

# Instrumentación en Electromiografía

JJ Gárate.

Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

## Abstract

*A bibliographical revision of acquisition sensors and of electromyographical signal processing techniques is presented. Special attention was given to the classification of sensors and their applicability. The physiological basis and pathologies associated to electromyographic signals were also examined. Samples of electromyograms are presented in order to establish their usefulness in determining the state of muscles and their associated structures. Finally the characteristics of commercial equipment for electromyographic signals capturing are presented.*

*Keywords: Electromyography, motor units, motor units potentials, pathologies, electrodes.*

## 1. Introducción.

La electromiografía (EMG) se refiere al registro de la actividad eléctrica generada por el músculo estriado (esquelético). Sin embargo, en la práctica se utiliza para designar genéricamente las diferentes técnicas utilizadas en el estudio funcional del sistema nervioso periférico (SNP), de la placa motriz y del músculo esquelético (unidad motora), tanto en condiciones normales como patológicas [1].

La EMG es, pues, una disciplina especializada que se ocupa de la evaluación clínica y neurofisiológica de la patología neuromuscular y de ciertos aspectos de la patología del Sistema Nervioso Central (SNC). La EMG es una extensión y profundización del diagnóstico clínico neurológico y dada su alta sensibilidad, permite descubrir alteraciones subclínicas o insospechadas; al ser cuantitativa permite determinar el tipo y grado de lesión neurológica [2].

Al contrario de otras pruebas de laboratorio, en las que se realiza un protocolo exploratorio rígido, la EMG clínica es una prueba dinámica en la que cada paciente precisa una estrategia de estudio individualizada en función de su cuadro clínico concreto. Por ello se debe partir siempre de la información proporcionada por el paciente y exploración clínica del mismo y a menudo es preciso cambiar el esquema inicial durante el examen a tenor de los resultados obtenidos [2] [3].

El empleo aislado o secuencial de las diferentes técnicas (procedimientos) que se realizan en el laboratorio de EMG permite diagnosticar varias patologías y problemas, entre ellas:

- Lesiones traumáticas o denervación con pérdida de continuidad entre un nervio y un músculo. La

presencia de potenciales de fibrilación en un músculo relajado puede ser una señal de denervación. Por otro lado la reinervación permite detectar Potenciales de Unidad Motora (PUM) antes de que se aprecie el movimiento voluntario [4].

- Neuropatías periféricas producidas por algunas enfermedades como la diabetes, la difteria o el alcoholismo, entre otras. Se caracterizan por una reducción de la actividad de las unidades motoras (UM) hasta el punto de perderse el factor de interferencia, incluso durante un esfuerzo máximo. Los PUM son, en general, polifásicos debido probablemente a las diferencias en velocidad de conducción de las ramas que inervan las fibras de la UM. Las amplitudes y duraciones son nominales o ligeramente inferiores [1][4].

- Enfermedades neuromusculares como la miastenia gravis, la esclerosis lateral amiotrófica, el síndrome de Guillain – Barré, algunas distrofias musculares, etc. Las fibras musculares están normalmente inervadas pero la transmisión del impulso a través de la unión mio – neuronal se hace con mucha dificultad, las contracciones solo pueden mantenerse durante períodos cortos [4].

- Desórdenes de la neurona motriz, como la poliomielitis y otras infecciones víricas agudas, las atrofiaciones musculares de la espina dorsal de origen genético, la enfermedad de la neurona motriz de tipo degenerativo, etc. Todas ellas presentan características comunes como excesiva actividad de inserción, fibrilación, reducida actividad voluntaria, aunque con PUM de amplitudes y duraciones mayores que las normales [1][4].

- Enfermedades musculares incluye enfermedades como las distrofias musculares, miopatías adquiridas y de tipo endocrino. Suele mostrar anomalías en los PUM (polifases) aunque el número de UM activadas suele ser normal [4].

En la Figura 1 se pueden observar como serían los resultados de una persona normal, un neuropático crónico y un miopático.

