

# ERGOMETRO DE CARGA CONSTANTE PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO ANAEROBICO

---

\*CARRASCO SOSA S. \*GAITAN GONZALEZ M.

\*\*YAÑEZ SUAREZ C. \*GONZALEZ CAMARENA R.

\*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

---

Se construyó un ergómetro de bicicleta tipo Doveln, frenado mecánicamente, al que se le adaptaron dos fotodetectores para registrar la velocidad de pedaleo, y un potenciómetro que mide el desplazamiento angular del péndulo. Ambas señales se adquieren y procesan en un microcomputador. Se calculó la potencia muscular desarrollada durante un esfuerzo máximo de 15 s, a carga constante, observando que el curso temporal de ésta sigue un patrón definido, cuyo análisis brinda información suficiente para la valoración del desempeño muscular anaeróbico.

---

## ANTECEDENTES.

El desempeño muscular anaerobio es la capacidad del ser humano de generar potencia máxima durante esfuerzos de breve duración (menos de 15 segundos); determinada fundamentalmente por la velocidad de hidrólisis del ATP almacenado en los músculos, el patrón de reclutamiento de las fibras musculares y el porcentaje de distribución de las fibras tipo 2b (2). Este tipo de esfuerzos forman parte de las actividades normales de la vida diaria, y de muchos eventos atléticos, como las carreras de 100,200 y 400 m, los saltos de longitud, altura, etc. A pesar de esto, no ha habido un estudio exhaustivo por parte de los investigadores de la fisiología del ejercicio (5).

La potencia anaerobica máxima puede ser determinada por las pruebas de Margaria (4) o por medio del ergómetro isoquinético, método que ha ganado popularidad en los años recientes dado que permite la caracterización de fuerza-velocidad y fatiga de los músculos in situ, aunque no con la finura y extensión brindados por estudios realizados en preparaciones aisladas de músculo. En el ergómetro isoquinético, un motor produce una velocidad

constante de pedaleo y se miden con strain-gauges las torcas aplicadas en los pedales por el sujeto. La potencia resulta del producto fuerza-velocidad en cada pedaleo (8). La principal limitación del anterior método es que el cuerpo normalmente no emplea para generar potencia el mecanismo de velocidad constante de contracción; siendo más frecuente utilizar velocidad de contracción variable como sucede, por ejemplo en la carrera de 100 m.

Para tratar de subsanar las desventajas del ergómetro isoquinético, Williams y Col. (9) propusieron recientemente una modificación del ergómetro de carga constante, descrito ya con anterioridad (1), con las siguientes características:

- a) Medición de la fuerza de fricción aplicada a la rueda con una celda de carga electrónica.
- b) Medición de la velocidad de pedaleo por interruptores magnéticos.
- c) Colección y análisis de datos via un microcomputador.

El propósito de la presente comunicación es presentar:

- a) el diseño de un ergómetro de carga constante, de hechura similar al ideado por Williams y Cols. pero con algunas modificaciones que hacen mas sencilla su fabricación a partir de un ergómetro mecánico convencional, como son: medición de la carga por el desplazamiento angular de la balanza senoidal, y utilización de fotointerruptores para la medición de la velocidad de pedaleo.
- b) demostrar su aplicación mediante la obtención de la relación revoluciones por minuto - carga y del patrón de dominancia muscular de los miembros inferiores.

#### MÉTODOS.

##### Desarrollo del ergómetro.

A un cuadro de una bicicleta estacionaria comercial se le adaptaron las siguientes partes:

- a) Rueda delantera, formada por un rin de plástico al que se le adicionaron planchas triangulares de plomo, distribuidas uniformemente, para aumentarle la masa a 25 Kg. La superficie rodante fué cubierta con un fajn de acero inoxidable de 0.02 m de ancho para homogeneizar la fricción y evitar el desgaste.
- b) Balanza senoidal: mide la tensión ejercida por una banda inelástica (cuero) sobre la rueda delantera. Consta de un eje sobre el cual puede girar, por medio de 2 baleros, un cilindro

metálico de 0.05 m de diámetro y 0.05 m de largo. Esta pieza lleva un sujetador para la banda y diametralmente un brazo metálico (0.25m de largo y 0.01 m de diámetro) en cuyo extremo se atornilló una masa cilíndrica metálica de 1.6 Kg de peso (péndulo). Una escala de acrílico graduada en grados, mide el desplazamiento angular del centro de la masa con respecto a la vertical. La balanza senoidal está en el extremo de un tubo metálico resistente, fijado a la parte delantera del cuadro.

