

## Introducción a los biopotenciales y adquisición de señales ECG y EMG

Isabella Bedoya Orozco - Antonia Yepes Quintero

Bioingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia Sede Medellín

[isabella.bedoyao@udea.edu.co](mailto:isabella.bedoyao@udea.edu.co), [antonía.yepes@udea.edu.co](mailto:antonía.yepes@udea.edu.co)

Octubre de 2024

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



### Componentes principales de un sistema de adquisición de biopotenciales [4]:

Un sistema de adquisición de biopotenciales se compone de varios elementos importantes que permiten la captura, procesamiento y análisis de señales bioeléctricas, como las generadas en el corazón (ECG) o en los músculos (EMG).

**Electrodos:** Son dispositivos que se colocan en la superficie del cuerpo para captar los biopotenciales. Dependiendo del tipo de señal a registrar, como ECG o EMG, se seleccionan puntos específicos para su colocación. Existen diferentes tipos de electrodos, como los de superficie, que se utilizan para registros no invasivos, y los de aguja, empleados en mediciones invasivas. Los electrodos deben estar bien colocados y la

piel debe estar preparada adecuadamente para asegurar una buena conductividad y minimizar el ruido en la señal.

**Amplificación de la señal:** Dado que las señales bioeléctricas suelen tener amplitudes muy bajas, es necesario amplificarlas para que sean detectables y procesables. Este proceso se realiza mediante un amplificador, que permite aumentar la magnitud de la señal sin distorsionarla ni introducir ruido adicional. La amplificación adecuada es importante para asegurar que las señales captadas sean suficientemente fuertes para su análisis.

**Filtrado:** Durante la adquisición de biopotenciales, las señales pueden verse afectadas por diversas fuentes de interferencia, como el ruido ambiental o el ruido muscular. Para eliminar estas señales no deseadas y mejorar la calidad de la señal, se utilizan filtros. Los filtros pueden ser analógicos o digitales, y su función es eliminar las frecuencias no deseadas, como la interferencia de la línea eléctrica y otros ruidos que puedan afectar la integridad de los datos.

**Conversión de la señal:** Una vez amplificada y filtrada, la señal bioeléctrica sigue siendo analógica. Para poder procesarla y almacenarla en sistemas digitales, se convierte a formato digital mediante un convertidor Analógico-Digital (ADC). Esta conversión permite que la señal sea interpretada y procesada por sistemas computarizados para su análisis detallado.

**Procesamiento y almacenamiento de la señal:** La señal digitalizada es enviada a una unidad de procesamiento, como un microcontrolador, donde se procesa y almacena. Durante este paso, la señal puede visualizarse en tiempo real, analizarse para extraer información relevante o almacenarse para su estudio posterior.

**Software de adquisición y procesamiento:** El software asociado a los sistemas de adquisición permite controlar y gestionar todo el proceso de captura de señales. En este caso, se utiliza arduino y un entorno python. Estos software facilitan la visualización de las señales, la aplicación de filtros digitales para mejorar su calidad, y el almacenamiento de los datos adquiridos. Además, se puede realizar un análisis avanzado de las señales, como la identificación de patrones específicos o la comparación entre señales pre y post-procesadas.

**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. Indique qué estrategias se utilizan para controlar o eliminar dicha fuente de ruido**

Fuente de Ruido	Descripción	Estática / Variante en el tiempo	Estrategias de control o eliminación
Ruido electromagnético ambiente	Ruido proveniente de campos electromagnéticos externos generados por otros dispositivos electrónicos o redes de comunicación.	Variante en el tiempo	- Alejar el sistema de fuentes electromagnéticas - Filtro pasa bajas [6]
Interfaz electrodo-piel	El ruido en la interfaz entre la piel y el gel puede ser mayor que el ruido térmico, dependiendo de las propiedades de la piel.	Variante en el tiempo	- Preparación adecuada de la piel. - Uso de geles conductores de calidad. - Piel hidratada
Ruido por movimiento muscular (EMG)	Interferencias por la actividad muscular	Variante en el tiempo	- Relajación del paciente - Uso de electrodos de

