

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

Análisis biomecánico del cuerpo humano
mediante el procesamiento digital de imágenes

Autor:

- Guerrero, Pablo Nicolás

Director:

-

*Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos
para acceder al título de Ingeniero Electrónico*

en la

Facultad Regional Paraná

Fecha (Marzo de 2018)

Declaración de autoría:

Yo declaro que el Proyecto Final “Análisis biomecánico del cuerpo humano mediante el procesamiento digital de imágenes” y el trabajo realizado es propio.

Declaro:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firma:

•

Fecha: 10/03/2018

Agradecimientos:

Quisiera agradecer especialmente con este trabajo a cada uno de los Docentes que participaron en mi formación académica, brindando su invaluable conocimiento y dedicación.

A mis compañeros, los cuales fueron un sostén muy importante en este gran desafío, entregando su apoyo y su aliento en todo momento.

Al Decano, Consejo Directivo y Secretarías, los cuales brindaron su tiempo y esfuerzo para resolver nuestras necesidades y hacer de nuestra facultad un lugar cada día mejor.

Al personal no docente, que acompañó con una sonrisa y con palabras de aliento el transcurso de mi carrera, además de hacer de nuestra facultad un espacio placentero para el estudio y la recreación.

Por último agradecer a todas aquellas personas que en pequeña o gran medida fueron parte de mi crecimiento académico y personal, dejando un aprendizaje que me acompañara el transcurso de mi vida.

Universidad Tecnológica Nacional

Abstract

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

**Análisis biomecánico del cuerpo humano mediante el
procesamiento digital de imágenes**

Guerrero, Pablo Nicolás

Abstract:

BioCam1 is software that exploits the advantages of digital image processing to perform biomechanical analysis of the human body, seeking to sensitize, measure and find indications of conditions that allow corrective or preventive action, avoiding the progression of the problem and improving the quality of life . It is able to be inserted in the sports area, seeking to improve the technique in certain disciplines, optimizing performance and avoiding chronic injuries.

The software can also be used to evaluate the correct functioning of prosthesis installed in the human body, in the interest of optimizing the body-to-body ratio.

BioCam1 was developed using a recognized free software called Qt creator, which through C ++ language allows to create applications with graphical environment (GUI), which greatly improves the interaction with the user.

In addition, libraries of the OpenCV library were used, which contains more than 500 functions that cover a wide range of areas in the vision process, such as object recognition, camera calibration and artificial vision, among others.

In this way a tool was obtained that is able to process in real time the data obtained by a camera delivering the results of the same in a friendly way and allowing an easy reading.

BioCam1 allows you to obtain accurate data leaving outdated tools and without the need to use expensive equipment with high technology.

Resumen:

BioCam1 es un software que explota las ventajas del procesamiento digital de imágenes para realizar análisis biomecánicos del cuerpo humano, buscando sensar, medir y encontrar indicios de afecciones que permitan actuar de manera correctiva o preventiva, evitando la progresión del problema y mejorando la calidad de vida. Es capaz de insertarse en el área deportiva, buscando mejorar la técnica en determinadas disciplinas, optimizando el rendimiento y evitando lesiones crónicas. También puede utilizarse para evaluar el correcto funcionamiento de prótesis instaladas en el cuerpo humano, con el fin de optimizar la relación pieza-cuerpo.

Este software permite obtener datos precisos dejando atrás herramientas anticuadas y sin necesidad de emplear equipos costosos con alta tecnología.

BioCam1 fue desarrollado utilizando un reconocido software libre llamado Qt creator, el cual a través de lenguaje C++ permite crear aplicaciones con entorno gráfico (GUI), lo que mejora notablemente la interacción con el usuario.

Además se utilizaron librerías de la biblioteca OpenCV, la cual contiene más de 500 funciones que abarcan una gran gama de áreas en el proceso de visión, como son el reconocimiento de objetos, calibración de cámaras y visión artificial, entre otras.

De esta manera se obtuvo una herramienta que es capaz de procesar en tiempo real los datos obtenidos por una cámara entregando los resultados del mismo de una manera amigable y permitiendo una fácil lectura.

Reconocimientos:

En reconocimiento al Dr. Francisco Alberto Rubinelli quien en 2014 nos brindo todos su conocimiento en el Procesamiento Digital de Imágenes.

Excelente profesional dedicado a la investigación, a la ciencia y a la docencia.

Especializado en las celdas fotovoltaicas, con el objetivo de predecir sus características y potenciar sus aplicaciones tecnológicas.

Con este humilde proyecto queremos agradecer todo el conocimiento transmitido, su calidad como persona y docente.

Índice

1 - Introducción	16
1.1 - PDI	16
1.2 - Biomecánica del cuerpo humano	19
1.3 - Marcha humana	25
1.3.1 Ciclo de marcha	25
1.3.1.1 Fase de apoyo	26
1.3.1.2 Balanceo	26
1.3.2 Parámetros	26
1.3.3 Determinantes de la marcha	27
1.3.4 Cinética	29
1.3.5 Potencia	29
1.3.6 Flujo de potencia	29
1.3.7 Alteración de la marcha	29
1.4 - Análisis de la marcha (Gait Analysis)	30
1.4.1 - Proceso y equipo	30
1.4.2 - Factores y parámetros	31
1.4.3 - Técnicas	31
1.5 - Software de desarrollo	34
1.5.1 - Introducción a QT	34
1.5.2 - Introducción a OpenCV	35
1.6 - Área de trabajo	37
1.6.1 - Introducción al mercado	37
1.6.1.1 - Competencia extranjera	38
1.6.1.2 - Competencia nacional	39
1.6.1.3 - Otras tecnologías	41
2 - Desarrollo	43
2.1 - Diagrama de bloques	43
2.1.1 - Zona de estudio	43
2.1.2 - Cámara	46
2.1.3 - Aplicación	49
2.1.3.1 - Fuente de datos	50
2.1.3.2 - Sentido de marcha	55
2.1.3.3 - Botón Ejecutar/Pausar	55
2.1.3.4 - Función ProcesarFrame()	56
2.1.3.4.1 - Detección de los "puntos de interés"	57
2.1.3.4.2 - Ordenamiento y cálculos	65
2.1.3.5 - Generación de gráficos	66
2.1.3.6 - Generación de gráficos ilustrativos	71
2.1.3.7 - Informe PDF	73
2.1.3.7.1 - Base de datos de pacientes	74
2.1.3.7.2 - Generación de Informe PDF	74
2.1.3.7.3 - Partes del Informe PDF	75
2.2 - Diseño de Biocam	79
3 - Resultados	86
4 - Análisis de costo	88
4.1 - Costos directos e indirectos	88
4.2 - Aspectos a tener en cuenta	90
4.3 - Costo del producto	91
4.4 - Amortización	91
5 - Discusión y conclusión	92
6 - Literatura Citada	93

Lista de Figuras

Figura 1.1 1.....	17
Figura 1.2 1.....	20
Figura 1.2 3.....	20
Figura 1.2 4.....	21
Figura 1.2 5.....	21
Figura 1.2 6.....	22
Figura 1.2 7.....	22
Figura 1.2 8.....	23
Figura 1.2 9.....	23
Figura 1.2 10.....	24
Figura 1.2 11.....	24
Figura 1.3.1 1.....	25
Figura 1.3.3 1.....	27
Figura 1.3.3 2.....	28
Figura 1.5.1 1.....	34
Figura 1.5.2 1.....	35
Figura 1.6.1.1 1.....	38
Figura 1.6.1.1 2.....	38
Figura 1.6.1.1 3.....	39
Figura 1.6.1.3 1.....	41
Figura 1.6.1.3 2.....	42
Figura 2.1 1.....	43
Figura 2.1.1 1.....	43
Figura 2.1.1 2.....	46
Figura 2.1.2 1.....	48
Figura 2.1.3 1.....	49
Figura 2.1.3 2.....	49
Figura 2.1.3.1 1.....	50
Figura 2.1.3.1 2.....	50
Figura 2.1.3.1 3.....	51
Figura 2.1.3.1 4.....	52
Figura 2.1.3.1 5.....	53
Figura 2.1.3.1 6.....	54
Figura 2.1.3.2 1.....	55
Figura 2.1.3.3 1.....	55
Figura 2.1.3.4 1.....	56
Figura 2.1.3.4.1 1.....	57
Figura 2.1.3.4.1 2.....	57
Figura 2.1.3.4.1 3.....	58
Figura 2.1.3.4.1 4.....	59
Figura 2.1.3.4.1 5.....	60
Figura 2.1.3.4.1 6.....	61
Figura 2.1.3.4.1 7.....	61
Figura 2.1.3.4.1 8.....	62
Figura 2.1.3.4.1 9.....	63

Figura 2.1.3.4.2 1.....	65
Figura 2.1.3.4.2 2.....	66
Figura 2.1.3.4.2 3.....	66
Figura 2.1.3.5 1.....	67
Figura 2.1.3.5 2.....	67
Figura 2.1.3.5 3.....	68
Figura 2.1.3.5 4.....	68
Figura 2.1.3.5 5.....	69
Figura 2.1.3.5 6.....	69
Figura 2.1.3.5 7.....	70
Figura 2.1.3.5 8.....	70
Figura 2.1.3.5 9.....	71
Figura 2.1.3.6 1.....	71
Figura 2.1.3.6 2.....	72
Figura 2.1.3.6 3.....	72
Figura 2.1.3.6 5.....	73
Figura 2.1.3.6 4.....	73
Figura 2.1.3.7.1 1.....	74
Figura 2.1.3.7.2 1.....	74
Figura 2.1.3.7.2 2.....	75
Figura 2.1.3.7.3 1.....	76
Figura 2.1.3.7.3 2.....	76
Figura 2.1.3.7.3 3.....	77
Figura 2.1.3.7.3 4.....	78
Figura 2.1.3.7.3 5.....	79
Figura 2.2 1.....	80
Figura 2.2 2.....	81
Figura 2.2 3.....	82
Figura 2.2 4.....	83
Figura 2.2 5.....	84
Figura 2.2 6.....	85

Lista de Tablas

Tabla 4.1 1	89
Tabla 4.3 1	91
Tabla 4.4 1	91

Lista de Abreviaciones

PDI	Procesamiento digital de imágenes
etc.	Etcétera
cm	Centímetro
cms	Centímetros
mm	Milímetros
m	Metro
min	Minuto
s	Segundo
GRF	Ground reaction force
EMG	Electromiograma
rad	Radianes
3D	Tres dimensiones
2D	Dos dimensiones
MEMS	Micro-Electro-Mechanical systems
PHP	Hypertext preprocessor
XML	Extensible markup language
SQL	Structured Query Language
GUI	Graphical user interface
QML	Qt Meta Language
BSD	Berkeley software distribution
TBB	Threading Building Blocks
SIMD	Single instruction, multiple data
MILL	Machine learning library
UI	Interfaz de usuario
LED	Diodo emisor de luz
HMI	Interfaz maquina hombre
PC	Computadora personal
K	Kelvin
FF	Full frame
ISO	Sensibilidad
AF	Enfoque automático
HD	Alta definición

MP	Mega pixel
FOV	Campo de visión diagonal
máx.	Máximo
IZQ	Izquierda
DER	Derecha
AVI	Audio video interleave
MP4	Formato MPEG-4
MPG	Formato MPEG-1
JPG	Joint Photographic Expert Group
PNG	Portable Network Graphics
TIF	Tagged Image File Format
.mdb	Microsoft Access data base
EJ	Ejemplo
RGB	Rojo-Verde-Azul
Cos	Coseno
Sin	Senos
DIV	División
ID	Identificador
TEMP	Temporal
Nº	Numero
USB	Universal Serial Bus
HR	Hora
PDF	Portable Document Format
WEB	World Wide Web

Lista de Símbolos

°	Grados sexagesimales
%	Por ciento
\$	Peso argentino
U\$s	Dólar estadounidense
M	Momento articular
ω	Velocidad angular
>	Mayor que
<	Menor que
P	Potencia
=	Igual que
\leq	Menor igual que
\wedge	Y
r	Radio circunferencia
Cx	Coordenada en eje x
Cy	Coordenada en eje y

Dedicado a:

Este trabajo se lo dedico a cada uno de los integrantes de mi familia, como agradecimiento a su apoyo, aliento y sobre todo a su esfuerzo para que yo pueda llevar adelante mis estudios universitarios.

Principalmente a mis padres por darme uno de los mayores regalos y una enorme herramienta para afrontar la vida. Sin ellos probablemente nada de esto hubiese sido posible.

Eternamente agradecido por enseñarme cual es el camino seguir.

1 - Introducción

1.1 - PDI

En sus inicios el procesamiento digital de imágenes estaba restringido a campos de investigación de ciencias de la computación, matemáticas y astronomía, lo que constituía una labor tardada, impredecible y cara. Hoy en día se ha convertido en una disciplina en sí misma, con la ayuda de microprocesadores baratos, dispositivos de gran memoria y componentes de procesamiento de señales poderosos, volviéndose así una herramienta invaluable para diversas aplicaciones, tales como robótica, control industrial, telecomunicaciones, medicina, etc.

En la actualidad los sistemas digitales son capaces de adquirir imágenes con un rango dinámico mas amplio que el ojo humano, y con una sola imagen digital puede obtenerse gran cantidad de información en forma compacta y sencilla.

Tanto la ingeniería electrónica como la ingeniería en sistemas son ramas de un extenso campo de aplicación para el PDI.

El procesamiento digital de imágenes se podría clasificar en las siguientes áreas:

- Adquisición de imágenes (Image Acquisition)
- Procesamiento de imágenes (Image Processing)
- Análisis de imágenes (Image Analysis)
- Comprensión de imágenes (Image Understanding)
 - Visión por computadora (Computer Vision)
 - Visión industrial (Machine Vision)

No existe consenso en la literatura técnica sobre donde inicia y donde termina cada una de estas áreas; sin embargo, si es común colocar en la gama de especialidades al procesamiento de imágenes en un extremo y a la visión por computadora en el otro.

En la siguiente figura se esbozan las áreas, enfatizando la diferencia entre ellas de acuerdo al tipo de información estas producen.

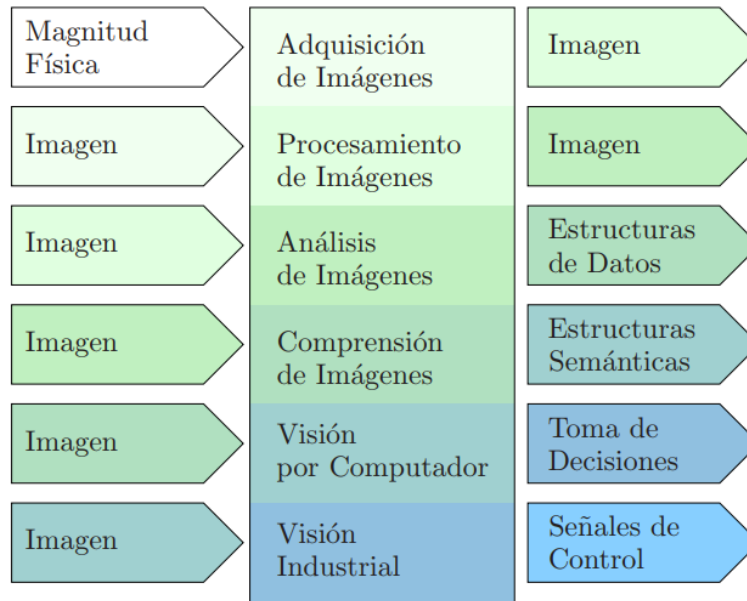


Figura 1.1 1

La adquisición de imágenes es el primer paso para cualquier procesamiento digital de imágenes, y consiste básicamente en un sistema óptico y el digitalizador, mediante el cual la imagen óptica se transforma en una señal eléctrica que permitirá el posterior procesamiento. Al digitalizar una imagen, es común la introducción de diferentes niveles de ruido o degradación sobre la misma.

El procesamiento o tratamiento digital de imágenes consiste en procesos algorítmicos que transforman una imagen en otra en donde se resalta cierta información de interés y/o se atenúa o elimina información irrelevante para la aplicación. Así, las tareas del procesamiento de imágenes comprenden la supresión de ruido, mejoramientos de contraste, eliminación de efectos no deseados en la captura como distorsiones por efectos ópticos o de movimiento, mapeos geométricos, transformaciones de color, etc.

El análisis de imágenes pretende extraer información cuantitativa de las imágenes. La información se empaqueta en estructuras de datos concretas que varían desde simples números escalares (como en el caso del cálculo de magnitudes estadísticas de una imagen, incluyendo el valor medio o la desviación estándar de los niveles de gris), hasta magnitudes vectoriales, matriciales o tensoriales (como el caso de histogramas), listas de puntos (denotando por ejemplo bordes, esquinas o líneas encontradas en la imagen), grafos denotando estructuras complejas, etc. Una sub área del análisis se concentra en cambios de representación de imágenes, lo que incluye los algoritmos de compresión con y sin pérdida de información, así como los modernos algoritmos de cifrado que ocultan información de otra naturaleza.

La comprensión de imágenes pretende asignar significado al contenido, y una de las tareas clásicas para esta área consiste en la segmentación completa de la imagen, que se basa en buscar una partición en regiones correspondientes a objetos de la escena capturada. Algunos autores consideran a esta tarea parte del análisis de imágenes, otros parte de la visión por computadora.

La visión por computadora es una rama de la inteligencia artificial que persigue emular al sistema visual humano, incorporando a los sistemas capacidades de aprendizaje, reconocimiento de patrones, inferencia y toma de decisiones basándose en el contenido de imágenes.

Finalmente, la visión industrial puede interpretarse como la aplicación de todas las otras áreas al contexto industrial, donde se utiliza en control de calidad, operaciones de conteo, captura y mejora de imágenes para revisión por operarios humanos, etc. Con frecuencia la salida de los procesos de visión industrial es alguna señal que activa mecanismos de clasificación de objetos, pero no se limita a ello. Los textos especializados en esta visión prestan atención especial a los aspectos de formación de las imágenes, particulares para el contexto industrial.

Como se advirtió inicialmente, esta división de aéreas no es compartida por todos los autores, pero brinda una idea de las capacidades de sistemas actuales y las tareas realizadas por medio del manejo de imágenes con medios electrónicos.

Podríamos decir que el proyecto utiliza las cuatro primeras áreas antes explicadas para llevar adelante el desarrollo de la aplicación.

Actualmente existe múltiples aplicaciones prácticas del PDI, entre las cuales podemos mencionar las siguientes:

- Robótica móvil y vehículos autónomos: se utilizan cámaras y otros tipos de sensores para localizar obstáculos, identificar objetos y personas, encontrar el camino, etc.
- Manufactura: se aplica PDI para la localización e identificación de piezas, para control de calidad, entre otras tareas.
- Interpretación de imágenes aéreas y de satélite: se usa para mejorar las imágenes obtenidas, para identificar diferentes tipos de cultivos, para ayudar a la predicción del clima, etc.
- Análisis e interpretación de imágenes médicas: ayuda a la interpretación de diferentes clases de imágenes como rayos X, tomografías, ultrasonido, resonancia magnética y endoscopia.
- Interpretación de escritura, dibujos y planos: se utilizan técnicas de PDI para el reconocimiento de textos, lo que se conoce como reconocimiento de caracteres.
- Análisis de imágenes microscópicas.
- Análisis de imágenes para astronomía.
- Análisis de imágenes para compresión: además de ser una sub área del PDI, se desarrollan técnicas más sofisticadas de compresión que se basan en la interpretación de imágenes para comprender procesos.

1.2 - Biomecánica del cuerpo humano

La biomecánica es una rama de la física que estudia el aparato locomotor de los organismos biológicos y desarrolla conocimientos para que las personas realicen actividades saludablemente y de una mejor manera. Es el área a través de la cual tendremos una mejor comprensión de las actividades y ejercicios, así mismo interviene en la prevención de lesiones, aumenta el rendimiento, describe y mejora la técnica, además de desarrollar nuevos materiales para la rehabilitación.

La biomecánica se puede insertar en cuatro campos de estudio:

- **Cinemática:** estudia los movimientos sin tener en cuenta las causas que lo producen, describe las técnicas deportivas o las diferentes habilidades y recorridos que el ser humano puede realizar.
- **Dinámica:** estudia el movimiento o la falta de este relacionado con las causas que lo provocan.
- **Cinética:** estudia las fuerzas que provocan el movimiento.
- **Estática:** estudia las fuerzas que determinan que los cuerpos se mantengan en equilibrio.

En biomecánica, se considera que cualquier movimiento parte de una posición anatómica: en la que una persona está situada de pie, con la vista hacia delante, los brazos a los laterales del cuerpo con las palmas hacia el frente, los pies ligeramente separados en la zona de los talones y los dedos de los pies señalando hacia delante.

Existen tres planos anatómicos o cardinales en la posición anatómica, según se describe a continuación:

El plano **sagital o mediano** divide el cuerpo en dos lados (derecho e izquierdo), con algunas excepciones: los movimientos de flexión (reducción del ángulo de una articulación o doblar la articulación) y de extensión (aumentar el ángulo de la articulación o extender la articulación) se producen en el plano sagital.

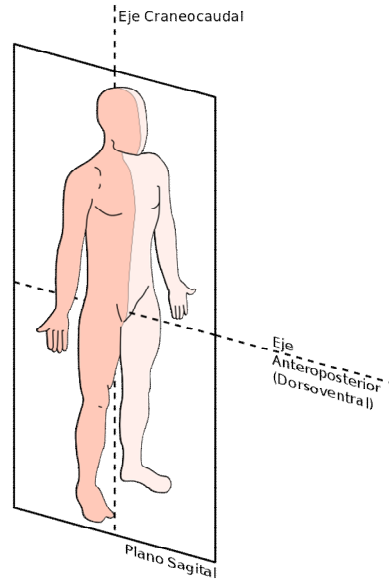


Figura 1.2 1

La segunda división del cuerpo se realiza a través del plano **frontal o coronal**, que distingue la parte delantera y la parte trasera del cuerpo. Una vez más, hay algunas excepciones: los movimientos de abducción (separar una extremidad de la línea central del cuerpo) y de aducción (acercar una extremidad a la línea central del cuerpo) se producen en el plano frontal.

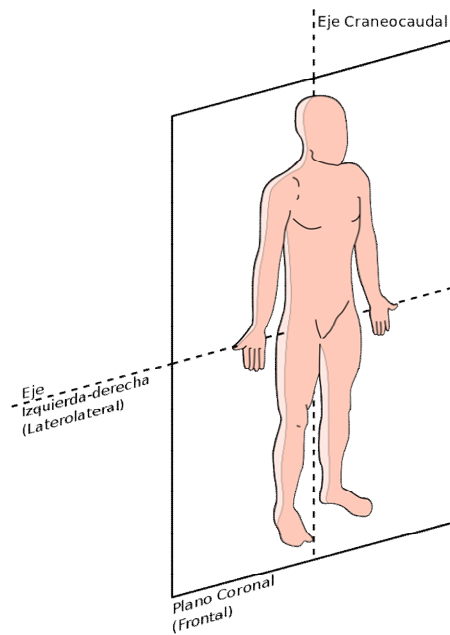


Figura 1.2 2

Por último, el plano **transversal u horizontal** divide el cuerpo en una parte superior y una parte inferior. Los movimientos de rotación se producen en el plano transversal.

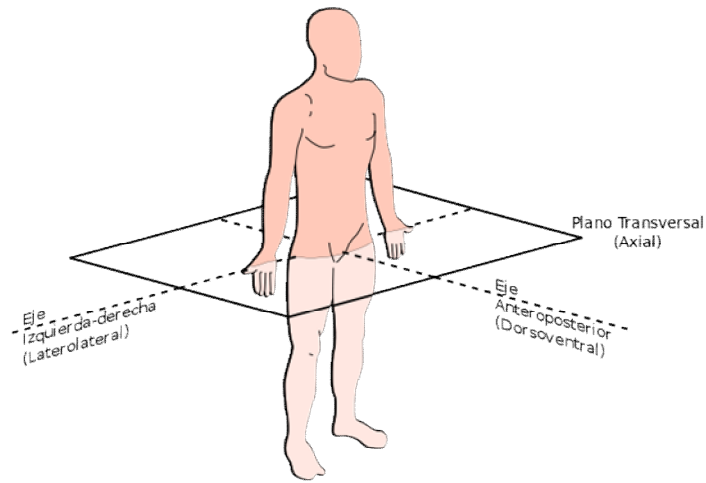


Figura 1.2 3

Los patrones diagonales de movimiento se producen cuando los componentes de estos tres planos cardinales de movimiento se combinan al mismo tiempo.

