

Article

Cinética Transitoria *Off* del VO_2 (VO_2 *Off-Kinetics*) durante una Prueba de Natación de Intensidad Extrema

Ana Sousa¹, Pedro Figueiredo¹, Kari L Keskinen², Ferran A Rodríguez³, Leandro Machado¹, João P Vilas-Boas¹ y Ricardo J. Fernandes¹

¹Centre of Research, Education, Innovation and Intervention in Sport, Faculty of Sport, University of Porto, Portugal.

²Finnish Society of Sport Sciences, Helsinki, Finland.

³National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC), University of Barcelona, Barcelona, Spain.

RESUMEN

En la literatura existen contradicciones sobre la asimetría dinámica entre las respuestas transitorias *on* y *off* en el consumo de oxígeno. Por lo tanto, el propósito de este estudio ha sido calificar la cinética transitoria *off* del consumo de oxígeno durante un esfuerzo máximo en el nado de 200 m. en estilo crol, mediante el análisis del grado en el que se preservó la regularidad *on/off* de la respuesta cinética del consumo de oxígeno. Ocho nadadores masculinos de alto nivel realizaron un nado de 200 m. en estilo crol a velocidad máxima durante el cual el consumo de oxígeno se midió directamente a través de una oximetría por respiración (promediada cada 5 s.). Este aparato estaba conectado al nadador mediante un sistema respiratorio de esnórquel y válvula con baja resistencia hidrodinámica. Resultados: Las fases transitorias *on* y *off* fueron simétricas en cuanto a la forma (imagen en espejo) una vez que se las ajustó de manera adecuada mediante un modelo de regresión exponencial simple, y no se desarrolló ningún componente lento para la respuesta del consumo de oxígeno. La media (\pm DE) del consumo de oxígeno pico fue de $69.0 (\pm 6.3) \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, en concordancia significativa con la constante de tiempo del período transitorio *off* ($r = 0.76$, $p < 0.05$), pero no con los otros parámetros cinéticos transitorios *off* del oxígeno estudiados. Se observó una relación directa entre la constante de tiempo del período transitorio *off* y la velocidad media de nado de los 200 m. ($r = 0.77$, $p < 0.05$), y con la amplitud del componente rápido del período de esfuerzo ($r = 0.72$, $p < 0.05$). Las medias de la amplitud y la constante de tiempo de los valores del período transitorio *off* fueron significativamente mayores que el respectivo transitorio *on*. En conclusión, aunque se comprobó una asimetría entre los parámetros cinéticos *on* y *off*, tanto el esfuerzo de los 200 m. como el respectivo período de recuperación se caracterizaron mejor por medio de un modelo de regresión exponencial simple.

Palabras Clave: nado, cinética del consumo de oxígeno, recuperación, nado en estilo crol

INTRODUCCIÓN

Se ha analizado la cinética del consumo de oxígeno (VO_2) a través del modelo matemático de la respuesta del VO_2 al inicio y cese del ejercicio de carga constante. Este perfil de respuesta parece ser de una naturaleza exponencial, lo que podría indicar operaciones cinéticas de primer y segundo orden (DiMenna y Jones, 2009). Este análisis ha demostrado que el VO_2 aumenta de manera exponencial en el inicio del ejercicio moderado con producción de potencia constante (componente rápido *on*), alcanza un estado estable, y disminuye rápidamente en el cese del ejercicio moderado (componente rápido *off*)

(Kilding et al., 2006; Ozyener et al., 2001; Paterson y Whipp, 1991; Scheuermann et al., 2001). La cinética de primer orden exige la simetría *on/off*, lo que significa que el cambio en el VO_2 que se produce cuando la actividad contráctil cesa debe ser una imagen en espejo del que se produjo al comenzar la misma (Rossiter et al., 2005). En el ejercicio de intensidad pesada, i.e., a intensidades mayores al umbral anaeróbico pero por debajo del VO_2 máximo, se presenta un incremento retrasado (componente lento *on*) después del componente rápido *on*, (Barstow y Molé, 1991; Barstow et al., 1996; Ozyener et al., 2001; Paterson y Whipp, 1991; Scheuermann et al., 2001), pero al cese solo se desarrolla un componente rápido *off* (Ozyener et al., 2001; Scheuermann et al., 2001). En el ejercicio de intensidad severa, la cual se encuentra significativamente por encima del umbral anaeróbico, y no se pueden estabilizar los niveles de VO_2 ni los de lactato en sangre (Poole et al., 1988), la cinética transitoria *on* del VO_2 se revierte a un perfil exponencial simple (Ozyener et al., 2001), mientras que la cinética transitoria *off* se mantiene en una forma de dos componentes (Dupont et al., 2010; Ozyener et al., 2001). En la intensidad más elevada, el ejercicio extremo que conduce al agotamiento antes de que se alcance el consumo de oxígeno máximo (DiMenna y Jones, 2009; Hill et al., 2002), la respuesta cinética *on* del VO_2 se caracteriza por el desarrollo de un componente rápido evidente, sin desarrollarse el fenómeno del componente lento (Burnley y Jones, 2007; Figueiredo et al., 2011; Whipp, 1994). Este área de la intensidad se ha descrito recientemente (Hill et al., 2002), y, según se sabe, nunca se ha estudiado el perfil cinético *off* del VO_2 en esta intensidad en particular.

