

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
VIDEOGRAMETRÍA DIGITAL PARA ANÁLISIS  
DE SALTABILIDAD EN DEPORTISTAS**

**DIEGO FERNANDO PERDOMO ORTIZ**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA – HUILA  
2010**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
VIDEOGRAMETRÍA DIGITAL PARA ANÁLISIS  
DE SALTABILIDAD EN DEPORTISTAS**

**DIEGO FERNANDO PERDOMO ORTIZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para  
obtener el título de Ingeniero Electrónico**

**DIRECTOR:**

**JOSÉ DE JESÚS SALGADO PATRÓN**  
**Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
NEIVA – HUILA  
2010**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

**Firma del Director**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Neiva, Noviembre de 2010**

## **DEDICATORIA**

Al todopoderoso, el ser supremo que me ha guiado en toda mi vida.  
A mi padre Fernando Perdomo, por ser la persona que siempre he admirado y me ha enseñado a hacer las cosas bien hechas.  
A mi madre Yolanda Ortiz, quien siempre me ha acompañado y apoyado en todos los momentos de mi vida.  
A mis hermanas Tatiana y Karla y a mi sobrino Juan Diego.  
A mis amigos del alma, los que han compartido conmigo muchas experiencias.

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia por apoyarme en toda mi carrera e inculcarme los valores como el compromiso y la responsabilidad, entre muchos, para poder alcanzar grandes metas.

Al Ingeniero Jesús Salgado director de este proyecto de grado, por su apoyo, confianza y colaboración.

Al profesor Saulo Chamorro coordinador del laboratorio *ALTIUS* de la Universidad Surcolombiana por su interés en este proyecto y por la invaluable colaboración que me prestó durante el desarrollo del mismo. Igualmente al profesor Fernando Salamanca asistente del laboratorio *ALTIUS* por su colaboración.

A la Fisioterapeuta Tatiana Perdomo, mi hermana, por idear este proyecto y porque sus explicaciones y apreciaciones me ayudaron en muchas oportunidades a comprender mejor el tema y a avanzar mucho más rápido.

A los Ingenieros Vladimir Mosquera y Yamil Cerquera por sus consejos de apoyo y por la amistad brindada en toda la carrera.

A todos los compañeros de estudio y amigos que colaboraron en saltar con el fin de probar el sistema y hacer las respectivas correcciones y mejoramiento.

## TABLA DE CONTENIDO

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>RESUMEN</b>  |             |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>   | 16          |
| <b>1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VIDEOGRAMETRÍA DIGITAL PARA ANÁLISIS DE SALTABILIDAD</b> | <b>18</b>   |
| 1.1 FILMACIÓN DEL VIDEO   | 18          |
| 1.1.1 Escenario de Filmación  | 19          |
| 1.1.2 Ubicación de Marcadores   | 20          |
| 1.1.3 Protocolo para el Salto Vertical  | 24          |
| 1.2 CALIBRACIÓN   | 26          |
| 1.3 CAPTURA Y CONVERSIÓN DE FORMATO   | 26          |
| 1.4 PROCESAMIENTO DE LOS MARCADORES   | 27          |
| 1.4.1 Segmentación  | 27          |
| 1.4.2 Eliminación de falsos positivos   | 28          |
| 1.4.3 Agrupamiento de regiones  | 28          |
| 1.5 MODELO BIOMECÁNICO  | 29          |
| 1.6 CÁLCULO DE VARIABLES  | 30          |
| 1.7 VISUALIZACIÓN DE GRÁFICAS   | 31          |
| <b>2. EQUIPOS, SOFTWARE Y MATERIALES DE FILMACIÓN</b>                                     | <b>33</b>   |
| 2.1 SELECCIÓN DE LA VIDEOCÁMARA   | 33          |
| 2.2 MARCADORES  | 34          |
| 2.3 BASE PARA CALIBRACIÓN   | 34          |
| 2.4 SELECCIÓN DE SOFTWARE   | 35          |
| <b>3. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS PARA EL ANÁLISIS DE SALTABILIDAD</b>                   | <b>36</b>   |
| 3.1 ADQUISICIÓN DEL VIDEO   | 36          |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.2       | SEGMENTACIÓN DE LOS MARCADORES                                      | 38        |
| 3.2.1     | Obtención de la matriz de color de los marcadores                   | 38        |
| 3.2.2     | Obtención de la matriz de color del video                           | 39        |
| 3.2.3     | Adaptación del vector media a una matriz                            | 39        |
| 3.2.4     | Obtención de la distancia Euclídea                                  | 40        |
| 3.2.5     | Comparación de la distancia con el umbral                           | 40        |
| 3.3       | MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN SEGMENTADA                                | 40        |
| 3.4       | DESCRIPCIÓN Y EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS                         | 41        |
| 3.5       | MODELO BIOMECÁNICO  | 43        |
| 3.6       | CÁLCULO DE VARIABLES CINEMÁTICAS Y CINÉTICAS, Y ÁNGULOS ARTICULARES | 44        |
| 3.6.1     | Variables Cinemáticas   | 46        |
| 3.6.2     | Variables Cinéticas   | 47        |
| 3.6.3     | Ángulos Articulares   | 48        |
| <b>4.</b> | <b>SOFTWARE APLICATIVO</b>  | <b>51</b> |
| 4.1       | DESCRIPCIÓN DEL PANEL CENTRAL                                       | 51        |
| 4.2       | EJECUCIÓN DEL SOFTWARE  | 52        |
| 4.3       | RESULTADOS  | 54        |
| <b>5.</b> | <b>VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE VIDEOGRAMETRÍA</b>                     | <b>57</b> |
| 5.1       | VARIABLES CINEMÁTICAS   | 57        |
| 5.2       | VARIABLES CINÉTICAS   | 60        |
| 5.3       | ÁNGULOS DE ARTICULARES  | 65        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>                               | <b>68</b> |
| <b>7.</b> | <b>TRABAJO A FUTURO</b>   | <b>70</b> |
|           | <b>FUENTES DE CONSULTA</b>  | <b>71</b> |
|           | <b>ANEXOS</b>   | <b>73</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   | <b>Pag.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1. Diagrama de bloques del sistema   | 18          |
| Figura 2. Dimensiones del escenario de filmación  | 19          |
| Figura 3. Huesos de las extremidades inferiores   | 20          |
| Figura 4. Ubicación de los cinco marcadores   | 21          |
| Figura 5. Huesos de la pelvis   | 21          |
| Figura 6. Ubicación primer marcador (Aproximación del CG)   | 22          |
| Figura 7. Ubicación segundo marcador (Trocánter Mayor)  | 22          |
| Figura 8. Ubicación tercer marcador (Epicóndilo femoral lateral)  | 23          |
| Figura 9. Ubicación de cuarto y quinto marcador (Maléolo lateral y cabeza del quinto metatarsiano)        | 24          |
| Figura 10. Posicionamiento del sujeto y marca de referencia para el salto                                 | 25          |
| Figura 11. Secuencia de movimiento en un Squat Jump   | 25          |
| Figura 12. Secuencia de movimiento en un Countermovement Jump   | 26          |
| Figura 13. Representación de los dos tipos de conectividad  | 28          |
| Figura 14. Representación biomecánica de puntos y líneas  | 29          |
| Figura 15. Visualización de gráfica con eje X en cuadros e interpolación sencilla                         | 32          |
| Figura 16. Visualización de gráfica con eje X en tiempo e interpolación con spline cúbicos                | 32          |
| Figura 17. Cámara digital utilizada en el sistema de videogrametría                                       | 33          |
| Figura 18. Base utilizada durante el proceso de calibración y escena de gran contraste con los marcadores | 34          |
| Figura 19. Diagrama de flujo del procesamiento  | 37          |
| Figura 20. Aplicación de operaciones morfológicas   | 41          |
| Figura 21. Aplicación de discriminantes en objetos no deseados  | 43          |
| Figura 22. Diagrama de flujo Modelo Biomecánico   | 44          |
| Figura 23. Diagrama de flujo del cálculo de variables   | 45          |
| Figura 24. Obtención del ángulo articular de la rodilla   | 49          |
| Figura 25. Obtención del ángulo articular del tobillo   | 50          |

|   |    |
|---|----|
| Figura 26. Panel central del software   | 51 |
| Figura 27. Ventana para calibración   | 53 |
| Figura 28. Video procesado  | 54 |
| Figura 29. Altura recorrida CG  | 54 |
| Figura 30. Velocidad CG   | 54 |
| Figura 31. Aceleración CG   | 55 |
| Figura 32. Fuerza vertical  | 55 |
| Figura 33. Potencia mecánica  | 55 |
| Figura 34. Ángulo articulación rodilla  | 56 |
| Figura 35. Ángulo articulación tobillo  | 56 |
| Figura 36. Velocidad vs alturas del sistema Axon Jump                           | 59 |
| Figura 37. Constante de la gravedad en la caída del tiempo de vuelo en el salto | 60 |
| Figura 38. Fuerza vertical obtenida de plataforma de fuerza                     | 61 |
| Figura 39. Características de la fuerza vertical en el salto                    | 61 |
| Figura 40. Fuerza vertical obtenida del sistema de videogrametría digital       | 62 |
| Figura 41. Potencia mecánica obtenida en test de salto                          | 63 |
| Figura 42. Potencia mecánica obtenida en sistema de videogrametría              | 63 |
| Figura 43. Medición del ángulo articular de la rodilla                          | 66 |
| Figura 44. Medición del ángulo articular del tobillo                            | 66 |

## LISTA DE CUADROS

|   | <b>Pag.</b> |
|---|-------------|
| Cuadro 1. Procedimiento requerido para calcular el ángulo de la rodilla   | 49          |
| Cuadro 2. Procedimiento para calcular el ángulo 1 si la posición X del segundo marcador es mayor que el tercer marcador   | 50          |
| Cuadro 3. Datos de altura y velocidad del sistema de videogrametría con referencia al sistema Axon Jump   | 58          |
| Cuadro 4. Porcentaje de error de altura y velocidad del Sistema de videogrametría con referencia al sistema Axon Jump   | 58          |
| Cuadro 5. Datos de potencia mecánica del sistema de videogrametría con referencia a la ecuación de Lara   | 64          |
| Cuadro 6. Porcentaje de error potencia mecánica del sistema de videogrametría con respecto a la ecuación de Lara  | 65          |
| Cuadro 7. Datos de ángulos articulares de posición inicial y de despegue del sistema de videogrametría con referencia a las mediciones del goniómetro               | 67          |
| Cuadro 8. Porcentaje de error de ángulos articulares de posición inicial y de despegue del sistema de videogrametría con referencia a las mediciones del goniómetro | 67          |

## LISTA DE ANEXOS

|   | <b>Pag.</b> |
|---|-------------|
| ANEXO A. Equipos comerciales de evaluación deportiva      | 74          |
| ANEXO B. Sistemas comerciales para análisis de movimiento | 77          |

## GLOSARIO

**FLUJO DE DATOS:** Se llama así a la cantidad de información por segundo que se lee del archivo de vídeo para reproducirlo. Este es un factor determinante en la calidad final del video, al igual que con el tamaño de imagen, a mayor flujo de datos mejor calidad de imagen.

**FORMATO Ó ESCANEEO PROGRESIVO:** Visualiza todas las líneas horizontales de una sola vez como si fuesen un único fotograma, se usa en monitores de computadores, proyectores y televisión digital.

**FPS (FRAMES PER SECOND) Ó CUADROS POR SEGUNDO:** Es una medida de cómo se muestra el movimiento del vídeo. Cada cuadro es una imagen fija que se superpone en la retina unas sobre otras dando la sensación de continuidad y movimiento.

**RESOLUCIÓN DE PANTALLA:** Es el número de píxeles o puntos que pueden existir, es también llamada relación de aspecto. Cada punto es la parte más pequeña que un monitor es capaz de representar y ese punto representa un solo color.

**SALTO CON CONTRAMOVIMIENTO Ó *COUNTERMOVEMENT JUMP*:** Permite al ejecutante realizar primero una fase de movimiento excéntrica y luego una fase concéntrica. De esta forma, en este salto es posible recurrir a la utilización del ciclo de acortamiento-estiramiento, produciendo una mayor cantidad de fuerza, con el consecuente aumento en la elevación del centro de gravedad, todo esto unido a una mayor eficacia mecánica (menor gasto energético).

**SALTO SIN CONTRAMOVIMIENTO Ó *SQUAT JUMP*:** Es una modalidad de salto incluida en el test de Bosco. Sólo permite una fase de movimiento concéntrica. Para su ejecución, el sujeto se pone las manos en las caderas, y las piernas con las rodillas flexionadas en un ángulo de 90°. Después de conservar la posición durante cinco segundos, se debe realizar un salto lo más alto posible, evitando cualquier acción de contramovimiento y sin soltar las manos, cayendo en la misma posición.

**PLANOS ANATÓMICOS:** Son las referencias espaciales que sirven para describir la disposición de los diferentes tejidos, órganos y sistemas, y las relaciones que hay entre ellos. Clásicamente, se parte del supuesto de que el cuerpo que va a ser estudiado se encuentra en la denominada *posición anatómica*.

**PLANOS CORONALES O FRONTALES:** Se orientan de manera vertical, de esta forma dividen al cuerpo en anterior y posterior.

**PLANOS SAGITALES:** Al igual que el plano coronal se orienta verticalmente; sin embargo, son perpendiculares a los planos coronales, de esta forma dividen del cuerpo en dos zonas: derecha e izquierda. Al plano que discurre centralmente en el cuerpo y a su vez forma de igual manera a las zonas izquierda y derecha se le llama: *plano medio sagital*.

**PLANOS TRANSVERSALES, HORIZONTALES O AXIALES:** Como su nombre lo indica se orientan horizontalmente, a diferencia de los otros dos planos. De esta manera dividen el cuerpo en zona inferior y superior.

**RUIDO:** En términos de señales, es la compuesta por información indeseada, ajena a la señal original.

## RESUMEN

Este proyecto presenta un sistema para el análisis cinemático y cinético del salto vertical. El sistema se basa en el uso de técnicas de videogrametría y procesamiento de imágenes para registrar la secuencia del movimiento ejecutado. Con este fin, se utilizó una cámara de video digital, ubicada a una distancia específica del deportista, capturando la trayectoria de su salto vertical en el plano sagital. También se desarrolló un modelo biomecánico bidimensional de los miembros inferiores que, a partir de puntos anatómicos referenciados, determina los ángulos articulares de la rodilla y el tobillo, durante el tiempo completo de duración del salto. La identificación de dichos puntos fue facilitada mediante el uso de marcadores reflectivos, ubicados en cinco posiciones anatómicas diferentes.

Después, se diseñó y desarrolló un programa aplicativo para el registro y procesamiento de los datos obtenidos por medio de la cámara, utilizando las herramientas de procesamiento digital de imágenes y la interface de usuario GUI que ofrece Matlab. La aplicación desarrollada captura y procesa el video, detecta cada uno de los marcadores en la imagen, realiza los cálculos para hallar las variables cinemáticas, cinéticas y ángulos articulares, para al final visualizar a modo de gráfica los valores de: recorrido, velocidad, aceleración, fuerza, potencia y ángulos articulares de los miembros inferiores, a lo largo de la ejecución del salto.

Por último, se diseñó un protocolo y se realizaron pruebas experimentales a cinco sujetos, para comparar las curvas entregadas por el software con respecto a las curvas teóricas encontradas en la literatura y datos obtenidos por otros sistemas de medición. A pesar de las limitaciones del sistema referentes al análisis bidimensional del salto vertical, se lograron obtener resultados satisfactorios con referencia a otros métodos utilizados actualmente y a instrumentos específicos para mediciones.

**Palabras clave:** videogrametría, salto vertical, biomecánica, plano sagital, ángulos articulares.

## ABSTRACT

This project presents a system for kinematic and kinetic analysis of vertical jump. The system is based on the use of techniques of videogrammetry and image processing to register the sequence of the movement executed. It was used a digital camcorder, located a specific distance from the athlete, capturing the trajectory of his vertical jump in the sagittal plane. A bidimensional biomechanical model of the lower limbs, which, from the referenced anatomical points, determines the joint angles of the knee and ankle during the total time of the jump, was also developed. The identification of those points was facilitated by reflective markers, located in five different anatomical positions.

Furthermore, an application program for the registering and processing of data which is obtained through the camera, using the tools of digital image processing and the users interface GUI offered by Matlab, was designed and developed. The developed application captures and processes the video; it also detects every single marker on the image, and carries out calculations to find kinematic, kinetic variables and joint angles, in order to view the graphics of the values of distance, speed, acceleration, strength, power and joint angles of the lower limbs, along the implementation of jump.

Finally, a protocol was designed and there were pilot tests carried out to five subjects in order to compare the curves delivered by the software with the curves which were found theoretically in the literature and obtained data by another measurement system. In spite of the limitations of the system related to the analysis of two-dimensional vertical jump, it was possible to obtain satisfactory results with reference to other methods currently used and to specific measuring equipment.

**Key Words:** videogrammetry, vertical jump, biomechanics, sagittal plane, joint angles.

## INTRODUCCIÓN

La acción de saltar es considerada como una de las cualidades básicas en un deportista que determina ciertos niveles de potencia, rapidez, coordinación, fuerza y velocidad, cuando se evalúa funcionalmente su estado físico, su proyección y su retroalimentación. El hecho de aplicar una fuerza músculo esquelética que genera una velocidad inicial del cuerpo en un determinado ángulo de despegue y en completa resistencia o contraria a la fuerza de gravedad para obtener una determinada distancia, establece la complejidad del mismo. Las evaluaciones de saltabilidad tienen como objetivo determinar la fuerza contráctil, potencia absoluta y relativa así como características elásticas de las extremidades inferiores.

El desarrollo de sistemas de videogrametría digital conforma una parte fundamental dentro del campo de la medicina deportiva o del estudio de la biomecánica, ya que permite a los especialistas realizar el análisis tridimensional o bidimensional de variables y curvas que caracterizan la cinemática y cinética del movimiento del cuerpo humano, logrando de esta manera corregir errores en los movimientos efectuados.

En el campo de la medicina deportiva se hace indispensable contar con sistemas de videogrametría digital en dos dimensiones (2-D) para analizar los movimientos efectuados en el salto, que sean capaces de realizar diversos análisis de todas y cada una de las variables cinéticas y cinemáticas que influyen en la manifestación de los miembros inferiores del sujeto.

Actualmente en el *Laboratorio de Evaluación y Desarrollo del Rendimiento Físico LEDRF ALTIUS* de la Universidad Surcolombiana, las técnicas para el análisis de saltabilidad consisten en una serie de saltos sobre una plataforma, la cual es capaz de medir tiempos de vuelo y tiempos de contacto de cada salto determinando el desplazamiento del centro de gravedad de cada sujeto en cada impulso, siendo posible a través de estos datos determinar de forma indirecta las propiedades músculo - esquelética y diagnosticar el rendimiento de los deportistas.

Por tanto es una oportunidad enorme el poder incursionar en tan importante campo, donde, se podría mostrar ante el mercado de la instrumentación deportiva nacional e internacional un sistema de videogrametría que obtiene de forma directa, variables de potencia y fuerza muscular a través del salto vertical, además de otras variables importantes generadas en la misma ejecución, evitando que las necesidades de instrumentación sean suplidas fuera del país.

A manera de introducción y contextualización, en el **Capítulo 1** se describe detalladamente el sistema de videogrametría, explicando cada uno de los bloques, como lo es el protocolo de filmación, la calibración, la captura y conversión de los videos, el procesamiento de los marcadores, el cálculo de las variables y por último la visualización grafica de variables junto con el modelo biomecánico.

En el **Capítulo 2** se describe las características más importantes a la hora de seleccionar la cámara digital utilizada en el sistema, los marcadores, la base que sirve como calibración y por último el software de programación.

En el **Capítulo 3** se desarrollan los algoritmos para el análisis de saltabilidad, empezando por la descripción detallada de la adquisición del video, la segmentación de los marcadores, el desarrollo del modelo biomecánico y el cálculo de variables cinemáticas y cinéticas, y ángulos articulares.

En el **Capítulo 4** se describe de forma general el software aplicativo para el usuario, explicando cada detalle del panel central y su correcta ejecución. Por último se muestran los resultados obtenidos por el software, en el cual un sujeto realizó una modalidad de salto vertical.

En el **Capítulo 5** se realizaron las pruebas que sirvieron para la validación del sistema y su respectivo análisis estadístico, se dividieron en tres secciones, como son: las variables cinemáticas, las variables cinéticas y los ángulos articulares.

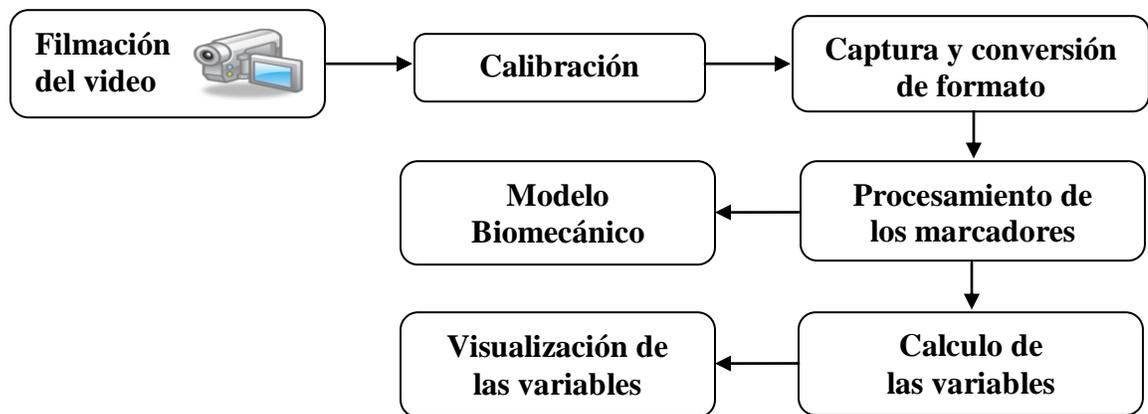
Por último en el **Capítulo 6** se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto, dando algunas sugerencias para un trabajo a futuro.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VIDEOGRAMETRÍA DIGITAL PARA ANALISIS DE SALTABILIDAD

La videogrametría es una técnica derivada de la fotogrametría que se vale de imágenes de algún objeto tomadas desde varios puntos de vista para realizar una reconstrucción tridimensional de él (Diaz et al., 2006). Aunque la videogrametría es una aproximación usada en la reconstrucción tridimensional, puede ser aplicada para el análisis bidimensional del movimiento, mediante el uso de una cámara situada paralela al plano que se analizará.

