

Article

Efecto de la Técnica de Pedaleo sobre la Efectividad Mecánica y la Eficiencia en Ciclistas

Thomas Korff¹, Lee M. Romer¹, Ian Mayhew¹ y James C. Martin²¹Brunei University, Centre for Sports Medicine and Human Performance, Brunei University, Uxbridge, UNITED KINGDOM.²University of Utah, College of Health, Salt Lake City, UT.

RESUMEN

Objetivo: Para optimizar el rendimiento en ciclismo de resistencia, es importante maximizar la eficiencia. Para determinar la efectividad mecánica de ciclismo se pueden utilizar bielas con medidores de potencia y pedales con sensores de fuerza. Desde una perspectiva de entrenamiento y de ciencia básica es interesante determinar si una técnica de pedaleo mecánicamente efectiva permite alcanzar una mayor eficiencia. Por lo tanto, el propósito de este estudio fue determinar el efecto de diferentes técnicas de pedaleo en la efectividad mecánica y eficiencia bruta durante ciclismo en estado estable. **Métodos:** Ocho ciclistas de sexo masculino realizaron ejercicios en una bicicleta ergométrica a 90 rpm y 200 W utilizando cuatro técnicas de pedaleo diferentes: forma de pedalear preferida (*preferred*); pedaleo redondo (*circling*); pedaleo enfatizando tirar del pedal en la fase ascendente (*pulling*); y pedaleo enfatizando empujar el pedal en la fase descendente (*pushing*). Cada serie de ejercicios duró 6 min y fueron intercaladas con 6 min de descanso pasivo. Determinamos la efectividad mecánica y eficiencia bruta por medio de mediciones de las fuerzas de reacción en los pedales y mediciones de parámetros respiratorios, respectivamente. **Resultados:** Cuando los participantes recibieron instrucciones de tirar del pedal durante la fase ascendente, la efectividad mecánica fue mayor (índice de efectividad de la fuerza = $62,4 \pm 9,8\%$) y la eficiencia bruta fue menor (eficiencia bruta = $19,0 \pm 0,7\%$) en comparación con lo que se observó en las otras condiciones de pedaleo (índice de efectividad de la fuerza = $48,2 \pm 5,1\%$ y eficiencia bruta = $20,2 \pm 0,6\%$; las medias y las desviaciones estándar disminuyeron en las condiciones de pedaleo preferido, redondo y de empuje). La efectividad mecánica y la eficiencia bruta durante las condiciones de pedaleo redondo y de empuje no fueron significativamente diferentes de la condición de pedaleo preferido. **Conclusiones:** La efectividad mecánica no fue indicativa de eficiencia bruta en las técnicas de pedaleo. Estos resultados aportan información útil para entrenadores y atletas para interpretar medidas de efectividad mecánica.

Palabras Clave: Entrenamiento, biomecánica, ciclismo, economía

INTRODUCCION

Para optimizar el rendimiento de resistencia es importante maximizar la eficiencia, la cual se define como la relación entre el trabajo realizado y la energía consumida (9). En el ciclismo, la eficiencia frecuentemente se infiere de manera indirecta a través de la relación entre la tasa de trabajo y el gasto calórico total (es decir, la eficiencia bruta) (9,12). Un factor que puede contribuir con la eficiencia bruta es la técnica de pedaleo (es decir, la manera en que las fuerzas producidas por los músculos de los ciclistas se transfieren a la biela) (6,15,18). Las fuerzas, torques, o potencia entregadas por el ciclista a los

pedales pueden ser determinados utilizando pedales de fuerza o bielas con sensores. Conocer la relación entre las variables mecánicas medidas en las bielas y la eficiencia bruta nos permitiría que las mediciones de fuerza, torque, o potencia sean más útiles para los entrenadores y para los atletas.