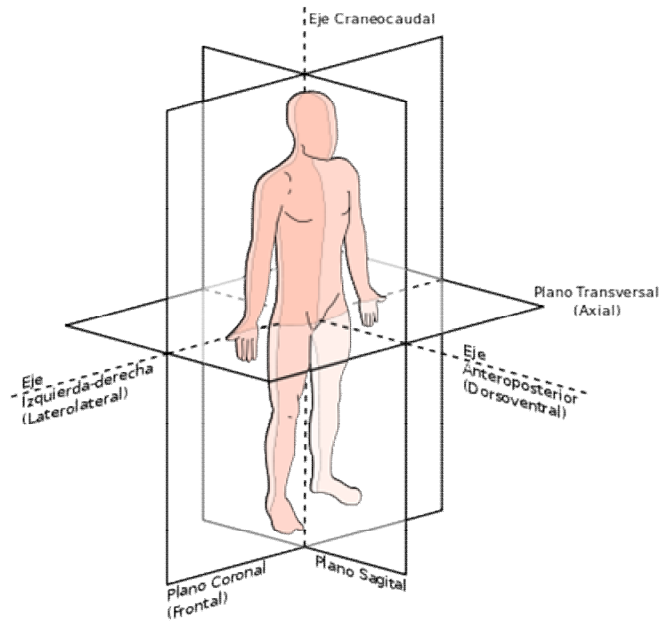


Figura 1.2 4

Gracias al desarrollo de la tecnología, en la actualidad se cuenta con métodos para la descripción e instrumentos de medición del movimiento del cuerpo humano. El uso de estos dependerá de que y como se quiera medir:

- Goniómetro: sirve para medir la amplitud de los segmentos corporales que conforman una articulación.

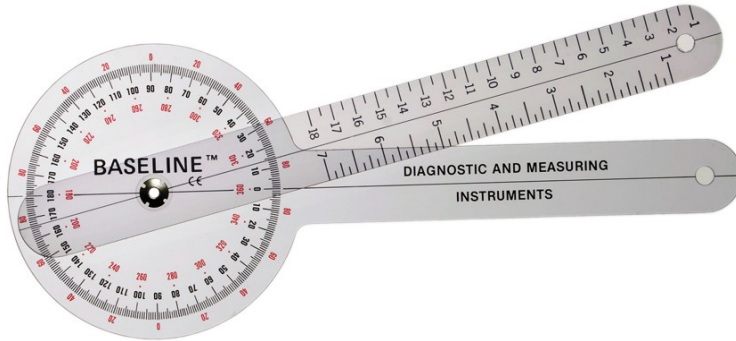


Figura 1.2 5

- Acelerómetro: emite señales usualmente analógicas y fácilmente digitalizables.

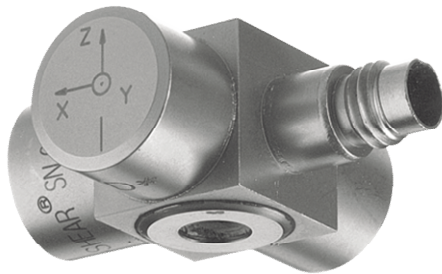


Figura 1.2 6

- Electromiografo: detecta, mediante electrodos (cutáneos o intramusculares), la actividad muscular de determinados músculos.

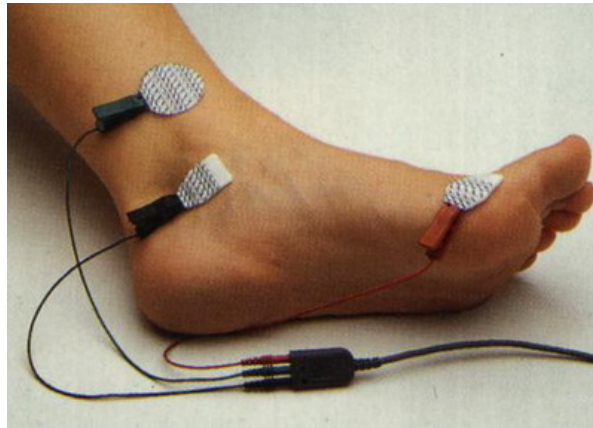


Figura 1.2 7

- Plataformas de fuerza: dividen las fuerzas que actúan sobre ellas en tres direcciones espaciales.

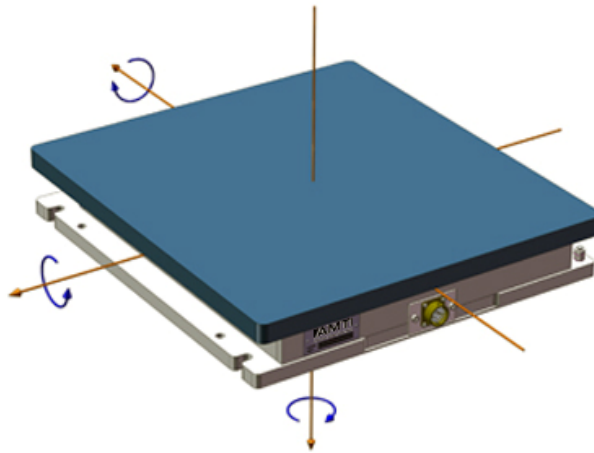


Figura 1.2 8

- Dinamómetros: registran el valor del torque en las rotación de segmentos en las diferentes articulaciones.



Figura 1.2 9

- PDI: provee información obtenida del análisis digital de la secuencias de imágenes que componen el movimiento ejecutado.

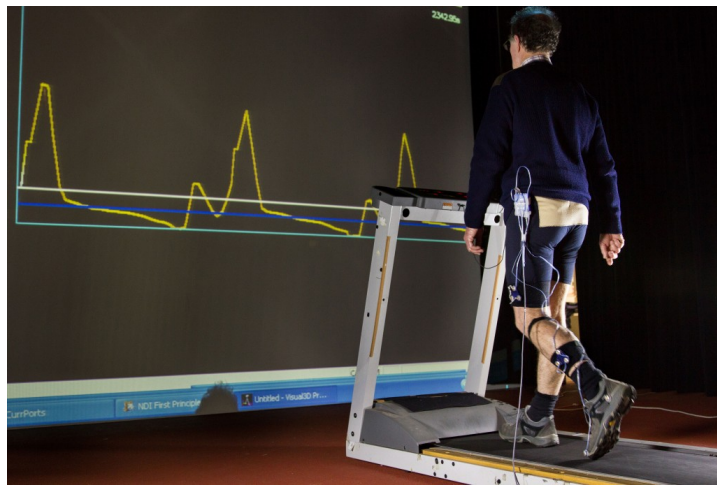


Figura 1.2 10

1.3 - Marcha humana

La Marcha humana es un proceso de locomoción en el cual el cuerpo humano, en posición erguida, se mueve hacia adelante, siendo un peso soportado, alternativamente por ambas piernas. Mientras el cuerpo se desplaza sobre la pierna de soporte, la otra pierna se balancea hacia adelante como preparación para el siguiente apoyo.

1.3.1 Ciclo de marcha

El ciclo de marcha comienza cuando el pie contacta con el suelo y termina con el siguiente contacto con el suelo del mismo pie. Los dos mayores componentes del ciclo de la marcha son: la fase de apoyo (60% del ciclo) y la fase de balanceo (40% del ciclo). Una pierna está en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo y está en fase de balanceo cuando no contacta con el suelo. El apoyo simple se refiere al periodo cuando sólo una pierna está en contacto con el suelo; el periodo de doble apoyo ocurre cuando ambos pies están en contacto con el suelo simultáneamente.

Con el aumento de la velocidad de la marcha hay un aumento relativo en el tiempo gastado en la fase de balanceo, y con la disminución de la velocidad una relativa disminución. La duración del doble apoyo disminuye conforme aumenta la velocidad de la marcha. La ausencia de un período de doble apoyo es lo que diferencia correr de caminar.

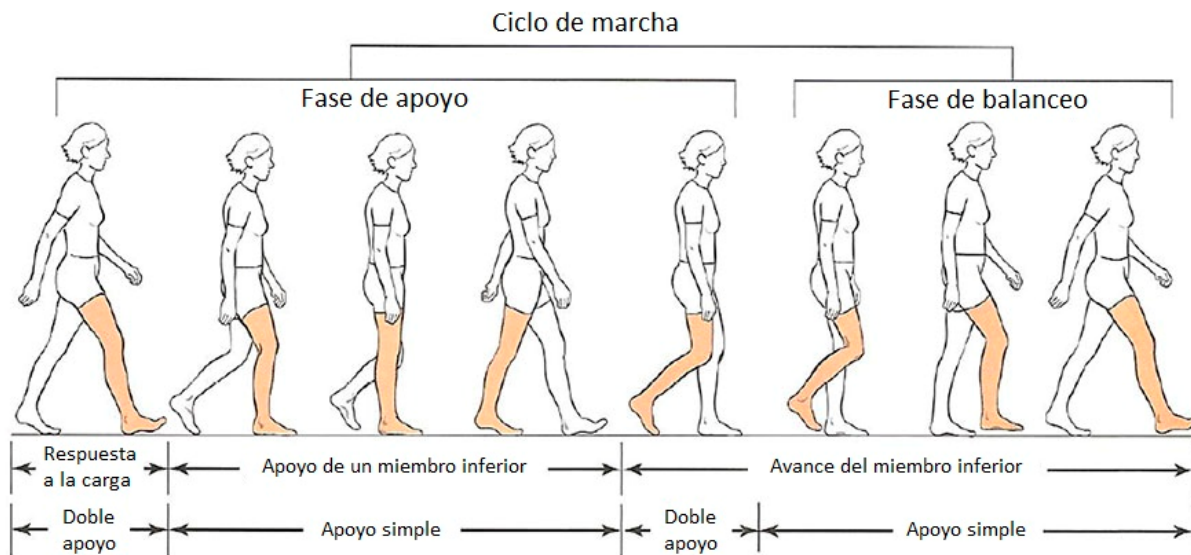


Figura 1.3.1 1

1.3.1.1 Fase de apoyo

La fase de apoyo puede dividirse de la siguiente manera:

- Contacto del talón: instante en que el talón de la pierna de referencia toca el suelo.
- Apoyo plantar: contacto de la parte anterior del pie con el suelo.
- Apoyo medio: ocurre cuando el trocánter mayor está alineado verticalmente con el centro del pie, visto desde un plano sagital.
- Apoyo terminal: ocurre cuando el talón se eleva del suelo.
- Despegue: ocurre cuando los dedos se elevan del suelo.

La fase de apoyo puede también dividirse en intervalos con los términos de aceptación del peso, apoyo medio y despegue. El intervalo de aceptación del peso empieza en el contacto del talón y termina con el apoyo plantar. El intervalo de apoyo medio empieza con el apoyo plantar y termina con el apoyo terminal del talón. El despegue se extiende desde el apoyo termina hasta el despegue de los dedos.

1.3.1.2 Balanceo

El balanceo puede dividirse de la siguiente manera:

- Balanceo inicial: se caracteriza por la rápida aceleración del extremo de la pierna inmediatamente después de que los dedos dejan el suelo.
- Balanceo medio: la pierna balanceada pasa a la otra pierna, moviéndose hacia delante de la misma, ya que está en fase de apoyo.
- Balanceo terminal: se da la desaceleración de la pierna que se mueve rápidamente cuando se acerca al final del intervalo.

1.3.2 Parámetros

Para analizar la marcha humana, se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- Ciclo de marcha: recorrido entre dos apoyos sucesivos de un mismo talón.
- Zancada: secuencia de acontecimientos que tiene lugar entre dos choques de talón consecutivos del mismo pie. La distancia media entre dos apoyos consecutivos del mismo pie se denomina longitud de zancada y es, en definitiva, la suma de las longitudes del paso izquierdo y del derecho.
- Velocidad de marcha: distancia que recorre el cuerpo hacia delante en la unidad de tiempo (por ejemplo, 1.5 m/s).
- Cadencia de marcha: ciclos o pasos por unidad de tiempo (120 pasos/min o 1 ciclo/s).
- Longitud de ciclo: distancia entre dos choques consecutivos de talón de un mismo pie.
- Longitud de paso: distancia entre ambos pies cuando contactan con el suelo.
- Amplitud de paso: distancia entre los centros de las huellas plantares.
- Ángulo interpodal: formado por el eje longitudinal del pie y la línea media de la progresión de la marcha.

1.3.3 Determinantes de la marcha

Durante la marcha, el movimiento que imprime el centro de gravedad es sinuoso y no rectilíneo, lo cual exige ciertos intercambios de energía: conversiones entre energía cinética y potencial y transferencias de energía entre segmentos.

Durante la fase de apoyo bipodal el centro de gravedad del tronco se encuentra en su posición más baja y presenta su máxima velocidad hacia delante, es decir, su energía potencial es mínima y su energía cinética máxima.

Tradicionalmente se han identificado seis mecanismos fundamentales de optimización de la marcha encaminados a la reducción de las oscilaciones que presentaría teóricamente el centro de gravedad del cuerpo. Estos seis mecanismos fundamentales son:

- Rotación pélvica en el plano transversal: la pelvis rota hacia delante en el plano horizontal 4° cada lado de la línea central, cuando el centro de gravedad está en el punto inferior de la trayectoria de la curva. Esta rotación permite que el desplazamiento vertical del centro de gravedad disminuya 1 cm. Para compensar, los brazos se mueven en sentido opuesto a los miembros inferiores y la cintura escapular gira en el sentido contrario a la pelviana.
- Inclinación pélvica: la pelvis desciende hacia el lado de la pierna en balanceo, mientras que la pierna que soporta el peso entra en aducción a medida que la pelvis se desplaza hacia ella. Este ligero desplazamiento sirve para reducir la elevación del centro de gravedad en 3 mm.
- Flexión de la rodilla durante la fase de apoyo: luego del apoyo de talón, la rodilla se flexiona unos 15° , lo cual desciende en otros 3 mm el centro de gravedad en su punto máximo.
- Ancho de la base de sustentación: en la marcha normal, la pelvis debe desplazarse horizontalmente para mantener su estabilidad en el apoyo medio. La estrecha base de sustentación, entre 5 y 10 cms reduce el desplazamiento lateral del centro de gravedad.
- Contacto mediante el talón y despegue mediante el antepié.
- Ligera angulación fisiológica en valgo de la rodilla: Persiguiendo una reducción del desplazamiento lateral del centro de gravedad.

Cuando se pierde cualquiera de estos 6 mecanismos fundamentales, se produce un aumento del gasto de energía.

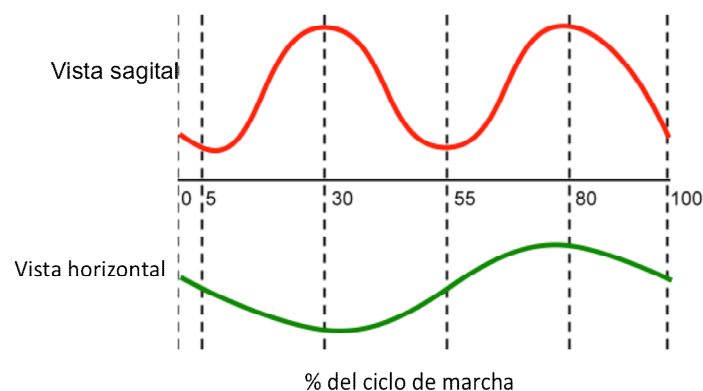


Figura 1.3.3 1

En un análisis de marcha, se estudian las posiciones angulares de los segmentos en cada uno de los planos: sagital, frontal y horizontal. Para las articulaciones de rodilla y tobillo estos movimientos en cada plano se conocen como flexo/extensión, abducción/aducción y rotación interna/externa. En la pelvis se llaman inclinación, oblicuidad y rotación interna y externa. Para el tobillo, dorsi/plantiflexión y progresión del pie. En la siguiente figura, se muestran los valores de referencia (franja gris) y los valores para el ciclo de marcha derecho (verde) e izquierdo (rojo) de un sujeto de prueba.

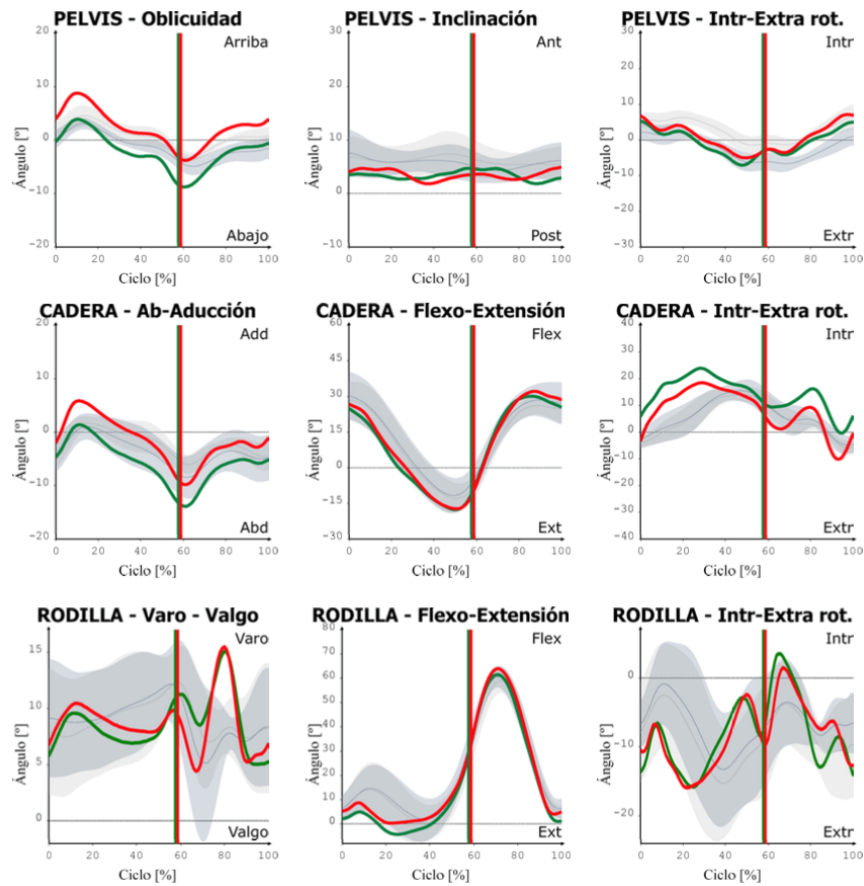


Figura 1.3.3 2

1.3.4 Cinética

Las fuerzas presentes durante la marcha son las de gravedad, inercia, contracción muscular y las de reacción del suelo, conocidas comúnmente como GRF por sus siglas en inglés (ground reaction force).

En un análisis cinético de marcha, se estudian las fuerzas de reacción producidas por el vector GRF en los tres ejes (vertical, medial-lateral y anteroposterior), los momentos articulares y la potencia muscular.

1.3.5 Potencia

La potencia durante la marcha se debe a la energía producida ($P > 0$) o absorbida ($P < 0$) en las articulaciones por la acción de los momentos internos (musculares) y externos (fuerza de reacción). Una potencia positiva se relaciona con contracciones musculares concéntricas, mientras que las negativas se deben a contracciones excéntricas.

En el análisis de marcha, la potencia se calcula como el producto $P = M\omega$, donde M es el momento articular y ω es la velocidad angular en [rad/s].

1.3.6 Flujo de potencia

La velocidad angular en una articulación es igual a:

$$P = M(\omega_{\text{proximal}} - \omega_{\text{distal}})$$

La ecuación de potencia podría escribirse entonces como:

$$P = M(\omega_{\text{proximal}} - \omega_{\text{distal}}) = M\omega_{\text{proximal}} - M\omega_{\text{distal}}$$

En otras palabras, el flujo de potencia muscular tiene dos componentes, una entregada o absorbida por el extremo proximal y otra entregada o absorbida por el extremo distal. Estos se llaman flujos activos porque son transmitidos de los músculos insertados al segmento en la articulación. Si el flujo proximal es igual al distal, $\omega_{\text{proximal}} - \omega_{\text{distal}} = 0$, no habrá potencia generada ni absorbida. En otras palabras el músculo se está contrayendo isométricamente y está únicamente transfiriendo de un segmento a otro. Por otro lado, si un segmento está fijo, habrá generación o absorción de potencia pero no transferencia.

1.3.7 Alteración de la marcha

Las causas que originan una marcha patológica pueden agruparse en 3 tipos:

- Anormalidades frecuentes: Acortamiento de miembro inferior, anquilosis o limitación de la amplitud articular, inestabilidad articular o marcha antiálgica.
- Déficits neurológicos de origen central: Hemiplejía, espasticidad, ataxia, parkinsonismo...
- Lesiones neurológicas periféricas: parálisis de extensores de cadera, de glúteo medio, de cuádriceps, isquiotibiales, flexores dorsales del pie o del tríceps sural.

1.4 - Análisis de la marcha (Gait Analysis)

El análisis de la marcha es el estudio sistemático de la locomoción, más específicamente el estudio del movimiento humano, utilizando el ojo y el cerebro de los observadores, aumentado por la instrumentación para medir los movimientos del cuerpo, la mecánica corporal y la actividad de los músculos. El análisis de la marcha se utiliza para evaluar y tratar a las personas con afecciones que afectan su capacidad para caminar. También se utiliza comúnmente en la biomecánica deportiva para ayudar a los atletas a correr de manera más eficiente e identificar los problemas relacionados con la postura o el movimiento en las personas con lesiones.

El estudio abarca la cuantificación (es decir, la introducción y el análisis de los parámetros mensurables de los avances), así como la interpretación, es decir, extrayendo varias conclusiones sobre el ser humano (salud, edad, tamaño, peso, velocidad, etc.).

1.4.1 - Proceso y equipo

El típico laboratorio de análisis de la marcha tiene varias cámaras (video y/o infrarrojo) colocadas alrededor de una pasarela o una cinta de correr, que están vinculados a una computadora. El paciente tiene marcadores ubicados en varios puntos de referencia del cuerpo (por ejemplo, espaldas ilíacas de la pelvis, tobillo maléolo y los cóndilos de la rodilla), o grupos de marcadores aplicados a la mitad de los segmentos corporales. El paciente camina por la pasarela o la cinta de correr y la computadora calcula la trayectoria de cada marcador en tres dimensiones. Se aplica un modelo para calcular el movimiento de los huesos subyacentes. Esto da una ruptura completa del movimiento de cada junta. Un método común es utilizar un conjunto de marcadores en la parte inferior del cuerpo, los cuales al efectuarse el movimiento se analizan analíticamente, y proporciona información de cada articulación.

Para calcular la cinética de los patrones de marcha, la mayoría de los laboratorios tienen transductores de carga montados en el suelo, también conocidos como plataformas de fuerza, que miden las fuerzas y momentos de reacción del suelo, incluyendo la magnitud, dirección y ubicación. La distribución espacial de las fuerzas puede medirse con equipos de pedobarografía. La adición de esto a la dinámica conocida de cada segmento del cuerpo permite la solución de ecuaciones basadas en las ecuaciones de Newton-Euler del movimiento permitiendo los cálculos de las fuerzas netas y de los momentos netos de la fuerza sobre cada unión en cada etapa del ciclo de la marcha. El método computacional para esto se conoce como dinámica inversa.

Sin embargo, este uso de la cinética no da como resultado información para los músculos individuales, sino para los grupos musculares, como los extensores o los flexores de la extremidad. Para detectar la actividad y la contribución de los músculos individuales al movimiento, es necesario investigar la actividad eléctrica de los músculos. Muchos laboratorios también utilizan electrodos de superficie unidos a la piel para detectar la actividad eléctrica o el electromiograma (EMG) de los músculos. De esta manera, es posible investigar los tiempos de activación de los músculos y, en cierto grado, la magnitud de su activación, evaluando así su contribución a la marcha. Se utilizan desviaciones de los patrones cinemáticos, cinéticos o EMG normales para diagnosticar patologías específicas, predecir el resultado de los tratamientos o determinar la eficacia de los programas de capacitación.

1.4.2 - Factores y parámetros

El análisis de la marcha es modulado o modificado por muchos factores, y los cambios en el patrón de marcha normal pueden ser transitorios o permanentes. Los factores pueden ser de varios tipos:

Extrínseco: terreno, calzado, ropa, carga

Intrínseco: sexo (masculino o femenino), peso, talla, edad, etc.

Físico: peso, estatura, físico

Psicológico: tipo de personalidad, emociones

Fisiológicos: características antropométricas, es decir, medidas y proporciones del cuerpo

Patológico: por ejemplo, trauma, enfermedades neurológicas, anomalías musculoesqueléticas, trastornos psiquiátricos.

Los parámetros tomados en cuenta para el análisis de la marcha son los siguientes:

- Longitud del paso
- Longitud de zancada
- Cadencia
- Velocidad
- Base dinámica
- Línea de progresión
- Ángulo del pie
- Ángulo de la cadera
- Ángulo de la rodilla
- Rendimiento en cuclillas

1.4.3 - Técnicas

El análisis de la marcha implica la medición donde se introducen y analizan parámetros mensurables, e interpretación, donde se extraen conclusiones sobre el sujeto (salud, edad, tamaño, peso, velocidad, etc.). El análisis es la medida de lo siguiente:

Temporal / espacial

Consiste en el cálculo de la velocidad, la duración del ritmo, el tono, etc. Estas mediciones se realizan a través de:

- Cronómetro y marcas en el suelo.
- Caminando sobre una estera de presión.
- Gama de sensores láser escaneando un avión a unos pocos centímetros por encima del piso.
- Sensores inerciales y software para interpretar giroscopios 3D y datos 3D acelerométricos.

Cinemática

La cronofotografía es el método más básico para registrar el movimiento. La iluminación estroboscópica a frecuencia conocida se ha utilizado en el pasado para ayudar en el análisis de la marcha en imágenes fotográficas individuales.

Películas o grabaciones de video utilizando imágenes de cámaras individuales o múltiples se puede utilizar para medir los ángulos de las articulaciones y velocidades. Este método ha sido ayudado por el desarrollo de software de análisis que simplifica en gran medida el proceso de análisis y permite el análisis en tres dimensiones en lugar de dos dimensiones solamente.

