



Fisiología de la contracción muscular y la conducción nerviosa

Objetivos de aprendizaje

- Describir las características del acoplamiento excitación-contracción en el músculo esquelético.
- Demostrar el concepto de umbral al estimular nervios motores periféricos
- Integrar la fisiología nerviosa y muscular en los estudios de velocidad de conducción nerviosa y electromiografía.

Resultado de aprendizaje

- Explica los mecanismos que participan en la transmisión neuromuscular y en la contracción muscular a través de los resultados de la práctica de laboratorio.

Glosario de términos

Ánodo: En un estimulador eléctrico, el ánodo es el polo positivo, hacia donde migran los electrones desde el cátodo (polo negativo).

Cátodo: En un estimulador eléctrico, el cátodo es el polo negativo, desde donde migran los electrones hacia el ánodo (polo positivo).

Contracción isométrica: Es el tipo de contracción en la cual se genera tensión del músculo, pero las fibras musculares se mantienen su longitud.

Contracción isotónica: Es la contracción en la que se mantiene una tensión constante en el músculo a medida que cambia de longitud.

Latencia: Tiempo que transcurre desde el inicio del estímulo hasta el inicio de la respuesta.

Unidad Motora: Unidad funcional para describir el control neuronal del proceso de contracción muscular. Cada unidad motora consiste en una motoneurona y todas las fibras musculares que inerva.

Fatiga: Incapacidad para seguir generando un nivel de fuerza o una intensidad de ejercicio determinada.

Tetania: Trastorno caracterizado por un aumento de la excitabilidad de los nervios, espasmos musculares dolorosos, temblores o contracciones musculares intermitentes, provocados por una alteración hidroelectrolítica o metabólica (hipocalcemia, hipomagnesemia, alcalosis)

1. Introducción

Los estudios electrofisiológicos de electromiografía (EMG) y velocidad de conducción nerviosa (VCN), son técnicas diagnósticas de utilidad en la exploración del sistema nervioso periférico y del aparato musculoesquelético y la relación que existe entre ambas.

1.1. Velocidad de Conducción Nerviosa

Los estudios de conducción nerviosa son técnicas electrofisiológicas que permiten estudiar la propagación del impulso nervioso en cualquier nervio periférico que puede ser sensitivo, motor o mixto.

Son especialmente útiles para el diagnóstico de la enfermedad de nervios periféricos (neuropatía), o como seguimiento de la recuperación tras una lesión. La valoración de la velocidad de conducción nerviosa (VCN) permite comparar los nervios de las extremidades o de regiones proximales de manera bilateral.

El sistema nervioso periférico se compone de dos grandes grupos de fibras nerviosas: mielinizadas y no mielinizadas. La velocidad de conducción de una neurona depende del diámetro del axón y de la presencia de mielina que lo recubre. Cuanto mayor es el diámetro del axón, mayor es la velocidad de conducción de los potenciales de acción (clasificación de Erlanger y Gasser, **tabla 1**). En los humanos es posible medir la velocidad de conducción de grandes nervios, mediante el registro de los potenciales de acción, medidos extracelularmente sobre la superficie de la piel que cubre al nervio o mediante la activación del músculo que inervan. Los potenciales sensitivos se registran directamente sobre las fibras sensitivas del nervio con electrodos de superficie dispuestos sobre el trayecto del nervio.

CLASIFICACIÓN DE ERLANGER Y GASSER					
Fib. Tipo A	Mielinizadas	α	Vel. De Conduc. 70-120 m/s	Diam 12-20 μ	Responsables de: Propiocepción Contracción musculoesquelética
		β	30-70 m/s	5-12 μ	Tacto Presión
		γ	15-30 m/s	3-6 μ	Transmisión motriz a los husos musculares
		δ	12-30 m/s	2-5 μ	Transm. del dolor, el frío y parte del tacto
Fibras Tipo B	Mielinizadas		3-15 m/s	inferior a tres micras	Conexión autónoma preganglionar
Fibras tipo C	No mielinizadas		0,5-2 m/s	0,4-1,2 μ	Transm. del dolor, la temperatura, olfato y autónomas posganglionares, información de algunos mecanorreceptores y de las respuestas de los arcos reflejos

Tabla 1. Se describen los tipos de fibras nerviosas, si tienen mielina, la velocidad de conducción, el diámetro y el tipo de información que transmiten.

