

Article

Rendimiento a Cadencias de Pedaleo Elevadas en Ciclistas Altamente Entrenados

Ricardo Mora-Rodriguez y Roberto Aguado-Jimenez

Universidad de Castilla-La Mancha, Exercise Physiology Laboratory, Toledo, España

RESUMEN

Objetivo: Este estudio fue realizado para determinar el efecto de cadencias de pedaleo elevadas sobre la producción de potencia máxima en ciclismo (W_{max}). **Métodos:** Nueve ciclistas altamente entrenados realizaron un test incremental continuo hasta el agotamiento en bicicleta ergométrica (con incrementos de 25 W cada 3 min) a 80, 100 o 120 rpm en tres ocasiones diferentes. **Resultados:** La W_{max} fue aproximadamente 9% más baja en el test con cadencia de 120 rpm comparado con los tests a 80 y 100 rpm (335 ± 9 , 363 ± 7 , y 370 ± 12 W, respectivamente; $P < 0,05$). En la cadencia de 120 rpm, la tasa ventilatoria (V_E) aumentó por encima del incremento en el CO_2 expirado, lo que redujo un 11% la producción de potencia (PO) en el umbral ventilatorio anaeróbico (VT_2) ($P < 0,05$). La eficiencia bruta (GE) no fue diferente entre las pruebas. A 120 rpm, la concentración de lactato en sangre capilar ([Lac]) aumentó por encima de lo observado en el test a 80 rpm ($5,3\pm 1,2$ versus $3,0\pm 0,7$ mM a 300 W; $P < 0,05$), aunque el pH no disminuyó. A 120 rpm, el CO_2 expirado aumentó y la concentración de bicarbonato en sangre ($[HCO_3^-]$) disminuyó, manteniendo el pH sanguíneo en un valor similar al de las otras pruebas. **Conclusión:** Una cadencia de pedaleo alta (es decir, 120 rpm) redujo el rendimiento (i.e. W_{max}) y el umbral anaeróbico durante un test incremental en ciclistas altamente entrenados. Los datos sugieren que el umbral ventilatorio anaeróbico (VT_2) es un estimador sensible de la cadencia de pedaleo óptima para el rendimiento, mientras que el pH sanguíneo o la eficacia no lo son.

Palabras Clave: Producción de potencia máxima, umbral ventilatorio anaeróbico, PH de la sangre capilar, producción de potencia, eficiencia gruesa, umbral anaeróbico

INTRODUCCION

No está claro si la cadencia de pedaleo es un factor importante para el rendimiento en ciclismo de ruta. Un rango de cadencias puede observarse en ciclistas con rendimiento similar durante cualquier etapa particular de una comp_{ER}encia de ciclismo (es decir, 80-99 rpm para etapas en llano; 62-80 rpm para ascensos a montañas altas (19)), lo que podría interpretarse como que la cadencia tendría un papel secundario en el rendimiento. Influenciada por la cadencia de pedaleo alta adoptada por el ganador por siete veces del Tour de Francia, Lance Armstrong, entre los ciclistas entrenados se observa una tendencia hacia una mayor cadencia (18), sin que esta práctica tenga apoyo científico. Desde el punto de vista del costo metabólico, varias investigaciones han confirmado la investigación original de Coast y Welch (6) que sugirieron que en los ciclistas altamente entrenados podría ser aconsejable aumentar la cadencia de pedaleo (por lo menos a 80 rpm) cuando la producción de potencia (PO) se incrementa a los niveles necesarios para subir pendientes (300-375 W) (13,18). Sin embargo cuando los ciclistas profesionales enfrentan una elevada demanda de PO (ascensos a pendientes), disminuyen

su cadencia de pedaleo por debajo de 80 rpm (19). Con la información disponible, algunos ciclistas se preguntan si deberían aumentar su cadencia de pedaleo habitual para mejorar el rendimiento y en qué terreno.

