



Cinética de la frecuencia cardíaca del esfuerzo ergométrico creciente en atletas mexicanos

Javier Padilla Pérez,* Víctor Alejandro Santos Cadena,* Christian Ernesto Pérez Téllez*

RESUMEN

El estudio cinético de la frecuencia cardíaca (FC) estimulada por una función ergométrica, permite estudiar el grado de acondicionamiento de resistencia físicodeportiva. Se investigó si existen diferencias cinéticas de FC entre NOA_{atletas jóvenes} y A_{atletas} con cierto grado de resistencia físicodeportiva en términos de su captación pulmonar máxima de O₂ (VO₂). De 38 voluntarios, se formaron dos grupos control de no atletas: NOA_{atletas jóvenes} (n = 9, 20 ± 3 años) (media ± DE) y NOA_{atletas adultos} (n = 9, 39 ± 8 años); y dos del deporte: A_{atletas jóvenes} (n = 10, 19 ± 2 años) y A_{atletas adultos} (n = 10, 40 ± 9 años). Realizaron una prueba de esfuerzo máximo pedaleando sentado sobre un cicloergómetro electrónico, método espirométrico de circuito abierto para medir la respuesta transitoria cardiopulmonar (FC; VO₂; VCO₂, eliminación pulmonar de CO₂; V_E, ventilación espirada) y potencia ergométrica (POT_{max}). Se modeló por computadora la fase dos de las tres fases transitorias de la FC, mediante regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados sobre los datos experimentales de la prueba de tipo rampa y el tiempo de respuesta media (TRM, s) fue analizado para estudiar la respuesta cinética de la FC (latidos•min⁻¹). Resultaron (p < 0.05) la FC del reposo menor (59 ± 7 < 73 ± 13) y la POT_{max} mayor (234 ± 27 > 197 ± 29, W) en el grupo de A_{atletas jóvenes} comparado con NOA_{atletas jóvenes}; mientras que el VO_{2max} absoluto (3.1 ± 0.8 > 2.3 ± 0.5, l•min⁻¹) y relativo a la masa corporal total (48 ± 13 > 31 ± 5, mL•min⁻¹•kg⁻¹), así como el TRM FC (77 ± 9 > 57 ± 13) fueron mayores en el grupo de A_{atletas adultos} comparado con NOA_{atletas adultos}. La dinámica de la FC similar entre los grupos de jóvenes se explica más por un efecto de la edad que por el impacto del ejercicio. Las diferencias de FC entre los grupos de adultos se explican por el beneficio que la actividad deportiva regular tiene en el sistema cardiovascular y el músculo esquelético del atleta, lo que a su vez causa una respuesta cardiovascular homeostática mejorada al ejercicio ergométrico. Se concluyó que el acondicionamiento físicodeportivo de resistencia en atletas adultos permitió una cinética lenta de la fase dos de la FC transitoria del esfuerzo máximo.

Palabras clave: Atletas, mexicanos, captación pulmonar de O₂, frecuencia cardíaca, cinética, tiempo de respuesta media.

ABSTRACT

The kinetics study of the heart rate (HR) response triggered by an ergometric function, allow us to study the degree of endurance sportive condition. We investigated if there exist HR kinetic differences between athletes, and non athletes holding certain degree of sportive endurance condition in terms of pulmonary maximal O₂ uptake (VO₂). We studied 38 volunteers, divided in two non athletes groups of control: NOA_{athletes young} (n = 9, 20 ± 3 years) (mean ± SD) y NOA_{athletes adults} (n = 9, 39 ± 8 years); and two sportive groups: A_{athletes young} (n = 10, 19 ± 2 years) y A_{athletes adults} (n = 10, 40 ± 9 years). Volunteers performed a maximal effort test pedaling sited on an electronic cycle ergometer, an open spirometric circuit method to measure the transient cardiopulmonary response (FC; VO₂; VCO₂, pulmonary CO₂ output; V_E, expired ventilation) and the ergometric power (POT_{max}). We modeled by computer the phase of the transient phases two of three HR, using the mean square linear regression method on the experimental data from a ramp test and the mean response time (MRT, s) was analyzed to study HR kinetic response (beats•min⁻¹). Resting HR resulted lower (59 ± 7 < 73 ± 13) and POT_{max} was higher (234 ± 27 > 197 ± 29, W) in A_{athletes young} compared NOA_{athletes young}; while the VO_{2max} either absolute (3.1 ± 0.8 > 2.3 ± 0.5, l•min⁻¹) or relative to the total body mass (48 ± 13 > 31 ± 5, mL•min⁻¹•kg⁻¹), and the MRT of the HR (77 ± 9 > 57 ± 13) were higher in A_{athletes adults} compared NOA_{athletes adults}. The HR response, similar between the young groups is explained mainly by the effect of the age rather to the impact of the exercise. The differences of HR between the groups of adults are explained by the beneficial effect of the regular sport activity on the cardiovascular system and skeletal muscle system in athletes, and these cause a better homeostatic cardiovascular response to the ergometric exercise. We concluded that a slow phase two on transient HR kinetics to ramp test estimated the endurance sportive condition in adult athletes.

