

# MÉTODOS PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE FATIGA MUSCULAR A TRAVÉS DE SEMG: REVISIÓN DE LA LITERATURA

## *METHODS OF DETERMINING MUSCLE FATIGUE INDEX THROUGH SEMG: LITERATURE REVIEW*

**Héctor Rosas Cardoso**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*m1903117@itcelaya.edu.mx*

**Luis Alejandro Alcaraz Caracheo**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx*

**Alonso Alejandro Jiménez Garibay**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*alonso.jimenez@itcelaya.edu.mx*

**Recepción:** 2/mayo/2020

**Aceptación:** 30/octubre/2020

### **Resumen**

En este artículo de revisión de la literatura se investigan algunos métodos utilizados comúnmente para el análisis de las señales eléctricas generadas en los músculos con la finalidad de determinar la fatiga muscular. El propósito del mismo es ayudar al lector a seleccionar un método sobre el cuál trabajar para poder determinar la fatiga muscular. Se realiza una comparación entre los métodos para determinar cuál es el más apto para su posterior integración en un sistema capaz de advertir sobre la presencia de la fatiga.

**Palabras Clave:** Análisis, Electromiografía, Fatiga muscular, Métodos, Superficial.

### **Abstract**

*Some methods commonly used in the analysis of electrical signals generated by muscles with the purpose to determinate muscle fatigue are investigated in this literature review. The main goal is to guide the reader to select a method with which work to determinate muscle fatigue. A comparison is made between methods to find*

*which is the more useful for a future integration in a system capable of warn on the beginning of muscle fatigue.*

**Keywords:** *Electromyography, Muscle fatigue, Signal analysis, Wavelet.*

## **1. Introducción**

Este artículo consta principalmente de 4 partes; En la presente introducción se abordan conceptos generales relacionados con la electromiografía para facilitar la comprensión del lector; En el apartado de métodos se mencionan los principales métodos de análisis de las señales eléctricas musculares que existen, así como las características que se tomarán en cuenta de cada uno para la selección de la mejor opción; La sección de resultados muestra una comparación de ventajas y desventajas de los métodos mencionados anteriormente, a manera de facilitar la selección de cada uno dependiendo la situación y aplicación final deseada; Finalmente, las conclusiones presentan las observaciones de los autores y su opinión en cuanto a la selección de un método específico para una aplicación en concreto.

La fatiga muscular es definida por algunos autores como una disminución en la capacidad máxima voluntaria para generar o mantener fuerza en los músculos, la cual se incrementa en paralelo con el decremento de la capacidad máxima del músculo [Al-Mulla et al, 2011; Bigland et al, 1948; Idrees et al, 2015; Kumar, 2006; Enoka et al, 2008; Enoka et al, 1992; Sarillee et al, 2014; Hicks et al, 2001; Sakurai et al, 2010; González et al, 2010; Asghari et al, 2008; Hagberg, 1981; Reaz et al, 2006; Kumar et al, 2003; Maclsaac et al, 2006; Filligoi et al, 1997; Morana et al, 2009]. Otros autores creen que está caracterizada por un desempeño impar, existiendo fatiga periférica, que se refiere a los cambios bioquímicos a nivel muscular, y fatiga central, que se atribuye a una disminución en los comandos motores centrales [Chtourou et al, 2013]. Otra opinión es que el desarrollo de la fatiga muscular está fuertemente ligado a procesos cognitivos, debido a que la fatiga central está asociada con la supresión de funciones cognitivas, al mismo tiempo que los procesos cognitivos pueden decrementar el ritmo de desarrollo de fatiga muscular [Aleksandrov et al, 2017; Kos et al, 2008; Asghari et al, 2008]. A pesar de

que ningún autor niega la posibilidad de que la fatiga se origine por procesos cognitivos, o que tenga relaciones bioquímicas, la mayoría de los autores se enfoca principalmente en el hecho de que la fatiga se presenta tras esfuerzos musculares repetitivos, por lo que la definición que se tomará en cuenta para este artículo es la primera.

