

MODELO MECÁNICO PARA EL ANÁLISIS BIOMECÁNICO DEL SERVICIO DE TENIS

C. López de Subijana, E. Navarro.

Instituto Nacional de Educación Física- Universidad Politécnica de Madrid

El propósito de este artículo es plantear un nuevo modelo mecánico del cuerpo, adaptado a los gestos técnicos del tenis. El modelo consta de 28 puntos articulares, en él se definen barras y sólido-rígidos. Dicho modelo permite un estudio del gesto técnico completo. Se analizó un servicio filmado con dos cámaras a 250 fps de una jugadora con ranking WTA mundial 42. Los resultados reflejan la validez de dicho modelo ya que nos permite cuantificar la evolución de la energía de toda la cadena cinética.

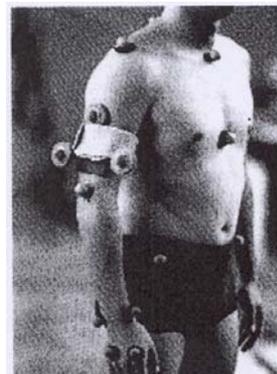
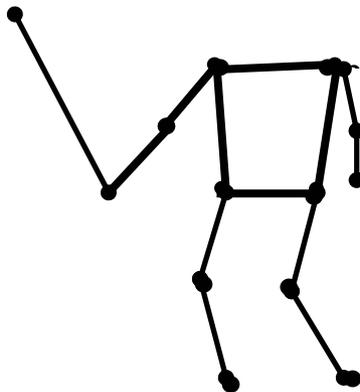
Palabras Clave: Modelo, mecánico, biomecánica, servicio, tenis.

INTRODUCCION

El análisis biomecánico del servicio de tenis, ha seguido una evolución paralela a la importancia que a adquirido el servicio dentro del resultado final del partido. Las velocidades registradas tanto en hombres como en mujeres han sido cada vez superiores, (Noffal, 1999). Los estudios biomecánicos se basan en estudiar los movimientos del cuerpo en un determinado gesto técnico, para ello se crea un modelo mecánico teórico que se asemeja en lo posible a las características mecánicas del cuerpo humano. Los segmentos se pueden definir como barras o como sólidos-rígidos. Los estudios que se centran en un modelo de barras se ven limitados por las variables a estudiar: posiciones de los centros articulares y ángulos. En cambio, aquellos estudios de sólidos-rígidos aportan una información más profunda, al analizar rotaciones sobre los tres ejes, momentos angulares, momentos de inercia, energías cinéticas...hasta la fecha no existen estudios biomecánicos del servicio de tenis en los que los parámetros valorados sean energías cinéticas.

Los estudios basados en un modelo de barras, Gheluwe y Hebbelink (1983), Elliott (1986), Gheluwe (1987), Buckley y Kerwin (1988), Balius (1995), Papadopoulos (2000), De Subijana y Navarro (2002 y 2003), suelen considerar tanto el cuerpo humano como la raqueta dentro del modelo teórico, son modelos completos. Los estudios basados en sólidos rígidos, Springins (1994), Ito (1995), Elliott (1995), Legnani (1997), Wang (2000), Fleisig (2002), Lo (2003), Elliott (2003), todos a excepción de Bahamonde (2000), asumen dentro del modelo teórico únicamente brazo y la raqueta. Ello supone que no se considera la participación del tren inferior ni del tronco en la cadena cinética previa.

