

Article

Relación entre la Cadencia Seleccionada Librementemente y la Cadencia Optima en Ciclismo

Umberto Emanuele, Tamara Horn y Jachen Denoth

Institute for Biomechanics, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

RESUMEN

Objetivo: El objetivo principal de este estudio fue comparar la cadencia seleccionada libremente (FCC) con la cadencia en la cual se minimiza la concentración de lactato sanguíneo a una producción de potencia constante (cadencia óptima [Copt]). El segundo objetivo fue examinar el efecto que provoca un cambio simultáneo en la pendiente de la ruta y en la posición del cuerpo sobre la FCC, la producción de potencia máxima externa (Pmax) y la Copt correspondiente. **Métodos:** Se realizó un análisis de FCC, Copt y Pmax en dos condiciones: ciclismo en terreno llano con postura baja (LGDP) y ciclismo de ascenso con postura erguida (UHUP). Siete ciclistas experimentados participaron en este estudio. Los participantes realizaron ejercicios de ciclismo en una cinta rodante para analizar dos hipótesis principales: Los ciclistas experimentados seleccionarán una cadencia adecuada cercana a la Copt independientemente de la condición de pedaleo, y FCC y Copt serán más bajas y la Pmax será más alta en la condición UHUP que en la condición LGDP. **Resultados:** La mayoría pero no todos los ciclistas experimentados eligieron una cadencia adecuada cercana a la Copt. Independientemente de la condición de ciclismo, FCC y Copt no fueron estadísticamente diferentes. FCC ($82,1 \pm 11,1$ y $89,3 \pm 10,6$ rpm, respectivamente) y Copt ($81,5 \pm 9,8$ y $87,7 \pm 10,9$ rpm, respectivamente) y fueron significativamente más bajas en la condición UHUP que en la condición LGDP y además la Pmax fue significativamente mayor ($2,0 \pm 2,1\%$) en la condición UHUP que en la condición LGDP. **Conclusión:** Los ciclistas más experimentados eligen una cadencia cercana a la Copt para minimizar la fatiga periférica en una producción de potencia dada, independientemente de la condición de ciclismo. Además, se observó que es una ventaja utilizar una cadencia más baja y una posición de cuerpo más vertical durante el ciclismo en ascenso.

Palabras Clave: FCC, ascenso, terreno llano, posición corporal, producción de potencia

En las bicicletas modernas con cambios múltiples, el ciclista es libre de elegir cualquier relación de transmisión disponible para alcanzar la velocidad de pedaleo deseada. A su vez, la elección de la relación de transmisión a una determinada velocidad de pedaleo determina la cadencia. Por lo tanto, tal como señalan Vercruyssen y Brisswalter (1), la cadencia es una de las únicas variables que un atleta puede modificar durante la práctica de ciclismo para optimizar el rendimiento. Por lo tanto, desde que se desarrolló la bicicleta con múltiples combinaciones de platos y piñones en el último siglo XIX, el interés por la selección de la cadencia es cada vez mayor. Durante más de 100 años, ciclistas, entrenadores e investigadores han debatido sobre la selección de la cadencia. Incluso en los últimos 10 años, se han publicado varios estudios científicos sobre la cadencia seleccionada libremente (FCC), lo que demuestra que hay una discusión continua sobre la teoría y la práctica del ciclismo. La investigación ha demostrado que la FCC es una característica altamente individual y se ve afectada por varios factores "externos" (2). Se ha informado que la producción de potencia externa (Pext) (3), la pendiente de la ruta (4), las cargas inerciales de la manivela (3), el drafting (5), la fatiga (6), el entrenamiento, (7) la composición de fibras musculares, (8) y el ritmo circadiano (9) afectan la FCC. A pesar de esta intensa discusión, los factores subyacentes que conducen a la elección de una determinada cadencia siguen siendo objeto de debate. Teóricamente, los ciclistas deben elegir una "cadencia óptima" en donde se optimicen las variables fisiológicas y/o

biomecánicas. Sin embargo, varios estudios han documentado numerosas definiciones de "cadencia óptima" en ciclismo (para una revisión ver, por ejemplo, Marais y Pelayo (10)). El término *cadencia óptima* ha sido definido como la cadencia que produce la menor actividad EMG para un determinada Pext, (11) la cadencia que minimiza los momentos articulares sumados (12), la cadencia que produce la menor fatiga neuromuscular (13), la cadencia con la mayor Pext en un nivel de rendimiento específico (14) y la cadencia más eficaz para el gasto energético (15). La "paradoja de la cadencia" (16), que afirma que los ciclistas competitivos y los sujetos entrenados eligen una cadencia más elevada que la cadencia más eficiente (Ceff), ha sido un tema especialmente interesante en el pasado (17).

De mayor interés (al menos para un ciclista de ruta competitivo) es la cadencia que permite obtener el mejor rendimiento para ganar una carrera y no la cadencia mas eficiente (Ceff). Por lo tanto, aquí definiremos la cadencia óptima (Copt) como la cadencia que corresponde al punto mas elevado de la relación Pext-cadencia (Pmax) en un nivel de rendimiento que puede ser sostenido para una determinada tarea (14). Desde una perspectiva teórica, los ciclistas deben elegir una cadencia cercana a la Copt para maximizar Pext para la tarea dada o para minimizar la fatiga periférica en una Pext dado. Los resultados de estudios previos demostraron que tanto FCC (3) como Copt (18) eran significativamente más bajas durante el ciclismo en ascenso que durante el ciclismo en terreno llano con la misma postura corporal. En conjunto, estos resultados sugieren que tanto FCC como Copt se ven afectadas de manera similar por la pendiente de la ruta, pero ningún estudio ha analizado si la diferencia entre FCC y Copt es la misma, independiente de la pendiente de la carretera. Más aún, según nuestros conocimientos, ningún estudio ha comparado FCC y Copt en un nivel de rendimiento submáximo.

Un estudio realizado por Emanuele y Denoth (18) demostró que la pendiente de la ruta no sólo disminuyó la Copt, sino que también disminuyó la Pmax. Además, este estudio demostró que el cambio en la postura corporal desde una postura baja (DP) con las manos del ciclista colocadas sobre la parte baja de los manillares y los brazos extendidos completamente, hacia una postura erguida (UP) con las manos del ciclista ubicadas en la parte superior de los manillares y los brazos completamente extendidos aumentó significativamente la Pmax sin afectar la Copt correspondiente. Estos resultados llevaron a la conclusión de que Copt y FCC deberían ser más bajas y que Pmax debería ser mayor para ciclismo de ascenso con UP que para ciclismo en el llano con DP (18). Sin embargo, no se ha estudiado de manera experimental cual sería la influencia de un cambio simultáneo en la pendiente la ruta y la posición del cuerpo tal como se observa en el campo.