Los sistemas de marcadores pasivos, que utilizan marcadores reflectantes (típicamente bolas reflectantes), permiten una medición precisa de los movimientos utilizando cámaras múltiples (normalmente de cinco a doce cámaras), simultáneamente. Las cámaras utilizan luces estroboscópicas de alta potencia (típicamente rojo, infrarrojo cercano o infrarrojo) con filtros de coincidencia para registrar la reflexión de los marcadores colocados en el cuerpo. Los marcadores se localizan en puntos de referencia anatómicos palpables. Basándose en el ángulo y el retardo de tiempo entre la señal original y la señal reflejada, es posible la triangulación del marcador en el espacio. El software se utiliza para crear trayectorias tridimensionales a partir de estos marcadores que posteriormente reciben etiquetas de identificación. A continuación, se utiliza un modelo de ordenador para calcular ángulos de articulación a partir de las posiciones de marcador relativas de las trayectorias marcadas. Estos también se utilizan para la captura de movimiento en la industria cinematográfica.

Los sistemas de marcadores activos son similares al sistema de marcadores pasivos, pero utilizan marcadores "activos". Estos marcadores son disparados por la señal infrarroja entrante y responden enviando una señal correspondiente propia. Esta señal se utiliza entonces para triangular la ubicación del marcador. La ventaja de este sistema sobre el pasivo es que los marcadores individuales trabajan a frecuencias predefinidas y por lo tanto, tienen su propia "identidad". Esto significa que no se requiere ningún post-procesamiento de localizaciones de marcadores, sin embargo, los sistemas tienden a ser menos tolerantes para los marcadores fuera de vista que los sistemas pasivos.

Sistemas inerciales- (cameraless) basados en sensores inerciales MEMS, modelos biomecánicos y algoritmos de fusión de sensores. Estos sistemas de cuerpo completo o cuerpo parcial se pueden utilizar en interiores y exteriores independientemente de las condiciones de iluminación.

Captura sin marcadores

Los sistemas de captura de marcha sin marcadores utilizan una o más cámaras de color o sensores de profundidad 2.5D (es decir, Kinect) para calcular directamente las posiciones de las articulaciones del cuerpo a partir de una secuencia de imágenes. El sistema sin marcadores permite el análisis de la marcha humana no invasiva en un entorno natural sin ningún accesorio. La eliminación de marcadores puede ampliar la aplicabilidad de las técnicas de medición y análisis de la marcha humana, reducir considerablemente el tiempo de preparación y permitir una evaluación de movimiento eficiente y precisa en todo tipo de aplicaciones. Actualmente, el sistema principal sin marcador es la captura de

movimiento basada en video con cámara monocular o estudio de cámara múltiple. Hoy en día, el análisis de la marcha basado en sensores de profundidad para aplicaciones clínicas se hace cada vez más popular. Dado que los sensores de profundidad pueden medir la información de profundidad y proporcionar una imagen de profundidad 2.5D, han simplificado efectivamente la tarea de substracción de primer plano/fondo y han reducido significativamente las ambigüedades planteadas en la estimación de la pose humana monocular.

Cinética

Es el estudio de las fuerzas implicadas en la producción de movimientos.

Electromiografía dinámica

Es el estudio de patrones de actividad muscular durante la marcha.

1.5 - Software de desarrollo

El desarrollo de la aplicación se llevo a cabo mediante un software libre de código abierto, el cual permitió implementar todas las funciones para el procesamiento de las imágenes y generar una interfaz grafica amigable para el usuario.

La herramienta utilizada fue Qt en conjunto con la implementación de librerías de OpenCV bajo el lenguaje de programación C++.

1.5.1 - Introducción a QT



Figura 1.5.1 1

Qt es un framework multiplataforma, que se utiliza para el desarrollo de aplicaciones, está escrito en C++, sin embargo, es posible utilizarlo con otros lenguajes a través de bindings. Existen bindings de Qt para lenguajes como C#, PHP, Python, y Ruby, entre otros.

En un principio, Qt sólo ofrecía bibliotecas de código para la creación de interfaces gráficas de usuario. Ahora existen bibliotecas para muchas cosas más, como: base de datos, XML, multimedia, comunicación en red, OpenGL, etc.

Qt extiende el lenguaje C++, a través de macros y meta información, mientras se mantiene apegado a él. Algunas características que agrega a C++ son: Bucle foreach, sentencia forever e introspección.

El propósito de Qt es permitir a los desarrolladores construir aplicaciones multiplataforma a partir de una misma base de código de manera rápida y sencilla. Una aplicación Qt, es una aplicación nativa, por la tanto se ve y se siente como tal.

Qt provee un API sencilla y divertida de utilizar, permitiendo que los desarrolladores tengan una alta productividad ofreciendo herramientas potentes y sencillas.

Está compuesto por una serie de módulos que proveen funcionalidad específica a través de una biblioteca de clases multiplataforma. Aunque también existen algunos módulos específicos para cada plataforma, por ejemplo, QtDBus para comunicación entre procesos, exclusiva de Unix o QtAxContainer y QtAxServer para construir y utilizar componentes ActiveX, exclusiva de Windows.

Algunos de los módulos que forman Qt son:

- Bases de Datos - Qt SQL
- Core - Qt Core
- Comunicación en red - Qt Network
- Interfaz Gráfica de usuario - Qt GUI
- Multimedia - Phonon, Qt Multimedia
- Quick - Qt Declarative, QML
- Webkit - Qt Webkit
- XML - Qt XML

También provee poderosas herramientas de desarrollo, entre ellas destaca un completo entorno de desarrollo, llamado Qt Creator, que incluye un editor de texto con autocompletado, diseñador de interfaces gráficas, gestión de proyectos, sistema de depuración, integración con sistemas de control de versiones y muchas más características. Se utiliza además en una amplia variedad de dispositivos, algunos de ellos son: computadoras de escritorio, teléfonos celulares, lectores electrónicos, impresoras, máquinas de café, computadoras de automóvil, etc.

1.5.2 - Introducción a OpenCV



Figura 1.5.2 1

Open Source Computer Vision (OpenCV) es una librería de programación de código abierto dirigida principalmente a la visión por computador en tiempo real, desarrollada por la división rusa de Intel en el centro de Nizhni Nóvgorod. Su uso es gratuito bajo la licencia open source BSD.

Esta librería es multiplataforma. Está optimizada para ser usada en procesadores Intel. También cuenta con apoyo de SIMD, optimizaciones OpenMP, optimizaciones para Intel TBB (Threading Building Blocks) y a partir de la versión 2.4.8 apoya instrucciones vectoriales NEON para sistemas ARM.

OpenCV permite desarrollar en C, C++ o Python y es compatible con el IDE QT Creator y sus correspondientes librerías QT.

Contiene aproximadamente 500 funciones que abarcan muchas áreas de CV, incluyendo inspección de productos de fábricas, escaneo médico, seguridad, interfaces de usuario, calibración de cámaras, robótica, etc.

También consta de una completa librería de uso general de aprendizaje automático (MLL: Machine Learning Library), la cual es muy útil para cualquier problema de aprendizaje automático. Esta sublibrería está especializada en el reconocimiento estadístico de patrones y clustering.

OpenCV tiene una *estructura modular*, cuyos módulos principales se listan a continuación:

- **Core:** es el módulo básico. Incluye las estructuras de datos básicas y las funciones básicas de procesamiento de imágenes. También es usado por otros módulos como highgui.
- **Highgui:** provee interfaz de usuario, códecs de imagen y vídeo y capacidad para capturar imágenes y vídeo, además de otras capacidades como la de capturar eventos del ratón, etc.
Si se necesita capacidades de UI (User Interface) más avanzadas se deberá usar frameworks tales como Qt, WinForms, etc.
- **Imgproc:** contiene algoritmos básicos de procesado de imágenes, incluyendo filtrado de imágenes, transformado de imagen, etc.
- **video:** este módulo de análisis de vídeo incluye algoritmos de seguimiento de objetos, entre otros.
- **objdetect:** incluye algoritmos de detección y reconocimiento de objetos para objetos estándar.

1.6 - Área de trabajo

El crecimiento y la evolución del PDI en estos últimos años le ha permitido insertarse en diferentes áreas logrando resultados concretos y superadores.

Una de las áreas donde más se ha desarrollado es en la medicina, permitiéndole a los especialistas un análisis confiable, seguro y eficiente, obligándolos a dejar atrás ciertos métodos anticuados y poco prácticos.

Si a lo antes mencionado le sumamos los poderosos software de desarrollo que existen hoy en día, se pueden lograr aplicaciones que resultan indispensables para los profesionales en su lucha por la evolución y la competencia entre pares.

Buscando otra área en la cual aprovechar el PDI que a su vez esté relacionada con la medicina, caemos indefectiblemente en la deportología, una ciencia que no solo se preocupa en la sanación de las lesiones corporales sino que también se encarga de comprender de qué modo nuestro organismo reacciona ante las exigencias físicas extremas o competitivas.

De este modo se logra identificar dos grandes áreas con alto potencial para llevar a cabo la implementación del producto desarrollado.

1.6.1 - Introducción al mercado

Desde la antigüedad hasta la actualidad el análisis biomecánico del cuerpo humano se viene realizando mediante métodos poco prácticos y primitivos. La utilización de las nuevas tecnologías ha quedado limitada para un sector reducido con alto poder adquisitivo.

El elevado costo y la complejidad de la mayoría de las herramientas que utilizan PDI hacen dificultosa la incursión de los jóvenes que dan sus primeros pasos en la profesión, como así también de las generaciones más grandes de especialistas.

Evaluando en detalle el mercado actual se pudo apreciar que el mayor porcentaje de las aplicaciones que utilizan estas tecnologías son desarrolladas en Estados Unidos, España y México con costos que superan los 8000 U\$s (arriba de los \$140000).

1.6.1.1 - Competencia extranjera

• Simi



Figura 1.6.1.1 1

Simi Reality Motion Systems ha desarrollado la aplicación Simi Aktisys 2D la cual puede realizar análisis de movimiento dinámico en tiempo real u obteniendo la información de archivos de videos. Para ello implemento un sistema de marcadores LED de diferentes colores que definen al sistema los puntos de interés a analizar. Para su correcto funcionamiento requiere de una cámara de alta velocidad.

La aplicación permite medir ángulos, distancias, ejes y otros parámetros. Simi también desarrollo la versión de Aktisys 3D la cual requiere de una segunda cámara adicional, que se calibra junto con la primera para generar datos en tres dimensiones.

Como requisito básico, Simi requiere un sistema operativo Windows 7 y su entorno grafico se encuentra disponible únicamente en lenguaje Ingles.



Figura 1.6.1.1 2

• TEMPLO

Templo es una aplicación realizada por Contemplas, una empresa alemana que permite desarrollar un análisis completo de la marcha humana, para luego plasmarla en un informe detallado del paciente. Esta aplicación no está preparada para trabajar en tiempo real, es por eso que utiliza archivos de videos para levantar los datos de interés.

La aplicación permite llevar una base de datos con toda la información importante de los pacientes.

Templo permite integrar un numero interesante de cámaras, sensores de EMC y sensores de fuerza y presión, los cuales aportan datos extras en el análisis.



Figura 1.6.1.1 3

1.6.1.2 - Competencia nacional

• Kinien

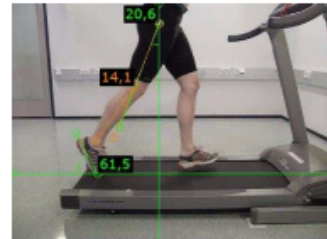
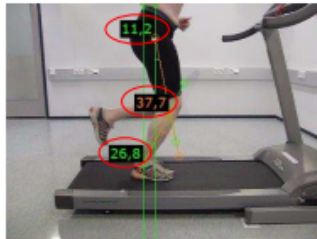
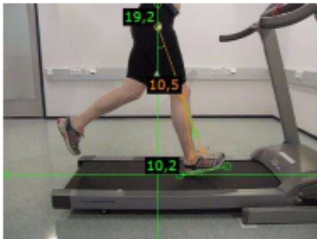
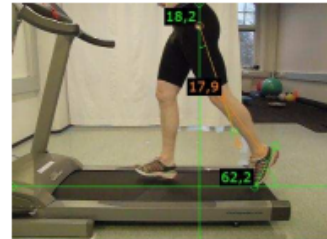
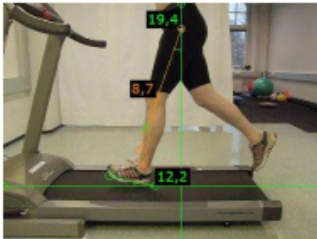
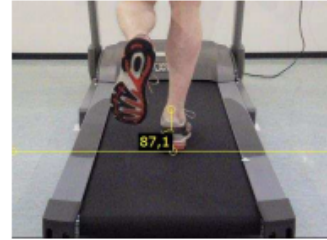
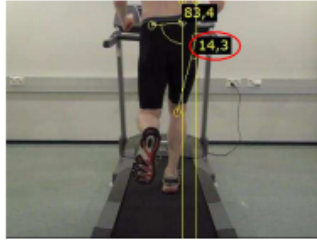
Kinien se forjó con el propósito de hacer que la biomecánica sea una herramienta posible y cotidiana. Una herramienta que ayude a avanzar a la profesión en la investigación, el tratamiento y la prevención de lesiones, de manera accesible a los profesionales.

Funciones Biomecánicas y Kinephy comenzaron a desarrollar una red de Laboratorios que se extienden por todo el país y el exterior. El objetivo del Sistema Kinien es poner al alcance de deportistas y pacientes la herramienta del análisis biomecánico más allá del lugar donde se encuentren.

Los centros Kinien registran las imágenes y las envían al Laboratorio Central. Funciones Biomecánicas se encarga del procesamiento de las mismas, la elaboración del informe y la confección del programa de ejercicios, de esta manera avalan los resultados. Además entregan la cámara específica para tomar las imágenes, se instala el programa que lo conecta con la red y los elementos necesarios para llevar adelante los programas de ejercicios.

El profesional debe aportar el espacio físico para la instalación del laboratorio, una cinta ergométrica y la iluminación requerida para la filmación.

Para adherirse al sistema se debe abonar un valor inicial de 2000 u\$s que incluyen la capacitación, y las herramientas necesarias para la elaboración del estudio. A partir de allí Funciones Biomecánicas a través de la empresa Kinephy cobra por cada estudio que el usuario envíe para analizar un monto de 40 u\$s.



1.6.1.3 - Otras tecnologías

• OptoGait (Tecnología Led)

Creada por Microgate una empresa multinacional, OptoGait es sistema de obtención óptica de datos, compuesto de una barra óptica transmisora y una receptora.

Cada una contiene 96 leds Infrarrojos (1,041 cm resolución). Estos leds están ubicados sobre la barra transmisora y se comunican continuamente con los leds ubicados en la barra receptora. El sistema detecta eventuales interrupciones y su duración.

Esto permite la medición de los tiempos de vuelo y de contacto durante la ejecución de una serie de saltos, con una precisión de 1/1000 de segundo. Partiendo de esta base de datos fundamentales, el software permite la obtención, con gran precisión y en tiempo real, de una serie de parámetros relacionados al rendimiento de un atleta.

La ausencia de partes mecánicas en movimiento garantiza una gran precisión y fiabilidad. Además gracias a pequeñas cámaras, cuya ubicación puede ser elegida libremente por el usuario, permite registrar las imágenes de las evaluaciones realizadas, sincronizándolas con los datos obtenidos. De esta forma es posible aprovechar las ventajas de una verificación cruzada entre datos e imágenes, y así mismo, es posible realizar un análisis profundo de los videos, gracias a las funciones especiales del software.

Los videos y todo lo demás es almacenado en una base de datos la cual permite su consulta en cualquier momento.



Figura 1.6.1.3 1

- **Strideway (Plataforma de presión modular)**

Strideway es la primera plataforma de medición de presión modular en la industria. Fue creada por Tekscan, una empresa estadounidense y es capaz de realizar el análisis de la marcha con un cálculo automático de los parámetros de la marcha y un índice de simetría para una fácil comparación de la simetría bilateral. Permite identificar rápidamente las asimetrías, las anomalías y la efectividad del tratamiento con puntos de vista objetivos sobre la marcha.

Proporciona información objetiva sobre la fuerza y la presión plantar, más los parámetros temporales y espaciales.

Para esto se utiliza una plataforma de medición de presión modular, compuesta por azulejos que en conjunto brindan la información necesaria para realizar un análisis completo de la marcha.



Figura 1.6.1.3 2

2 - Desarrollo

2.1 - Diagrama de bloques

En esta sección se detallarán cada uno de los bloques que componen el sistema.

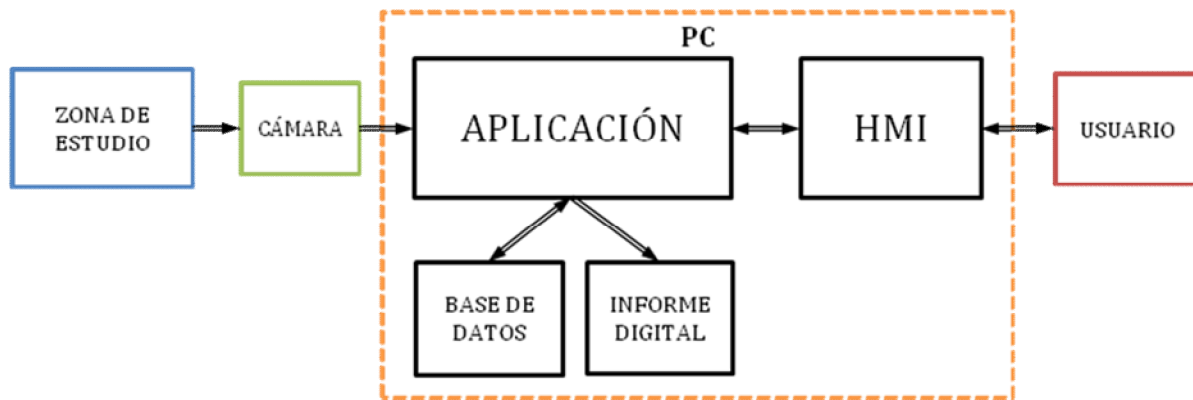


Figura 2.1 1

2.1.1 - Zona de estudio

Definimos como zona de estudio el área física en la cual se realizarán las pruebas con el paciente, que serán captadas por la lente de la cámara para ser posteriormente procesadas.

Esta área es de suma importancia ya que de su conformación dependerá la calidad de las imágenes y por ende la eficacia de la aplicación para relevar los datos del paciente.



Figura 2.1.1 1

Algunos puntos a tener en cuenta para obtener imágenes de calidad son los siguientes:

- **Fondo:** Para evitar interferencias y falsas lecturas es muy recomendable que el fondo de la zona de estudio sea de un color uniforme, evitando colores que puedan confundirse con los "puntos de interés". Uno de los colores más utilizados para el fondo en el procesamiento digital de imágenes es el azul y sus variedades.
- **Iluminación:** la luz es un factor fundamental al momento de capturar imágenes con una cámara. De ésta dependerá en gran medida la calidad de la misma.

Aunque la luz es un sujeto muy complejo con numerosas características físicas como difracción, dispersión, interferencia, reflexión, refracción o polarización, nos enfocamos a continuación en el estudio de cuatro propiedades de la luz que son fundamentales para la captura de imágenes con una cámara:

A. Cantidad

Las imágenes tomadas por una cámara dependen esencialmente de la luz. En una escena totalmente oscura la imagen es imposible, solamente aparecerá un cuadro negro. Por otra parte, si hay demasiada luz se sobre-expondrá de tal modo que todo lucirá en color blanco sin gradación tonal alguna. En conclusión: la cantidad de luz puede arruinar una imagen, tanto si es mucha como si es poca.

B. Calidad

La segunda propiedad de la luz tiene también un gran impacto en la percepción de la escena. La cantidad implica qué tan brillante es la escena, pero la calidad implica comprender el impacto que tiene si la fuente de luz genera un haz luminoso concentrado o uno difundido.

La luz, cuando está concentrada, genera un tipo de luz que podría denominarse *dura* y puede identificarse por la clara definición de las sombras. La "escopeta de fotones" impacta al sujeto desde un haz de luz concentrado que genera grandes contrastes.

Sin embargo, cuando tenemos el caso de las pelotas de ping-pong que se dispersan tenemos un tipo de luz conocida como *difusa* que es mucho más uniforme y suave, donde no hay sombras tan claramente definidas y el origen direccional de la luz es más difícil de identificar.

C. Dirección

Una propiedad que influye directamente en la ilusión del volumen es la dirección. Al leer una escena siempre debemos preguntarnos cuál es la cualidad de la luz (dura o difusa) si hay luz suficiente (cantidad) pero también cuál es la dirección de la luz, desde dónde viene.

Se pueden identificar varias direcciones de la luz:

C.1. Luz frontal

La luz frontal ilumina perfectamente la escena, es la dirección que ofrece mayor información y de ahí viene su uso en la fotografía de identificación como en el caso de un pasaporte o carnet de conducir.

C.2. Contraluz

Cuando la luz apunta directamente hacia la cámara y es iluminado desde atrás se obtiene un contraluz. Puede ser un tipo de luz muy interesante con el cual trabajar, ya que genera un profundo contraste entre las luces y la sombras.

C.3. Luz lateral

De todas las direcciones de la luz, cuando impacta lateralmente al sujeto realza el volumen y las formas. Esta luz dirige la atención del observador a la textura, la forma o el volumen.

C.4. Luz cenital

Una de las direcciones de la luz más comunes es de arriba hacia abajo. La dirección cenital (la fuente de luz se encuentra en el cenit) es típica del sol a medio día y sin nubes o de una bombilla o lámpara colocada en el techo de una habitación. Este tipo de luz puede no favorecer a la identificación de rostros humanos.

D. Color

En la fotografía en blanco y negro no puede apreciarse el color original de la luz, pero éste es una parte esencial. Dependiendo de la longitud de onda de la luz tendrá un color específico porque la luz "consiste de color." La luz puede tener una dominante de color específica. Por ejemplo la luz de una vela es muy amarilla, en el caso de una lámpara fluorescente el resultado será verdoso. A veces la coloración es muy sutil, pero en fuentes de gas como es el caso de las luminarias utilizadas en alumbrado público la dominante puede ser muy agresiva.

Aunque el impacto del color de la luz es relativo en la fotografía monocromática cuando se realiza a color es de gran importancia. El principal impacto del color de la luz está más en lo denotativo (el color objetivo que domine en la escena). El color de la luz se mide en grados Kelvin (°K) y es una escala que parte de la idea de calentar una pieza metálica. La luz blanca (neutra) estará en el orden de los 5500°K, la amarilla luz de tungsteno en el orden de los 3200°K a los 3400°K.

- **Distancia entre cámara y objetivo:** la distancia entre la cámara y el paciente que va a ser estudiado juega un papel importante en los datos que integran el informe, es por ello que deberá ser parte de una de las variables que requiere la aplicación para lograr mayor exactitud en los cálculos.

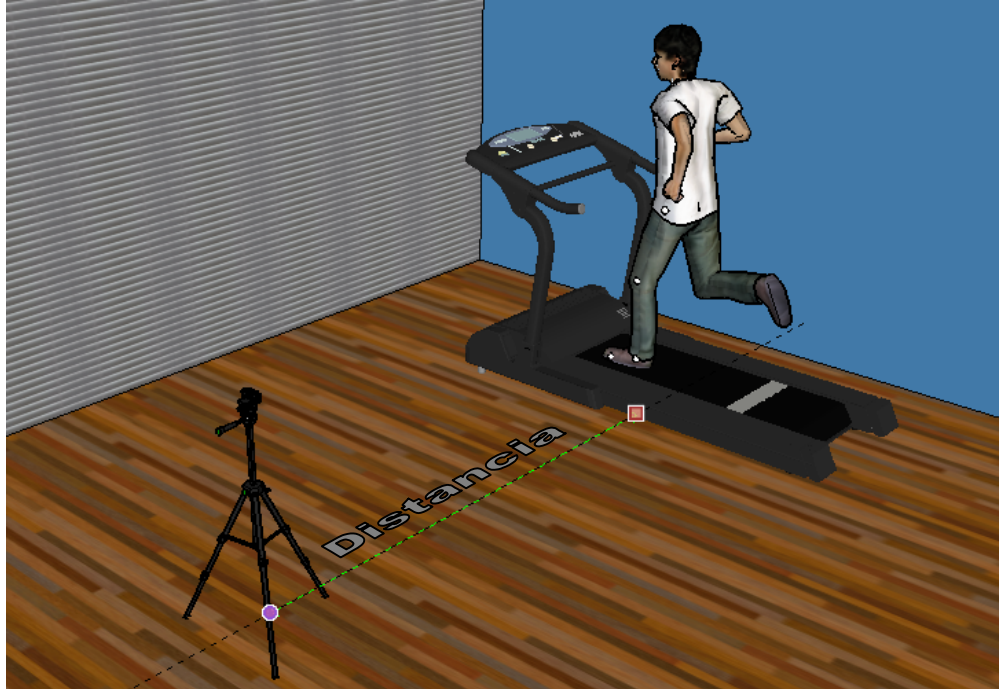


Figura 2.1.1 2

- **Vestimenta:** La vestimenta del paciente al igual que el fondo del área de trabajo pueden generar ruido en las imágenes captadas por la cámara, por esto es recomendable despojar al sujeto de prendas cuyo color puedan confundirse con los "puntos de interés". Lo más práctico en este tipo de situaciones es contar con un traje símil neoprene o calza de color solido en el cual se pueden adherir las marcas en cada una de las articulaciones a analizar, obteniendo de esta manera una imagen nítida y libre de ruido.

