

Efecto del porcentaje de fibras rápidas en la mecánica de la carrera humana.

Patricia Polero

Tesis de maestría en Ciencias Biológicas
Opción Biofísica
Programa de Desarrollo de Ciencias Básicas
(PEDECIBA)

Orientador: Dr. Gustavo Brum

**Unidad de Investigación en Biomecánica de la Locomoción Humana
(UIBLH)**
Dptos. de Biofísica y de Medicina Física y Rehabilitación.
Facultad de Medicina
Montevideo, Uruguay
2011

AGRADECIMIENTOS

Para lograr este trabajo, precisé de la ayuda de muchas personas; familia, amigos y profesores, tanto de Uruguay como de Brasil, a quienes estoy realmente muy agradecida.

Antes que nada quiero agradecer a quienes me acompañaron en este y en todos los caminos: a mis padres, por el estímulo y el apoyo constante y por enseñarme desde chiquita descubrir lo fascinante de la ciencia.

Quiero agradecer a quien estuvo a mi lado siempre desde el inicio de este trabajo: a mi esposo Damián, por acompañarme en este emprendimiento, por la paciencia, el cariño y por alentarme siempre para que no baje los brazos.

También quiero agradecer muy especialmente a Guille, mi hermano y a su novia Naty por la compañía, la alegría y la complicidad de siempre.

A mis tíos y primos que viven en Canadá, en especial a mi tío José por la ayuda (como profe y como amigo) y a mi primo Nico por contagiarme siempre su entusiasmo y su energía.

A mis amigos: Richard, Fernando, Nadine, Vale, Lu y Gonza, Naty Azziz, Naty Castro, Mariana, Lessy, Vicky y a mi amiga de toda la vida Fabi Bianchi, por los consejos, la confianza y por saber cómo levantarme cuando mis fuerzas flaqueaban.

A todos los integrantes de la UIBLH, en especial al “grupo elástico”: Gabriel, Fernando, Gustavo, Germán, Valentina y Alejandro por escucharme todos los jueves de mañana tempranito y ayudarme muchísimo con sus comentarios acerca de este trabajo. Quiero agradecer también a Andrés, Darío y Sabrina por muchos aportes que también fueron muy importantes para el desarrollo de este trabajo.

Un agradecimiento especial para Leonardo Tartaruga que me guió en los pasos iniciales de este trabajo, por las profundas discusiones de muchos artículos (y de la vida...) y por su importantísima ayuda para que yo pudiera viajar a Brasil para hacer los experimentos. Agradezco mucho también a toda su familia: Stella, Virginia, Iván y La Abuela por hacerme sentir realmente parte de la familia mientras yo estaba en Brasil.

Quiero agradecer especialmente también a Renata Bona y toda su familia: Lourdes, Chico y Tiago que también me adoptaron como parte de su familia, me ayudaron mucho, me escucharon y ¡nos divertimos mucho!

A todo el grupo “*Locomotion*” de la ESEF, en especial a Naty, Clarissa, Gabi, Gustavo y Jorginho ¡su ayuda fue indispensable para lograr este objetivo! También a Artur y Paty Pantoja por la ayuda durante las colectas y a La Torre por su importantísima ayuda con Matlab.

A la gente de Biofísica de la Facultad de Medicina, en especial a Meche, Anagab, Helen, Nazira, Vero, Fabi, y Gonzalo Budelli. Todos ellos me ayudaron muchísimo directa o indirectamente con este trabajo.

A Rafael Alonso por la disposición para pensar y repensar las dudas que le planteamos (¡que fueron muchas!)

A la gente de Biofísica de la Facultad de Ciencias: Eduardo, Andrés, Julio, Luis, Guille, Ernesto, Alvaro, Juan Carlos y Victoria por las charlas, los consejos y los chocolates compartidos en los seminarios.

A Richar Fariña por sus aportes para este trabajo, algunos en Montevideo y algunos en Brasil. Todas las charlas con él fueron siempre muy enriquecedoras para mí.

A todos los atletas que participaron de este estudio y a su entrenador Leonardo Ribas por la disposición, la ayuda y el buen humor en cada reunión y cada colecta.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Lista de tablas y figuras..... | 6 |
| Resumen..... | 9 |
| Lista de símbolos y abreviaturas..... | 10 |
| 1. Introducción..... | 13 |
| 1.1 Paradigmas de la locomoción humana..... | 15 |
| <i>Modelo masa-resorte</i> | 17 |
| 2. La carrera humana como un sistema masa-resorte lineal..... | 19 |
| 2.1 Eficiencia y trabajo mecánico | 24 |
| 2.2 Rigidez, frecuencia de resonancia y frecuencia de paso..... | 27 |
| 2.3 Asimetrías del paso..... | 29 |
| 2.4 Asimetrías contacto-despegue..... | 32 |
| <i>Altura del CM</i> | 32 |
| <i>Duración del trabajo positivo y negativo</i> | 32 |
| 3. Comportamiento de la unidad músculo-tendón durante la carrera humana | 34 |
| 3.1 ciclo estiramiento-acortamiento..... | 37 |
| 3.2 Tipos de fibras musculares..... | 39 |
| <i>Propiedades mecánicas de los distintos tipos de fibras</i> | 40 |
| 3.3 Diferencias entre velocistas y fondistas: ¿efectos del entrenamiento o causas genéticas?..... | 40 |
| 4. Objetivos..... | 43 |
| 4.1 Objetivo general..... | 43 |
| 4.2 Objetivos específicos..... | 43 |
| 5. Hipótesis..... | 44 |
| 6. Material y métodos..... | 44 |
| 6.1 Muestra..... | 44 |
| <i>Poblaciones de estudio</i> | 44 |
| <i>Criterios de inclusión</i> | 44 |
| <i>Criterios de exclusión</i> | 44 |
| 6.2 Instrumentos de medida..... | 45 |
| <i>i). Cámara de video</i> | 45 |
| <i>ii) Marcadores reflexivos</i> | 45 |
| <i>iii) Calibrador</i> | 45 |
| <i>iv) Plataforma de fuerza</i> | 45 |
| <i>v) instrumentos de medida para caracterización de la muestra</i> | 45 |
| 6.3 Procedimiento experimental..... | 46 |
| 6.3.1 <i>Estimación del porcentaje de fibras rápidas</i> | 46 |
| 6.3.2 <i>Diseño experimental</i> | 46 |
| i) Preparación del individuo..... | 46 |
| ii) Cinemetría..... | 46 |
| iii) Dinamometría..... | 47 |
| 6.4 Análisis de los datos..... | 48 |
| 6.4.1 <i>Estimación del porcentaje de fibras rápidas</i> | 48 |
| 6.4.2 <i>Determinación de variables cinemáticas</i> | 48 |
| 6.4.3 <i>Análisis de las fuerzas de reacción del piso y cálculo de las energías del CM</i> | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 6.4.4 Cálculo de los parámetros del modelo..... | 51 |
| i) Rigidez vertical..... | 51 |
| ii) Frecuencia del sistema..... | 51 |
| iii) Tiempo de contacto efectivo y tiempo aéreo efectivo..... | 51 |
| 6.4.5 Análisis de las asimetrías contacto-despegue..... | 52 |
| 6.4.6 Análisis de los valores de trabajo mecánico y potencia mecánica | 53 |
| 6.4.7 Análisis estadístico..... | 54 |
| 7. Resultados..... | 55 |
| 7.1 Porcentaje de fibras rápidas..... | 55 |
| 7.2 Parámetros del modelo..... | 57 |
| 7.2.1 Período de paso y desplazamiento vertical del CM..... | 57 |
| 7.2.2 Rigidez, frecuencia de paso y frecuencia del sistema..... | 59 |
| 7.3 Trabajo y potencia..... | 61 |
| 7.3.1 Trabajo mecánico..... | 61 |
| 7.3.2 Potencia de paso y potencia de empuje..... | 61 |
| 7.4 Asimetrías contacto-despegue..... | 65 |
| 7.4.1 Velocidad y aceleración..... | 65 |
| 7.4.2 Tiempos de trabajo positivo y negativo..... | 66 |
| 8. Discusión..... | 71 |
| 8.1 Parámetros del modelo | 71 |
| 8.1.1 Período de paso y oscilación vertical del CM..... | 71 |
| 8.1.2 Rigidez, frecuencia de paso y del sistema..... | 73 |
| 8.2 Trabajo y potencia..... | 75 |
| 8.3 Asimetrías contacto-despegue..... | 76 |
| 9. Conclusiones..... | 78 |
| 10. Bibliografía..... | 79 |
| 11. Apéndices..... | 88 |
| A) Tablas de valores p | 88 |
| B) Rutina "Fibras" para el cálculo de porcentaje de fibras rápidas..... | 90 |
| C) Rutina "cinemática" para el cálculo de variables cinemáticas..... | 91 |
| D) Rutina "vertical"..... | 93 |
| E) Rutina "Horizontal"..... | 93 |
| F) Rutina "Tce"..... | 94 |
| G) Rutina "Main Program"..... | 95 |
| H) Rutina "Asimetrías"..... | 96 |

Lista de tablas y figuras

- Figura 1.1:** Simulación del mecanismo del modelo de péndulo invertido y del mecanismo del modelo masa-resorte. En el mecanismo de péndulo invertido, el intercambio de energía vertical (energía potencial más energía cinética vertical, E_v) en cinética horizontal ($E_{k,h}$) permite que la energía total (E_{tot}) del CM sea prácticamente constante en el tiempo. En el modelo masa-resorte es la transformación de $E_v + E_{k,h}$ en energía elástica lo que permite que sea prácticamente constante la E_{tot} del CM. Adaptado de Cappellini, Ivanenko, et al. (2006) y de Saibene y Minetti (2003).....16
- Fig 2.1:** Modelo de McMahon (1990). K_{leg} representa la constante elástica del resorte, L_i es la longitud del resorte en el momento que toma contacto con el piso, L_f es la longitud del resorte en el momento de compresión máxima, m es una masa puntual que representa la masa corporal, Δy representa el desplazamiento total vertical del CM y θ es el ángulo que forma el resorte con la vertical. Adaptado de Brughelli y Cronin (2008).....21
- Figura 2.2:** Modelo de Blickhan (1989). El resorte representa todas las estructuras elásticas del cuerpo que almacenan energía mecánica durante la carrera. El sistema tiene un movimiento horizontal y vertical con el resorte siempre perpendicular al piso.....21
- Figura 2.3:** Variación de las variables cinemáticas en función del tiempo (a_v : aceleración vertical, V_v : velocidad vertical, S_v : desplazamiento vertical) del CM durante un paso de carrera. La línea punteada indica el desplazamiento durante la fase aérea. La aceleración se considera positiva cuando el sentido es ascendente y se toma como unidad el valor de la aceleración gravitatoria. Al igual que en un sistema masa-resorte simple, cuando la aceleración es máxima positiva, el desplazamiento es máximo negativo y la velocidad es nula; cuando la velocidad alcanza su valor máximo (positivo o negativo), la aceleración y el desplazamiento son nulos. Adaptado de Cavagna, Franzetti et al. (1988).....23
- Figura 2.4:** Los círculos negros muestran la frecuencia preferida de paso para las distintas velocidades. Los cuadrados blancos representan las frecuencias para las cuales la potencia de paso es mínima para cada velocidad y las frecuencias indicadas con los triángulos blancos, las que minimizan la potencia de empuje para cada velocidad. Cerca de 13 Km/h, la frecuencia preferida, es igual a la que minimiza la potencia de paso, mientras que para velocidades más altas, la frecuencia preferida es cada vez más cercana a la que minimiza la potencia de empuje. Adaptado de Cavagna (2010).....31
- Figura 2.5:** Energía total del CM en función del tiempo para un paso de carrera a 5,9 Km/h, indicando los tiempos de despegue (rojo) y aterrizaje (azul). Las fotos indican la fase del paso de carrera que se corresponden con cada parte de la curva de E_{tot} . Durante la la fase aérea, E_{tot} es constante ya que existe un intercambio entre E_v y $E_{k,h}$. Adaptado de Cavagna (2010).....33
- Figura 6.1:** Lugar donde fueron realizados los experimentos. Los marcadores reflexivos en el piso muestran dónde se encontraba la plataforma de fuerza. Estos punto no eran visibles para el participante. Una persona anotaba los pasos válidos (cuando todo el pie se apoyaba dentro de los límites de la plataforma. Una cámara de video se encontraba frente a la plataforma para poder calcular luego la velocidad media de carrera y saber si ésta era constante.....47
- Figura 7.1:** Valores de potencia mecánica promedio cada 15 segundos de saltos verticales de altura máxima, en un total de 60 segundos. Las líneas rojas representan el ajuste lineal para los velocistas que participaron de este estudio; las líneas azules representan el ajuste lineal para los fondistas.....56

Figura 7.2: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En a (i) y b (i) el período de paso está representado por TP (cuadrados negros) y sus fracciones: tiempo de contacto efectivo (t_{ce}), durante el cual la fuerza de reacción del piso es mayor que el peso corporal (círculos azules) y tiempo aéreo efectivo (t_{ae}), durante el cual la fuerza de reacción del piso es menor que el peso corporal (círculos rojos). En a (ii) y b (ii) está representado el desplazamiento vertical del CM por S_v (cuadrados negros) y sus fracciones: el desplazamiento durante el contacto efectivo (S_{ce} , círculos azules) y el desplazamiento durante la fase aérea efectiva (S_{ae} , círculos rojos).....**58**

Figura 7.3: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. Las figuras a (i) y b (i) muestran la rigidez vertical normalizada por la masa ($K/m = a_{v,mx}/S_{ce}$) que tiene un comportamiento similar para ambos grupos. Las figuras a (ii) y b (ii) muestran la frecuencia del sistema (f_{sist} ; líneas punteadas) y la frecuencia de paso (f_{step} , líneas llenas). Las diferencias entre f_{sist} y f_{step} son significativas para todas las velocidades analizadas para el grupo de los velocistas ($P < 0,05$) mientras que para los fondistas las diferencias son significativas para velocidades mayores de 8 Km/h.....**60**

Figura 7.4: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En esta figura se representa el trabajo mecánico total normalizado por la masa y por unidad de distancia ($W_{tot} = W_{ext} + W_{int}$, cuadrados negros), el trabajo externo realizado para mantener el movimiento del CM en el plano sagital (W_{ext} , línea punteada), así como el trabajo interno necesario para mover los segmentos corporales en relación al CM (W_{int} , círculos blancos). W_{ext} tiende a mantenerse aproximadamente constante para los velocistas mientras que tiende a disminuir con la velocidad (entre 8 y 12 Km/h) para los fondistas. El W_{int} aumenta con la velocidad para ambos grupos. No se observaron diferencias significativas entre los grupos para los valores de W_{int} , W_{ext} o W_{tot} en ninguna de las velocidades analizadas ($P > 0,05$).....**63**

Figura 7.5: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En las figuras a (i) y b (i) se representa la potencia de empuje ($\dot{W}_{push} = W_{ext}/t_{W+}$). En las figuras a (ii) y b (ii) se representan la potencia de paso total ($\dot{W}_{step,tot} = W_{tot}/TP$; cuadrados negros), la potencia de paso externa ($\dot{W}_{step,ext} = W_{ext}/TP$; línea punteada) y la potencia de paso interna ($\dot{W}_{int} = W_{int}/TP$; círculos blancos). Las diferencias entre los grupos sólo son estadísticamente significativas en el intervalo de 8 a 9 Km/h.....**64**

Figura 7.6: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En a (i) y b (i) están representadas las velocidades verticales máximas del CM, ascendentes ($V_{v,mx,up}$; verde oscuro) y descendente ($V_{v,mx,down}$; verde claro). Las diferencias entre ambos grupos sólo son significativas ($P < 0,01$) para 8 Km/h, tanto para la velocidad ascendente, como para la velocidad descendente. En las figuras a (ii) y b (ii) está representada la aceleración ascendente máxima ($a_{v,mx}$). Las diferencias entre los grupos no son significativas en todo el rango de velocidades analizadas ($P > 0,05$).....**67**

Figura 7.7: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En las figuras a (i) y b (i) se representa el desplazamiento vertical ascendente del CM durante la fase de contacto efectivo ($S_{ce,up}/S_{v,up}$; círculos verde oscuro) y el desplazamiento vertical descendente del CM durante la fase de contacto efectivo ($S_{ce,down}/S_{v,down}$; círculos verde claro) normalizados por el desplazamiento vertical en cada fase. Las diferencias entre los valores de estos dos desplazamientos aumentan al aumentar la velocidad para ambos grupos, observándose diferencias significativas a partir de 12 Km/h. Las figuras a (ii) y b (ii) muestran las duraciones de los tiempos de trabajo positivo

(t_{W+} ; círculos verde oscuro) y de trabajo negativo (t_{W-} ; círculos verde claro). En este caso, para ambos grupos se observa una tendencia a la disminución de las diferencias entre estos valores al aumentar la velocidad. Las diferencias entre t_{W+} y t_{W-} son siempre significativas ($P < 0,05$) para todas las velocidades excepto para los fondistas en el intervalo de 13 a 14 Km/h.....**68**

Figura 7.8: Curvas de Energía potencial (E_p); energía cinética vertical ($E_{k,v}$), energía cinética horizontal ($E_{k,h}$) y Energía total (E_{tot}) durante una carrera a velocidad de 9,6 Km/h para un participante del grupo de los velocistas (a, sexo masculino, 1.67 m de altura; 18 años; 60.3 Kg) y durante una carrera a velocidad de 9,8 Km/h para un participante del grupo de los fondistas (b, sexo masculino, 1.62 m de altura, 25 años; 52,0 Kg). Las líneas punteadas verticales indican los tiempos en que $Fv=PC$ (puntos de equilibrio del sistema). Nótese que estos puntos coinciden con los valores máximos de $E_{k,v}$ y con un valor de cero de E_p . La E_{tot} se mantiene constante durante la fase aérea debido a que E_p y $E_{k,v}$ están desfasadas por lo que existe un intercambio de una en otra. Todas las energías disminuyen durante el contacto y es cuando se almacenan en las estructuras elásticas. En la curva de E_{tot} están señalados los tiempos de trabajo negativo (líneas horizontales rojas) y los tiempos de trabajo positivo (líneas horizontales azules).Nótese que para estas velocidades el paso es simétrico ya que el tiempo de contacto efectivo (delimitado por las líneas punteadas verticales) es similar al tiempo aéreo efectivo. El tiempo de trabajo positivo siempre es mayor que el tiempo de trabajo negativo.....**69**

Figura 7.9: Curvas de Energía potencial (E_p); energía cinética vertical ($E_{k,v}$), energía cinética horizontal ($E_{k,h}$) y Energía total (E_{tot}) durante una carrera a velocidad de 13,9 Km/h para un participante del grupo de los velocistas (a, sexo masculino, 1.67 m de altura; 18 años; 60.3 Kg) y durante una carrera a velocidad de 13,1 Km/h para un participante del grupo de los fondistas (b, sexo masculino, 1.62 m de altura, 25 años; 52,0 Kg). Las líneas verticales indican los tiempos en que $Fv=P$ (puntos de equilibrio del sistema). Nótese que estos puntos coinciden con los valores máximos de $E_{k,v}$ y con un valor de cero de E_p . La E_{tot} se mantiene constante durante la fase aérea debido a que E_p y $E_{k,v}$ están desfasadas por lo que existe un intercambio de una en otra. Todas las energías disminuyen durante el contacto y es cuando se almacenan en las estructuras elásticas. En la curva de E_{tot} están señalados los tiempos de trabajo negativo (líneas horizontales rojas) y los tiempos de trabajo positivo (líneas horizontales azules).Nótese que para estas velocidades el paso es asimétrico ya que el tiempo de contacto efectivo (delimitado por las líneas punteadas verticales) es menor que el tiempo aéreo efectivo. El tiempo de trabajo positivo siempre es mayor que el tiempo de trabajo negativo.....**70**

Tabla 6.1: Características de la muestra (media y desvío estándar).....**45**

Tabla 7.1: Estimación del porcentaje de fibras rápidas en el músculo vasto lateral según el método de Bosco (1983) para cada uno de los velocistas y fondistas que participaron de este estudio.....**56**

Resumen

En este estudio se analizó el efecto del tipo de fibra muscular en los parámetros del modelo masa-resorte, en las asimetrías contacto-despegue y en el trabajo mecánico durante la carrera a distintas velocidades. Se compararon 5 velocistas y 5 fondistas. Se estimó el porcentaje de fibras rápidas en los músculos extensores de pierna a través del test de Bosco (1983). Los participantes realizaron 4 carreras de 30 vueltas en una pista de aproximadamente 30 metros dentro de un gimnasio. Las carreras fueron realizadas en 4 velocidades distintas: la velocidad preferida que el participante elegía para correr, una velocidad más lenta y 2 más rápidas. Las carreras fueron registradas con una cámara de video para medir las variables cinemáticas y una plataforma de fuerza para medir las fuerzas de reacción del suelo. La plataforma estaba colocada en un punto de la pista de carrera cubierta con una alfombra de goma, de manera que no era visible para el participante para evitar alteraciones en el paso de carrera. Con el test de Bosco (1983) se encontró un mayor porcentaje de fibras rápidas para el grupo de los velocistas ($p < 0,05$). El procesamiento de los datos fue realizado utilizando rutinas elaboradas en *Matlab R2007b*. y en *Labview 8.2* Los test estadísticos fueron realizados en *SPSS 17.0* y *Excel 2003*. Fueron realizados test "t" de student para muestras pareadas para comparar los valores dentro de cada grupo y test "t" de student para muestras independientes para hacer las comparaciones entre grupos. Las comparaciones entre los grupos para los valores de los parámetros del modelo masa-resorte, trabajo mecánico y asimetrías contacto-despegue sólo mostraron diferencias estadísticamente significativas para las velocidades más bajas analizadas (8 a 9 Km/h). Para la velocidades más altas (13 a 14 Km/h) el tiempo de contacto efectivo fue mayor para los velocistas. Para el grupo de los fondistas el paso fue simétrico para las velocidades más bajas (entre 6 y 8 Km/h) mientras que para los velocistas no se obtuvieron carreras a velocidades menores de 8 Km/h y el paso siempre fue asimétrico. Para las velocidades intermedias de carrera (10 a 13 km/h) no se observaron diferencias en ninguno de los parámetros analizados indicando que, a pesar de las diferencias extremas en los entrenamientos de ambas poblaciones y las diferencias en los porcentajes de fibras rápidas, las estrategias elegidas para correr a estas velocidades son las mismas.

Lista de símbolos y abreviaturas

| | |
|-----------------------|---|
| a_v | Aceleración vertical |
| a | Aceleración |
| $\overline{a_{v,ae}}$ | Aceleración vertical media durante la fase aérea efectiva |
| $\overline{a_{v,ce}}$ | Aceleración vertical media durante la fase de contacto efectiva |
| $a_{v,ae}$ | Aceleración vertical durante la fase aérea efectiva |
| $a_{v,ce}$ | Aceleración vertical durante la fase de contacto efectiva |
| CM | Centro de masa |
| E_k | Energía cinética |
| $E_{k,h}$ | Energía cinética horizontal |
| $E_{k,v}$ | Energía cinética vertical |
| E_p | Energía potencial |
| E_v | Energía vertical |
| E_{tot} | Energía total |
| f | Frecuencia |
| f_{sist} | Frecuencia del sistema |
| f_{step} | Frecuencia de paso |
| FR | Fibras rápidas |
| FL | Fibras lentas |
| FRS | Fuerza de reacción del suelo |
| FRSv | Fuerza de reacción del suelo, vertical |
| FRSh | Fuerza de reacción del suelo, horizontal |
| k | Rigidez |
| K_{vert} | Rigidez del sistema |

| | |
|------------------|---|
| K_{leg} | Rigidez de la pierna |
| LP | Largo de paso |
| LDR | Fondistas (<i>long distance runners</i>) |
| SPR | Velocistas (<i>sprint runners</i>) |
| S_v | Desplazamiento vertical |
| S_{ae} | Desplazamiento vertical durante la fase aérea efectiva |
| S_{ce} | Desplazamiento vertical durante la fase de contacto |
| $S_{ce,up}$; | Desplazamiento ascendente del CM durante S_{ce} |
| $S_{ce,down}$; | Desplazamiento descendente del CM durante S_{ce} |
| $S_{ae,up}$ | Desplazamiento ascendente del CM durante S_{ae} |
| $S_{ae,down}$ | Desplazamiento descendente del CM durante S_{ae} efectiva |
| TP | Tiempo de paso |
| t_c | Tiempo de contacto |
| t_a | Tiempo aéreo |
| t_{ce} | Tiempo de contacto efectivo |
| t_{ae} | Tiempo aéreo efectivo |
| $t_{ce,up}$ | Duración del desplazamiento ascendente del CM durante t_{ce} |
| $t_{ce,down}$ | Duración del desplazamiento descendente del CM durante t_{ce} |
| $t_{ae,up}$ | Duración del desplazamiento ascendente del CM durante t_{ae} |
| $t_{ae,down}$ | Duración del desplazamiento descendente del CM durante t_{ae} |
| t_{W+} | Tiempo de trabajo positivo |
| UMT | Unidad músculo-tendón |
| v | Velocidad |
| \overline{v}_h | Velocidad media horizontal |
| V_h | Velocidad horizontal |
| V_v | Velocidad vertical |

| | |
|----------------------|--|
| $V_{v,mx,up}$ | Velocidad vertical ascendente máxima |
| $V_{v,mx,down}$ | Velocidad vertical descendente máxima |
| W_{m+} | Trabajo muscular positivo |
| W_{m-} | Trabajo muscular negativo |
| W_{+} | Trabajo positivo |
| W_{-} | Trabajo negativo |
| W_{ext} | Trabajo externo |
| W_{int} | Trabajo interno |
| W_{tot} | Trabajo total ($W_{ext} + W_{int}$) |
| W_{ext+} | Trabajo externo positivo |
| W_{ext-} | Trabajo externo negativo |
| \dot{W}_{step} | Potencia del paso |
| \dot{W}_{push} | Potencia de empuje |
| $\dot{W}_{ext,step}$ | Potencia de paso, externa |
| $\dot{W}_{int,step}$ | Potencia de paso, interna |
| $\dot{W}_{tot,step}$ | Potencia de paso total ($\dot{W}_{ext,step} + \dot{W}_{int,step}$) |
| $\dot{W}_{ext,push}$ | Potencia de empuje, externa. |
| $\dot{W}_{int,push}$ | Potencia de empuje, interna |
| $\dot{W}_{tot,push}$ | Potencia de empuje total ($\dot{W}_{ext,push} + \dot{W}_{int,push}$) |

1. Introducción

La marcha y la carrera son los dos tipos de locomoción básicos para el humano. Nos permiten recorrer grandes distancias a velocidades bajas o alcanzar grandes velocidades por cortos períodos de tiempo. Ambas formas de locomoción implican secuencias de movimiento muy complejas, ya que resultan de la acción coordinada de muchos músculos, algunos biarticulares, que ejercen fuerza a través de tendones para producir el movimiento de los huesos y así, de los segmentos corporales. Sin embargo, ambas formas de locomoción pueden ser estudiadas utilizando dos modelos físicos simples: el modelo de péndulo invertido para la marcha y el modelo masa-resorte para la carrera. Estos modelos permiten comprender la mecánica general del movimiento a través del estudio del comportamiento de las energías mecánicas asociadas al centro de masa (CM) durante la locomoción (Saibene y Minetti 2003).

Tradicionalmente, se diferenciaba la marcha de la carrera por la presencia o ausencia de fase aérea. Durante la marcha, no existe fase aérea (en todo momento hay al menos un pie en contacto con el piso) mientras que la carrera se caracteriza por alternar fases de apoyo con fases aéreas. Sin embargo, en ciertas situaciones puede producirse la carrera sin fase aérea, por ejemplo, cuando se corre con las rodillas muy flexionadas, a muy baja velocidad o con carga (McMahon, Valiant et al. 1987; Rome, Flynn et al. 2006; Cavagna, Legramandi et al. 2008). Una forma más adecuada de definir las, es a través del intercambio de energías mecánicas que se producen durante el desplazamiento del CM (Cavagna, Thys et al. 1976).

Modos de paso que pueden describirse con el modelo masa-resorte son utilizados por la mayoría de los animales terrestres para desplazarse a grandes velocidades (Cavagna, Heglund et al. 1977; Heglund, Fedak et al. 1982; Cavagna, Franzetti et al. 1988). Para estas formas de locomoción, el sistema músculo-esquelético animal puede ser considerado, del punto de vista mecánico como un sistema masa-resorte no lineal dirigido activamente y formado por varios componentes. Sin embargo, en su forma más simple, puede estudiarse como un sistema masa-resorte lineal con una masa puntual sobre un resorte pasivo sin rozamiento ni masa. La ventaja del modelo simple es la transparencia respecto a la influencia de factores físicos o morfológicos. Este modelo permite describir la interdependencia de los parámetros que caracterizan a la carrera: tiempo de contacto con el piso (t_c), tiempo aéreo (t_a), rigidez (k), frecuencia de paso (f_{step}), velocidad de aterrizaje, curso temporal de la fuerza de reacción del piso, etc (Cavagna, Franzetti et al. 1988; Blickhan 1989; McMahon y Cheng 1990).

El funcionamiento del sistema músculo-esquelético durante la locomoción es influenciado por las propiedades mecánicas de músculos y tendones. Por ejemplo, las propiedades elásticas del tendón pueden aumentar la eficiencia muscular en ejercicios que impliquen ciclos de estiramiento-acortamiento ya que el músculo puede estirarse y acortarse a velocidades que, sin el tendón, serían mecánicamente desfavorables (Biewener y Roberts 2000; Hof, Van

Zandwijk et al. 2002; Roberts y Marsh 2003; Arampatzis, Karamanidis et al. 2006). A su vez, las propiedades mecánicas de las unidades músculo-tendón, dependen de sus propiedades morfológicas, mecánicas y metabólicas y, por lo tanto, del tipo de fibra que los componen. (Gans y Gaunt 1991; Zuurbier y Huijing 1992; Ettema 1996; Biewener y Roberts 2000; Lieber, Leonard et al. 2000).

