

Análisis del pedaleo ciclista con sistemas convencionales VS no circulares en pruebas submáximas y supramáximas

J. GARCÍA-LÓPEZ, J.A. RODRÍGUEZ-MARROYO, J. GERARDO VILLA.
Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte.
León, España.

Resumen

El objetivo de este trabajo ha sido analizar y comparar el rendimiento mecánico máximo (pruebas supramáximas) y la eficiencia energética (pruebas submáximas) desarrollada por ciclistas profesionales con un sistema de pedaleo convencional (C) y con un sistema de pedaleo no circular (Sistema Rotor® o SR); así como valorar sus efectos en la cinemática del pedaleo. 15 ciclistas profesionales realizaron varias pruebas submáximas y supramáximas, con un sistema C y con 4 variantes del SR. Los datos de eficiencia energética obtenidos en el estudio fueron similares a los descritos en otros trabajos, sin diferencias entre C y SR, aunque sí se alteró la cinemática del pedaleo del tobillo y la rodilla. Las variables de rendimiento mecánico máximo fueron mayores con SR, lo que parece indicar que estos sistemas pudieran incrementar el rendimiento en las modalidades de Ciclismo en Pista.

Palabras clave: Ciclismo, sistema rotor, eficiencia, rendimiento mecánico

Introducción

Durante los últimos 100 años diferentes autores han intentado mejorar el rendimiento en ciclismo cambiando varios aspectos relacionados con la cinemática de la biela y del pedal (13); todos ellos pueden ser contemplados en el conjunto de sistemas de pedaleo no circular, el cual, se puede conseguir, variando la forma del plato (mayor número y antigüedad de los estudios) o de las bielas (estudios más recientes) que convencionalmente se han utilizado en ciclismo. Existen evidencias sobre la utilización de sistemas de pedaleo no circular en competiciones de Ciclismo en Pista desde el año 1890 (3). Sus objetivos han sido aumentar la eficiencia energética (pruebas submáximas) o aumentar el rendimiento mecánico máximo (pruebas supramáximas), con las siguientes estrategias (3, 6, 7, 9, 10, 13, 14, 17): 1-Aumentar el par motor de la biela cuando se encuentra en el instante del ciclo en el que el ciclista puede ejercer más fuerza (entre

los 90-110°). 2-Aumentar el tiempo de la fase de impulso, alargando así el periodo en el que la fuerza propulsiva puede ser aplicada (impulso mecánico del pedaleo). 3-Minimizar el tiempo en el que las bielas se encuentran en el Punto Muerto Superior (PMS) o en el Punto Muerto Inferior (PMI), ya que son zonas donde difícilmente se puede aplicar fuerza efectiva. El comportamiento mecánico teórico de estos sistemas ha sido demostrado (10), pero sólo se trata de modelos teóricos y no prácticos (6). Hasta el momento, todos los estudios coinciden en que, la eficiencia energética no es mejorada por los sistemas de pedaleo no circular (3, 7, 10, 12, 14, 17). Estos resultados contrastan con los obtenidos en investigaciones recientes, donde se afirma que el rendimiento mecánico máximo sí podría ser mejorado con estos sistemas (1, 9, 13, 15). No obstante, estos trabajos han empleado ciclistas federados no profesionales, estudiantes de educación física (9), e incluso estudiantes de educación física que no practicaban ciclismo (1). Además, algunos sólo han medido la potencia mecánica durante el pedaleo con una pierna (13), y otros han utilizado a pocos ciclistas profesionales (n=4), no obteniendo diferencias estadísticamente

Correspondencia:

inejgl@unileon.es

Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. León (España)

significativas (15). Ninguno de los estudios mencionados anteriormente analizan la repercusión de estos sistemas no circulares en la cinemática del pedaleo. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo ha sido determinar si un sistema de pedaleo no circular («Sistema Rotor») mejora el rendimiento mecánico máximo (pruebas supramáximas) y la eficiencia energética (pruebas submáximas) en ciclistas profesionales durante condiciones simuladas de laboratorio, así como constatar si dicho sistema altera la cinemática del pedaleo.

Métodos

En el estudio participaron 15 ciclistas profesionales (68.0 ± 3.9 Kg y 178 ± 4 cm) del Equipo Ciclista Profesional Colchón Relax-Fuenlabrada (España). Todos ellos estaban en perfecto estado de salud y dieron su consentimiento por escrito, atendiendo a las recomendaciones de la Conferencia de Helsinki para investigación con humanos.

Sistema de pedaleo no circular: Se empleó el «Sistema Rotor®» (16), homologado por la Unión Ciclista Internacional, y utilizado en investigaciones previas sobre eficiencia energética (17). Este sistema combina, a nivel teórico, los efectos de un plato no circular y de un sistema de bielas independientes (Fig.1).

Test de laboratorio: Los ciclistas realizaron una prueba de esfuerzo, en su propia bicicleta sobre un ciclosimulador (Cateye CS-1000), 48 horas antes de comenzar la fase experimental. El entrenamiento, alimentación del día anterior, así como las condiciones del laboratorio (entre las 9:00-12:00h) y del calentamiento fueron estandarizadas. La velocidad inicial del test fue de $32 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, incrementándose en $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ cada minuto hasta

que el ciclista no pudo mantener la velocidad fijada. Durante toda la prueba se monitorizó el intercambio de gases respiración a respiración (CPX-Plus de Medical Graphics) y la frecuencia cardiaca (Polar Xtrainer Plus). Posteriormente se determinó el umbral anaeróbico ventilatorio atendiendo al incremento concomitante del $\text{VE} \cdot \text{VO}_2^{-1}$ y $\text{VE} \cdot \text{VCO}_2^{-1}$.

Prueba supramáxima (rendimiento mecánico máximo): 48 h después de realizar el test inicial, los ciclistas realizaron aleatoriamente 5 test de Wingate en 3 días diferentes (2 test por día), separados entre sí por un mínimo de tiempo de 8 horas, en las 4 posiciones del «Sistema Rotor»: R1, R2, R3 y R4; y 1 del sistema convencional: Sin Rotor. Las 4 posiciones del «Sistema Rotor» diferían según el máximo par de la biela (116° , 122° , 128° y 134° , respectivamente). Tras un calentamiento sobre un cicloergómetro de freno mecánico (Monark 818) que como mínimo duró 10 minutos y que se prolongó a petición de los ciclistas en función de su adaptación a las diferentes posiciones del Rotor, se realizó el test de Wingate. La resistencia de frenado utilizada en el test fue la óptima para cada uno de los sujetos, utilizándose la metodología propuesta por Vandewalle (18) para su determinación.

La cadencia de pedaleo se midió a través de un sistema de imanes colocados en las bielas del ergómetro que estaban conectados a un contador de tiempo (SportSpeed-v2.0), validado para una precisión de 500 Hz (5). Los resultados de cada test se expresaron como potencia mecánica máxima y media relativas al peso corporal de cada ciclista. También se analizó el tiempo empleado por los ciclistas en alcanzar la potencia mecánica máxima, el índice de fatiga (porcentaje de disminución de la potencia máxima a lo largo del test) y el mejor valor de potencia alcanzado por los ciclistas con el Sistema Rotor.

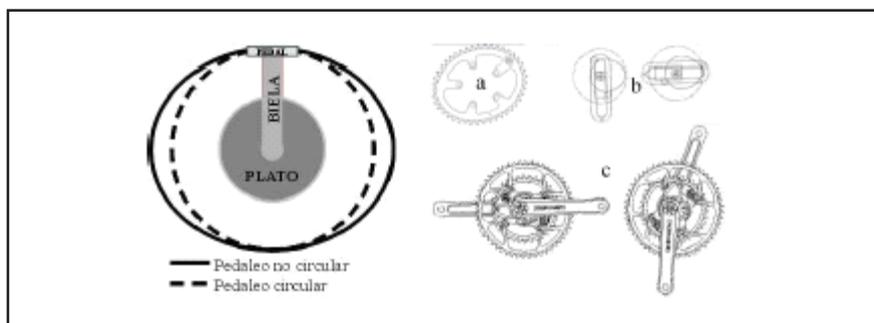


Figura 1. Representación del pedaleo circular y no circular, así como de las diferentes estrategias para conseguirlo: a = platos no circulares; b = sistemas de bielas móviles; c = combinación de ambos (Sistema Rotor®)

Prueba submáxima (eficiencia energética): En las mismas sesiones que se realizaron los tests supramáximos, y respetando un mínimo descanso de 30 min, los ciclistas fueron sometidos a un test submáximo. Este consistió en pedalear sobre su propia bicicleta 15 min a una intensidad ~75% del VO₂max, aleatoriamente con el Sistema Rotor (R1, R2, R3, R4 y R5) y convencional. Se monitorizó durante toda la prueba el consumo de oxígeno, la frecuencia cardíaca, y la cadencia de pedaleo, así como otras variables goespirométricas.

Durante todos los test submáximos se obligó a los ciclistas a utilizar el mismo desarrollo y cadencia, para poder estudiar el comportamiento cinemático del pedaleo utilizando un modelo de 8 puntos y 5 segmentos. Para ello, se colocó una cámara de vídeo filmando el

plano sagital de pedaleo (Panasonic MS1®), en el punto medio entre el centro de la biela o eje de giro de la biela y la cadera. El sistema de referencia utilizado para la calibración fue de 1×1 m. Las imágenes fueron capturadas y analizadas mediante el software informático Kinescan-2001® (11). Se obtuvieron los ángulos de los 5 segmentos (tronco,

muslo, pierna, pie y biela), así como sus rangos de movimiento o ROM. También se obtuvieron las aceleraciones angulares máximas y mínimas de estos segmentos.

Análisis estadístico: Los valores se expresan como medias y errores estándar de la media.

El análisis estadístico se realizó con el paquete estadístico SPSS+-v12.0, utilizando la prueba paramétrica de Student para datos apareados (t-test). Considerándose las diferencias significativas cuando $p < 0.05$.

Resultados y discusión

Eficiencia energética durante la prueba submáxima (Fig. 2). Los resultados de este trabajo no prueban que la individualización de las angulaciones de máximo par mecánico tenga efectos positivos en la eficiencia energética. De hecho, existe una tendencia no significativa a obtener mayor eficiencia energética con el sistema circular convencional que con el Sistema Rotor®, lo cual, está en la línea de los resultados obtenidos por otros autores (12), quienes encontraron una

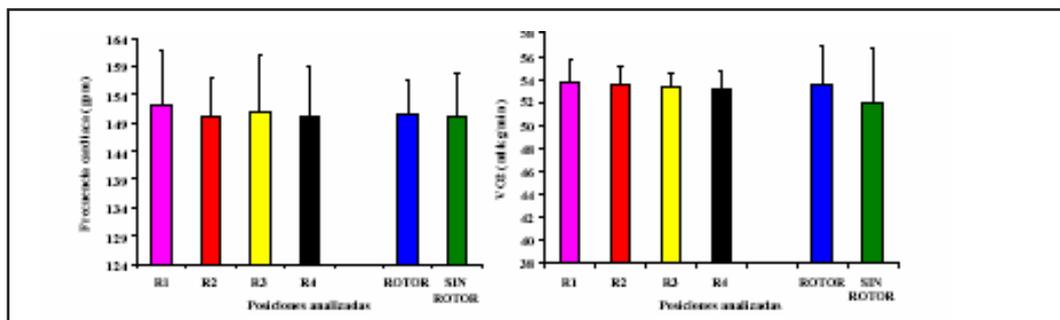


Figura 2. Frecuencia cardíaca (izquierda) y consumo de oxígeno (derecha) medios durante el test submáximo realizado con las 4 posiciones del Sistema Rotor (R1, R2, R3 y R4), la media de todas ellas (Rotor) y con el sistema convencional (Sin Rotor)

	T _{max} (°)	T _{min} (°)	ROM-T (°)	R _{max} (rad s ⁻²)
Sin Rotor	95.2±2.7	74.4±0.5	20.8±1.9	-103.9±1.66
Rotor 1	87.2±0.4*	72±0.7*	15.2±0.4*	-100.2±1.2*
Rotor 2	89.8±0.7*	74.6±0.5	14.2±0.7*	-85.6±1.4*
Rotor 3	88.6±0.5*	73±0.6*	15.6±0.8*	-91.4±0.6*
Rotor 4	90.2±1.9*	71.2±1.2*	18.0±1.5*	-80.3±2.9*

T_{max} y T_{min} = Ángulos máximo y mínimo de tobillo. ROM-T = Rango de movimiento articular del tobillo. R_{max} = Deceleración angular máxima de rodilla. * diferencias significativas respecto al sistema convencional (Sin Rotor).

Tabla 1: Cinemática angular del tobillo (T) y la rodilla (R) con el sistema convencional (Sin Rotor) y las 4 posiciones del Sistema Rotor (Rotor 1, Rotor 2, Rotor 3 y Rotor 4)

tendencia al aumento de la frecuencia cardiaca y la lactacidemia, así como al descenso de la eficiencia gruesa, cuando los ciclistas realizaban un test submáximo con este sistema (pedaleo durante 20 min al 80% del VO₂máx). Ninguno de los trabajos anteriores sobre eficiencia energética con sistemas de pedaleo no circulares fue capaz de demostrar un descenso en las variables de gasto metabólico (3, 7, 11, 14, 17).

El análisis cinemático del pedaleo en el plano sagital demostró una clara disminución en las deceleraciones angulares máximas de la rodilla cuando se utilizaba el Sistema Rotor® (Tabla 1). Esto ocurrió, sobre todo, cuando la rodilla pasaba de un movimiento en extensión a otro en flexión, cuestión que ocurre aproximadamente a los 120° de biela. En ese instante, las deceleraciones de la rodilla, y por lo tanto, las fuerzas soportadas por la misma fueron mayores con el sistema convencional. Pudiera ser éste el motivo por el cual, el Sistema Rotor® tiene su mejor aceptación en el ámbito de deportistas veteranos de este deporte que, a veces, se han visto obligados a dejar de practicarlo por problemas en dicha articulación. Además, se constató que la articulación del tobillo tenía un menor rango de movimiento, limitado tanto por sus menores flexiones como extensiones. Esto pudo ser debido a que, dado que el Sistema Rotor® no tiene «punto muerto», la musculatura especialmente implicada en dicha fase no participó en tanta medida. Diferentes autores ratifican que los músculos flexores dorsales y plantares del tobillo tienen un papel fundamental en el paso por el «punto

muerto superior» y «punto muerto inferior», respectivamente (4, 6, 8), lo cual, pudo ser la causa de los menores rangos de movimiento.