	involuntaria o voluntaria, que contaminan señales de ECG o EEG.		alta calidad - Filtros de rechazo de bandas específicas (EMG)
Tamaño del electrodo	El tamaño del electrodo influye directamente en el nivel de ruido, siendo inversamente proporcional al área del electrodo.	Estática	- Uso de electrodos de mayor área (como Ag-AgCl pregelados) - Optimización del tamaño del electrodo para reducir el ruido [5]
Artefactos de movimiento	Cambios en la colocación de los electrodos o la tensión de la piel debido a movimientos, que introducen ruido en la señal.	Variante en el tiempo	- Uso de electrodos adhesivos o fijos - Minimizar movimientos durante la medición[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)?**

El acoplamiento piel-electrodo presenta desafíos importantes que afectan la calidad de los registros de señales biopotenciales como el EEG, EMG y ECG. La principal problemática se centra en la alta impedancia que se genera en la interfaz entre la piel y el electrodo. Esta impedancia puede variar significativamente dependiendo de factores como la ubicación del electrodo, el estado de la piel (humedad, sudoración) y la presión aplicada. Los electrodos secos tienden a tener una impedancia más alta y menos estable en comparación con los electrodos húmedos, lo que afecta la estabilidad de las señales, especialmente en aplicaciones que requieren registros prolongados y precisos, como el EEG [7][10].

Otro problema común es el desbalance de impedancia entre los electrodos, que puede amplificar la interferencia electromagnética (EMI) de la red eléctrica (50-60 Hz). Esta interferencia se origina cuando la conversión de voltaje de modo común a diferencial es afectada por diferencias en la impedancia de los electrodos, lo que genera artefactos en las señales registradas [8]. Además, los artefactos de movimiento son otra fuente de ruido común. Los cambios en la posición de los electrodos o en el contacto con la piel, provocados por el movimiento del paciente, pueden alterar la impedancia, distorsionando las señales [9].

**Estrategias para mejorar el acoplamiento piel-electrodo:**

Es recomendable realizar una preparación adecuada de la piel, limpiar la piel y realizar una abrasión suave para eliminar células muertas ayuda a reducir la impedancia de contacto, mejorando la calidad de las señales. Usar alcohol para limpiar el área de contacto también contribuye a disminuir la resistencia [7].

Se recomienda el uso de geles conductores, los electrodos húmedos, que utilizan geles conductores, presentan una impedancia mucho más baja y estable, lo que mejora considerablemente la calidad del acoplamiento. Estos geles facilitan la transmisión de señales eléctricas al mejorar la conductividad entre la piel y el electrodo [9][10].

Utilizar electrodos semi-secos ayuda a mejorar este proceso de adquisición de señales, estos electrodos, que combinan características de los electrodos secos y húmedos, ofrecen comodidad al usuario mientras mantienen una impedancia baja. Liberan pequeñas cantidades de solución salina, mejorando el contacto sin los inconvenientes de los geles tradicionales [7].

Se pueden realizar mediciones del desbalance de impedancia, actualmente se han desarrollado técnicas para medir el desbalance de impedancia entre los electrodos a frecuencias de la red eléctrica, lo que permite ajustar el sistema de registro y minimizar los artefactos provocados por diferencias en la impedancia [8].

Finalmente utilizar electrodos flexibles y de contacto mejorado ayudan a realizar una mejor adquisición ya que los avances en el diseño de electrodos flexibles y delgados permiten un mejor ajuste a la piel, reduciendo la impedancia de contacto y mejorando la estabilidad de las señales, especialmente en aplicaciones donde el paciente está en movimiento [9].

#### **Importancia crítica del acoplamiento piel-electrodo:**

El acoplamiento piel-electrodo es una etapa crítica en el registro de señales biopotenciales porque determina directamente la calidad de las señales obtenidas. Un mal acoplamiento o una alta impedancia en la interfaz puede degradar severamente las señales, introduciendo ruido, distorsiones y artefactos que dificultan su interpretación. Además, el desbalance de impedancia entre los electrodos incrementa la susceptibilidad a la interferencia electromagnética, lo que compromete la calidad de los registros [8][10].