Los distintos tipos de fibras (rápidas y lentas) son considerados ejemplos extremos de especialización muscular en el músculo esquelético humano. Difieren en actividad enzimática glicolítica densidad de mitocondrias y economía de contracción (Essen, Jansson et al. 1975; Stienen, Kiers et al. 1996; He, Bottinelli et al. 2000; Gregory, Vandenborne et al. 2001). Existen algunas evidencias de cambios en los porcentajes de los distintos tipos de fibras que posee cada músculo, debidos al entrenamiento, la edad, la dieta o la inmovilización prolongada (Costill, Cleary et al. 1979; Jansson, Esbjornsson et al. 1990; Simoneau y Bouchard 1995; Karamanidis y Arampatzis 2007; Kim, Roy et al. 2007; Gondin, Brocca et al. 2010).

El entrenamiento puede producir cambios tanto a nivel de las fibras musculares como también en los tendones y en el tejido conectivo que forma parte de los músculo (Fukunaga, Funato et al. 1992). Por lo tanto, distintos tipos de entrenamiento podrían producir cambios morfológicos y funcionales distintos en estos tejidos (Michna 1984; Vilarta y Vidal Bde 1989). Los corredores de velocidad (SPR) tienen mayor porcentaje de fibras rápidas en los músculos de sus piernas (Costill, Daniels et al. 1976; Thorstensson, Larsson et al. 1977) y sus tendones son menos rígidos que los de corredores de larga distancia (LDR). Sin embargo, está muy discutido si esto es debido a causas genéticas o debidas al entrenamiento (Komi, Viitasalo et al. 1977; Kubo, Akima et al. 2000). Las propiedades elásticas de las fibras rápidas (FR) difieren de las propiedades elásticas de las fibras lentas (FL) (Petit, Filippi et al. 1990; Galler, Hilber et al. 1996) y la transición de FR a FL se asocia al aumento de rigidez de la unidad músculo-tendón (UMT) (Goubel y Marini 1987). Por lo tanto, los distintos porcentajes de fibras rápidas presentes en un músculo, van a influenciar los valores de rigidez de las UMT.

Los distintos niveles de potencia que puedan generar los músculos de las piernas en el momento del contacto con el piso, para producir el desplazamiento del CM y las propiedades elásticas de las UMT, van a influenciar la capacidad de almacenar energía elástica en cada paso de carrera, así como la frecuencia de paso elegida y el trabajo mecánico y muscular necesario para correr a una velocidad dada.

El objetivo de este estudio es analizar la influencia de las diferencias en las propiedades mecánicas de los distintos tipos de fibras musculares en los parámetros de la carrera humana analizada utilizando el modelo masa-resorte.

1.1) Paradigmas de la locomoción humana

La locomoción terrestre no es particularmente eficiente ya que, a diferencia del nado o el vuelo, el cuerpo se desacelera en cada paso cuando las estructuras anatómicas que lo sostienen entran en contacto con el piso. Esto provoca una pérdida de energía cinética (E_k) que debe ser proporcionada nuevamente para reaccelerar el cuerpo y mantener una velocidad de progresión constante. Es necesario el trabajo muscular para acelerar el CM pero también para permitir el frenado en cada apoyo (Cavagna 2010). Para reducir el efecto negativo del frenado del cuerpo que se produce en cada paso, existen mecanismos que permiten almacenar y reutilizar la energía mecánica. Estos dependen del modo de paso. Durante la marcha, el CM se desplaza sobre el punto de contacto con el piso comportándose como un péndulo invertido: la energía cinética generada durante el movimiento hacia adelante ($E_{k,h}$) es en parte, transformada en energía potencial gravitatoria (E_p) y energía cinética vertical ($E_{k,v}$) cuando el CM alcanza la mayor altura (cuando está alineado verticalmente con el punto de apoyo). Luego, esta Energía vertical (E_v) vuelve a ser transformada en $E_{k,h}$ ya que cuando el CM disminuye la altura es a la vez reaccelerado hacia delante. Los valores de E_v y $E_{k,h}$ cambian en oposición de fase (Cavagna, Saibene et al. 1963). Este mecanismo de conservación de energía no puede ocurrir durante la carrera ya que el CM es desacelerado a la vez que disminuye su altura (durante el contacto con el piso); y alcanza su velocidad máxima a la vez que alcanza su altura máxima. Los cambios de E_v están en fase con los cambios de $E_{k,h}$ (Cavagna, Saibene et al. 1964). En este caso, existe otro mecanismo minimizador de energía. Varios estudios han demostrado evidencias del almacenamiento de la energía por medio de las estructuras elásticas durante la carrera en humanos, así como también en otros animales como canguros y caballos (Alexander y Vernon 1975; Cavagna 1977; Biewener 1998).

Actualmente es ampliamente aceptado el modelo masa-resorte para estudiar parámetros mecánicos de la carrera como el efecto de la rigidez en el costo energético la relación entre rigidez y frecuencia de paso y la variación de estos parámetros en distintas situaciones como: superficies con distinta rigidez, fatiga, edad, gravedad, entrenamiento, etc. (McMahon, Valiant et al. 1987; Cavagna, Franzetti et al. 1988; McMahon y Cheng 1990; Ferris y Farley 1997; Ferris, Louie et al. 1998; Ferris, Liang et al. 1999; Dutto y Smith 2002; Kerdok, Biewener et al. 2002; Cavagna, Heglund et al. 2005; Brughelli y Cronin 2008; Cavagna, Legramandi et al. 2008; Slawinski, Heubert et al. 2008).

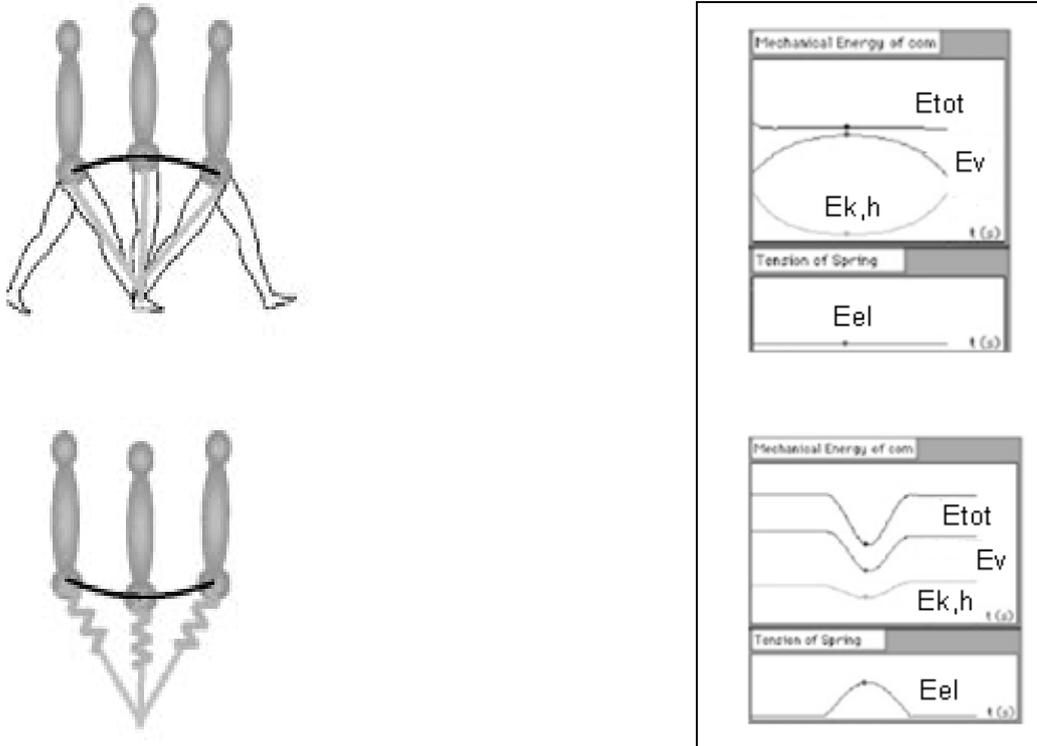


Figura 1.1: Simulación del mecanismo del modelo de péndulo invertido y del mecanismo del modelo masa-resorte. En el mecanismo de péndulo invertido, el intercambio de energía vertical (energía potencial más energía cinética vertical, E_v) en cinética horizontal ($E_{k,h}$) permite que la energía total (E_{tot}) del CM sea prácticamente constante en el tiempo. En el modelo masa-resorte es la transformación de $E_v + E_{k,h}$ en energía elástica lo que permite que sea prácticamente constante la E_{tot} del CM. Adaptado de Cappellini, Ivanenko, et al. (2006) y de Saibene y Minetti (2003).

Modelo masa-resorte

Este modelo se utiliza para estudiar un sistema formado por una masa puntual (m) unida al extremo de un resorte lineal sin masa y sin rozamiento. El resorte se encuentra en posición vertical, la masa está sometida a la fuerza de gravedad y sólo puede moverse verticalmente.

Si y representa el estiramiento del resorte (cuánto se estiró o comprimió respecto de su longitud natural), de acuerdo a la ley de Hooke, la fuerza que este ejerce sobre la masa es $-ky$ (siendo k la constante elástica del resorte). Por otro lado, existe la fuerza de gravedad, por lo tanto la fuerza total ejercida sobre la masa es $-ky-mg$ ($g=9.81\text{m/s}^2$). La altura de la masa es $y+h$, siendo h una constante que representa la longitud natural del resorte. De acuerdo a la ley de Newton, la fuerza total sobre la masa es $m(y+h) = m\ddot{y}$. Por lo tanto el modelo responde a la ecuación:

$$m\ddot{y} = -ky - mg$$

En la posición de equilibrio del sistema la altura es constante, entonces $\ddot{y} = 0$. Con la ecuación anterior concluimos que la posición de equilibrio es $y_e = -mg/k$. O sea que en la posición de equilibrio el resorte está algo comprimido.

Si llamamos z a la posición de la masa respecto del punto de equilibrio, o sea $y = z + y_e$, de la ecuación del modelo concluimos que $m\ddot{z} = -kz$. Esta ecuación expresa que, analizando el movimiento desde el punto de equilibrio del sistema, la fuerza ejercida sobre la masa, $m\ddot{z}$, es proporcional a la posición z . También nos permite observar que la magnitud de la fuerza que tiende a restituir la masa a su posición de equilibrio, $m\ddot{z}$, es máxima cuando la separación del punto de equilibrio, z , es máxima. Al resolver la ecuación encontramos que $z(t) = A\cos(\omega t + \phi)$, siendo A , ω y ϕ constantes.

Si observamos el comportamiento de la posición de la masa, $y = z + y_e$, notamos que esta oscila en torno al punto de equilibrio del sistema. La constante A representa la amplitud de la oscilación, ω es la frecuencia angular y ϕ un ángulo que ajusta la posición inicial de la masa, $y_0 = y_e + A\cos(\phi)$. Así, la velocidad y la aceleración, quedan determinadas por las derivadas primera y segunda de $y(t)$, respectivamente:

$$v_{(t)} = -\omega A \sin(\omega t + \phi) \quad \text{y} \quad a_{(t)} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi)$$

Por lo tanto, la aceleración puede expresarse como:

$$a_{(t)} = -\omega^2 z_{(t)} = -\omega^2 (y_{(t)} - y_e) \quad \text{(Ec 1)}$$

Si T es el período de la oscilación, $y_{(t)} = y_{(t+T)}$, entonces:

$$\omega_{(t)} + 2\pi = \omega_{(t+T)}$$

Recordando que $m \ddot{z} = -kz$ y que $\ddot{z} = \ddot{y} = a$, la ecuación 1 nos lleva a

$$\frac{k}{m} = -\frac{\ddot{z}}{z} = -\frac{(-\omega^2 a)}{a} = \omega^2 \Rightarrow 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{(Ec 2)}$$

Entonces:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{(Ec 3)}$$

Así, la frecuencia y el período son independientes de la amplitud del movimiento y quedan determinados por la masa y la rigidez del resorte.

2. La carrera humana como un sistema masa-resorte lineal

El complejo sistema de músculos y tendones actuando para producir el movimiento de las piernas y los pies, así como el movimiento de todos los segmentos corporales durante un paso de carrera, resultan en una relación aproximadamente lineal entre la fuerza que se produce contra el piso y el desplazamiento del CM producido mientras el pie está en contacto con el piso (Cavagna, Franzetti et al. 1988). Así, teniendo en cuenta ciertas limitaciones, el modelo masa-resorte puede describir el movimiento del CM durante la carrera y permite estudiar la relación que existe entre los distintos parámetros (Blickhan 1989; McMahon y Cheng 1990).

Cuando se estudia la carrera humana, es necesario agregarle a este modelo el movimiento de la masa en sentido horizontal. La fuerza que actúa sobre el centro de masa del cuerpo, tendrá una componente vertical y una componente horizontal y la frecuencia de resonancia dependerá de la velocidad horizontal, el largo del “resorte” y el ángulo de aterrizaje y despegue. McMahon (1990) distingue entre K_{vert} (rigidez del sistema) y K_{leg} (rigidez de la pierna). Esta última sería un valor fijo que representa la rigidez del resorte, mientras que K_{vert} varía en función del ángulo entre el resorte y el piso, de manera que ambas tienen el mismo valor cuando el resorte está perpendicular al piso.

En la figura 2.1 se representa un esquema del modelo masa resorte para carrera en plano horizontal. Si se supone que existe simetría entre contacto y despegue, es decir, tanto el ángulo como la longitud del resorte y la velocidad tienen el mismo valor durante el aterrizaje y durante el despegue, puede encontrarse la relación entre K_{vert} y K_{leg} .

Si llamamos $F_{v,i}$ a la fuerza vertical que actúa sobre la masa en el momento del aterrizaje y $F_{v,f}$ a la fuerza vertical que actúa en el momento de mayor compresión del resorte (cuando se encuentra perpendicular al piso):

$$F_{v,i} = -m.g - k(L - L_0) \cos \theta$$

$$F_{v,f} = -m.g - k(L - L_0)$$

donde θ es el ángulo formado entre el resorte y la vertical, L_0 es la longitud de reposo del resorte, L_i es la longitud del resorte en el momento del aterrizaje y L_f es la longitud del resorte en el momento de máxima compresión.

K_{vert} se calcula como la relación entre la variación de fuerza vertical y la variación de desplazamiento vertical del CM. Entonces para hallar la relación entre K_{leg} y K_{vert} , igualamos las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 K_{vert} &= \frac{F_{v,i} - F_{v,f}}{\Delta y} = \frac{-K_{leg}(L_f - L_o) + K_{leg}(L_i - L_o)\cos\theta}{\Delta y} \\
 &= \frac{K_{leg}[(L_i - L_o)\cos\theta - (L_f - L_o)]}{\Delta y} = \frac{K_{leg}(L_i\cos\theta - L_f + L_o - L_o\cos\theta)}{\Delta y} \\
 &= \frac{K_{leg}(\Delta y + L_o(1 - \cos\theta))}{\Delta y} = K_{leg} + K_{leg}\frac{L_o(1 - \cos\theta)}{\Delta y}
 \end{aligned}$$

Entonces:

$$K_{vert} = K_{leg} + K_{leg}\frac{L_o(1 - \cos\theta)}{\Delta y}$$

donde Δy representa el desplazamiento vertical del CM entre el punto de equilibrio del resorte y el punto de máxima compresión. Cuando el resorte está perpendicular al piso, $\cos\theta = 1$ y $K_{vert} = K_{leg}$.

Este modelo es válido si se supone que existe simetría en las variables (desplazamiento, velocidad, energía potencial, energía cinética, tiempo de duración) tanto entre los momentos de contacto y despegue como entre las fases aéreas y de contacto. En la realidad existen desviaciones de este modelo simétrico que dependen de la velocidad de carrera y del comportamiento de la UMT durante la carrera.

Blickhan (1989), propone estudiar la carrera con un modelo más simple, suponiendo que existe simetría solamente entre las variables durante el contacto y el despegue, estudiando el movimiento de un resorte que se estira y se comprime mientras tiene un movimiento horizontal siempre perpendicular al piso (figura 2.2). Este modelo permite calcular la frecuencia de resonancia del sistema por la ecuación 3 y dividir el movimiento del CM en cuatro fases: movimiento ascendente y descendente por debajo y por encima del punto de equilibrio.

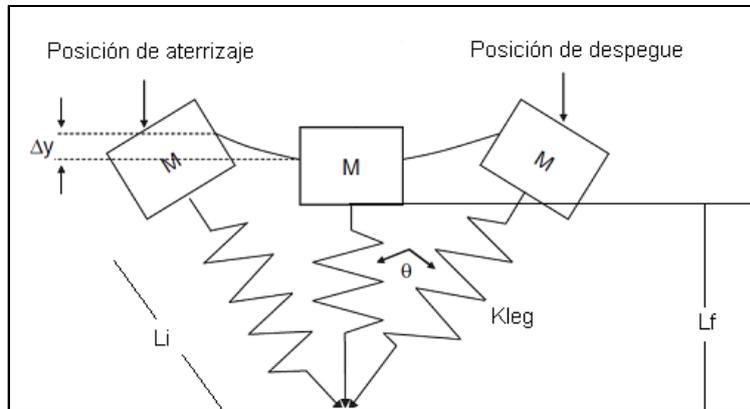


Fig 2.1: Modelo de McMahon (1990). K_{leg} representa la constante elástica del resorte, L_i es la longitud del resorte en el momento que toma contacto con el piso, L_f es la longitud del resorte en el momento de compresión máxima, m es una masa puntual que representa la masa corporal, Δy representa el desplazamiento total vertical del CM y θ es el ángulo que forma el resorte con la vertical. Adaptado de Brughelli y Cronin (2008)

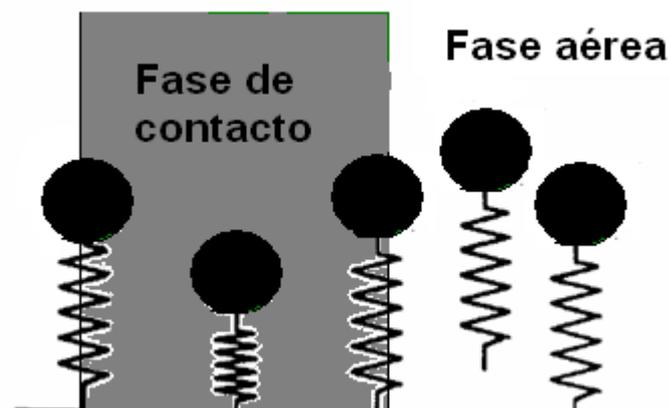


Figura 2.2: Modelo de Blickhan (1989). El resorte representa todas las estructuras elásticas del cuerpo que almacenan energía mecánica durante la carrera.

El sistema tiene un movimiento horizontal y vertical con el resorte siempre perpendicular al piso

Si bien este modelo es muy simple, permite la predicción y análisis de distintas variables de la carrera y su posterior relación con mecanismos musculares y metabólicos. (Cavagna, Franzetti et al. 1988; Saibene y Minetti 2003).

El paso de carrera puede ser dividido en tiempo aéreo (t_a) y tiempo de contacto (t_c). El modelo puede aplicarse sólo durante t_c ya que, durante la fase aérea, el valor de la fuerza vertical es igual al peso ($m \cdot g$) en todo momento y por lo tanto es independiente del desplazamiento del CM (Cavagna, Franzetti et al. 1988). En cada paso, el movimiento vertical del CM se revierte debido a la gravedad y el impacto contra el piso, (figura 2.3). La velocidad, la aceleración y el desplazamiento deberían variar entre cero y un valor máximo, pudiendo reconocerse 4 fases limitadas por los tiempos en que la velocidad es cero o es máxima (y no por los tiempos aéreos o de contacto): frenado descendente, aceleración ascendente, frenado ascendente, aceleración descendente. Las dos primeras fases se producen durante el contacto del pie con el piso. La duración de estas dos fases es el tiempo de contacto efectivo (t_{ce}). Las últimas dos fases se producen en parte durante el tiempo de apoyo y en parte durante el tiempo aéreo y la suma de las dos corresponde al tiempo aéreo efectivo (t_{ae}). Tanto en el modelo masa-resorte teórico como en la situación real de un paso de carrera, la oscilación vertical del CM se produce por encima y por debajo de una posición de equilibrio donde la fuerza vertical es igual al peso del cuerpo. Queda así definido t_{ae} como el tiempo durante el cual la fuerza ejercida contra el piso es menor que el peso corporal y t_{ce} como el tiempo durante el cual la fuerza ejercida contra el piso es mayor que el peso corporal. Por lo tanto, t_{ce} es un poco menor que t_c y t_{ae} un poco mayor que t_a (Cavagna, Franzetti et al. 1988).

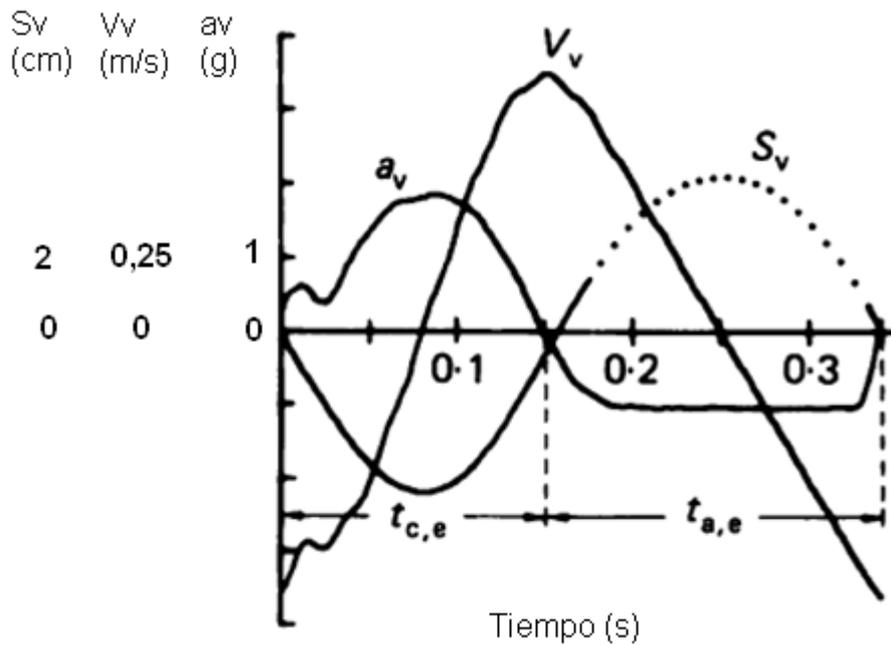


Figura 2.3: Variación de las variables cinemáticas en función del tiempo (a_v : aceleración vertical, V_v : velocidad vertical, S_v : desplazamiento vertical) del CM durante un paso de carrera. La línea punteada indica el desplazamiento durante la fase aérea. La aceleración se considera positiva cuando el sentido es ascendente y se toma como unidad el valor de la aceleración gravitatoria. Al igual que en un sistema masa-resorte simple, cuando la aceleración es máxima positiva, el desplazamiento es máximo negativo y la velocidad es nula; cuando la velocidad alcanza su valor máximo (positivo o negativo), la aceleración y el desplazamiento son nulos. Adaptado de Cavagna, Franzetti et al. (1988).

Para estudiar la carrera humana, es válido utilizar el modelo masa-resorte si se estudia solamente el período de contacto con el piso y si se supone que existe simetría de los parámetros durante el aterrizaje y el despegue. Esta última es una limitante importante ya que, sobre todo a bajas velocidades, el tiempo, la velocidad y el desplazamiento del CM durante el aterrizaje son significativamente menores que durante el despegue. Además, el aterrizaje se produce con la pierna flexionada y el despegue con la pierna extendida y la distancia para la desaceleración durante el aterrizaje es menor que la de aceleración durante el despegue por lo que la pierna debe ser más rígida durante el aterrizaje. Estas asimetrías deben tenerse en cuenta al analizar el comportamiento de las estructuras durante el paso de carrera (Blickhan 1989; McMahon y Cheng 1990).

Conocer las situaciones en las cuales el sistema se comporta de forma simétrica o asimétrica es útil para entender la fisiología del aparato locomotor y aspectos relacionados con la economía y eficiencia durante la carrera. Además, las asimetrías en los valores de las variables durante el aterrizaje y el despegue, indican una desviación del modelo teórico y por lo tanto deberán ser tenidas en cuenta para predecir o estimar características de la carrera en distintas situaciones.

2.1) Eficiencia y trabajo mecánico

Para analizar la carrera, se estudia el trabajo y la energía que produce (o absorbe) el músculo, así como los cambios de energía que sufre el CM. La eficiencia de la carrera es la relación entre el trabajo realizado por el CM y la energía metabólica consumida. De la misma manera, puede calcularse la eficiencia muscular como la relación entre el trabajo que un músculo realiza y la energía química que utiliza (Kaneko 1990). El trabajo muscular es igual al producto de la fuerza que este ejerce por la variación de su longitud. Si el músculo se acorta mientras se contrae, el trabajo es positivo (W_{m+}), ya que la fuerza y el cambio de longitud se producen en el mismo sentido (contracción concéntrica). Si el músculo es estirado mientras se contrae (contracción excéntrica), el trabajo muscular es negativo (W_{m-}). La mayor eficiencia muscular encontrada en experimentos de músculo aislado, fue siempre menor a 0,25 (Gibbs y Gibson 1972). Sin embargo, la eficiencia en la carrera es mayor a 0,5. Esto es posible debido a que existen mecanismos que minimizan la energía necesaria que debe ser aportada por los músculos para mantener el movimiento (Cavagna 1977; Alexander 1984; Heglund y Cavagna 1985).

Cuando se estudia la energética de la carrera, siempre que el CM aumente su energía total, se estará produciendo un trabajo positivo sobre el sistema ($W+$) y siempre que la energía disminuya, se estará produciendo un trabajo negativo ($W-$). En cada ciclo completo de paso de carrera a velocidad constante, la energía inicial y final del CM es la misma. La resistencia con el aire es despreciable (excepto para velocidades muy altas de carrera) (Pugh 1971) y no se produce trabajo para vencer la fuerza de fricción contra el piso ya que no hay desplazamiento del pie respecto al piso (a menos que el pie resbale contra el piso o la carrera se produzca en superficies deformables como la arena o la nieve). Por lo tanto, el $W+$ necesario para contrarrestar las fuerzas de fricción en velocidades constantes (excepto para velocidades máximas) es despreciable (Cavagna 2010). Sin embargo, es necesario el trabajo muscular para mantener la locomoción a velocidad constante y esto se debe a que se necesita trabajo positivo para aumentar temporalmente la E_p o E_k del CM. Estas energías luego vuelven al músculo (estirándolo) para desacelerar o para disminuir la altura del CM en otra fase del paso. Durante la fase de aterrizaje disminuye la energía total del CM ($E_p + E_k$) a la vez que la mayor parte de los músculos de la pierna que está en contacto con el piso, son estirados mientras se mantienen contraídos (para que la caída o la desaceleración no sean bruscas), por lo tanto, durante esta fase se produce trabajo negativo tanto sobre el CM como en los músculos. Por el contrario, durante la fase de despegue se produce trabajo positivo ya que aumenta la energía mecánica del CM (aumenta la altura y la velocidad) y los músculos producen contracciones concéntricas (Cavagna, Franzetti et al. 1988).

Para estudiar el trabajo necesario para desplazar el cuerpo, Fenn (1930) se basó en el teorema de Koenig, según el cual el trabajo hecho por un sistema formado por varias partículas es igual a la suma del cambio de energía del CM del sistema (trabajo externo) más el cambio de energía que sufren las partículas moviéndose en relación al CM (trabajo interno). En el caso del cuerpo humano, el trabajo externo (W_{ext}) es el producido sobre el CM, mientras que el trabajo interno (W_{int}) es la suma de los trabajos producidos por los segmentos corporales cuando se mueven en relación al CM del cuerpo.

El trabajo externo depende de los cambios de velocidad en la dirección de progresión y de altura que se producen durante un ciclo de paso:

$$W = \left| \Delta E_{kh} \right| + \left| \Delta E_p \right|$$

siendo E_{kh} el valor de energía cinética en la dirección del desplazamiento. Como la velocidad vertical del CM es cero en los puntos de altura mínima y máxima que alcanza el CM, la variación de energía cinética vertical ($\left| \Delta E_{kv} \right|$) en un paso completo de carrera, también es cero y por lo tanto no afecta la variación total de energía.

Por la definición de trabajo:

$$W = F_r S_c + c_m x \varphi + F_h S_h + F_v S_v + F_l S_l$$

donde F_r es la resultante de todas las fuerzas que actúan en el cuerpo, φ es el ángulo entre F_r y el desplazamiento del CM (S_{cm}). F_h , F_v y F_l son las proyecciones de F_r en las direcciones horizontal, vertical y lateral respectivamente.

Las fuerzas y desplazamientos laterales durante la carrera son muy pequeños comparados con los valores de las fuerzas y desplazamientos horizontales y verticales y pueden despreciarse (Cavagna, Saibene et al. 1964). Entonces:

$$W \approx M_b a_h S_h + (P + M_b a_v) S_v$$

donde M_b representa la masa corporal y a_v y a_h son las proyecciones de la aceleración en la dirección vertical y horizontal respectivamente y P es el peso de la persona.

