

MEDICION, MEDIANTE ELECTROGONIOMETRIA, DE LA POTENCIA INSTANTANEA DURANTE EL SALTO VERTICAL

* Gaitán González M. J.
* González Camarena R.

* Carrasco Sosa S.
** Yáñez Suárez O.

- * Laboratorio de Fisiología del Ejercicio.
Depto. Ciencias de la Salud. DCBS.
- ** Laboratorio de Investigación en Computación y Procesamiento de Señales. Depto. Ingeniería Eléctrica. DCBI.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA - IZTAPALAPA

RESUMEN

Se propone un método de medición de la potencia máxima instantánea desarrollada durante el salto vertical, basado en el análisis del desplazamiento vertical instantáneo del centro de masa, calculado a partir de los movimientos angulares de las articulaciones de cadera, rodilla, tobillo y dedos, y sus respectivas longitudes interarticulares. En la cara externa del miembro inferior derecho se fijó un esqueleto de aluminio con cuatro electrogoniómetros, cuyas señales fueron procesadas por computadora. Se estudiaron seis sujetos obteniéndose potencias máximas instantáneas de extensión (normalizadas al peso del sujeto) entre 23.0 W/Kg y 50.9 W/Kg. Los patrones cinemáticos y dinámicos obtenidos son semejantes a los reportados para la plataforma de fuerza. El método electrogoniométrico descrito es una buena alternativa al de la plataforma con un potencial de análisis biomecánico mucho mayor.

ANTECEDENTES.

El desempeño físico de un sujeto puede valorarse mediante la medición de la potencia desarrollada durante un esfuerzo. Este índice es ampliamente utilizado en los campos de la fisiología del ejercicio y la medicina del deporte (6).

Los esfuerzos físicos pueden clasificarse como de resistencia y de fuerza-velocidad. Los primeros son ejercicios prolongados y aeróbicos (la energía se obtiene a partir del mecanismo oxidativo); mientras que los segundos son ejercicios máximos, cortos (duraciones de menos de 15 s) y anaeróbicos (utilizan el ATP y la fosfocreatina muscular).

El salto vertical, por ser un movimiento complejo de corta duración (menos de 1 s), que involucra la utilización de una gran masa muscular, puede considerarse como un esfuerzo ideal para la valoración de la potencia anaeróbica (6).

La plataforma de fuerza es el método comúnmente empleado para valorar la potencia anaeróbica máxima durante saltos verticales, mediante la medición del componente vertical de la fuerza desarrollada por el sujeto sobre la plataforma, y para la obtención, a partir de esta variable, de la aceleración y la velocidad del centro de masa. Con este método, Davis y Rennie (5) obtuvieron potencias máximas (normalizadas al peso del sujeto) de 51 W/Kg para hombres y 39 W/Kg para mujeres, mientras que Ferreti y cols. (7) reportaron potencias de 52 W/Kg para hombres.

En el presente trabajo, se propone un método de medición de la potencia anaeróbica durante el salto vertical, basado en la utilización de cuatro electrogoniómetros ubicados en las articulaciones de los dedos, el tobillo, la rodilla y la cadera, de manera que permitan describir el desplazamiento del centro de masa del sujeto en el eje vertical y estimar variables dinámicas tales como fuerza, trabajo y potencia.

METODO.

Medición de las variables cinemáticas y dinámicas. Se utilizaron cuatro electrogoniómetros constituidos por potenciómetros lineales de precisión montados en un esqueleto de aluminio y sus respectivos amplificadores para determinar el desplazamiento angular de las secciones de la extremidad inferior derecha. Los goniómetros se colocaron en las articulaciones de cadera, rodilla, tobillo y dedos (metatarso falángica del quinto dedo).

Previamente al salto, se pesó al sujeto y se calculó analíticamente la ubicación de su centro de masa (CM), parado y con las manos en la cintura, mediante la utilización de los pesos relativos de las partes componentes del cuerpo humano según Bernstein (8) y los radios del centro de gravedad de los fragmentos particulares del cuerpo sugeridos por Fisher (8). También se midieron las longitudes tobillo-dedos, rodilla-tobillo, cadera-rodilla y CM-cadera, utilizadas en el cálculo del desplazamiento del centro de masa.

