

MIGUEL RODRÍGUEZ JOUVENCEL

# FATIGA MUSCULAR

CUESTIONES PREVIAS

PRINCIPIOS DE ELECTROMIOGRAFÍA  
DE SUPERFICIE



Madrid • Buenos Aires • México • Bogotá

© Miguel Rodríguez Jouvencel, 2020

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos  
Internet: <http://www.editdiazdesantos.com>  
E-mail: [ediciones@editdiazdesantos.com](mailto:ediciones@editdiazdesantos.com)

ISBN: 978-84-9052-259-2  
Depósito Legal: M-1188-2020

Diseño de cubierta y Fotocomposición: P55 Servicios Culturales

Printed in Spain - Impreso en España

# ÍNDICE

---

<b>PREFACIO</b> .....	IX
<b>Capítulo I</b>	
<i>Introducción</i> .....	1
<b>Capítulo 2</b>	
<i>El juicio médico como entidad formal</i> .....	5
<b>Capítulo 3</b>	
<i>La lesión: lo iconográfico (significante), lo iconológico (significado) y el signo-función</i> .....	7
<b>Capítulo 4</b>	
<i>La contracción muscular</i> .....	9
4.1. La estructura muscular .....	10
4.2. Clasificación de las fibras musculares .....	12
4.3. Energía y actividad muscular .....	13
4.4. Tipos de contracción muscular .....	17
<b>Capítulo 5</b>	
<i>La fatiga muscular</i> .....	19
5.1. Generalidades .....	19
5.2. Fatiga y trabajo.....	20
5.3. Fatiga muscular.....	22
<b>Capítulo 6</b>	
<i>El problema de las pruebas de reposo</i> .....	31

**Capítulo 7**

<i>Las pruebas bajo carga</i> .....	33
-------------------------------------	----

**Capítulo 8**

*La EMGS en el estudio de la actividad muscular.*

<i>Concepto de señal</i> .....	37
--------------------------------	----

8.1. Electromiografía invasiva y electromiografía de superficie .....	37
8.2. Concepto de señal .....	39

**Capítulo 9**

<i>Fatiga muscular y EMGS</i> .....	41
-------------------------------------	----

9.1. Aspectos generales .....	41
9.2. Cuantificación de la señal electromiográfica y parámetros de interés en el estudio de la fatiga muscular por EMGS. Distinción entre fatiga contráctil y fatiga metabólica .....	44

**Capítulo 10**

<i>Prueba de fatiga lumbar</i> .....	67
--------------------------------------	----

10.1. Introducción.....	67
10.2. La especial sensibilidad de la frecuencia mediana (MF).....	69
10.3. Protocolo del <i>Low Back Fatigue Test</i> .....	72
10.4. Estudio tipo.....	75
10.5. Aplicación del test de carga lumbar como control evolutivo de la respuesta muscular a la terapia rehabilitadora .....	81
10.6. Utilidad actual de la prueba de esfuerzo lumbar .....	85
ANEXO 1 .....	91
ANEXO 2 .....	95

**Capítulo 11**

<i>Referencias bibliograficas</i> .....	97
---	----

# PREFACIO

---

La fatiga muscular es un problema todavía mal comprendido, insuficientemente diagnosticado en gran número de ocasiones, cuando no olvidado. A veces se habla de la fatiga con carácter genérico, tanto que su abordaje clínico se vuelve poco o nada operativo, más aún cuando se ha de relacionar con la *carga de trabajo*, que en su heterogeneidad se presenta como una quimera, como un “fantasma” (SPERANTIO, 1972) la cual conoce sin embargo connotaciones que se pueden definir de forma más concreta, como es la *carga física*, que se proyecta y descompone a su vez en diferentes factores que contribuyen a la misma, como es la *fatiga muscular local*.

La fatiga, tanto local como general, es un factor que hay que tener muy presente en el contexto de los riesgos profesionales. En el análisis de las causas del accidente de trabajo en particular ha de ser fuente de especial preocupación. La fatiga, en cualquiera de sus formas, entorpece, perturba o altera severamente la ejecución de la tarea, interfiriendo en la seguridad, atención, agilidad, precisión y coordinación, etc., de gestos y movimientos.