La mayor eficiencia ha sido considerada una adaptación importante al entrenamiento de resistencia vinculada con el rendimiento de ciclismo (15, 20) y correlacionada con el porcentaje de fibras tipo I y los años de $comp_{ET}$ en ciclismo (7). En contraste, otros autores han observado que la eficiencia no difiere cuando se comparan ciclistas de $comp_{ET}$ y ciclistas recreativos (22, 23), a pesar de la gran diferencia en el rendimiento entre estos grupos. La eficiencia está muy influenciada por la cadencia de pedaleo y la producción de potencia (PO). En la producción de potencia (PO) a la cual pedalean los ciclistas de $comp_{ET}$ ($>70\% VO_{2max}$), la eficiencia bruta (GE) es similar a 100 rpm y a 60-80 rpm (24), y el delta de eficiencia (DE) a 100 rpm es mayor que a cadencias más bajas (24), aunque este hallazgo no carece de controversia (8,16). Un valor más alto de delta de eficiencia (DE) indica menos energía gastada para un aumento dado en PO, lo que sugiere que pedalear a 100 rpm podría beneficiar el rendimiento durante un test incremental continuo hasta el agotamiento.

Las mediciones de eficiencia en ciclismo se basan en la valoración del gasto de energía aeróbico del cuerpo entero, el cual incluye la energía gastada por las piernas para superar la resistencia en los pedales (trabajo mecánico externo), el oxígeno consumido por otros tejidos (respiratorio, cardíaco y músculos posturales) y el costo del trabajo interno (29). El costo de pedalear sin carga (índice de trabajo interno) se incrementa de manera curvilínea al aumentar la cadencia de pedaleo (14) debido al costo de activar y relajar las fibras musculares (3) y al esfuerzo por superar la inercia del desplazamiento vertical de las piernas (25). A medida que se incrementa la demanda de energía con el aumento en PO, el trabajo interno representa un menor porcentaje del gasto de energía total, lo que podría explicar la convergencia de eficiencias a PO altas entre diferentes cadencias (24). Debido a la contribución desconocida del trabajo interno en la eficiencia, no está claro si los cálculos de eficiencia son válidos cuando la cadencia es la variable en estudio.

El umbral anaeróbico (determinado por la relación entre PO y la tasa de ventilación o la acumulación de lactato en sangre) es un índice del desarrollo de acidosis muscular, que se correlaciona con el rendimiento de ciclismo (21). Los aumentos en la cadencia de pedaleo aumentan la acumulación de lactato en sangre en ciclistas desentrenados (16) y altamente entrenados (8). Así, los aumentos en la cadencia de pedaleo muy por encima de las tasas usuales podrían reducir la PO en el umbral del lactato y finalmente podrían afectar el rendimiento. El conocimiento de los efectos de la cadencia en el umbral anaeróbico es importante porque las determinaciones del umbral anaeróbico se usan rutinariamente en las pruebas de laboratorio en ciclistas, sin que se realice siempre un control preciso de la cadencia de pedaleo.

En nuestro estudio, investigamos si las cadencias de pedaleo en un intervalo de 80 a 120 rpm afectan la PO final durante un test incremental continuo. También investigamos si la cadencia de pedaleo afecta el umbral anaeróbico y si esto podría ser responsable de las diferencias en el rendimiento.

MÉTODOS

Sujetos

En este estudio participaron nueve ciclistas de ruta $comp_{ET}$ ivos, altamente entrenados. Los valores medios (\pm SD) de los sujetos para edad, talla y peso fueron $26,7\pm 7$ años, $180,5\pm 6$ centímetros y $73,6\pm 7$ kg y los valores máximos para frecuencia cardíaca y VO_2 fueron 183 ± 7 lat min^{-1} y $4,7\pm 0,4$ LO_2 min^{-1} , respectivamente. Todos los sujetos habían participado en carreras nacionales de la federación Española de Ciclistas amateur durante por lo menos 3 años previos al estudio. Cada participante dio su consentimiento informado por escrito y el comité de ética institucional local aprobó el estudio. Un examen físico previo (que incluía un electrocardiograma (ECG)) aseguró que todos los participantes gozaban de buena salud.

Pruebas preliminares

Después de una entrada en calor de 10 min (140 W), comenzó la evaluación del VO_{2max} a 225 W y la PO aumentó 25 W min^{-1} hasta que se produjera alguna de las siguientes condiciones: (a) interrupción voluntaria, (b) la cadencia de pedaleo no podía ser mantenida por encima de 70 rpm, o (c) cuando el criterio establecido para VO_{2max} alcanzara las recomendaciones del Colegio Americano de Medicina del Deporte (ACSM) (1). Se permitió que los sujetos eligieran su cadencia de pedaleo preferida.