Key words: Athletes, Mexicans, pulmonary O₂ uptake, heart rate, kinetics, mean response time.

* Escuela Superior de Medicina, Instituto Politécnico Nacional.



INTRODUCCIÓN

La adaptación a un entrenamiento de resistencia físico-deportiva, habilita a una persona para mantener por un tiempo relativamente "prolongado" un esfuerzo submáximo (resistencia físico-deportiva) que involucra la combinación de contracciones musculares concéntricas y excéntricas. Diversos investigadores han observado en los atletas de deportes de resistencia como el maratón, caminata y ciclismo de ruta, características antropométricas, ergométricas, fisiológicas,¹ bioquímicas, fenotípicas, psicológicas y de desempeño físicodeportivo que los distingue de los que no lo son.²⁻⁴ Por ejemplo, los mecanismos responsables de una capacidad cardiorrespiratoria para el ejercicio submáximo y de potencia aerobia máxima, son todavía motivo de estudio, en su mayoría de la actividad físicodeportiva de resistencia, ha permitido sustentar programas de adecuación físicodeportiva de resistencia, aplicados a la rehabilitación, medicina y ciencias del deporte y promoción de la salud. Así, la aptitud cardiorrespiratoria, que es una medida del efecto de la actividad físicodeportiva de resistencia sobre la potencia aerobia y su acoplamiento con el metabolismo energético musculoesquelético,² es motivo de estudios de cinética fisiológica durante el ejercicio ergométrico.

Antecedentes

La frecuencia cardíaca, la presión arterial, la electro-miografía y la temperatura corporal están estrechamente relacionadas con el gasto energético inherente a la actividad física.⁵ La frecuencia cardíaca (FC) durante la respuesta cardiopulmonar transitoria al ejercicio ergométrico; destaca, el modelado matemático computado de esta respuesta, para estudiar su índice de cambio en el transcurso del tiempo (cinética física) y determinar su participación temporal, dinámica de la FC, durante un esfuerzo de tipo rampa durante una prueba de esfuerzo máximo, lo que una vez tipificado, facilitaría el abordaje de la siguiente etapa, el estudio de los mecanismos correspondientes y su potencial aplicación en el área biomédica.

El estudio cinético (cambio por unidad de tiempo) de la respuesta cardiovascular durante ejercicio ergométrico, es una forma de analizar la dinámica de la respuesta FC del estado no estable (transitorio) estimulada por una función forzada ergométrica, para estudiar el grado de adaptación o de desadaptación cardiopulmonar o vascular al acondicionamiento físicodeportivo. También se sabe que el curso temporal de la FC está relacionada con el volumen por minuto de captación de O₂ ($\dot{V}O_2$) corporal total mediante

la ecuación de Fick ($\dot{V}O_2 / FC = (V_{\text{volumen sistólico}} \cdot S_{\text{arterial}} - C_{\text{contenido O}_2 \text{ arterial}} - C_{\text{contenido O}_2 \text{ venoso}}) \cdot 6$)⁶ que refleja el curso temporal del consumo de O₂ muscular durante un ejercicio en estado estable (acoplamiento entre el índice de intercambio respiratorio y el cociente respiratorio). Sin embargo, al inicio de un ejercicio y aproximadamente a partir de la mitad del tiempo total de duración de una prueba ergométrica hasta lograr un esfuerzo máximo, incluidos los primeros momentos de recuperación, no se observa un estado estable, sino transitorias, pues la regulación cardiopulmonar queda rezagada respecto a la demanda local de la masa muscular activa o en ejercicio. En consecuencia, es necesario estudiar si durante una prueba ergométrica tipo rampa, existe una dinámica de FC diferente entre atletas de diversas especialidades deportivas.

Estado actual

Con base en la relación entre las variables $\dot{V}O_2$, gasto cardíaco o flujo sanguíneo total y diferencia arteriovenosa de oxígeno,⁶ aunado a la observación de que un $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ se relaciona con la condición atlética; se sabe que a mayor condición atlética mayor es la sensibilidad para las conductancias del transporte de oxígeno en los sistemas pulmonar, cardiovascular (Vg., FC, volumen sistólico) y músculo esquelético.⁷ Por otro lado, con la edad y un estilo de vida sedentario, existen una disminución en la potencia aerobia y frecuencia cardíaca máximos, lo que disminuye el gasto cardíaco máximo.⁸ La FC generalmente se incrementa en forma lineal con la carga de trabajo, mientras que el volumen sistólico muestra un valor asintótico durante la respuesta ergométrica hasta lograr un $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.⁷ Durante la fase transitoria de un esfuerzo ergométrico, el gasto cardíaco es cinéticamente más rápido comparado con $\dot{V}O_2$.⁹ El tiempo requerido para lograr 63% de la respuesta exponencial cardiopulmonar transitoria al incremento rápido de carga de trabajo ergométrica, ha mostrado ser de 28s para el gasto cardíaco, 55s para $\dot{V}O_2$, 57s para la diferencia arteriovenosa de O₂, y desde 10 hasta 26s para la presión arterial sistólica en humanos.¹⁰ La frecuencia cardíaca es un parámetro medido por métodos no invasivos, que se usa también para evaluar la actividad física, ya que la FC se asocia positivamente con el gasto de energía durante la actividad física¹¹ y con el componente de resistencia físicodeportiva.¹² Se han hecho estudios cinéticos de FC del ejercicio ergométrico submáximo en estudiantes, adultos, preseniles y seniles sanos¹³ a nivel internacional, pero en el medio mexicano estos estudios son escasos;¹⁴ por lo tanto, éste es un estudio de la cinética transitoria de la FC durante esfuerzo ergométrico creciente en atletas mexicanos.