Por medio del uso de mediciones relacionadas a la fuerza, podemos describir la efectividad mecánica del sistema. En particular, se han utilizado dos conceptos para describir la efectividad mecánica. El primer concepto es maximizar la acción de la fuerza perpendicular a la biela y, por lo tanto de propulsión, (fuerza efectiva) en relación a la fuerza resultante. La relación entre la fuerza efectiva y la fuerza resultante (índice de efectividad de la fuerza) se ha usado para entender las interacciones entre trabajo, cadencia y eficiencia mecánica (7, 15, 17). Se ha sugerido que una técnica de pedaleo mecánicamente más efectiva puede ser más eficiente (11). Esta asociación no es intuitiva, por dos razones. Primero, la efectividad mecánica no tiene en cuenta las influencias neuromusculares (dependientes de la gravedad y del movimiento). Por ejemplo Neptune y Herzog (13), demostraron que es principalmente la contribución no muscular quien reduce la efectividad mecánica durante el ciclismo en estado estable a 90 rpm. Cuando se eliminan las influencias no musculares de la fuerza total de pedaleo, el componente mecánicamente ineficaz del perfil de fuerza también se elimina. La segunda razón por la cual la valoración de efectividad mecánica no puede reflejar la eficiencia bruta durante la difícil tarea de pedalear es que la entrega de energía a la biela es un resultado de complejos mecanismos mecánicos. Dado que la energía mecánica es producida por varios músculos con diferentes propiedades y que la energía se transfiere indirectamente a través de las diferentes partes del cuerpo a la biela (8, 10, 14), la relación entre la efectividad mecánica medida en la biela y la eficiencia bruta no es intuitiva. Existe información acerca de esta relación en los participantes (6, 18) y del efecto de la técnica de pedaleo en la coordinación muscular (16). Sin embargo, aun no se ha establecido si la maximización de la efectividad de la fuerza en las técnicas de pedaleo mejora la eficiencia bruta.

Un segundo concepto que se ha utilizado para interpretar la mecánica de la técnica de pedaleo es el de la distribución uniforme del torque de la biela a lo largo del ciclo de pedaleo. Los dispositivos de entrenamiento modernos y el software asociado proporcionan información sobre cuan uniformemente se distribuye el torque sobre el eje de la biela a lo largo del ciclo de pedaleo. En la práctica de entrenamiento, una distribución uniforme del torque en el ciclo de pedaleo se considera una técnica "eficiente" (1, 2, 4, 5). Sin embargo, nosotros no conocemos la existencia de evidencia científica que apoye esta suposición.

A partir de estas consideraciones, queda claro que nuestro conocimiento sobre la interacción entre la efectividad mecánica y la eficiencia durante el ciclismo en estado estable es incompleto. Por consiguiente, la utilidad de los perfiles de potencia y de torque es limitada para los entrenadores y atletas que buscan promover una técnica de pedaleo óptima. Por lo tanto, el propósito del presente estudio fue determinar la interacción entre efectividad mecánica y eficiencia bruta en diferentes técnicas de pedaleo en ciclistas competitivos. Planteamos la hipótesis que en las diferentes técnicas de pedaleo, el índice de efectividad de la fuerza y la uniformidad de la distribución del torque en el ciclo de pedaleo no reflejaría la eficiencia bruta.

MÉTODOS

Participantes

En el estudio participaron voluntariamente ocho ciclistas de sexo masculino (edad $35,3 \pm 6,3$ años, masa corporal $74,4 \pm 8,1$ kg, consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}) $58,2 \pm 3,1$ mL $kg^{-1} min^{-1}$, producción de potencia máxima (W_{max}) 365 ± 30 W). Todos los participantes tenían por lo menos 2 años ($6,8 \pm 4,4$ años) de experiencia en carreras. El comité de ética local de la Universidad de Brunel aprobó los métodos y los participantes dieron su consentimiento informado por escrito.

Procedimientos

Los participantes realizaron una entrada en calor pedaleando a 70, 90 y 110 rpm en una producción de potencia de 100 W durante 2 min en cada cadencia. Luego se les solicitó que realizaran cuatro pruebas de pedaleo a 90 rpm y 200 W en una bicicleta ergométrica con freno electromagnético. (*Lode Excalibur, Groningen, Países Bajos*) que fue calibrada antes de comenzar el estudio por medio de un calibrador dinámico (Modelo 17801, Vacumed, CA). Se solicitó a los participantes que emplearan una técnica de pedaleo diferente en cada prueba. En una condición se solicitó a los participantes que usaran su técnica de pedaleo preferido (*preferred*). En una segunda condición, se solicitó a los participantes que pedalearan redondo y se concentraran en las fases de la transición hacia el centro muerto más alto y el centro muerto más bajo del ciclo de pedaleo (*circling*). En la tercera condición se solicitó a los participantes que pusieran énfasis a un tirón activo durante la fase de recobro (ascendente) del ciclo de pedaleo (*pulling*). Finalmente, en la cuarta condición se les solicitó que pusieran énfasis en la acción de empuje durante la fase de empuje del ciclo de pedaleo (*pushing*). Estas instrucciones se reiteraron a