Dado que durante el salto vertical, la ubicación del CM no varía respecto al cuerpo en el eje vertical (9), se determinó el desplazamiento instantáneo de éste en dicho eje, durante las fases de extensión y flexión (3), mediante relaciones trigonométricas entre los ángulos medidos con los goniómetros y las longitudes ya descritas. El modelo geométrico del desplazamiento del centro de masa (S) queda descrito por la ecuación:

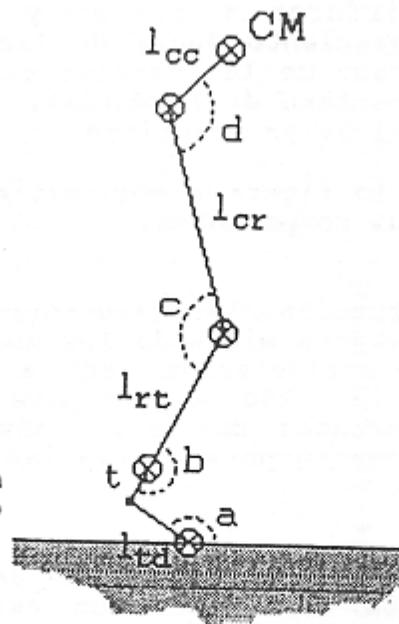
$$S = l_{td} \sin(\Pi - a) + t \sin(a - \Pi/2) + l_{rt} \sin(a + b - 3\Pi/2) + l_{cr} \sin(c - a - b + 3\Pi/2) + l_{cc} \sin(d - c + a + b - 3\Pi/2)$$

donde:

- ltd = longitud tobillo a dedos
- lrt = longitud rodilla a tobillo
- lcr = longitud cadera a rodilla
- lcc = longitud CM a cadera
- t = altura del tobillo
- a = ángulo de dedos
- b = ángulo de tobillo
- c = ángulo de rodilla
- d = ángulo de cadera

según se observa en la figura 1.

FIGURA 1. Longitudes y ángulos empleados en el cálculo del desplazamiento del centro de masa.



Durante la fase de vuelo, el desplazamiento vertical del CM está dado por la ecuación de un cuerpo en un campo de aceleración constante (10). Se consideró como el inicio de la fase de vuelo el tiempo en el que la velocidad instantánea, calculada a partir de los goniómetros, fuera máxima, condición verificada mediante una plataforma descrita anteriormente (3).

A partir del desplazamiento vertical instantáneo del centro de masa $S(t)$, se derivaron la velocidad $v(t)$ y la aceleración $a(t)$. La fuerza vertical instantánea aplicada al CM, $F(t)$, se determinó por el producto de la masa corporal (M) y la aceleración vertical instantánea neta:

$$F(t) = M \times (g + a(t)),$$

el trabajo instantáneo, $W(t)$, como el producto de ésta por el desplazamiento vertical del centro de masa:

$$W(t) = F(t) \times S(t)$$

y la potencia vertical instantánea, $P(t)$, como el producto de la fuerza por $v(t)$:

$$P(t) = F(t) \times v(t).$$

La potencia máxima de la fase de extensión, normalizada al peso del sujeto (P_{max}) es el valor máximo de $P(t)$ en dicha fase entre el peso del sujeto.

Sistema de adquisición y procesamiento. Se utilizó un convertidor analógico-digital de 12 bits con 16 canales conectado a una microcomputadora tipo XT de 10 MHz. La programación se escribió en turbo-Pascal. Las señales procedentes de los goniómetros se

adquirieron a 200 Hz y se almacenaron en memoria para su procesamiento fuera de línea. El procesamiento consistió en el filtrado de las señales electrogoniométricas (filtro promediador con ventana de 10 datos), y en la determinación de las variables mecánicas ya descritas.

La figura 2 esquematiza el sistema de medición, con cada uno de sus componentes.

Calibración. Las características estáticas de los goniómetros se obtuvieron midiendo los ángulos dentro del rango de variación de cada articulación (80° a 200° para cadera, 60° a 200° para rodilla, 150° a 270° para tobillo y 100° a 200° para dedos), con incrementos de 10°. Antes de cada prueba, se calibró cada goniómetro para una variación de 90° y un nivel de referencia de 180°.