#### **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.**

	<b>Aplicación clínica</b>	<b>Tipo de Registro</b>	<b>Procesamiento</b>
ECG	Detección de arritmias cardiacas	ECG de 12 derivaciones o monitoreo Holter para registro continuo de la actividad cardíaca	Detección automática de picos R, análisis del intervalo QT y variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC). Uso de algoritmos de aprendizaje profundo para mejorar la precisión diagnóstica, superando a los cardiólogos en algunos casos [11].
ECG	Diagnóstico de infarto de miocardio (MI)	ECG de 12 derivaciones para detectar cambios en el segmento ST	Análisis del segmento ST para detectar elevaciones o depresiones indicativas de infarto. Los métodos de aprendizaje profundo mejoran la precisión y rapidez del diagnóstico, reduciendo el riesgo de complicaciones severas [12].
ECG	Monitorización fetal (FECG)	FECG no invasivo a través de electrodos colocados en el abdomen de la madre	Procesamiento avanzado que incluye filtrado de ruido y separación de señales materno-fetales. Algoritmos adaptativos para mejorar la detección de latidos fetales, optimizando la monitorización de la salud del feto durante el trabajo de parto [13]
EMG	Diagnóstico de neuropatías	EMG de superficie y de aguja	Se evalúan tanto la amplitud como la frecuencia de las señales musculares para detectar la presencia de actividad anormal. La frecuencia anormal o la amplitud baja pueden indicar la presencia de daño en el nervio. Los algoritmos pueden identificar patrones de descargas musculares irregulares, facilitando el diagnóstico de neuropatías como la neuropatía periférica o la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) [14].
EMG	Monitorización	EMG de superficie	La fatiga muscular suele manifestarse como

	de la fatiga muscular		una disminución de la frecuencia media del espectro de la señal EMG y un incremento en la amplitud debido a la activación de unidades motoras adicionales. El procesamiento de la señal incluye la aplicación de filtros para eliminar ruido y artefactos, y se utiliza para identificar el momento en que un músculo empieza a fatigarse. El monitoreo continuo puede ser útil en rehabilitación y entrenamiento deportivo [15].
EMG	Control de prótesis basadas en EMG	EMG de superficie, multi-canal	Se procesan las señales para identificar patrones de activación muscular y relacionarlas con movimientos específicos. Los algoritmos de reconocimiento de patrones y redes neuronales se utilizan para traducir las señales EMG en comandos para controlar prótesis en tiempo real. Estos sistemas permiten a los usuarios controlar dispositivos robóticos, como prótesis de brazos o piernas, con alta precisión, mejorando la calidad de vida de las personas con amputaciones o discapacidades [16].

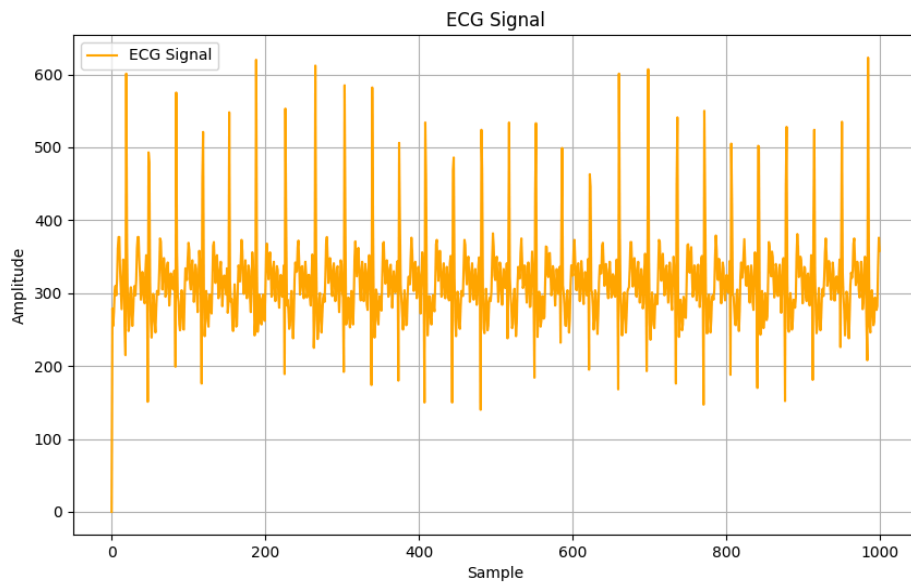
**5. Presente la realización de las tareas descritas en la Aplicación y adjunte los archivos de código Arduino y Python implementados; además adjunte un ejemplo de cada una de las señales registradas.**