- c) Tornillo para tensar la banda, de 0.2 m de largo, 0.01 m de diámetro y con cuerda fina; tiene en un extremo una pieza que se adapta a la banda, con giro libre. El movimiento de avance del tornillo permite un ajuste preciso de la tensión sobre la banda.

Hasta aquí, el instrumento descrito constituye un ergómetro de bicicleta mecánicamente frenado, de uso generalizado en fisiología del ejercicio; descrito en 1954 por Dovel W. (3). La potencia realizada sobre el ergómetro, es igual al producto de la velocidad de la rueda por la tensión sobre la misma. La torca ejercida en el cilindro de la balanza (tensión x radio) es igual en el equilibrio, al brazo por la masa por el seno del ángulo del péndulo, en relación a la vertical. Dado que el radio del cilindro, el brazo y la masa son de valor constante, cualquier tensión aplicada a la banda desplazará proporcionalmente al péndulo. La velocidad de la rueda es igual a su circunferencia, por el factor de transmisión, por el número de revoluciones de los pedales en un minuto. En las pruebas clásicas de ejercicio se mantiene un ritmo constante de pedaleo mediante un metrónomo.

Para poder aplicar el ergómetro mecánico en la evaluación de la capacidad anaeróbica se requieren señales proporcionales a la tensión y la velocidad. Con este fin se agregaron al ergómetro dos dispositivos electrónicos sencillos:

- a) Medidor de velocidad. Dos detectores ópticos formados por un LED y un fototransistor, fueron colocados en un soporte metálico de tal forma que el haz de luz es interrumpido por un obstáculo colocado en cada pedal. Un circuito monoestable proporciona un pulso de duración constante cada vez que el obstáculo de uno de los pedales interrumpe el haz de luz del respectivo fotodetector. El intervalo de tiempo entre dos pulsos consecutivos, es el periodo que se toma en cuenta para el cálculo de la velocidad.
- b) Medidor de tensión. En el eje de la balanza se situó un potenciómetro lineal de precisión, cuyo vástago se articuló, por medio de una varilla metálica, al centro de la masa del péndulo. Así, el desplazamiento del péndulo produce un cambio proporcional en la resistencia del potenciómetro, y al encontrarse éste conectado en forma de un divisor de voltaje proporciona un voltaje proporcional a dicho desplazamiento.

Para facilitar el cálculo y despliegue de la potencia, el índice de fatiga y otras variables relacionadas, se utilizó un sistema computarizado de adquisición y procesamiento de datos. El hardware utilizado fue un microcomputador PC-XT, con reloj de 10 MHz y 640 Kbytes de RAM, en uno de cuyos slots se acopló un convertidor analógico digital de 12 bits, 16 canales y frecuencia de muestreo máxima de 4 KHz. El software fue escrito en ensamblador y turbo Pascal; consta de los siguientes programas:

- a) Adquisición. Las señales eléctricas provenientes de los circuitos ya descritos son adquiridas a 250 Hz durante 15 segundos. Los datos se almacenan para su posterior procesamiento.
- b) Procesamiento. Del archivo de datos correspondiente a la señal producida por los fotodetectores se mide el periodo de tiempo entre pulsos consecutivos, y la velocidad es calculada, cada medio ciclo, como el producto de la distancia que recorre la rueda (constante) por el periodo. Se determina el curso temporal de la velocidad, y a partir de éstos, los valores de velocidad máxima (VMAX), velocidad a los 15 segundos (V15), velocidad media (VM) y distancia total recorrida (DT), como la integral de la velocidad, para cada una de las piernas. De este archivo también se obtuvieron las revoluciones por minuto. El archivo correspondiente a la señal del potenciómetro, es promediado y convertido a grados; la tensión es obtenida como el producto del seno del ángulo por una constante que expresa las características físicas de la balanza.

La potencia en cada medio ciclo es calculada por el producto velocidad-tensión. De la relación potencia tiempo, además son derivados las siguientes variables:

- Valor máximo de la potencia (P<sub>MAX</sub>)
- Tiempo al que se logra la potencia máxima (t<sub>P<sub>MAX</sub></sub>)
- Potencia a los 15 segundos (P<sub>15</sub>)
- Velocidad de disminución de la potencia (P), pendiente entre la P<sub>MAX</sub> y la P<sub>15</sub>
- Índice de fatiga (IF), porcentaje de disminución de la potencia máxima a los 15 segundos.
- Potencia media (PM)
- Trabajo total (TT), integral de la potencia en los 15 segundos.