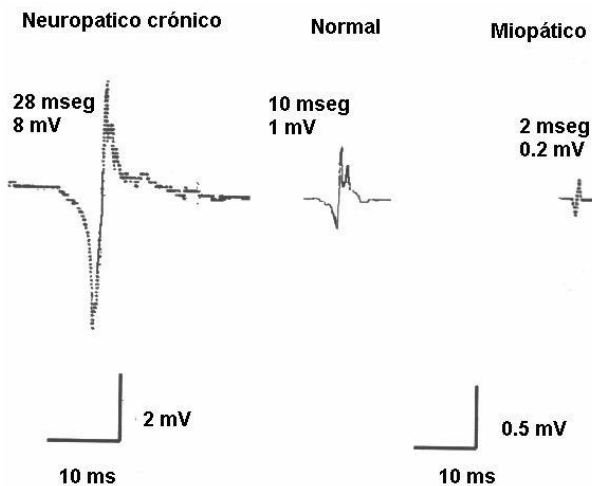


Figura 1. Señales miográficas de una persona normal, un neuropático crónico y un miopático.

## 2. Bases Fisiológicas.

El objetivo que persigue la electromiografía consiste en el estudio de la actividad dieléctrica que se produce y desplaza a través de la Unidad Motora (UM) [1]. Esta es la unidad fisiológica fundamental del sistema neuromuscular: está formada por la neurona motora del asta anterior o de los núcleos de los pares craneanos, su axón, las terminaciones neuromusculares y el conjunto de fibras musculares que cada una de ellas inerva [1][3](véase Figura 2).

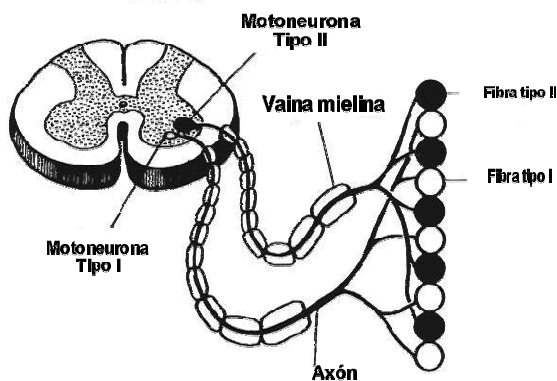


Figura 2. Estructura fisiológica de una unidad motora.

El número de fibras musculares por unidad motora es sumamente variable en el organismo. Los músculos que tienen una actividad fina y de gran coordinación tienen pocas fibras musculares. En cambio aquellos músculos que desarrollan una actividad de esfuerzo poseen un gran número de fibras musculares por UM [2][3].

La actividad eléctrica producida por la despolarización de cada fibra muscular que compone la unidad motora, se conoce como potencial de unidad

motora (PUM), y es captado a través de electrodos de agujas insertados en el vientre muscular [3].

A medida que comienza la contracción muscular, se producen algunos potenciales de unidad motora (PUM); son generalmente bi o trifásicos [3]. Al aumentar la contracción muscular descargan un número mayor de unidades motoras y cada una de ellas descarga a una frecuencia mayor (hasta 15 ciclos por segundo). Este fenómeno se denomina reclutamiento espacial y temporal respectivamente, permitiendo la graduación de una fuerza determinada y la mantención del esfuerzo por un tiempo dado [1][3]. Frente a la contracción muscular máxima, un gran número de PUM descargan formando lo que se denomina esquema interferencial, en el cual no se pueden ver las características individuales de la unidad motora [2][3].

El tamaño de un PUM está relacionado con el diámetro del axón motor, su grosor de mielina y con la velocidad de conducción de la fibra nerviosa, umbral de despolarización y tipo de fibras musculares inervadas [1][2]. Las UM pequeñas se asocian a fibras musculares del tipo I (contracción lenta, metabolismo oxidativo, resistentes a la fatiga) que tienen un bajo umbral de excitación y se contraen precozmente en la actividad voluntaria [1]. Las UM de tamaño progresivamente mayor se recluta también a grados mayores de contracción de forma que raramente en una exploración electro fisiológica pueden ser observados aisladamente potenciales pertenecientes a UM del tipo II (contracción rápida, metabolismo glicolítico, fácilmente fatigables) [1][2].

La frecuencia de disparo de las UM lentas está por debajo de los 30 Hertz, en tanto las UM rápidas pueden alcanzar frecuencias mucho mayores [1]. Los estudios EMG no permiten valorar habitualmente este dato, puesto que el incremento de frecuencia de una UM activa pronto es ocultado por la detección de otras UM vecinas batiendo a su propia frecuencia [1][2].

