

Análisis cinemático del salto en pacientes sin patologías en extremidades inferiores

Catalina González Cruz^{1,ψ}, Federico Bregains², Ariel Braidot²

¹Programa de Ingeniería Biomédica, Escuela de Ingeniería de Antioquia-Universidad CES, Colombia

²Laboratorio de Biomecánica, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde, Argentina

Resumen— El salto vertical es una habilidad relevante en el desempeño de muchos deportes de alto rendimiento, como el voleibol, básquetbol y fútbol. El gesto está basado en un conjunto de variables independientes específicas, cada una de las cuales puede afectar o favorecer en el rendimiento final. En este trabajo se realizó un análisis cinemático del salto vertical en deportistas amateurs sin antecedentes patológicos en extremidades inferiores, por medio de dos técnicas de *squat jump*. Para esto, se utilizó un sistema de videografía bidimensional y softwares desarrollados anteriormente en el laboratorio de biomecánica. Se evaluaron los ángulos entre segmentos, posiciones y desplazamientos de los centros de gravedad y velocidades de las articulaciones anatómicas, en cada variante del ejercicio. Los resultados obtenidos permiten caracterizar el gesto realizado y comparar las dos técnicas evaluadas. Se demostró que la técnica mejora el desempeño del salto vertical cuando se usa el balanceo de los brazos, aumentando la altura del centro de masa del cuerpo entero. El estudio demuestra ser una herramienta factible como referencias para futuros análisis del salto vertical en extremidades inferiores.

Palabras clave— Análisis cinemático, Centro de masa, Salto, squat jump.

Abstract— Vertical jumping is a crucial ability in the performance of several sports such as volleyball, basketball and football. The standing vertical jump is based on several specific independent variables, where each can affect or improve the final performance. The main goal of this study was to examine the kinematic vertical jump in amateurs sportsmen without pathological antecedents in lower limbs, through two types of squat jump. The movement was analyzed using two-dimensional video system and the data were processed with the use of software developed in the laboratory. The angles among segments, positions and displacements of the center of mass and anatomical joints velocities were evaluated, in each variant of the exercise. The results obtained allow the characterization of the standing vertical jump performed by the subject and allow the comparison of both techniques as well. It was demonstrated that this technique improves performance of the vertical jump while using arm swing which leads to an increase in height of the body's center of mass.

Keywords— Kinematic analysis, Center of mass, Jump, squat jump.

I. INTRODUCCIÓN

El salto vertical es una habilidad relevante en el desempeño de muchos deportes de alto rendimiento, como el voleibol, básquetbol y fútbol. La ejecución de esta tarea motora depende de la acción coordinada de los segmentos del cuerpo humano, la cual es determinada por

la interacción entre las fuerzas musculares (moduladas por impulsos de sistema nervioso central) y los momentos netos que se generan alrededor de las articulaciones debido a las demandas mecánicas [1]. La esencia del movimiento es transformar el trabajo conjunto en energía cinética del movimiento vertical o energía potencial [2].

El salto vertical es una de las maniobras deportivas más estudiadas en deportes de alto rendimiento [1, 3, 4]. Las evaluaciones de saltabilidad tienen como objetivo determinar la fuerza contráctil, potencia absoluta y relativa así como características elásticas de las extremidades inferiores [5].

Para realizar un análisis del salto es posible utilizar diferentes técnicas, en este trabajo se utilizó la técnica de *squat jump*, la cual se puede realizar, con balanceo de los brazos (SJA, por su nombre en inglés) o sin balanceo de brazos (SJ), la diferencia entre ellas es que en el SJ las manos se ubican sobre la cadera durante todo el ejercicio [2, 6].

Diferentes estudios han encontrado que la técnica aumenta el desempeño del salto vertical cuando se usa el balanceo de los brazos, el cual consigue un aumento en la altura y en la velocidad del centro de masa (CM). El aumento en la altura se origina en el momento del despegue debido a la elevación de los brazos y en la velocidad, el aumento proviene de una serie de eventos que permiten que los brazos generen una energía temprana y posteriormente se transfiera al resto del cuerpo durante la etapa posterior del salto. La energía proviene de las articulaciones de brazos y codos, así como del trabajo extra realizado por la cadera [2, 7].

