

Análisis de sensibilidad por la colocación de los electrodos en la electromiografía de superficie (semg)

Sensitivity analysis for the positioning of electrodes in surface electromiography (semg)

Angélica Ramírez^{1}, Diego Alexander Garzón²*

¹Grupo de Estructuras y Modelado de Materiales GEMM, Universidad de Zaragoza, Calle Maria de Luna 3 , Zaragoza, España

²Grupo de Modelado y métodos numéricos en Ingeniería (GNUM). Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia. Cra. 30 N.º 45-03, Bogotá, Colombia

(Recibido el 15 de noviembre de 2007. Aceptado el 9 de mayo de 2008)

Resumen

La electromiografía de superficie se utiliza actualmente en los laboratorios de análisis de movimiento, gracias a la facilidad de colocación de los electrodos y por su carácter no invasivo. Esta expansión genera una variación en los protocolos aplicados en cada laboratorio creando resultados de difícil comparación [1]. En el presente estudio se realiza un análisis de sensibilidad de la colocación de electrodos bipolares sobre los músculos: vasto lateral VL, vasto medial VM y recto femoral RF perteneciente al cuádriceps. Se halla el mayor valor RMS de la señal ante los factores de estudio designados tales como: a. la posición longitudinal de electrodo, b. la orientación del electrodo y c. el ángulo de extensión de la rodilla. Las pruebas se realizan ante la máxima contracción voluntaria de una fuerza isométrica. Se concluye que existe una diferencia significativa entre la orientación y la distancia con la señal EMG para los tres músculos. La mejor orientación de los electrodos es de 0° para el VL, 70° para el VM y -20° para el RF. La mejor distancia es de 22,59 ± 2,84% para el VL, 29,44 ± 1,88% para el VM y 66,28 ± 0,38% para el RF, medido desde el ápice de la rótula.

----- *Palabras clave:* Ingeniería biomédica, electromiografía, músculos del cuádriceps.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 1 + 316 50 00 ext. 11216, fax: + 57 + 1 + 31650 00 Ext.11203, correo electrónico: angelica-maria.ramirezmartinez@gmail.com (A. M. Ramírez)

Abstract

The surface electromyography is widely used in laboratories of movement analysis due to its easy manipulation and its noninvasive character. However, this extended use generates a variation in the protocols and produces difficult to compare results [1]. **In the present study, an analysis of sensitivity for the positioning of bipolar electrodes is made on three muscles of the quadriceps: vastus lateralis (VL), vastus medialis (VM) and rectus femoris (RF).** The three main factors of the study are: a. the longitudinal position of electrode, b. the orientation of electrode and c. the angle of extension of the knee. Additionally, the response factors are the maxima force and the RMS of the EMG signal. The tests were made for maxima voluntary contraction (MVC) during an isometric force. We conclude that there are differences in the EMG signal when the electrodes are in different position and orientation. **The best distance for the electrodes is $22.59 \pm 2.84\%$ for the VL, $29.44 \pm 1.88\%$ for the VM and $66.28 \pm 0.38\%$ for the RF from the apex of the patella. The best orientation of the electrodes is 0° for the VL, 70° for the VM and -20° for the RF.**

----- *Keywords:* Biomedical engineering, electromyography, quadriceps muscles.

Introducción

El inicio de estudios en cualquier laboratorio de análisis de movimiento, requiere como primera medida hacer una calibración de los equipos, generar un protocolo y conocer los márgenes de error de los instrumentos en uso. En el caso de la captación de las señales musculares, los cambios electroquímicos de la fibra muscular producen campos eléctricos variables en el tiempo que pueden ser detectados por electrodos de superficie. Estos electrodos tienen la ventaja de ser muy fáciles de colocar debido a su carácter no invasivo, sin embargo, la sensibilidad a la ubicación espacial del electrodo sobre la piel tiene un efecto visible en la amplitud de la señal obtenida [2], Mathiassen y Hägg [3] en su revisión de literatura mostraron que la amplitud de la señal electromiográfica varía a medida que se desplazan los electrodos en dirección longitudinal sobre los músculos. Cabe entonces la pregunta ¿Cuál es la mejor posición de los electrodos?