El trabajo interno (W_{int}) es mucho más difícil de medir que el W_{ext} , ya que requiere del cálculo de las variaciones de energía de los centros de masa de cada uno de los segmentos para lo cual es necesario un registro con cinemetría, varias cámaras de video y una interpretación de los datos mucho más compleja y plausible de error que los datos obtenidos con plataforma de fuerza. Además, el cálculo del W_{int} requiere suponer algunas propiedades físicas respecto a la energética del sistema como la posible transferencia de energía entre los distintos segmentos del cuerpo durante el movimiento. Otra dificultad es que el trabajo interno no involucra solamente el trabajo necesario para acelerar los segmentos sino también en trabajo hecho contra la gravedad al elevar los segmentos en movimientos iguales pero de sentidos opuestos. Todas estas posibilidades de error fueron analizadas por Cavagna (1977) y Willems, (1995), llegando a la conclusión que la forma más precisa de medir el W_{int} es teniendo en cuenta los cambios de E_k de los segmentos corporales en relación al CM y considerando la transferencia de energía sólo entre segmentos de un mismo miembro (por ejemplo: entre muslo y pierna derecha) (Cavagna, Heglund et al. 1977; Willems, Cavagna et al. 1995).

El trabajo interno realizado, normalizado por la masa de la persona y la distancia recorrida puede estimarse de la siguiente manera:

$$\frac{W_{int}}{M_b L} \approx 0.140 \times 10^{-0.200L} \times \overline{V_h} \times f$$

siendo L el largo de paso, $\overline{V_h}$ la velocidad media de progresión y f la frecuencia de paso (Cavagna, Mantovani et al. 1997). Esta ecuación predice un valor de W_{int} que está de acuerdo con resultados experimentales para varias velocidades de carrera (Cavagna, Heglund et al. 1977; Willems, Cavagna et al. 1995). Puede notarse que el W_{int} será mayor cuanto menor sea la longitud de paso y cuanto mayor sea la velocidad de progresión o la frecuencia de paso, lo cual es muy importante para analizar los factores que influyen la frecuencia de paso elegida

para una velocidad dada. El trabajo mecánico total (W_{tot}) durante un paso de carrera, es la suma del valor total del W_{ext} y el W_{int} hechos en cada paso de carrera (Cavagna, Heglund et al. 1977; Willems, Cavagna et al. 1995).

2.2) Rigidez, frecuencia de resonancia y frecuencia de paso.

La rigidez mecánica (k) está definida como la relación entre la tensión y la deformación de un objeto. En un sistema masa-resorte, la rigidez del resorte y la masa son las únicas variables que determinan la frecuencia de resonancia del sistema. Si se aplica a éste una fuerza periódica, con esta misma frecuencia, se obtendrán mayores desplazamientos para un valor dado de fuerza que si ésta es aplicada a otra frecuencia. En el modelo que se utiliza para estudiar la carrera, la rigidez del sistema (K_{vert}) representa la relación entre la fuerza aplicada y el movimiento del CM. Según la ecuación 2, la rigidez del sistema normalizada por la masa (K/m), puede calcularse como la pendiente de la curva aceleración vertical (a_v) en función del desplazamiento (S_v). Debe remarcarse que la rigidez vertical medida así, no representa la rigidez de la pierna sino de todas las estructuras que participan en la deformación del sistema durante el rebote contra el piso (Cavagna, Franzetti et al. 1988; Blickhan 1989; McMahon y Cheng 1990).

Conociendo K_{vert} , puede calcularse la frecuencia de resonancia del sistema (f_{sist}) utilizando la ecuación 4. Si la frecuencia de paso (f_{step}) es igual a la frecuencia de resonancia del sistema significa que la fuerza aportada al sistema (fuerza de reacción del piso) es aplicada de manera óptima, obteniéndose el desplazamiento deseado para el CM con un mínimo de esfuerzo muscular

La f_{step} preferida, o sea, la que una persona elige libremente para correr a determinada velocidad, es siempre la que maximiza la eficiencia (Kaneko 1990). Se ha observado que cuando la velocidad de progresión aumenta de 5 a 13 Km/h, el desplazamiento vertical del CM aumenta mientras que la f_{step} permanece prácticamente constante (Cavagna, Franzetti et al. 1988). La frecuencia constante con aumento del desplazamiento vertical del CM a medida que aumenta la velocidad de carrera sugiere un progresivo aumento de la deformación del aparente resorte, manteniéndose constante el período del sistema. De hecho, en un sistema masa resorte lineal, el período de oscilación es independiente de la amplitud del movimiento. Es posible entonces, que esta frecuencia de paso sea adoptada porque coincide con la frecuencia de resonancia del sistema. Una f_{step} cercana a la frecuencia de resonancia del sistema del cuerpo para velocidades lentas resultaría en un mínimo de gasto de energía y en un máximo de eficiencia debido a la conversión de la energía elástica almacenada, en trabajo muscular positivo (Cavagna, Mantovani et al. 1997).

K_{vert} puede influir en muchas de las variables atléticas como tasa de aplicación de fuerza, almacenamiento y utilización de energía elástica así como en las variables cinemáticas de la carrera. Por esto es de mucho interés para investigadores y entrenadores conocer la relación entre la rigidez y el rendimiento atlético. Esta rigidez depende principalmente de la activación muscular en los miembros inferiores, por lo tanto está relacionada con la respuesta de la unidad músculo-tendón para el almacenamiento y liberación de energía elástica (Brughelli y Cronin 2008). Este valor es ajustado de manera que permita disminuir el impacto que sufren las articulaciones pero también un mayor ahorro de energía (permitiendo una menor frecuencia de paso y una mayor utilización de la energía elástica) (Cavagna, Willems et al. 1991).

Se ha observado que en *hopping* y carreras en distintas superficies (con distintos valores de rigidez), las personas ajustan la rigidez, aumentándola o disminuyéndola, de manera que la rigidez total (superficie y cuerpo) se mantenga constante (Lejeune, Willems et al. 1998; Moritz y Farley 2003; Moritz y Farley 2004). Lo mismo sucede cuando se colocan exoesqueletos que aumentan la rigidez de una o más articulaciones de la pierna (Ferris, Bohra et al. 2006; Sawicki y Ferris 2008). En este caso la rigidez de la pierna disminuye de manera que la rigidez total (pierna y exoesqueleto) es la misma que cuando se corre o se salta sin el exoesqueleto. Esto indica la importancia de mantener un mismo patrón de movimiento para correr a pesar de las distintas condiciones del ambiente ya sea para maximizar la energía elástica almacenada y devuelta por tendones y ligamentos, optimizar del reflejo de estiramiento o para planificar la dinámica del movimiento para alcanzar la trayectoria deseada del CM (Hof 2003; Moritz y Farley 2005).

Cuando la frecuencia de paso es forzada a valores por encima o por debajo de la frecuencia preferida, f_{sist} cambia de forma similar ajustándose la rigidez (regulando el nivel de contracción muscular). Sin embargo, la mayor similitud entre f_{sist} y f_{step} se da solamente próximo a la frecuencia de paso que uno elige (frecuencia preferida) (2,6 – 2,8 Hz) (Cavagna, Mantovani et al. 1997).

La carrera con una frecuencia de paso similar a la frecuencia de resonancia del sistema se produce sólo para bajas velocidades de carrera, por lo tanto, deben existir otros mecanismos que determinen la frecuencia de paso para una velocidad dada de carrera. Para estos mecanismos, es necesario analizar por separado los eventos que ocurren en cada fase del paso (t_{ae} y t_{ce}).

2.3) Asimetrías del paso.

Paso simétrico: A velocidades bajas de carrera, t_{ae} es similar a t_{ce} así como también el desplazamiento vertical del CM que se produce durante t_{ce} (S_{ce}) es similar al que se produce durante t_{ae} (S_{ae}). Este tipo de paso es llamado “paso simétrico”: $t_{ae} \approx t_{ce}$ y $S_{ae} \approx S_{ce}$. Esto se debe a que durante la carrera a velocidad constante, el momento ganado y perdido durante t_{ce} , debe igualar el momento ganado y perdido durante t_{ae} :

$$\overline{a_{v,ce} t_{ce}} = \overline{a_{v,ae} t_{ae}}$$

donde $\overline{a_{v,ce}}$ representa la aceleración vertical promedio del CM durante la fase de contacto efectivo y $\overline{a_{v,ae}}$ es la aceleración vertical promedio del CM durante la fase aérea efectiva (Cavagna, Franzetti et al. 1988).

Durante la fase aérea, la aceleración vertical es igual a la aceleración de la gravedad (g), por lo tanto, la aceleración vertical promedio durante t_{ce} , no debe exceder $1g$ para que el paso sea simétrico. En la carrera humana esta condición se mantiene hasta velocidades de 11 Km/h aprox. En todo este intervalo de velocidades, $a_{v,ce}$ aumenta de forma proporcional a la velocidad de progresión pero nunca supera $1g$. La mayor parte de la oscilación vertical se produce durante el contacto con el piso y f_{step} es similar a f_{sist} que se mantiene constante para todo este rango de velocidades debido a que la rigidez masa-específica (K/m) también se mantiene constante. Por lo tanto, el aumento de la velocidad de progresión se logra aumentando la longitud del paso (Cavagna, Franzetti et al. 1988).

Paso asimétrico: Para velocidades mayores que 11 Km/h , aumenta la longitud del paso. S_{ae} aumenta y S_{ce} disminuye, llevando a que t_{ce} sea menor que t_{ae} . La asimetría del paso se caracteriza por $S_{ae} > S_{ce}$ y $t_{ae} > t_{ce}$. Esto es debido a que la aceleración vertical promedio durante la fase de contacto efectiva supera el valor de la gravedad y por lo tanto es necesario aumentar el tiempo aéreo efectivo para mantener la igualdad de los impulsos verticales producidos durante el despegue y durante el aterrizaje. La disminución en S_{ce} y el aumento de la fuerza vertical, producen un aumento en el valor de K/m . Como consecuencia, aumenta la f_{sist} . f_{step} también aumenta, pero relativamente menos que f_{sist} . Una consecuencia de esta asimetría es contener la disminución del período de paso $T=t_{ce}+t_{ae}$ para que no aumente demasiado f_{step} y por lo tanto el W_{int} ya que al aumentar f_{step} se necesitan mayores

aceleraciones de los miembros con respecto al CM. Sin embargo la disminución de la frecuencia de paso y el aumento de t_{ae} implican un aumento en la longitud del paso y por lo tanto un aumento del W_{ext} , ya que se producen mayores aceleraciones del CM en cada paso (Cavagna, Franzetti et al. 1988).

Como se dijo anteriormente, para velocidades bajas, f_{step} está principalmente determinada por f_{sist} . Para velocidades mayores de 13 Km/h, dos factores son los que determinan la frecuencia de paso elegida para una velocidad dada: el costo metabólico de movilizar los segmentos corporales más veces por segundo y las fuerzas de impacto que reciben las articulaciones cuando se producen pasos más largos (Cavagna, Willems et al. 1991). Como la velocidad de progresión es igual al producto de la frecuencia de paso por el largo de paso, puede aumentarse la velocidad de carrera aumentando el valor de cualquiera de estas variables.

Con el objetivo de entender por qué a altas velocidades f_{step} se aleja de f_{sist} y cuáles son los factores fisiológicos que determinan la frecuencia de paso en la carrera, Cavagna et al., (1991), analizaron separadamente la potencia mecánica producida durante todo un ciclo de paso (\dot{W}_{step}) y la potencia producida sólo durante la fase de empuje (\dot{W}_{push}) para distintas velocidades (entre 5 y 21 Km/h) y para distintas frecuencias de paso para cada velocidad (la frecuencia preferida, frecuencias más bajas y frecuencias más altas). La \dot{W}_{step} fue definida como el trabajo total realizado durante un ciclo de paso, dividido el tiempo total de duración del paso (TP) y \dot{W}_{push} fue definida como el trabajo total realizado durante un ciclo de paso, dividido el tiempo durante el cual se produce trabajo positivo (t_{W+}). A su vez, se estudiaron por separado las potencias internas y externas definidas de la siguiente manera:

$$\dot{W}_{int,step} = \frac{W_{int}}{TP} \qquad \dot{W}_{int,push} = \frac{W_{int}}{t_{Wint+}}$$

$$\dot{W}_{ext,step} = \frac{W_{ext}}{TP} \qquad \dot{W}_{ext,push} = \frac{W_{ext}}{t_{Wext+}}$$

Encontraron que para un pequeño rango de velocidades cercanas a 13 Km/h, la frecuencia de paso es similar a la que minimiza \dot{W}_{step} ($f_{o,step}$), para velocidades entre 13 y 22 Km/h f_{step} es intermedia entre $f_{o,step}$ y la frecuencia que minimiza \dot{W}_{push} ($f_{o,push}$) y para velocidad más altas, f_{step} es similar a $f_{o,push}$.

\dot{W}_{step} está relacionada principalmente con el consumo metabólico durante el paso de carrera, mientras que \dot{W}_{push} está relacionada a la capacidad de los músculos para desarrollar la potencia adecuada para impulsar el CM en cada paso. A velocidades mayores que 13 Km/h,

este último sería el factor limitante para la frecuencia de paso y por eso f_{step} es más cercana a $f_{o,push}$ aunque esto implique un mayor costo metabólico.

Velocidades cercanas a 13 Km/h (donde la frecuencia de paso es cercana a $f_{o,step}$, son las elegidas en general para correr grandes distancias. A estas velocidades, la frecuencia de paso es menor que $f_{o,push}$ sugiriendo que la necesidad de reducir la potencia muscular durante el empuje, no afecta la elección de la frecuencia de paso (Cavagna, Willems et al. 1991). Para velocidades por debajo de 13 Km/h, tanto $f_{o,step}$ como $f_{o,push}$ están por encima de f_{step} . Esto implica una mayor potencia mecánica tanto interna como externa, sin embargo, para estas velocidades, la eficiencia ($W_{tot}/E_{metabólica}$) es alta porque f_{step} se acerca a f_{sist} (Cavagna, Mantovani et al. 1997).

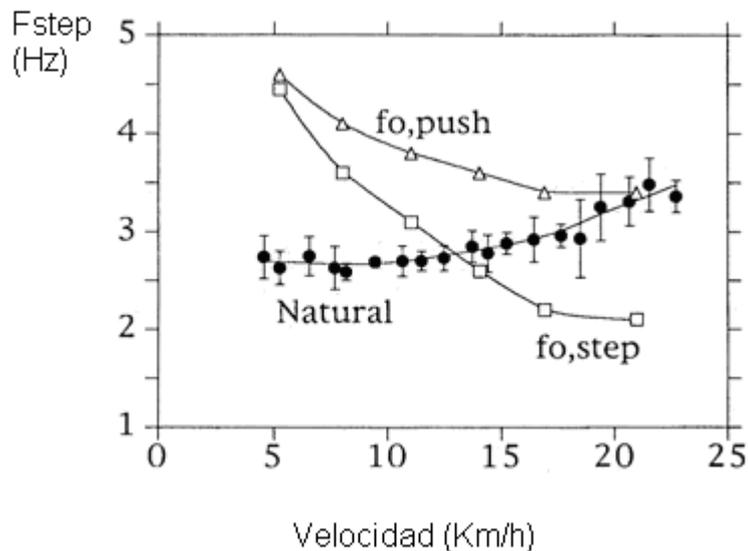


Figura 2.4: Los círculos negros muestran la frecuencia preferida de paso para las distintas velocidades. Los cuadrados blancos representan las frecuencias para las cuales la potencia de paso es mínima para cada velocidad y las frecuencias indicadas con los triángulos blancos, las que minimizan la potencia de empuje para cada velocidad. Cerca de 13 Km/h, la frecuencia preferida, es igual a la que minimiza la potencia de paso, mientras que para velocidades más altas, la frecuencia preferida es cada vez más cercana a la que minimiza la potencia de empuje. Adaptado de Cavagna (2010).

2.4) Asimetrías contacto-despegue

Una de las limitaciones más importantes al modelo masa-resorte para estudiar la carrera es que se debe suponer que existe una simetría en los parámetros durante el despegue y el aterrizaje. Se supone que la velocidad y la altura del despegue y del aterrizaje son iguales pero en realidad no lo son. El despegue es habitualmente con la pierna estirada mientras que el aterrizaje es con la pierna un poco flexionada. La distancia para la desaceleración durante el aterrizaje es menor que la distancia de aceleración durante el despegue por lo que la pierna debe ser más rígida durante el aterrizaje (Blickhan 1989). Además, el modelo supone que la unidad músculo-tendón actúa igual que un resorte lineal que se comprime en el aterrizaje y se estira durante el despegue, cuando en realidad la mayor parte de músculos y tendones de la pierna se estiran cuando la pierna entra en contacto con el piso y se comprimen durante el despegue. Estas desviaciones del modelo simétrico de Blickhan han sido estudiadas midiendo la E_p y E_k del CM durante las fases ascendente y descendente en cada paso, observándose que los distintos comportamientos de la unidad músculo-tendón (UMT) durante el estiramiento y durante el acortamiento, pueden afectar los tiempos de $W+$ y $W-$ durante la carrera (Cavagna 2006; Cavagna, Legramandi et al. 2008; Cavagna y Legramandi 2009).

Altura del CM

La altura del CM en el instante del despegue es mayor que la altura en el instante del aterrizaje, indicando que la cantidad relativa de desplazamiento vertical hacia arriba que se produce durante el contacto ($S_{ce,up}/S_v$) es mayor que la cantidad relativa de desplazamiento hacia abajo ($S_{v,down}/S_v$). Esta diferencia es debida a que el aterrizaje se produce con la pierna flexionada y el despegue con la pierna extendida. Al aumentar la velocidad de carrera, estas asimetrías disminuyen (Cavagna 2006).

Duración del trabajo positivo y negativo

La asimetría en el desplazamiento del CM durante las fases de aterrizaje y despegue resultan en un t_{W-} , menor que el t_{W+} . Sin embargo, estas asimetrías son más marcadas para velocidades bajas (menores de 14 Km/h). Para velocidades mayores, las diferencias entre los dos valores no son significativas. Se ha sugerido que esto es debido a que la UMT actúa de forma distinta durante el acortamiento y el estiramiento en la carrera a bajas velocidades, mientras que su comportamiento se aproxima más al de un resorte lineal (con características similares tanto durante el acortamiento como durante el estiramiento) en la carrera a

velocidades más altas (Cavagna 2006). Una posible explicación para estas asimetrías puede encontrarse analizando la interacción músculo-tendón en cada fase del tiempo de contacto: en el aterrizaje y en el despegue.

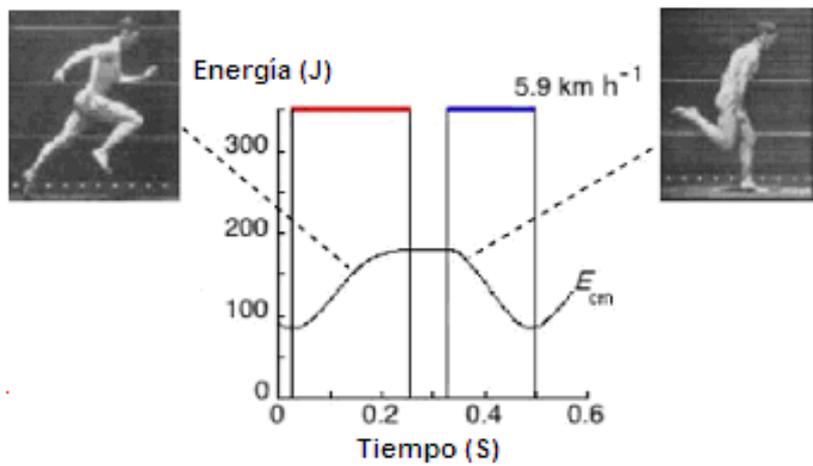


Figura 2.5: Energía total del CM en función del tiempo para un paso de carrera a 5,9 Km/h, indicando los tiempos de despegue (rojo) y aterrizaje (azul). Las fotos indican la fase del paso de carrera que se corresponden con cada parte de la curva de E_{tot} . Durante la la fase aérea, E_{tot} es constante ya que existe un intercambio entre E_v y $E_{k,h}$. Adaptado de Cavagna (2010).

3. Comportamiento de la unidad músculo-tendón durante la carrera humana

La fuerza necesaria para mantener el movimiento durante la carrera proviene principalmente de los músculos. Éstos, al acortarse, generan tensión en los tendones que los unen a los huesos y transmiten la fuerza generada por la contracción muscular para producir el movimiento de los segmentos corporales. A su vez, el movimiento de los segmentos también puede ser generado por fuerzas externas (como la gravedad o la inercia de los segmentos) y producir cambios en la longitud de la UMT. Estos cambios de longitud se dividen en cambios de longitud de las fibras musculares y cambios de longitud del tendón en serie con ellas. El estiramiento de las fibras musculares en relación al estiramiento del tendón depende de la rigidez relativa de ambos tejidos. A su vez la rigidez del músculo depende de su grado de activación (Petit, Filippi et al. 1990). Cuando el músculo está en reposo, tiene una rigidez que es menor que la del tendón. Esta rigidez pasiva se debe principalmente a la aponeurosis del músculo y algunas proteínas estructurales, de las cuales la más importante es la titina.

A bajas velocidades de carrera, la activación muscular es baja o moderada y por lo tanto gran parte del estiramiento impuesto a la UMT durante el movimiento se debe a estiramiento de las fibras musculares. Al aumentar la velocidad de carrera aumenta la activación muscular, por lo tanto, aumenta la rigidez del músculo y progresivamente una mayor parte del cambio de longitud de la UMT será debida a cambios de longitud en el tendón. Si los músculos producen menos trabajo durante la carrera, pueden trabajar en la región óptima de la curva F-v y producir mayores niveles de fuerza para un mismo volumen de músculo activado (Roberts, Marsh et al. 1997; Arampatzis, Karamanidis et al. 2006).

Algunos experimentos muestran que, en la carrera a altas velocidades, el cambio de longitud en la UMT al flexionar y extender el tobillo contra el piso durante el paso de carrera se debe principalmente a cambios de longitud del tendón con pequeños cambios en la longitud de las fibras musculares (Roberts, Marsh et al. 1997; Biewener 1998).

Como se dijo anteriormente, el impulso generado durante la fase de trabajo positivo debe ser igual al impulso durante la fase de trabajo negativo para mantener la velocidad constante. Las fuerzas responsables de generar los impulsos son principalmente musculares por lo tanto la menor duración del trabajo negativo podría ser debida a la mayor fuerza ejercida por la UMT durante el estiramiento comparada con la fuerza realizada durante el acortamiento en la fase de empuje. Esto está de acuerdo con la relación fuerza-velocidad durante el acortamiento y el estiramiento del músculo, ya que para cualquier velocidad, la tensión generada por el músculo es mayor si éste es estirado que si es acortado (Hill 1964). Sin embargo, según esta relación,

las diferencias de la fuerza generada durante el estiramiento o durante el acortamiento deberían aumentar con la velocidad de cambio de longitud, por lo tanto, las diferencias en los tiempos de trabajo positivo y negativo deberían hacerse cada vez mayores a medida que aumenta la velocidad de carrera y en realidad, estas diferencias se hacen cada vez menores. Entonces, podría pensarse que la cantidad de estiramiento y acortamiento (deslizamiento de los filamentos) que se produce en los músculos durante la carrera es progresivamente menor al aumentar la velocidad de carrera y por lo tanto los tiempos de trabajo positivo y negativo son cada vez menos influenciados por la relación fuerza-velocidad del músculo (Cavagna 2006).

Tanto el mecanismo asimétrico contacto-despegue, como el mecanismo simétrico, son estrategias para optimizar la eficiencia muscular. Cuando el músculo produce una contracción concéntrica a la velocidad de acortamiento que maximiza la potencia, genera un nivel de fuerza que es un tercio del que puede producir en una contracción isométrica (Hill 1950). Por lo tanto, durante la carrera a altas velocidades, podría minimizarse el costo produciendo fuerzas isométricas y dejando que el trabajo necesario para la carrera sea producido por el tendón (Roberts, Marsh et al. 1997). Roberts (1997) observó en experimentos con pavos, que durante la fase de apoyo, los músculos producen 35% más de fuerza que la máxima observada para contracciones isométricas.

En la carrera a velocidades bajas, cuando el cambio de longitud del músculo debe contribuir al del tendón para el cambio total de la UMT (cuando el nivel de fuerza no es suficiente para mantener al músculo en contracción isométrica) la mayor fuerza desarrollada durante el estiramiento permite almacenar energía elástica en tendones y otras estructuras elásticas de la UMT. Esto aumenta la eficiencia muscular ya que, según la relación F-v, cada fibra puede alcanzar el doble de F durante el estiramiento que durante la contracción isométrica con la consecuencia de que menos fibras deben ser activadas. Además, el gasto metabólico para mantener una fibra activa durante el estiramiento es menor que durante la contracción isométrica o durante la contracción concéntrica (Fenn 1923; Hill 1957). La energía almacenada en tendones durante el estiramiento puede recuperarse casi completamente en un siguiente acortamiento debido a la pequeña histéresis elástica que poseen los tendones (Alexander 2002). Además el acortamiento del tendón en serie con las fibras musculares disminuye la cantidad de acortamiento que deberían efectuar las fibras para un cambio dado de longitud de la UMT. Si la fibra muscular debe acortarse menos, puede generar más fuerza y tiene un menor costo energético (Cavagna, Legramandi et al. 2010).

Sin embargo es necesario aclarar que las asimetrías en el modelo son calculadas teniendo en cuenta las disminuciones y aumentos de energía total del CM, debidas a la acción de músculos agonistas y antagonistas, distales y proximales, de miembros superiores e inferiores y del tronco. Por esta razón, esta hipótesis es necesariamente especulativa, pero por otra parte, puede explicar el resultado final de la interacción global de todos los músculos del cuerpo durante la carrera (Cavagna 2010). Además, la relación fuerza-velocidad del músculo

como causa de estas asimetrías no es la única explicación posible; las diferentes longitudes de los brazos de momento entre tobillo y talón y entre tobillo y dedos del pie durante la fase de apoyo deberían tenerse en cuenta al explicar las asimetrías contacto-despegue en la carrera humana (Cavagna y Legramandi 2009). Como trabajo es fuerza por distancia, la mayor fuerza producida durante el trabajo negativo implica un menor desplazamiento del CM que durante el despegue. Esto es lo que se esperaría para este sistema de palancas asimétrico como es el pie humano (Carrier, Heglund et al. 1994). Sin embargo, se encontraron que existen las mismas asimetrías contacto-despegue para una gran variedad de animales con distintas geometrías, brazos de palancas, masa corporal y frecuencia de paso. Estas asimetrías fueron siempre en la misma dirección ($t_{w+} > t_{w-}$) lo que refuerza nuevamente la idea de la relación fuerza-velocidad del músculo como causa de las asimetrías contacto despegue (Cavagna y Legramandi 2009).

Así, se produce durante la carrera una secuencia de movimientos en la que la UMT es estirada manteniendo cierto grado de rigidez e inmediatamente después se contrae acortándose. Esto es llamado ciclo estiramiento-acortamiento y permite al músculo alcanzar mayores valores de trabajo positivo y ser más eficiente (Cavagna, Dusman et al. 1968; Komi y Viitasalo 1977).

3.1) ciclo estiramiento-acortamiento

Las características de la contracción muscular (nivel de fuerza máxima alcanzada, trabajo y eficiencia) dependen de la contracción previa que haya sufrido el músculo. La fuerza que puede generar un músculo está disminuida luego de un acortamiento y aumentada luego de un estiramiento (Abbott y Aubert 1952). El efecto de disminución de la fuerza luego de un acortamiento no es tan marcado como el aumento de la fuerza luego de un estiramiento (Herzog 1998). En general, todos los movimientos naturales involucran un estiramiento del músculo antes de un acortamiento (Komi, Linnamo et al. 2000). Estas secuencias de acciones musculares excéntricas (el músculo se contrae mientras es estirado) seguidas inmediatamente de acciones musculares concéntricas (el músculo se contrae mientras se acorta) se llaman ciclos estiramiento-acortamiento (CEA)

Cuando se produce un CEA, el trabajo positivo que el músculo puede producir durante la fase concéntrica es mucho mayor que si se produce la contracción concéntrica a partir de la situación de reposo (Cavagna, Dusman et al. 1968; Bobbert, Gerritsen et al. 1996). Este aumento, es proporcional a la velocidad de pre-estiramiento y disminuye si aumenta el tiempo entre el estiramiento y el acortamiento (Cavagna, Dusman et al. 1968; Edman, Elzinga et al. 1978; Edman, Elzinga et al. 1982).

Existen varias explicaciones posibles para este comportamiento. Una de ellas, es que se requiere un tiempo antes que el músculo logre el máximo valor de fuerza. Producir una contracción isométrica o una excéntrica antes de la contracción concéntrica (que es lo que sucede en general en los movimientos naturales), permitiría que el músculo tenga el tiempo necesario para alcanzar la fuerza máxima (Bobbert, Gerritsen et al. 1996).

Una segunda explicación posible, se refiere al almacenamiento y reutilización de energía elástica (Cavagna, Dusman et al. 1968; Asmussen y Bonde-Petersen 1974; Komi y Bosco 1978). Durante un CEA, los músculos activos son pre-estirados absorbiendo energía que en parte es acumulada en los elementos elásticos y luego es reutilizada durante la contracción concéntrica ayudando a producir trabajo positivo.

Una tercera explicación posible es la participación de reflejos espinales que pueden ayudar al aumento del nivel de estimulación durante la fase concéntrica con lo cual el músculo podría producir mayores niveles de fuerza (Kallio, Linnamo et al. 2004). El reflejo de estiramiento juega un importante rol en la regulación de la rigidez. Cuando los reflejos están intactos, la rigidez muscular es mayor que cuando se compara un músculo sin reflejos ejerciendo el mismo nivel de fuerza (Hoffer y Andreassen 1981).