El desarrollo completo del sistema de videogrametría se describe en el diagrama de bloques que se expone en la Figura 1. Para las cuatro últimas etapas del diagrama de bloques se desarrolló una aplicación para Windows utilizando la interfaz grafica de Matlab – Guide.

**Figura 1. Diagrama de bloques del sistema**



## 1.1 FILMACIÓN DEL VIDEO

La etapa de filmación del video es una de las más importantes en el sistema debido a que esta captura cada cuadro del video que será procesado más adelante por los algoritmos de procesamiento digital de imágenes, por tal motivo, es indispensable una buena videocámara para la filmación. En el Capítulo 2 se enuncian los parámetros de selección de la cámara.

Por el hecho de registrar una secuencia de movimientos realizados en el salto vertical, es necesario tener algunos procedimientos estandarizados para la repetitividad en las pruebas ejecutadas con los sujetos a evaluar. Por consiguiente la filmación del video está dividida en tres secciones las cuales se deben tener en cuenta siempre que se vaya a realizar una prueba de salto vertical.

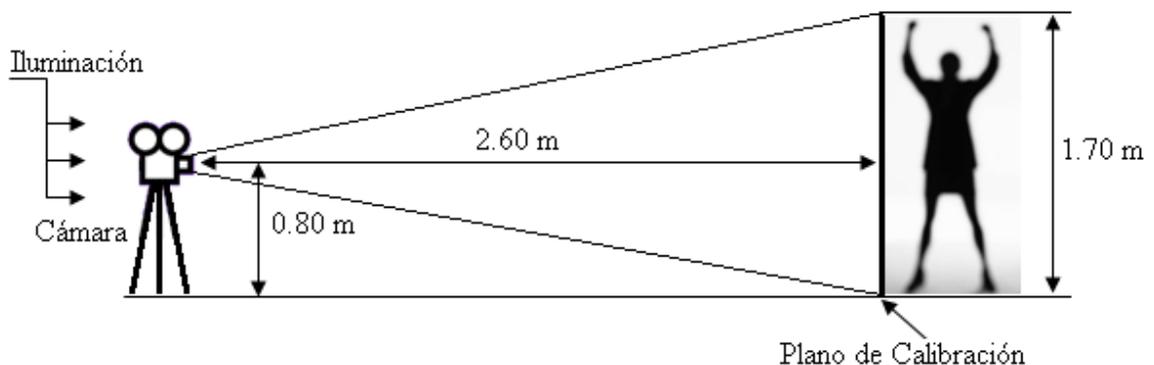
**1.1.1 Escenario de Filmación.** El escenario de filmación es el espacio físico en el cual se realizan las filmaciones del gesto deportivo. Para el proyecto, éste debe tener las dimensiones suficientes para colocar la cámara a 2.60 m del plano de filmación, una dimensión más pequeña produce que el marcador del centro de gravedad (CG) no quede registrado en el caso en que el sujeto realice un salto de más de 40 cm; y una distancia mayor del especificado genera que los marcadores tengan menos área para el programa de reconocimiento, lo que produciría datos erróneos.

La distancia del centro óptico de la cámara debe estar a 80 cm del piso, esta distancia se genera por la condición de que el centro óptico de la cámara deberá apuntar al centro de la base de calibración que tiene por altura 160 cm, la consecuencia de no tener en cuenta la anterior recomendación produciría que las alturas halladas en el sistema sean incorrectas al haber diferencias entre las distancias de pixeles y las distancias reales.

La iluminación de la escena debe estar de forma que la luz esté de frente al plano de calibración, es decir que la iluminación este en el mismo sentido en que la cámara esté filmando. En el caso de los videos utilizados para realizar las pruebas y correcciones, se aprovechó la iluminación natural del laboratorio que servía como escenario. En las primeras pruebas realizadas se utilizó iluminación artificial para televisión, pero resultó que esta se debía hacer con el escenario totalmente oscuro, y para realizar las pruebas de salto en esas condiciones se tendría que estar en horas de la noche, lo cual es algo inusual para realizar las pruebas de salto vertical en deportistas.

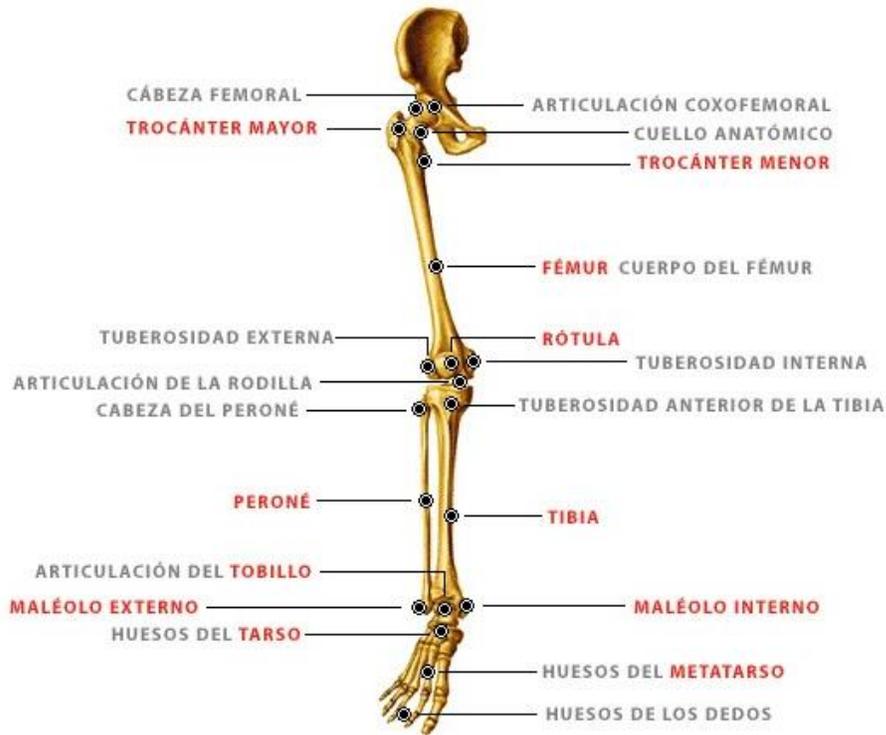
Las dimensiones del escenario de filmación para el cual el sistema está diseñado se muestran en la Figura 2.

**Figura 2. Dimensiones del escenario de filmación**



**1.1.2 Ubicación de Marcadores.** La ubicación de los marcadores es la forma de aproximar los puntos anatómicos del sujeto a analizar. En la Figura 3 se observa la localización de forma general los huesos de las extremidades inferiores.

**Figura 3. Huesos de las extremidades inferiores**

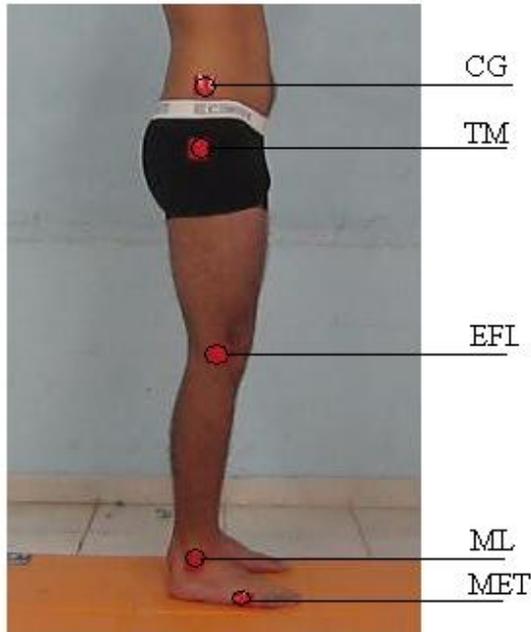


Fuente: <https://sites.google.com/site/cienciasnaturalesbiologiaii/sistema-oseo>

En el proyecto se ubican cinco marcadores en el lado derecho de la extremidad inferior del deportista, independientemente del hemisferio predominante en el sujeto, por tal fin la ropa debe tener un espesor mínimo y seguir el contorno natural del cuerpo.

En orden descendente los cinco puntos son: la *aproximación del Centro de Gravedad (CG)*, *Trocánter mayor (TM)*, *Epicóndilo femoral lateral (EFL)*, *Maléolo lateral (ML)* y *Cabeza de quinto metatarsiano (MET)*, tal como se ven en la Figura 4. Estos puntos son identificados con el dedo pulgar o el índice, luego el sitio es soltado para evitar cualquier distorsión de la piel, y en seguida es relocalizado y marcado.

**Figura 4. Ubicación de los cinco marcadores**

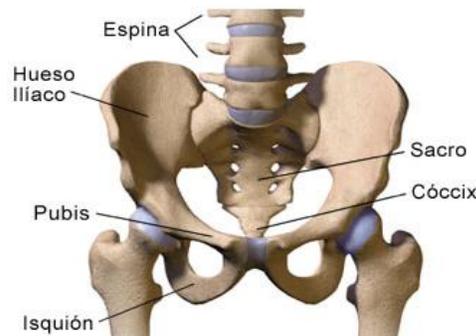


A continuación se especifican individualmente la localización de cada marcador en su punto anatómico correspondiente.

**Primer marcador: Aproximación del Centro de Gravedad (CG)**

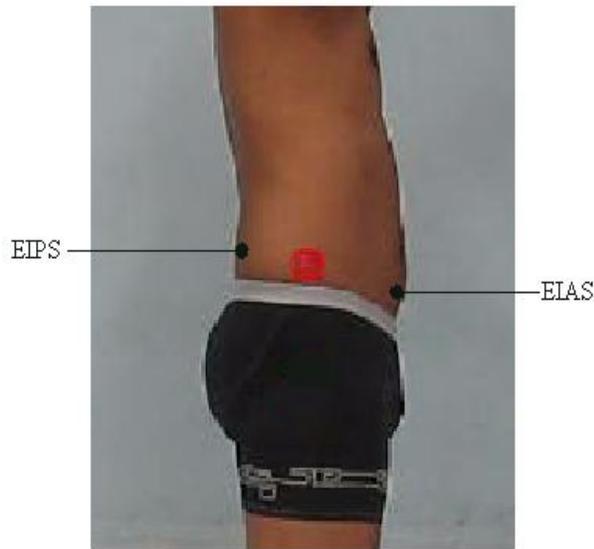
Según el *Modelo de Seguimiento del Centro de Masa en la Marcha* (Martínez, 2009), la aproximación del centro de gravedad (CG) se ubica en la región sacra, dentro de los huesos de la pelvis (ver Figura 5), entre el punto medio de la espina iliaca postero-superior (EIPS) y la espina iliaca antero-superior (EIAS), véase la Figura 6. La cresta iliaca se puede localizar fácilmente al situar al sujeto de pie y poner las manos alrededor de sus caderas.

**Figura 5. Huesos de la Pelvis**



Fuente: [http://www.allina.com/mdex\\_sp/SD2136G.HTM](http://www.allina.com/mdex_sp/SD2136G.HTM)

**Figura 6. Ubicación primer marcador (Aproximación del CG)**



**Segundo marcador: Trocánter mayor (TM)**

Está situado unos 10 cm por debajo de la cara más lateral de la cresta iliaca. Los trocánteres son fáciles de identificar, son la parte ósea más lateral de la zona de la cadera. La ubicación del trocánter mayor puede verse en la Figura 7.

**Figura 7. Ubicación segundo marcador (Trocánter Mayor)**

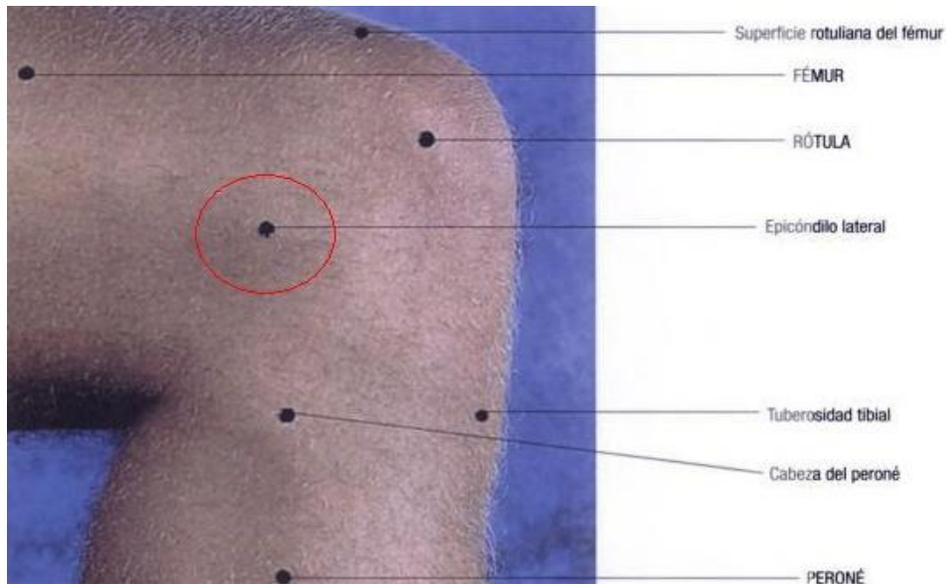


**Fuente: FIELD, Derek. Anatomía. Palpación y localización superficial. 2004**

### **Tercer marcador: Epicóndilo femoral lateral (EFL)**

La superficie lateral plana del epicóndilo femoral lateral se puede palpar fácilmente, está situada posterior al borde lateral de la rotula. La ubicación del Epicóndilo femoral lateral puede verse en la Figura 8.

**Figura 8. Ubicación tercer marcador (Epicóndilo femoral lateral)**



**Fuente: FIELD, Derek. Anatomía. Palpación y localización superficial. 2004**

### **Cuarto marcador: Maléolo lateral (ML)**

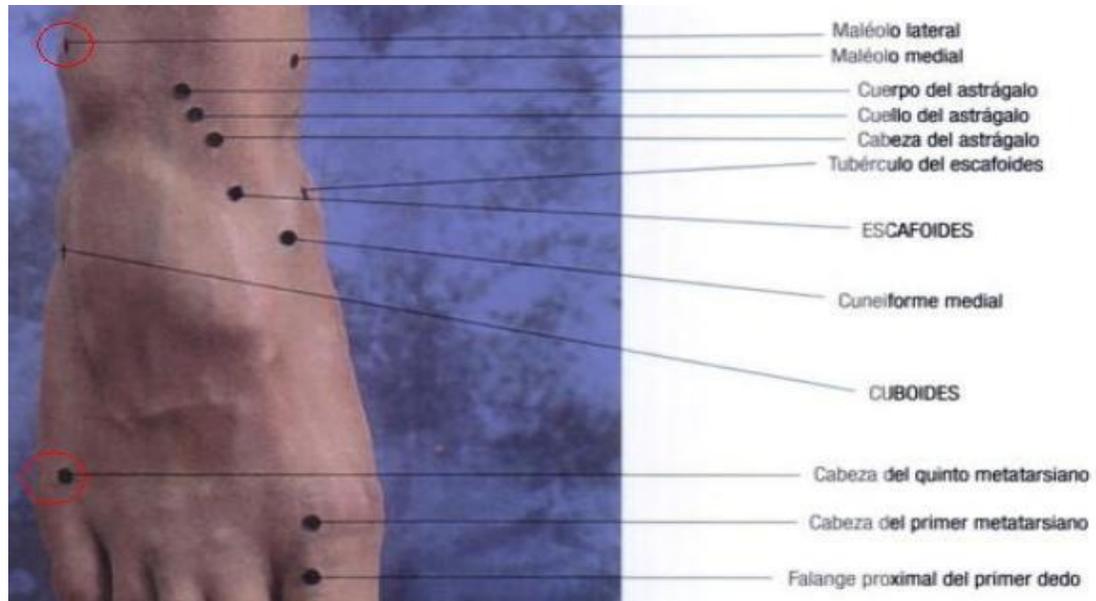
Este punto anatómico está ubicado en lo que se denomina comúnmente tobillo, el maléolo lateral o exterior es el apoyo del hueso del peroné.

### **Quinto marcador: Cabeza del quinto metatarsiano (MET)**

Está situado en la parte lateral del pie, posee dos carillas articulares, una posterior (para el cuboides) y otra interna (para el cuarto metatarsiano).

En la Figura 9 se muestra la ubicación del cuarto y quinto marcador.

**Figura 9. Ubicación de cuarto y quinto marcador (Maléolo lateral y cabeza del quinto metatarsiano)**



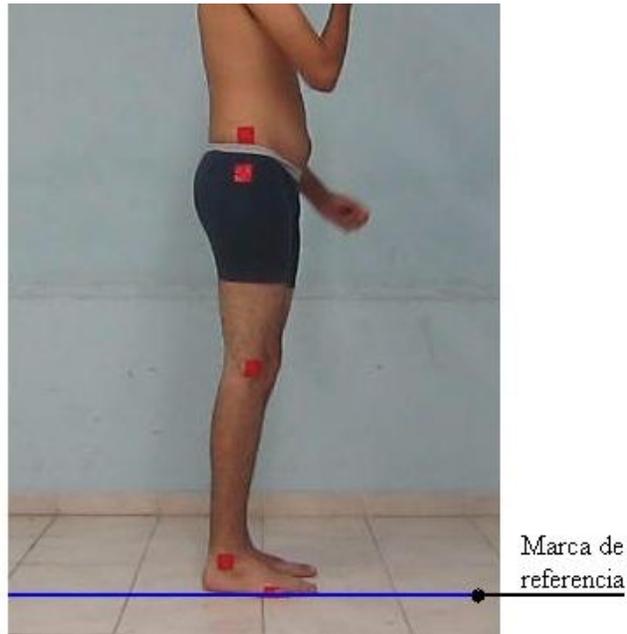
**Fuente: FIELD, Derek. Anatomía. Palpación y localización superficial. 2004**

**1.1.3 Protocolo para el Salto Vertical.** Este protocolo es el procedimiento que siempre se debe tener en cuenta para la realización del salto vertical, debido a que es la forma de asegurar que todos los sujetos fueron analizados con un mismo método de evaluación.

Para ejecutar el salto vertical en el proyecto se procede primero a tomar el peso corporal del sujeto. Con la ayuda de una balanza se toma esta medida que debe ser suministrada al software aplicativo para generar los cálculos de las variables cinéticas como Fuerza vertical y Potencia mecánica. Generalmente el peso con la mínima ropa es suficientemente exacto. Se debe controlar que la balanza se encuentre en el cero, luego el sujeto se para en el centro del platillo sin sostenerse y con el peso distribuido por igual sobre la balanza.

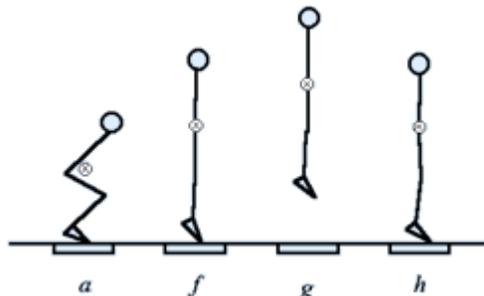
Después que el sujeto tenga los marcadores corporales se procede a ubicarlo en el escenario de filmación, de tal forma, que estará posicionado con el plano sagital derecho del cuerpo hacia la videocámara, situando el exterior de su pie derecho en la marca predefinida en la calibración del sistema. Las plantas de los pies deben estar completamente apoyadas antes del inicio del salto. En la Figura 10 se puede observar los detalles anteriormente mencionados.

**Figura 10. Posicionamiento del sujeto y marca de referencia para el salto**



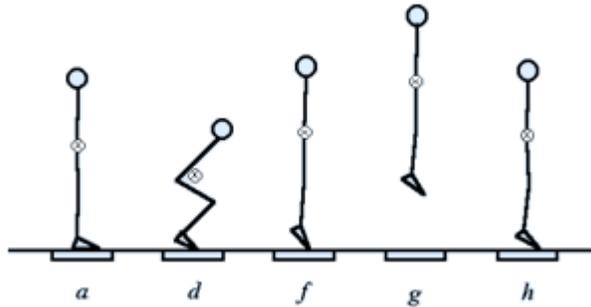
Una vez la persona esté lista para saltar, el individuo que esté manipulando la videocámara contará: 3, 2, 1, “listo”, tras haber presionado el botón de “grabar” en la videocámara, con lo cual el sujeto realizará el salto especificado, que puede ser de tipo *Sin Contramovimiento (Squat Jump)* ver Figura 11, ó *Con Contramovimiento (Countermovement Jump)* ver Figura 12. La duración del video debe ser como máximo de 10 segundos. La persona deberá permanecer quieta 2 segundos antes y después de la prueba, hasta que quien maneje el dispositivo de video observe que se ha completado el periodo de filmación. Entre intento e intento se tendrá que dejar unos 90 segundos de descanso.