La respuesta al cuestionamiento conduce a estudios anteriores de electromiografía y posicionamiento [4]. En ellos se indican tres estrategias para ubicar la colocación de los electrodos: la primera en el vientre muscular, en el punto medio entre el punto de origen e inserción [5], el segundo entre la zona de inervación (ZI) y el tendón distal [6] y el tercero en el punto motor. La primera estrategia es bastante subjetiva, dependiendo tanto de quien la mide como de el volumen muscular del paciente; la tercera estrategia contiene la desventaja de que los electrodos puestos en los puntos motores o inervaciones no reporten una señal real ya que se puede generar una interferencia de potenciales de acción de unidades motoras (PAUMS), por ser un punto de gran densidad neural [7]. La segunda estrategia requiere conocer las zonas de inervación. Éstas son identificadas por medio de técnicas de mapeo, es decir, detectando la propagación bidireccional de los PAUMS [7]. Rainoldi [6] presenta un estudio en que se identifican las zonas de inervación de 16 músculos de la extremidad inferior.

El grupo muscular en estudio es el cuádriceps, compuesto por tres músculos superficiales: el

vasto lateral VL, el vasto medial VM y el recto femoral RF. Mientras que la orientación de las fibras de los dos primeros es oblicua, (músculos unipenados), el tercero es un músculo bipenado. Dentro de las patologías más frecuentes en deportistas como futbolistas, son la tendinitis, la contractura o las lesiones en el tejido muscular. La presencia de estas disfunciones en cualquiera de los músculos que componen el cuádriceps causa disminución en el ángulo de extensión de la rodilla, entumecimiento, o inestabilidad en la rótula, produciendo a la vez dolor en la rodilla.

El presente estudio utiliza como base la metodología propuesta por Rainoldi [6] para las zonas de inervación, extendida a encontrar la posición óptima en la colocación de los electrodos de superficie. El objetivo es realizar un análisis de sensibilidad en el cambio de la posición de electrodos en los músculos VL, VM y RF, con tres factores de estudio: la posición longitudinal del electrodo, la orientación del electrodo (variación ángulo de posición del electrodo frente a una línea central) y el ángulo de extensión de la rodilla. La variable resultado de comparación es la amplitud de la señal electromiográfica.

Metodología

Factores de estudio

El RF es un músculo bipenado, que se origina en la espina iliaca antero superior (ASIS) y se inserta en el ápice de rótula. El VL se origina en la parte superior de la línea intertrocanterica y se inserta en el borde externo de la rótula, mientras que el VM se origina en la parte inferior de la línea intertrocanterica y se inserta en el borde interno de la rótula.

La línea de acción del músculo está dado por la línea trazada entre su punto de origen y su punto de inserción, Para el presente estudio a estas líneas serán llamadas “Líneas de Referencia” definidas para cada músculo. Para el RF y el VM se tomará las líneas de referencia como está descrito en [6], mientras que para el VL se define la línea de acción entre el trocánter mayor y el ápice lateral de la rótula [8], como se muestra en la figura 1.

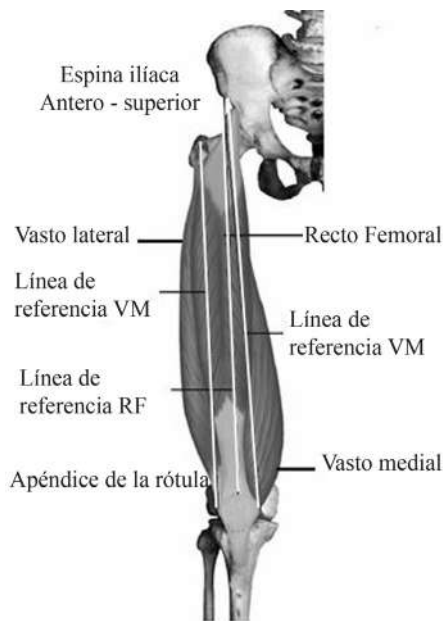


Figura 1 Definición de las líneas de referencia de los músculos del cuadriceps: VM, RF [6] y VL [8]

El primer factor de estudio es la *posición longitudinal del electrodo*. Esta posición está dada por la distancia d entre el ápice de la rótula y el punto donde se debe poner el centro del electrodo. La dirección de ese vector está dada por el ángulo Φ , formado entre la línea de referencia del recto femoral y el punto donde se ubica el electrodo en cualquiera de los tres músculos. En la figura 2 se observa un ejemplo del trazado para medir la distancia.



Figura 2 Ejemplo para el VM del vector que define la posición longitudinal del electrodo. Φ Es el ángulo y d la distancia al punto desde el ápice de la rótula

El segundo factor de estudio es la *orientación del electrodo*. La orientación es el ángulo en el que se han de colocar los electrodos de modo que siga la dirección de las fibras, ya que esta es la dirección que lleva el potencial de acción. La orientación se mide desde la línea de referencia de cada músculo definida anteriormente. A la orientación de los electrodos del VL le corresponde el ángulo α , al del VM el ángulo β y al RF los ángulos γ y $-\gamma$ como se observa en la figura 3.

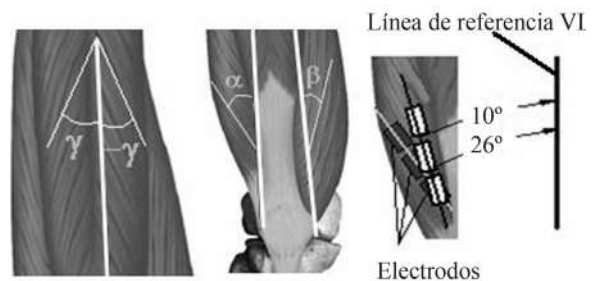


Figura 3 Ángulos que definen la orientación de los electrodos. a) α para el VL, β para el VM b) γ para el RF c) Ejemplo para el VL

La señal electromiográfica es sensible al movimiento de la rodilla en el plano sagital [8], por tal razón el tercer factor de estudio es el *Ángulo de extensión de la rodilla* variando en 90° , 120° y 150° .

Protocolo

El estudio se realizó con 5 pacientes sanos, de 25 a 36 años ($29,2 \pm 4,65$), con una estatura de $167,54 \pm 7,12$ cm. y un peso de $60,4 \pm 6,51$ Kg. Se explica con antelación el protocolo a seguir y se firma la hoja de consentimiento. La prueba se comienza con el levantamiento antropométrico y la toma de datos rutinaria. Antes de colocar los electrodos, la piel se rasura y se limpia insistentemente con un gel de micropartículas. Se marcan sobre la pierna dominante los puntos de referencia expresados en el epígrafe anterior con un lápiz dermatográfico. Se miden y trazan las líneas de referencia que unen las inserciones proximal y distal de cada músculo. Se trazan además los puntos de inervación.

La posición longitudinal de los electrodos se halla por palpación, asegurando que los electrodos queden puestos sobre el vientre muscular. Los electrodos se ponen en la extremidad dominante entre los puntos de inervación y la conjunción miotendinosa, fuera de la zona de inervación. El espacio entre el punto de inervación y la inserción distal permite la colocación de tres electrodos para cada uno de los vastos, midiendo las distancias en porcentaje a la longitud de la línea de referencia del RF. Los valores de las distancias para cada uno de los electrodos se encuentran en la tabla 1. Ya que se cuenta con 10 canales, se usan los cuatro electrodos sobrantes para colocarlos sobre el RF. Durante las pruebas la numeración de los electrodos está hecha de acuerdo a canales, sin embargo para efecto del análisis se ordenan ascendentemente desde la parte distal hacia la proximal como se observa en la figura 4.

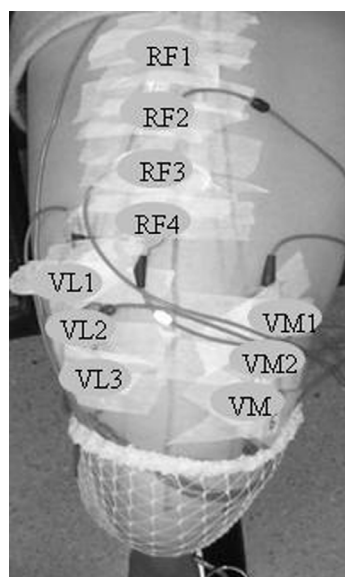


Figura 4 Posicionamiento de los 10 electrodos en los tres músculos del cuadriceps

Tabla 1 Distancia de los electrodos medidos desde el ápice de la rótula para los músculos VL (Vasto Lateral), VM (Vasto Medial) y RF (Recto Femoral)

Canal	# Electrodo para los músculos VL, VM y RF	Distancia <i>d</i> (porcentaje de la longitud de la tuberosidad isquial al ápice de la rótula). medida desde el ápice de la rótula	Ángulo Φ en grados
1	VL1	36,52 ±2,48	25°
2	VM1	29,44±1,88	30°
3	VL2	29,90±3,02	25°
4	VM2	23,0±1,28	30°
5	VL3	22,59±2,84	35°
6	VM3	18,55±1,25	60°
7	RF1	66,28±0,38	
8	RF3	58,32±1,09	5 mm. Paralelo a LR
9	RF2	51,13±0,98	
10	RF4	43,93±0,34	

Ya ubicados los electrodos, se procede a su orientación. El rango de los ángulos elegidos para el presente estudio contienen los ángulo de penación

de los estudios de Yamaguchi [9] [10] y Delp [11] y están recogidos en la Tabla 2. Se orientan con $\alpha_1, \beta_1,$ y γ_1 y se realizan las repeticiones para los

tres ángulos de extensión de la rodilla. Después se cambia la orientación de los electrodos a $\alpha_2, \beta_2,$ y γ_2 y de nuevo se toman los datos para los tres ángulos de extensión y así mismo para $\alpha_3, \beta_3,$ y γ_3 . El electrodo de referencia es puesto en la rótula de la pierna contraria.

Tabla 2 Orientación de los electrodos con $i=1, 2, 3$

Músculo	Orientación $X^\circ \pm 1$			
VL	α_i	0°	10°	26°
VM	β_i	0°	20°	70°
RF	γ_i	0°	20°	-20°

Todos los electrodos se fijan 10 minutos antes de la prueba para que se adapten a la piel y disminuya su impedancia.

El paciente se sienta en una camilla con una flexión de cadera de 90° y con la espalda apoyada a un espaldar, después es sujetado a la camilla a la altura de la cadera por medio de cinchas de poleoterapia, para evitar movimientos y compensación al esfuerzo por otro grupo muscular, como se observa en la figura 5. Se realizan extensiones isométricas de la rodilla a ángulos de 90°, 120° y 150° del segmento de la pierna con respecto al muslo, a la máxima contracción voluntaria (MVC). Se usa una cadena inextensible unida por uno de sus extremos al dinamómetro y por el otro al tobillo del paciente asegurando contracciones isométricas. De este modo el paciente extiende la pierna hasta el ángulo indicado y allí se opone la resistencia. Con el fin de controlar la contracción el paciente tiene como retroalimentación el dinamómetro que indica la fuerza que realiza en cada instante. Durante la realización de la MVC se anima verbalmente al paciente. La contracción es mantenida durante 6 s. [12].

Se deja 2 minutos de reposo entre prueba y prueba para evitar la fatiga muscular. Se hace la toma de 81 datos para cada músculo de un solo paciente, 27 por cada día, con repeticiones durante tres días. Lo que hace un total de 135 datos por día, 405 datos por paciente. La duración total de la prueba de dos horas.



Figura 5 Paciente durante la prueba con ángulo de extensión de 90°

Instrumentos

Los ángulos de extensión de la rodilla y los ángulos sobre los músculos se miden con un goniómetro digital de un rango de 0 a 360°, con una precisión de $\pm 1^\circ$ (Guymon Goniometer Lafayette). Las distancias a cada electrodo se miden con una cinta antropométrica flexible con una precisión de ± 1 mm.

La señal electromiográfica se obtuvo usando electrodos circulares bipolares, de material de contacto acero inoxidable quirúrgico, de 12 mm. de diámetro, con una distancia entre electrodos de 18 mm. de centro a centro. El ancho de banda de señal de 10 Hz a 2 KHz (MA317, Motion Lab Systems, Inc,US). Los electrodos cuentan con un preamplificador con una ganancia de x20. La posición de los marcadores es tomada a 100 Hz con el Sistema Vicon peak.

Resultados

Como factores respuesta de las pruebas se tienen: la fuerza máxima registrada por el dinamómetro y la señal electromiográfica durante $6 \pm 0,01$ s para cada canal.

El tratamiento de la fuerza máxima se hace considerando 9 repeticiones para cada ángulo. La fuer-

za máxima promedio es de $559,88 \pm 11,96$ N y se presenta a $120 \pm 1^\circ$ de flexión de la rodilla. El momento mínimo está distribuido entre un 40 % para un ángulo de flexión de la rodilla de $150 \pm 1^\circ$ y un 60% de los pacientes para un ángulo de flexión de $120 \pm 1^\circ$ con un valor promedio de $440,88 \pm 94,47$ N (ver figura 6).

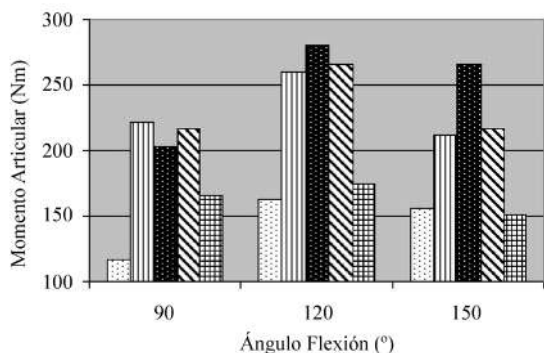


Figura 6 Variación del momento articular para los 5 pacientes en estudio

El estimador de dispersión utilizado para es la RMS de la señal electromiográfica, hallado sobre una ventana de 200 ms. para evaluar el nivel de actividad del muscular. La mejor posición de los electrodos se determina de acuerdo al lugar donde se obtenga una mayor amplitud de la señal es decir, el mayor valor RMS.

El análisis estadístico de los datos se hace en Minitab V 13.0. La distribución normal de los datos se determina por medio de la prueba Anderson-Darling mientras que la comparación entre los factores se hace por medio de un ANOVA con un valor de $p=0,05$.

La comparación de la señal se hace individualmente para cada músculo. El promedio del RMS de la señal EMG para la MCV es de $170 \pm 11 \mu V$ para el RF, $190 \pm 12 \mu V$ para el VM y $220 \pm 16 \mu V$ para el VL.

En cuanto a la distancia de los electrodos se encuentra una diferencia significativa ($p<0,0$) para los tres músculos, de modo que se tiene una me-

jor señal para en el VL en la posición tres (VL3) y en la posición uno para el VM y el RF (VM1 y RF1 respectivamente).