Las evaluaciones del VO_2 se han llevado a cabo principalmente en entornos bien controlados, especialmente en laboratorios de ejercicios, y los estudios realizados en campo son muy escasos (Billat et al., 2002; Fernandes et al., 2008). De hecho, la cinética transitoria *off* del VO_2 está documentada en el ejercicio de carga constante realizado en intensidades de moderadas a severas. Sin embargo, los estudios que apuntan a modelar la cinética de recuperación del VO_2 en ejercicios de intensidad extrema aún no se han realizado en la disciplina del nado. En este sentido, el propósito de este estudio es calificar la cinética transitoria *off* del VO_2 , analizando también la simetría *on/off*, durante un esfuerzo máximo de nado de 200 m. en estilo crol a una intensidad extrema. Se ha planteado la hipótesis de que se mantendría una simetría *on/off* de la respuesta cinética del VO_2 , aunque el VO_2 posterior al ejercicio no concordara con el déficit de O_2 .

MÉTODOS

Participantes

Ocho nadadores masculinos altamente entrenados se ofrecieron de manera voluntaria para participar en el estudio. Los participantes dieron el consentimiento informado por escrito antes de la recopilación de datos, que fue aprobada por el comité de ética local y se llevó a cabo según la declaración de Helsinki. El rendimiento medio para el nado en estilo libre de 200 m. de curso largo fue de 109.3 ± 2.0 s, concordando con $90.3 \pm 3.2\%$ del record mundial de 2009 para este evento. Esta muestra incluyó un finalista y cinco participantes de los Campeonatos Europeos. Los valores individuales y las medias (\pm DE) para las principales características físicas y de rendimiento de los sujetos fueron: edad (21.8 ± 2.4 años), altura (184.5 ± 6.2 cm), masa corporal (76.1 ± 6.5 kg), masa grasa ($10.4 \pm 1.7\%$) y masa corporal magra ($62.4 \pm 4.4\%$).

Recopilación de Datos

En una piscina de 25 m en interiores, con una temperatura del agua de 27°C , los nadadores realizaron una prueba de nado de 200 m. en estilo crol a velocidad máxima. Se utilizaron salidas desde el agua y virajes simples, sin deslizamiento debajo del agua. Todos los nadadores realizaron un esfuerzo máximo de nado de 200 m. en estilo crol, de acuerdo con su mejor rendimiento individual de 200 m. y su propia experiencia, y recibieron aliento para nadar lo mejor que pudieran; por lo tanto, no se implementó ninguna pauta visual ni acústica. La cinética del VO_2 se midió utilizando un analizador telemétrico de gas portátil (K4b2, Cosmed, Italia), que estaba conectado al nadador mediante un sistema respiratorio de esnórquel y válvula con baja resistencia hidrodinámica (Keskinen et al., 2003; Rodríguez et al., 2008), y que se calibró antes y después de cada prueba. Las variables respiratorias se monitorearon de manera continua después de la prueba de 200 m. hasta obtener los valores iniciales de VO_2 (la evaluación finalizaba después de aproximadamente 12 minutos de recuperación). Se les aconsejó a los nadadores que utilizaran una respiración de ritmo continuo durante el nado, los giros y el período de recuperación. Las concentraciones de gas espirado se midieron en cada respiración y se promediaron cada 5 s. para una mejor resolución temporal (Sousa et al., 2010) a fin de disminuir las fluctuaciones inter-respiración ("ruido"). Al consumo de oxígeno pico ($\text{VO}_{2\text{pico}}$) se lo consideró como el valor más elevado de este intervalo de muestra.

Análisis de los Datos

La siguiente ecuación se utilizó para ajustar la cinética del VO_2 en el período transitorio *on*:

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}_b + A_{on} \times \left(1 - e^{-(t-TD_{on})/\tau_{on}}\right) \quad (1)$$

Donde t es el tiempo, V_b es el consumo de oxígeno al comienzo del ejercicio ($mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$), A_{on} es la amplitud del componente rápido ($mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$), TD_{on} es el tiempo para el inicio del componente rápido (s) y τ_{on} es la constante de tiempo del componente rápido; i.e., el tiempo para alcanzar el 63% de la meseta de esta fase durante la cual se ajustan las adaptaciones fisiológicas para cumplir con la mayor exigencia metabólica. La fase cardiodinámica no se tuvo en cuenta debido a su insignificante valor de amplitud. La inexistencia de un componente lento se confirmó mediante el método de intervalos rígidos, en particular a través de la diferencia entre la última medición de VO_2 del ejercicio y el valor medido en los últimos 5 s del evento de 200 m. (adaptación de Fernandes et al, 2003; Koppo y Bouckaert, 2002).

Para el período transitorio *off*, las respuestas individuales se ajustaron mediante la utilización de ambos modelos de regresión exponencial, simple (ecuación 2) y doble (ecuación 3) para todo el período de recuperación, en el cual el período exponencial empezó al comienzo del modelado del período transitorio *off* (TD_{1off} en las ecuaciones):

$$\dot{V}O_2(t) = A_{1off} \cdot e^{-(t-TD_{1off})/\tau_{1off}} + A_0 \quad (2)$$

$$\dot{V}O_2(t) = A_{1off} \cdot e^{-(t-TD_{1off})/\tau_{1off}} + A_{2off} \cdot e^{-(t-TD_{2off})/\tau_{2off}} + A_0 \quad (3)$$

Donde t es el tiempo, A_{off} representa la amplitud para el período exponencial y el τ_{off} y TD_{off} son la constante de tiempo y el retraso de tiempo asociados. Se implementó un método de mínimos cuadrados no lineales en MatLab para ajustar estas funciones a los datos del VO_2 .

Después de una inspección visual aclaratoria de todas las curvas de VO_2 , y en beneficio de la estabilidad numérica, se verificó que, debido a la intensidad extrema del ejercicio en la que se mantuvieron los 200 m., todos los nadadores comenzaron el período de recuperación inmediatamente después de la prueba de 200 m. En este sentido, y suponiendo que $TD_{1off} = 0$, el período transitorio *off* se modeló según las ecuaciones de reestructura:

$$\dot{V}O_2(t) = A_{1off} \cdot e^{-(t/\tau_{1off})} + A_0 \quad (4)$$

$$\dot{V}O_2(t) = A_{1off} \cdot e^{-(t/\tau_{1off})} + A_{2off} \cdot e^{-(t-TD_{2off})/\tau_{2off}} + A_0 \quad (5)$$

Análisis Estadísticos

Para toda la muestra, se obtuvieron los cálculos de las medias y DE para análisis descriptivos para todas las variables y para todo el grupo de participantes, y se los controló para la normalidad de distribución con el test de Shapiro-Wilk. Todos los procedimientos estadísticos se llevaron a cabo con SPSS 10.05.

Se utilizó una prueba F para comparar los modelos de regresión exponencial simple y doble que mejor se ajustaban.

A fin de comparar los parámetros transitorios *on* y *off* se utilizaron pruebas T para muestras apareadas. Se calculó una regresión lineal simple y un coeficiente de correlación de Pearson a fin de indicar la relación lineal entre los parámetros y con el tiempo de nado. El nivel de significancia se estableció en $p < 0.05$.

Resultados

La prueba F (0.28) mostró la homogeneidad de ambas varianzas de modelos, confirmada también por la igualdad de los valores medios ($p=0.98$), y por lo tanto, la respuesta transitoria *off* fue bien descrita por una función exponencial simple. En realidad, esta calificación no fue mejor por utilizar el modelo exponencial doble. En este sentido, los períodos transitorios *on* y *off* son simétricos en forma (imagen en espejo) una vez que se ajustan de manera adecuada a través de funciones exponenciales simples. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de la curva de cinética *on* y *off* del consumo de oxígeno (O_2).

En la Tabla 1 se presentan los valores medios (\pm DE) para la velocidad de nado ($200_{velocidad}$), el VO_{2pico} , la A_{on} , el TD_{on} , la τ_{on} y la A_{off} y la τ_{off} para la prueba de nado de 200 m. en estilo crol y el período de recuperación.

Se obtuvieron diferencias significativas entre los parámetros de la cinética del VO_2 *on* y *off* (todos para $p < 0.01$), y su amplitud fue mayor en el período de recuperación. De manera complementaria a los datos referidos anteriormente, se observaron relaciones directas entre la τ_{off} y la $200_{\text{velocidad}}$ ($r = 0.77$, $p = 0.02$), la τ_{off} y el $\text{VO}_{2\text{pico}}$ ($r = 0.76$, $p = 0.03$) y la τ_{off} y la A_{on} ($r = 0.72$, $p = 0.04$) (ver Figura 2). No se hallaron correlaciones significativas entre el $\text{VO}_{2\text{pico}}$ y los otros parámetros transitorios *off* del VO_2 (A_{off} , $r = 0.35$, para $p > 0.05$). También se observaron ausencias de relaciones significativas entre la τ_{on} y la τ_{off} ($r = 0.19$) y la A_{on} y la A_{off} ($r = 0.5$), todos con $p > 0.05$.

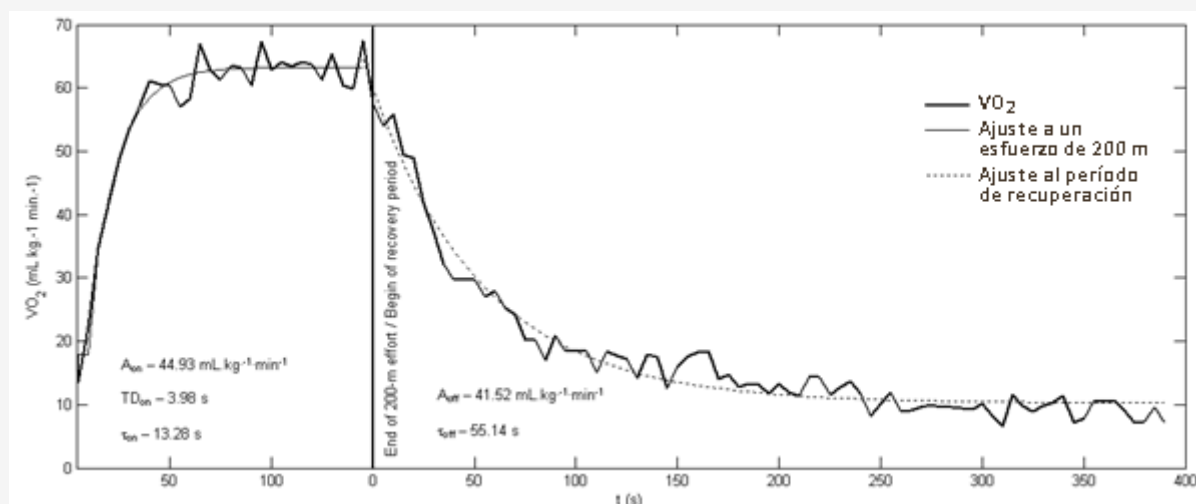


Figura 1. Ejemplo de un consumo de oxígeno con respecto a la curva de tiempo, identificándose el tiempo de inicio del componente rápido (TD_{on}), la constante de tiempo del componente rápido (τ_{on}) y la amplitud del componente rápido (A_{on}) en los períodos transitorios *on* y *off* (τ_{off} , A_{off}).

DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio ha sido calificar la cinética transitoria *off* del VO_2 y analizar la simetría *on/off* durante un nado de 200 m. auto-impuesto a ritmo de carrera. Se evaluó la hipótesis de que la respuesta de la cinética del VO_2 manifestaría una respuesta simétrica *on/off*, aunque el VO_2 posterior al ejercicio no concordara con el déficit de O_2 . Se considera que la comprensión de la cinética del VO_2 es un parámetro importante para mejorar la metodología de entrenamiento deportivo y aumentar el rendimiento en el deporte (Billat et al., 2001). Además, en el último tiempo se ha sugerido que los factores determinantes de la tolerancia al ejercicio y las limitaciones para el rendimiento deportivo pueden comprenderse mejor a través de una apreciación de la importancia fisiológica de los componentes rápidos y lentos de la respuesta dinámica del VO_2 al ejercicio (Burnley y Jones, 2007). Durante mucho tiempo, los estudios sobre la evaluación del consumo de O_2 en el nado se llevaron a cabo ya sea con bolsas de Douglas (di Prampero et al., 1974; Lavoie y Montpetit, 1986) o bien con analizadores de gas con cámara mezcladora (Dal Monte et al., 1994; Demarie et al., 2001). Fue en este último tiempo que el desarrollo de un esnórquel para nado adecuado para el análisis por respiración (Keskinen et al., 2003; Rodríguez et al., 2008) permitió evaluar las dinámicas del VO_2 en piscinas a través de la oximetría directa (Fernandes et al., 2003; Rodríguez et al., 2003). Sin embargo, en la literatura sobre la cinética del consumo de O_2 , son muy escasos los estudios que tuvieron como objetivo calificarla en ejercicios de intensidad extrema y de carga no constante para seres humanos. Además, entre estos estudios, solo Rodríguez y Mader (2003), Rodríguez et al. (2003), y Silva et al. (2006) implementaron una prueba de nado a intensidades similares a las del presente protocolo.

Teniendo en cuenta toda la muestra, el $\text{VO}_{2\text{pico}}$ varió de 60.2 a 81.8 $\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, lo que concuerda con los datos recientemente reportados obtenidos en nadadores masculinos competitivos entrenados que nadaron en piscinas (Fernandes et al., 2008; Figueiredo et al., 2011; Reis et al., 2010; Rodríguez y Mader, 2003; Rodríguez et al., 2003; Silva et al., 2006).

Nadador	200 _{velocidad} (m·s ⁻¹)	VO _{2pico} (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	A _{on} (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	TD _{on} (s)	τ _{on} (s)	A _{off} (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	τ _{off} (s)
#1	1.40	68.4	49.6	10.00	6.21	54.4	62.22
#2	1.36	60.2	38.6	4.99	12.04	41.2	49.38
#3	1.44	67.4	44.9	3.98	13.28	41.5	55.14
#4	1.42	70.7	44.5	4.99	9.31	54.8	73.13
#5	1.49	81.8	52.0	5.00	12.43	50.1	94.04
#6	1.42	70.1	45.4	4.99	11.56	49.3	84.36
#7	1.42	63.7	46.9	4.99	9.17	42.2	73.90
#8	1.47	69.0	50.2	4.99	13.41	62.3	86.23
Media (± DE)	1.42 (0.04)	69.0 (6.3)	46.5 (4.2)	5.49 (1.85)	10.92 (2.49)	49.5 (7.56)	72.30 (15.75)
Promedio del CV	2.81%	9.13%	9.05%	33.69%	22.84%	15.27%	21.78%
Promedio del CI	1.39-1.46	63.7-74.3	43.0-50.0	3.93-7.04	8.84-13.01	43.2-55.8	59.13-85.46

Tabla 1. Valores individuales promedio (± DE), coeficientes de variación e intervalos de confianza para medias para 200_{velocidad}, VO_{2pico}, A_{on}, TD_{on} y τ_{on}, A_{off} y τ_{off} en el esfuerzo máximo de 200 m. y el período de recuperación. 200_{velocidad} = velocidad media de nado de los 200 m.; VO_{2pico} = consumo de oxígeno pico; A_{on} = amplitud del componente rápido en el esfuerzo máximo de 200m.; TD_{on} = tiempo del inicio del componente rápido en el esfuerzo máximo de 200 m.; τ_{on} = tiempo del esfuerzo máximo de los 200 m.; A_{off} = amplitud del componente rápido en el periodo de recuperación de los 200 m.; τ_{off} = constante del componente rápido en la constante de tiempo del componente rápido en el periodo de recuperación de los 200 m.; CV = coeficiente de variación; CI = intervalo de confianza.

Figura 2. Relaciones entre la constante de tiempo del componente rápido del período de recuperación (τ_{off}) y la velocidad media de nado de los 200 m. (200_{velocidad} □ línea completa: $y = 1.284x + 0.002$, $n = 8$, $r = 0.77$, $p < 0.05$), entre el τ_{off} y el consumo de oxígeno pico (VO_{2pico} □ línea punteada: $y = 46.975x + 0.305$, $n = 8$, $r = 0.76$, $p < 0.05$) y entre el τ_{off} y la amplitud del componente rápido del período de esfuerzo (A_{on} □ línea gris: $y = 32.594x + 0.192$, $n = 8$, $r = 0.72$, $p < 0.05$).

Simetría entre las fases transitorias on y off: Debido a que la simetría es una cualidad esencial de las dinámicas de la cinética del VO₂, vista como la cinética de reacción de primer orden (Rossiter et al., 2005), la misma ha sido un punto de interés en el presente estudio. Se ha observado la simetría on/off de los componentes rápidos para el dominio del ejercicio de intensidad moderada realizado en un cicloergómetro (Paterson y Whipp, 1991; Ozyener et al., 2001; Scheuermann et al., 2001) y en la carrera en cinta ergométrica (Kilding et al., 2006). Para el ejercicio de intensidad pesada, se ha reportado una asimetría en la dinámica del VO₂, describiendo un componente rápido on y un componente rápido off y componentes lentos off en la ejercitación en cicloergómetro (Ozyener et al., 2001) y del extensor de la rodilla (Rossiter et al., 2002). También se reportó esta asimetría para los ejercicios de intensidad severa, concretamente en la carrera en interiores (Dupond et al., 2010) y en cicloergómetro (Ozyener et al., 2001). En contraste, en el presente estudio las fases transitorias on y off fueron simétricas, una vez ajustadas de manera adecuada por medio de una función exponencial simple, en comparación con el exponencial doble, y no se desarrolló ningún componente lento para la respuesta del VO₂ (ver Figura 1). A pesar de los estudios referidos anteriormente, la simetría observada en el presente estudio puede explicarse mediante la implementación de una carga no constante, y a la mayor intensidad del ejercicio. Como se esperaba, se observó solo un componente rápido on, pues la carga no constante a un ritmo de carrera máxima elegido libremente indujo a un incremento exponencial en la cinética del VO₂ que no permitió el desarrollo de un componente lento del VO₂; este hecho fue previamente mencionado pero solo para el ejercicio del ergómetro (Burnley y Jones, 2007; Whipp, 1994).

Parámetros cinéticos on/off: Aunque se observó una simetría on/off en la respuesta de la cinética del VO₂ en este ejercicio de intensidad extrema que duró 2.7 min en promedio, se observaron diferencias entre los parámetros cinéticos transitorios on y off del VO₂. De hecho, se reportaron mayores valores de A_{off} y τ_{off}. Este último parámetro es un punto de interés importante en la literatura sobre la cinética del VO₂, pues es un factor determinante en la dinámica del VO₂. Un valor mayor del τ_{off} como el observado en el presente estudio, concuerda con los datos previos obtenidos en el dominio del ejercicio pesado (Cleuziou et al., 2004; Yano et al., 2007); no obstante, otros estudios reportaron el comportamiento opuesto para la misma intensidad de ejercicio (Engelen et al., 1996; Ozyener et al., 2001; Scheuermann et al., 2001), como también para el dominio moderado (Patterson y Whipp, 1991). En la intensidad severa de ejercitación, Billat et al. (2002) y Ozyener et al. (2001) no reportaron diferencias de τ con respecto a los períodos rápidos on y off. Además, el valor promedio obtenido de τ_{off} fue mayor que los resultados reportados en la literatura, tanto para las intensidades moderadas

(Cleuziou et al., 2004; Kilding et al., 2006; Rossiter et al., 2002; Takayoshi et al., 2003), pesadas (Rossiter et al., 2002) y severas (Perrey et al., 2002).

Sin embargo, como se sugiere, cuando se compararon los datos del presente con estudios que utilizaron un método de ajuste exponencial doble, el τ_{off} fue más corto en comparación con el τ_{off} del componente lento durante el ejercicio de intensidad pesada (Cleuziou et al., 2004) y severa (Dupont et al., 2010). Como se ha establecido con anterioridad, el presente estudio reportó una simetría en la respuesta de la cinética *on/off* del VO_2 ; sin embargo, se hallaron diferencias entre los parámetros relacionados con la cinética *on* y *off* del VO_2 .

De hecho, la cinética del VO_2 está influenciada por el entrenamiento de resistencia, habiéndose reportado una cinética *on* del VO_2 más rápida en los sujetos entrenados de estudios de diseño transversal y longitudinales (Casaburi et al., 1987; Koppo et al., 2004; Murias et al., 2010; Phillips et al., 1995). En efecto, el entrenamiento parece cambiar las características del tipo de fibra muscular, la densidad mitocondrial, la actividad enzimática oxidativa, la disponibilidad de oxígeno, la densidad capilar y la perfusión muscular (Koppo et al., 2004), existiendo diferencias evidentes entre los sujetos entrenados y no entrenados. Aunque este estudio no ha tenido la intención de investigar este fenómeno, la velocidad media de nado fue muy elevada desde el inicio de la prueba, lo cual puede inducir a un incremento más rápido en los requerimientos de ATP, y a una acumulación de lactato rápida, una vez que un patrón de contribución de fibras musculares tipo I/II parece establecerse sin retraso (Cunningham et al., 2000). Estos hechos (y habiéndose explicado el componente rápido del cese por medio de la restitución de O_2 en sangre y en músculo, una remoción significativa de lactato, y mediante la resíntesis de ATP y PCr) pueden inducir a respuestas perceptibles más lentas durante el período de recuperación. Por lo tanto, la deuda de oxígeno debe ser mayor que el déficit de oxígeno, i.e., el VO_2 post-ejercicio no concordó de manera cuantitativa con el déficit de O_2 (Yano et al., 2007). De hecho, debido a que se adoptaron estrategias de diferentes ritmos durante el nado máximo de 200m., se puede producir una cinética *on* del VO_2 diferente, lo cual incluyó en la respuesta del VO_2 en el período de recuperación. Esta es una limitación del presente estudio, en comparación con las investigaciones de ritmo constante.

Con respecto a la amplitud del VO_2 , el mayor valor medio de A_{off} observado (en comparación con A_{on}) no concuerda con los resultados reportados para las intensidades moderadas y pesadas (Cleuziou et al., 2004), ni para el ejercicio de intensidad severa (Perrey et al., 2002), que no mostró diferencias significativas entre los valores medios de A_{on} y A_{off} . En el presente estudio, los mayores valores de la A_{off} pueden ser una consecuencia de la intensidad extrema del ejercicio en la que se llevó a cabo este estudio, los diferentes procedimientos de modelos que se utilizaron, como también la modalidad del ejercicio realizado. En esta intensidad de ejercicio, en la que se observan los índices de trabajo más elevados, el valor medio del VO_2 es elevado aún hasta el final de la prueba. Dado que la A_{off} representa la diferencia entre el VO_2 al final del ejercicio y el VO_2 en estado estable, el mayor valor medio de la A_{off} parece justificado.

Dado que se supuso que el TD_{off} era cero, como resultado de la disminución repentina e instantánea del VO_2 , son difíciles de establecer las comparaciones con los datos reportados previamente obtenidos para los dominios de intensidades moderadas (Cleuziou et al., 2004) y pesadas (Billat et al., 2002). Sin embargo, Takayoshi et al. (2003) reportaron valores medios de TD_{off} bajos (1, 2 s) para el dominio de intensidad moderada del ejercicio. Además, y en contraste con los resultados del presente estudio, Perrey et al. (2002) no hallaron diferencias entre los valores medios de TD_{on} y TD_{off} en la intensidad severa.

Relación entre las fases transitorias on/off de la cinética del VO_2 y el rendimiento: La relación directa observada entre el τ_{off} y la $200_{velocidad}$ demuestra que los nadadores que realizaron los 200 m. con más rapidez, necesitaron más tiempo para alcanzar un estado estable del VO_2 en la fase transitoria *off*; además, estos nadadores presentaron valores medios de VO_2 y A_{on} mayores. Estos hechos parecen demostrar una vez más que la velocidad de nado muy elevada inmediatamente después del comienzo de la prueba condujo a valores medios de VO_2 y A_{on} mayores, incrementando tanto la necesidad de un mayor suministro de energía como también la acumulación de metabolitos relacionados con la fatiga, haciendo más lenta la fase de recuperación. De hecho, el rendimiento de los 200 m. está fuertemente relacionado con el τ_{off} , que también parece ser un buen indicador del VO_{2pico} y la A_{on} . No obstante, se debe tener precaución con estos datos, dado que otros factores podrían explicar la variabilidad del rendimiento en esta distancia específica.

CONCLUSIÓN

No se desarrolló ningún componente lento para la cinética *off* del VO_2 en los nados de 200 m., y las fases transitorias *on* y *off* fueron simétricas una vez ajustadas de manera adecuada por medio de una función exponencial simple. No obstante, los valores medios de A_{off} y τ_{off} fueron mayores en comparación con los respectivos parámetros transitorios *on*. Los valores

medios del $VO_{2\text{pico}}$ y la $200_{\text{velocidad}}$ concordaron de manera positiva con el τ_{off} , como éste con la A_{on} , sin observarse más correlaciones entre ninguno de los parámetros de la cinética transitoria *on/off* estudiados. Aceptando que la comprensión general de la cinética del VO_2 implica abordar otras áreas de investigación, son bienvenidos los experimentos futuros para comprender el mecanismo subyacente relacionado con este comportamiento de la dinámica del VO_2 .

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado por una subvención: PTDC/DES/101224/2008 (FCOMP-01-0124-FEDER-009577).

Puntos Clave

- No se observó el componente lento del VO_2 en el período de recuperación de las pruebas extremas de nado;
- Los períodos transitorios *on* y *off* se ajustaron mejor mediante una función exponencial simple, y de esta manera, estos períodos de esfuerzo y recuperación de las pruebas extremas de nado son simétricos;
- El índice de disminución del VO_2 durante el período de recuperación puede deberse no solo a la magnitud de la deuda de oxígeno sino también al $VO_{2\text{pico}}$ obtenido durante el período de esfuerzo.

REFERENCIAS

1. Barstow, T. and Molé, P (1991). Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 71(6), 2099-2106
2. Barstow, T., Jones, A., Nguyen, P. and Casaburi, R (1996). Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 81(4), 1642-1650
3. Billat, V., Hamard, L. and Koralsztein, JP (2002). The influence of exercise duration of the $VO_{2\text{max}}$ on the off-transient pulmonary oxygen uptake phase during high intensity running activity. *Archives of Physiology and Biochemistry* 110(5), 383-392
4. Billat, VL (2001). Interval training for performance: A scientific and empirical practice. *Special recommendations for middle and long distance running. Part I: Aerobic interval training. Sports Medicine* 31(1), 13-31
5. Burnley, M. and Jones, A (2007). Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance. *European Journal of Sport Science* 7(2), 63-79
6. Casaburi, R., Storer, TW., Ben-Dov, I. and Wasserman, K (1987). Effect of endurance training on possible determinants of VO_2 during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 62(1), 199-207
7. Cleuziou, C., Perrey, S., Borrani, F., Lecoq, A., Candau, R., Courteix, D. and Obert, P (2004). Dynamic responses of oxygen uptake and end of moderate and heavy exercise in trained subjects. *Ca-nadian Journal of Applied Physiology* 29(1), 32-44
8. Cleuziou, C., Perrey, S., Lecoq, M., Candau, R., Courteix, D. and Obert, P (2005). Oxygen uptake kinetics during moderate and heavy intensity exercise in humans: the influence of hypoxia and training status. *International Journal of Sports Medicine* 26(5), 356-62
9. Cunningham, D., Croix, D., Ozyener, J. and Whipp, B (2000). The off-transient pulmonary oxygen uptake (VO_2) kinetics following attainment of a particular VO_2 during heavy-intensity exercise in humans. *Experimental Physiology* 85, 339-347
10. Dal Monte, A., Sardelle, F., Alippi, B., Faina, M. and Manetta, A (1994). A new respiratory valve system for measuring oxygen uptake during swimming. *European Journal of Applied Physiology* 69(2), 159-162
11. Demarie, S., Sardella, F., Billat, V., Magini, W. and Faina, M (2001). The VO_2 slow component in swimming. *European Journal of Applied Physiology* 84(1-2), 95-99
12. DiMenna, FJ. and Jones, A (2009). [Linear] versus [Nonlinear] VO_2 responses to exercise: reshaping traditional beliefs. *Journal of Exercise and Science Fitness* 7(2), 67-84
13. Di Prampero, P.E., Pendergast, D.R., Wilson, D.W. and Rennie, D.W (1974). Energetics of swimming in man. *Journal of Applied Physiology* 37(1), 1-5
14. Dupond, G., McCall, A., Prieur, F., Millet, G. and Berthoin (2010). Faster oxygen uptake kinetics during recovery is related to better repeated sprinting ability. *European Journal of Applied Physiology* 110, 627-634
15. Engelen, M., Porszasz, J., Riley, M., Wasserman, K., Maehara, K. and Barstow, T (1996). Effects of hypoxic hypoxia on O_2 uptake and heart rate kinetics during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology* 81, 2500-2508
16. Fernandes, RJ., Cardoso, CS., Soares, SM., Ascensão, A., Colaço, P. and Vilas-Boas, JP (2003). Time limit and VO_2 slow component at intensities corresponding to $VO_{2\text{max}}$ in swimmers. *International Journal of Sports Medicine* 24(8), 576-581
17. Fernandes, R., Keskinen, K., Colaço, P., Querido, A., Machado, L., Morais, P., Novais, D., Marinho, D. and Vilas-Boas, JP (2008). Time limit at $VO_{2\text{max}}$ velocity in elite crawl swimmers. *International Journal of Sports Medicine* 29, 145-150
18. Fernandes, R., Sousa, A., Figueiredo, P., Keskinen, K., Rodriguez, F., Machado, L. and Vilas-Boas, J (2011). Modeling off-transient oxygen uptake kinetics after maximal 200-m swims. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 43(5), S264
19. Figueiredo, P., Zamparo, P., Sousa, A., Vilas Boas, J.P. and Fernandes, R (2011). An energy balance of the 200 m front crawl race.