Asimismo existen otras técnicas para evaluar la saltabilidad. Para valorar la fuerza explosiva del atleta se suele evaluar el salto comenzando desde la posición erguida realizando el contramovimiento de descenso hasta una posición horizontal del muslo y el ascenso posterior (*counter movement vertical jump*) [8, 9]. Durante el descenso el golpe mecánico es atenuado por el sistema músculo esquelético, pero cuando las cargas externas llegan a ser demasiado grandes para que el cuerpo las pueda atenuar adecuadamente, se incrementa el riesgo de sufrir alguna lesión [10].

Cuando el salto es realizado desde una posición estática, existe una contracción muscular inicial y la altura máxima alcanzada se ve reducida [11-13]. Esta técnica tiene mayor semejanza con los gestos más comunes en diferentes deportes [8, 9].

El objetivo de este trabajo es analizar la cinemática de las articulaciones de miembros inferiores durante la propulsión y el aterrizaje de un ejercicio de salto por medio de la técnica SJ y SJA en una población sin antecedentes patológicos de extremidades inferiores (población sana).

Este primer trabajo permitirá establecer una base de datos de una población sana para cuantificar el grado de similitud del salto en pacientes con diferentes patologías presentadas en las extremidades inferiores con relación al grupo de control.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. La población

Para realizar el estudio se analizaron sujetos deportistas amateurs de sexo masculino sin antecedentes de patología en extremidades inferiores. La población estaba constituida por 10 voluntarios de altura = $1,79 \pm 0,07$ m, peso = 78 ± 6 kg y edad = 24 ± 1 años. En todos los casos los sujetos voluntarios fueron informados del tipo de registro y dieron su consentimiento escrito de conformidad.

B. Sistema de registro

El sistema de registro consistió en un sistema de videografía bidimensional. La cámara utilizada fue de tipo PAL-N a 25 cuadros por segundo con un tamaño de cuadro de 768 x 576 píxeles. La misma se ubicó a 4 metros del plano de filmación, teniendo en cuenta la nivelación y se utilizó un cubo de calibración [14].

Para la definición de los segmentos en el plano sagital se consideraron los puntos anatómicos establecidos por Winter [15], utilizando 10 marcadores recubiertos con material retrorreflectivo para cada mitad del cuerpo.

En la Fig. 1 Se muestran los puntos anatómicos de los segmentos articulados para la ubicación de los marcadores.

- Acromion (HOM).
- Base de las costillas sobre la línea media del torso (HAT).
- Cresta iliaca antero superior (ESP)
- Trocánter mayor del fémur (CAD).
- Cóndilo femoral lateral (ROD).
- Cabeza del peroné o fibula (FIB).
- Maléolo lateral externo (MAL).
- Talón (TAL).
- Cabeza del quinto metatarsiano (META).
- Punta del III dedo del pie (PUN).

La trayectoria de los marcadores fue determinada a partir de un software desarrollado anteriormente en el Laboratorio de Biomecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina [14]. Los datos obtenidos fueron filtrados con un filtro Butterworth, eligiendo la frecuencia de corte con el método de análisis de residuos.

Los segmentos representativos de los miembros inferiores, muslo, pierna y pie, se establecieron a partir de las líneas que unen los marcadores CAD-ROD, FIB-MAL y TAL-META respectivamente.

C. La maniobra deportiva

La técnica SJ consiste en realizar un salto máximo comenzando desde una posición semi-flexionada (muslo en posición horizontal). Inicialmente el sujeto debe mantener la posición durante 5 segundos para eliminar la mayor parte de la energía elástica acumulada durante la flexión [16]. Durante toda la realización del gesto, las manos deben ubicarse sobre las caderas.

Para la técnica de SJA se realiza el mismo gesto explicado anteriormente, pero adicional a esto se utiliza el balanceo de brazos. En el momento del despegue los brazos deben estar completamente extendidos con el objetivo de generar mayor energía y se logre un mayor salto [7]. Luego de realizar un calentamiento y práctica previa, los sujetos bajo estudio realizaron un salto vertical máximo en los dos tipos de *squat jump*. En la Fig. 2 se muestran los dos tipos de salto de la técnica *squat jump*, SJ y SJA.

El análisis de los datos registrados se realizó del 0% al 100% del ciclo limitándose el mismo entre dos instantes: cuando el individuo abandona la posición flexionada antes de realizar el salto y cuando recupera la postura vertical luego de amortiguar el salto. Cada ciclo comprendió tres períodos perfectamente definidos: salto (S), vuelo (V) y aterrizaje (A).