lo largo de cada serie de ejercicio. El orden de las condiciones fue aleatorizado y contrabalanceado. Cada serie duró 6 min, y las pruebas consecutivas estaban separadas por 6 min de descanso pasivo. Aproximadamente 30 min después de la última prueba, los participantes realizaron un test de ejercicio incremental máximo (empezando a 150-200 W y aumentando 10-20 W/min) para la determinación del VO_{2max} (definido como el mayor VO_2 obtenido en promedio durante 1 min de ejercicio) y W_{max} (definido como la suma entre la carga de trabajo final completada más la fracción de la carga de trabajo parcialmente completada utilizadas antes del agotamiento). Los participantes se abstuvieron de consumir cafeína durante 12 h antes del ejercicio y de realizar ejercicios estresantes 48 h antes del ejercicio.

Instrumentos y Obtención las Medidas Dependientes

Las fuerzas de reacción de los pedales fueron medidas en 960 Hz utilizando un pedal de fuerza realizado a medida con dos sensores de fuerza piezoeléctricos triaxiales (Kistler, modelo 9251AQ01). El ángulo del pie y el ángulo de la biela fueron medidos a 120 Hz con un sistema de análisis de movimiento- (*Motion Analysis*, Santa Rosa, CA). Los datos de fuerza y de la cinemática fueron filtrados con un filtro de paso bajo (Butterworth de segundo-orden) usando frecuencias corte de 20 y 10 Hz, respectivamente. El ángulo del pedal y el ángulo de la biela fueron calculados a partir de los datos de cinemática. Se redujo la resolución/tamaño de los datos de fuerza (las fuerzas normal y tangencial al pedal) para emparejarlos con los datos de cinemática. Usando los datos de cinemática y de fuerza se calcularon los componentes de fuerza perpendiculares y radiales a la biela. La fuerza total (F_{tot}) se calculó como la suma vectorial de los componentes normales y tangenciales. El torque sobre el eje de rotación de la biela se calculó como el producto de la fuerza efectiva por la longitud de la biela (0,17 m).

Índice de efectividad de la fuerza (IFE) se calculó según ecuación 1 (6):

$$IFE = 100 \times \frac{\int_0^{2\pi} F_e(\Theta)}{\int_0^{2\pi} F_{tot}(\Theta)}$$

donde θ es el ángulo de la biela, F_e es la fuerza efectiva y F_{tot} es la fuerza resultante.

La uniformidad de la distribución del torque fue calculada dividiendo el torque medio en el ciclo de pedaleo, medido en el pedal derecho en la revolución del pedaleo completa de 360° , por el torque máximo multiplicado por 100. En cada participante, el índice de efectividad de fuerza y la uniformidad de distribución del torque fueron promediados a lo largo de 10 revoluciones durante el quinto minuto de cada serie de evaluación.

Las medidas de VO_2 y producción de dióxido de carbono (VCO_2) fueron obtenidas respiración por respiración por medio de un sistema en línea (*Oxycon Pro Profesional*, Jaeger, Alemania). La eficiencia bruta se calculó como la media de todos los datos recolectados en los últimos 3 min de cada serie de ejercicios (tasa de intercambio respiratorio ≤ 1), por medio de la siguiente ecuación: producción de potencia (W)/energía consumida ($J s^{-1}$) x 100%, dónde la energía consumida se calculó a partir de las medidas de VO_2 y VCO_2 utilizando ecuaciones estequiométricas (3).

