

METODO DE MEDICION DE LA POTENCIA MECANICA DURANTE EL SALTO VERTICAL

*CARRASCO SOSA S.

*GAITAN GONZALEZ M.

**YAÑEZ SUAREZ O.

*GONZALEZ CAMARENAR.

*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 AUTONOMA METROPOLITANA - IZTAPALAPA

RESUMEN

Las potencias musculares de las fases de extensión y frenado, durante la realización de un salto vertical de intensidad máxima, fueron valoradas por la medición de 3 tiempos: vuelo, extensión y frenado. El tiempo de vuelo se registró mediante una plataforma de contacto, y los tiempos de flexión y extensión con un electrogoniómetro de rodilla. Los cálculos se hicieron con un sistema computarizado. Se probaron dos protocolos, saltos simples y consecutivos, siendo repetible solo el primero.

ANTECEDENTES.

Los esfuerzos musculares ejecutados a intensidad máxima voluntaria y de breve duración (menos de 15 s) son denominados "ejercicios anaerobios alácticos", ya que en ellos la contribución energética de los mecanismos regeneradores de ATP oxidativo y láctico no es significativa (4). Se considera que el salto vertical máximo solo emplea como fuente de energía, dado que dura menos de 1 segundo, a los almacenes de ATP muscular (6).

Uno de los métodos de uso corriente para valorar la potencia máxima instantánea es la plataforma, la cual registra la fuerza que ésta ejerce sobre los miembros inferiores (tercera ley de Newton), durante la realización de un salto de intensidad máxima. Por manipulación algebraica de la fuerza se deducen la velocidad, la aceleración y la potencia del centro de masa corporal. Con este método, Davies y Cols. (3) reportaron en 1968 las potencias musculares máximas instantáneas más grandes hasta entonces

obtenidas; 51 w/Kg para hombres y 39 w/Kg para mujeres. Aunque el método es idóneo para el estudio de la potencia muscular anaeróbica, el precio de las plataformas de fuerza, actualmente ya comerciales, es prohibitivo, y su construcción compleja, razones, que han limitado su utilización en los países subdesarrollados.

En nuestro medio, Cherebetiu y Cols. (2) han empleado el método de Goergescu, en la valoración de la potencia anaeróbica. Dicho método consiste en determinar la potencia muscular máxima, durante una serie de 30 saltos consecutivos de intensidad máxima, realizados sobre una plataforma montada sobre interruptores eléctricos. Este dispositivo, vía una microcomputadora, mide los tiempos de vuelo de cada salto y los tiempos entre saltos consecutivos (tiempo de contacto). A partir del tiempo de vuelo se calcula la altura del salto, que multiplicada por el peso del sujeto da el trabajo del salto. La potencia total del salto resulta de la relación entre el trabajo y el tiempo de contacto todo multiplicado por 1.5, factor que según Cherebetiu "corrige el trabajo de frenado al aterrizar". Dos consideraciones son pertinentes al método de Georgescu: la validez del factor empírico de corrección para la potencia de frenado, y la asignación al tiempo de vuelo de un salto, del tiempo de contacto entre saltos adyacentes.

Proponemos, en el presente trabajo, un método para medir la potencia mecánica máxima del salto vertical, basado en: una plataforma, que proporciona en forma sencilla los tiempos de vuelo y contacto; un electrogoniómetro posicionado en la rodilla, que indica el inicio de la extensión y flexión de los miembros inferiores y un sistema de adquisición y procesamiento que realiza los cálculos pertinentes.

MÉTODOS.

Con fines descriptivos, el salto vertical puede ser dividido en tres fases consecutivas:

- a) Extensión de miembros inferiores, durante la cual se acelera el centro de masa corporal contra la gravedad; termina cuando el individuo despega.
- b) Vuelo, el sujeto no está en contacto con el suelo; el centro de masa se va desacelerando, se logra la altura máxima, para luego acelerarse en dirección de la gravedad (caída). Termina al hacer contacto los pies con el piso.
- c) Flexión de miembros inferiores, durante la cual los músculos de los miembros inferiores desaceleran o frenan al centro de masa.