Justificación

El estudio de la cinética transitoria de la FC puede contribuir en el estudio de las causas responsables de la dinámica cardiopulmonar y vascular del organismo durante el ejercicio y sus posibles aplicaciones en el área biomédica. Consistió en una búsqueda de efectos cinéticos específicos de FC, en atletas mexicanos de un conjunto de especialidades deportivas, para determinar si dentro de la dinámica cardiopulmonar de aptitud físicodeportiva del atleta, existían diferencias en la cinética de la FC durante una prueba de esfuerzo máximo a la altura de la ciudad de México (2,240 m sobre el nivel del mar; presión barométrica 576 mmHg o 76.77 kPa).

Hipótesis

Si existen diferencias cardiopulmonares que distinguen a un grupo de no atletas de atletas con determinado grado de resistencia físico-deportiva, entonces se observarán entre grupos diferencias cinéticas significativas de FC durante su respuesta transitoria al esfuerzo creciente, hasta lograr un esfuerzo máximo.

MATERIAL Y MÉTODO

Voluntarios

Se estudiaron 38 personas del sexo masculino clínicamente sanas, sin historia clínica de padecer una enfermedad crónica o un padecimiento reciente durante los últimos tres meses y sin contraindicaciones para realizar una prueba de esfuerzo máximo. Cada persona aceptó por escrito, participar voluntariamente después de haberle informado sobre los posibles riesgos y beneficios del experimento aprobado por el Comité Ético Local de la Escuela Superior de Medicina del Instituto Politécnico Nacional.

Grupos

Se formaron dos grupos de no atletas (control: NOA_{atletas jóvenes} 9 y NOA_{atletas adultos} 9) de la comunidad de la Escuela Superior de Medicina del Instituto Politécnico Nacional. Los NOA_{atletas} no estaban en un programa de acondicionamiento físicodeportivo y carecían de historial de participación regular en una actividad físicodeportiva. También se formaron dos grupos del deporte (grupo experimental: A_{atletas jóvenes} 10 y A_{atletas adultos} 10) con 20 atletas disponibles que contaban con una posición en el escalafón ("ranking") nacional¹⁵ o internacional¹⁴ dentro de su especialidad deportiva en 100 m planos (n = 1), 1,500 m pla-

nos (n = 6); 3 mil m "steplechase" (n = 1); 5 mil m planos (n = 8); maratón (n = 3), y 20 km caminata (n = 1) del Centro Deportivo Olímpico Mexicano.¹⁶

Antropometría general

Las mediciones antropométricas generales se realizaron en todos los voluntarios con base en las técnicas de Martín y Saller¹⁷ y Tanner.¹⁸

Prueba de esfuerzo máximo

Se aplicó en todos los voluntarios un método espirométrico de circuito abierto, para medir la respuesta cardiopulmonar máxima ($\dot{V}O_{2\text{pico}}$, $\dot{V}CO_{2\text{pico}}$, $\dot{V}e_{\text{pico}}$), en el momento en que la persona lograba su potencia ergométrica máxima ($POT_{\text{máx}}$) pedaleando sentado sobre un bicicleta ergométrica (cicloergómetro). Del volumen espirado ($\dot{V}e$) y colectado en un gasómetro Tissot (propiedad del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias de la Secretaría de Salud), se calculó el volumen minuto de la producción de CO_2 ($\dot{V}CO_2$) y del consumo de O_2 ($\dot{V}O_2$) durante el último minuto de cada carga de potencia ergométrica.¹⁶ La concentración de oxígeno y de bióxido de carbono fueron medidas con analizadores de tipo electroquímico para el O_2 (Medical Analyzer IL404) e infrarrojo para el CO_2 (Medical Analyzer IL200). Con estos datos se calcularon los $\dot{V}O_{2\text{pico}}$, $\dot{V}CO_{2\text{pico}}$ (STPD: volumen de gas seco a 0°C Celsius y 760 Torr) y $\dot{V}e_{\text{pico}}$ (VTPS: volumen de gas saturado de vapor de agua a la presión ambiente y temperatura corporal). El $\dot{V}O_{2\text{pico}}$ se definió como el $\dot{V}O_2$ obtenido al momento de la fatiga (POT_{pico}), índice de intercambio respiratorio mayor a uno y también por el hecho de haber registrado una frecuencia cardíaca máxima (FC_{pico}) experimental mayor o coincidente con la estimada por fórmula 220 menos la edad cronológica de cada voluntario. La prueba de esfuerzo máximo se realizó en una bicicleta electrónica ergométrica (Collins, Pedal Mate) mediante un procedimiento continuo de ejercicio bifásico creciente (función tipo rampa). La carga inicial de potencia fue de 50 "Watts" (W) durante los dos primeros minutos (primera fase de la prueba ergométrica tipo rampa). Enseguida, se incrementó en 25 W•2min⁻¹ hasta que el voluntario ya no pudo sostener una frecuencia de pedaleo de 60 revoluciones por minuto (segunda fase de la prueba ergométrica tipo rampa). En todos los casos la rampa fue de 25 W•2min⁻¹ con el propósito de que ésta no tuviera una pendiente demasiado alta o demasiado baja; sino que la duración total para lograr el esfuerzo máximo no fuera prolongada y al mismo tiempo permitiera obtener el mayor $\dot{V}O_{2\text{pico}}$ en los voluntarios. La FC fue monitoreada electrónicamente desde el es-