**Figura 11. Secuencia de movimiento en un Squat Jump**



**Fuente: Standing vertical jump. Brunel University, United Kingdom.**

**Figura 12. Secuencia de movimiento en un Countermovement Jump**



**Fuente: Standing vertical jump. Brunel University, United Kingdom.**

Según Xavier Aguado (Aguado y Alegro, 2000) se debería descartar todos los intentos en los que:

- Halla un desequilibrio en la batida, vuelo o caída.
- La persona dice que no lo ha podido realizar de forma correcta.
- La posición final no coincide con la del inicio del contacto con el suelo en la caída.
- Se ocultan algunos marcadores corporales.

## 1.2 CALIBRACIÓN

El proceso de calibración posee dos objetivos básicos, el primero es la corrección de errores producidos por la ubicación de la cámara, por ejemplo, errores de rotación y perspectiva, con lo cual se debe ajustar nuevamente el ángulo de visión de la cámara; y el segundo es la equivalencia del píxel con una medida métrica.

Teniendo la base para la calibración se procede a ubicarla en el escenario de filmación con el fin de obtener una foto, o en el caso de que la videocámara no tenga esta opción, obtener un video corto, para proceder a ingresar éste en el software aplicativo que será explicado en el Capítulo 4.

## 1.3 CAPTURA Y CONVERSIÓN DE FORMATO

La captura es la manera de transferir los datos adquiridos por la videocámara al computador. La conversión de formatos es la manera como se transforma un formato de video digital a otro que posee diferentes métodos o algoritmos de reproducción.

En el proyecto se descarga el video de la cámara al computador mediante el uso de un cable USB 1.1. De tal manera al final de esta etapa se obtiene un video en formato AVI, el cual será procesado por el software aplicativo.

En el caso en que el formato de la videocámara utilizada sea diferente al AVI, como son los formatos H264 ó MP4 con frecuencia en videocámaras más recientes, éstos deben pasar por un conversor de video, que tenga como formato de salida el AVI, el cual es el requerido por el software. El segundo requerimiento por el cual se hace necesario el uso del conversor, es que el video debe tener una compresión del tipo FFDS para que pueda ser leído por el software. En la actualidad se pueden conseguir estos tipos de conversores en Internet.

Luego de intentar con programas de conversión como son *Xilisoft Video Converter* y *One Click* se decidió utilizar en el proyecto el conversor *TMPEGnc 3.0 XPres*, debido a que este es muy completo y brinda opciones para editar partes del video, además de ser software libre y de tener una gran variedad de formatos de conversión.

Debido a que en el protocolo de filmación, tanto en el comienzo como en el final del video existen dos segundos de tiempo en el que el sujeto está quieto, estos se pueden editar en el programa utilizado para la conversión, entonces es recomendable que se suprima un segundo al principio y al final, en el caso en que el video tenga una duración extensa.

## 1.4 PROCESAMIENTO DE LOS MARCADORES

El procesamiento de los marcadores es la etapa en la cual se extraen los marcadores de la secuencia de cuadros que componen un video, aplicando técnicas de procesamiento digital de imágenes con el fin de facilitar u obtener la escena deseada de la imagen original.

En el Capítulo 3 se observan los algoritmos implementados y los resultados del procesamiento de los marcadores. A continuación se enuncian tres procedimientos importantes en el procesamiento de los marcadores:

**1.4.1 Segmentación.** La segmentación consiste en aislar un trozo de imagen que tenga un rango de valores de color parecidos. Existen dos métodos muy conocidos para la segmentación de color:

- **Distancia Euclídea o Euclideana:** Consiste en determinar la distancia de todos los píxeles de la imagen respecto de un píxel o color de referencia. Ver Ecuación 1.

$$D = \sqrt{(X - Y)^T(X - Y)} \quad (\text{Ec.1})$$

- **Distancia de Mahalanobis:** Permite calcular distancias entre colores ponderados por la importancia del Matiz (color principal) y la varianza en cada componente (R, G y B). La distancia de Mahalanobis es igual a la distancia Euclidiana si la matriz de covarianza C corresponde a la matriz identidad. Ver Ecuación 2.

$$D = \sqrt{(X - Y)^T C^{-1}(X - Y)} \quad (\text{Ec.2})$$

**1.4.2 Eliminación de Falsos Positivos.** Consiste en implementar métodos para eliminar regiones que no representan marcadores deseados, este procedimiento se debe aplicar después de realizar una segmentación sobre cualquier cuadro del video. Básicamente existen tres maneras para eliminar estas regiones:

- Por Área
- Por Tamaño
- Por Forma

**1.4.3 Agrupamiento de Regiones.** Debido a que la segmentación de los marcadores se hace sobre cada uno de los pixeles que contiene la imagen, un marcador en algún momento puede estar compuesto por una cantidad específica de pixeles, pero estos pueden aparecer como un conjunto de regiones diferentes, es aquí, donde se debe escoger el tipo de conectividad a utilizar. La conectividad puede ser de dos tipos, de conexión-4 ó bien conexión-8. En la Figura 13 se esquematiza ambas conectividades, en la Figura 13 (a) hay una conexión 8 y en la Figura 13 (b) conexión 4.

**Figura 13. Representación de los dos tipos de conectividad**



**Fuente:** VALDEMAR Erick y ZALDIVAR Daniel. **Visión por computador utilizando Matlab y el Toolbox de Procesamiento Digital de Imágenes.**

## 1.5 MODELO BIOMECÁNICO

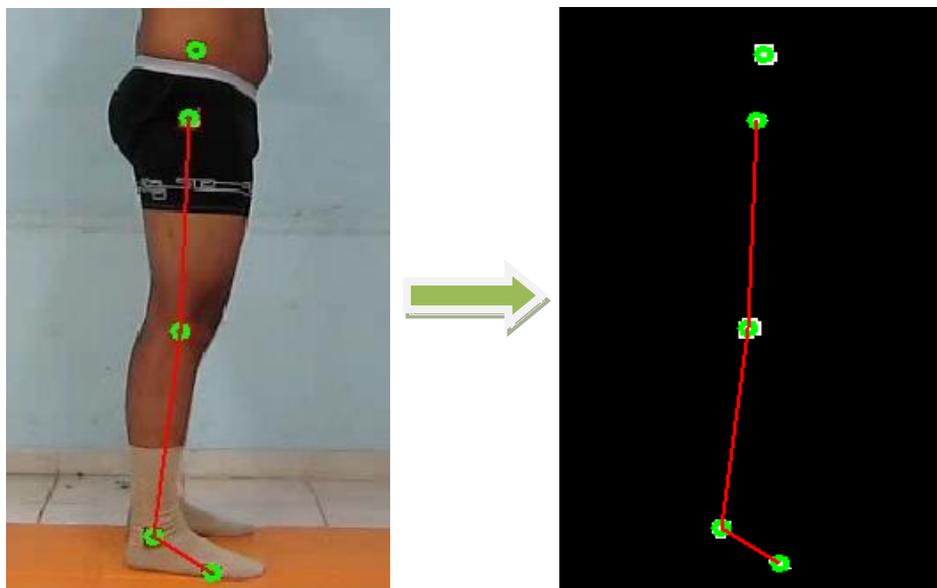
Con el fin de presentar al experto en biomecánica una herramienta que le permita mejorar de manera objetiva el análisis observacional de los movimientos realizados por el deportista, se muestra un modelo biomecánico de seguimiento en el salto vertical el cual está representado como una estructura virtual en dos dimensiones.

Los marcadores o las regiones de interés que se extraen en las secuencias de video se asocian a diferentes estructuras que representan de forma simplificada el sistema musculoesquelético, de esta manera la estructura corporal utilizada es por modelos de formas articuladas.

Esta representación se construye a partir de tres líneas rojas que simulan los miembros inferiores como cuerpos rígidos, estos son: el muslo, la pierna y el pie; y cinco puntos verdes, de los cuales dos determinan los centros de giro de las articulaciones: la rodilla (entre el muslo y la pierna) y el tobillo (entre la pierna y el pie). El proceso de captura de la estructura del cuerpo, a partir de la estimación de un conjunto de marcadores, permite simplificar el modelo del cuerpo humano sin perder precisión.

En el Capítulo 3 se podrán observar los algoritmos aplicados para la representación del modelo biomecánico bidimensional con resultados observados en la Figura 14.

**Figura 14. Representación biomecánica de puntos y líneas**



## 1.6 CÁLCULO DE VARIABLES

Es indispensable para el experto en medicina deportiva la información cuantitativa en la ejecución del salto vertical, de ahí que es necesario calcular tanto las variables cinemáticas como las cinéticas, además de ángulos articulares obtenidos tanto en rodilla como tobillo.

La cinemática según (Garzón y Cruz, 2005) se refiere a la descripción de los movimientos, tales como el *desplazamiento*, *velocidad* y *aceleración*, independientemente de las fuerzas que actúan sobre el organismo humano o de los implementos que se emplean para los deportes.

Revisando la literatura (Acevedo et al., 2008) en el movimiento de caída del centro de masa del salto vertical se observan como características las siguientes fases:

**Equilibrio:** Se presenta únicamente en la caída de una serie de salto de rebote. Como característica la velocidad de caída es la misma al comienzo y al final de la fase.

**Compresión:** Como característica el final de la fase está determinada por la velocidad en el punto más bajo del centro de masa.

**Propulsión:** Que caracteriza el impulso hacia arriba del centro de masa y que tiene las siguientes subfases:

- **Fase de aceleración:** La característica es que la velocidad y la aceleración en el levantamiento son positivas.
- **Fase de desaceleración:** La característica es que la velocidad es positiva y la aceleración negativa.

Por otro lado, la cinética estudia las causas que provocan el movimiento del cuerpo/objetos, incluyendo los conceptos de *masa*, *fuerza* y *energía*.

*La fuerza* es el producto de una acción muscular iniciada y orquestada por procesos eléctricos en el sistema nervioso, definida según (Acevedo et al., 2008), por lo tanto es un componente importante para el rendimiento de cualquier ser humano y su desarrollo se convierte en un elemento esencial en la preparación de los deportistas. Se puede clasificar la fuerza según sus manifestaciones en:

- **Manifestación activa de la fuerza:** Tensión capaz de generar un músculo por acción de una contracción muscular voluntaria.

- **Manifestación reactiva de la fuerza:** Fuerza generada por el musculo como reacción a una fuerza externa que modifica o altera su propia estructura.

*La potencia mecánica* es la capacidad de un deportista para vencer una resistencia mediante una alta velocidad de contracción; esta variable es un indicador de fatiga y de rendimiento para evaluar la condición física en muchos deportes. En este proyecto, la potencia mecánica calculada está basada en su definición física, el cual, es el resultado de la acción de la fuerza por la velocidad, pretendiendo dar precisión a esta variable, debido a que en la mayoría de *test* de saltos utilizados se calcula estos resultados a partir de la altura del salto y de la masa del sujeto, asumiendo de esta manera la posibilidad de errores importantes.

En el Capítulo 3 se desarrollan los algoritmos para el cálculo de las variables a analizar en la ejecución del salto vertical.

## 1.7 VISUALIZACIÓN DE GRÁFICAS

Este es el resultado final del cálculo de las variables analizadas en la sección anterior, aquí se presenta al usuario final una representación gráfica de fácil interpretación, que para este proyecto utilizó la interfaz grafica de usuario GUI de Matlab. Es así como se visualizan siete graficas todas con respecto al tiempo de duración del salto, estas son: *Recorrido del CG*, *Velocidad del CG*, *Aceleración del CG*, *Fuerza Vertical*, *Potencia Mecánica*, *Ángulo articular de rodilla* y *Ángulo articular de tobillo*. En el Capítulo 4 se describirá la utilización de esta etapa en el software.

Debido a que las graficas anteriormente nombradas están relacionadas todas con el tiempo, y Matlab obtiene este vector en unidades de la totalidad de cuadros en el video, se debe realizar una conversión de cuadros a tiempo en segundos, como se especifica en la Ecuación 3.

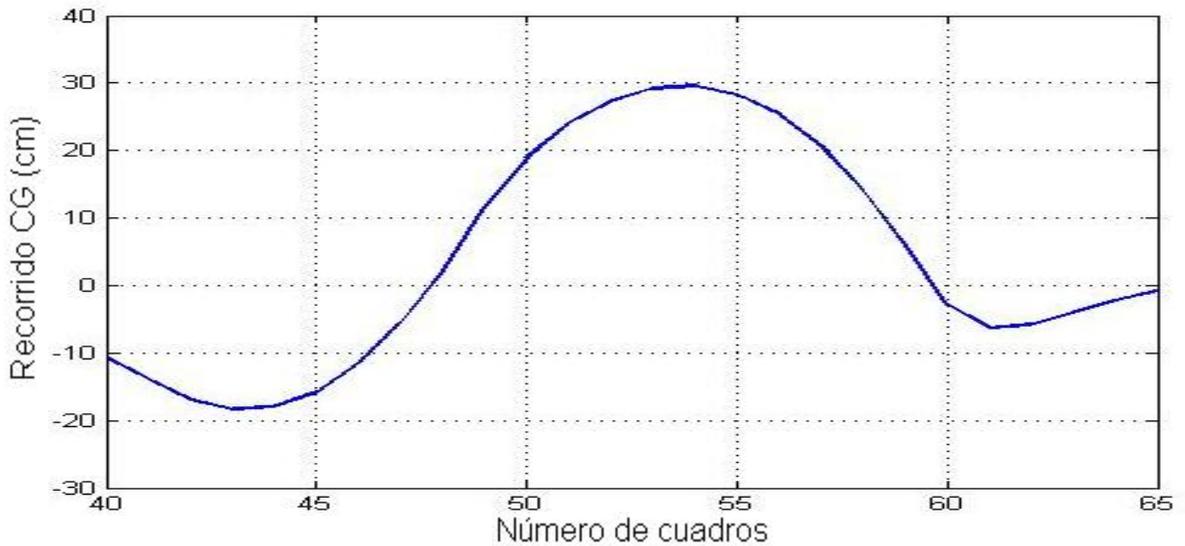
$$\mathbf{eje\ de\ tiempo} = \frac{(\text{numero total de cuadros} - 1)}{\text{cuadros por segundo}}$$

**(Ec. 3)**

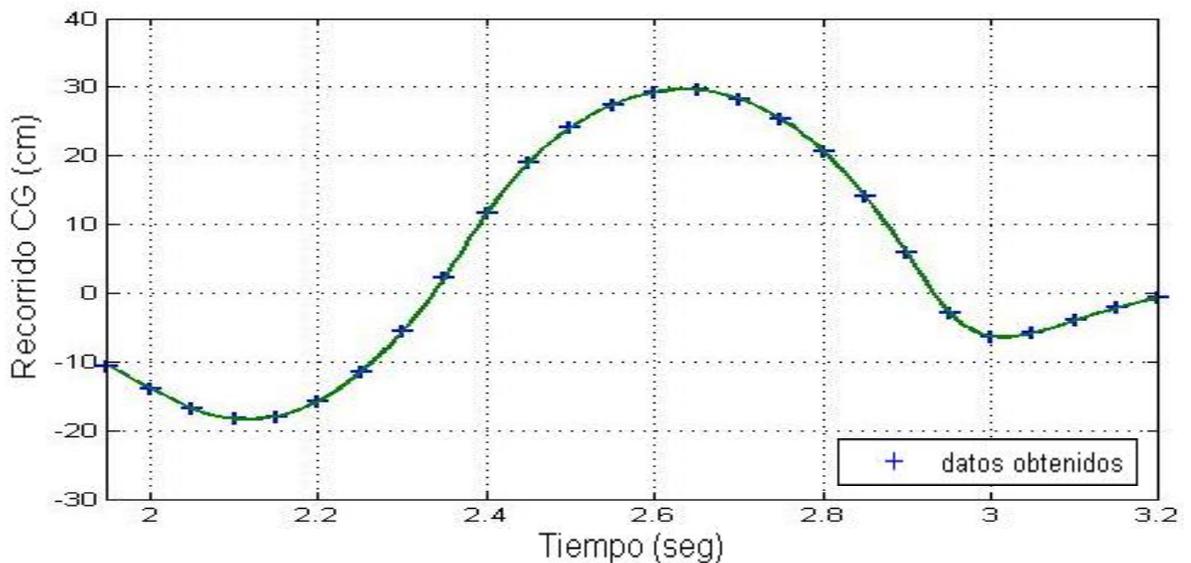
Con este nuevo eje de tiempo se puede visualizar las variables con una interpolación de *splines cúbicos* el cual ofrece Matlab como función llamada *spline*, esta posee tres parámetros, en el cual el primero es el eje independiente, en este caso el eje de tiempo, el segundo es la variable a visualizar y el tercero son las muestras en la totalidad del eje independiente; cabe aclarar que entre más muestras tenga el tercer parámetro, mucho mejor los trazos realizados en la interpolación.

En las dos siguientes figuras se muestran dos visualizaciones distintas de la misma variable, en la Figura 15 se observa que el eje independiente de la gráfica está expresado en el número de cuadros, lo cual no es para el experto la unidad acostumbrada a interpretar, y que su interpolación es sencilla, causando que su visualización sea estéticamente inferior comparada con la Figura 16 en la cual se observa que el eje independiente está expresado en unidades de segundos y la interpolación se realiza con *splines cúbicos*.

**Figura 15. Visualización de grafica con eje X en cuadros e interpolación sencilla**



**Figura 16. Visualización de grafica con eje X en tiempo e interpolación con spline cúbicos**



## 2. EQUIPOS, SOFTWARE Y MATERIALES DE FILMACIÓN

En este capítulo se describen las características para la selección de la videocámara, de los materiales para la filmación y el software utilizado para el procesamiento y desarrollo del software aplicativo.

### 2.1 SELECCIÓN DE LA VIDEOCAMARA

En principio del proyecto se pensó que al filmar un evento tan rápido como lo es el salto vertical se necesitaría de una cámara de alta velocidad, las cuales comercialmente se encuentran con un mínimo de 60 cuadros por segundo, lo cual es lo ideal para no perder ningún detalle del movimiento. Realizando pruebas con distintas videocámaras se observó que la velocidad de cuadros no es el principal requerimiento para tener un buen seguimiento de los marcadores en el movimiento, con esto se llegó a inducir que el requerimiento más representativo para la selección de la videocámara es el *flujo de datos (kbps)*, la cual debe ser mayor de *200kbps* para que la imagen no sea tan distorsionada cuando se genera un movimiento de velocidad en la escena.

La cámara digital utilizada en el proyecto fue la *Canon A470 power shot* en modo video con el mayor flujo de datos para filmación a una velocidad de 20 cuadros por segundo, con una resolución de pantalla de 640x480 y sin hacer uso del zoom. En la Figura 17 se puede observar la cámara anteriormente especificada. Una característica muy importante en esta videocámara y por lo cual fue seleccionada para el desarrollo del proyecto es que genera el video en modo progresivo, lo cual es una ventaja debido a que no se debe realizar algoritmos para des-entrelazar las imágenes a procesar.

**Figura 17. Cámara digital utilizada en el sistema de videogrametría**



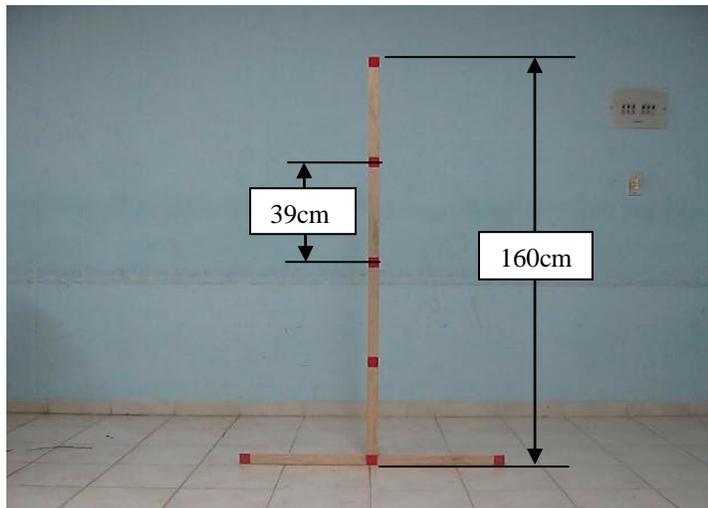
Fuente: <http://lamiissfreak.blogspot.com/2009/02/venga-venga.html>

## 2.2 MARCADORES

En un principio se utilizaron como marcadores pelotas de ping-pong de color amarillo, pero ocurrió que en personas con color de piel claro la segmentación de los marcadores se veía afectada al confundirse en algún instante de tiempo el color de los marcadores con partes del cuerpo. Por tal motivo, finalmente se seleccionó como marcadores cinta reflectiva de color rojo de un tamaño de 4x4cm, debido a que éste es un color primario para Matlab, y no se confunde con el color del cuerpo del sujeto que está ejerciendo el salto.

Al definir el color de los marcadores implícitamente se requiere que el fondo de la escena tenga un gran contraste con los marcadores utilizados, fue así como en el laboratorio *ALTIUS* en el cual se realizaron los videos, las paredes tenían un color azul celeste tal como se muestra en la Figura 18, el cual no producía errores en la segmentación de los marcadores. En tal caso en que las paredes fueran de una tonalidad parecida al rojo, se tendría que utilizar alguna tela que contrastara el color de los marcadores.

**Figura 18. Base utilizada durante el proceso de calibración y escena de gran contraste con los marcadores**



## 2.3 BASE PARA CALIBRACIÓN

Para realizar el proceso de calibración, se usó como referencia una base de madera la cual tiene una altura de 160 cm y un ancho de 4 cm, como se muestra en la Figura 18.

La altura de la estructura se escogió debido a que el marcador el cual se aproxima a la ubicación del centro de gravedad del sujeto esta aproximadamente a 57% de la altura del cuerpo en hombres y a 55% de la altura en mujeres según lo expresa Xavier Aguado (Aguado, 2000). Teniendo en cuenta un estudio de la Universidad de León en España sobre *cualidades fisiológicas y biomecánicas del jugador joven de liga eba* (Vaquera et al., 2002) se referenció la estatura de un jugador de baloncesto en promedio, el cual puede ser aproximadamente 197 cm, para este caso la altura de su CG esta aproximadamente a 112 cm y teniendo el valor medio de un salto máximo, el cual es aproximadamente 42 cm, por lo cual la suma del CG inicial con la altura del salto es de 154 cm, entonces se diseño la altura para la calibración con unos valores de exceso para poder evaluar un caso extremo.