La fatiga puede ser inducida por una gran variedad de mecanismos. Dependiendo de la tarea que se realiza cambiarán los mecanismos que la producen, así como el punto en el que ocurrirá la fatiga, este es el principio de dependencia de la fatiga muscular [Enoka et al, 2008; Enoka et al, 1992].

El electromiograma (EMG) es un método invasivo que muestra la actividad eléctrica del músculo, la cual es controlada por el sistema nervioso. Una señal EMG es la superposición de las actividades de múltiples unidades motoras (MU's, por sus siglas en inglés). Al medir la corriente eléctrica en los músculos nos permite observar cambios en la frecuencia y amplitud de las señales, así como la velocidad de conducción del músculo. Durante la fatiga muscular los componentes de la baja frecuencia y amplitud de la señal EMG se incrementan debido al aumento de los requerimientos de energía de los músculos [Al-Mulla et al, 2011; Sarillee et al, 2015; Idrees et al, 2015].

El electromiograma superficial (sEMG, por sus siglas en inglés) es una variante no invasiva del EMG, mide las señales musculares con electrodos colocados, como su nombre lo indica, en la superficie de la piel [Sakurai et al, 2010]. Al utilizar sEMG existen limitaciones tales como la habilidad para monitorear sólo los músculos en contacto con la superficie, el ruido en la señal provocado por las mediciones de los músculos adyacentes a la posición del electrodo al no ser mediciones directas y, la colocación de los electrodos, que requiere preparación de la piel para evitar interferencias adicionales [Sarillee et al, 2014; Sarillee et al, 2015]. El uso de las señales sEMG requiere dominio sobre la generación de las señales y su mecanismo de propagación. Aunque la adquisición de la señal es sencilla, las conclusiones pueden ser erróneas si no se utilizan métodos apropiados [Al-Mulla et al, 2011]. De igual manera, presenta la ventaja de ser no invasiva, no es necesario dañar el músculo ni la piel para realizar las mediciones y obtener las señales deseadas, que

pueden ser tratadas y analizadas posteriormente para determinar los parámetros necesarios.

La evaluación de la fatiga durante tareas dinámicas es probablemente de mayor importancia en cuanto a las actividades comunes diarias. Sin embargo, durante contracciones dinámicas diversos factores pueden afectar el número de MU's activas e incrementar el nivel no estacionario de la señal. Esto implica que los parámetros que comúnmente se utilizan como indicadores de cambios en el espectro durante contracciones dinámicas podrían no reflejar eficientemente la fatiga [González et al, 2010].

Desarrollos recientes en los procedimientos de análisis de tiempo-frecuencia han sido propuestos para identificar nuevos parámetros de la EMG para evaluar la fatiga muscular a pesar de las condiciones no estáticas [González et al, 2010].

## **2. Métodos**

Existen diversos métodos para el análisis de las señales eléctricas musculares, cada método tiene algún propósito en específico. En esta sección se realizó la investigación de la literatura de los principales métodos empleados en la determinación de la fatiga muscular a partir de las señales sEMG, se mencionan sus ventajas y desventajas principales para permitir una comparación y selección posterior. Los métodos que se mencionarán se enlistan a continuación:

- Análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.
- Análisis de Wavelet.
- Análisis de regresión.
- Características compuestas.
- Indicadores fractales.
- Entropía.
- Análisis de cuantificación recurrente.
- Estadísticas de orden superior.

Los investigadores se centran en contracciones isométricas para la lectura de sEMG. Cambios en la amplitud, la frecuencia media (MDF, por sus siglas en inglés),

y los requerimientos de MU son indicadores directos de fatiga muscular [Al-Mulla et al, 2011].