2.1.2 - Cámara

Cuando hablamos de PDI, una de las piezas más importantes, sino la fundamental, es la cámara ya que de ésta se obtendrán las imágenes que van a ser posteriormente procesadas.

Las características principales de una cámara son las siguientes:

- **Resolución:** número de puntos (pixels) activos que tiene el sensor de la cámara. Se corresponden aproximadamente con el número de puntos de la imagen una vez tomada. En la actualidad la mayoría de las cámaras tienen una resolución alta (12 megapíxeles o más).

- **Tamaño del sensor:** a igualdad de condiciones, un sensor más grande va a tener un mejor rendimiento en cuanto a sensibilidad y calidad de imagen. Las cámaras profesionales tienen un sensor denominado **Full Frame (FF)** que se corresponde aproximadamente con el tamaño de la película fotográfica: 36 x 24 mm. Las réflex de iniciación y gama media suelen tener un sensor **APS-C** (aprox. 23 x 15 mm).
- **Sensibilidad (ISO):** este parámetro hace referencia a la capacidad de la cámara de hacer fotos con escasa luz y alta velocidad de obturación. Se mide en una escala ISO: 80, 100, 400, 800. En las cámaras digitales la sensibilidad está relacionada con el ruido, a mayor ISO mayor ruido. Lo importante es que una cámara pueda hacer fotos a un ISO alto con una calidad aceptable.
- **Sensibilidad máxima (Max. ISO):** el valor máximo de sensibilidad al que se puede configurar la cámara (valor más alto de ISO). Cuanto más alto, más sensibilidad de la cámara. Pero a efectos prácticos el límite lo pone la cantidad de ruido y por tanto la calidad de la imagen.
- **Profundidad de color:** esta característica mide la capacidad de la cámara (sensor) de distinguir diferentes tonos o colores. Se mide en bits y lo que realmente interesa no es la profundidad de color teórica, sino el número real de colores que detecta la cámara.
- **Rango dinámico:** mide la diferencia en una fotografía entre los tonos oscuros y los claros. Dicho de otra forma, si una escena contiene zonas en sombra y zonas muy iluminadas, un rango dinámico alto indica que la cámara es capaz de guardar información de las dos zonas. Si tiene un rango dinámico bajo, una de las dos zonas (bien la oscura, bien la iluminada) perderá todo detalle.
- **Enfoque automático (AF):** cuantos más puntos de enfoque tenga una cámara más fácil y rápido será el proceso de enfocar cualquier elemento de la escena.
- Los puntos de enfoque simples detectan el desfase bien en elementos horizontales o en elementos verticales de la escena. Los puntos de enfoque en cruz (*cross-type* AF points) permiten usar a la vez las dos dimensiones para conseguir un enfoque más rápido y fiable.
- Por lo tanto cuantos más puntos de enfoque en cruz, mejor será la cámara en cuanto a velocidad de enfoque. Por ejemplo esto es importante para fotografiar eventos deportivos, animales (aves en vuelo por ejemplo) y en general escenas en movimiento.
- **Velocidad de obturación (shutter speed):** la velocidad máxima de obturación (tiempo mínimo de exposición). Importante sobre todo para capturar escenas con movimientos muy rápidos. Las de gama baja e intermedia suelen tener un tiempo de exposición mínimo de 1/4000 (0.25 milésimas de segundo).

En el desarrollo del proyecto se utilizaron diferentes cámaras (del tipo WebCam) logrando en todos los casos resultados aceptables, pero para reducir el ruido y mejorar la calidad de imagen se eligió una cámara de marca Logitech modelo C920 HD, la misma cuenta con las siguientes características:

Calidad de video: Full HD 1080p = 1920x1080 pixeles = 2073600 pixeles = 2MP

Calidad de imagen: 15 MP

Resolución Óptica: 3MP

Resolución Software: 15MP

Campo de visión diagonal (FOV) : 78°

Longitud focal: 3.67 mm

Frecuencia de fotogramas (máx) : 1080p - 30fps - 33,33 ms

Autoenfoco (AF): Si



Figura 2.1.2 1

2.1.3 - Aplicación



Figura 2.1.3 1

Como se mencionó en la introducción, la aplicación fue desarrollada mediante dos poderosas herramientas llamadas QT y OpenCV, ambas de licencia libre.

QT fue utilizada para crear la base y el entorno gráfico de la aplicación y OpenCV fue la clave en el procesamiento digital de las imágenes. Ambas permitieron darle forma a la que denominé BioCam 1.0.

Para facilitar la explicación del funcionamiento de BioCam se utilizará el siguiente diagrama de flujo:

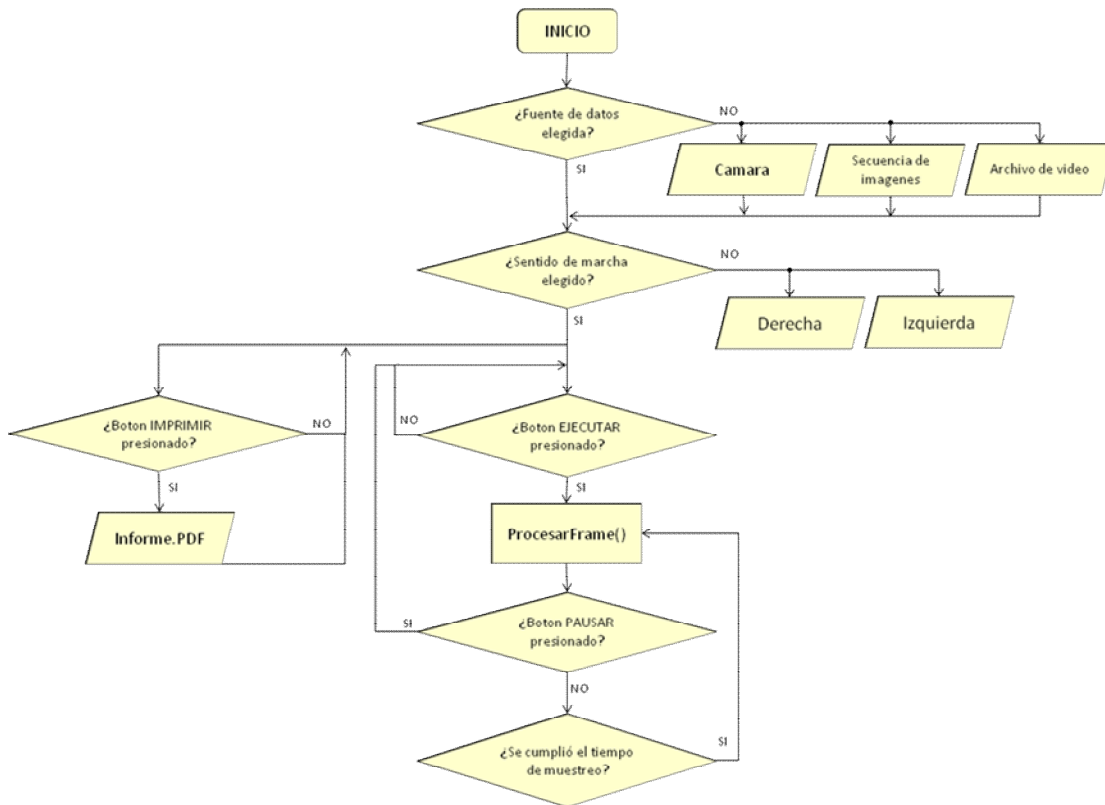


Figura 2.1.3 2

2.1.3.1 - Fuente de datos

La aplicación da la posibilidad de elegir entre 3 fuentes distintas de datos: cámara (procesamiento en tiempo real), secuencia de imágenes y archivo de video.

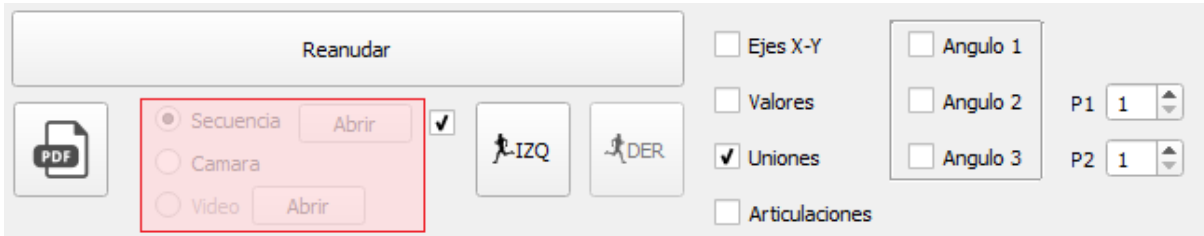


Figura 2.1.3.1 1

- **Cámara**
La aplicación es capaz de obtener los datos desde una cámara de video y procesarlos en tiempo real para obtener los resultados al instante.

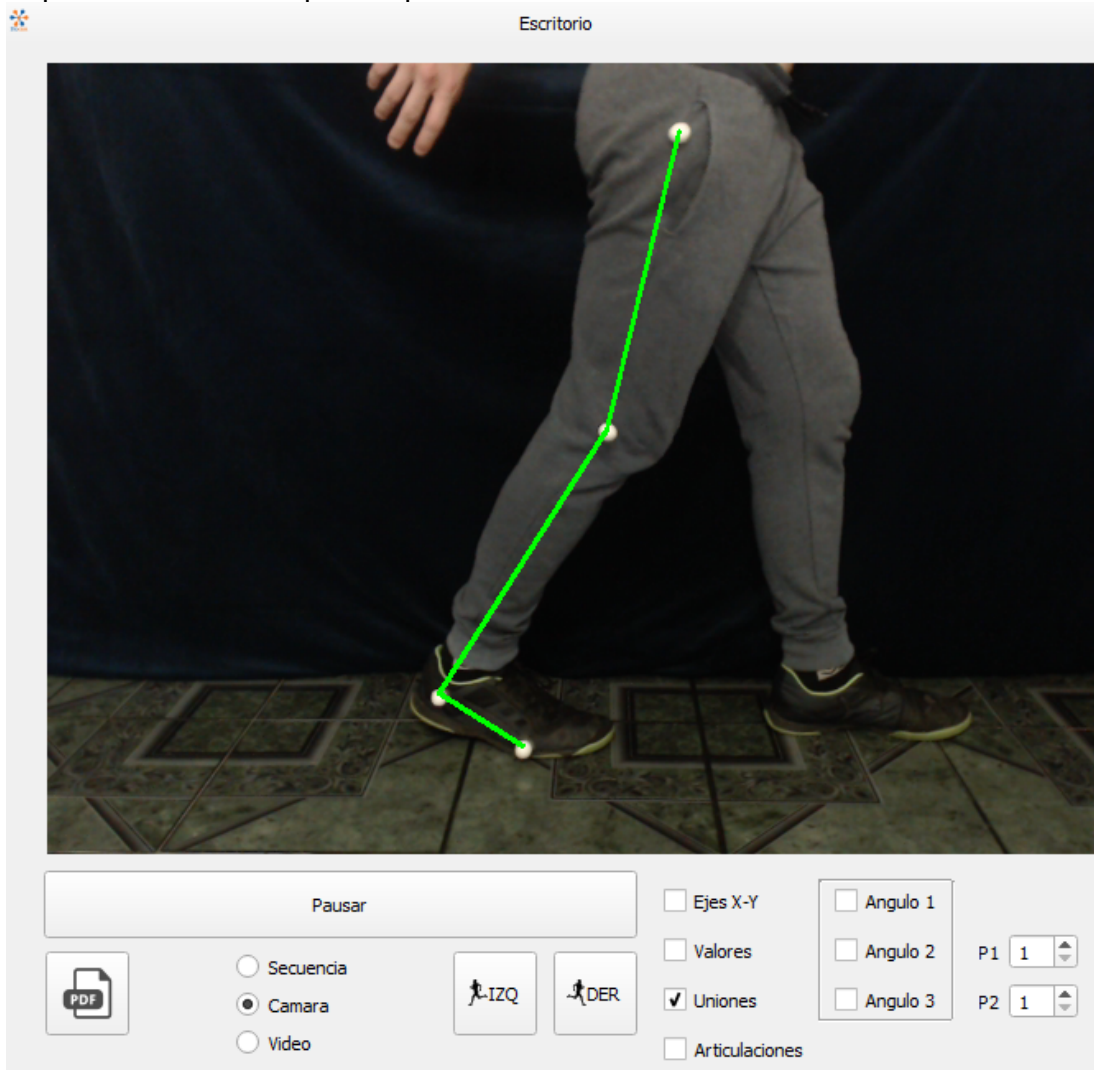


Figura 2.1.3.1 2

- Secuencia de imágenes
La aplicación permite procesar una secuencia de imágenes obteniendo los datos de cada una de las imágenes que la componen.

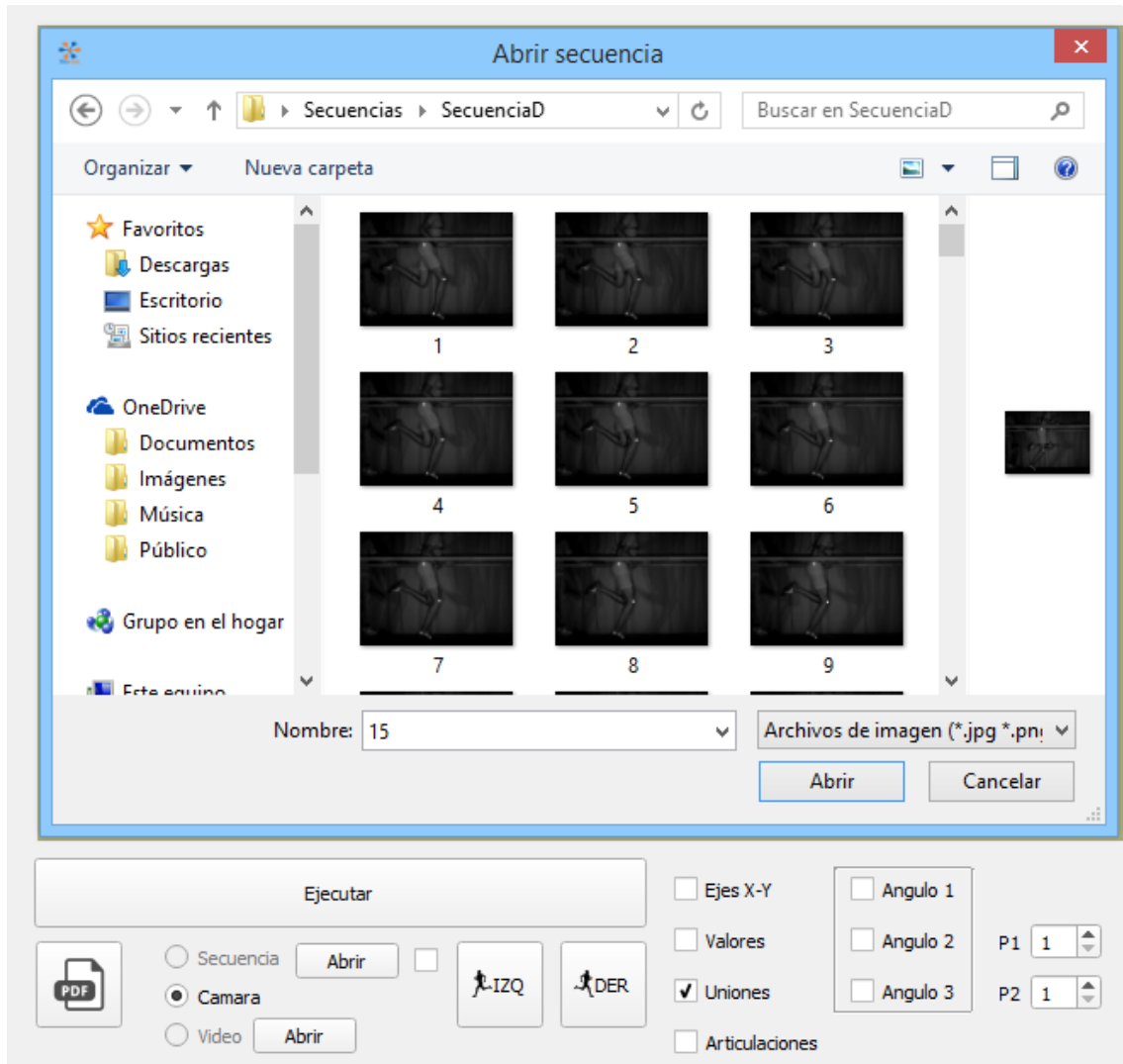


Figura 2.1.3.1 3

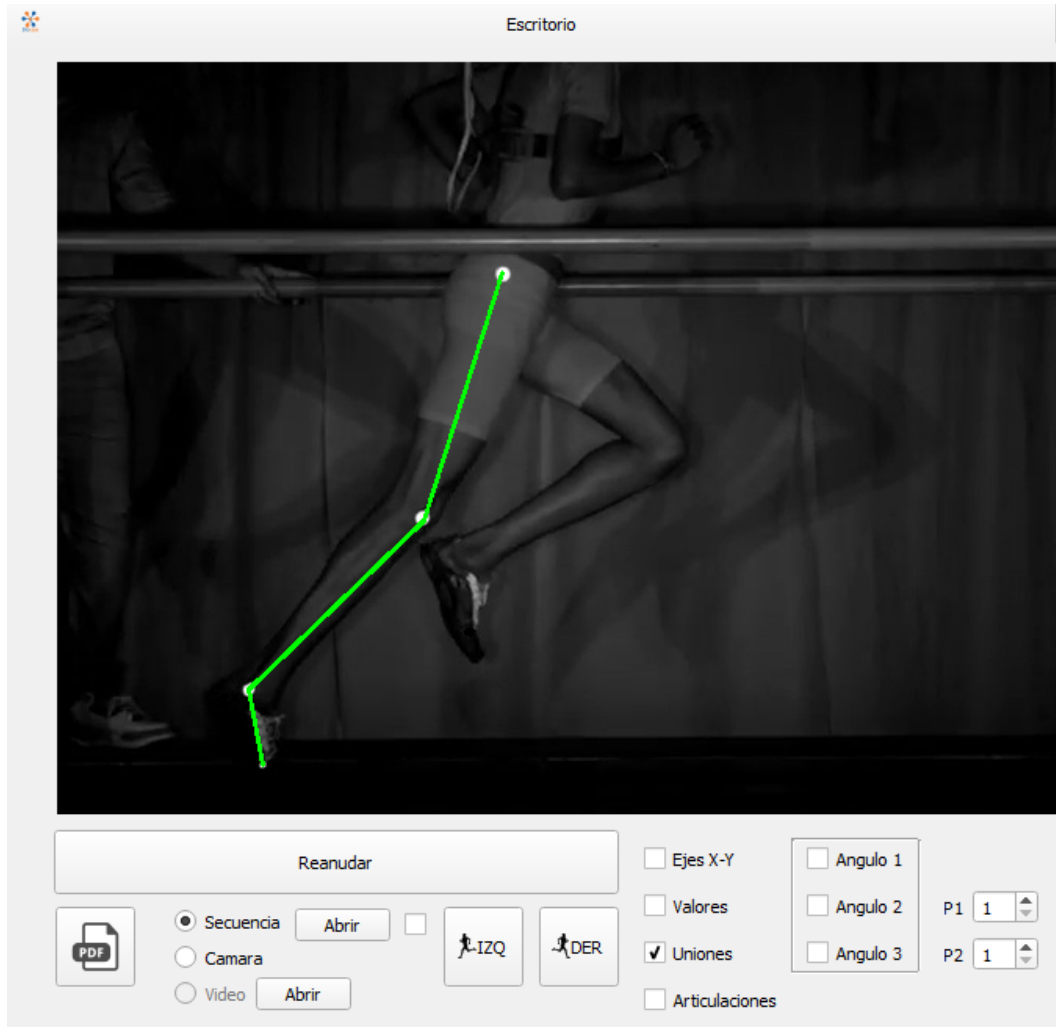


Figura 2.1.3.1 4

- Archivo de video
La aplicación permite procesar un archivo de video obteniendo los datos de cada uno de los frames que componen el archivo.

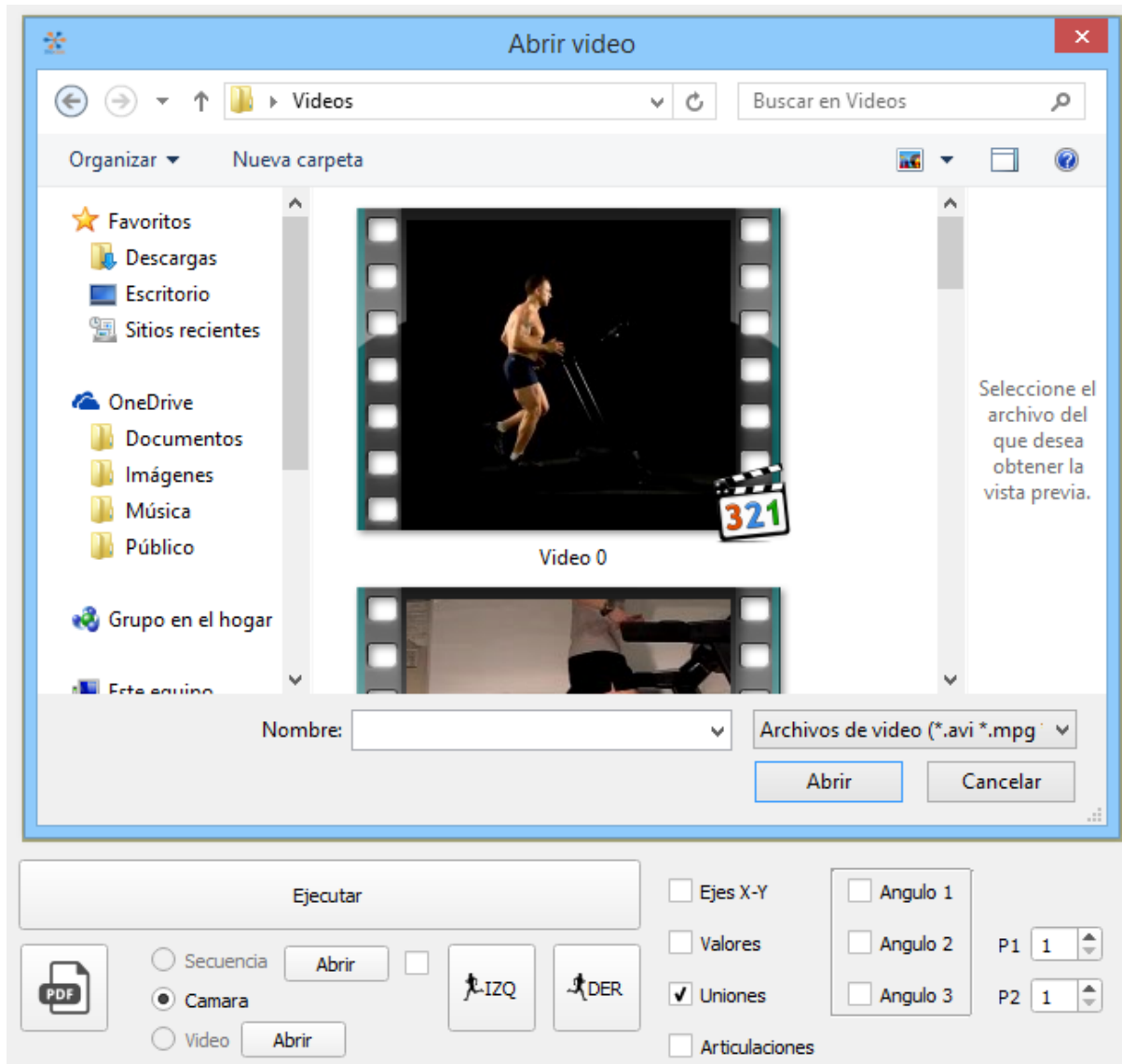


Figura 2.1.3.1 5

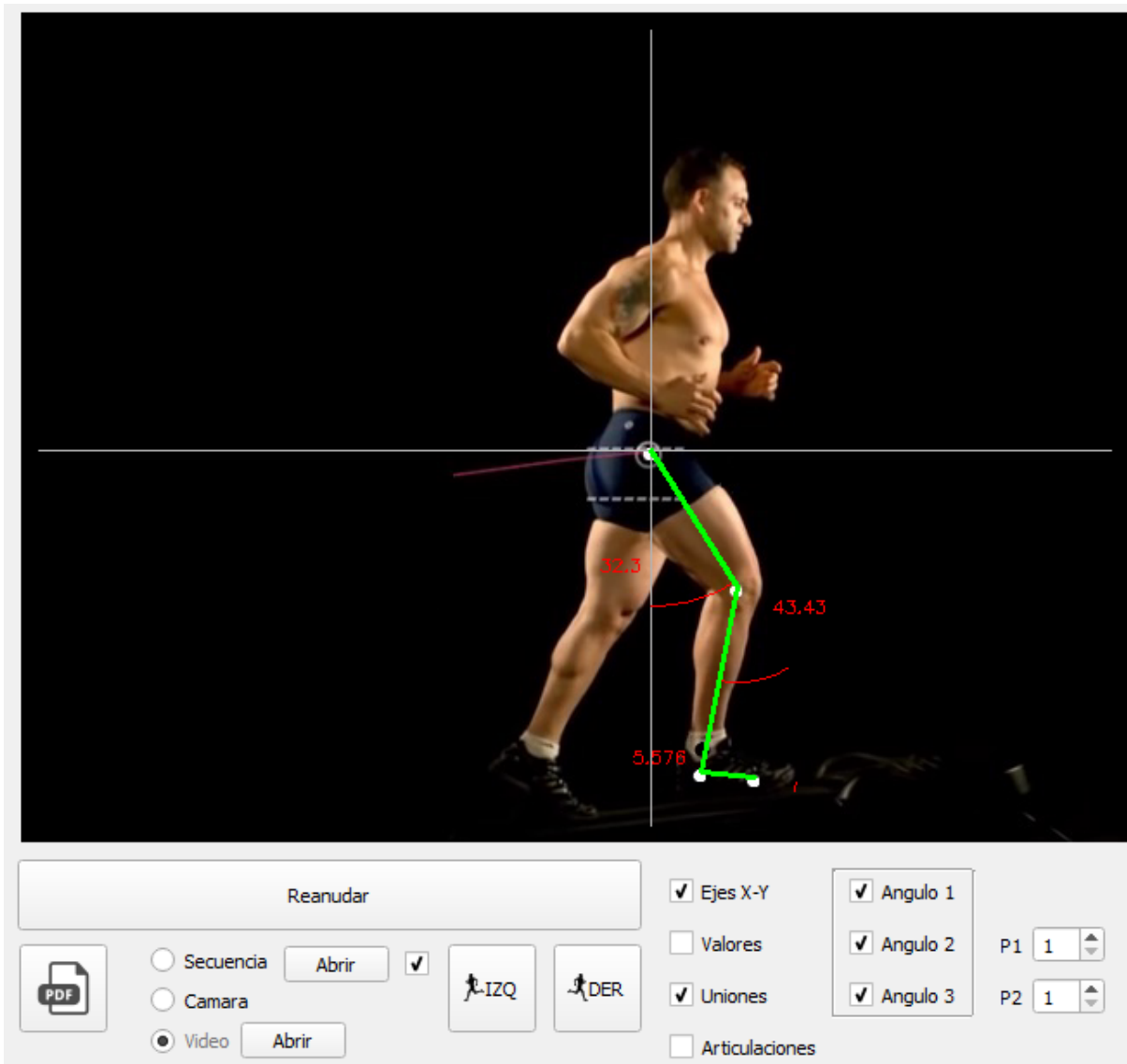


Figura 2.1.3.1 6

Para la selección de la fuente de datos, la aplicación cuenta con tres RadioButton, los cuales están asociados a tres funciones que serán las encargadas de verificar, definir y preparar las imágenes para que luego sean procesadas por la función principal ProcesarFrame().