Finalmente, otra posible explicación es que el pre-estiramiento de la fibra muscular activa puede alterar las propiedades de los elementos contráctiles (Bobbert, Gerritsen et al. 1996; Herzog 1998; Colombini, Nocella et al. 2007). El mecanismo por el cual el elemento contráctil participa en el aumento de la fuerza durante el CEA está muy discutido. Podría ser por el aumento del número de puentes (Sugi y Tsuchiya 1988) o por el aumento de la tensión en cada uno de los puentes (Linari, Bottinelli et al. 2004).

Si bien el CEA aumenta la eficiencia muscular, también se necesita más energía para producir una contracción con CEA que cuando se produce solamente una contracción concéntrica, ya que el músculo debe estar contraído también durante la fase excéntrica. Entonces, debe optimizarse la ganancia en trabajo debida al almacenamiento de energía en los elementos elásticos y la energía química perdida para mantener la contracción durante el estiramiento de la UMT. Durante la carrera esto no es un problema, ya que necesariamente debe producirse trabajo negativo para desacelerar el cuerpo en cada paso. Durante esta fase los músculos deben estar contraídos para impedir la caída hacia delante, por lo tanto, la fracción de trabajo muscular debida al trabajo hecho sobre el músculo no necesita energía extra de la que ya es necesaria para realizar el ejercicio (Cavagna, Dusman et al. 1968).

La eficiencia de trabajo muscular (más de 70%), alcanzada por los grandes animales se produce para altas velocidades de carrera cuando el músculo es estirado antes de acortarse. La eficiencia medida en músculo aislado sólo alcanza estos valores cuando existe pre estiramiento. Por lo tanto, debe ser importante la participación de la energía elástica en la carrera a altas velocidades (Heglund y Cavagna 1985).

El aumento de la eficiencia debido al CEA y las características del CEA dependen de las propiedades mecánicas de la UMT y del tipo de fibra predominante: el aumento de la eficiencia con el pre estiramiento es mayor en músculos con tendones menos rígidos y para músculos más rápidos. Contrario a lo que sucede con el W realizado por el componente contráctil, la liberación de energía mecánica almacenada durante el estiramiento no disminuye al aumentar la velocidad de contracción (Awan, Frearson et al. 1972; Heglund y Cavagna 1985).

3.2) Tipos de fibras musculares

Los músculos esqueléticos humanos, así como los de la mayoría de los mamíferos, están compuesto por distintas proporciones de fibras de distinto tipo. Las fibras se clasifican por sus propiedades funcionales y metabólicas en tres grandes grupos: tipo I o lentas (FL), tipo IIA o rápidas resistentes a la fatiga (FR) y tipo IIB o rápidas fatigables (Burke, Levine et al. 1973). Las respuestas de la UMT, los valores de trabajo que el músculo es capaz de producir y la energía necesaria para realizarlo, depende en gran medida de los tipos de fibras musculares que los componen. Las fibras rápidas y lentas son consideradas ejemplos extremos de especialización muscular en músculo esquelético humano. Difieren en actividad enzimática glicolítica densidad de mitocondrias y economía de contracción (Essen, Jansson et al. 1975; Hoppeler 1986; Stienen, Kiers et al. 1996; He, Bottinelli et al. 2000; Gregory, Vandenborne et al. 2001) Sin embargo la clasificación se hace en base a las distintas isoformas de miosina que forman los filamentos gruesos de los sarcómeros de las fibras (Staron 1991).

Los tres tipos de unidades motoras se encuentran en la mayoría de los músculos pero en proporciones distintas y, dentro de cada músculo, las fibras musculares que pertenecen a una unidad motora están ampliamente distribuidas. Cada músculo tiene distinta proporción de cada tipo de fibra, dependiendo de su función (Ariano, Armstrong et al. 1973). Puede conocerse el porcentaje de fibras rápidas en un músculo a través de métodos directos, que se basan en el reconocimiento de las fibras según sus propiedades morfológicas e histoquímicas, luego de realizar una biopsia muscular. Pero, debido los efectos secundarios a corto y mediano plazo que puede producir realizar una biopsia, especialmente en deportistas que deben continuar sus rutinas de entrenamiento (Morin, Samozino et al. 2009), muchos investigadores han tratado de encontrar métodos no invasivos por medio de los cuales sea posible estimar el porcentaje de fibras rápidas de los músculos (Thorstensson y Karlsson 1976; Gregor, Edgerton et al. 1979; Gerdle, Karlsson et al. 2000; Bosco, Komi et al. 1983; MacIntosh, Herzog et al. 1993; Crowther, Jubrias et al. 2002).

Bosco (1983) encontró que existe una relación lineal entre la potencia promedio que una persona puede realizar durante 15 segundos de saltos continuos y el porcentaje de fibras rápidas en el músculo vasto lateral. Como las fibras rápidas son reclutadas cuando es necesario producir altos niveles de fuerza ya que responden a frecuencias de estímulo más altas que las fibras lentas y tienen un mayor umbral para activarse, los saltos son movimientos que pueden utilizarse para predecir la cantidad de fibras rápidas porque son ejemplos de realización de máxima fuerza muscular a muy alta velocidad (De Luca 1985; Petit, Filippi et al.

1990). Según Macintosh (1993), la propiedad que mejor predice el porcentaje de fibras rápidas es el valor de potencia que es capaz de alcanzar el músculo durante una contracción concéntrica.

Propiedades mecánicas de los distintos tipos de fibras.

Las propiedades mecánicas y morfológicas intrínsecas de las UMT (como la rigidez del tendón o la arquitectura muscular) están implicadas en las propiedades funcionales del aparato locomotor (Gans y Gaunt 1991; Zuurbier y Huijing 1992; Biewener y Roberts 2000; Lieber, Leonard et al. 2000). Las unidades motoras lentas pueden producir mayores valores de rigidez muscular pasiva, aunque desarrollan menores tensiones tetánicas que las fibras rápidas. Las FR alcanzan más rápidamente los valores máximos de tensión y la velocidad óptima (a la cual pueden producir los niveles máximos de potencia) es mayor que para las fibras lentas (Petit, Filippi et al. 1990; Brooks y Faulkner 1991).

Los distintos tipos de fibras participan de manera distinta en la producción de rigidez muscular total. Las unidades motoras lentas producen un aumento en la rigidez que, en relación con la tensión desarrollada es desproporcionadamente grande comparada con la rigidez desarrollada por las fibras rápidas (Petit, Filippi et al. 1990). Algunos estudios han encontrado que también los elementos elásticos en serie con las fibras lentas son más rígidos que los elementos elásticos en serie con las fibras rápidas (Goubel y Marini 1987; Petit, Filippi et al. 1990). Por lo tanto, la rigidez del músculo va a estar influenciada por los distintos porcentajes de fibras rápidas y lentas que posea.

3.3) Diferencias entre velocistas y fondistas: ¿efectos del entrenamiento o causas genéticas?

Han sido reportadas muchas diferencias en la estructura y en las propiedades mecánicas tanto de las fibras musculares como de los tendones de las UMT de velocistas y fondistas. Está muy discutido si estas diferencias se deben a efectos del entrenamiento o a causas genéticas. En general, los velocistas tienen músculos más largos en los miembros inferiores con más cantidad de sarcómeros, mayor cantidad de fibras rápidas y menores valores de rigidez tanto en las fibras como en el tendón en serie con ellas (Abe, Kumagai et al. 2000; Arampatzis, Karamanidis et al. 2006; Lee y Piazza 2009). Algunos estudios en animales, han demostrado que al menos algunas de estas diferencias podrían deberse a respuestas adaptativas al ejercicio. Por ejemplo, el aumento en el número de sarcómeros en los músculos de los velocistas (Williams y Goldspink 1978; Ashmore y Summers 1981; Lynn, Talbot et al. 1998). También se han encontrado diferencias en la arquitectura muscular como resultado del entrenamiento en la pierna dominante de jugadores de fútbol (Kearns, Isokawa et al. 2001) y

un estudio realizado con hermanos gemelos, mostró que al menos algunos músculos pueden variar su longitud por efecto del entrenamiento (Abe 2002). Este cambio de longitud sería debido a un proceso de formación de nuevos sarcómeros en serie. Esto produciría un cambio en la relación longitud-tensión del músculo hacia valores de mayores longitudes, permitiendo al músculo trabajar en longitudes óptimas de generación de fuerza para un mayor rango de movimiento (Alegre, Jimenez et al. 2006).

Otra adaptación encontrada en los velocistas es el menor brazo de momento para el tendón de Aquiles (palanca con ventaja mecánica de velocidad y no de fuerza) (Lee y Piazza 2009). Aunque un menor brazo de momento en el tendón de Aquiles no es la estructura mecánica que favorece la generación de fuerza, aumenta la performance del *sprint* ya que permite que la velocidad de acortamiento del músculo sea menor y así éste pueda producir mayores niveles de fuerza en las flexiones plantares rápidas (Lee y Piazza 2009). Además, ha sido sugerido que existe una relación entre la ventaja mecánica del músculo y la proporción de fibras rápidas (Gandevia y Mahutte 1980) ya que músculos con pequeños brazos de momento deben desarrollar grandes fuerzas y las unidades motoras rápidas pueden desarrollar mayores tensiones que las lentas (Petit, Filippi et al. 1990).

El porcentaje de fibras rápidas en los músculos de las piernas también es una característica distintiva en ambos grupos de deportistas. Es sabido que los corredores de velocidad (SPR) y los corredores de distancia (LDR) poseen diferente porcentaje de fibras en sus músculos (Costill, Daniels et al. 1976; Thorstensson, Larsson et al. 1977). Existen algunas evidencias de la transformación de un tipo de fibra en otro que puede ocurrir con la edad, en caso de inmovilización del músculo o debido al entrenamiento (Costill, Cleary et al. 1979; Jansson, Esbjornsson et al. 1990; Lexell 1995; Kim, Roy et al. 2007; Gondin, Brocca et al. 2010).

El entrenamiento puede producir también cambios a nivel de las estructuras elásticas de la UMT, tanto a nivel de sarcómero como del tendón. Por ejemplo, Pousson (1990) observó una disminución en la rigidez pasiva luego de un entrenamiento con ejercicios excéntricos en músculos flexores del codo (Pousson, Van Hoecke et al. 1990). Esta disminución sería debida a un aumento en la longitud de la titina. El estiramiento repetido de la titina disminuye la rigidez de la molécula, aumentando su longitud. Esto produce una disminución en la rigidez del músculo.

Según Arampatziz (2006), los SPR tienen un tendón del cuádriceps menos rígido mientras que no existirían diferencias significativas en la rigidez del tendón del tríceps sural entre SPR y LDR. La menor rigidez en el tendón del cuádriceps permitiría a las fibras musculares trabajar en las regiones óptimas de longitud y velocidad (y así generar mayores niveles de fuerza) para un mayor rango de movimiento ya que gran parte del acortamiento o estiramiento de la UMT sería debido al tendón y no a las fibras. Por el contrario, el entrenamiento de resistencia, aumenta la rigidez del tendón del cuádriceps (Woo, Gomez et al.

1981; Goubel y Marini 1987). Un tendón del cuádriceps más rígido, permitiría a los fondistas utilizar más cantidad de energía elástica y disminuir el consumo metabólico en las carreras de largas distancias (Arampatzis, Karamanidis et al. 2006).

Las diferencias en las propiedades mecánicas de los tendones también podría estar relacionada con los tipos de fibras que están en serie con ellos (Komi y Viitasalo 1977). Baratta (1998) encontró que el tendón del gastrocnemio medial disminuye el tiempo entre el estímulo y el la producción de movimiento cuando se compara con la respuesta obtenida en músculo sin tendón, mientras que, por el contrario, el tendón del tibial anterior, la retrasa. Dado que el tibial anterior es un músculo con más cantidad de fibras rápidas que el gastrocnemio, este experimento podría indicar la rigidez de los tendones de músculos con mayor porcentaje de fibras rápidas es menor (Baratta, Solomonow et al. 1998).

,

4. Objetivos

4.1) Objetivo general

Comparar los parámetros del modelo masa-resorte, el trabajo mecánico y las asimetrías contacto-despegue de la mecánica de la carrera de velocistas y fondistas en distintas velocidades de carrera.

4.2) Objetivos específicos

1) Estimar el porcentaje de fibras rápidas en músculos extensores de pierna para ambos grupos.

2) Comparar entre ambos grupos, para distintas velocidades de carrera, los siguientes parámetros del modelo:

- Rigidez vertical.
- Frecuencia de paso y frecuencia de resonancia del sistema.
- Tiempo de contacto efectivo y tiempo aéreo efectivo.
- Desplazamiento vertical del CM.
- Aceleración vertical máxima del CM.
- Velocidad vertical máxima del CM.

3) Comparar entre ambos grupos, para distintas velocidades de carrera, los siguientes valores de trabajo y energías mecánicas:

- Energía cinética vertical, energía cinética horizontal, energía potencial y energía total del CM.
- Trabajo mecánico externo, interno y total del CM.

4) Comparar entre ambos grupos, para distintas velocidades de carrera, las siguientes asimetrías contacto-despegue:

- Tiempo de trabajo positivo y tiempo de trabajo negativo.
- Desplazamiento vertical del CM ascendente y descendente durante el contacto efectivo.
- Velocidad vertical máxima ascendente y descendente del CM.

5. Hipótesis

Suponemos que la carrera de los velocistas se ajustaría mejor a un modelo masa-resorte perfecto que la de los fondistas ya que, debido a la mayor potencia muscular desarrollada por los músculos con mayor porcentaje de fibras rápidas, podrían producir una oscilación vertical del CM de mayor amplitud durante el paso de carrera, con un mayor almacenamiento de energía elástica, mayor tiempo de vuelo y por lo tanto, una menor frecuencia de paso.

6. Material y métodos

6.1) Muestra

Poblaciones de estudio.

Participaron como sujetos de estudio 5 velocistas y 5 fondistas (ambos grupos estaban formados por 4 integrantes de sexo masculino y 1 integrante de sexo femenino) del club de atletismo SOGIPA de Porto Alegre.

Criterios de inclusión

Individuos mayores de 18 años de edad con más de 2 años de práctica deportiva federada en pruebas de fondo o velocidad que no hayan tenido lesiones que hayan representado periodos de inactividad prolongados en los últimos dos años y que posean experiencia previa en evaluaciones mediante test de saltos verticales.

Criterios de exclusión

Estado de salud (estado nutricional, cardiorrespiratorio, etc.) que no permita realizar las actividades físicas requeridas en el estudio.

La tabla 6.1 muestra las características promedio de los participantes.

Todos los participantes fueron informados de los procedimientos que implica el estudio y firmaron un consentimiento informado escrito según lo establecido en la declaración de Helsinki y previamente aprobado por el Comité de Ética de la Facultad de Medicina (Universidad de la República).

| | Velocistas | Fondistas |
|-------------------|-------------------|------------------|
| Variable | | |
| Edad (años) | 21,2 ± 2,39 | 30,6 ± 9,26 |
| Altura (m) | 1,77 ± 0,079 | 1,72 ± 0,092 |
| Masa (kg) | 62,33 ± 6,07 | 57,1 ± 9,01 |
| Largo de MI* (cm) | 86,92 ± 4,18 | 87,53 ± 3,98 |

* miembro inferior

Tabla 6.1: Características de la muestra (media y desvío estándar).

6.2) Instrumentos de medida

i) Cámara de video:

Se utilizó una cámara de video (JVC GR-DVL 9800 – JVC Company of America, Wayne, New Jersey, USA) conectada a una computadora modelo INSPIRON 1525 Dell. La frecuencia de muestreo fue de 25 Hz.

ii) Marcadores reflexivos:

Para el cálculo de la velocidad media fue colocado un marcador esférico de 1 cm de diámetro de nylon polyamida-6, revestido de cinta reflexiva. La forma esférica permite disminuir errores debido a la perspectiva y proyección de la luz (Barros, Brezinkofer et al. 1999; Meneghesso 2002)

iii) Calibrador:

Fue utilizado un calibrador bidimensional de 148 cm de altura y 98 cm de ancho.

iv) Plataforma de fuerza:

Los datos de FRS fueron registrados con una plataforma de fuerza (60x60 cm) AMTI (modelo OR5) conectada a una computadora Pentium III, 900 Mhz, a través de un conversor analógico-digital con una frecuencia de adquisición de 500 Hz.

v) instrumentos de medida para caracterización de la muestra:

Cinta métrica, balanza y estadímetro Filizola serie 3134.

6.3) Procedimiento experimental

6.3.1) *Estimación del porcentaje de fibras rápidas*

Se estimó el porcentaje de fibras rápidas en los músculos extensores de pierna de los deportistas por medio del test de Bosco. Para esto se midió la fuerza máxima de reacción del piso producida por los deportistas para realizar saltos consecutivos tratando de alcanzar la máxima altura posible, durante 60 segundos. Los saltos fueron realizados sobre la plataforma de fuerza, con las manos en la cintura y llegando a flexionar la rodilla 90 grados durante el contacto con el piso (Bosco, Komi et al. 1983).

6.3.2) *Diseño experimental*

El estudio fue realizado en el “Laboratorio de Pesquisa do Exercício LAPEX-ESEF-UFRGS”. La duración de cada experimento fue de aproximadamente 2 horas. Las carreras se realizaron en un ambiente cerrado, en un circuito circular de aproximadamente 30 metros. Una parte de este circuito, de aproximadamente 10 metros era recta y fueron estos tramos los considerados para realizar los cálculos.

Para realizar las medidas de fuerza, se colocó en el tramo recto del circuito de carrera una plataforma de fuerza ubicada en el piso. Una alfombra de goma negra cubría casi la totalidad de la trayectoria recta de forma que no era posible detectar el lugar exacto donde se localizaba la plataforma, para evitar que la persona alterase su paso de carrera tratando de pisarla (figura 6.1). Una persona que conocía la ubicación de la plataforma indicaba verbalmente cuándo los pasos habían sido dentro o fuera de ésta y corregía el largo del circuito de manera de lograr que en la mayor parte de las pasadas cada deportista pisara dentro de la superficie de la plataforma.

i) Preparación del individuo: Antes de comenzar el estudio, fueron tomadas todas las medidas necesarias del participante: peso, altura y largo del miembro inferior. Luego fueron colocados marcadores reflexivos en el cuello (para el cálculo de la velocidad media), en el calcáneo, en el quinto metatarso y en el maléolo (para identificar los pasos en que el pie estaba totalmente dentro de los límites de la plataforma de fuerza. Todos los marcadores fueron colocados solamente del lado izquierdo.

ii) Cinimetría: Se midió la velocidad de carrera con cinimetría, fijando en el cuello del deportista, un marcador reflexivo. Se filmó con una sola cámara de video colocada a 5 metros

de la plataforma de fuerza, para filmar el paso previo y posterior al contacto del pie con la plataforma. Para la captura de imágenes se utilizó el programa Dvideow 6.3. Previo a la realización del experimento se realizó una calibración del ambiente para luego poder reconstruir el movimiento y calcular la velocidad. El sistema de calibración utilizado y la definición de los ejes se realizó según las recomendaciones de la Sociedad Internacional de Biomecánica (Barros, Russomano et al. 2006).

iii) Dinamometría: Para obtener los valores de la fuerza de reacción del piso ejercidas durante la carrera en los tres ejes, se utilizó la plataforma de fuerza. Los datos fueron obtenidos en unidades de voltaje y convertidos luego a unidades de fuerza por medio de rutinas realizadas en *Matlab R2007b*.



Figura 6.1: Lugar donde fueron realizados los experimentos. Los marcadores reflexivos en el piso muestran dónde se encontraba la plataforma de fuerza. Estos punto no eran visibles para el participante. Una persona anotaba los pasos válidos (cuando todo el pie se apoyaba dentro de los límites de la plataforma. Una cámara de video se encontraba frente a la plataforma para poder calcular luego la velocidad media de carrera y saber si ésta era constante.

6.4) Análisis de los datos

6.4.1) *Estimación del porcentaje de fibras rápidas*

Una vez obtenidos los datos de fuerza de reacción del piso durante los 60 segundos de saltos y el tiempo de vuelo, se estimó la potencia máxima promedio a través de la ecuación:

$$\overline{\dot{W}} = \frac{g^2 t_v 1.5}{4n(1.5 - t_v)}$$

donde t_v representa el tiempo de vuelo total durante todos los saltos realizados en los primeros 15 segundos de salto y n representa el número de saltos realizados en esos 15 segundos.

El porcentaje de fibras rápidas fue estimado utilizando la ecuación :

$$F = \frac{\overline{\dot{W}} - 1.256}{0.26}$$

donde F representa el porcentaje de fibras rápidas y $\overline{\dot{W}}$ el valor de potencia máxima promedio durante los primeros 15 segundos de salto (Bosco, Luhtanen et al. 1983) .

Estos cálculos fueron realizados con la rutina “Fibras” realizada en *Matlab R2007b* (apéndice B).

6.4.2) *Determinación de variables cinemáticas.*

El programa *Dvideow 6.3* permite desentrelazar los campos de los que se compone la imagen de cada cuadro, duplicando así, la frecuencia de adquisición de datos de la cámara. Por lo tanto, para el análisis de datos, se trabajó con una frecuencia de 50 Hz.

Se digitalizaron las imágenes del marcador en la pantalla para obtener las coordenadas en cada cuadro y poder realizar la reconstrucción del movimiento. Esta matriz fue cargada en *Matlab R2007b* para poder calcular la velocidad con la rutina “cinemática” (apéndice C).

Se calculó la distancia recorrida en un ciclo de pasada (dos pasos consecutivos) y luego se calculó la velocidad media horizontal ($\overline{v_h}$) como el tiempo necesario para recorrer esa distancia. El tiempo fue calculado como el número de cuadros de la filmación multiplicado por el inverso de la frecuencia de muestreo (en este caso: 0,02 segundos).

El largo de paso (LP), fue calculado como la distancia entre el toque de un pie con el piso hasta el toque del otro pie con el piso.

El tiempo de paso (TP), fue calculado como el tiempo necesario para producir un paso (LP).

La Frecuencia de paso (f_{step}), fue calculada como $1/TP$.

El tiempo aéreo (t_a) fue calculado como el tiempo entre el despegue del piso de un pie y el toque con el piso del otro pie.

6.4.3) Análisis de las fuerzas de reacción del piso y cálculo de las energías del CM.

Los cálculos de las energías mecánicas del CM a partir de las FRS, fueron hechos según el trabajo de Cavagna (1975).

La plataforma utilizada en este estudio era sensible a las componentes verticales, horizontales y laterales de la fuerza ejercida contra el piso.

Sólo se utilizaron para el estudio los valores de fuerza vertical y horizontal ya que los valores de las fuerzas laterales son más de 10 veces menores que los valores alcanzados por las fuerzas verticales y horizontales y pueden ser despreciadas para calcular los cambios de energía mecánica que ocurren en el CM durante la carrera (Cavagna 1975)

Las curvas de fuerza fueron filtradas con la frecuencia de corte determinada a través del análisis residual propuesto por Winter (Winter 2005). Para esto se utilizó una rutina realizada en *Matlab R2007b*. Las frecuencias de corte promedio determinadas por este proceso matemático fueron de 45,32 Hz para las curvas de fuerza vertical y de 55,67 Hz para las curvas de fuerza horizontal. Luego, fueron identificadas y recortadas las curvas correspondientes a los pasos válidos (aquellos en los cuales el pie estaba completamente dentro de los límites de la plataforma durante el contacto con el piso) en el programa SAD 32.

Para determinar los cambios de energía del CM a partir de las curvas de fuerza de reacción del piso, se utilizó una rutina implementada en *Labview* versión 8.2 ("Main program", apéndice D). Se ingresaron en la rutina los datos de fuerza de reacción del suelo (FRS) horizontal y vertical, la masa del individuo, la aceleración de la gravedad, la frecuencia de muestreo de la plataforma y los datos calculados por medio de cinemetría (velocidad media horizontal, tiempo aéreo, frecuencia de paso, largo de paso y duración del paso).

Para obtener la curva de fuerza correspondiente a un paso de carrera completo (fase de contacto + fase aérea), se agregó un registro de fuerza correspondiente a un valor de FRS igual a cero durante el tiempo de fase aérea calculado por cinemetría. Como el objetivo del estudio es estudiar pasos de carrera a velocidad constante, la curva de FRS horizontal (FRSh) fue integrada en el tiempo para analizar los cambios de velocidad horizontal. Solamente fueron aceptados para el análisis los pasos para los cuales la variación de velocidad horizontal fue menor al 5% de la velocidad horizontal media (Schepens, Willems et al. 1998).

Fue realizada una subrutina para calcular todas las variables verticales ("Vertical", apéndice E) y una subrutina para calcular las variables horizontales ("Horizontal", apéndice F).

La aceleración vertical (a_v) en función del tiempo, fue determinada por la FRSh obtenida, menos el peso corporal (PC), dividida por la masa (m):

$$a_v = \frac{1}{m}(F_v - P)$$

Este valor fue integrado respecto del tiempo ($dt = 0,002$) para obtener la velocidad vertical (V_v) en función del tiempo, eligiendo la constante de integración, de manera que el valor de velocidad vertical media durante un paso de carrera sea cero.

$$V_v = \int a_v dt + C$$

La posición vertical del CM (S_v) en función del tiempo, fue calculada de la misma manera; suponiendo también un desplazamiento vertical promedio durante un paso de carrera igual a cero:

$$S_v = \int v_v dt + C$$

Conociendo estas variables, se calcularon las energías cinética vertical ($E_{k,v}$), potencial (E_p) y la energía vertical total del CM (E_v):

$$E_{k,v} = \frac{1}{2}(m.v_v^2)$$

$$E_p = m.g.S_v$$

$$E_v = E_{k,v} + E_p$$

La aceleración horizontal (a_h) fue determinada dividiendo la FRSh por la masa:

$$a_h = \frac{1}{m} F_h$$

Luego, este valor fue integrado respecto del tiempo ($dt = 0,002$) para obtener la velocidad horizontal (V_h) en función del tiempo, eligiendo la constante de integración, de manera que el valor de velocidad horizontal media durante un paso de carrera sea igual al valor de velocidad horizontal calculado por cinemetría:

$$V_h = \int a_h dt + (\overline{v_h} - \overline{\int a_h dt})$$

donde $\overline{v_h}$ representa la velocidad media horizontal obtenida por cinemetría y $\overline{\int a_h dt}$ representa el valor medio de la integral de a_h en función del tiempo.

Conociendo el valor de V_h en función del tiempo, fue calculado el valor de la energía cinética horizontal:

$$E_{k,h} = \frac{1}{2}(m.v_h^2)$$

La curva de energía total del CM (E_{tot}) en función del tiempo, fue obtenida sumando las curvas de $E_{k,h}$ y $E_{k,v}$:

$$E_{tot} = E_v + E_h$$

6.4.4) Cálculos de los parámetros del modelo.

i) Rigidez vertical

Suponiendo que el sistema se comporta como un resorte lineal, la rigidez vertical masa específica (K/m), puede ser calculada como la razón entre la aceleración vertical máxima y el desplazamiento durante el tiempo de contacto efectivo (Cavagna, Franzetti et al. 1988):

$$\frac{K}{m} = \frac{a_{v,max}}{S_{ce}}$$

ii) Frecuencia del sistema

La frecuencia del sistema fue calculada con la ec.4:

$$f_{sist} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

iii) Tiempo de contacto efectivo y tiempo aéreo efectivo

Los tiempos de contacto efectivo ascendente ($t_{ce,up}$) y descendente ($t_{ce,down}$) y los tiempos aéreos efectivos ascendente ($t_{ae,up}$) y descendente ($t_{ae,down}$), así como los desplazamientos del CM en cada una de estas fases ($S_{ce,up}$; $S_{ce,down}$; $S_{ae,up}$ y $S_{ae,down}$ respectivamente) fueron calculados con la subrutina "Asimetrías" (apéndice G)

A partir de la FRS_v , fue calculado en tiempo de contacto efectivo (t_{ce}) con la subrutina "Tce" (Apéndice H) de la siguiente manera:

1. Se restó el valor del peso corporal (PC), de manera que los valores mayores a PC quedaron positivos y los valores menores quedaron negativos.

2. Se cortó la curva en el punto correspondiente al valor máximo de manera que se obtuvieron dos curvas.

3. Se realizó valor absoluto para las dos para que todos los valores quedaran positivos y el valor en que $FRS_v = PC$ fuera igual a cero y fuera el mínimo de la curva.

4. Se restó de la primer curva el valor del tiempo que corresponde a la distancia entre el comienzo del paso y el mínimo.

5. Al valor obtenido en 4, se sumó el valor de la segunda curva correspondiente al tiempo entre el comienzo de la segunda curva hasta el mínimo.

6. Este valor se dividió por la frecuencia de muestreo de la plataforma para obtenerlo en unidades de segundos.

El t_{ae} fue obtenido restando el valor de t_{ce} a la duración total del paso.

Para calcular $t_{ce,up}$ y $t_{ce,down}$, se cortó la curva de S_v en función del tiempo, de manera de tener solamente los valores de S_v correspondientes a t_{ce} . Se obtuvo $t_{ce,up}$ como el tiempo correspondiente a los valores positivos de la derivada de S_v y $t_{ce,down}$ como el tiempo correspondiente a valores negativos de la derivada.

Para calcular $S_{ce,up}$ y $S_{ce,down}$, se sumaron los incrementos positivos y negativos respectivamente de S_v durante t_{ce} .

El mismo procedimiento fue realizado para obtener las variables de tiempo y desplazamiento durante t_{ae} .

6.4.5) Análisis de las asimetrías contacto-despegue

A partir de la curva de velocidad vertical en función del tiempo, fue calculado el valor de velocidad máxima vertical ascendente ($V_{v,mx,up}$) y descendente ($V_{v,mx,down}$). El valor de $V_{v,mx,up}$ fue calculado como el máximo valor positivo de la función y el valor de $V_{v,mx,down}$ como el máximo valor negativo.

A partir de la curva de W_{tot} , fue calculado el tiempo de trabajo positivo (t_{W+}) como el tiempo correspondiente a los valores positivos de la derivada de W_{tot} y el tiempo de trabajo negativo (t_{W-}) como el tiempo correspondiente a valores negativos de la derivada. Como la energía total del CM se mantiene constante mientras el cuerpo está en el aire (porque puede despreciarse el rozamiento con el aire), para calcular t_{W+} y t_{W-} se utilizó solamente el registro de fuerza, sin tener en cuenta el tiempo aéreo calculado por cinemetría (Cavagna 2006).

6.4.6) Análisis de los valores de trabajo mecánico y potencia mecánica

El trabajo externo positivo (W_{ext+}) fue calculado sumando los valores de las variaciones positivas de la curva de energía total durante un paso y el trabajo externo negativo (W_{ext-}) sumando el valor absoluto de los valores de las variaciones negativas.

El trabajo mecánico interno fue estimado con la ecuación de (Cavagna, Mantovani et al. 1997).

$$\frac{W_{int}}{M_b L} = 0.1 \times 4^{-0.2} \times \overline{V_h} \times f$$

El trabajo mecánico total (W_{tot}) fue calculado como la suma del W_{ext} y el W_{int} :

$$W_{tot} = |W_{ext}| + |W_{int}|$$

La potencia mecánica externa ($\dot{W}_{ext,step}$), interna ($\dot{W}_{int,step}$) y total ($\dot{W}_{tot,step}$) realizadas durante un paso de carrera fueron determinadas de la siguiente manera:

$$\dot{W}_{ext,step} = \frac{W_{ext}}{T_P}$$

$$\dot{W}_{int,step} = \frac{W_{int}}{T_P}$$

$$\dot{W}_{tot,step} = \dot{W}_{ext,step} + \dot{W}_{int,step}$$

La potencia mecánica realizada durante la fase de impulso $\dot{W}_{ext,push}$ fue determinada solamente para el trabajo externo, de la siguiente manera:

$$\dot{W}_{ext,push} = \frac{W_{ext}}{t_{W_{ext+}}}$$

6.4.7) Análisis estadístico

Primero fue verificada la normalidad de los datos por el test de Shapiro-Wilk para todos los datos. Una vez comprobada la distribución normal ($p > 0,05$) fueron utilizados media, desvío estándar y valores porcentuales para analizar los resultados.

Para las comparaciones de las variables del modelo, para el paso de carrera de una misma persona (por ejemplo: t_{ce} vs t_{ae} , S_{ce} vs S_{ae} , f_{step} vs f_{sist}) se utilizó un test de "t" de *student* para muestras pareadas con $\alpha < 0,05$.

Las comparaciones de los valores de las variables entre los grupos de velocistas y fondistas, se hicieron un test de "t" de *student* para muestras independientes.

Los programas utilizados para realizar estos análisis fueron *Excell 2003* y *SPSS* versión 17.0.

7. Resultados

Los resultados obtenidos en este estudio son similares a los obtenidos en otros estudios donde se midieron las mismas variables. Este capítulo está dividido en cuatro partes. En la primera parte se muestran los resultados referentes a la estimación del porcentaje de fibras rápidas en los músculos extensores de pierna para el grupo de los velocistas y para el grupo de los fondistas. Luego, en la segunda parte, se describen los resultados obtenidos en los parámetros del modelo: período de paso, desplazamiento vertical del CM, frecuencia de paso, frecuencia del sistema y rigidez. En la tercera parte se describen los valores de trabajo mecánico por unidad de distancia: W_+ , W_- , W_{ext} , W_{int} y W_{tot} y de trabajo mecánico por unidad de tiempo: \dot{W}_{push} , y \dot{W}_{step} . Finalmente, la cuarta parte muestra los valores de energía del CM y las asimetrías del modelo.

Para las variables que fueron estudiadas en función de la velocidad de carrera, los datos se agruparon en clases de intervalos de a 1 Km/h, de la siguiente manera: 6 a <6 Km/h, 7 a <7 Km/h,....., 15 a < 16 Km/h.

Para el grupo de los fondistas, se analizaron pasos de carrera de entre 6 y 13 Km/h, mientras que para el grupo de los velocistas, las velocidades fueron de entre 8 y 15 Km/h. Por lo tanto, para las comparaciones entre grupos se analizaron velocidades entre 8 y 13 Km/h mientras que para el análisis de las variables dentro de un mismo grupo, se utilizaron todas las velocidades registradas.

7.1) Porcentaje de fibras rápidas

La figura 7.1 muestra la potencia promedio durante 15 segundos de salto para cada uno de los participantes del estudio calculada con la ecuación de Bosco (1983). Existe una marcada diferencia entre los valores obtenidos para los participantes pertenecientes al grupo de los fondistas (F1, F2, F3, F4, F5) durante los primeros 15 segundos de saltos, en comparación con los valores obtenidos para los participantes al grupo de los velocistas (V1, V2, V3, V4, V5). Sin embargo, no parece haber diferencias en la potencia promedio alcanzada por ambos grupos en los últimos 15 segundos de saltos.

La tabla 7.1 muestra los porcentajes de fibras rápidas del vasto lateral, estimados según Bosco (1983). Los valores de porcentaje de fibras rápidas entre ambos grupos fueron significativamente distintos ($P < 0,05$).

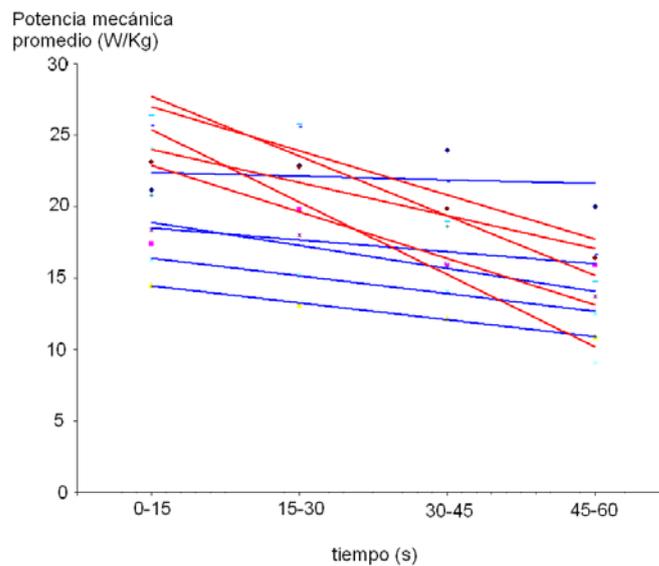


Figura 7.1: Valores de potencia mecánica promedio cada 15 segundos de saltos verticales de altura máxima, en un total de 60 segundos. Las líneas rojas representan el ajuste lineal para los velocistas que participaron de este estudio; las líneas azules representan el ajuste lineal para los fondistas.

| Participante (fondista) | Fibras rápidas (%) | Participante (velocista) | Fibras rápidas (%) |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| F1 | 10,4 | V1 | 20,9 |
| F2 | 3,4 | V2 | 30,7 |
| F3 | 0,6 | V3 | 27,9 |
| F4 | 15,7 | V4 | 32,8 |
| F5 | 2,7 | V5 | 17,4 |

Tabla 7.1: Estimación del porcentaje de fibras rápidas en el músculo vasto lateral según el método de Bosco (1983) para cada uno de los velocistas y fondistas que participaron de este estudio.

7.2) Parámetros del modelo

7.2.1) Período de paso y desplazamiento vertical del CM

En la figura 7.2 se muestran los valores promedio de período de paso (figura 7.2; TP; a (i) y b (i)) y de la oscilación vertical del CM (figura 7.2; S_v ; a (ii) y b (ii)) en función de la velocidad de progresión. También se representan sus respectivas fracciones: t_{ae} y S_{ae} (círculos rojos) y t_{ce} y S_{ce} (círculos azules). Los resultados obtenidos para ambos grupos están de acuerdo con resultados publicados en otros estudios (Cavagna, Franzetti et al. 1988; Cavagna, Legramandi et al. 2008; Cavagna y Legramandi 2009). A partir de 8 Km/h el paso es asimétrico ($t_{ae} > t_{ce}$ y $S_{ae} > S_{ce}$) y la asimetría aumenta a medida que aumenta la velocidad de carrera. Para el grupo de los velocistas, las diferencias entre S_{ce} y S_{ae} fueron significativas a partir de los 10 Km/h.

El desplazamiento vertical del CM (S_v) durante un paso de carrera alcanzó el máximo valor en el intervalo de 14 a 15 Km/h en el grupo de los velocistas (0,11 m) y en el intervalo de 13 a 14 Km/h en el grupo de los fondistas (0,10 m). Debe tenerse en cuenta que no se registraron carreras de 14 Km/h para el grupo de los fondistas y, si se analizan sólo las velocidades que se obtuvieron para los dos grupos, para ambos se observó el máximo valor de S_v a la velocidad de entre 13 y 14 Km/h y el valor registrado fue el mismo: 0,10 m.

Para todas las velocidades analizadas, solamente se encontraron diferencias significativas entre los desplazamientos verticales del CM (S_v) de velocistas y fondistas para el intervalo de velocidades de entre 8 y 9 Km/h. Esto es debido a un menor valor tanto de S_{ce} como de S_{ae} . A esta velocidad, TP también fue un poco menor para los velocistas aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas. El menor valor de TP fue debido principalmente a un menor valor de t_{ae} .

Para las velocidades más altas analizadas (12 y 13 Km/h), si bien no existieron diferencias estadísticamente significativas en los valores de TP o S_v entre velocistas y fondistas, los valores de estas variables fueron mayores para los velocistas. Esto se debe principalmente a un mayor valor de S_{ce} y t_{ce} , encontrándose menores diferencias en los valores de S_{ae} y t_{ae} . Para el intervalo de velocidad de 12 a 13 Km/h, las diferencias en S_{ce} y t_{ce} fueron estadísticamente significativas.

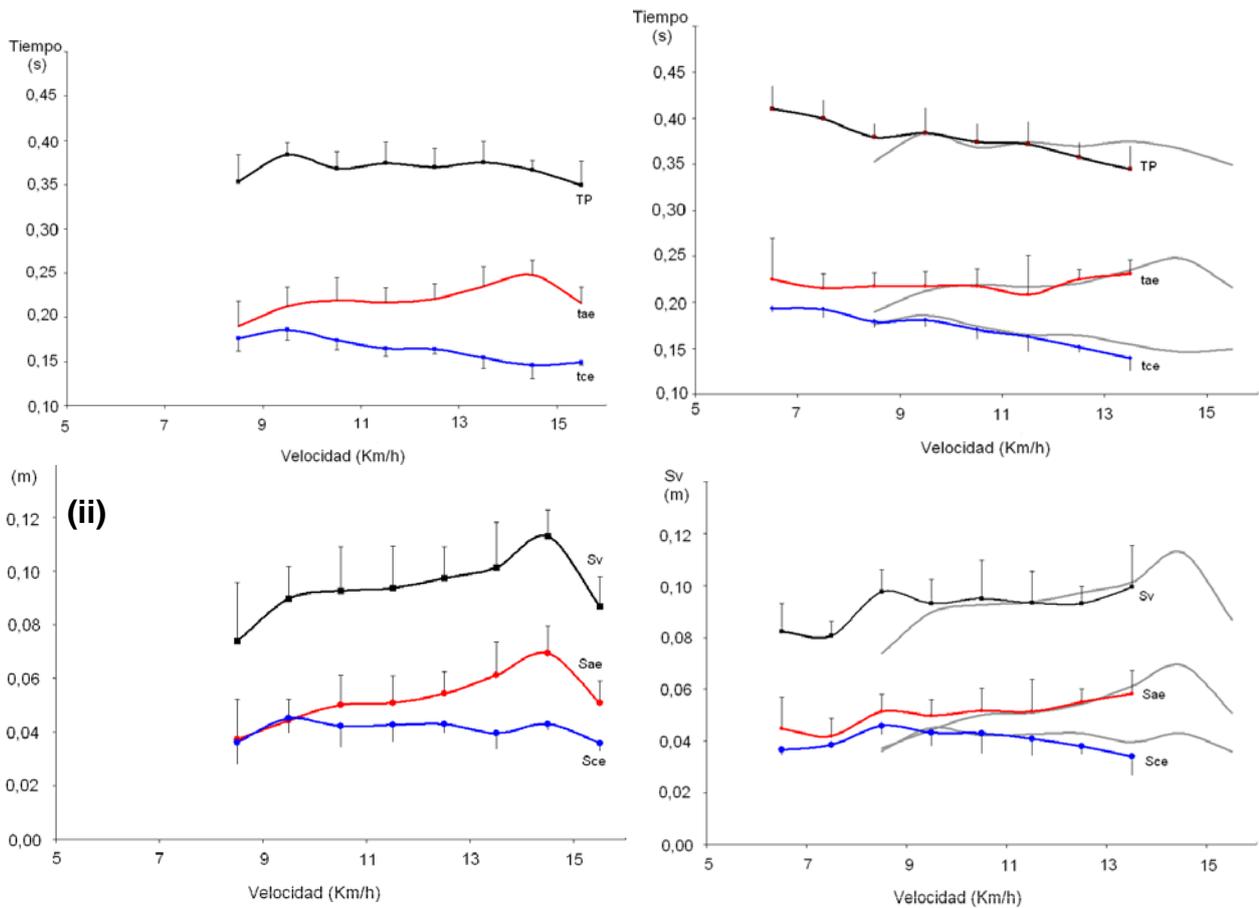


Figura 7.2: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En a (i) y b (i) el período de paso está representado por TP (cuadrados negros) y sus fracciones: tiempo de contacto efectivo (t_{ce}), durante el cual la fuerza de reacción del piso es mayor que el peso corporal (círculos azules) y tiempo aéreo efectivo (t_{ae}), durante el cual la fuerza de reacción del piso es menor que el peso corporal (círculos rojos). En a (ii) y b (ii) está representado el desplazamiento vertical del CM por S_v (cuadrados negros) y sus fracciones: el desplazamiento durante el contacto efectivo (S_{ce} , círculos azules) y el desplazamiento durante la fase aérea efectiva (S_{ae} , círculos rojos)

7.2.2) Rigidez, frecuencia de paso y frecuencia del sistema

En la figura 7.3 están representados los valores de rigidez normalizada por la masa ($K/m = a_{v,mx}/S_{ce}$) en función de la velocidad de carrera (a (i) y b (i)). Para ambos grupos los valores de K/m son similares ($p > 0,05$) y aumentan con la velocidad de carrera. Este aumento de rigidez, se ve reflejado en un aumento del valor de la frecuencia de resonancia del sistema (f_{sist}). Esto está de acuerdo con el modelo ya que a medida que aumenta la velocidad también disminuye t_{ce} que representa la mitad del período de oscilación del sistema elástico (Blickhan 1989).

Según los estudios de Cavagna (1988) los humanos mantienen la frecuencia de paso constante hasta 11 Km/h, consiguiéndose el aumento de velocidad aumentando el largo de paso; partir de 11 Km/h, el largo de paso se mantiene constante y comienza a aumentar la frecuencia de paso. La frecuencia de paso (f_{step}) y la frecuencia del sistema se representan en la figura 7.3 a (ii) y b (ii). Los velocistas tienen aproximadamente el mismo valor de frecuencia de paso hasta los 13 Km/h, luego ésta comienza a aumentar con la velocidad. En el caso de los fondistas, f_{step} aumentó con la velocidad para todo el intervalo de velocidades analizadas. Aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas, f_{step} de los fondistas fue menor que f_{step} de velocistas hasta 11 Km/h. A partir de 12 Km/h es mayor que la de los velocistas.

Al igual que lo observado por Cavagna, (1988), solamente para las velocidades de carrera en que el paso fue simétrico ($t_{ae} = t_{ce}$), las diferencias entre f_{sist} y f_{step} no fueron significativas ($P > 0,05$). Por lo tanto, para el grupo de los velocistas, las diferencias fueron significativas para todas las velocidades mientras que para el grupo de los fondistas, esto sucedió a partir de los 8 Km/h.

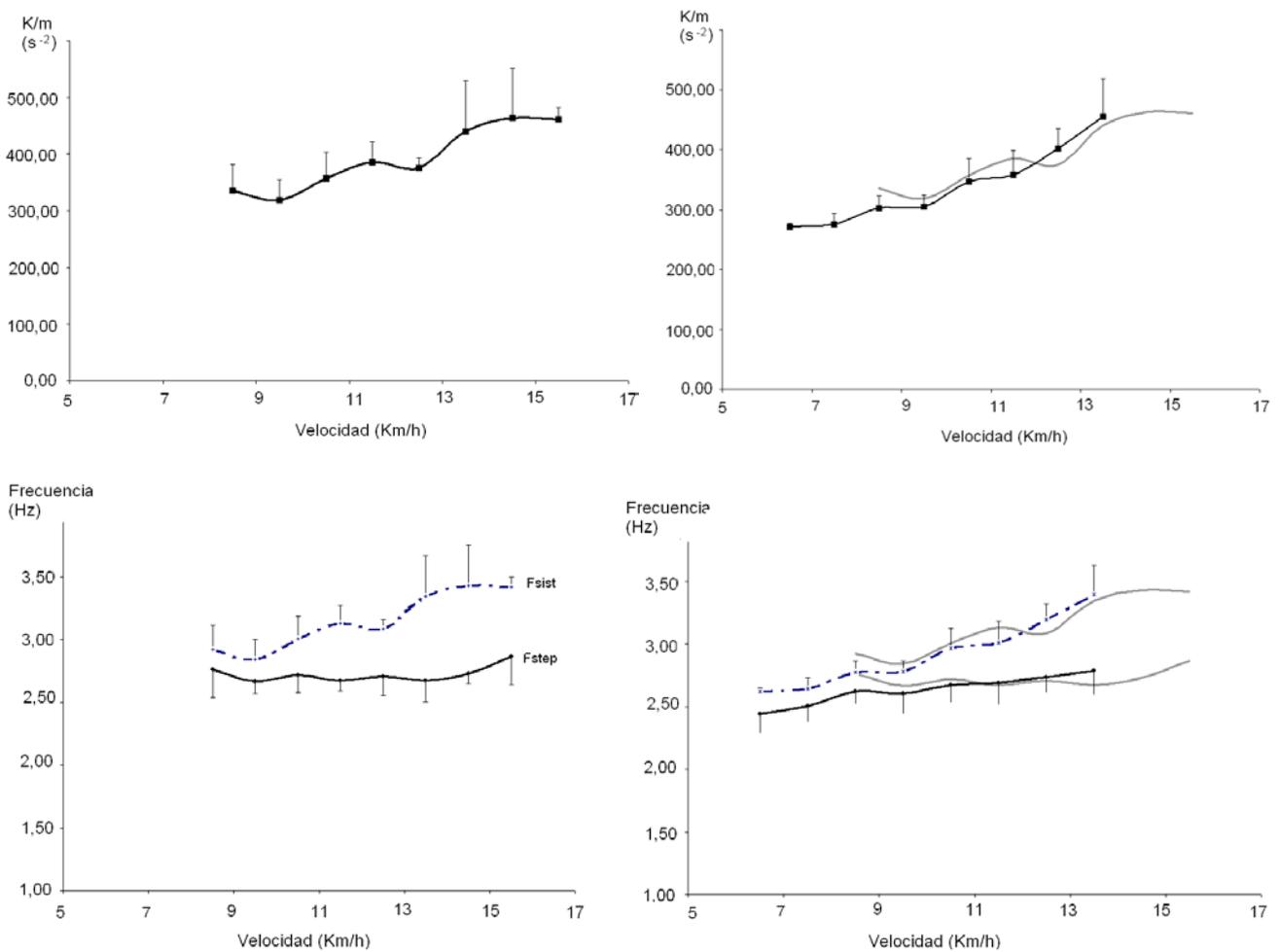


Figura 7.3: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. Las figuras a (i) y b (i) muestran la rigidez vertical normalizada por la masa ($K/m = a_{v,mx}/S_{ce}$) que tiene un comportamiento similar para ambos grupos. Las figuras a (ii) y b (ii) muestran la frecuencia del sistema (f_{sist} ; líneas punteadas) y la frecuencia de paso (f_{step} , líneas llenas). Las diferencias entre f_{sist} y f_{step} son significativas para todas las velocidades analizadas para el grupo de los velocistas ($P < 0,05$) mientras que para los fondistas las diferencias son significativas para velocidades mayores de 8 Km/h.

7.3) Trabajo y potencia

7.3.1) Trabajo mecánico

El trabajo mecánico externo normalizado por la masa y por unidad de distancia realizado para mantener el movimiento del CM en el plano sagital (W_{ext}), así como el trabajo interno necesario para mover los segmentos corporales en relación al CM (W_{int}) y el trabajo total ($W_{tot} = W_{ext} + W_{int}$), están representado en la figura 4 a (i) y b(i).

El W_{ext} parece disminuir con la velocidad para los fondistas entre los 8 y los 12 Km/h, mientras que permanece aproximadamente constante para los velocistas pero no se encontraron diferencias significativas entre ambos grupos.

También se observaron valores similares de W_{int} para ambos grupos, no encontrándose diferencias significativas y observándose un aumento con la velocidad.

Los velocistas tuvieron valores de W_{int} un poco mayores que los fondistas para velocidades menores de 11 Km/h. Esta relación fue revertida para velocidades mayores. Si bien estas diferencias tampoco fueron significativas, reflejarían el mayor W_{int} necesario para lograr la mayor f_{step} observada en cada grupo en estas velocidades.

7.3.2) Potencia de paso y potencia de empuje

Para aumentar la velocidad de carrera, existen dos posibles estrategias: aumentar el largo de paso o aumentar la frecuencia de paso. La primer estrategia produce un aumento del W_{ext} ya que el CM tiene un mayor desplazamiento en cada paso, mientras que la segunda estrategia produciría principalmente un aumento del W_{int} debido a las mayores aceleraciones de los segmentos corporales en relación al CM para producir una mayor frecuencia de paso. La elección de la estrategia a utilizar dependerá de las características metabólicas y musculares de cada persona ya que para aumentar el largo de paso es importante la capacidad de generación de potencia muscular en los miembros inferiores, mientras que, aumentar la frecuencia de paso, produciría un aumento del metabolismo aeróbico. Para analizar estas limitantes para la elección de la frecuencia de paso en las distintas velocidades, Cavagna (1991), propone el cálculo separado de la potencia media durante la fase de trabajo positivo (\dot{W}_{push}) y la potencia media durante todo el paso (\dot{W}_{step}).

La figura 7.5 a (i) y b (i) representa los valores de \dot{W}_{push} externa en función de la velocidad para ambos grupos analizados. Los valores de \dot{W}_{push} interna no pudieron obtenerse porque el valor del W_{int} fue estimado para todo el paso por lo que no se obtuvieron los datos del W_{int} positivo en función del tiempo.

Las diferencias entre los valores de \dot{W}_{push} para ambos grupos sólo fueron significativas para 8 Km/h.

En la figura 7.5 a (ii) y b (ii) se representan los valores de \dot{W}_{step} en función de la velocidad. No se observaron diferencias significativas entre los grupos en $\dot{W}_{step,ext}$, $\dot{W}_{step,int}$ o $\dot{W}_{step,tot}$.

Mientras que la $\dot{W}_{step,int}$ mostró un comportamiento similar para los dos grupos, aumentando casi linealmente con la velocidad, se observó un comportamiento distinto con los valores de $\dot{W}_{step,ext}$. Para el grupo de los fondistas, su valor aumenta hasta 8 Km/h y luego disminuye, observándose el valor más bajo en el intervalo de velocidad de 12 a 13 Km/h. Para el grupo de los velocistas, sin embargo, $\dot{W}_{step,ext}$ tiende a disminuir hasta los 13 Km/h que es cuando se observó su valor más bajo.

Entre 10 y 12 Km/h tanto \dot{W}_{push} como $\dot{W}_{step,tot}$ fue mayor para el grupo de los velocistas.

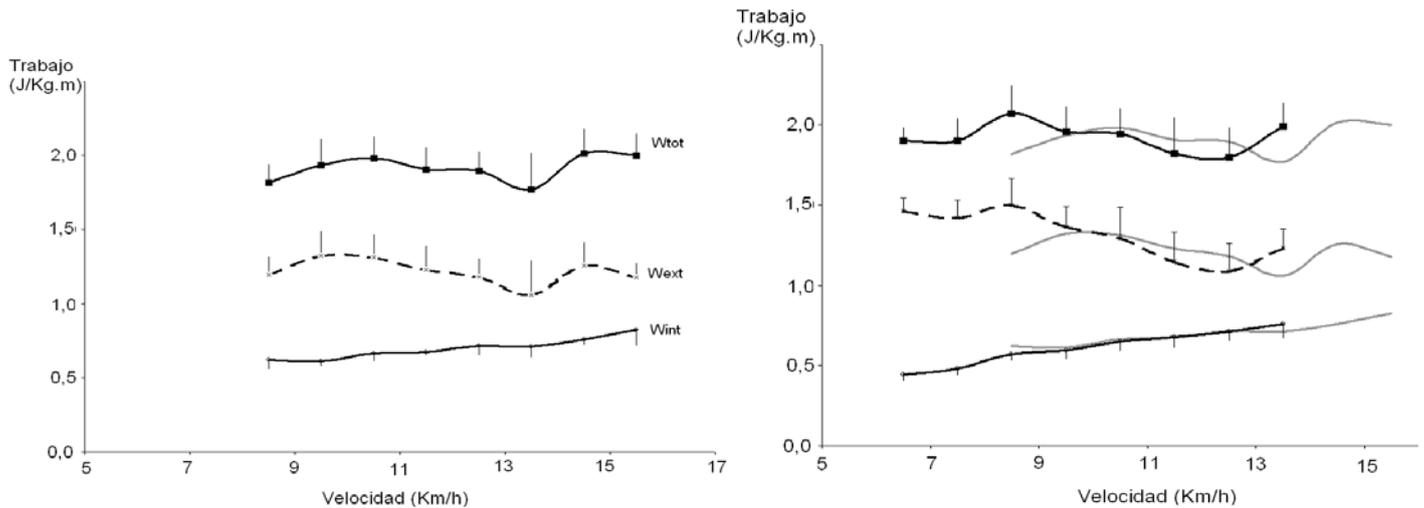


Figura 7.4: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En esta figura se representa el trabajo mecánico total normalizado por la masa y por unidad de distancia ($W_{tot} = W_{ext} + W_{int}$, cuadrados negros), el trabajo externo realizado para mantener el movimiento del CM en el plano sagital (W_{ext} , línea punteada), así como el trabajo interno necesario para mover los segmentos corporales en relación al CM (W_{int} , círculos blancos). W_{ext} tiende a mantenerse aproximadamente constante para los velocistas mientras que tiende a disminuir con la velocidad (entre 8 y 12 Km/h) para los fondistas. El W_{int} aumenta con la velocidad para ambos grupos. No se observaron diferencias significativas entre los grupos para los valores de W_{int} , W_{ext} o W_{tot} en ninguna de las velocidades analizadas ($P > 0,05$).

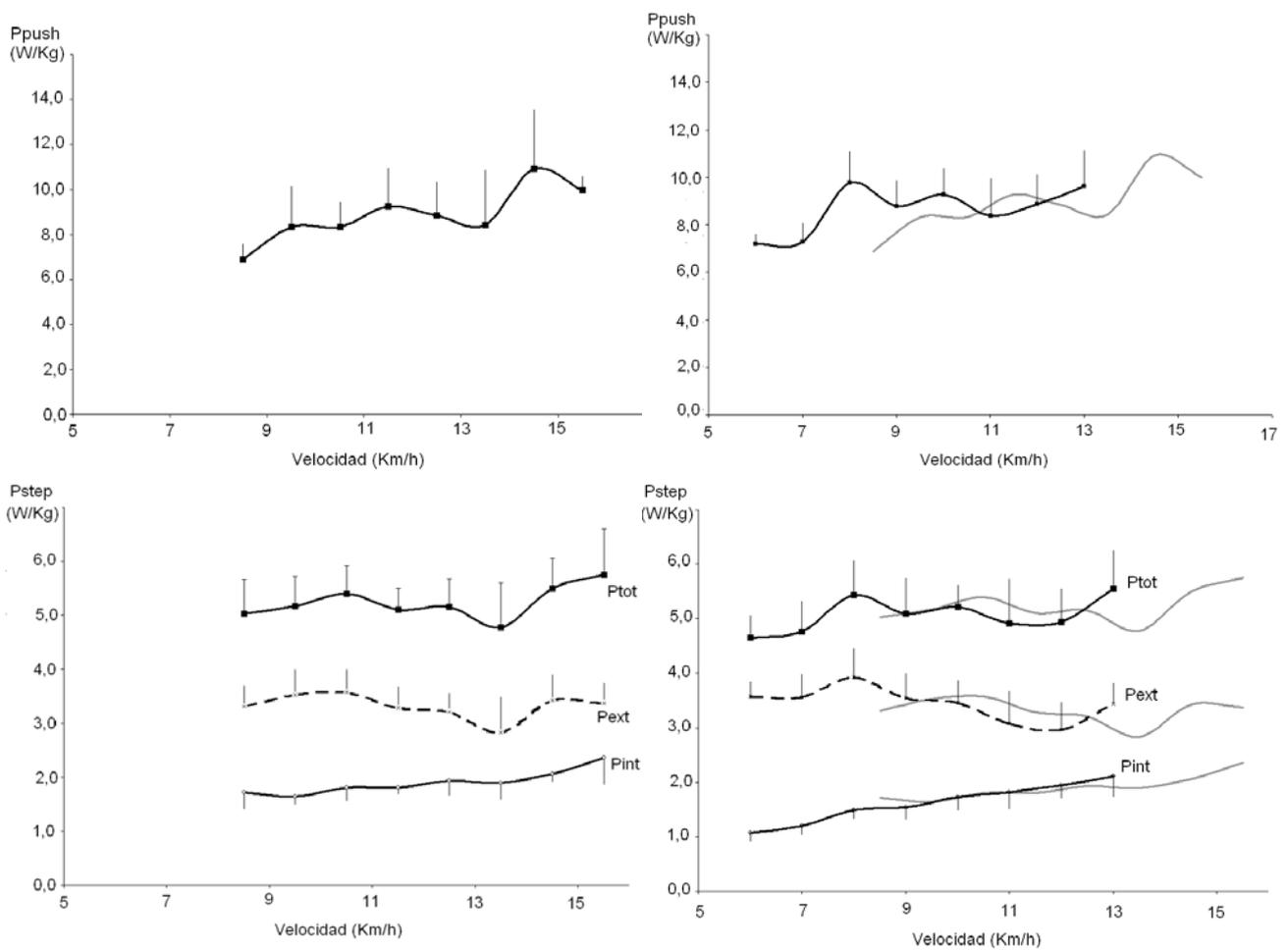


Figura 7.5: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En las figuras a (i) y b (i) se representa la potencia de empuje ($\dot{W}_{push} = W_{ext}/t_{W+}$). En las figuras a (ii) y b (ii) se representan la potencia de paso total ($\dot{W}_{step,tot} = W_{tot}/TP$; cuadrados negros), la potencia de paso externa ($\dot{W}_{step,ext} = W_{ext}/TP$; línea punteada) y la potencia de paso interna ($\dot{W}_{int} = W_{int}/TP$; círculos blancos). Las diferencias entre los grupos sólo son estadísticamente significativas en el intervalo de 8 a 9 Km/h.