La fatiga muscular repercute sobre otros órganos que no han entrado en actividad (como en el aparato digestivo, en el encéfalo, provocando desarreglos y disminuyendo la capacidad de trabajo) lo que se explica dado que las sustancias catabólicas que son formadas se vierten al torrente circulatorio causando fenómenos de intoxicación general (NÓVOA SANTOS, 1948). Tal “autoenvenenamiento” ya fue advertido por MOSSO (1846-1910).

La imagen polariza en gran medida el ejercicio médico, “reduccionismo” que muchas veces no permite penetrar en la realidad del enfermo. En general, la fatiga expresa la incapacidad de un órgano o tejido para responder normalmente a un estímulo. La *fatiga fisiológica* es la que se corresponde con un estado o sensación de disminución de la capacidad funcional de una parte del cuerpo provocado por un exceso de actividad. Queriendo abordar la cuestión de la *fatiga muscular* hay que tener en cuenta, por una parte, la denominada *fatiga central* (considerando estructuras como el cerebro, médula espinal, motoneurona, nervios motores), y una *fatiga periférica*,

remitida ahora al músculo-esquelético (placa motriz, sarcolema, retículo sarcoplasmático, sistema actina-miosina). La fatiga muscular manifiesta la incapacidad del músculo para mantener una respuesta ante determinadas exigencias de trabajo. En el nivel central, la fatiga se expresa inhibiendo la respuesta motriz, con el fin de que el músculo economice su actuación, con reducción de la excitación. En su vertiente periférica la fatiga se expresa por un decaimiento de la actividad muscular, esto es, del músculo propiamente dicho. *La fatiga muscular aparece cuando el régimen crítico ha sido sobrepasado.* Con la fatiga muscular se produce una disminución de la fuerza, así como disminución de la precisión de movimientos, pudiendo al final acompañarse de temblor.

La información bioeléctrica muscular es abordable con técnicas de electromiografía de superficie (EMGS) con tratamiento informático de la señal. En los estados de fatiga muscular se pueden observar modificaciones en su registro. Electromiográficamente, la fatiga de un músculo esquelético se puede definir como "la imposibilidad por parte del músculo para mantener una tarea determinada sin modificar su nivel de actividad eléctrica" (BROCAS J, 1989).

El estudio de la fatiga muscular por EMGS se pueden sistematizar en dos grandes grupos: (1) representación de la señal en función de la relación voltaje/tiempo que se remite a la amplitud de la señal; (2) representación de la señal en función de las frecuencias (análisis del *espectro de frecuencias*).

En general, la amplitud de la señal aumenta en una primera fase, pudiendo evolucionar hasta la aparición del punto de fallo (pf / *faillure point*). No obstante, la amplitud de la señal es un parámetro burdo y poco específico. Es por eso que interesa adentrarse en el terreno de las frecuencias. Es en este último dominio (el de las frecuencias) en que el estudio de la fatiga muscular toma mayor relevancia y fiabilidad, con la posibilidad de remitirse a diferentes parámetros: MF *-frecuencia mediana-*, MPF *-frecuencia media-* y ZCR *-número de veces que la señal cruza la línea base-*. Dentro del comportamiento frecuencial interés especial tiene el análisis de la *densidad del espectro de potencia* (DSP). La investigación confirma el desplazamiento de los espectros de potencia (DSP) hacia las frecuencias más bajas, a causa de la fatiga muscular; decremento frecuencial que a su vez es expresivo de los cambios metabólicos que se producen en el músculo (acidificación, deficiencia de oxígeno, alteraciones de la conductibilidad de la membrana, etc.).

Los parámetros referidos van a permitir diferenciar entre la fatiga contráctil (reflejada en la amplitud) y la fatiga metabólica (expresión del dominio de las frecuencias), lo cual tiene todavía más interés si se considera que la fatiga muscular no surge de forma brusca, sino que tal fatiga muscular es “un proceso a través del tiempo” (BASMAJIAN JV, DE LUCA CJ. *Muscle Alive*, 1985) y más aún dado que la fatiga metabólica antecede a la fatiga contráctil.