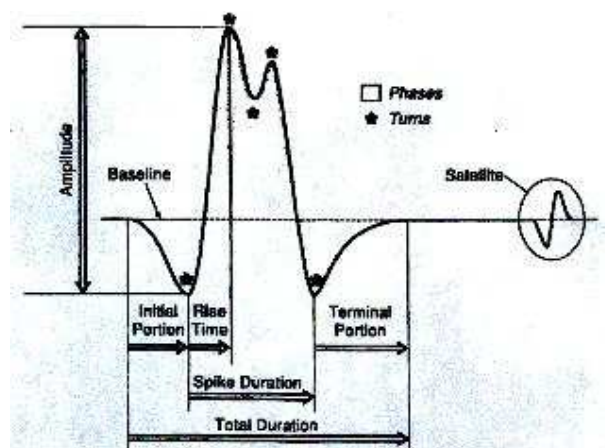


Figura 3. Características morfológicas del potencial de unidad motora.

Las características morfológicas de los PUM (Figura 3) deben ser analizadas durante el estudio electro fisiológico: La duración se define como el tiempo desde la deflexión inicial al retorno a la línea de base y refleja el número y dispersión espacial de las fibras musculares de la UM [1][2]. Los valores normales medios se hallan entre 5 y 15 milisegundos, pero varían para cada músculo, edad y temperatura [3].

La amplitud del PUM se mide entre pico y pico y corresponde a la actividad de un relativo escaso número de fibras musculares cercanas a la punta de la aguja; normalmente mide entre 200 microvoltios y 2 – 3 milivoltios [1][3]. Las fases del PUM corresponden al número de cruces por la isoeletrica más uno, es decir, la cantidad de porciones a uno y otro lado de la línea de base [1][2]. En el músculo normal, el número de PUM polifásicos no debe sobrepasar el 10 – 15% [3].

El número de puntas o cambios en la dirección del potencial que no llegan a cruzar la línea de base tienen el mismo significado que la polifasia y pueden ser cuantificados por métodos automáticos relacionándolos con la amplitud media del trazado EMG [3].

### 3. Electromiografía normal:

El estudio electromiográfico se realiza en el reposo y en la actividad muscular. Para condiciones de reposo en el músculo normal no existe actividad eléctrica [1].

A medida que comienza la contracción muscular, se producen algunos PUM [1][3] (Véase Figura 4).

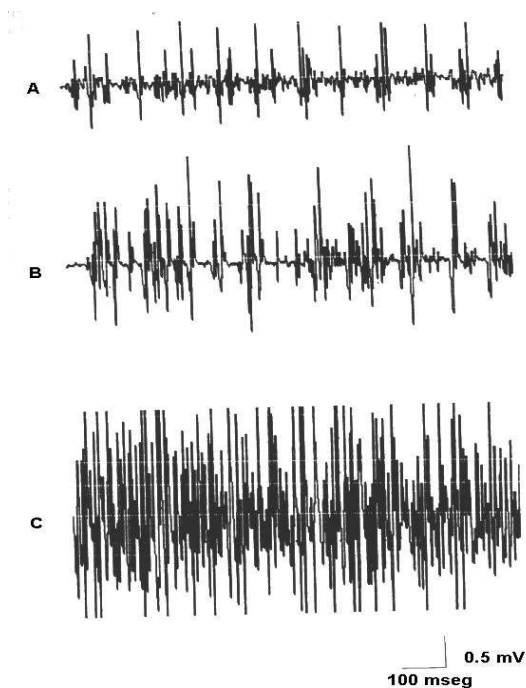


Figura 4. (A) Contracción mínima. (B) Moderada. (C) Máxima.

### 4. Electromiografía anormal:

En condiciones basales se produce actividad eléctrica que normalmente no existe de los siguientes tipos:

- **Fibrilaciones y ondas positivas (potenciales de Denervación):** Es la actividad eléctrica generada por la contracción de una fibra muscular aislada de su unidad motora [1][4]. Se produce cuando se ha perdido la continuidad anatómica entre la moto neurona y el músculo, ya sea por muerte de la neurona o daño axonal; aparece aproximadamente a los 15 días de que se ha producido el daño neuropático, una vez que se ha completado la degeneración walleriana [3][4] (Véase Figura 5).

