



## Bioenergética - Fuentes de energía para el trabajo muscular

Ruth Gallo de Cardona\*

### PRIMERA PARTE

¿De donde proviene la energía que el ser humano requiere para la realización de un trabajo muscular? Esto es importante saberlo ya que el hombre requiere de esa energía porque es un ser que ha sido creado para el movimiento.

En nuestro sistema solar existe un ciclo energético, el cual toda la energía tiene su origen en el sol (energía solar, resultado de la energía nuclear). Esta alcanza la tierra como energía solar o luminosa a través de los rayos del sol. Las plantas reciben esta energía y la guardan como energía química, utilizada por ellas en la construcción de moléculas tales como: glucosa, celulosa, proteínas y lípidos, a partir de un proceso denominado **Fotosíntesis** ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{E}^{\text{luminosa}} \rightarrow \text{O}_2 + \text{Sustancias orgánicas}$ ).

La energía solar es fijada en los vegetales a través de un átomo llamado ión Hidrógeno que es el que carga los electrones ricos en energía. Nosotros no somos capaces de hacer esto en nuestro organismo y por ello necesitamos alimentarnos de plantas y otros animales. Dependemos entonces directamente de las plantas e indirectamente del sol para nuestro suministro de energía.

Los alimentos que consumimos traen en el ión  $\text{H}^+$  cargados de los electrones con esa potencialidad de energía solar. Después de un proceso de ingestión, digestión y asimilación, los nutrientes existentes en los alimentos son metabolizados en presencia de  $\text{O}_2$  y son catabolizados hasta  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (Energía). su propósito es proporcionar energía pa-

ra que ocurran los procesos biológicos, entre ellos la contracción muscular necesaria para la realización de la actividad física o trabajo muscular.

¿Para qué usamos la energía?

La mayor parte de nuestra energía se emplea: **En el funcionamiento normal de los órganos del cuerpo**, de ella depende desde el movimiento del corazón al bombear la sangre, hasta el trabajo realizado por el hígado al metabolizar los nutrientes. **Mantenimiento de la Temperatura Corporal**, normalmente el calor desprendido para mantener el organismo en funcionamiento y para realizar el trabajo muscular es suficiente; pero, si la temperatura exterior baja, entonces se necesita energía adicional. **Crecimiento**, los distintos procesos de formación de nuevos tejidos requieren también energía. **Trabajo Muscular**, la energía obtenida de los alimentos nos permite andar, correr, trabajar, etc. Sabemos ahora de donde proviene la energía y para que la usamos en nuestro organismo. El propósito de esta Revisión es entender como la energía es usada para producir trabajo mecánico.

La energía liberada durante el desdoblamiento de los alimentos no es directamente utilizada en trabajo y sí empleada en la elaboración de otro componente químico, la adenosina trifosfato (ATP), la cual es almacenada en las células musculares, solamente a través de la energía liberada por el desdoblamiento.

\*Lic. Nutrición, Ms Fisiología  
Esp. Ciencias del Deporte  
Prof. I, U.E.F.A. U. de A.

miento de ATP, las diferentes células son capaces de realizar su trabajo específico.

### Fuentes de la energía para el Trabajo Muscular

El músculo puede ser considerado como una máquina y como tal obtiene fundamentalmente su energía quemando combustible. Su rendimiento o capacidad de trabajo depende de la naturaleza o disponibilidad de la fuente de energía.

La máquina muscular es muy compleja, emplea combustibles diferentes y algunos de ellos los regenera ella misma. Por esto la evaluación de los factores implicados en el funcionamiento muscular no es sencilla. Para ello se requiere un análisis cuantitativo detallado de cada una de las fuentes de energía, su actuación y acoplamiento.

Gracias a las investigaciones llevadas a cabo en los últimos años, se ha llegado a conseguir un cuadro bastante complejo sobre el mecanismo de las fuentes de energía muscular y ha sido posible proponer métodos para emplear los músculos con mayor eficiencia.

La fuente directa de energía para la actividad muscular es el ATP (Trifosfato de adenosina), compuesto caracterizado por sus enlaces ricos en energía, la liberación de la energía cuando el ATP se desdobra en ADP + p es lo que hace posible las contracciones musculares.

La reserva de ATP asciende a aproximadamente 5 mMol/kg de peso de músculo y tiene un contenido energético, con el cual durante una carga máxima, solamente se puede efectuar trabajo durante 1 a 2 segundos, por esto es indispensable la resíntesis del ATP.