En el caso de la secuencia de imágenes y del archivo de video, se requiere que el usuario defina primero la ubicación de los mismos en el ordenador, es por ello que ambos tienen asociado un botón de "Abrir" el cual disparará una pantalla de diálogo para que se determine la ruta origen de los archivos. Esta pantalla de diálogo cuenta con un filtro para archivos .AVI, .MP4 y .MPG en el caso de los archivos de video y un filtro para archivos .JPG, .PNG y .TIF para la secuencia de imágenes, evitando de esta manera errores por la lectura de archivos indeseados.

En caso de generarse un fallo en la lectura de un archivo, ya sea por estar dañado o por algún otro motivo, la aplicación dará aviso y quedará a la espera de una nueva fuente de datos.

En esta sección del programa juega un papel fundamental la función VideoCapture de la librería OpenCV.

2.1.3.2 - Sentido de marcha

Una vez elegida la fuente de datos, la aplicación nos da la posibilidad de elegir el sentido de marcha: hacia la derecha o hacia la izquierda. Esto será tenido en cuenta por la función principal para el cálculo de los ángulos y la confección de los gráficos, entre otros.

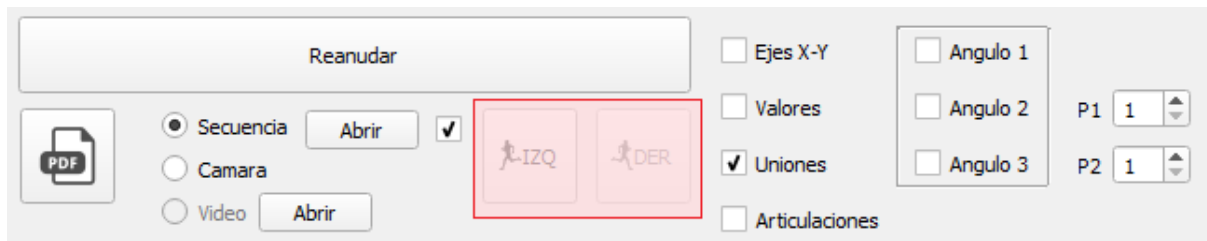


Figura 2.1.3.2 1

2.1.3.3 - Botón Ejecutar/Pausar

El botón ejecutar es el que da comienzo al procesamiento digital de las imágenes. Al presionarlo, se realiza un llamado a una función, que se encargada de determinar el intervalo de muestreo de la función principal ProcesarFrame().

Además de esto, guarda en una base de datos la última configuración utilizada por el usuario, para ello se utilizan una serie de variables que contienen cada una de las variantes del programa.

A través de este botón se puede pausar y reanudar cuantas veces se quiera el procesamiento de las imágenes en la aplicación.

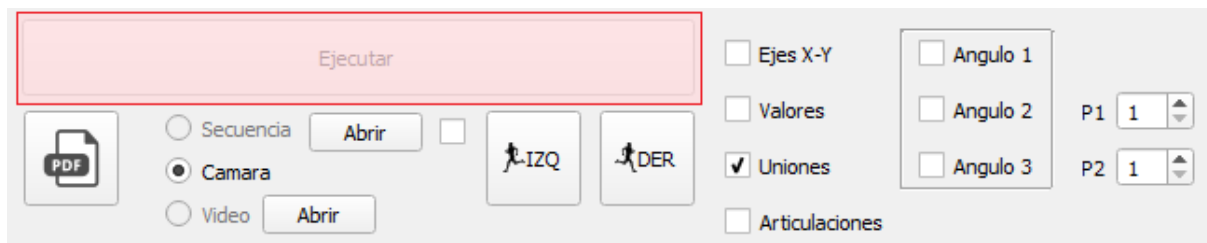


Figura 2.1.3.3 1

En esta sección del programa, se hacen relevantes tres importantes clases de QT: QTimer, QSqlDatabase y QSqlTableModel.

La clase QTimer proporciona una interfaz de programación de alto nivel para temporizadores. A través de ella se logró conectar la señal de un temporizador con la función ProcesarFrame(), para conseguir un muestreo a una frecuencia imperceptible para el ojo humano, evitando la pérdida de datos y la sobrecarga del ordenador.

Las clases QSqlDatabase y QSqlTableModel permitieron establecer un vínculo entre la aplicación y una base de datos .mdb de Microsoft Access, como así también leer y escribir cada uno de los elementos de la tabla.

Estas últimas dos clases también serán utilizadas en otros fragmentos del programa, para por ejemplo generar la historia clínica de los pacientes.

2.1.3.4 - Función ProcesarFrame()

La función ProcesarFrame() es la más importante de la aplicación, ya que es donde se realiza el procesamiento digital de las imágenes y la encargada de extraer los datos de interés de cada una de ellas.

Para explicar su funcionamiento, se irá detallando paso a paso cada una de sus etapas:

El primer paso para la función es tomar una muestra de la fuente de origen (cámara, secuencia de imágenes o archivo de video), para eso tendrá en cuenta el valor de las variables seteadas en la etapa de elección de las mismas.

Dado que la imagen procesada va a ser visualizada en la aplicación, se ajusta a un tamaño de 640x480. Para ello se utiliza una transformación geométrica denominada interpolación bicúbica.

Interpolación bicúbica: es una extensión de la interpolación cúbica para interpolar puntos de datos de una cuadrícula regular bidimensional (EJ: Imagen). La superficie interpolada es más lisa que las superficies correspondientes obtenidas en una interpolación bilineal o por una interpolación de vecino más próximo.

La interpolación bicúbica se puede lograr usando polinomios de Lagrange, splines cúbicos o algoritmo de convolución cúbica.

En el procesamiento de imágenes, esta la interpolación se elige a menudo sobre la interpolación bilineal o de vecino más próximo, cuando la velocidad de procesamiento no es un problema. A diferencia de la bilineal que sólo tiene en cuenta 4 píxeles (2x2), la bicúbica considera 16 píxeles (4x4). Las imágenes con esta interpolación son más suaves y tienen menos defectos de interpolación.



Figura 2.1.3.4 1

2.1.3.4.1 - Detección de los "puntos de interés"

Luego del retamizado de la imagen, se inicia el proceso para la identificación de los "puntos de interés"

Llamamos "puntos de interés" a las marcas adhesivas que son colocadas en las articulaciones de los pacientes que quieren ser estudiadas.



Figura 2.1.3.4.1 1

Para la detección de los puntos de interés en el muestreo de la imágenes se aplican una serie de filtros y funciones que eliminan el entorno dejando solamente en la imagen puntos blancos que respetan la ubicación y el tamaño de los puntos de interés. Un ejemplo se muestra en la siguiente imagen.

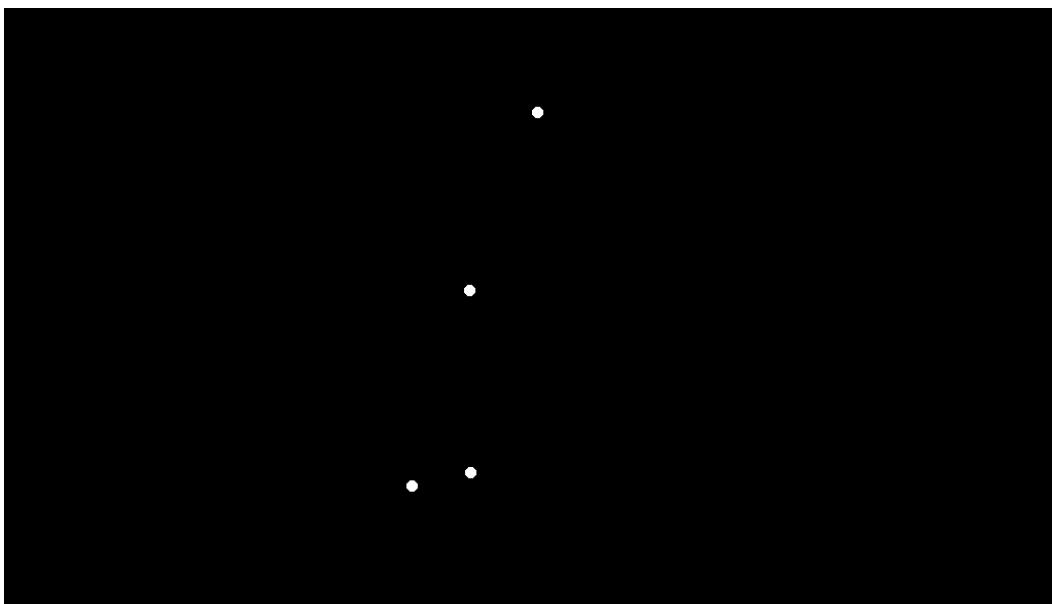


Figura 2.1.3.4.1 2

Para esto utilizamos la función `inRange()`, la cual compara cada uno de los pixeles de una imagen "fuente" con un intervalo de color RGB. Si el pixel se encuentra dentro de ese intervalo, entonces su correspondiente de la imagen "destino" será seteado en 255,255,255 es decir color blanco, caso contrario será seteado en 0,0,0 es decir color negro.

De esta manera se obtiene una imagen "destino" compuesta de los pixeles pertenecientes al intervalo de interés.

`inRange (Fuente, (R1,G1,B1), (R2,G2,B2), Destino)`

$\text{Destino}(i,j) = 1$ si $R1 \leq \text{Fuente}(i,j)_R \leq R2 \wedge G1 \leq \text{Fuente}(i,j)_G \leq G2 \wedge B1 \leq \text{Fuente}(i,j)_B \leq B2$

$\text{Destino}(i,j) = 0$ en cualquier otro caso

A continuación, con la intención de acentuar los "puntos de interés" se aplica la función `dilate()`.

Esta función consiste en convolucionar una imagen "Fuente" con otra que puede tener cualquier forma o tamaño, generalmente un cuadrado o un círculo.

De esta manera se puede lograr que el fondo brillante de la imagen se dilate alrededor de las regiones negras. Con la dilatación logramos que un objeto blanco sea más grande.

En la siguiente figura se puede observar una imagen y a su lado el resultado de su convolución con un rectángulo de 3x3 pixeles.



Figura 2.1.3.4.1 3

El próximo paso en el procesamiento de la imagen es la utilización de un filtro de desenfoque gaussiano (Gaussiano Blur), de esta manera se reduce el ruido y los detalles, preparando la imagen para localización de las circunferencias. Para ello aplicamos la función `GaussianBlur()`, en la cual especificamos el tamaño del centro gaussiano, la desviación estándar en la dirección horizontal y la desviación estándar en la dirección vertical.

En la siguiente figura se puede observar el efecto de aplicar el filtro gaussiano de desenfoque.



Figura 2.1.3.4.1 4

Luego de esto la imagen está preparada para la detección y localización de los puntos de interés, para ello aplicaremos la función `HoughCircles()`; la cual utiliza la transformada de Hough para la detección de círculos de determinadas características dentro de una imagen.

Transformada de Hough

La transformada de Hough es una técnica usada para detectar formas geométricas que puedan ser representadas por una expresión matemática.

Para la detección de circunferencias se utiliza un sencillo sistema de votación similar al utilizado para la detección de rectas donde sólo habrá que encontrar las casillas más votadas.

La expresión matemática que define una circunferencia es:

$$(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 = r^2$$

Donde r es el radio de la circunferencia, C_x la coordenada en eje x del centro de la circunferencia y C_y la coordenada en eje y del centro de la circunferencia.

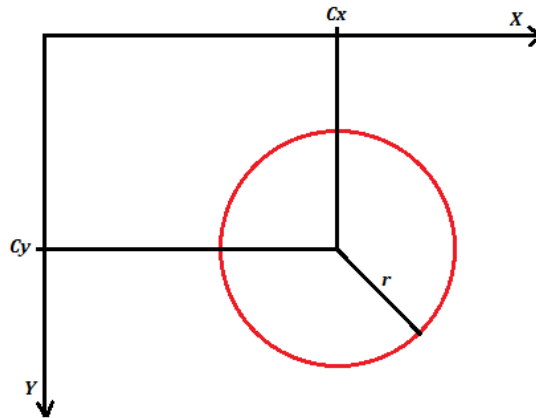


Figura 2.1.3.4.1 5

Una circunferencia queda totalmente definida por tres parámetros, en consecuencia el espacio de parámetros tendrá tres dimensiones, por lo cual, una circunferencia en el espacio imagen es un punto en el espacio de parámetros.

Valores diferentes de (C_x, C_y, r) proporcionan distintas circunferencias.

Por lo cual, para cada píxel de contorno que aparece en la posición (x_0, y_0) de una imagen existe una familia de circunferencias que pasan por este punto dadas por:

$$\begin{aligned} C_x &= x_0 + \cos \theta \cdot r \\ C_y &= y_0 + \sin \theta \cdot r \end{aligned}$$

Cada píxel de contorno vota por todas las circunferencias en la familia (todas las posibles circunferencias que pasan por él).

Si aparece un punto en el espacio que tenga muchos votos es que los parámetros de ese punto corresponden a la circunferencia que pasa por una gran cantidad de puntos de contorno.

De esta manera podríamos detectar una circunferencia incompleta y con ruido:

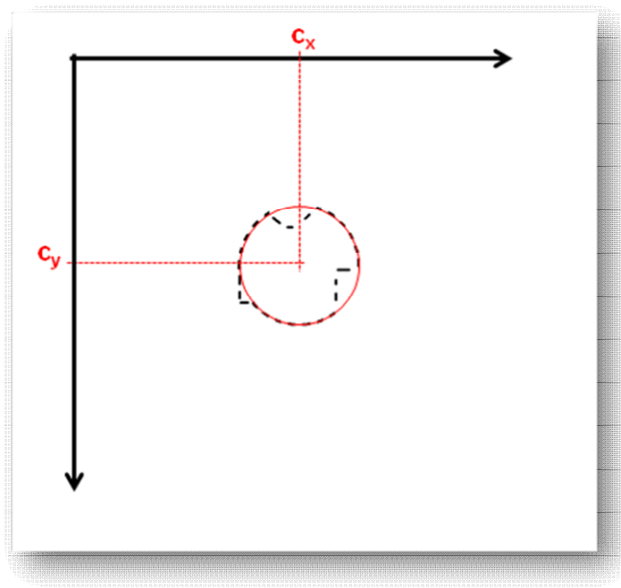


Figura 2.1.3.4.1 6

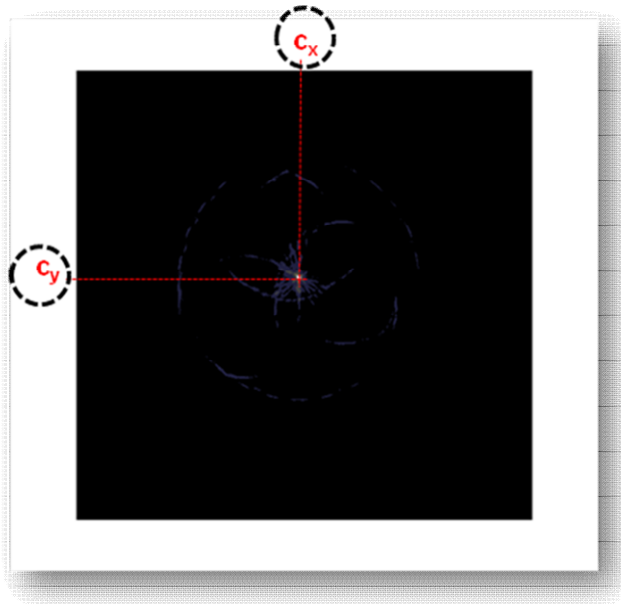


Figura 2.1.3.4.1 7

Este proceso requiere de mucha memoria si no se acota el rango de los parámetros de la circunferencia.

La función `HoughCircles()` utiliza este método y guarda en un vector variable cada uno de los círculos encontrados de la imagen, especificando de cada uno de ellos los parámetros C_x , C_y y r .

La función permite filtrar la búsqueda definiendo el radio máximo y mínimo, y la distancia mínima que debe existir entre el centro de los círculos pertenecientes a la imagen.

A continuación se muestran dos imágenes, en la primera el resultado de la función `HoughCircles()` sin un ajuste preciso de sus parámetros, en la segunda se aprecia el resultado de la función seteada para la detección de los 4 "puntos de interés" adheridos al corredor.

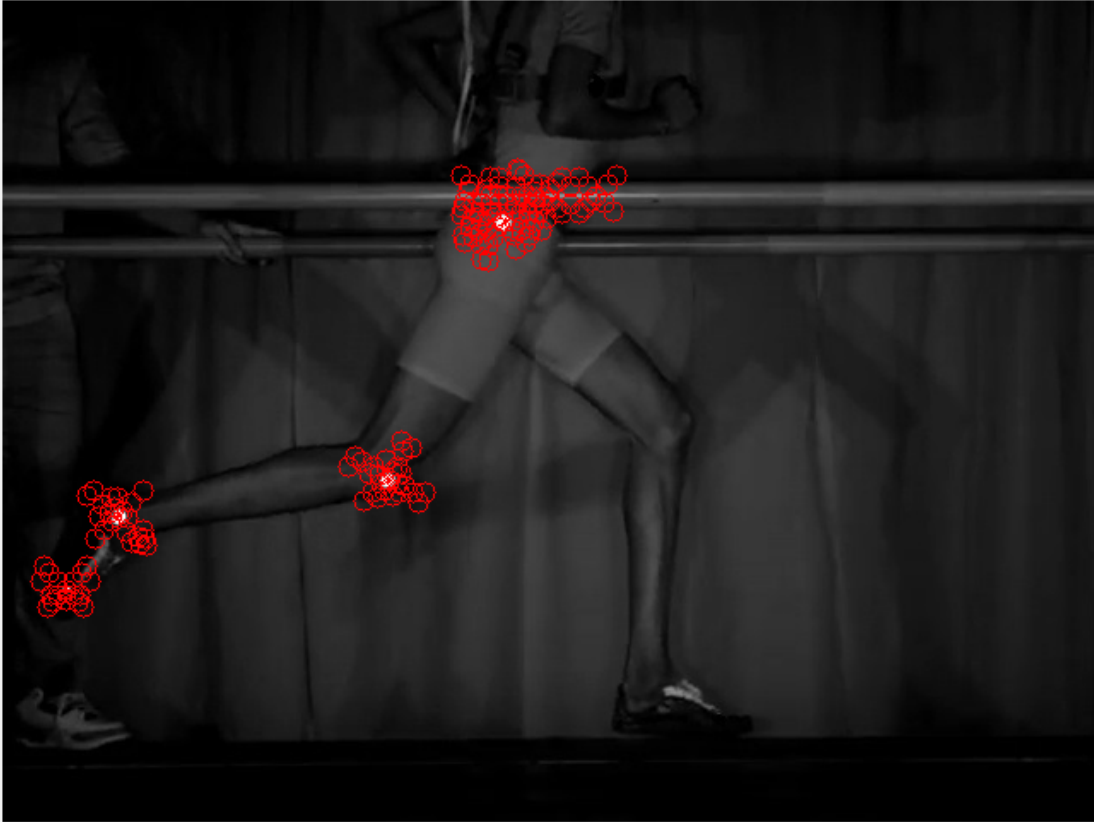


Figura 2.1.3.4.1 8

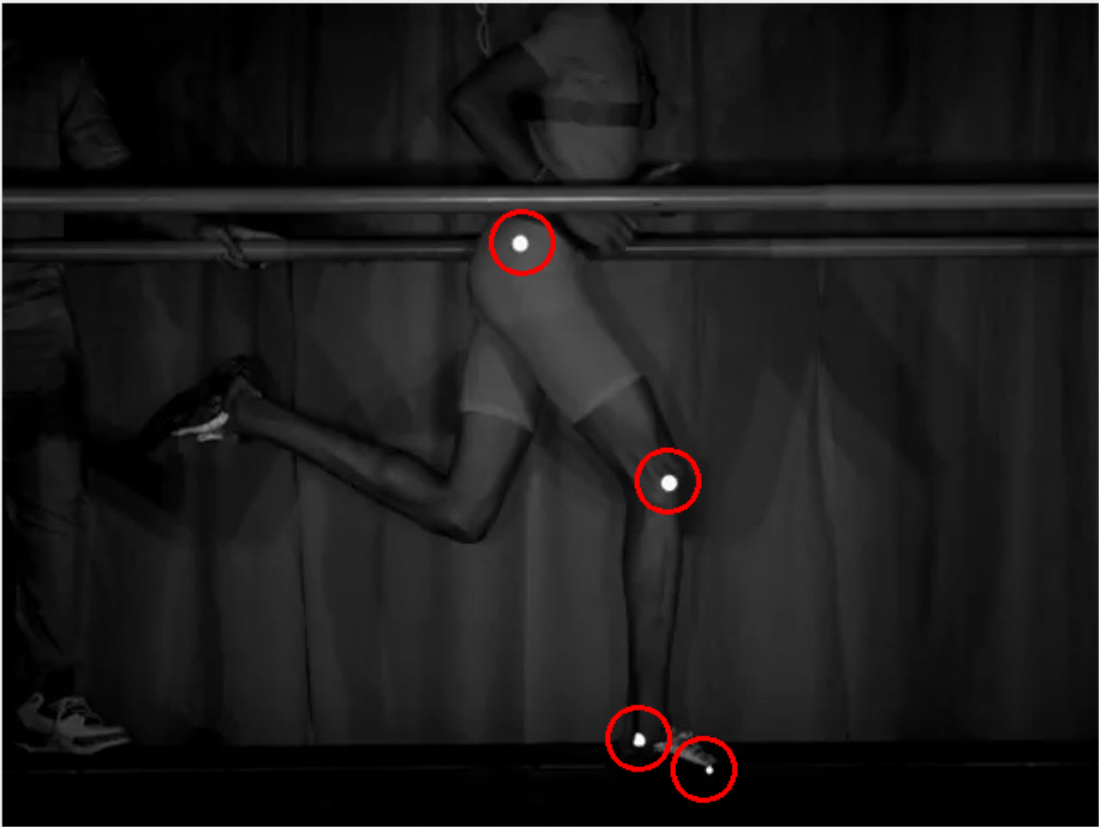


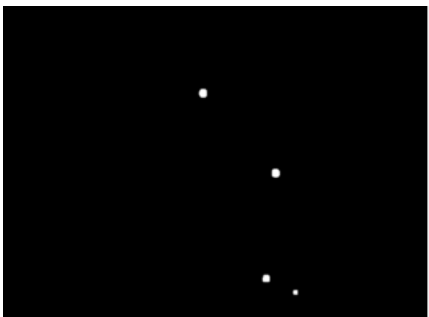
Figura 2.1.3.4.1 9



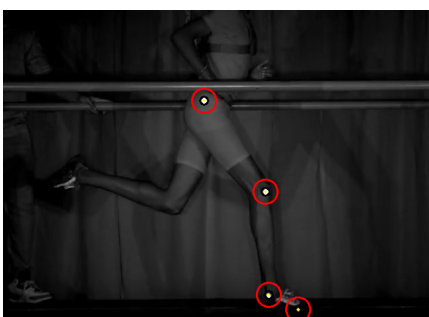
Muestreo de la imagen a través de alguna de las tres fuentes de datos.