El objetivo principal de este estudio fue comparar FCC y Copt que se pueden mantener durante aproximadamente 1 hora en un nivel de rendimiento de resistencia. La hipótesis fue que a un nivel de rendimiento correspondiente al máximo estado estable de lactato (MLSS), los ciclistas experimentados seleccionarán una cadencia adecuada cercana a la Copt independientemente de la condición de pedaleo. El segundo objetivo de este estudio fue examinar el efecto en FCC, Copt y Pmax que tendría un cambio simultáneo en la pendiente la ruta y la postura corporal en un nivel de rendimiento de resistencia correspondiente al MLSS. La hipótesis planteada es que FCC y Copt serían más bajas y Pmax sería más alta en ciclismo de ascenso con una postura corporal erguida (UP) que en ciclismo realizado en el llano con una postura corporal baja (DP).

MÉTODOS

Sujetos

Siete ciclistas amateurs (31 ± 6 y, $182,0 \pm 4,5$ cm, $71,7 \pm 6,7$ kg) que habían competido a nivel nacional participaron voluntariamente en este estudio. Todos los participantes fueron informados de la naturaleza de este estudio, y del riesgo potencial y la incomodidad asociada con los procedimientos experimentales, antes de firmar el consentimiento informado para participar. El comité de ética de la ETH Zurich aprobó el diseño experimental del estudio.

Diseño experimental

Se solicitó a los sujetos que asistieran a 3 sesiones de prueba dentro de un período de 3 semanas con al menos 2 días de separación entre los días de prueba individuales. Para mejorar la confiabilidad de las mediciones, se solicitó a los participantes que controlaran una serie de variables; para mas detalles consultar los trabajos de Emanuele y Denoth (14, 18). El propósito de la primera sesión de prueba fue determinar la FCC individual y estimar la Pext individual en máximo estado estable de lactato (PMLSS). El propósito de la segunda y tercer sesiones de prueba fue estimar Copt y Pmax en MLSS pedaleando en un terreno llano con DP y en ascenso con UP, respectivamente.

Determinación de la cadencia seleccionada libremente (FCC).

Para determinar la FCC durante el ejercicio de ciclismo en el llano (FCCLG) los sujetos pedalearon con una postura

corporal baja (DP) en una ruta con una pendiente de 0% y una velocidad de 30,2 km/h. Durante esta prueba, se animó a los ciclistas a que efectuaran cambios de marchas y utilizaran los desarrollos con los cuales se sintieran mas cómodos. Sin embargo, debido a las limitadas relaciones de transmisión, existió limitación en las cadencias que podían seleccionar libremente (FCC). Sólo se podía elegir las siguientes cadencias: 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100 y 105 rpm. Después de una entrada en calor de 10 minutos a 100 W, la Pext se incrementó hasta alcanzar un nivel en el cual el ciclista pensaba que podía mantenerse durante aproximadamente 1 hora. Esta estimación subjetiva de PMLSS se alcanzó en 5 a 7 minutos. La Pext y los cambios se mantuvieron constantes durante 1 minuto, y se registraron la cadencia (FCC) y la Pext. Posteriormente los sujetos tuvieron un período de descanso de 20 minutos.

Para determinar la FCC durante el ciclismo en ascenso (FCCUH), se utilizó el mismo protocolo, excepto que los sujetos pedalearon con una postura corporal erguida (UP) en la cinta rodante con una pendiente de 7% y una velocidad de 15,1 km/h.

Test de Lactato Mínimo.

La determinación de la producción de potencia en el lactato mínimo (PLM) mediante un test de lactato mínimo (LMT) es un método confiable y válido para predecir el PMLSS y, por tanto, es un buen estimador del nivel específico de rendimiento de resistencia que se puede mantener durante aproximadamente 1 hora (19, 20). Durante el LMT, los participantes pedalearon con UP y con una cadencia constante de 80 rpm, lo que corresponde a la cadencia optima (Copt) media determinada por Emanuele y Denoth (18) en ejercicios de ciclismo realizados en bicicleta ergométrica. El método utilizado para determinar PLM se basó en la metodología de Fontana et al. (21) (Figura 1). Brevemente, el LMT consistió en 2 tests incrementales. El primer test incremental comenzó a 100 W y aumentó 50 W cada minuto hasta el agotamiento para inducir acidosis láctica, y luego continuó con 1 minuto a 100 W y 7 minutos de descanso completo (Parte 1). Después del período de descanso, se realizó un segundo test incremental que comenzó a 100 W y luego se incrementó 25 W cada 90 segundos (Parte 2). Durante el LMT, se realizó la medición continua de frecuencia cardiaca, consumo de oxígeno, producción de dióxido de carbono, ventilación por minuto y frecuencia respiratoria. La concentración de lactato en sangre (bLa) se midió en reposo, en el punto de agotamiento en la Parte 1, durante la recuperación en la Parte 1 (después de 2, 4 y 7,5 min), y al final de cada etapa en la Parte 2. Los niveles de bLa obtenidos en la Parte 2 del LMT se graficaron en función de la producción de potencia, y a través de estos puntos de datos se trazó una curva polinómica de tercer orden (21). El PLM corresponde al "lactato mínimo" en esta curva polinómica. PLM se utilizó como una estimación de PMLSS a 80 rpm, la intensidad de ejercicio necesaria para la segunda y tercera sesiones de prueba.

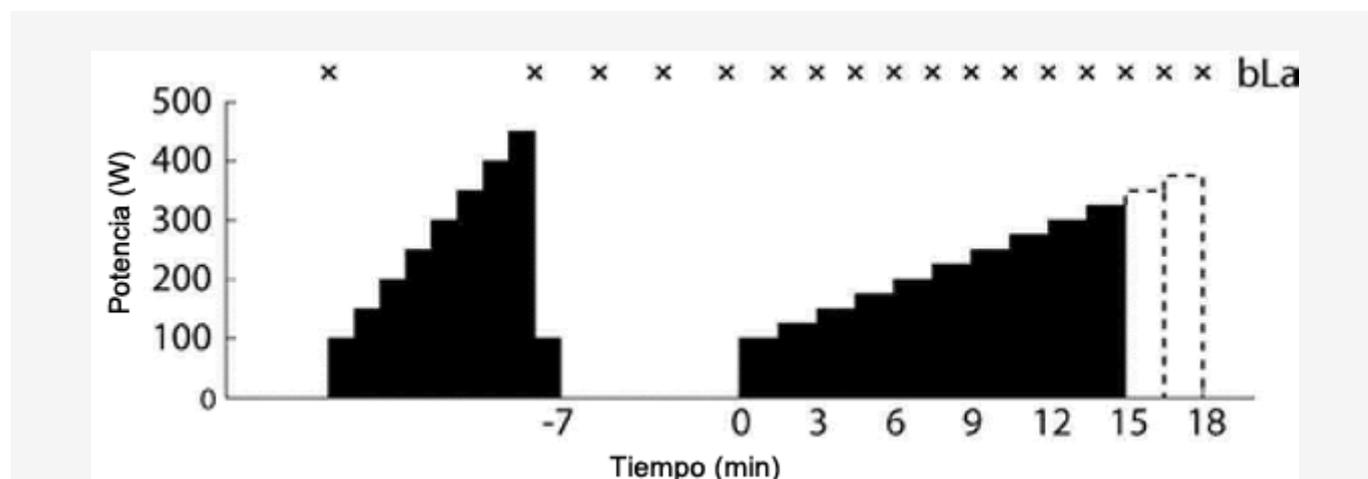


Figura 1. Esquema del protocolo para el test de lactato mínimo. El test consta de 2 test incrementales, separados por 1 minuto a 100 W y 7 minutos de descanso total. El primer test incremental comenzó a 100 W con incrementos de 50 W cada minuto hasta el agotamiento para inducir acidosis láctica. El segundo test incremental comenzó a 100 W con incrementos de 25 W cada 90 segundos. x = Mediciones de la concentración de lactato sanguíneo (bLa).

Determinación de la Cadencia Optima (Copt).

Para determinar la Copt en MLSS durante ciclismo en ascenso, los sujetos realizaron 3 tests de ejercicio incremental con las siguientes 3 cadencias: FCCUH-10 rpm, FCCUH y FCCUH + 10 rpm en orden aleatorio. Durante estas pruebas, los sujetos pedalearon con postura erguida (UP) en la cinta rodante con una pendiente del 7% a 15,1 km/h. En cada cadencia,

luego de la entrada en calor de 2 minutos a 100 W se realizó un test de ejercicio incremental que comprendía 4 incrementos de Pext (Figura 2): P80MLSS - 20 W (3 min), P80MLSS - 10 W (3 min), P80MLSS 2 min), y P80MLSS + 10 W (2 min). Luego del test incremental se realizó una vuelta a la calma (enfriamiento) de 2,5 minutos a 100 W. Entre los 3 tests de ejercicio incremental, los sujetos realizaron un descanso de 14 minutos para evitar la fatiga. El lactato sanguíneo (bLa) se midió al comienzo de la entrada en calor y al final de cada etapa de los tests de ejercicio incremental. Para determinar la Copt en MLSS, se analizó el incremento en bLa. El incremento de bLa desde el descanso hasta el final del test se graficó en función de la cadencia utilizada (Figura 3 [a]). Una línea de regresión polinomial de segundo orden fue ajustó a través de estos puntos de datos para determinar la relación entre bLa y cadencia. La Copt en MLSS se corresponde con el "lactato mínimo " de esta curva polinomial. Posteriormente se ajustó a Copt en MLSS y PMLSS a 80 rpm una curva cuadrática que pasara obligatoriamente por el origen para evaluar la Pmax individual en MLSS (Figura 3 [b])(14).

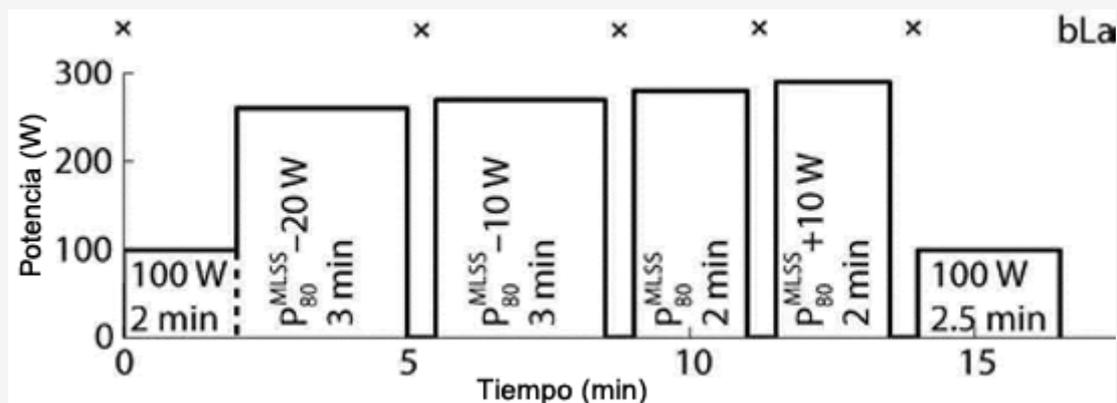


Figura 2. Esquema del protocolo para las sesiones de prueba 2 y 3. PMLSS80 = producción de potencia en estado estable máximo de lactato estimado con una prueba de lactato mínimo a 80 rpm. × = Mediciones de la concentración de lactato sanguíneo (bLa).

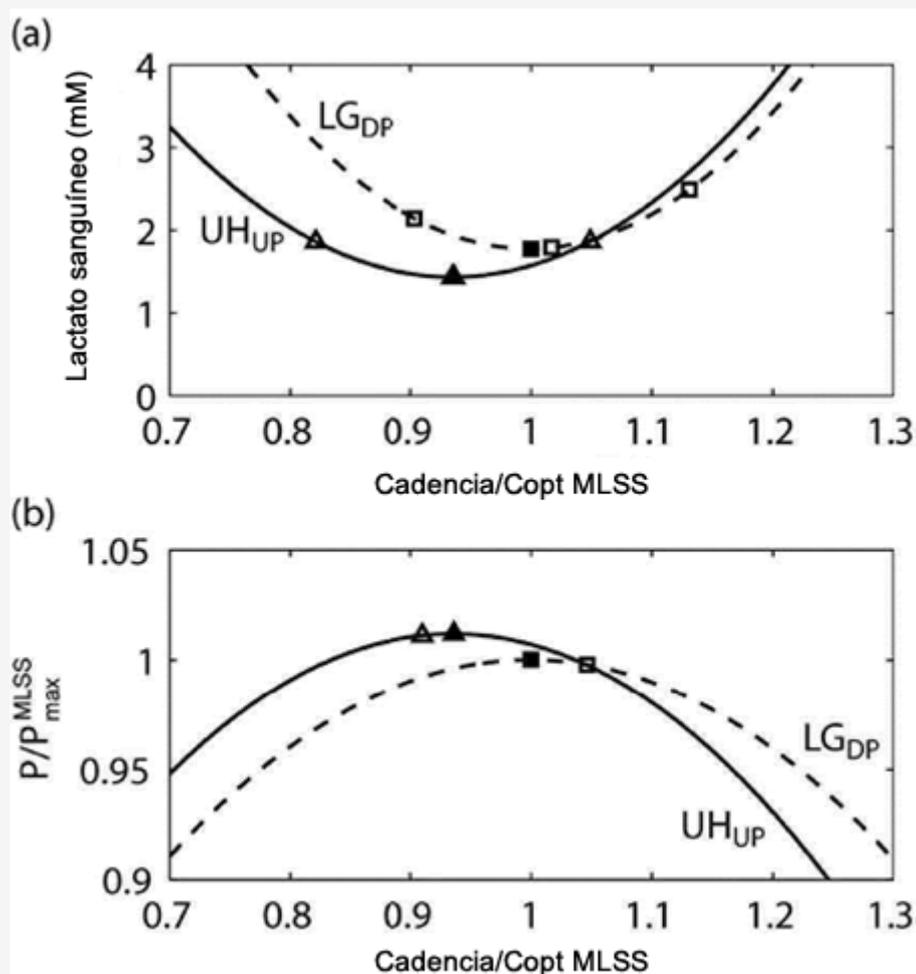


Figura 3. (a) Concentración de lactato en sangre (bLa) en relación con la cadencia. Los valores medios de la bLa en la cadencia seleccionada libremente (FCC), FCC-10 rpm y FCC+10 rpm se presentan para los ejercicios de ciclismo en ascenso (triángulos blancos) y para los ejercicios de ciclismo en el llano (cuadrados blancos). Curvas de regresión polinómicas de segundo orden se ajustaron a los datos de los ejercicios de ciclismo en el llano con postura corporal baja (LGDP, línea punteada) y para los ejercicios de ciclismo en ascenso con postura corporal vertical (UHUP, línea continua), para evaluar la cadencia óptima (Copt) en UHUP triángulo negro) y la Copt en LGDP (cuadrado negro). Las cadencias se normalizaron en función de la Copt en estado estable máximo de lactato (MLSS) para LGDP. (b) Relación entre potencia y cadencia en el nivel de rendimiento correspondiente a MLSS. Para evaluar la producción de potencia máxima (Pmax) en MLSS para UHUP, se ajustó una curva cuadrática (línea continua) obligada para pasar a través del origen en la Copt evaluada para UHUP (triángulo negro) y en la producción de potencia en MLSS estimada con el test de mínimo de lactato a 80 rpm (P80MLSS, triángulo blanco). Para evaluar Pmax en MLSS para LGDP (cuadrado negro) se utilizó la Pext para UHUP correspondiente al punto de intersección de las 2 relaciones bLa-cadencia (cuadrado blanco) para ajustar una curva cuadrática que pasara por el origen (línea punteada). Estas producciones de potencia y cadencias fueron normalizadas en función de Pmax en MLSS y de la correspondiente cadencia óptima (Copt en MLSS) para LGDP.

Para determinar Copt en MLSS en el ciclismo en el llano, se utilizó el mismo protocolo, excepto que la cinta rodante fue ajustada para una inclinación de 0%, la velocidad aumentó a 30,2 km/h y los participantes pedalearon con una postura corporal baja (DP). La relación bLa-cadencia para el ciclismo en el llano se comparó luego con la relación bLa-cadencia para el ciclismo en ascenso. La Pext para el ciclismo en ascenso con postura corporal erguida (UP) correspondiente al punto de intersección de las 2 relaciones bLa-cadencia, se utilizó para ajustar una curva cuadrática con paso por el origen para evaluar la Pmax individual en MLSS para el ciclismo en el llano con DP.

Equipamiento

En todos los tests, los sujetos realizaron los ejercicios en una bicicleta de carreras normal con coronas para cadenas con 24-36-48 dientes y un conjunto de piñones de 12-13-14-15-17-18-19-20-21-24 dientes. La bicicleta se ajustó de manera que la ubicación vertical y horizontal del sillín y el manillar en relación al eje de bielas coincidiera con la de la bicicleta de cada sujeto. La bicicleta de carreras estaba equipada con una biela estándar (longitud = 170 mm), pedales automáticos y un

potenciómetro profesional (8 bandas extensométricas) *SRM PowerMeter (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Alemania)*. La Pext, la cadencia y la frecuencia cardíaca fueron registradas con el SRM PowerMeter. Durante todos los tests excepto el LMT, la bicicleta fue montada en una cinta rodante (Woodway, Weilam Rhein, Alemania). Para ello, la bicicleta fue fijada con la horquilla a un carro de deslizamiento, que permitió el traslado horizontal de la bicicleta en relación al laboratorio (Figura 4). La Pext se ajustó cambiando los pesos de un cargador de pesos. Este cargador fue conectado a un cable que corría sobre una polea colocada detrás de la cinta y estaba sujeto a la parte trasera de la bicicleta (3, 22). La masa necesaria para alcanzar la Pext deseada se calculó para cada sujeto sobre la base de su Pext medida sin el cargador de pesos. Durante el test LMT, la bicicleta fue montada en un *indoor trainner (Flow, Tacx, Wassenaar, Países Bajos)*. Las variables de intercambio gaseoso y de ventilación se midieron respiración por respiración con un dispositivo *Oxycon Mobile (Viasys Healthcare, Höchberg, Alemania)*. La concentración de lactato en las muestras de sangre (20 μ L) tomadas a partir del lóbulo de la oreja se analizó con un analizador *Biosen C-Line (EKF Industrie-Elektronik, Barleben, Alemania)*.



Figura 4. Bicicleta estándar montada en la cinta rodante. La horquilla se fijó al carro deslizante, lo que permitió el movimiento horizontal de la bicicleta en relación con el laboratorio (30 cm).

Análisis Estadísticos

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SPSS Statistics 17 (SPSS Inc, Chicago, IL). El nivel de significancia se estableció en $P < 0,05$. Sobre la base del coeficiente de variación estimado medido para la bLa del 5%, el intervalo de confianza (IC) del 95% para determinar la Copt individual en MLSS (Figura 5) se calculó utilizando el método de bootstrap residual basado en modelos para regresión (14, 18). Suponiendo que los ciclistas utilizarían la cadencia inmediatamente mayor (Copt+) o menor (Copt-) posible de la Copt real (Copt*) (Figura 5), el IC teórico del 95% para la diferencia entre FCC y Copt medida/estimada en MLSS (ΔC) se calculó utilizando el IC del 95% para la Copt individual en MLSS y las relaciones de transmisión disponibles. Los IC de 95% teóricos para ΔC también se calcularon asumiendo que los ciclistas eligieron Copt+ + 5 rpm o Copt- - 5 rpm. La potencia estadística para detectar un ΔC relevante por encima de 5 rpm se calculó para un tamaño de muestra de 7. Todos los valores de los parámetros se compararon usando el Test *t* de Student de muestras pareadas. Las variables fueron sintetizadas con estadística descriptiva (media \pm DE).

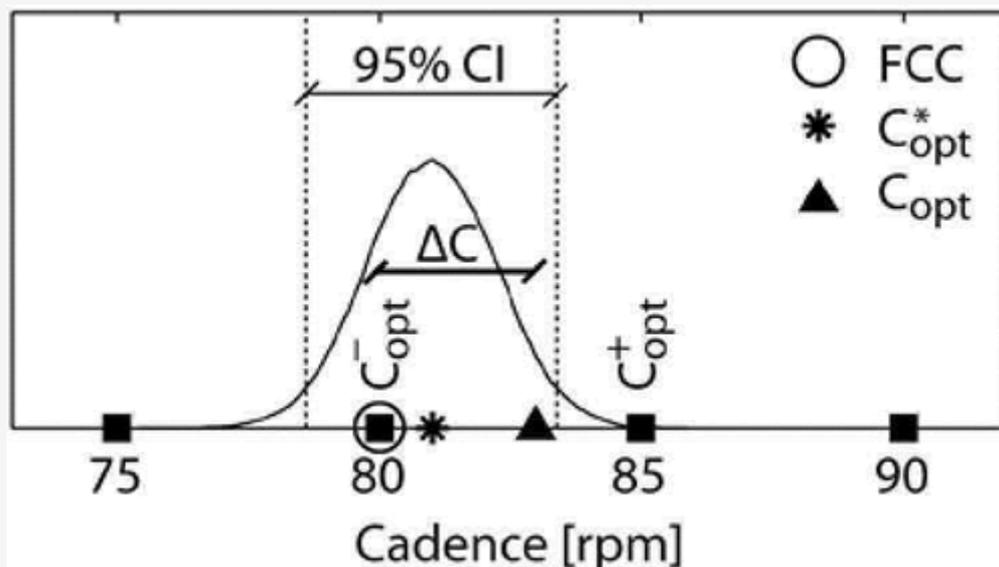


Figura 5. Esquema de las diferentes cadencias. Los cuadrados negros indican las cadencias disponibles que el ciclista puede elegir. El círculo blanco marca la cadencia seleccionada libremente por el ciclista (FCC). El asterisco (*) marca la cadencia óptima real (C_{opt}^*). El triángulo negro marca la cadencia óptima medida/estimada (C_{opt}). C_{opt-} es la cadencia disponible inmediatamente más baja que C_{opt}^* . C_{opt+} es la cadencia inmediatamente más alta disponible para C_{opt}^* . ΔC es la diferencia entre FCC y C_{opt} . Se presenta la distribución posible de C_{opt} usando el método de determinación de C_{opt} descrito en este estudio (línea sólida delgada). Las líneas punteadas delimitan el intervalo de confianza (IC) del 95% para evaluar C_{opt} .

RESULTADOS

Sobre la base del coeficiente de variación para el aumento medido en bLa, el bootstrap residual arrojó un IC del 95% para la evaluación de la C_{opt} individual en MLSS de 4,8 rpm (Figura 6 [a]). Asumiendo que los ciclistas utilizaron C_{opt+} o C_{opt-} , el IC del 95% teórico para ΔC fue de $0 \pm 7,4$ rpm (Figura 6 [b]). Durante el ejercicio de ciclismo realizado en el llano, el ΔC de todos los ciclistas estaba dentro de este IC, y durante el ciclismo en ascenso la diferencia de 1 ciclista se ubicó fuera de este IC. Asumiendo que los ciclistas utilizaron una $C_{opt+} + 5$ rpm o $C_{opt-} - 5$ rpm, los IC del 95% teóricos para ΔC fueron $7,5 \pm 3,7$ rpm y $-7,5 \pm 3,7$ rpm. En el ejercicio de ciclismo realizado en el llano, el ΔC de 6 ciclistas se ubicó fuera de este IC, y en el ejercicio de ciclismo en ascenso, el ΔC de 4 ciclistas se ubicó fuera de este IC. Por lo tanto, durante el ejercicio de ciclismo en el llano, 6 ciclistas utilizaron C_{opt+} o C_{opt-} y 1 ciclista C_{opt+} o $C_{opt+} + 5$ rpm. En el ejercicio de ciclismo en ascenso, 4 ciclistas utilizaron C_{opt+} o C_{opt-} , 1 ciclista utilizó C_{opt-} o $C_{opt-} - 5$ rpm y 1 ciclista utilizó $C_{opt+} + 5$ rpm.

En el ciclismo ascendente con UP y en el ciclismo en el llano con DP, la FCC y C_{opt} determinadas en MLSS no fueron significativamente diferentes. La potencia estadística para detectar una diferencia relevante de 5 rpm entre FCC y C_{opt} en MLSS fue de 0,84 para un tamaño muestral de 7 participantes.

La FCC en PMLSS auto-seleccionada subjetiva (278 ± 30 W) fue significativamente menor ($P < 0,05$) cuando se realizó el ejercicio de ciclismo ascenso con UP ($82,1 \pm 11,1$ rpm) que cuando se realizó el ejercicio en el llano con DP ($89,3 \pm 10,6$ rpm). La PMLSS a 80 rpm estimada usando el LMT fue de 261 ± 24 W. La C_{opt} individual evaluada en MLSS fue significativamente mayor ($P < 0,01$) para el ejercicio de ciclismo en el llano con DP ($87,7 \pm 10,9$ rpm) que para el ejercicio en ascenso con UP ($81,5 \pm 9,8$ rpm). La C_{opt} en MLSS para el ejercicio de ciclismo en el llano fue de $7,5\% \pm 2,3\%$ superior a la de ciclismo en ascenso. Por último, la P_{max} en MLSS fue significativamente mayor ($2,0\% \pm 2,1\%$, $p < 0,05$) en el ejercicio de ciclismo en subida con UP que para el ejercicio de ciclismo en el llano con DP (Figura 3 [b]).

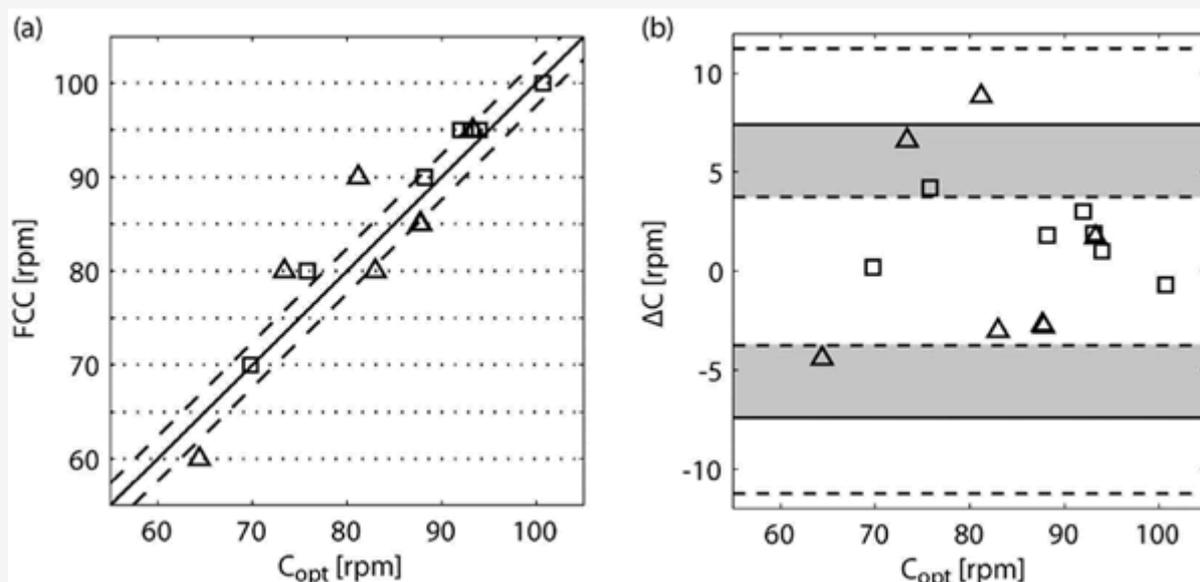


Figura 6. (a) Relación entre la cadencia óptima (C_{opt}) y cadencia seleccionada libremente (FCC). Se presentan los datos pertenecientes a todos los sujetos ($n=7$) obtenidos en los ejercicios de ciclismo en ascenso con postura erguida (triángulos blancos) y ejercicios de ciclismo en el llano con postura baja (cuadrados blancos). La línea continua representa la línea de identidad ($FCC = C_{opt}$). El intervalo de confianza (IC) del 95% para evaluar C_{opt} está representado por las 2 líneas discontinuas. Las líneas punteadas marcan las cadencias disponibles que el ciclista podría elegir. b) Diferencias individuales entre FCC y C_{opt} (ΔC). Se muestran los ΔC para los ejercicios de ciclismo en ascenso con postura erguida y los ejercicios en el llano con postura baja para todos los sujetos ($n = 7$). Las líneas continuas marcan el IC 95% teórico para ΔC suponiendo que los ciclistas habían escogido la cadencia inmediatamente más alta ($C_{opt}+$) o más baja ($C_{opt}-$) posible con respecto a la C_{opt} real. Las líneas punteadas marcan los IC de 95% teóricos para ΔC suponiendo que los ciclistas seleccionaban la cadencia inmediatamente más alta $C_{opt}+ + 5$ rpm o $C_{opt}- - 5$ rpm. La zona gris marca la intersección de 2 IC. En los datos de esta zona gris no fue posible determinar si los ciclistas utilizaron $C_{opt}+$ o $C_{opt}+ + 5$ rpm o $C_{opt}-$ o $C_{opt}- - 5$ rpm.

DISCUSIÓN

FCC y C_{opt}

El propósito principal de este estudio fue comparar FCC y C_{opt} en un nivel de rendimiento de resistencia que correspondía a MLSS. La hipótesis que planteamos fue que los ciclistas experimentados elegirían una cadencia adecuada cercana a la C_{opt} independientemente de la condición en que pedalearan. Los resultados revelaron que la mayoría, pero no todos los ciclistas experimentados, seleccionan la cadencia inmediatamente por arriba ($C_{opt}+$) o la inmediatamente por debajo ($C_{opt}-$) de la C_{opt} posible, independientemente de la condición en que pedaleen. Sin embargo, los resultados también demostraron que, independientemente de la pendiente que tenga la ruta y la posición corporal, la FCC y la C_{opt} en MLSS no fueron significativamente diferentes. En este punto debemos señalar que la potencia estadística para detectar una diferencia entre FCC y C_{opt} en MLSS fue mayor a 0,8 sólo para una diferencia asumida de 5 rpm entre FCC y C_{opt} en MLSS. Por otro lado, una diferencia entre FCC y C_{opt} en MLSS inferior a 5 rpm no es relevante desde un punto de vista relacionado con el rendimiento, porque dicha diferencia reduce la Pext menos del 0,5% (14). Además, la mayor parte de las diferencias individuales entre FCC y C_{opt} en MLSS pueden ser atribuidas a las discretas relaciones de transmisión disponibles y a la precisión en la determinación de la C_{opt} en MLSS.

De acuerdo con Emanuele y Denoth (14), la C_{opt} se define como la cadencia que corresponde al punto máximo de la relación Pext-cadencia a un nivel de rendimiento específico, por ejemplo, en una determinada bLa. Desde una perspectiva teórica, la C_{opt} puede ser evaluada indirectamente midiendo diferentes variables con Pext constante mientras se manipula la cadencia. Una de estas variables indicativas es la bLa. Emanuele y Denoth (14) demostraron que para evaluar la C_{opt} en una dada bLa, la relación Pext-cadencia puede ser fijada usando una línea de regresión cuadrática que pase por el origen. Este resultado implica que C_{opt} también puede ser evaluada usando una relación cuadrática de bLa-cadencia con Pext constante. Por lo tanto, los resultados de este estudio confirman la hipótesis de que la mayoría de los ciclistas competitivos elegirían una cadencia cercana a C_{opt} para minimizar la fatiga periférica en una determinada Pext o para maximizar la Pext para la tarea dada. Esta suposición ha sido planteada por diferentes autores, pero nunca ha sido demostrada