#### Ondas positivas

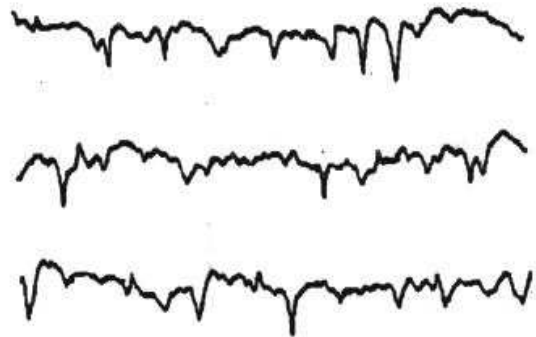


Figura 5. Potenciales de denervación.

- **Fasciculaciones:** Es la descarga de una unidad motora completa que ocurre durante el reposo. Este fenómeno puede ser normal o patológico [1][4]. En este último caso estarán asociados especialmente a Enfermedades de la Moto Neurona (EMA). También puede ser vista en lesiones del nervio periférico [3][4].

Se describirán a continuación los hallazgos más frecuentes del examen de electromiografía en las diferentes patologías que afectan el sistema neuromuscular.

- **Enfermedad de moto neurona:** Se produce cuando hay lesiones de la moto neurona del asta anterior o de los núcleos motores de los nervios craneanos [3][4], obedeciendo a múltiples causas.

Ejemplos:

- Poliomieltis ( enfermedad viral ).
- Esclerosis lateral amiotrófica (patología degenerativa del Sistema Nervioso).
- Atrofia espinal (Werdning – Hoffman – autosómica recesiva).

La característica del EMG es la presencia de

denervación (fibrilaciones y ondas positivas en el reposo, fasciculaciones, y esquema voluntarios pobres con pocas PUM, de duración y amplitud sobre lo normal. re inervación por colateralización) [3][4].

### PUM neuropático crónico

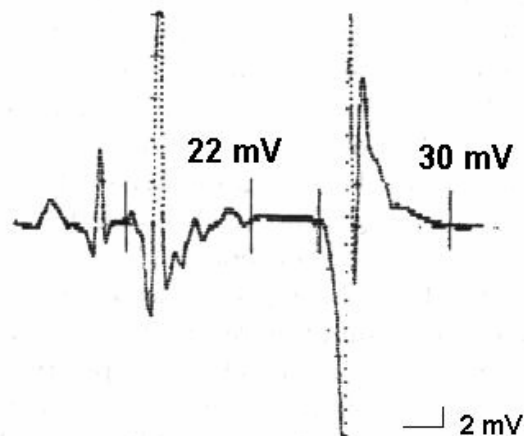


Figura 6. PUM neuropático crónico.

- **Neuropatía periférica:** Las neuropatías periféricas son alteraciones hereditarias o adquiridas, difusas o locales, que afectan primariamente al nervio (raíz, plexo o troncos), clasificándose desde el punto de vista fisiopatológico en dos principales tipos [4]:

- Desmielinizantes: cuando la alteración se produce principalmente en la vaina de mielina (Síndrome de Guillen Barre o polirradiculoneuritis) [3][4].

- Axonales o axonopatía: cuando la lesión ocurre especialmente en el axón. Puede ser producida por alteraciones metabólicas o tóxicas, compresiones, trauma o tracción, etc. [3][4].

Muchas de las alteraciones de nervio periférico tienen un patrón mixto, tanto desmielinizante como axonal.

### 5. Afecciones estudiadas:

- **Neuropraxia:** Es un daño localizado del nervio, transitorio y que no produce daño axonal. Es a menudo causado por compresión nerviosa extrínseca [1][3]; ocurre una interrupción de la conducción nerviosa a través del nervio, explicando la sintomatología del paciente (paresia o parálisis, compromiso sensitivo en el área inervada por el nervio lesionado). Su recuperación es total y en un tiempo variable [4].