Teniendo la altura de la base de calibración se ubicaron a lo largo de la estructura cinco marcadores a iguales distancias con el fin de obtener cuatro distancias iguales de 39 cm para la realizar la equivalencia entre pixeles y centímetros.

## 2.4 SELECCIÓN DE SOFTWARE

Se seleccionó el software matemático MATLAB (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices"), debido a las siguientes razones:

- Es un software licenciado por el programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana, por tal motivo se facilitaba el acceso para su manejo.
- Ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y está disponible para las plataformas *Unix*, *Windows* y *Apple Mac OS X*. Además de sus prestaciones básicas en manipulación de matrices y representación de datos y funciones.
- Dispone de cajas de herramientas "*toolbox*" específicos para cada área en el cual se desea trabajar, en el caso del sistema de videogrametría, facilita la herramienta "Procesamiento Digital de Imágenes", el cual dispone de los algoritmos básicos para trabajar los videos que en síntesis son una sucesión de imágenes.
- Dispone de la herramienta GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI) que tiene como característica la creación de interfaces de usuario o software aplicativo para facilitar el manejo de los procesos implementados a un personal sin previo conocimiento de programación.

### 3. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS PARA EL ANÁLISIS DE SALTABILIDAD

El procesamiento de los marcadores se realiza con todas las herramientas que ofrece el *Toolbox de Procesamiento de Imágenes* de Matlab, por tal razón en las siguientes secciones se explica cada una de las etapas con sus respectivos comandos utilizados. En la Figura 19 se presenta el diagrama de flujo del procesamiento de los marcadores, con el fin de obtener el reconocimiento de los cinco puntos anatómicos de la extremidad inferior en el salto vertical.

#### 3.1 ADQUISICIÓN DEL VIDEO

El comando *aviread* permite abrir archivos de video con extensión .avi; esto es una desventaja debido a que en la actualidad muchas videocámaras digitales almacenan en formatos diferentes al mencionado, esto causa que los videos pasen por un conversor de formato, con lo cual muchos de estos tienen el inconveniente de perder calidad de video, haciendo cambios notorios en el procesamiento de los cuadros del video.

```
avi = aviread ('nombrevideo.avi');
```

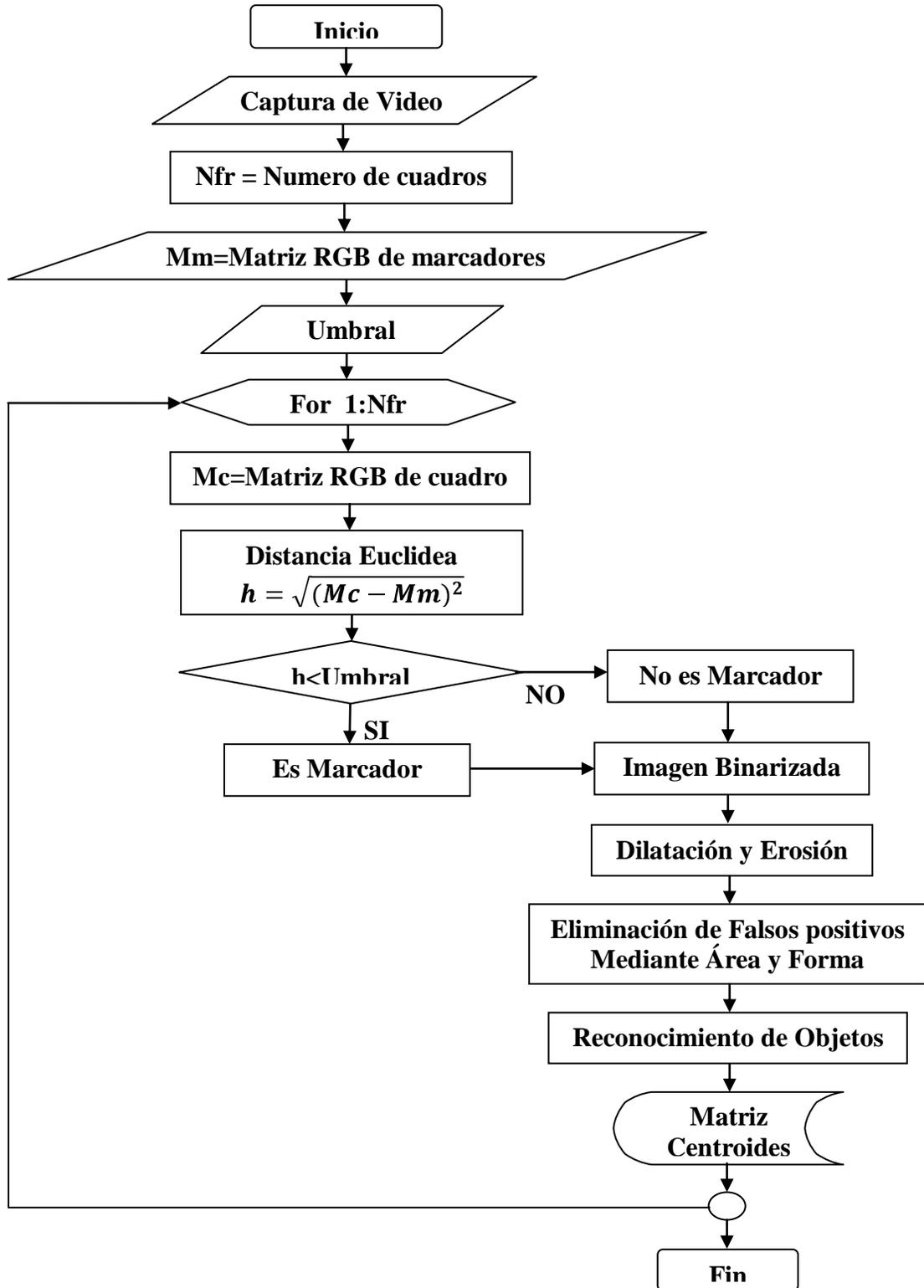
Se debe tener en cuenta que la estructura *aviread* está compuesta por dos campos, y estos varían según el tipo de imagen, que en el caso del proyecto es *truecolor*, con lo cual el campo *cdata* es el que almacenará los datos del video, de ahí que se llamara video a la información original. Es recomendable limpiar de la memoria algunas de las variables que ocupan mucho espacio y que ya fueron utilizadas, para eso fue necesario utilizar la línea de código *clear avi*.

```
video = {avi.cdata};  
clear avi
```

Debido que la variable asignada al video tiene almacenada la información en tres dimensiones, y para realizar el recorrido por cada uno de estos es necesario una cuarta dimensión se utiliza la función *cat*, la cual tiene dos parámetros: cantidad de dimensiones y la variable la cual deseamos concatenar, esto se hace con el fin de concatenar los campos de: filas, columnas, colores y cuadros (frames), para de esta manera acceder fácilmente a la información haciendo uso de la variable *pixels*.

```
pixels = (cat(4,video{1:2:end}));
```

Figura 19. Diagrama de flujo del procesamiento



Es importante resaltar que no es necesario obtener todos los cuadros del video debido a que de esta manera se requiere mucha memoria y tiempo para el procesamiento, por lo que se puede sub-muestrear cada 2 cuadros si la cantidad de cuadros es superior o igual a 30 cuadros por segundo. En el caso de la videocámara utilizada en el proyecto, son 20 cuadros por segundo, por lo tanto se decide no realizar el sub-muestreo anteriormente especificado para obtener buena precisión de los datos obtenidos.

## 3.2 SEGMENTACIÓN DE LOS MARCADORES

El método utilizado para la segmentación de los marcadores fue la distancia Euclideana, debido a que con esta se obtuvo un mejor rendimiento en el procesamiento. En las siguientes secciones se describe los *toolbox* utilizados por cada procedimiento para hallar la segmentación de los marcadores por cada cuadro de video.

**3.2.1 Obtención de la matriz de color de los marcadores.** En esta parte del programa se obtiene una matriz de color (RGB) de los marcadores. Por lo tanto la matriz deseada debe tener muestras de distintas tonalidades del color rojo, esto se logra utilizando la herramienta de Matlab *ginput* para obtener los datos de una forma más práctica, debido a que esta función permite especificar una cantidad de puntos, con lo cual da la opción de seleccionar con *click* los objetos representativos, y así poder tener la matriz de forma más eficiente. En el Capítulo 4 se describe la ejecución para la toma de muestras de los marcadores.

A continuación se muestra un caso en el cual se representa en la matriz llamada *ROI* una cantidad de 10 tonalidades de rojo, obtenidas a través del comando *ginput*.

```
ROI = [193 59 112
       162 37 81
       201 73 96
       181 30 65
       184 44 73
       192 53 92
       184 38 77
       204 64 101
       201 42 83
       186 35 66];
```

La matriz de color se determina principalmente para encontrar la media de cada componente del espacio RGB, por tanto el comando *mean* ayuda a calcular esta medida, recordando que todas estas operaciones son aplicadas a variables con formato tipo *double*, por lo tanto se realiza la conversión de formato *uint8* (que por defecto asigna Matlab a sus

variables) a **double** para realizar esta operación. La información de la media para cada componente del espacio RGB se almacena en un vector fila llamado **cm**.

```
ROI = double(ROI);  
cm = [mean(ROI(:,1)); mean(ROI(:,2)); mean(ROI(:,3))];
```

**3.2.2 Obtención de la matriz de colores del video.** Inicialmente para la obtención de la matriz de colores se recorría la variable que contenía el video por medio de dos ciclos *for*, uno para filas y otro para columnas, para de esta forma extraer el pixel que posteriormente se comparaba con el vector de la muestra de los tres colores. Sin embargo, al momento de procesar un video que contenía mínimo 30 cuadros de duración, se observó que éste requería una cantidad significativa de tiempo, ocasionando ineficiencia en la identificación final. Por tal motivo se consultó en la literatura acerca de la optimización de los códigos en Matlab, encontrando que al procesar elementos individuales en ciclos *for*, éste demanda mucho tiempo, por eso es recomendable procesar en matrices, debido a que es así como Matlab ejecuta sus funciones.

```
for l = 1:nfr  
r = pixels(:, :, 1, l);  
g = pixels(:, :, 2, l);  
b = pixels(:, :, 3, l);  
mc = double([r(:) g(:) b(:)]);
```

Debido a lo anteriormente mencionado se tomo de la variable **pixels** los tres componentes de colores de forma independiente en vectores columnas ahora llamadas *r*, *g* y *b* respectivamente, luego de esta operación se inserta cada vector en una matriz llamada **mc** que se compone nuevamente de los tres colores, con el fin de comparar los colores de cada cuadro con la media generada anteriormente.

**3.2.3 Adaptación del vector media a una matriz.** Con el fin de realizar las operaciones de diferencia con la matriz de color, se hace necesaria la creación de una matriz de un tamaño determinado por **f**, el cual es el producto de filas y columnas de la variable **pixels**. La forma de crear el arreglo es haciendo el producto de cada componente de la media con el comando **ones** para generar por cada color un vector columna con el valor de la media. Seguido se genera una matriz llamada **mm** con los tres vectores columnas.

```
f = rows*cols;  
mr = cm(1).*ones(f,1);  
mg = cm(2).*ones(f,1);  
mb = cm(3).*ones(f,1);  
mm = [mr mg mb];
```

**3.2.4 Obtención de la distancia Euclídea.** Los dos pasos anteriores facilitan el cálculo de la distancia euclídea, debido a que ahora se realizan operaciones netamente matriciales; primero se hace la diferencia entre la matriz de colores y la matriz de media, el resultado de esta operación se eleva al cuadrado, y seguido se suman los resultados de los tres componentes anteriores con la ayuda del comando *sum*, que se compone de parámetros de la variable a sumar y la operación interna a realizar, para este caso, es indicado con el número 2, debido a que de esta forma permite realizar la suma de las filas.

```
pp = mc-mm;  
p2 = pp.^2;  
p3 = sum(p2,2);  
h = (p3).^0.5;
```

Luego de este resultado se obtiene la raíz cuadrada, pero no haciendo uso del comando *sqrt* sino de la propiedad de potenciación análoga a la radicación, porque se encontró que se obtiene un buen rendimiento. El resultado de la última operación es la distancia euclídea que esta asignada a la variable *h*.

**3.2.5 Comparación de la distancia con el umbral.** Se realiza una comparación entre la variable *h* y un umbral hallado de forma experimental, este valor fue definido entre 60 y 70, con esta comparación lógica almacenada en *h2* se obtiene que los *h* menores de 70 se les asigna un 1 porque cumple la condición, de esta manera se obtiene la binarización de la imagen, es decir que los marcadores se visualizaran blancos y los demás negro.

```
h2 = h<70;  
h3 = reshape(h2,rows,cols);  
res(:, :, 1) = h3;
```

Como se necesita que la variable *h2* sea un arreglo con dimensiones de filas y columnas, es indispensable el comando *reshape*, el cual convierte un vector columna o fila a una matriz, con la condición que el producto de sus dimensiones sea igual al total de elementos del vector. Con esto se busca que en una variable llamada *res* quede almacenado tres campos de la imagen binarizada, las cuales son: filas, columnas y cuadros.

### 3.3 MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN SEGMENTADA

En esta etapa de procesamiento se aplican operaciones morfológicas con el fin de mejorar la figura de los marcadores reconocidos sobre imágenes binarias, debido a que en algunos pixeles que forman parte del marcador se detallan espacios que no pertenecen a la

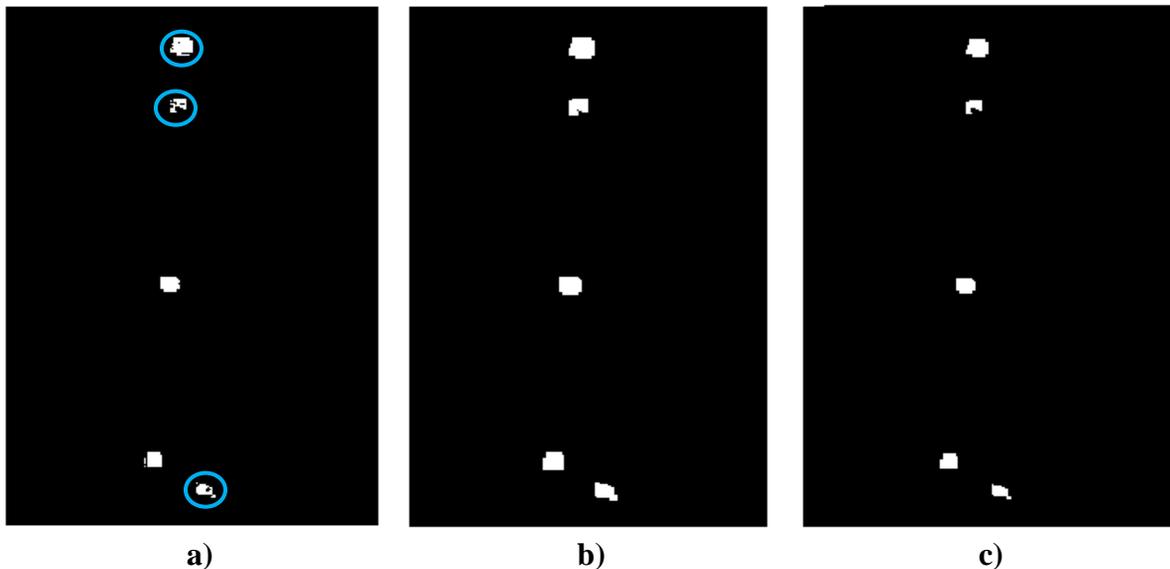
binarización requerida, es decir, que la forma cuadrada de los marcadores no se observa completamente debido a que dentro de ellos existen píxeles con información que no pertenece a los marcadores.

```
rs = bwmorph(res(:,:,1), 'dilate');  
rs2 = bwmorph(rs, 'erode');
```

Para el procesamiento se aplica en primer lugar la operación de dilatación con el fin de rellenar los espacios dentro de las formas reconocidas; y luego se realiza la operación de erosión con el objetivo de remover excesos en el contorno de las figuras.

Como se observa en la Figura 20, en la imagen (a) se ha encerrado tres marcadores con el problema enunciado anteriormente, en la imagen (b) se observa cómo la operación de dilatación reduce los píxeles que están dentro de los marcadores que con la distancia euclidiana no tomaron los valores deseados, pero esta operación tiene efectos indeseables en el borde de la forma, que se eliminan con la operación de la erosión mostrada en la imagen (c).

**Figura 20. Aplicación de operaciones morfológicas**



### 3.4 DESCRIPCIÓN Y EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Esta etapa busca principalmente discriminar algunos objetos que cumplieron con la segmentación realizada, es así como se observan objetos que no hacen parte de los

marcadores; por lo tanto se eliminan con dos discriminantes, el primero es eliminación por área. Este paso consiste en conocer todas las áreas de los objetos reconocidos por la función *bwlabel*, a continuación se observa cuales son objetos marcadores y cuáles no, entonces se determina la mínima área que tiene cada uno de los marcadores, para luego obtener el parámetro de la función *bwareaopen*, con la cual se remueven los objetos que estén por debajo del valor encontrado de área. El segundo discriminante consiste en eliminar objetos que no cumplan condiciones de forma de los marcadores, entonces aprovechando la herramienta *boundingbox* suministrada por la función *regionprops* se obtiene los parámetros ancho y alto de cada uno de los objetos, conociendo la mínima magnitud con la cual se establece que el objeto es un marcador se realiza un ciclo *if-end* en donde sí el objeto cumple la condición mínima de ancho y alto, será reconocido como marcador.

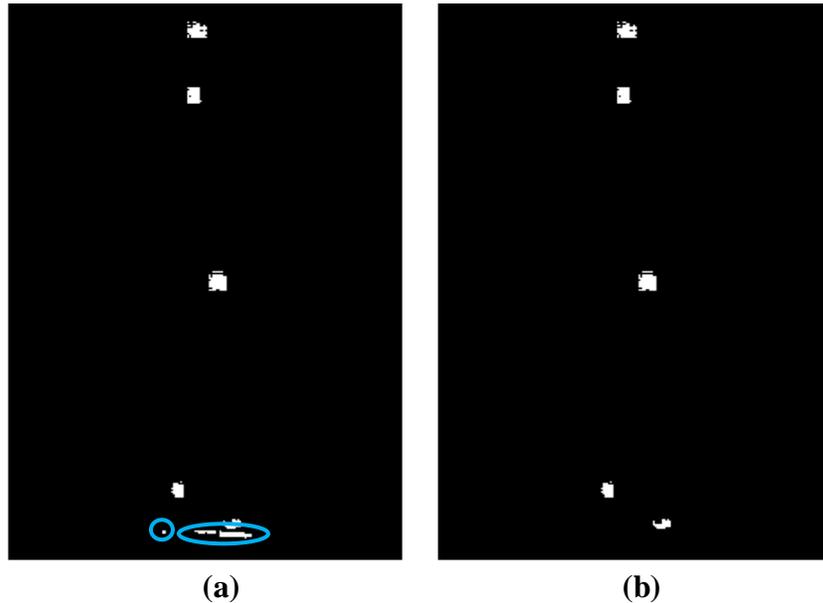
```
res2=bwareaopen(rs2,20);
[L Ne]=bwlabel(res2);
prop=regionprops(L);

for n=1:size(prop,1)
    bb(n, :, :, :)=cat(1, prop(n).BoundingBox);
    if ((bb(n,3)>2) & (bb(n,4)<=40))
        cc(n, :)=cat(1,prop(n).Centroid);
        [w x]=sort(cc,1);
        new=[cc((x(:,2)),1) cc((x(:,2)),2)];
    end
end
```

El campo *centroid* indica la posición de los centroides de los marcadores, pero para este caso se presentó el inconveniente que las coordenadas (x,y) presentadas tienen un orden ascendente por columnas, es decir toma primero los marcadores con posición x menores hasta x mayores, esto generaba la unión de los marcadores de forma incorrecta para el modelo biomecánico; debido a este inconveniente se vio la necesidad de ordenar las coordenadas por filas ascendentemente para lograr la visualización deseada en los trazos, esto se consiguió con la función *sort* para generar el nuevo arreglo de centroides llamado *new*.

En la Figura 21 se observa la aplicación de los discriminantes de objetos no deseados, en la imagen (a) se observa dos falsos positivos que no cumplen en primera instancia con las condiciones de área ni de tamaño, y en la imagen (b) se muestra la imagen solamente con los objetos que son los marcadores reales.

**Figura 21. Aplicación de discriminantes en objetos no deseados**



### 3.5 MODELO BIOMECÁNICO

La representación de las extremidades inferiores para la animación bidimensional de la secuencia del salto vertical se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 22.