Para las diferentes orientaciones se encuentra una diferencia significativa para el RF ($p<0,038$) y para el VM ($p<0,0$); sin embargo el VL lateral no muestra diferencias significativas ($p<0,574$).

El último factor es la flexión de la rodilla el cual no mostró una diferencia significativa para ninguno de los casos. Para el RF ($p<0,064$), VL ($p<0,792$), VM ($p<0,476$).

En la interacción entre factores, se presenta la relación entre la distancia y la orientación. Para este caso se observa una diferencia significativa únicamente para el VL ($p<0,008$), mientras que para el RF ($p<0,479$) y el VL ($p<0,169$) no se evidencia interacción.

Comparando la distancia y la orientación con el ángulo de flexión, no se encuentra ninguna diferencia significativa VL ($p<0,81$), RF ($p<0,655$) y el VM ($p<0,510$).

Por otro lado existe una diferencia significativa ($p<0,0$) entre los diferentes músculos, presentando una mayor señal el músculo VL, el cual domina la extensión de la rodilla. En amplitud RMS le sigue el VM y por último está el RF.

La amplitud de la señal electromiográfica varía con la distancia al ápice de la rótula de cada electrodo. Como se observa en la figura 7, el gráfico de barras del VL supone que el electrodo está puesto justo bajo la inervación, obteniendo un máximo cerca de la inervación y produciéndose una disminución de la señal durante la propagación del potencial de acción. Sin embargo los electrodos de la distancia d2 y d3 del Vasto Medial se mantienen en valores de amplitud muy semejantes ($211,7 \pm 12 \mu V$ y $220 \pm 11 \mu V$ respectivamente). Caso semejante sucede con el RF en el que la señal para las otras distancias a un ángulo de orientación de -20° , en la señal para las distancias d2, d3 y d4 son de ($141,2 \pm 7 \mu V$, $156 \pm 3 \mu V$ y $161 \pm 7 \mu V$ respectivamente).

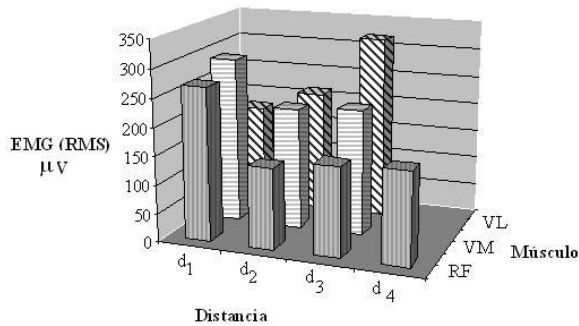


Figura 7 Relación de la distancia de los electrodos para cada músculo en la orientación de mayor valor RMS. (VL=0° VM=70° RF=-20°)

Discusión y conclusiones

La amplitud de la señal electromiográfica es sensible a los dos factores de posición: posición longitudinal (distancia) y orientación del electrodo. Con base a este hecho se recomienda en la tabla 3 la mejor disposición de los electrodos en los músculos superficiales del cuadriceps.

Tabla 3 Disposición de los electrodos en cada músculo para la mayor señal EMG

Músculo y posición	Orientación	RMS de EMG (µV)
VL-3	0°	320,02±25
VM-1	70°	290,7±14
RF-1	-20°	267,8±16

La posición del electrodo del vasto Lateral con una distancia del $22,59 \pm 2,84\%$ de longitud, es comparable con el usado por Ericsson que es de un 25% [13]. Además mientras que la posición longitudinal del electrodo del VL es más proximal con respecto a la zona de inervación del músculo, el electrodo del VM en el que se presenta la mejor señal, está ubicado entre la zona de inervación y el tendón distal, semejante a la posición usada por Soderberg [14]. El Recto Femoral exhibe una mejor señal a la mayor distancia del ápice de la rótula.