En el músculo se encuentra otro fosfágeno de alta energía la fosfocreatina o CP, ésta reacciona con el ADP para generar ATP ( $CP + ADP \rightarrow ATP + C$ ), esta CP también

se encuentra en poca cantidad en el músculo, aproximadamente 15 mMol/kg. de peso, en menor cantidad se encuentra en el miocardio y el cerebro. La transferencia del residuo de fosfato de la CP al ADP se realiza rápidamente, debido a esto también se le llama a la CP "Reserva instantánea de energía", la cantidad es suficiente para realizar una carga máxima de trabajo de aproximadamente 8 a 10 segundos, por esto también necesita ser resintetizado.

Existen dos fuentes primarias de energía para la resíntesis de los fosfágenos:

1. La Glucólisis (anaeróbica): Glucógeno  $\rightarrow$  ácido pirúvico  $\rightarrow$  ácido láctico.
2. Combustión u oxidación de los alimentos, medida por el consumo de  $O_2$ .

El sistema en definitiva, consiste en cinco reacciones: tres (3) liberan energía: Hidrólisis de fosfágenos, oxidación de alimentos y glucólisis y las otras dos absorben energía: Resíntesis de fosfágeno y resíntesis de glucógeno (Figura 1)

La desintegración de la glucosa y del glucógeno por la vía anaeróbica hasta ácido láctico, también tiene una velocidad de transferencia muy alta. Aquí se resintetiza por cada mol de glucosa 2 moles de ATP y por cada mol de glucógeno 3 moles de ATP. La capacidad de este sistema energético está limitado por la máxima concentración de ácido láctico y la acidosis asociada que se puede tolerar.

Por lo tanto la fuente principal para la producción de energía es la combustión y oxidación de los alimentos, esta oxidación ocurre mediante una completa serie de reacciones químicas ya vistas anteriormente en las mitocondrias de las células, en donde sus nutrientes principales se transforman a través del ciclo de Krebs o ácido tricarbóxico en  $CO_2 - H_2O$  y energía. Esta energía producida por medio de la oxidación de los alimentos es

## FUENTES DE ENERGIA MUSCULAR



Fig. 1 Fuentes de energía muscular.

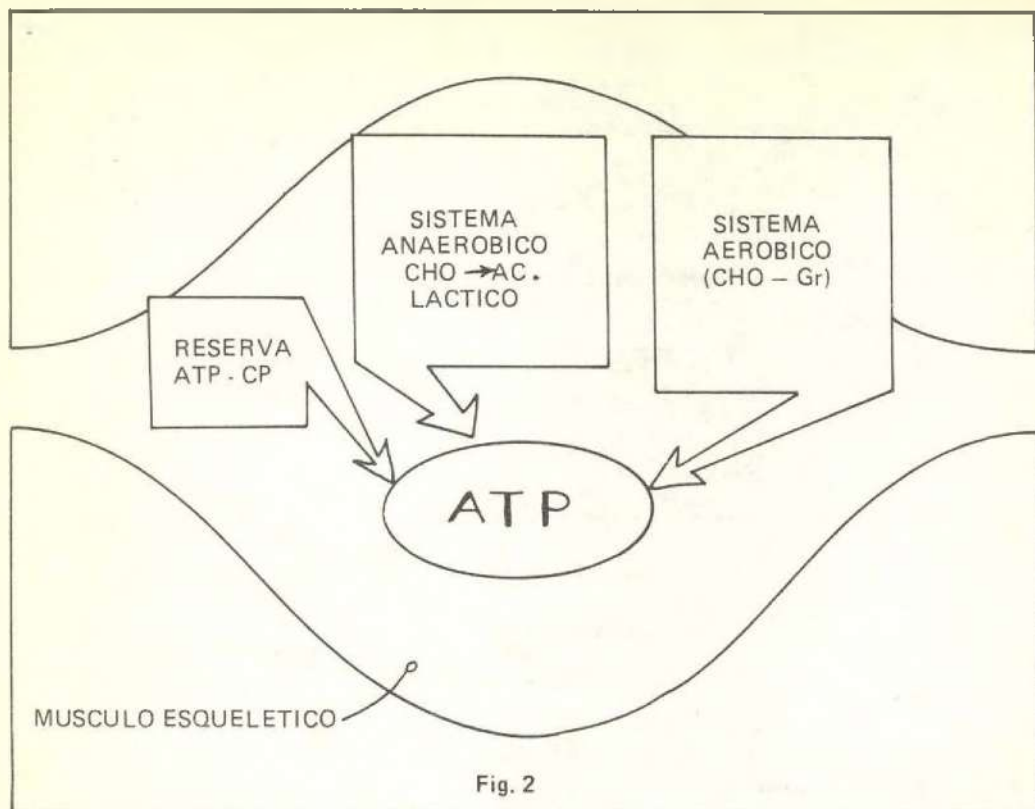
utilizada para efectuar trabajo, externo, en energía almacenada (ATP) y calor.