Protocolo Experimental

Cada sujeto realizó, en orden aleatorio, tres tests incrementales continuos hasta el agotamiento, cada uno a una cadencia de pedaleo diferente (80, 100 o 120 rpm). Después de una entrada en calor de 4 min (25 W), la producción de potencia se fijó en 175 W y a partir de allí aumentó 25 W cada 3 min hasta la fatiga (incapacidad para mantener la cadencia en un valor ± 5 rpm del valor fijado). Las pruebas estuvieron separadas por lo menos por 24 hr y fueron realizadas en el mismo momento del día en condiciones ambientales similares (25-26°C, humedad relativa de 30-40 %). Para la evaluación, se utilizó una bicicleta ergométrica con freno eléctrico (Ergo-metrics 900, Ergoline GmbH, Alemania) que controla la producción de potencia de manera independiente de la cadencia. Antes de las pruebas, se calibró la unidad de medición del torque siguiendo los procedimientos establecidos por el fabricante. Se solicitó a los sujetos que mantuvieran la cadencia designada y para esto recibieron retroalimentación visual del tablero fijado en el frente. Se fijó la altura del sillín y la distancia del manubrio para reproducir la posición de pedaleo habitual de cada sujeto. Durante el test, los antebrazos de los ciclistas descansaron sobre los manubrios para triatletas para minimizar la contribución del tren superior del cuerpo con el gasto de energía. La frecuencia cardíaca (HR, lat min⁻¹) fue registrada de manera continua (Acurex, Polar, Kempele, Finlandia) y el gas expirado fue analizado mediante un sistema de respiración por respiración automatizado (Quark b2, Cosmed, Italia) para determinar el VO₂, VCO₂, V_E, equivalente ventilatorio para dióxido de carbono (V_E/VCO₂) y presión parcial tidal para el dióxido de carbono (P_{ET}CO₂). Los analizadores de O₂ y de CO₂ fueron calibrados antes de cada prueba con gases de referencia (Carburos Metálicos, Madrid, España, 0,01 % de exactitud) y el flujómetro fue calibrado con una jeringa de 3L (Cosmed). En cada test, se calculó la producción de potencia máxima (W_{max}) de la siguiente manera (17):

$$W_{\max} = W_f + [(t/180 \times 25)] \quad [1]$$

Donde W_f es el valor de la carga de trabajo final completada (W), t es el tiempo soportado en la última etapa incompleta, 180 es la duración de cada etapa (s) y 25 es la diferencia de producción de potencia entre las etapas (W). La producción de potencia que corresponde a VT₂ (también conocido como el punto de compensación respiratoria; RCP) fue identificado por dos investigadores independientes como la producción de potencia en la cual se observó un aumento claro en VE/VCO₂ y una disminución simultánea en P_{ET}CO₂ (9). Cuando la identificación de VT₂ tuviera una diferencia superior al 10 %, se buscó la ayuda de una tercera persona. La tasa de gasto de energía se calculó a partir del VO₂ y VCO₂ (5). El GE se calculó como la relación entre tasa de trabajo y tasa de gasto de energía expresado como porcentaje:

$$GE (\%) = (\text{tasa de trabajo [W]}/\text{energía gastada [W]}) \quad [2]$$

Para aclarar, sólo se presenta el GE a 275 W (GE₂₇₅) que es la PO común más alta completada por todos los sujetos en las tres pruebas sin que el valor de RER exceda 1,00. El delta de eficiencia (DE) se calculó como el recíproco de la pendiente de la relación lineal de PO con la tasa de gasto de energía (es decir, 7 puntos de 125 a 275 W).

La sangre capilar arterial (125 µL) se obtuvo a partir de las yemas de los dedos tibios con un microtubo heparinizado (CriGel Li-He, Radiómetro, Copenhague, Dinamarca) en reposo, después de la entrada en calor y dentro de los últimos 40s de cada etapa. La sangre se introdujo inmediatamente en un analizador automático de gases en sangre (ABL 520, Radiómetro) para determinar el pH y la presión parcial de CO₂ (PcapCO₂), mientras que la concentración de bicarbonato en sangre [HCO₃⁻] se calculó a partir de la relación Henderson-Hasselbalch. El lactato sanguíneo se midió en lo que quedaba de la muestra (40 µL) usando un analizador electroenzimático (YSI 1500, Yellow Spring Instruments, Yellow Spring, OH). El umbral del lactato (LT) se determinó examinando la relación [Lac]: producción de potencia según la metodología descrita por Weltman et al. (28). Este método define la PO que corresponde al LT como la mayor PO que no se asoció con un aumento en la concentración de lactato por encima del valor obtenido al inicio. Se requirió un aumento de por lo menos 0,5 mM de lactato sanguíneo para la valoración de LT.