La orientación de los electrodos es un factor fundamental en el momento de la colocación de los electrodos, ya que puede variar la amplitud de la señal hasta en un 30%. Por ejemplo para el músculo VL del paciente 2 en la distancia 3 que corresponde a la de mejor señal, el valor RMS varía de 246,4 µV con una orientación de 10° hasta 76,9 µV con una orientación de 26°. En la figura 8 se encuentra un ejemplo de la diferencia de amplitud de la señal en bruto para el electrodo VL3. A la izquierda permanece fija la extensión de la rodilla en $90 \pm 1^\circ$ y se varía la observación de las tres orientaciones diferentes (0°, 10° y 26°), observando una señal mucho más amplia para la orientación de $10 \pm 1^\circ$. A la derecha permanece fija la orientación de 10° y se varía la el ángulo de extensión (90°, 120° y 150°), observando una señal más amplia para $90 \pm 1^\circ$ de extensión de la rodilla.

La diferencia significativa que se presenta en la interacción distancia orientación en el VL tiene un sentido plenamente geométrico. El VL es un músculo bastante extenso, que se origina en toda la línea áspera del fémur y que cambia la orientación de las fibras a medida que recorre la pierna. Pero además, la orientación de las fibras puede cambiar hasta 5° del estado de relajación al estado contraído [15]. Por lo tanto se observa una mejor señal con un ángulo de $10 \pm 1^\circ$ para la zona más proximal y una orientación de $0 \pm 1^\circ$ para la zona más distal.

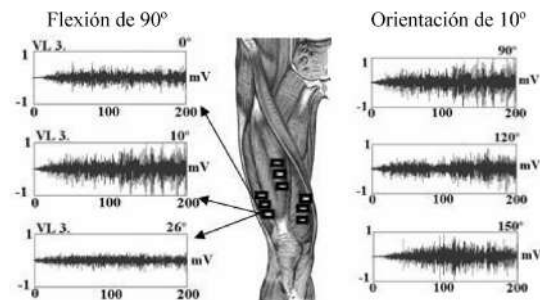


Figura 8 Señal electromiográfica hallada para el Vasto Lateral, a la izquierda con extensión constante y a la derecha con orientación constante. El eje de las abscisas en ms

Estudiando la relación entre el momento articular y la señal electromiográfica se observa como el 80% de los pacientes tuvieron la máxima amplitud RMS del vasto lateral a $90 \pm 1^\circ$. Es importante resaltar que mientras la fuerza máxima leída por el dinamómetro fue a los $120 \pm 1^\circ$, aquí la amplitud máxima RMS se alcanza a los $90 \pm 1^\circ$. El hecho que la señal electromiográfica sea mayor a 90° en el VL y no coincida con el mayor valor de momento de la rodilla que se presenta a 120° , ratifica la idea de que el mayor momento articular no necesariamente debe coincidir con la mayor longitud muscular, donde el músculo realiza la mayor fuerza isométrica. Así que la máxima fuerza articular se encuentra en un equilibrio entre el brazo articular y la longitud sarcomérica mientras que la amplitud de la señal electromiográfica depende del nivel de activación enviada por el cerebro. Se concluye además, que el momento articular es directamente proporcional a la señal electromiográfica, es decir, para aumentar el nivel de fuerza se necesita aumentar la señal neural. Sin embargo, la razón de que la fuerza sea menor a diferentes ángulos de flexión depende únicamente del brazo de momento y de la relación fuerza-longitud del músculo y no de la señal electromiográfica.

Aunque el presente estudio presenta unas recomendaciones de la ubicación de los electrodos, al tiempo se invita a que cada uno de los laboratorios haga un estudio de sensibilidad, ya que los factores de variación son múltiples. El presente trabajo brinda una metodología para realizar el correspondiente análisis.