7.4) Asimetrías contacto-despegue

El modelo masa-resorte usado para analizar la carrera humana, supone un comportamiento simétrico en los parámetros durante el aterrizaje y el despegue. Si el cuerpo humano, durante la carrera se comportara como un sistema masa-resorte ideal, el CM tendría una amplitud de desplazamiento durante el contacto igual hacia arriba ($S_{ce,up}$) y hacia abajo ($S_{ce,down}$); el valor del trabajo positivo ($W+$) sería igual al valor del trabajo negativo ($W-$) y los tiempos de trabajo positivo (t_{W+}) y negativo (t_{W-}) también serían iguales. Sin embargo, como para mantener la carrera, se requiere el aporte de energía por parte de los músculos para compensar las pérdidas de energía en cada paso, existen asimetrías entre los parámetros cuando se comparan los valores durante el contacto y el despegue. Una posible causa de estas asimetrías es el comportamiento distinto que tiene la unidad músculo tendón en estas dos fases de la carrera.

En la figura 7.7 a (i) y b (i) están representados $S_{ce,up}/S_{v,up}$ (verde oscuro) y $S_{ce,down}/S_{v,down}$ (verde claro) en función de la velocidad de carrera. Ambos desplazamientos tienen valores similares para ambos grupos y también tienen un comportamiento similar al aumentar la velocidad de carrera: hasta 12 Km/h no existen diferencias significativas entre las variables. A partir de esta velocidad, las diferencias comienzan a ser significativas debido principalmente a una disminución de $S_{ce,down}$ en el grupo de los velocistas.

Al aumentar la velocidad de carrera, el paso se hace asimétrico, aumenta S_{ae} y disminuye S_{ce} . Esta disminución es más marcada para la fase descendente que para la fase ascendente, es decir que cuando el pie se despega del piso, el CM está más elevado que en el momento del contacto del pie durante el aterrizaje.

Los resultados observados están de acuerdo con resultados reportados en estudios anteriores para estas mismas velocidades (Cavagna 2006; Cavagna, Legramandi et al. 2008).

7.4.1) Velocidad y aceleración.

Las diferencias entre las velocidades máximas verticales ($V_{v,mx,up}$ y $V_{v,mx,down}$) entre ambos grupos sólo fueron significativas para el intervalo de velocidad de 8 a 9 Km/h, (Figura 7.6; a (i) y b (i)) mientras que no se observaron diferencias significativas en los valores de aceleración vertical máxima para ninguno de los intervalos de velocidades analizados (Figura 7.6; a (ii) y b (ii)).

Solamente para el intervalo de 8 a 9 Km/h, los valores de $V_{v,mx,up}$ y $V_{v,mx,down}$ observados en el grupo de los velocistas fueron iguales entre sí y significativamente menores que los valores observados para los fondistas. Sin embargo, los valores de aceleración vertical máxima no fueron significativamente distintos para este intervalo de velocidad.

7.4.2) *Tiempos de trabajo positivo y negativo*

En la figura 7.7 a (ii) y b (ii) están representadas las duraciones del trabajo positivo (t_{w+}) y del trabajo negativo (t_{w-}) en función de la velocidad. En las figuras 7.8 y 7.9 pueden observarse los valores de las energías mecánicas en función del tiempo para las velocidades más lentas y para las más rápidas analizadas para un participante del grupo de los fondistas y un participante del grupo de los velocistas. En estas figuras se muestran también t_{w+} y t_{w-} superpuestos con la gráfica de energía total del CM.

Ambos grupos muestran valores similares en ambas variables siendo siempre mayor el t_{w+} respecto al t_{w-} . Los velocistas mostraron diferencias significativas entre t_{w+} y t_{w-} para todas las velocidades analizadas, mientras que para los fondistas, no se observaron diferencias significativas entre los tiempos para el intervalo de velocidad de entre 13 y 14 Km/h. Según los resultados obtenidos en estudios anteriores, las simetrías entre los tiempos de t_{w+} t_{w-} comienzan a partir de 14 Km/h aproximadamente. Las simetrías encontradas para las velocidades más altas indicarían un menor aporte de trabajo muscular con mayor participación del tendón y mayor almacenamiento y reutilización de la energía elástica en cada paso, mientras que las asimetrías encontradas en velocidades más bajas estarían reflejando la diferencia entre la fuerza muscular realizada durante la fase de aterrizaje (contracción excéntrica) y la realizada durante la fase de despegue (contracción concéntrica) (Cavagna 2006; Cavagna, Legramandi et al. 2008).

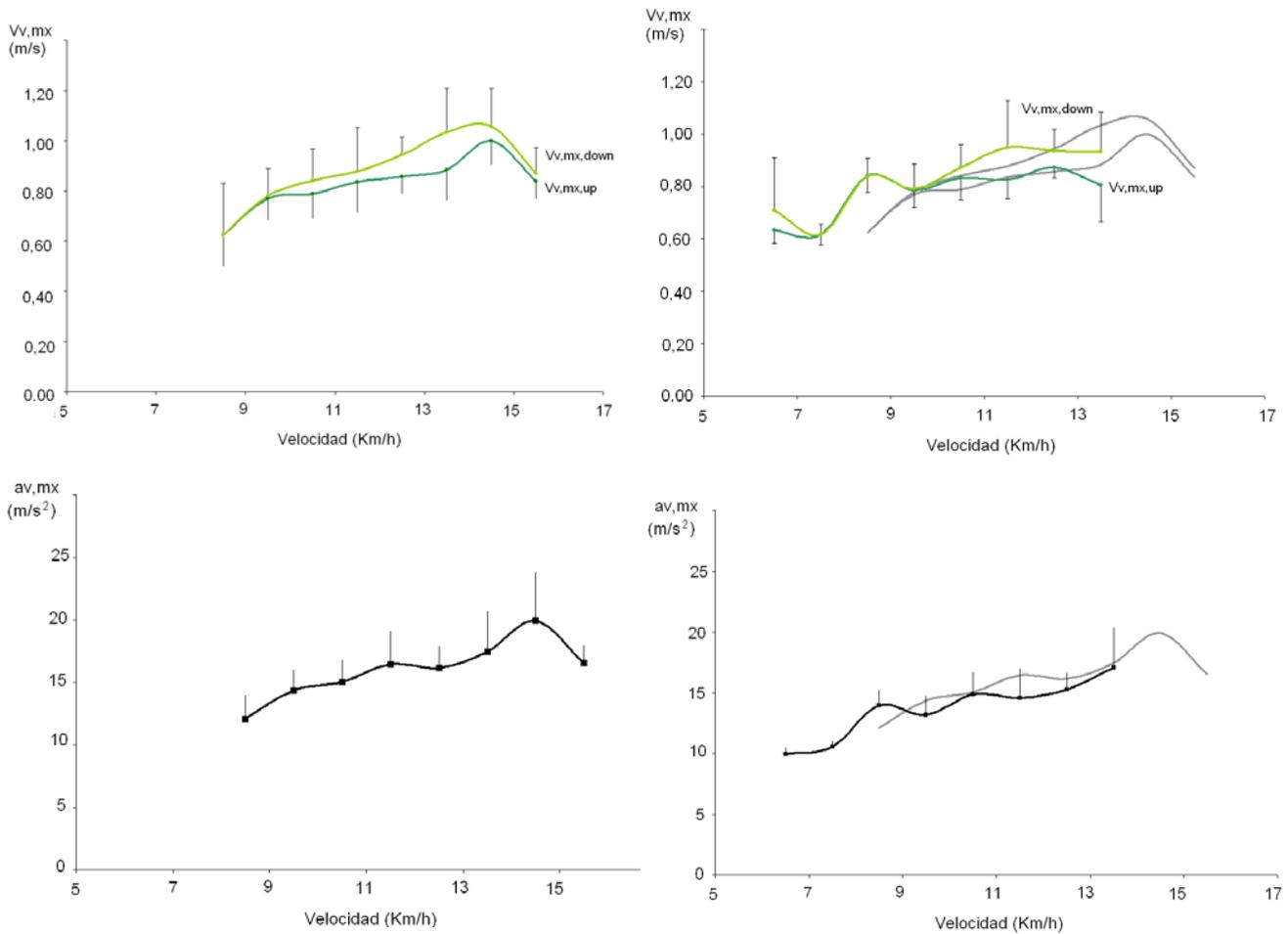


Figura 7.6: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En a (i) y b (i) están representadas las velocidades verticales máximas del CM, ascendentes ($V_{v,mx,up}$; verde oscuro) y descendente ($V_{v,mx,down}$; verde claro). Las diferencias entre ambos grupos sólo son significativas ($P < 0,01$) para 8 Km/h, tanto para la velocidad ascendente, como para la velocidad descendente. En las figuras a (ii) y b (ii) está representada la aceleración ascendente máxima ($a_{v,mx}$). Las diferencias entre los grupos no son significativas en todo el intervalo de velocidades analizadas ($P > 0,05$).

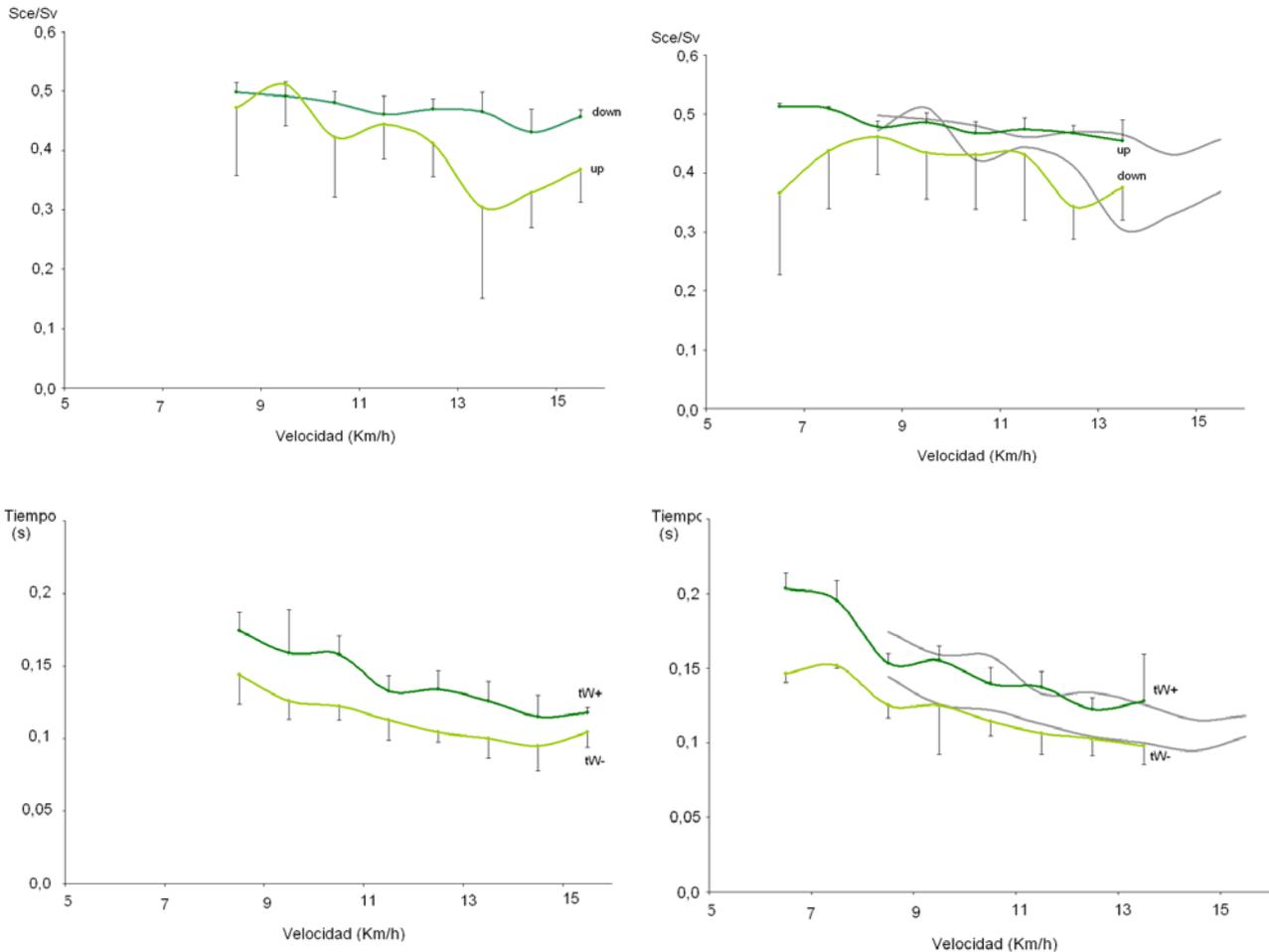
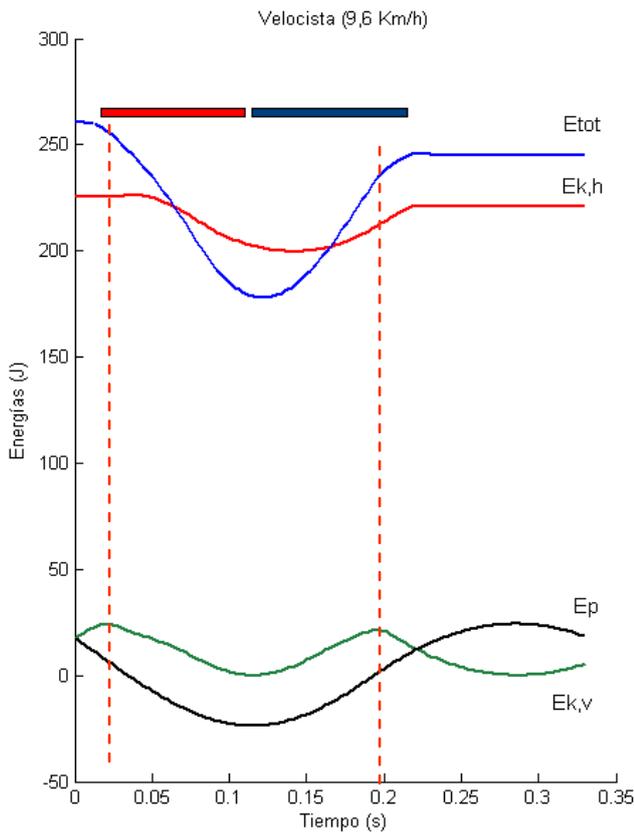


Figura 7.7: (a) Carrera de velocistas. (b) Carrera de fondistas, con líneas grises superpuestas de la carrera de los velocistas, para comparación. En las figuras a (i) y b (i) se representa el desplazamiento vertical ascendente del CM durante la fase de contacto efectivo ($S_{ce,up}/S_{v,up}$; círculos verde oscuro) y el desplazamiento vertical descendente del CM durante la fase de contacto efectivo ($S_{ce,down}/S_{v,down}$; círculos verde claro) normalizados por el desplazamiento vertical en cada fase. Las diferencias entre los valores de estos dos desplazamientos aumentan al aumentar la velocidad para ambos grupos, observándose diferencias significativas a partir de 12 Km/h. Las figuras a (ii) y b (ii) muestran las duraciones de los tiempos de trabajo positivo (t_{w+} ; círculos verde oscuro) y de trabajo negativo (t_{w-} ; círculos verde claro). En este caso, para ambos grupos se observa una tendencia a la disminución de las diferencias entre estos valores al aumentar la velocidad. Las diferencias entre t_{w+} y t_{w-} son siempre significativas ($P < 0,05$) para todas las velocidades excepto para los fondistas en el intervalo de 13 a 14 Km/h.

Velocistas (a)



Fondistas (b)

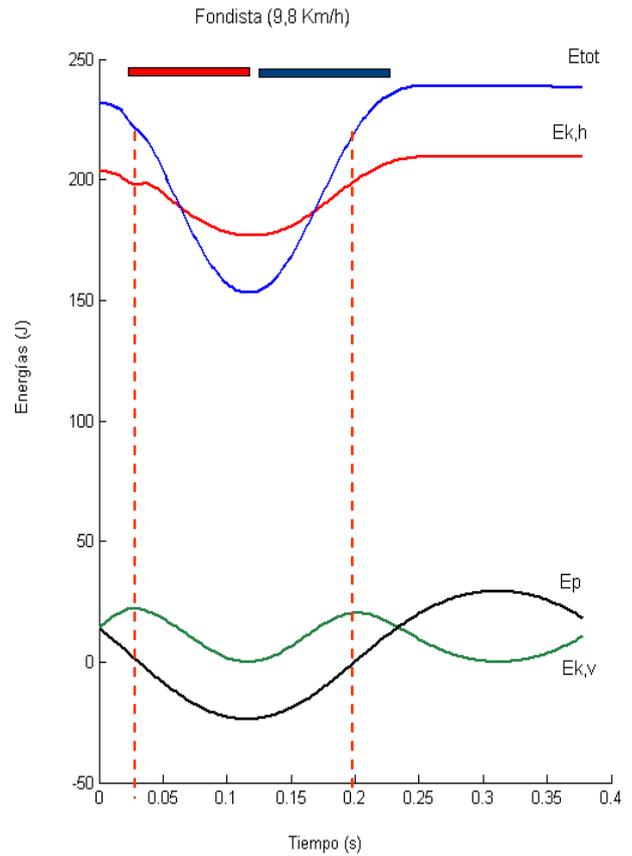


Figura 7.8: Curvas de Energía potencial (E_p); energía cinética vertical ($E_{k,v}$), energía cinética horizontal ($E_{k,h}$) y Energía total (E_{tot}) durante una carrera a velocidad de 9,6 Km/h para un participante del grupo de los velocistas (a, sexo masculino, 1,67 m de altura; 18 años; 60,3 Kg) y durante una carrera a velocidad de 9,8 Km/h para un participante del grupo de los fondistas (b, sexo masculino, 1,62 m de altura, 25 años; 52,0 Kg). Las líneas punteadas verticales indican los tiempos en que $F_v=PC$ (puntos de equilibrio del sistema). Nótese que estos puntos coinciden con los valores máximos de $E_{k,v}$ y con un valor de cero de E_p . La E_{tot} se mantiene constante durante la fase aérea debido a que E_p y $E_{k,v}$ están desfasadas por lo que existe un intercambio de una en otra. Todas las energías disminuyen durante el contacto y es cuando se almacenan en las estructuras elásticas. En la curva de E_{tot} están señalados los tiempos de trabajo negativo (líneas horizontales rojas) y los tiempos de trabajo positivo (líneas horizontales azules). Nótese que para estas velocidades el paso es simétrico ya que el tiempo de contacto efectivo (delimitado por las líneas punteadas verticales) es similar al tiempo aéreo efectivo. El tiempo de trabajo positivo siempre es mayor que el tiempo de trabajo negativo.

Velocistas (a)

Fondistas (b)

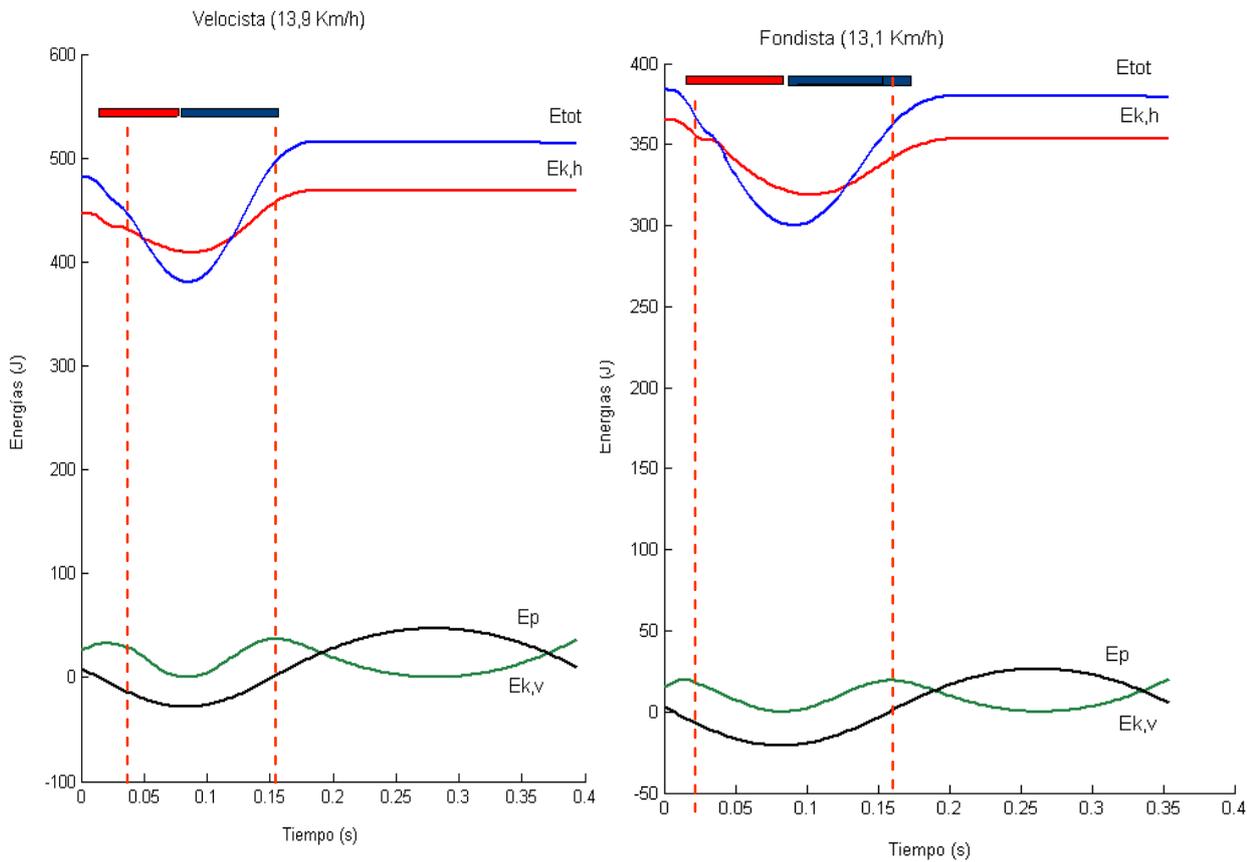


Figura 7.9: Curvas de Energía potencial (E_p); energía cinética vertical ($E_{k,v}$), energía cinética horizontal ($E_{k,h}$) y Energía total (E_{tot}) durante una carrera a velocidad de 13,9 Km/h para un participante del grupo de los velocistas (a, sexo masculino, 1,67 m de altura; 18 años; 60,3 Kg) y durante una carrera a velocidad de 13,1 Km/h para un participante del grupo de los fondistas (b, sexo masculino, 1,62 m de altura, 25 años; 52,0 Kg). Las líneas verticales indican los tiempos en que $F_v=P$ (puntos de equilibrio del sistema). Nótese que estos puntos coinciden con los valores máximos de $E_{k,v}$ y con un valor de cero de E_p . La E_{tot} se mantiene constante durante la fase aérea debido a que E_p y $E_{k,v}$ están desfasadas por lo que existe un intercambio de una en otra. Todas las energías disminuyen durante el contacto y es cuando se almacenan en las estructuras elásticas. En la curva de E_{tot} están señalados los tiempos de trabajo negativo (líneas horizontales rojas) y los tiempos de trabajo positivo (líneas horizontales azules). Nótese que para estas velocidades el paso es asimétrico ya que el tiempo de contacto efectivo (delimitado por las líneas punteadas verticales) es menor que el tiempo aéreo efectivo. El tiempo de trabajo positivo siempre es mayor que el tiempo de trabajo negativo.

8. Discusión

8.1) Parámetros del modelo

8.1.1) Período de paso y oscilación vertical del CM

En un sistema masa resorte lineal, el desplazamiento del CM es directamente proporcional a la fuerza que se aplica al resorte. Durante la carrera, la fuerza que produce el desplazamiento del CM es la fuerza de reacción del piso. En cada paso de carrera, el CM se desplaza hacia arriba y hacia abajo de un punto de equilibrio en el cual la fuerza vertical (F_v) ejercida contra el piso es igual al valor del peso corporal. Se llama fase de contacto efectivo a la fase durante la cual la F_v es mayor que el peso corporal y fase aérea efectiva cuando F_v es menor que el peso corporal. El modelo solamente puede aplicarse al estudio de la carrera durante la fase de contacto efectivo ya que durante la fase aérea, la F_v es constante (igual al peso corporal) y no depende de la deformación del sistema. A pesar de esto, en la carrera a bajas velocidades, el desplazamiento vertical del CM (S_v) es igual para ambas fases ($S_{ae} = S_{ce}$), así como también el tiempo de contacto efectivo es igual al tiempo aéreo efectivo ($t_{ce} = t_{ae}$). Esto se debe a que el impulso generado durante la fase de contacto efectiva debe ser igual al impulso durante la fase aérea efectiva: $\overline{a_{v,ce}}t_{ce} = \overline{a_{v,ae}}t_{ae}$. Durante la fase aérea, la aceleración vertical no puede exceder la aceleración de la gravedad ($1g$), por lo tanto, durante la fase de contacto efectiva en la carrera a bajas velocidades, la aceleración vertical promedio tampoco supera $1g$ (Cavagna, Franzetti et al. 1988).

En este estudio, se observó una asimetría del paso ($S_{ce} < S_{ae}$ y $t_{ce} < t_{ae}$) a partir de 8 Km/h. Estos resultados están de acuerdo con resultados de estudios anteriores que indican que para personas jóvenes, la asimetría del paso comienza a observarse para velocidades de entre 8 y 10 Km/h (Cavagna, Legramandi et al. 2008). En el grupo de los velocistas, aunque las diferencias entre t_{ce} y t_{ae} son estadísticamente significativas desde los 8 Km/h, las diferencias entre S_{ce} y S_{ae} son estadísticamente significativas desde los 10 Km/h. Esta discrepancia fue encontrada también en estudios anteriores y puede ser debida a que los valores de S_{ce} y S_{ae} se calculan como el promedio del desplazamiento hacia arriba y hacia abajo durante cada fase ($S_{ce} = (S_{ce,up} + S_{ce,down})/2$) cuando en realidad estos no siempre son iguales (Schepens, Willems et al. 1998).

El mayor tiempo de contacto efectivo encontrado para las velocidades más altas estudiadas en el grupo de los velocistas, implica un mayor tiempo para realizar fuerza contra el piso. Esto permitiría un acortamiento más lento del músculo y por lo tanto, por la relación fuerza-velocidad del músculo, un menor volumen muscular activado

para generar un valor dado de fuerza (Roberts, Marsh et al. 1997). Lee y Piazza (2009) resaltan la importancia de disminuir la velocidad de acortamiento para generar mayores niveles de fuerza muscular durante la carrera a altas velocidades. Si bien los velocistas necesitan generar grandes valores de potencia durante los primeros pasos de la carrera, en general, los corredores más rápidos tienen un momento flexor plantar menor. Por lo tanto, parece que sacrifican la ventaja mecánica de velocidad, en función del arreglo que reduce la velocidad de acortamiento del sarcómero durante las flexiones plantares rápidas (Lee y Piazza 2009). Reforzando esta idea, varios estudios sugieren la importancia de la distensibilidad del tendón en la generación de fuerza por parte del músculo. Un tendón más distensible permitiría al músculo acortarse más lentamente (para una velocidad dada de acortamiento de la UMT) y así poder producir mayores niveles de fuerza (Arampatzis, Karamanidis et al. 2006). Este mayor tiempo de contacto efectivo en la carrera de los velocistas puede ser reflejo de algunas de estas características observadas en los corredores de velocidad: menor brazo de momento de los músculos flexores plantares, tendones menos rígidos o diferencias en la técnica de carrera adquirida con el entrenamiento para maximizar la generación de fuerza contra el piso.

Solamente para el intervalo de velocidades de entre 8 y 9 Km/h, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos para el desplazamiento vertical (S_v). Éste fue menor para los velocistas que para los fondistas. Las diferencias en los valores de S_{ae} y S_{ce} también fueron estadísticamente significativas entre los grupos para esta velocidad. El menor valor encontrado en el desplazamiento vertical del CM para el grupo de los velocistas podría deberse a que estos realizaron un movimiento más similar al de la marcha para estas velocidades.

Para los velocistas, el paso fue asimétrico para todas las velocidades analizadas. Es importante notar que para este grupo no fue posible correr a velocidades menores que 8 Km/h y que incluso para las velocidades más bajas en que lograron correr, t_{ae} fue mayor que t_{ce} .