- c) Despliegue. Sumariza numéricamente las variables globales y por pierna para la potencia, velocidad y revoluciones por minuto. Grafica los cursos temporales de la carga, velocidad y potencia.

En la figura 1 se esquematiza el arreglo del sistema de medición empleado en el presente estudio.

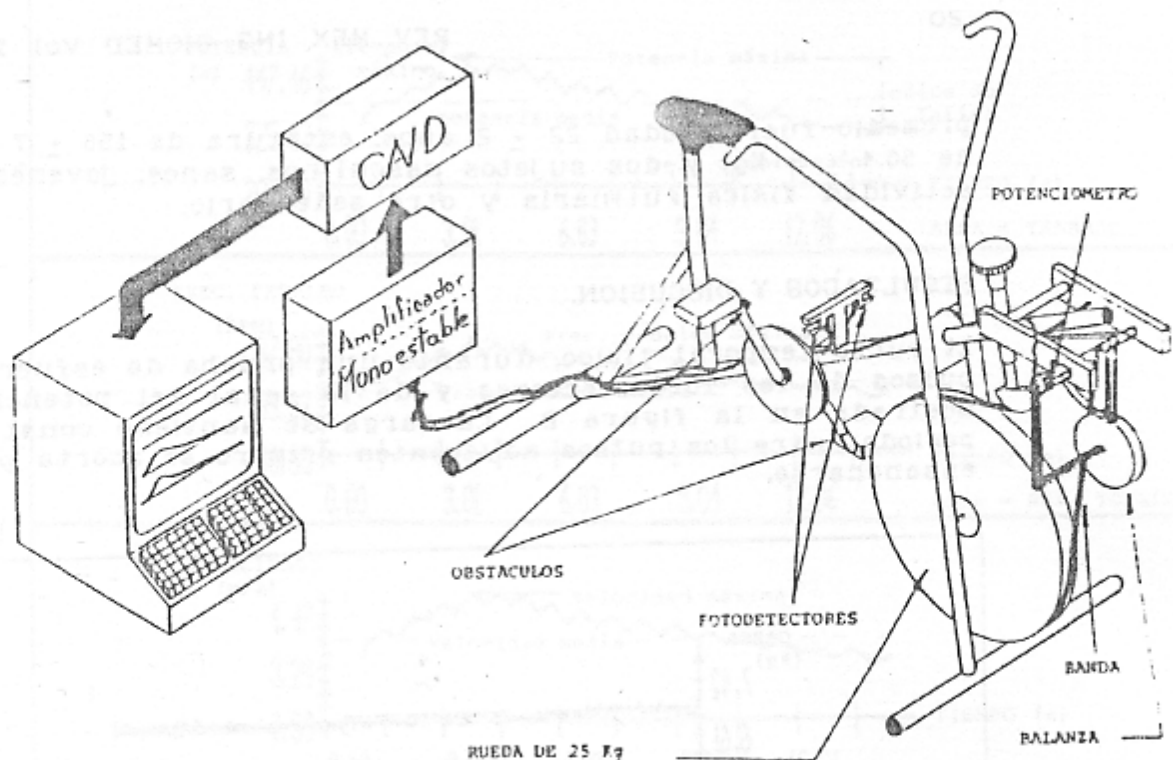


FIGURA 1. Ergómetro mecánico modificado para medir el desempeño anaeróbico.

#### Calibración.

La resolución en el cálculo del intervalo de tiempo entre pulsos consecutivos, a frecuencia de muestreo de 250 Hz, es de 4 ms, con una precisión y exactitud similar al del reloj de la computadora.

La tensión se calibró en forma estática, colocando en uno de los extremos de la banda, alternativamente, pesos de gran exactitud ( $\pm 5$  gr) de 3, 5, 7, 11 y 13 Kg (5 repeticiones para cada peso), comparándolos con los obtenidos por el método descrito. La línea de regresión peso real(x)-peso calculado(y) ( $y = 1.027x - 0.267$ ) se aproxima mucho a la línea de identidad, con una desviación estandar de  $\pm 82$  gr, y un coeficiente de correlación de 0.999,  $p < 0.001$ , resultados que confirman la óptima confiabilidad del sistema en la medición de la carga.

#### Protocolo de ejercicio.

Después de un calentamiento durante 3 minutos a 50 watts, el sujeto es incitado a pedalear lo más rápido que le sea posible durante 15 segundos. La prueba se repite en 4 ocasiones, con periodos de descanso de 10 minutos entre ellas, aplicando consecutivamente cargas de 4,7,10 y 13 Kg. Los sujetos son instruidos a permanecer sentados durante la realización de cada prueba. Con fines de probar la repetibilidad del método se realizó la prueba 24 horas después. Se estudiaron un total de 10 sujetos, 8 femeninos, sanos, cuyas características físicas

promedio fueron: edad  $22 \pm 2$  años, estatura de  $156 \pm 7$  cm y peso de  $56.4 \pm 5$  Kg; y dos sujetos masculinos, sanos, jóvenes, uno con actividad física rutinaria y otro sedentario.