Fundamentos físicos del salto vertical (7). La potencia total (Pt) desarrollada durante el salto consta de dos componentes, la potencia generada durante la fase de extensión (Pe) y la generada durante el frenado (Pf):

$$Pt = Pe + Pf \quad \dots 1$$

La altura del salto (A) puede calcularse a partir del tiempo de vuelo (tv) y la aceleración de la gravedad (g):

$$A = \frac{1}{8} g (tv)^2 \quad \dots 2$$

El trabajo (T) del salto resulta del producto de la altura por el peso del sujeto (P) en Newtons:

$$T = A P \quad \dots 3$$

La potencia de extensión (Pe) es igual a la relación entre el trabajo y el tiempo empleado en la extensión (te):

$$Pe = \frac{T}{te} \quad \dots 4$$

De igual manera, la potencia de frenado (Pf) es igual al trabajo entre el tiempo requerido para frenar completamente al sujeto (tf):

$$Pf = \frac{T}{tf} \quad \dots 5$$

Sustituyendo en la ecuación 1, las ecuaciones 2, 3, 4 y 5:

$$Pt = \frac{1}{8} g (tv)^2 P \left(\frac{1}{te} + \frac{1}{tf} \right) \quad \dots 6$$

Por tanto, como se especifica en la ecuación 6, para determinar las potencias total, de extensión y de frenado es necesaria la medición de los tiempos de vuelo, de extensión y de frenado.

Medición del tiempo de vuelo. Se tienen como polos de un interruptor, a trozos de papel aluminio colocados en las suelas de los zapatos y a una plataforma metálica de 1 m². El contacto entre las suelas y la plataforma aterriza la salida de un circuito sencillo, alimentado por una batería, produciendo un nivel de DC de 0 v. El no contacto o despegue de ambos pies, genera un escalón de aproximadamente 2.5 v, que regresa de nueva cuenta a 0 v hasta el ulterior contacto entre la plataforma y los pies. El tiempo de vuelo es equivalente a la duración del escalón.

Medición de los tiempos de extensión y flexión. Se construyó un electrogoniómetro (EGM), formado por un potenciómetro lineal de precisión y un amplificador operacional alimentado por baterías. El voltaje de salida del amplificador es proporcional al cambio de resistencia del potenciómetro. Al cuerpo y vástago del potenciómetro se le fijaron soleras de aluminio, de tal forma que el desplazamiento angular entre ellas haga variar la resistencia del potenciómetro. El EGM fue colocado mediante bandas elásticas en la parte lateral externa de la articulación de la rodilla, para que registrara el desplazamiento angular entre muslo y pierna. Se consideró como tiempo de extensión el inicio en el aumento del ángulo pierna-muslo al inicio del tiempo de vuelo (ascenso en el nivel de DC del circuito de la plataforma). En forma correspondiente, el tiempo de frenado va de la parte final de tiempo de vuelo (descenso del nivel de DC en la plataforma) al mínimo del ángulo muslo-pierna (fin de la flexión).

Electromiografía. Para confirmar los tiempos de extensión y frenado, se registró durante el salto la actividad eléctrica del vasto interno del cuádriceps, a partir de dos electrodos de superficie (separados 2 cm) y un amplificador bioeléctrico Hewlett Packard 8811A.

Sistema de adquisición y procesamiento. Consiste en un convertidor analógico-digital de 12 bits, 16 canales y un microcomputador XT de 10 MHz, RAM de 640 Kbytes. La programación se escribió en turbo pascal. Las señales eléctricas provenientes de los circuitos de la plataforma, el electrogoniómetro y el amplificador bioeléctrico, fueron adquiridas a 500 Hz, y almacenadas en disco flexible, para su procesamiento fuera de línea. Este consistió en la medición de los tiempos de extensión, vuelo y frenado; valores que fueron sustituidos en las ecuaciones anteriormente mencionadas, para calcular la altura del salto, la velocidad de despegue ($g \cdot t \sqrt{2}$), la potencia de ascenso, la potencia de frenado, la potencia total, así como la potencia según el procedimiento de Cherebetiu.

En la figura 1 se esquematizan las partes y el arreglo del sistema de medición empleado en el estudio de la potencia del salto vertical.