Análisis Estadísticos

Para determinar si la técnica de pedaleo afectaba el índice de efectividad de la fuerza, la uniformidad de la distribución del torque y la eficiencia bruta, se aplicó un ANOVA de una vía con medidas repetidas para cada variable dependiente. Si el ANOVA indicaba un efecto principal significativo, se realizaban comparaciones pareadas *post hoc* con el ajuste de Bonferroni. El nivel del alfa se fijó en 0,05.

RESULTADOS

Para asegurar que los participantes siguieron las instrucciones con respecto a la técnica de pedaleo, calculamos el torque de la biela que se producía durante la fase de empuje ($0-180^\circ$ del ciclo de pedaleo) como porcentaje del torque total de la biela a lo largo del ciclo completo de pedaleo. Entre 0 y 180° del ciclo de pedaleo, los participantes produjeron la mayor proporción de torque al empujar y la menor cantidad de torque al tirar. En esta región del ciclo de pedaleo, los participantes produjeron también una mayor proporción de torque en la condición de pedaleo preferido en comparación con la condición de pedaleo redondo o *circling* (Figura 1). Los tamaños de efecto en todas las comparaciones pareadas fueron grandes (0,77-1,63).

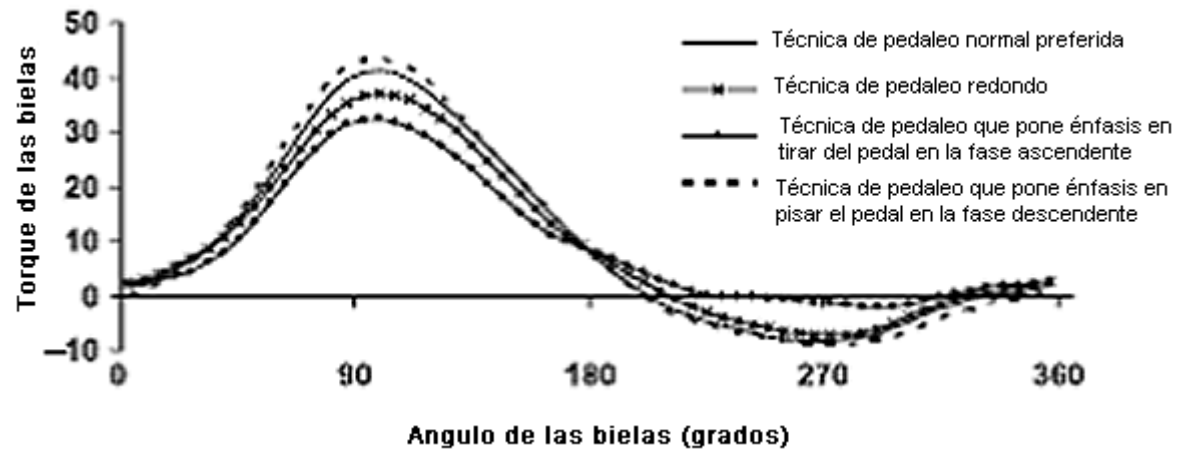


Figura 1. Perfiles del torque en las diferentes condiciones de pedaleo. Los perfiles que se muestran se obtuvieron del promedio de todos los participantes en cada condición de pedaleo.

La técnica pedaleo afectó significativamente la uniformidad de la distribución del torque ($F_{3,21} = 16,3$, $P < 0,001$) y el índice de efectividad de la fuerza ($F_{3,21} = 18,7$, $P < 0,001$). La Figura 1 muestra el perfil de torque (promedio entre todos los participantes) para las cuatro condiciones de pedaleo. Los análisis *post hoc* revelaron que la uniformidad de distribución del torque era mayor durante la condición donde se enfatizó tirar del pedal en la fase ascendente (pulling) que durante la condición de pedaleo en donde se enfatizó pisar el pedal en la fase descendente (pushing) o la condición de pedaleo preferido (preferred) ($P < 0,05$) (Figura 2A). Además, la uniformidad de distribución del torque fue mayor durante la condición de pedaleo redondo (Circling) en comparación con la condición de pedaleo Pushing ($P < 0,05$). Los análisis *post hoc* también revelaron que durante la condición de pedaleo Pulling, el índice de efectividad de fuerza fue significativamente mayor que durante las otras condiciones ($P < 0,05$) (Figura 2B).