### **Análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia**

Generalmente las señales se analizan en el dominio del tiempo. Sin embargo, para muchas técnicas de análisis, la frecuencia de la señal es de mayor importancia, y en consecuencia debe ser analizada en el dominio de la frecuencia, por lo que se aplica la transformada de Fourier a la señal [Al-Mulla et al, 2011]. Para fines de computación existe la transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés), la cual es muy eficiente y requiere poco tiempo de análisis. La DFT se define por la ecuación 1.

$$A_r = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(-\frac{2\pi jrk}{N}\right) \quad r = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

Donde:

- $A_r$ : Coeficiente número  $r$  de la DFT.
- $X_k$ : Dato número  $k$  de una serie de  $N$  datos.
- $j$ :  $\sqrt{-1}$

Las  $X_k$ 's pueden ser números complejos mientras que los  $A_r$ 's casi siempre son complejos [Cochran et al, 1967]. Dos de las características dependientes de la frecuencia más comunes en el análisis de sEMG son la frecuencia promedio (MNF, por sus siglas en inglés) y elMDF [Asghari et al, 2011]. Hagberg estableció que se tiene un gran indicador de fatiga si el MDF disminuye con un incremento de la amplitud de la señal sEMG[Harberg, 1981].

### **Análisis de Wavelet**

La transformada de Wavelet (WT, por sus siglas en inglés) es una herramienta matemática eficiente para el análisis de señales no estacionarias y rápidas, existen dos variedades, la transformada continua de Wavelet y la transformada discreta de Wavelet. La transformada continua permite analizar señales no estacionarias y se define como la ecuación 2.

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi * \left( \frac{t - b}{a} \right) dt \quad (2)$$

Donde:

- $\psi * (t)$ : Conjugado complejo del análisis de función de Wavelet.
- $a$ : Parámetro de dilatación de Wavelet.
- $b$ : Parámetro de posición de Wavelet.

Para clasificar como Wavelet, una función debe cumplir algunos criterios matemáticos [Addison, 2005]. Se utiliza para detectar y caracterizar el componente de tiempo corto en una señal no estática, dando información respecto al tiempo y frecuencia de la señal. La función de wavelet (WF) mantiene una correlación con el dominio del tiempo de la señal, [Laterza et al, 1997].

Una de las propiedades principales de la transformada de Wavelet es que puede ser implementado por medio de un banco de filtro de tiempo discreto conocido como filtro WT [Raez et al, 2006]. La transformada rápida de Fourier puede ser utilizada para acelerar el proceso de análisis de la transformada de Wavelet [Addison, 2005]. Usando la transformada de wavelet en señales sEMG, es posible determinar la fatiga muscular con sólo determinar la Sym4 o Sym5 de la descomposición de wavelet de la señal en los niveles 8 y 9 (de 10 niveles) [Kumar et al, 2003].

### Análisis de regresión

Un electrodo superficial detecta actividad muscular de todos los músculos activos adyacentes, mientras que el EMG intramuscular tiene una mínima interferencia de los músculos cercanos. El análisis de regresión es una técnica para estimar la EMG intramuscular y sus propiedades de espectro a partir de las EMG [Raez et al, 2006]. Para este análisis se utiliza el modelo autorregresivo promedio variable (ARMA, por sus siglas en inglés), estos modelos comúnmente se expresan como ecuación 3.

$$\phi_p(B)y_t = \theta_q(B)a_t \quad (3)$$

Donde:

- $B$ : Operador de regresión tal que  $B^m y_t = y_{t-m}$  para cualquier entero  $m$ .

$\phi_P(B)$ : Operador polinomial.

$\phi_q(B)$ : Operador polinomial.

Este análisis requiere un alto costo de procesamiento [Gooijer et al, 1985].

### Características compuestas

El término de características compuestas hace referencia al uso de una combinación de características comunes para desarrollar una nueva que ayude en el análisis de señales sEMG: Esta función es ajustada por redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés) y se puede aplicar en tiempo real [Al-Mulla et al, 2011]. Posterior al entrenamiento de la ANN, esta produjo una función optimizada para encontrar la fatiga en la señal mioeléctrica, correspondiendo al nivel de fatiga asociado con un parámetro presentado a la misma (ecuación 4) [Maclsaac et al, 2006].

