

03063



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

**T E S I S**

**MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACION**

**Implantación de un método  
computarizado para el análisis  
biomecánico de los ejercicios físicos**

**Matilde Espinosa Sánchez**

**DIRECTOR DE LA TESIS: Dr. Enrique Daltabuit Godás**

**ENERO/1993**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# C O N T E N I D O

## CAPITULO I. RESUMEN

## CAPITULO II. INTRODUCCION

## CAPITULO III. MATERIALES Y METODOS

### 3.1 Lista de equipo

- 3.1.1 Cámara de video
- 3.1.2 Editor de video
- 3.1.3 Monitor de video
- 3.1.4 Tarjeta digitalizadora
- 3.1.5 Computadora

### 3.2 Representación del cuerpo humano

- 3.2.1 Modelo de representación
- 3.2.2 Identificación y extracción de segmentos

### 3.3 Procesamiento de imágenes

- 3.3.1 Digitalización
- 3.3.2 Resolución
- 3.3.3 Principios de barrido
- 3.3.4 Velocidad de cuadros
- 3.3.5 Formato
- 3.3.6 Distorsión

### 3.4 Interpolación de datos

- 3.4.1 Interpolar
- 3.4.2 Interpolación polinomial
- 3.4.3 Interpolación por splines
- 3.4.4 Aproximación polinomial en porciones
- 3.4.5 B-splines
- 3.4.6 Beta-splines

### **3.5 Características del sistema**

#### **3.5.1 Módulo de captura**

- 3.5.1.1 Despliegue de la imagen
- 3.5.1.2 Captura de datos y coordenadas

#### **3.5.2 Módulo de depuración**

- 3.5.2.1 Depuración de archivos

#### **3.5.3 Módulo de análisis**

- 3.5.3.1 Animación de segmentos
- 3.5.3.2 Desplazamiento de los centros de gravedad
- 3.5.3.3 Cálculo y graficación del desplazamiento, la velocidad y la aceleración angular
- 3.5.3.4 Cálculo y graficación del desplazamiento, la velocidad y la aceleración lineal del centro de gravedad
- 3.5.3.5 Cálculo de los momentos de inercia
- 3.5.3.6 Cálculo de los momentos angulares

## **CAPITULO IV. EJEMPLOS Y RESULTADOS**

### **4.1 Velocidad en el atletismo femenino**

### **4.2 Gimnasia artística varonil**

### **4.3 Velocidad en el atletismo varonil**

## **CAPITULO V. DISCUSION Y CONCLUSIONES**

### **5.1 Fuentes de error**

### **5.2 Limitaciones del sistema**

### **5.3 Mejoras al sistema**

### **5.4 Validación**

### **5.5 Conclusiones**

## **APENDICE**

Lista de programas.

Condiciones para la grabación del video.

## **REFERENCIAS**

**SISTEMA DE ANALISIS BIOMECANICO**

**EXPO CIENCIA Y DEPORTE**

**U N A M**

matilde espinosa. 1991

**Da Esc para abortar, otra tecla para continuar.**

## C A P I T U L O I .

### R E S U M E N

La biomecánica deportiva es una disciplina que consiste en el estudio de los movimientos del hombre en el proceso del ejercicio físico, así como en el análisis de las acciones motoras del deportista como sistemas de movimientos activos. La tarea general de esta disciplina consiste en evaluar la efectividad de la ejecución de los movimientos, y perfeccionar la técnica del deportista. (s) Para la evaluación y el análisis se utilizan los procedimientos de la cinemática y la dinámica que son ramas de la mecánica física.

En el sistema computarizado que se presenta en este trabajo, se han implantado métodos que permiten evaluar los desplazamientos del cuerpo humano. Dentro de la rama de la cinemática, el sistema permite calcular la velocidad y la aceleración lineales y angulares, por ejemplo, del centro de gravedad del cuerpo, del brazo derecho, del muslo izquierdo, etc. Por otro lado, dentro de la rama de la dinámica el sistema permite calcular los momentos de inercia y los momentos angulares de la parte del cuerpo que se desee, en las distintas fases o etapas del movimiento en estudio.

El método desarrollado utiliza al video como el medio de obtención de una secuencia de instantes que conforman el movimiento. Estos instantes son imágenes, que después de ser digitalizadas se despliegan en el monitor de una microcomputadora para obtener de ellas la información fuente, necesaria para calcular los parámetros que evalúan, cuantitativamente, las características del movimiento grabado.

El sistema en la computadora consta de varios programas que le permiten al usuario, por ejemplo, capturar la información fuente, crear archivos de movimientos, ver la animación de la secuencia de instantes, hacer cálculos, obtener resultados graficados, etc.

El objetivo del desarrollo de este trabajo es proporcionar al entrenador deportivo una herramienta para la depuración de la técnica de sus atletas, utilizando para esto medios relativamente accesibles como lo son una cámara de video y una microcomputadora, y valores de parámetros que le permitan evaluar cuantitativamente el desempeño humano.

## C A P I T U L O   I I .

### I N T R O D U C C I O N

El método utilizado en este trabajo fue desarrollado en la EXPO CIENCIA Y DEPORTE, dentro del Laboratorio de Biomecánica montado en el Museo de Ciencias y Artes, anexo a la Facultad de Arquitectura durante el año de 1991. Uno de los principales objetivos de la implantación de este método fue la utilización de recursos de tecnología actual en video, imágenes digitalizadas, computadoras y software, para el desarrollo de una aplicación en una de las áreas de las ciencias del ejercicio, la biomecánica deportiva.

En la literatura especializada, los métodos utilizados para análisis semejantes y utilizados en las investigaciones hechas en ejercicios específicos en diversas especialidades deportivas, han usando tradicionalmente a la cinematografía como el medio para la obtención de los datos. Una de las preocupaciones más grandes en los métodos desarrollados ha sido la cantidad de datos con los que se cuenta para hacer el análisis, así, para conocer mejor la ejecución de un movimiento entre más instantes sucesivos se tengan en la unidad de tiempo, mejor, ya que el movimiento del cuerpo humano es continuo y no se puede decir cuantos son los instantes que lo forman. Por eso el número de cuadros por segundo de una película está relacionado con de la veracidad de los resultados obtenidos en el análisis. Con el objeto de cubrir los intervalos de tiempo de los que no se tiene información, en los métodos publicados se habla de la interpolación de los datos.

Como ya se mencionó anteriormente, el método utiliza como medio de captura de la secuencia de imágenes al video. En los últimos

años el video ha reemplazado, casi completamente, a la cinematografía dentro de los propósitos de enseñanza y entrenamiento deportivo. Como el video es reusable y no necesita de ningún tipo de procesamiento para reproducir inmediatamente las escenas grabadas, resulta barata su utilización. Sin embargo a pesar de que este medio es muy valioso para las evaluaciones cualitativas, no se usa generalmente para investigaciones de naturaleza cuantitativa. No tiene la resolución suficiente ni la linealidad que permita mediciones finas. Hemos querido, no obstante, como una de las finalidades del método que se reporta en este trabajo, comparar los resultados que se obtienen con los resultados obtenidos de los métodos desarrollados a partir de la cinematografía y, de esta manera, demostrar su confiabilidad.

Para suplir la relativamente poca información que puede adquirirse del bajo número de imágenes digitalizadas por segundo, 30 de las grabaciones de video no profesional, el sistema cuenta con módulos de interpolación con los que se pretende aproximar al comportamiento real en la ejecución del ejercicio. El número de datos interpolados puede ser tan alto como para suponer 120 cuadros por segundo.

El cuerpo humano es una estructura compleja, difícil de representar, cualquier movimiento que se ejecute es en realidad el resultado del comportamiento de varios músculos. Debido a esta complejidad, se opta por representar al cuerpo de una manera más sencilla que, en este caso, es la de asumir al cuerpo como un conjunto de segmentos rígidos e individuales. Esta representación, constituida por un conjunto de líneas rectas permite la aplicación de los procedimientos de cálculo de la Física.

Para que el sistema de cómputo desarrollado pueda utilizar los

instantes o imágenes de la secuencia del movimiento deben pasar de ser imagen de video a imagen digitalizada. Así, la secuencia de imágenes se digitalizan una por una.

Con el fin de obtener la información de la postura del cuerpo en cada instante del movimiento, lo que se hace es localizar los puntos extremos de las líneas rectas, las cuales representan las diferentes partes del cuerpo tales como los miembros superiores, inferiores, cabeza y tronco. Esta identificación de puntos se realiza en este método por medio de la obtención de las coordenadas x y y de los puntos. De esta manera, dos pares de coordenadas son los extremos de la línea recta que representa a un miembro del cuerpo. El sistema "Implantación de un método computarizado para el análisis biomecánico de los ejercicios físicos" permite leer las coordenadas fácilmente en pantalla, utilizando al mouse y la imagen digitalizada, desplegada en el monitor de la computadora.

Con la identificación de los puntos en cada una de las imágenes, el sistema genera un archivo de coordenadas para ese movimiento. De ser necesario, el sistema contempla la posibilidad de corregir la secuencia de las imágenes en la captura eliminando y/o añadiendo una o varias imágenes. También permite corregir la localización de puntos por imagen, si se detecta que hubo error.

Además de crear un archivo de coordenadas, se debe contar con información adicional. Para el cálculo de los parámetros de evaluación son necesarios el peso del atleta, su estatura y la longitud de las diferentes partes de su cuerpo. Estos datos son almacenados en otro archivo con información adicional como es el nombre del atleta, especialidad deportiva, etc.

El sistema permite que el usuario vea, en forma animada, la

reproducción del movimiento, la cual facilita la evaluación cualitativa (descriptiva) del movimiento realizado por el atleta, puede además, ver como se desplaza el centro de gravedad del cuerpo. La posición de los centros de gravedad le dicen al usuario la forma en que el atleta distribuye, en cada instante del movimiento, la masa de su cuerpo y de esta manera puede saber, por ejemplo, por qué el atleta pierde el equilibrio y se va de bruces.

El sistema cuenta con otro módulo que permite al usuario, para cada una de las partes del cuerpo, conocer los ángulos de desplazamiento, calcular la velocidad y la aceleración angulares, hacer interpolación y graficar los resultados calculados. La amplitud de los ángulos le dicen al entrenador que tanta flexión, extensión o inclinación, según sea el caso, presentan las partes del cuerpo en cada instante del movimiento. Con los valores obtenidos el usuario puede llevar un registro y un seguimiento en la enseñanza o depuración de la técnica de su entrenado. Los resultados de velocidad y aceleración angulares muestran la capacidad del atleta de hacer cambios de posición en la unidad de tiempo y, la magnitud de la aceleración en los diferentes instantes da idea de la fuerza muscular total aplicada en aquellos. De esta manera, el entrenador sabe si el deportista debe aplicar mayor o menor fuerza y en qué momento debe hacerlo para desarrollar una aceleración o una desaceleración.

El ejercicio grabado puede ser dividido en fases o etapas, dependiendo de si, por ejemplo, en un instante del ciclo de la carrera de un corredor, éste se encuentra apoyado en el talón del pié derecho o si está sin apoyo al piso, es decir, en vuelo. El usuario decide qué imágenes cumplen con un determinado requisito de apoyo y, para estos instantes, calcula el momento de inercia del desplazamiento de cada una de las partes del cuerpo con respecto a ese punto de apoyo (la

velocidad de un desplazamiento angular de las partes del cuerpo es inversamente proporcional a la magnitud de sus momentos de inercia). [Nota: Momento de inercia ( $I$ ) es la cantidad que indica la resistencia de un cuerpo al cambio angular en su estado de movimiento. Es una medida de la distribución de la masa del objeto con respecto a un eje o punto alrededor del cual está rotando.]

El sistema contempla para el cálculo de momentos de inercia, el apoyo en el piso de la punta o talón del pié izquierdo o del pié derecho, de la mano izquierda o la derecha y el caso de cuando no hay apoyo (el cuerpo en vuelo).

El usuario puede calcular también el momento angular (cantidad de movimiento o momentum, que es la medida de rotación del cuerpo que caracteriza su capacidad para transmitirse a otro cuerpo en forma de movimiento mecánico) del desplazamiento para las fases definidas en el cálculo de los momentos de inercia. Los resultados pueden ser interpolados y graficados.

## C A P I T U L O   I I I .

### M A T E R I A L E S   Y   M E T O D O S

#### 3.1 LISTA DE EQUIPO.

3.1.1 Cámara de video: para la grabación de los ejercicios se han utilizado cámaras de video Hi8mm marca Sony Handycam de tecnología NTSC, modelo CCD - V101. Estas cámaras son de tipo "casero" o no profesionales. En realidad se puede utilizar cualquier cámara de video y posiblemente cualquier formato de grabación, Beta, VHS o video8. Creemos que cualquier tipo de cámara de video puede estar al alcance de un entrenador.

3.1.2 Editora de video: la selección de las imágenes cuadro por cuadro de las secuencias a digitalizar se hace por medio de una editora de video Hi 8mm marca Sony modelo EVO-9700. Las editoras de este tipo y algunas cámaras tienen la facilidad de transmitir al monitor cuadro tras cuadro. La editora tiene además la capacidad de numerar los cuadros de cada segundo de la grabación, lo que facilita enormemente la selección de cuadros.

3.1.3 Monitor: Sony Trinitron a color, modelo KX-27HG2. Este monitor RGB se utiliza para proyectar las imágenes del video grabado. Se utiliza también en la configuración de monitor dual para el proceso de digitalización de imágenes.

3.1.4 Tarjeta digitalizadora: una vez congelada la imagen o cuadro seleccionado, se procede a digitalizarla usando para esto una tarjeta comercial PIB+ (Professional Image Board) de Atronics Internacional, Inc. insertada en la computadora.

3.1.5 Computadora: la computadora es una Acer 915V.

a. *procesador y memoria interna*: procesador 80286 en una máquina tipo AT compatible con memoria RAM de 1 Megabyte,

b. *almacenamiento*: disco duro de 40 megabytes,

c. *dispositivos de entrada/salida*: drive para diskettes de 5 1/4" de alta densidad, monitor tipo VGA (Video Graphics Array) a color,

d. *software de soporte*: sistema operativo MS-DOS versión 3.3, programas para digitalizar suministrados junto con la tarjeta PIB, programas desarrollados en Turbo C de Borland versión 2.

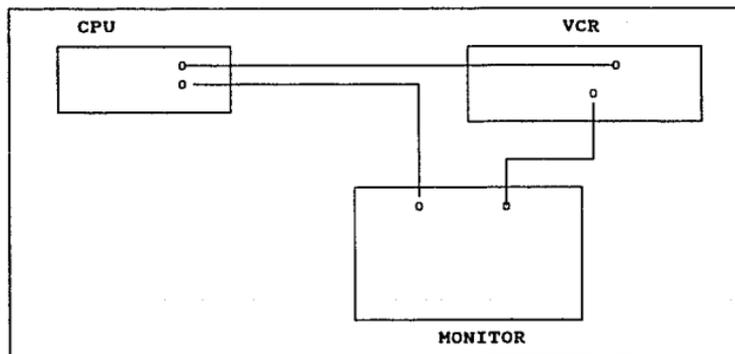


FIG. 1 Diagrama de la conexión del equipo.

## 3.2 REPRESENTACION DEL CUERPO HUMANO

3.2.1 Modelo de representación: Con el método (6) utilizado en este trabajo para representar el cuerpo humano en las diferentes posiciones durante la evolución del movimiento en un ejercicio, se tienen 14 líneas rectas y 19 puntos. A las 14 líneas rectas se les conoce como segmentos corporales. La

distribución de la masa del cuerpo se representa mediante indicadores como son el peso de las diferentes partes del cuerpo o segmentos (piernas, manos, tronco, etc.) el centro de gravedad de cada una de estas partes, la localización del centro de gravedad de todo el cuerpo, etc.

En el modelo desarrollado por Chandler et al. (6) se utilizan dos constantes para el cálculo del peso de cada uno de los segmentos corporales (tabla 1) y el peso total del individuo (P). Para la localización del centro de gravedad de cada segmento existe una tercera constante, que es un porcentaje de la longitud del segmento a partir del extremo más cercano al tronco o proximal.

segmento	a	b	c
cabeza	0.032 * P	18.70	66.3
tronco	0.532 * P	-6.93	52.2
brazo	0.022 * P	4.76	50.7
antebrazo	0.013 * P	2.41	41.7
mano	0.005 * P	0.75	51.5
muslo	0.127 * P	-14.82	39.8
pierna	0.044 * P	-1.75	41.3
pié	0.009 * P	2.48	40.0

Tabla 1. Ecuaciones de regresión según Chandler et al. (6)  
 peso segmento = peso total \* a + b  
 centro de gravedad de segmento = longitud de segmento \* c / 100

Existen otros métodos de representación del cuerpo humano: por ejemplo los soviéticos (5) representan al cuerpo en 19 segmentos, y otros investigadores (7) hacen una representación volumétrica para un análisis tridimensional.

**3.2.2 Identificación y extracción de segmentos:** La información necesaria para la representación por medio de segmentos se obtiene identificando los puntos extremos de las líneas rectas en el cuerpo del atleta. El extremo proximal es el punto más

cercano y el punto distal es el punto más distante. El punto a partir del cual se hace esta referencia, es la orquilla. En la tabla 2 se identifican los extremos de los segmentos.

No.	segmento	punto proximal	punto distal
1	tronco	orquilla	cóccix
2	cabeza	orquilla	vertex
3, 6	brazo	vértice del acromio (hombro)	opicóndilo (codo)
4, 7	antebrazo	opicóndilo (codo)	estiloides (muñeca)
5, 8	mano	estiloides (muñeca)	punta del dedo más largo
9, 12	muslo	trocánter (cadera)	vértice de la rótula (rodilla)
10, 13	pierna	vértice de la rótula (rodilla)	maleolo ext. (tobillo)
11, 14	pie	maleolo externo (tobillo)	punta del dedo más largo

Tabla 2. Identificación de los segmentos corporales.

Para cada imagen de la secuencia del movimiento, se localizan los puntos extremos de los segmentos, según un patrón de los 14 segmentos y 19 puntos, como se puede observar en la figura 2.

### 3.3 PROCESAMIENTO DE IMAGENES (2) (3) (21).

**3.3.1 Digitalización.** El concepto digitalizar es el proceso de convertir una imagen de tonos continuos (por ejemplo una fotografía en blanco y negro compuesta de tonos de grises) a una imagen digital. Esta conversión se produce haciendo cortes

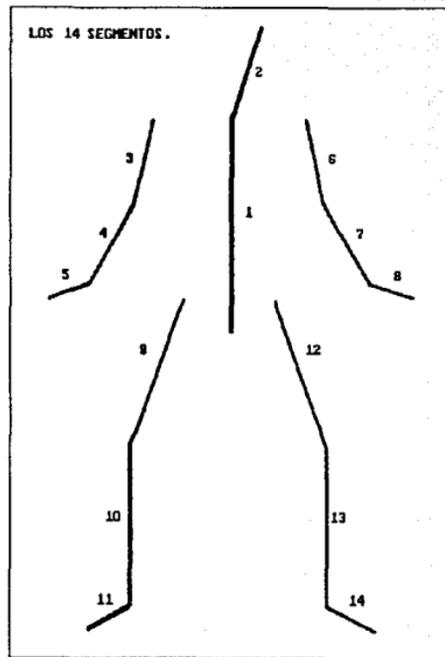
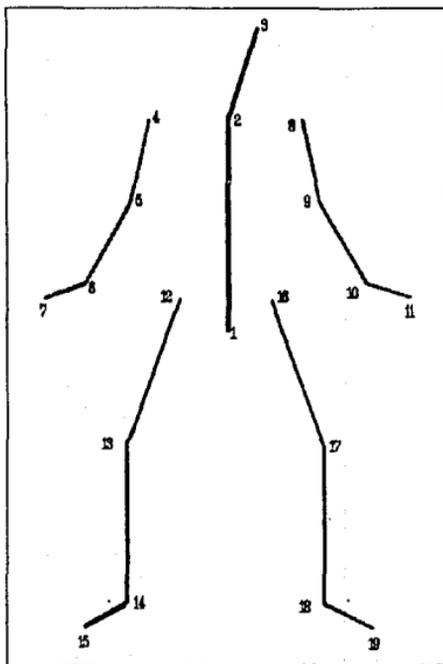


Fig. 2 Diagramas de los segmentos corporales.

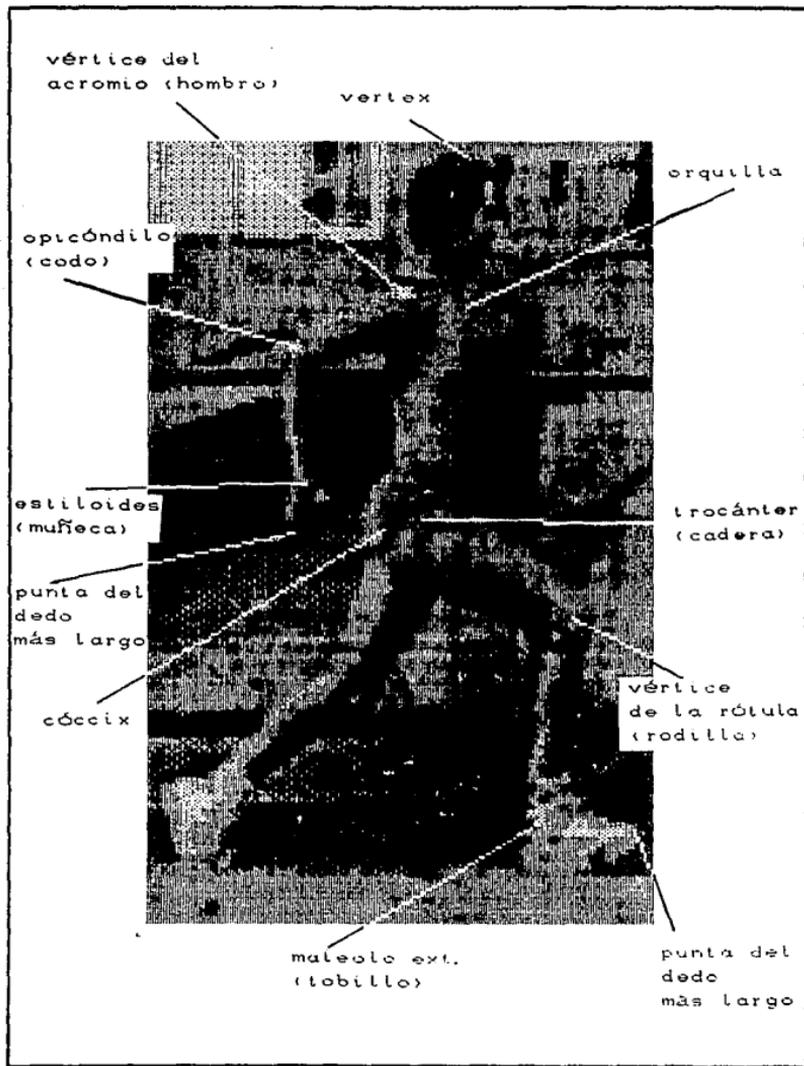


Fig. 3 Identificación de segmentos.

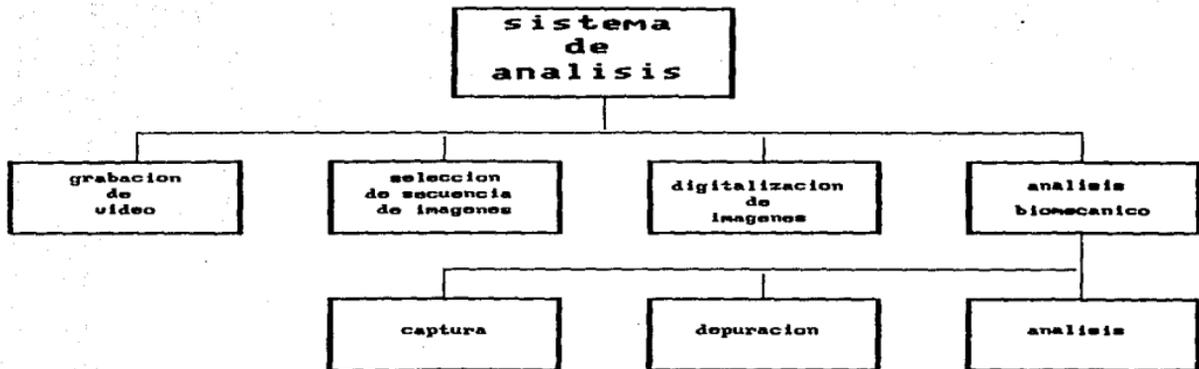


Fig. 4 Diagrama del sistema.

de información en puntos individuales. Al proceso de cortar se le llama más propiamente muestreo, debido a que se toman muestras de la brillantez de la imagen en puntos específicos dentro de ella. Comúnmente a una muestra se le conoce como pixel y es lo que representa a un elemento discreto de la imagen digitalizada.

La limitación de un proceso de digitalización se define con el término resolución. La representación con imagen es tan buena como lo sea su parecido con el original y entre más fina sea esta resolución, más cerca estará la imagen de la apariencia del original.

**3.3.2 Resolución de brillantez.** Cada pixel representa el brillo de la imagen original en un punto de su muestreo. El proceso de digitalización muestrea la imagen original en una localización en cuadrícula predeterminada: cada brillantez muestreada es convertida a un valor numérico entero, o sea, se cuantifica. La cuantificación de la brillantez de un pixel, por ejemplo con un número binario de tres bits, permite a cada pixel ser representado por uno de 8 niveles de brillantez, del negro al blanco, esto es, la escala de grises. Los fabricantes de equipo de procesamiento de imágenes adoptan generalmente la representación de imágenes digitalizadas en 8 bits.

En el muestreo, cada pixel es manejado en forma individual. El pixel en las coordenadas  $I(x,y)$  en la imagen de entrada es modificado y regresado a la imagen de salida en las coordenadas  $O(x,y)$ .

La ecuación general para el procesamiento está dada por la siguiente ecuación:

$$O(x,y) = M[I(x,y)]$$

donde

$M$  = función de mapeo

**3.3.3 Principios de barrido.** El propósito de una cámara de video es convertir una imagen frente a la cámara en una señal eléctrica. Una señal eléctrica tiene sólo un valor en cualquier instante en el tiempo, es unidimensional: pero una imagen es bidimensional y tiene muchos valores en todas las posiciones diferentes en la imagen. La conversión de la imagen bidimensional en una señal eléctrica unidimensional es efectuada por medio de un barrido de esa imagen con un patrón ordenado llamado raster. Con el rastreo, movemos rápidamente un punto sensible sobre la imagen antes de que ésta se mueva demasiado. Conforme el punto sensible se mueve, la salida eléctrica cambia en respuesta a la brillantez o al color de la imagen bajo el punto sensible. La variabilidad de la señal eléctrica del sensor representa a la imagen con una serie de valores generados llamados señal de video.

Con respecto al manejo de imágenes de video, hay que saber que todo video es analógico, de valores continuos; nunca es un sistema perfecto donde las distorsiones análogicas se acumulan. Las distorsiones dependen de la calidad del equipo y probablemente la calidad de éste dependerá de su costo.

**3.3.4 Velocidad de cuadros.** Para el video del movimiento se deben rastrear muchos cuadros cada segundo para producir un efecto de movimiento continuo. En los sistemas estándar de video comercial las velocidades normales son de 25 a 30 cuadros por segundo, dependiendo del país. A pesar de que estas velocidades son suficientes para presentar un movimiento continuo, no lo son tanto como para evitar el parpadeo. Para que el ojo humano no perciba el parpadeo en una imagen brillante, la velocidad de refresco de la imagen debe ser mayor de 50 por segundo. Sin embargo, para tener esta velocidad y preservar la resolución horizontal, se requerirá aumentar la velocidad de rastreo tanto horizontal como vertical, o sea aumentar el ancho (bandwidth) de banda del sistema: para evitar

esta dificultad, todo sistema de televisión usa la técnica del *interlacing*. En un sistema de televisión entrelazar significa que se usa más de un rastreo vertical para reproducir un cuadro completo. La televisión comercial usa 2 rastreos verticales por cuadro. Con un rastreo vertical se despliegan todas las líneas nones y con el segundo rastreo, las líneas pares. Lo anterior quiere decir que cada cuadro del video es dividido en dos campos, cada uno conteniendo la mitad de la imagen, los dos campos se interlazan presentándose alternadamente cada 1/60 de segundo, un campo tiene las líneas nones y el otro las líneas pares. O sea que a 30 cuadros por segundo (Norteamérica y Japón), la velocidad vertical es de 60 rastreos por segundo. Los estándares de la televisión comercial en México están dados por la NTSC (National Television Standards Committee). Los estándares en países de Europa, por la PAL (Phase Alternating Line). Estos estándares usan un total de 525 líneas horizontales con un marco o relación de aspecto de visión de 4:3, esto significa que el marco de visión es 3/3 en la vertical, por 4/3 en la horizontal.

3.3.5 Formato (10): En este trabajo se manejan las imágenes en el formato no comprimido del archivo. El tamaño del archivo corresponde directamente a la resolución del monitor y del tamaño de la ventana seleccionada y almacenada de la imagen desplegada en el monitor.

Este formato se usa para almacenar imágenes de video en las cuales cada pixel se representa con sus valores del rojo, verde y azul. Es útil cuando el tiempo de despliegue es crítico y el tamaño de la imagen no lo es. Para el caso de este trabajo, ambos factores son críticos; sin embargo, se puede prescindir de las imágenes después de tomar de ellas la información necesaria.

Tabla 3.

Formato del archivo de imagen (\*.PIB):

posición	tamaño	descripción
Byte 0	-- 1 byte	-- reservado, siempre 0
Byte 1	-- 1 byte	-- reservado, siempre 0
Byte 2	-- 1 byte	-- formato del archivo, en este caso 41 para formato no comprimido
Byte 3	-- 1 byte	-- reservado, siempre 0
Byte 4	-- 2 bytes	-- dispositivo PIB, resolución en x
Byte 6	-- 2 bytes	-- dispositivo PIB, resolución en y
Byte 8	-- 2 bytes	-- despliegue de la imagen iniciando en la posición x del origen
Byte 10	-- 2 bytes	-- despliegue de la imagen iniciando en la posición y del origen
Byte 12	-- 2 bytes	-- longitud x de la imagen
Byte 14	-- 2 bytes	-- longitud y de la imagen
Byte 16	-- 1 byte	-- número de bits por pixel, siempre 16
Byte 17	-- 1 byte	-- reservado, siempre 32

En total son 18 bytes. Todos los campos son sin signo.

Las imágenes al ser digitalizadas generan archivos no comprimidos con el formato tipo PIB, estos archivos son relativamente grandes (40 Kb en promedio) se utiliza entonces un programa<sup>(12)</sup> para eliminar la información que no se requiere y generar un archivo que le llamamos tipo VGA. Son archivos más pequeños (25 Kb en promedio) que además de la imagen guardan las coordenadas del punto original del origen de ésta en el monitor al ser digitalizada.

El procedimiento de digitalización consiste en seleccionar la imagen de video en la editora, por medio del software de digitalización (suministrado por el fabricante, Atronics) se congela la imagen y usando el mouse se delimita en el monitor el rectángulo que encierra el cuadro que se desea, se da nombre al archivo e inmediatamente se genera éste en el disco duro de la computadora.

3.3.6 Distorsión: En cualquier sistema de manejo de imágenes, se tiene una cierta degradación que está en base al equipo

usado. Estas degradaciones se manifiestan en forma de distorsiones fotométricas (propiedad de las respuestas a la intensidad de la luz) y geométricas. Las primeras tienen relación con la respuesta de incongruencias en brillantéz del dispositivo sensor. Las segundas son de orientación espacial.

Para corregir las distorsiones fotométricas se usan funciones de mapeo que actúen en contra de estos efectos.

En el proceso de video-digitalización en este trabajo, se presenta una distorsión geométrica en las imágenes que afecta en los valores de las coordenadas de los puntos que delimitan los segmentos corporales.

Para corregir los valores de las coordenadas fue necesario utilizar un procedimiento de transformación de coordenadas, o sea hacer corresponder las coordenadas del mundo real a las coordenadas en el monitor de la computadora.

Se debe considerar que el sistema de coordenadas del mundo real (22) tiene una amplitud teóricamente infinita, y el área de exhibición del dispositivo es finita. Es necesario, entonces, una transformación que mapee una ventana descrita en el espacio de coordenadas del mundo real, a un puerto de visión en el espacio de coordenadas del dispositivo.

Se aplicó una transformación lineal de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

donde  $x'$  y  $y'$  son las coordenadas corregidas,  $x$  y  $y$  son las coordenadas capturadas, y  $a, b, c$  y  $d$  son las constantes de una matriz de transformación. Para este caso, la matriz es una matriz de transformación de coordenadas de la siguiente forma:

$$\tilde{S}_{5x5y} = \begin{pmatrix} 1/5x & 0 \\ 0 & 1/5y \end{pmatrix}$$

utilizando una matriz unitaria, se tiene:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

entonces  $b = 0$  y  $c = 0$ ,

si se fija el valor para  $d = 1$ , se tiene que

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

si fijamos el valor de  $x = 1$ , y el de  $y = 0$ , se tendrá:

$$\begin{aligned} x' &= a * x \\ y' &= 0 \end{aligned}$$

o bién, si el valor de  $y = 1$ , entonces  $x = 0$ , y se tendrá :

$$\begin{aligned} x' &= 0 \\ y' &= y \end{aligned}$$

Se debe escoger cual de los dos valores fijar. Se podría pensar también que tanto los valores de  $x$  como los valores de  $y$  debieron ser modificados en el proceso de video-digitalización, o que sólo se modificaron los de  $x$ , o que sólo se modificaron los de  $y$ . Si se observan las imágenes digitalizadas, se puede sugerir que el valor de  $x$  (a lo largo del eje horizontal) fuera el valor modificado en el proceso. De lo anterior se deduce que los valores de las coordenadas corregidas son:

$$\begin{aligned} x' &= x * a \\ y' &= y \end{aligned}$$

Para calcular el valor de  $a$  se grabó en video el dibujo de un círculo circunscrito en un cuadrado que se muestra en la figura. Se midieron las coordenadas de los puntos que se muestran de la imagen digitalizada. El despliegue de la imagen en el monitor de la computadora es una elipse circunscrita en

un rectángulo, lo que confirma una distorsión.

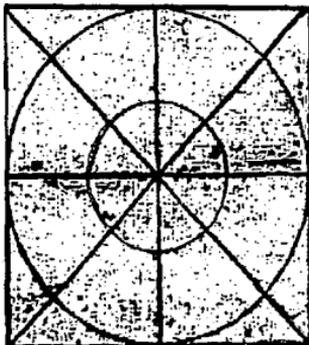


FIG. 5 Imagen de un círculo circunscrito en un cuadrado.

Con la ayuda del mouse se midió la longitud en pixeles en  $x$  y en  $y$ , del rectángulo (que debía ser cuadrado en la pantalla). Esta medida se hizo en diferentes lugares promediándose después.

Para un cuadrado perfecto en la pantalla de la computadora sin distorsión, la longitud en pixeles en  $x$  y la longitud en pixeles en  $y$  deben ser iguales,

$$x = y$$

en este caso como  $x \neq y$  y además  $x < y$ , se tiene que

$$x + \text{constante} = y$$

como

$$x' = a * x$$

y

$$y' = y$$

y, si no hay distorsión, se tiene que

$$x = y$$

sustituyendo  $y = a * x$

y finalmente  $a = y / x$

Calculando el promedio de los valores medidos en pixeles,

$x = 258$  y  $y = 319$ , entonces:

$$258 * a = 319$$

$$a = 1.2364$$

La constante calculada de  $y/x = 1.2364$

Es este el valor utilizado para corregir la coordenada  $x$  de cada punto de los segmentos:

$$x' = 1.2364 * x$$

donde  $x'$  = coordenada corregida

$x$  = coordenada capturada

### 3.4 INTERPOLACION APROXIMADA POR SPLINES CUBICOS.

El resultado de los cálculos de desplazamiento, velocidad y aceleración de los segmentos, de desplazamiento del centro de gravedad del cuerpo, y de los momentos angulares de los segmentos, se despliegan al usuario en gráficas. Los valores calculados se interpolan con el objeto de aproximar el movimiento a tiempos para los que no existe una imagen grabada, lo que hace suponer más cuadros por segundo. A continuación se explica la teoría del método de interpolación utilizado para generar las gráficas de los resultados del sistema. Las rutinas de interpolación son una adaptación de las rutinas publicadas en la referencia (9).