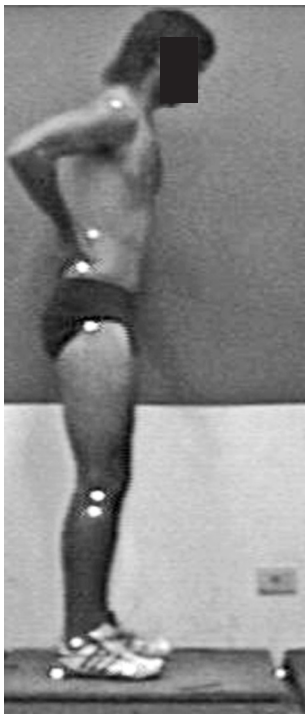


Fig. 1. Puntos anatómicos para la definición de los segmentos articulados.

Durante cada sesión de ejercicios, los sujetos realizaron 3 repeticiones para cada extremidad, descansando el tiempo que necesitaron entre cada una de ellas. Cada sujeto se instruyó acerca de realizar los ejercicios a su velocidad normal de ejecución y saltar a la mayor altura posible.

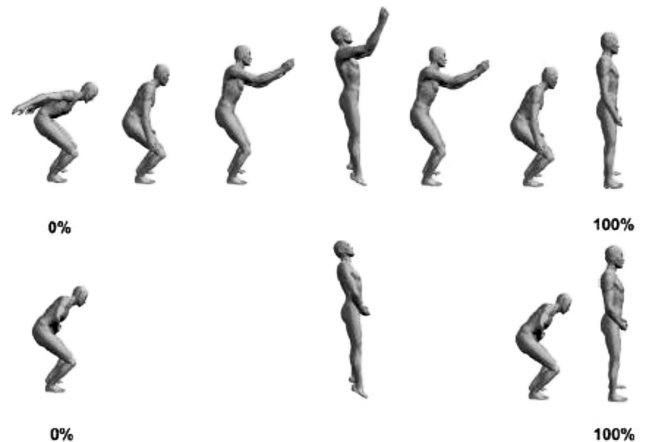


Fig. 2. Dos tipos de *squat jump*: SJ: *squat jump* sin balanceo de los brazos, SJA: *squat jump* con balanceo de brazos. Modificado de [17].

D. Presentación de datos

Con el objetivo de estudiar los parámetros registrados, se desarrolló un algoritmo en Matlab 6.5 cuya función es obtener las variables de interés a partir de los datos cinemáticos. El software desarrollado en la cátedra Biomecánica de la Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina [14], entrega los primeros datos sin filtrar de la posición de los marcadores, posteriormente son filtrados utilizando un filtro Butterworth, eligiendo la frecuencia de corte con el método de análisis de residuos. Se evaluaron los ángulos entre segmentos, posiciones y desplazamientos de los centros de masa y velocidades de las articulaciones anatómicas, en cada variante del ejercicio. Las variables analizadas se obtuvieron instante a instante a una frecuencia de 50 Hz utilizando las expresiones conocidas. Para el centro de masa de un segmento,

$$cm_{x,Segmento} = MarcaProx_x + FraccionProx \cdot (MarcaDist_x - MarcaProx_x); \quad (1)$$

donde *MarcaProx* es el marcador proximal, *MarcaDist* es el marcador distal y *FraccionProx* es la fracción proximal del centro de masa tabulado de cada segmento [15]. Para evaluar los ángulos de los segmentos,

$$\theta_{ij} = \arctan \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \quad (2)$$

donde los subíndices i y j indican los marcadores distal y proximal respectivamente. Los ángulos relativos se obtienen por simple diferencia. Las velocidades angulares se evalúan utilizando diferencias finitas.

Los resultados se expresaron a través de gráficas acotadas del 0% al 100% del gesto demostrando el valor medio de la variable con su correspondiente desvío estándar.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis del gesto

Las Figs. 3-5 presentan los ángulos de las articulaciones del miembro inferior promedio y su desvío estándar para la población realizando el SJ. El eje de abscisas representa el porcentaje del ciclo correspondiendo 0% al momento en que el sujeto está en flexión máxima y el 100% al momento en que el sujeto retorna a la posición erguida, luego de recuperar la postura. Las gráficas se encuentran divididas en tres períodos, que corresponden al salto (S), vuelo (V) y aterrizaje (A).