### RESULTADOS Y DISCUSION.

El curso temporal típico, durante una prueba de esfuerzo, de los pulsos de los fotodetectores y de la señal del potenciómetro es mostrada en la figura 2. La carga se mantiene constante y el periodo entre los pulsos adyacentes primero se acorta para luego ensancharse.

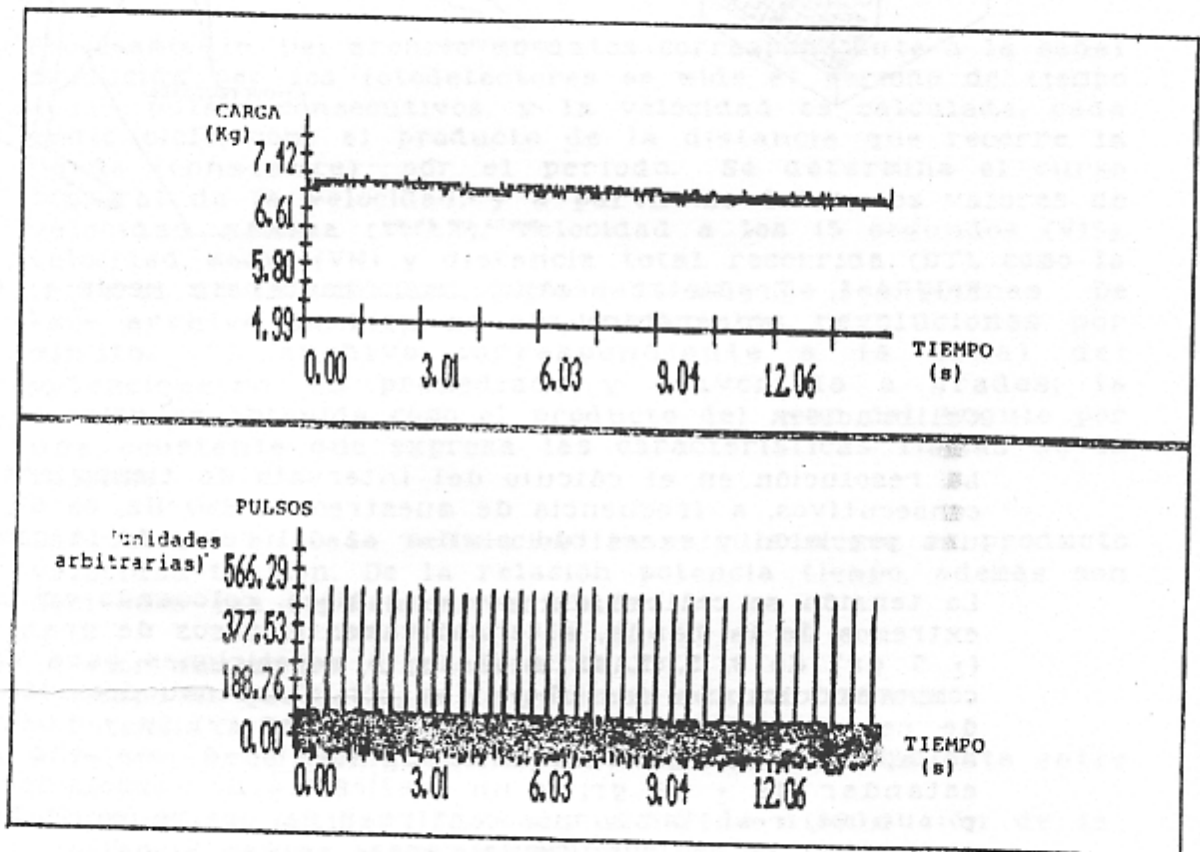


FIGURA 2. Registros representativos del curso temporal de la carga y pulsos de los fotodetectores, durante un esfuerzo máximo.

El comportamiento de la velocidad (m/s), la frecuencia de pedaleo y la potencia (watts) siguen, como era de esperarse, el mismo patrón: un incremento rápido, hasta un máximo seguido de una disminución mas o menos lineal (Figura 3). La potencia máxima se alcanza después de 4 a 5 segundos de iniciado el ejercicio y disminuye entre un  $25 \times$  a  $35 \times$  a los 15 segundos (índice de fatiga).