De los diferentes nutrientes existentes en los alimentos que consumimos, solamente los carbohidratos, grasas y proteínas pueden producir energía para el trabajo muscular. Estos tres combustibles no participan de igual manera en los procesos energéticos dentro de la célula muscular. Se ha observado en varias investigaciones que la excreción de Nitrógeno no aumenta mucho durante el trabajo muscular en individuos bien alimentados, esto nos demuestra que las proteínas no son utilizadas en grado apreciable como combustible por la célula muscular. Por lo tanto, solamente cuando un individuo está desnutrido o en ayuno es que las proteínas pueden ser utilizadas como fuente de energía. De acuerdo con estos hechos se torna claro que la escogencia de combustible para el músculo que trabaja está limitada a los carbohidratos (CHO) y grasas.

Con base a lo anterior, podemos observar que la producción de energía en nuestro organismo se obtiene por medio de la utilización de 3 motores o sistemas principales y de 2 combustibles esenciales: CHO y Grasas. (Fig. 2)

El primer motor denominado el motor de los fosfágenos (ATP-CP) o sistema anaeróbico aláctico, caracterizado por alta potencia y actúa durante corto tiempo (20 seg), debido a que las cantidades de fosfágenos son pequeñas y limitadas en nuestro organismo.

El segundo motor denominado sistema del ácido láctico o anaeróbico láctico, el combustible es la glucosa que se encuentra almacenada en el hígado y músculo en forma de glucógeno. El producto final es el ácido láctico; cuando éste se acumula en los músculos y sangre y alcanza altos niveles, resulta temporalmente la fatiga muscular. Otra limitante de este sistema es que sólo unas pocas moles de ATP pueden ser resintetizadas



a partir del desdoblamiento de carbohidratos. Como vemos, este motor se cansa rápidamente actuando durante un tiempo aproximado de cuatro (4) minutos.

El tercer motor no para nunca, su tanque de combustible es indefinido (CHO, Grasas), trabaja a baja intensidad y es muy lento. Se denomina sistema aeróbico porque se requiere para su funcionamiento el consumo de  $O_2$  ( $VO_2$ ). Este sistema se lleva a cabo en las mitocondrias de las células, donde se manufacturan aeróbicamente el ATP. Las células musculares son ricas en mitocondrias. Abundante ATP puede ser formado durante el metabolismo aeróbico, sin que se produzca fatiga por los productos formados. El  $CO_2$  de las células pasa a la sangre y es llevado hasta los pulmones donde es exhalado. El  $H_2O$  formado es utilizado por las células mismas, siendo uno de los mayores constituyentes de ellas.

Otra característica de este sistema es la utilización además de los CHO, de las grasas y proteínas en la producción de energía, además de un rendimiento mayor de estos nutrientes, el desdoblamiento completo de 180 gramos de glucógeno hasta  $CO_2 + H_2O +$  energía, produce 39 moles de ATP y de glucosa, 38 moles de ATP. El desdoblamiento de 256 gramos de grasa produce 130 moles de ATP.

La fig. 3 reproduce en forma gráfica la participación porcentual de los sustratos de los diferentes sistemas productores de energía en relación a la duración de la carga de trabajo.

Al iniciarse una carga de trabajo en los primeros segundos (1" a 2"), se agotan los depósitos de ATP, los cuales son llenados nuevamente por el aprovechamiento de las reservas de fosfocreatina, según la intensidad