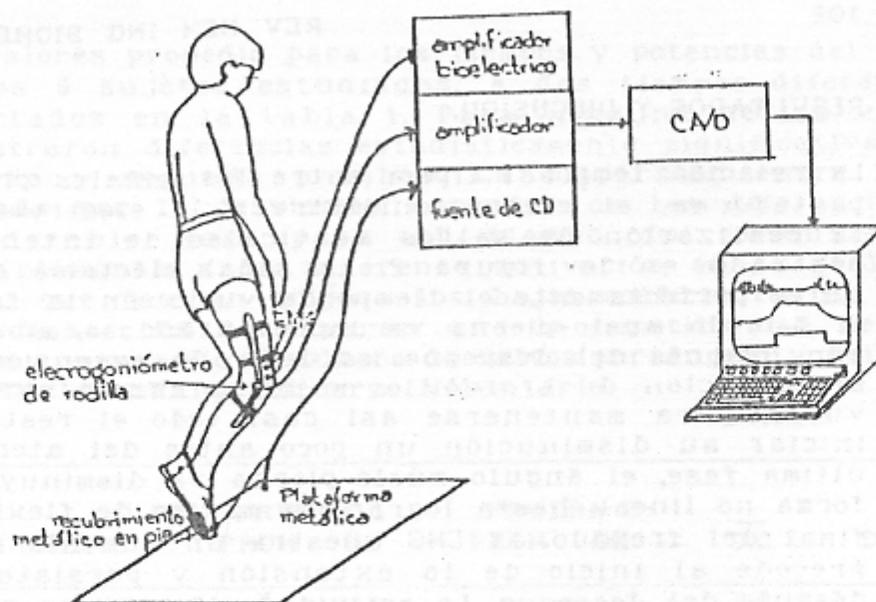


FIGURA 1. Arreglo y componentes del sistema de medición de la potencia del salto vertical.

Calibración. La resolución en la medición de los tiempos es función de la frecuencia de muestreo. Dado que ésta fue de 500 Hz, el intervalo de tiempo mínimo capaz de medirse es de 2 ms, con una precisión y exactitud similar al del reloj de la microcomputadora.

La calibración estática del electrogoniómetro consistió en medir con el sistema 3 ángulos fijos de 30°, 60° y 90°, en 5 ocasiones cada uno. La relación ángulo real(x)-ángulo medido(y), queda descrita por la recta de regresión $y = 1.00x - 0.26$, cuya desviación estandar es de ± 0.68 , con un coeficiente de correlación de 0.999, $p < 0.001$, resultados que respaldan el buen desempeño del electrogoniómetro.

Protocolo de ejercicio. Se utilizaron dos protocolos de ejercicio. En el primero se pidió al sujeto realizar un salto vertical único de intensidad máxima, sin flexionar las piernas en el aire, a partir de una posición de semiflexión, maniobra que se repitió en dos ocasiones. En el segundo, los individuos ejecutaron una serie de saltos verticales consecutivos, de intensidad máxima, durante 15 s, sin flexionar las piernas en el aire, y sin detenerse durante los saltos. Este procedimiento se repitió en cada individuo en dos ocasiones.

Sujetos. Intervinieron en el estudio 8 sujetos femeninos, sanos, con las siguientes características físicas promedio: edad de 23.3 ± 2.9 años, estatura de 156 ± 6 cm y peso de 54.3 ± 7 Kg.

RESULTADOS Y DISCUSION.

La relación temporal típica entre las señales provenientes de la plataforma, el electrogoniómetro y la electromiografía, durante la realización de saltos verticales de intensidad máxima es mostrada en la figura 2. La señal eléctrica de la plataforma limita perfectamente el tiempo de vuelo. En la fase de extensión, el ángulo muslo-pierna va incrementándose, en forma no lineal, aun después del despegue; es decir, la extensión completa de la articulación de la rodilla se logra en el inicio de la fase de vuelo, para mantenerse así casi todo el resto de la misma, e iniciar su disminución un poco antes del aterrizaje. En esta última fase, el ángulo muslo-pierna va disminuyendo, también en forma no lineal, hasta lograr un máximo de flexión, que marca el final del frenado. El EMG muestra un aumento de actividad que precede al inicio de la extensión y persiste hasta un poco después del despegue. La actividad eléctrica es mínima durante la fase de vuelo y se incrementa un poco antes del aterrizaje, - el músculo se prepara para aterrizar -. Hecho previamente reportado por Asmussen y Col. (1). La fase de frenado se acompaña de un incremento en la actividad eléctrica del músculo para disminuir paulatinamente a medida que el sujeto se va frenando.