El término ajustar la curva (9) ó ajustar los datos se usa para describir el problema general de encontrar una función  $y = f(x)$ , que iguale un conjunto de valores observados con un conjunto de puntos dados. Específicamente, los puntos dados son los valores de tiempo  $x_1$  (en segundos, de los cuadros consecutivos) en el caso de este sistema:

$$x_1, x_2, \dots, x_N$$

y los valores correspondientes  $y_1$ , que son los resultados calculados de desplazamiento (en radianes o en metros, según sea el caso) ó de momentos angulares (en  $\text{kg m}^2/\text{segundo}$ ):

$$y_1, y_2, \dots, y_N ;$$

La meta es encontrar la función tal que:

$$y_1 = f(x_1), y_2 = f(x_2), \dots, y_N = f(x_N)$$

de tal manera que  $f(x)$  asuma valores "razonables" para otros puntos, o sea, otros cuadros no grabados del movimiento que se analiza. De esta manera se puede conocer el valor de la función para los tiempos no medidos.

**3.4.1 Interpolación.** En la experimentación científica o en el cálculo numérico, constantemente se obtienen resultados de valores, para una función, solamente en puntos discretos de la variable independiente de esa función. Interpolación es encontrar los valores de la función entre los puntos tabulados, o sea puntos en los que no hay información pero que se necesitan para hacer las gráficas. La interpolación (16) provee un método básico para tomar datos ya sea de una función ó de un proceso ó de una curva, etc., extiéndolos en el dominio creando una función que se puede evaluar en cualquier punto que se desee. Esta extensión es por supuesto, aproximada y su exactitud

depende de muchos factores. La interpolación como herramienta puede ser vista como un caso especial de la aproximación de funciones y datos. La aproximación se convierte en interpolación cuando se obliga a la función aproximante a pasar exactamente por los puntos en los que si se tiene información, esto es, en los que se conoce el valor de la función. En ocasiones el método seleccionado para resolver determinado problema resulta poco eficiente o poco estable. Definiendo a la estabilidad como a la continua dependencia de la solución de los datos de un problema o del método, es decir, que un método es numéricamente inestable cuando los errores (de redondeo, por ejemplo) se magnifican con el método.

**3.4.2 Interpolación polinomial:** Aún cuando no sabemos nada en particular acerca de la función  $f$ , podríamos resolver el problema del ajuste de datos considerando a  $f(x)$  como un polinomio de grado  $N-1$  que pasa por los  $n$  puntos dados.

Un polinomio  $p(x)$  de grado  $n$  es una función de la forma:

$$p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n ;$$

El problema a resolver es encontrar los coeficientes  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  de tal forma que  $p(x)$  en  $x$  conocidas den los valores de  $y$  que se tienen.

El polinomio puede ser evaluado, diferenciado e integrado facilmente, y en un número de pasos finito usando las operaciones básicas de la aritmética. Una consideración con respecto a la interpolación polinomial sería su costo, esto es, el alto número de operaciones necesarias para construir y evaluar un interpolante. La notación anterior de polinomio es una forma que podría ser numéricamente inestable; utilizando multiplicación anidada (esquema de Horner):

$$c_0 + tc_1 + t^2c_2 + t^3c_3 = c_0 + t(c_1 + t(c_2 + tc_3))$$

se tiene una forma en la que se evalúa más eficientemente:

$$p(x) = a_0 + (x - c_1)[a_1 + (x - c_2)[a_2 + \dots \\ + (x - c_{n-1})[a_n(x - c_n) \dots ]]] ;$$

La interpolación polinomial no se restringe a datos de puntos, se puede interpolar también otro tipo de información, tales como datos de las derivadas. Esto conduce a un esquema de interpolación más útil que se conoce como *interpolación de Hermite*. Para conocer más acerca de ésta consultar las referencias (14)(17).

La limitación esencial de la aproximación polinomial consiste en que si una función a ser aproximada se comporta "mal" en cualquier parte dentro del intervalo de interpolación, entonces la interpolación es pobre en cualquier parte. Esta dependencia global en propiedades locales puede ser eliminada usando la aproximación por polinomios en porciones (*piecewise*), que se explica más adelante.

3.4.3 Interpolación por spline: los polinomios de bajo grado son curvas simples con las que se trabaja fácilmente en forma analítica, y se usan ampliamente para el ajuste de curvas. La respuesta está en abandonar la idea de encontrar UN solo polinomio que pase por todos los puntos, y usar diferentes polinomios para conectar los puntos adyacentes uniéndolos suavemente.

Un *spline* es un dispositivo mecánico utilizado para dibujar curvas estéticas: los dibujantes fijan un conjunto de puntos (nodos) en su dibujo y entonces producen una curva doblando una tira de plástico o madera flexible (el *spline*) que pasa por los puntos. El método matemático de interpolación por spline es equivalente a este proceso.

Se puede demostrar con mecánica elemental que la forma asumida

por el spline entre dos puntos adyacentes es un polinomio de tercer grado (cúbico). Considerando la curva de  $N-1$  polinomios cúbicos diferentes:

$$s_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i; \quad i = 1, 2, \dots, N-1$$

definiendo a  $s_i(x)$  como el polinomio cúbico usado en el intervalo entre  $x_i$  y  $x_{i+1}$ . Crear el spline consiste en calcular los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  para los puntos  $x$  y los valores  $y$ . Obviamente se debe tener

$$s_i(x_i) = y_i \quad \text{y} \quad s_i(x_{i+1}) = y_{i+1}$$

para  $i = 1, 2, \dots, N-1$ .

Para el cálculo de los coeficientes, además de estas dos condiciones y con el fin de cumplir con la "suavidad" requerida, se utiliza el acercamiento más efectivo que es el emparejar la primera y segunda derivadas (la pendiente y la curvatura) de  $s_i(x_i)$  a esas de  $s_{i-1}(x)$  usadas para la interpolación en un intervalo adyacente  $x_{i-1} \leq x \leq x_i$ . Si se lleva a cabo este procedimiento a todo el intervalo  $x_0 \leq x \leq x_n$  (con un tratamiento especial en los puntos terminales), se habrá construido una función llamada spline cúbico.

3.4.4. Aproximación polinomial en porciones. El spline no sólo toca los nodos, sino que también suaviza el trazo entre ellos sin dobleces ni picos. La (14) aproximación por funciones de este tipo se llama aproximación polinomial en porciones (piecewise) y específicamente la aproximación polinomial en porciones usando polinomios cúbicos en cada intervalo se conoce como interpolación por splines cúbicos.

Un polinomio cúbico en general involucra cuatro constantes, así existe suficiente flexibilidad en el procedimiento de spline cúbico para asegurar no solamente que el interpolante sea de continua diferenciación en el intervalo, sino que tiene

también, una segunda derivada continua en el mismo intervalo. La construcción del spline cúbico, sin embargo, no asume que las derivadas del interpolante concuerden con aquellas de la función, aún en los nodos.

De (14)(15) se tiene la siguiente definición: Dada una función  $f$  definida en un intervalo  $[a, b]$  y un conjunto de números llamados nodos o puntos de ruptura (*breakpoints*), tal que  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$  existe un interpolante de spline cúbico,  $S$ , si  $f$  satisface las siguientes condiciones:

- a)  $S$  es un polinomio cúbico,  $S_j$ , en el intervalo  $[x_j, x_{j+1}]$  para cada  $j = 0, 1, \dots, n-1$ ;
- b)  $S(x_j) = f(x_j)$  para cada  $j = 0, 1, \dots, n$ ;  
El spline pasa por cada punto.
- c)  $S_{(j+1)}(x_{j+1}) = S_j(x_{j+1})$  para cada  $j = 0, 1, \dots, n-2$ ;  
El spline forma una función continua.
- d)  $S'_{(j+1)}(x_{j+1}) = S'_j(x_{j+1})$  para cada  $j = 0, 1, \dots, n-2$ ;  
El spline forma una función suave.
- e)  $S''_{(j+1)}(x_{j+1}) = S''_j(x_{j+1})$  para cada  $j = 0, 1, \dots, n-2$ ;  
La segunda derivada es continua.
- f) se satisface la siguiente condición de frontera:  
 $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$ ; (frontera libre)

nota: existen además de ésta, otras condiciones de la frontera que no se mencionarán en este trabajo.

Cuando las condiciones de frontera son libres, el spline se llama spline natural y su gráfica aproxima la forma de una cuerda larga y flexible que es forzada a pasar por cada uno de los puntos datos. Este tipo de curvas son curvas abiertas.

El spline natural, desde el punto de vista aproximación, no es muy recomendable. El hecho de asignar arbitrariamente un valor de cero a la segunda derivada produce errores cerca de los puntos finales y reduce en forma dramática la calidad de toda

la convergencia del método de interpolación. Interpretados de otra manera, al no conocer las derivadas en los puntos finales, se puede tomar la condición de *no un nodo*. De tal forma que se seleccionan las pendientes primera y última así que los polinomios primero y segundo sean iguales y que el polinomio  $n-2$  sea igual al  $n-1$ . Esto hace pensar que para interpolar a un punto adicional que no es punto de ruptura, se necesitan la primera y última porción de polinomio, lo que significa que se tienen  $n-3$  porciones de polinomio y no  $n-1$ . Interpretado de esta manera se tiene el hecho de que en la interpolación polinomial por porciones, los puntos interpolados no necesitan coincidir con los puntos de ruptura.

**3.4.5 B-splines.** La experiencia (18) ha demostrado que las funciones polinomiales en porciones de orden arriba de 4, suministran aproximaciones más eficientes de lo que hacen las porciones parabólicas o las funciones de porciones cúbicas. Se define a una función polinomial en porciones (17) como una colección de funciones  $pp$ , constituidas por una secuencia  $i$  de puntos (o puntos de ruptura) estrictamente ascendente, para  $l$  polinomios cada uno de orden  $k$ .

Se dice que  $\mathcal{P}$  es el espacio lineal de las funciones  $pp$ , cada espacio tiene una base, función de base de spline o B-spline.

Se dice entonces que, una función spline de orden  $k$  con una secuencia de nodos  $t$ , es una combinación de B-splines ( $B_i$ ) de orden  $k$  para una secuencia de nodos  $t$ . Y, la secuencia  $B_1, \dots, B_n$  de B-splines de orden  $k$  para una secuencia de nodos  $t$ , es una base para el espacio lineal  $\mathcal{P}$  considerada como funciones en el rango  $[t_k, t_{n+1}]$ .

Las curvas de B-splines cúbicos se han utilizado como una poderosa herramienta para "modelar" fácilmente formas complejas. La teoría matemática de los B-splines cúbicos puede consultarse en (18)(19).

Concluyendo entonces, matemáticamente es posible construir una función  $S_j(x)$  en cada intervalo  $[x_j, x_{j+1}]$  tal que la curva de porciones  $f = S(x)$  y sus primera y segunda derivadas son todas continuas en el intervalo total  $[x_0, x_n]$ . La continuidad de  $S'(x)$  significa que la gráfica de  $F = S(x)$  no tendrá esquinas agudas. La continuidad de  $S''(x)$  significa que no habrá rupturas (la segunda derivada de un polinomio cúbico es una línea recta).

Barsky (18)(19) denota a los polinomios cúbicos en porciones en forma parametrizada como  $Q(u) = (X(u), Y(u))$ . Los valores  $u_0 < u_1 < \dots < u_m$  de  $u$ , corresponden a las uniones entre polinomios sucesivos llamados nodos. Apartir de esta parametrización (si se requiere más información consultar a Barsky) se obtienen las ecuaciones de las funciones que definen las bases 6 funciones básicas, de las curvas de tipo B-spline uniforme, donde un B-spline cúbico es uniforme cuando los nodos están igualmente separados.

Existen otras razones además de las estéticas para tener una curvatura continua. Si por ejemplo, suponemos un molino controlado en forma numérica por medio de una curva. El programa de la máquina guía a la herramienta por la trayectoria curva, si existe un salto en la segunda derivada de la curva, entonces deberá haber un salto en la fuerza aplicada a la herramienta (fuerza = masa \* aceleración, y la aceleración es la segunda derivada de la posición). Este cambio brusco en la fuerza puede desprender la herramienta y dañar la máquina.

**3.4.6 Beta-splines.** El Beta-spline fue introducido por Barsky (18) en 1981. Este provee la facilidad de controlar localmente la forma de la curva utilizando para esto dos parámetros  $\beta$  que dan mayor significado a los requerimientos de continuidad. Los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son parámetros que dan forma a la curva, y se expresan en términos de parámetros de *bias* y *tensión*.

Continuidad geométrica. Intuitivamente si consideramos a una curva paramétrica como la ruta del movimiento de un punto, la dirección del vector de la primera derivada da la dirección del movimiento del punto en un instante, y la magnitud de este vector da la velocidad del movimiento. Geométricamente, dos curvas se unen suavemente con respecto a su primera derivada si sus vectores en el punto de unión apuntan a la misma dirección. La magnitud de los vectores derecho e izquierdo, ó las velocidades de entrada y de salida de la unión, no tiene aportación en el resultado de la dirección.

Como en el caso de las B-splines, en las Beta-splines se tienen las funciones que definen las bases para los valores de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  dados.

Estas ecuaciones definen a una curva Beta-spline uniformemente formada. Se hace notar que si  $\beta_1 = 1$  y  $\beta_2 = 0$ , se obtendrán las ecuaciones que definen a una curva de B-splines cúbica uniforme.

El incrementar  $\beta_1$  incrementa la "velocidad" a la cual se recorre la curva (de izquierda a derecha) inmediatamente a la derecha de una unión sirviendo al sesgo de la curva. El parámetro  $\beta_2$  sirve para controlar la tensión de la curva, alterando el valor mueve la unión entre dos polinomios. Tanto  $\beta_1$  como  $\beta_2$  pueden alterarse para modificar la forma de la curva. Se puede ver en las figuras que se dan a continuación cómo se alteran.

En el sistema que se reporta, el método de interpolación (9) permite al usuario ajustar los datos a la curva según le convenga, proponiendo valores de las  $\beta_s$ . Para la mayoría de las gráficas en este trabajo se dieron los valores de sesgo=1 y tensión=0.001. El método utiliza la representación del polinomio en forma de multiplicación anidada, en el cálculo de

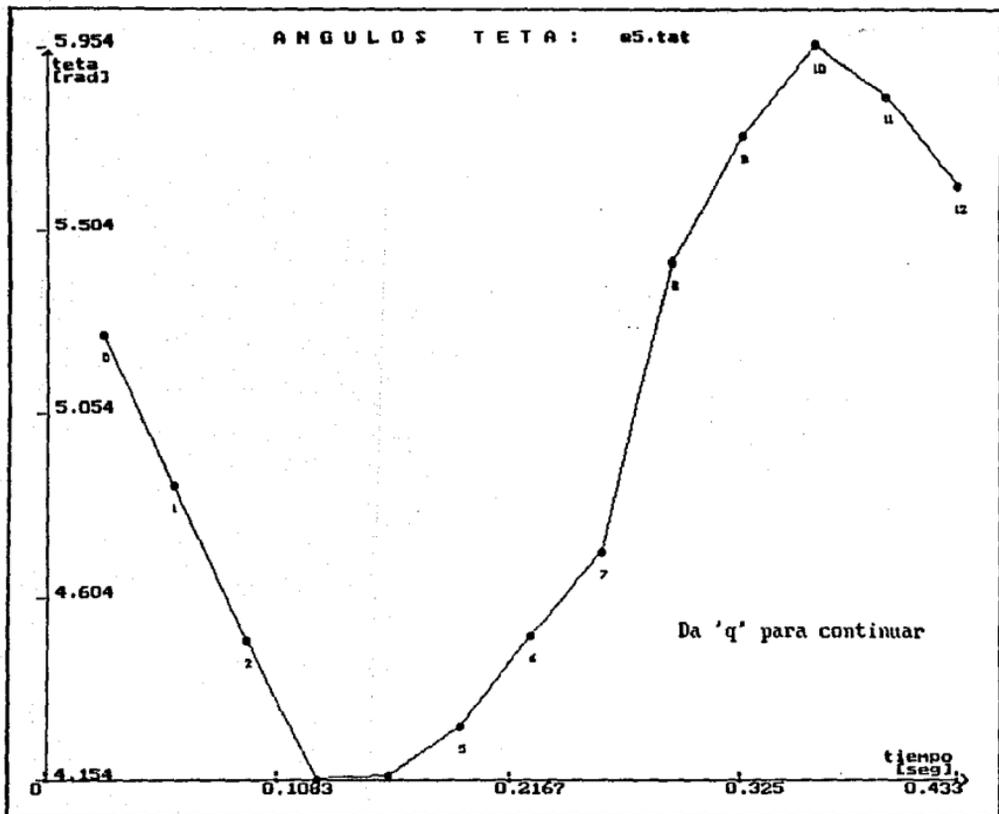
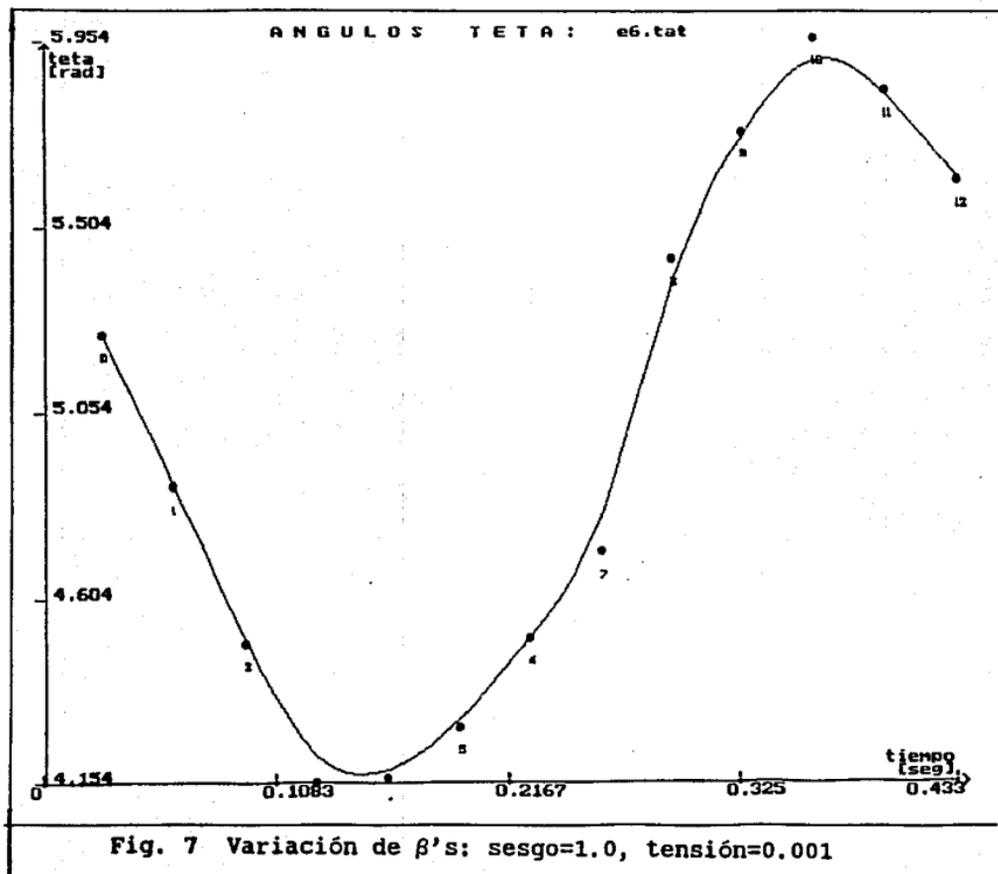
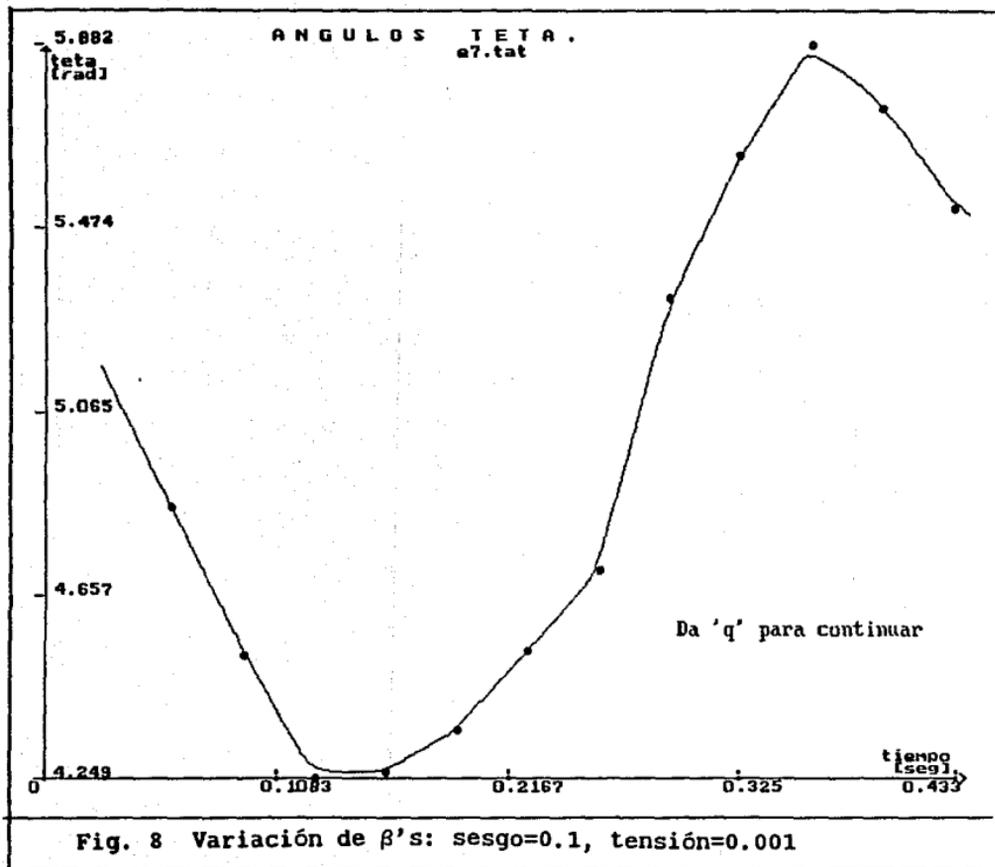
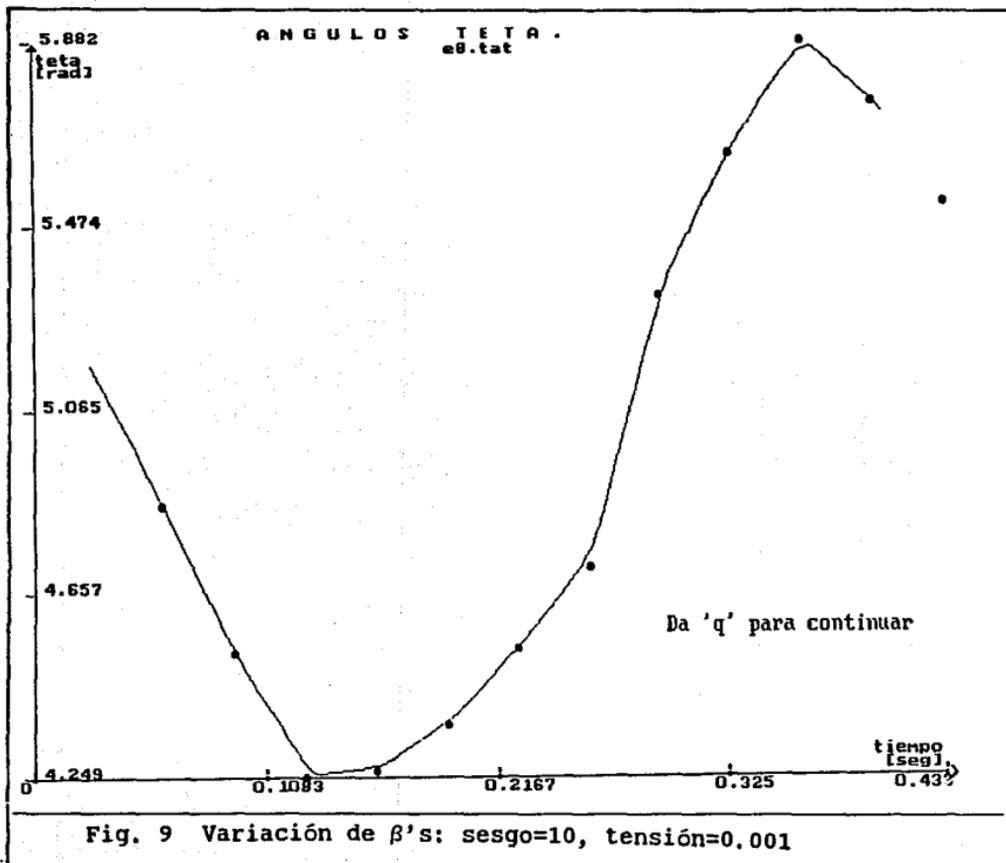


Fig. 6 Variación de  $\beta$ 's: sesgo=0.001, tensión=0.001





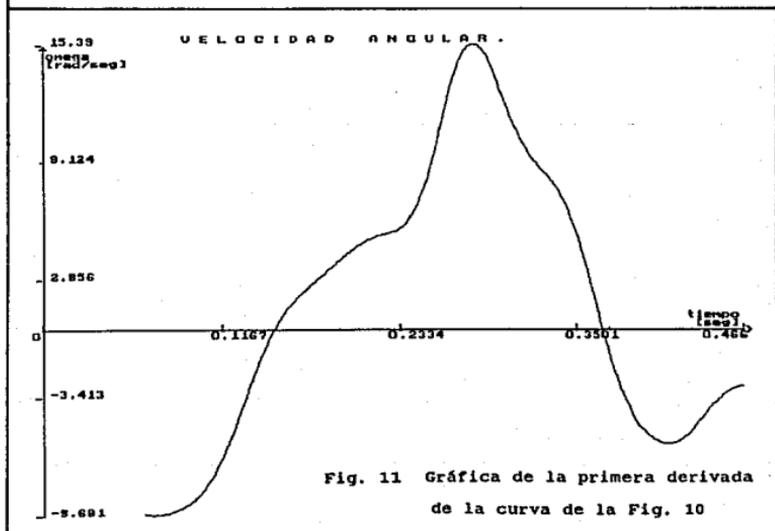
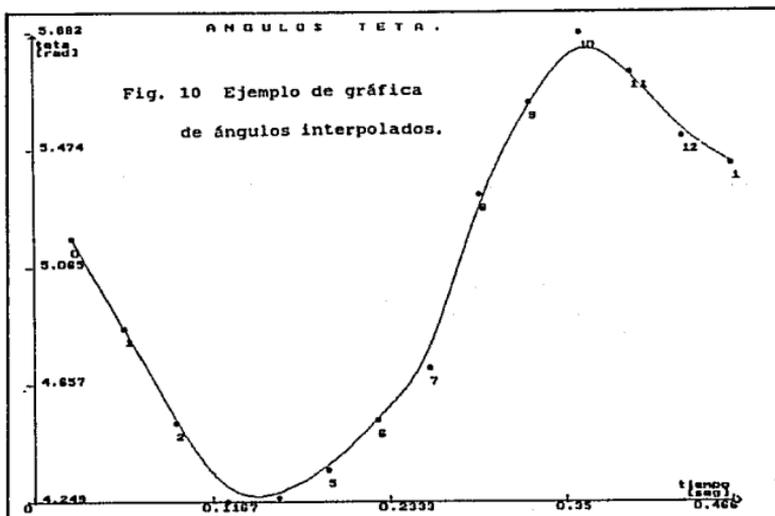


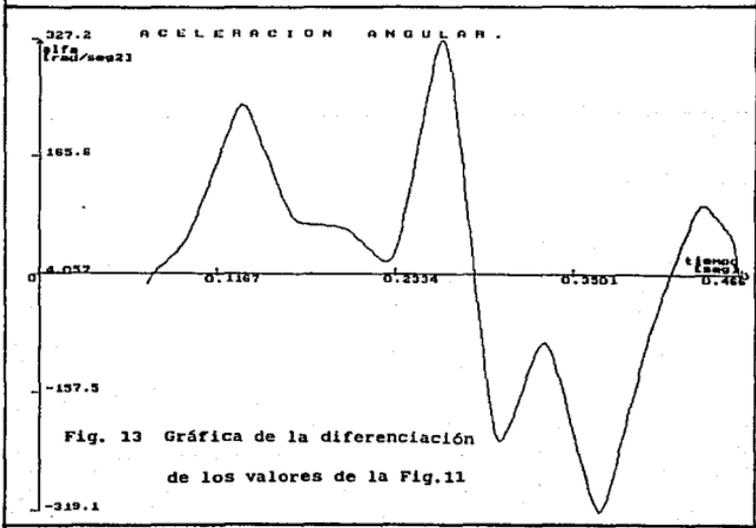
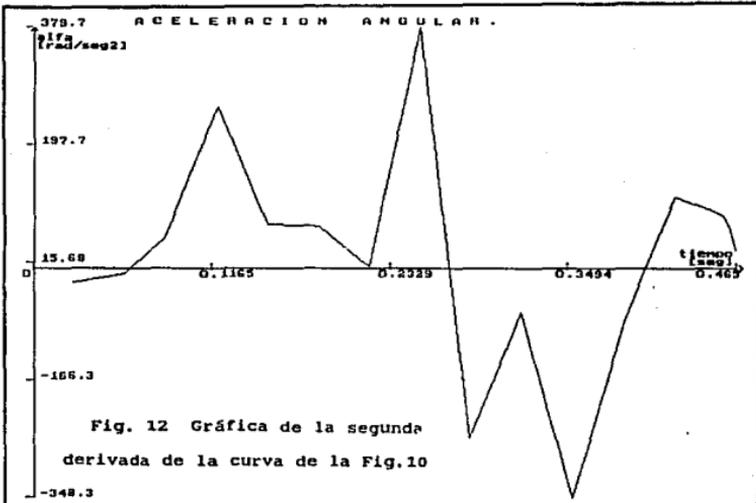
los coeficientes se hace uso una matriz en la que el contenido de columnas y renglones dependerá de las  $\beta$ s propuestas por el usuario y de las funciones base de los Beta-splines.

La primera derivada de la curva de posición, en el caso de desplazamientos, o sea la curva de velocidad (angular o lineal, según sea el caso) originada al derivar el polinomio, es una curva suave y continua. Sin embargo, la curva de la segunda derivada del polinomio, o sea la aceleración, no presenta suavidad.

Debido a que los movimientos del cuerpo humano son suaves y continuos por más bruscos que estos sean, la segunda derivada del polinomio no es representativa de la aceleración. Por esta razón para obtener la curva deseada, se hace una diferenciación de los datos de la velocidad y del tiempo, obteniendo una curva suave.

En las curvas siguientes se presenta un ejemplo.





### 3.5 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

El sistema desarrollado para el método que se reporta consta de tres módulos principales:

1. Captura
2. Depuración
3. Análisis

```

: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam : unam ciencia unam :
: unam ciencia unam 1. CAPTURA DE DATOS Y SEGMENTOS unam ciencia unam :
: unam ciencia unam 2. DEPURACION DE SEGMENTOS unam ciencia unam :
: unam ciencia unam 3. ANALISIS unam ciencia unam :
: unam ciencia unam 4. SALIDA unam ciencia unam :
: unam ciencia unam : unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :

```

FIG. 15 Menú principal del sistema

El usuario interactúa con el sistema por medio de menús que le permiten utilizar las diversas opciones, puede usar también en forma independiente, alguna de las opciones que exista en modo ejecutable.

#### 3.5.1 Módulo de captura.

```

: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :
: unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam :

```

FIG. 16 Menú de captura.

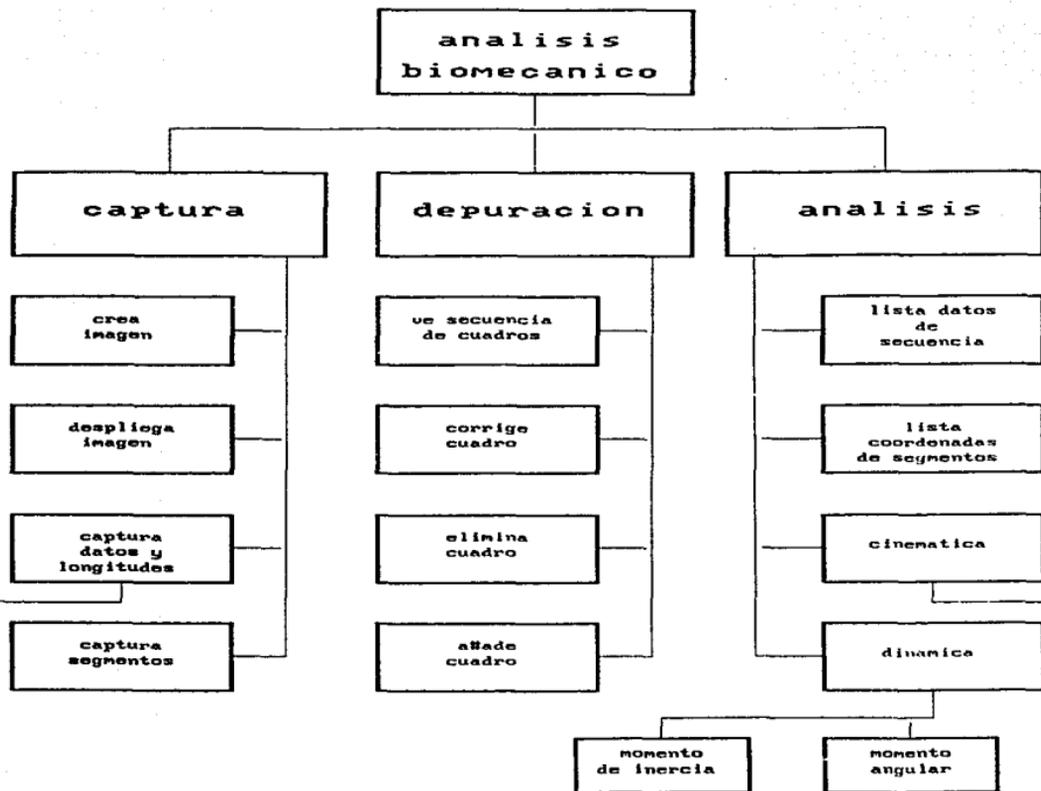


Fig. 14 Diagrama de flujo del sistema computarizado.



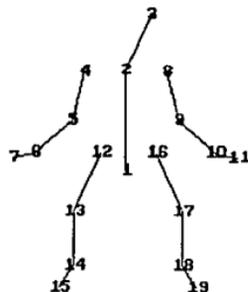
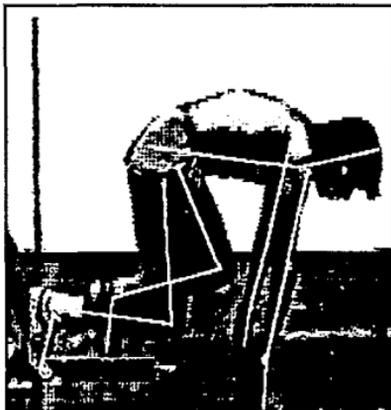
CARACTERISTICAS DE LA IMAGEN  
DIGITALIZADA.

Formato: 41 de PIB  
Tamaño: 259x235 => 31158  
Resolución Original:  
512x482  
Posición Original:  
59x199

Archivos:  
arr12.pib  
arr12.uga

'a' continúa

Fig. 17 Despliegue de la imagen.



CAPTURA DE LOS 14  
SEGMENTOS CORPORALES.



-> Grabo Cuadro.

Se almacena el cuadro?

NO

SI

Fig. 18 Captura de los segmentos.

3.5.1.1. Despliegue de la imagen. Después de digitalizar la imagen seleccionada y de convertirla a un formato llamado tipo VGA, se despliega en el monitor en blanco y negro y no a color, para así tener mejor calidad de imagen y definición.

3.5.1.2 Captura de datos y coordenadas. Las coordenadas de los puntos que delimitan cada segmento se marcan con la ayuda del "mouse". Al oprimir el botón derecho el programa conserva los valores de X y Y en pixeles. Estos valores se ajustan, considerando los valores de la distancia al origen de la imagen original y a la colocación de la imagen en el despliegue en el monitor.

La captura completa de un cuadro consta de 19 puntos, siguiendo la secuencia de los puntos en el patrón que se despliega. Para cada punto señalado, el sistema muestra los valores de las coordenadas de la imagen en video, no las de ese punto en el monitor. Al terminar de capturar los segmentos de un cuadro, se pintan las líneas de los segmentos sobre la imagen.

Esta captura genera un archivo que llamamos de tipo SEG que contiene la información de las coordenadas de los 14 segmentos con los que se representa el cuerpo para cada cuadro de la secuencia. Las estructuras de los datos del archivo son las siguientes:

Estructura	tipo	nombre
PuntoXY	entero entero	x y
Segmento	PuntoXY PuntoXY	proximal distal
Cuadro	entero Segmento	número s[14]

Tabla 3. Estructura del archivo de segmentos.

El cuadro anterior muestra que cada punto tiene dos valores, las coordenadas x y y, para cada segmento existen dos puntos, uno el más cercano al tronco o proximal y el más lejano ó distal.