- **Axonotmesis:** Es una injuria del axón, con degeneración axonal secundaria (degeneración walleriana) distal al nivel de lesión [2][3]. Las membranas que envuelven al axón (endoneuro,

perineurio y epineurio) permanecen intactas; se produce una alteración de la función motora, sensitiva y neurovegetativa [1][3]. El tiempo de recuperación depende de la localización de la lesión, de la edad y de la condición general del paciente. En general los axones se recuperan a una velocidad de crecimiento de 1 a 2 milímetros por día [3]. Mientras más proximal la injuria, más tiempo toma la recuperación de la función distal [4].

- **Neurotmesis:** Es la lesión más severa. Es una sección completa que compromete al axón y a las membranas que lo envuelven. Se produce al igual que la axonotmesis una degeneración walleriana secundaria [1][3]. La recuperación es en general mala y requiere de cirugía reconstructiva (neurorrafia con o sin injerto) [4].

- **Alteraciones de la placa neuromuscular (Miastenia Gravis):** Para analizar la función de la placa neuromuscular, se utiliza los estudios de estimulación repetitiva de un nervio periférico, observándose la respuesta a nivel del músculo [3]. Cuando se estimula a frecuencia alta (sobre 3 ciclos por segundo) normalmente la amplitud del potencial de acción evocado permanece constante. En casos de alteración de la placa neuromuscular se produce un agotamiento precoz de la transmisión sináptica, disminuyendo la amplitud del potencial de acción muscular [1][3]. Los hallazgos de la electromiografía son en ocasiones de tipo miopático [4].

- **Alteraciones del músculo o miopatías:** Son enfermedades que afectan en forma primaria o secundaria al músculo, de causa hereditaria o adquiridas (metabólicas, inflamatorias, etc.) [1][3]. En este tipo de afecciones se produce una pérdida anatómica o funcional de fibras musculares de cada unidad motora [1][2]. Los PUM así generados son de menor duración (< a 3 milisegundos) y de menor amplitud (0,1 a 0,5 mili voltios). Además se altera el patrón de reclutamiento espacial, produciéndose esquemas interferenciales máximos ante esfuerzo musculares mínimos [3][4] (Véase Figura 5).

### PUM miopático

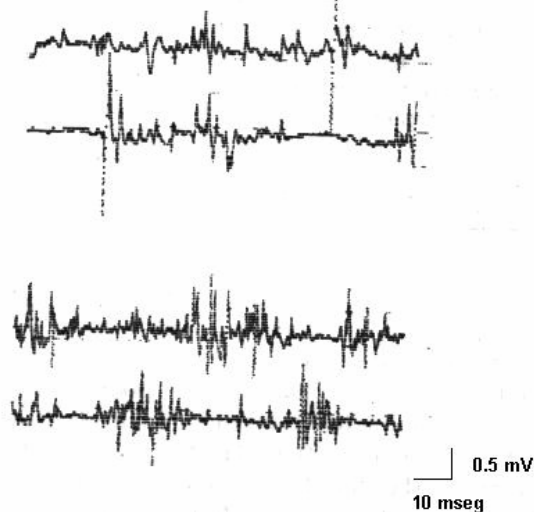


Figura 7. PUM miopático.

## 6. Electromiografía en neuropatía:

Los hallazgos de la Electromiografía van a depender si se produce o no degeneración axonal:

- **Sin degeneración axonal (neuropraxia):** En reposo hay silencio eléctrico y en la actividad disminución o abolición de PUM voluntarios (según la intensidad de la neuropraxia), los cuales descargan a alta frecuencia. La alta frecuencia de descarga de las unidades motoras es una característica propia de las lesiones neuropáticas con o sin degeneración axonal [1][3]. Al disminuir la actividad neuronal o axonal de un determinado músculo, las unidades motoras remanentes intentan suplir esta deficiencia, descargando a una frecuencia sobre lo normal (sobre 20 Hertz), en un intento de compensar la pérdida mencionada. Es lo que se denomina aumento de reclutamiento temporal [3][4]; entre los 15 y 30 días hay una recuperación total de la actividad electromiográfica [4].