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-\left[ \sum_{n=1}^N \left( \frac{2}{1 + e^{-2(v \cdot w_n^{(1)} + b_n)} - 1 \right) \cdot w_n^{(2)} + b_0 \right]}} \quad (4)$$

Donde:

$f(v)$ : Estimado de fatiga.

$v$ : Vector de entrada de  $4 \times 1$ .

$w_n^{(1)}$ : Pesos del vector entrenado de la  $n$  neurona en la primera capa.

$w_n^{(2)}$ : Pesos del vector entrenado de la  $n$  neurona en la segunda capa.

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_N$ : Biases entrenados.

### Indicadores fractales

Un fractal es una geometría o señal que tiene dimensiones fraccionales (FD, por sus siglas en inglés), haciendo pequeñas copias del original. Los fractales han sido probados para las mediciones de las características de las señales sEMG [Al-Mulla et al, 2011].

Arjunan et al. parten del hecho de que las bio-señales como la sEMG son el resultado de la sumatoria de los potenciales de acción de unidades motoras (MUAP,

por sus siglas en inglés) que viajan por el tejido y sufren compresión espectral y de magnitud. El concepto de fractal se puede aplicar a procesos fisiológicos que son similares entre si a través del tiempo. Para calcular la FD se utiliza el algoritmo de Higuchi (ecuación 5) [Arjunan et al, 2008].

$$L_m(k) = \frac{\left( \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor} |X(m+ik) - X(m+(i-1) \cdot k)| \right) \frac{N-1}{\lfloor \frac{N-m}{k} \rfloor \cdot k}}{k} \quad (5)$$

### Entropía

Sung et al. argumentan que las medidas entrópicas revelan otras partes de las señales sEMG que no se incluyen en el espectro de potencia [Sung et al, 2008]. La entropía es la medición rigurosa de la falta de información. La entropía de Shannon para una condición experimental particular con un grupo de  $M$  posibles resultados (ecuación 6). Donde  $p_j$  es la frecuencia relativa de la salida número  $j$ .

$$S_{Information} = - \sum_{j=1}^M p_j \ln(p_j) \quad (6)$$

El método requiere futura investigación para decidir si es una herramienta útil de diagnóstico muscular [Kaufman et al, 2007].

### Análisis de cuantificación recurrente

El análisis de cuantificación recurrente (RQA, por sus siglas en inglés) es una eficiente herramienta de análisis dinámico no lineal del dominio de tiempo. Es muy efectivo para detectar cambios en la señal sEMG y es casi equivalente al análisis en el dominio de la frecuencia en contracciones no isométricas de fuerza constante [Filligoi et al, 1997].

Para realizar la gráfica de recurrencia se utilizan las ecuaciones de Hénon. Es un sistema completamente determinístico que consiste en dos variables interconectadas con retroalimentación no lineal (ecuación 7 y 8) [Webber et al, 1994].

$$X_{i+1} = Y_i + 1.0 - (1.4X_i^2) \quad (7)$$

$$Y_{i+1} = 0.3X_i \quad (8)$$

Donde:

$i$ : Identificador de la iteración de la variable actual.

$i + 1$ : La siguiente iteración para las variables actualizadas.

### **Estadísticas de orden superior (HOS, por sus siglas en inglés)**

Una técnica basada en teoría de probabilidad apropiada para su uso en series de tiempo aleatorias producidas por las señales sEMG. HOS se ha utilizado en estudios para estimar la amplitud y el número de nuevos MUAP's [Kanosue et al, 1979].

Existen diferentes caminos para utilizar las HOS en el análisis de las sEMG, entre ellos destaca el uso de ANN. Subasi et al. utilizaron ANN con una modificación de HOS llamada análisis de componente independiente (ICA, por sus siglas en inglés) para diferenciar entre músculos descansados y fatigados, permitiendo la visualización del comienzo de la fatiga a través del tiempo. El modelo general ICA se define como la ecuación 9. El principal problema de ICA es determinar  $X$  o  $A$  a partir de  $Y$  [Subasi et al, 2010].

$$Y = AX \quad (9)$$

Donde:

$A$ : Matriz desconocida llamada matriz de mezcla.