8.1.2) Rigidez, frecuencia de paso y del sistema

A partir de la medición del desplazamiento vertical del CM y de la fuerza de reacción del piso necesaria para producirlo, puede calcularse la rigidez masa específica (K/m) y estimar la contribución de la energía elástica para aumentar la energía total del CM, que es almacenada en músculos y tendones en cada paso de carrera (Cavagna, Saibene et al. 1964; Heglund y Cavagna 1985; Cavagna, Franzetti et al. 1988). El modelo propuesto por Blickhan (Blickhan 1989) ha sido muy usado para el análisis de la carrera en distintas situaciones, determinando los cambios en la rigidez del sistema que se producen al variar la frecuencia de paso, al correr en superficies más o menos rígidas y el efecto de la rigidez en el consumo metabólico (McMahon, Valiant et al. 1987; McMahon y Cheng 1990; Ferris y Farley 1997; Ferris, Liang et al. 1999; Kerdok, Biewener et al. 2002).

K/m determina la frecuencia de resonancia del sistema. La estrategia de adoptar la f_{step} más cercana a f_{sist} es la elegida para velocidades menores a 11 Km/h ya que como el período de oscilación es independiente de la amplitud del movimiento, si la fuerza es aplicada al sistema a una frecuencia igual a la frecuencia de resonancia, se obtienen mayores desplazamientos del CM para un valor de fuerza dado y por lo tanto, una mayor eficiencia en la utilización de energía elástica almacenada (Cavagna, Franzetti et al. 1988; Cavagna, Mantovani et al. 1997).

La frecuencia de paso que una persona elige para correr a determinada velocidad, es siempre la que minimiza el consumo metabólico. Si la frecuencia de paso es forzada a valores menores que la frecuencia de paso elegida para correr a una velocidad dada, será necesario producir más fuerza contra el piso para aumentar el largo de paso y por lo tanto, el valor de W_{ext} en cada paso será mayor ya que los desplazamientos del CM serán mayores. Si, por el contrario, la frecuencia de paso es forzada a valores mayores que la frecuencia elegida, aumentará el valor de W_{int} producido en cada paso ya que se deberán producir mayores aceleraciones de los segmentos corporales en relación al CM (Cavagna, Willems et al. 1991). El mayor valor de eficiencia y el menor valor de consumo metabólico para una velocidad dada, se encuentra siempre cuando la frecuencia de paso es la elegida naturalmente (Cavagna, Franzetti et al. 1988; Cavagna, Mantovani et al. 1997).

Para una velocidad dada, los factores que determinan la frecuencia de paso son:
a) la frecuencia de resonancia del sistema (para velocidades menores a 11 Km/h, el valor de f_{step} es cercano al valor de f_{sist});

b) minimizar la \dot{W}_{step} (esta estrategia es utilizada a velocidades intermedias, entre 11 y 20 Km/h, para minimizar el consumo aeróbico) y

c) minimizar la \dot{W}_{push} (para velocidades altas de carrera, la potencia que debe hacerse para aumentar el largo de paso es la limitante de la frecuencia de paso).

Para velocidades bajas de carrera, el paso es simétrico y la frecuencia de paso es igual a la frecuencia de resonancia del sistema ($f_{step} = f_{sist}$). Al aumentar la velocidad de carrera y el paso hacerse asimétrico, t_{ce} se hace relativamente menor que t_{ae} . Esto es debido a que la aceleración vertical promedio durante la fase de contacto efectiva supera el valor de la gravedad y, por lo tanto, es necesario aumentar el tiempo aéreo efectivo para mantener la igualdad de los impulsos verticales. La disminución en S_{ce} y el aumento de la fuerza vertical, producen un aumento en el valor de K/m. Como consecuencia, aumenta la f_{sist} . f_{step} también aumenta, pero relativamente menos que (Cavagna, Franzetti et al. 1988; Cavagna, Mantovani et al. 1997).

En este estudio, f_{sist} fue siempre mayor que f_{step} para ambos grupos para todas las velocidades analizadas. Sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativas para los fondistas para el intervalo de velocidades de entre 6 y 8 Km/h. Para estas velocidades, el paso fue simétrico. A partir de 10 Km/h, las diferencias entre f_{sist} y f_{step} comienzan a ser cada vez mayores para ambos grupos, indicando que para velocidades mayores a 10 Km/h, la estrategia utilizada para disminuir el costo energético de la carrera ya no es correr a la frecuencia de resonancia del sistema.

Los valores de K/m encontrados en este estudio están de acuerdo con los obtenidos en estudios anteriores (Cavagna, Franzetti et al. 1988; Kerdok, Biewener et al. 2002; Ferris, Bohra et al. 2006; Cavagna, Legramandi et al. 2008). Las diferencias entre los grupos en los valores de esta variable, así como en los valores de f_{sist} y f_{step} , sólo fue estadísticamente significativa para las velocidades entre 8 y 9 Km/h. Para este intervalo de velocidad, todas estas variables tuvieron un mayor valor para el grupo de los velocistas. Es decir que corrieron una mayor frecuencia de paso y por lo tanto con pasos más cortos. Esta forma de carrera sería menos eficiente ya que se necesitan más aceleraciones de los segmentos corporales debido a la mayor frecuencia de paso (Cavagna, Willems et al. 1991). El mayor valor de K/m observado para el grupo de los velocistas para el rango de velocidad de 8 a 9 Km/h puede deberse al mecanismo más rígido de movimiento, similar a la marcha. La adopción de este mecanismo para correr a velocidades bajas, puede deberse a que les es más económico para los velocistas, caminar a esta velocidad (Beaupied, Multon et al. 2003).

K/m solamente es una medida de las propiedades elásticas de la UMT, para velocidades altas de carreras (cuando el músculo trabaja de forma isométrica y la deformación de la UMT se debe sólo a los elementos elásticos). Para velocidades más bajas de carrera, el estiramiento de la UMT durante el aumento de la FRS y el posterior acortamiento durante la disminución de la FRS se debe en parte al

estiramiento de los elementos elásticos pero también al trabajo positivo y negativo realizado por los elementos contráctiles (Cavagna 2006). Por lo tanto, los valores de K/m obtenidos en este estudio son reflejo tanto de las características elásticas como de las características de los elementos contráctiles de los músculos de los participantes. Sería necesario estudiar velocidades más altas de carrera para saber si realmente las diferencias en las propiedades elásticas de los distintos tipos de fibras y las diferencias en las propiedades del tendón debidas a los distintos entrenamientos, pueden ser observadas en los parámetros del modelo masa-resorte.

8.2) Trabajo y potencia

El trabajo mecánico externo, interno y total normalizados por la masa y la distancia, están representados en la figura 7.4. Al aumentar la velocidad de carrera, el trabajo externo (W_{ext}) disminuye mientras que el trabajo interno (W_{int}) aumenta, haciendo que se mantenga prácticamente constante el valor del trabajo total (W_{tot}). Esto es debido a que el aumento de la frecuencia de paso para aumentar la velocidad de carrera, produce un menor desplazamiento del CM en cada paso y mayores aceleraciones de los miembros en relación al CM (Cavagna, Willems et al. 1991).

Debido a la mayor cantidad de fibras rápidas que tienen los velocistas y su capacidad de generar mayores valores de potencia durante el t_{ce} para generar mayores desplazamientos del CM en cada paso, podría esperarse que la estrategia elegida para aumentar la velocidad de carrera fuera aumentar el largo de paso y no aumentar la frecuencia de paso. Hansen (2002) observó que, para una misma velocidad, personas con mayor porcentaje de fibras lentas en el músculo vasto lateral, eligen mayores frecuencias de pedaleo que personas con menor porcentaje de este tipo de fibra (Hansen, Andersen et al. 2002). Esta estrategia produciría un aumento en los valores de W_{ext} (o una menor disminución) y una disminución de W_{int} (o un menor aumento) a medida que aumenta la velocidad de carrera (Cavagna, Willems et al. 1991).

Si bien las diferencias no fueron significativas, pueden observarse mayores valores de W_{ext} y menores valores de W_{int} para los velocistas que para los fondistas para velocidades mayores a 10 Km/h. Además, la disminución del W_{ext} con la velocidad de carrera, es más marcada para el grupo de los fondistas.

Las potencias analizadas (\dot{W}_{push} y \dot{W}_{step}) están representadas en la figura 7.5. No existieron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos (excepto para \dot{W}_{push} en el rango de velocidad de 8 a 9 Km/h) y los valores de ambas variables se mantuvieron aproximadamente constantes, observándose un aumento en el valor de

las potencias para las velocidades más altas que pudieron obtenerse sólo para el grupo de los velocistas (entre 14 y 16 Km/h).

La mayor \dot{W}_{push} observada para los fondistas para las velocidades de entre 8 y 9 Km/h es debida tanto a un menor t_{W+} como a un mayor valor de W_{ext} . Esto se debe a la menor longitud de paso producida por los velocistas a esta velocidad, para lo cual es necesario producir un menor valor de potencia durante el despegue.

8.3) Asimetrías contacto-despegue

Las asimetrías que existen entre las fases de despegue y aterrizaje son desviaciones del comportamiento del CM durante la carrera respecto del modelo teórico. Las desviaciones principales fueron planteadas por Blickhan (1989): la pierna es más rígida en el momento del aterrizaje que en el momento del despegue; la velocidad no es la misma durante el contacto que durante el despegue ya que el despegue se realiza con la pierna extendida mientras el aterrizaje es con la pierna un poco flexionada.

Respecto al desplazamiento vertical del CM, se observó para ambos grupos y para todas las velocidades, que es mayor el desplazamiento ascendente durante el contacto efectivo ($S_{ce,up}$) que el descendente ($S_{ce,down}$), aunque estas diferencias sólo fueron estadísticamente significativas para velocidades mayores a 12 Km/h en el grupo de los velocistas y para velocidades de entre 9 y 13 km/h para los fondistas. Esto significa que, en el momento que se está despegando el pie del piso y se llega al punto de equilibrio en el cual la F_v es igual al peso corporal, el CM se encuentra en una posición de mayor altura que en el momento en que el pie vuelve a hacer contacto con el piso y llega nuevamente al punto de equilibrio luego de la fase aérea efectiva (ver figura 2.3).

Al aumentar la velocidad, estas diferencias entre $S_{ce,up}$ y $S_{ce,down}$ aumentan. Esto está de acuerdo con resultados de estudios anteriores para las velocidades analizadas (Cavagna 2006; Cavagna, Legramandi et al. 2008; Cavagna y Legramandi 2009) y muestra la desviación del modelo teórico simétrico.

El modelo también supone un movimiento armónico simple del CM, por lo tanto, éste podría dividirse en cuatro fases: ascendente y descendente por encima del punto de equilibrio y ascendente y descendente por de bajo de éste. En los puntos de equilibrio, cuando se considera que el desplazamiento del CM es cero, la velocidad vertical es máxima. El modelo teórico supone igualdad entre la velocidad máxima ascendente ($V_{v,mx,up}$) y la velocidad máxima descendente ($V_{v,mx,down}$), sin embargo, en la carrera humana la velocidad máxima descendente del CM es mayor que la ascendente. Esto es debido a las asimetrías en $S_{ce,up}$ y $S_{ce,down}$.

En este estudio, para ambos grupos, $V_{v,mx,down}$ fue mayor que $V_{v,mx,up}$, para todas las velocidades analizadas, pero las diferencias fueron estadísticamente significativas a partir de los 10 Km/h. Para el grupo de los velocistas las diferencias dejan de ser significativas a partir de 13 Km/h pero no se pueden hacer comparaciones con el grupo de los fondistas ya que no se obtuvieron carreras a estas velocidades.

Las asimetrías en la duración del trabajo positivo y negativo pueden explicarse por la mayor fuerza que es capaz de generar el músculo durante la contracción excéntrica (W-) que durante la contracción concéntrica (W+). Como el impulso generado durante la fase de trabajo positivo debe ser igual al impulso generado durante la fase de trabajo negativo, el tiempo necesario para generarlo será mayor durante la fase de trabajo positivo (Cavagna 2006). Al aumentar la velocidad de carrera, aumenta la velocidad de acortamiento del músculo y por lo tanto disminuye también el nivel de fuerza que éste puede alcanzar en la fase de trabajo positivo. Por lo tanto, debería esperarse que las asimetrías en los tiempos de contacto y despegue aumentaran con la velocidad de carrera. Sin embargo, se ha observado que las asimetrías desaparecen para velocidades mayores de 13 o 14 Km/h (Cavagna 2006; Cavagna, Legramandi et al. 2008; Cavagna y Legramandi 2009). Una posible explicación es que, debido a la gran activación del músculo para estas velocidades de carrera, éste comienza a trabajar de forma casi isométrica, siendo el tendón el responsable de los cambios de longitud de la UMT (Cavagna 2006). De esta manera, la UMT funcionaría de forma similar a un sistema masa-resorte ideal, lo que permitiría una mayor utilización de energía elástica ya que el tendón permite que más del 90% de la energía mecánica almacenada sea reutilizada como energía elástica (Alexander 2002).

En este estudio, las diferencias entre la duración del tiempo de trabajo positivo (t_{w+}) y la duración del tiempo de trabajo negativo (t_{w-}) fueron estadísticamente significativas para todas las velocidades analizadas para el grupo de los velocistas mientras que para el grupo de los fondistas, las diferencias no fueron significativas para las velocidades de entre 13 y 14 Km/h.

Dado que la velocidad óptima de acortamiento de las fibras rápidas es mayor que la de las fibras lentas y que son menos rígidas, podría esperarse que las asimetrías fueran mayores para los velocistas ya que el músculo puede trabajar en un mayor intervalo de velocidades y la menor rigidez de las fibras y el tendón permitiría a las fibras trabajar en longitudes óptimas de sarcómero para un mayor rango de velocidades. Esto haría la carrera menos eficiente pero permitiría generar más fuerza y mayores aceleraciones. A su vez, la mayor rigidez del tendón y de las fibras lentas y la menor velocidad óptima de acortamiento de éstas, permitiría a los fondistas minimizar

las asimetrías contacto-despegue para velocidades más bajas (cercanas a sus velocidades de entrenamiento) y utilizar más energía elástica, permitiendo un menor costo metabólico y una mayor eficiencia para bajas velocidades de carrera.

9. Conclusiones

Modelando la carrera como un sistema masa-resorte, se encontró que el mayor porcentaje de fibras musculares rápidas no produce cambios significativos en la mecánica de la carrera humana en velocidades intermedias (entre 9 y 13 Km/h). A pesar de las diferencias extremas en los entrenamientos de los dos grupos estudiados y de las diferentes características de sus UMT, las estrategias para correr a estas velocidades son similares.

Sin embargo sí se encontraron diferencias para las velocidades más bajas analizadas y existen tendencias que indican que también podrían existir diferencias en la mecánica de la carrera para velocidades más altas.

Las diferencias encontradas indican que los velocistas son menos eficientes que los fondistas, en carreras a baja velocidad y que para altas velocidades, optimizan la generación de fuerza por parte de los músculos y no el ahorro de energía.

10. Bibliografia

- Abbott, B. C. and X. M. Aubert (1952). "The force exerted by active striated muscle during and after change of length." J Physiol **117**(1): 77-86.
- Abe, T. (2002). "Fascicle length of gastrocnemius muscles in monozygous twins." J Physiol Anthropol Appl Human Sci **21**(6): 291-5.
- Abe, T., K. Kumagai, et al. (2000). "Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners." Med Sci Sports Exerc **32**(6): 1125-9.
- Alegre, L. M., F. Jimenez, et al. (2006). "Effects of dynamic resistance training on fascicle length and isometric strength." J Sports Sci **24**(5): 501-8.
- Alexander, R. M. (1984). "Elastic Energy Stores in Running Vertebrates." American Zoologist **24**(1): 85-94.
- Alexander, R. M. (1989). "Optimization and gaits in the locomotion of vertebrates." Physiol. Rev. **69**: 1199-1227.
- Alexander, R. M. (2002). "Tendon elasticity and muscle function." Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol **133**(4): 1001-11.
- Alexander, R. M. and A. Vernon (1975). "The mechanics of hopping by kangaroos (Macropodidae). ." Journal of Zoology **177**: 265–303.
- Arampatzis, A., K. Karamanidis, et al. (2006). "Effect of different ankle- and knee-joint positions on gastrocnemius medialis fascicle length and EMG activity during isometric plantar flexion." J Biomech **39**(10): 1891-902.
- Ariano, M. A., R. B. Armstrong, et al. (1973). "Hindlimb muscle fiber populations of five mammals." J Histochem Cytochem **21**(1): 51-5.
- Ashmore, C. R. and P. J. Summers (1981). "Stretch-induced growth in chicken wing muscles: myofibrillar proliferation." Am J Physiol **241**(3): C93-7.
- Asmussen, E. and F. Bonde-Petersen (1974). "Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise." Acta Physiol Scand **92**(4): 537-45.
- Awan, M. Z., N. Frearson, et al. (1972). "Biochemical efficiency of smooth muscle and different types of striated muscle." J Mechanochem Cell Motil **1**(4): 225-32.
- Baratta, R. V., M. Solomonow, et al. (1998). "Frequency domain-based models of skeletal muscle." J Electromyogr Kinesiol **8**(2): 79-91.
- Beaupied, H., F. Multon, et al. (2003). "Does training have consequences for the walk-run transition speed?" Hum Mov Sci **22**(1): 1-12.
- Barros, R. M. L., R. Brezinkofer, et al. (1999). "Desenvolvimento e avaliação de um sistema para análise tridimensional de movimentos humanos." Revista Brasileira de Engenharia Biomédica. **15**: 79-86.

- Barros, R. M. L., T. G. Russomano, et al. (2006). "A method to synchronise video cameras using the audio band." Journal of biomechanics **39**: 776-780.
- Biewener, A. A. (1998). "Muscle-tendon stresses and elastic energy storage during locomotion in the horse." Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol **120**(1): 73-87.
- Biewener, A. A. and T. J. Roberts (2000). "Muscle and tendon contributions to force, work, and elastic energy savings: a comparative perspective." Exerc Sport Sci Rev **28**(3): 99-107.
- Blickhan, R. (1989). "The spring-mass model for running and hopping." J Biomech **22**(11-12): 1217-27.
- Bobbert, M. F., K. G. Gerritsen, et al. (1996). "Why is countermovement jump height greater than squat jump height?" Med Sci Sports Exerc **28**(11): 1402-12.
- Booth, F. W. and E. W. Gould (1975). "Effects of training and disuse on connective tissue." Exerc Sport Sci Rev **3**: 83-112.
- Bosco, C., P. V. Komi, et al. (1983). "Mechanical power test and fiber composition of human leg extensor muscles." Eur J Appl Physiol Occup Physiol **51**(1): 129-35.
- Bosco, C., P. Luhtanen, et al. (1983). "A simple method for measurement of mechanical power in jumping." Eur J Appl Physiol Occup Physiol **50**(2): 273-82.
- Brooks, S. V. and J. A. Faulkner (1991). "Forces and powers of slow and fast skeletal muscles in mice during repeated contractions." J Physiol **436**: 701-10.
- Brughelli, M. and J. Cronin (2008). "A review of research on the mechanical stiffness in running and jumping: methodology and implications." Scand J Med Sci Sports **18**(4): 417-26.
- Burke, R. E., D. N. Levine, et al. (1973). "Physiological types and histochemical profiles in motor units of the cat gastrocnemius." J Physiol **234**(3): 723-48.
- Butler, D. L., E. S. Grood, et al. (1978). "Biomechanics of ligaments and tendons." Exerc Sport Sci Rev **6**: 125-81.
- Cappellini, G., Y. P. Ivanenko, et al. (2006). "Motor patterns in human walking and running." J Neurophysiol **95**(6): 3426-37.
- Carrier, D. R., N. C. Heglund, et al. (1994). "Variable gearing during locomotion in the human musculoskeletal system." Science **265**(5172): 651-3.
- Cavagna, G. A. (1977). "Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle." Exerc Sport Sci Rev **5**: 89-129.
- Cavagna, G. A. (2006). "The landing-take-off asymmetry in human running." J Exp Biol **209**(Pt 20): 4051-60.
- Cavagna, G. A. (2010). "Symmetry and Asymmetry in Bouncing Gaits." Symmetry **2**: 1270-1321.
- Cavagna, G. A., B. Dusman, et al. (1968). "Positive work done by a previously stretched muscle." J Appl Physiol **24**(1): 21-32.

- Cavagna, G. A., P. Franzetti, et al. (1988). "The determinants of the step frequency in running, trotting and hopping in man and other vertebrates." J Physiol **399**: 81-92.
- Cavagna, G. A. (1975). "Force platforms as ergometers." J Appl Physiol **39**(1): 174-9.
- Cavagna, G. A., N. C. Heglund, et al. (1977). "Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure." Am J Physiol **233**(5): R243-61.
- Cavagna, G. A., N. C. Heglund, et al. (2005). "Effect of an increase in gravity on the power output and the rebound of the body in human running." J Exp Biol **208**(Pt 12): 2333-46.
- Cavagna, G. A. and M. A. Legramandi (2009). "The bounce of the body in hopping, running and trotting: different machines with the same motor." Proc Biol Sci **276**(1677): 4279-85.
- Cavagna, G. A., M. A. Legramandi, et al. (2010). "Running backwards: soft landing-hard takeoff, a less efficient rebound." Proc Biol Sci **278**(1704): 339-46.
- Cavagna, G. A., M. A. Legramandi, et al. (2008). "The landing-take-off asymmetry of human running is enhanced in old age." J Exp Biol **211**(Pt 10): 1571-8.
- Cavagna, G. A., M. A. Legramandi, et al. (2008). "Old men running: mechanical work and elastic bounce." Proc Biol Sci **275**(1633): 411-8.
- Cavagna, G. A., M. Mantovani, et al. (1997). "The resonant step frequency in human running." Pflugers Arch **434**(6): 678-84.
- Cavagna, G. A., F. P. Saibene, et al. (1963). "External work in walking." J Appl Physiol **18**: 1-9.
- Cavagna, G. A., F. P. Saibene, et al. (1964). "Mechanical Work in Running." J Appl Physiol **19**: 249-56.
- Cavagna, G. A., H. Thys, et al. (1976). "The sources of external work in level walking and running." J Physiol **262**(3): 639-57.
- Cavagna, G. A., P. A. Willems, et al. (1991). "The two power limits conditioning step frequency in human running." J Physiol **437**: 95-108.
- Colombini, B., M. Nocella, et al. (2007). "Crossbridge properties during force enhancement by slow stretching in single intact frog muscle fibres." J Physiol **585**(Pt 2): 607-15.
- Costill, D. L., P. Cleary, et al. (1979). "Training adaptations in skeletal muscle of juvenile diabetics." Diabetes **28**(9): 818-22.
- Costill, D. L., J. Daniels, et al. (1976). "Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes." J Appl Physiol **40**(2): 149-54.
- Crowther, G. J., S. A. Jubrias, et al. (2002). "A "functional biopsy" of muscle properties in sprinters and distance runners." Med Sci Sports Exerc **34**(11): 1719-24.
- De Luca, C. J. (1985). "Control properties of motor units." J Exp Biol **115**: 125-36.

- Dutto, D. J. and G. A. Smith (2002). "Changes in spring-mass characteristics during treadmill running to exhaustion." Med Sci Sports Exerc **34**(8): 1324-31.
- Edman, K. A., G. Elzinga, et al. (1978). "Enhancement of mechanical performance by stretch during tetanic contractions of vertebrate skeletal muscle fibres." J Physiol **281**: 139-55.
- Edman, K. A., G. Elzinga, et al. (1982). "Residual force enhancement after stretch of contracting frog single muscle fibers." J Gen Physiol **80**(5): 769-84.
- Essen, B., E. Jansson, et al. (1975). "Metabolic characteristics of fibre types in human skeletal muscle." Acta Physiol Scand **95**(2): 153-65.
- Ettema, G. J. (1996). "Elastic and length-force characteristics of the gastrocnemius of the hopping mouse (*Notomys alexis*) and the rat (*Rattus norvegicus*)." J Exp Biol **199**(Pt 6): 1277-85.
- Fenn, W. O. (1923). "A quantitative comparison between the energy liberated and the work performed by the isolated sartorius muscle of the frog." J Physiol **58**(2-3): 175-203.
- Fenn, W. O. (1930). "Work against gravity and work due to velocity changes in running: movements of the Center of Gravity Within the Body and Foot Pressure on the Ground." Am. J. Physiol. **93** **433**: 433-462.
- Ferris, D. P., Z. A. Bohra, et al. (2006). "Neuromechanical adaptation to hopping with an elastic ankle-foot orthosis." J Appl Physiol **100**(1): 163-70.
- Ferris, D. P. and C. T. Farley (1997). "Interaction of leg stiffness and surfaces stiffness during human hopping." J Appl Physiol **82**(1): 15-22; discussion 13-4.
- Ferris, D. P., K. Liang, et al. (1999). "Runners adjust leg stiffness for their first step on a new running surface." J Biomech **32**(8): 787-94.
- Ferris, D. P., M. Louie, et al. (1998). "Running in the real world: adjusting leg stiffness for different surfaces." Proc Biol Sci **265**(1400): 989-94.
- Fukunaga, T., K. Funato, et al. (1992). "The effects of resistance training on muscle area and strength in prepubescent age." Ann Physiol Anthropol **11**(3): 357-64.
- Galler, S., K. Hilber, et al. (1996). "Force responses following stepwise length changes of rat skeletal muscle fibre types." J Physiol **493** (Pt 1): 219-27.
- Gandevia, S. C. and C. K. Mahutte (1980). "Joint mechanics as a determinant of motor unit organization in man." Med Hypotheses **6**(5): 527-33.
- Gans, C. and A. S. Gaunt (1991). "Muscle architecture in relation to function." J Biomech **24** **Suppl 1**: 53-65.
- Gerdle, B., S. Karlsson, et al. (2000). "The influences of muscle fibre proportions and areas upon EMG during maximal dynamic knee extensions." Eur J Appl Physiol **81**(1-2): 2-10.
- Gibbs, C. L. and W. R. Gibson (1972). "Energy production of rat soleus muscle." Am J Physiol **223**(4): 864-71.

- Gondin, J., L. Brocca, et al. (2010). "Neuromuscular electrical stimulation training induces atypical adaptations of the human skeletal muscle phenotype: a functional and proteomic analysis." J Appl Physiol **110**(2): 433-50.
- Goubel, F. and J. F. Marini (1987). "Fibre type transition and stiffness modification of soleus muscle of trained rats." Pflugers Arch **410**(3): 321-5.
- Gregor, R. J., V. R. Edgerton, et al. (1979). "Torque-velocity relationships and muscle fiber composition in elite female athletes." J Appl Physiol **47**(2): 388-92.
- Gregory, C. M., K. Vandeborne, et al. (2001). "Metabolic enzymes and phenotypic expression among human locomotor muscles." Muscle Nerve **24**(3): 387-93.
- Hansen, E. A., J. L. Andersen, et al. (2002). "Muscle fibre type, efficiency, and mechanical optima affect freely chosen pedal rate during cycling." Acta Physiol Scand **176**(3): 185-94.
- He, Z. H., R. Bottinelli, et al. (2000). "ATP consumption and efficiency of human single muscle fibers with different myosin isoform composition." Biophys J **79**(2): 945-61.
- Heglund, N. C. and G. A. Cavagna (1985). "Efficiency of vertebrate locomotory muscles." J Exp Biol **115**: 283-92.
- Heglund, N. C., M. A. Fedak, et al. (1982). "Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. IV. Total mechanical energy changes as a function of speed and body size in birds and mammals." J Exp Biol **97**: 57-66.
- Herzog, W. (1998). "History dependence of force production in skeletal muscle: a proposal for mechanisms." J Electromyogr Kinesiol **8**(2): 111-7.
- Herzog, W. and T. R. Leonard (2000). "The history dependence of force production in mammalian skeletal muscle following stretch-shortening and shortening-stretch cycles." J Biomech **33**(5): 531-42.
- Hill, A. V. (1950). "Mechanics of the contractile element of muscle." Nature **166**(4219): 415-9.
- Hill, A. V. (1957). "Heat production without mechanical response in a muscle twitch." J Physiol **137**(2): 57P-8.
- Hill, A. V. (1964). "The Efficiency of Mechanical Power Development During Muscular Shortening and Its Relation to Load." Proc R Soc Lond B Biol Sci **159**: 319-24.
- Hof, A. L. (2003). "Muscle mechanics and neuromuscular control." J Biomech **36**(7): 1031-8.
- Hof, A. L., J. P. Van Zandwijk, et al. (2002). "Mechanics of human triceps surae muscle in walking, running and jumping." Acta Physiol Scand **174**(1): 17-30.
- Hoffer, J. A. and S. Andreassen (1981). "Regulation of soleus muscle stiffness in premammillary cats: intrinsic and reflex components." J Neurophysiol **45**(2): 267-85.
- Hoppeler, H. (1986). "Exercise-induced ultrastructural changes in skeletal muscle." Int J Sports Med **7**(4): 187-204.