Análisis Estadísticos

Los datos de 25 a 300 W (última etapa completada por los sujetos en todas las pruebas) fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA de medidas repetidas de dos vías (es decir, PO x cadencia). Los datos de producción de potencia en VT₂, LT y agotamiento (i.e, W_{max}) fueron analizados mediante un ANOVA de una vía (cadencia). Para identificar en donde se originaban las diferencias significativas entre las medias se utilizó el test post hoc de Tuckey en aquellos casos en que se obtuvieran valores de F significativos y después de efectuar la corrección de Greis-Hauss para el supuesto de esfericidad. El nivel de significancia se fijó en P<0,05. Los resultados se expresan en forma de media \pm error estándar de la media (SEM).

RESULTADOS

W_{max} y Eficacia

La cadencia elegida libremente durante el test preliminar de VO_{2max} ($89 \pm 1,4$ rpm) no fue estadísticamente diferente de 80 y 100 rpm, pero fue 34 % inferior a 120 rpm ($P < 0,05$). La PO máxima alcanzada antes del agotamiento (W_{max}) durante el test de ciclismo incremental fue similar en las pruebas a 80 y 100 rpm. Sin embargo durante la prueba a 120 rpm, la W_{max} se redujo aproximadamente 9% debido al agotamiento ($P < 0,05$; Figura 1). GE_{275} no fue diferente entre las pruebas ($21,6 \pm 0,4$, $21,2 \pm 0,6$, y $20,4 \pm 0,4$ % para 80, 100, y 120 rpm, respectivamente), y DE se aumentó en la prueba con 120 rpm ($29,4 \pm 1,3$ %) en comparación con 80 y 100 rpm ($25,0 \pm 1,1$ y $26,4 \pm 1,3$ %, respectivamente; $P < 0,05$).

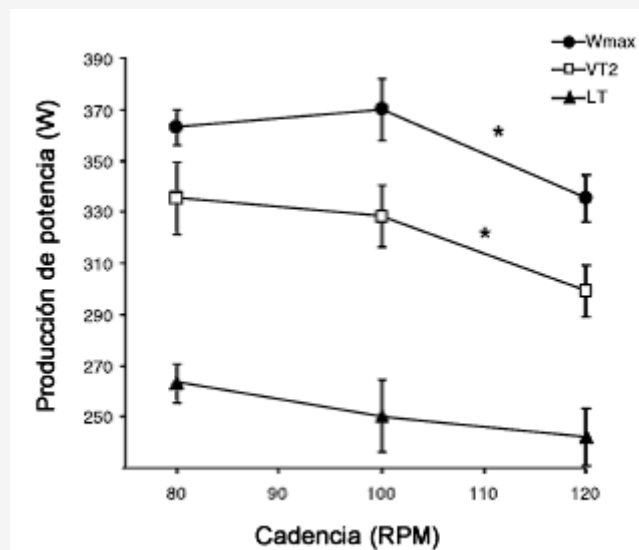


Figura 1. Producción de potencia alcanzada en el punto de agotamiento (W_{max}), en el umbral ventilatorio anaeróbico (VT_2) y en el umbral de lactato sanguíneo (LT) durante el test de ciclismo incremental continuo. Los datos se expresan en forma de Media \pm SEM (error estándar de la media) ($n=9$). * Diferencia entre las cadencias ($P < 0,05$).