tado de reposo relativo y minuto a minuto durante dicha prueba.¹⁶

Formulario: Las siguientes variables fueron calculadas.

Estimación de la frecuencia cardíaca máxima

$FC_{máx} Est$ [220 (latidos \cdot min⁻¹) - Edad cronológica (años)]

$FC_{máx} Est_{Ejemplo}$ [220 (latidos \cdot min⁻¹) - 23 (años)] 197 (latidos \cdot min⁻¹)

Cálculo de la captación máxima de oxígeno relativo a la masa corporal total

El $\dot{V}O_{2máx} Abs$ fue dividido entre la masa corporal total (MCT) para obtener el $\dot{V}O_{2máx} Rel$ a la MCT (ml \cdot kg⁻¹ \cdot min⁻¹):

$$\dot{V}O_{2máx} Rel = \frac{\dot{V}O_{2máx} Abs (ml \cdot min^{-1})}{MCT (kg)}$$

$\dot{V}O_{2máx} Rel_{Ejemplo}$ 3,000 (mL \cdot min⁻¹) / 63 (kg) 47.62 (mL \cdot kg⁻¹ \cdot min⁻¹)

Modelado de la fase dos transitoria de la FC ergométrica del esfuerzo máximo

Conforme progresa la respuesta cardiopulmonar transitoria en el tiempo, durante la aplicación de la función de tipo rampa, esta respuesta pasa a ser en línea recta con una pendiente determinada y por eso su tiempo de respuesta media (TRM) es igual a la suma de tiempo de retardo (TD) más la respuesta característica del sistema (la constante del tiempo, τ), es decir, el TRM (TD + τ) es un indicador cinético global que resulta de la primera derivada de la forma de la regresión lineal y representa el tiempo requerido para que la FC logre 63% de su respuesta total (100%).¹⁹ En el caso de una función de tipo rampa, la FC registrada está retrasada respecto a los requerimientos metabólicos por un tiempo equivalente al TRM. El curso temporal (min) de la FC (latidos \cdot min⁻¹) al ejercicio ergométrico fue transformado a segundos (s). La fase II se delimitó mediante regresión lineal simple, ya que las fases uno y tres que son no lineales.¹⁴ Esta fase II transitoria de FC fue modelada por computadora, mediante regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados sobre los datos experimentales de la prueba de tipo rampa y el TRM fue el único parámetro temporal analizado para estudiar la respuesta cinética de la FC; su mejor ajuste fue elegido por el programa para minimizar la suma de las diferencias al cuadrado observadas entre la regresión lineal y los datos experimentales.¹⁴

Análisis estadístico

La antropometría general y las respuestas ergométrica y cardiopulmonar máximas, así como los TRM de la FC fase

II entre los grupos control ($NOA_{tletas} J$) y experimental ($A_{tletas} J$) fueron analizados mediante un prueba t-Student y se consideraron significativos a 0.05 o mejores. El análisis de coeficientes de correlación de Pearson (r) y la regresión lineal se aplicaron entre las variables antropométricas, ergométrica y cardiopulmonares máximas, así como con los TRM de la FC fase II para evaluar el grado de relación existente entre ellas.²⁰

RESULTADOS

Las características antropométricas, cardiopulmonares y cinéticas de la FC fase II de los grupos de jóvenes ($NOA_{tletas} J$ y $A_{tletas} J$) y de adultos ($NOA_{tletas} A$ y $A_{tletas} A$) se muestran en el cuadro 1. Sólo fue posible modelar la FC en 34 de los 38 voluntarios, ya que en cuatro de ellos se interrumpieron momentáneamente los registros de una porción de los datos experimentales transitorios de dicha variable. Un ejemplo de la respuesta total de FC transitoria a la función tipo rampa, con modelado de la FC fase II se muestra en la figura 1. La regresión lineal simple que delimitó la FC fase II de los grupos de jóvenes fueron en $NOA_{tletas} J$: FC fase II 102.376 + (6.287 \cdot Tiempo), r = 0.80, p < 0.001, y en $A_{tletas} J$: FC fase II 91.411 + (5.221 \cdot Tiempo), r = 0.78, p < 0.001; mientras que en los grupos de adultos fueron para $NOA_{tletas} A$: FC fase II 103.912 + (3.692 \cdot Tiempo), r = 0.50, p < 0.001, y $A_{tletas} A$: FC fase II 83.961 + (5.199 \cdot Tiempo), r = 0.77, p < 0.001.