Este procedimiento de captura se hace en forma manual y la exactitud en la localización de los puntos dependerá de los siguientes factores:

- calidad de la imagen,
- visibilidad de todas las partes del cuerpo,
- capacidad de la persona que captura  
para identificar los puntos en el cuerpo.

Se capturan los datos referentes a la identificación del sujeto: nombre, talla, peso, longitud de los segmentos (en el caso de haber podido medirlo) o relación de las longitudes de alguna distancia de referencia en pixeles y en metros, comentarios, deporte, etc., generando un archivo tipo DAT. La estructura del archivo es la siguiente:

Estructura	tipo	nombre
Quien	char 10	identificación (RFC)
	char 30	nombre
	char 1	sexo (1=m / 2=f)
	char 20	deporte
	float	largo[14] (metros)
	entero	long_pixeles (pixeles)
	float	long_metros (metros)
	float	peso en newtons
	float	talla (estatura en m)
	char 80	comentarios 1
	char 80	comentarios 2
	char 80	comentarios 3

Tabla 4. Estructura del archivo de datos.

Para hacer el análisis de un movimiento son necesarios dos archivos, el tipo SEG y el tipo DAT, ambos generados en el módulo de captura.

### 3.5.2 Módulo de depuración.

```
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
```

1. NOMBRE DEL ARCHIVO A DEPURAR
2. VER LA SECUENCIA DE CUADROS
3. CORRIJE SEGMENTOS DE UN CUADRO
4. ELIMINA UN CUADRO
5. AÑADE UN CUADRO
6. GRABA LA NUEVA SECUENCIA A DISCO
7. CARACTERISTICAS DEL VIDEO
8. SALIDA

FIG. Menú de depuración

3.5.2.1. Depuración de archivos. Las rutinas de este módulo permiten corregir tanto la secuencia de los cuadros eliminando o añadiendo cuadros, como las coordenadas de un cuadro. Existe la opción de recorrer la secuencia cuadro por cuadro con el despliegue de las coordenadas de cada segmento. De esta manera el usuario puede reconocer un error de captura. Los segmentos derechos de las extremidades superiores y las inferiores se identifican con el color azul, los izquierdos con el color rojo. Los datos corregidos se almacenan en un nuevo archivo.

### 3.5.3 Módulo de análisis.

```
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
| unam ciencia unam deporte unam biomecanica unam deporte unam ciencia unam |
```

1. LISTA LOS DATOS
2. LISTA COORDENADAS DE CUADRO
3. CINEMATICA
4. DINAMICA
5. SALIDA

FIG. 20 Menú de análisis.

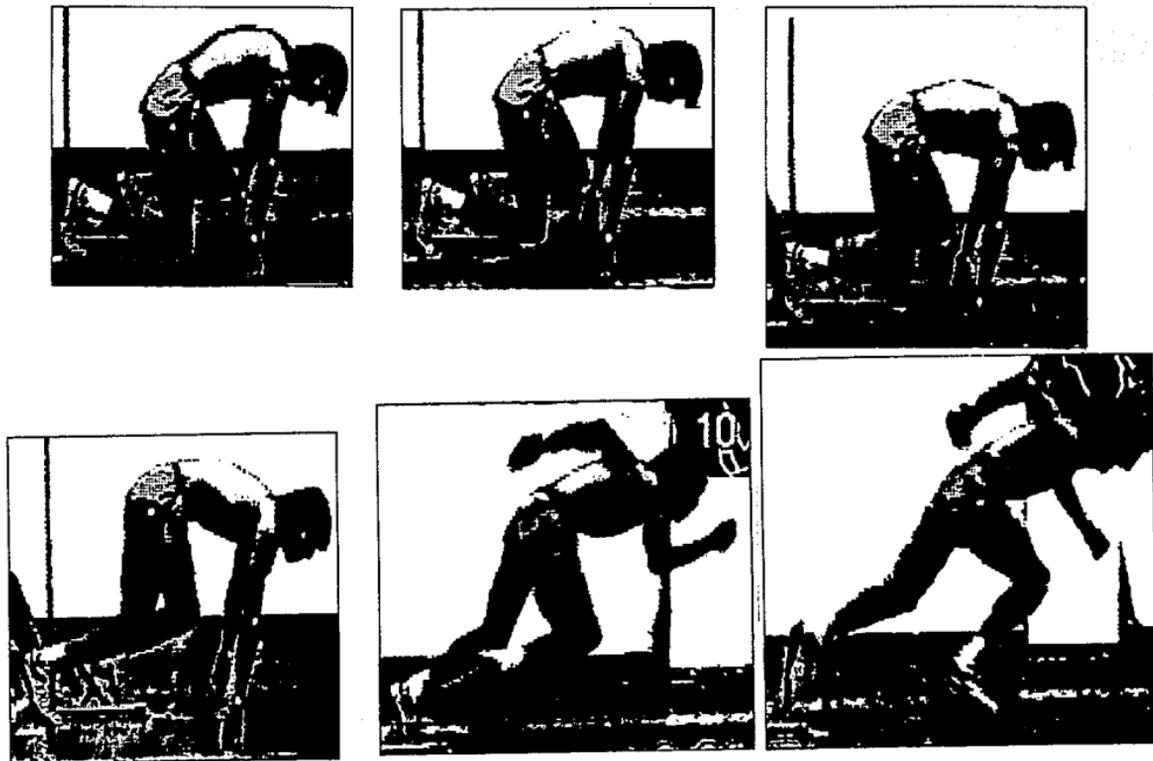


Fig. 21 Algunas imágenes de la secuencia del arranque.

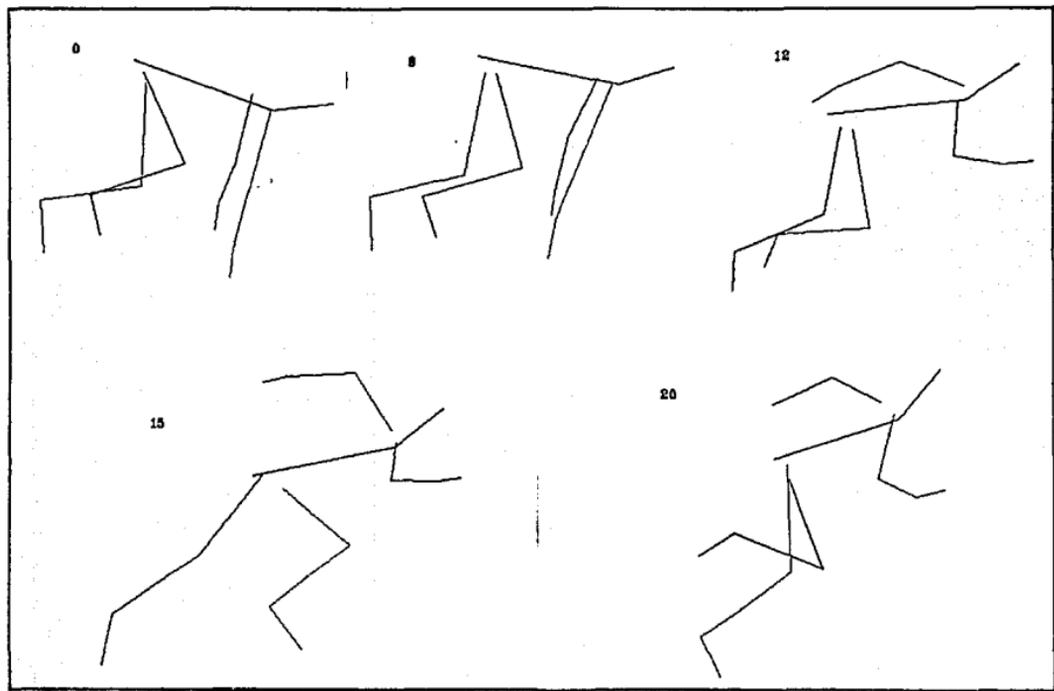


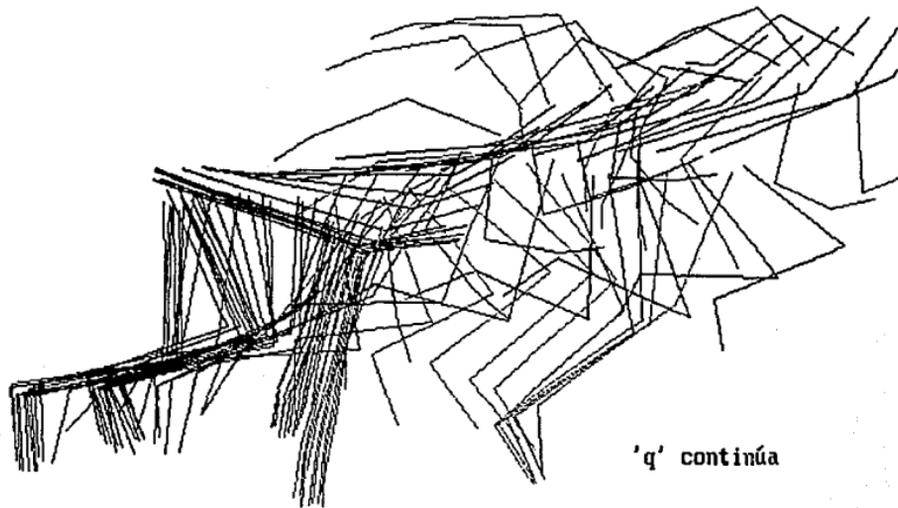
FIG. 22a Algunos cuadros del arranque.

cuadro por cuadro

CUADRO NUM.

MIEMBROS DERECHOS.

MIEMBROS IZQUIERDOS.



'q' continúa

Da tecla para interrumpir

FIG. 22b Secuencia de los cuadros del arranque.

MIEMBROS DERECHOS.  
MIEMBROS IZQUIERDOS

Cuadros:

011  
012  
013  
014  
015  
016  
017  
018  
019  
020  
021  
022  
023  
024  
025  
026  
027  
028  
029  
030  
031  
032  
033  
034  
035  
036  
037  
038  
039  
040  
041  
042  
043  
044  
045  
046  
047  
048  
049  
050  
051  
052  
053  
054  
055  
056  
057  
058  
059  
060  
061  
062  
063  
064  
065  
066  
067  
068  
069  
070  
071  
072  
073  
074  
075  
076  
077  
078  
079  
080  
081  
082  
083  
084  
085  
086  
087  
088  
089  
090  
091  
092  
093  
094  
095  
096  
097  
098  
099  
100

seg. x1, y1, x2,y2

12 0	204	242	337	229
12 1	337	229	391	196
12 2	336	216	275	194
12 3	275	194	213	217
12 4	213	217	189	231
12 5	330	230	326	279
12 6	326	279	373	287
12 7	373	287	403	284
12 8	228	256	244	344
12 9	244	344	155	349
12 10	155	349	142	379
12 11	216	254	200	332
12 12	200	332	113	365
12 13	113	365	111	400

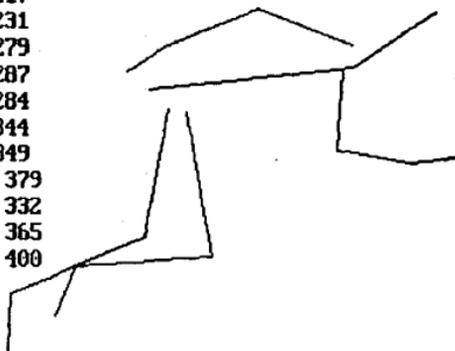


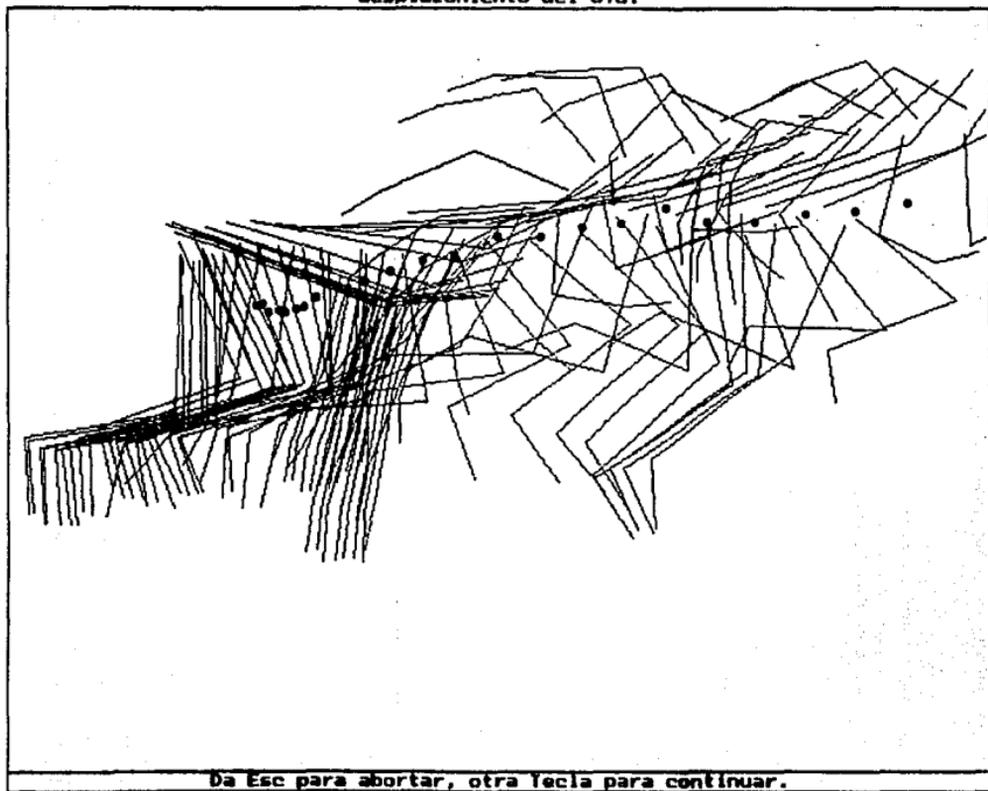
FIG. 22c Del módulo de depuración, cuadro 12 y coordenadas.

3.5.3.1. Animación de segmentos. Entendiéndose por animación, en este caso, a desplegar uno tras otro en secuencia progresiva, los cuadros de los segmentos, dejando permanezca en pantalla 30 milisegundos (función delay de turbo C). Esto se acerca a la frecuencia de cuadros del video y da, aproximadamente, la idea del movimiento real grabado. Este programa reproduce el movimiento por medio de la animación, la secuencia de cuadros se repite tantas veces como el usuario las desee ver y, al terminar, despliega toda la secuencia de los cuadros. Los miembros derechos se identifican con el color azul y los izquierdos con el rojo. Cada cuadro se identifica por su número dentro de la secuencia en el archivo. Como entrada este programa necesita el archivo tipo SEG correspondiente al movimiento a ser analizado.

3.5.3.2. Desplazamiento de los centros de gravedad. Por medio del archivo de segmentos tipo SEG, las ecuaciones de regresión de Chandler para la estimación del peso de cada segmento como función del peso del cuerpo del sujeto, y el peso del sujeto leído del archivo tipo DAT, se calcula para cada cuadro, las coordenadas del centro de gravedad de cada segmento. El sistema traza una línea para el desplazamiento de cada centro de gravedad en el movimiento. Cada línea tiene diferente color para su identificación. La salida del sistema es la animación de los cuadros y el recorrido del desplazamiento de los centros de gravedad de cada segmento. Para conocer el recorrido del centro de gravedad de todo el cuerpo, se hace el cálculo para la localización del centro de gravedad de cada uno de los segmentos y algebraicamente se calcula para cada cuadro su localización.

Los resultados que se obtienen en las gráficas del ejemplo del arranque, son comparativos a los publicados en la referencia (20).

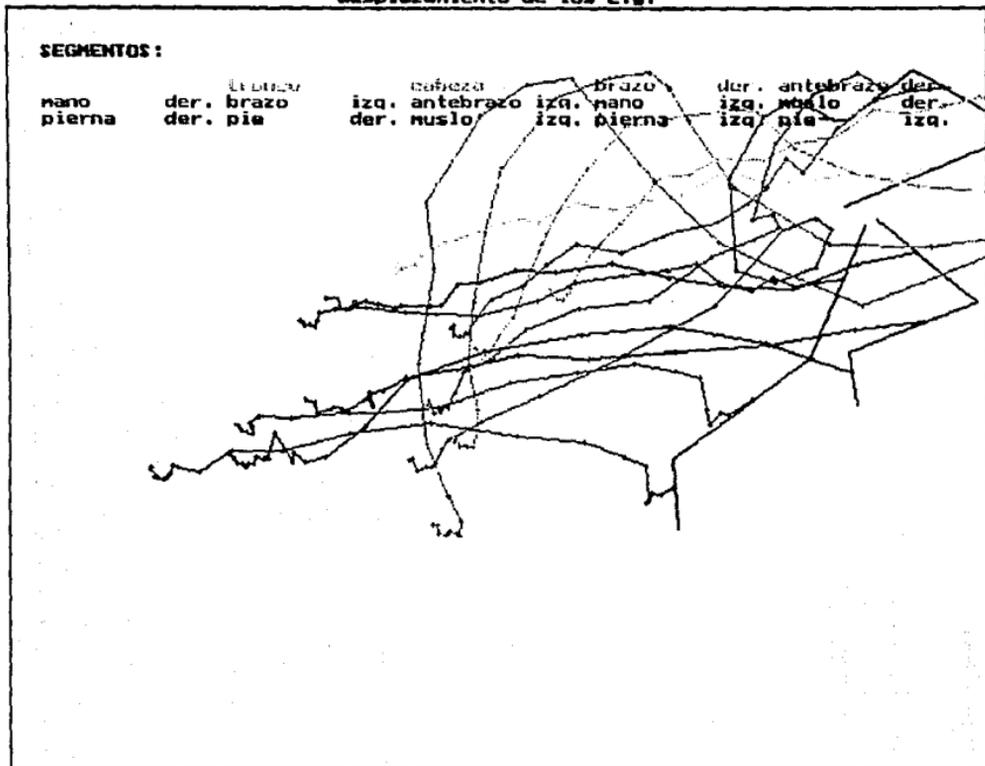
desplazamiento del C.G.



Da Esc para abortar, otra Tecla para continuar.

Fig. 23 Desplazamiento del Centro de Gravedad.

desplazamiento de los c.g.



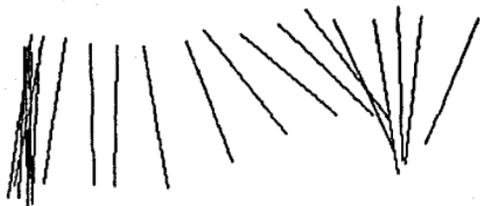
Da Esc para abortar, otra tecla para continuar.

Fig. 24 Desplazamientos de los centros de gravedad.



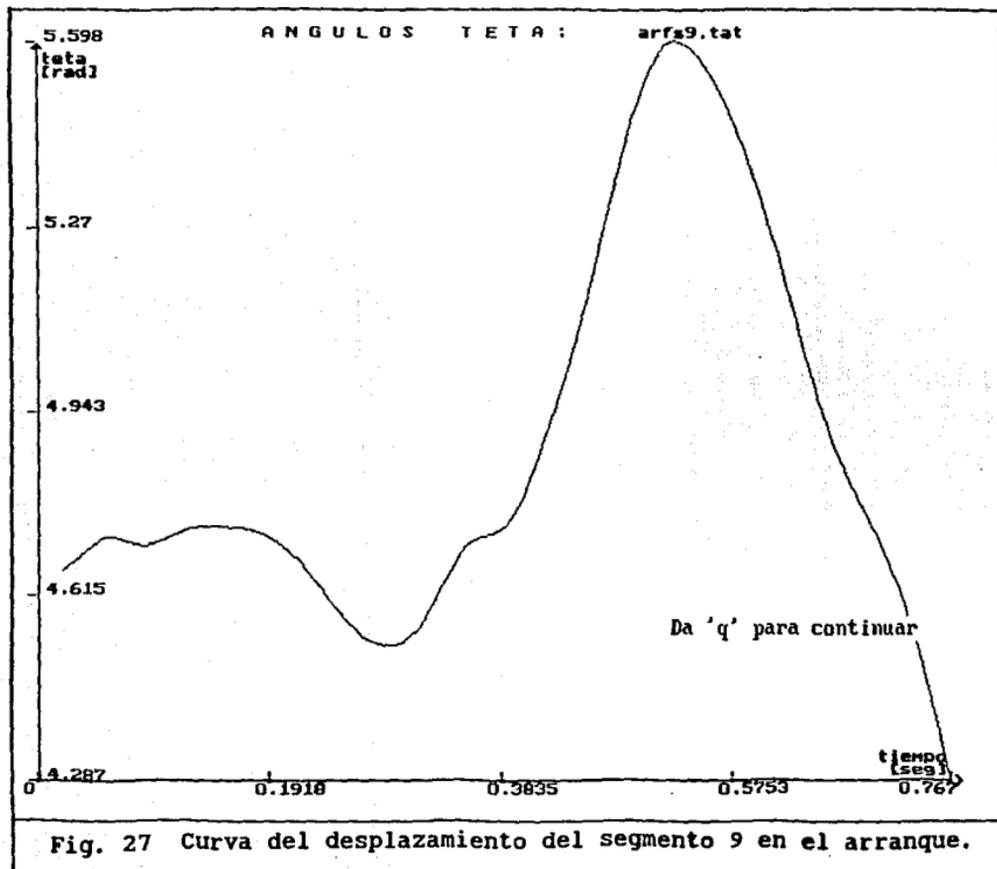
DESPLAZAMIENTO DEL SEGMENTO: 9

en cm



cuadro:	ángulo:	tratl lateral	dato (total):
22	4.28	245	0.7667

Fig. 26 Pantalla del desplazamiento del segmento 9.



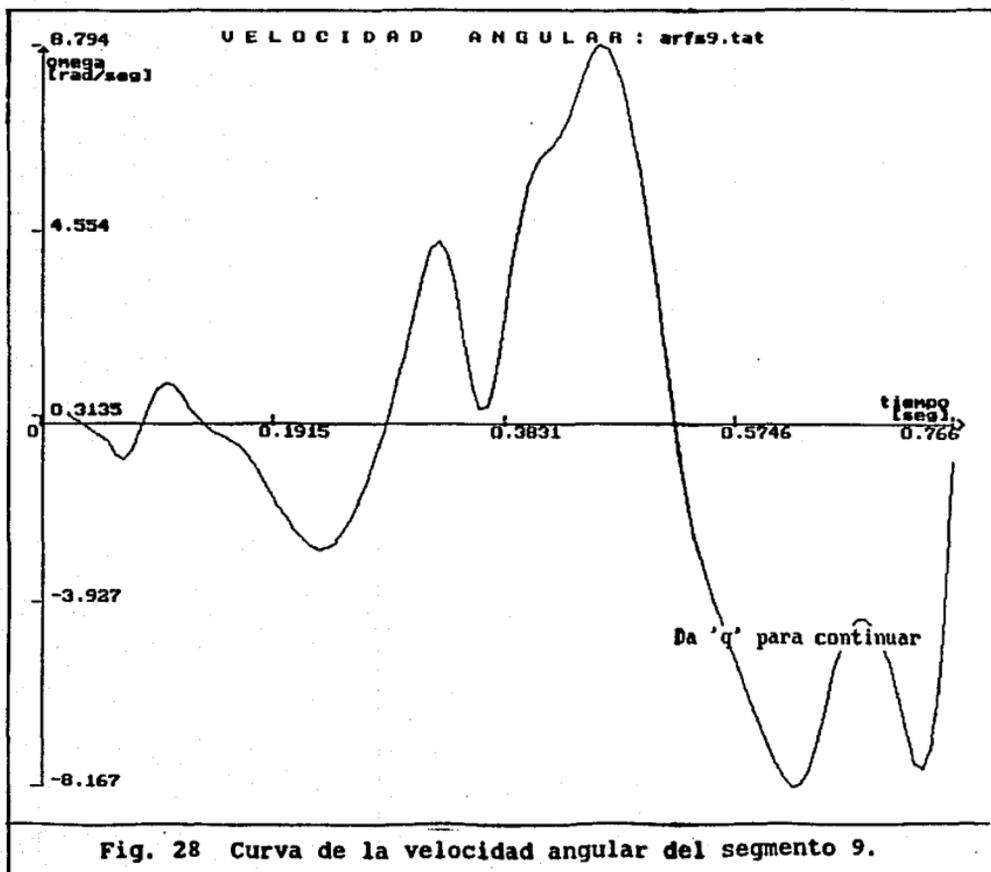


Fig. 28 Curva de la velocidad angular del segmento 9.

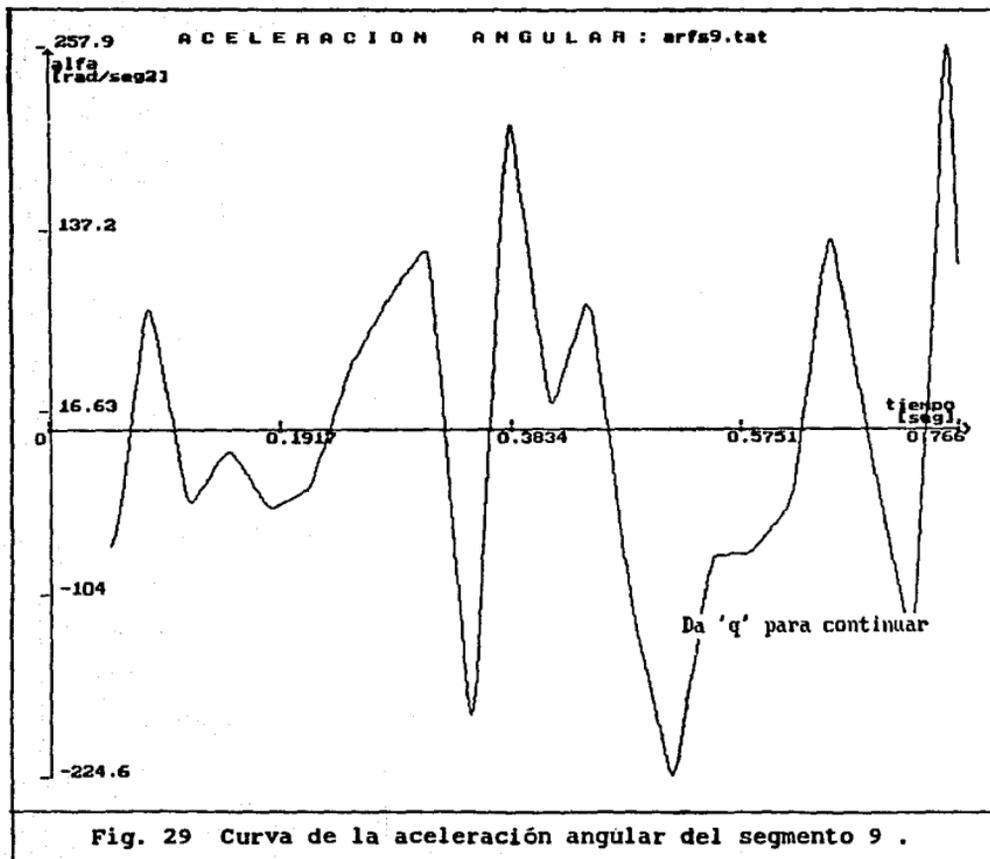


Fig. 29 Curva de la aceleración angular del segmento 9 .

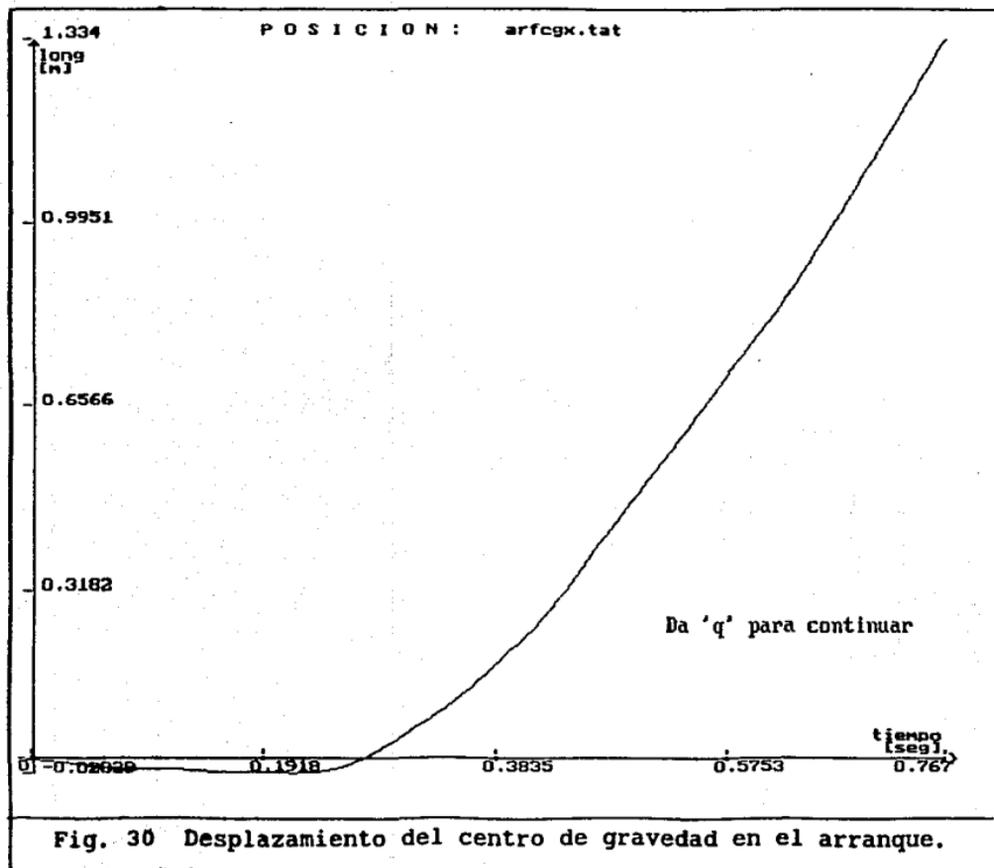
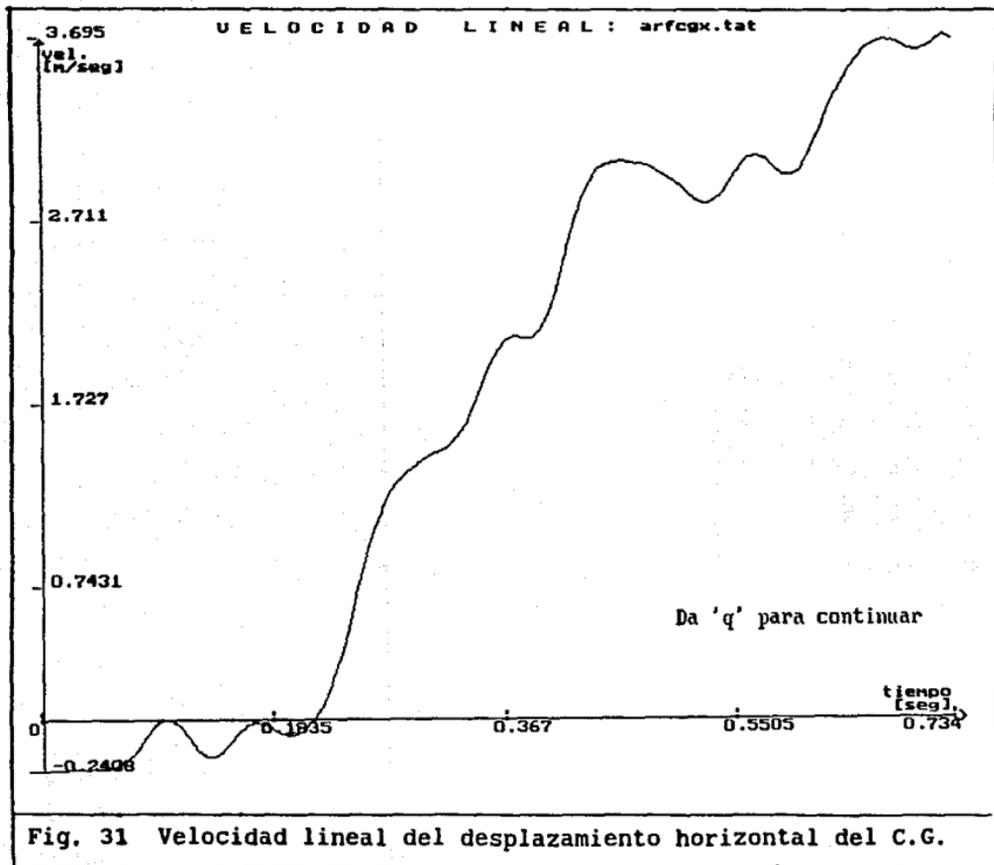


Fig. 30 Desplazamiento del centro de gravedad en el arranque.



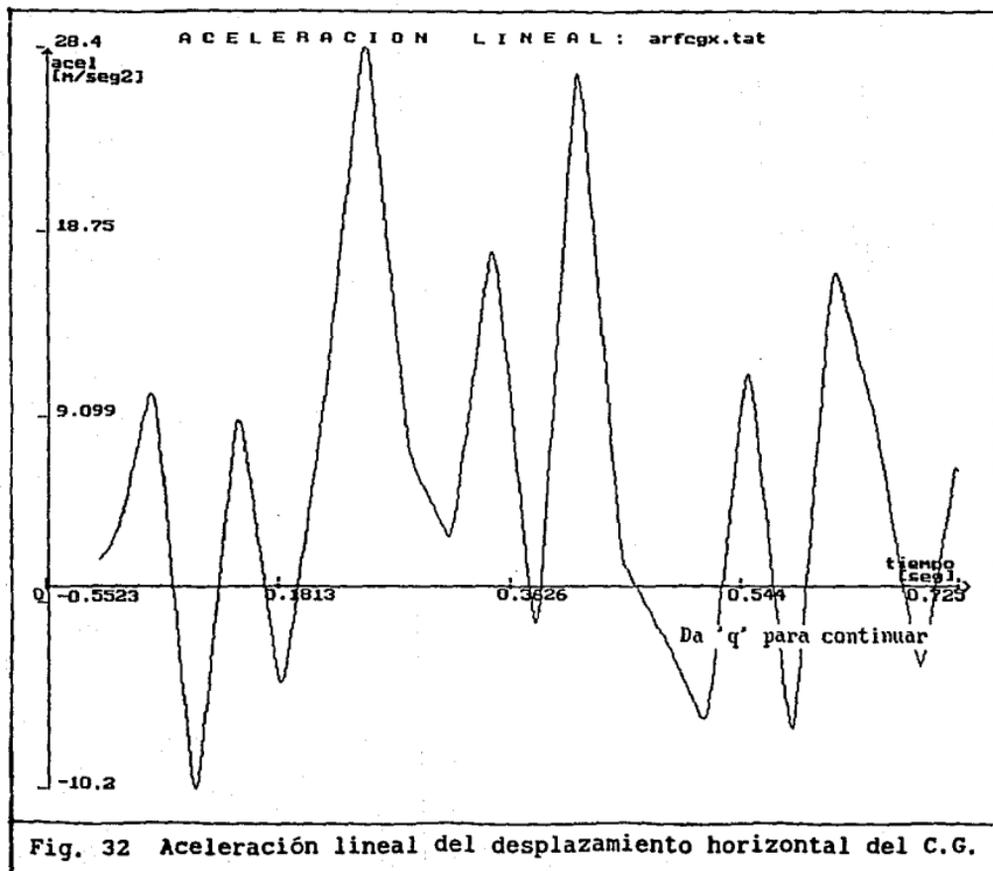


Fig. 32 Aceleración lineal del desplazamiento horizontal del C.G.