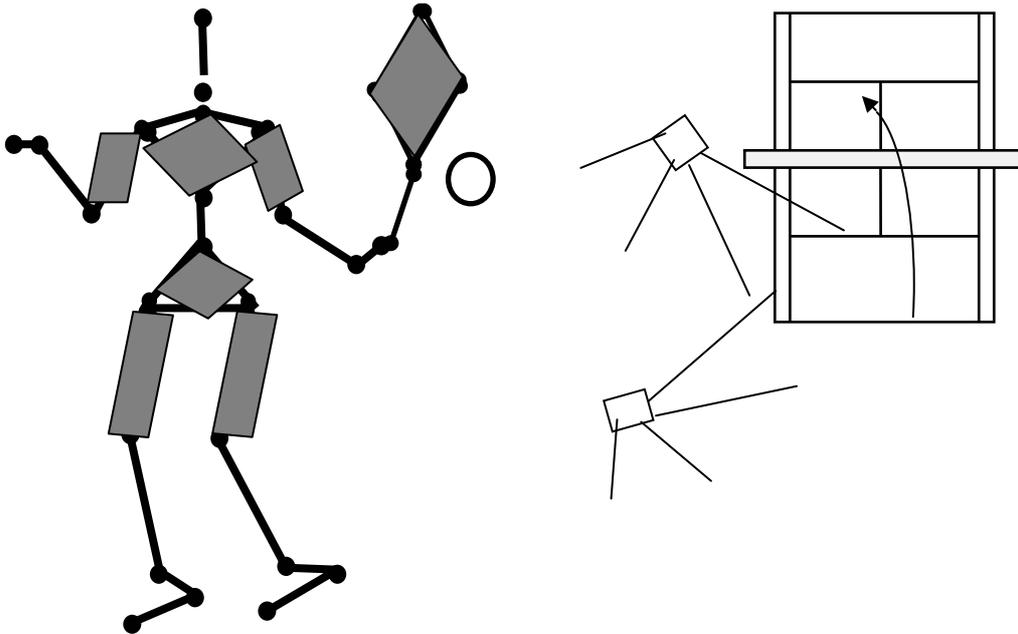
El objetivo de este estudio es el crear un modelo mecánico de sólidos rígidos que sea completo, es decir, que considere tanto los miembros inferiores y superiores, como la raqueta. Con ello se obtiene una herramienta útil de valoración y análisis del servicio del tenis.



Figuras 1 y 2. Modelo de Barras de Papadopoulos (2000) y de sólido-rígidos de Lo (2003).

MÉTODOS

El modelo creado es un modelo mixto de barras y sólidos rígidos. Se basa en 28 puntos articulares internos, de Clauser (1969), adaptado por Zatsiorsky (1990), de los cuales 23 son del cuerpo humano, 4 son de la raqueta y el último es de la pelota de tenis. Son sólidos rígidos definidos con tres puntos no colineales: la pelvis, el torax, y la raqueta y definidos por dos puntos y otro punto en el mismo plano los muslos y los brazos (Navarro, 1994). Los parámetros inerciales del cuerpo humano se tomaron de De Leva (1996). La raqueta era una raqueta "Volk classic 7 pro", de dimensiones, masa, radio de giro y momentos de inercia conocidos. Se hallaron los parámetros inerciales de la misma siguiendo las especificaciones de Brody (2000) y de la Asociación Americana de encordadores de raquetas, (USRSA).



Figuras 3 y 4. Modelo mixto, siendo en gris los segmentos sólido-rígidos y posición de las cámaras.

La filmación se realizó el 5 de febrero de 2002 en las instalaciones del Consejo Superior de Deportes en Madrid. Se registraron 30 servicios de dos jugadoras de Alto Nivel, en dicha semana su ranking mundial fue de 65 y 42 del mundo respectivamente. Para este estudio se ha tomado un servicio de la jugadora GL, que se consideró "bueno" por aterrizar en la zona diana marcada. La jugadora era zurda.

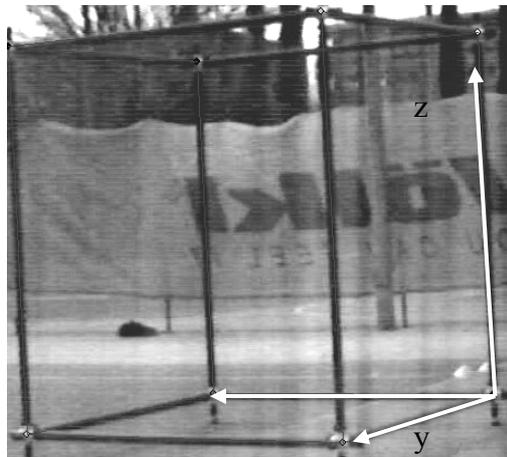


Figura 5. Cubo de 2x2x2 con los tres ejes señalados.