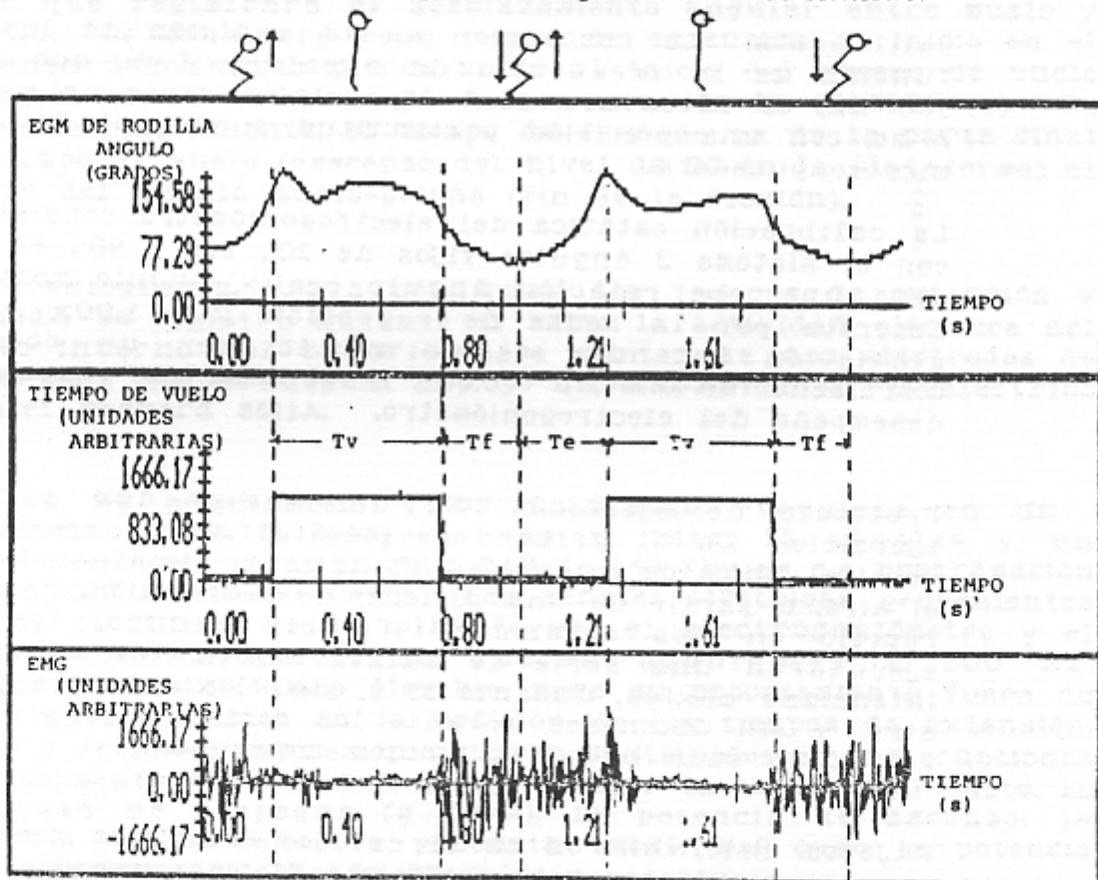


FIGURA 2. Relación temporal representativa entre el tiempo de vuelo, la electrogoniometría y la electromiografía, durante un salto de intensidad máxima. T_v = Tiempo de vuelo, T_e = Tiempo de extensión, T_f = Tiempo de flexión

Los valores promedio para los tiempos y potencias del salto único en los 8 sujetos estudiados, a dos tiempos diferentes, están reportados en la tabla 1. Para ninguna de las variables se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre la primera y segunda pruebas. La dispersión entre las pruebas, valuada por la desviación estandar de las diferencias, resulta considerable solo para el tiempo de extensión, debido probablemente a la diferente motivación en la realización del salto, que también origina los bajos coeficientes de correlación intraclase. Es de esperar que la repetibilidad de la prueba mejore aumentando el número de saltos por sujeto y motivándolos a ejecutar el máximo esfuerzo voluntario.

VARIABLE	PRUEBA 1		PRUEBA 2		\bar{X}_d	DEd	r
	PROM	DE	PROM	DE			
TIEMPO DE EXTENSION (s)	0.232	0.050	0.205	0.037	0.040	0.020	0.68
TIEMPO DE VUELO (s)	0.479	0.067	0.475	0.070	0.007	0.007	0.99
TIEMPO DE FLEXION (s)	0.135	0.025	0.136	0.012	0.015	0.012	0.61
POTENCIA DE EXTENSION (w)	667.6	199.5	723.1	164.0	106.9	48.8	0.84
POTENCIA DE FLEXION (w)	1112.7	170.5	1091.2	233.0	127.2	86.8	0.73
POTENCIA TOTAL (w)	1780.8	350.2	1814.3	365.4	149.4	92.9	0.87

\bar{X}_d = Promedio de diferencias intraclase

DEd = Desviación estandar de las diferencias intraclase

r = Coeficiente de correlación intraclase

TABLA 1. Promedios y desviaciones estándar de las principales variables obtenidas en dos pruebas para un mismo sujeto, en diferentes tiempos (8 sujetos en total). La comparación estadística entre la primera y segunda prueba, por t de student, no mostró diferencias significativas para $p < 0.05$.