El potencial motor compuesto registra la actividad eléctrica generada por la contracción muscular resultante de la estimulación de un nervio con fibras motoras y se registra con electrodos de superficie sobre el músculo específico. Para el registro, normalmente se utilizan 2 electrodos de superficie, donde un electrodo es activo y el otro es referencial. Se ponen en contacto con el músculo o sobre el nervio sensitivo.

El electrodo activo tiene una localización proximal y el referencial se localiza distalmente. Estos 2 electrodos reciben el estímulo que provocamos en el nervio correspondiente. Para la estimulación,

usualmente se usa un electrodo bipolar, donde un pulso de corriente se genera entre el cátodo, y el ánodo; este pulso de corriente despolariza al nervio adyacente y genera un potencial que se propaga a través de este.

Dicho estímulo debe realizarse de forma creciente hasta asegurar un estímulo máximo, es decir, un 20% superior al que evoca un potencial de amplitud máxima. En cada paciente varía la intensidad del estímulo dependiendo de varios factores, tales como, el grado de relajación del músculo, las condiciones de la piel, la presencia de edema, la cantidad de tejido adiposo, etc.

Los parámetros por estudiar son los siguientes:

- **Latencia inicial:** Es el tiempo transcurrido entre la estimulación y la aparición de la respuesta en un sitio de registro. Se mide en milisegundos (ms).

- **Velocidad de conducción:** se expresa en metros por segundo (m/s) y refleja la velocidad con la que se propaga el estímulo a través del nervio, desde la estimulación distal hasta la proximal en la conducción motora (VCM). Se expresa como resultante de la diferencia entre las latencias iniciales del potencial registrado en un sitio proximal y uno distal entre la distancia medida en milímetros (mm) que hay entre ambos estímulos.

- **Características del potencial:** Se evalúa la forma, amplitud, duración y área bajo la curva. Las fibras nerviosas de mayor diámetro de los nervios periféricos conducen la corriente eléctrica por encima de 45 m/s transmitiendo el impulso de forma saltatoria entre los nódulos de Ranvier hasta llegar al músculo.

1.2. Electromiografía

Se utiliza el término electromiografía (EMG) para referirse a las técnicas utilizadas en el estudio funcional del sistema neuromuscular tanto en reposo como durante una contracción. Su fundamento eléctrico se basa en el registro de potenciales bioeléctricos. Los equipos de EMG para el registro y análisis de los potenciales de acción del músculo están compuestos por electrodos de superficie o aguja que captan la señal y, una vez amplificados y filtrados, son convertidos en una señal digital. Además de la señal digital visual, los aparatos de EMG tienen altavoces para la captación acústica de la señal analógica.

Patrón de descarga de la unidad motora. La unidad motora está formada o constituida por una sola neurona motora inferior (incluyendo el cuerpo celular y sus prolongaciones) y todas las fibras musculares inervadas por las ramificaciones de su axón.

El músculo de un sujeto sano en reposo no muestra actividad eléctrica alguna en el EMG. Una contracción voluntaria media causa descargas de bajas frecuencias (1 o 2 impulsos por segundo), de una o pocas unidades motoras. El esfuerzo incrementa la fuerza muscular y se asocia con dos cambios relacionados pero separados en el patrón de descarga de la unidad motora: a) reclutamiento de las unidades previamente inactivas, y b) mayor rapidez en el disparo de las unidades ya activadas.

Un sujeto sano puede ser capaz de activar una o dos unidades motoras inicialmente. Las unidades motoras activadas son pequeñas y probablemente representan las fibras musculares de tipo I. Aquellas que son reclutadas más tarde son considerablemente más grandes y reflejan la participación de las unidades de tipo II, a esto se le conoce como “principio de tamaño” o “ley de Henneman” (**figura 1**). Normalmente la frecuencia de disparo es de 10 a 12 Hz.



Figura 1. La Ley de Henneman o el “principio del tamaño”) establece que, dado que el tamaño de las motoneuronas determina su umbral de excitación, durante la aplicación de una fuerza muscular las unidades motoras de menor tamaño serán las primeras en reclutarse, y en la medida en que el esfuerzo lo requiera, se irán reclutando más unidades motoras en un patrón estereotipado según su progresivo tamaño (Parodi, 2017).