La técnica de pedaleo afectó significativamente la eficiencia bruta ($F_{3,21} = 20,4$, $P < 0,001$). Los análisis *post hoc* revelaron que durante la condición Pulling, la eficiencia bruta fue significativamente menor de durante todas las otras condiciones de pedaleo (Figura 3). Aunque no lo presentamos aquí, se observó el mismo efecto independientemente de si se realizó una corrección de la eficiencia al inicio del estudio para el gasto de energía en reposo (eficiencia bruta) o el gasto de energía estimado para el ciclismo sin carga (eficiencia de trabajo).

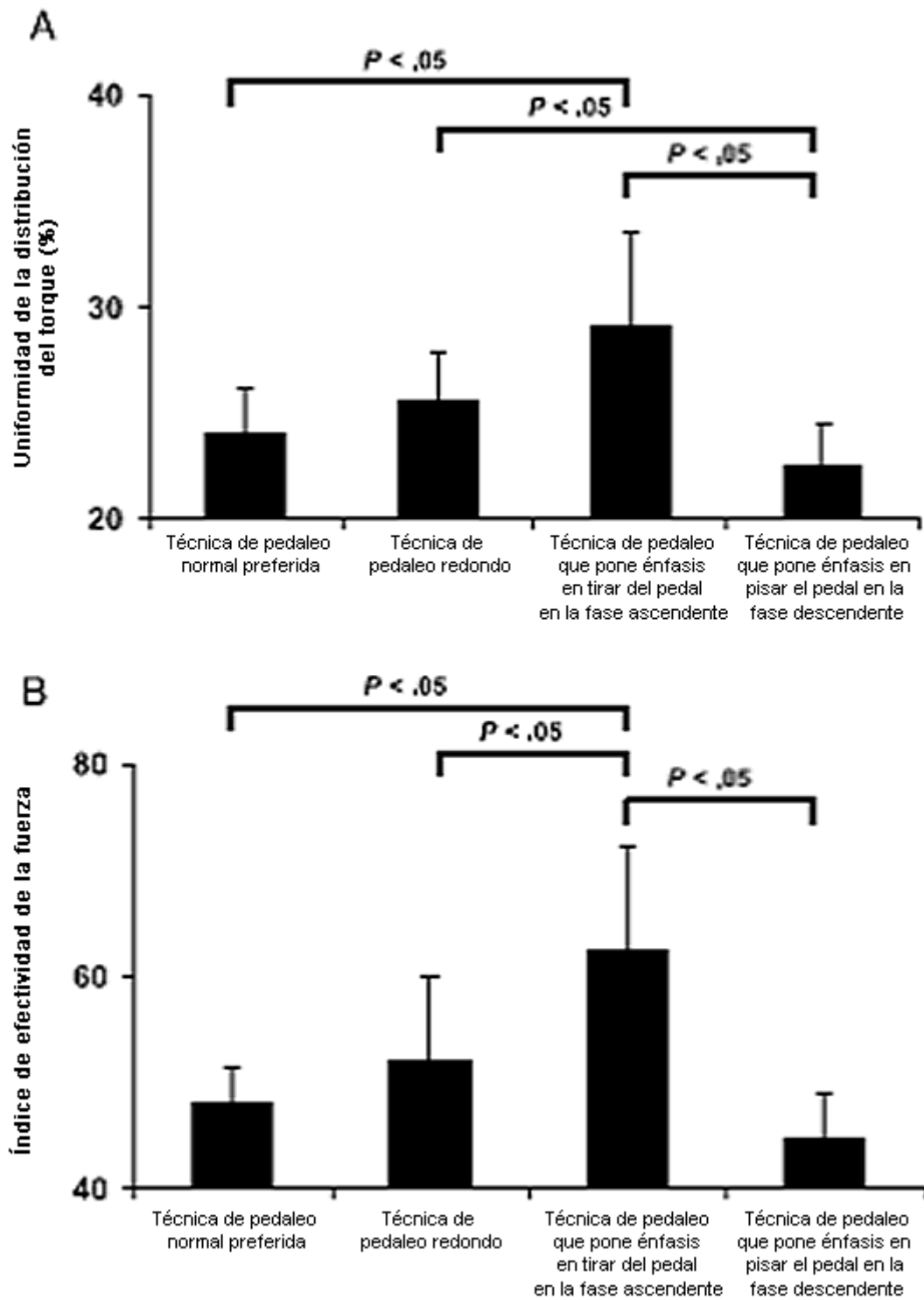


Figura 2. Efecto de la técnica de pedaleo en la uniformidad de la distribución de torque o ET (Panel A) y en el índice de efectividad de la fuerza o IFE (Panel B). Los datos se presentan en forma de medias grupales y desviación estándar.