Se filmó con dos cámaras de alta velocidad a 250 fps, siendo disminuida la frecuencia a 125 fps. Tal y como se demostró en De Subijana y Navarro, (2003), 125 fps es una

frecuencia válida para analizar este tipo de gesto técnico. Así mismo se tomó como sistema de referencia un cubo de dimensiones conocidas 2x2x2 m.

Se aplicó la Direct Linear Transformation (DLT), de Abdel-Aziz y Karara, (1971), para la obtención de las coordenadas 3D de los 28 puntos digitalizados, con el software desarrollado por el laboratorio de Biomecánica del INEF. Se suavizaron los datos y se les aplicó un error medio de 0,015 m, similar a Fleisig et. al (2003). Dicho error se obtuvo de la digitalización de tres fotogramas diferentes 30 veces cada fotograma. La secuencia analizada consta de 143 fotogramas.

RESULTADOS

Para la determinación de los instantes fundamentales, es necesario conocer:

- Instante de lanzamiento de pelota, (t1), es el cuando la pelota se desprende de la mano, $t = 0,056$ s.
- Instante de máxima flexión de ambas rodillas, (t2), es cuando el sumatorio de ambos ángulos es mínimo, $t = 0,656$
- Instante de máxima flexión de ambas rodillas con apoyo de ambos pies, (t3), es cuando los dos pies permanecen apoyados en flexión, $t = 0,760$ s.
- Instante de máxima rotación externa, (t4), es cuando la velocidad angular en el eje z es 0), $t = 0,976$ s.
- Instante del impacto, (t5), es cuando raqueta golpea la bola, $t = 1,076$ s.

Estos instantes se pueden apreciar en las figuras 6, 7 y 8. La jugadora “pivota” sobre la pierna derecha, por ello la rodilla izquierda llega antes a la flexión máxima alcanzada. El instante t2 ocurre cuando la pierna izquierda se encuentra todavía en el aire. T3 será el instante de mayor flexión en apoyo, previo a la extensión de las rodillas.