Patrón de reclutamiento o interferencia. Cuando se incrementa la fuerza de contracción, se van sumando un mayor número de unidades motoras activas que empiezan a disparar rápidamente. La activación simultánea de muchas unidades motoras es un fenómeno llamado **reclutamiento** y no permite el reconocimiento de potenciales de unidades motoras individuales. Esta respuesta sumatoria usualmente se refiere como **patrón de interferencia**. Este patrón es una medida de la densidad o número de espigas que se generan y el promedio de amplitud de todos los potenciales de la unidad motora. La configuración y la frecuencia de disparo de cada potencial de la unidad motora, depende del número de neuronas motoras capaces de estar descargando. Al analizar el patrón de interferencia, es importante determinar no sólo cómo descargan las unidades motoras, sino también el número de unidades disparando proporcionalmente para alcanzar la fuerza muscular ejercida. El músculo a máximo esfuerzo es el resultado de la contracción de todas las unidades motoras funcionantes en el músculo en cuestión. Durante el esfuerzo máximo, las unidades motoras aisladas descargan a frecuencias en el rango de 25 a 50 impulsos por segundo. En el músculo normal aparece un trazado muy rico o interferencial que borra la línea base como consecuencia de que las unidades motoras aumentan de frecuencia de contracción y a su vez hay un mayor reclutamiento de unidades motoras.

2. Actividad

2.1. Preguntas

Lee las siguientes preguntas y responde:

- ¿Es la fuerza de tu brazo derecho diferente a la de tu brazo izquierdo?
- Cuándo se sostiene un objeto de manera constante, ¿el número de unidades motoras permanece igual? ¿Son usadas las mismas unidades motoras durante todo el tiempo que se sostiene el objeto?
- Con la fatiga, la fuerza muscular disminuye, ¿qué proceso fisiológico explica la declinación en la fuerza?
- Define unidad motora.
- Define reclutamiento de unidades motoras.
- Define fatiga.
- Define EMG.
- Define dinamometría.

Material para la práctica:

- Electromiógrafo Cadwell y Computadora (figura 2).
- Programa de captura y registro
- Juego de electrodos de superficie con cables
- Gel conductor
- Algodón – Alcohol
- Voluntarios para registros
- Cinta métrica



Figura 2. Equipo Cadwell, con equipo de cómputo y estimulador

2.2. Práctica de VCN

Colocación de los electrodos

Para la realización de esta práctica, siga las instrucciones del docente.

- 1) En la sección de ayuda del programa (ver manual operativo, o en la sección “help” del programa) se señalan claramente los puntos de estimulación y registro para la exploración de diferentes nervios. Pueden seleccionar distintos nervios, sin embargo, recomendamos el nervio mediano.

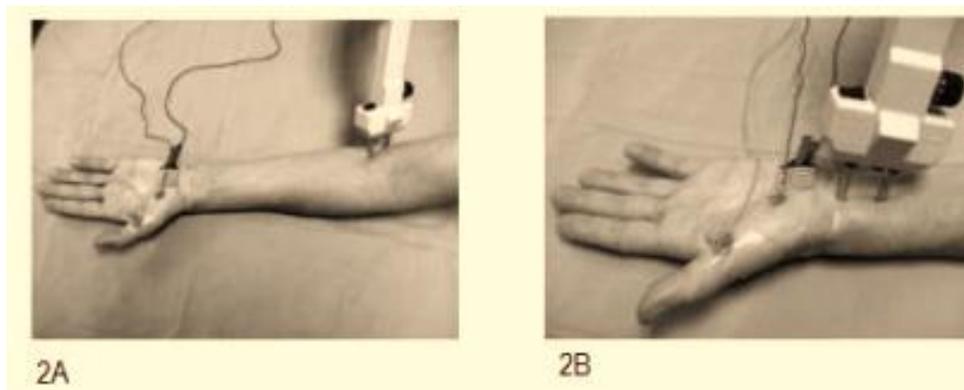


Figura 3. Ejemplo de técnica adecuada de estimulación, proximal 2A y distal 2B de nervio mediano.