Rendimiento mecánico máximo durante la prueba supramáxima (Fig. 3). Las potencias mecánicas media y máxima fueron significativamente mayores (entre 0.4-0.71 W/Kg) en varias de las posiciones del Sistema Rotor. Estas diferencias eran más amplias (0.79 W/Kg) tomando la mejor posición con el Sistema Rotor® para cada uno de los ciclistas analizados. No se encontraron diferencias significativas entre el sistema convencional (Sin Rotor) y los peores registros con el Sistema Rotor® (0.26 W/Kg). Además, el tiempo empleado en alcanzar la máxima potencia con el sistema convencional fue mayor que con cualquiera de las posiciones del Sistema Rotor® (diferencias significativas con el Rotor 2 y el Mejor Rotor). Este mayor rendimiento mecánico máximo no tuvo influencia significativa en el índice de fatiga, por lo que el Sistema Rotor® resulta beneficioso en este tipo de pruebas con ciclistas profesionales de ruta, posiblemente porque, como comenta Hull (10), su diseño está más dirigido a la mejora de la producción de potencia a corto plazo que a la mejora de la eficiencia del pedaleo. Las mejoras en el rendimiento mecánico máximo están en consonancia con las obtenidas en otros trabajos (9, 13, 15), aunque no se corresponden con las de otros (1). Hasta el momento, sólo estos cuatro trabajos han evaluado los efectos de los sistemas de pedaleo no circular en el rendimiento mecánico máximo del pedaleo.

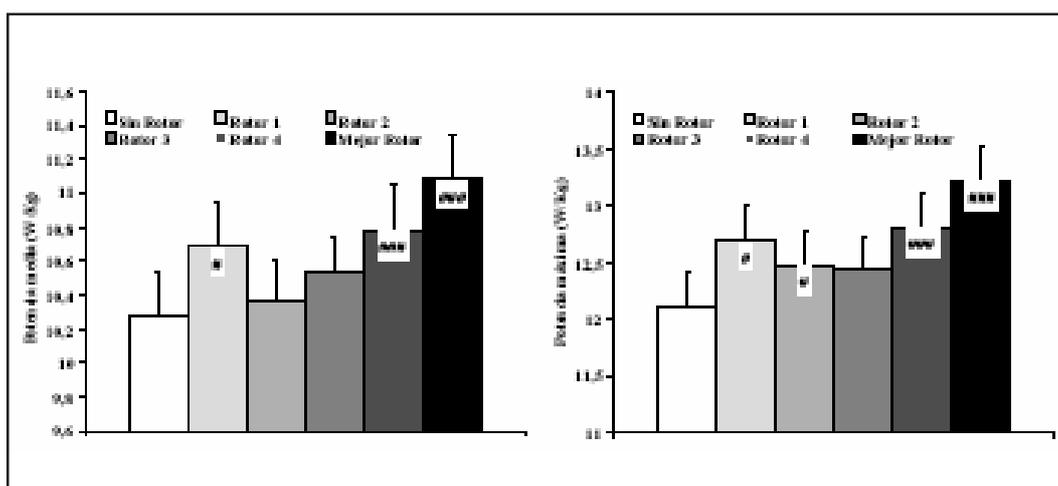


Figura 3. Potencias mecánicas media (izquierda) y máxima (derecha) obtenidas durante el Test de Wingate con el sistema convencional (Sin Rotor), las 4 posiciones del Sistema Rotor (Rotor 1, Rotor 2, Rotor 3 y Rotor 4) y el mejor Rotor (Mejor Rotor). # diferencias significativas respecto al sistema convencional (Sin Rotor)

Conclusiones

El Sistema Rotor® es capaz de mejorar el rendimiento mecánico máximo, pero no la eficiencia energética del pedaleo en ciclistas profesionales. Este sistema altera la cinemática del pedaleo, disminuyendo las deceleraciones angulares en la articulación de la rodilla, así como el rango de movimiento en la articulación del tobillo. Es posible que los sistemas de pedaleo no circular mejoren el rendimiento ciclista en aquellas disciplinas de corta duración y altas sollicitaciones de potencia, como son la mayoría de las modalidades de Ciclismo en Pista (2).

Para que los sistemas no circulares mejoren la eficiencia energética del pedaleo, muy importante en la modalidad de Ciclismo en Ruta, un modelo específico con este objetivo debería ser desarrollado, evitando así la progresiva desaparición de estos sistemas como parte del equipamiento estándar de las bicicletas (6). Futuros trabajos deberían profundizar en las adaptaciones a los sistemas de pedaleo no circular de ciclistas profesionales y principiantes en este deporte.