Función **inRange()** seteada para valores de blanco superiores a (210,210,210) en la escala RGB filtran la imagen dejando solo los "puntos de interés"



Función **dilate()** filtra y acentúa los "puntos de interés" facilitando su localización.



Función **HoughCircles()** seteada para la detección de círculos de tamaño entre 3 y 9 píxeles brinda la localización de los mismos



Se utiliza la información brindada por **HoughCircles()** para marcar en la imagen los "puntos de interés" y la unión entre los mismos.

2.1.3.4.2 - Ordenamiento y cálculos

Una vez localizados los puntos de interés y previo a la generación de los gráficos, la función `ProcesarFrame()` ordena el vector de parámetros generados en la función `HoughCircle()` y efectúa los cálculos de los ángulos y del resto de las variables de interés.

El ordenamiento de los puntos se realiza con el objetivo de evitar errores en los cálculos y en la representación gráfica de los segmentos que forman las uniones entre las articulaciones.

A continuación se observa el error generado debido a la falta de orden en el vector de parámetros.

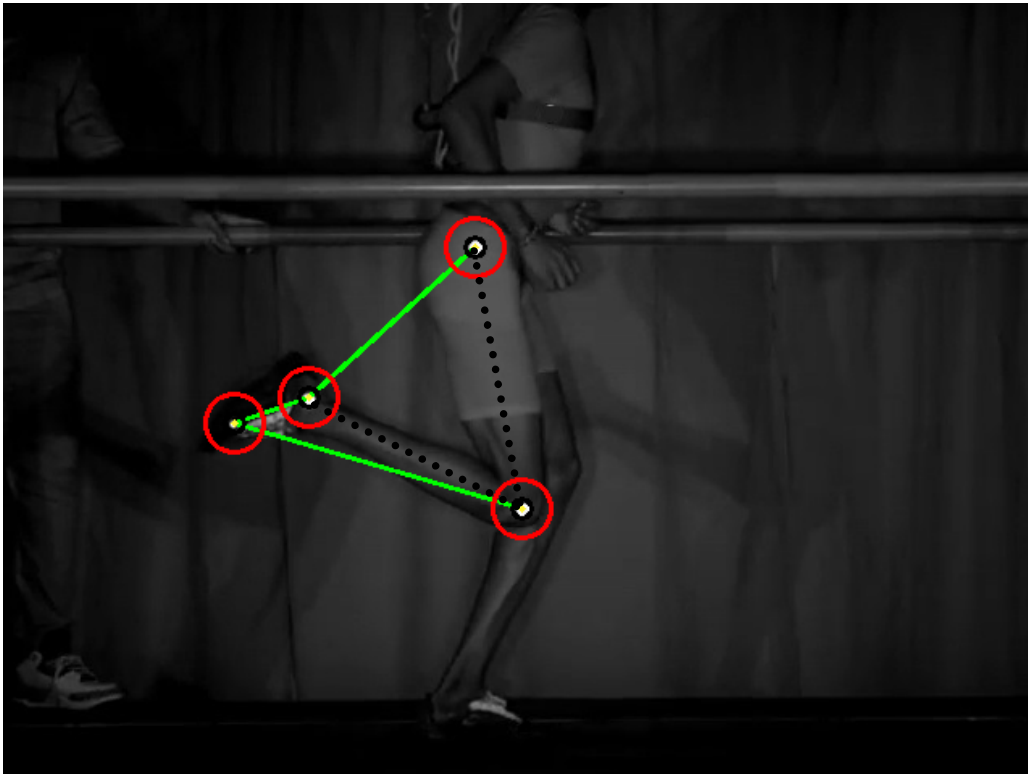


Figura 2.1.3.4.2 1

Para el ordenamiento de los mismos se utiliza como primer paso el método de burbuja simple, el cual ordena el vector posicionando los puntos de mayor valor de "y" en la parte superior de la pila. El punto superior es denominado como P_4 y el inferior como P_1 .

El inconveniente se presenta cuando el punto del tobillo y/o el del pie superan en altura al de la rodilla durante el ciclo de marcha, es por esto que se generan una serie de condiciones para poder mantener los puntos "ordenados" en todo momento.

La condición utilizada se trata de comparar el segmento P_3P_2 con el segmento P_2P_1 , y en caso de que $P_3P_2 > P_2P_1$, se aplica nuevamente el método de burbuja pero ordenando los puntos en función al parámetro "x". Este último ordenamiento se aplica solo sobre los puntos P_1 , P_2 y P_3 , ya que P_4 se encuentra correctamente identificado con el primer ordenamiento.

Es importante mencionar que en caso de llevarse a cabo por segunda vez el método de burbuja, el orden de los puntos será de mayor a menor o viceversa dependiendo del

sentido de marcha del paciente. Esto se debe a que las imágenes se procesan teniendo en cuenta que el punto $x = 0$ y $y = 0$ se ubica en la esquina superior izquierda.

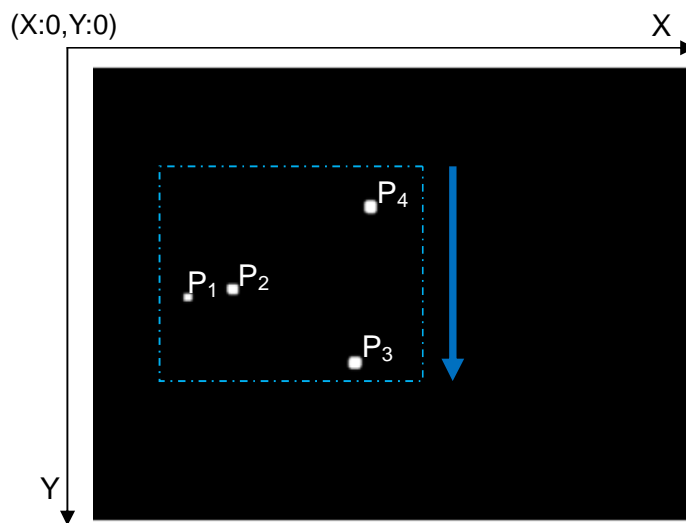


Figura 2.1.3.4.2 2

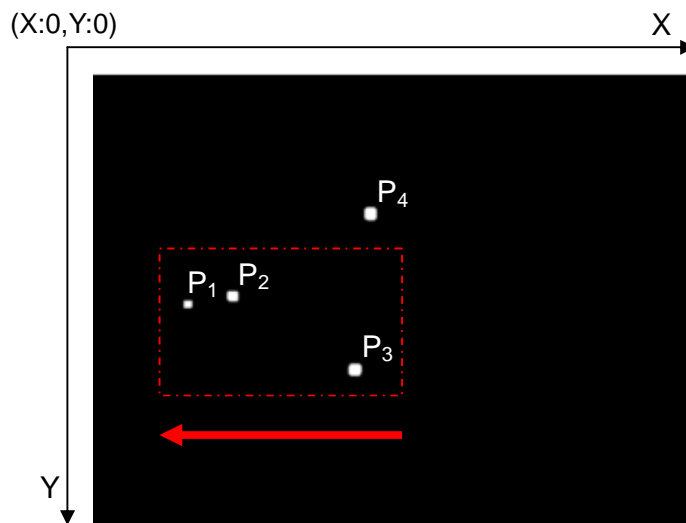


Figura 2.1.3.4.2 3

2.1.3.5 - Generación de gráficos

Como se mencionó en la primera parte del informe, las gráficas más importantes para el estudio del paciente son las siguientes:

- Oscilación de la cadera
- Flexo-Extensión de la cadera
- Flexo-Extensión de la rodilla
- Flexo-Extensión del tobillo

En el primero de los casos, la oscilación de la cadera, puede ser calculada de manera simple una vez obtenida la ubicación del punto P_4 correspondiente a la cadera, cosa que ya se ha hecho con anterioridad.

A medida que se van procesando cada una de las imágenes, una variable irá tomando cada uno de los valores de la componente "y" del punto P_4 para que al unirla con su valor anterior se pueda generar la gráfica correspondiente.

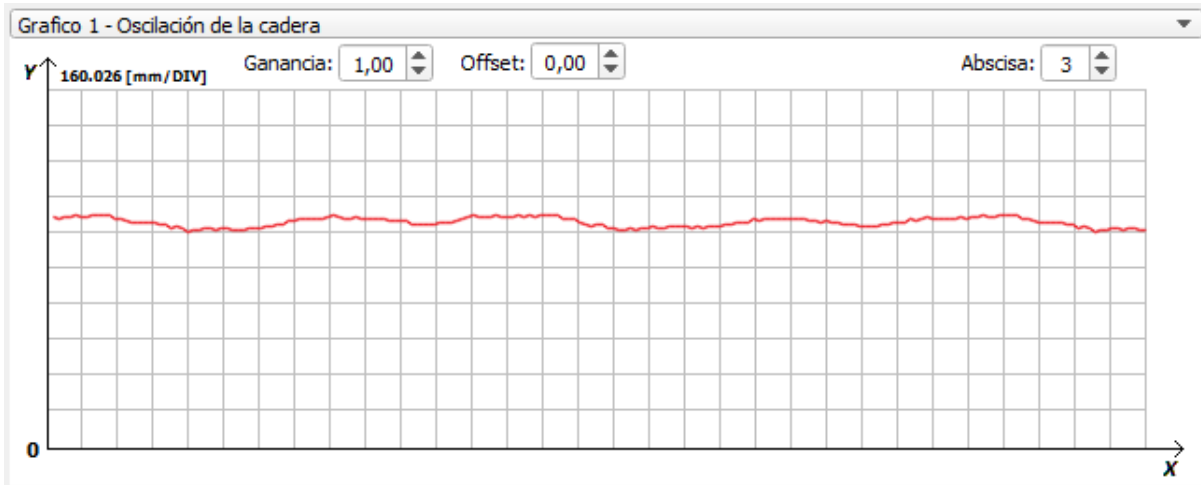


Figura 2.1.3.5 1

La aplicación brinda la posibilidad de modificar ciertos parámetros de ganancia y offset para permitirle al usuario ampliar o desplazar cada una de las graficas.

En el caso de las tres siguientes gráficas, lo que se calcula en primer lugar es cada uno de los ángulos de la flexo-extensión. Para ello se utilizan las propiedades de los ángulos rectos que la componen:

Flexo-extensión de la cadera:

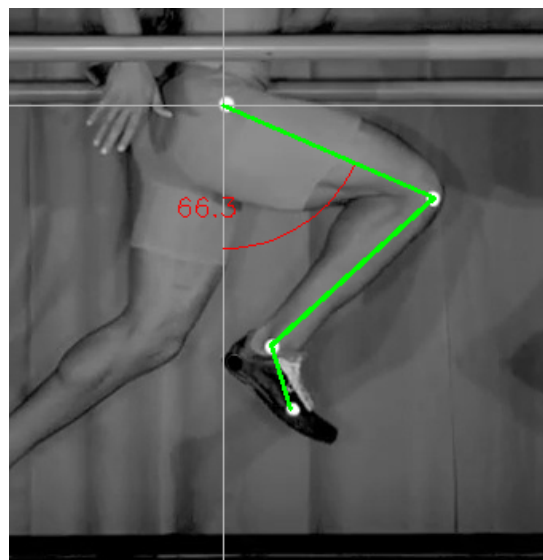


Figura 2.1.3.5 2

Para medir este ángulo debemos empezar desde la recta vertical que pasa por el punto de la cadera (P_4) hasta llegar al segmento P_4P_3 (correspondiente con el hueso "femur"), tomando valores positivos cuando la rodilla (punto P_3) se encuentra delante de la recta normal, y valores negativos cuando se encuentra por detrás. Para el correcto cálculo de este ángulo es importante definir previamente el sentido de marcha del paciente, en caso contrario los signos quedarán invertidos.

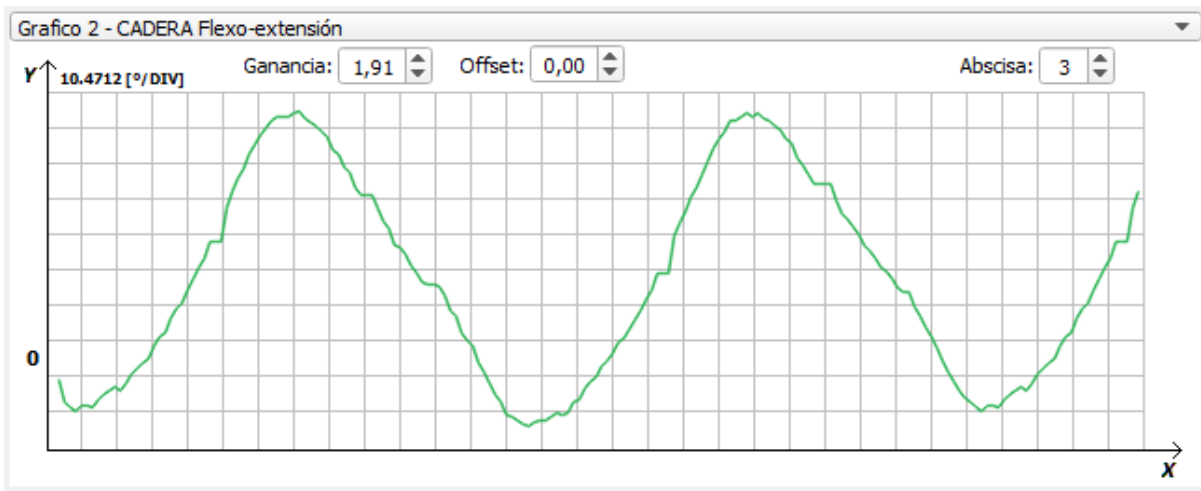


Figura 2.1.3.5 3

Flexo-extensión de la rodilla:

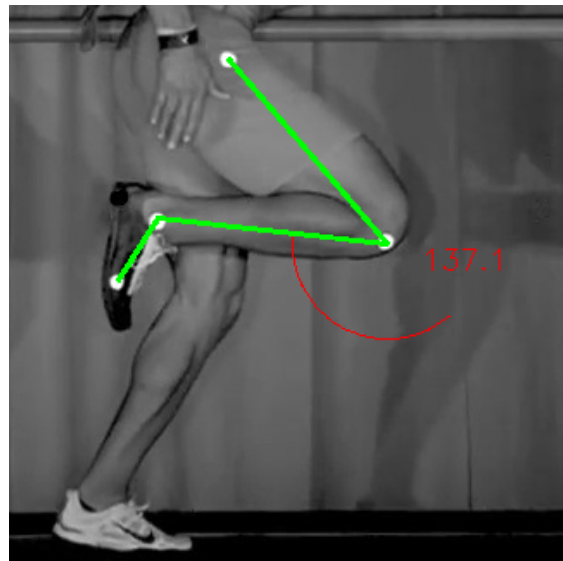


Figura 2.1.3.5 4

Para medir este ángulo debemos empezar desde la recta tangente al segmento P_4P_3 (correspondiente con el hueso del "femur") hasta llegar al segmento P_3P_2 (correspondiente con el hueso de la "tibia"), tomando valores positivos cuando la rodilla se encuentra flexionada y llegando a tomar un valor cercano a cero cuando la rodilla se encuentra completamente extendida.

Para el correcto cálculo de este ángulo es importante definir previamente el sentido de marcha del paciente, en caso contrario los valores obtenidos serán erróneos.

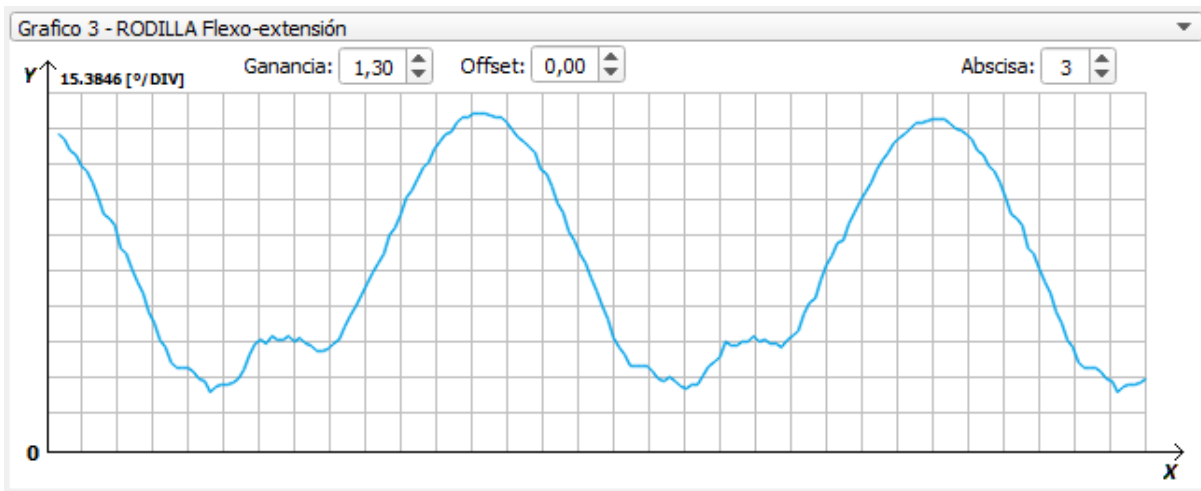


Figura 2.1.3.5 5

Flexo-extensión del tobillo:

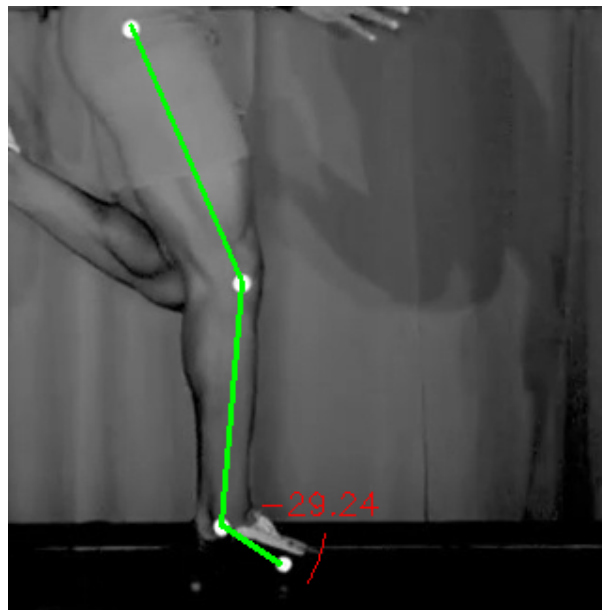


Figura 2.1.3.5 6

Para medir este ángulo debemos empezar desde la recta horizontal que pasa por el punto del tobillo (P_2) hasta llegar hasta la proyección del segmento P_2P_1 (correspondiente al pie), tomando valores positivos cuando el extremo del pie (punto P_1) se encuentra por encima del tobillo (punto P_2) y negativos cuando se encuentra por debajo.

Para el correcto cálculo de este ángulo es importante definir previamente el sentido de marcha del paciente, en caso contrario los valores obtenidos serán erróneos.

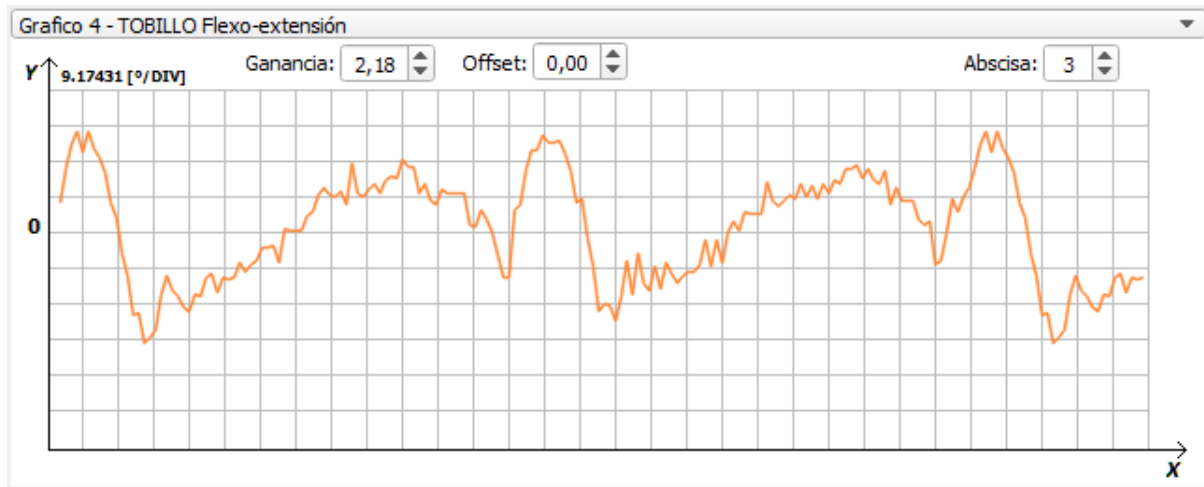


Figura 2.1.3.5 7

Flexo-extensión de Cadera/Rodilla/Tobillo:

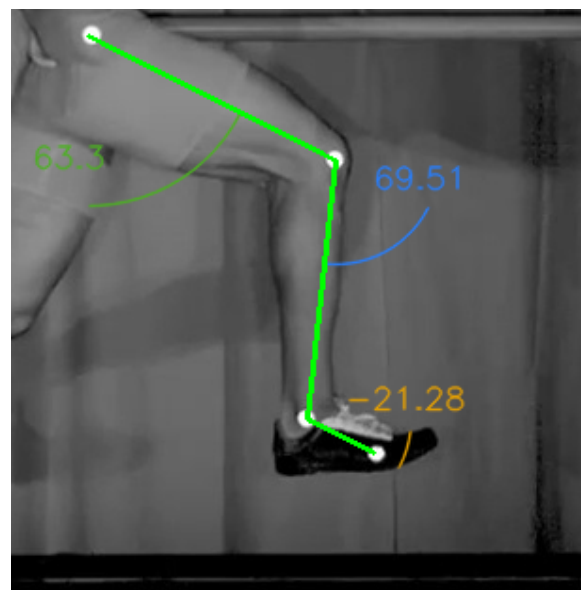


Figura 2.1.3.5 8

A modo comparativo, la aplicación brinda la posibilidad de generar una gráfica con los tres ángulos en simultáneo, para ello se utilizan los valores hallados con anterioridad.

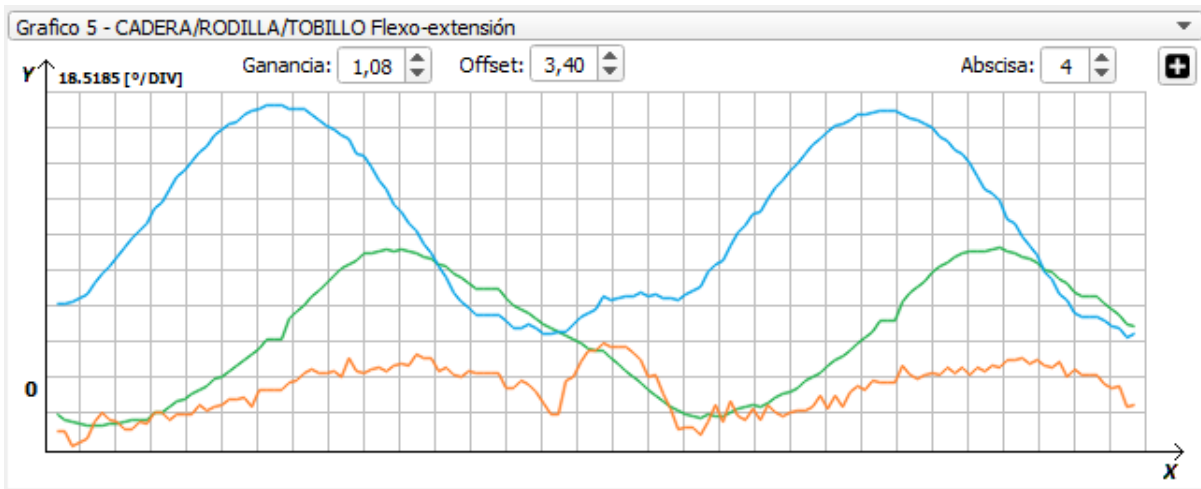


Figura 2.1.3.5 9

2.1.3.6 - Generación de gráficos ilustrativos

Dentro de la aplicación también se pueden visualizar una serie de gráficos ilustrativos que permiten tener una idea del comportamiento de las articulaciones durante la marcha del paciente.