Protocolo de ejercicio. Se entrenó a los sujetos para realizar saltos verticales con esfuerzo máximo, iniciando en posición semiflexionada (ángulo de rodilla a 90° aproximadamente), sin sobreflexionarse al momento del salto, con las manos situadas en la misma posición que tenían al calcular el CM, manteniendo lo más erectas posible la espalda y la cabeza, y procurando despegar y aterrizar en la misma posición. Todo lo anterior es con el fin de minimizar tanto el almacenamiento de energía elástica muscular (1), como la variación de la ubicación del CM durante el salto.

Cada sujeto realizó dos saltos con las características anteriores, separados por un intervalo de tiempo de 3 minutos, con el fin de evaluar repetibilidad. Si en algún salto el sujeto realizó sobreflexión, se repitió esa prueba. Para fines comparativos, se utilizó el mejor salto (requerimientos anteriores cumplidos y salto de mayor potencia).

Sujetos. Se estudiaron 6 sujetos (3 masculinos y 3 femeninos), jóvenes, sanos y sedentarios, cuyas características físicas se resumen en la tabla 1.

SUJETO	EDAD años	SEXO	ESTATURA cm	PESO Kg	ALTURA DEL CM m
1	21	M	158	47.5	0.904
2	23	M	170	63.9	0.997
3	27	M	180	79.8	1.052
4	21	F	169	49.1	0.972
5	30	F	158	56.6	0.930
6	22	F	160	54.4	0.921

TABLA 1. Características físicas de los sujetos estudiados.