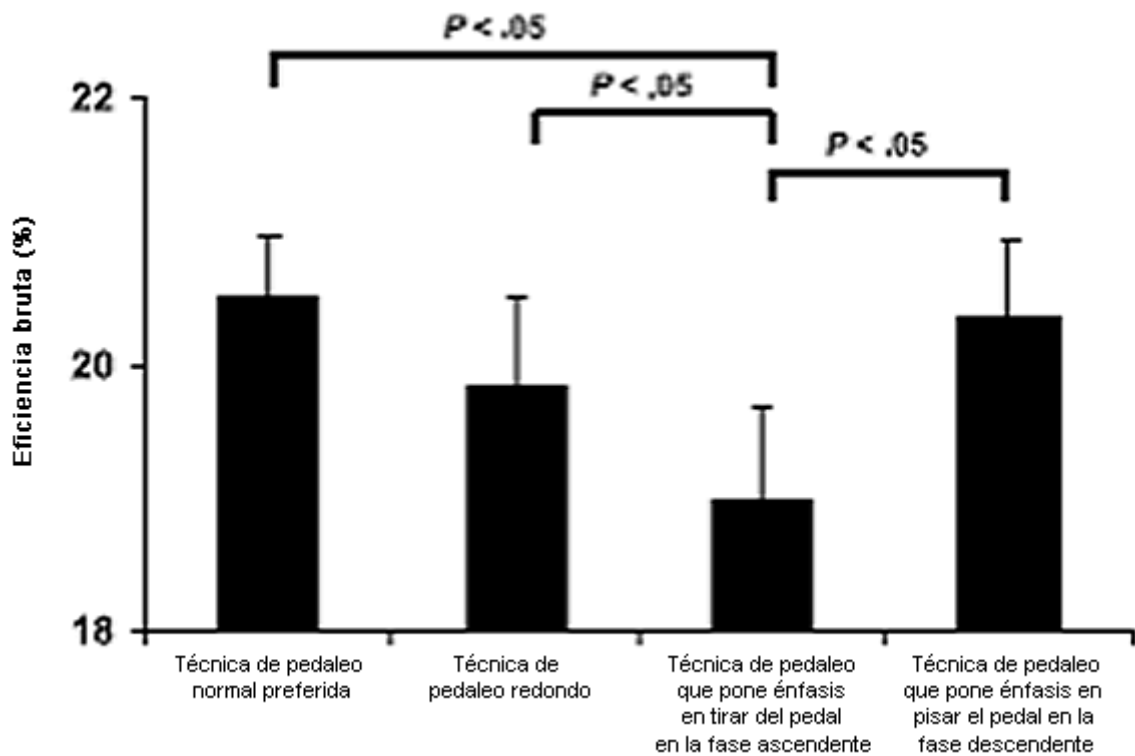


Figura 3. Efecto de la técnica de pedaleo sobre la eficiencia bruta (GE). Los valores se presentan en forma de medias grupales y desviaciones estándar.

DISCUSIÓN

El propósito de este estudio fue determinar la interacción entre la efectividad mecánica y eficiencia bruta en las diferentes técnicas de pedaleo en ciclistas competitivos. En apoyo de nuestra hipótesis, el índice de efectividad de la fuerza y la uniformidad de la distribución del torque a lo largo del ciclo de la biela no reflejaron la eficiencia bruta en las diferentes técnicas de pedaleo. Aunque los participantes eran mecánicamente muy efectivos durante la condición de pedaleo *pulling* (mayor índice de efectividad de fuerza y uniformidad de distribución del torque), eran metabólicamente menos eficientes.

