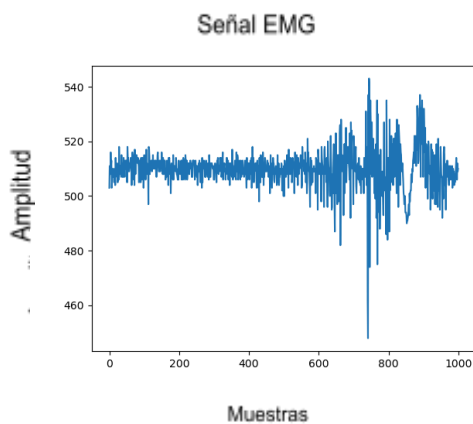
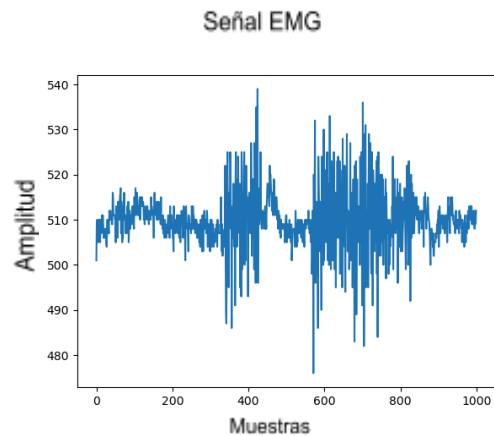
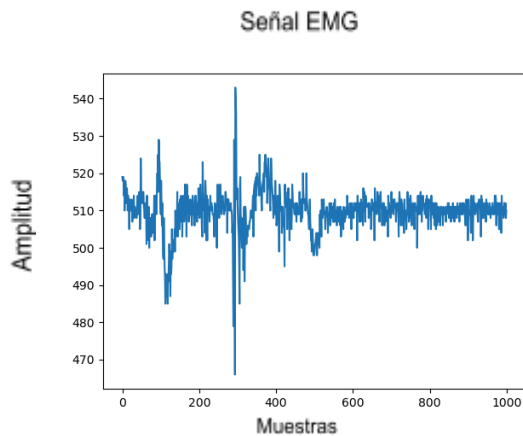
Figura 4. Diagrama de bloques del Sistema de adquisición de señales SEMG para la detección de fatiga muscular.

6.5 *Presente la realización de las tareas descritas en la Aplicación y adjunte los archivos de código Arduino y Python implementados; además adjunte un ejemplo de cada una de las señales registradas.*

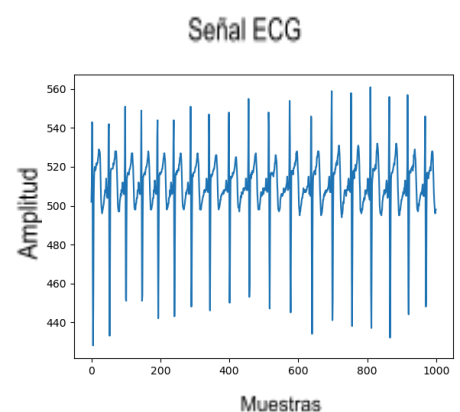
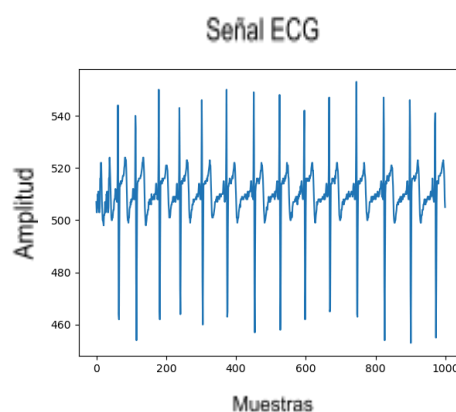
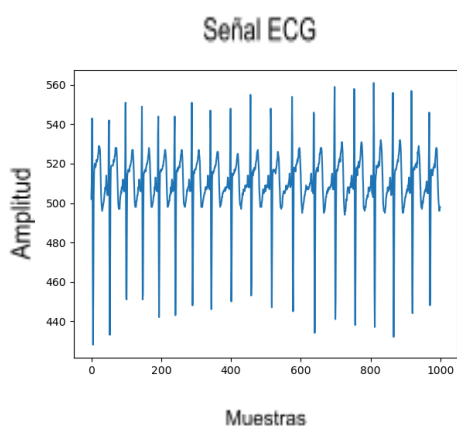
Realización de las tareas:

1. Posicionamiento electrodos: Se realiza el adecuado posicionamiento de los electrodos dependiendo de la señal que se desea captar, en el músculo para el caso de la señal EMG y en el pecho para la señal ECG, se usaron 3 electrodos, dos para captar las señales y uno como referencia que se usó como tierra, para poder ajustar el offset.
2. Configuración del hardware: Es el sistema de adquisición, en esta parte se conectaron los sensores es decir los electrodos a la tarjeta la cual está conectada a un arduino para captar las señales, además también servirá como intermediario, ya que transformó las señales captadas en datos digitales para poder procesarse.
3. Captura de las señales: Las señales que se capturaron con el Arduino se pasaron por medio de un cable de extensión USB al computador para recibir los datos.
4. Procesamiento y visualización: Se usó Python para procesar los datos que tomó el programa Arduino, cuando se tomaron los datos me Python se usaron librerías para poder adquirir y procesar estas señales. Posteriormente las señales fueron graficadas después de algunos procesos de filtrado y ajuste de la frecuencia de muestreo de estas señales para poder analizar estas adecuadamente.