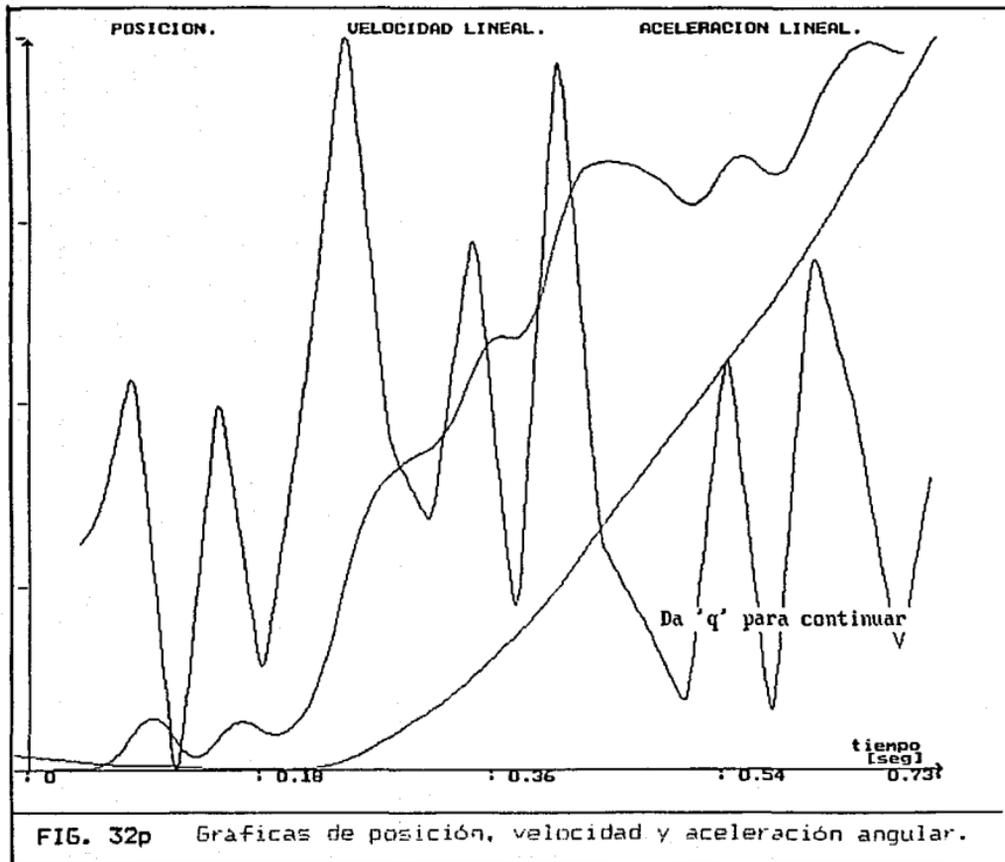


FIG. 32p Gráficas de posición, velocidad y aceleración angular.



3.5.3.3. Cálculo y graficación de la velocidad y la aceleración angulares del desplazamiento de los segmentos. A partir del archivo de segmentos tipo SEG se calculan los valores, en radianes, de los ángulos teta de la inclinación del segmento en estudio, con respecto a la horizontal, midiendo en contra de las manecillas del reloj, a partir del eje de las X en el primer cuadrante. El punto proximal del segmento se considera que es el origen. Los datos se interpolan por medio del método numérico de Splines antes descrito, esta interpolación genera un archivo que llamamos tipo TAT (\*.TAT). Se grafican los ángulos, la velocidad y la aceleración angulares del desplazamiento con respecto al tiempo. Las unidades son radianes, radianes por segundo y radianes por segundo al cuadrado, respectivamente. Las gráficas se despliegan en pantalla, una tras otra y, por último, las tres juntas.

En la siguiente lista se presenta un ejemplo de los datos interpolados para el segmento 9:

Tabla 5.

tiempo [seg]	ángulo [rad]	velocidad angular [rad/seg]	aceleración angular [rad/seg <sup>2</sup> ]
0.400363	4.735168	2.352861	224.003311
0.407029	4.755517	3.705217	181.707306
0.413696	4.783943	4.775601	139.411316
0.420363	4.818565	5.564016	97.115311
0.427029	4.857503	6.070459	54.819313
0.433726	4.899063	6.294933	12.712172
0.440393	4.941433	6.434296	29.097002
0.447059	4.985096	6.682889	45.481831

3.5.3.4. Cálculo y graficación del centro de gravedad del cuerpo en el desplazamiento en X o en Y. Las entradas a este programa son el archivo de segmentos tipo SEG, la tabla de ecuaciones de regresión de Chandler, el archivo tipo DAT y el peso del cuerpo del sujeto. Se calcula la posición del centro de gravedad del cuerpo para cada cuadro y se utiliza el método

de interpolación ya descrito. Este programa genera también un archivo tipo TAT. Se grafican los desplazamientos, la velocidad y la aceleración lineales en X o en Y según se haya solicitado. Las unidades son metros, metros por segundo y metros por segundo al cuadrado.

En la siguiente lista se presenta un ejemplo de los datos interpolados para el desplazamiento del cetro de gravedad en el arranque.

Tabla 6. Ejemplo de datos interpolados.

tiempo [seg]	distancia [m]	velocidad lineal [m/seg]	aceleración lineal [m/seg <sup>2</sup> ]
0.260212	-0.013874	0.508617	25.729458
0.266908	-0.009876	0.693704	29.817757
0.273575	-0.004622	0.877269	25.252481
0.280241	0.001753	1.030400	20.687204
0.286908	0.009049	1.153096	16.121929
0.293575	0.017060	1.245357	11.556653
0.300272	0.025622	1.307183	7.030595
0.306938	0.034486	1.350953	6.100435

3.5.3.5 Cálculo de los momentos de inercia de los segmentos. Para este caso, se tienen como entrada al programa el archivo de segmentos tipo SEG, la tabla de ecuaciones de regresión de Chandler y del archivo tipo DAT el peso del cuerpo del sujeto. El sistema pregunta por el punto (eje) de giro para el cual se hace el cálculo (por ejemplo: talón, centro de gravedad, etc.). Pregunta por el número de imágenes que cumplen con ese punto de giro y calcula el radio resultante del momento de inercia para cada cuadro. Para el cálculo del momento de inercia se aplica el teorema de Steiner o de los ejes paralelos:

$$I_i = \text{masa}_i * \text{radiogiro}^2 + \text{masa}_i * \text{largo}_i / 12$$

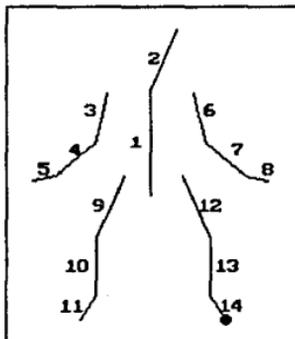
para  $i = 1, \dots, 14$  (14 segmentos)

donde  $I =$  momento de inercia [ $\text{Kg m}^2$ ]

CUADRO: 12

**MOMENTOS DE INERCIA**

● PUNTO DE GIRO



1 TRONCO.	38.58		
2 CABEZA.	8.744		
3 BRAZO D.	3.033	6 BRAZO I.	2.714
4 ANTEBR. D.	1.321	7 ANTEBR. I.	1.562
5 MANO D.	0.3259	8 MANO I.	0.7432
9 MUSLO D.	3.965	12 MUSLO I.	3.39
10 PIERNA D.	0.7608	13 PIERNA I.	0.405
11 PIE D.	0.06584	14 PIE I.	0.02244

[Kg m<sup>2</sup>]

MOMENTO DE INERCIA TOTAL  
y RADIO RESULTANTE

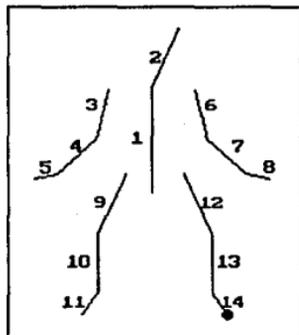
65.63 [Kg m<sup>2</sup>]  
0.9452 [m]

Fig. 34a Pantalla de cálculo del momento de inercia.

arf.dat  
arf.ses

MOMENTOS DE INERCIA

● PUNTO DE GIRO



CUADRO: 13



1 TRONCO.	45.28	[Kg m <sup>2</sup> ]	
2 CABEZA.	9.676		
3 BRAZO D.	3.744	6 BRAZO I.	3.365
4 ANTEBR. D.	1.917	7 ANTEBR. I.	2.11
5 MANO D.	0.5384	8 MANO I.	1.034
9 MUSLO D.	5.447	12 MUSLO I.	3.91
10 PIERNA D.	1.4	13 PIERNA I.	0.405
11 PIE D.	0.178	14 PIE I.	0.02396

MOMENTO DE INERCIA TOTAL  
y RADIO RESULTANTE

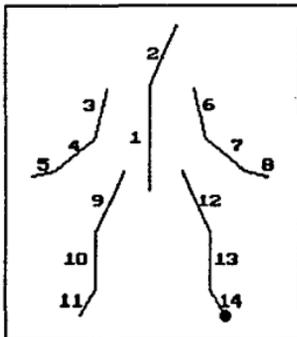
79.03 [Kg m<sup>2</sup>]  
1.046 [m]

Fig. 34b Pantalla de cálculo del momento de inercia.

arf.dat  
arf.seg

MOMENTOS DE INERCIA

● PUNTO DE GIRO



CUADRO: 14



1 TRONCO.	52.16		
2 CABEZA.	11.13		
3 BRAZO D.	4.425	6 BRAZO I.	4.088
4 ANTEBR. D.	2.415	7 ANTEBR. I.	2.556
5 MANO D.	0.7148	8 MANO I.	1.179
9 MUSLO D.	7.177	12 MUSLO I.	4.616
10 PIERNA D.	2.23	13 PIERNA I.	0.5036
11 PIE D.	0.3838	14 PIE I.	0.02742

MOMENTO DE INERCIA TOTAL  
y RADIO RESULTANTE

93.61	[Kg m <sup>2</sup> ]
1.151	[m]

FIG. 34c Pantalla de cálculo del momento de inercia.

Por fase del movimiento, se despliegan los valores de momento de inercia para cada segmento, el valor total para cada cuadro y el valor del radio resultante. Se presenta en pantalla la postura del cuerpo en el cuadro que corresponde para el que se está haciendo el cálculo y la localización del radio resultante.

3.5.3.6. Cálculo del momento angular por segmento. Se calcula la velocidad angular del segmento seleccionado con el mismo procedimiento usado en el módulo de cinemática. Para el cálculo del momento de inercia se utiliza el método de los ejes paralelos. Se calcula el momento angular (L) multiplicando el momento de inercia (I) por la velocidad angular ( $\omega$ ). Se interpola antes de graficar. Los resultados de la interpolación se almacenan en un archivo tipo MAN.

$$L_i = I_i * \omega_i$$

para  $i = 1, \dots, 14$

donde L = momento angular [Kg m<sup>2</sup>/ seg]

En la tabla 5 se muestra una lista de los resultados obtenidos para el segmento 9 del arranque.

CALCULOS PARA EL SEGMENTO 9

Cuadro	Mom. Inercia Kg m <sup>2</sup>	Radio Resul. m	Vel. Angular rad/seg	Inc. Tiempo seg	Mom. Angular Kg m <sup>2</sup> /seg
0	3.3587	0.6849	0.0000	0.0333	0.0000
1	3.3174	0.6804	2.2363	0.0667	7.4187
2	3.4002	0.6895	-1.5820	0.100	-5.3793
3	3.5265	0.7032	1.5886	0.1333	5.6023
4	3.4002	0.6895	-0.0193	0.1667	-0.0657
5	3.3587	0.6849	-0.2964	0.2000	-0.9955
6	3.4841	0.6986	-1.9271	0.2333	-6.7144
7	3.4002	0.6895	-3.1020	0.2667	-10.5474
8	3.7424	0.7260	-1.6415	0.3000	-6.1433
9	2.3758	0.5662	1.4004	0.3333	3.3270
10	2.7318	0.6119	5.6441	0.3667	15.4181
11	3.2765	0.6758	-1.3791	0.4000	-4.5185
12	3.9652	0.7489	6.0852	0.4333	24.1292
13	5.4470	0.8858	6.5057	'q' continúa	35.4370
14	7.1772	1.0228	9.6637	0.5000	69.3589
15	8.4015	1.1096	5.8882	0.5333	49.4692
16	0.3549	0.1233	-1.8940	0.5667	-0.6722
17	0.4138	0.1553	-4.5891	0.6000	-1.8990
18	3.5691	0.7078	-7.2091	0.6333	-25.7302
19	3.6552	0.7169	-8.7553	0.6667	-32.0026
20	4.0563	0.7580	-4.0586	0.7000	-16.4630
21	4.0106	0.7534	-4.5560	0.7333	-18.2722
22	4.9255	0.8402	-9.3635	0.7667	-46.1199

Tabla 7. Resultados del movimiento angular del segmento 9 en el arranque.

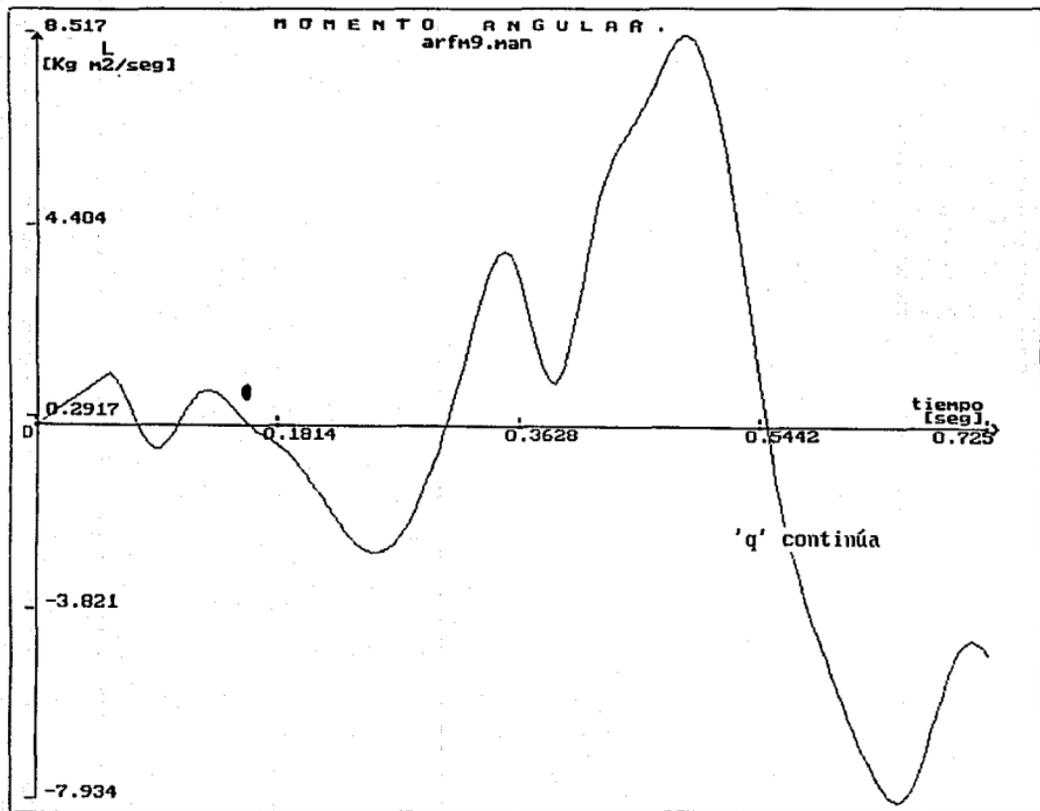


Fig. 35 Gráfica del momento angular del segmento 9 en el arranque.

## C A P I T U L O   I V .

### E J E M P L O S   Y   R E S U L T A D O S

#### 4.1 PRUEBAS DE VELOCIDAD EN EL ATLETISMO FEMENIL

Durante los Juegos Centroamericanos efectuados en la Cd. de México en noviembre de 1990 se pudo hacer una grabación de la corredora cubana Ana Fidelia Quirot, campeona de la prueba de los 400 metros.

Apesar de que cuando se hizo esta grabación aún no se habían establecido con precisión las especificaciones y requerimientos de la grabación de video para este proyecto, el material obtenido fue adecuado para hacer las primeras comparaciones de la técnica en la carrera de velocidad.

En general la carrera se divide en tres fases principales que son: la fase en la que el sujeto pisa el suelo (apoyo con el talón), la fase en la que el sujeto está en vuelo (sin apoyo) y la fase en la que el sujeto se impulsa y se desprende del piso (apoyo con la punta del pié). Un ciclo de carrera lo conforman los siguientes movimientos: pisada con un pié, impulso y desprendimiento del suelo, vuelo, pisada con el pié contrario, impulso y desprendimiento y vuelo.

Para conocer la diferencia entre una corredora alto rendimiento (Ana Fidelia Quirot: 9 cuadros para medio ciclo de carrera) y una corredora principiante, se grabó y seleccionó la secuencia de imágenes de medio ciclo de carrera de la corredora universitaria principiante Reyna González (7 cuadros para medio ciclo de carrera).



FIG. 36 Secuencia de imágenes de Reyna.

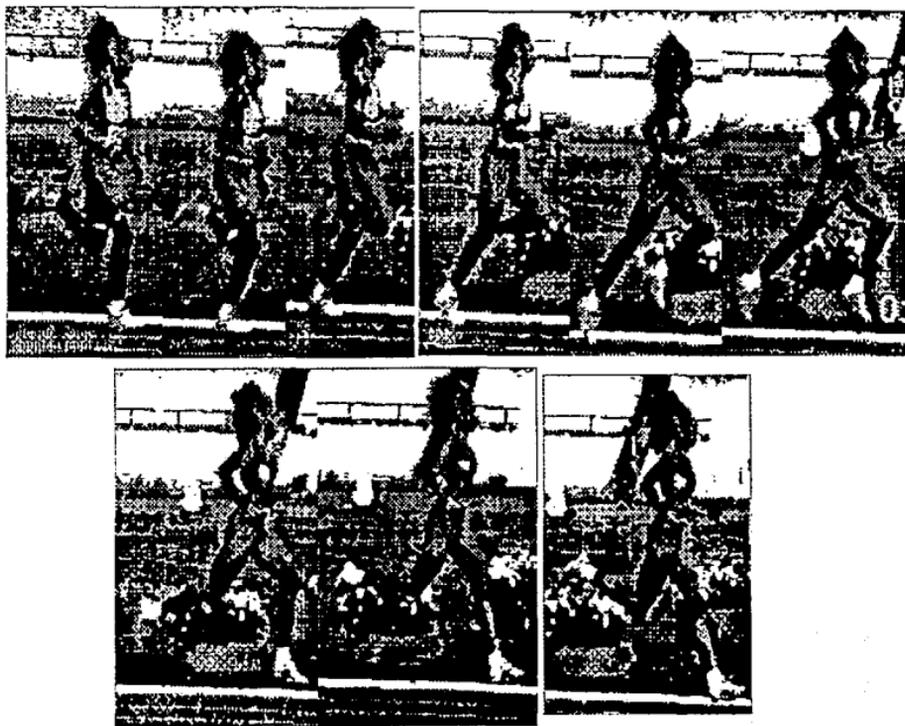


Fig. 37 Secuencia de imágenes de Ana Fidelia.

cuadro por cuadro

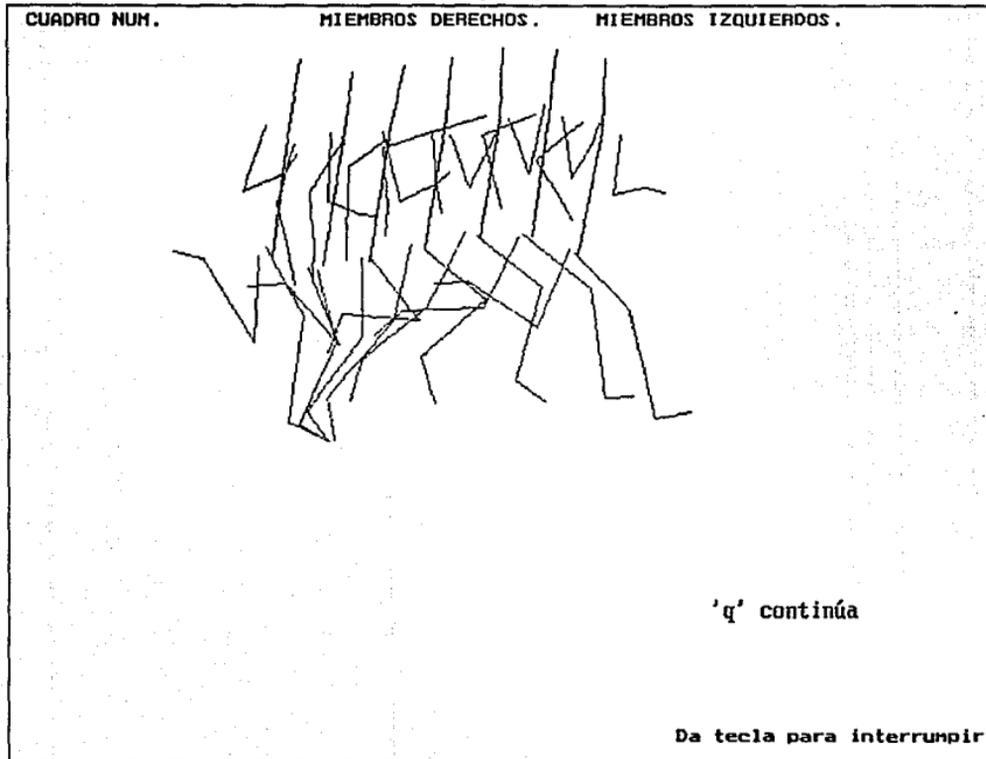
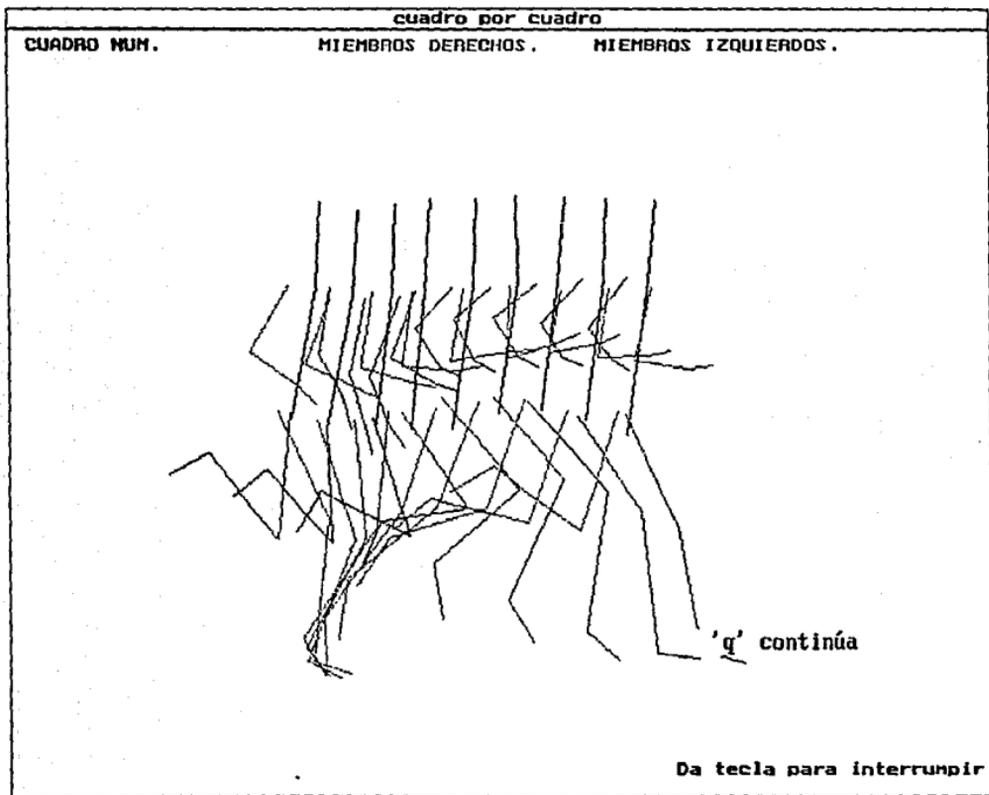


Fig. 38 Secuencia de cuadros de Reyna.



**Fig. 39** Secuencia de cuadros de Ana Fidelia.

Atleta	peso [Kg]	talla [m]
Reyna Gonzalez	53	1.58
Ana Fidelia Quirot	62	1.67

Tabla 8. Datos de peso y talla de las corredoras.

Tabla 9. Cuadros en las fases de la carrera de las atletas.

Fases de un ciclo de carrera	Número de cuadros	
	Reyna G.	Ana F.
apoyo pié dercho, talón	6	0,1
apoyo pié derecho, punta	-	2,3,4
sin apoyo, en vuelo	-	5,6,7
apoyo pié izquierdo, talón	0	8
apoyo pié izquierdo, punta	1,2	-
sin apoyo, en vuelo	3,4,5	-

Debido a que los medio ciclos de cada atleta corresponden a diferente lado, Ana F. lado derecho y Reyna lado izquierdo, se hizo un análisis sobre la fase del vuelo.

Valores de Momento de Inercia [ $\text{Kg m}^2$ ] obtenidos para la fase de vuelo del ciclo de carrera:

Atleta y núm. cuadro	I del miembro pélvico que hizo el impulso, [ $\text{Kg m}^2$ ]			I de todo el cuerpo [ $\text{Kg m}^2$ ]
	muslo	pierna	pie	
Reyna				
3	0.5889	0.925	0.6039	6.442
4	0.6267	0.9596	0.6207	6.689
5	0.6076	0.8577	0.5311	6.852
Ana F.				
5	0.7665	1.437	0.9399	8.701
6	0.7456	1.251	0.8139	8.904
7	0.8319	1.173	0.6972	9.308

Tabla 10. Datos comparativos en las pruebas de velocidad femenil.

Los resultados de la tabla anterior muestran que los valores de

los momentos de inercia de Ana Fidelia, tanto del miembro pélvico que impulsó como de todo el cuerpo son mayores que los valores calculados para Reyna.

#### 4.2 GIMNASIA ARTISTICA VARONIL

Se grabó video a los participantes de la prueba del salto al caballo varonil durante el Campeonato de Gimnasia Artística de la Zona Sur en el gimnasio de la Magdalena Mixhuca, en abril de 1991. La secuencia de cuadros seleccionada para el análisis corresponde a la mejor grabación en video, esto es, no hubo persona u objeto que se atravesara en el momento del salto.

En la tesis "Uso del video en el análisis del movimiento en biomecánica." (23) se hace un estudio comparativo de los resultados obtenidos con el método presentado en este y los resultados publicados en la literatura especializada (24) (25) (26). Para ese trabajo de desarrolló un módulo adicional de análisis cinemático del cual se presentan dos pantallas (Figs. 50). En este módulo lo que se interpola y suaviza son las coordenadas de los segmentos obteniendo cuadros de tiempos para los que no se hizo grabación.

En la tabla 11 se muestran los resultados del cálculo del momento angular del salto seleccionado.

#### 4.3 PRUEBA DE 100m VARONIL EN EL ATLETISMO OLIMPICO

Para este análisis se obtuvo un video de la final de los 100m en la Olimpiada de Seúl de 1988. Este video incluye una secuencia de toda la carrera en cámara lenta y grabado con cámara profesional que permitió que se pudiera seleccionar un ciclo de carrera a 158 cuadros por segundo. Sin embargo para que este material fuera comparativo con los videos grabados para este trabajo, hubo que tomar solo 17 de los 64 cuadros



Fig. 40 Algunas imágenes del salto al caballo.

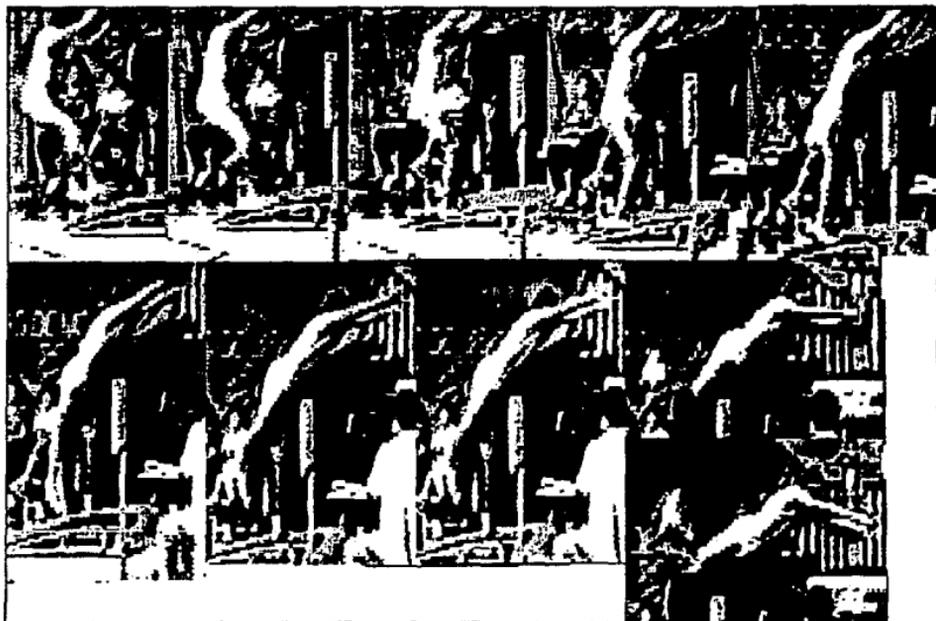


Fig. 41 Secuencia de imágenes de las fases de impulso y prevuelo.

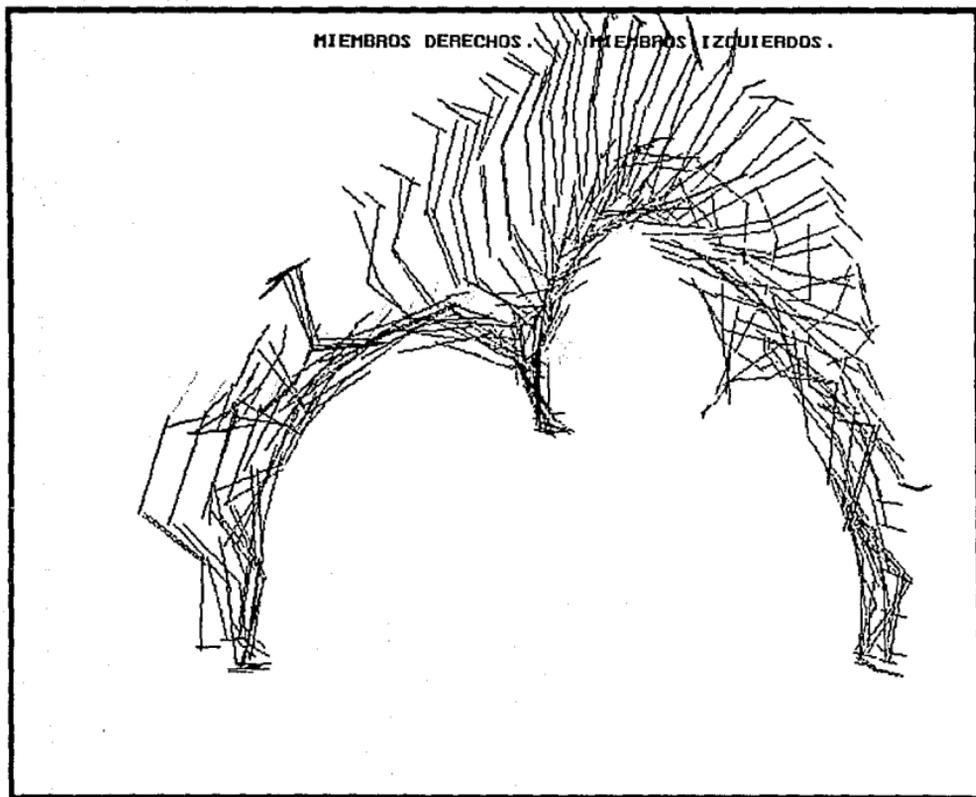


Fig. 42 Secuencia de cuadros del salto al caballo.

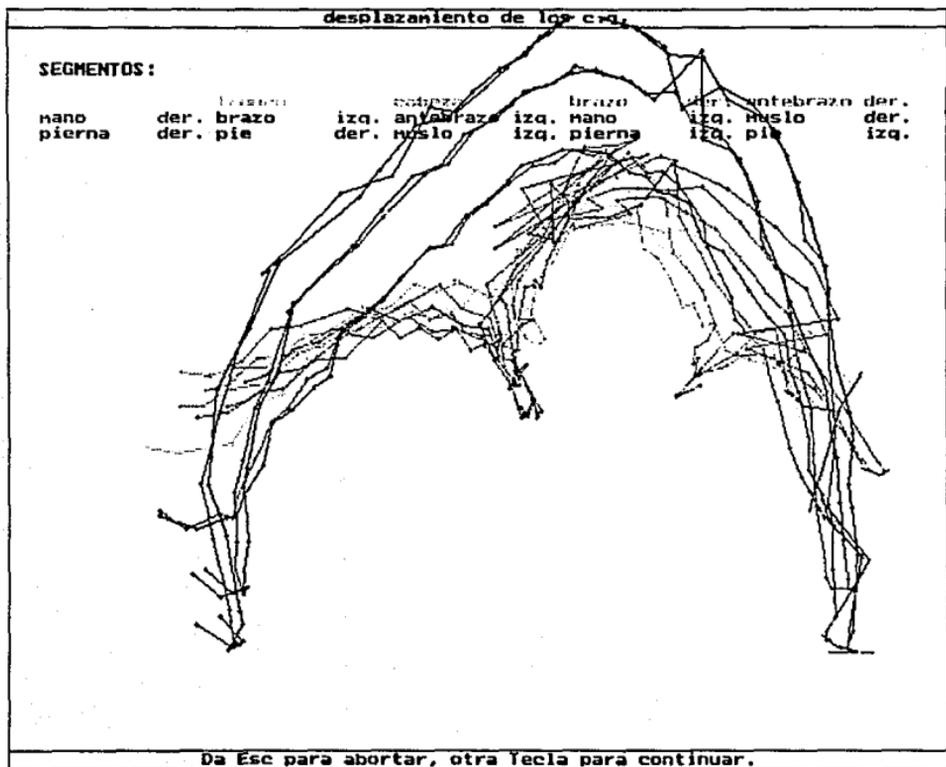


Fig. 43. Desplazamiento de los centros de gravedad.