Nuestros resultados demuestran que durante la condición de pedaleo preferido (*preferred*), redondo (*circling*) y *pushing*, se produjo una cantidad considerable de torque negativo (y por lo tanto trabajo mecánico negativo) durante la fase de recobro (ascendente). Durante la condición de pedaleo *pulling*, se produjo una cantidad de trabajo considerablemente menos negativo en la fase de ascenso (Figura 1). La mayor efectividad mecánica durante la condición *pulling* se tradujo en un mayor índice de efectividad de fuerza y una mayor uniformidad de distribución del torque. Teniendo presente que la eficiencia bruta fue menor durante la condición *pulling*, estos resultados demuestran que una técnica de pedaleo mecánicamente más efectiva no se asocia con una mayor eficiencia bruta. Asumiendo que el aumento en el trabajo mecánico durante la fase de ascenso se logró a través de una mayor producción de fuerza de los músculos flexores de los miembros inferiores, nuestros resultados sugieren que, dentro del contexto de ciclismo en estado estable, los músculos extensores pueden ser productores de potencia más eficientes que los músculos flexores.

Varios autores han observado una relación entre la efectividad mecánica y la eficiencia bruta en el ciclismo entre sujetos (6, 18). Nuestros resultados agregan información a la literatura existente ya que utilizamos un diseño intraindividual que nos permitió extraer conclusiones sobre la importancia de las instrucciones que se dan a los ciclistas sobre la técnica de pedaleo. Notablemente, la condición de pedaleando preferido fue significativamente diferente de las condiciones *pushing* o redondo (*circling*) en lo que se refiere a la eficiencia mecánica o a la eficiencia bruta. Quizás no es sorprendente que la técnica de pedaleo preferido haya sido la más eficiente metabólicamente (aunque no significativamente diferente de las condiciones de pedaleo redondo y la condición *pushing*), porque los participantes probablemente deben haber adoptado un estilo de pedaleo eficiente como resultado del entrenamiento y de las adaptaciones fisiológicas. Sin embargo, y mas

importante, es que el tipo de instrucción no influyó en la eficiencia bruta a menos que se les solicitara a los participantes que tiraran activamente del pedal. Nosotros podemos especular que durante el ciclismo en estado estable, la técnica de pedaleo puede no ser un determinante importante de rendimiento en ciclismo, porque una amplia gama de técnicas de pedaleo producen niveles similares de eficiencia bruta.

Nuestros resultados plantean dudas sobre la noción que afirma que distribuyendo el torque de la biela uniformemente a lo largo del ciclo de pedaleo se puede mejorar la eficacia. Animando a los ciclistas a aumentar al máximo la uniformidad de la distribución de torque de la biela, se fomentó un tirón activo durante la fase de ascenso que disminuyó la eficiencia bruta en nuestros sujetos. De manera similar, nuestros datos no apoyan la noción que pedalear en círculos puede mejorar la eficiencia, porque la eficiencia bruta no fue diferente entre la condición de pedaleo preferido y la condición de pedaleo redondo.

Antes de concluir que las instrucciones con respecto a la técnica pedaleo son contraproducentes o irrelevantes, es necesario considerar dos factores. Primero, es probable que los sistemas fisiológicos múltiples se adapten en respuesta al entrenamiento con una técnica de pedaleo específica. Nuestros datos apoyan esta especulación porque demuestran que en todos los participantes, la condición de pedaleo preferido presentó la mayor eficiencia bruta (aunque no significativamente diferente las condiciones de pedaleo redondo o pedaleo *pushing*). Sin embargo, una limitación de nuestro estudio, es que no descarta la posibilidad que pueda haber un estilo de pedaleo más eficiente si se proporciona a los participantes el tiempo suficiente para adaptarse a él. Se necesitan estudios longitudinales para explorar esta posibilidad. Segundo, nosotros estudiamos el efecto de la técnica de pedaleo en la efectividad mecánica y en la eficiencia bruta durante ciclismo en estado estable. Aunque nuestros resultados sugieren que tirando activamente del pedal se reduce la eficiencia bruta durante el ciclismo en estado estable, puede haber situaciones durante las cuales un tirón activo sea beneficioso en lo que se refiere a agregar potencia a la biela (por ejemplo, durante la realización de esprints de máxima potencia).