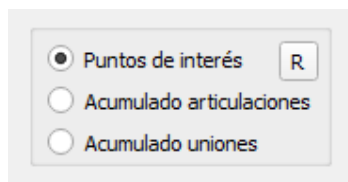


Figura 2.1.3.6 1

- Gráfica de puntos de interés:

En ella podemos observar en tiempo real el desplazamiento de cada una de las articulaciones, es decir: cadera, rodilla, tobillo y pie (P_1, P_2, P_3 y P_4)

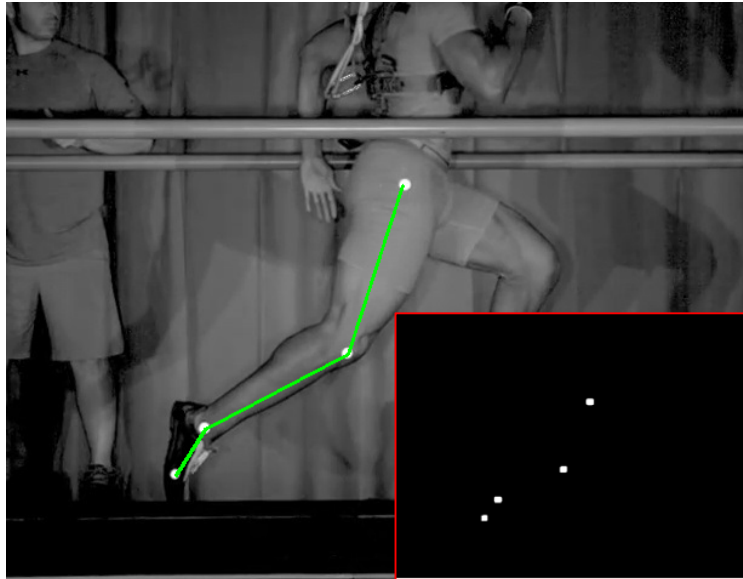


Figura 2.1.3.6 2

- Gráfica del acumulado de las articulaciones:

En ella podemos observar en tiempo real el acumulado del desplazamiento de cada una de las articulaciones, es decir: cadera, rodilla, tobillo y pie (P_1, P_2, P_3 y P_4)

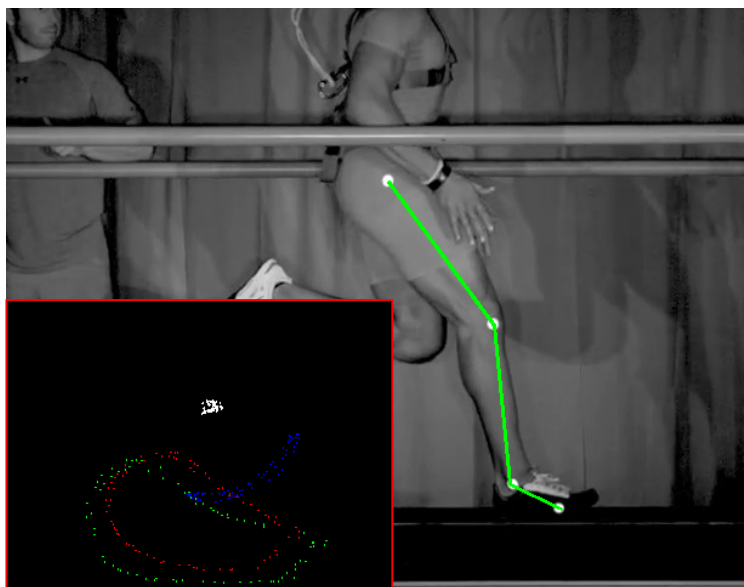


Figura 2.1.3.6 3

- Gráfica del acumulado de las uniones:

En ella podemos observar en tiempo real el acumulado del desplazamiento de cada una de las uniones, es decir: fémur, tibia, y pie (P_4P_3 , P_3P_2 , y P_2P_1)

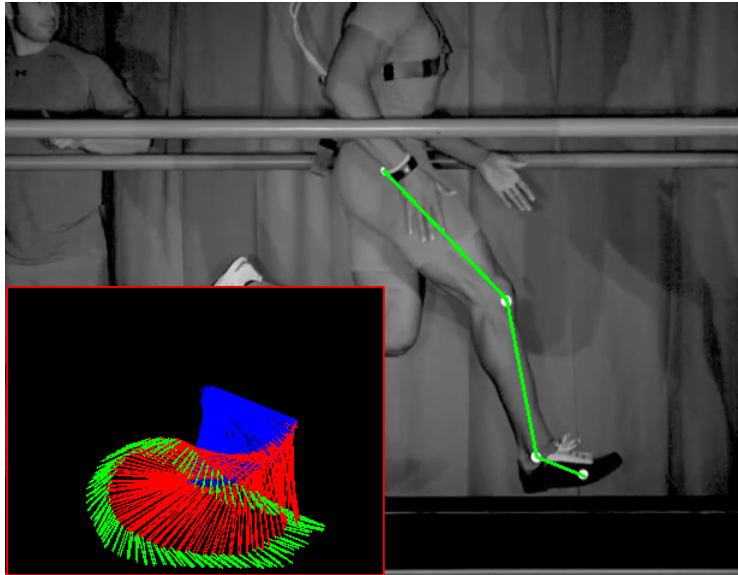


Figura 2.1.3.6 4

El botón "R" que se observa en la selección de los gráficos es un botón de reset, que permite resetear la gráfica acumulada en cualquier instante de tiempo.

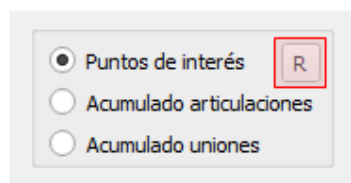


Figura 2.1.3.6 5

2.1.3.7 - Informe PDF

Una herramienta muy importante que brinda la aplicación es la posibilidad de generar un informe en PDF del estudio realizado, en el cual se podrán visualizar las gráficas generadas, como así también los valores relevados durante el análisis del paciente. La aplicación le permite al usuario elegir las gráficas que van a visualizarse en el informe, de esta manera, podrá determinar el grado de detalle que quiere darle al estudio. La condición necesaria para generar el archivo es que el paciente esté cargado en la base de datos, de no ser así, el usuario simplemente tendrá que cargarlo con anterioridad en simples pasos.

Además de agregarse al informe, cada una de las gráficas seleccionadas por el usuario quedará guardada en formato .png en una carpeta nombrada con el "ID" del usuario dentro de otra carpeta llamada "TEMP", de naturaleza temporal. De esta manera se podrá generar un respaldo de las mismas si así se lo desea.

2.1.3.7.1 - Base de datos de pacientes

Para cargar un paciente en la base de datos basta simplemente con completar los siguientes campos y presionar el botón de "Agregar paciente".

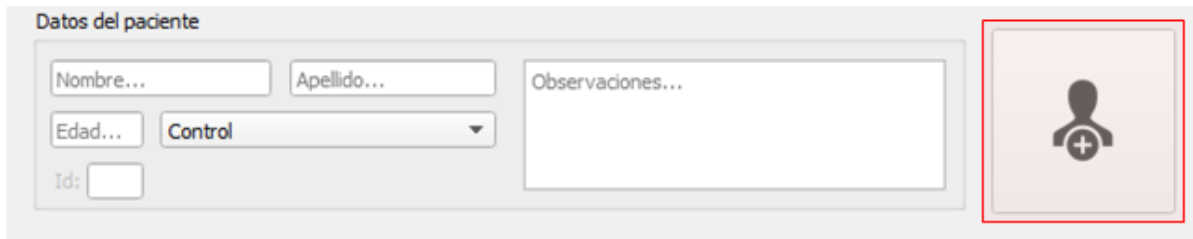


Figura 2.1.3.7.1 1

El campo obligatorio es el Apellido del paciente y el N° de Id se genera de manera única para cada paciente.

2.1.3.7.2 - Generación de Informe PDF

Una vez que el paciente se encuentra cargado en la base de datos, el usuario podrá mientras se ejecuta el análisis ir agregando una a una las gráficas que van a ser luego colocadas en el informe final. Para ello la aplicación cuenta con los botones "+" asociado a cada una de las gráficas, como se observan a continuación:

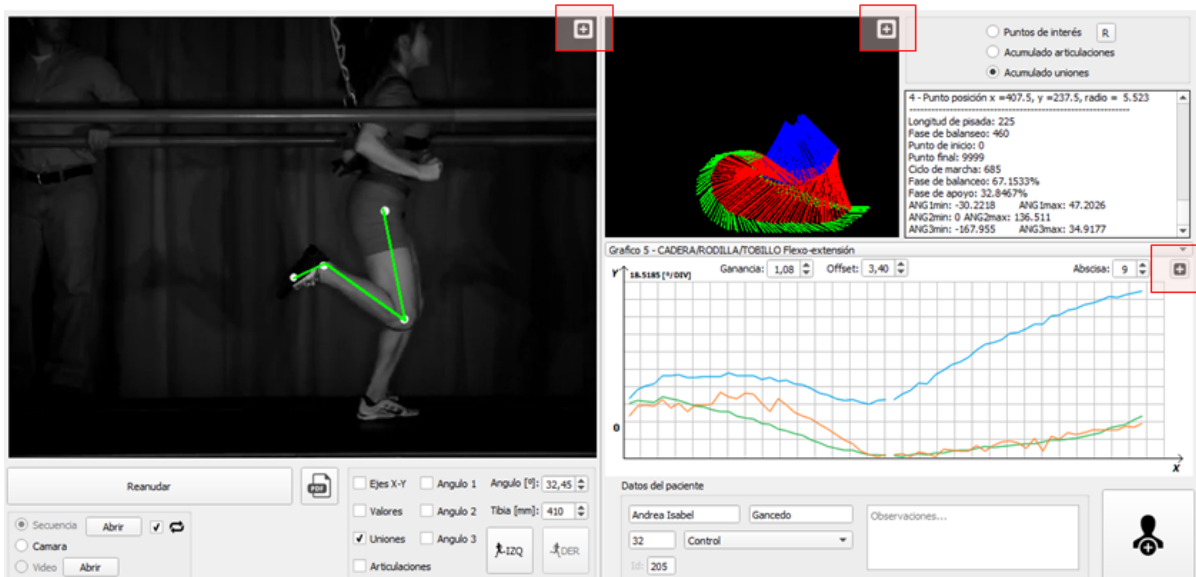


Figura 2.1.3.7.2 1

Las graficas que pueden agregarse al informe son las siguientes:

- _Gráfico 1 - Oscilación de la cadera
- _Gráfico 2 - CADERA Flexo-extensión
- _Gráfico 3 - RODILLA Flexo-extensión
- _Gráfico 4 - TOBILLO Flexo-extensión
- _Gráfico 5 - CADERA/RODILLA/TOBILLO Flexo-extensión
- _Gráfico de Acumulado de las uniones
- _Gráfico de Acumulado de las articulaciones
- _Captura del paciente con cualquiera de los filtros aplicados.

Una vez finalizado el estudio y una vez agregadas todas las gráficas deseadas, bastará con presionar el botón PDF para que se genere el informe.

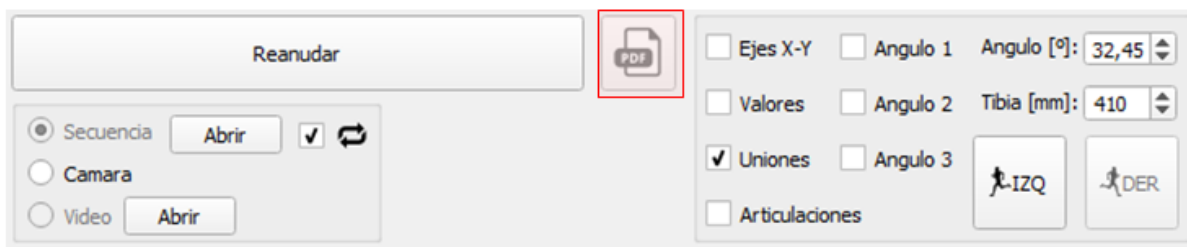


Figura 2.1.3.7.2 2

2.1.3.7.3 - Partes del Informe PDF

En el encabezado del informe se pueden apreciar los datos principales del paciente: Nombre, Apellido, Edad e ID.

Posteriormente se detallan dos valores que son seteados por el usuario previo al análisis, los cuales permiten el cálculo preciso del resto de los parámetros del estudio: ángulo seteado del tobillo y el valor de la longitud de la tibia del paciente.

A continuación se ilustran ambos parámetros:

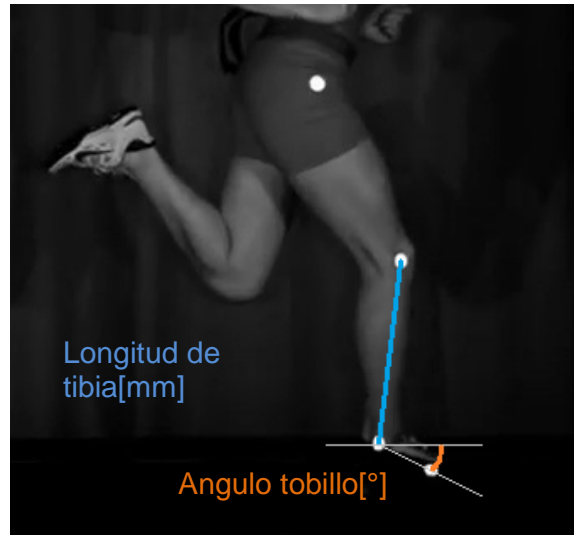


Figura 2.1.3.7.3 1

A continuación se registran los valores asociados al ciclo de marcha, como son:

- _Longitud de pisada (en pixels y en mm)
- _Longitud de balanceo (en pixels y en mm)
- _Ciclo de marcha (en pixels y en mm)

Por último, en la cabecera del informe se ilustra una gráfica con la distribución del ciclo de marcha y una serie de renglones donde el especialista puede efectuar las observaciones pertinentes del estudio.

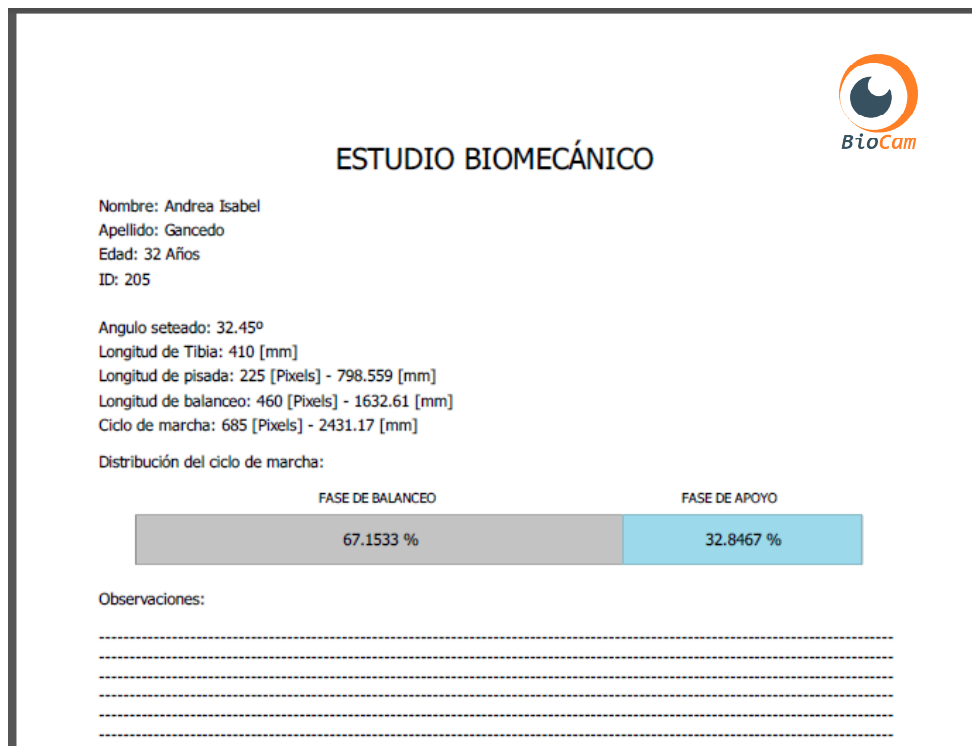


Figura 2.1.3.7.3 2

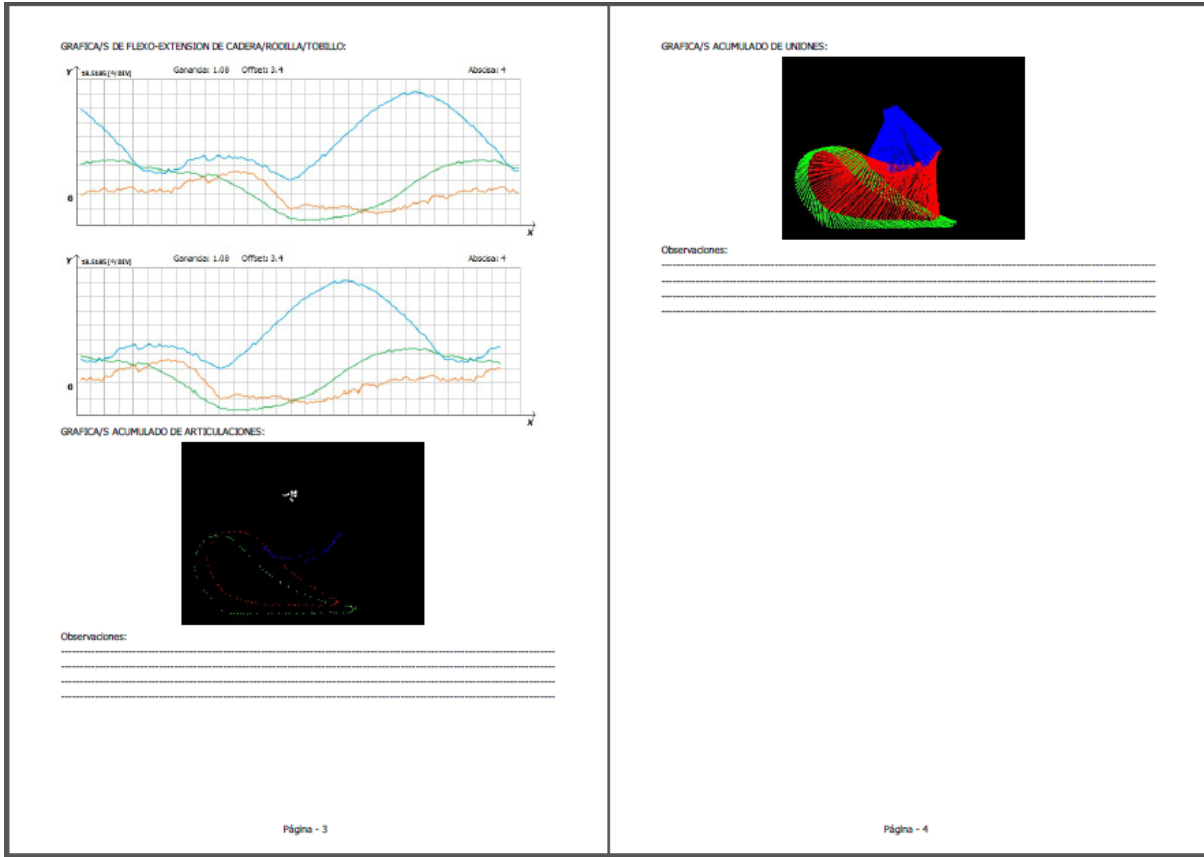


Figura 2.1.3.7.3 4

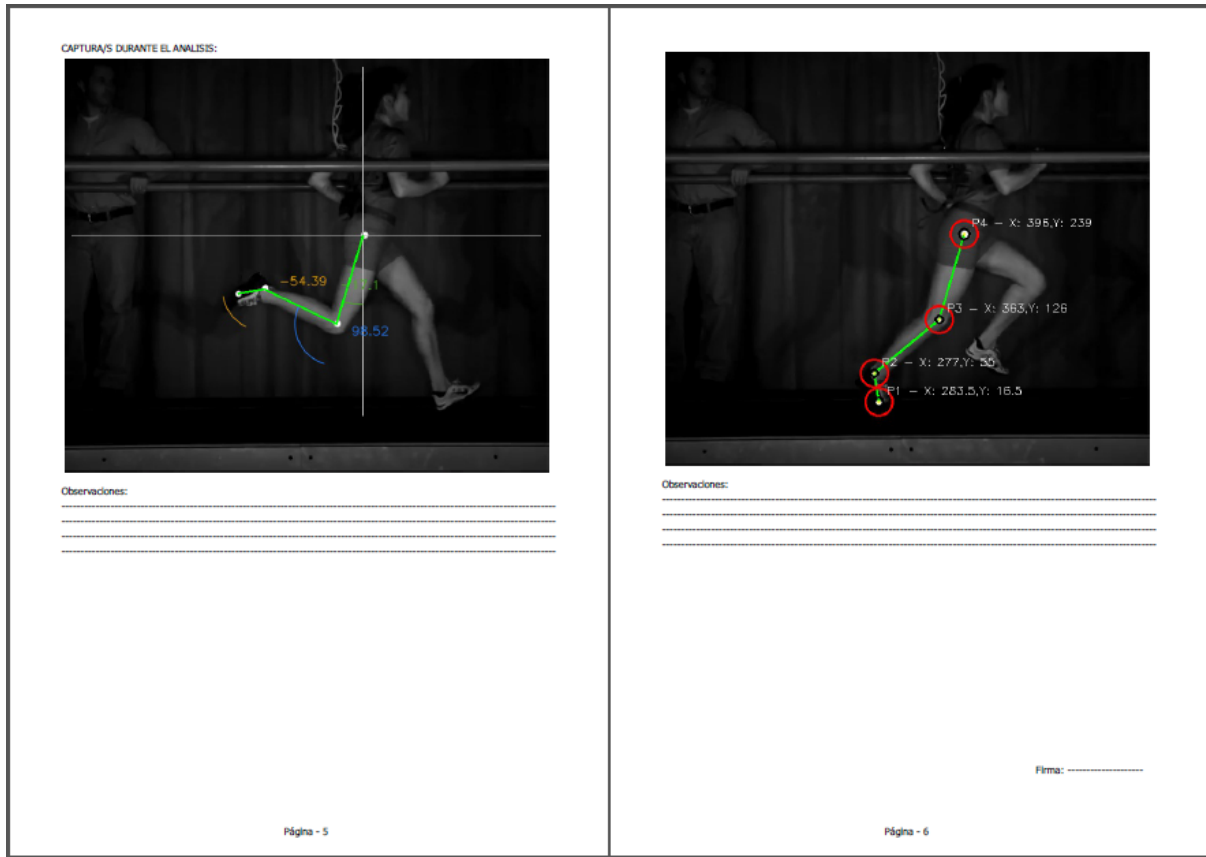


Figura 2.1.3.7.3 5

En el cuerpo del informe se irán colocando cada una de las gráficas que fueron agregadas por el usuario, sin restricción en número.
Como pie de cada una de las imágenes se coloca una serie de renglones para que nuevamente el especialista haga las observaciones pertinentes.
Por último y como pie de la página se deja la posibilidad al especialista de firmar el informe.
De esta manera el usuario podrá obtener fácilmente un informe del estudio realizado, de manera flexible, rápida y sobre todo permitiéndole manejar el grado de complejidad que desee darle al estudio.

2.2 - Diseño de Biocam

A continuación se ilustran algunas capturas del software desarrollado.