Se utilizó un sistema para la adquisición de señales bioeléctricas, específicamente EMG y ECG, empleando un Arduino como plataforma central de procesamiento. Para la detección de las señales, se utilizaron dos electrodos encargados de captar la actividad eléctrica generada por el cuerpo, mientras que un tercer electrodo actuó como tierra, asegurando una referencia estable para la adquisición de datos. Este conjunto de electrodos permitió captar tanto la actividad muscular (EMG) como la actividad cardíaca (ECG).

El Arduino fue programado para procesar las señales capturadas por los electrodos y transmitirlas en tiempo real a un computador. Un código desarrollado específicamente para esta tarea permitió visualizar la evolución de las señales a través de una interfaz gráfica. De esta manera, fue posible monitorear de forma instantánea la actividad bioeléctrica, observando las variaciones en las señales capturadas de manera dinámica y en tiempo real.

Además, se empleó un segundo componente en Python para realizar la adquisición continua de datos durante un periodo fijo de 20 segundos. El código en Python fue diseñado para recibir la señal transmitida desde el Arduino a través de una conexión serial. Este proceso de adquisición no solo se centró en la transmisión continua de los datos, sino que también los registraba a intervalos de tiempo regulares, lo que aseguraba que no se perdieran muestras importantes. Los datos obtenidos durante esos 20 segundos fueron organizados y almacenados en un archivo CSV. Este formato es ideal para su posterior análisis, ya que facilita la importación de los datos a herramientas estadísticas y de procesamiento de señales. La estructura del archivo CSV permite registrar el tiempo de adquisición junto con las señales EMG y ECG, lo que proporcionó una base sólida para un análisis de las señales capturadas.

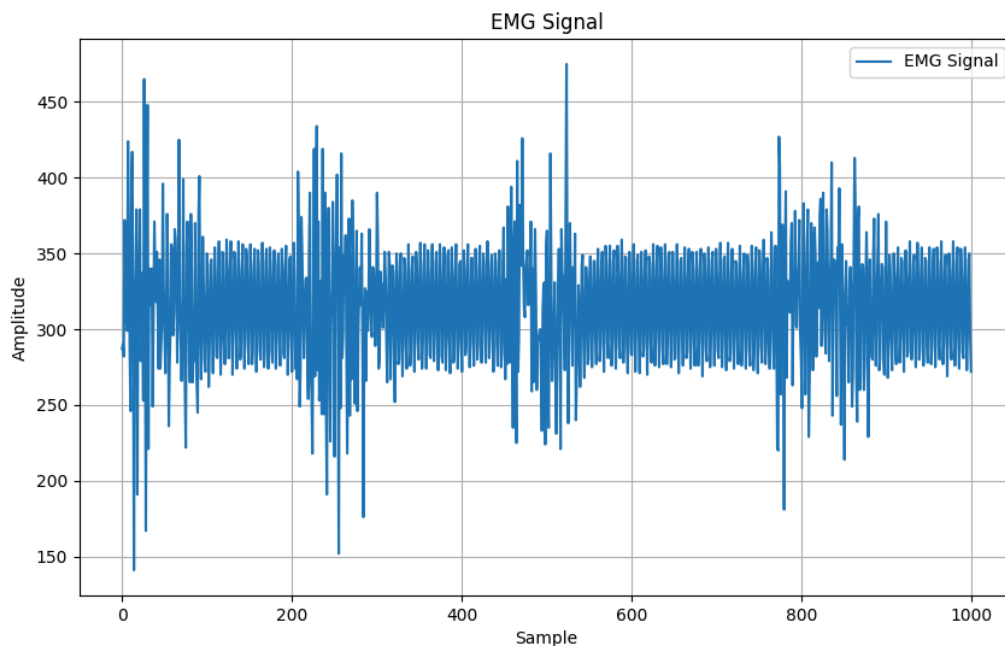
A continuación se presentan las señales obtenidas para ECG y EMG respectivamente:



El gráfico de ECG muestra una señal afectada por ruido y artefactos que distorsionan el registro, evidenciado por la presencia de picos abruptos que no siguen el patrón regular de un electrocardiograma típico. Aunque la señal muestra un patrón bastante regular que podría corresponder a los complejos QRS de un latido cardíaco normal, se observan puntos donde la amplitud varía de manera abrupta, alcanzando valores superiores a 600, lo que indica posibles interferencias. Estos picos de alta amplitud, que no siguen el ritmo esperado del latido, pueden ser el resultado de varias causas.

En primer lugar, los artefactos de movimiento son una causa común de los picos irregulares y abruptos, ya que el contacto electrodo-piel se ve afectado cuando el paciente no está completamente quieto o cuando hay mala adherencia de los electrodos. Además, estos artefactos son comunes en registros de ECG en condiciones de movimiento del sujeto. También se debe considerar la interferencia electromagnética, que podría contribuir a estos picos. Fuentes externas, como campos electromagnéticos cercanos o un mal blindaje en los cables del electrodo, pueden generar interferencias. En este caso, la interferencia puede verse exacerbada por un desbalance en la impedancia de los electrodos, lo que amplifica las señales no deseadas [5] [6]. Otra razón importante es la mala calidad del acoplamiento piel-electrodo, que puede ocurrir cuando los electrodos están secos o la piel no ha sido bien preparada, generando fluctuaciones en la señal que resultan en estos picos anómalos [7].

A pesar de estas interferencias, se puede observar una periodicidad en el rango medio de la gráfica, lo que sugiere que la señal cardíaca está presente aunque distorsionada. Para mejorar la calidad del registro, se podría aplicar un filtrado adecuado, como un filtro pasa bajas o de rechazo de banda, para eliminar el ruido y las interferencias electromagnéticas, optimizando la precisión del análisis.



El gráfico de EMG refleja la actividad muscular durante una tarea de flexión y extensión del brazo. Se observa que los picos altos y abruptos en la señal corresponden a los momentos en que se realiza la flexión rápida del brazo. Este comportamiento es típico cuando los músculos se activan intensamente para generar fuerza en un corto período de tiempo, lo que resulta en una mayor amplitud de la señal.

Por otro lado, las secciones de menor amplitud corresponden a la extensión lenta del brazo. Durante este movimiento, la activación muscular es más controlada y menos intensa, lo que se traduce en una señal EMG de menor amplitud y frecuencia. La diferencia entre ambos patrones refleja las distintas demandas neuromusculares para movimientos rápidos y lentos: los movimientos rápidos requieren mayor activación de unidades motoras, mientras que los lentos priorizan el control y la estabilidad muscular.

La señal EMG también muestra un nivel considerable de ruido, que, al igual que en el ECG, podría deberse a interferencias electromagnéticas externas causadas por un aislamiento inadecuado del equipo de adquisición. También podrían influir movimientos involuntarios del electrodo o del sujeto, así como problemas de acoplamiento entre los electrodos y la piel, lo que genera picos y caídas bruscas en la señal. Estas perturbaciones son especialmente notorias en las muestras iniciales y en varias secciones dispersas a lo largo de la señal.

## 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)

- La aplicación de los conceptos teóricos sobre la adquisición de señales biopotenciales en un entorno controlado es esencial para comprender cómo los factores externos, como el ruido, afectan las señales. A través de la práctica, se demostró que un manejo adecuado de los componentes del equipo y la identificación de las fuentes de interferencia son clave para optimizar la calidad de las señales en entornos clínicos o de investigación.
- La amplificación y el filtrado efectivos de las señales bioeléctricas, son determinantes para lograr registros óptimos en la adquisición de ECG y EMG. Estas técnicas ayudan a evitar interferencias, lo que garantiza una interpretación precisa de la actividad cardíaca y muscular.
- La correcta colocación de los electrodos y una adecuada preparación de la piel son pasos críticos para minimizar la impedancia y reducir los artefactos durante el monitoreo de señales bioeléctricas. Estas

acciones permiten obtener registros más fiables y precisos, mejorando la calidad de las señales adquiridas.