$X$ : Matriz de datos del componente independiente.

$Y$ : Matriz de datos de la variable medida.

### **3. Resultados**

Los diferentes métodos de análisis mencionados en la sección anterior se aplican a la señal sEMG, y el propósito de todos es poder separar y observar las características deseadas de manera más simple. Sin embargo, cada uno tiene un enfoque diferente, cada uno busca una característica en particular diferente con la cual poder determinar la fatiga muscular.

Los métodos en el dominio del tiempo parecen ser los menos eficaces, ya que todos los demás se enfocan más en el dominio de la frecuencia. Ya que es en este dominio

donde se pueden observar las principales características para la determinación de la fatiga.

El método de análisis de wavelet parece ser el más apto para la determinación de la fatiga, otros métodos requieren la WT para poder realizar sus análisis. Y por su capacidad de determinar la fatiga a partir de características conocidas, es tal vez, el método más completo.

El método de regresión requiere de una gran capacidad computacional, Kiryu [Kiryu et al, 1992] consideró que un modelo tan preciso no es necesario para el movimiento dinámico de los músculos.

El método de características compuestas podría ser más preciso en la determinación de la fatiga al combinar diferentes características. Al-Mulla [Al-Mulla et al, 2010] comprobó que las características obtenidas del espectograma unidireccional proporciona mayor precisión en la clasificación al ser comparado con otras características comúnmente utilizadas en la clasificación de fatiga muscular de sEMG.

Los indicadores fractales requieren más estudios para probar su utilidad. Ravier *et al.* [Ravier et al, 2005] probaron que el indicador de fatiga en este método de análisis se mantiene constante durante activación muscular.

El método de entropía busca analizar nuevas características de la señal, al ser nuevas características se puede inferir que se requieren mayores estudios sobre el mismo.

El método de análisis recurrente es de los pocos métodos aplicados en el dominio del tiempo.

Un estudio por Morana *et al.* [Morana et al, 2009] encontró cambios en la fatiga sólo bajo circunstancias específicas, por lo que requiere más estudios.

El método HOS es mayormente estadístico y requiere, generalmente, aplicación de redes neuronales artificiales o controladores difusos, por lo que es un método de mayor complejidad que los demás.

En la tabla 1 se muestra una comparación más concreta sobre cada método y sus principales características.

Tabla 1 Comparación entre los métodos de análisis de señales sEMG.

Método	Fórmula	Métodos adicionales necesarios	Estado de investigación del método	Costo de procesamiento	Principal característica que busca o requiere
Análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia	DFT (1)	Variantes del mismo	Aún en investigación, ha dado resultados positivos en muchos experimentos	Bajo	MNF y MDF
Análisis de Wavelet	WT (2)	Variantes del mismo y transformada rápida de Fourier	Aún en investigación, ha dado resultados positivos en muchos experimentos	Bajo	MUAP
Análisis de regresión	ARMA (3)	Variantes del mismo y ANN	Aún en investigación. Pocos experimentos	Alto	EMG a partir de sEMG
Características compuestas	Función producida por una ANN (4)	ANN	Aún en investigación	Alto	Nuevas características
Indicadores fractales	Algoritmo de Higuchi (5)	NO	Aún en investigación	Alto	MUAP
Entropía	Entropía de Shannon (6)	NO	Aún en investigación	Alto	EMG en general
Análisis de cuantificación recurrente	Ecuaciones de Hénon (7) y (8)	Transformada rápida de Fourier	Aún en investigación	Alto	MU
Estadísticas de orden superior	Modelo general ICA (9)	Métodos de análisis de tiempo-frecuencia y ANN	Aún en investigación	Alto	EMG en general