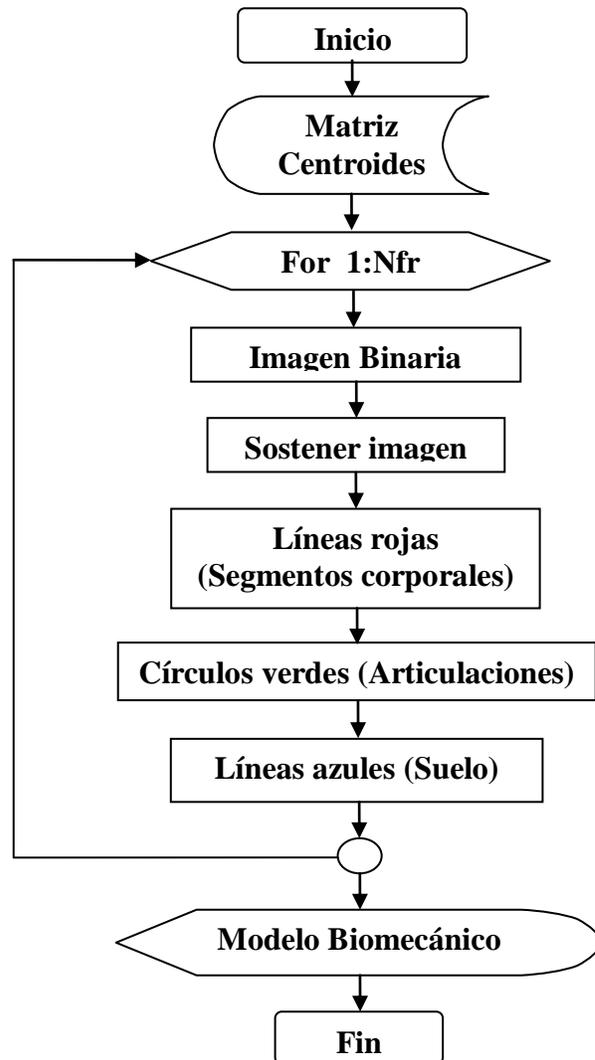
En esta parte del programa existen dos pasos importantes para la visualización final, en primera medida está mostrar con la función *imshow* la imagen binaria almacenada en la variable *res2*, obtenida en la sección 3.4, donde el parámetro *l* indicara el cuadro que se va a mostrar, entonces al estar en el ciclo *for-end* se visualiza para el ojo humano el movimiento del video, todo esto se hace posible con la función *drawnow*, la cual permite dibujar secuencialmente los cuadros.

```
imshow(res2(:, :, l));  
hold on
```

Finalmente teniendo la variable *new*, obtenida en la sección 3.4 y utilizando la herramienta *hold on* se trazan círculos de color verde con el comando *plot*. Seguidamente se trazan con el comando *line*, líneas de color rojo sobre cada uno de los componentes de este arreglo, y por último se trazan líneas azules para visualizar el suelo en cada uno de los cuadros del video.

```
plot(new(:, 1, l), new(:, 2, l), 'go', 'LineWidth', 2)  
line([new(:, 1, l)], [new(:, 2, l)], 'Color', 'r', 'LineWidth', 2);
```

**Figura 22. Diagrama de flujo Modelo Biomecánico**

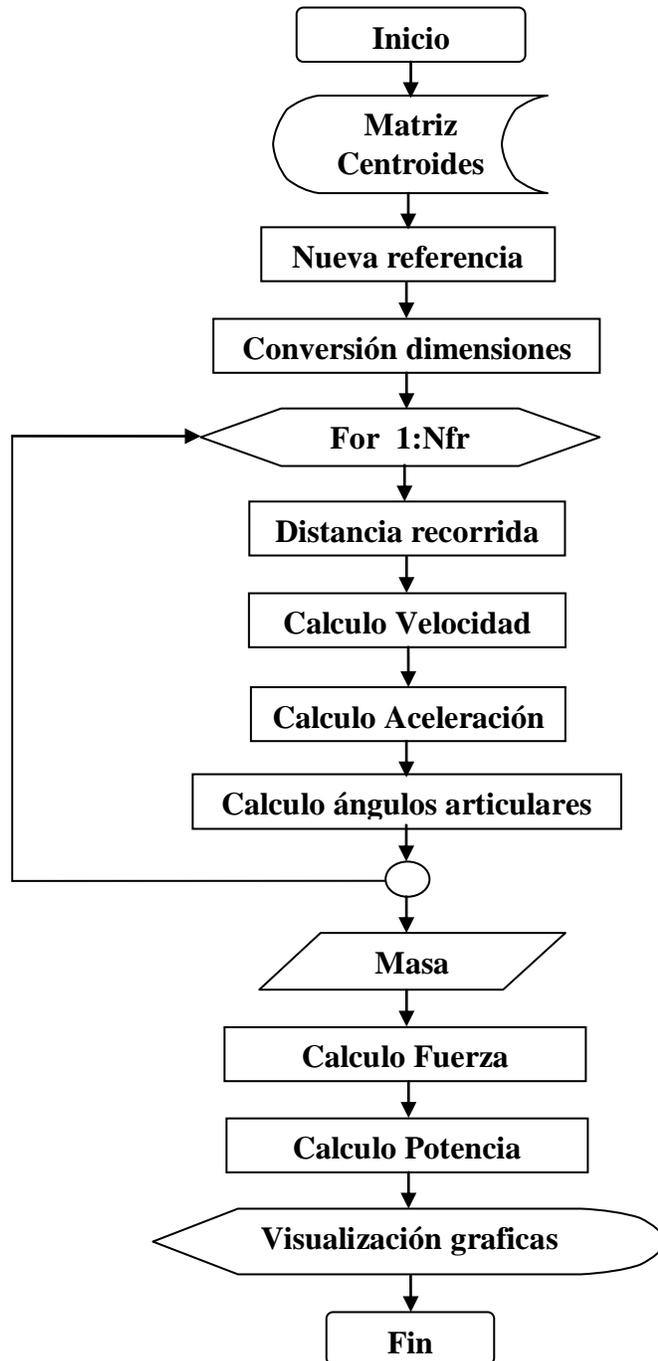


### **3.6 CÁLCULO DE VARIABLES CINEMÁTICAS Y CINÉTICAS, Y ÁNGULOS ARTICULARES**

Para el cálculo de los datos cinemáticos, cinéticos y ángulos articulares en el software aplicativo para la prueba del salto vertical se hace necesario la obtención de una matriz que contenga los centroides de todos los marcadores por cada cuadro del video, por lo tanto, finalizado el procesamiento de la totalidad de los cuadros en el software se obtiene este arreglo, el cual, al ser almacenado se puede acceder fácilmente y va a ser referido en cada uno de las siguientes secciones.

El diagrama de flujo de la Figura 23 explica los procedimientos y operaciones para obtener los cálculos de las variables requeridas, además de su respectiva visualización. Los cálculos especificados en el diagrama serán explicados con mayor detalle en las siguientes secciones.

**Figura 23. Diagrama de flujo del cálculo de variables**



**3.6.1 Variables Cinemáticas.** En esta sección se describe los procedimientos para la obtención de las tres variables cinemáticas en la ejecución del salto vertical.

***Recorrido del centro de gravedad (recorrido del CG)***

La primera variable cinemática calculada y por tanto la más importante, debido a que a partir de ella se derivan las demás, es el *recorrido del centro de gravedad (RecCG)* en el sujeto. Esta se obtiene a partir del primer marcador, descrito anteriormente en el protocolo de filmación.

Para la obtención de la matriz que describe el recorrido del centro de gravedad (Ecuación 4) se realiza una diferencia entre la posición Y (PosY) del primer centroide del primer cuadro con respecto a la posición Y (PosY) de todos los cuadros del video, este procedimiento se realiza con el fin de que todos los datos del recorrido CG sean referenciados a un nivel cero.

$$RecCG = PosY\ 1^{\circ}centroide(cuadro\ 1) - PosY\ 1^{\circ}centroide(todos\ los\ cuadros)$$

**(Ec. 4)**

***Velocidad del centro de gravedad (velocidad del CG)***

La *velocidad del centro de gravedad (VelCG)* se determina a partir del vector del recorrido del CG (Ecuación 5), debido a que es la derivada de la primera variable. El procedimiento para obtener esta variable es realizar la diferencia entre cada uno de los cuadros de la nueva referencia, teniendo en cuenta que se realiza la diferencia entre el actual y el anterior centroide. A continuación se divide entre la tasa de cuadros por segundo (Tasa FPS) la diferencia encontrada. Así, por ejemplo, para un video de 20 cuadros por segundo, se divide la diferencia de posiciones entre 1/20, lo cual, simplificando es igual a multiplicar la diferencia de posiciones por 20.

$$VelCG = \frac{[PosY\ 1^{\circ}\ centroide\ (actual) - PosY\ 1^{\circ}\ centroide\ (anterior)]}{Tasa\ FPS}$$

**(Ec. 5)**

Es importante aclarar que al realizar la diferencia de centroides, el número de datos obtenidos al final se reduce en un dato, lo que implica que se debe asumir el primer dato de la velocidad como una velocidad inicial cero, esta condición es implementada en el

algoritmo cuando se realiza el ciclo *for-end* que recorre cada uno de los cuadros, especificando que sí el número de cuadro a procesar es menor a 2 se asume que la velocidad es cero, de lo contrario realiza la Ecuación 5.

### ***Aceleración del centro de gravedad (aceleración del CG)***

La *aceleración del centro de gravedad (AcelCG)* es la derivada de la velocidad del CG (Ecuación 6), por lo tanto se realiza la diferencia entre la velocidad (*VelCG*) actual y la velocidad (*VelCG*) anterior, al resultado obtenido se divide entre la tasa de cuadros por segundo (Tasa FPS).

$$AcelCG = \frac{[VelCG (actual) - VelCG (anterior)]}{Tasa FPS}$$

**(Ec. 6)**

Al igual que en el vector de velocidad se disminuía un dato, en la aceleración ocurre lo mismo, por lo tanto se asume que la aceleración inicial es cero, igualmente se aplica el algoritmo que asume que sí el cuadro a procesar es menor a 2 se asigna aceleración cero, de lo contrario se aplica la ecuación 6.

**3.6.2 Variables cinéticas.** Se describen a continuación los procedimientos para la obtención de las dos variables cinéticas en la ejecución del salto vertical.

### **Fuerza Vertical**

Para el cálculo de la *Fuerza Vertical (Fver)* es necesario que el software ya tenga el valor de la masa corporal del deportista, debido a que la fuerza vertical es el producto de la aceleración con la masa sumado el peso corporal (*Pes*) expresada en la Ecuación 8, este resultado deberá tener unidades en Newtons (*N*), por lo tanto la aceleración debe ser expresada en  $m/s^2$ , la masa (*mas*) en Kg-fuerza y el peso en Newtons (Ecuación 7).

$$Pes (Newtons) = mas(Kg) * gravedad (m/s^2)$$

**(Ec. 7)**

$$Fver (Newtons) = [AcelCG (m/s^2) * mas(Kg)] + pes(N)$$

**(Ec. 8)**

## Potencia Mecánica

La *Potencia Mecánica (Potm)* se obtiene a partir del producto entre la fuerza vertical y la velocidad del CG (Ecuación 9), al ser ambos vectores, la multiplicación de estos debe ser punto a punto, o más específicamente de cada valor en el mismo instante de tiempo. Por lo tanto en el algoritmo se crea un ciclo *for-end* para recorrer el total de cuadros y ser este el puntero para multiplicar estas dos variables.

$$Potm (Watt) = Fver (N) * VelCG (m/s)$$

**(Ec. 9)**

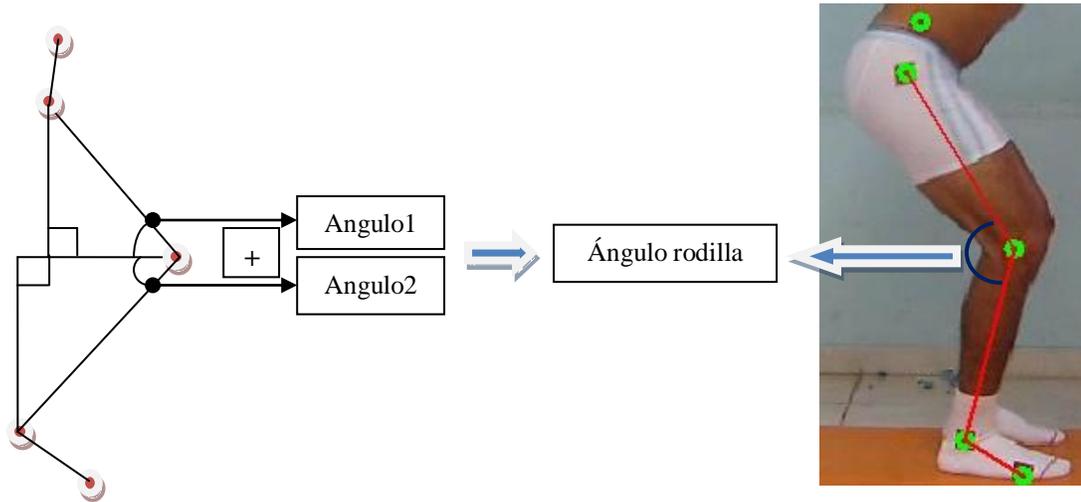
**3.6.3 Ángulos articulares.** Para la obtención de estos datos se recurre a la trigonometría básica, calculando ángulos entre los puntos anatómicos y segmentos corporales.

### Ángulo articular de la rodilla

El cálculo del ángulo de la rodilla se obtiene a partir de la suma de los dos ángulos que forman los dos triángulos rectángulos, el primero se forma con los puntos anatómicos del segundo y el tercer marcador; y el segundo triángulo se obtiene a partir del tercer y el cuarto marcador. En la Figura 24 se observa los dos triángulos rectángulos a partir de tres puntos anatómicos.

En el algoritmo implementado para calcular el ángulo articular de la rodilla se considera las posiciones X y Y de los centroides respectivos a cada triángulo, con el fin de obtener las dos hipotenusas y los dos catetos opuestos para efectuar la operación del arcoseno a cada triángulo. En el cuadro 1 se muestra el procedimiento requerido para calcular el ángulo articular de la rodilla.

**Figura 24. Obtención del ángulo articular de la rodilla**



**Cuadro 1. Procedimiento requerido para calcular el ángulo de la rodilla**

$$Cat. \text{ opuest } 1 = \sqrt{pos Y(\text{centroide } 2 - \text{centroide } 3)^2}$$

$$Hip 1 = \sqrt{posX(\text{centroide } 2 - \text{centroide } 3)^2 + posY(\text{centroide } 2 - \text{centroide } 3)^2}$$

$$\text{ángulo } 1 = \sin^{-1} \frac{cat. \text{ opuest } 1}{Hip1}$$

$$Hip2 = \sqrt{posX(\text{centroide } 3 - \text{centroide } 4)^2 + posY(\text{centroide } 3 - \text{centroide } 4)^2}$$

$$Cat. \text{ opuest } 2 = pos Y(\text{centroide } 3 - \text{centroide } 4)$$

$$\text{ángulo } 2 = \sin^{-1} \frac{cat. \text{ opuest } 2}{Hip2}$$

$$\text{Ángulo rodilla} = \text{angulo } 1 + \text{angulo } 2$$

En la práctica se observó que en el algún momento del salto el segundo marcador puede estar en una posición más a la derecha que el tercer marcador, lo cual genera que los cálculos del ángulo 1 sean erróneos al cambiar el sistema de referencia. Por tal motivo se implemento en un ciclo *if-end* una comparación entre el tercer y el segundo marcador, el

cual, sí el segundo marcador tiene una posición X mayor con respecto al tercero, cambia la fórmula del cateto opuesto y el ángulo 1 por las mostradas en el cuadro 2, por el contrario se aplica la fórmula del cateto opuesto y el ángulo 1 del cuadro 1.

**Cuadro 2. Procedimiento para calcular el ángulo 1 si la posición X del segundo marcador es mayor que el tercer marcador**

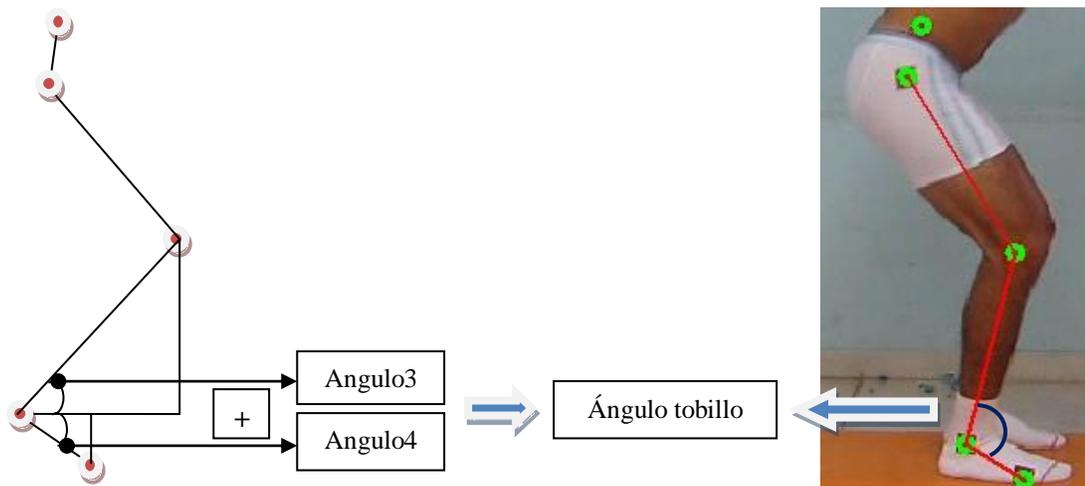
$$Cat.opuest\ 1 = posX(centroide\ 2 - centroide\ 3)$$

$$angulo\ 1 = \sin^{-1} \frac{cat.opuest\ 1}{Hip1} + 90^\circ$$

**Ángulo articular del tobillo**

El cálculo del ángulo del tobillo se obtiene a partir de la suma de los dos ángulos que forman los dos triángulos rectángulos, el primero se forma con los puntos anatómicos del tercer y el cuarto marcador; y el segundo triángulo se obtiene a partir del cuarto y el quinto marcador. En la Figura 25 se observa los dos triángulos rectángulos a partir de tres puntos anatómicos. Para calcular el ángulo articular del tobillo se sigue el mismo procedimiento que se muestra en el cuadro 1, teniendo en cuenta que ahora se reemplaza centroide 2 por centroide 3 y centroide 3 por centroide 4; al igual que ángulo 1 es ahora ángulo 3 y ángulo 2 es ahora ángulo 4.

**Figura 25. Obtención del ángulo articular del tobillo**



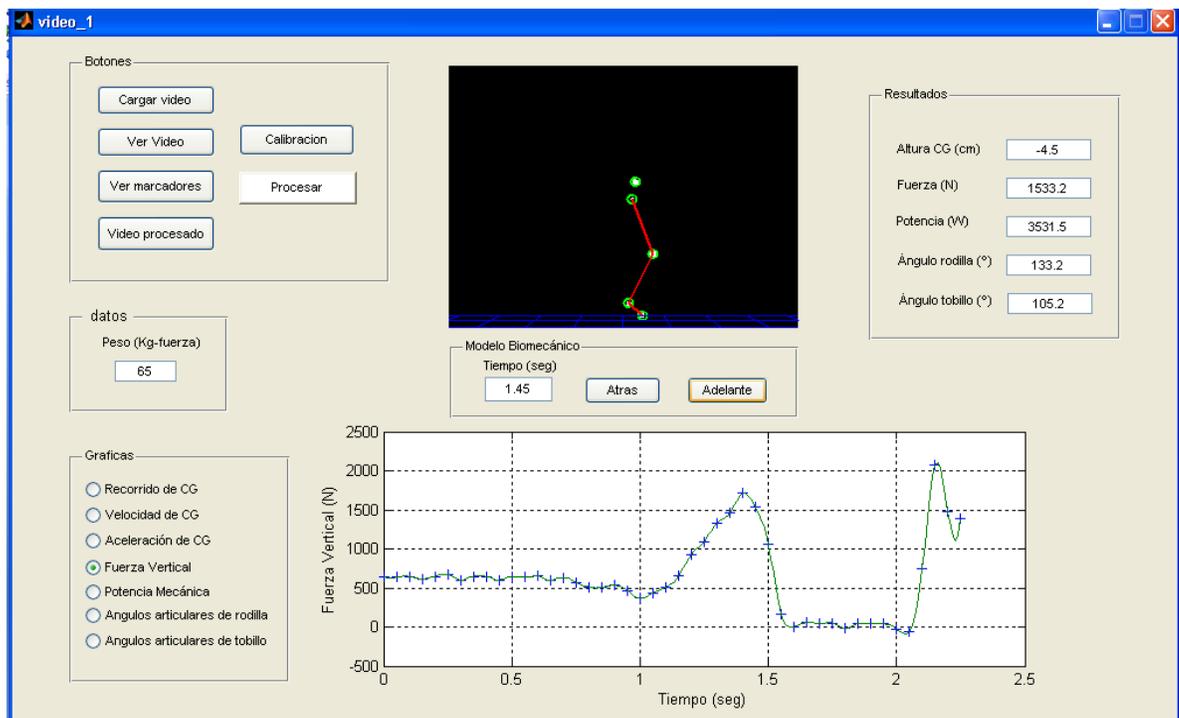
## 4. SOFTWARE APLICATIVO

Como se describió en capítulos anteriores el software aplicativo es el resultado final de la implementación de los algoritmos de procesamiento digital de imágenes para brindar la herramienta con la cual el usuario especialista, realizará sus análisis y observaciones sobre el deportista que ha realizado la ejecución del salto vertical.

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL PANEL CENTRAL

Al abrir el software aplicativo se encuentra el panel central mostrado en la Figura 26, éste contiene cinco paneles importantes los cuales se explicaran brevemente a continuación:

**Figura 26. Panel central del software**



**Panel de botones:** Este panel contiene seis botones los cuales son necesarios para ejecutar los algoritmos de procesamiento de los marcadores y visualización de resultados, estos se describen a continuación:

- **Cargar Video:** Este botón abre los archivos con extensión .avi los cuales previamente fueron almacenados en una carpeta contenedora.
- **Ver Video:** Visualiza el video original cuadro por cuadro en el panel respectivo.
- **Procesar:** Realiza el procesamiento del video original para segmentar y realizar los cálculos requeridos.
- **Ver marcadores:** Visualiza el modelo bidimensional cuadro por cuadro en el panel respectivo.
- **Video procesado:** Visualiza el video original reconociendo los marcadores corporales.
- **Calibración:** Tiene como propósito la calibración del sistema de referencia para ejecutar el procesamiento.