En conclusión, la efectividad mecánica no reflejó la eficiencia bruta en las diferentes técnicas de pedaleo durante el ciclismo en estado estable. Además, las instrucciones a los ciclistas para que emplearan una cierta técnica de pedaleo no produjeron cambios significativos en la efectividad mecánica y eficiencia bruta en comparación con lo observado cuando se utilizó la técnica de pedaleo preferido, a menos que se solicitara al ciclista que tirara activamente del pedal. Estos resultados sugieren que durante el pedaleo, los músculos extensores son productores de potencia más eficaces que los músculos flexores. Nuestros resultados tienen implicaciones prácticas y deben ser considerados cuando se crean planes o intervenciones de entrenamiento.

Esta investigación recibió el subsidio URB/02270/G de *The Nuffield Foundation*

Los resultados del presente estudio no constituyen una recomendación del producto por parte de los autores o del ACSM.

REFERENCIAS

1. Bannister, S. Technique. (2000). In: british cycling federation level 2 club coach award: training, j. Kelly and j. Mills (eds.). Leeds, Uk: coachwise ltd, pp. 1-22.
2. British triathlon association. (2000). Cycling technique (section 2). In: level 1 (course resource). Ashby-de la zouch, uk: british Triathlon association.
3. 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 (oxygen intake and carbonic acid output) and urine-n. *Acta physiol. Pharmacol. Neerl.* 6:795-802.
4. Carmichael, C. (2000). The power of pedaling. In: *the lance armstrong performance program*. Emmaus, pa: rodale, pp. 131-137.
5. Cavanagh, P. R., and D. J. (1995). Sanderson. *The biomechanics of cycling: studies of the pedaling mechanics of elite pursuit riders*. In: *science of cycling*, e. R. Burke (ed.). Champaign, il: human kinetics, pp. 91-122.
6. Coyle, E. F., M. E. Feltner, S. A. Kautz, et al. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med. Sci. Sports exerc.* 23:93-107.
7. Davis, R. R., and M., L., Hull. (1981). Measurement of pedal loading in bicycling: ii. *Analysis and results*. *J. Biomech.* 14:857-872.
8. Fregly, B. J., and F. E. Zajac. (1996). A state-space analysis of mechanical energy generation, absorption, and transfer during Pedaling. *J. Biomech.* 29:81-90.
9. Gaesser G. A. and G. A. (1975). Brooks. *Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate*. *J. Appl. Physiol.* 38:1132-1139.
10. Korff, T. and L. Jensen. (2007). Age-related differences in adaptation during childhood: the influences of muscular power production and segmental energy flow caused by muscles during pedaling. *Exp. Brain res.* 177:291-303.
11. Lafortune, M. A. and R. Cavanagh. (1983). Effectiveness and efficiency during bicycle riding. In: *biomechanics viib*, h. Matsui and k. Kobayashi (eds.). Champaign, il: human kinetics, Pp. 928-936,.

12. Moseley L. and E. Jeukendrup. (2001). The reliability of cycling efficiency. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33:621-627.
13. Neptune, R. R. and W. Herzog. (2000). Adaptation of muscle coordination to altered task mechanics during steady-state cycling. *J. Biomech.* 33:165-172.
14. Neptune, R. R., S. A. Kautz, and F. E. Zajac. (2000). Muscle contributions to specific biomechanical functions do not change in forward versus backward pedaling. *J. Biomech.* 33:155-164
15. Patterson. P. and I. Moreno. (1990). Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *Med. Sci. Sports Exerc.* 22:512-516.
16. Prilutsky, B. I and R. J. Gregory. (2000). Analysis of muscle coordination strategies in cycling. *IEEE trans. Rehabil. Eng.* 8:362-370.
17. Sanderson, D. J. (1991). The influence of cadence and power output on the biomechanics of force application during steady-rate cycling in competitive and recreational cyclists. *J. Sports sci.* 9:191-203.
18. Zameziati, K., G., Mornieux, D. Rouffet and A., Belli. (2006). Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power. *Eur. J. Appl. Physiol.* 96:274-281.

Cita Original

Korff, T., L. M. Romer, I. Mayhew and J. C. Martin. (2007). Effect of pedaling technique on mechanical effectiveness and efficiency in cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* vol. 39, no. 6, pp. 991-995.