20. Hill, D.W., Poole, D.C. and Smith, C (2002). The relationship between power and the time to achieve VO₂max. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34, 709-714
21. Keskinen, K., Rodriguez, O. and Keskinen, O (2003). Respiratory snorkel and valve system for breath-by-breath gas analysis in swimming. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sport* 13(5), 322-329
22. Kilding, A., Winter, E.M. and Fish, M (2006). A comparison of pulmonary oxygen uptake kinetics in Middle- and Long-Distance Runners. *International Journal of Sports Medicine* 27(5), 419-426
23. Koga, S., Shiojiri, T. and Kondo, N (2005). Measuring VO₂ kinetics: The practicalities. In: *Oxygen Uptake Kinetics in Sport, Exercise and Medicine*. Eds: Jones, A.M. and Poole, D.C. Routledge, London & New York: 39-61
24. Koppo, K. and Bouckaert, J (2002). The decrease in the VO₂ slow component induced by prior exercise does not affect the time to exhaustion. *International Journal of Sports Medicine* 23, 262-267
25. Koppo, K., Bouckaert, J. and Jones, AM (2004). Effects of training status and exercise intensity on phase II VO₂ kinetics. *Medicine and Science in Sport and Exercise* 36(2), 225-232
26. Lavoie, J.M. and Montpetit, R.R (1986). Applied physiology of swimming. *Sports Medicine* 3(3), 165-189
27. Murias, J.M., Kowalchuck, J.M. and Paterson, D.H (2010). Speeding of VO₂ kinetics with endurance training in old and young men is associated with improved matching of local O₂ delivery to muscle O₂ oxygenation. *Journal of Applied Physiology* 108(4), 913-922
28. Ozyener, F., Rossiter, H., Ward, S. and Whipp, B (2001). Influence of exercise intensity on the on and off-transient kinetics of pulmonary oxygen uptake in humans. *Journal of Physiology* 533(3), 891-902
29. Paterson, D. and Whipp, B (1991). Asymmetries of oxygen uptake transients at the on- and offset of heavy exercise in humans. *Journal of Physiology* 443, 575-586
30. Perrey, S., Candau, R., Borrani, F., Millet, G. and Rouillon, J (2002). Recovery kinetics of oxygen uptake following severe-intensity exercise in runners. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 42(4), 381-388
31. Phillips, S.M., Green, H.J., MacDonald, M.J. and Hughson, R.L (1995). Progressive effect of endurance training on VO₂ kinetics at the onset of submaximal exercise. *Journal of Applied Physiology* 79(6), 1914-1920
32. Poole, D.C., Ward, S.A., Gardner, G.W. and Whipp, B.J (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics* 31, 1265-1279
33. Reis, V., Marinho, D., Policarpo, F., Carneiro, A., Baldari, C. and Silva, A (2010). Examining the accumulated oxygen deficit method in front crawl swimming. *International Journal of Sports Medicine* 31(6), 421-427
34. Rodriguez, F. and Mader, A (2003). Energy metabolism during 400m and 100m crawl swimming: computer simulation based on free swimming measurement. In: *IX Biomechanics and Medicine in Swimming*. Eds: Chatard, J.E. Publications de l'Université de Saint-Étienne: 373-378
35. Rodriguez, F.A., Keskinen, K.L., Keskinen, O.P. and Malvela, M (2003). Oxygen uptake kinetics during free swimming: a pilot study. In: *IX Biomechanics and Medicine in Swimming* Eds: Chatard, J. E. Publications de l'Université de Saint-Étienne: 379-384
36. Rodriguez, F.A., Keskinen, K.L., Kusch, M. and Hoffmann, U (2008). Validity of a swimming snorkel for metabolic testing. *International Journal of Sports Medicine* 29(2), 120-128
37. Rodriguez, F.A (2000). Maximal oxygen uptake and cardiorespiratory response to maximal 400-m free swimming, running and cycling tests in competitive swimmers. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 40(2), 87-95
38. Rossiter, H.B., Howe, F.A. and Ward, S.A (2005). Intramuscular phosphate and pulmonary VO₂ kinetics during exercise: implications for control of skeletal muscle oxygen consumption. In: *Oxygen Uptake Kinetics in Sport, Exercise and Medicine*. Eds: Jones, A.M. and Poole, D.C. Routledge, London & New York: 154-184
39. Rossiter, H., Ward, S., Kowalchuk, J., Howes, F., Griffiths, J. and Whipp, J (2002). Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate and high-intensity exercise in humans. *Journal of Physiology* 541(3), 991-1002
40. Scheuermann, B., Hoelting, B., Noble, M. and Barstow, T (2001). The slow component of O₂ uptake is not accompanied by changes in muscle EMG during repeated bouts of heavy exercise in human. *Journal of Physiology* 531, 245-256
41. Short, K. and Sedlock, D (1997). Excess post exercise oxygen consumption and recovery rate in trained and untrained subjects. *Journal of Applied Physiology* 83(1), 153-159
42. Silva, A., Reis, V., Reis, A., Garrido, N., Moreira, A., and Carneiro, A (2006). Associations between energy release and performance in a supramaximal effort of 200-m in crawl. *Portuguese Journal of Sport Science* 6(Suppl.1), 59-60
43. Sousa, A., Figueiredo, P., Oliveira, N., Keskinen, K., Vilas-Boas, J.P. and Fernandes, R (2010). Comparison between VO₂peak and VO₂max at different time intervals. *Open Sport Science Journal* 3, 22-24
44. Takayoshi, Y., Yamamoto, K., Naka, T. and Udo, M (2003). Cardiac output and oxygen uptake kinetics at the onset and offset of exercise. *Journal of Thermal Biology* 18(5-6), 609-615
45. Whipp, B (1994). The slow component of O₂ uptake kinetics during heavy exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 26, 1319-1326
46. Yano, T., Yunoki, T., Matura, R., Arimitsu, R. and Kimura, T (2007). Excessive Oxygen Uptake during Exercise and Recovery in Heavy Exercise. *Physiology Research* 56, 721-725

Cita Original

Ana Sousa, Pedro Figueiredo, Kari L. Keskinen, Ferran A. Rodríguez, Leandro Machado, João P. Vilas-Boas, Ricardo J. Fernandes. VO₂ Off Transient Kinetics in Extreme Intensity Swimming. *Journal of Sports Science and Medicine* (2011) 10, 546 - 552