Análisis de signos vitales

Sólo resultó la FC del reposo menor en el grupo de $A_{tletas} J$ comparado con $NOA_{tletas} J$ (t = 2.158, p < 0.05) (Cuadro 1).

Análisis de la respuesta ergométrica máxima

Únicamente resultó la potencia ergométrica mayor en el grupo de $A_{tletas} J$ comparado con $NOA_{tletas} J$ (t = 3.042, p < 0.007) (Cuadro 1).

Análisis de la respuesta cardiopulmonar máxima

Sólo resultó la potencia aerobia máxima absoluta (t = 2.471, p < 0.03) y relativa (t = 3.224, p < 0.007) mayores en el grupo de $A_{tletas} A$ comparado con $NOA_{tletas} A$ (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características antropométricas y cardiopulmonares por grupos.

Variable	NOA _{TLETAS} J _{óvenes} (n = 9)	A _{TLETAS} J _{óvenes} (n = 10)	NOA _{TLETAS} A _{dultos} (n = 9)	A _{TLETAS} A _{dultos} (n = 10)
Edad, años	20 ± 3	19 ± 2	39 ± 8	40 ± 9
Estatura, cm	169 ± 5	172 ± 6	169 ± 6	167 ± 6
MCT, kg	66 ± 11	62 ± 6	72 ± 8	67 ± 9
IMCT, kg•m ⁻²	23 ± 3	21 ± 1	25 ± 2	24 ± 3
Signos vitales de reposo				
F _{recuencia} R _{espiratoria} (ciclos•min ⁻¹)	18 ± 2	19 ± 4	17 ± 3	17 ± 2
F _{recuencia} C _{ardíaca} (latidos•min ⁻¹)	73 ± 13 ^a	59 ± 7 ^a	65 ± 6	63 ± 15
Presión arterial (mmHg)				
S _{istólica}	115 ± 11	110 ± 15	123 ± 16	116 ± 15
D _{istólica}	70 ± 8	67 ± 8	78 ± 10	74 ± 9
Respuesta cardiopulmonar máxima				
P _{otencia} Watts	197 ± 29 ^b	232 ± 29 ^b	181 ± 35	208 ± 21
FC, lat•min ⁻¹	197 ± 21	193 ± 16	175 ± 10	171 ± 7
FCE _{stimada} lat•min ⁻¹	197 ± 21	201 ± 2	181 ± 8	180 ± 9
VO ₂ l•min ⁻¹	2.9 ± 0.7	3.3 ± 1.3	2.3 ± 0.5 ^c	3.1 ± 0.8 ^c
ml•kg ⁻¹ •min ⁻¹	44 ± 12	50 ± 17	31 ± 5 ^d	48 ± 13 ^d

Nota: (n = tamaño del grupo). $\dot{V}O_2$: Potencia aerobia máxima. Los valores numéricos representan el promedio ± desviación estándar. Los superíndices en una misma letra son diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los valores promedio de pares de grupos, localizados mediante la prueba t de Student.

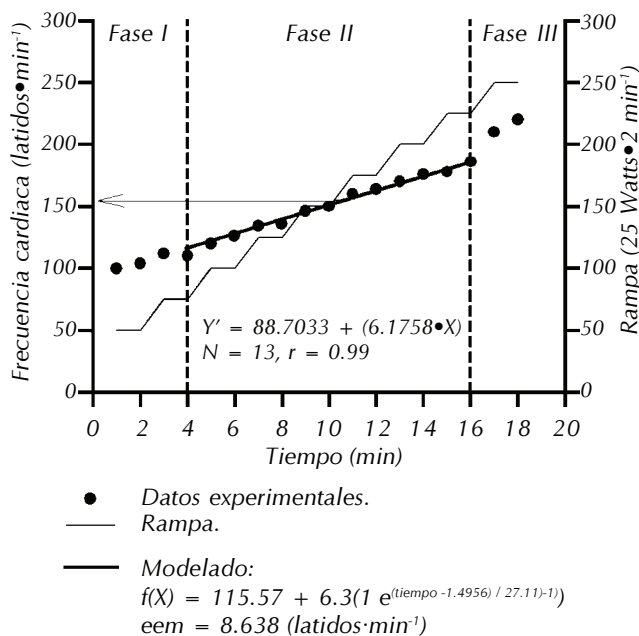


Figura 1. Un ejemplo de respuesta cardíaca transitoria al es fuerzo ergométrico tipo rampa con modelado no lineal ($f(x)$) de la fase II (delimitada mediante regresión lineal = Y). El tiempo de respuesta media fue de 28.61s (0.47 min) necesarios para lograr 63% (flecha) de la respuesta exponencial de la frecuen cia cardíaca desde el inicio hasta el final de la fase II.