**Panel de modelo biomecánico:** En este panel se visualiza los videos cargados por el usuario, además del modelo biomecánico el cual tiene la opción de adelantar y atrasar cada cinco centésimas de segundo ( $0.05\text{seg}$ ) del tiempo que dura la ejecución del salto.

**Panel de datos:** En este panel se ingresa el dato del *peso* del sujeto el cual está ejerciendo el salto, es muy importante debido a que sin este dato no se puede calcular las variables cinéticas de fuerza vertical y potencia mecánica.

**Panel de resultados:** Este panel muestra los datos de *altura CG*, *fuerza*, *potencia*, *ángulo de rodilla* y *ángulo de tobillo* cuando se está ejecutando la opción de mostrar el modelo biomecánico paso a paso, entonces cambia cada  $0.05\text{ seg}$ . Esta es otra manera de observar los resultados sin recurrir al panel de graficas.

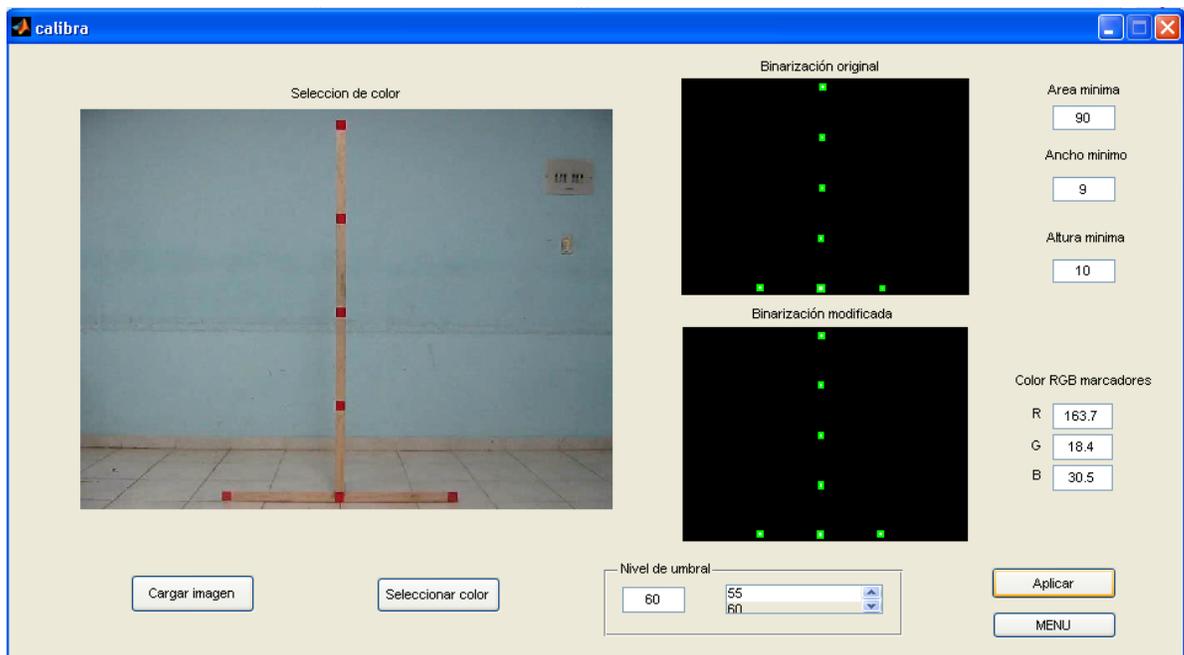
**Panel de gráficas:** Este panel contiene la opción de escoger entre las siete graficas obtenidas con respecto al tiempo, las cuales son importantes para la visualización del usuario.

## 4.2 EJECUCIÓN DEL SOFTWARE

Estando en el software se procede a seleccionar el botón de calibración si es la primera vez que va a trabajar sobre el video. Seguida esta instrucción se genera una ventana, tal como se aprecia en la Figura 27, se selecciona el botón cargar imagen, con lo cual se obtiene la

imagen tomada para calibración, en esta imagen se selecciona diez puntos con el click derecho, es recomendable hacer dos veces click sobre cada marcador, evitando obtener colores ajenos al color del marcador. Terminado este proceso aparecerá una imagen binaria en la misma ventana con los cinco marcadores escogidos, siendo estos de color blanco y cubiertos por un recuadro de color verde, se debe asegurar que el área de estos sean lo suficientemente grandes y que sigan la forma cuadrada original, en tal caso en que no aparezcan todos los marcadores, se debe ajustar el nivel de umbralización, en este caso incrementándolo y aplicando los cambios con el botón aplicar.

**Figura 27. Ventana para calibración**



Si se ajusta la imagen binarizada con un nuevo nivel de umbralización, ésta se verá en la misma pantalla al igual que la binarización original. Al finalizar los cambios y al observar que se tiene el nivel correcto de binarización se aplican los cambios y automáticamente se genera la matriz de color del marcador, la cual será utilizada para realizar la segmentación de los marcadores en el video, además de obtener el tamaño en pixeles de la escena.

Consiguiendo una buena calibración para el software se prosigue a ir al botón *MENU*, el cual cierra la ventana de calibración y abre nuevamente el panel central, en donde ya se puede cargar los videos y procesarlos, tal como se describió en la sección anterior.

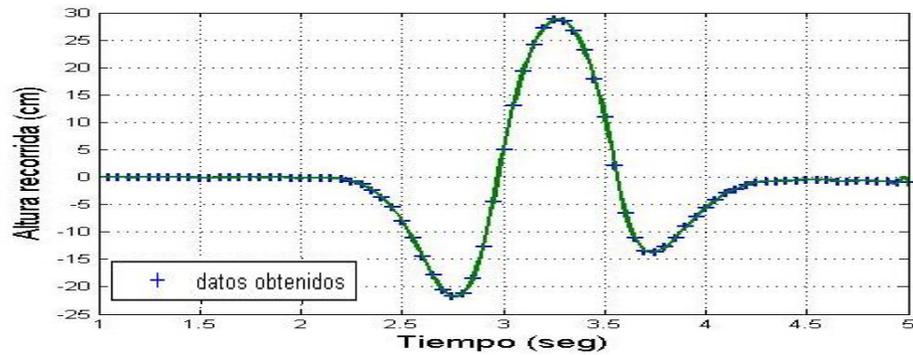
### 4.3 RESULTADOS

En esta sección se muestra los resultados de un deportista que pesó 65Kg el cual realizó un salto *con contramovimiento*. En la Figura 28 se observa el video procesado, y en las Figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35 se observan las variables obtenidas.

**Figura 28. Video procesado**



**Figura 29. Altura recorrida CG**



**Figura 30. Velocidad CG**

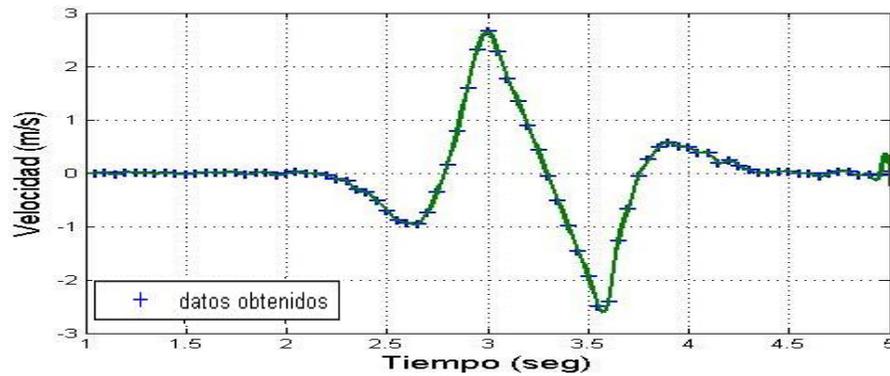


Figura 31. Aceleración CG

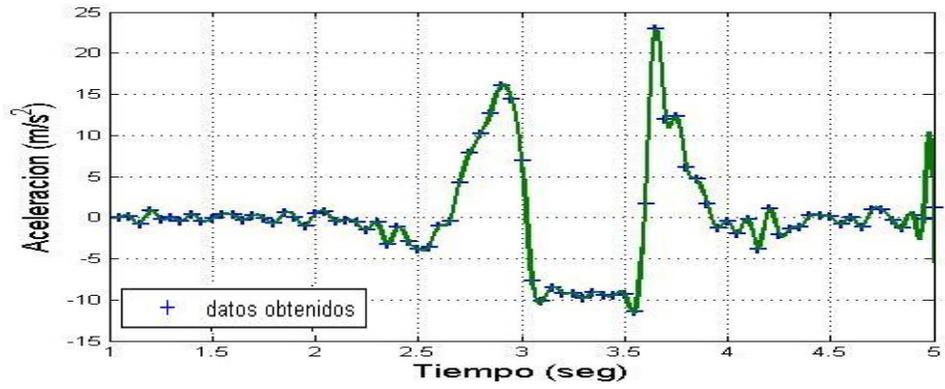


Figura 32. Fuerza vertical

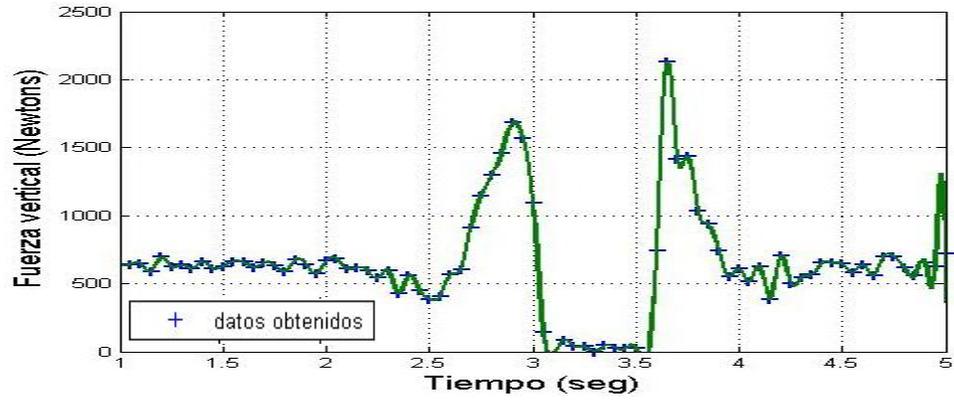


Figura 33. Potencia mecánica

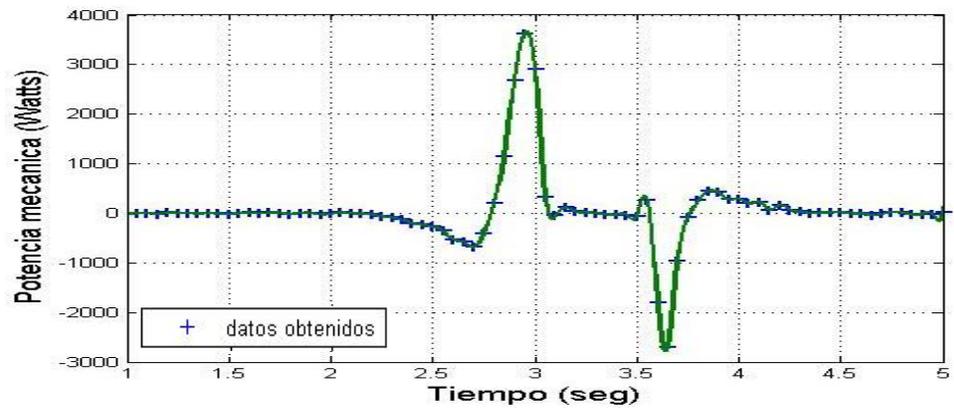


Figura 34. Ángulo articulación rodilla

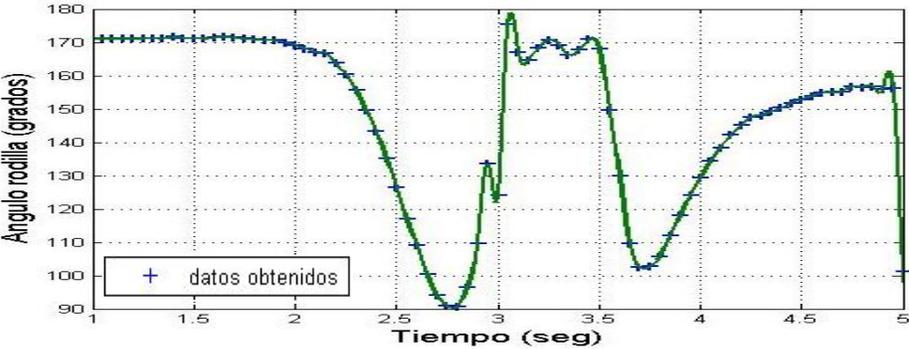
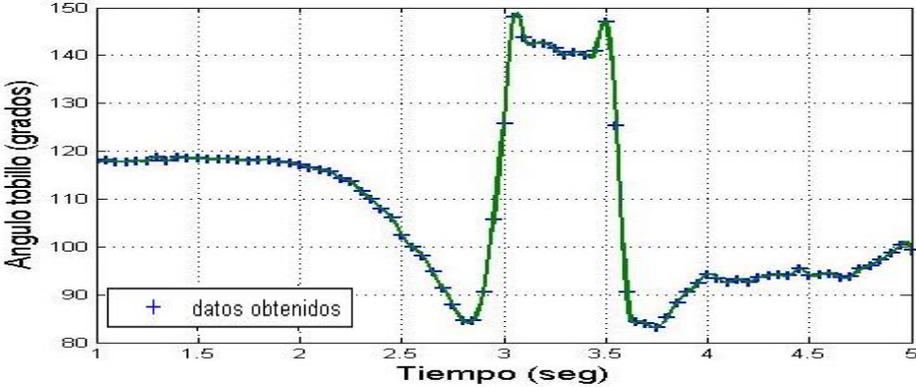


Figura 35. Ángulo articulación tobillo



## 5. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE VIDEOGRAMETRÍA

Con el fin de comprobar que los datos que se obtienen del sistema de videogrametría son equivalentes con datos obtenidos en sistemas comerciales, se realizaron tres tipos de pruebas razón por la cual este capítulo se divide en tres secciones, el primero se encarga de los datos cinemáticos como son el recorrido del CG y la velocidad del mismo los cuales se validaron con el sistema Axon Jump, la aceleración del CG se trata como una validación gráfica. La segunda sección se encarga de validar los datos cinéticos como son la fuerza vertical y la potencia mecánica, los cuales por motivos de falta de instrumentación se validaron con gráficas y formulas existentes para tal fin. En la tercera sección se comprueban los ángulos articulares de rodilla y tobillo usando como instrumento un goniómetro.

### 5.1 VARIABLES CINEMÁTICAS

Las variables cinemáticas se validaron con el sistema de evaluación cinemática Axon Jump que consta de una alfombra sobre la cual el sujeto salta y por medio del software se visualiza Tiempo de vuelo en ms, Altura alcanzada en *cm* y Velocidad de despegue en *m/s*.

El procedimiento para la validación fue poner a saltar a cinco estudiantes de la Universidad sobre la plataforma Axon Jump siguiendo el protocolo de filmación. Estos sujetos tenían diferencias de estatura y masa corporal, aclarando que dos eran estudiantes deportistas y los otros tres, estudiantes que no practicaban deporte; se aclara que según validaciones en otros sistemas (Martinez, 2009) el número de muestras puede ser pocas y no alteran demasiado los resultados. Obtenidos los resultados se prosigió a comparar los datos de altura alcanzada y velocidad de despegue con los suministrados por el sistema de videogrametría.

Para tal comparación se realizó tres tipos de saltos que el sistema de videogrametría permite reconocer, en todos los casos el sujeto salta con los brazos levantados todo el tiempo para así no ocultar los dos primeros marcadores. El primer salto se realiza con contramovimiento; el segundo sin contramovimiento y el tercero con contramovimiento con flexión profunda de las rodillas.

En el Cuadro 3 se muestra los datos de altura máxima y velocidad despegue en cada una de las clases de saltos enunciados anteriormente, se utiliza la nomenclatura de SAJ para referirse al sistema Axon Jump, igualmente SVGR para referirse al sistema de videogrametría realizado.

**Cuadro 3. Datos de altura y velocidad del sistema de videogrametría con referencia al sistema Axon Jump**

|  | CLASE DE SALTO | ALTURA<br>(cm) |      |           | VELOCIDAD<br>(m/s) |      |           |
|--|----------------|----------------|------|-----------|--------------------|------|-----------|
|  |                | SAJ            | SVGR | ERROR (%) | SAJ                | SVGR | ERROR (%) |
| <b>SUJETO 1</b><br><b>70Kg</b><br><b>1.87m</b> | SALTO 1        | 26.4           | 29.6 | 10.81     | 2.28               | 2.56 | 10.94     |
|  | SALTO 2        | 24.6           | 25.2 | 2.38      | 2.20               | 2.41 | 8.71      |
|  | SALTO 3        | 28.2           | 27.2 | 3.55      | 2.35               | 2.60 | 9.62      |
| <b>SUJETO 2</b><br><b>65Kg</b><br><b>1.75m</b> | SALTO 1        | 28.2           | 25.8 | 8.51      | 2.35               | 2.36 | 0.42      |
|  | SALTO 2        | 29.2           | 30.0 | 2.67      | 2.39               | 2.52 | 5.16      |
|  | SALTO 3        | 30.1           | 31.2 | 3.53      | 2.43               | 2.76 | 11.96     |
| <b>SUJETO 3</b><br><b>65Kg</b><br><b>1.72m</b> | SALTO 1        | 29.2           | 28.5 | 2.40      | 2.39               | 2.65 | 9.81      |
|  | SALTO 2        | 32.1           | 34.0 | 5.59      | 2.51               | 2.74 | 8.39      |
|  | SALTO 3        | 40.8           | 41.9 | 2.65      | 2.83               | 2.95 | 4.07      |
| <b>SUJETO 4</b><br><b>79Kg</b><br><b>1.90m</b> | SALTO 1        | 19.6           | 18.8 | 4.08      | 1.96               | 2.40 | 18.33     |
|  | SALTO 2        | 19.6           | 20.5 | 4.39      | 1.96               | 2.45 | 20.0      |
|  | SALTO 3        | 23.8           | 22.6 | 5.04      | 2.16               | 2.53 | 14.63     |
| <b>SUJETO 5</b><br><b>64Kg</b><br><b>1.70m</b> | SALTO 1        | 29.5           | 30.0 | 1.67      | 2.40               | 2.51 | 4.38      |
|  | SALTO 2        | 30.2           | 31.5 | 4.13      | 2.44               | 2.58 | 5.42      |
|  | SALTO 3        | 35.8           | 36.8 | 2.72      | 2.61               | 2.78 | 6.12      |

En el Cuadro 4 se calcula el porcentaje de error del recorrido y la velocidad del sistema de videogrametría con respecto al sistema Axon Jump. Se expresa con un error medio y su respectiva desviación estándar.

**Cuadro 4. Porcentaje de error de altura y velocidad del Sistema de videogrametría con referencia al sistema Axon Jump**

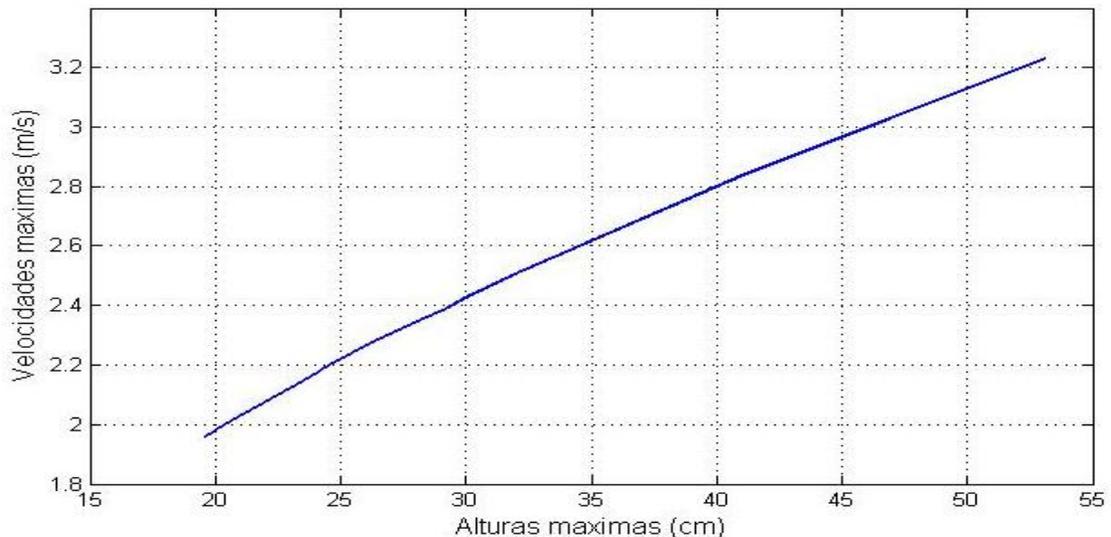
|                 | ERROR MEDIO (%) | DESV. EST (%) |
|-----------------|-----------------|---------------|
| ALTURA (cm)     | 4.27            | ±2.39         |
| VELOCIDAD (m/s) | 9.20            | ±5.22         |

Al analizar el porcentaje de error del sistema, se puede observar fácilmente que las mediciones de alturas están dentro de un rango aceptable para una medición de alturas por diferencia de marcas, según lo expresa en su publicación (García y Peleteiro, 2004).

Con respecto al porcentaje de error en las velocidades de despegue se ha encontrado en la literatura (Aguado, tema 3) unos valores promedio para dos clases de salto: *con contramovimiento* entre (2.49 y 2.94) m/s, y *sin contramovimiento* entre (2.38 y 2.72) m/s, según estos datos y haciendo la comparación con el Cuadro 3, tiene más correlación el sistema de videogrametría que el sistema Axon Jump.