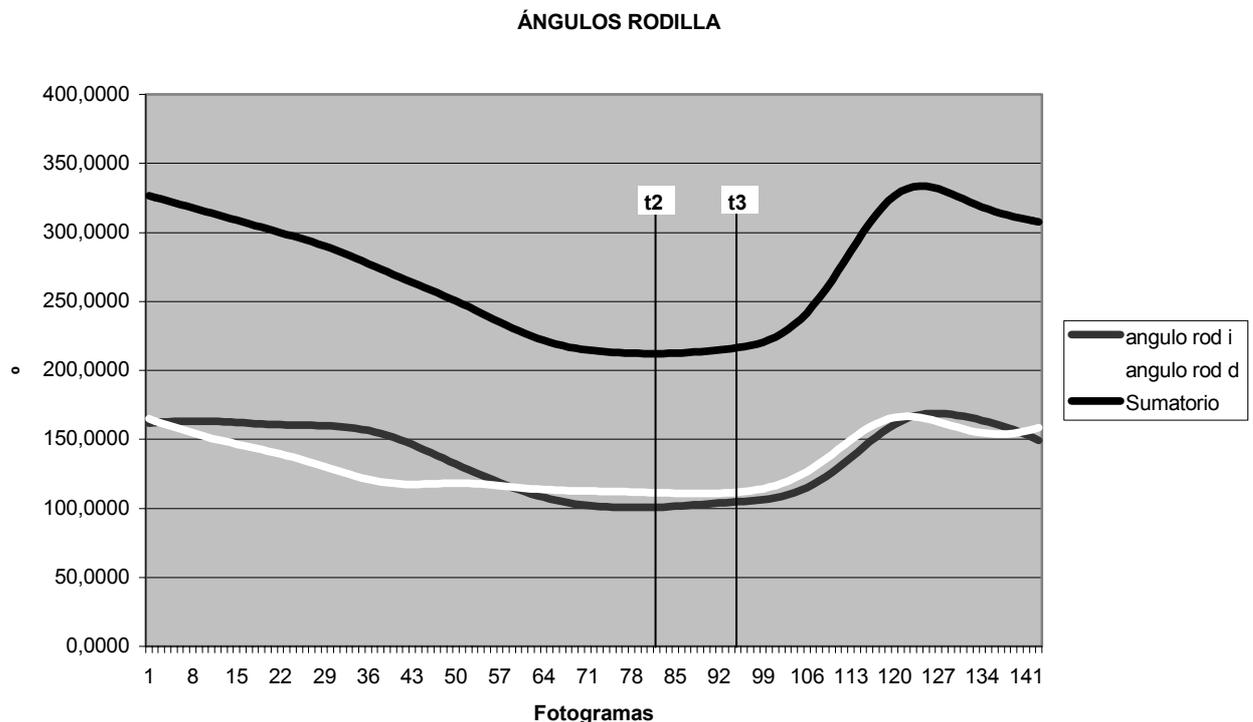


Figura 6. Gráfica de los ángulos de la rodilla derecha e izquierda y, en negro, el sumatorio de ambas, t2 y t3.

La velocidad angular del brazo izquierdo, puede ser recogida siempre que el codo no se encuentre en extensión. Por ello los primeros parámetros no son válidos ya que la jugadora se encuentra realizando el “péndulo” con la raqueta.

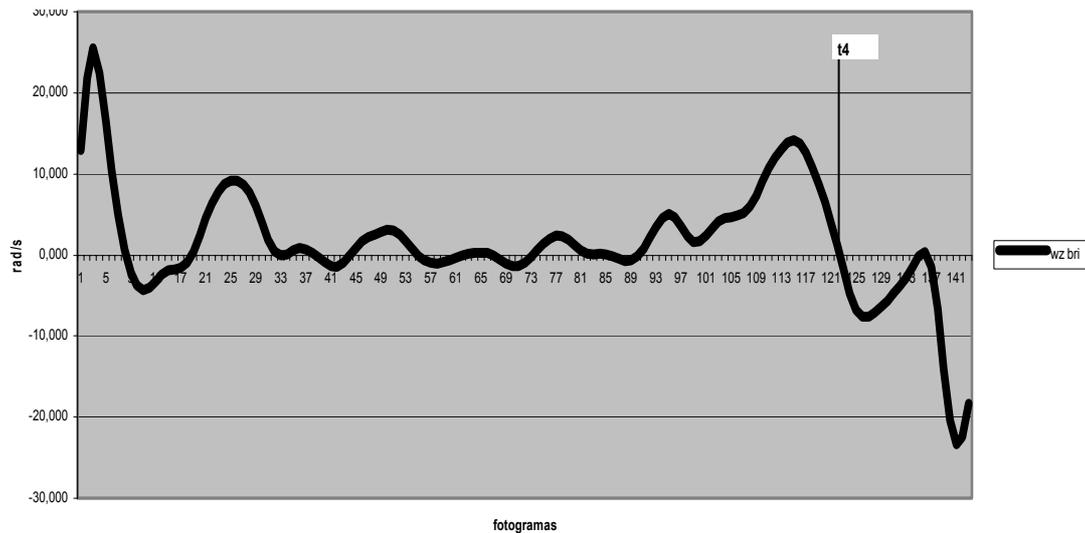


Figura 7. Gráfica de la Velocidad angular en el eje z del brazo izquierdo, y t4.