- **Con degeneración axonal:** Cuando se ha producido la pérdida de la continuidad anatómica del axón, se produce la degeneración walleriana. Esta consiste en degeneración axonal distal a la lesión, quedando las fibras musculares aisladas del control de la moto neurona [4]. La traducción electromiográfica es la aparición de actividad de denervación en reposo (ondas positivas y fibrilaciones), a los 15 días de producida la lesión [4]. Si la lesión es incompleta, se registran algunos PUM en la actividad, de alta frecuencia. Se denominan PUM remanentes.

- **Regeneración nerviosa:** También denominada re-inervación. Luego de la lesión, el axón proximal comienza a crecer a una velocidad promedio de 1 a 2 milímetros por día, y dependiendo de la distancia entre la

lesión y el músculo, este llega en un determinado tiempo al efector [1][4]. Esto se traduce en la electromiografía por la aparición de potenciales de acción reinervatorios; son de pequeña amplitud, de gran duración y polifasicidad.

A medida que llegan más axones al músculo, estos PUM van creciendo en amplitud y adoptan una morfología normal [1][3][4]. También existe la reinervación por colateralización que consiste en el reclutamiento de las fibras musculares de axones dañados, por parte de motoneuronas indemnes [3]. Se traduce por PUM de amplitud aumentada (expresan compromiso de evolución crónica).

## 7. Tipos de Electrodo:

Para poder determinar cuál es la enfermedad que pueda sufrir el paciente, existen cinco tipos de electromiografía, en función de los distintos tipos de electrodos [1]:

- **Electromiografía convencional (electrodo concéntrico):** Consiste en el registro de la actividad bioeléctrica generada por músculo mediante el electrodo concéntrico (EC) de Adrian y Bronk o con electrodo monopolar (EM). El EC tiene una superficie de registro de forma helicoidal de 150 x 580 milímetros que equivale a 0,07 milímetros<sup>2</sup>; la del EM es de forma cónica y mide 0,25 milímetros<sup>2</sup>. Este tamaño es el adecuado para el estudio de los PUM. La EMG de aguja está indicada cuando se sospecha la presencia de trastornos miógenos o neurógenos, sean estos primarios o secundarios. Con esta técnica se explora en primer lugar el músculo en reposo para detectar la presencia de actividad espontánea [1][2].

- **Electromiografía cuantitativa:** se realiza midiendo manualmente los Potenciales de Unidad Motora sobre un registro gráfico realizado en papel durante una contracción con esfuerzo ligero moderado [1][2].

- **Electromiografía de Fibra Simple (EMGFS):** Se trata de una técnica diseñada y desarrollada por Stalberg y Cols desde comienzos de los años 60. Se utiliza una aguja especial con un área de registro muy pequeña (25 micras de diámetro) que, empleando filtros (bajas: 500 Hertz, altas: 10 kilohertz) que atenúan las bajas frecuencias, permite registrar y estudiar la actividad aislada de una sola fibra muscular [2]. Las dos indicaciones fundamentales son la detección de cambios en la estructura de la unidad motora y el estudio de la transmisión neuromuscular [1][2].

- **Macro EMG:** Lo característico de esta técnica es el electrodo "macro" que consiste en un electrodo con una cánula desnuda en una longitud de 15 milímetros que le permite captar la actividad de virtualmente todas las fibras de una unidad motora [1]. El barrido es disparado mediante la técnica del "trigger" por un electrodo de fibra simple instalado en el centro de la superficie de registro del electrodo macro. La técnica precisa de 2 canales: Uno, que capta la actividad EMG mediante una aguja de Fibra Simple y dispara el barrido del osciloscopio; otro,

que promedia la señal capturada por el electrodo macro [1][2]. Los filtros del electrodo fibra simple se sitúan a 500 Hertz y 10 kilohertz y los de la macro a 8 Hertz y 8 kilohertz.