Por lo anteriormente mencionado se podría suponer que el sistema Axon Jump consiste en una relación lineal entre la máxima altura alcanzada y la máxima velocidad. En la Figura 36 se puede observar esta relación, que fue realizada con los datos obtenidos en la prueba de salto con el sistema Axon Jump.

**Figura 36. Velocidad vs. Alturas del sistema Axon Jump**

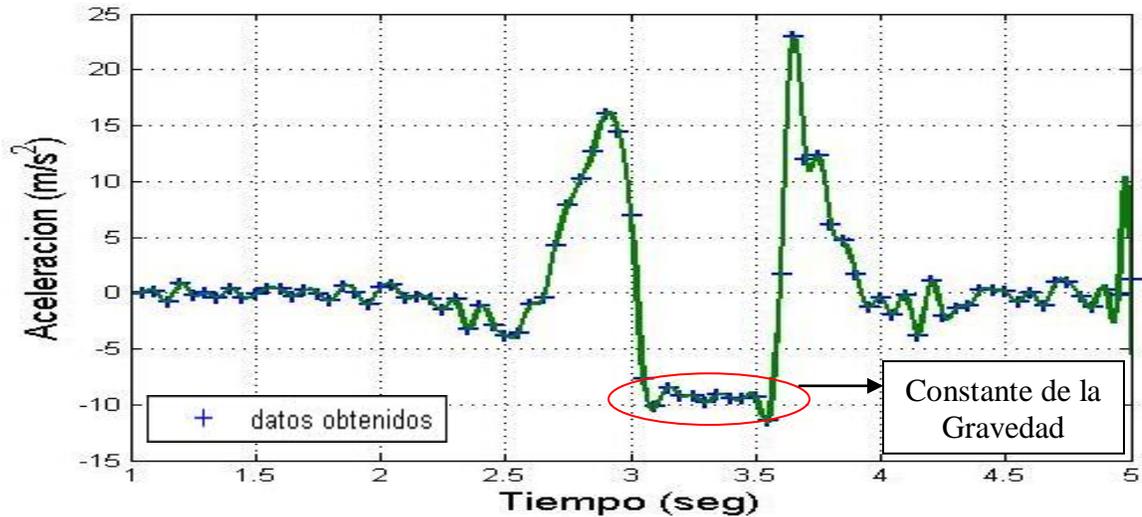


Esta relación en la práctica no se cumple debido a que se pueden alcanzar alturas máximas con diferentes velocidades de despegue, todo depende de las características musculoesqueléticas, pero también del desarrollo de la capacidad de fuerza y potencia del tren inferior generada por el tiempo de entrenamiento del sujeto el cual está ejerciendo el salto (Aguado y Alegre, 2000). Por tal motivo el error en las máximas velocidades del sistema de videogrametría con respecto al sistema Axon Jump tiene un gran porcentaje de error.

La variable cinemática de la aceleración se puede validar de dos formas: la primera es una forma muy empírica, debido a que en el momento en que los sujetos empiezan a caer en el

tiempo de vuelo, los valores tomados en éste momento son una constante que reflejan la gravedad terrestre, por lo tanto se asume que en realidad si son correctos los datos. En la Figura 37 se observa el momento en que la caída toma el valor de la gravedad (aproximadamente  $9.8 \text{ m/s}^2$ ), con el sistema de videogrametría implementado.

**Figura 37. Constante de la gravedad en la caída del tiempo de vuelo en el salto**



La segunda forma de validar la aceleración es teniendo la gráfica de la Fuerza vertical, la cual se validará en la siguiente sección, debido a que como se vio en la sección 4.6.2, esta variable es un dimensionamiento de la aceleración.

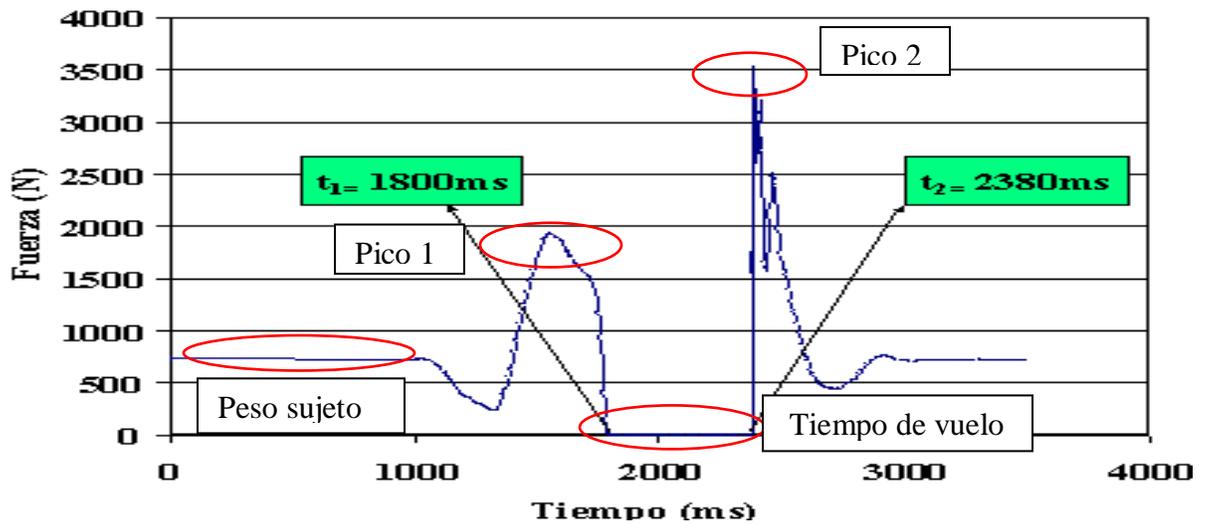
## 5.2 VARIABLES CINÉTICAS

Debido a que en el laboratorio *ALTIUS* en el cual se hicieron las pruebas de validación no se disponía de plataformas de fuerzas, en gran parte porque éstas tienen un alto costo económico se recurrió a validar esta variable de forma gráfica con otras obtenidas en prácticas de biomecánica realizadas en la Universidad de Castilla de la Mancha en el cual utilizan una plataforma de fuerzas portable Quattro Jump de Kistler (Aguado y Alegre, 2000).

En las Figuras 38 y 39 se observan dos gráficas obtenidas con plataformas de fuerzas, en donde se describe la fuerza vertical durante un salto vertical con contramovimiento, en estas se pueden observar cuatro características muy importantes en el desarrollo del salto, estas son:

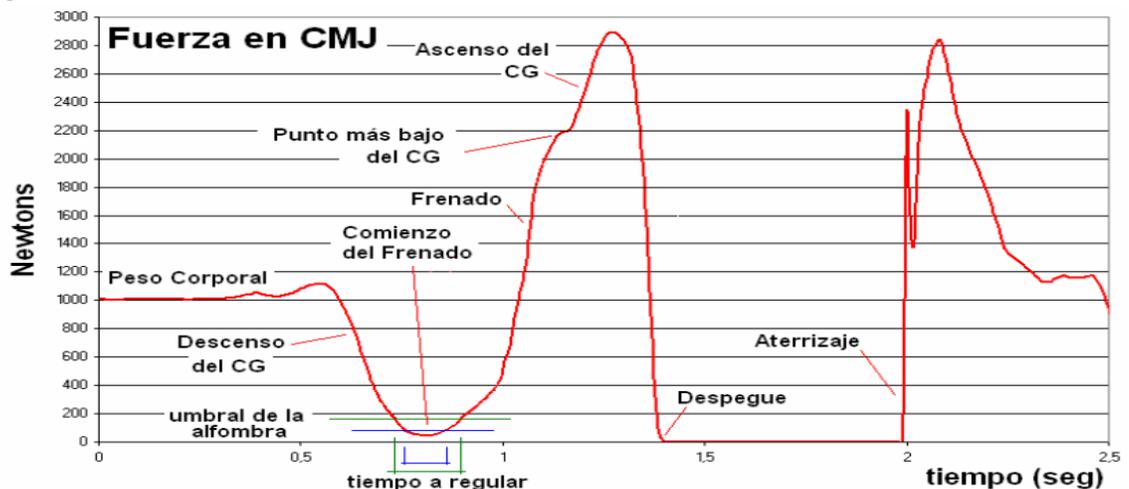
- **El Peso del sujeto:** Se obtiene siempre que el sujeto se encuentre en reposo, debido a que es la fuerza que ejerce la gravedad sobre su masa corporal.
- **El Pico 1:** Es la Fuerza en el punto más bajo del contramovimiento (manifestación activa), en esta fase el sujeto ejerce el mínimo ángulo articular en la rodilla.
- **La Fase de vuelo:** Es el tiempo en el cual el sujeto no ejerce ninguna fuerza, debido a que su cuerpo no está en contacto con el suelo.
- **El Pico 2:** Es la Fuerza máxima ejercida cuando el sujeto entra en contacto con el suelo (manifestación reactiva) luego de la fase de vuelo.

Figura 38. Fuerza vertical obtenida de plataforma de fuerza



Fuente: García-López, J.; Peleteiro, J. Tests de salto vertical (II): Aspectos biomecánicos. *RendimientoDeportivo.com*, N°7. 2004.

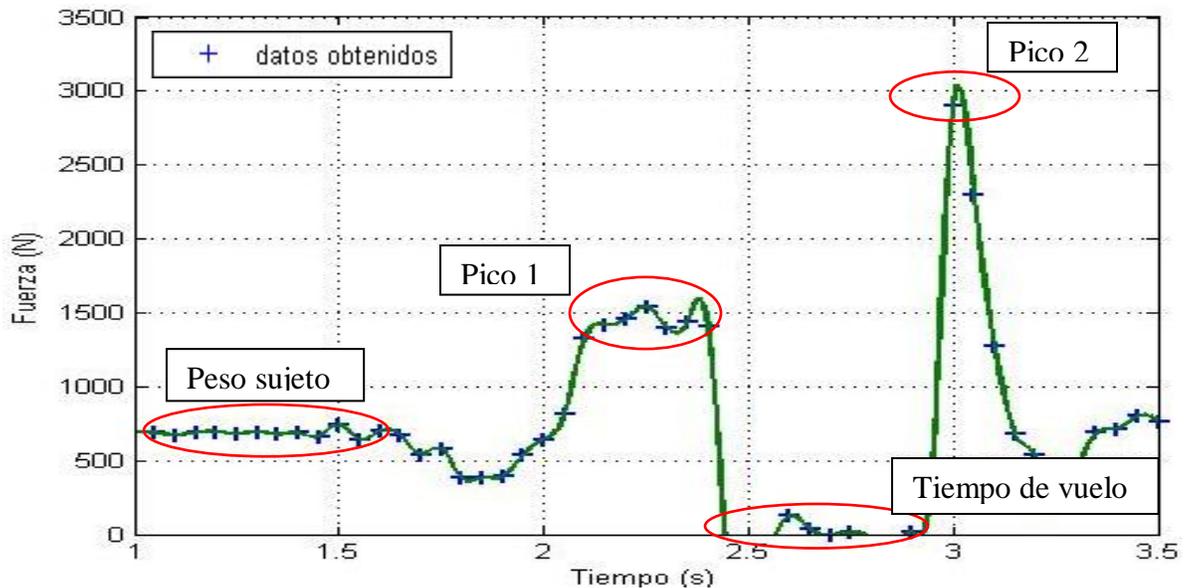
Figura 39. Características de la Fuerza vertical en el salto



Fuente: Manual de usuario Axon Jump. 2004

Luego de observar y comparar las cuatro características de la fuerza vertical entre las dos gráficas obtenidas con plataformas de fuerzas y la obtenida en la Figura 40 con el sistema de videogrametría se puede asumir que los datos de fuerza son muy semejantes al de las plataformas, sin especificar el rango de error.

**Figura 40. Fuerza vertical obtenida del sistema de videogrametría digital**

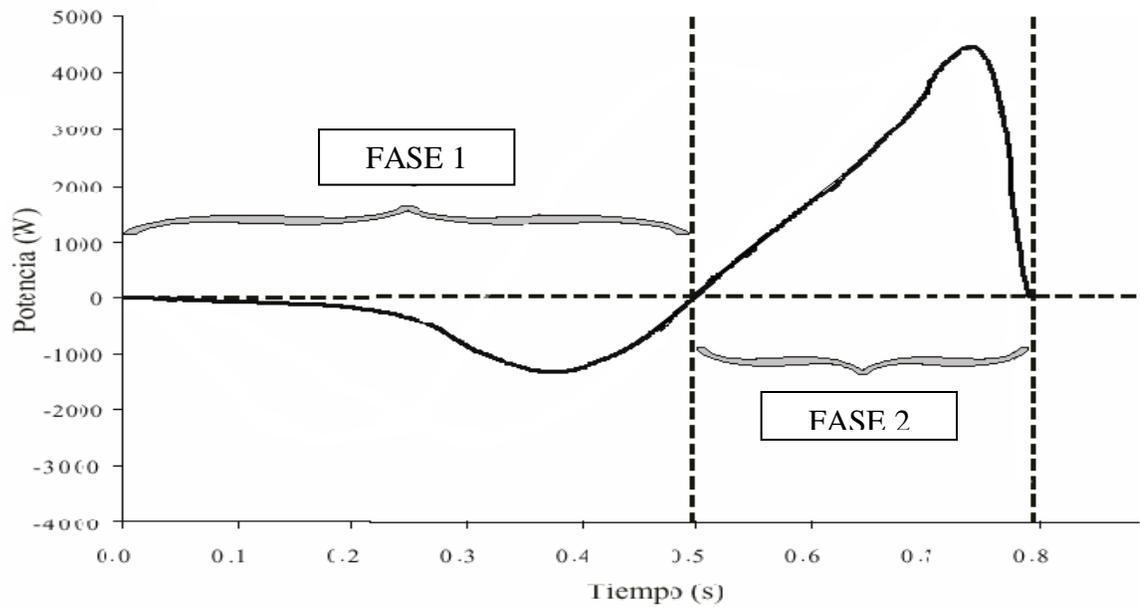


Para realizar la validación de la potencia mecánica se procede a hacer el mismo procedimiento gráfico que se hizo con la fuerza vertical. En las Figuras 41 y 42 se observan dos gráficas de potencia mecánica obtenidas de diferentes sistemas, la primera de un test de salto en una práctica (Lara et al., 2006), y la segunda obtenida del sistema de videogrametría implementado.

En las dos gráficas se ve claramente dos fases importantes en la potencia mecánica del salto vertical con contramovimiento, estas son:

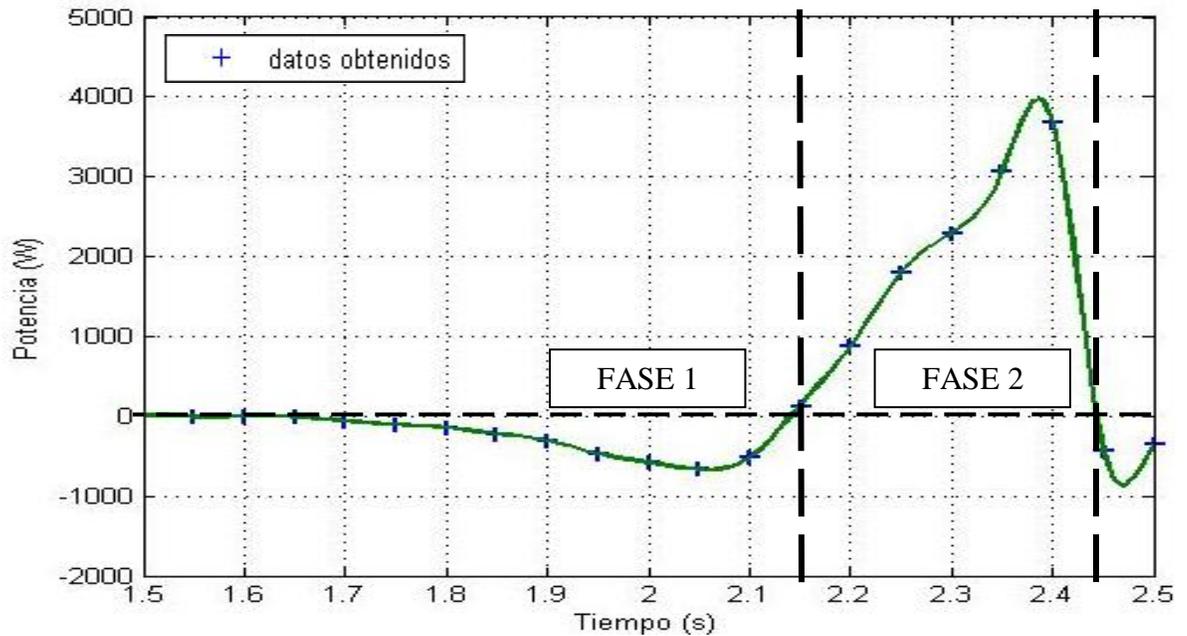
- **Fase 1:** Es la correspondiente a la fase excéntrica de la batida.
- **Fase 2:** Correspondiente a la fase concéntrica del salto, que es la fase en la cual se obtiene la potencia máxima.

Figura 41. Potencia mecánica obtenida en test de salto



Fuente: LARA S., ABIÁN V., ALEGRE D., AGUADO J. Tests de potencia de extremidades inferiores de corta duración: pedaleo vs salto.

Figura 42. Potencia mecánica obtenida en sistema de videogrametría



El valor de la potencia máxima ejercida en un salto vertical se puede comparar con el valor de la ecuación de Lara para calcular la potencia mecánica (Aguado y Alegre, 2000). En la Ecuación 10 se expresa la ecuación de Lara (*PotL*) para hallar la máxima potencia mecánica en el salto vertical, para lo cual se tiene en cuenta la altura del salto (*alts*) y la masa del sujeto (*mas*).

$$PotL = [62.5 * alts(cm) + (50.3 * mas(Kg)) - 2184.7]$$

**(Ec. 10)**

En el Cuadro 5 se realiza la comparación de la potencia mecánica entre el sistema de videogrametría con nomenclatura SVGR y la ecuación de Lara, los cinco sujetos especificados en el cuadro 5 son los mismos que ayudaron a validar los datos cinemáticos del recorrido y velocidad del centro de gravedad en el Cuadro 3.

A diferencia del Cuadro 3, en el Cuadro 5 solo se estudia el tipo de salto con contramovimiento, debido que con este es que se han realizado anteriores comparaciones de potencia mecánica con la ecuación de Lara (Aguado y Alegre, 2000).

**Cuadro 5. Datos de potencia mecánica del sistema de videogrametría con referencia a la ecuación de Lara**

| SUJETO | MASA (Kg) | ALTURA SALTO (cm) | POTENCIA LARA (W) | POTENCIA SVGR (W) | ERROR (%) |
|--------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| 1      | 70Kg      | 29.6              | 3186.8            | 3608.1            | 11.68     |
| 2      | 65Kg      | 25.8              | 2694.7            | 2818.4            | 4.39      |
| 3      | 65Kg      | 28.5              | 2882.3            | 3008.5            | 4.19      |
| 4      | 79Kg      | 18.8              | 2961.4            | 3054.3            | 3.04      |
| 5      | 64Kg      | 30.0              | 2909.5            | 3052.2            | 4.68      |

En el Cuadro 6 se calcula el porcentaje de error de la potencia mecánica del sistema de videogrametría con respecto a la ecuación de Lara. Se expresa con un error medio y su respectiva desviación estándar.

**Cuadro 6. Porcentaje de error potencia mecánica del sistema de videogrametría con respecto a la ecuación de Lara**

|                                  | <b>ERROR MEDIO (%)</b> | <b>DESV. EST (%)</b> |
|----------------------------------|------------------------|----------------------|
| <b>POTENCIA MECÁNICA<br/>(W)</b> | 5.60                   | ±3.46                |

Al observar el porcentaje de error del sistema con respecto a la ecuación de Lara, se podría deducir dos razones por las cuales este porcentaje toma este valor tan significativo. La primera razón sería que la ecuación de Lara contiene también un porcentaje de error con respecto a la potencia mecánica tomada con las plataformas de fuerzas, lo cual no es una referencia directa sobre la medida; y la segunda razón por la cual se obtendría un porcentaje significativo, sería que al ser la potencia mecánica un producto entre la fuerza vertical y la velocidad de despegue, se obtendría en el sistema valores alejados de la potencia debido a que el porcentaje de error de la velocidad del sistema mostrado en el Cuadro 3 contiene un rango de más del 9% de error en su medición.

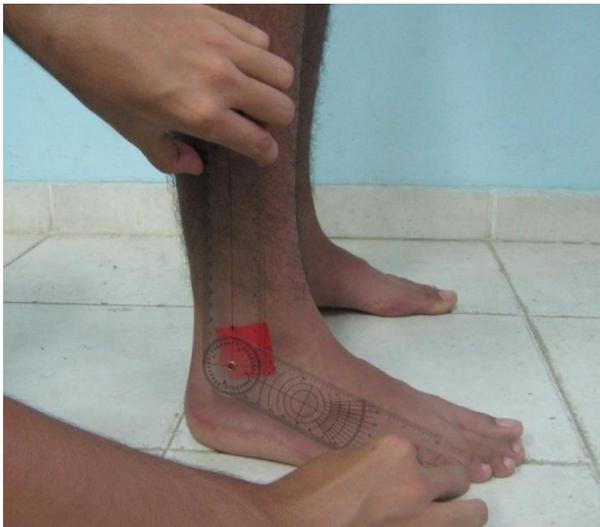
### **5.3 ÁNGULOS ARTICULARES**

La validación de los ángulos articulares de rodilla y tobillo se realizó utilizando un goniómetro de brazos. El procedimiento que se siguió fue medir el ángulo que se formaban entre los marcadores adyacentes a la articulación. Así para el ángulo articular de la rodilla se referenció el segundo marcador (TM) y el cuarto marcador (ML) manteniendo el centro del instrumento en el tercer marcador (EFL) tal como se muestra en la Figura 43; y para medir el ángulo articular del tobillo se referenció el tercer marcador (EFL) y el quinto marcador (MET), manteniendo el centro del instrumento en el cuarto marcador (ML) tal como se muestra en la Figura 44.