Limitaciones

Se notó que la longitud medida en mm a la que se deben colocar los electrodos es igual para los músculos vastos, sin embargo se prefirió la normalización con la longitud de la línea de referencia para posibilitar comparaciones de datos. Debido a que los pacientes tienen un mismo rango de altura, la proporción del muslo es similar, a pesar de tener más o menos masa muscular y los valores de distancia son similares, por lo tanto, es posible hacer una tabulación o recomendación de posición. Sin embargo para pacientes de otras es-

taturas, no podemos asegurar que los resultados no son comparables, por no tener una normalización válida.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo técnico del Doctor Miguel Ángel Mañanas de la Universidad Politécnica de Cataluña y de la doctora Dorita Villarraga de la Universidad de Zaragoza, el Laboratorio de análisis de movimiento de la Universidad de Zaragoza.

Referencias

1. H. J. Hermens, M. M. R. Vollenbroek-Hutten. "Effects of electrode dislocation on electromyographic activity and relative rest time: effectiveness of compensation by a normalisation procedure". *Medical & Biological Engineering & Computing*. Vol. 42. 2004. pp. 502-508.
2. S. H. Roy, C. J. De Luca, J. Schneider. "Effects of electrode location on myoelectric conduction velocity and median frequency estimates". *J. Appl. Physiol.* Vol. 61. 1986. pp. 1510-1517.
3. S. E. Mathiassen, G. Hägg. "Amplitude aspects and functional considerations on surface EMG electrode displacement with particular emphasis on the upper trapezius muscle". H. J. Hermens, B. Freriks, (editors). *SENIAM*. 1997. pp. 84.
4. H. J. Hermens, B. Freriks, C. Disselhorst-Klug, G. Rau, "Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures". *J. Electromyogr. Kinesiol.* Vol. 10. 2000. pp. 361-74.
5. C. J. De Luca, "The use of surface electromyography in biomechanics". *J. Appl. Biomech.* Vol. 13. 1997. pp. 135-163.
6. A. Rainoldi, G. Melchiorri, I. Caruso. "A method for positioning electrodes during surface EMG recordings in lower limb muscles". *J. Neurosci. Methods.* Vol. 134. 2004. pp. 37-43.
7. K. Saitou, T. Masuda, D. Michikami, R. Kojima, M. Okada. "Innervation zones of the upper and lower limb muscles estimated by using multichannel surface EMG". *J. Human Ergol.* Vol. 29. 2000. pp. 35-52.
8. K. Ebersole, T. Housh, G. Johnson, T. Evetovich, D. Smith, S. Perry. "MMG and EMG responses of the superficial quadriceps femoris muscles". *Journal of Electromyography and Kinesiology.* Vol. 9. 2004. pp. 219-227.

9. F. C. T. Van Der Helm, G. Yamaguchi. "Morphological data for the development of musculoskeletal models: An update". J. M. Crago P (Editor), *Neural control of posture and movement*, Winters Springer Verlag, New York, 2000. pp. 645-658.
10. Morphological data. http://mms.tudelft.nl/morph_data/main.htm, Consultada mayo 10 de 2006.
11. Parameters for a model of the lower limb. <http://isbweb.org/data/delp/index.html>. Consultada mayo 10 de 2006.
12. G. M. C. De Vito, D. Hugh, A. Macaluso, P. E. Riches. "Is the coactivation of biceps femoris during isometric knee extension affected by a asiposity in health young humans?". *J. Electromyogr Kinesiol.* Vol 5. 2003. pp. 425-31.
13. M. O. Ericson, R. Nisell, U. O. Arborelius. "Muscular activitiy during ergometer cycling". *Scand. J. Rehabil Med.* Vol 17. 1985. pp. 53-61.
14. G. L. Soderberg, D. Vanderlinden, C. Zimmerman. *Electrode site location for maximizing EMG output for selected muscles*. Unpublished data, The University of Iowa, 1988.
15. T. Fukunaga, Y Ichinose, M Ito, Y. Kawakami, S. Fukashiro. "Determination of fascicle length and pennation in a contracting human muscle in vivo" *J. Appl. Physiol.* Vol 82. 1997. pp. 354-358.