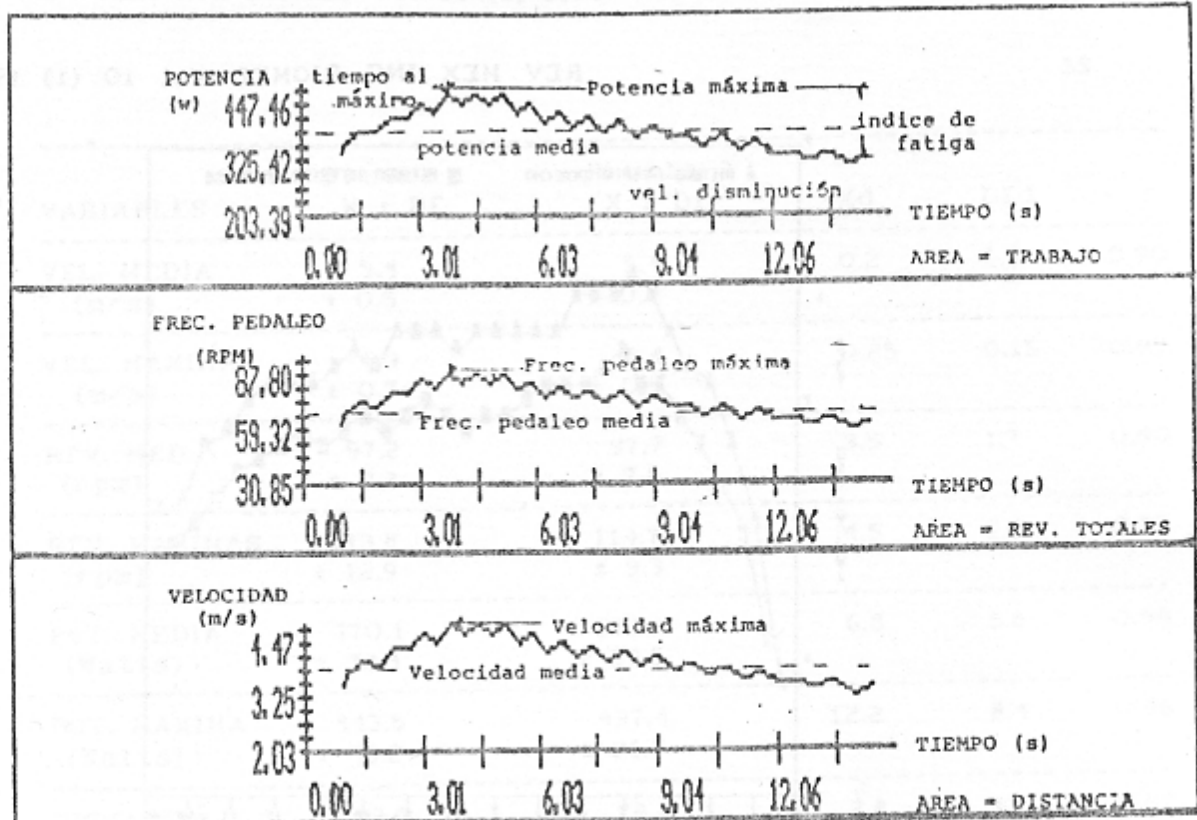


FIGURA 3. Curvas de potencia, velocidad y frecuencia de pedaleo, durante un esfuerzo máximo, que muestran el patrón temporal característico, así como las variables que lo definen.

Las oscilaciones observadas en las gráficas de la velocidad y la potencia, resultan de la alternancia entre las diferentes velocidades ejercidas por los miembros inferiores, durante la prueba; efecto que se hace notorio al separar la velocidad para cada uno de los miembros (Figura 4); siendo uno de ellos el que ejerce mayor velocidad (patrón de dominancia).

Existe una relación inversamente proporcional entre la frecuencia de pedaleo y la carga, en el rango de 7 a 13 Kg (Figura 5), semejante a la obtenida con el ergómetro isoquinético (6,8); aunque tiende a aplanarse a cargas menores de 7 Kg. La relación anterior difiere de las curvas fuerza-velocidad de la preparación de músculo aislado, donde es descrita por una función hiperbólica rectangular.

Los valores de potencia máxima, el tiempo a la potencia máxima, el índice de fatiga, la velocidad de disminución de la potencia, la potencia promedio y el trabajo total, obtenidos en 8 sujetos, en dos días diferentes, no muestran diferencias significativas, presentan altos coeficientes de correlación intraclass, y la desviación estandar de las diferencias, para cada variable, es de magnitud similar a las reportadas por Williams (9) (Tabla 1), resultados todos que aseguran la buena repetibilidad del método.