Umrales Anaeróbicos Ventilatorio y de Lactato

La tasa ventilatoria (V_E) en la prueba con 120 rpm fue $10-20$ L min^{-1} más alta que durante las pruebas a 80 y 100 rpm en todas las etapas ($P < 0,05$). El aumento significativo en la ventilación en la prueba a 120 rpm fue provocado por una frecuencia respiratoria más alta ($P < 0,05$) porque el volumen tidal fue similar en las tres pruebas. El VCO_2 también aumentó durante la prueba con 120 rpm por encima del valor en las otras pruebas pero en menor grado que V_E . Así, durante la prueba con 120 rpm el VT_2 (PO en el umbral ventilatorio anaeróbico) disminuyó 11% con respecto al test realizado con 80 rpm (335 ± 14 y 328 ± 12 W versus 299 ± 10 W para 80, 100 y 120 rpm, respectivamente; $P < 0,05$). Al comparar la prueba con 120 rpm y la prueba con 80 rpm, se observó una reducción porcentual similar (8 %) en LT pero la diferencia no llegó a ser estadísticamente significativa (263 ± 8 , 242 ± 11 , y 242 ± 11 W, para 80, 100 y 120 rpm, respectivamente).

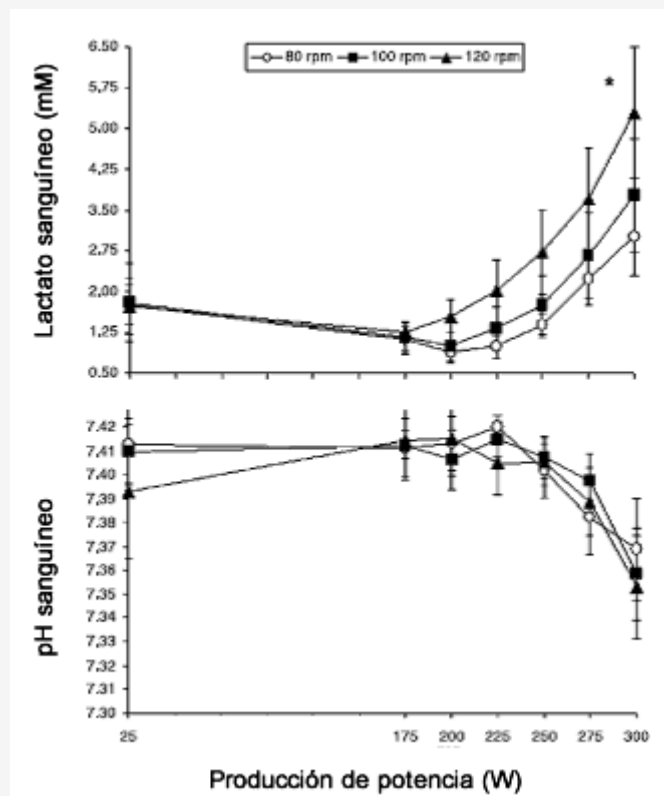


Figura 2. Concentración de lactato ([Lac]) y pH de la sangre arterial durante el test de ciclismo incremental continuo. Los datos se expresan en forma de Media \pm SEM (error estándar de la media) (N = 9). * Se observan diferencias significativas entre el test a 120 rpm y el test a 80 rpm ($P < 0,05$).

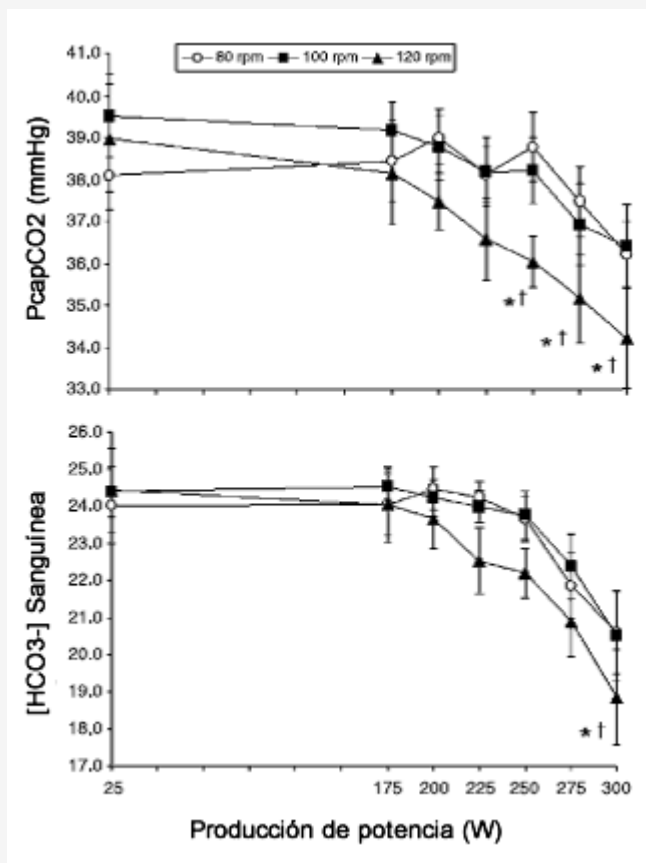


Figura 3. Valores de $[HCO_3^-]$ y $P_{cap}CO_2$ en la sangre arterial durante el test de ciclismo incremental continuo. Los datos se expresan en forma de Media \pm SEM (N = 9). * Se observaron diferencias entre la cadencia a 120 rpm y 80 rpm; † 120 rpm presenta diferencias significativas con 100 rpm ($P < 0,05$).