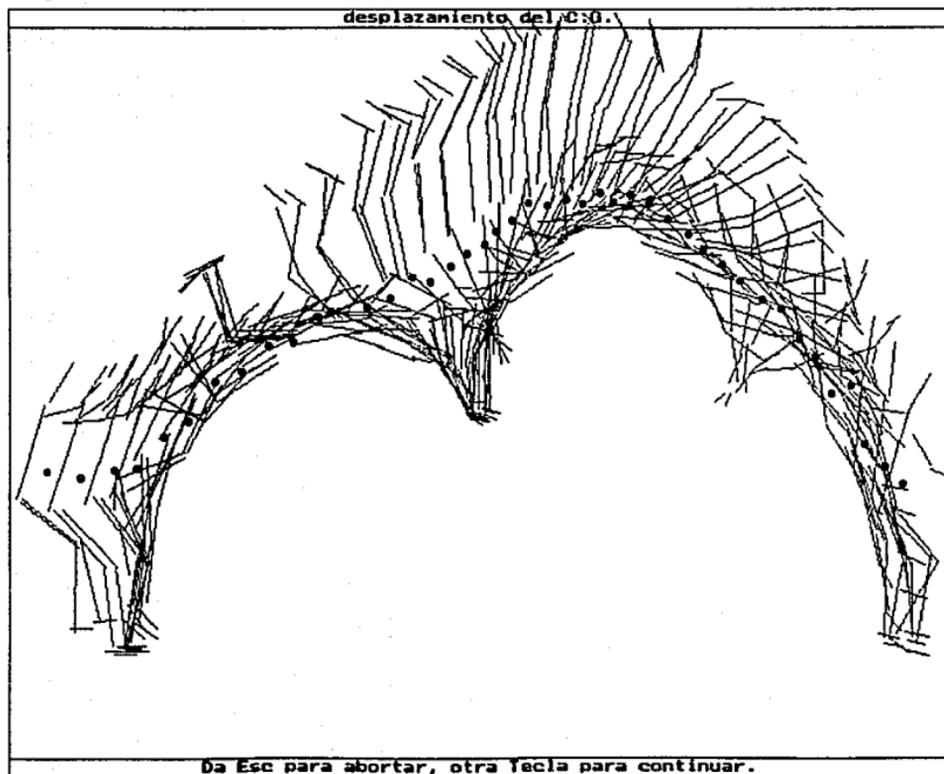
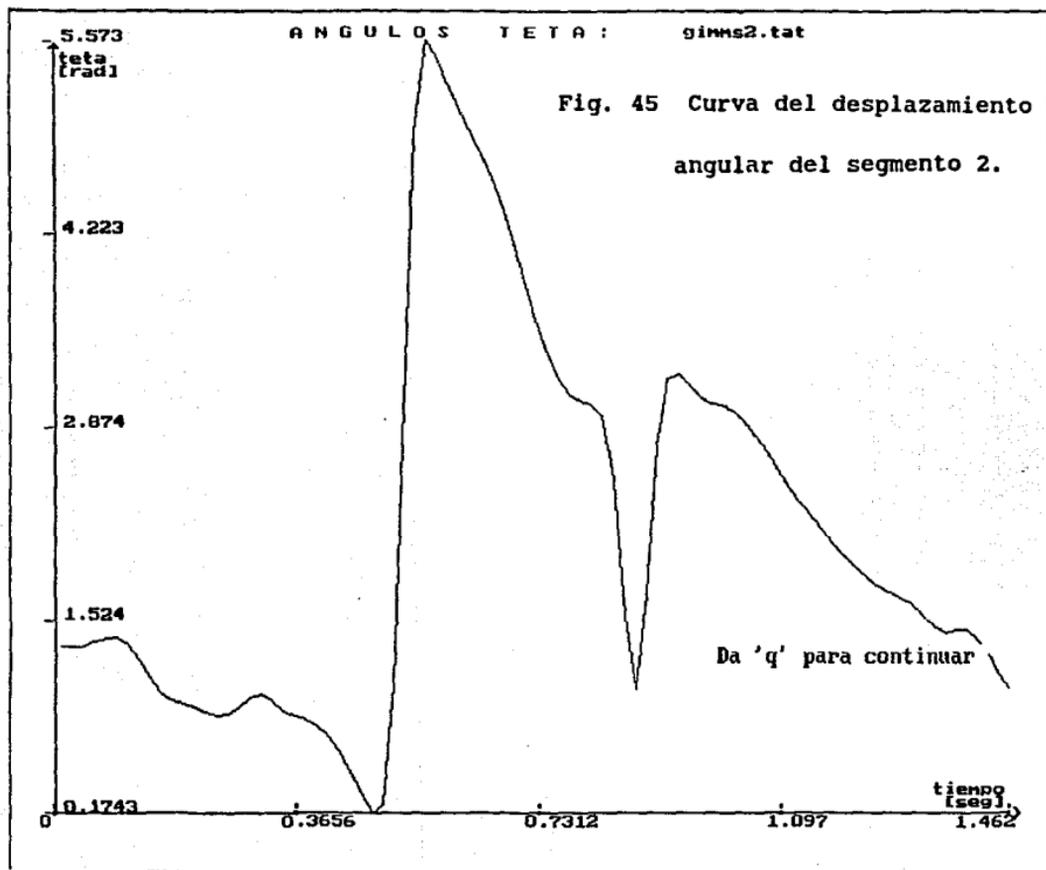
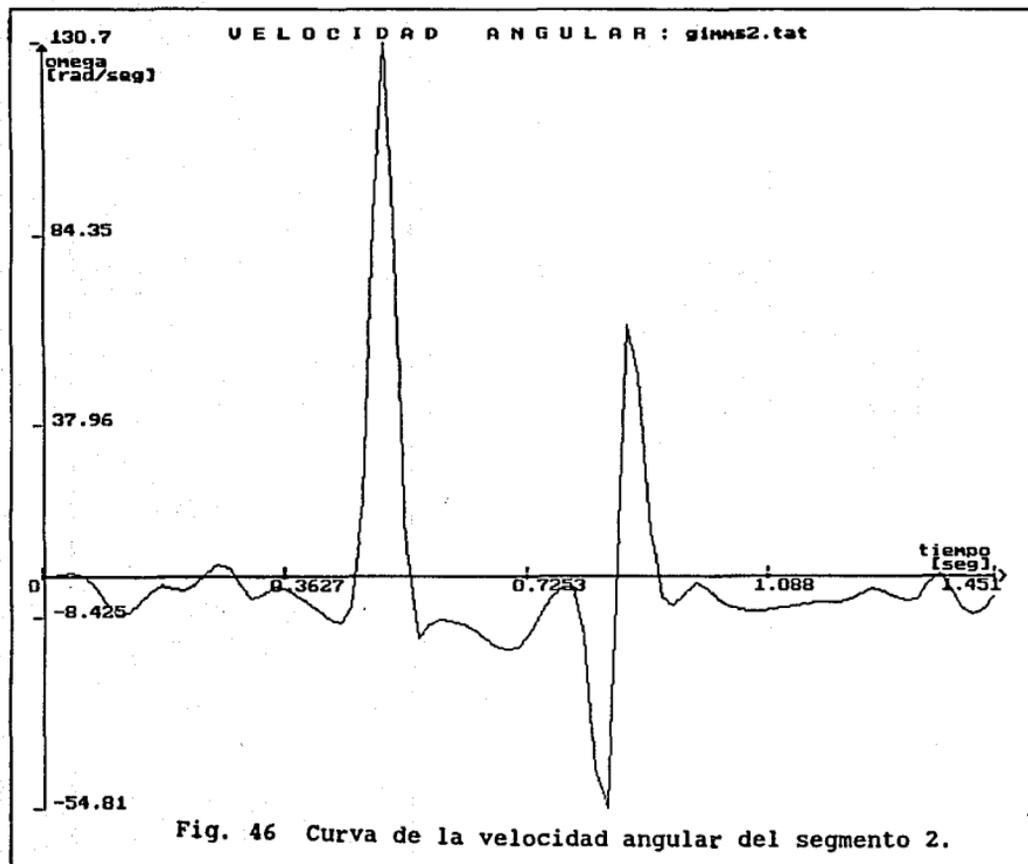
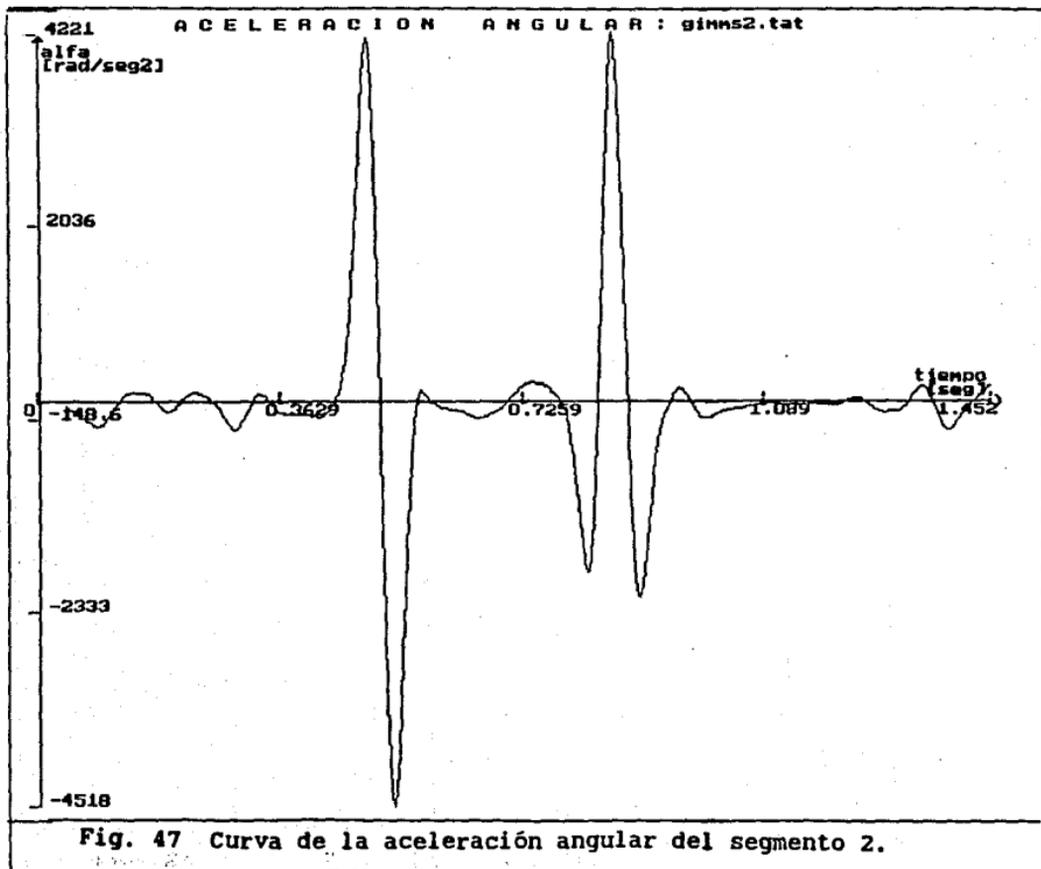


Fig. 44 Desplazamiento del centro de gravedad.

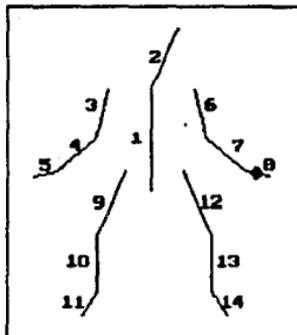






gin.dat  
ginn.sag

**MOMENTOS DE INERCIA**  
**● PUNTO DE GIRO**



CUADRO: 19



1 TRONCO.	34.27	[Kg m <sup>2</sup> ]	
2 CABEZA.	0.9739		
3 BRAZO D.	0.7682	6 BRAZO I.	0.7766
4 ANTEBR. D.	0.2194	7 ANTEBR. I.	0.1375
5 MANO D.	0.02903	8 MANO I.	0.007082
9 MUSLO D.	15.25	12 MUSLO I.	15.49
10 PIERNA D.	9.941	13 PIERNA I.	10.47
11 PIE D.	4.258	14 PIE I.	4.343

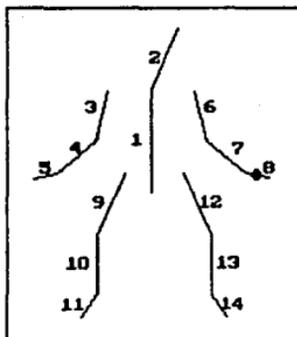
**MOMENTO DE INERCIA TOTAL**  
**W RADIO RESULTANTE**

96.93	[Kg m <sup>2</sup> ]
1.071	[m]

Fig. 48a Momento de inercia en el contacto al caballo.

gim.dat  
gimh.seg

MOMENTOS DE INERCIA  
● PUNTO DE GIRO



CUADRO: 20



1 TRONCO.	38.68	[Kg m2]	
2 CABEZA.	1.277		
3 BRAZO D.	1.285	6 BRAZO I.	0.8066
4 ANTEBR. D.	0.5702	7 ANTEBR. I.	0.1228
5 MANO D.	0.1382	8 MANO I.	0.007082
9 MUSLO D.	17.7	12 MUSLO I.	16.84
10 PIERNA D.	11.47	13 PIERNA I.	11.6
11 PIE D.	4.811	14 PIE I.	4.85

MOMENTO DE INERCIA TOTAL  
y RADIO RESULTANTE

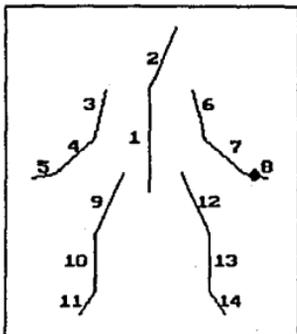
110.1	[Kg m2]
1.148	[m]

Fig. 48b Momento de inercia en el contacto al caballo.

gin.dat  
ginn.seg

MOMENTOS DE INERCIA

● PUNTO DE GIRO



CUADRO: 21



1 TRONCO.	37.78	[Kg m <sup>2</sup> ]	
2 CABEZA.	1.627		
3 BRAZO D.	1.246	6 BRAZO I.	0.8066
4 ANTEBR. D.	0.7377	7 ANTEBR. I.	0.1536
5 MANO D.	0.1833	8 MANO I.	0.007082
9 MUSLO D.	16.58	12 MUSLO I.	16.29
10 PIERNA D.	11.04	13 PIERNA I.	11.03
11 PIE D.	4.606	14 PIE I.	4.543

MOMENTO DE INERCIA TOTAL  
y RADIO RESULTANTE

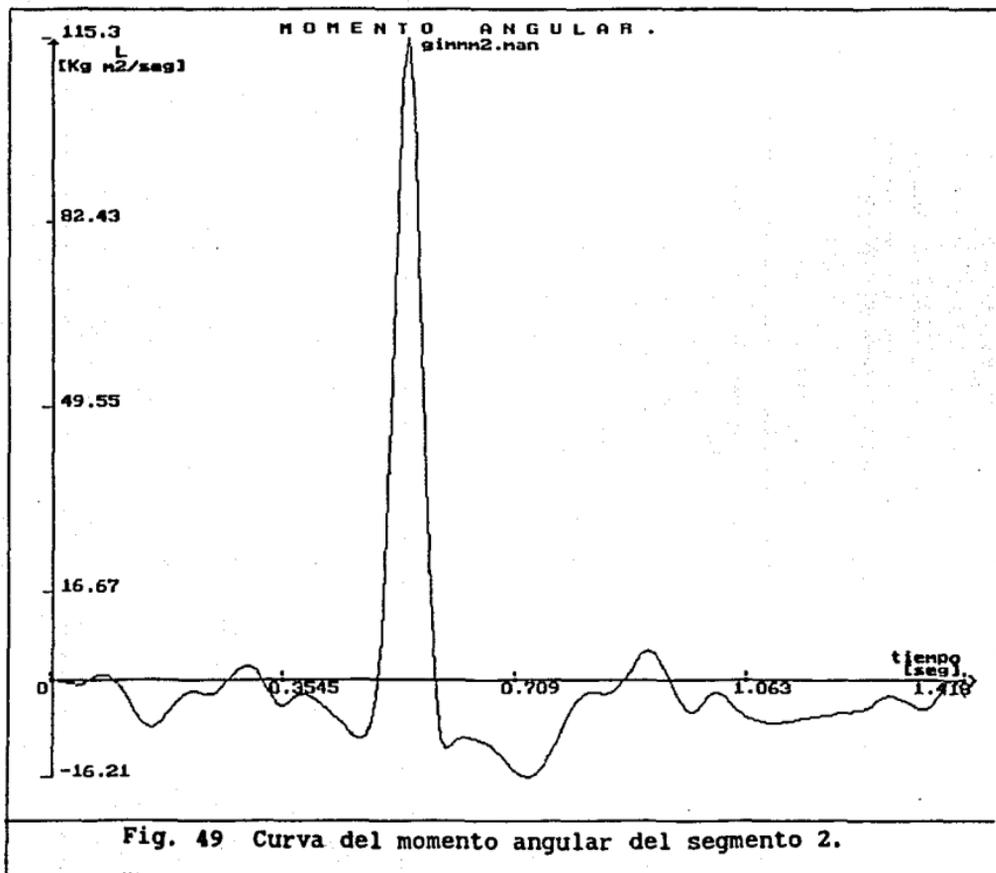
106.6 [Kg m<sup>2</sup>]  
1.148 [m]

FIG. 48c Momento de inercia en el contacto al caballo.

CALCULOS PARA EL SEGMENTO 2

Cuadro	Mon. Inercia Kg m <sup>2</sup>	Radio Resul. m	Vel. Angular rad/seg	Inc. Tiempo seg	Mom. Angular Kg m <sup>2</sup> /seg
0	9.4060	1.5049	0.0000	0.0333	0.0000
1	10.7021	1.6070	-0.6451	0.0667	-6.9036
2	10.8701	1.6197	2.8827	0.100	31.3350
3	11.3820	1.6580	-0.4878	0.1333	-5.5518
4	12.9895	1.7728	-9.4723	0.1667	-123.0401
5	1.8205	0.6377	-5.1057	0.2000	-9.2950
6	1.9560	0.6632	0.2273	0.2333	0.4445
7	1.7548	0.6249	-3.4000	0.2667	-5.9663
8	2.2428	0.7142	2.4628	0.3000	5.5237
9	1.5655	0.5867	5.0293	0.3333	7.8736
10	1.6904	0.6122	-6.5864	0.3667	-11.1334
11	2.2428	0.7142	-0.0977	0.4000	-0.2192
12	2.3178	0.7270	-3.5376	0.4333	-8.1995
13	1.3883	0.5484	-6.6042	'q' continúa	-9.1682
14	1.4460	0.5612	-11.6391	0.5000	-16.8304
15	1.2229	0.5101	-0.9521	0.5333	-1.1643
16	1.1193	0.4846	177.4892	0.5667	198.6676
17	0.8405	0.4081	-18.1407	0.6000	-15.2465
18	0.7986	0.3954	-8.8200	0.6333	-7.0439
19	0.9739	0.4464	-9.2547	0.6667	-9.0134
20	1.2767	0.5229	-10.9088	0.7000	-13.9273
21	1.6273	0.5994	-16.0824	0.7333	-26.1706
22	1.3883	0.5484	-16.8814	0.7667	-23.4356
23	1.4460	0.5612	-8.2489	0.8000	-11.9280
24	1.5051	0.5739	-0.2464	0.8333	-0.3709
25	1.5655	0.5867	-2.3916	0.8667	-3.7442
26	1.8876	0.6504	0.0000	0.9000	0.0000
27	1.8205	0.6377	8.9709	0.9333	16.3316
28	2.0257	0.6759	0.7361	0.9667	1.4910
29	2.0967	0.6807	-8.0496	'q' continúa	-16.8779
30	1.9560	0.6632	1.1880	1.0333	2.3236
31	1.8876	0.6504	-4.9545	1.0667	-9.3520
32	1.9560	0.6632	-6.5601	1.1000	-12.8314
33	1.8876	0.6504	-7.0874	1.1333	-13.3781
34	1.9560	0.6632	-6.0785	1.1667	-11.8893
35	1.8205	0.6377	-5.6632	1.2000	-10.3099
36	1.8205	0.6377	-4.7331	1.2333	-8.6167
37	1.9560	0.6632	-4.8929	1.2667	-9.5704
38	1.8205	0.6377	-1.0290	1.3000	-1.8733
39	1.8205	0.6377	-3.7307	1.3333	-6.7918
40	13.5493	1.8110	-5.6997	1.3667	-77.2269
41	11.7299	1.6835	4.5003	1.4000	52.7887
42	10.0434	1.5559	-7.9771	1.4333	-80.1171
43	9.2499	1.4922	-7.7232	1.4667	-71.4392

Tabla 11. Resultados del movimiento angular del segmento 2 en el ejemplo del salto al caballo.



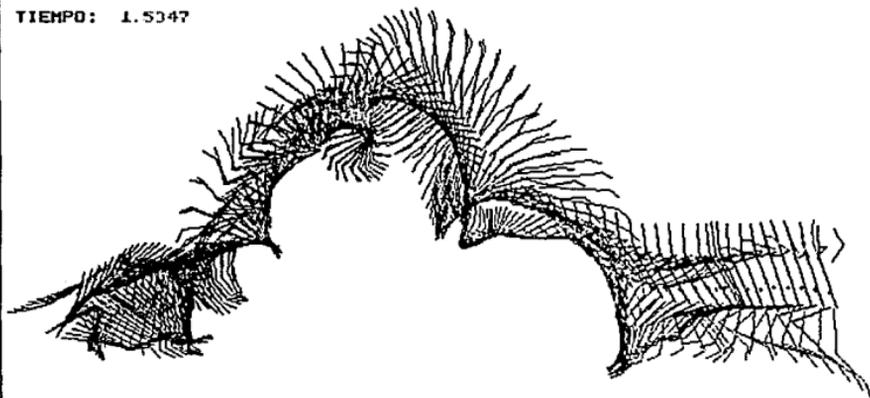
análisis cinemático

CUADRO NUM. 88

MIEMBROS DERECHOS.

MIEMBROS IZQUIERDOS.

TIEMPO: 1.5347



DISTANCIAS AL C.G.:  $x = 6.897$  m  $y = 0.13399$  m  
VELOCIDADES DEL C.G.:  $v_x = 3.4447$  m/s  $v_y = -1.9687$  m/s

Fig. 50R Todos los cuadros interpolados de un salto tipo Tzucahara  
indicando las distancias y velocidades del C.G.

análisis cinemático

CUADRO NUM. 17

MIEMBROS DERECHOS.

MIEMBROS IZQUIERDOS.

TIEMPO: 0.3503



Ángulos (grados):

cabeza	87.207	brazo d.	173.92	brazo i.	200.32
tronco	306.28	antebr. d.	159.66	antebr. i.	166.52
brazo-antebr. d.	165.75	mano d.	141.13	mano i.	129.84
muslo-pierna d.	133.4	muslo d.	224.84	muslo i.	231.34
brazo-antebr. i.	146.2	pierna d.	271.44	pierna i.	266.79
muslo-pierna i.	144.56	pie d.	199.22	pie i.	201.89

Fig. 50b. Pantalla de cálculo de los ángulos de los segmentos.

para un ciclo de carrera. Este video no fue grabado con la cámara estática por lo que no fue útil para el análisis del desplazamiento del centro de gravedad.

Se grabaron los ciclos de carrera de un atleta universitario de alto nivel Fabrizio Chamor y un adolescente que no es corredor, Bernardo Escalona, con el objeto de hacer un análisis comparativo.

Atleta	peso [Kg]	talla [m]
Ben Johnson	80	1.80
Fabrizio Chamor	64	1.80
Bernardo Escalona	57.7	1.71

Tabla 12. Datos de peso y talla de los corredores.

Fases de un ciclo de carrera	Número de cuadros		
	Ben J.	Fabrizio	Bernardo
apoyo pié derecho, talón	0,2	0,1	19,0,1
apoyo pié derecho, punta	3,4	2,3	2,3,4
sin apoyo, en vuelo	5 -> 8	4 -> 6	5 -> 9
apoyo pié izquierdo, talón	9,10	7,8	10,11
apoyo pié izquierdo, punta	11,12	9,10	12,13,14
sin apoyo, en vuelo	13 -> 16	11,12	15 -> 18

Tabla 13. Cuadros de las Fases de la carrera de los atletas.

En las siguientes lista se muestran unos ejemplos de los datos interpolados.

Ejemplo de datos interpolados del segmento 9 del ciclo de carrera de Ben Johnson:



Fig. 51 Secuencia de algunas imágenes de Ben Johnson.

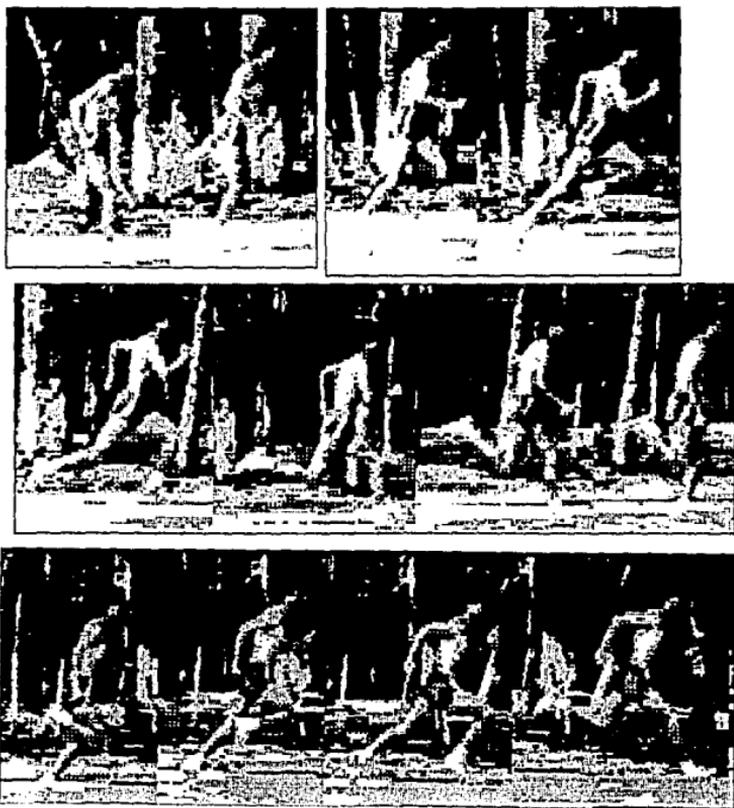


Fig. 52 Sequencia de imágenes de Fabrizio Chamor.

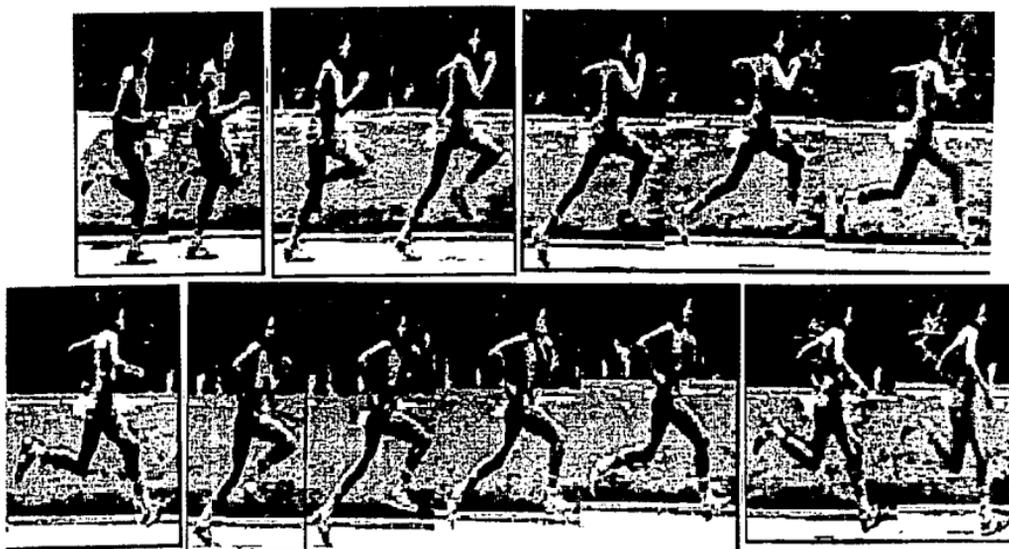


Fig. 53  
Secuencia de imágenes  
de Bernardo Escalona.



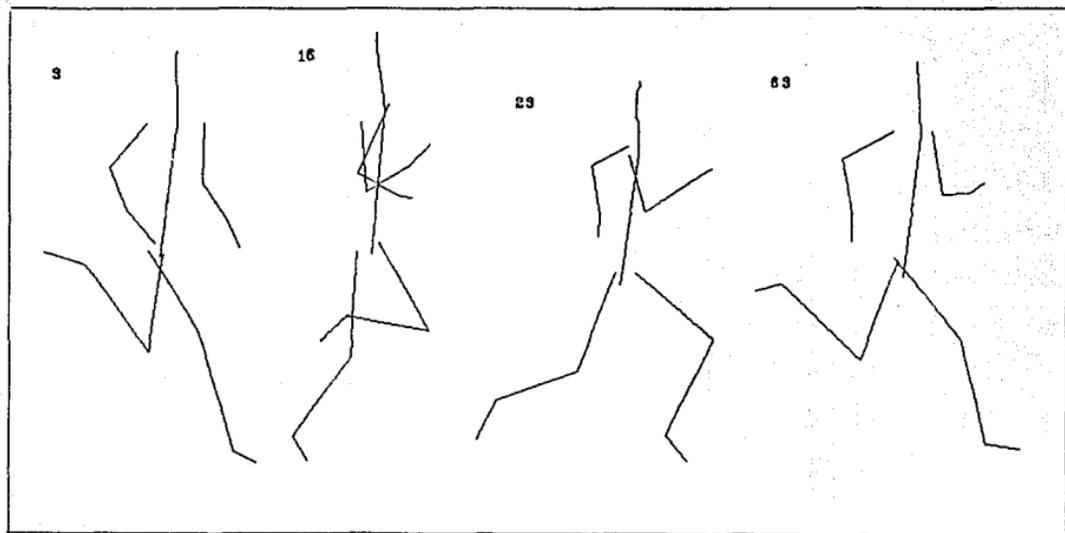
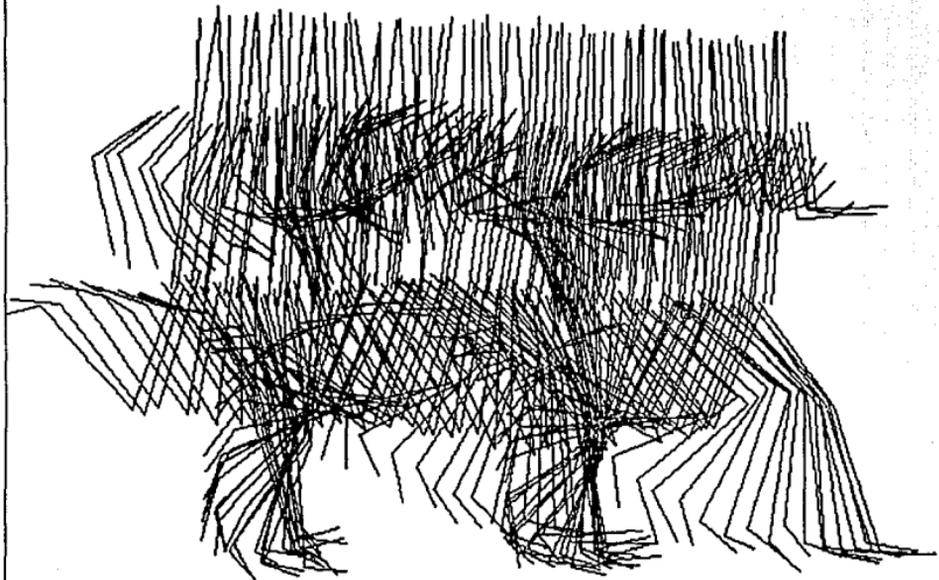


Fig. 54 Algunos cuadros del ciclo de carrera de Ben Johnson.

cuadro por cuadro



Da Esc para abortar, otra Tecla para continuar.

Fig. 55 Secuencia de cuadros de Ben Johnson.

cuadro por cuadro

CUADRO NUM.

MIEMBROS DERECHOS.

MIEMBROS IZQUIERDOS.



Da tecla para interrumpir

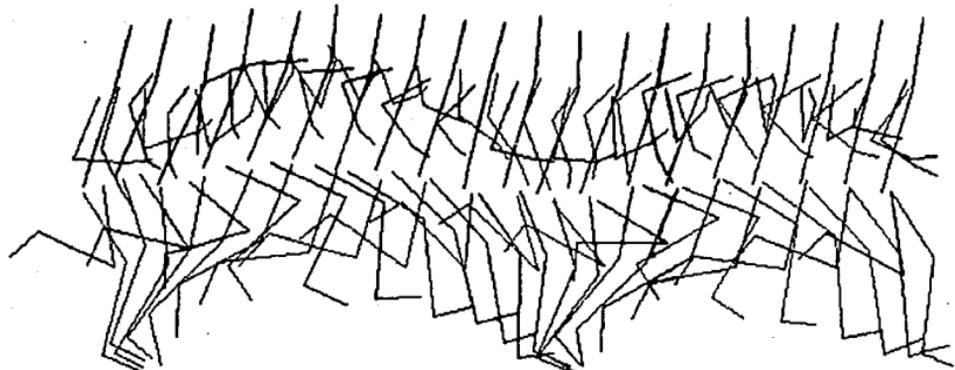
Fig. 56 Secuencia de cuadros de Fabrizio Chamor.

cuadro por cuadro

CUADRO NUM.

MIEMBROS DERECHOS.

MIEMBROS IZQUIERDOS.



'q' continúa

De tecla para interrumpir

Fig. 57 Secuencia de cuadros de Bernardo Escalona.

Tabla 14.

tiempo [seg]	ángulo [rad]	velocidad angular [rad/seg]	aceleración angular [rad/seg <sup>2</sup> ]
0.266908	4.800696	13.783318	480.857170
0.273575	4.901462	16.265835	290.905518
0.280241	5.015158	17.662020	127.953842
0.286908	5.134540	17.971870	-54.997818
0.293575	5.252366	17.195287	-197.949778
0.300272	5.362047	15.332569	-360.441162
0.306938	5.456666	13.115082	-304.811707
0.313605	5.537777	11.268453	-249.182266

Ejemplo de datos interpolados del segmento 9 del ciclo de carrera de Fabrizio Chamor:

Tabla 15.

tiempo [seg]	ángulo [rad]	velocidad angular [rad/seg]	aceleración angular [rad/seg <sup>2</sup> ]
0.300275	5.105571	12.020147	221.185486
0.305275	5.168024	12.878477	122.146523
0.310275	5.233531	13.241612	23.107567
0.315275	5.299615	13.109552	-75.931389
0.320275	5.363801	12.482299	-174.970352
0.325298	5.423952	11.359849	-273.554901
0.330298	5.477408	10.037946	-255.206238
0.335298	5.524484	8.807786	-236.857590

Ejemplo de datos interpolados del desplazamiento del segmento 9 del ciclo de carrera de Bernardo Escalona:

Tabla 16.

tiempo [seg]	ángulo [rad]	velocidad angular [rad/seg]	aceleración angular [rad/seg <sup>2</sup> ]
0.360302	4.943744	11.935559	68.536369
0.366999	5.024938	12.277436	34.395790
0.373665	5.107387	12.432561	12.141891
0.380332	5.190374	12.439326	-10.112006
0.386999	5.272913	12.297735	-32.365906
0.393666	5.354013	12.007786	-54.619801
0.400363	5.433078	11.569478	-76.526619
0.407029	5.508333	10.981134	-99.978233

Ejemplo de los datos interpolados del momento angular del

desplazamiento del segmento 9 de Ben Johnson, Fabrizio Chamor y  
Bernardo Escalona, respectivamente:

Tablas 17.

tiempo [seg]	momento angular [Kg m <sup>2</sup> /seg]
0.312775	11.977005
0.315900	12.303339
0.319025	12.566558
0.322150	12.723285
0.325298	12.735204
0.328423	12.560814
0.331548	12.221826
0.334673	11.746897

tiempo [seg]	momento angular [Kg m <sup>2</sup> /seg]
0.275241	11.031677
0.279408	12.293684
0.283575	13.548388
0.287742	14.712421
0.291908	15.702420
0.296075	16.435017
0.300272	16.840704
0.304438	16.834164

tiempo [seg]	momento angular [Kg m <sup>2</sup> /seg]
0.366999	10.762478
0.371166	11.219549
0.375332	11.590937
0.379499	11.880627
0.383666	12.092611
0.387832	12.230879
0.391999	12.299417
0.396166	12.302217

De las gráficas de resultados obtenidos, se puede resumir

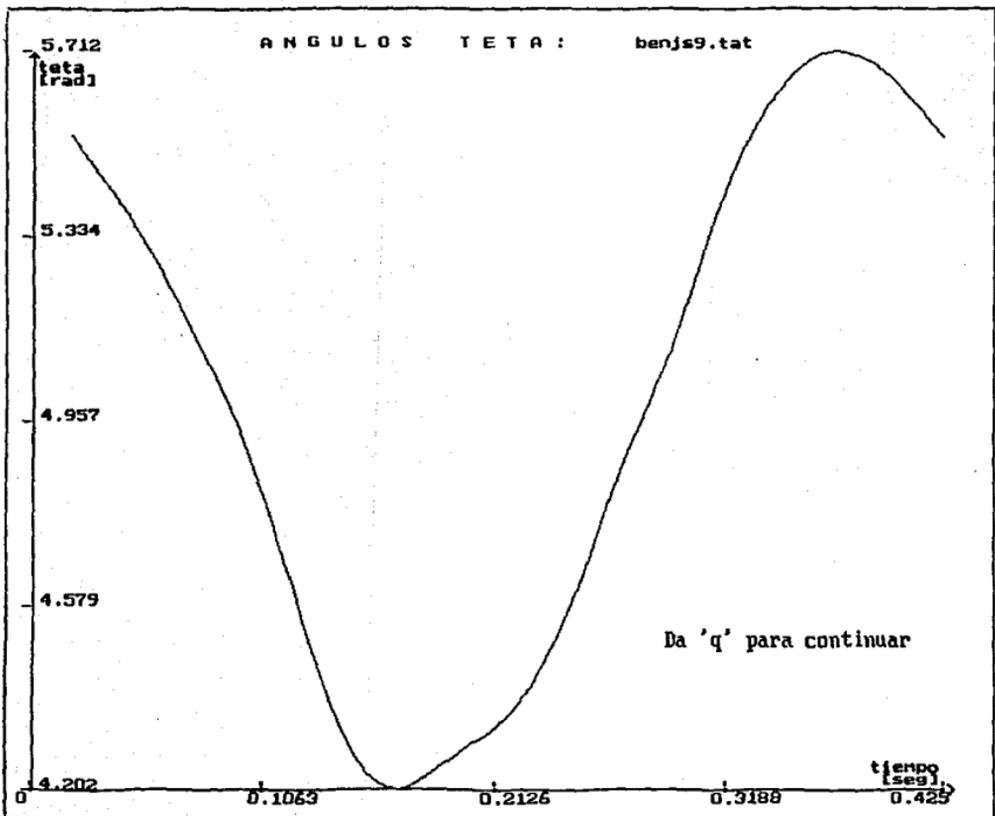
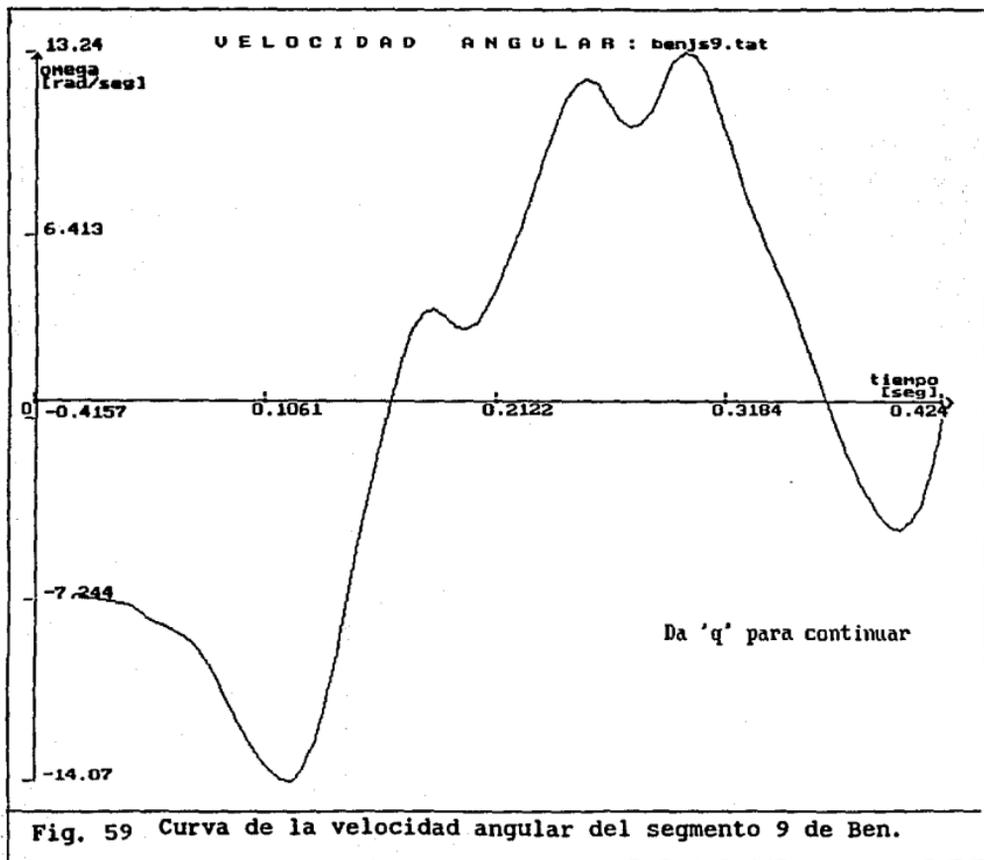


Fig. 58 Curva del desplazamiento del segmento 9 de Ben.