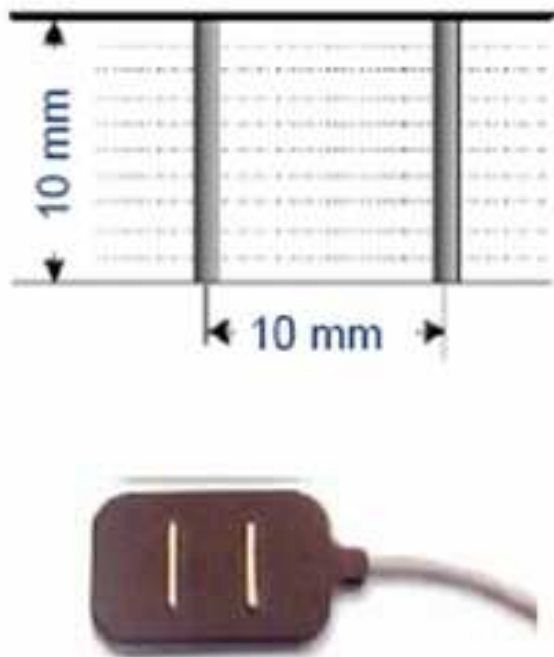


Figura 8. Electrodo superficial de ranura.

- EMG de superficie y estudio del espectro de frecuencias: La primera es una técnica preferentemente utilizadas en los laboratorios de kinesiología para valorar los patrones de marcha, para lo cual se procede a menudo al rectificado de la señal [1]. Para estos casos se utilizan electrodos superficiales que van unidos a la piel sobre el segmento muscular a estudiar. Los electrodos de superficie suelen ser de ranura, con pasta de electrodo llenando la cavidad para conseguir más contacto con la piel y reducir así la impedancia de los electrodos [2]. Su diámetro va de 2 a 10 milímetros en su parte activa (Figura 8). En ocasiones se emplean electrodos profundos de hilo metálico que son más estables. Estos electrodos son muy selectivos y no se observan los cruces (registros de músculos activos adyacentes) que pueden ocurrir con electrodos superficiales. Estos electrodos consisten en dos cables de acero inoxidable aislado con teflón, fino y altamente maleable, de un diámetro de 25 a 50 micrómetros pasados por una aguja hipodérmica [2]. Las puntas se descubren un milímetro y se doblan unos milímetros sobre la cánula de la aguja, con una porción doblada de 1 milímetro más larga que la otra para evitar el cortocircuito del circuito eléctrico. Cuando la aguja se clava en el músculo y después se retira, los cables permanecen en su sitio porque las porciones dobladas hacen las veces de gancho (Figura 5) [2]. El estudio del

espectro de frecuencias se emplea en el estudio de la fatiga muscular localizada. Esta técnica todavía se emplea en algunos laboratorios en el estudio de fisiología de la musculatura respiratoria y de la fatiga diafragmática en la EPOC y otras alteraciones de la respiración [2].

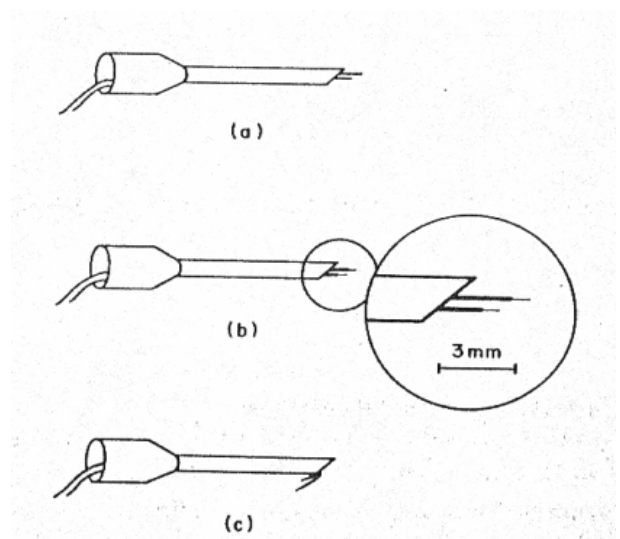


Figura 9. Diagrama esquemático de los electrodos de aguja.

## 8. Adquisición de las señales:

Las señales son adquiridas mediante electrodos colocados en la superficie del cuerpo, luego amplificadas mediante un amplificador de biopotenciales, con un ancho de banda de entre 0,05 Hertz y 300 Hertz, Ganancia que va desde 1.000 a 10.000 y el Rechazo de Modo Común mayor que 100 dB [5].