Al final de este trabajo se incluye un capítulo dedicado a lo que se ha querido denominar como “Prueba de esfuerzo lumbar” (que se corresponde con el llamado en inglés *Low Back Fatigue Test*). En su momento varios trabajos dados a conocer en publicaciones internacionales, algunas de gran prestigio (entre otras *Spine*) eran muy alentadores. No obstante, actualmente hay que reconocer, quien escribe el primero, que el entusiasmo inicial hoy día es preciso moderarlo, aun cuando para una aproximación a la fatiga muscular, la EMGS junto al test isométrico de SÖRENSEN para el seguimiento del paciente con dolor lumbar puede proporcionar datos útiles al terapeuta y así apreciar su evolución en el curso del tratamiento rehabilitador, o en el orden preventivo, como para identificar grupos de sujetos con el riesgo de desarrollar el dolor lumbar paravertebral en el futuro. (“EMG analysis of lumbar paraspinal muscles as a predictor of the risk of low-back pain”. *Eur Spine J*, 2010).

Con el devenir del tiempo, conforme se han ido acumulando experiencias, ahora es obligado, en una saludable autocrítica, adoptar una cautelosa prudencia, lo que no quiere decir que se vaya a desconocer el valor de tal técnica de EMGS con carácter general. En la actualidad el uso de la EMGS se estima en estos términos: (1) para una aproximación a la fatiga muscular, la EMGS puede proporcionar datos útiles al terapeuta en el seguimiento del paciente, y así apreciar su evolución en el curso del tratamiento rehabilitador; (2) dado que el análisis en el dominio de la amplitud de la señal es poco riguroso, interesa adentrarse especialmente en el terreno de las frecuencias; en este dominio (el de las frecuencias) el estudio de la fatiga muscular toma mayor relevancia y fiabilidad); (3) preventivamente la Prueba de esfuerzo lumbar / *Low Back Fatigue Test* en “banco romano” practicada siguiendo el test isométrico de SÖRENSEN puede aportar datos de interés, especialmente para aquellas actividades que demanden una especial carga interna de trabajo en la región lumbar.

En definitiva, la EMGS, junto con otras pruebas funcionales o/y biomecánicas han de contribuir como un elemento más para tratamiento del paciente, tanto que a la vista de ciertos resultados tales pruebas han de servir para reorientar dicho tratamiento (introduciendo correcciones, cambios, nuevas terapias etc.). En tal orden conviene su práctica antes, durante y después del tratamiento. Antes del tratamiento (para ver las deficiencias) durante (buscando apreciar la evolución) y después (para constatar los resultados). En ocasiones parece hay demasiada prisa por dar de alta al paciente, incluso tomando un carácter de fijación insana (¡que se ponga a trabajar de una vez!) cuando en realidad en lo que hay que pensar es en el restablecimiento real del enfermo.

## INTRODUCCIÓN

---

La *fatiga muscular*, tantas veces ligada al dolor, sin duda, es síntoma común en diversas patologías, realidad extensible también a otras múltiples manifestaciones, de interpretación a veces no fácil, conflicto abundado por el subjetivismo del paciente. Junto a lo que participa el enfermo, el médico se ha de interrogar sobre aspectos tan elementales, pero también tan esenciales, como la realidad y ubicación del dolor, y su posible cuantificación.

La fatiga muscular es un problema todavía mal comprendido, insuficientemente diagnosticado en gran número de ocasiones, cuando no olvidado. Hace años que se viene investigando con sistemas de análisis muscular computarizado, aplicando pruebas de carga que intentan diferenciar sujetos con respuesta patológica, con índices de fatiga anormal, frente a aquellos que quedan fuera de este marco.

La información bioeléctrica muscular es abordable con técnicas de electromiografía de superficie (EMGS), tanto para el diagnóstico, seguimiento en la terapia rehabilitadora, así como con fines preventivos. Desde hace años se dispone de equipos que reconocen valores electromiográficos entre 1 y 20.000 microvoltios, con amplificadores de alta tecnología, a la vez que se eliminan de forma eficaz los fenómenos parasitarios, tomando la señal con gran precisión en una banda de frecuencia útil entre 20 y 500 hertzios, sin que los resultados sufran distorsión.