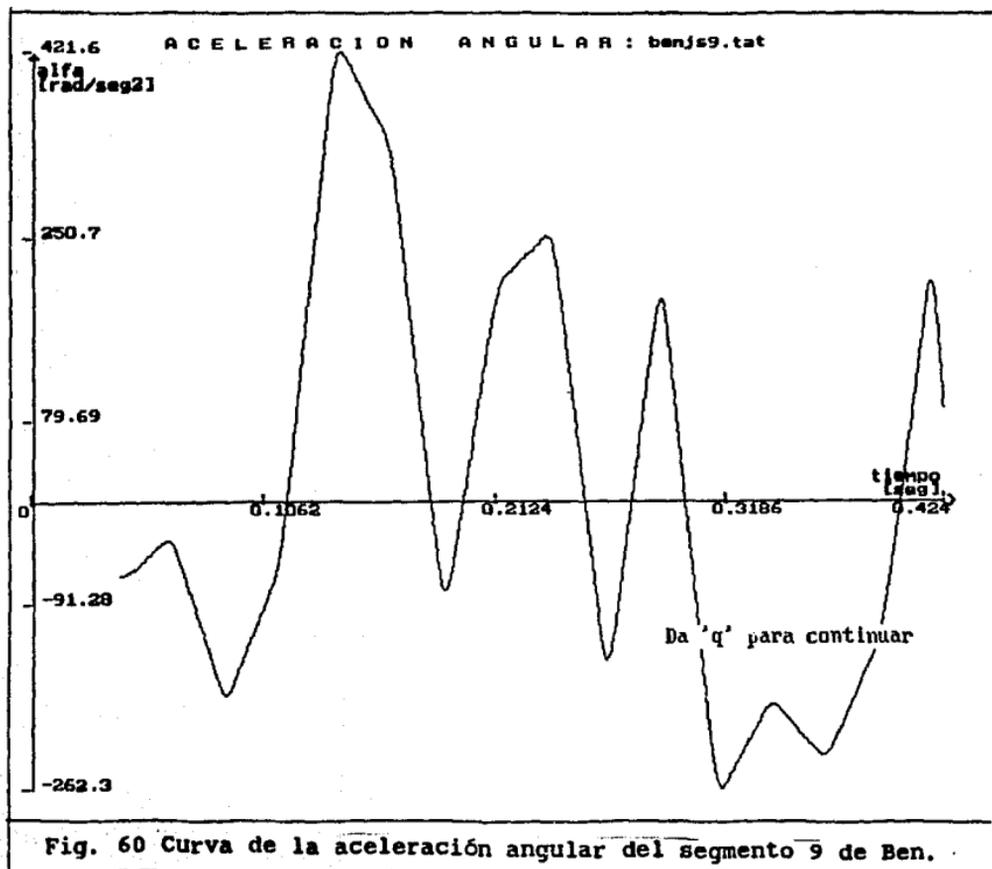
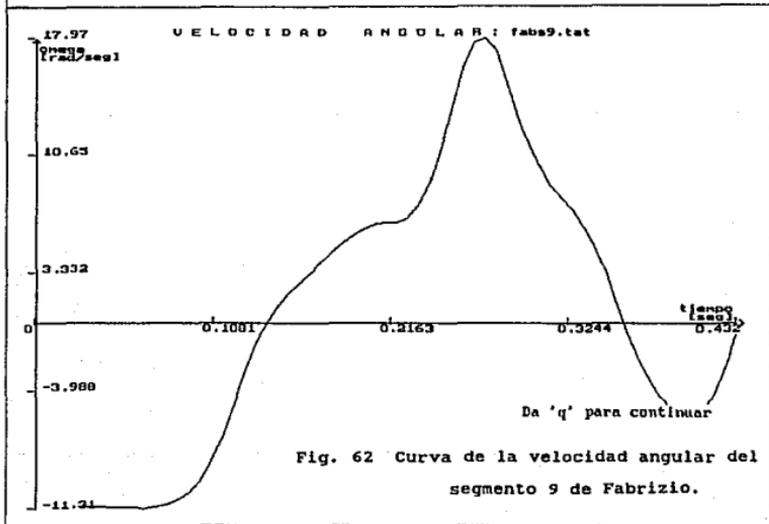
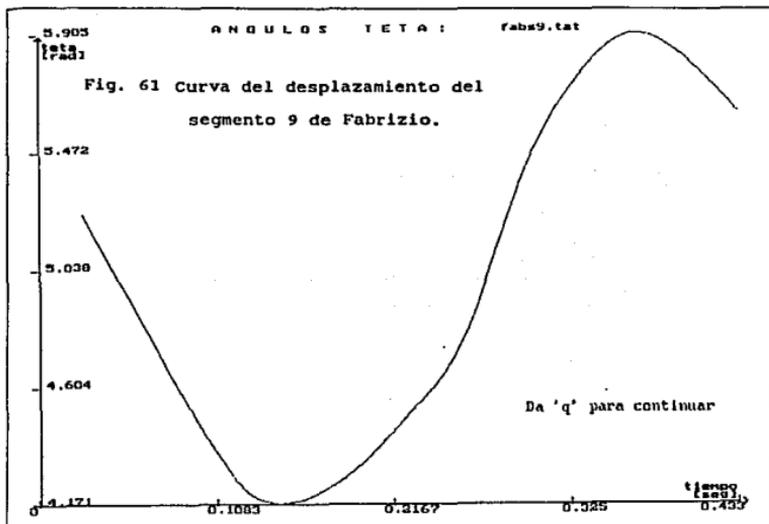
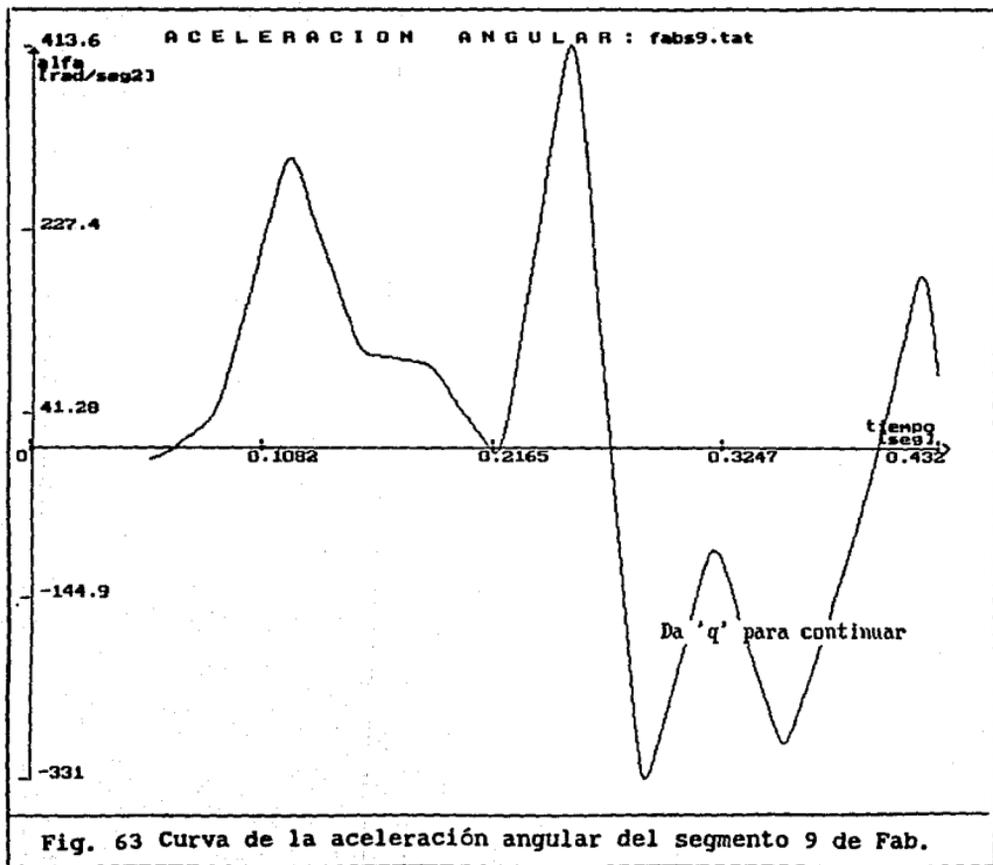


Fig. 60 Curva de la aceleración angular del segmento 9 de Ben.





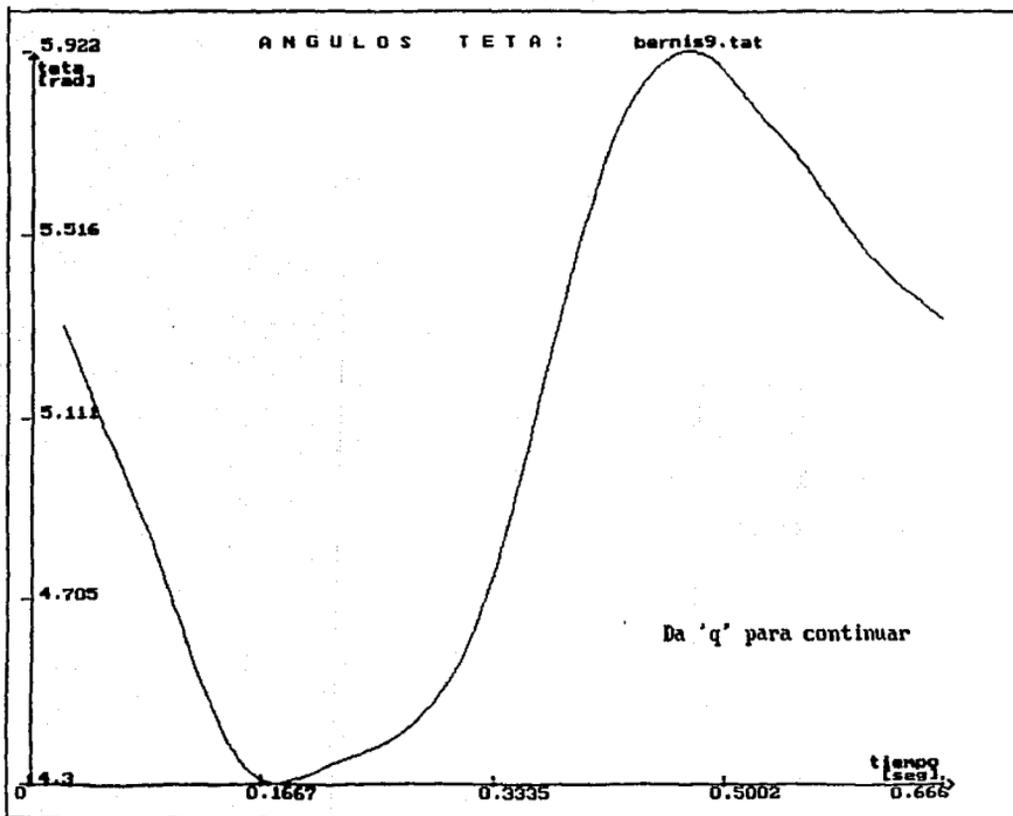


Fig. 64 Curva del desplazamiento del segmento 9 de Bernardo.

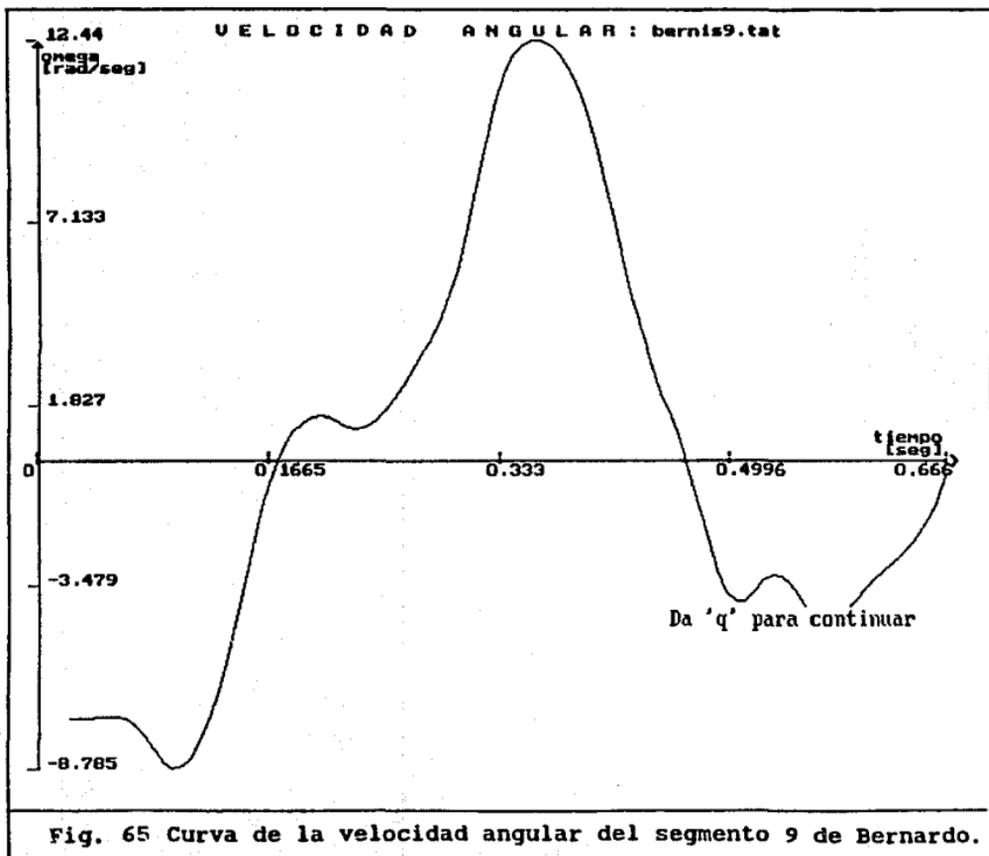


Fig. 65 Curva de la velocidad angular del segmento 9 de Bernardo.

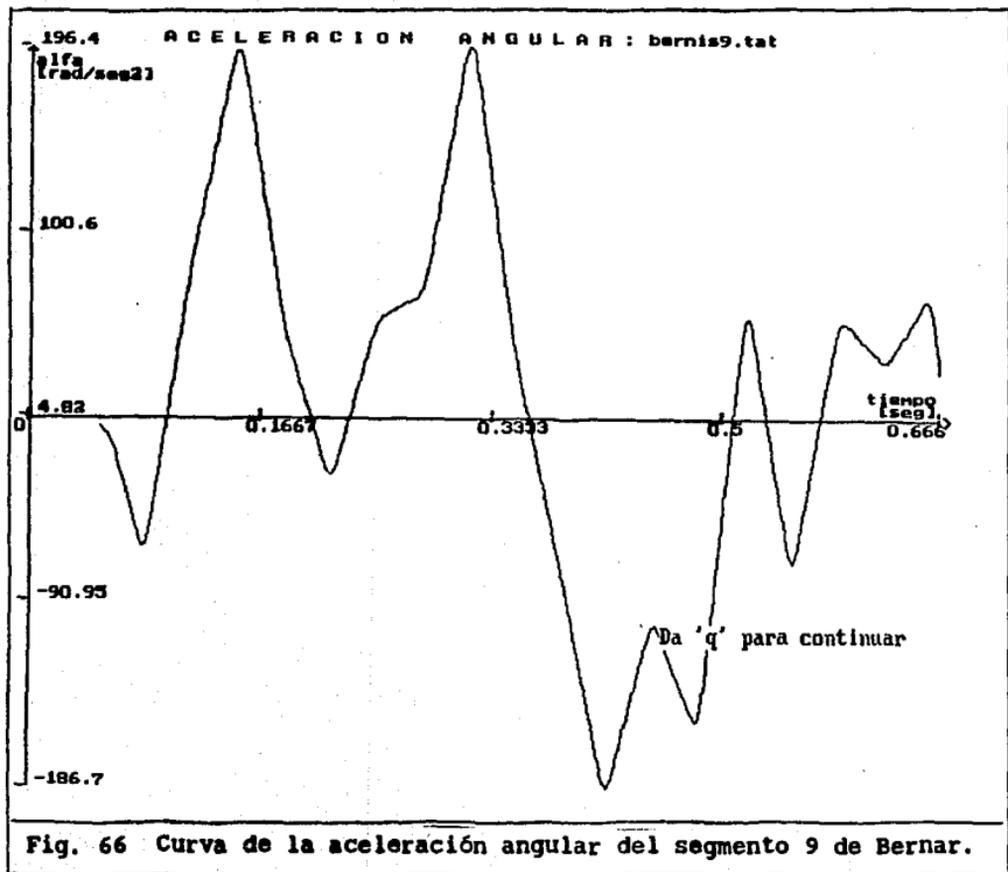
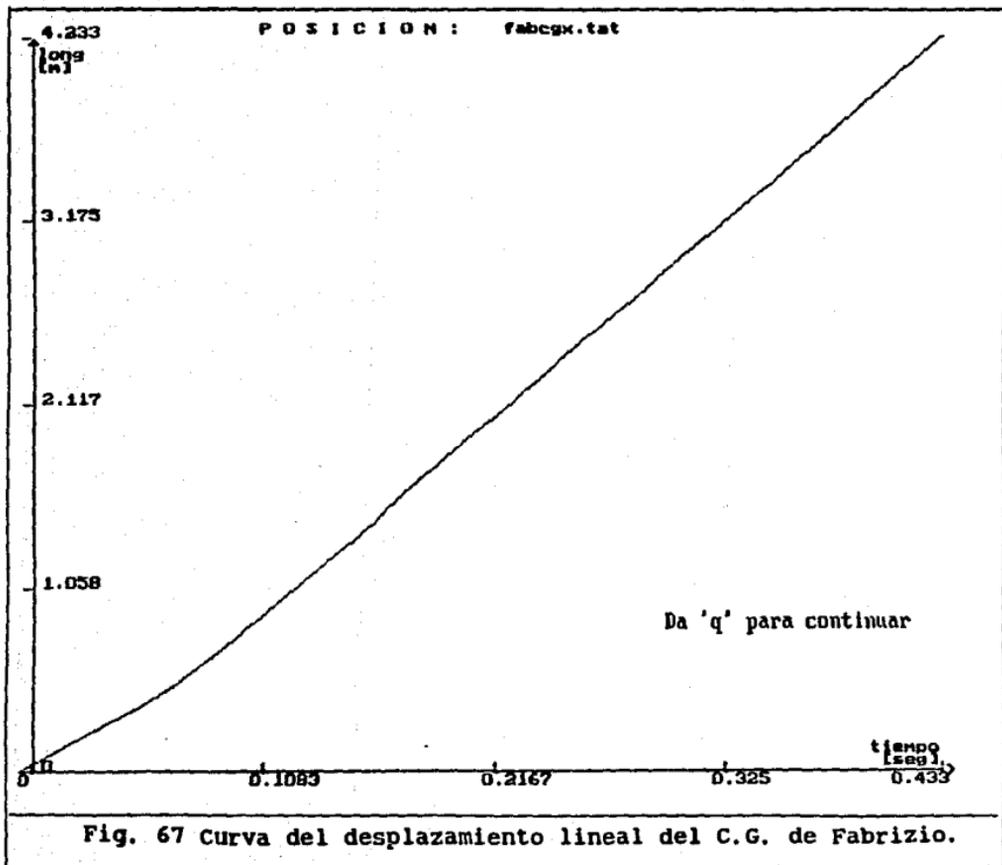


Fig. 66 Curva de la aceleración angular del segmento 9 de Bernar.



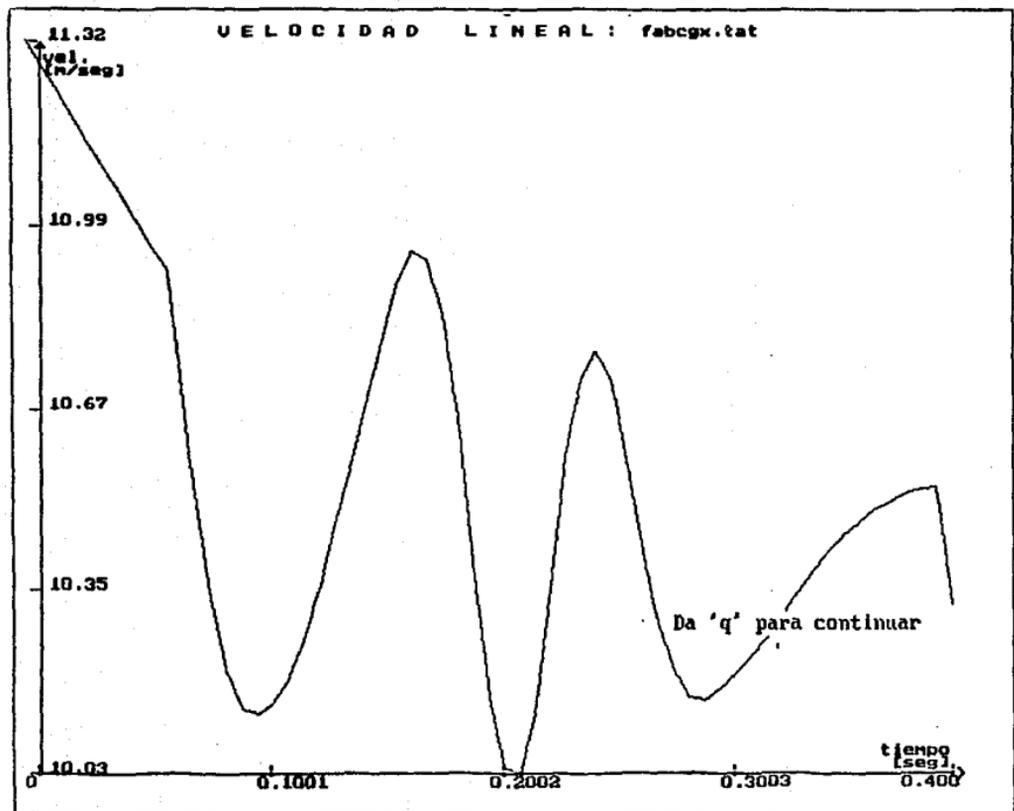
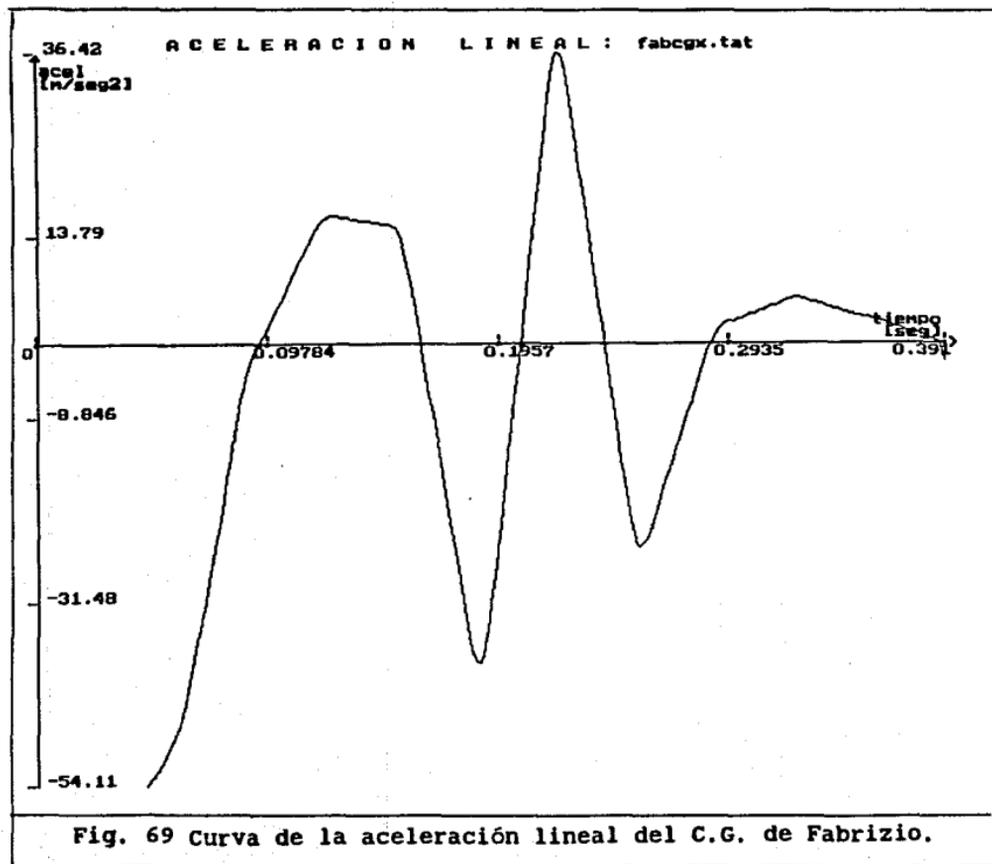


Fig. 68 Curva de la velocidad lineal del C.G. de Fabrizio.



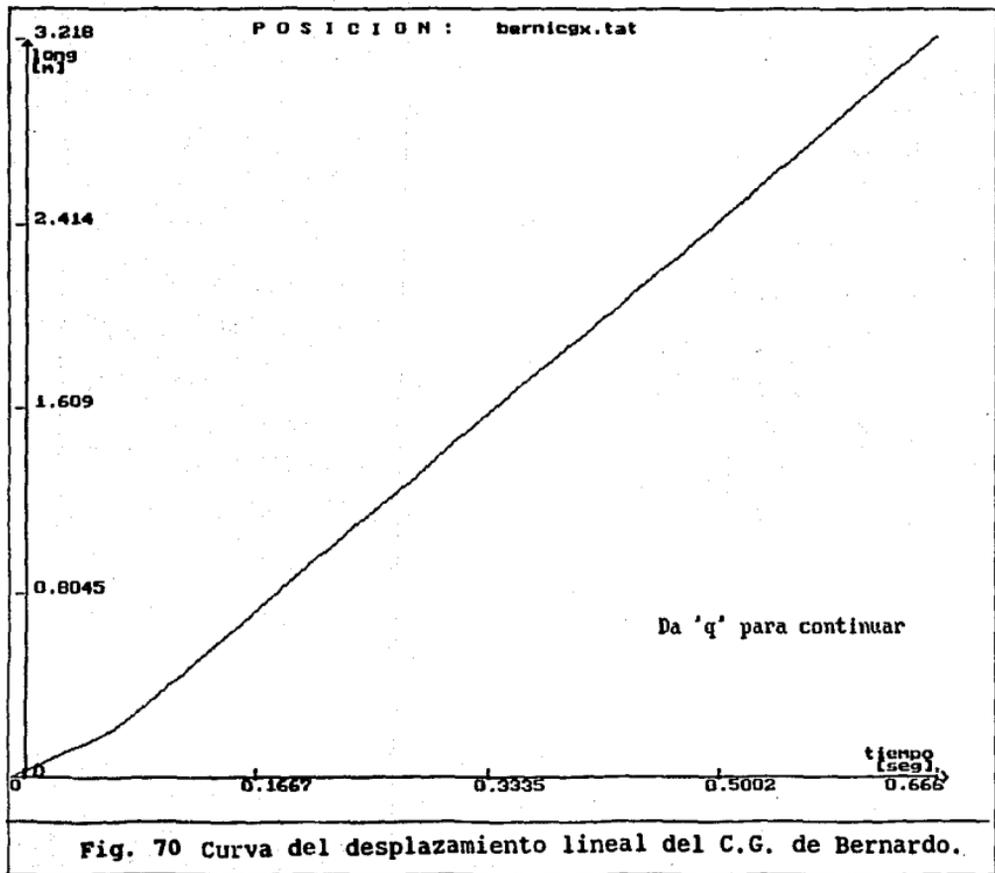


Fig. 70 Curva del desplazamiento lineal del C.G. de Bernardo.

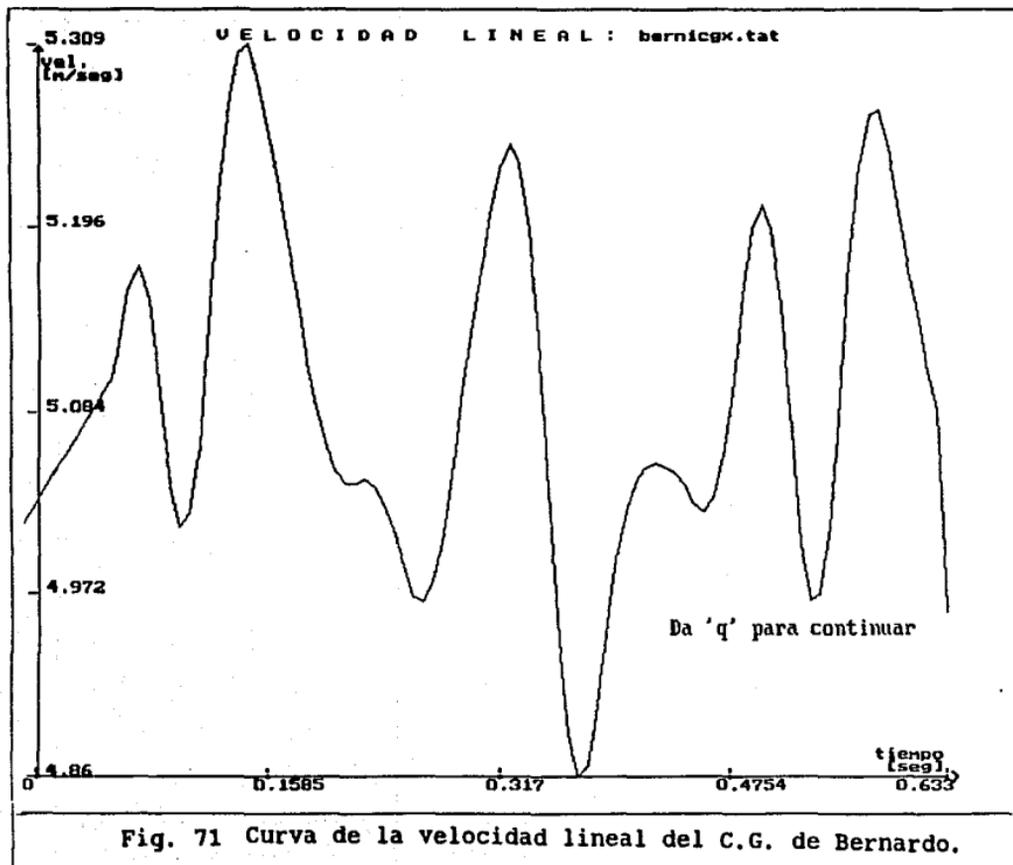
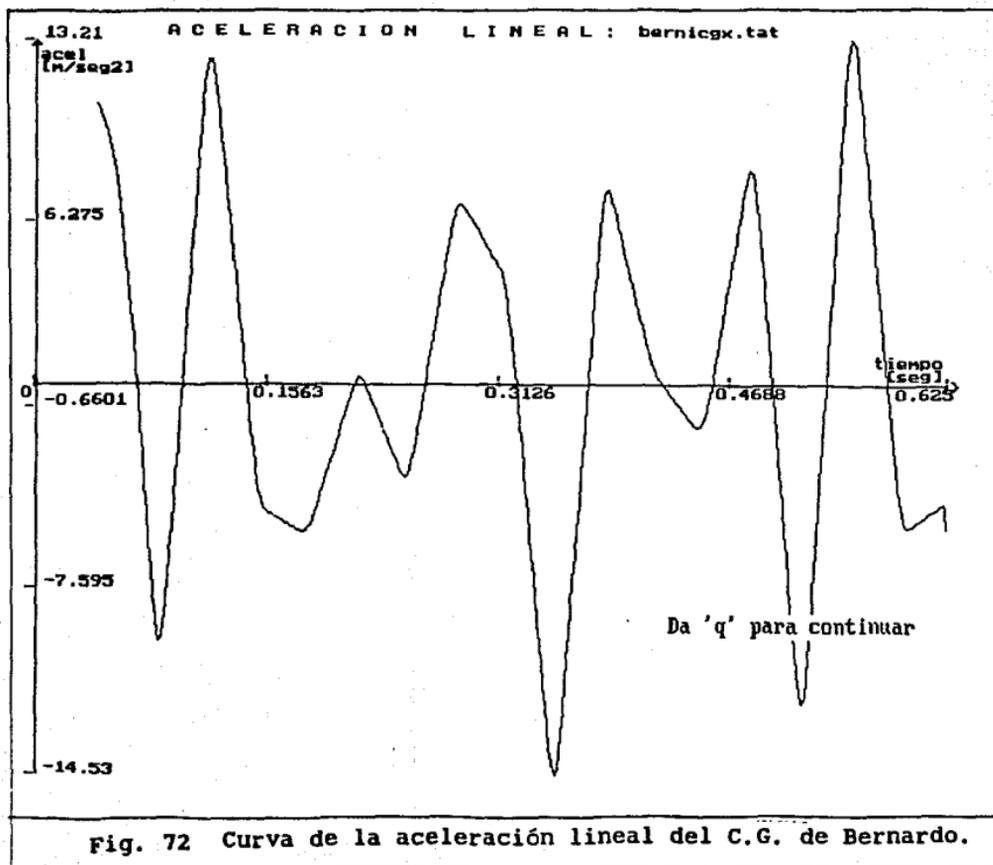


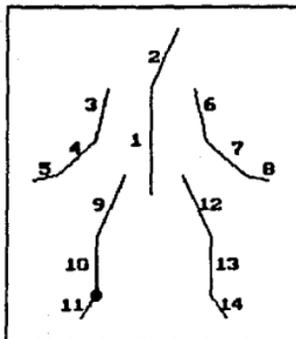
Fig. 71 Curva de la velocidad lineal del C.G. de Bernardo.



benj.dat  
benj.sag

MOMENTOS DE INERCIA

● PUNTO DE GIRO



CUADRO: 0



1 TRONCO.	64.59	[Kg m <sup>2</sup> ]	
2 CABEZA.	12.14		
3 BRAZO D.	5.022	6 BRAZO I.	3.948
4 ANTEBR. D.	2.62	7 ANTEBR. I.	1.712
5 MANO D.	0.7475	8 MANO I.	0.519
9 MUSLO D.	6.193	12 MUSLO I.	6.99
10 PIERNA D.	0.5008	13 PIERNA I.	3.613
11 PIE D.	0.02855	14 PIE I.	1.845

MOMENTO DE INERCIA TOTAL  
w RADIO RESULTANTE

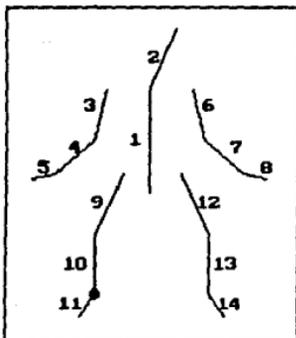
110.5 [Kg m<sup>2</sup>]  
1.086 [m]

Fig. 73 Momento de Inercia de Ben Johnson.