La potencia de extensión es aproximadamente 59% menor que la de frenado, debido al menor tiempo de ésta última (lo que significa la utilización de una mayor fuerza muscular), hecho ya notado desde el trabajo de Davies y Col. con la plataforma de fuerza (3). Ya que los valores de potencia obtenidos con el presente método representan promedios más que valores instantáneos (resumen las variaciones de la potencia en intervalos relativamente grandes de tiempo), son de menor magnitud que los reportados en la plataforma de fuerza (6), pero resultan superiores a los conseguidos por otros métodos de valoración de la potencia anaeróbica, como la prueba de Margaria o el ergómetro isoquinético (5). El comportamiento anterior puede explicarse por el hecho, ya conocido, que la potencia aumenta con la disminución de la duración del esfuerzo, en nuestro caso de menos de 1 s, además de la mayor participación de grupos musculares en el esfuerzo (contracción simultánea de los extensores de los miembros inferiores).

Las potencias desarrolladas durante el protocolo de saltos múltiples consecutivos no siguen un patrón definido y presentan tal variabilidad entre pruebas, para un mismo sujeto, que hacen de él un protocolo no confiable en la valoración de la potencia muscular.

En la tabla 2 se reportan los valores numéricos de las variables calculadas durante el salto vertical para un sujeto deportista y uno sedentario. Resaltan los valores más altos del primero respecto al segundo.

	A m	Vd m/s	Pe w	Pf w	Pt w	Pt/m w/Kg
SEDENTARIO (40 Kg)	0.33	2.6	547.0	1066.0	1613.0	40.3
ACTIVO (48 Kg)	0.45	3.0	953.0	1525.0	2478.0	51.6

A = Altura del salto; Vd = Velocidad de despegue;
 Pe = Potencia de extensión; Pf = Potencia de flexión;
 Pt = Potencia total; Pt/m = Potencia total/masa;

TABLA 2. Resultados obtenidos en un sujeto sedentario y un activo durante un salto vertical de intensidad máxima.

En seis sujetos fueron calculadas la potencias con el método aquí descrito y según el propuesto por Georgescu-Cherebetiu para dos mismos saltos consecutivos; sus respectivos valores son presentados en la tabla 3. Puede notarse que las potencias, según este autor, son más bajas aún que los valores de la potencia de ascenso. Los coeficientes de correlación entre potencia por Cherebetiu contra potencia de ascenso, de frenado y total son respectivamente 0.863, 0.849 y 0.997. Dado lo alto de esta última correlación, es de esperar una buena predicción de la potencia total del salto con el solo empleo de la plataforma. La línea de regresión entre potencia total y potencia según Cherebetiu es presentada en la figura 3.