experimentalmente. Las siguientes variables adicionales indicativas de la Copt a Pext constante han sido analizadas previamente: Fatiga neuromuscular (13), actividad EMG (11, 23) y tiempo hasta el agotamiento (24). Todos los conjuntos de datos individuales de estos estudios fueron ajustados a una curva de regresión polinómica de segundo orden ($R^2 = 0,88$ a $0,99$) para evaluar Copt. Sin embargo, ninguno de estos estudios analizó la Copt y la comparó con FCC. Por lo tanto, este es el primer estudio que demuestra que la mayoría de los ciclistas competitivos eligen una cadencia adecuada cercana a la Copt individual en un nivel específico de rendimiento de resistencia. Por otra parte, la comparación entre ciclismo en el llano con postura corporal baja (DP) y ciclismo en ascenso con postura corporal erguida (UP) reveló que no sólo las diferencias en FCC entre los individuos, sino que también las diferencias en FCC dentro de un mismo individuo están relacionadas con la Copt. Estas son indicaciones experimentales de una relación causal entre FCC y Copt. Esta relación también puede ser deducida a partir de la disminución, tanto en FCC (6) como de Copt (25), a medida que aumentaba la fatiga. Así, la paradoja de la cadencia (16) se resuelve porque la mayoría de los ciclistas competitivos eligen una cadencia cercana a la Copt, que es claramente una cadencia más alta que la cadencia más eficiente. Kohler y Boutellier (16) ya explicaron que la FCC es superior a la Ceff. En su estudio teórico, concluyeron que la FCC no es fija si no que depende de la duración de la carrera y de los rangos de Copt y Ceff. Sin embargo, en su conclusión, descuidaron el hecho de que no sólo la FCC, sino también la Copt y la Ceff dependen del nivel de rendimiento o, más bien, de la duración de la carrera (14, 26). Incluso su propio cálculo demostró que Copt, Ceff y la diferencia entre estas cadencias dependen de nivel de rendimiento o, más bien, del reclutamiento de fibras de tipo II. Por lo tanto, una variación en la diferencia entre Ceff y FCC puede ser explicada por el cambio en la diferencia entre Copt y Ceff. Otros estudios que han intentado explicar la paradoja de la cadencia observaron una menor diferencia entre FCC y Ceff con la fatiga (6, 17, 27). Por ejemplo, Argentin et al, (27), observaron un cambio significativo en la FCC (87-68 rpm) hacia Ceff (65 rpm) después de 2 horas de ciclismo al 65% de la potencia aeróbica máxima. A medida que la Copt disminuye con la fatiga, que proviene principalmente de un aumento en la potencia interna, (14) la menor diferencia entre FCC y Ceff con la fatiga también podría ser explicada por la menor diferencia entre Copt y Ceff con la fatiga. Lamentablemente, ningún estudio ha analizado simultáneamente la influencia de la fatiga en FCC, Copt y Ceff para confirmar este supuesto teórico.

La hipótesis de que la mayoría de los ciclistas competitivos seleccionarían una cadencia cercana a la Copt debe ser confirmada en futuros estudios que analicen simultáneamente la influencia de otros factores "externos" en la FCC y la Copt. Los factores de interés podrían incluir Pext, fatiga, entrenamiento, composición de fibras musculares, altura del sillín y longitud de la biela. Además, no se supone que todos los ciclistas de la competencia eligieron una cadencia óptima. Por lo tanto, el porcentaje de ciclistas que eligieron una cadencia demasiado alta o demasiado baja debe estimarse en un futuro estudio utilizando un gran número de sujetos. Los estudios también deben ser realizados con ciclistas recreacionales y sujetos que no sean ciclistas para demostrar si los sujetos eligen una cadencia óptima independiente de la experiencia en ciclismo. Se recomienda realizar estudios futuros donde se contemple una mayor cantidad de cadencias para mejorar la precisión en la determinación de la Copt.

Comparación entre ciclismo en el llano y ciclismo en ascenso

Al comparar el ciclismo en el llano con DP y el ciclismo en ascenso con UP, este estudio tuvo un segundo objetivo: determinar la influencia de un cambio concomitante en la pendiente de la ruta y la posición del cuerpo en la FCC, Pmax y Copt. En lo que respecta a la FCC, los estudios experimentales revelaron que la misma está influenciada por la pendiente de la ruta (3), pero no por la posición del cuerpo (28). Por lo tanto, un cambio concomitante en la pendiente de la ruta y la posición del cuerpo debería teóricamente tener la misma influencia en FCC que el cambio en la pendiente de la ruta solo. Nuestros resultados en la cinta rodante apoyan los resultados de Hansen et al (3) que también observaron una menor FCC cuando los sujetos pedaleaban cuesta arriba en una cinta rodante (69 rpm a 150 W y 73 rpm a 250 W) que cuando pedaleaban en el llano (75 rpm a 150 W y 82 rpm a 250 W). Estos resultados también coinciden con las observaciones obtenidas en ciclistas durante su entrenamiento normal (29) o durante las competencias (30). Un estudio previo demostró que un cambio en la pendiente de la ruta (0 vs 7%) solamente afectó a Pmax y Copt y que un cambio en la posición corporal (DP vs UP) influenció solamente la Pmax pero no la Copt (18). Estos resultados llevaron a la hipótesis de que Copt sería menor y Pmax mayor para el ciclismo en ascenso con postura erguida (UP) que para ciclismo en el llano con postura baja (DP). Esta hipótesis fue confirmada experimentalmente.

Aplicaciones prácticas

Los resultados de este estudio sugieren que la mayoría de los ciclistas competitivos eligen libremente una cadencia cercana a la Copt para minimizar la fatiga en una Pext dada. Por lo tanto, los atletas no deben intentar copiar la cadencia usada por los ciclistas exitosos, y los entrenadores deben evitar forzar a atletas a utilizar una determinada cadencia. De ser así, algunos ciclistas elegirían libremente una cadencia demasiado alta o demasiado baja. Por lo tanto, la comparación entre la FCC individual y la Copt individual en un nivel específico de rendimiento de resistencia es un método adecuado para optimizar el rendimiento.

Los resultados de la segunda parte de este estudio confirmaron que bajo condiciones reales de ciclismo es ventajoso, desde

un punto de vista relacionado con el rendimiento, utilizar una cadencia más baja y una posición corporal más vertical durante el ciclismo en subida.

CONCLUSIÓN

A pesar de la intensa discusión sobre la FCC en el ciclismo, los factores subyacentes que llevan a los ciclistas a elegir una determinada cadencia siguen siendo debatidos. Este estudio demostró que las diferencias en la FCC interindividuales y dentro de un mismo individuo, están relacionadas con diferencias en la Copt. Estos resultados indican una relación causal entre la FCC y la Copt. Como se esperaba desde una perspectiva teórica, la mayoría de los ciclistas escogen libremente una cadencia cercana a la Copt para minimizar la fatiga periférica en una Pext dada o para maximizar la Pext para una tarea dada. Así, hemos resuelto la paradoja de la cadencia, que afirma que los ciclistas competitivos eligen una cadencia más alta que la Ceff.

Por otra parte, al comparar el ciclismo en el llano con DP y el ciclismo en ascenso con UP, este estudio confirmó que, en condiciones reales de ciclismo, es ventajoso utilizar una cadencia más baja y una posición corporal más erguida cuando se realiza ciclismo de ascenso.

Agradecimientos.

Estos estudios fueron apoyados por el Consejo Federal Suizo de Deportes (ESK / BASPO). Los autores agradecen a los sujetos por haber participado en el estudio. También agradecen a Marco Hitz y Peter Schwilch por el soporte técnico brindado.