fab.dat  
fab.sec

CUADRO: 0

MOMENTOS DE INERCIA  
● PUNTO DE GIRO



1 TRONCO.	44.34	[Kg m2]	
2 CABEZA.	9.993		
3 BRAZO D.	3.316	6 BRAZO I.	3.075
4 ANTEBR. D.	1.467	7 ANTEBR. I.	1.346
5 MANO D.	0.3521	8 MANO I.	0.3813
9 MUSLO D.	3.548	12 MUSLO I.	3.442
10 PIERNA D.	0.337	13 PIERNA I.	1.295
11 PIE D.	0.02373	14 PIE I.	0.8022

MOMENTO DE INERCIA TOTAL  
v RADIO RESULTANTE

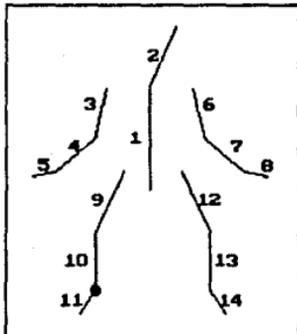
73.72 [Kg m2]  
0.9851 [m]

Fig. 74 Momento de Inercia de Fabrizio Chamor.

berni.dat  
berni.ses

MOMENTOS DE INERCIA

● PUNTO DE GIRO



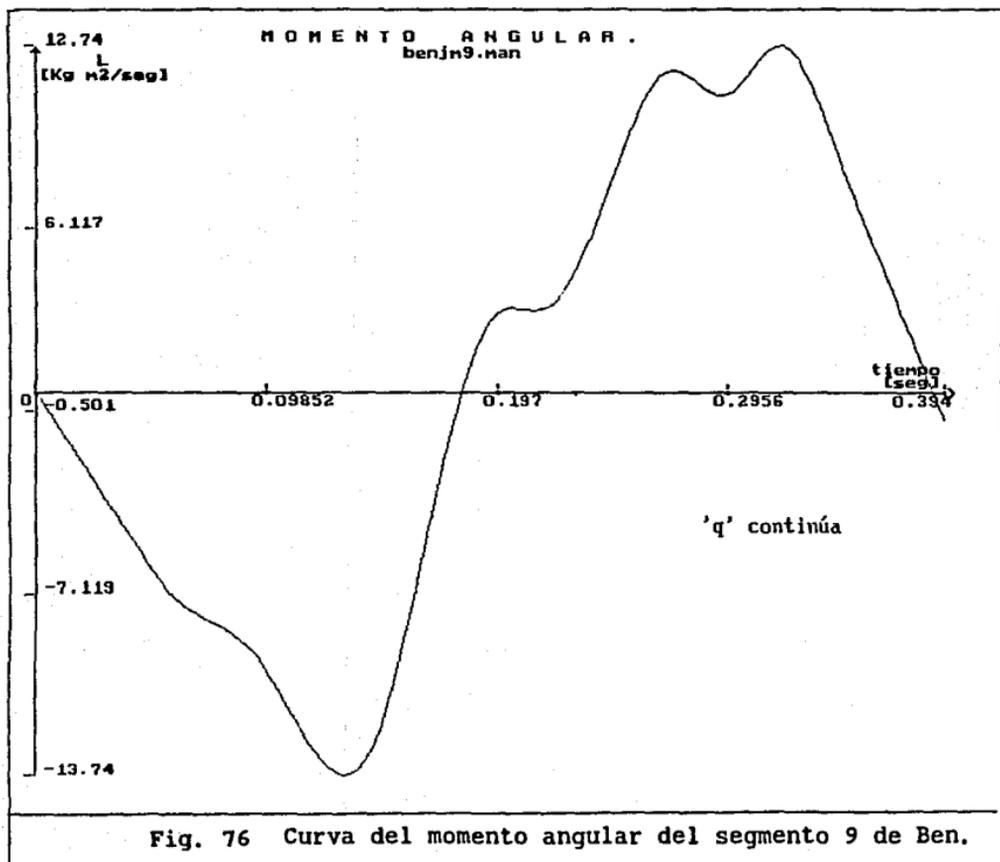
CUADRO: 0

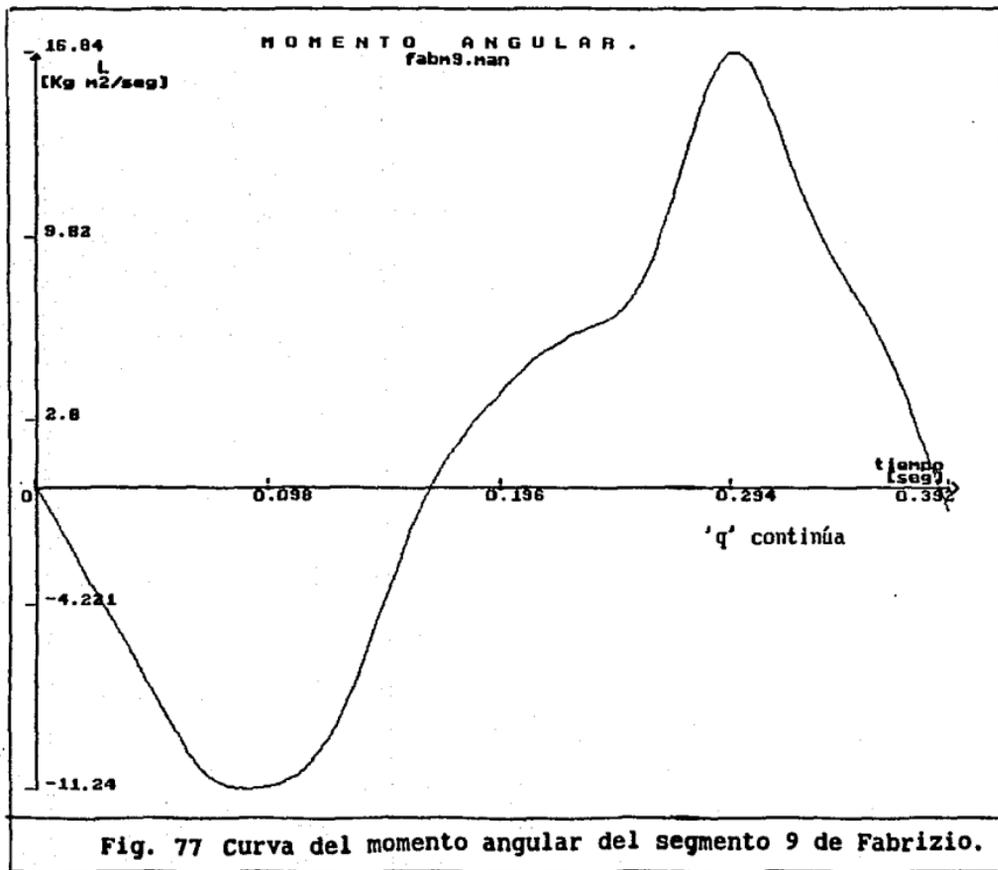
1 TRONCO.	26.63	[Kg m <sup>2</sup> ]	
2 CABEZA.	6.305		
3 BRAZO D.	1.639	6 BRAZO I.	1.781
4 ANTEBR. D.	0.692	7 ANTEBR. I.	0.6473
5 MANO D.	0.2599	8 MANO I.	0.1685
9 MUSLO D.	2.088	12 MUSLO I.	2.134
10 PIERNA D.	0.2124	13 PIERNA I.	0.5475
11 PIE D.	0.01846	14 PIE I.	0.2848

MOMENTO DE INERCIA TOTAL  
y RADIO RESULTANTE

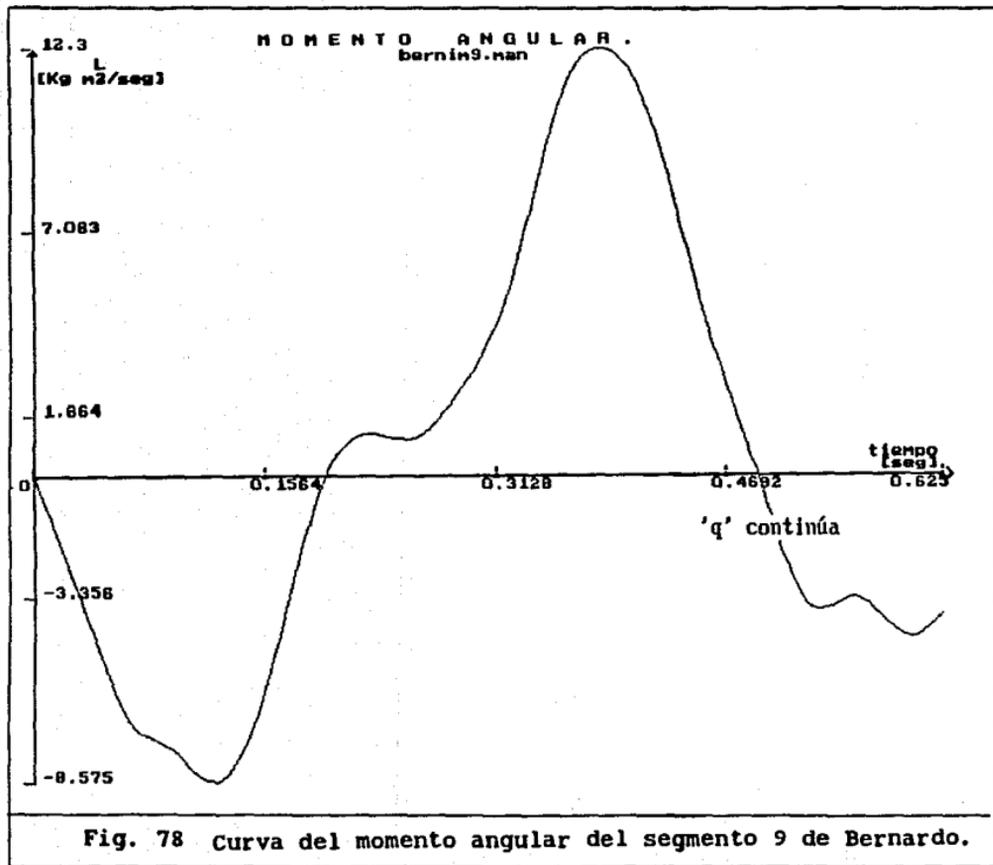
43.41	[Kg m <sup>2</sup> ]
0.7992	[m]

Fig. 75 Momento de inercia de Bernardo Escalona.





**Fig. 77** Curva del momento angular del segmento 9 de Fabrizio.



algunos datos que pueden ser significativos. En las siguientes tablas se muestran unos ejemplos.

**Tabla 18.** Compara la mayor velocidad angular con  $\omega$  del muslo derecho.

Atleta	tiempo [seg]	mayor $\omega$ muslo derecho [rad/seg]	$\alpha$ muslo derecho [rad/seg <sup>2</sup> ]
Ben Johnson	0.310	13.24	23.10
Fabrizio Chamor	0.287	17.97	-34.99
Bernardo Escalona	0.380	12.44	-10.11

**Tabla 19.** Compara la aceleración angular con el ángulo del muslo derecho.

Atleta	tiempo [seg]	mayor $\alpha$ muslo derecho [rad/seg <sup>2</sup> ]	ángulo del muslo derecho [rad]
Ben Johnson	0.150	421.6	4.31
Fabrizio Chamor	0.267	413.6	4.8
Bernardo Escalona	0.336	196.4	4.66

**Tabla 20.** Compara el mayor momento angular.

Atleta	tiempo [seg]	mayor L muslo derecho [Kg m <sup>2</sup> /seg]
Ben Johnson	0.325	12.74
Fabrizio Chamor	0.300	16.84
Bernardo Escalona	0.392	12.3

Comparando el desplazamiento horizontal de centro de gravedad, se pueden obtener los datos que se agrupan en las siguientes tablas:

**Tabla 21.** Compara la distancia recorrida del C. G.

Atleta	tiempo [seg]	distancia recorrida [m]
Fabrizio Chamor	0.433	4.233
Bernardo Escalona	0.666	3.218

**Tabla 22.** Compara el rango de la velocidad lineal del C.G. con el rango de la aceleración lineal del C.G.

Atleta	rango de velocidad durante el ciclo [m/seg]	rango de aceleración durante el ciclo [m/seg <sup>2</sup> ]
Fabrizio Chamor	10.03 → 11.32	-54.11 → 36.42
Bernardo Escalona	4.86 → 5.309	-14.53 → 13.21

## C A P I T U L O V .

### D I S C U S I O N Y C O N C L U S I O N E S

5.1 Fuentes de error. Como se expuso anteriormente, la captura de los 19 puntos no es exacta, y probablemente la localización de estos puntos no sea la misma para diferentes personas e incluso para la misma persona en capturas sucesivas del mismo cuadro. Cuando en una imagen por ejemplo, no se muestra en hombro o una rodilla es necesario suponer el lugar donde se localiza. De la localización de estos puntos se deriva todo cálculo en el método por lo que es de suma importancia que la captura se efectúe con la mayor precisión posible, que la persona que capture conozca físicamente los puntos en el cuerpo. Se debe recomendar que la captura de una secuencia de cuadros sea hecha por la misma persona, con lo que la captura será consistente más no excenta de error.

#### 5.2 Limitaciones del sistema.

- a. Solamente se puede hacer un análisis bidimensional del movimiento.
- b. El número de 30 cuadros por segundo de la grabación normal del video, reduce la información que se puede obtener partir de la cinematografía.
- c. El manejo de la memoria en los programas y la computadora usada en la implementación del sistema, impide manejar secuencias grandes de cuadros. El límite para el sistema es de 80 cuadros.
- d. Los valores de los cálculos deben considerarse valores aproximativos.  
En la comparación de los valores de un mismo

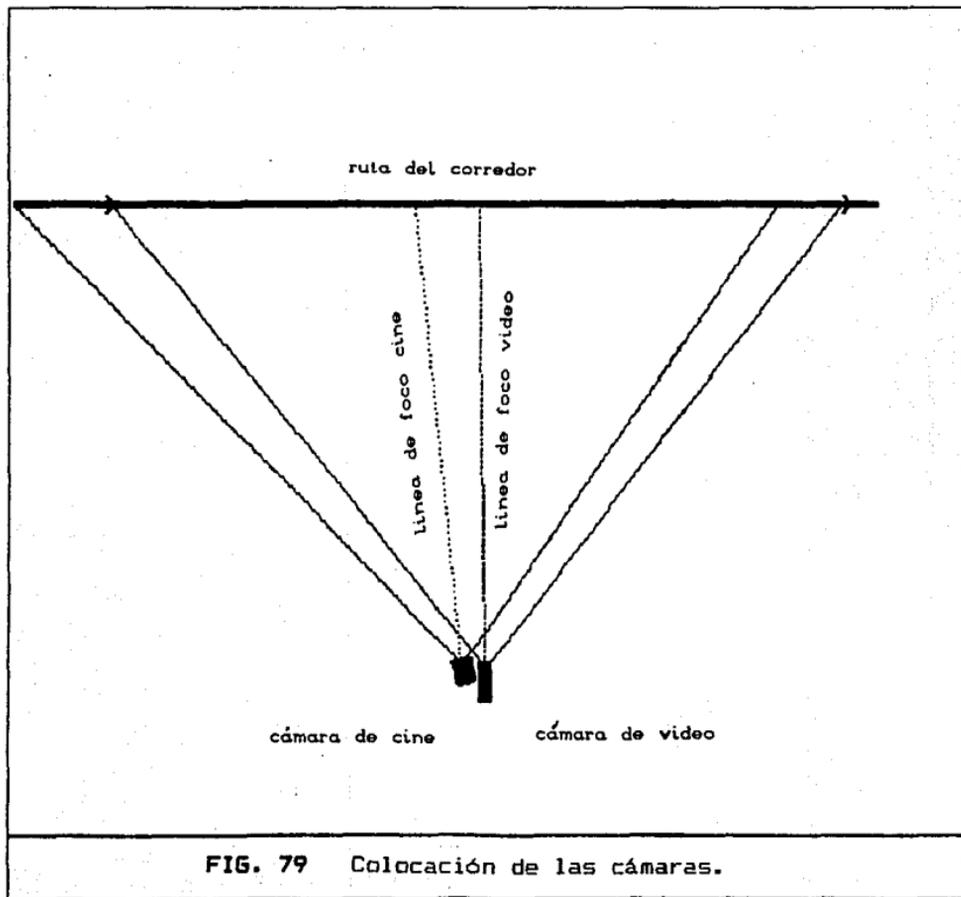
movimiento realizado por sujetos diferentes, ó por el mismo sujeto pero en circunstancias distintas, deberán usarse los resultados obtenidos a partir de grabaciones hechas bajo las condiciones de grabación mencionadas.

### **5.3 Mejoras al sistema.**

El sistema no ha sido utilizado aún como herramienta en la depuración de las técnicas deportivas, seguramente al ser utilizado, surgirán ideas y propuestas nuevas. Esto motivará el desarrollo de una segunda, tercera, etc. versiones con las que se espera satisfacer por un lado, las necesidades creadas a los entrenadores, y por otro lado, abrirá espacios al estudio del movimiento. Una de las metas futuras es implantar el análisis tridimensional, lo que dará resultados más cercanos a la realidad.

### **5.4 Validación.**

Como se ha mencionado anteriormente, la cinematografía ha sido el medio generalmente usado en el análisis del movimiento. Así, para validar el método que se propone en esta tesis, se procedió a hacer un estudio comparativo. Con la utilización de una cámara de alta velocidad para filmaciones especiales en cine (HYCAM, O'Connor, Hydro-ped, Mod-102-B para película de 16 mm) se realizó la grabación de una secuencia de carrera de un muchacho. La secuencia se filmó a 240 cuadros por segundo, también se grabó simultáneamente en video. Las dos cámaras fueron colocadas a la misma distancia del corredor, perpendiculares a la trayectoria de la carrera y lo más cerca posible una de otra. Vease la figura 79 .



Sin embargo, como se comprobó más tarde, la línea del foco de cada una no fueron paralelas. La línea de foco de la cámara de cine tuvo un ángulo hacia el inicio de la carrera con respecto a la línea de foco de la cámara de video y por esta razón la proyección de los ángulos de los segmentos con respecto a la horizontal fueron deferentes. Se procedió entonces, a hacer cálculos que no dependieran de estos ángulos.

Para el estudio se utilizó la secuencia de cuadros que abarca las siguientes etapas de la carrera:

- . apoyo en el suelo con la planta del pié izquierdo,
- . apoyo en el suelo con la punta del pié izquierdo,
- . desprendimiento del suelo con el pié izquierdo,
- . vuelo del cuerpo,
- . apoyo en el suelo con el talón del pié derecho,
- . apoyo en el suelo con la planta del pié derecho,
- . apoyo en el suelo con la punta del pié derecho.

El número de cuadros de cine para esta secuencia fue de 72, y para video de 10.

Los procedimientos de lectura de las coordenadas en video e interpolación, fueron los anteriormente descritos. Para el caso de las imágenes de cine se utilizó un proyector de transparencias al que se le manufacturó una ventana de cartón de 16 milímetros. Se proyectaron los cuadros sobre una cuadrícula milimétrica, leyendo de cada cuadro las coordenadas de los 19 puntos que conforman los 14 segmentos. Como se puede notar el procedimiento de lectura fué poco preciso haciendo muy "ruidosas" las mediciones. Para evaluar el "ruido" de las mediciones de las coordenadas en cine, se midieron 5 veces los puntos proximal y distal del muslo derecho, segmento 9. El resultado del cálculo de la desviación estandar mostró estar en un rango cercano al 5 % del valor promedio en la longitud del segmento. Consultar la tabla 23 y la gráfica de la figura 79.

## DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA LONGITUD DEL MUSLO DERECHO.

num.	media	d.st.	5 %	num.	media	d.st.	5 %
1	0.526	0.007	0.026	37	0.534	0.027	0.027
2	0.537	0.024	0.027	38	0.532	0.035	0.027
3	0.523	0.021	0.026	39	0.533	0.029	0.027
4	0.545	0.025	0.027	40	0.511	0.026	0.026
5	0.543	0.021	0.027	41	0.535	0.020	0.027
6	0.560	0.022	0.028	42	0.545	0.019	0.027
7	0.556	0.050	0.028	43	0.549	0.013	0.027
8	0.552	0.023	0.028	44	0.544	0.010	0.027
9	0.544	0.008	0.027	45	0.544	0.019	0.027
10	0.553	0.011	0.028	46	0.544	0.019	0.027
11	0.562	0.009	0.028	47	0.554	0.026	0.028
12	0.541	0.031	0.027	48	0.554	0.026	0.028
13	0.530	0.013	0.027	49	0.544	0.019	0.027
14	0.540	0.017	0.027	50	0.544	0.010	0.027
15	0.514	0.036	0.026	51	0.520	0.01	0.026
16	0.529	0.045	0.026	52	0.530	0.013	0.027
17	0.538	0.043	0.027	53	0.540	0.016	0.027
18	0.537	0.032	0.027	54	0.531	0.022	0.027
19	0.531	0.019	0.027	55	0.552	0.018	0.028
20	0.536	0.017	0.027	56	0.553	0.019	0.028
21	0.565	0.027	0.028	57	0.543	0.018	0.027
22	0.535	0.022	0.027	58	0.542	0.023	0.027
23	0.517	0.033	0.026	59	0.558	0.024	0.028
24	0.514	0.032	0.026	60	0.555	0.036	0.028
25	0.536	0.042	0.027	61	0.551	0.028	0.028
26	0.524	0.045	0.026	62	0.536	0.021	0.027
27	0.512	0.032	0.026	63	0.549	0.018	0.027
28	0.528	0.051	0.026	64	0.538	0.026	0.027
29	0.510	0.025	0.026	65	0.560	0.013	0.028
30	0.521	0.029	0.026	66	0.550	0.015	0.027
31	0.524	0.022	0.026	67	0.563	0.032	0.028
32	0.536	0.016	0.027	68	0.552	0.019	0.028
33	0.540	0.026	0.027	69	0.535	0.041	0.027
34	0.529	0.021	0.026	70	0.551	0.018	0.028
35	0.527	0.021	0.026	71	0.559	0.032	0.028

tabla 23 Desviación estandar de las 5 longitudes del muslo derecho calculadas para cada cuadro.

num. = número de cuadro

media = promedio de las 5 longitudes

d.st. = desviación estandar de la longitud

5 % = cinco por ciento del valor promedio

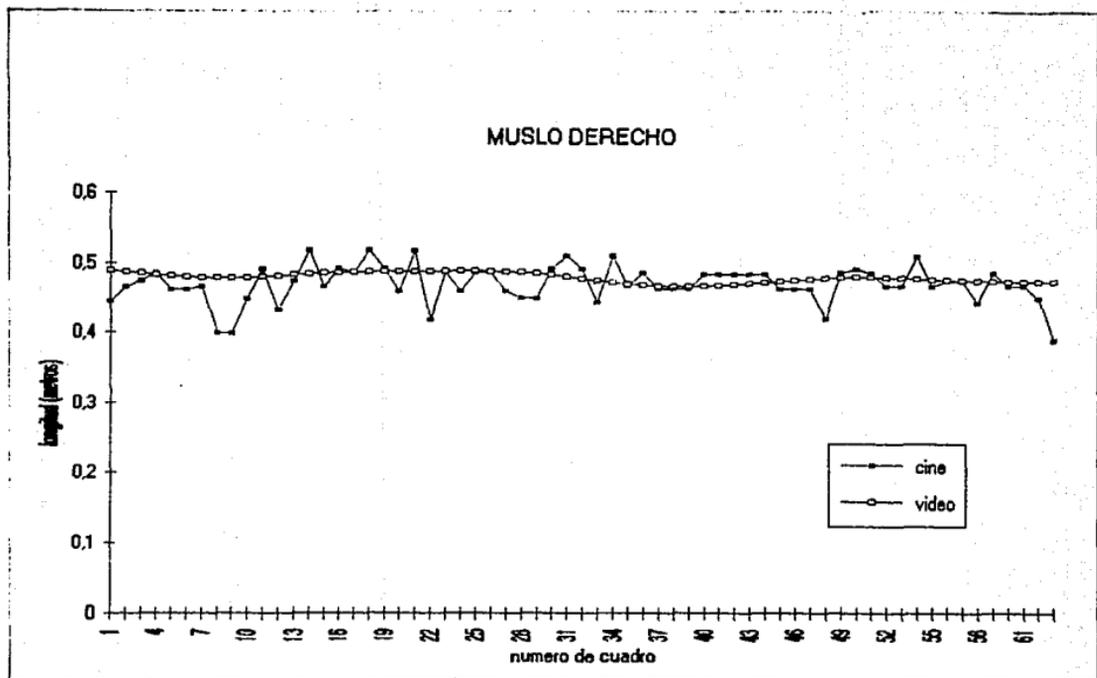


FIG. 79 Variacion de la longitud del segmento 9, muslo derecho.

Para ambos casos se calculó lo siguiente:

(Nota: las gráficas, correlaciones y suavización de curvas se obtuvieron por medio del paquete EXCEL de Microsoft.)

a) el desplazamiento del centro de gravedad del cuerpo, se correlacionaron los resultados de cine y video obteniéndose los coeficientes de correlación de la tabla 24 y de las figuras 80, 81, 82 y 83.

desplazamiento C.G.		curva con "ruido"	curva suavizada
coeficientes	x	0.9970	0.9967
de correlación	y	0.2829	0.4144

Tabla 24. Correlación del desplazamiento del Centro de Gravedad.

La correlación del desplazamiento en x es aceptable, pero en el eje y la correlación es mala. Este resultado no es significativo si se ve el rango de variación de los valores, hasta 5 centímetros, por ser la magnitud medida comparable con el error de medición.

b) La variación de los ángulos de flexión-extensión de brazo-antebrazo (3-4) derechos y muslo-pierna (9-10) derechos, el resultado de la correlación se muestra en la tabla 25 y las gráficas correspondientes en las figuras 84, 85, 86 y 87.

ángulo flex - ext.		curva con "ruido"	curva suavizada
coeficientes	3-4	0.5417	0.9075
de correlación	9-10	0.9158	0.8679

Tabla 25. Correlación de ángulos de flexión/extensión.

Para los dos casos el valor de la correlación es aceptable.

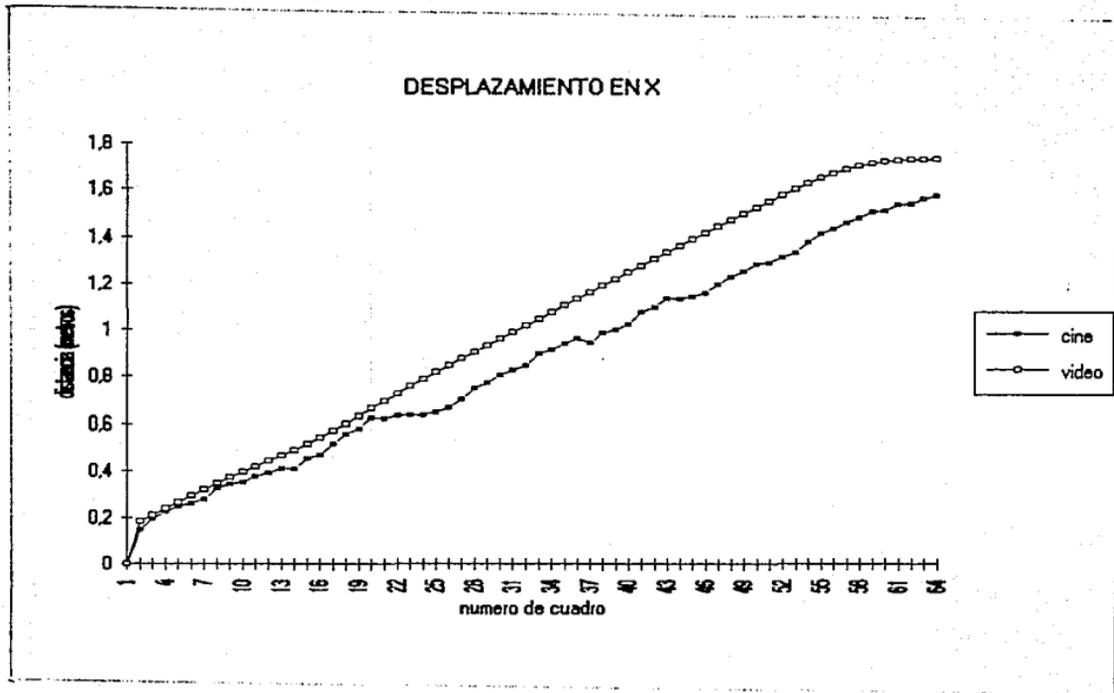


FIG. 80 Desplazamiento horizontal del Centro de Gravedad de cuerpo.

Curvas suavizadas

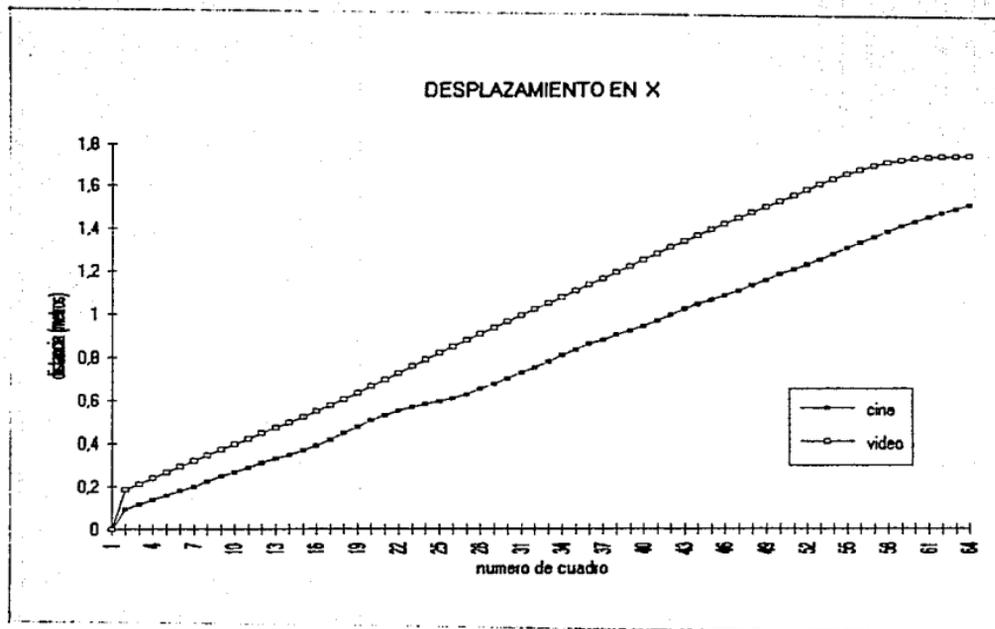


FIG. B1 Desplazamiento horizontal del Centro de Gravedad del cuerpo.

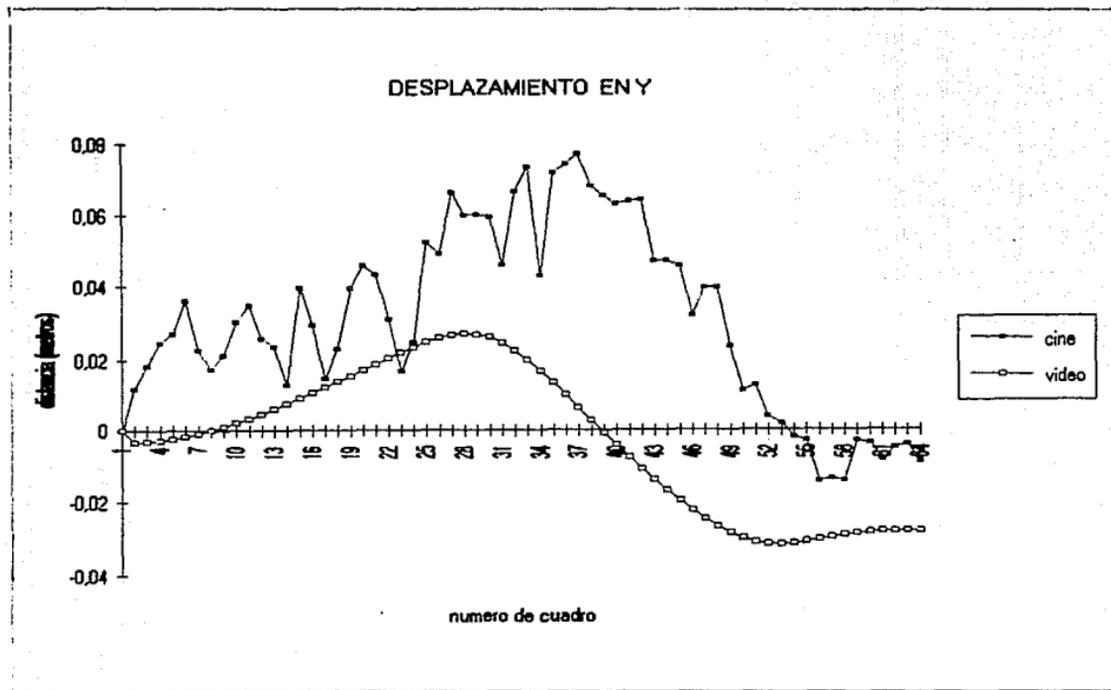


FIG. 82 DESplazamiento vertical del Centro de Gravedad del cuerpo.

Curvas suavizadas

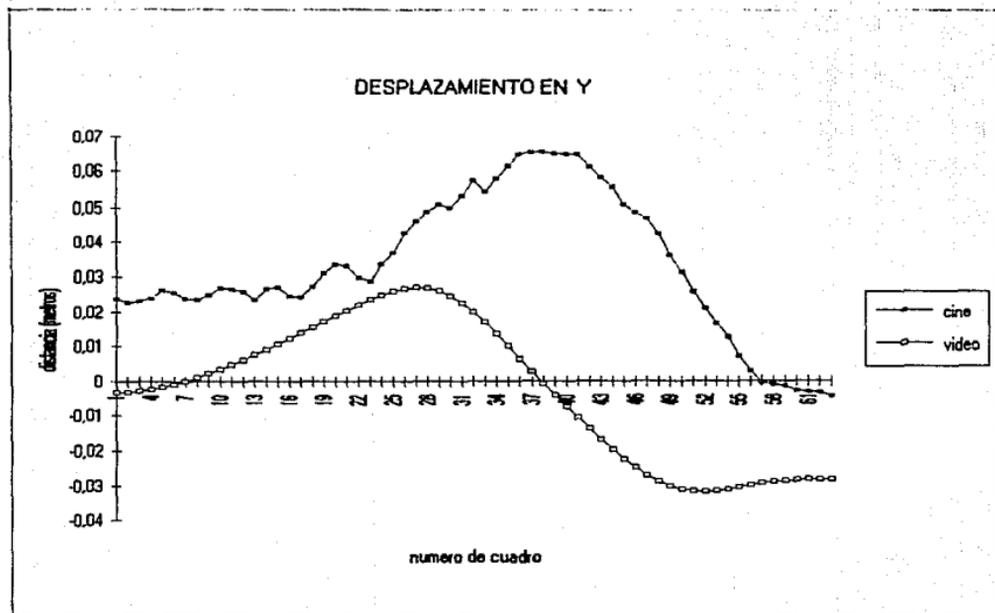


FIG. 83 Desplazamiento vertical del Centro de Gravedad del cuerpo.

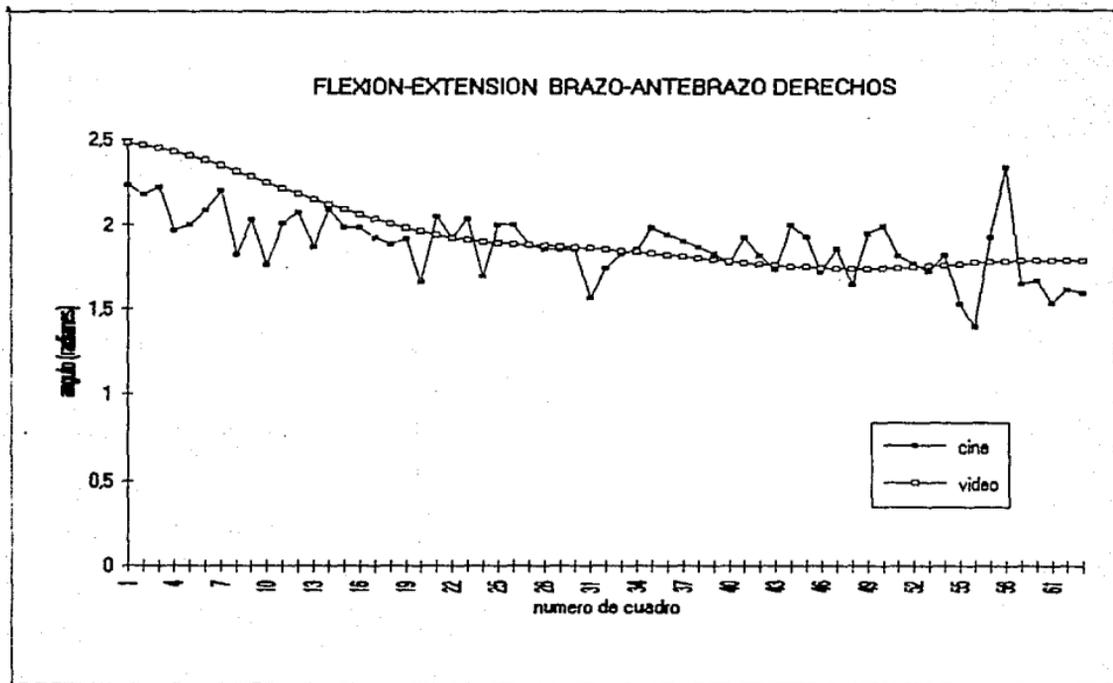


FIG. B4 Variación del ángulo de flexión extensión correspondiente al brazo-antebrazo derechos.