**Figura 43. Medición del ángulo articular de la rodilla**



**Figura 44. Medición del ángulo articular del tobillo**



Debido a que las mediciones de los ángulos en las dos articulaciones no son totalmente medibles en la ejecución del salto, por su corto tiempo de duración, se prosiguió a obtener solo dos valores por cada articulación, el primero cuando el sujeto se encuentra estático en posición inicial y el segundo cuando realice su máxima flexión articular para despegar del suelo. En el Cuadro 7 se obtiene un posible rango articular del sistema de videogrametría con referencia a las mediciones realizadas con el goniómetro, los sujetos son los mismos cinco estudiados en las anteriores secciones.

**Cuadro 7. Datos de ángulos articulares de posición inicial y de despegue del sistema de videogrametría con referencia a las mediciones del goniómetro**

|                 | MEDICION GONIOMETRO (°) |          | MEDICION SVGR (°) |          | ERROR RANGO (%) |         |
|-----------------|-------------------------|----------|-------------------|----------|-----------------|---------|
|                 | RODILLA                 | TOBILLO  | RODILLA           | TOBILLO  | RODILLA         | TOBILLO |
|                 | INI-DESP                | INI-DESP | INI-DESP          | INI-DESP |                 |         |
| <b>SUJETO 1</b> | 174-94                  | 116-90   | 172-94            | 115-92   | 2.50            | 11.54   |
| <b>SUJETO 2</b> | 176-96                  | 122-96   | 176-98            | 124-96   | 2.50            | 7.14    |
| <b>SUJETO 3</b> | 174-90                  | 120-84   | 172-91            | 121-85   | 3.57            | 0.00    |
| <b>SUJETO 4</b> | 176-82                  | 116-80   | 172-80            | 118-84   | 2.13            | 5.56    |
| <b>SUJETO 5</b> | 174-92                  | 118-88   | 174-94            | 120-86   | 4.76            | 11.76   |

En el Cuadro 8 se calcula el porcentaje de error de los ángulos articulares de posición inicial y de despegue del sistema de videogrametría con respecto a las mediciones del goniómetro. Se expresa con un error medio y su respectiva desviación estándar.

**Cuadro 8. Porcentaje de error de ángulos articulares de posición inicial y de despegue del sistema de videogrametría con referencia a las mediciones del goniómetro**

|                    | ERROR MEDIO (%) | DESV. EST (%) |
|--------------------|-----------------|---------------|
| ÁNGULO RODILLA (°) | 3.09            | ±1.08         |
| ÁNGULO TOBILLO (°) | 7.20            | ±6.33         |

Debido a que los datos del sistema al ser referenciados a un sistema manual de medición producirán un error humano aceptable, es válido aceptar que el porcentaje de error calculado en el Cuadro 8 está dentro de un rango posible para validar los ángulos articulares del sistema.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró diseñar e implementar un sistema de videogrametría digital bidimensional que permite visualizar la medición de la *altura máxima alcanzada* por un deportista y a partir de esta variable obtener características cinemáticas como: *velocidad de despegue* y *aceleración del centro de gravedad*; cinéticas como: *fuerza vertical* y *potencia mecánica*; y por último *ángulos articulares de rodilla* y *tobillo* en la ejecución del salto vertical.

Se generó un protocolo de filmación completo para la prueba de salto, éste incluye ubicación de marcadores corporales, dimensiones del escenario y procedimiento propio para ejercer tres clases de saltos que no ocultan ningún marcador corporal.

Se desarrolló un software aplicativo utilizando las herramientas de *Matlab* para el procesamiento digital de imágenes y la interface de usuario *GUI*, para el análisis detallado de la secuencia del movimiento y trayectorias del centro de gravedad de un deportista que ejecuta un salto vertical.

Con la implementación de este sistema a muy bajo costo, el cual solo requiere de una cámara y un software de procesamiento, se pretende integrar y mejorar el tiempo al momento de recolectar datos, debido a que este sistema obtiene las variables más importantes para evaluar un salto vertical, ya que en la actualidad se requieren de diferentes instrumentos para integrar todas las variables a analizar, tal es el caso de la plataforma de vuelo para medición de alturas, plataformas de fuerzas para medición de fuerza y potencia musculares, e instrumentos como goniómetros para medición de ángulos articulares.

Con la evaluación de las gráficas y animación en dos dimensiones mostradas por el software, los entrenadores de deportistas pueden empezar a realizar sus recomendaciones de acuerdo a las falencias observadas en la ejecución del salto vertical, con el fin de mejorar la potencia mecánica de acuerdo a la clase de deporte realizado, por ejemplo voleibolistas o futbolistas de alto rendimiento de la región.

El sistema de videogrametría implementado se diferencia de la plataforma de vuelo porque al generar el despegue o aterrizaje de la persona, la plataforma marca una altura del centro de gravedad CG con algunas diferencias en centímetros respecto al sistema de videogrametría, debido a que las plataformas miden la altura a través del tiempo de vuelo, por lo cual en algún momento del despegue o aterrizaje el sistema de videogrametría registra una altura mientras que en la plataforma no hay registro.

Las gráficas de velocidad y aceleración al ser datos derivados del recorrido del centro de gravedad presentan ruido, especialmente en los datos de la aceleración por ser la segunda derivada, estos se pueden observar como un rizado en el tiempo en que el sujeto esta en reposo.

El sistema es adecuado para medir el recorrido del centro de gravedad (CG) siempre en cuando no se flexionen las rodillas durante el salto, debido a que el centro de gravedad cambia durante esta clase de movimiento y en el sistema implementado se asume un CG fijo poder para modelar las variables cinemáticas y cinéticas durante el salto.

El sistema de procesamiento no es adecuado para las situaciones en donde al saltar haya alguna oclusión de los marcadores y en donde la escena no tenga un buen contraste con los marcadores.

Al ejecutar el salto vertical, en la etapa del segundo contacto con el suelo luego de la fase de vuelo se observa que en la mayoría de los casos el pie donde se encuentra los marcadores no quedan en el mismo lugar de donde se inicio el salto, por tal razón se puede presentar un error minúsculo en el sistema de videogrametría al cambiar la relación de distancia en pixeles con la distancia real. Por tal motivo se sugiere que si al observar en primera instancia este tipo de error, no se continúe con el procesamiento del video y se vuelva a realizar el salto.

## **7. TRABAJO A FUTURO**

Se propone como trabajo a futuro utilizar métodos de predicción para poder estimar la ubicación de los marcadores ocultos en un instante determinado.

Se propone utilizar una etapa de filtrado con el fin de atenuar el ruido producido por las variables de primera y segunda derivada, tales como velocidad y aceleración respectivamente.

Para la validación de las variables cinéticas se recomienda que sean nuevamente consideradas en un próximo trabajo teniendo el equipo preciso para tal medición, debido a que por recursos no se pudieron comparar con plataformas de fuerzas lo cual genera que la validación realizada tenga mucho margen de error.

Para un próximo trabajo el sistema de videogrametría se podría realizar en tres dimensiones con el fin de considerar otros puntos de vista y poder aproximar mucho mejor los resultados obtenidos.

## FUENTES DE CONSULTA

### BIBLIOGRAFICAS

AGUADO, Xavier. Tema 3: Plataforma de fuerzas en la medición de las manifestaciones de la fuerza. Biomecánica de la fuerza y arquitectura muscular. Facultad de Ciencias del deporte. Universidad de Castilla la Mancha. 2000.

AGUADO, Xavier. Tema 8: El Equilibrio. Biomecánica del movimiento (2º). Facultad de Ciencias del deporte. Universidad de Castilla la Mancha. 2000.

AGUADO, Xavier y ALEGRE, Luis. Potencia máxima en salto (medida vs. calculada). Cuaderno de prácticas de Biomecánica de las Técnicas deportivas. Facultad de Ciencias del deporte. Universidad de Castilla de la Mancha. 2000.

ACEVEDO, D.; HINCAPIÉ, F.; SÁNCHEZ, J. Valoración de la manifestación reactiva de la fuerza de los miembros inferiores a las integrantes de la selección Antioquia de voleibol categoría junior rama femenina. Universidad de Antioquia. Instituto de educación física. Medellín. 2008.

CALDERÓN, Ximena y MONTERO, María. Correlación entre torque isocinético máximo de cuádriceps y potencia de la cadena muscular de la extremidad inferior. Facultad de medicina. Universidad de Chile 2004.

DIAZ C.; TORRES A.; RAMIREZ J.; GARCIA L. y ALVAREZ N. 2006. Descripción de un dispositivo destinado al análisis de la marcha en dos dimensiones, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 5 p. 85-92.

ESPAÑA, Boquera; María del Carmen. Servicios avanzados de telecomunicación. Ediciones Diaz Santos. S. A. España. 2003.

FIELD, Derek. Anatomía. Palpación y localización superficial. Editorial Paidotribo. 2004.

GARCÍA López, J.; PELETEIRO J. Tests de salto vertical (II): Aspectos biomecánicos. *RendimientoDeportivo.com*, N°7. 2004.

GARZÓN, Carolina y CRUZ, Fabiola. Diseño e implementación de un sistema electrónico para la medición de las presiones plantares. Universidad Surcolombiana. Ingeniería Electrónica. Neiva. 2005.

LARA S., ABIÁN V., ALEGRE D., AGUADO J. Tests de potencia de extremidades inferiores de corta duración: pedaleo vs salto. Facultad de Ciencias del Deporte de Toledo. Universidad de Castilla-La Mancha. 2006.

MARTÍNEZ C. Fabio. Modelo de Seguimiento del Centro de Masa para el Análisis Cinemático de la Marcha. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Biomédica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2009.

RODRÍGUEZ Sandra. Sistema de captura de movimiento grueso para animaciones tridimensionales en un ambiente controlado. Monografía. Fundación Universitaria San Martín. Bogotá. 2006.

VALDEMAR, Erick, ZALDIVAR, Daniel. Visión por Computador utilizando Matlab y el Toolbox de Procesamiento Digital de Imágenes.

VAQUERA A.; RODRÍGUEZ J.A.; VILLA J. G.; GARCÍA J. y ÁVILA C. Cualidades fisiológicas y biomecánicas del jugador joven de liga eba. Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Universidad de León. 2002

## **PRINCIPALES ENLACES**

<http://html.rincondelvago.com/anatomia-de-la-extremidad-inferior.html>

<http://www.medicina.org.ar/anatomia-patologica/230-articulaciones-concepto.html>

<http://www.videoedicion.org>

<http://www.digitalfotored.com/imagendigital/sensorimagen.htm>

<http://www.vicon.com>

<http://www.physiomed.de/index.php?id=488>

<http://www.axonjump.com.ar/>

<http://www.c-motion.com/products/visual3d.php>

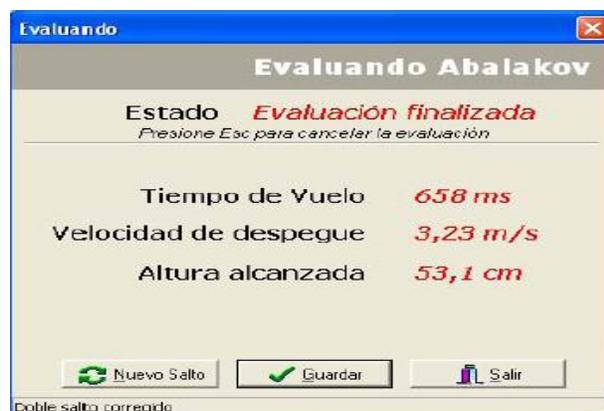
# *ANEXOS*

## ANEXO A. EQUIPOS COMERCIALES DE EVALUACION DEPORTIVA

Actualmente existen diferentes equipos que permiten calcular la potencia desarrollada además de otras variables ejercidas en un salto vertical. A continuación se describen dos de los sistemas más utilizados:

### SISTEMA AXON JUMP

El sistema de evaluación cinemática Axón Jump es un producto de la empresa argentina Axón Bioingeniería Deportiva dedicada a la creciente demanda de tecnología para el deporte. El sistema está constituido básicamente por una alfombra de contactos y un cable de conexión RCA para el computador.



Fuente: <http://www.axonjump.com.ar/>

### **Funcionamiento**

La alfombra acciona un cronómetro de alta resolución (1 *mseg*) que se encuentra en el programa provisto. La altura y la velocidad de los saltos son calculados a través de las fórmulas de la física clásica, conociendo la gravedad del lugar (9,81  $m/s^2$  a nivel del mar). Si el salto está técnicamente bien ejecutado, la exactitud de la medición es muy alta.

### **Características**

La alfombra de contactos Axon Jump es un instrumento semirrígido plegable y portátil, comandado por software e interconectables entre sí. Está diseñado para:

- **La Evaluación** de distintas capacidades mecánicas cinemáticas en deportistas tales como: capacidad de salto en distintas condiciones, fatiga en saltos continuos, velocidad de desplazamiento horizontal, pliometría de miembros superiores, frecuencia en skipping y cronómetro automático programable.
- **El Entrenamiento** de sesiones pliométricas de saltos continuos con feedback visual en tiempo real, con opción de variar el volumen, la intensidad y las pausas de dichas sesiones.
- **El Registro** de todas las variables obtenidas de las evaluaciones, para su posterior gestión, graficación, generación de reportes y comparación de resultados.

### **COBS FEEDBACK**

El dispositivo COBS Feedback facilita al paciente la respuesta informativa que necesita en tiempo real representada de forma gráfica y/o acústica sencilla. Este dispositivo es uno de los productos de la empresa PHYSIOMED ELEKTROMEDIZIN AG, un productor líder de equipos de alta calidad para fisioterapia tradicional e innovadora en rehabilitación, deporte y medicina estética.

Partiendo de la base de una planificación y control eficaces de la terapia o entrenamiento, se trata, no obstante, de la respuesta informativa exacta sobre las habilidades motrices de una persona. Las funciones de medición de COBS Feedback permiten evaluar de forma cualitativa y cuantitativa las siguientes habilidades:

- Simetría de movimientos
- Capacidad de carga
- Fuerza

- Potencia de salto
- Coordinación
- Reacción
- Anticipación
- Funciones cognitivas
- Equilibrio en la dirección X e Y



**Fuente:** <http://www.physio-med.de/index.php?id=488>

Gracias a su versatilidad en cuanto a mediciones y a un software de entrenamiento atractivo, COBS Feedback es el dispositivo adecuado para las siguientes indicaciones:

- **Rehabilitación ortopédica y traumatología**

En el área de la rehabilitación ortopédica, COBS Feedback se utiliza después de una operación quirúrgica de colocación de una endoprótesis, para tratar el dolor de espalda y en traumatología.

- **Pediatría**

COBS Feedback se puede aplicar de forma eficaz para corregir problemas de esqueleto en niños como, por ejemplo, escoliosis y problemas posturales de columna provocados por la inactividad física o por un crecimiento acelerado.

- **Deporte**

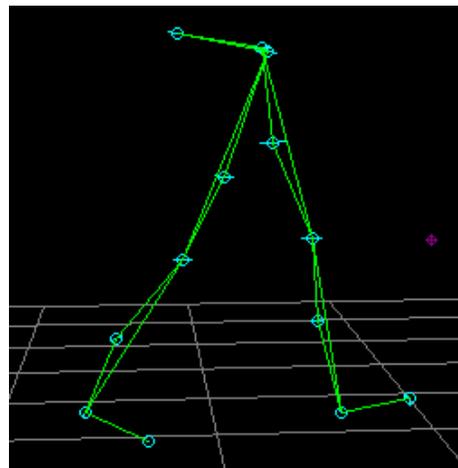
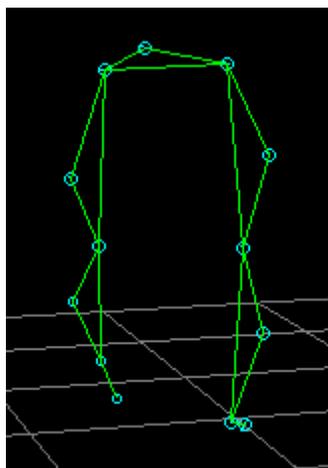
COBS Feedback ofrece un amplio abanico de opciones para entrenar la coordinación dinámica, la fuerza y el equilibrio, incluida la potencia de salto. Mediante el juego de goniómetro opcional, la coordinación se puede combinar de forma eficaz con el entrenamiento de la velocidad perceptual, la anticipación y la reacción.

## ANEXO B. SISTEMAS COMERCIALES PARA ANALISIS DE MOVIMIENTO

Los sistemas de captura y análisis de movimiento en la actualidad tienen muchas aplicaciones en el análisis clínico de la marcha, biomecánica deportiva y otras tantas evaluaciones, para lo cual, los movimientos ejecutados son imperceptibles para el ojo humano. A continuación se presenta dos grandes sistemas comerciales para tal fin:

### SISTEMA VICON

Vicon es un sistema líder a nivel mundial dedicado a ofrecer productos de captura de movimientos y análisis biomecánico para ayudar a atletas a mejorar su funcionamiento en la preparación para competición de Olímpicos y mundiales.



Fuente: <http://www.vicon.com>

Vicon ofrece una gama completa de productos para satisfacer las necesidades de rastreo de movimiento – desde la facilidad del análisis de 2D de vídeo hasta la alta exactitud de los sistemas digitales ópticos de 3D. A continuación se describen los cuatro productos que ofrece esta empresa.

### **Sistemas**

La gama de producto Vicon ofrece un número de sistemas diferentes y accesos de tecnología - cada uno con sus propias ventajas y exigencias ambientales.

- Vicon mx
- Vicon bonita
- Vicon motus video

### **Cameras**

Vicon ofrece la opción más amplia de cámaras de captura de movimiento convenientes para cada uso imaginable. Vicon Serie T ofrece el último en la alta resolución y la alta exactitud. Bonita es la cámara de próxima generación, pequeña y poderosa, ofreciendo la mayor mezcla de funcionamiento de precios de cualquier cámara sobre el mercado. Y para el trabajo puro de vídeo, Vicon recomienda y suministra una gama de calidad, cámaras de vídeo de alta velocidad.

- T160
- T40
- Bonita
- High speed video

### **Hardware**

Vicon ofrece componentes de hardware de alta calidad. Con Vicon Motus, el único hardware requerido son cámaras o alguna otra fuente de vídeo. La Unidad de Sincronización Remota De vídeo (RVSU) puede ser añadida a un Vicon Motus el sistema para permitirle coordinar la adquisición de vídeo de múltiples cámaras.

### **Software**

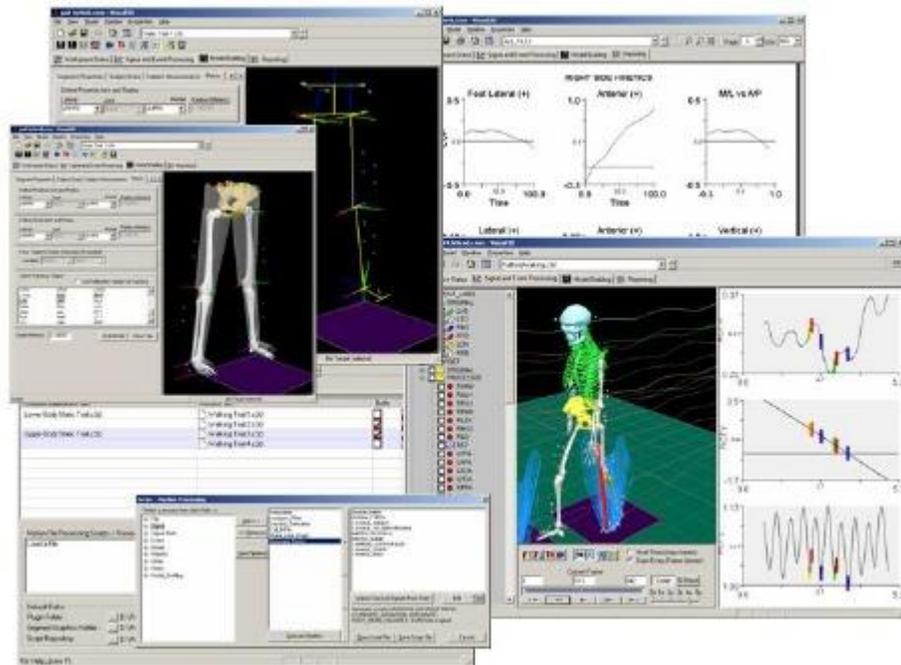
Cientos de personas en los últimos años han desarrollado una variedad de software consistentes en proporcionar soluciones a cada necesidad. Los software estan divididos entre las dos líneas de productos de software Vicon y Vicon Motus software.

- Vicon tracker

- Vicon BodyBuilder
- Vicon Motus

## SISTEMA VISUAL3D

Visual3D es un producto de la empresa C-Motion, es el software más avanzado para análisis y moldeamiento biomecánico para investigadores y clínicos. El software es usado para el análisis, funcionamiento, estudios de movimiento y evaluaciones.



Fuente: <http://www.c-motion.com/products/visual3d.php>

### Características

- Visual3D trabaja con casi todos los sistemas de captura de movimiento, lee archivos C3D y realiza procesamiento en tiempo real.
- Soporta datos análogos provenientes de plataformas de fuerza, EMG, EEG, células de carga, giroscopios, MEMS, etc.
- Exporta archivos .mot para realizar modelamientos avanzados.
- Contiene marcadores virtuales (señales), segmentos, y laboratorios para simplificar, mejorar e incrementar el análisis.