REFERENCIAS

1. Vercruyssen F., Brisswalter J. (2010). Which factors determine the freely chosen cadence during submaximal cycling? *J. Sci. Med. Sport.* 13(2):225-231. *PubMed* doi:10.1016/j.jsams.2008.12.631
2. Hansen E.A., Smith G. (2009). Factors affecting cadence choice during submaximal cycling and cadence influence on performance. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 4(1):3-17.
3. Hansen E.A., Jorgensen L.V., Jensen K., Fregly B.J., Sjogaard G. (2002). Crank inertial load affects freely chosen pedal rate during cycling. *J. Biomech.* 35(2):277-285 *Erratum in J Biomech. 2002.35(2):1521. PubMed* doi:10.1016/S0021-9290(01)00182-8
4. Lucia A., Hoyos J., Chicharro J.L. (2001). Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33(8):1361-1366. *PubMed*
5. Hausswirth C., Lehenaff D., Dreano P., Savonen K. (1999). Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent run-nig performance during a triathlon. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31(4):599-604. *PubMed* doi:10.1097/00005768-199904000-00018
6. Vercruyssen F., Hausswirth C., Smith D., Brisswalter J. (2001). Effect of exercise duration on optimal pedaling rate choice in triathletes. *Can. J. Appl. Physiol.* 26(1):44-54.
7. Hausswirth C., Argentin S., Bieuzen F., Le Meur Y., Couturier A., Brisswalter J. (2010). Endurance and strength training effects on physiological and muscular parameters during prolonged cycling. *J. Electromyogr. Kinesiol.* 20(2):330-339. doi:10.1016/j.jelekin.2009.04.008.
8. Hansen E.A., Andersen J.L., Nielsen J.S., Sjogaard G. (2002). Muscle fibre type, efficiency, and mechanical optima affect freely chosen pedal rate during cycling. *Acta Physiol. Scand.* 176(3):185-194. *PubMed* doi:10.1046/j.1365-201X.2002.01032.x
9. Moussay S., Dosseville F., Gauthier A., Larue J., Sesboue B., Davenne D. (2002). Circadian rhythms during cycling exercise and finger-tapping task. *Chronobiol. Int.*;19(6):1137- 1149. *PubMed* doi:10.1081/CBI-120015966
10. Marais G., Pelayo P. (2003). Cadence and exercise: physiological and biomechanical determinants of optimal cadences practical applications. *Sports Biomech.* 2(1):103- 132. *PubMed* doi:10.1080/14763140308522811
11. MacIntosh B.R., Neptune R.R., Horton J.F. (2000). Cadence, power, and muscle activation in cycle ergometry. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32(7):1281-1287. *PubMed* doi:10.1097/00005768-200007000-00015
12. Marsh A.P., Martin P.E., Sanderson D.J. (2000). Is a joint moment-based cost function associated with preferred cycling cadence? *J. Biomech.* 33(2):173-180. *PubMed* doi:10.1016/S0021-9290(99)00155-4
13. Takaishi T., Yasuda Y., Ono T., Moritani T. (1996). Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28(12):1492-1497. *PubMed*
14. Emanuele U., Denoth J. (2012). Power-cadence relationship in endurance cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 112(1):365- 375. *PubMed* doi:10.1007/s00421-011-1987-z
15. Coast J.R., Welch H.G. (1985). Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 53(4):339-342. *PubMed* doi:10.1007/BF00422850

16. Kohler G., Boutellier U. (2005). The generalized force-velocity relationship explains why the preferred pedaling rate of cyclists exceeds the most efficient one. *Eur. J. Appl. Physiol.* 94(1-2):188-195. *PubMed* doi:10.1007/s00421-004-1283-2
17. Brisswalter J., Hausswirth C., Smith D., Vercruyssen F., Vallier J.M. (2000). Energetically optimal cadence vs. *freely-chosen cadence during cycling: effect of exercise duration*. *Int. J. Sports Med.* 21(1):60-64. *PubMed* doi:10.1055/s-2000-8857
18. Emanuele U., Denoth J. (2012). Influence of road incline and body position on power-cadence relationship in endurance cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 112(7):2433-2441. doi:10.1007/s00421-011-2213-8. *PubMed*
19. Baron B., Noakes T.D., Deckerle J., et al. (2008). Why does exercise terminate at the maximal lactate steady state intensity? *Br. J. Sports Med.*;42(10):828-833. *PubMed* doi:10.1136/bjism.2007.040444
20. Tegtbur U., Busse M.W., Braumann K.M. (1993). Estimation of an individual equilibrium between lactate production and catabolism during exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25(5):620-627. *PubMed*
21. Fontana P., Boutellier U., Knopfi-Lenzin C. (2009). Time to exhaustion at maximal lactate steady state is similar for cycling and running in moderately trained subjects. *Eur. J. Appl. Physiol.* 107(2):187-192. *PubMed* doi:10.1007/s00421-009-1111-9
22. Coleman D.A., Wiles J.D., Davison R.C., Smith M.F., Swaine I.L. (2007). Power output measurement during treadmill cycling. *Int. J. Sports Med.* 28(6):525-530. *PubMed* doi:10.1055/s-2006-955888
23. Marsh A.P., Martin P.E. (1995). The relationship between cadence and lower extremity EMG in cyclists and noncyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27(2):217-225. *PubMed*
24. Nielsen J.S., Hansen E.A., Sjogaard G. (2004). Pedalling rate affects endurance performance during high-intensity cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 92(1-2):114-120. *PubMed* doi:10.1007/s00421-004-1048-y
25. MacIntosh B.R., Svedahl K., Kim M. (2004). Fatigue and optimal conditions for short-term work capacity. *Eur. J. Appl. Physiol.* 92(4-5):369-375. *PubMed* doi:10.1007/s00421-004-1177-3
26. Foss O., Hallen J. (2004). The most economical cadence increases with increasing workload. *Eur. J. Appl. Physiol.* 92(4-5):443-451. *PubMed* doi:10.1007/s00421-004-1175-5
27. Argentin S., Hausswirth C., Bernard T., et al. (2006). Relation between preferred and optimal cadences during two hours of cycling in triathletes. *Br. J. Sports Med.* 2006;40(4):293-298, discussion 298. *PubMed* doi:10.1136/bjism.2005.020487
28. Jobson S.A., Nevill A.M., George S.R., Jeukendrup A.E., Passfeld L. (2008). Influence of body position when considering the ecological validity of laboratory time-trial cycling performance. *J. Sports Sci.* 26(12):1269-1278. *PubMed* doi:10.1080/02640410802183585
29. Sassi A., Rampinini E., Martin D.T., Morelli A. (2009). Effects of gradient and speed on freely chosen cadence: the key role of crank inertial load. *J. Biomech.* 42(2):171-177. *PubMed* doi:10.1016/j.jbiomech.2008.10.008
30. Lucia A., Hoyos J., Chicharro J.L. (2001). Physiology of professional road cycling. *Sports Med.*;31(5):325-337. *PubMed* doi:10.2165/00007256-200131050-00004

Cita Original

Umberto Emanuele, Tamara Horn, and Jachen Denoth. The Relationship Between Freely Chosen Cadence and Optimal Cadence in Cycling. (2012). *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 7, 375-381 © 2012 Human Kinetics, Inc.