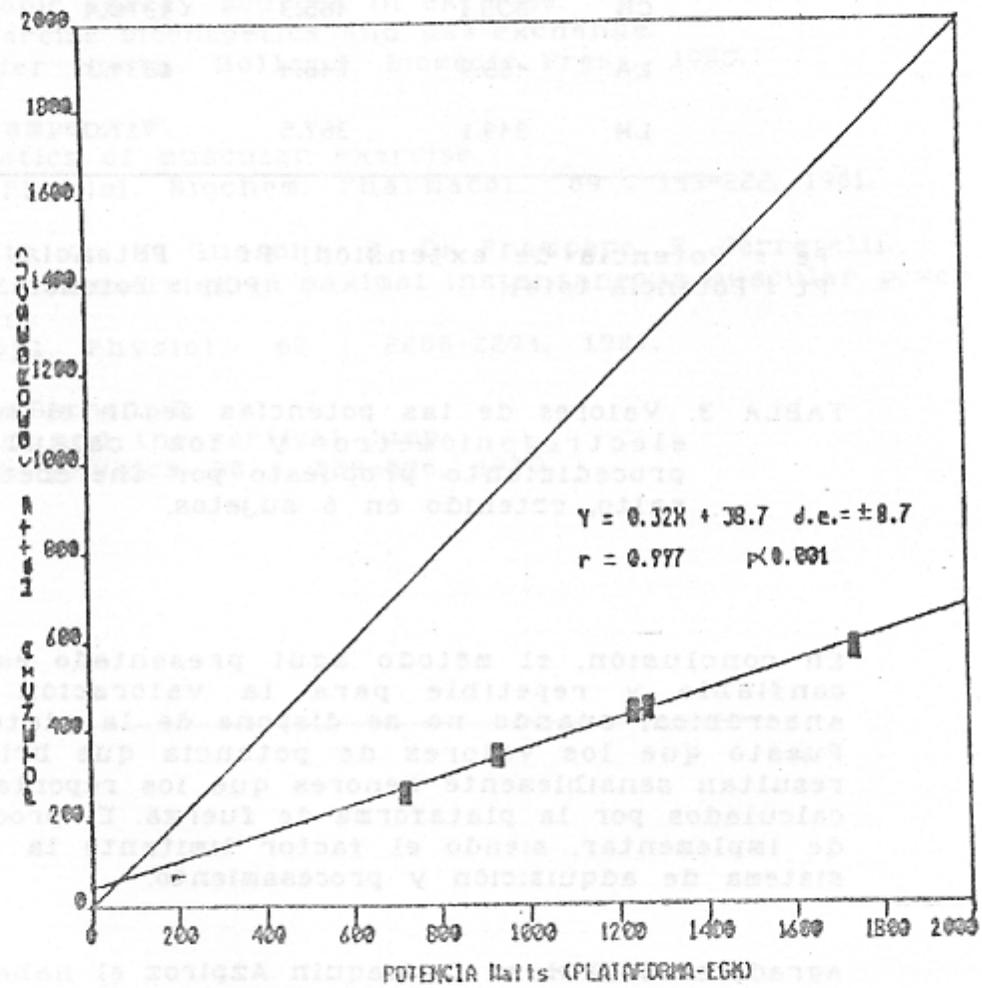


FIGURA 3. Línea de regresión entre las potencias calculadas por el método aquí propuesto y el de Georgescu, para un mismo salto máximo, obtenidos en seis sujetos.

SUJETO	Pe (w)	Pf (w)	Pt (w)	PCh (w)
MJ	702.5	535.5	1238.0	442.5
MH	832.3	901.2	1740.5	585.3
RV	447.1	485.0	932.1	338.6
CH	505.1	465.3	1270.4	444.7
LA	485.9	748.4	1234.3	438.2
LM	349.1	367.5	717.0	257.2

Pe = Potencia de extensión; Pf = Potencia de flexión;
Pt = Potencia total; PCh = Potencia según Cherebetiu;

TABLA 3. Valores de las potencias según el método plataforma-electrogoniómetro y los calculados según el procedimiento propuesto por Cherebetiu para un mismo salto, obtenido en 6 sujetos.

En conclusión, el método aquí presentado es una alternativa confiable y repetible para la valoración de la potencia anaeróbica, cuando no se dispone de la plataforma de fuerza. Puesto que los valores de potencia que brinda son promedio, resultan sensiblemente menores que los reportados como máximos, calculados por la plataforma de fuerza. El procedimiento es fácil de implementar, siendo el factor limitante la disponibilidad del sistema de adquisición y procesamiento.

Agradecemos al M. en C. Joaquin Azpiroz el habernos facilitado el convertidor analógico digital empleado en el trabajo.

BIBLIOGRAFIA.

1. Asmussen, E., P. Bonden.
Storage of elastic energy in skeletal muscle in man.
Acta Physiol. Scand. 91 : 385-392, 1984.
2. Cherebetiu, G., J. Jiménez.
Potencia aneróbica máxima en niños y adolescentes.
Rev. Mex. Med. Dep. 1 : 9-14, 1983.
3. Davies, C., R. Rennie.
Human Power output.
Nature Lond. 217 : 770-771, 1968.
4. Di Prampero, P., M. Meyer, J. Pilper.
Anaerobic energy sources in exercise.
En Exercise bioenergetics and gas exchange.
Elsevier North. Holland. Biomedic Press., 1980.
5. Di Prampero, P.
Energetics of muscular exercise.
Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol. 89 : 143-222, 1981.
6. Ferretti, G., M. Gussoni, P. Di Prampero, P. Cerretelli.
Effects of exercise on maximal instantaneous muscular power of humans.
J. Appl. Physiol. 62 : 2288-2294, 1987.
7. Offen Bacher, E.
Physics and the vertical jump.
Am. J. Physics 38 : 829-836, 1970.