Curvas suavizadas

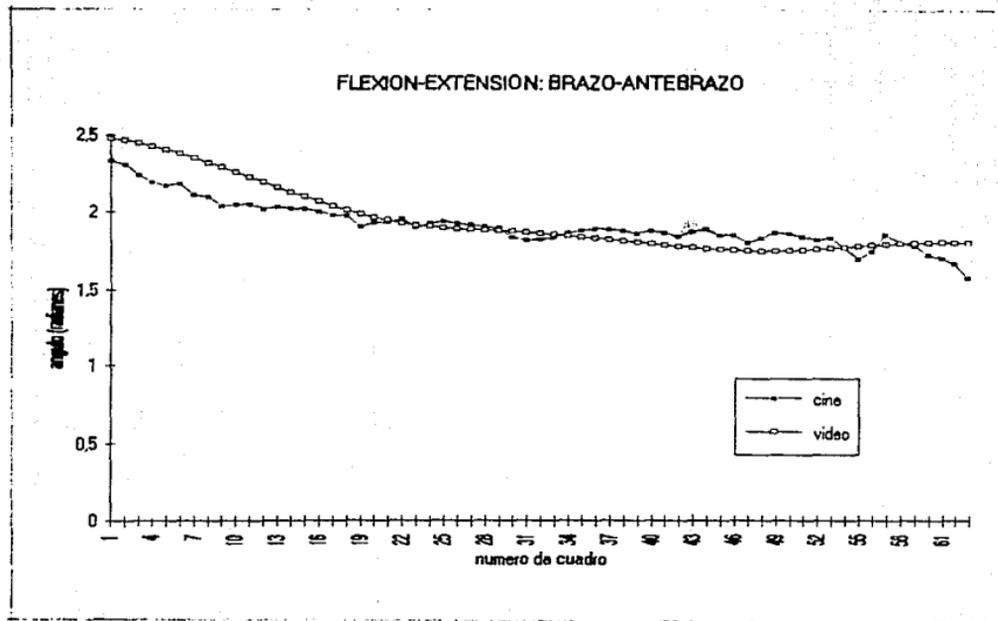


FIG. 85 Variación del ángulo de flexión-extensión correspondiente al muslo-pierna derechos.

### FLEXION-EXTENSION: MUSLO-PIERNA DERECHOS

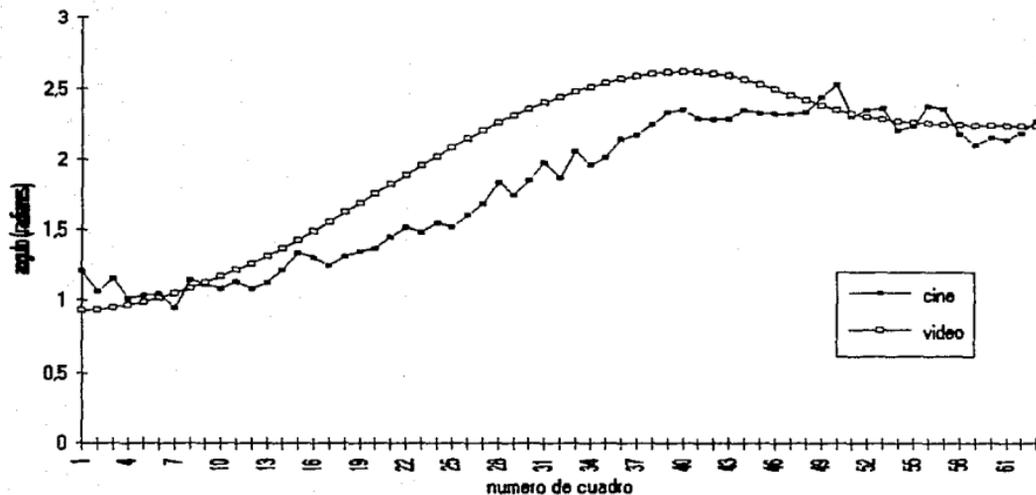


FIG. 86 Variación del ángulo de flexion-extensión correspondiente al muslo-pierna derechos.

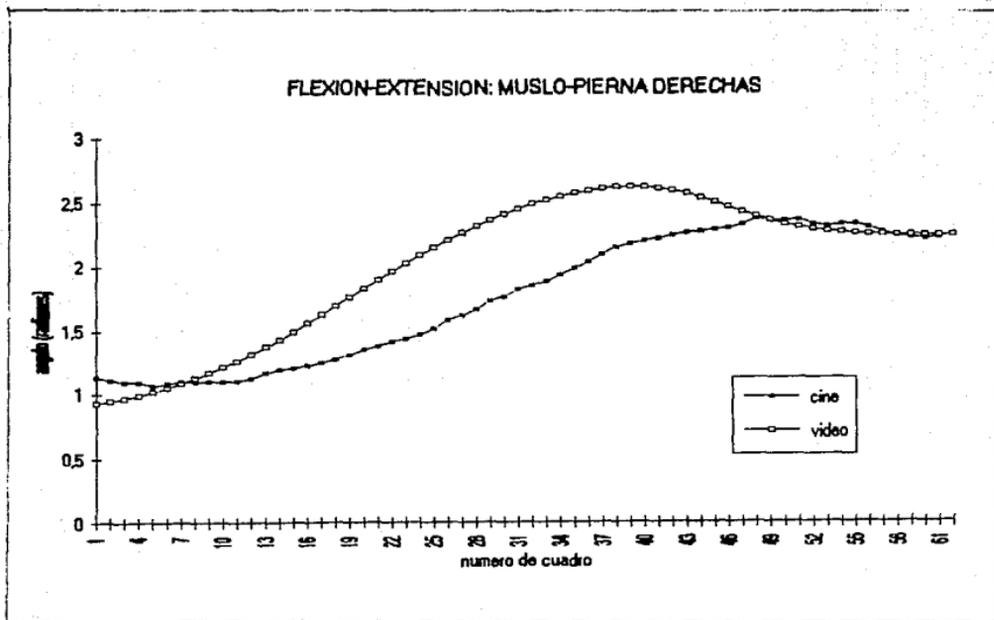


FIG. B7 Variación del ángulo de flexión-extensión correspondiente al muslo-pierna derechos.

c) La variación de la longitud de algunos segmentos, los que se consideró tendrían menor error de medición (segmentos 1, 3, 4, 9 y 10).

La variación de los valores de las longitudes de los segmentos seleccionados entra en el rango de  $\pm 5\%$ , como se muestra en las curvas de las figuras 88 a la 97.

De los resultados y gráficas anteriores se puede concluir que el método implantado con el uso del video es comparable con las técnicas convencionales.

Debe mencionarse además, que a pesar de que se puede contar con más información al disponer de un número mayor de cuadros por segundo, para hacer un análisis a partir de una secuencia de cuadros de cine es necesario desarrollar un procedimiento. Este deberá incluir la filmación (la colocación de la cámara) y crear un método efectivo y con menos probabilidad de error en la medición de las coordenadas en cada cuadro de la película.

Se pudo comprobar también:

1. La cámara de alta velocidad es poco maniobrable y que se requiere además de un camarógrafo especialista.
2. El hecho de hacer varias filmaciones hasta contar con el material adecuado ocasiona gastos elevados en película y revelado.
3. No se puede comprobar la calidad de la filmación en forma inmediata, perdiendo la oportunidad de corregir colocaciones, iluminación, etc., en el momento.

## 5.5 Conclusiones.

Como se ha demostrado en este trabajo, el Sistema de Análisis Biomecánico puede ser una herramienta útil en el análisis del movimiento del cuerpo humano.

### TRONCO

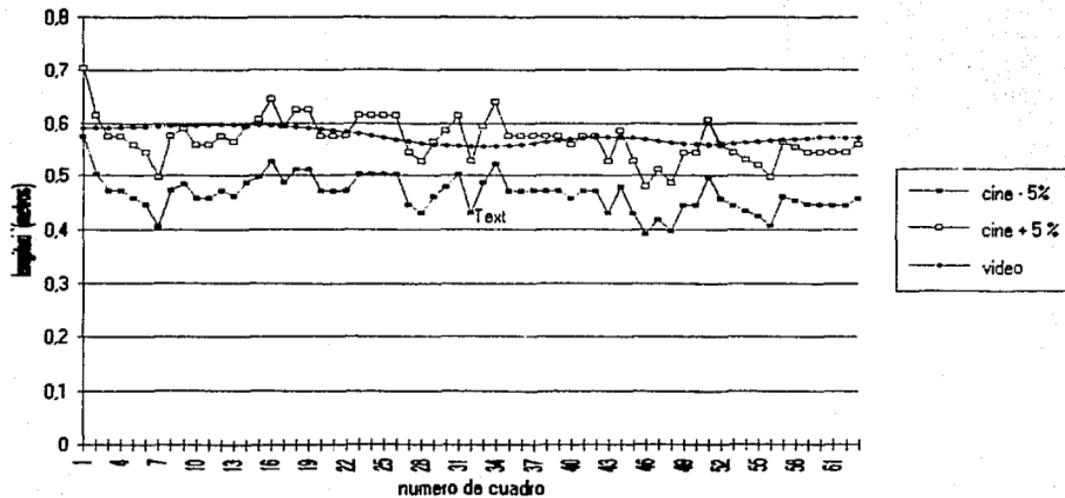


FIG. 88 Variacion de la longitud del segmento 1, tronco.

Curvas suavizadas.

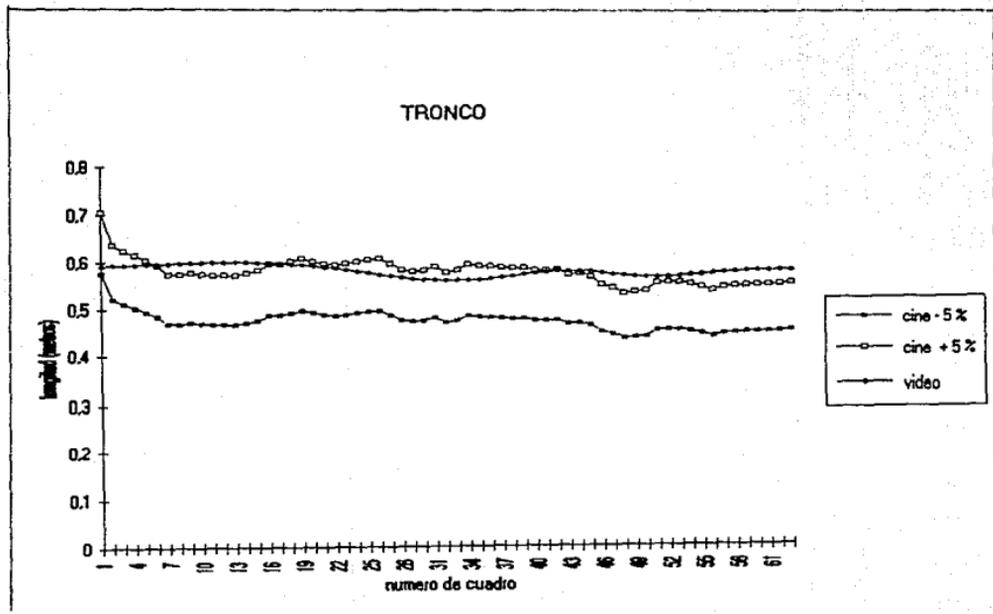


FIG. 89 Variación de la longitud del segmento 1, tronco.

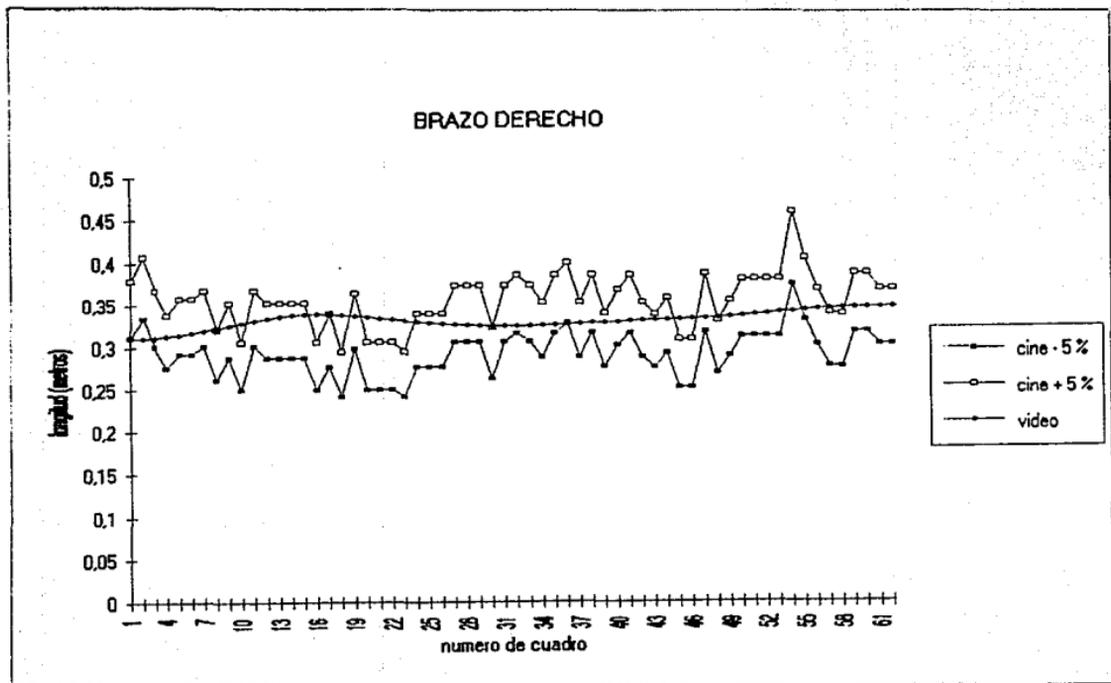


FIG. 90 Variacion de la longitud del segmento 3, brazo derecho.

Curvas suavizadas.

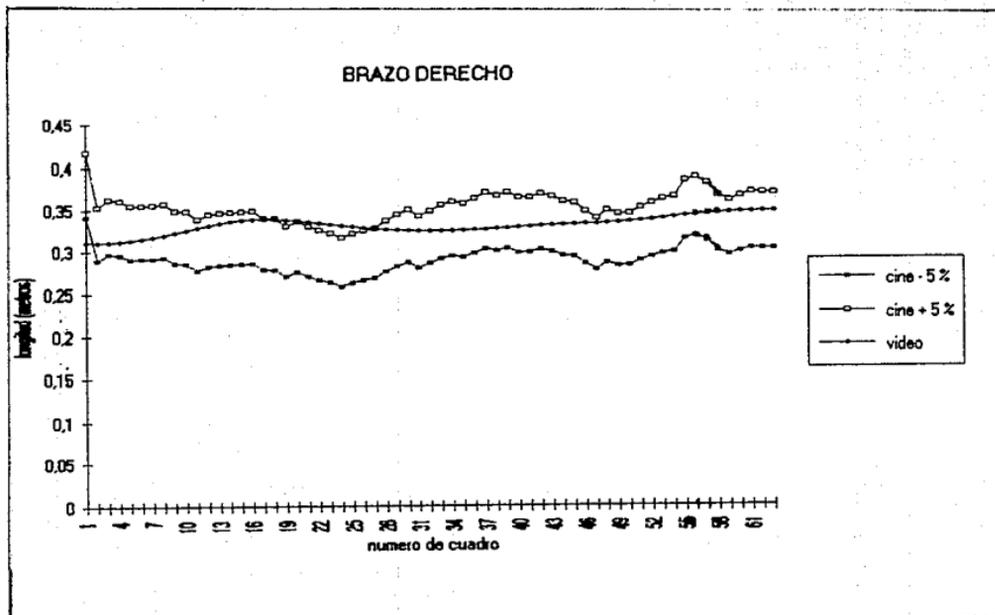


FIG. 91 Variación de la longitud del segmento 3, brazo derecho.

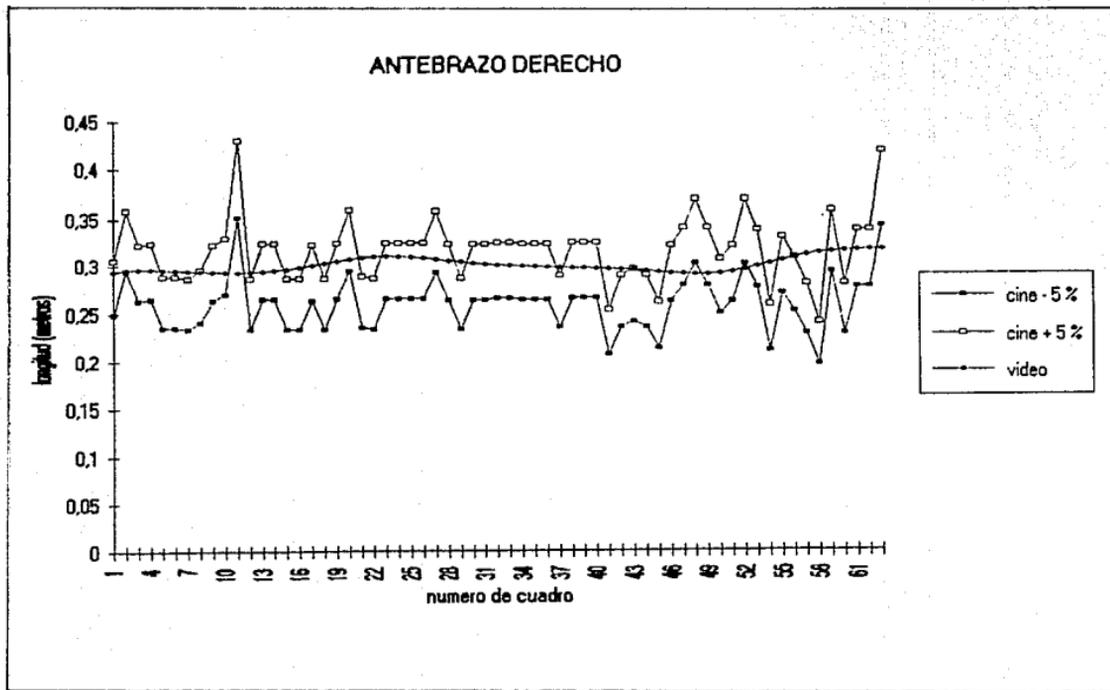


FIG. 92 Variación de la longitud del segmento 4, antebrazo derecho.

Curvas suavizadas.

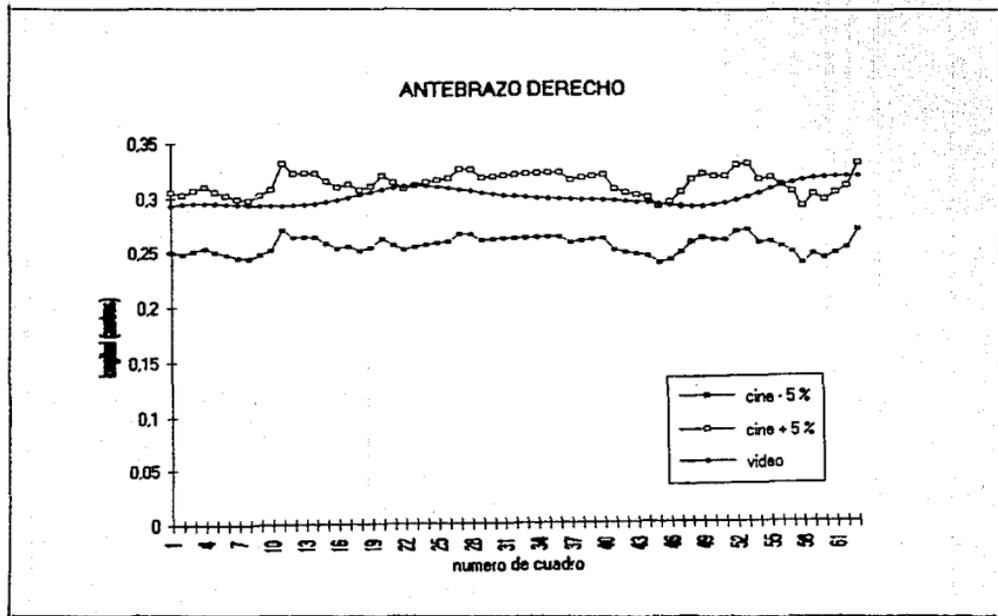


FIG. 93 Variación de la longitud del segmento 4, antebrazo derecho.

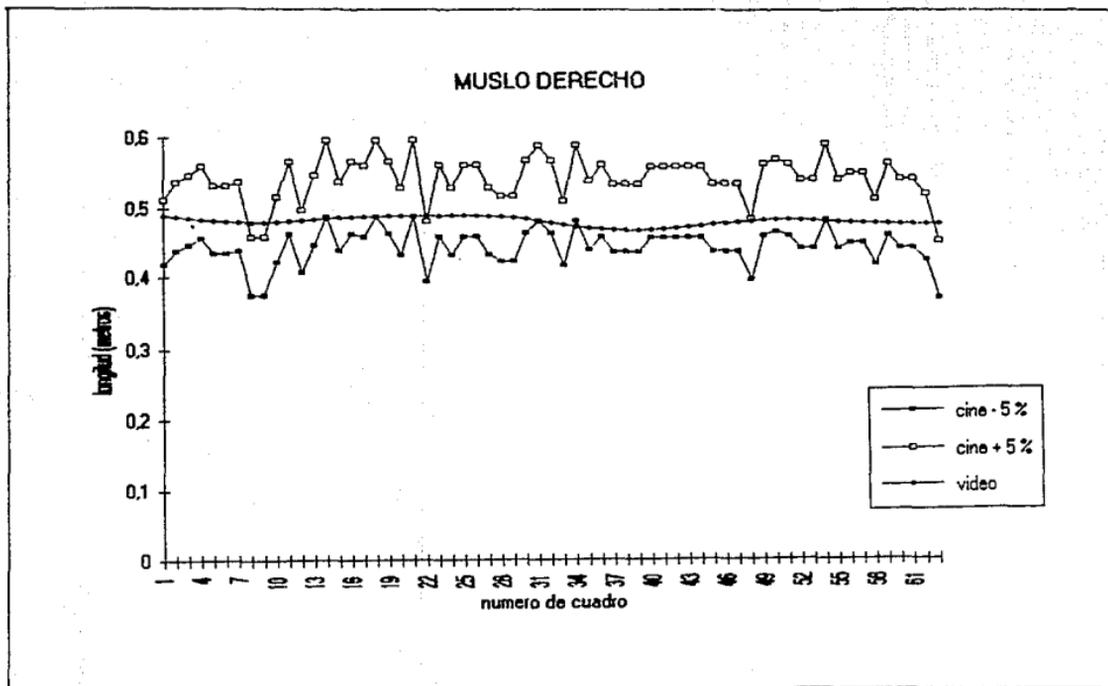


FIG. 94 Variación de la longitud del segmento 9, muslo derecho.

Curvas suavizadas.

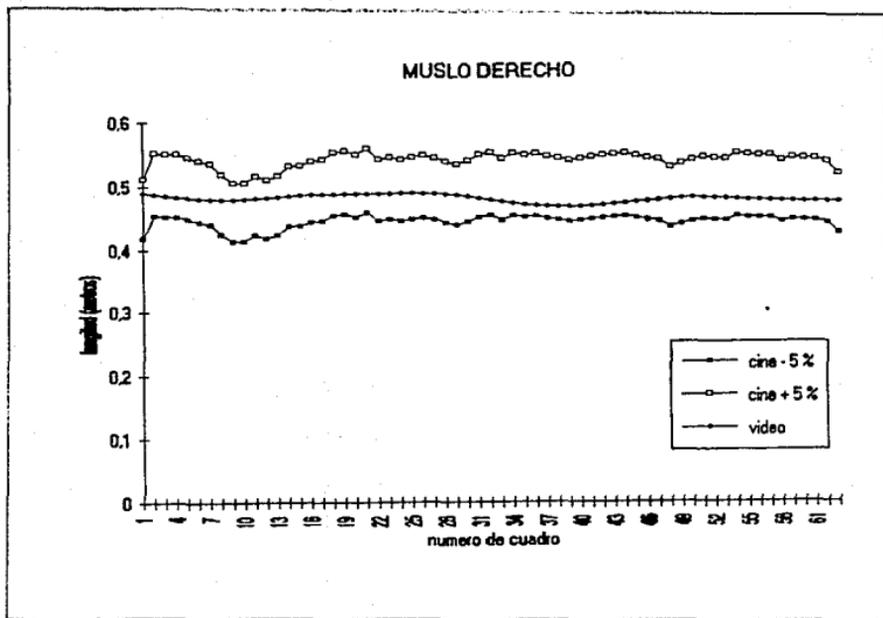


FIG. 95 Variación de la longitud del segmento 9, muslo derecho.

### PIERNA DERECHA

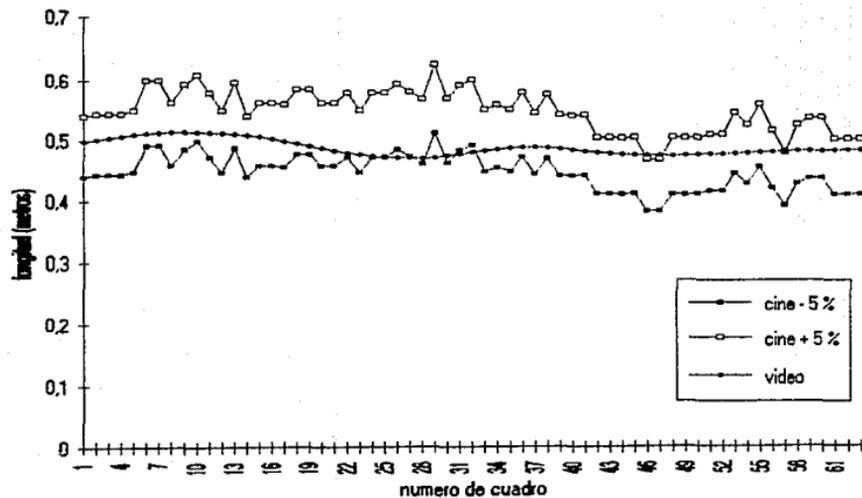


FIG. 96 Variación de la longitud del segmento 10, pierna derecha.

Curvas suavizadas.

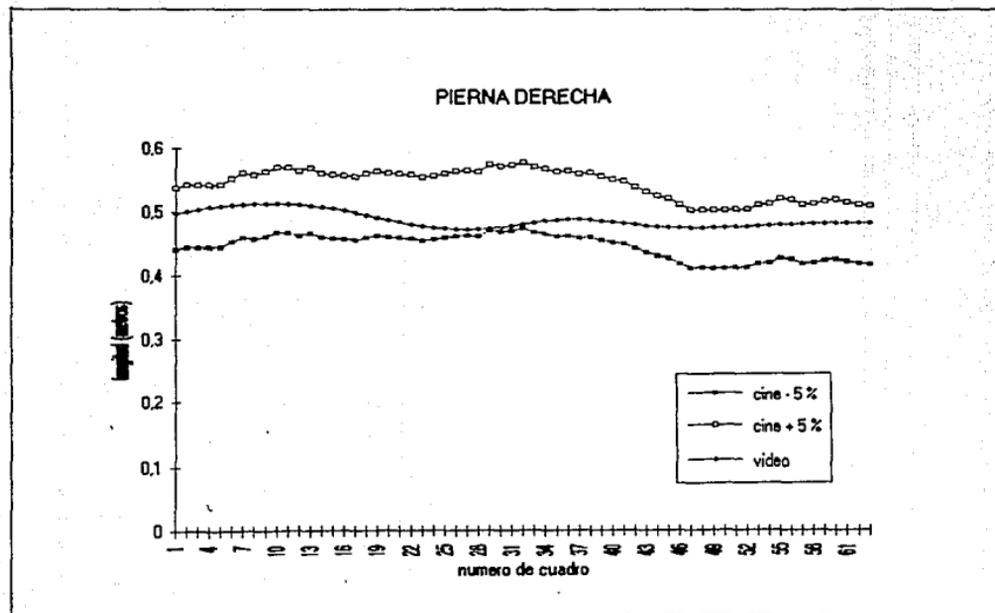


FIG. 97 Variación de la longitud del segmento 10, pierna derecha.

El resultado de los cálculos que se obtienen con este sistema permitirán al entrenador comparar atletas de diferentes niveles de desempeño. Le podrán ayudar por lo tanto a dosificar más adecuadamente los planes de entrenamiento y las cargas de trabajo para el desarrollo de las cualidades motrices (fuerza, velocidad, resistencia, flexibilidad, coordinación) de sus entrenados.

Así también, en el área de la ortopedia el especialista podrá detectar desviaciones en algunas posturas, ó podrá medir la asimetría de los movimientos de los dos brazos ó de las dos piernas, ó podrá medir la inclinación del tronco al andar, etc.

## A P E N D I C E

### Lista de programas:

- ANABIO - Principal de sistema, por medio de éste se invocan los demás programas.
- CREAVGA - Crea el archivo de imagen tipo VGA a partir de la imagen digitalizada.
- DAIMAGEN - Despliega la imagen y por medio del "mouse" se pueden leer coordenadas de pantalla.
- CAPBIO - Captura y corrige los datos del ejecutante como son nombre, masa, longitud de segmentos, etc.
- CREASEGX - Crea mediante la captura de los segmentos, un archivo de movimiento de secuencia de cuadros.
- DEPBIO - Da la posibilidad de ver cada cuadro, corregirlo, eliminarlo, y añadir otro.
- ESCDATOS - Lista los datos del ejecutante en pantalla.
- LISTCOOR - Lista las coordenadas de los segmentos de cada cuadro de la secuencia, en pantalla.
- CINEM - Hace el análisis cinemático del movimiento, despliega la animación de los segmentos, despliega el desplazamiento de los centros de gravedad, llama los programas de interpolación y graficación.

- GENTATOP** - Genera el archivo interpolado del desplazamiento angular del segmento solicitado.
- GENCG** - Genera el archivo interpolado del desplazamiento lineal, horizontal o vertical del centro de gravedad del cuerpo.
- GRAFAVA** - Grafica los ángulos, velocidad y aceleración angulares del segmento solicitado.
- GRAFCG** - Grafica la posición, velocidad y aceleración lineales del centro de gravedad del cuerpo.
- DINAM** - Hace el análisis dinámico del movimiento, llama a los programas de momento de inercia y momento angular.
- MINERZ** - Calcula el momento de inercia para cada segmento y el total del cuerpo, dependiendo del punto o eje de giro en el cuadro considerado.
- MANG** - Calcula el momento angular del segmento solicitado, dependiendo de eje o punto de giro en el cuadro considerado. Interpola y grafica.
- CINEMA** - A partir del archivo interpolado de segmentos hace un análisis cinemático calculando distancias, velocidades, aceleraciones, ángulos de segmentos para cada cuadro.
- MINERZA** - Calcula los ángulos de la línea de gravedad (centro de gravedad, eje de giro del cuerpo) con respecto a la horizontal y momentos de inercia totales.

### Condiciones para la grabación del video:

1. La cámara deberá estar completamente estática y colocada preferentemente en un tripié nivelado a la horizontal. Durante la grabación no debe variar el foco.

2. Para evitar errores de paralaje, la distancia al objetivo debe ser lo más lejos posible, por lo que se recomienda usar una lente de acercamiento que permita tener imágenes lo más grandes posible.

3. La cámara deberá grabar al sujeto en forma perpendicular al plano xy del movimiento y debe tratar de colocarse en una posición media entre el inicio y el fin del movimiento. Con respecto a la altura de la cámara, se deberá colocar a una altura media del piso a la altura máxima alcanzada por el ejecutante.

4. Es recomendable grabar una escala fija, notoriamente delimitada y de valor conocido en el caso de no contar con las medidas antropométricas reales de los segmentos del individuo. Esta escala debe colocarse en el lugar donde se ejecutará el ejercicio.

## REFERENCIAS

- 1 Glass, Robert L.  
Software Communication Skills  
Software Engineering Program  
Seattle University  
Prentice-Hall, Inc. 1988
- 2 Baxes, Gregory A.  
Digital Image Processing  
A Practical Primer  
Prentice-Hall, Inc. 1984.
- 3 Luther, Arch C.  
Digital Video in the PC Environment.  
Featuring DVI Technology  
Mc Graw-Hill, 1989
- 4 McCord, James W.  
C Programers Guide to Graphics.  
SAMS
- 5 Donskoi D. y Zatsiorski V.  
Biomecánica de los ejercicios físicos.  
Editorial Raduga, Moscú  
Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, Cuba  
1988
- 6 Enoka, Roger M.  
Neuromechanical Basis of Kinesiology  
University of Arizona  
Human Kinetics Books, Champaign Illinois, 1988

- 7 Yeadon, M. R.  
The simulation of Aerial Movement III.  
The Determination of the Angular Momentum  
of the Human Body  
J. Biomechanics Vol. 23, No. 1, pp. 75-83, 1990
  
- 8 Sedgewick, Robert  
Algorithms in C  
Princeton University  
Addison-Wesley Publishing Company, 1990
  
- 9 Smith, Alvy Ray  
Interpolation with Cubic Splines  
Spline Tutorial Notes. Technical Memo 77,  
Lucasfilm, Ltd.  
Course #7: Introduction to Computer Animation  
SIGGRAPH'83, may 1983
  
- 10 Professional Image Board  
Technical Reference PIB and PIB+  
Atronics International Inc.
  
- 11 Purdum, Jack  
C programmer's toolkit.  
Programming Series, QUE Corporation, 1989
  
- 12 Software desarrollado  
por Alejandro Aguilar Sierra, 1991  
Centro de Estudios de la Atmósfera, U.N.A.M.
  
- 13 Barham Jerry N.  
Mechanical Kinesiology  
The C.V. Mosby Company, Saint Louis, 1978

- 14 Burden Richard L. & Faires J. Douglas & Reynolds Albert  
Numerical Analysis, 1981  
Prindle, Weber & Schmidt  
Boston, Massachusetts
- 15 Mathews John H.  
Numerical Methods for Computer Science,  
Engineering and Mathematics.  
Prentice Hall, Inc. 1987
- 16 Rice R. John  
Numerical Methods, Software, and Analysis  
McGraw-Hill Book Company  
1983
- 17 deBoor Carl  
A Practical Guide to Splines  
Springer-Verlag, 1978
- 18 Barsky Brian A., Beatty John C.  
Local Control of Bias and Tension in Beta-splines  
Computer Graphics, Volumen 17, No.3, julio 1983
- 19 Bartels Richard H., Beatty John C., Barsky Brian A.  
An Introduction to Splines for use in Computer  
Graphics and Geometric Modeling  
Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1987
- 20 Baumann W.  
Kinematic and dynamic characteristics of the  
sprint start.  
International Series on Biomechanics, Volume 1B  
Biomechanics V-B  
Edited by Paavo V. Komi  
University Park Press, 1976

- 21 Baxes A. Gregory  
Digital Image Processing  
Prentice-Hall, Inc. 1984
- 22 Plasttock Roy K. & Kalley Gordon  
Gráficas por Computadora  
Serie Schaum, 1987  
Mc Graw-Hill
- 23 Espinosa Sánchez Matilde  
"Uso del video en el análisis del movimiento  
en biomecánica."  
Tesis, diploma en Entrenamiento Deportivo.  
C.E.C.E.S.D., U.N.A.M., septiembre 1992.
- 24 Yoshiaki Takei  
A comparison of techniques used in performing the  
men's compulsory Gymnastic Vault at the 1988 Olympics.  
International Journal of Sport Biomachanics,  
1991,7,54-75
- 25 Dillman Charles J., Cheetham Phillip J. and Smith Sarah  
U.S. Olympic Committee, Sports Medicine Division  
"Un análisis cinemático del salto de caballo largo  
olímpico en hombres."  
International Journal of Sport Biomechanics,  
1985, 1, 96-110
- 26 Yoshiaki Takei  
"A comparison of techniques used in performing the men's  
compulsory gymnastic vault at the 1988 olympics."  
International Journal of Sport Biomechanics, 1991, 7,  
54-71

A D I O S   Y   G R A C I A S