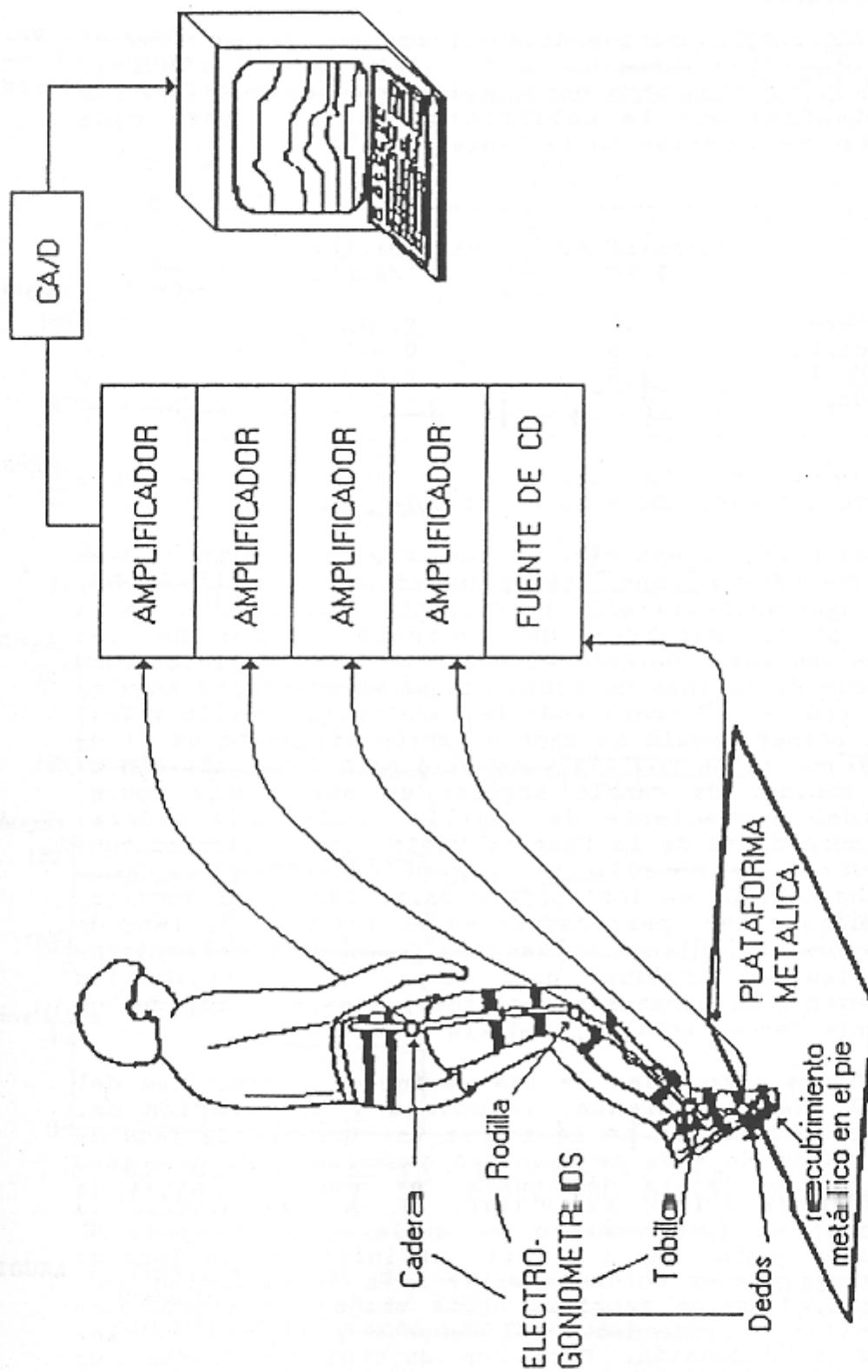


FIGURA 2. Componentes del sistema de medición de la potencia instantánea del salto vertical.

RESULTADOS Y DISCUSION.

El sistema de electrogoniómetros diseñado resultó ligero (700 g) y de fácil colocación (menos de 10 min), características similares a las reportadas para otros electrogoniómetros (2). Los resultados obtenidos por la calibración estática para cada electrogoniómetro se muestran en la tabla 2.

	LINEALIDAD % EC	SENSIBILIDAD °/punto
Cadera	1.7	0.046
Rodilla	1.5	0.043
Tobillo	1.9	0.043
Dedos	1.8	0.039

TABLA 2. Resultados de la calibración estática de cada electrogoniómetro. EC = escala completa.

Este instrumento permitió describir el movimiento angular de cada una de las articulaciones involucradas en el salto, comportamiento que no había sido previamente investigado. En la figura 3 se puede observar un registro típico de los desplazamientos angulares durante el salto vertical de intensidad máxima. Al inicio de la fase de extensión el valor de los ángulos es de 98° para cadera, 77° para rodilla, 135° para tobillo y 183° para dedos; el primer ángulo en cambiar apreciablemente es el de cadera, seguido por el de rodilla y tobillo para finalizar con el de dedos. La rapidez de cambio angular es mayor para dedos, seguida en orden decreciente de tobillo, rodilla y cadera. Durante la primera mitad de la fase de vuelo, las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo se siguen extendiendo, hasta alcanzar ángulos máximos de 168° para cadera, 182° para rodilla, 204° para tobillo y 190° para dedos; en el resto de la fase de vuelo, los ángulos articulares varían muy poco, si bien empiezan a disminuir antes de finalizar esta etapa. Al aterrizar, los ángulos disminuyen a diferentes velocidades, siendo su rapidez en orden decreciente dedos, tobillo, rodilla y cadera.

Las interrelaciones temporales de las variables cinemáticas del salto vertical (desplazamiento, velocidad y aceleración del centro de masa) se muestran en la figura 4a. Durante la fase de extensión, el centro de masa se desplazó aumentando su velocidad hasta el momento de inicio del vuelo, en que se alcanza la velocidad máxima; en este momento la aceleración, después de alcanzar un valor máximo, baja a cero. Al inicio de la fase de flexión se observa una velocidad similar a la de extensión pero negativa, ya que el CM se desplaza hacia abajo; la aceleración durante la flexión se incrementa rápidamente y alcanza valores mayores a los de extensión. Para los sujetos estudiados, el desplazamiento máximo del CM, respecto al piso, varió entre

0.94 m y 1.22 m, mientras que los rangos de velocidad y aceleración máximas durante la fase de extensión fueron de 1.70 m/s a 2.72 m/s y de 7.37 m/s a 18.05 m/s respectivamente.