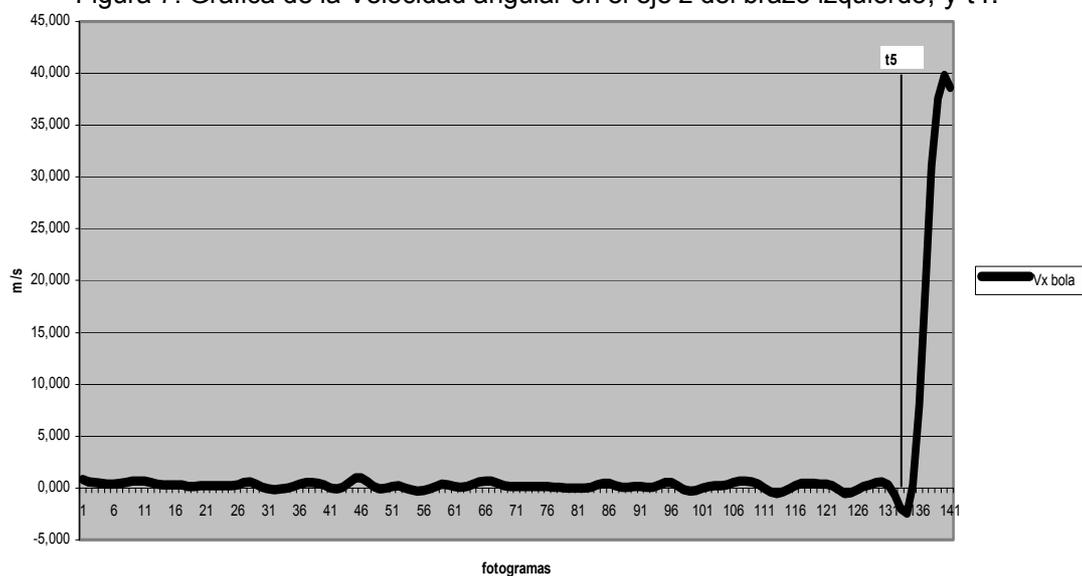


Figura 8. Gráfica de la velocidad lineal de la bola, en el eje x, t5.

La bola alcanza una velocidad máxima de 39,74 m/s, es decir 143 km/h. Algo razonable teniendo en cuenta el nivel de las jugadoras.

En la fase de t1a t2 y t3: El protagonismo lo tienen los miembros inferiores. El giro se produce con la pierna derecha en apoyo, por ello desarrolla menor energía que la pierna izquierda, que se desplaza. El giro que se produce sobre el eje longitudinal hace que también se aprecie un ligero aumento de energía cinética en la pelvis.

En la fase de t3 a t4: Es la fase previa a la aceleración final, intervienen primero la pelvis junto con la pierna derecha y posteriormente el tórax y la pierna izquierda. A raíz del pico máximo del tórax, todos los componentes disminuyen menos la raqueta y el brazo izquierdo.

En la fase de t4 a t5: Mientras el resto de los componentes disminuyen su energía, el brazo alcanza su máximo y posteriormente la raqueta en el momento del impacto. La raqueta llega a valores nueve veces a los logrados por el brazo y el tórax.

Las cantidades alcanzadas por la pierna izquierda, pueden indicar que debido a la técnica utilizada, de “cabeza de alfiler”, quizás se produzcan dos cadenas cinéticas, una previa al apoyo de pies juntos y otra posterior al apoyo de pies juntos.

En la segunda cadena cinética posible se observa como tras el máximo alcanzado por el tórax, todos los valores disminuyen menos los segmentos más distales: el brazo izquierdo y la raqueta.