Equilibrio Ácido-Base en Sangre

El pH disminuyó de manera similar en todas las pruebas, con los incrementos en PO (de $7,41 \pm 0,02$ después de la entrada en calor a $7,36 \pm 0,02$ después de los 300 W). La prueba con 120 rpm arrojó valores de $P_{cap}CO_2$ y $[HCO_3^-]$ inferiores a los de las pruebas a 80 y 100 rpm ($P < 0,05$; Figura 3). Además, a 300 W, la $[Lac]$ en la sangre arterial durante el test con 120 rpm fue significativamente mayor que el valor obtenido con el test con 80 rpm ($5,3 \pm 1,2$ mM versus $3,0 \pm 0,7$ mM, respectivamente; $P < 0,05$), pero no significativamente superior que en el test con 100 rpm ($3,8 \pm 1,0$ mM; Figura 2).

DISCUSIÓN

El hallazgo principal de este estudio fue que una cadencia pedaleo de 120 rpm ($34 \pm 1,4$ % mayor que la cadencia habitual de los ciclistas) redujo significativamente la producción de potencia máxima (W_{max}) que los ciclistas altamente entrenados pueden alcanzar durante un test incremental continuo. Sin embargo cadencias de pedaleo que difieren 11% de sus cadencias habituales (ya sea 80 o 100rpm), no comprometen el rendimiento. El pedaleo a 120 rpm redujo el rendimiento y al mismo tiempo disminuyó el umbral ventilatorio anaeróbico (VT_2). La asociación entre VT_2 y W_{max} fue alta ($R = 0,93$; $P < 0,05$), lo que sugiere que, en ciclistas entrenados, el umbral ventilatorio (VT_2) es un estimador conveniente de los efectos de la cadencia sobre el rendimiento.

Recientemente se ha informado que cuando los ciclistas profesionales pedalean a 366 ± 37 W (75 % de VO_{2max}) la concentración de lactato es más alta al pedalear a 60 rpm que a 80 o 100 rpm (18). Lucía et al (18) plantearon la hipótesis que la PO alta durante el pedaleo a 60 rpm produce un mayor reclutamiento de fibras de tipo II, y por lo tanto una mayor producción de ácido láctico. Esta sugerencia se basa en los datos de Ahlquist et al. (2) donde el agotamiento de glucógeno (índice de glucógenolisis y la producción de ácido láctico) aumentó cuando la cadencia de pedaleo disminuyó de 90 a 50

rpm en sujetos no entrenados. Nuestros datos amplían estos resultados, sugiriendo que no sólo en cadencias bajas (60 rpm) si no que también en cadencias altas (120 rpm) se puede estimular la glucógenolisis. La [Lac] observada a 300 W durante la prueba con 120 rpm apoya esta idea. Una explicación para la mayor acumulación de [Lac] podría ser que, a 120 rpm, la mayor velocidad de acortamiento podría producir un mayor reclutamiento de fibras de contracción rápida (11).

La fatiga prematura durante la prueba con 120 rpm podría ser inducida por una mayor velocidad de producción de ácido láctico y por la acumulación de iones hidrógeno en los músculos que se contraen (3). Aunque la [Lac] era elevada, el pH sanguíneo se comportó de manera similar en 120 rpm y en el resto de las pruebas, probablemente debido al sistema buffer de la sangre. La elevada [Lac] durante la prueba a 120 rpm no implica necesariamente una mayor glucógenolisis o acumulación de hidrógeno en el músculo. Sin embargo, a 120 rpm se indujo hiperventilación e hipocapnia (reducciones en P_{capCO_2}) lo que permitió una mayor utilización de bicarbonato en la sangre para prevenir disminución en el pH. Una mayor amortiguación de la sangre (menor $[HCO_3^-]$) pero pH similar, sugieren una mayor tasa de aparición de H^+ en sangre (si no acumulación) durante la prueba a 120 rpm.