## Referencias

- [1] Winters, J. M., & Story, M. F. (Eds.). (2006). *Medical Instrumentation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420006223>
- [2] Mohr, M., Schön, T., von Tscharn, V., & Nigg, B. M. (2018). Intermuscular Coherence Between Surface EMG Signals Is Higher for Monopolar Compared to Bipolar Electrode Configurations. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00566>
- [3] Universidade do Minho: Photonic platform for bioelectric signal acquisition on wearable devices. (s.f.). Universidade do Minho: Página principal. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/19759>
- [4] Gohel, V., & Mehendale, N. (2020). Review on electromyography signal acquisition and processing. *Biophysical Reviews*, 12(6), 1361–1367. <https://doi.org/10.1007/s12551-020-00770-w>
- [5] E. Huigen, A. Peper, and C. A. Grimbergen, "Investigation into the origin of the noise of surface electrodes," *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 40, no. 3, pp. 332–338, 2002.
- [6] Biosemi.com. [Online]. Available: <https://www.biosemi.com/publications/pdf/ElectrodesMBEC.pdf>. [Accessed: 06-Oct-2024].
- [7] G. Li, S. Wang, Y. Duan, and H. Zhang, "Towards Gel-Free Electrodes: A Systematic Study of Electrode-Skin Impedance," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. xxx, pp. xxx-xxx, 2016, doi: 10.1016/j.snb.2016.10.005.
- [8] E. M. Spinelli, M. A. Mayosky, and R. Pallàs-Areny, "A Practical Approach to Electrode-Skin Impedance Unbalance Measurement," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 7, pp. 1451-1454, Jul. 2006, doi: 10.1109/TBME.2006.875714.
- [9] H. Wu, G. Yang, K. Zhu, S. Liu, W. Guo, Z. Jiang, and Z. Li, "Materials, Devices, and Systems of On-Skin Electrodes for Electrophysiological Monitoring and Human-Machine Interfaces," *Advanced Science*, vol. 8, no. 2, pp. 2001938, Dec. 2020, doi: 10.1002/advs.202001938.
- [10] L. Yang, L. Gan, Z. Zhang, Z. Zhang, H. Yang, Y. Zhang, and J. Wu, "Insight into the Contact Impedance between the Electrode and the Skin Surface for Electrophysical Recordings," *ACS Omega*, vol. 7, pp. 13906-13912, Apr. 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c00282.
- [11] Y. Jin et al., "Cardiologist-level Interpretable Knowledge-fused Deep Neural Network for Automatic Arrhythmia Diagnosis," *Communications Medicine*, vol. 4, no. 31, pp. 1-11, 2024, doi: 10.1038/s43856-024-00464-4.
- [12] C. Vanello et al., "Real-time Fetal Electrocardiography: Assessment and Potential Applications," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 38, pp. 1-12, 2024, doi: 10.1038/s43856-024-00464-4.
- [13] G. Sameni, M. B. Shamsollahi, C. Jutten, and M. B. P. S. N. Clifford, "A Nonlinear Bayesian Filtering Framework for ECG Denoising," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 57, no. 4, pp. 797-806, Apr. 2010, doi: 10.1109/TBME.2009.2033042.
- [14] D. Biller, "Neuropathy, Diagnosis and Management," in *StatPearls* [Internet], StatPearls Publishing, 2021. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK563169/>.



[15] K. Karthick et al., "Electromyographic Indicators of Muscle Fatigue during Dynamic Contractions: A Review," *Frontiers in Physiology*, vol. 13, 2022, doi: 10.3389/fphys.2022.9406287. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9406287/>.

[16] L. Vujaklija et al., "Multichannel Electromyography in Prosthetic Control: A Guide to Muscle Sensing and Pattern Recognition," *Frontiers in Neurobotics*, vol. 14, 2023, doi: 10.3389/fnbot.2023.10470657. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10470657/>.