Las variables dinámicas (fuerza, potencia y trabajo) se presentan en la figura 4b. Durante la fase de extensión, las potencias máximas instantáneas (normalizadas al peso del sujeto) variaron

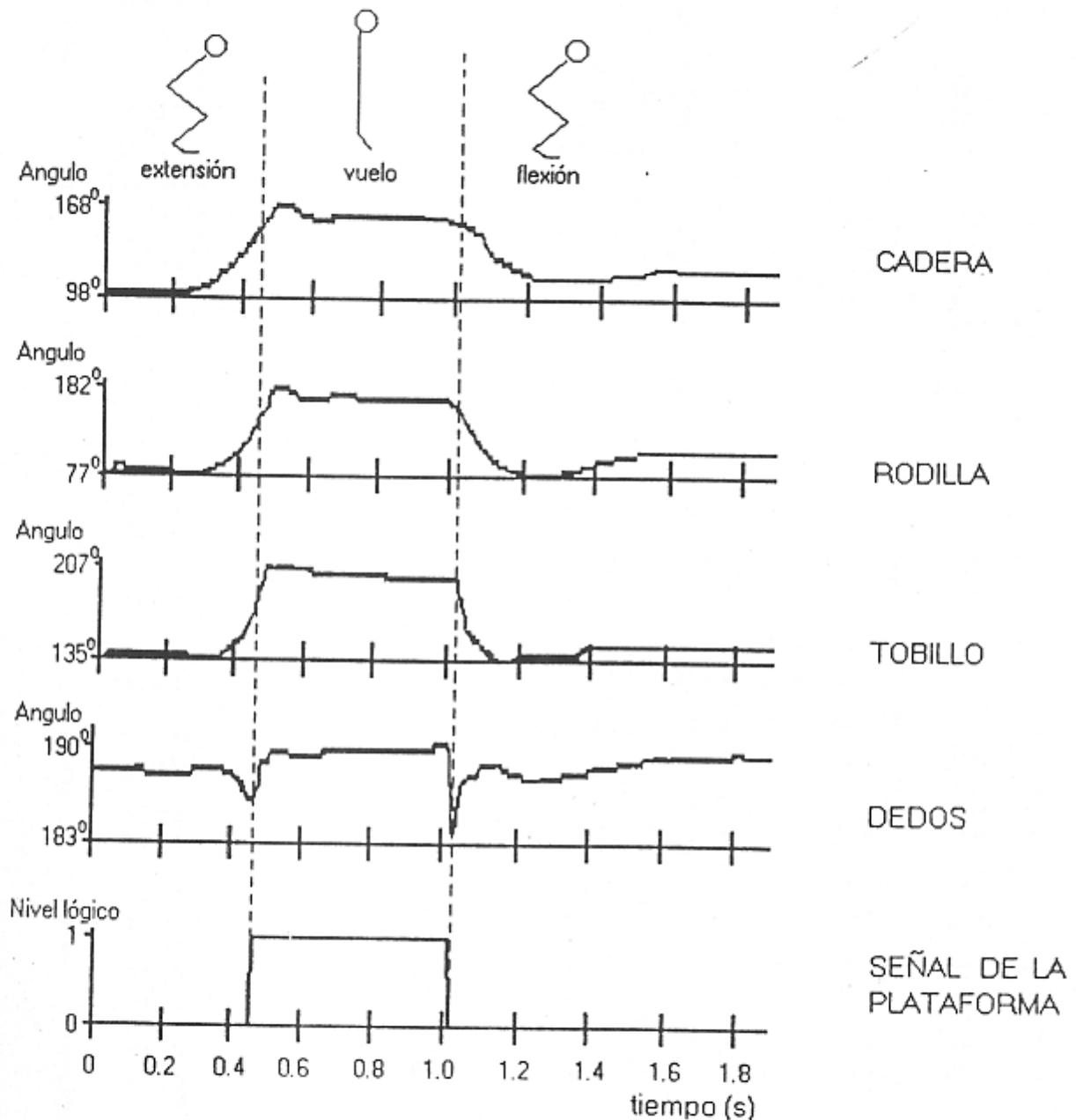


FIGURA 3. Curso temporal de los ángulos de las articulaciones involucradas en el salto vertical máximo. La señal de la plataforma marca las fases del salto.