- 2) Obtenga los registros de la actividad nerviosa a diferentes distancias de la ubicación de los electrodos de estimulación. **Debe haber medido dichas distancias para poder calcular.**
- 3) Obtenga registros de velocidad de conducción de fibras motoras y mida las velocidades de conducción.
- 4) Si es posible, se puede sumergir el brazo en agua fría o tibia y comparar lo obtenido con el brazo a temperatura ambiente, para que se evidencien los cambios de VNC con los cambios de temperatura.
- 5) Mediante el programa del equipo puede usted medir para ambos tipos de potenciales la latencia inicial, la latencia terminal, amplitud base y amplitud pico. Y en base a ellos obtener duración del potencial, área de este y al ingresar la distancia entre estímulos proximal y distal obtener también la velocidad de conducción.
- 6) Midan diferentes nervios y compare de manera bilateral los resultados.
- 7) Midan a diferentes compañeros de la clase.
- 8) Tabulen sus resultados y compare los registros obtenidos para los diferentes estímulos utilizados y para vías motoras y sensitivas.
- 9) Comparen los resultados de todos los alumnos medidos.
- 10) Evalúen si los valores de latencia, velocidad y amplitud se encuentran dentro de los valores de referencia (el programa muestra los valores de referencia, ver el manual operativo).
- 11) ¿Qué diferencias son evidentes en la morfología, amplitud, duración y latencias de los potenciales motores contra los sensoriales?
- 12) ¿Encuentra alguna diferencia entre los registros de un voluntario masculino y un femenino?

2.3. Desarrollo de la práctica de EMG

Obtención de un electromiograma de superficie (EMG) estándar:

- 1) En un voluntario, seleccione el músculo del que se obtendrá el registro, bíceps braquial, por ejemplo. La superficie deberá estar descubierta, la región deberá estar libre de ropa, pulseras, relojes, etc.
- 2) Limpie con algodón y alcohol la región en donde se colocarán los electrodos de superficie.
- 3) Coloque un electrodo cerca de la inserción proximal del músculo en estudio y otro cerca de la inserción distal, de manera que queden paralelos a las fibras del músculo (esta ubicación se puede variar dependiendo de la longitud del músculo a explorar). Para la colocación adecuada de los electrodos, puede en la ventana del programa “ayuda”, seleccione el “EMG”, se abrirá una lista de los músculos que puede explorar y donde debería colocar los electrodos (**figura 4**).
- 4) Coloque un tercer electrodo en cualquier otra parte del cuerpo, alejado del sitio donde se encuentren los electrodos de registro.
- 5) Una vez activado el sistema de registro se puede obtener un registro inicial como el que se muestra a continuación:

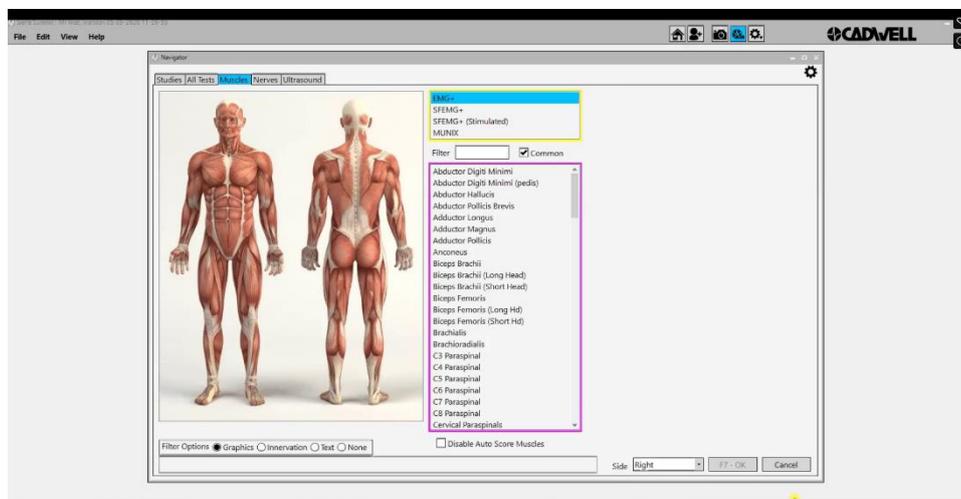


Figura 4. Manual de referencias para la colocación de los electrodos.

Obtención del EMG en diversas condiciones

En un voluntario, comience el registro de la actividad muscular (**figura 5**) y realicen las siguientes maniobras:

- 1) **Contracción isotónica:** Coloque los electrodos en los extremos del bíceps braquial y pida al paciente que levante un peso de valor conocido, registre el EMG de dicho movimiento.
- 2) **Contracción isométrica:** Coloque los electrodos en los extremos del bíceps braquial y pida al paciente que mantenga levantado el peso, manteniendo un ángulo de 45° entre el brazo y el antebrazo, registre el EMG de este fenómeno.