Durante el período de salto el sujeto se encuentra inicialmente en posición de flexión, donde las articulaciones se encuentran en el estado de mayor flexión del gesto. A medida que transcurre el período puede observarse como las articulaciones disminuyen la flexión para encontrarse prácticamente extendidas en el instante en que despegan los pies del suelo. En el período de vuelo no se observan grandes cambios en la posición de las articulaciones del miembro inferior salvo pequeñas oscilaciones debido a variaciones propias entre las distintas personas que realizan la actividad.

Por último, en el período de aterrizaje, la persona amortigua la caída de su propio peso por lo que se observa un pico de flexión-extensión de menor amplitud que el valor inicial (0%).

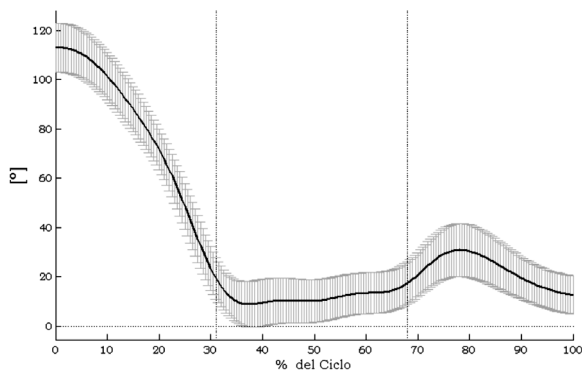


Fig. 3. Ángulo promedio de la articulación de la cadera en función del porcentaje del ciclo y el desvío estándar para el SJ.

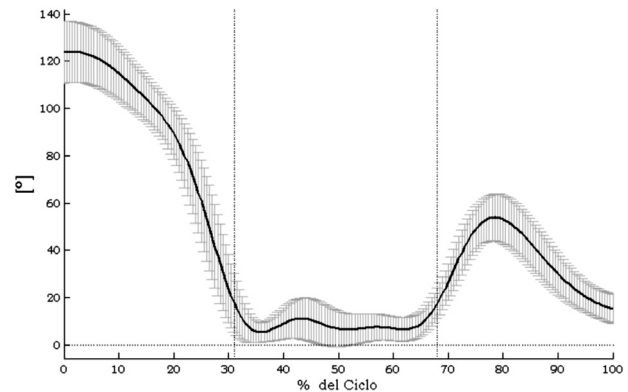


Fig. 4. Ángulo promedio de la articulación de la rodilla en función del porcentaje del ciclo y el desvío estándar para el SJ.

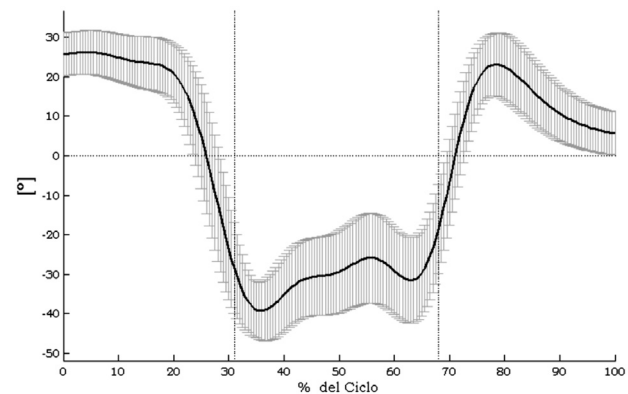


Fig. 5. Ángulo promedio de la articulación del tobillo en función del porcentaje del ciclo y el desvío estándar para el SJ.

En las Figs. 6-8 se presenta la velocidad angular promedio y el desvío estándar de cada una de las articulaciones del miembro inferior. Básicamente, se puede apreciar que todas las articulaciones poseen dos picos de signo opuesto ubicados en los períodos de S y A.

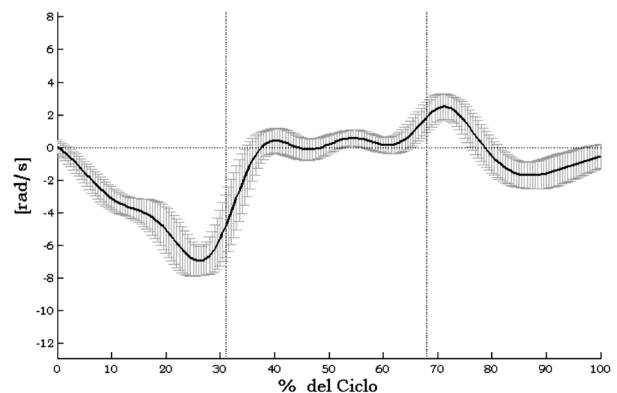


Fig. 6. Promedio de la velocidad angular de la cadera en función del porcentaje del ciclo y el desvío estándar para el SJ.

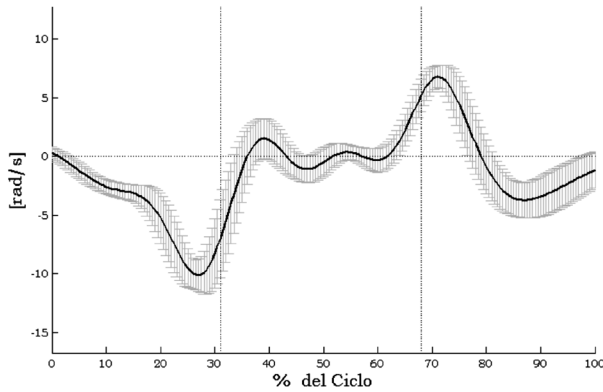


Fig. 7. Promedio de la velocidad angular de la rodilla en función del porcentaje del ciclo y el desvío estándar para el SJ.

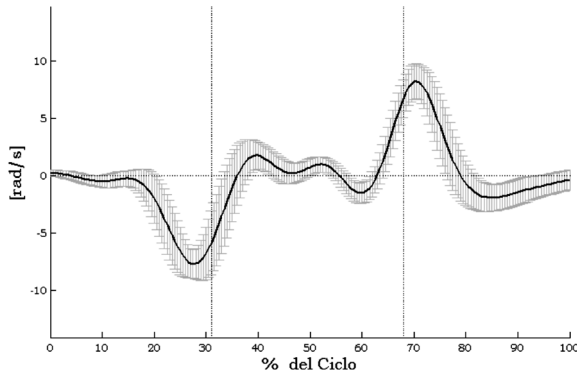


Fig. 8. Promedio de la velocidad angular del tobillo en función del porcentaje del ciclo y el desvío estándar para el SJ.

La Fig. 9 muestra la posición promedio de la altura del centro de masa del cuerpo entero y su desvío estándar. Se evalúa el CM del cuerpo entero considerando los CMs de cada uno de los segmentos ponderados por la masa de cada uno de ellos. Se observa que el mínimo del CM se halla al inicio del ciclo, cuando el individuo está en posición de flexión evolucionando hacia el mayor alcance en el período de vuelo.

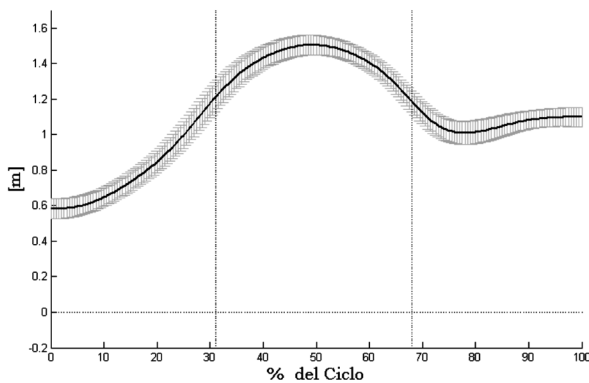


Fig. 9. Promedio del CM en función del porcentaje del ciclo y el desvío estándar para el SJ.

Hacia el final del ciclo de este gesto, el CM retorna a la posición de equilibrio de la persona en la postura erguida. La excursión máxima del centro de masa promedio (desde la posición de flexión hasta el máximo valor en el vuelo) es de 0,922 m. La diferencia entre la máxima altura en vuelo y la posición luego de recuperar la postura vertical es de 0,406 m. Este último valor de alguna manera indica la altura promedio de salto en la población registrada.

B. Comparación entre SJ y SJA

Las Figs. 10-12 presentan el promedio de los ángulos de las articulaciones de miembro inferior de la población sana. En todas las figuras se representan las curvas obtenidas en el ejercicio con líneas de trazos (SJ) y línea continua (SJA).

Las curvas del ángulo de la articulación de la cadera no presentó cambios significativos entre los dos tipos de salto en el período S. En el período A se observa un leve aumento en la flexión de la cadera en SJ para el 78% del ciclo aproximadamente, esto indicaría un mayor amortiguamiento. Una explicación posible correspondería a que parte de la amortiguación en el SJA se realiza con el balanceo de los brazos.

Para la articulación de la rodilla se observa una mayor diferencia al inicio del ciclo. Esto puede deberse a la posición de los brazos en SJ provocando una mayor flexión antes del ascenso posterior.

En el caso de la articulación del tobillo, en el primer período no se observan diferencias significativas, en ambas técnicas se manifiesta una plantar-flexión máxima en el 32% del ciclo durante el vuelo.

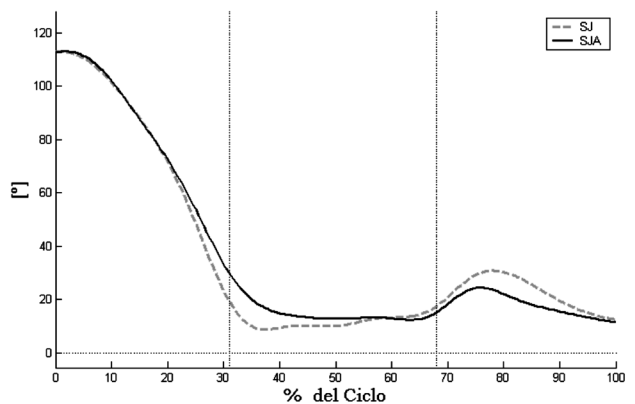


Fig. 10. Ángulo de la articulación de la cadera en función del porcentaje del ciclo.

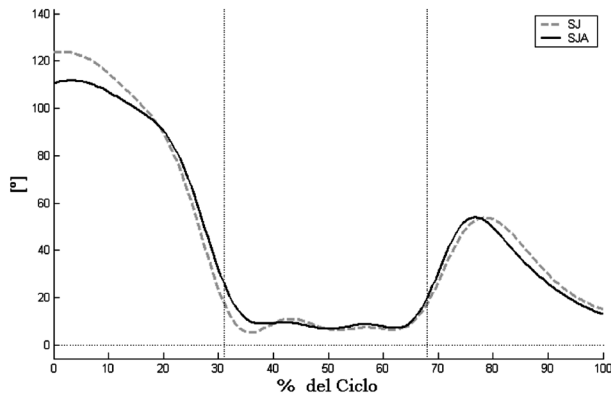


Fig. 11. Ángulo de la articulación de la rodilla en función del porcentaje del ciclo.

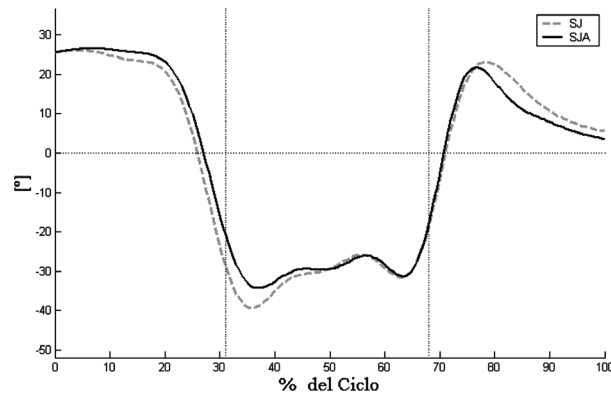


Fig. 12. Ángulo de la articulación del tobillo en función del porcentaje del ciclo.

En las Figs. 13-15 se muestran las velocidades angulares promediadas de las articulaciones. Para las curvas de la velocidad angular de las tres articulaciones del miembro inferior se observa en el período S un aumento de las velocidades angulares articulares para el gesto SJ respecto del gesto SJA. En los períodos V y A no se observan diferencias en la velocidad angular de ambos gestos.

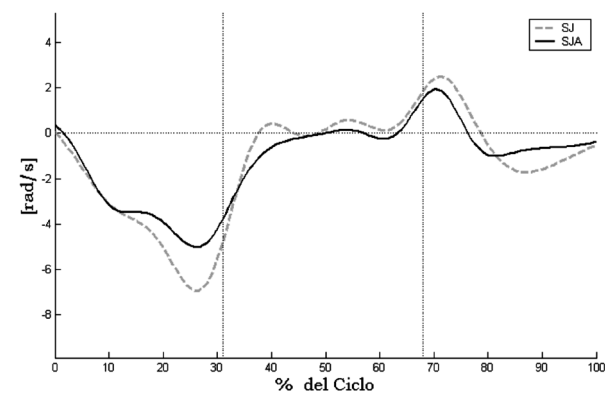


Fig. 13. Velocidad angular de la articulación de la cadera en función del porcentaje del ciclo.

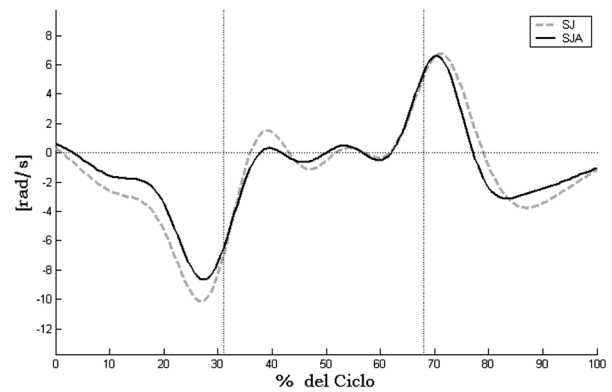


Fig. 14. Velocidad angular de la articulación de la rodilla en función del porcentaje del ciclo.

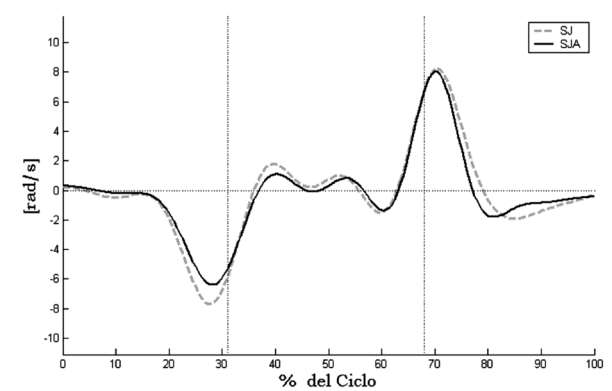


Fig. 15. Velocidad angular de la articulación del tobillo en función del porcentaje del ciclo.

En la Fig. 16 se presenta la posición vertical del centro de masa durante el ejercicio. En los períodos S y A no se presentan diferencias significativas entre cada técnica, sin embargo, en la fase V se observa un aumento en SJA para el 50% del ciclo aproximadamente, donde el sujeto alcanza la máxima altura.

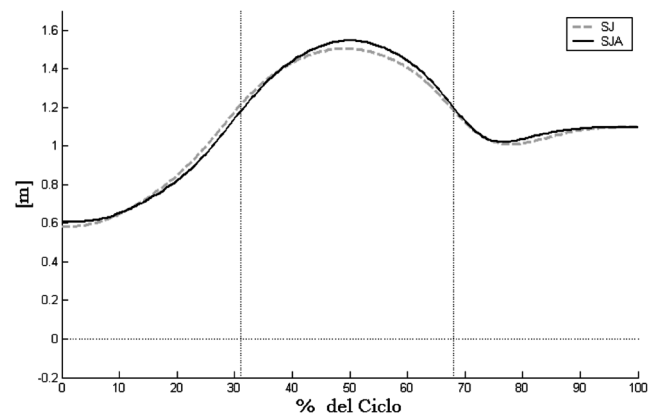


Fig. 16. Promedio del CM en función del porcentaje del ciclo.

Este aumento se debe a la ayuda en el impulso que provee el balanceo de los brazos. La máxima altura de salto para el gesto SJ es de 0,407 m en promedio y la altura de salto para el gesto SJA es de 0,45 m en promedio. En definitiva el aumento en la altura del salto por el balanceo de los brazos es de 10,6%.

IV. CONCLUSIÓN

En este trabajo se compararon parámetros cinemáticos por medio de dos técnicas de *squat jump*, que permitieron obtener resultados esperados con relación a estudios anteriores, se comprobó que el CM aumenta su altura cuando se realiza el SJA. Si bien se mencionó algunas diferencias en las curvas de ángulos, el gesto SJA, en general esta dentro del límite de la desviación estándar de SJ.

En las Figs. 13-15 los picos de velocidad angular extensora durante el período S, en las tres articulaciones del miembro inferior, indicaron de alguna manera la potencia generada para realizar el gesto. En este trabajo, se encuentra que en la variante del gesto sin ayuda de los brazos (SJ) este pico es mayor, significando esto un requerimiento de potencias articulares menores en el miembro inferior cuando se ayuda con el balanceo de los brazos. Algo similar ocurre en el período A pero sólo en la cadera se observa un pico de menor amplitud del gesto SJA que indicaría que está absorbiendo la caída con ayuda del balanceo de los brazos.

Si bien el estudio se encuentra todavía en las fases iniciales, demuestra ser una herramienta factible como referencias para futuros análisis del salto vertical en extremidades inferiores. La continuidad de este trabajo permitirá evaluar las capacidades de salto de poblaciones particulares, por ejemplo pacientes con cirugía de reconstrucción del ligamento cruzado anterior, que constituye el tema de interés en nuestro grupo de trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Rodacki A., Fowler N., Bennett S. Vertical jump coordination: Fatigue Effects. *Medicine & Science in sports & exercise*, 34, 105-116, 2002.
- [2] Hara M., Shibayama A., Takeshita D., Fukashiro S. The effect of arm swing on lower extremities in vertical jumping, *Journal of Biomechanics*, 39, 2503-2511, 2006.
- [3] Bobbert M.F., Gerritsen K.G.M., Litjens M.C.A., Van Soest A.J. Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28, 1402-1412, noviembre de 1996.
- [4] Bobbert M.F., Van Zandwijk J.P. Dynamics of force and muscle stimulation in human vertical jumping, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 303-310, febrero de 1999.
- [5] Ortiz J. Influencia del calentamiento previo sobre la saltabilidad en tenistas universitarios Facultad de Ciencias de la Rehabilitación. Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile.
- [6] Anderson F.C., Pandy M.G. Storage and utilization of elastic strain energy during jumping, *Journal of Biomechanics*, 26, 1413-1427, diciembre 1993.
- [7] Bobbert M., Jaspers T., Sijpkens I. Muscle Activation Patterns In Squat Jumps From Different Initial Positions. Institute for Fundamental and Clinical Human Movement Sciences, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, *Journal of Biomechanics*, 40, July 2007.
- [8] Athanasios V., Adrian L. A biomechanical analysis of good and poor performers of the vertical jump, *Ergonomics*, 48, 11(14), 1594-1603, 2005.
- [9] Liu Y., Peng C., Wei S., Chi J., Tsai F., Chen J. Active leg stiffness and energy stored in the muscles during maximal counter movement jump in the aged. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 16, 342-351, 2006.
- [10] Coventry E., O'Connor K., Hart B., Earl J., Ebersole K. The effect of lower extremity fatigue on shock attenuation during single-leg landing. *Clinical Biomechanics*, 21, 1090-1097, July 2006.
- [11] Christopher J.H. Neuromechanical strategies employed to increase jump height during the initiation of the squat jump. *Journal of electromyography and kinesiology*, 14, 515-521, 2004.
- [12] Moritani T., Shibata M. Premovement electromyographic silent period and a-motoneuron excitability, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 4, 27-36, enero 1994.
- [13] Mortimer J.A., Eisenberg P., Palmer S.S. Premovement silence in agonist muscles preceding maximum efforts, *Experimental Neurology*, 98, 542-554, marzo 1987.
- [14] Braidot A., Cian L., Cherniz A., Gallardo D., Spinetto J. Desarrollo de sistema de videografía digital para análisis de la marcha, II Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, La Habana, Cuba, 2001.
- [15] Winter D.A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Wiley, 1990.
- [16] Sáez E. Variables determinantes en el salto vertical. *Revista Digital EF y deportes*, 10, 70, marzo 2004. [Online]. Disponible en: <http://www.efdeportes.com/efd70/salto.htm>.
- [17] Lees A., Vanrenterghem J., De Clercq D. Understanding how an arm swing enhances performance in the vertical jump, *Journal of Biomechanics*, 37, 1929-1940, 2004.