Tales sistemas de análisis muscular están fundamentados en procedimientos de electromiografía de superficie (EMGS), con tratamiento de la señal mediante modernos ordenadores con la introducción de coprocesadores matemáticos de alta velocidad.

En este terreno de la investigación se han desarrollado softwares para el tratamiento de la señal electromiográfica. Con sensores de superficie se capta la respuesta muscular y luego se interpreta, pudiendo incluso comparar los valores obtenidos recurriendo a un banco de datos previamente elaborado. Tales pruebas son de realización fácil, incruenta, sin coste económico.

El tratamiento y análisis de la señal se hace a partir de los datos acumulados en memoria que se vuelcan en el ordenador. De esta forma aparece en pantalla la señal cruda (o señal bruta) del electromiograma de superficie correspondiente a la contracción muscular. El coprocesador matemático permite calcular la transformada rápida de FOURIER (FFT o *Fast Fourier Transform*) y el estudio espectral del electromiograma de superficie. La investigación confirma el desplazamiento de los espectros de potencia hacia las frecuencias más bajas, a causa de la fatiga muscular. Por esto interesa adentrarse en el terreno frecuencial, esto es, en la frecuencia de descarga de la motoneurona sobre el músculo, y el software lo permite, recabando parámetros tan útiles como lo son especialmente la frecuencia mediana (MF, o *Median Frequency*), la frecuencia media (MPF, o *Mean Power Frequency*) y también el número de cruces de la señal por la línea isoeléctrica (ZCR, o *Zero Crossing Rate*, hoy menos utilizado) que obedecen todos ellos a diversos modelos matemáticos.

Tales parámetros traducen los cambios internos en el músculo con ocasión de la contracción sostenida (acidificación, deficiencia de oxígeno, alteraciones de la conductibilidad de la membrana, etc.) capaces de expresar la fatiga muscular, y extensivamente remitirse el explorador a la contractura y el dolor muscular.

Concretamente, a nivel lumbar, la realización de la prueba se puede llevar a cabo mediante el test isométrico de SÖRENSEN, siguiendo un protocolo (*Low Back Fatigue*) que supone una prueba de carga, que genéricamente se ha traducido como test de carga lumbar, y que se remite a una prueba de esfuerzo, como se verá mas adelante. Determinados softwares disponen de un banco de datos (al margen de que los que tengan inquietud construyan uno propio) referido a una población agrupada por sexo y edad, con lo que se apreciará el comportamiento en decremento de los índices espectrales durante el tiempo de extensión, y a su vez su compara-

ción servirá para determinar si la respuesta a la prueba de carga lumbar en su resultado es normal, pobre o excelente.

Dentro de las posibles aplicaciones de interés, la técnica es prometedora, objetiva y como ayuda en los siguientes aspectos:

1. La evaluación funcional de los procesos musculares.
2. El seguimiento de la evolución del paciente sometido a terapia rehabilitadora, para comprobar si hay mejoría en la respuesta muscular, así como orientador para proceder a su alta (y, por extensión, como un medio más de control médico del periodo de incapacidad temporal).
3. Prevención de la fatiga muscular.
4. Como contribución al uso racional de las técnicas de imagen: TAC, resonancia nuclear magnética y otras y, en consecuencia, servir de ayuda al ahorro de los costes sanitarios.
5. Para intentar evaluar las situaciones de simulación (aunque aquí se impone una enorme prudencia por razones obvias) al cursar el decremento de las frecuencias *con independencia de la motivación del paciente*, y ser su resultado cero operador dependiente, pues tal resultado, expresivo de la caída frecuencial durante la contracción muscular, viene determinado sobre datos numéricos, traducidos de una señal digitalizada, que se arrojan como consecuencia de la fatiga muscular progresiva que experimentan los músculos bajo la prueba de carga correspondiente.