Bibliografía

1. **Coso J, Aguado R, Mora R.** Mejora la biomecánica en el sprint en ciclismo: sistema de bielas Rotor® vs sistema tradicional. *Archivos de Medicina del Deporte* 2004; 26: 207-214.
2. **Craig NP, Norton KI.** Characteristics of track cycling. *Sports Med* 2001. 31: 457-468.
3. **Cullen LK, Andrew K, Lair KR, Widger MJ, Timson BF.** Efficiency of trained cyclists using circular and noncircular chainrings. *Int J Sports Med* 1992; 13: 264-269.
4. **Faria I.** Energy expenditure, aerodynamics and medical problems in cycling. *Sports Med* 1992; 14: 43-63.
5. **García J, González J, Rodríguez JA, Morante JC, Villa J G** (2.002) «Validación y Aplicación de un nuevo sistema de fotocélulas: DSD LASER SYSTEM» En «Llibre de les Actes del Cinquè Congrés de Ciències de L'Esport, L'Educació Física i la Recreació». Ed: INEF Catalunya: 583-595.
6. **Gregor RJ, Broker JP, Ryan MM.** The biomechanics of cycling. *Exerc Sports Sci Rev* 1991; 19: 127-169.
7. **Henderson SC, Ellis RW, Klimovitch G, Brooks GA.** Effects of circular and elliptical chainwheels on steady-rate cycle ergometer work efficiency. *Med Sci Sports* 1977; 9:202-207.
8. **Henke T, Brach M, Suhr S, Marées H.** Investigaciones científico-biomecánicas: Aspectos del entrenamiento de la técnica en ciclismo de fondo en carretera. En Nitsch, J.R. et al (Eds.) *Entrenamiento de la técnica: contribuciones para un enfoque interdisciplinario.* Barcelona. Ed. Paidotribo. 2002: 247-328.
9. **Hue O, Galy O, Hertogh C, Casties JF, Prefaut Ch.** Enhancing cycling performance using an eccentric chainring. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 1006-1010.
10. **Hull ML, Williams M, Williams K, Katuz S.** Physiological response to cycling with both circular and noncircular chainrings. *Med Sci Sports Exerc* 1992; 24: 114-122.
11. **IBV** (2002). Sistema de fotogrametría tridimensional Kinescan-2001. Instituto de Biomecánica de Valencia». Disponible en: <http://www.ibv.org/> [Consulta: 30/06/02].
12. **Lucía A, Balmer J, Davison RCR, Pérez M, Santalla A, Smith PM.** Effets of the rotor pedalling system on the performance of trained cyclists during incremental and constantload cycle-ergometer test. *Int J Sports Med* 2004; 25: 479-485.
13. **Martin JC, Lamb SM, Brown AT.** Pedal trajectory alters maximal single-leg cycling power. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 1332-1336.
14. **Ratel S, Poujade B, Duché P, Bedu M.** Comparación des dones bioénergétiques observées lors d'un exercice musculaire sur bicyclettes equipes de plateaux rond ou «Harmonic». *Science & Sports* 1998; 13: 287-289.
15. **Rodríguez-Marroyo JA, García-López J, Ávila MC, Peleteiro J, Jiménez F, Córdova A, Villa JG.** Potencia mecánica y Sistema Rotor. En M. Hernández, E. Navarro y A. Lorenzo (Eds.). Madrid. Ed. Asociación Española de Ciencias del Deporte. 2002.
16. **Rotorbike** (2003). Rotor System... the natural way of pedaling. Disponible en: <http://www.rotorbike.com> [Consulta: 14/07/03].
17. **Santalla A, Manzano JM, Pérez M, Lucía A.** A new pedaling design: the Rotor-effects of cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 1854-1858.
18. **Vandewalle H, Peres G, Monod H.** Standart anaerobic exercise tests. *Sports Med* 1987; 4: 268-298.