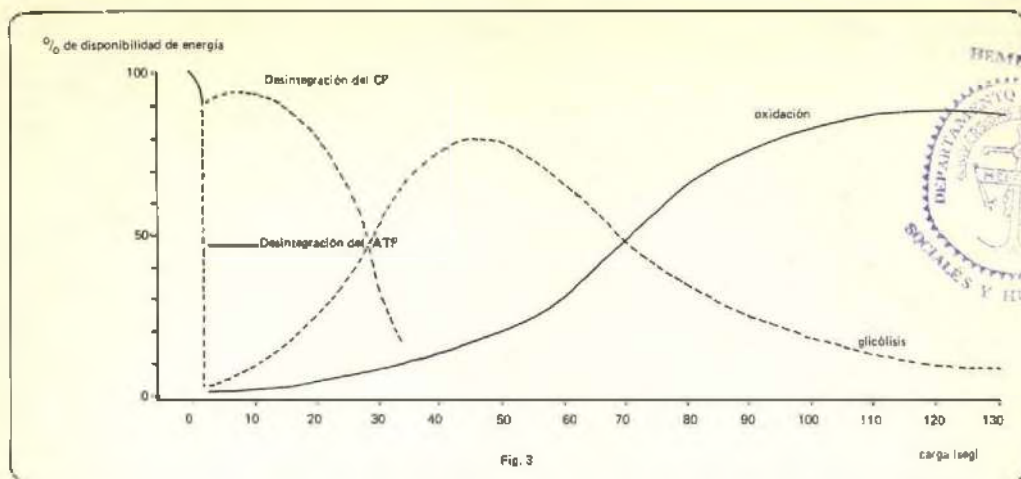


Fig. 3

del trabajo, los fosfágenos solo alcanzan aproximadamente 20 segundos. Ciertamente, al principio de la carga ya son puestas a disposición, energía a través de glucólisis, pero el máximo es alcanzado después de 40 seg. De aquí en adelante aumenta en importancia los procesos oxidativos y se convierte finalmente en la predominante fuente de energía para el trabajo muscular.

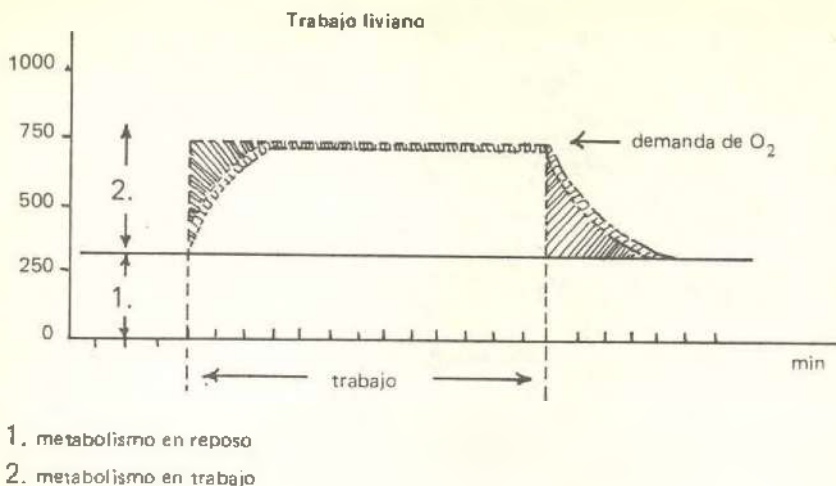
Como observamos todas las transformaciones de energía que en unidad de tiempo no se llevan a cabo por vía oxidativa, se cubren forzosamente por vía anaeróbica. Esto significa que el organismo presenta durante el trabajo un déficit de  $O_2$ , el cual tiene que pagarse al finalizar el trabajo (deuda de  $O_2$ ). La altura del déficit de  $O_2$  depende en primer lugar de la intensidad del trabajo y en segundo lugar de la duración del mismo. A continuación se demostrarán en tres ejemplos típicos, la participación del metabolismo anaeróbico en la transformación total de energía.

Durante un ejercicio ligero el  $O_2$  almacenado en el músculo (mioglobina) más el  $O_2$  que es suministrado a medida en que la respiración y la circulación se adaptan al trabajo, cubrirán completamente las necesidades de  $O_2$  llegando a la fase estable (Steady State). Aquí el déficit de  $O_2$  inicial puede equili-