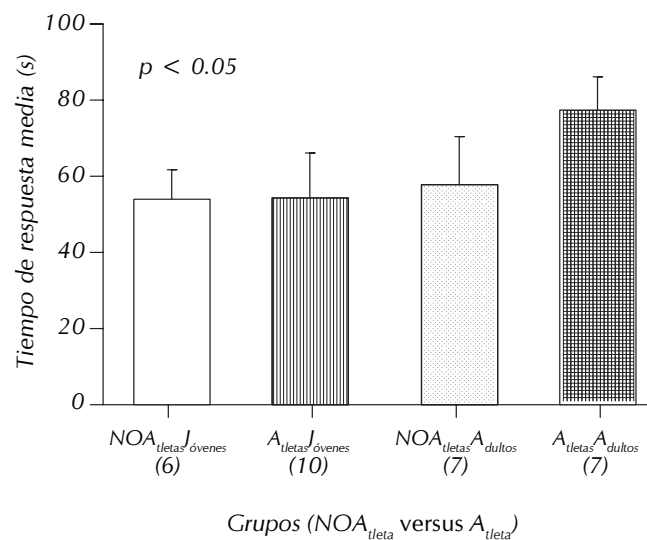


Figura 2. Fase II Transitoria de la frecuencia cardíaca. Tiem po de respuesta media exponencial de grupos control ver sus experimental, necesario para lograr 63% de la respuesta exponencial de la frecuencia cardíaca desde el inicio hasta el final, de la fase II al esfuerzo ergométrico tipo rampa. La barra y su línea vertical son Media ± DE. El tamaño de muestra está entre paréntesis. La diferencia significativa en tre grupos es $p < 0.05$.



Análisis del T_{tiempo} de $R_{\text{respuesta}}$ M_{media} de la FC fase II

El tiempo de respuesta media de la frecuencia cardíaca de la fase II resultó menor en el grupo de $A_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$ comparado con $NOA_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$ ($t = 8.093$, $p < 0.001$) (Figura 2).

DISCUSIÓN

$NOA_{\text{tletas}} J_{\text{óvenes}}$ versus $A_{\text{tletas}} J_{\text{óvenes}}$

Una FC del reposo menor en $A_{\text{tletas}} J_{\text{óvenes}}$ comparado con $NOA_{\text{tletas}} J_{\text{óvenes}}$ indicaría una adaptación cardíaca positiva a la adecuación físico-deportiva de resistencia,^{4,21} en la que si bien no se acompañó de diferencias significativas de frecuencia cardíaca y potencia aerobia absoluta y relativa máximas, a pesar de que es bien sabido que el entrenamiento disminuye la FC del reposo en jóvenes y viejos por un aumento del tono parasimpático;²² en cambio, sí resultó una potencia ergométrica mayor en $A_{\text{tletas}} J_{\text{óvenes}}$ comparado con $NOA_{\text{tletas}} J_{\text{óvenes}}$, lo que también se explicaría por una adaptación benéfica periférica músculo esquelética a la adecuación físico-deportiva de resistencia.^{3,23} Por otro lado, debido a que la edad cronológica de ambos grupos juveniles control y experimental, resultó menor a 25 años y la captación máxima de oxígeno comienza a disminuir a partir de esta última edad cronológica, ello también explicaría un tiempo de respuesta medio de la fase II de la frecuencia cardíaca transitoria, similar entre $A_{\text{tletas}} J_{\text{óvenes}}$ comparado con $NOA_{\text{tletas}} J_{\text{óvenes}}$.²⁴ Asimismo, el efecto del ejercicio de resistencia en el corazón, es menos pronunciado en jóvenes.²⁵ También, debido a que el ergómetro empleado en este estudio fue un cicloergómetro en el que participaron principalmente las extremidades pélvicas, se descarta la posibilidad la influencia de la actividad dinámica del ejercicio con las extremidades torácicas y su efecto sobre una menor actividad vagal vegetativa durante la prueba de esfuerzo.²⁶

$NOA_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$ versus $A_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$

Una frecuencia cardíaca de reposo similar entre los grupos de adultos, se interpreta como una adaptación positiva físico-deportiva de resistencia principalmente a nivel músculo esquelético²; sino fuera por ello, la cinética lenta de la frecuencia cardíaca en $A_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$ se explicaría también porque los atletas con mayor adaptación físico-deportiva de resistencia muestran mayor volumen en sus cavidades cardíacas y por ello muestran menor frecuencia cardíaca del reposo y durante el trabajo submáximo.^{4,27} No obstante, la potencia aerobia máxima absoluta ($\dot{V}O_{2\text{máx}}$)⁴ y re-

lativa ($\dot{V}O_{2\text{máx}} \text{ Rel}$)³ mayores en $A_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$ comparado con $NOA_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$, se debe a que su componente físico-deportivo músculo esquelético de resistencia fue mayor.^{3,28} Por ejemplo, se sabe que la resistencia músculo esquelética permite lograr mayor carga de trabajo ergométrica,² si bien en este trabajo no fue diferente del grupo $NOA_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$; en cambio, la potencia aerobia máxima relativa a la masa corporal total fue mayor en $A_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$ comparado con $NOA_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$, lo que seguramente obedece a una mayor capilaridad y a una mayor capacidad oxidativa enzimática²⁹ en el metabolismo energético del músculo esquelético²⁸ del grupo experimental (atletas). Esta mayor capacidad oxidativa ($\dot{V}O_{2\text{máx}} \text{ Rel}$) de los $A_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$ acoplada a una mayor potencia aerobia absoluta ($\dot{V}O_{2\text{máx}}$) establece una relación causal, que explicaría la observación de un tiempo de respuesta media de la frecuencia cardíaca de la fase dos menor en $A_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$ comparado con $NOA_{\text{tletas}} A_{\text{dultos}}$. Asimismo, la dinámica de la FC es más sensitiva a la actividad física que a la edad³⁰. La importancia de la fase II transitoria del ejercicio ergométrico se debe a que la respiración celular, principalmente músculo esquelética, estimula el acoplamiento de la respiración pulmonar y el transporte de gases, sobre todo el de oxígeno, en el que el gasto cardíaco, y por ello la contractilidad miocárdica conjuntamente con la FC³¹ juegan un papel central, para la realización del trabajo biomecánico generado por la maquinaria contráctil músculo esquelética.³² La frecuencia cardíaca es un parámetro que permite también evaluar la adecuación físicodeportiva, ya que la frecuencia cardíaca se relaciona positivamente con el gasto de energía durante la actividad físicodeportiva.¹¹ Luego entonces, el monitoreo cinético no invasivo de la FC, puede ser de gran utilidad en estudios del estado no estable (transitorio), de la dinámica del componente físico-deportivo de resistencia en programas de adecuación físico-deportiva, con propósitos de promoción de la salud, rehabilitación y entrenamiento deportivo. En este trabajo se observó una cinética lenta de FC en su fase II durante la respuesta transitoria al esfuerzo creciente sólo en adultos atletas. Ello se explica por una probable adaptación músculo esquelética mayor, comparada con la que ocurre en el corazón; sin embargo, también se explicaría por qué durante una prueba de esfuerzo máximo, el aumento en la FC está determinada principalmente por una disminución de la influencia vagal vegetativa,¹⁶ la que sería menor a mayor componente de resistencia físico-deportiva²⁶ de un atleta. Esto podría ocurrir a pesar de que la FC durante una prueba a intensidad supraumbral anaerobia exceda su valor esperado.³³ Todo ello demuestra que el estudio de la FC del estado transitorio del ejercicio ofrece una mejor posibilidad de análisis dinámico de la homeostasis compara-



do con el de las mediciones de FC del estado estable. Otra posible explicación de una cinética lenta de FC en su fase II durante la respuesta transitoria al esfuerzo creciente en adultos atletas sería una mayor capacitancia cardiovascular, que durante el ejercicio causará un mejor llenado ventricular diastólico con un mayor volumen de eyección y menor FC transitoria, debido a una adaptación orgánica causada por la práctica constante de una actividad deportiva.²⁵

CONCLUSIONES

La cinética lenta de la fase dos de la frecuencia cardíaca transitoria del esfuerzo ergométrico creciente, coincidió con una potencia aerobia máxima absoluta y relativa mayor en atletas adultos. El estudio de la frecuencia cardíaca transitoria del esfuerzo ergométrico creciente, mostró en atletas adultos una cinética diferente de dicho parámetro, durante su intervención en la respuesta homeostática a este tipo de ejercicio.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestra gratitud a todos los atletas, entrenadores, personal y autoridades del Comité Olímpico Mexicano (COM)-Centro Deportivo Olímpico Mexicano (CDOM) por su cooperación y por las facilidades que brindaron en las instalaciones a su digno cargo. Este trabajo fue apoyado por la Escuela Superior de Medicina (ESM) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), gracias al desarrollo experimental de los proyectos de investigación científica apoyados por la ESM (Bol No.: 94061012, 2006520085), IPN (CGEPI: 20070298-PIFI; CGEPI: 20080619), COFAA, EDD, y CONACyT:23151. Asimismo, nuestro agradecimiento a todos los estudiantes voluntarios y colaboradores en investigación, personal de apoyo a la docencia, personal docente y autoridades de la ESM y también, a las distinguidas autoridades del IPN por su apoyo académico administrativo.

REFERENCIAS

1. Ekblom B, Åstrand P-O, Saltin B, Stenert J, Wallström B. Effect of training on circulatory response to exercise. *J Appl Physiol* 1968; 24: 518-28.
2. Bassett DR, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 70-84.
3. Conley DL, Krahenbul G. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1980; 12: 357-60.
4. Crawford MH, Maron BJ. El corazón del deportista. *Clin Med Nor DF: México: Nueva Edit. Interamericana*; 1992, P. 205-302.
5. Montoye HJ. Introduction: evaluation of some measurements of physical activity and energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: S439-S441.
6. Fick A. Über die messung des blutquantums in den hertzventrikeln. *Verhandlungen der Physikalisch-Medizinschen Gesellschaft zu Würzburg* 1870; 2: 16.
7. Wagner PD. Determinants of maximal oxygen transport and utilization. *Ann Rev Physiol* 1996; 58: 21-50.
8. Åstrand P-O, Bergh U, Kilbom Å. A 33-yr follow-up of peak oxygen uptake and related variables of former physical education students. *J Appl Physiol* 1997; 82: 1844-52.
9. Yoshida T, Whipp BJ. Dynamic asymmetries of cardiac output transients in response to muscular exercise in man. *J Physiol (London)* 1994; 480(2): 355-9.
10. De Cort SC, Innes JA, Barstow TJ, Guz A. Cardiac output, oxygen consumption, and arteriovenous oxygen difference following a sudden rise in exercise level in humans. *Exp Physiol (London)* 1991; 441: 501-12.
11. Strath SJ, Swartz AM, Bassett DR, O'Brien WL, King GA, Ainsworth BE. Evaluation of heart rate as a method for assessing moderate intensity physical activity. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: S465-S470.
12. Lucía A, Hoyos J, Pérez M, Chicharro JL. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 1777-82.
13. Babcock MA, Paterson DH, Cunningham DA. Influence of ageing on aerobic parameters determined from a ramp test. *Europ J Appl Physiol* 1992; 65: 138-43.
14. Padilla JP, Licea JM, Olvera GS, Durán LCh, López JIC. Cinética del intercambio gaseoso y la frecuencia cardíaca durante una prueba de esfuerzo creciente en atletas Mexicanos. *Rev Inst Nal Enf Resp Mex* 1999; 12(2): 87-96.
15. Federación Mexicana de Atletismo: Anuario 1989. D.F., México: Comisión Nacional del Deporte de la Secretaría de Educación Pública y Confederación Deportiva Mexicana; 1989, p. 22.
16. Padilla JP, Eguía Lis MaCG, Licea JM, Taylor AW. Capacidad aerobia y actividad deportiva en mexicanos de 13 a 56 años de edad. *Arch Inst Cardiol Méx* 1998; 68: 224-31.
17. Martin R, Saller K. *Lehrbuch der Anthropologie I. Stuttgart: Germany: Fisher; 1975.*
18. Tanner JM. *The Physique of the Olympic Athlete. London, England: Allen & Unwin; 1964.*
19. Lamarra N. Ventilatory control, cardiac output, and gas-exchange dynamics during exercise transients in man. University of California, Los Angeles, California, U.S.A.: Ph. D. Thesis Dissertation; 1982, p. 1-300.
20. Zar JH. *Biostatistical Analysis* 3rd. Ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, Inc.; 1996.



21. Casaburi R, Storer TW, Ben-Dov I, Wasserman K. Effect of endurance training on possible determinants of O_2 during heavy exercise. *J Appl Physiol* 1987; 62: 199-207.
22. Levy WC, Cerqueira MD, Harp GD, Johannessen KA, Abrass IB, Schwartz RS, Stratton JR. Effect of endurance exercise training on heart rate variability at rest in healthy young and older men. *Am J Cardiol* 1998; 82: 1236-41.
23. Daniels J. A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 1985; 17: 332-8.
24. Springer C, Barstow TJ, Wasserman K, Cooper DM. Oxygen uptake and heart rate response during exercise in children and adults. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 24: 71-9.
25. Forman KA, Manning WJ, Hauser R, Gervino EV, Evans WJ, Wei JY. Enhanced left ventricular diastolic filling associated with long-term endurance training. *J Gerontol* 1992; 263: 2766-71.
26. Tulppo MP, Makikallio TH, Laukkanen RT, Huikuri HV. Differences in autonomic modulation of heart rate during arm and leg exercise. *Clin Physiol* 1999; 19(4): 294-9.
27. Pichot V, Roche F, Gaspoz J-M, Enjolras F, Antoniadis A, Minini P, Costes F, Busso T, Lacour J-R, Barthélémy JC. Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 1729-36.
28. Saltin B, Gollnick PD. Skeletal muscle adaptability. In: Peachey LD, Adrian PH, Geiser SR (ed.). *Handbook of physiology: Skeletal muscle*. Bethesda. Am Physiol Soc 1983; 30: 550-631.
29. Willis WT, Jackman MR. Mitochondrial function during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1994; 26: 1347-54.
30. Fukuoka Y, Nakagawa Y, Ogoh K, Shiojiri T, Fukuba Y. Dynamics of the heart rate response to sinusoidal work in humans: influence of physical activity and age. *Clinical Science* 2002; 102: 31-8.
31. Matsuda M, Segushita Y, Koseki S, Ito I, Akatsuka T, Takamatsu K. Effect of exercise on left ventricular diastolic filling in athletes and non athletes. *J Appl Physiol: Resp Environ Exercise Physiol* 1983; 55: 323-8.
32. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Casaburi R, Whipp BJ. Principles of exercise testing and interpretation. 3rd. Ed. Hargestown: EEUU: Lippincott Williams & Wilkins; 1999, p. 76-8, 185.
33. Riley MS, Cooper CB. Ventilatory and gas exchange response during heavy constant work-rate exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 98-104.

Solicitud de sobretiros:

Javier Padilla P. MD, MSc
 Fisiología del Ejercicio,
 Escuela Superior de Medicina 3er Piso
 Instituto Politécnico Nacional,
 Casco de Santo Tomás, DMH, México,
 C.P.11340, D.F.
 Tel.: (55) 5729-6300 Ext/Fax: 62733
 Correo electrónico: japadilla@ipn.mx