- Hreljac, A. (1993). "Preferred and energetically optimal gait transition speeds in human locomotion." Med Sci Sports Exerc **25**(10): 1158-62.
- Hreljac, A. and P. E. Martin (1993). "The relationship between smoothness and economy during walking." Biol Cybern **69**(3): 213-8.
- Jansson, E., M. Esbjornsson, et al. (1990). "Increase in the proportion of fast-twitch muscle fibres by sprint training in males." Acta Physiol Scand **140**(3): 359-63.
- Kallio, J., V. Linnamo, et al. (2004). "The effects of muscle history on short latency stretch reflex response of soleus muscle." J Electromyogr Kinesiol **14**(3): 411-21.
- Kaneko, M. (1990). "Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency." J Biomech **23 Suppl 1**: 57-63.
- Karamanidis, K. and A. Arampatzis (2007). "Age-related degeneration in leg-extensor muscle-tendon units decreases recovery performance after a forward fall: compensation with running experience." Eur J Appl Physiol **99**(1): 73-85.
- Kearns, C. F., M. Isokawa, et al. (2001). "Architectural characteristics of dominant leg muscles in junior soccer players." Eur J Appl Physiol **85**(3-4): 240-3.
- Kerdok, A. E., A. A. Biewener, et al. (2002). "Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses." J Appl Physiol **92**(2): 469-78.
- Kim, S. J., R. R. Roy, et al. (2007). "Electromechanical stimulation ameliorates inactivity-induced adaptations in the medial gastrocnemius of adult rats." J Appl Physiol **103**(1): 195-205.
- Kojima, H., A. Ishijima, et al. (1994). "Direct measurement of stiffness of single actin filaments with and without tropomyosin by in vitro nanomanipulation." Proc Natl Acad Sci U S A **91**(26): 12962-6.
- Komi, P. V. and C. Bosco (1978). "Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women." Med Sci Sports **10**(4): 261-5.
- Komi, P. V., V. Linnamo, et al. (2000). "Force and EMG power spectrum during eccentric and concentric actions." Med Sci Sports Exerc **32**(10): 1757-62.
- Komi, P. V., J. H. Viitasalo, et al. (1977). "Skeletal muscle fibres and muscle enzyme activities in monozygous and dizygous twins of both sexes." Acta Physiol Scand **100**(4): 385-92.
- Komi, P. V. and J. T. Viitasalo (1977). "Changes in motor unit activity and metabolism in human skeletal muscle during and after repeated eccentric and concentric contractions." Acta Physiol Scand **100**(2): 246-54.
- Kubo, K., H. Akima, et al. (2000). "Changes in the elastic properties of tendon structures following 20 days bed-rest in humans." Eur J Appl Physiol **83**(6): 463-8.
- Lee, S. S. and S. J. Piazza (2009). "Built for speed: musculoskeletal structure and sprinting ability." J Exp Biol **212**(Pt 22): 3700-7.
- Lejeune, T. M., P. A. Willems, et al. (1998). "Mechanics and energetics of human locomotion on sand." J Exp Biol **201**(Pt 13): 2071-80.

- Lexell, J. (1995). "Human aging, muscle mass, and fiber type composition." J Gerontol A Biol Sci Med Sci **50 Spec No**: 11-6.
- Lieber, R. L., M. E. Leonard, et al. (2000). "Effects of muscle contraction on the load-strain properties of frog aponeurosis and tendon." Cells Tissues Organs **166**(1): 48-54.
- Linari, M., R. Bottinelli, et al. (2004). "The mechanism of the force response to stretch in human skinned muscle fibres with different myosin isoforms." J Physiol **554**(Pt 2): 335-52.
- Lynn, R., J. A. Talbot, et al. (1998). "Differences in rat skeletal muscles after incline and decline running." J Appl Physiol **85**(1): 98-104.
- MacIntosh, B. R., W. Herzog, et al. (1993). "Human skeletal muscle fibre types and force: velocity properties." Eur J Appl Physiol Occup Physiol **67**(6): 499-506.
- McMahon, T. A. and G. C. Cheng (1990). "The mechanics of running: how does stiffness couple with speed?" J Biomech **23 Suppl 1**: 65-78.
- McMahon, T. A., G. Valiant, et al. (1987). "Groucho running." J Appl Physiol **62**(6): 2326-37.
- Meneghesso, L. (2002). Análise da Marcha: protocolo experimental a partir de variáveis cinemáticas e Antropométricas. Facultad de Educación Física. Campinas, Brazil, Universidad Estadual de Campinas.
- Mercier, J., D. Le Gallais, et al. (1994). "Energy expenditure and cardiorespiratory responses at the transition between walking and running." Eur J Appl Physiol Occup Physiol **69**(6): 525-9.
- Michna, H. (1984). "Morphometric analysis of loading-induced changes in collagen-fibril populations in young tendons." Cell Tissue Res **236**(2): 465-70.
- Minetti, A. E. and R. M. Alexander (1997). "A theory of metabolic costs for bipedal gaits." J Theor Biol **186**(4): 467-76.
- Minetti, A. E., L. P. Ardigo, et al. (1994). "The transition between walking and running in humans: metabolic and mechanical aspects at different gradients." Acta Physiol Scand **150**(3): 315-23.
- Morin, J. B., P. Samozino, et al. (2009). "Effects of muscular biopsy on the mechanics of running." Eur J Appl Physiol **105**(2): 185-90.
- Moritz, C. T. and C. T. Farley (2003). "Human hopping on damped surfaces: strategies for adjusting leg mechanics." Proc Biol Sci **270**(1525): 1741-6.
- Moritz, C. T. and C. T. Farley (2004). "Passive dynamics change leg mechanics for an unexpected surface during human hopping." J Appl Physiol **97**(4): 1313-22.
- Moritz, C. T. and C. T. Farley (2005). "Human hopping on very soft elastic surfaces: implications for muscle pre-stretch and elastic energy storage in locomotion." J Exp Biol **208**(Pt 5): 939-49.
- Neptune, R. R. and K. Sasaki (2005). "Ankle plantar flexor force production is an important determinant of the preferred walk-to-run transition speed." J Exp Biol **208**(Pt 5): 799-808.

- Nilsson, J. and A. Thorstensson (1989). "Ground reaction forces at different speeds of human walking and running." Acta Physiol Scand **136**(2): 217-27.
- Petit, J., G. M. Filippi, et al. (1990). "Changes in muscle stiffness produced by motor units of different types in peroneus longus muscle of cat." J Neurophysiol **63**(1): 190-7.
- Pousson, M., J. Van Hoecke, et al. (1990). "Changes in elastic characteristics of human muscle induced by eccentric exercise." J Biomech **23**(4): 343-8.
- Prilutsky, B. I. and R. J. Gregor (2001). "Swing- and support-related muscle actions differentially trigger human walk-run and run-walk transitions." J Exp Biol **204**(Pt 13): 2277-87.
- Pugh, L. G. (1971). "The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces." J Physiol **213**(2): 255-76.
- Reich, T. E., S. L. Lindstedt, et al. (2000). "Is the spring quality of muscle plastic?" Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol **278**(6): R1661-6.
- Roberts, T. J. and R. L. Marsh (2003). "Probing the limits to muscle-powered accelerations: lessons from jumping bullfrogs." J Exp Biol **206**(Pt 15): 2567-80.
- Roberts, T. J., R. L. Marsh, et al. (1997). "Muscular force in running turkeys: the economy of minimizing work." Science **275**(5303): 1113-5.
- Rome, L. C., L. Flynn, et al. (2006). "Biomechanics: rubber bands reduce the cost of carrying loads." Nature **444**(7122): 1023-4.
- Saibene, F. and A. E. Minetti (2003). "Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans." Eur J Appl Physiol **88**(4-5): 297-316.
- Sawicki, G. S. and D. P. Ferris (2008). "Mechanics and energetics of level walking with powered ankle exoskeletons." J Exp Biol **211**(Pt 9): 1402-13.
- Schepens, B., P. A. Willems, et al. (1998). "The mechanics of running in children." J Physiol **509** (Pt 3): 927-40.
- Seyfarth, A., H. Geyer, et al. (2002). "A movement criterion for running." J Biomech **35**(5): 649-55.
- Simoneau, J. A. and C. Bouchard (1995). "Genetic determinism of fiber type proportion in human skeletal muscle." Faseb J **9**(11): 1091-5.
- Slawinski, J., R. Heubert, et al. (2008). "Changes in spring-mass model parameters and energy cost during track running to exhaustion." J Strength Cond Res **22**(3): 930-6.
- Staron, R. S. (1991). "Correlation between myofibrillar ATPase activity and myosin heavy chain composition in single human muscle fibers." Histochemistry **96**(1): 21-4.
- Stienen, G. J., J. L. Kiers, et al. (1996). "Myofibrillar ATPase activity in skinned human skeletal muscle fibres: fibre type and temperature dependence." J Physiol **493** (Pt 2): 299-307.

- Stone, M. H. (1988). "Implications for connective tissue and bone alterations resulting from resistance exercise training." Med Sci Sports Exerc **20**(5 Suppl): S162-8.
- Sugi, H. and T. Tsuchiya (1988). "Stiffness changes during enhancement and deficit of isometric force by slow length changes in frog skeletal muscle fibres." J Physiol **407**: 215-29.
- Thorstensson, A. and J. Karlsson (1976). "Fatiguability and fibre composition of human skeletal muscle." Acta Physiol Scand **98**(3): 318-22.
- Thorstensson, A., L. Larsson, et al. (1977). "Muscle strength and fiber composition in athletes and sedentary men." Med Sci Sports **9**(1): 26-30.
- Vilarta, R. and C. Vidal Bde (1989). "Anisotropic and biomechanical properties of tendons modified by exercise and denervation: aggregation and macromolecular order in collagen bundles." Matrix **9**(1): 55-61.
- Willems, P. A., G. A. Cavagna, et al. (1995). "External, internal and total work in human locomotion." J Exp Biol **198**(Pt 2): 379-93.
- Williams, P. E. and G. Goldspink (1978). "Changes in sarcomere length and physiological properties in immobilized muscle." J Anat **127**(Pt 3): 459-68.
- Winter, D. A. (2005). Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons.
- Woo, S. L., M. A. Gomez, et al. (1981). "The effects of exercise on the biomechanical and biochemical properties of swine digital flexor tendons." J Biomech Eng **103**(1): 51-6.
- Zuurbier, C. J. and P. A. Huijing (1992). "Influence of muscle geometry on shortening speed of fibre, aponeurosis and muscle." J Biomech **25**(9): 1017-26.

11. Apéndices

A) Tablas de valores p

| Tiempo (s) | Potencia mecánica promedio SPR vs LDR |
|------------|--|
| 0-15 | 0,003 |
| 15-30 | 0,018 |
| 30-45 | 0,259 |
| 45-60 | 0,638 |

| Vel (Km/h) | SPR | | | | LDR | | |
|------------|------------|------------|---------------|--|------------|------------|---------------|
| | Sae vs Sce | tae vs tce | Fstep vs Fsis | | Sae vs Sce | tae vs tce | Fstep vs Fsis |
| 6,5 | | | | | 0,265 | 0,267 | 0,10 |
| 7,5 | | | | | 0,473 | 0,226 | 0,06 |
| 8,5 | 0,405 | 0,022 | 0,03 | | 0,025 | 0,000 | 0,00 |
| 9,5 | 0,899 | 0,025 | 0,01 | | 0,000 | 0,000 | 0,00 |
| 10,5 | 0,009 | 0,000 | 0,00 | | 0,000 | 0,000 | 0,00 |
| 11,5 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | | 0,017 | 0,002 | 0,00 |
| 12,5 | 0,004 | 0,000 | 0,01 | | 0,000 | 0,000 | 0,00 |
| 13,5 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | | 0,002 | 0,007 | 0,00 |
| 14,5 | 0,001 | 0,000 | 0,00 | | | | |
| 15,5 | 0,002 | 0,000 | 0,00 | | | | |

| SPR vs LDR | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Vel (Km/h) | ta | tae | Tce | TP | LP | |
| 8,5 | 0,000 | 0,081 | 0,713 | 0,093 | 0,316 | |
| 9,5 | 0,018 | 0,052 | 0,380 | 0,322 | 0,841 | |
| 10,5 | 0,009 | 0,913 | 0,273 | 0,374 | 0,015 | |
| 11,5 | 0,165 | 0,806 | 0,754 | 0,851 | 0,085 | |
| 12,5 | 0,073 | 0,422 | 0,005 | 0,657 | 0,747 | |
| 13,5 | 0,798 | 0,746 | 0,181 | 0,241 | 0,223 | |

| SPR vs LDR | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--|
| Vel (Km/h) | Sae | Sce | Sv | av,mx | Fstep | K/m | |
| 8,5 | 0,024 | 0,003 | 0,008 | 0,020 | 0,07 | 0,04 | |
| 9,5 | 0,051 | 0,346 | 0,394 | 0,072 | 0,31 | 0,11 | |
| 10,5 | 0,722 | 0,859 | 0,754 | 0,822 | 0,38 | 0,51 | |
| 11,5 | 0,808 | 0,735 | 0,878 | 0,058 | 0,72 | 0,05 | |
| 12,5 | 0,865 | 0,002 | 0,222 | 0,213 | 0,68 | 0,06 | |
| 13,5 | 0,563 | 0,676 | 0,618 | 0,822 | 0,22 | 0,80 | |

| Vel (Km/h) | SPR | | LDR | |
|---------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | Sce,up/Sv vs Sce,down/Sv | tW+ vs tW- | Sce,up/Sv vs Sce,down/Sv | tW+ vs tW- |
| 6,5 | | | 0,16 | 0,00 |
| 7,5 | | | 0,35 | 0,02 |
| 8,5 | 0,67 | 0,00 | 0,54 | 0,00 |
| 9,5 | 0,30 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| 10,5 | 0,11 | 0,00 | 0,26 | 0,00 |
| 11,5 | 0,39 | 0,00 | 0,42 | 0,00 |
| 12,5 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 13,5 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,12 |
| 14,5 | 0,01 | 0,02 | | |
| 15,5 | 0,01 | 0,03 | | |

B) Rutina “Fibras” para el cálculo de porcentaje de fibras rápidas

```
% Rutina para el cálculo del porcentaje de fibras rápidas en miembro
inferior según la ecuación de Bosco 1983.
% Archivos necesarios: carrega, lesad, pasta.txt, directorio.txt.
% ingresar datos de fuerza vertical en función del tiempo en formato
PRN.
% Los datos deben estar filtrados.

% 7/3/2011
% patricia.polero@gmail.com

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Cargar archivo PRN

[pathname,filename]=carrega('*.prn');

saltos=lesad(pathname,filename);

% Ver gráfico de los saltos

figure
plot(saltos(:,1),saltos(:,2))

h=msgbox ('ajuste el zoom para marcar los tiempos de vuelo');
waitfor (h);

numsaltos=inputdlg({'ingrese el número de saltos'}, 'número de
saltos',1,{ '10' });
numsaltos=str2double (numsaltos);

A= ginput(2*numsaltos);

B=A(:,1);

[nl,nc]=size(B);

tv=0;
i=0;
while i<nl
    tv=tv+B(i+2,1)-B(i+1,1);
    i=i+2;
end

Pot=(9.81^2*tv*15)/((4*numsaltos)*(15-tv))

FR=(Pot-12.56)/0.26
```

C) Rutina "Cinemática" para el cálculo de variables cinemáticas

```

function datos_cinem
[pathname,filename]=carrega('.2D')
cinematica=Levideow(pathname,filename);
% cinematica es una matriz con 3 columnas. Col 1: núm de cuadro, Col
2:
% posición en x del punto 1.
fsamp=50;
dt=1/fsamp;
g=9.8;
errores_rec=[0.000001 dt];
% errores_rec es el error de cinemetría en x y en t, de un cuadro.

% vel media %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[nl,nc]=size(cinematica);
Vel=(cinematica(nl,2)-cinematica(1,2))/(nl*dt); %variación de
posición HORIZONTAL sobre el tiempo total digitalizado.
VelK=Vel*3.6;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

prompt={'Cuadro del comienzo de fase aérea:', 'Cuadro del final de fase
aérea:', 'Número del primer cuadro digitalizado:', 'Fin paso:'};
titulo='Selección de los instantes de fase aérea.';
cuadros={'1', '1', '1', '1'};
numlines=1;
cuadros=inputdlg(prompt,titulo,numlines,cuadros);
fin=str2double(cuadros(2))-str2double(cuadros(3))+1;
inicio=str2double(cuadros(1))-str2double(cuadros(3))+1;
finpaso=str2double(cuadros(4))-str2double(cuadros(3))+1;
ta=(fin-inicio)*dt;

%long_paso

TP=(finpaso-inicio)*dt;% Si se digitalizó el paso desde el fin de la
fase aérea hasta el fin de la siguiente, hay que modificar
acá!!!!!!!!!!!!!!!
LP=((cinematica(finpaso,2))-(cinematica(inicio,2))); %Largo de paso.
FP=1/TP; %Frecuencia de paso.

% Cálculo del error
% Ahora fin e inicio son los límites que se usaron para calcular Vel.

vel_calc=Vel;
fin=nl;
inicio=1;
elmax=2*errores_rec(1)/ta;
e2max=2*errores_rec(2)/(cinematica(fin,2)-cinematica(inicio,2)-
2*errores_rec(1));
candidatos=[error(vel_calc,elmax,e2max) error(vel_calc,-
elmax,e2max)...
error(vel_calc,elmax,-e2max) error(vel_calc,-elmax,-e2max)];
intervalo_vel=[min(candidatos) max(candidatos)];
% intervalo_vel da el intervalo en el cual se encuentra la velocidad
real.

```

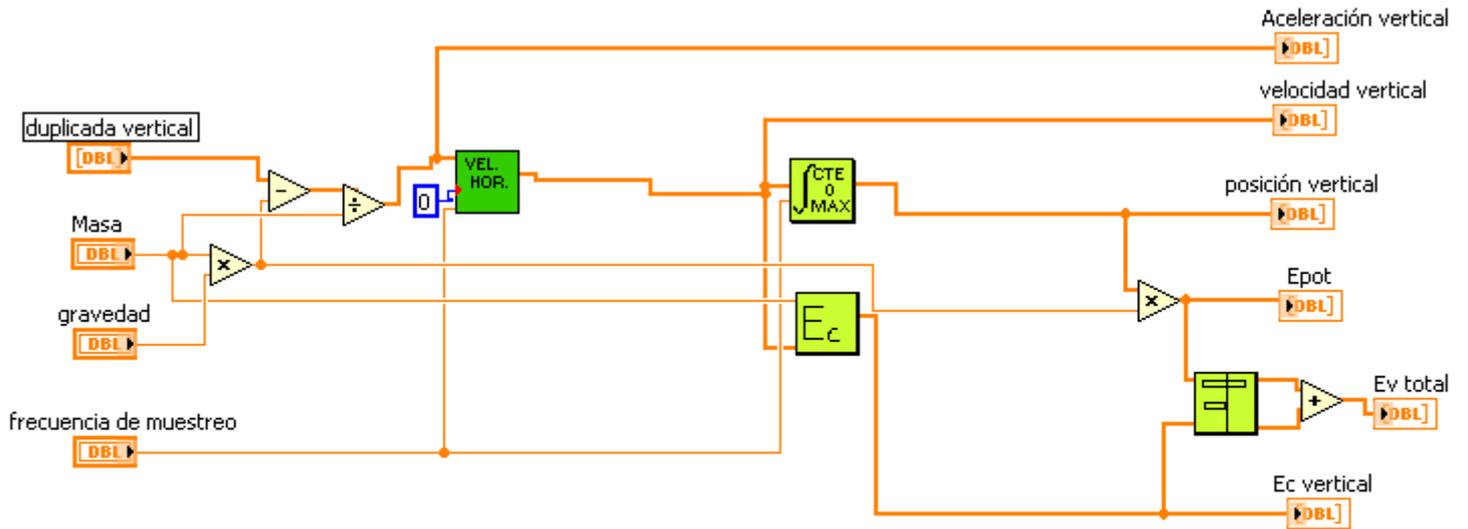
```

resultados=[ta TP LP FP Vel intervalo_vel VelK]
% Guarda los resultados automáticamente en la carpeta cinemetría del
% sujeto, con el mismo nombre del archivo 2d., sin el .2d y se le
agrega
% _vel.
indice_barras=[];
for k=1:size(pathname,2)
    if pathname(k)=='\ '
        indice_barras=[indice_barras k];
    end
end
corte=indice_barras(size(indice_barras,2)-2);
nombre_sinext=filename(1:(size(filename,2)-3));
file=[pathname(1:corte) nombre_sinext '_vel.txt'];
save(file, 'resultados', '-ascii');

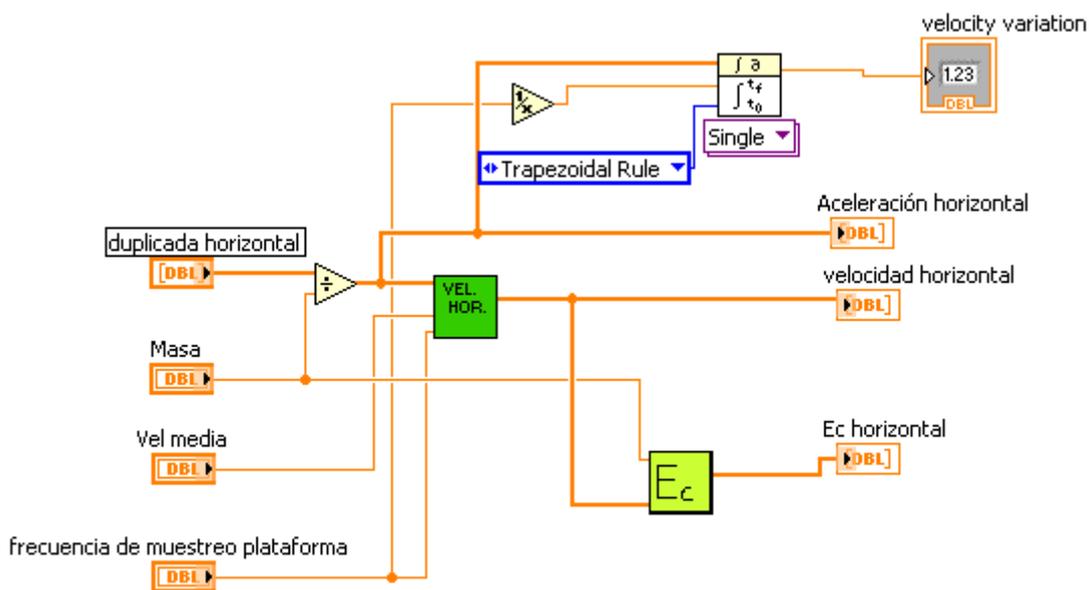
function r=error(v_c,e1,e2)
r=1/(1/(v_c-e1)-e2)-v_c;

```

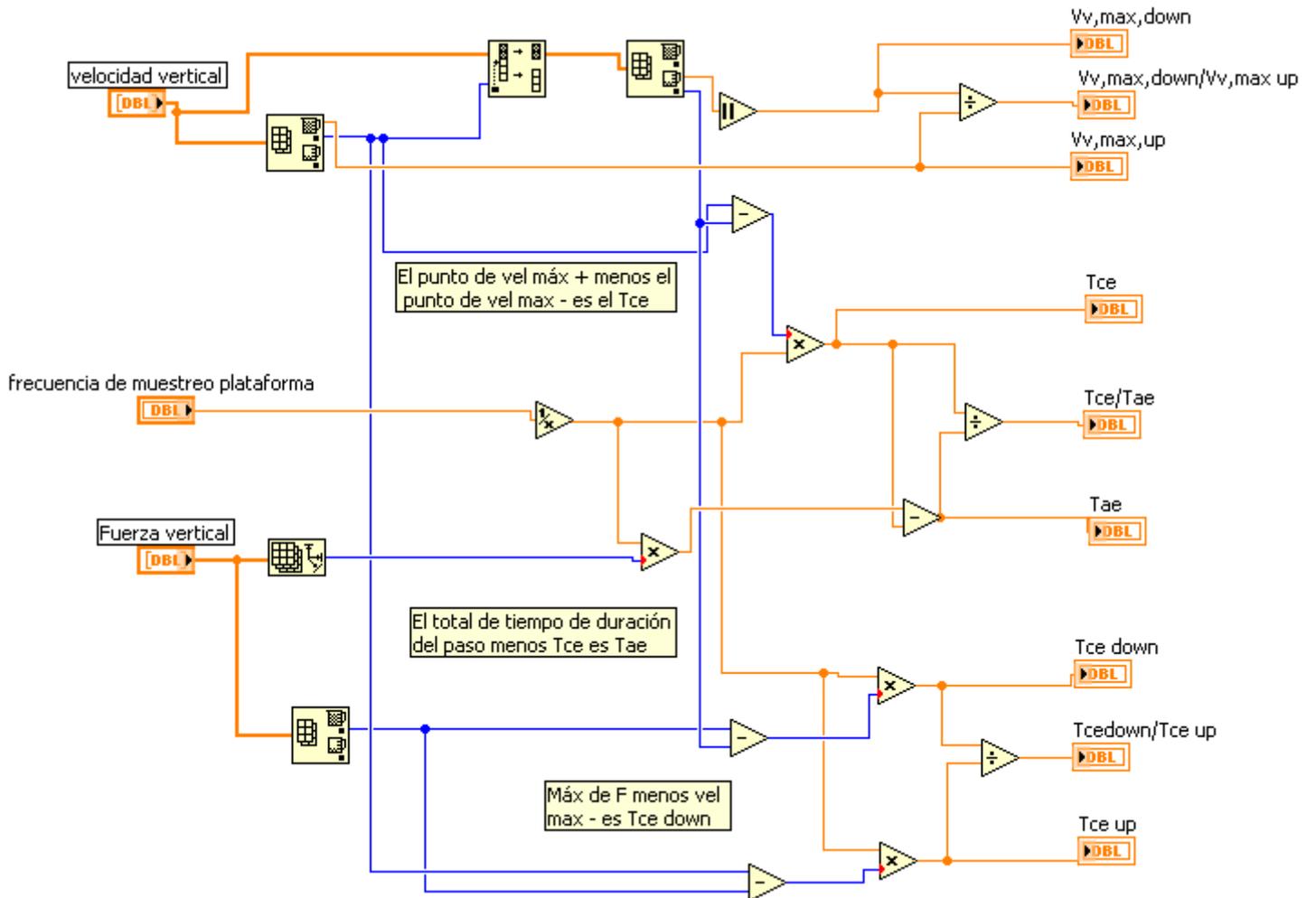
D) Rutina "vertical"



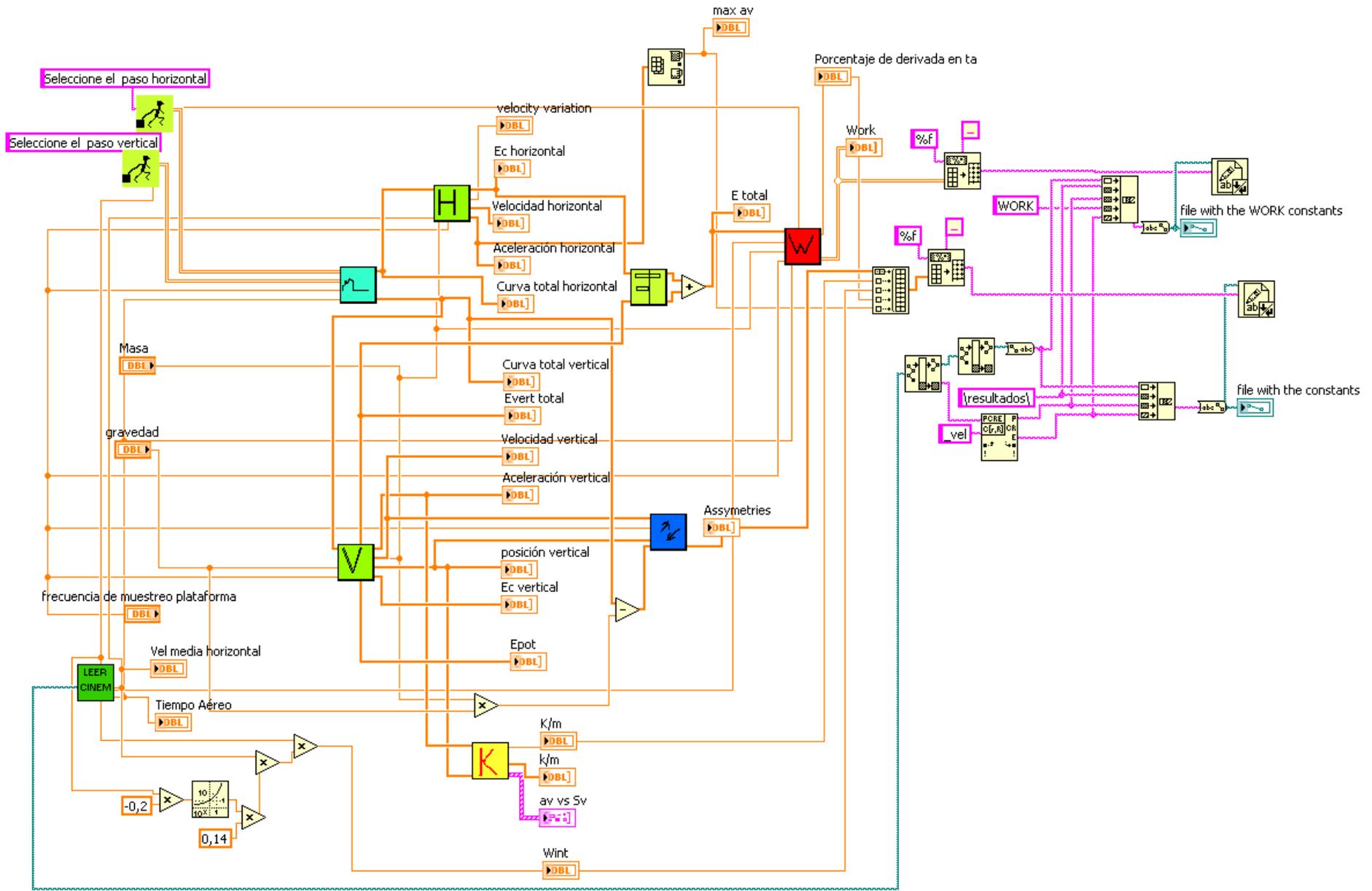
E) Rutina "Horizontal"



F) Rutina "Tce"



G) Rutina Principal: "Main Program"



H) Rutina "Asimetrías"