El análisis computarizado es aplicable a distintos músculos en superficie, trapecio, deltoides, cuádriceps, etc., bien en su estudio singular, o bien tomando los músculos correspondientes a un determinado plano anatómico (*electromiografía*, RIDEAU), así como también es útil para realizar estudios de campo, respuestas bajo carga, utilizando el equipo como Holter, con una posibilidad de registro de la actividad muscular hasta de varias horas, estudios de estados patológicos por hipersolicitación. Otras posibilidades podrían ser para observar la recuperación de enfermos renales, interesando en concreto la respuesta muscular a raíz del equilibrio de intercambio iónico  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ .

Empero, adviértase que los problemas musculoesqueléticos son complejos y las lagunas científicas grandes. Con ansia se esperan nuevas técnicas para poder profundizar en el estudio de la anatomía y de la función, camino imprescindible para acercarse más a la génesis mortificante. Un apasionante campo para los que tengan ansia para la investigación.

## El juicio médico como entidad formal

---

En la descripción de lesiones y secuelas la importancia de los exámenes complementarios y pruebas instrumentales cada vez es mayor en los distintos ámbitos en los que haya de desenvolverse la acción médica. Junto al valor intrínseco de los exámenes médicos para llegar a la cuestión de fondo, el dictamen médico ha de ser entendido también como respuesta a una entidad formal, esto es, que se vea cumplido un protocolo mínimo en el estudio del lesionado, más aún cuando el resultado de las operaciones médicas ha de quedar plasmado por escrito.

En este orden, cualquier juicio diagnóstico ha de responder en su esencia, en una contemplación aséptica, a un *iter* objetivo ligado a elementos y datos de naturaleza exploratoria y técnica que sean bastantes para el estudio del caso problema, interesando en particular los de tipo instrumental, haciéndolo constar de forma fehaciente. De este modo, el juicio diagnóstico ha de responder en su construcción a un silogismo, tanto que la conclusión (esto es, el mismo juicio diagnóstico susceptible de ser discutido) solo podrá ser admitida, comprendida y resistir a la crítica si descansa en unas premisas sólidas, es decir, en medios suficientes de análisis (y no solo cuantitativos, sino también cualitativos en cuanto al grado de resolutivez de los mismos, para la aclaración del caso concreto).

Quiere esto decir que las apreciaciones técnicas se han de emitir no solo con referencia al “qué”, sino que ello ha de venir precedido por el “cómo” y el “por qué”. No hacerlo así predispone a que se genere un espíritu de rechazo, dificultando el esclarecimiento de los hechos, tanto que se podrá argumentar, no sin razón, que la escasez de elementos con los que se contó para emitir el dictamen inducen a dudar del valor técnico del mismo.



## La lesión: lo iconográfico (significante), lo iconológico (significado) y el signo-función

---

A partir de una observación clínica inicial, la lesión ha de ser sometida a un proceso interpretativo, recorriendo etapas sucesivas, con el fin de que siguiendo tal camino se haga posible un acercamiento realista para poder conocer la verdadera dimensión y trascendencia del daño inicialmente apreciado. En tal dirección se propone seguir las siguientes fases:

1. La lesión en su *vertiente iconográfica*, o *significante*, esto es, la mera apreciación de la estructura dañada, en su visión anatómica, en cuanto objeto expresivo de una alteración en su forma física o material.
2. La lesión en su *vertiente iconológica*, o *significado*, queriendo ya indicar la representación psíquica que se hace al explorador, en tanto intuye “un algo” que pretende conectar con la posible repercusión funcional de ese daño físicamente contemplado.
3. La lesión como *signo-función*, de tal modo que el mismo daño ya no queda detenido en la etapa anterior, meramente imaginativa, sino que ahora pretende configurarse como un proceso global en el que lo iconográfico y lo iconológico se han de trasladar, en su confluencia, a la práctica, para así poder cuantificar la auténtica dimensión del daño en la realidad, esto es, ante exigencias y requerimiento concretos (3). Además, insistiendo en ello, la estimación del menoscabo orgánico *in situ*, difícilmente puede permitir cono-

cer los mecanismos de interacción, amortiguación, compensación y suplencias que se han de poner en marcha para responder al desequilibrio desencadenado por las modificaciones estructurales inicialmente contempladas (4).