- 3) **Reclutamiento de unidades motoras:** Con la misma preparación se pedirá al paciente que levante un peso cuyo valor se irá incrementando paulatinamente. Registre el EMG durante toda la operación.
- 4) **Fatiga de contracción:** Con la misma preparación pida al voluntario que realice flexiones y extensiones del antebrazo sobre el brazo hasta que la amplitud y duración del fenómeno eléctrico que registra se reduzca en al menos un 50%.

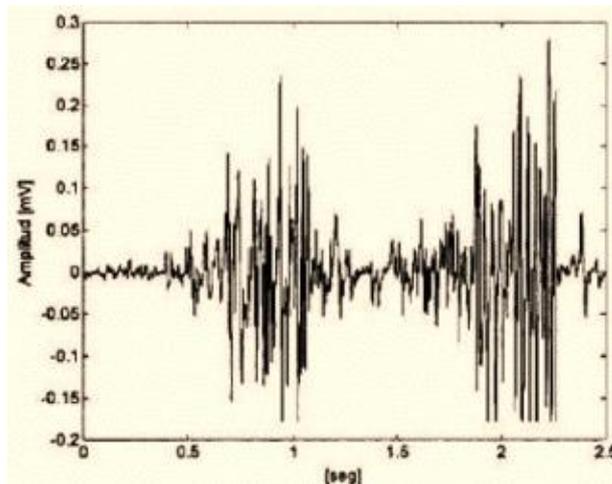


Figura 5. Electromiograma típico, en las abscisas se encuentra el tiempo (ms), en las ordenadas el voltaje (mV)

Resultados Práctica EMG

El registro que usted obtuvo se puede analizar de varias maneras. La más sencilla es medir la duración y la amplitud (voltaje) de la descarga eléctrica que se produce cuando se contrae el músculo contra una carga cero o en el reposo. Es decir, cuando no se le aplica ninguna resistencia, y se compara con la magnitud y duración de esta descarga cuando se aplican resistencias sucesivas. Estos valores, de voltaje y duración de cada contracción, se pueden representar en una gráfica que relacione el peso levantado respecto a las características eléctricas de la contracción.

Para finalizar, respondan:

- 1) ¿Puede usted medir la intensidad de la contracción en los registros obtenidos?
- 2) De ser así, ¿de qué magnitud es? Si la respuesta es negativa ¿cuál es la razón? ¿Qué otro tipo de análisis se puede hacer?
- 3) ¿Cómo se modifica el EMG al aumentar la carga?
- 4) ¿Qué cambios ocurren cuando se fatiga el músculo?
- 5) ¿El EMG cambia según el músculo?
- 6) ¿Si cambia la posición de los electrodos también lo hace la forma del EMG?

3. Bibliografía

- Berne & Levy. Fisiología. 7ª Edición. Madrid: Elsevier. 2018.
- Derrickson. Fisiología Humana. Editorial Panamericana, 2018.
- Fernández, J. M., Acevedo, R. C., y Tabernig, C. B. (2007). Influencia de la fatiga muscular en la señal electromiográfica de músculos estimulados eléctricamente. *Revista EIA*, (7), 111-119. ¿Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000100010



- Hall, J.E. (2016). *Guyton y Hall. Tratado de fisiología médica*. Barcelona, España: Elsevier.
- Massó, N., Rey, F., Romero, D., Gual, G., Costa, L., & Germán, A. (2010). Aplicaciones de la electromiografía de superficie en el deporte. *Apunts Sports Medicine*, 45(166), 127-136. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/Apunts/article/view/196617/298837>
- Moreno Quinchanegua, J. E. (2018). LA FATIGA, TIPOS CAUSAS Y EFECTOS. *Revista Digital: Actividad Física Y deporte*, 3(2). <https://doi.org/10.31910/rdafd.v3.n2.2017.376>
- Parodi Feye, A. S. (2017). Análisis crítico de la Ley de Henneman. *Educación Física Y Ciencia*, 19(2), e032. <https://doi.org/10.24215/23142561e032>
- Robergs, R. A., Ghiasvand, F., y Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 287(3), R502–R516. doi: 10.1152 / ajpregu.00114.2004



CC BY

Esta obra está bajo una
Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional