CINÉTICA DE LA FRECUENCIA CARDIACA DEL ESFUERZO ERGOMÉTRICO CRECIENTE EN ATLETAS MEXICANOS

JAVIER PADILLA PÉREZ[*], VICTOR ALEJANDRO SANTOS CADENA [*,**], CHRISTIAN ERNESTO PÉREZ TÉLLEZ[*,**].

Escuela Superior de Medicina, Instituto Politécnico Nacional [*]

Estudiantes I.P.N. (Bols. Nos.: 94061012, 2006520085)[**].

Correspondencia:

Javier Padilla P. MD, MSc

Fisiología del Ejercicio, Escuela Superior de Medicina 3º Piso

Instituto Politécnico Nacional, Casco de Santo Tomás, DMH,

México C.P.11340, D.F.

TEL: (55)5729-6300 EXT/FAX. 62733

e-mail: **japadillap@ipn.mx**

Título corto: Modelo de la fase dos transitoria de frecuencia cardíaca en atletas

Resumen.- El estudio cinético de la dinámica 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_{tletas} y A_{tletas} con cierto grado de resistencia físicodeportiva en términos de su captación máxima de O_2 pulmonar ($\dot{V}O_2$). De 42 voluntarios, se formaron dos grupos control de no atletas: $NOA_{tletas}J_{óvenes}$ (n= 9, 20±3 años) (media±DE) y $NOA_{tletas}A_{dultos}$ (n= 9, 39 ±8 años); y dos del deporte: $A_{tletas}J_{óvenes}$ (n= 14 , 19±2 años) y $A_{tletas}A_{dultos}$ (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; $\dot{V}O_2$; $\dot{V}CO_2$, eliminación pulmonar de CO_2; $\dot{V}e$, ventilación espirada) y potencia ergométrica ($POT_{máx}$). 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 (61±13 < 73±13) y la $POT_{máx}$ mayor (234±27 > 197±29, W) en el grupo de $A_{tletas}J_{óvenes}$ comparado con $NOA_{tletas}J_{óvenes}$; mientras que el $\dot{V}O_{2máx}$ 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 $A_{tletas}A_{dultos}$ comparado con $NOA_{tletas}A_{dultos}$. La dinámica de la FC similar entre los grupos de jóvenes se explica mas 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 los sistema cardiovascular y músculo esquelético del atleta, lo que a su vez causa una dinámica cardiovasular homeostática de respuesta mejorada al ejercicio ergométrico. Se concluyó que la cinética lenta de la fase dos de la FC transitoria del esfuerzo máximo permitió el acondicionamiento físicodeportivo de resistencia en atletas adultos. **PALABRAS CLAVE: Atletas, Mexicanos; captación pulmonar de O_2; frecuencia cardiaca; cinética, tiempo de respuesta media.**

HEART RATE KINETICS OF THE CRESCENT ERGOMETRIC EFFORT IN MEXICAN ATHLETES

Summary.- The kinetics study of the heart rate (HR) dynamics 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 O_2 uptake ($\dot{V}O_2$). We studied 42 volunteers, divided in two non athletes groups of control: $NOA_{thletes}Y_{oungs}$ (n= 9, 20±3 years) (mean±SD) y $NOA_{thletes}A_{dults}$ n= 9, 39 ±8 years); and two sportive groups: $A_{thletes}Y_{oungs}$ (n= 14 , 19±2 years) y $A_{thlees}A_{dults}$ (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; $\dot{V}O_2$; $\dot{V}CO_2$, pulmonary CO_2 output; $\dot{V}e$, 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 (61±13 < 73±13) and POT_{max} was higher (234±27 > 197±29, W) in $A_{thletes}Y_{oungs}$ compared $NOA_{thletes}Y_{oungs}$; while the $\dot{V}O_{2max}$ 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 $A_{thletes}A_{dults}$ compared $NOA_{thletes}A_{dults}$. The dynamic of the HR, 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 benefical effect of the regular sport activity on the cardiovascular system and skeletal muscle system in athletes, and these cause a better homoeostatic cardiovascular dynamical 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.

INTRODUCCIÓN.- La adaptación a un entrenamiento de resistencia físicodeportiva, habilita a una persona para mantener por un tiempo relativamente "prolongado" un esfuerzo submáximo (resistencia físicodeportiva) 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 electromiografía 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 macanismos 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 O_2 ($\dot{V}O_2$) corporal total mediante la ecuación de Fick ($\dot{V}O_2$ / FC= $V_{olumen}S_{istólico}$,ml•min-1• $C_{ontenido}O_2a_{rterial}$ - $C_{ontenido}O_2\bar{v}_{enosa}$)[6] que refleja el curso temporal del consumo de O_2 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 un dinámica de FC diferente entre aletas de diversas especialidades deportivas.

Estado actual.- En base a 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 $\dot{V}O_{2máx}$ se relaciona con la condición atlética; se sabe que, a mayor condición atlética mayor es la sensitividad para las conductancias del transporte de oxígeno en los sistemas pulmonar, cardiovascular (v.gr., 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 cardíaca 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 $\dot{V}O_{2máx}$[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 el 63 % de la respuesta total cardiopulmonar transitoria al incremento rápido de carga de trabajo ergométrica, ha mostrado ser de 28 s para el gasto cardíaco, 55 s para $\dot{V}O_2$, 57s para la diferencia arteriovenosa de O_2, 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 durente la actividad física[11] 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 sanos[13] a nivel internacional, pero en el medio mexicano estos estudios son escasos[14]; por lo tanto , este es uno de los primeros estudios 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 (2240 m sobre el nivel del mar; presión barométrica = 576 mm Hg o 76.77 kPa). **Hipótesis**.- Si existen diferencias cardiopulmonares, que distinguen a un grupo de no atletas de atletas con determinado grado de resistencia físicodeportiva, 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 42 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: NO $NOA_{tletas}J_{óvenes}$ = 9 y $NOA_{tletas}A_{dultos}$= 9) de la comunidad de la Escuela Superior de Medicina del Instituto Politécnico Nacional. Los NOA_{tletas}, 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: $A_{tletas}J_{óvenes}$= 14 y $A_{tletas}A_{dultos}$= 10) con 24 atletas disponibles, que contaban con una posición en el escalafón ("ranking") nacional[15] o internacional[14] dentro de su especialidad deportiva de karate-do (n=3); atletas de 100 m planos (n=1), 1500 m planos (n=6); 3mil m “steeplechase” (n=1); 5mil m planos (n=8); maratón (n= 3), buceo (n=1) y 20 km caminata (n= 1) del Centro Deportivo Olímpico Mexicano[16].

Antropometría general.- La mediciones antropométricas generales se realizaron en todos los voluntarios en base a las técnicas de Martín y Saller[17] 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 ($\dot{V}O_{2pico}$, $\dot{V}CO_{2pico}$, $\dot{V}e_{pico}$) en el momento en que la persona lograba su potencia ergométrica máxima ($POT_{máx}$) 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 éstos datos se calcularon los $\dot{V}O_{2pico}$, $\dot{V}CO_{2pico}$ (STPD: volumen de gas seco a 0°Celsius y 760 Torr) y $\dot{V}e_{pico}$ (VTPS: volumen de gas saturado de vapor de agua a la presión ambiente y temperatura corporal). El $\dot{V}O_{2pico}$ 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 incremento en 25 $W \cdot 2min^{-1}$ 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 $W \cdot 2min^{-1}$ con el propósito de que esta 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 $\dot{V}O_{2pico}$ en los voluntarios. La FC fue monitoreada electrónicamente desde el estado 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 ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$): $\dot{V}O_{2máx}Rel = \dot{V}O_{2máx}Abs\ (ml \cdot min^{-1}) / MCT\ (kg)$

$$\dot{V}O_{2máx}Rel_{Ejemplo} = 3000\ (ml \cdot min^{-1}) / 63\ (kg) = 47.62\ (ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1})$$

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 el 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·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}) y experimental (A_{tletas}) 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 ($NOA_{tletas}J_{óvenes}$ y $A_{tletas}J_{óvenes}$) y de adultos ($NOA_{tletas}A_{dultos}$ y $A_{tletas}A_{dultos}$) se muestran en el Cuadro I. Un ejemplo de la respuesta holística 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 el $NOA_{tletas}J_{óvenes}$: FC fase II= 102.376 + (6.287•Tiempo), r= 0.80, $p<0.001$, y en $A_{tletas}J_{óvenes}$: FC fase II= 91.411 + (5.221•Tiempo), r= 0.78, $p<0.001$; mientras que en los grupos de adultos fueron para el $NOA_{tletas}A_{dultos}$: FC fase II= 103.912 + (3.692•Tiempo), r= 0.50, $p<0.001$, y $A_{tletas}A_{dultos}$: FC fase II= 83.961 + (5.199•Tiempo), r= 0.77, $p<0.001$.

Análisis de signos vitales.- Sólo resultó la FC del reposo menor en el grupo de $A_{tletas}J_{óvenes}$ comparado con $NOA_{tletas}J_{óvenes}$ ($t= 2.158$, $p<0.05$) (Cuadro I).

Análisis de la respuesta ergométrica máxima.- Únicamente resultó la potencia ergométrica mayor en el grupo de $A_{tletas}J_{ovenes}$ comparado con $NOA_{tletas}J_{óvenes}$ ($t= 3.042$, $p<0.007$) (Cuadro I).

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 $A_{tletas}A_{dultos}$ comparado con $NOA_{tletas}A_{dultos}$ (Cuadro I).

Análisis del T_{iempo} de $R_{espuesta}$ M_{edia} de la FC fase II.- El tiempo de respuesta media de la frecuencia cardíaca de la fase II resultó menor en el grupo de $A_{tletas}A_{dultos}$ comparado con $NOA_{tletas}A_{dultos}$ ($t= 8.093$, $p<0.001$) (Figura 2).

DISCUSIÓN. - $NOA_{tletas}J_{óvenes}$ ***versus*** $A_{tletas}J_{óvenes}$.- Una FC del reposo menor en el grupo de $A_{tletas}J_{óvenes}$ comparado con $NOA_{tletas}J_{óvenes}$ indicaría una adaptación cardíaca positiva a la adecuación fisicodeportiva de resistencia[4,21], en la que si bien no se acompaño 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, si resultó una potencia ergométrica mayor en el grupo de $A_{tletas}J_{ovenes}$ comparado con $NOA_{tletas}J_{óvenes}$, lo que también se explicaría por una adaptación benéfica periférica músculo esquelética a la adecuación fisicodeportiva 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 $A_{tletas}J_{óvenes}$ comparado con $NOA_{tletas}J_{óvenes}$[24]. Por otro lado, 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].

$NOA_{tletas}A_{dultos}$ ***versus*** $A_{tletas}A_{dultos}$.- Una frecuencia cardíaca de reposo similar entre los grupos de adultos, se interpreta como adaptación positiva fisicodeportiva de resistencia principalmente a nivel músculo esquelético[2]; sino fuera por ello, la cinética lenta de la frecuencia cardíaca en el grupo de $A_{tletas}A_{dultos}$ se explicaría también por que, los atletas con mayor adaptación fisicodeportiva 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 ($\dot{V}O_{2máx}$)[4] y relativa ($\dot{V}O_{2máx}Rel$)[3] mayores en el grupo de $A_{tletas}A_{dultos}$ comparado con $NOA_{tletas}A_{dultos}$, se debe a

que su componente fisicodeportivo 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 $NOA_{tletas}A_{dultos}$; en cambio, la potencia aerobia máxima relativa a la masa corporal total fue mayor en el grupo $A_{tletas}A_{dultos}$ comparado con el grupo $NOA_{tletas}A_{dultos}$, lo que seguramente obedece a una mayor capilarización y a una mayor capacidad oxidativa enzimática[29] del metabolismo energético músculo esquelético[28] del grupo experimental. Esta mayor capacidad oxidativa ($\dot{V}O_{2máx}Rel$) del grupo $A_{tletas}A_{dultos}$, acoplada a una mayor potencia aerobia absoluta ($\dot{V}O_{2máx}$) establece una relación causal que explicaría la observación de un tiempo de respuesta media de la frecuencia cardíaca de la fase dos menor en el grupo de $A_{tletas}A_{dultos}$ comparado con $NOA_{tletas}A_{dultos}$. Asimismo, la dinámica de la FC es más sensitiva a la actividad física que a la edad[30]. 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 FC[31] 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 durente 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 físicodeportivo de resistencia en programas de adecuación físicodeportiva con propósitos de promoción de la salud, rehabilitación y entrenamiento deportivo. En este trabajo, solo se observo una cinética lenta de FC en su fase II durante la respuesta transitoria al esfuerzo creciente en el grupo de adultos atletas y se explica por una probable adaptación músculo esquelética mayor comparada con la que ocurre en el corazón; sin embargo, también se explicaría por que 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 físicodeportiva[26] de un atleta, 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 comparado 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 el grupo de 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 dinámica 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, IPN (CGEPI: 20070298-PIFIs), COFAA 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.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ekblom B, Åstrand P-O, Saltin B, Stenterg J, Wallström B: *Effect of training on circulatory response to exercise*. J Appl Physiol, 1968;24:518-528.

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;12:357-360.

4. Crawford MH, Maron BJ: *El corazón del deportista*. Clin Med Nor, DF: México, Nueva Edit. Interamericana, 1992;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: *Uber die messung des blutquantums in den hertzventrikeln*. Verhandlungen der Physikalisch-Medizinschen Gesellschaft zu Wurzberg, 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; 82:1844-1852.

9. Yoshida T, Whipp BJ: *Dynamic asymmetries of cardiac output transients in response to muscular exercise in man*. J Physiol (London), 1994;480.2: 355-359.

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; 501-512.

11. Strath SJ, Swarts AM, Bassett DR, O´Brien WL, King GA, Ainsworth BE: *Evaluation of heart rate as a method for assesing 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; 32:1777-1782.

13. Babcock, MA, Paterson DH, Cunningham DA: *Influence of ageing on aerobic parameters determined from a ramp test*. Europ J Appl Physiol, 1992; 65:138-143.

14. Padilla JP, Licea JM, Olvera GS, Durán LCh, Lópes JIC: *Cinética del intercambio gaseoso y la frecuencia cardiaca 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*. DF: México, Comisión Nacional del Deporte de la Secretaría de Educación Pública y Confederación Deportiva Mexicana, 1989; 22.

16. Padilla JP, Eguia Lis MaCG, Licea JM, Taylor, AW: *Capacidad aeróbia y actividad deportiva en Mexicanos de 13 a 56 años de edad*. Arch Inst Cardiol Méx., 1998; 68: 224-231.

17. Martin R, Saller K: *Lehrbuch der Anthropologie I*. Stuttgar: 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*. Ph. D. Thesis Dissertation, University of California, Los Angeles, California, U.S.A., 1982; 1-300.

20. Zar JH. Biostatistical Analysis, Third Edition, New Jersey; Prentice Hall, Inc., USA, 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; 82:1236-1241.

23. Daniels J: *A physiologyst's view of running economy*. Med Sci Sports Exerc, 1985;17:332-338.

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;24:71-79.

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;263:2766-2771.

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: 1729-1736.

28. Saltin B, Gollnick PD: *Skeletal muscle adaptability*. En: Peachey LD, Adrian PH, Geiser SR. *Handbook of physiology: Skeletal muscle*. Bethesda, American Physiology Society 1983;30:550-631.

29. Willis WT, Jackman MR: *Mitochondrial function during heavy exercise*. Med Sci Sports Exerc, 1994; 26:1347-1354.

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; 102:31–38.

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: 323-328.

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; 76-78, 185.

33. Riley MS, Cooper CB: *Ventilatory and gas exchange response during heavy constant work-rate exercise*. Med Sci Sports Ecerc, 2002;34:98-104.

PIE DE FIGURA

Figura 1.- Un ejemplo de respuesta cardíaca transitoria al esfuerzo 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 28.61 s (0.47 min) necesarios para lograr el 63% (flecha) de la respuesta de frecuencia cardíaca desde el inicio hasta el final de la fase II.

Figura 2.- Tiempo de respuesta media exponencial de grupos control *versus* experimental, necesario para lograr el 63% de la respuesta de 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 entre grupos es $p<0.05$.

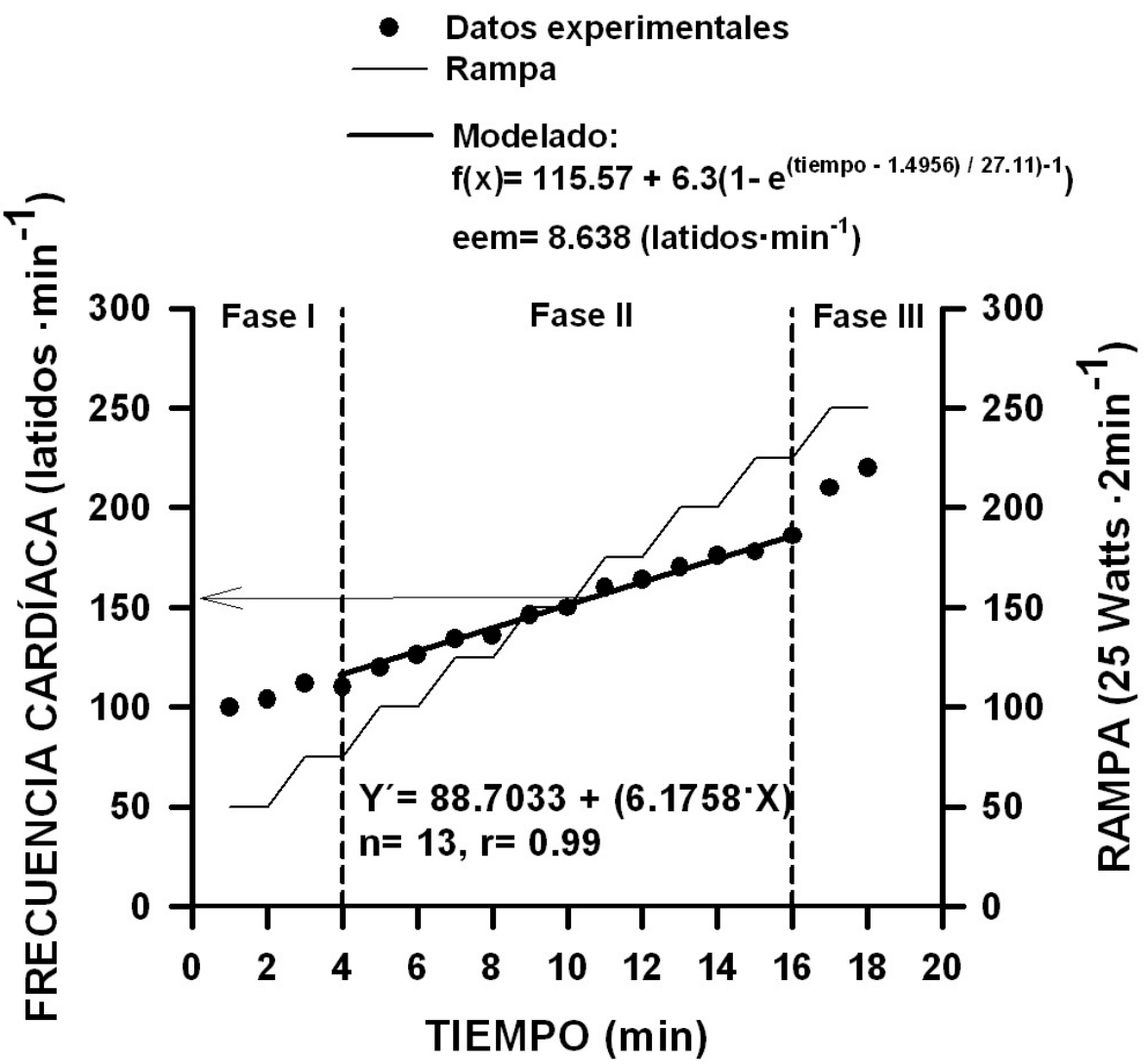
Cuadro I. Características antropométricas y cardiopulmonares por grupos.

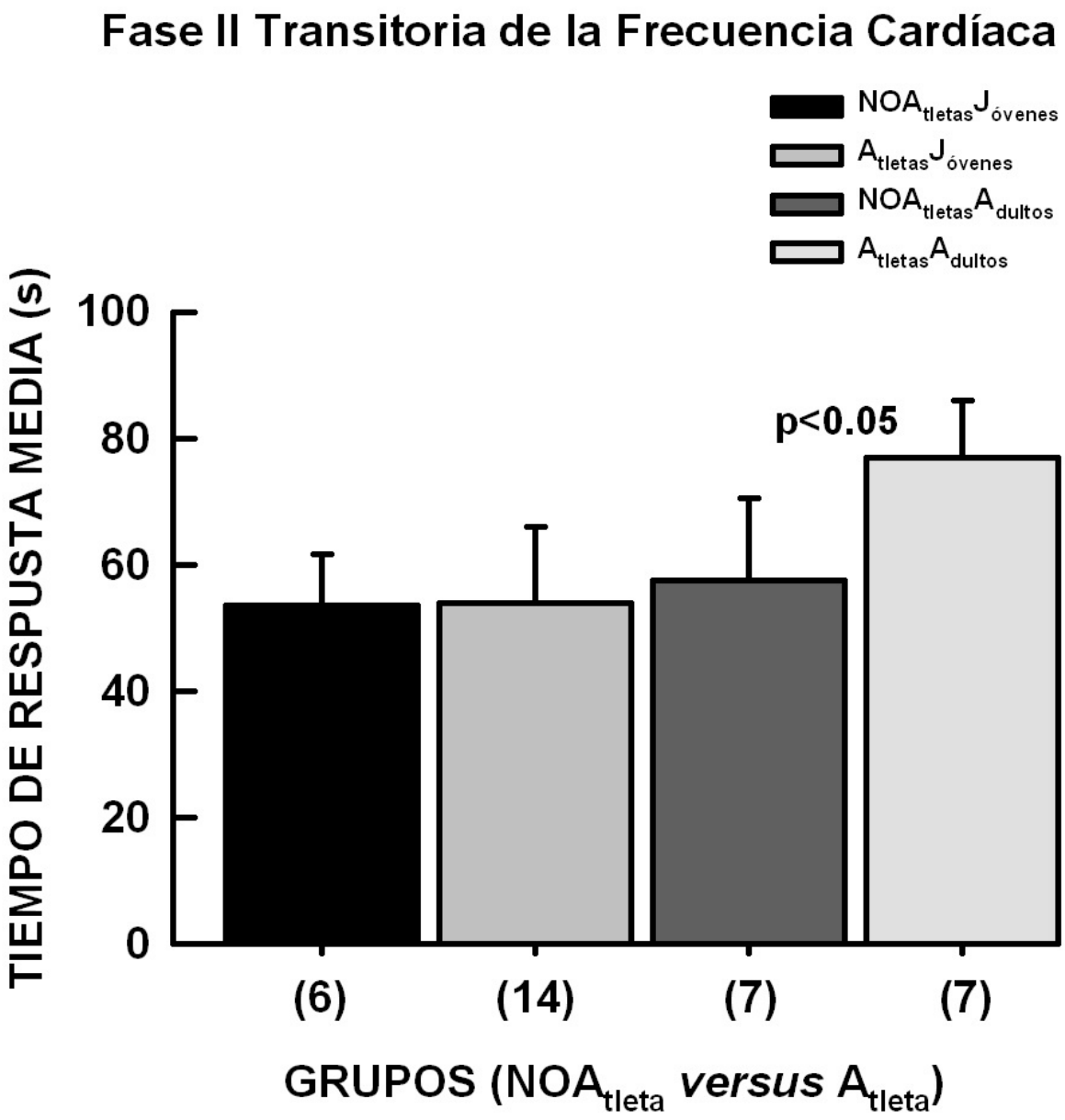
VARIABLE	$NOA_{TLETAS}J_{óvenes}$ (n = 9)	$A_{TLETAS}J_{óvenes}$ (n = 14)	$NOA_{TLETAS}A_{dultos}$ (n = 9)	$A_{TLETAS}A_{dultos}$ (n = 10)
Edad, años	20±3	19±2	39±8	40±9
Estatura, cm	169±5	172±7	169±6	167±6
MCT, kg	66±11	63±6	72±8	67±9
IMCT, $kg \cdot m^{-2}$	23±3	21±1	25±2	24±3
Signos vitales de reposo:				
Frecuencia/ Respiratoria ($ciclos \cdot min^{-1}$)	18±2	19±5	17±3	17±2
Cardíaca ($latidos \cdot min^{-1}$)	73±13[a]	61±12[a]	65±6	63±15
Presión arterial: Sistólica ,mmHg	115±11	111±14	123±16	116±15
Diastólica, mmHg	70±8	67±7	78±10	74±9
Respuesta cardiopulmonar máxima:				
Potencia, Watts	197±29[b]	234±27[b]	181±35	208±21
FC, $lat \cdot min^{-1}$	197±21	199±18	175±10	171±7
$FCE_{stimada}$, $lat \cdot min^{-1}$	197±21	201±2	181±8	180±9
$\dot{V}O_2$, $l \cdot min^{-1}$	2.9±0.7	3.3±1.1	2.3±0.5[c]	3.1±0.8[c]
$ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$	44±12	52±16	31±5[d]	48±13[d]

Nota:(n = tamaño del grupo)

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.


Datos experimentales
Rampa
Modelado:
f(x)= 115.57 + 6.3(1- e(tiempo - 1.4956) / 27.11)-1)
eem= 8.638 (latidos·min-1)
Fase I
Fase II
Fase III
Y´= 88.7033 + (6.1758·X)
n= 13, r= 0.99
FRECUENCIA CARDÍACA (latidos ·min-1)
RAMPA (25 Watts ·2min-1)
TIEMPO (min)
0
50
100
150
200
250
300
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20


Fase II Transitoria de la Frecuencia Cardíaca
NOA tletas Jóvenes
A tletas Jóvenes
NOA tletas Adultos
A tletas Adultos
TIEMPO DE RESPUESTA MEDIA (s)
100
80
60
40
20
0
p<0.05
(6)
(14)
(7)
(7)
GRUPOS (NOA tleta versus A tleta)