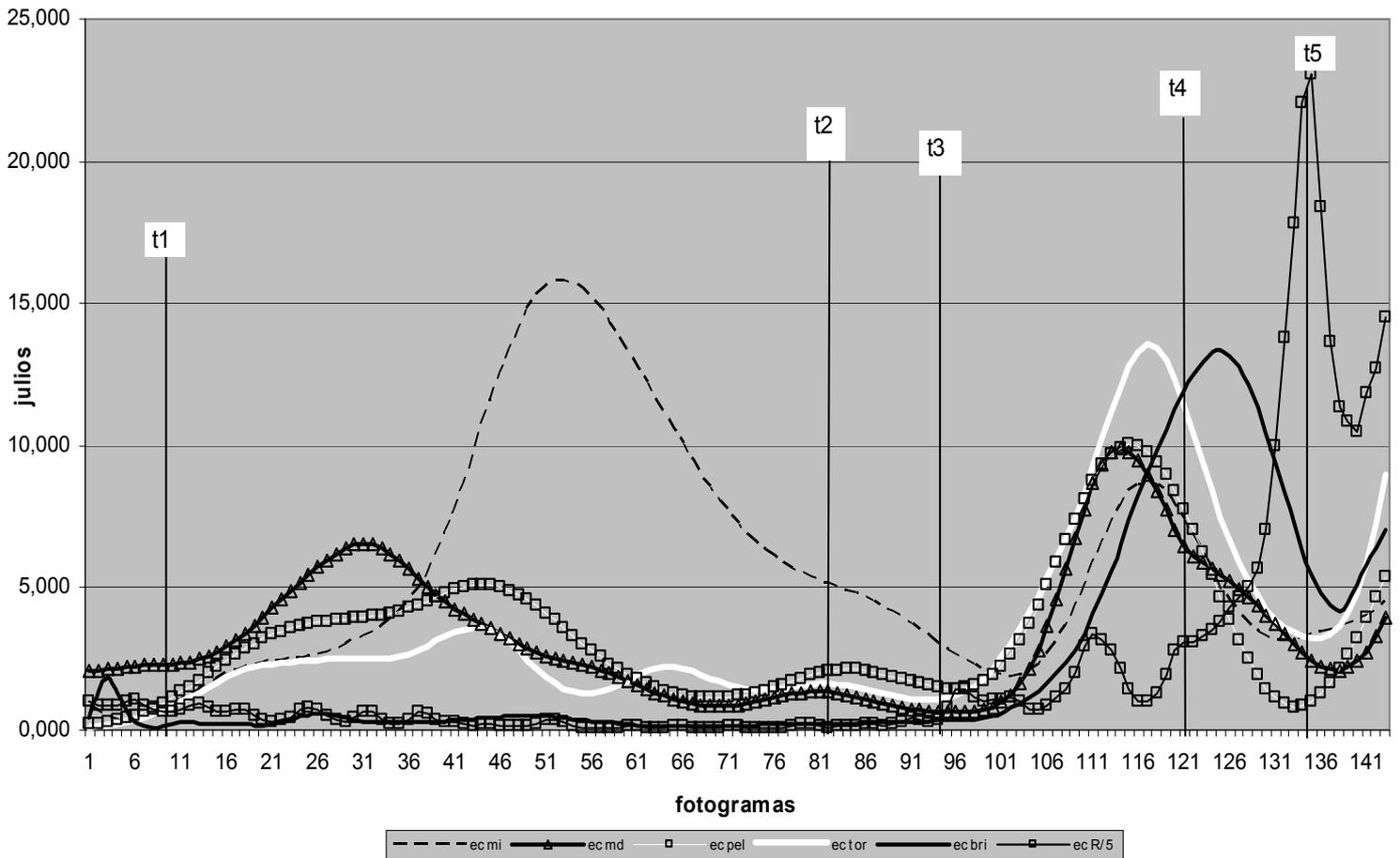


Figura 10. Evolución de la Energía cinética del muslo izquierdo, el muslo derecho, la pelvis, el tórax, el brazo izquierdo y la raqueta en su décima parte.

CONCLUSIONES

El modelo mecánico desarrollado es válido ya que nos permite valorar la evolución de la cadena cinética de una forma completa. Desde un punto de vista teórico, las cadenas cinéticas de los lanzamientos y los golpes deben de seguir una evolución proximal distal e ir en aumento (Hay, 1985). La cadena cinética reflejada sí que sigue un orden lógico de intervención: miembros inferiores, pelvis, tórax, brazo izquierdo y por último la raqueta. Como propuesta para futuras investigaciones se propone, realizar un estudio con una muestra más amplia y con ello desarrollar un método para la valoración de la eficacia del servicio de tenis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Aziz, Y.I. Karara, H.M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry. En ASP Symposium on close range photogrammetry, Ed. American society of photogrammetry, ASP, 1-18, Falls Church.
- Bahamonde, -R.-E. (2000). Changes in angular momentum during the tennis serve. *Journal-of-sports-sciences-(London)*, 18(8), 579-592.
- De Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, Vol.29, nº9, 1223-1230.
- Elliott, -B.-C; Marshall, -R.-N; Noffal, -G.-J. (1995) Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *Journal of applied biomechanics*, 11(4), Nov 1995, 433-442.
- Elliott, -B; Takahashi, -K; Marshall, -R. (1996). Internal rotation of the upper arm: the missing link in the kinematic chain *International Society of Biomechanics in Sports In*,