No está claro cual mecanismo indujo la hiperventilación durante la prueba a 120-rpm. V_E aumentó por encima del valor necesario para eliminar la producción extra de CO_2 durante la prueba a 120 rpm y, por consiguiente, P_{capCO_2} disminuyó notablemente (Figura 3), lo que evidencia que $PaCO_2$ ($\sim P_{capCO_2}$) no era la variable regulada por V_E (26) cuando la cadencia de pedaleo era alta (120 rpm). Notablemente, a 120 rpm, la tasa respiratoria ya había aumentado durante la etapa a 175 W, antes de que se hubiera podido manifestar una posible diferencia de acidosis muscular entre las pruebas (es decir, similar [Lac] de 175 a 275 W). Esto sugiere que los aumentos en V_E durante la prueba con 120 rpm no fueron dirigidos por la activación de quimiorreceptores musculares sensibles a las reducciones en el pH (10). Es posible que los aumentos en V_E respondieran a mecanismos activados neurológicamente, vinculados al efecto de arrastre de respirar al pedalear (4). La estrategia de aumentar V_E a 120 rpm aumentando la frecuencia respiratoria y no el volumen tidal, también sugiere que existe un vínculo con la cadencia de pedaleo.

Pedaleo en producciones de potencia elevadas (~ 200 W para los sujetos desentrenados), pero a cadencias bajas (50 rpm) reduce el flujo de sangre a los cuádriceps durante el primer tercio del ciclo de la pedaleada (27). Estos datos han sido extrapolados para sugerir que los ciclistas prefieren usar cadencias más altas para evitar los efectos agotadores de esta isquemia temporal. La cadencia de pedaleo más baja utilizada en el estudio presente (80 rpm) era mucho más alta que las observadas para reducir el flujo de sangre, y por lo tanto es improbable que pueda explicar la fatiga en alguna prueba. También podría argumentarse que el aumento en el trabajo interno provocado por los aumentos en la cadencia (12) explica la reducción en el rendimiento. Sin embargo a 275 W, GE fue similar entre las pruebas, lo que indica que el costo metabólico para producir el trabajo (externo mas interno) era similar a PO alta. Finalmente, es posible que la fatiga se produjera debido a la falta de familiarización de los sujetos con la cadencia de pedaleo alta (120 rpm), aunque todos informaron que habían utilizado la cadencia de 120 rpm durante esprints en masa sostenidos.

En resumen, una cadencia de pedaleo alta (34 % por encima de la habitual; 120 rpm) redujo la producción de potencia máxima (W_{max}) alcanzada durante un test de ciclismo progresivo incremental en ciclistas altamente entrenados. La disminución en el rendimiento se asoció con un umbral ventilatorio anaeróbico más bajo, lo que sugiere que VT_2 es un estimador sensible de la cadencia pedaleo óptima para el rendimiento.

Los autores agradecen a los sujetos su valiosa contribución con el estudio.

REFERENCIAS

1. ACSM. (2000). Interpretation of clinical test data. In: *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*, Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins, pp. 116-117.
2. AHLQUIST, L. E., D. R. BASSETT, R. SUFIT, F. J. NAGLE, and D. P. THOMAS. (1992). The effect of pedaling frequency on glycogen depletion rates in type I and type II quadriceps muscle fibers during submaximal cycling exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 65:360-364
3. BERGSTROM, M., and E. HULTMAN. (1988). Energy cost and fatigue during intermittent electrical stimulation of human skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.* 65:1500-1505
4. BONSIGNORE, M.R., G. MORICI, P. ABATE, S. ROMANO, and G. BONSIGNORE. (1998). Ventilation and entrainment of breathing during cycling and running in triathletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30:239-245.
5. BROUWER, E. (1957). On simple formulae for calculating the heat expenditure and the quantities of carbohydrate and fat oxidized in metabolism of men and animals, from gaseous exchange.
6. COAST, J., and H. G. WELCH. (1985). Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol.* 53:339-342