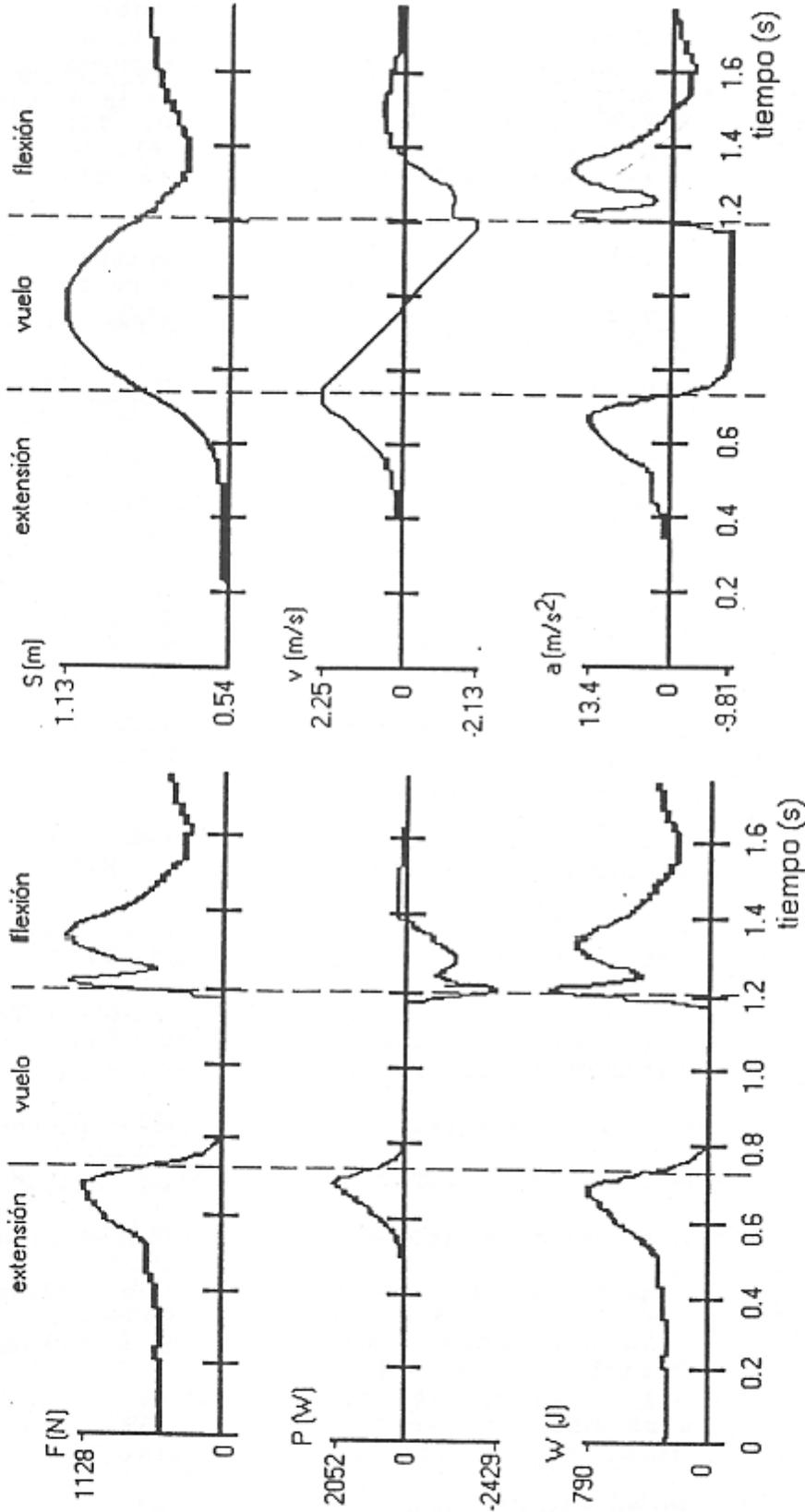
entre 19.9 W/Kg y 50.9 W/Kg, las fuerzas de 939.5 N a 1799.5 N y el trabajo entre 620.3 J y 1506.1 J. La fuerza, el trabajo y la potencia aumentan durante la fase de extensión, y al inicio de la fase de vuelo son iguales al:

- peso del sujeto para la fuerza,
- peso por velocidad máxima para la potencia, y
- peso por desplazamiento del CM al momento del despegue para el trabajo.

Durante la fase de vuelo todas las variables dinámicas alcanzan el cero. Al inicio de la fase de flexión, las tres variables cambian rápidamente, alcanzando valores absolutos mayores que los de la fase de extensión, resultado que concuerda con los observados para la plataforma de fuerza (4,5). El comportamiento global de las variables dinámicas es comparable con el descrito para la plataforma de fuerza (4), razón por la cual el método aquí descrito puede considerarse como una alternativa de éste, pero con un mayor potencial de análisis biomecánico del salto vertical, dado que hace posible el estudio por segmentos articulares.