- Abrantes, J.M.C.S. (ed.), XIV Symposium on biomechanics in sports. June 25-29, 1996, Funchal, Madeira, Portugal. Proceedings, pp 205-208. Lisboa: Edicoes FMH.
- Elliott, -B; Fleisig -G; Nicholls -R & Escamilla -R. (2003) Technique effects on upper limb loading in the tennis serve. In, *Journal of Science and Medicine in Sport*, vol. 6 (1), 76-87.
 - Fleisig, -G; Nichols, -R; Escamilla, -R; Elliot, -B. (2002). Kinematics and kinetics of the high velocity tennis serve. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol. 34 (5) supl. 1, May 2002, 105.
 - Fleisig, -G; Nichols, -R; Escamilla, -R; Elliot, -B. (2003). Kinematics used by world class tennis players to produce high-velocity serves. *Sports Biomechanics*, Vol. 2 (1), 17-30.
 - Hay, J.G. (1985). *The biomechanics of sport techniques*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
 - Ito, -A; Tanabe, -S; Fuchimoto, -T. (1995). Three dimensional kinematic analysis of the upper limb joint in tennis flat serving. In, Hakkinen, K. (ed.) et al., XVth Congress of the International Society of Biomechanics, July 2-6, 1995, Jyvaskyla: book of abstracts, pp 424-425. Jyvaskyla, University of Jyvaskyla.
 - L. De Subijana C.; Navarro E. (2003). An approach in determining the adequate filming frequency in a biomechanical analysis of tennis serves. In, S. Miller, *Tennis Science and Technology 2*. pp. 211-216. Canada: Ed. Webcom Ltd.
 - Lo, - K; Wang -L; Lin -H; Su -F. (2003). Momentum transfer of upper extremity segments during the tennis serve. In, S. Miller, *Tennis Science and Technology 2*. pp. 185-191. Canada: Ed. Webcom Ltd.
 - Marshall, -R.-N; Elliott, -B.-C. (2000). Long-axis rotation: the missing link in proximal-to-distal segmental sequencing. *Journal of sports sciences*, 18(4), Apr 2000, 247-254.
 - Mitchell -S; Jones -R; Kotze -J. (2000). The influences of racket moment of inertia during the tennis serve: 3-dimensional analysis. In, S. J. Haake and A. O. Coe Eds., *Tennis Science and Technology*, pp 57-65. Londres: Blackwell Science Ltd.
 - Navarro, E., Campos, J., Vera, P., Chillaron, E. (1994). A Procedure for determining the acceleration phase in the Javelin Throwing., A. Barabas y G. Fabian eds., *Proceedings of 12th Symposium of the International society of biomechanics in sports*, pp 357-358. Siofok
 - Noffal, -G.-J. (1999) Where do high speed tennis serves come from?. In, Elliott, B. (ed.), *Applied proceedings: tennis*, Perth, W.A., School of Biomedical and Sports Science, pp 27-33. Perth: Edith Cowan University.
 - Papadopoulos -C; Emmanouilidou -M.; Prassas -S. (2000). Kinematic analysis of the service stroke in tennis. In, S. J. Haake and A. O. Coe Eds., *Tennis Science and Technology*, pp 383-387. Londres: Blackwell Science Ltd.
 - Springings, E., Marshall, R., Elliott, B., and Jennings L. (1994). A Three Dimensional Kinematic Method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racket-head speed. *Journal of Biomechanics*, vol.27, n°3, 245-254.
 - Wang -L; Wu -C; Su -F. (2000). Kinematics of trunk and upper extremity in tennis flat serve. In, S. J. Haake and A. O. Coe Eds., *Tennis Science and Technology*, pp 395-400. Londres: Blackwell Science Ltd.
 - www.racquettech.com