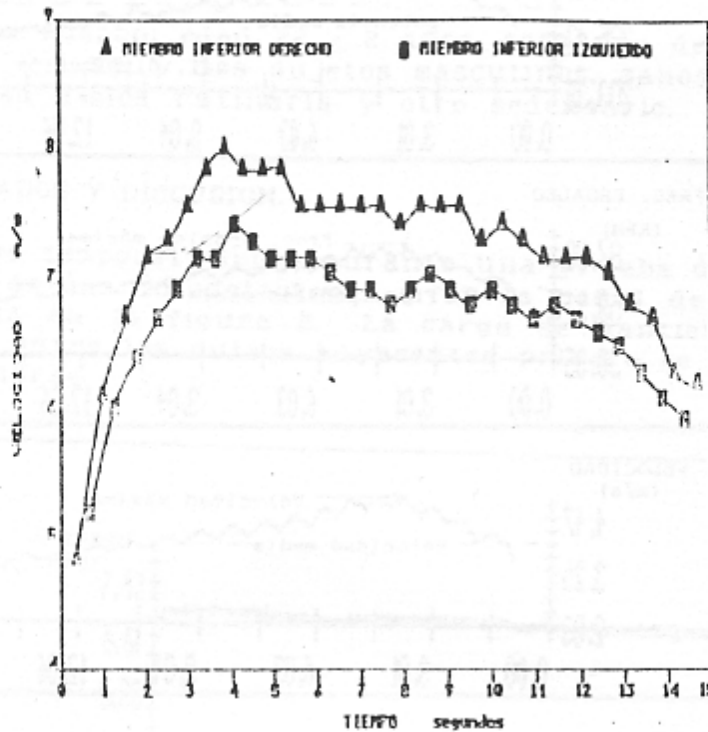


FIGURA 4. Curva velocidad - tiempo para cada uno de los miembros inferiores de un mismo sujeto, que determinan el patrón de dominancia.

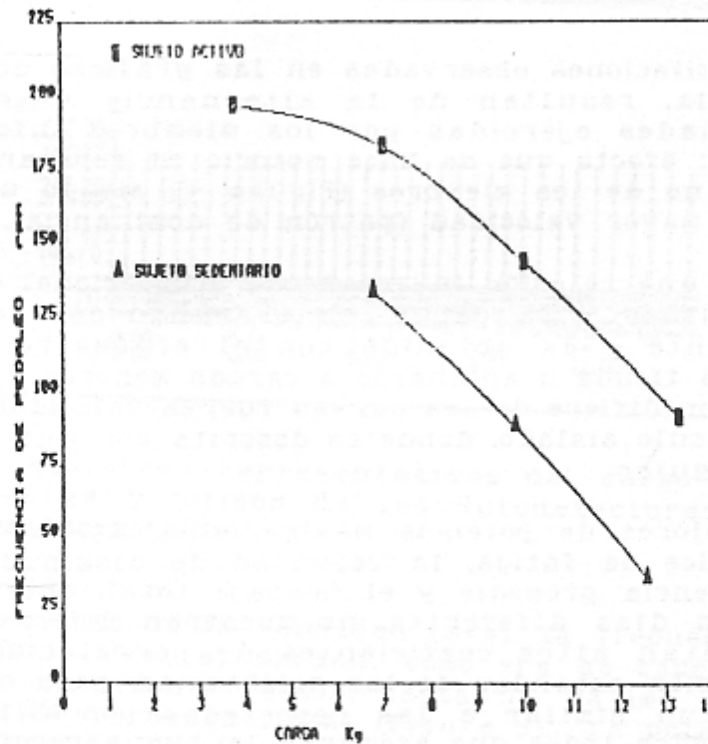


FIGURA 5. Relación carga-frecuencia de pedaleo obtenidas en un sujeto activo y en otro sedentario.