Señales adquiridas para adquisición de electromiografía (EMG)



Señales adquiridas para adquisición de electrocardiografía (ECG)



6.6 Adjunte al menos tres conclusiones, y referencias bibliográficas apropiadas y suficientes (evitar el uso de páginas web y preferir el uso de artículos académicos).

- Al momento del registro de biopotenciales es importante tener en cuenta la interfaz piel-electrolito-electrodo, ya que de esto depende que se pueda convertir la conducción iónica en conducción eléctrica, y de esta forma poder captar las señales o información del cuerpo humano.

Para esto es importante también la elección del electrodo, tener un ambiente controlado y el aumento del área analizada. Por lo tanto, el uso de electrodos reversibles y la consideración cuidadosa de la interfaz entre el cuerpo y los electrodos son clave para obtener mediciones precisas en la adquisición de biopotenciales.

- El control de causas extrínsecas de ruido, como el tipo de electrodo utilizado, el ruido ambiental, el acoplamiento piel-electrodo, el movimiento de los componentes del equipo de adquisición, y la calidad de los componentes electrónicos es crucial para obtener bioseñales de alta calidad y fiabilidad para su posterior uso en diagnóstico, investigación o evaluación de funciones fisiológicas.
- La adquisición de biopotenciales, como los de EMG o ECG, requiere de una etapa de amplificación y filtrado debido a la baja amplitud y alta susceptibilidad al ruido de estas señales. Sin estas etapas, las señales serían difíciles de interpretar o incluso indetectables. La amplificación aumenta su magnitud para hacerlas adecuadas para su procesamiento por sistemas digitales, mientras que el filtrado elimina interferencias no deseadas, garantizando una señal más clara y legible. Posteriormente, se realiza la conversión de la señal de analógica a digital mediante un conversor ADC, lo que permite su análisis y procesamiento en diversas aplicaciones clínicas y tecnológicas.

Referencias bibliográficas

- [1] eduCommons. (s. f.). IB_material — OCW de la Universitat de Valencia.
http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/1-5/ib_material
- [2] DE LA TORRE FREGOSO, M. M. (2013). DISEÑO e IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA EL REGISTRO DE BIOPOTENCIALES CON FINES DIDÁCTICOS [Tesis de pregrado, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO].
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3786/1/Tesis.pdf>
- [3] García M, A. (2007). Telemetría Biopotenciales WIFI [Proyecto de grado, Uniandes].
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/55d36e49-f3ca-4357-834b-c7a82a141a5f/content>
- [4] J. M. Drake. “Capítulo 4. Ruidos e interferencias: Técnicas de reducción”. Universidad de Cantabria. Santander, 2005. [En línea]. Disponible:
https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_it/iec_4.pdf
- [5] J. Mulindi. “3 Sources of Noise in Biomedical Measurement Systems”. Biomedical Instrumentation Systems. [En línea]. Disponible:
<https://www.biomedicalinstrumentationsystems.com/3-sources-of-noise-in-biomedical-measurement-systems/>
- [6] C. V. Silva y L. P. Farriol, “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE SEÑALES ELECTROCARDIOGRÁFICAS”, Scielo.cl. 2004. [En línea]. Disponible en:
<https://www.scielo.cl/pdf/rfacing/v13n1/art05.pdf>
- [7] F. Córdova Ricapa. “Desarrollo de un sistema para la evaluación de la actividad muscular mediante electrodos de superficie”. Tesis PUCP. [En línea]. Disponible:
https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4768/CORDOVA_FERNANDO_ACTIVIDAD_MUSCULAR_ELECTRODOS.pdf?sequence=3&isAllowed=y

- [8] D. Naranjo, “Detección de arritmias mediante procesamiento de señales ECG a través de FPGAs”, Trabajo fin de máster, Univ. Oberta Catalunya, Madrid, 2022. [En línea]. Disponible: <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/139388/6/gmorenteTFM0122memoria.pdf>
- [9] R. Magrans, “Detección de isquemia de miocardio y estudio de la respuesta autónoma asociada mediante procesamiento de la señal de ECG”, Univ. Politec. Catalunya, 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/404305#page=1>
- [10] M. Cárdenas y A. Mejía, “Diseño e Implementación de Monitor Holter de Bajo Costo con Almacenamiento de Señal de ECG”, Univ. Auton. SAn Luis Potosi, 2016. [En línea]. Disponible: <https://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/download/25/20>
- [11] “Electromyographic signal processing and analysis methods”, Anales del Sist. Sanitario de Navarra, vol. 32, enero de 2010. Accedido el 16 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.23938/assn.0151>
- [12] M. Rodríguez, G. Dorantes y M. Mendoza, “Development of a Myoelectric-Controlled Prosthesis for Transradial Amputees”, Rev. Mex. Ing. Biomed, vol. 38, n.º 3, 2017. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-95322017000300602
- [13] J. Correa, E. Morales, J. Huerta, J. González y C. Cárdenas, “Sistema de Adquisición de Señales SEMG para la Detección de Fatiga Muscular”, Rev. Mex. Ing. Biomed, vol. 37, n.º 1, 2016. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-95322016000100017