#### 4. Conclusiones

Cada método tiene sus puntos positivos y negativos en términos de la determinación de la fatiga muscular, unos son más complejos, otros buscan alternativas con nuevas características. Los métodos estadísticos podrían dar mejores resultados debido a las variaciones de mediciones entre cada persona y cada condición de medición. Pero el que parece ser el más completo es el método de la transformada de wavelet, ya que utiliza características bien conocidas de las señales sEMG y es de los métodos más desarrollados y estudiados, por lo que su

eficiencia, hasta este momento, en la detección de la fatiga muscular es la más completa y ampliamente demostrada. De cualquier manera, ninguno es completamente aceptado ni ha demostrado poder determinar la fatiga o la transición a la fatiga sin errores, aún se requieren estudios para poder determinarla de manera precisa bajo cualquier condición y para cualquier músculo.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] Al-Mulla, M., Sepulveda, F. & Colley, M. (2011). *Sensors* N° 11, 50 pág. 3545-3594, A review of non-invasive Techniques to detect and predict localised muscle fatigue.
- [2] Bigland-Ritchie, B., & Woods, J. (1948). *Muscle & Nerve* N° 7, 9 pág. 691-699. Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue.
- [3] Chtourou, H., Hammouda, O., Aloui, A. & Souissi, N. (2013). *Novel physiotherapies* Vol 3, Issue 3, 10 pág. Effect of Time-of-Day on Muscle Fatigue: A Review.
- [4] Aleksandrov, A. & Knyazeva, V., (2017). *Neuroscience and Behavioral Physiology*, Vol 47, N°8, 7 pág. 960-966. Effects of cognitive loading on the development of muscle fatigue.
- [5] Idrees, B. & Farooq, O. (2015). 2015 Fifth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC) 5 pág. 267-271. Estimation of muscle fatigue using wavelet decomposition.
- [6] Kumar, S. (2006). *Revista Brasileira de Fisioterapia*, Vol. 10, N° 1, 20 pág. 9-28. Localized muscle fatigue: review of three experiments.
- [7] Enoka, R. & Duchateau, J. (2008). *The Journal of Physiology* 586.1, 13 pág. 11-23. Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function.
- [8] Enoka, R. & Stuart, D. (1992). *Journal of Applied Physiology* Vol. 72, 5, 18 pág. 1631-1648. Neurobiology of muscle fatigue.
- [9] Sarillee, M., Hariharan, M., Mohd, A., M.I. O., Mohd, A. & Qi, O. (2014). 5<sup>th</sup> Control and System Graduate Research Colloquium 6 pág. 187-192. Non-invasive techniques to assess muscle fatigue using biosensors: A Review.

- [10] Kos, D., Kerchkofs, E., Nagels, G., D'hooghe, M., & Ilsbroukx, S. (2008). The American Society of Neurorehabilitation Vol. 22, 1, 10 pág. 91-100. Origin of fatigue in multiple sclerosis: Review of the literature.
- [11] Hicks, A., Kent-Braun, J. & Ditor, D. (2001). Exercise and Sport Science Reviews Vol. 29, N° 3, 4 pág, 109-112. Sex Differences in human skeletal muscle fatigue.
- [12] Sakurai, T., Toda, M., Sakurazawa, S., Akita, j., Kondo, K. & Nakamura, Y. (2010). 2010 IEEE/ACIS 9th International Conference on Computer and Information Science, 5 pág. 43-47. Detection of muscle fatigue by the surface electromyogram and its application.
- [13] González, M., Malanda, A., Navarro, I., Gorostiaga, E., Mayor, F., Ibañez, J., & Izquierdo, M. (2010). Journal of Electromyography and Kinesiology N° 20, 8 pág, 233-240. EMG spectral indices and muscle power fatigue during dynamic contractions.
- [14] Asghari, M., Hu, H., & Gan, J. (2008). Proceedings of the 30th anual international IEEE EMBS conference, 4 pág, 315-318. Manifestation of fatigue in myoelectric signals of dynamix contractions produced during playing PC games.
- [15] Harberg, M. (1981). Ergonomics, Vol. 24, Issue 7, 13 pág, 543-555. Work load and fatigue in repetitive arm elevations.
- [16] Laterza, F., & Olmo, G. (1997). Electronic Letters Vol. 33, N° 5, 3 pág, 357-359. Analysis of EMG signals by means of the matched wavelet transform.
- [17] Raez, M., Hussain, M., & Mohd, F. (2006). Biological Procedures Online Vol 8, N° 8, 25 pág, 11-35. Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications.
- [18] Kumar, D., Pah, N., & Bradley, A. (2003). IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering Vol. 11, Issue 4, 7 pág, 400-406. Wavelet analysis of surface electromyography to determine muscle fatigue.
- [19] Maclsaac, D., Parker, P., Englehart, K., & Rogers, D. (2006). IEEE Transactions on Biomedical Engineering Vol. 53, Issue 4, 7 pág, 694-700. Fatigue estimation with a multivariable myoelectric mapping function.