VARIABLES	Prueba 1 X ± DE	Prueba 2 X ± DE	Xd	DEd	r
VEL. MEDIA (m/s)	5.4 ± 0.5	5.4 ± 0.4	0.2	0.1	0.90
VEL. MAXIMA (m/s)	6.3 ± 0.7	6.4 ± 0.5	0.25	0.15	0.93
REV. MED. (rpm)	97.2 ± 9.2	97.7 ± 7.6	3.5	1.7	0.90
REV. MAXIMAS (rpm)	113.8 ± 12.9	114.7 ± 9.3	4.5	2.6	0.93
POT. MEDIA (Watts)	370.1 ± 32.4	372.2 ± 29.5	6.8	5.8	0.96
POT. MAXIMA (Watts)	443.5 ± 46.2	437.4 ± 36.7	12.2	8.4	0.96
DISTANCIA (m)	78.0 ± 7.0	78.4 ± 6.0	2.8	1.7	0.87
REV. TOTALES	23.5 ± 2.1	23.5 ± 1.8	0.9	0.5	0.87
TRABAJO (KJ)	5.3 ± 0.44	5.4 ± 0.42	0.11	0.11	0.94
CARGA (Kg)	7.0 ± 0.08	7.0 ± 0.10	0.14	0.07	---
TIEMPO A MAX. (s)	4.5 ± 1.5	4.3 ± 1.1	1.1	0.7	---
IND. FATIGA (%)	29.4 ± 6.1	30.9 ± 6.1	7.5	5.2	---
PENDIENTE (Watts/s)	-12.7 ± 3.2	-12.9 ± 2.2	5.5	6.7	---

Xd = Promedio de las diferencias intraclase;  
 DEd = Desviación estándar de las diferencias;  
 r = Coeficiente de correlación intraclase.

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

El valor absoluto de nuestros resultados son semejantes a los reportados, tanto para el ergómetro isoquinético (6,8), como para el ergómetro de carga constante (9), lo que indica la similitud del desempeño anaeróbico de sujetos de nuestro medio en relación a otras poblaciones, aunque faltaría hacer estudios mas extensos para verificar plenamente este importante punto.

A manera de ejemplo, en la figura 6 se muestra la gráfica de potencia-tiempo en el sujeto sedentario y en el activo. A una misma carga de 10 Kg, resaltan en este último sujeto, los valores superiores en la potencia máxima (780 w contra 469 w), potencia media (681 w contra 392 w), trabajo total (9.94 KJ contra 5.86 KJ), revoluciones máximas (144 RPM contra 88 RPM) y menores en la velocidad de disminución de la potencia (-16 w/s contra -15 w/s) e índice de fatiga (22.4% contra 30.3%), así como un desplazamiento hacia arriba de la relación frecuencia de pedaleo-carga (Figura 5). Por tanto, el método califica adecuadamente el desempeño anaeróbico de los sujetos.