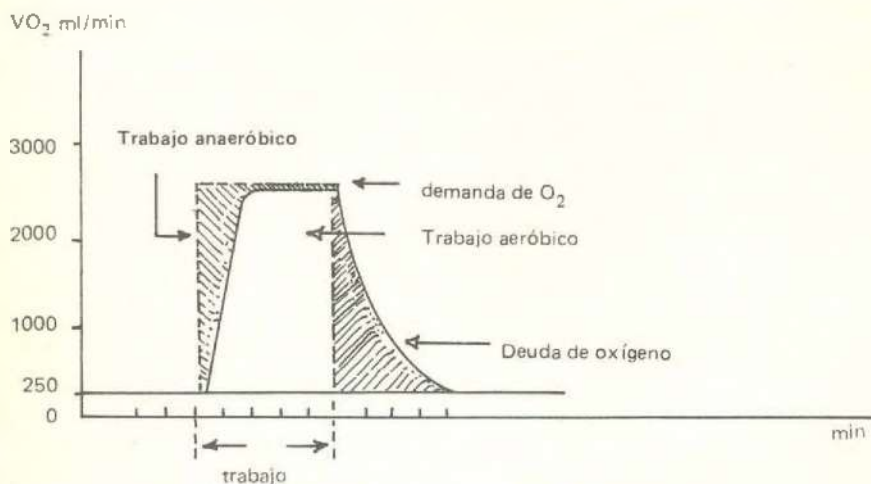
brarse por medio de una simple rebaja de la cantidad de fosfocreatina, no se presenta formación de lactato. Por esto se le denomina fase alactácida del déficit de  $O_2$ . Este déficit que se presentó durante la parte inicial del trabajo se restablece de nuevo después de finalizada la carga por medio de una mayor absorción de  $O_2$ . Durante un trabajo liviano, el déficit de  $O_2$  corresponde casi cuantitativamente a la deuda de  $O_2$  (fig. 4). La mayoría de las actividades diarias normales pertenecen a esta categoría de trabajo.

Durante un ejercicio de intensidad moderada, los procesos anaeróbicos contribuyen para la producción de energía al inicio del ejercicio, hasta que la oxidación aeróbica pueda asumir sus funciones y satisfacer completamente la demanda de energía. La fase alactácida cumple fundamentalmente con la disponibilidad de energía anaeróbica, lo cual se demuestra por el hecho del poco aumento de las concentraciones de lactato, por encima de los valores de reposo. Sin embargo, debido a una mayor intensidad de la carga, se observa aquí el rápido aumento de la absorción de  $O_2$  a un nivel más alto pero llega a la fase estable. (fig. 5).

Durante un ejercicio pesado o de alta intensidad, es tan alta la transformación de energía en la unidad de tiempo que la misma no pue-



**Fig. 4 Consumo de  $O_2$  durante trabajo corporal liviano.**  
(De Mares 1976, pág. 264)



**Fig. 5 Consumo de  $O_2$  durante trabajo corporal medianamente pesado.**  
(De Mares 1976, 264).

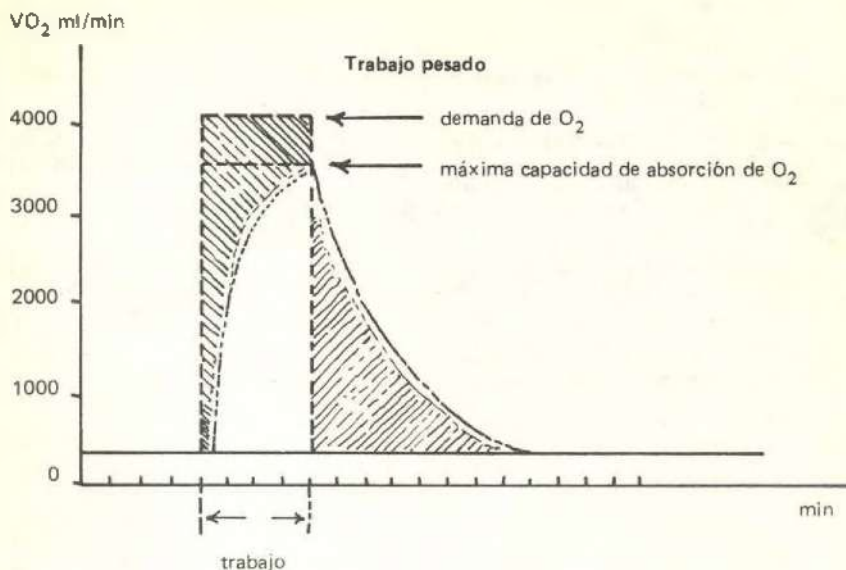


Fig. 6 Consumo de  $O_2$  durante trabajo corporal pesado.  
(De Marees 1976, pág. 264)

de llevarse a efecto solamente por vía aeróbica, ni siquiera después de la fase inicial. La cuota de  $O_2$  queda muy por debajo de la necesaria para una transformación de energía puramente aeróbica. Se observa un déficit de  $O_2$  constantemente mayor y un aumento en el contenido de lactato, por causa de un metabolismo predominante anaeróbico láctico. El rápido aumento de la concentración de lactato conduce finalmente a provocar la fatiga muscular, por lo tanto este tipo de trabajo sólo puede realizarse por unos pocos minutos (fig. 6).