- [20] Arjunan, S., & Kumar, D. (2008). TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference 4pág, 1-4. Fractal features based technique to identify subtle forearm movements and to measure alertness using physiological signals (sEMG, EEG).
- [21] Sung, P., Zurcher, U., & Kauman, M. (2008). Journal of Rehabilitation Research & Development Vol. 45, N° 9, 10 pág, 1431-1440. Gender differences in spectral and entropic measures of erector spinae muscle fatigue.
- [22] Filligoi, G., Felici, F., Vicini, M., & Rosponi, A. (1997). <http://library.med.utah.edu/cyprus/proceedings/medicon98/medicon98.filligoi.giancarlo.pdf>. 6 pág. Recurrence Quantification Analysis of Surface Electromyograms.
- [23] Kanosue, K., Yoshida, M., Akazawa, K., & Fuji, K. (1979). Japanese Journal of Physiology Vol. 29, 17 pág, 427-443. The Number of Active Motor Units and Their Firing Rates in Voluntary Contraction of Human Brachialis Muscle.
- [24] Ravier, P., Buttelli, O., Jennane, R., & Couratier, P. (2005). Journal of Electromyography and Kinesiology Vol. 15, 12 pág, 210-221. An EMG fractal indicator having different sensitivities to changes in force and muscle fatigue during voluntary static muscle contractions.
- [25] Morana, C., Ramdani, S., Perrey, S., & Varray, A. (2009). Journal of Neuroscience Methods Vol. 177, 7 pág, 73-79. Recurrence quantification analysis of surface electromyographic signal: Sensitivity to potentiation and neuromuscular fatigue.
- [26] Kiryu, T., Saitoh, Y., & Ishioka, K. (1992). IEEE Transactions on Biomedical Engineering Vol. 39, N° 3, 9 pág, 280-288. Investigation on parametric analysis of dynamic EMG signals by a muscle-structured simulation model.
- [27] Al-Mulla, M., & Sepulveda, F. (2010). Sensors N° 10, 17 pág, 4838-4854. Novel Feature Modelling the Prediction and Detection of sEMG Muscle Fatigue towards an Automated Wearable System.
- [28] Addison, P. (2005). Physiological measurement N° 26, 46 pág, 155-199. Wavelet transforms and the ECG: a review.

- [29] Cochran, W., Cooley, J., Favon, D., Helms, H., Kaenel, R., Lang, W., Maling, G., Nelson, D., Rader, C., & Welch, P. (1967). *Proceedings of the IEEE* Vol. 55, N° 10, 11 pág, 1664-1674. What Is the Fast Fourier Transform?
- [30] Goojier, J., Abraham, B., Gould, A., & Robinson, L. (1985). *International Statistical Review* Vol. 53, N°3, 29 pág, 301-329. Methods for Determining the order of an Autoregressive-Moving Average Process: A Survey.
- [31] Kaufman, M., Zurcher, U., & Sung, P. (2007). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* Vol. 386, Issue 2, 10 pág, 698-707. Entropy of electromyography time series.
- [32] Webber, C., & Zbilut, J. (1994). *Journal of applied Physiology* Vol. 76, Issue 2, 9 pág, 965-973. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies.
- [33] Subasi, A., & Kemal, M. (2010). *Journal of Medical Systems* Vol 34. Issue 4, 9 pág, 777-785. Muscle Fatigue Detection in EMG Using Time-Frequency Methods, ICA and Neural Networks.