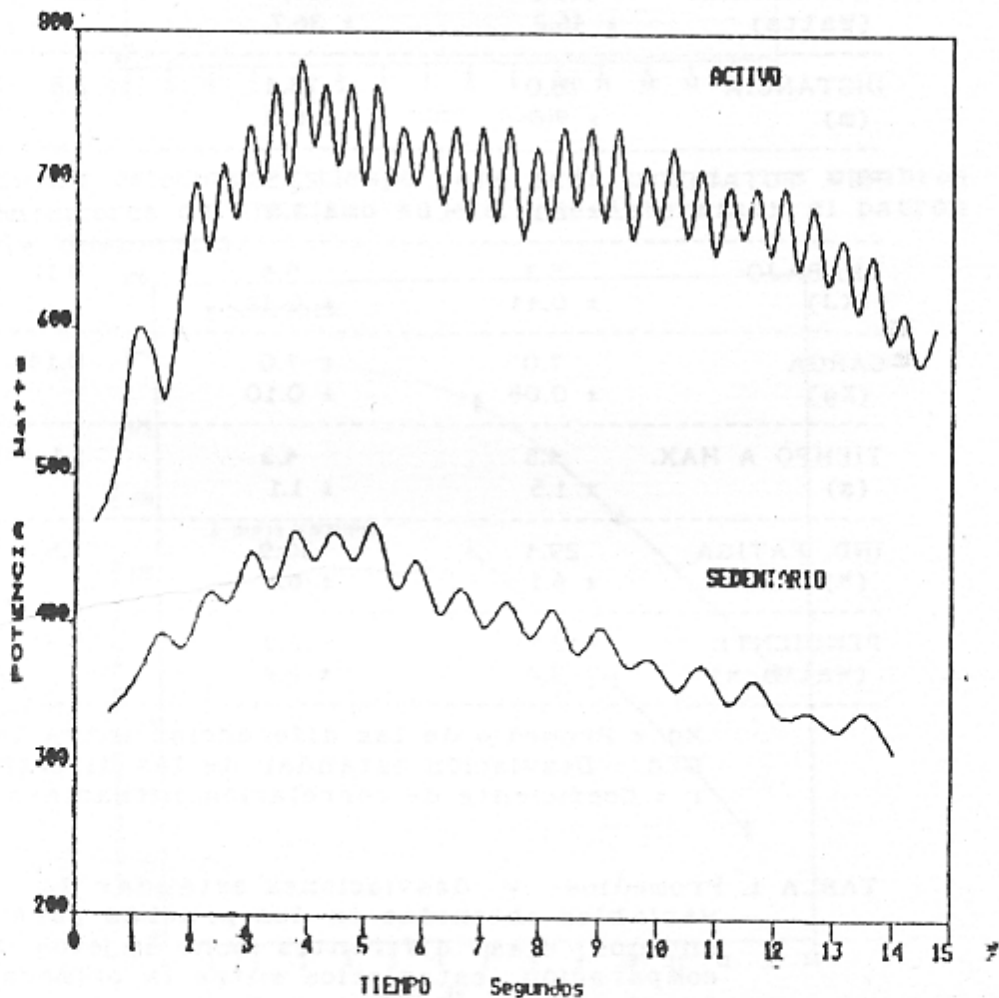


FIGURA 6. Relación potencia-tiempo obtenida en un sujeto activo y en otro sedentario, a una carga de 10 Kg.

Las modificaciones que se hicieron al ergómetro de carga constante ideado por Williams y Cols. no van en detrimento del método, en cambio tienen la ventaja de hacer su fabricación asequible en nuestro medio, donde tanta falta hacen investigaciones sobre el desempeño anaeróbico.

La aplicación del ergómetro de carga constante en la caracterización de la relación potencia-carga y determinación del patrón de dominancia de los miembros inferiores, resultados no reportados en la literatura, hacen que este procedimiento sea comparable en versatilidad al ergómetro isoquinético, sin sus desventajas.

La principal limitación en el estudio de los movimientos humanos a carga constante, es la debida a la complejidad de las propiedades del sistema de palancas de las extremidades inferiores; así, provocan que la velocidad de pedaleo varíe a través del rango del movimiento, hacen que la velocidad máxima se sostenga solo por breves instantes en cada ciclo y consecuentemente, la potencia de una contracción isotónica es máxima solo en ese breve tiempo.

En conclusión, el ergómetro aquí descrito posee las siguientes características sobresalientes, que hacen de él un instrumento adecuado en el estudio del desempeño anaeróbico de los sujetos, mediante la aplicación de los conceptos clásicos de la función muscular:

- a) fácil construcción a partir de un ergómetro mecánico;
- b) la carga puede ser mantenida a cualquier nivel preseleccionado;
- c) la potencia máxima se puede lograr en 5 segundos, antes que la depleción de sustratos metabólicos musculares limite el desempeño de los mismos;
- d) posibilita la determinación del patrón de dominancia;
- e) la información que brinda es reproducible.

Agradecemos al M. en C. Joaquín Azpiroz el habernos facilitado el convertidor analógico digital utilizado en el presente trabajo.

BIBLIOGRAFIA.

1. Bar-Or, O., R. Dotan, O. Inbar, A. Rothstein, J. Harlsson, P. Tesh.  
Anaerobic capacity and fiber distribution in man.  
Int. J. Sports Med. 1: 82-85, 1978.
  2. Di Prampero, P.  
Energetics of muscular exercise  
Rev. Physiol Biochem Pharmacol. 89 : 143-222, 1981.
  3. Dovelm, W.  
A simple bicycle ergometer.  
J. Appl. Physiol. 7 : 222-224, 1954.
  4. Margaria, R., P. Aghemo, E. Rovelli.  
Measurement of muscular power (anaerobic) in man.  
J. Appl. Physiol. 21: 1666-1669, 1966.
  5. Margaria, R.  
Biomechanics and energetics of muscular exercise.  
Clarendon Press, Oxford, 1976.
  6. McCartney, N., G. Heingenhauser, A. Sargeant, N. Jones.  
A constant-velocity cycle ergometer for study of dynamic  
muscle function.  
J. Appl. Physiol. 55 : 212 - 217, 1983.
  7. McCartney, N., J. Heingenfauser, N. Jones.  
Power out and fatigue of human muscle in maximal cycling  
exercise.  
J. Appl. Physiol. 55 : 218-224, 1983.
  8. Sargeant, A., E. Hoinville, A. Young.  
Maximum leg force and power output during short term dynamic  
exercise.  
J. Appl. Physiol. 51 : 1175-1182, 1981.
  9. Williams, J., B. William, F. Signorile.  
A constant-load ergometer for measuring peak power output and  
fatigue.  
J. Appl. Physiol. 65 : 2343-2348, 1988.
-