7. COYLE, E. F., L. S. SIDOSSIS, J. F. HOROWITZ, and J. D. BELTZ. (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24:782-788
8. CHAVARREN, J., and J. A. CALBET. (1990). Cycling efficiency and pedaling frequency in road cyclist. *Eur. J. Appl. Physiol.* 80:555-563.
9. DAVIS, J. A. (1985). Anaerobic threshold: a review of the concept and directions for future research. *Med. Sci. Sports Exerc.* 17:6-18,
10. EVANS, A. B., L. W. TSAI, D. A. OELBERG, H. KAZEMI, and D. M. SYSTROM. (1998). Skeletal muscle ECF pH error signal for exercise ventilatory control. *J. Appl. Physiol.* 84:90-96.
11. FERGUSON, R. A., D. BALL, P. KRUSTRUP, P. ADGAARD, M. KJAER, A. J. SARGEANT, Y. HELLSTEN, and J. BANGSBO. (2001). Muscle oxygen uptake and energy turnover during dynamic exercise at different contraction frequencies in humans. *J. Physiol.* 536:261-271.
12. FERGUSON, R. A., P. AAGAARD, D. BALL, A. J. SARGEANT, and J. BANGSBO. (2000). Total power output generated during dynamic knee extensor exercise at different contraction frequencies. *J. Appl. Physiol.* 89:1912-1918.
13. FOSS, O., and J. HALLEN. (2004). The most economical cadence increases with increasing workload. *Eur. J. Appl. Physiol.* 92:443-451,
14. GAESSER, G. A., and G. A. BROOKS. (1975). Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J. Appl. Physiol.* 38:1132-1139,
15. HOROWITZ, J. F., L. S. SIDOSSIS, and E. F. COYLE. (1994). High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *Int. J. Sports Med.* 15:152-157.
16. HUGHES, E. F., S. C. TURNER, and G. A. BROOKS. . (1982). Effects of glycogen depletion and pedaling speed on "anaerobic threshold" *J. Appl. Physiol.* 52:1598-1607
17. KUIPERS, H., F. T. J. VERSTAPPEN, H. A. KEIZER, and P. GUERTEN. (1985). Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiological correlates. *Int. J. Sports Med.* 6:197-201
18. LUCIA, A., A. SAN JUAN, M. MONTILLA, S. CANETE, A. SANTALLA, C. EARNEST, and M. PEREZ. (2004). In professional road cyclists, low pedaling cadences are less efficient. *Med. Sci. Sports Exerc.* 36:1048-1054
19. LUCIÁ, A., J. HOYOS, and J. L. CHICHARRO. (2001). Preferred pedaling cadence in professional cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33:1361-1366,
20. LUCIA, A., J. HOYOS, M. PEREZ, A. SANTALLA, and J. L. CHICHARRO. (2002). Inverse relationship between VO₂max and economy/efficiency in world-class cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:2079-2084
21. LUCIA, A., J. HOYOS, M. PEREZ, and J. L. CHICHARRO. (2000). Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32:1777-1782
22. MOSELEY, L., J. ACHTEN, J. C. MARTIN, and A. E. JEUKENDRUP. (2004). No differences in cycling efficiency between world-class and recreational cyclists. *Int. J. Sports Med.* 25:374-379
23. NICKLEBERRY, B. J., and G. A. BROOKS. (1996). No effect of cycling experience on leg cycle ergometer efficiency. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28:1396-1401
24. SIDOSSIS, L. S., J. F. HOROWITZ, and E. F. COYLE. (1992). Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency. *Int. J. Sports Med.* 13:407-411
25. SJOGAARD, G., E. A. HANSEN, and T. OSADA. (2002). Blood flow and oxygen uptake increase with total power during five different knee-extension contraction rates. *J. Appl. Physiol.* 93:1676-1684
26. SWANSON, G. D. (1979). Overview of ventilatory control during exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 11:221-226
27. TAKAISHI, T., T. YAMAMOTO, T. ONO, T. ITO, and T. MORITANI. (1998). Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30:442-449
28. WELTMAN, A., D. SNEAD, R. SEIP, R. SCHURRER, S. LEVINE, and R. RUTT. (1990). Reliability and validity of a continuous incremental treadmill protocol for the determination of lactate threshold, fixed blood lactate concentration, and VO₂max. *Int. J. Sports Med.* 11:26-32,
29. WIDRICK, J. J., P. S. FREEDSON, and J. HAMILL. (1992). Effect of internal work on the calculation of optimal pedaling rates. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24:376-382