Durante este tipo de trabajo, la deuda de  $O_2$  es mayor que el déficit de  $O_2$  existente durante el trabajo, debido a que no solo debe pagar el déficit aláctico y láctico sino también que después de terminado el trabajo la temperatura del cuerpo está aumentada requiriendo un sobreconsumo de  $O_2$ ; hay elevada producción de adrenalina que conduce a un aumento de energía con el correspondiente sobreconsumo de  $O_2$ . Finalmente, después de terminado el trabajo, se encuentra también aumentados el trabajo cardíaco y respiratorio, lo que a su vez conduce a un mayor consumo de  $O_2$ .

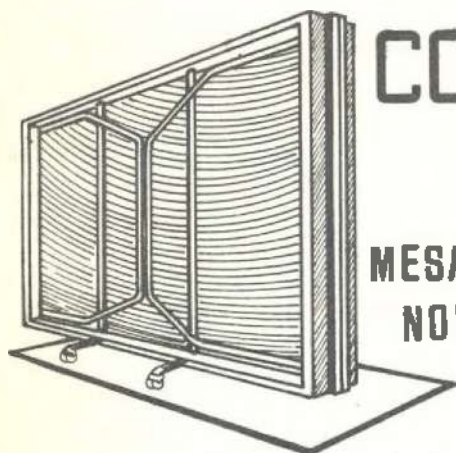
NOTA: En la segunda parte, revisaremos: "Factores que gobiernan la escogencia del combustible para el trabajo muscular."

## Bibliografía

1. ASTRAND, P., B. SALTIN. Oxygen Uptake During the First Minutes of Heavy muscular exercise. *J. Appl. Physiol* 18:6 971 - 976, 1961.
2. ASTRAND, P., K. RODAHL, *Textbook of Work Physiology*. McGraw Hill, New York, 1977.

3. BARAC, M. Conceptos elementales del metabolismo Energético. Folleto de la Facultad de Medicina, Departamento de Fisiología, Universidad del Valle, Cali, 1979.
4. COON, E., P.K. STUMPF. Bioquímica Fundamental. Editorial Limusa, México, 1978.
5. FOX, E. L. Sports Physiology. W.B. Saunders Company, Philadelphia, 1979.
6. GALLO de C. R. Metabolismo Energético, en: RITTEL, H. F. (ed) Sistema Muscular y Deporte, Tomo 3 (Convenio Colombo Alemán de Educación Física y Deporte) Copicentro, Medellín, 1980.
7. GANONG, W.F. Manual de Fisiología Médica, 6a. edición. El Manual Moderno, S. A., México, 1978.
8. GUYTON, A. G. Tratado de Fisiología Médica, 5a. edición, Interamericana, México, 1977.
9. MARGARIA, R. Anaerobic Metabolism in Muscle. Canad. Med. Ass. J. 96, 1967.
10. MARGARIA, R. Fuentes de la Energía Muscular, Folleto, marzo 1972
11. MATHEWS, D.K.; E. L. FOX. Bases Fisiológicas Da Educacao Física e Dos Desportos, 2a. Edicao Interamericana, Rio de Janeiro, 1979
12. MOREHOUSE, L. E., Fisiología del Ejercicio, Editorial de Ateneo. Buenos Aires, 1980.
13. MOUNTCASTLE, V. Medical Physiology, Vol. II, pag. 1202 - 1233, Mosby Company, Saint Louis, 1977.
14. NENSHOLME, E. A. The control of fuel Utilatation by Muscle During Exercise and Starvation. Diabetes, 28 (Supp 1), 1979.
15. PINI, M. O. Fisiología Esportiva, Guanabara Koogan, Río de Janeiro, 1978.
16. WEST, E., W. TOOD, H. MASON, J. VAN BRUGGEN. Bioquímica Médica, 1969.

\* \*



# COMPLEMENTOS

*Capri*

MESAS DE PING PONG PLEGABLES  
NOVEDOSAS Y FUNCIONALES

Porterías para fútbol y microfútbol

Soportes para baloncesto, fijas y móviles

Medidas reglamentarias

Calle 38 Sur No.46 35-Tel:76 20 26-Envigado