## 9. Procesamiento de las señales:

La limitante mayor de los procedimientos electromiográficos clásicos o convencionales es la carga subjetiva en la interpretación de sus resultados, basada esta esencialmente en valoraciones cualitativas o semicuantitativas de la señal electromiográfica [3][4]. La electromiografía cuantitativa ha tenido un desarrollo impetuoso; forman parte de este procedimiento un grupo de métodos que abordan el estudio de la señal electromiográfica con diversos tipos de análisis matemáticos y estadísticos, y los resultados de estos son objetivos y replicables en diferentes laboratorios de neurofisiología [4]. La ventaja fundamental de este método es que permite la apreciación cuantitativa de los potenciales de unidad motora [5]. Los llamados métodos de descomposición procesan las señales electromiográficas con algoritmos matemáticos para identificar, clasificar y editar los potenciales de unidad motora. Otras modalidades de análisis automático se ocupan de examinar el patrón de contracción voluntaria.

Uno de los más utilizados es el llamado análisis de

turns/amplitudes. El método es útil y muy sensible para discriminar entre patrones generados en enfermedades miógenas y neurógenas. El método de análisis espectral, también perteneciente a la electromiografía cuantitativa, se basa en la distribución de frecuencias del patrón electromiográfico [6][7].

Cada uno de estos métodos tiene sus aplicaciones específicas, aportes y limitaciones; no obstante, en la práctica asistencial el método de elección por la mayoría de los especialistas, sigue siendo la electromiografía convencional [4][6]. El diagnóstico electromiográfico con métodos convencionales es un proceso complejo, con un carácter sumamente subjetivo. Los métodos cuantitativos brindan la posibilidad de realizar un electro diagnóstico más objetivo, con resultados replicables en diferentes laboratorios de electrofisiología. Otra técnica muy usada hoy en día se basa en analizar las señales electromiográficas por medio de la transformada wavelet, debido a características, que entre otras posee, para:

- Eliminar ruido y conserva detalles de la señal.
- Permitir una mejor manipulación de los diferentes coeficientes (aproximación y detalles).
- Permitir la obtención de una mayor similitud de la forma de onda de los PUM con la wavelet madre.

Este último aspecto resulta altamente conveniente en los diagnósticos clínicos [8].

## 10. Conclusiones:

Las señales electromiográficas han presentado un camino para entender el comportamiento de los músculos y sus estructuras asociadas, permitiendo a personal de salud diagnosticar y tratar un conjunto variado de patologías. La introducción de nuevas tecnologías tanto en la parte de adquisición como de procesamiento de las señales evidencia una creciente tendencia de su uso. Se espera que futuras tecnologías permitan mejorar técnicas de clasificación y diagnosis.

## 11. Referencias:

- [1] **Sociedad Española de neurofisiología clínica.** www.neurofisiologia.org. [Online] [Cited: Noviembre 7, 2008.]
- [2] **Gowitzke, Barbara and Milner, Morris.** *El cuerpo y sus movimientos: bases científicas*. s.l.: Science, 2000.
- [3] **Barkhaus, PE, Nandedkar, SD.** EMG evaluation of the motor unit. The electrophysiologic Biopsy. [Online] 2003. [Cited: Noviembre 12, 2008.] <http://www.eMedicine.com>.
- [4] **Álvarez, R, Medina, E.** La neurofisiología en el estudio de las enfermedades neuromusculares; desarrollo y limitaciones. *Rev Cubana de Medicina Militar.* 2004.
- [5] **Fernández, JM, Saborido, JG, Álvarez, FJ.** Análisis automático del patrón interferencial. Principios y aplicaciones. *Revista Neurol.* 1999, Vol. 31.
- [6] **Fuglsang-Frederiksen, A.** The utility of

interference pattern analysis. *Muscle Nerve.* 2000, Vol. 23.

[7] **Fuglsang-Frederiksen, A, Ronager, J.** EMG power spectrum, turns-amplitude analysis and motor unit potential duration in neuromuscular disorders. *J Neurol Sci.* 1990, Vol. 97.

[8] **L. E. Mendoza, R. D. G. Castellano, R. D. Rojas.** Aportes y alcances de las técnicas de procesamiento, clasificación y descomposición de señales electromiográficas. CLAIB 2007, IFMBE Proceedings 18, pp. 131-135, 2007.

Dirección para correspondencia.

Juan José Gárate Pirela.

Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas 89000. Caracas, Venezuela. [juanjogp1@gmail.com](mailto:juanjogp1@gmail.com).