SUJETO		1	2	3	4	5	6
vmax (m/s)	1	2.56	2.72	1.89	2.05	2.09	1.80
	2	2.60	2.68	1.93	2.14	1.94	1.70
amax (m/s)	1	13.45	18.05	10.69	13.47	12.10	7.37
	2	11.99	16.25	11.37	11.26	9.60	8.35
Fmax (N)	1	1127.9	1799.5	1647.9	1157.0	1246.6	939.5
	2	1057.4	1683.2	1702.7	1047.3	1104.4	993.5
Wmax (J)	1	789.6	1318.4	1445.9	816.0	846.6	693.8
	2	726.1	1251.3	1506.1	732.5	704.9	620.3
Pmax (W/Kg)	1	42.3	50.9	27.0	32.3	29.8	23.0
	2	42.0	48.4	27.7	32.2	27.4	19.9
tv (s)	1	0.53	0.56	0.39	0.42	0.43	0.37
	2	0.53	0.55	0.40	0.44	0.40	0.35
As (m)	1	0.34	0.39	0.19	0.22	0.23	0.17
	2	0.34	0.37	0.20	0.23	0.20	0.15
Smax (m)	1	1.13	1.22	1.16	1.01	1.08	0.97
	2	1.14	1.21	1.19	1.04	0.92	0.94

TABLA 3. Valores máximos de la fase de extensión de las variables cinemáticas (vmax, amax) y dinámicas (Fmax, Wmax, Pmax); tiempo de vuelo (tv), altura del salto (As) y desplazamiento máximo del centro de masa respecto al piso (Smax), de la primera (1) y segunda (2) pruebas.



(a) (b)

FIGURA 4. Patrón cinemático (a) y dinámico (b) del centro de masa característico del salto vertical. S=desplazamiento, v=velocidad, a=aceleración, F=fuerza, P=Potencia, W=Trabajo.

Los valores máximos de la fase de extensión obtenidos para los sujetos, así como el tiempo de vuelo, la altura del salto y el desplazamiento máximo se muestran en la tabla 3. La repetibilidad se valoró por prueba de t-pareada para todas las variables máximas y no mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los resultados de la primera y la segunda prueba. Podemos observar que en promedio tanto las potencias como los tiempos de vuelo medidos en el presente estudio, son ligeramente menores a los reportados en la literatura (4,6). La confirmación y explicación de tales diferencias requiere más estudio.

En conclusión, el método electrogoniométrico resultó aceptable para la determinación de la potencia anaeróbica durante el salto vertical y mostró ser una herramienta versátil y eficaz para la obtención instantánea de variables cinemáticas y dinámicas.

BIBLIOGRAFIA.

1. Asmusen, E., Bonde-Petersen, F. Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol. Scand.* 91:385 - 392, 1974.
2. Badj, T., Stanic, M., Kljajic, M., Trnkoczy, A. On-line electrogoniometric gait analysis. *Comp. Biom. Res.* 9: 439-444, 1976.
3. Carrasco, S., Gaitán, M., Yáñez, O., González, R. Método de medición de la potencia mecánica durante el salto vertical. *Rev. Mex. Ing. Biomed.* 10: 97-107, 1989.
4. Cavanagh, P., Grieve, D. The biomechanics of movement. En "Sports Medicine and Physiology". Editor Strauss, R., W.B. Saunders. Co., 1979.
5. Davies, C., Rennie, R. Human power output. *Nature Lond.* 217: 770-771, 1968.
6. Di Prampero, P.E. Energetics of muscular exercise. *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.* 89: 143-222, 1981.
7. Ferreti G., Maristella, G., Di Prampero, P., Cerretelli, P. Effects of the exercise on maximal instantaneous muscular power of humans. *J. Appl. Physiol.* 62:2288-2294, 1987.
8. Hochmuth, G. "Biomecánica de los movimientos deportivos." Ed. Doncel, 1973.
9. Murray, M.P., Seireg, A., Scholz, R.C. Center of gravity, center of pressure, and supportive forces during human activities. *J. Appl. Physiol.* 26: 831-838, 1967.
10. Offenbacher, E. Physics and the vertical jump. *Am. J. Physics.* 38: 829-836, 1970.