Figura 2.2 1

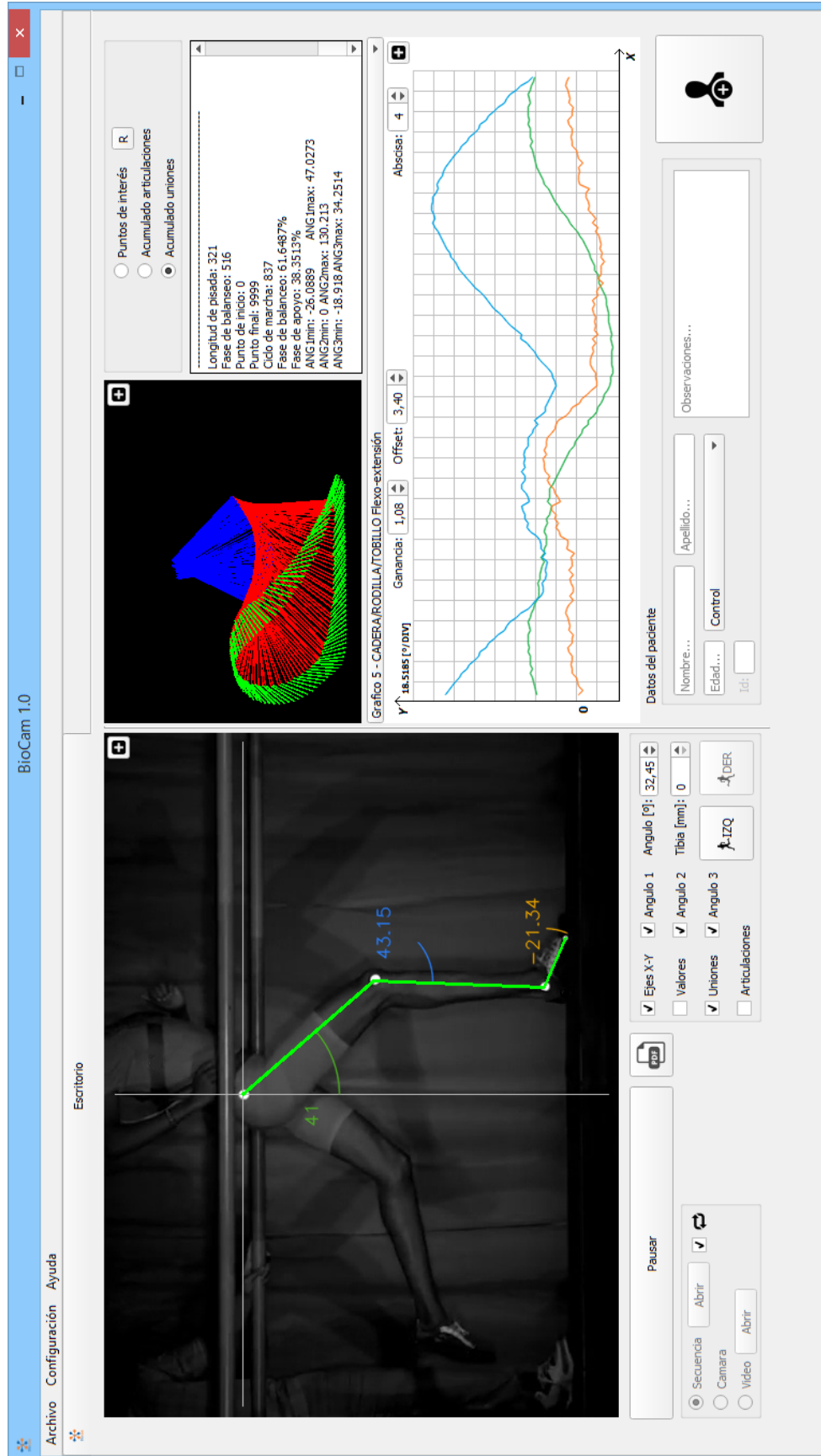


Figura 2.2 2

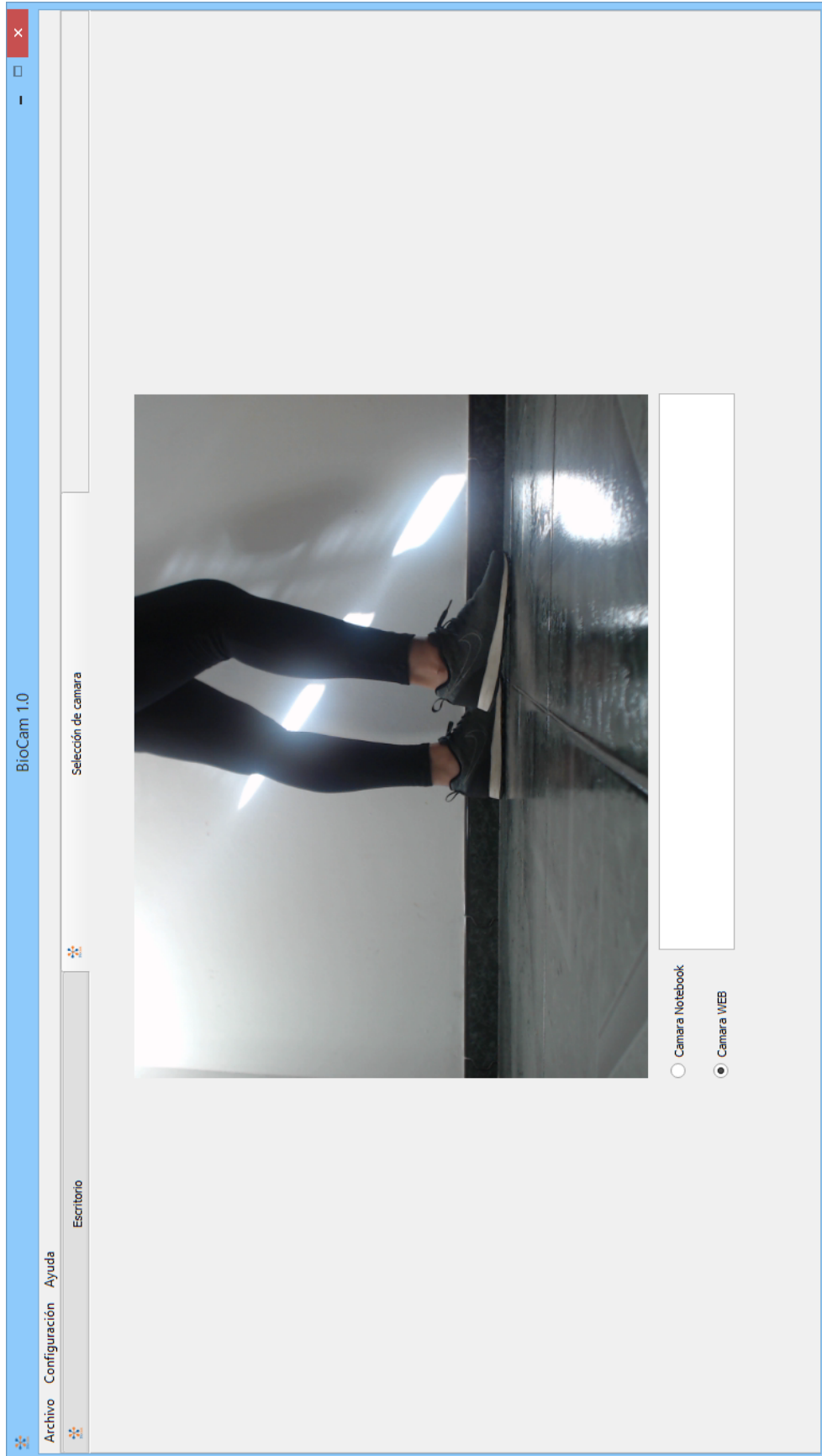


Figura 2.2 3

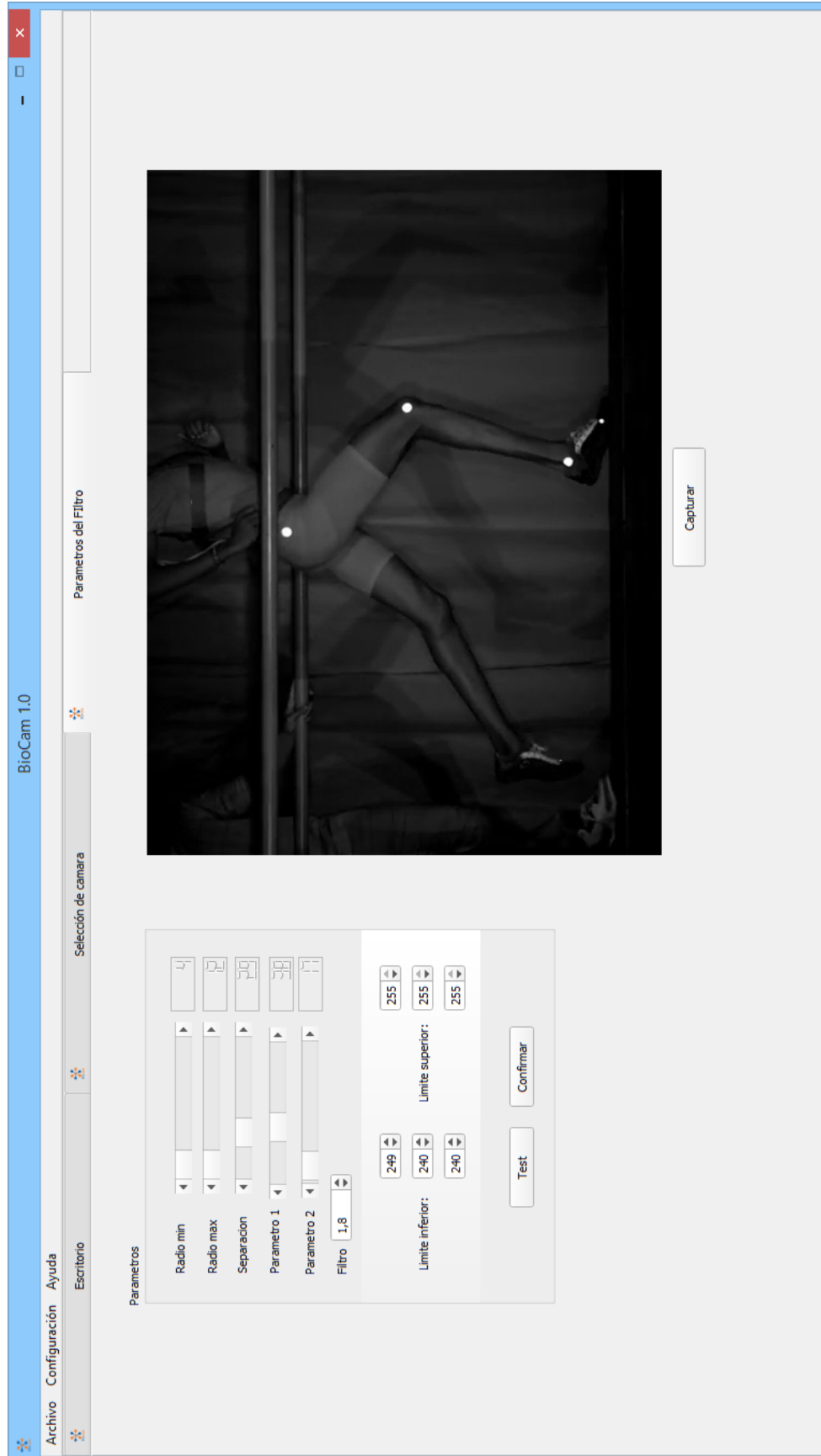


Figura 2.2 4

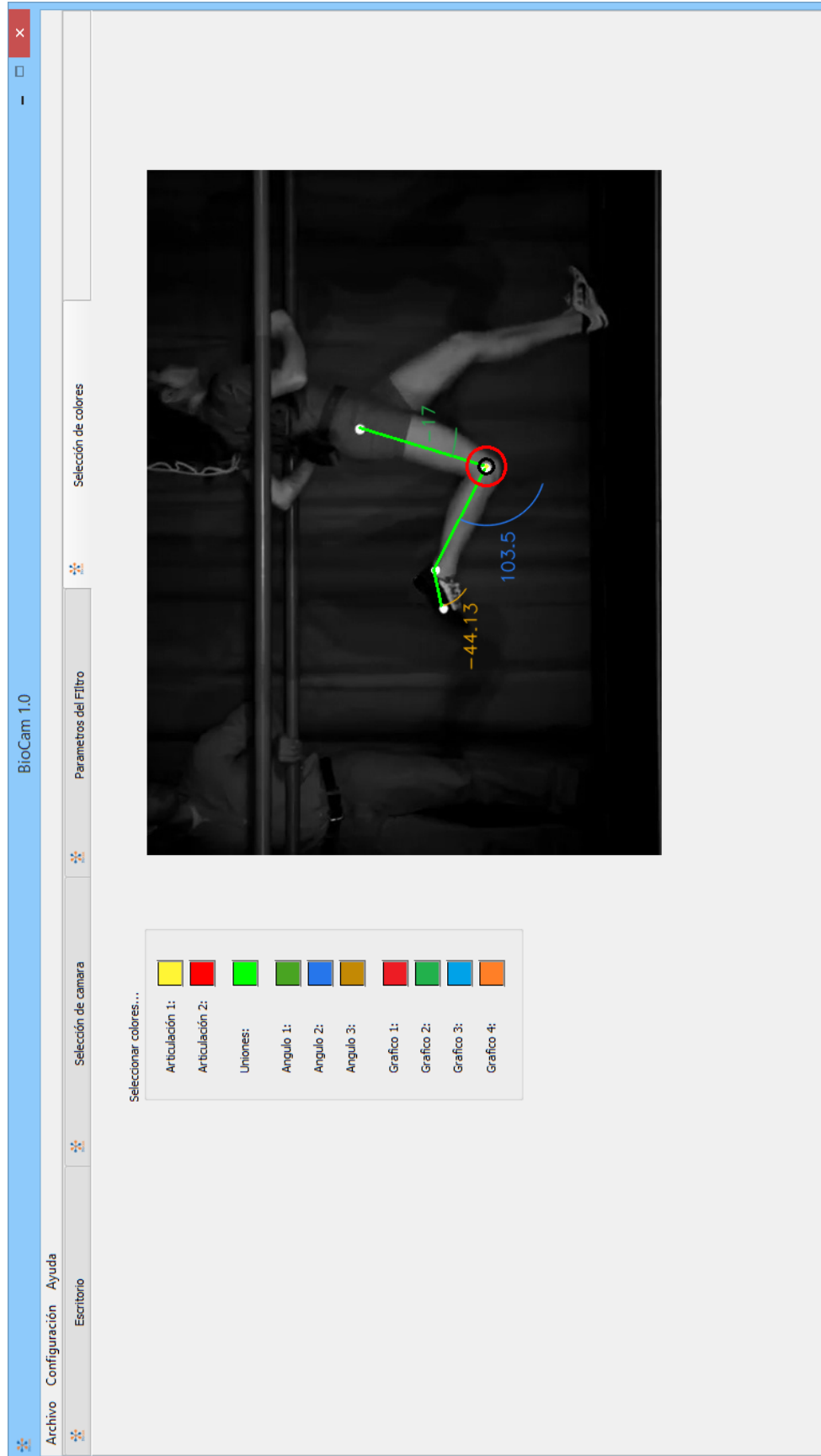


Figura 2.2 5

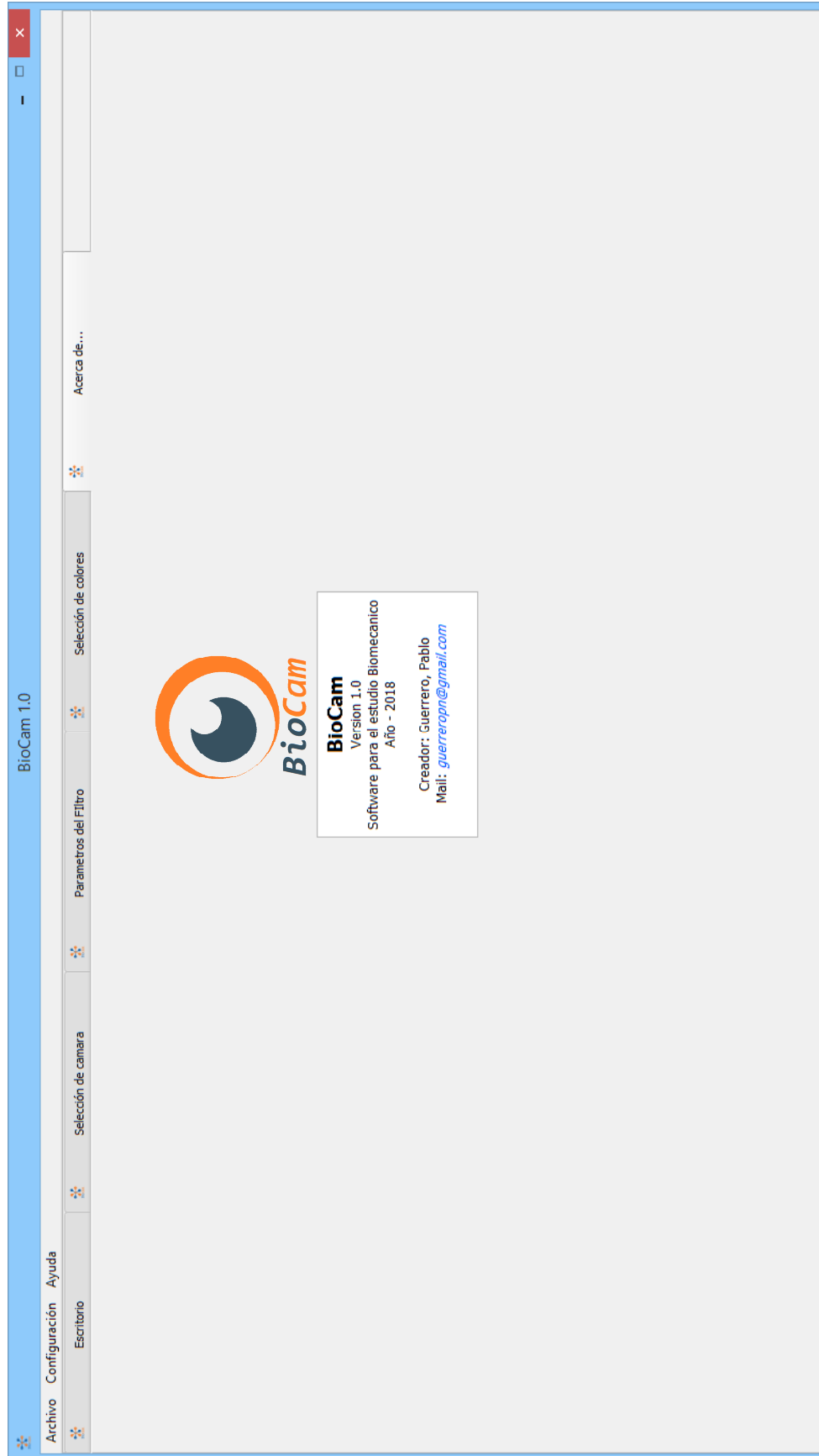


Figura 2.2 6

3 - Resultados

Luego de varios meses de investigación y desarrollo se logró crear un software para el estudio biomecánico del cuerpo humano de características muy versátiles y fácilmente operativo.

A continuación se detallan las ventajas y prestaciones más importantes de BioCam:

Ventajas:

- _Bajo Costo
- _Diseño intuitivo
- _Versátil
- _Alta precisión

Prestaciones:

- _Capacidad de interpretar tres fuentes de datos diferentes.
- _Capacidad de analizar ambos sentidos de marcha con solo presionar un botón.
- _Incorporar una base de datos para almacenar cada uno de los pacientes.
- _Capacidad de generar un informe del estudio realizado.
- _Visualizar gráficamente y en tiempo real diferentes magnitudes del estudio.
- _Generación de diferentes gráficas interactivas.
- _Permitir setear los parámetros principales para mejorar la eficiencia del análisis.
- _Permitir elegir cada uno de los colores que componen cada una de las gráficas.

Cuando hablamos de las ventajas de BioCam, uno de los puntos más fuertes para competir en el mercado es su bajo costo, esto se debe en primer medida a que no requiere de un hardware costoso. La potencia la aporta casi en su totalidad el software, el cual, como ya se ha mencionado anteriormente se desarrolló con software libre, esto permite eliminar las costosas licencia pagas y disminuir su costo.

Al desarrollar BioCam se buscó que el entorno gráfico sea intuitivo y de fácil aprendizaje, permitiéndole a los profesionales más experimentados (los cuales normalmente están mas alejados de la tecnología) adecuarse rápidamente a su funcionamiento.

La forma en la que la aplicación permite efectuar el estudio biomecánico la hace una herramienta muy versátil, permitiéndole al usuario direccionar el análisis hacia una hipótesis o facilitando la búsqueda de la afección. Como vimos anteriormente tanto las gráficas como la visualización en tiempo real y el informe son personalizables.

La precisión de BioCam radica en la poderosa Transformada de Hough, la cual es muy efectiva a la hora de detectar los "puntos de interés". Obviamente la precisión en este tipo de herramientas estará limitada por la calidad de la imagen y por el ruido presente en ella, es por ello que la aplicación cuenta con la posibilidad de configurar los parámetros del filtro, logrando un estudio muy preciso y confiable.

Además de las numerosas ventajas y prestaciones con las cuales BioCam cuenta para competir en el mercado actual, también es importante mencionar el potencial de crecimiento que posee: se encuentra en su versión 1.0, con intención de seguir desarrollándose.

A continuación se listan una serie de prestaciones a incorporar en el futuro, las cuales harán de la aplicación una herramienta aun más poderosa:

Potenciales:

- _Incorporar lectura de sensores para sumar otras magnitudes al estudio (Ej: EMG).
- _Incorporar comparación de gráficas dentro de la aplicación.
- _Incorporar estudio biomecánico para pacientes con vista posterior.
- _Desarrollar más el estudio biomecánico para ciclistas.
- _Desarrollar más el estudio biomecánico de salto in situ.
- _Incorporar vista 3D en el visualizador de tiempo real.
- _Incorporar asistente de calibración.
- _Incorporar foto del paciente en la base de datos.
- _Incorporar posibilidad de descargar desde la aplicación los datos temporales.

4 - Análisis de costo

Para comenzar con el análisis de costo de nuestro producto, es importante como primera medida identificar el mercado en el cual nos manejaremos. En este caso, el precio del producto no se encuentra definido por el mercado, es decir, tenemos cierta libertad para establecerlo.

Por esta razón utilizaremos el método del "costo más el margen" para definir y establecer el precio de nuestro producto. Este consiste en añadir un margen de beneficio al costo total unitario del producto.

4.1 - Costos directos e indirectos

Como primer paso a continuación se realizará la división de los costos directos y de los costos indirectos:

Costos directos:

_Insumos:

Hardware: Valor monetario del conjunto de elementos físicos o materiales que integran el producto. EJ: Cámara web, Cable USB y Disco compacto.

Software: Valor monetario de las líneas de código y rutinas que conforman la aplicación.

_Envases: Valor monetario necesario para el packaging del producto.

_Distribución: Valor monetario necesario para la distribución del producto dentro del mercado elegido.

_Manual de usuario: Valor monetario necesario para la confección del manual de usuario del producto.

_Capacitación a terceros: Valor monetario necesario para la capacitación de terceros en el producto desarrollado.

_Impuestos: Valor monetario necesario para poner el producto en el mercado cumpliendo con las obligaciones legales.

Costos indirectos:

_Amortización: Valor monetario invertido durante el desarrollo de la aplicación.

_Servicio técnico posventa: Valor monetario para brindar un servicio de postventa.

_Desarrollo: Valor monetario necesario para llevar adelante un proceso de desarrollo para mejorar el producto.

_Marketing: Valor monetario necesario para presentar y hacer conocido al producto dentro del mercado elegido.

En la siguiente tabla se encuentran listado el valor monetario de cada uno de los costos:

COSTO DIRECTO				
CATEGORIA	SUBCATEGORIA	DETALLE	COSTO	ANEXO
INSUMOS	HARDWARE	CAMARA	\$ 1.400	
		CABLE USB 5 MTS	\$ 80	
		DISCO COMPACTO	\$ 4	
		ENVACE	\$ 3	
		MANUAL DE USUARIO	\$ 20	
		SOFTWARE	\$ 4.000	
DISTRIBUCION		COSTO DE ENVIO	\$ 250	* Mercado local
CAPACITACION A TERCERO		JORNADA DE 4 HORAS	\$ 400	* \$100/HR
SUBTOTAL			\$ 6.157	

COSTO INDIRECTO				
AMORTIZACION		840HS DE PROGRAMACION	\$ 168.000	* \$200/HR
MARKETING			\$ 0	* Redes Sociales (Facebook, Twitter, Instagram, otros)
SERVICIO POSTVENTA		SUELDO SERVICIO TÉCNICO	\$ 30.000	* \$150/HR
DESARROLLO		SUELDO DESARROLADOR	\$ 45.000	* \$200/HR
SUBTOTAL			\$ 243.000	

Tabla 4.1 1

4.2 - Aspectos a tener en cuenta

Como se puede observar en la tabla, hay algunos puntos a tener en cuenta al momento de realizar el análisis de costo de nuestro producto.

En principio el mercado al cual se desea apuntar es al mercado local, es por esto, que los costos de distribución no son elevados. El mercado exterior dependerá del crecimiento del producto dentro del país y de una hipotética demanda perteneciente a otros países, esta es la razón por la cual no se tienen en cuenta costos de envíos internacionales.

Por otro lado, luego de investigar un poco sobre las obligaciones impositivas en Argentina en el rubro del software (Ley 26.692), el mismo cuenta con políticas para promocionar esta industrial. Por tal motivo, dentro del marco legal seremos beneficiados con estabilidad fiscal, alcanzando impuestos directos, tasas y contribuciones impositivas, así como también ciertas ventajas para competir en el mercado internacional.

Claramente si deseamos incrementar las ventas de nuestro producto es importante que el mismo se haga conocido, para ello podemos utilizar una herramienta de costo cero que ha dado en este último tiempo resultados sorprendente: las redes sociales. Facebook, Twitter, Instragram y otras plataformas nos permitirán dar a conocer los beneficios y características de nuestro producto sin necesidad de invertir dinero. Esto nos permitirá dar un buen puntapié inicial en el mercado sin aumentar el valor agregado.

Por último, podemos ver que en este caso los costos indirectos aumentan de sobremanera el valor de nuestro producto. Es por ello que debemos tomar la decisión de si realmente es conveniente brindar un servicio de postventa y desarrollar aun más la aplicación desde un principio. Lo más conveniente será adquirirlos a medida que la rentabilidad sea lo suficientemente alta como para incorporarlos al balance. No sería sano para nuestra economía contratar a técnicos y programadores si nuestro volumen de venta no puede costear sus salarios.

En cuanto a la amortización, es decir, el costo de las horas que fueron invertidas en desarrollar la aplicación obviamente será recuperado dependiendo del volumen de ventas y del porcentaje que elijamos para que éste impacte sobre el precio del producto.

4.3 - Costo del producto

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, el costo del producto estará dado de la siguiente manera:

CATEGORIA	SUBCATEGORIA	DETALLE	COSTO
INSUMOS	HARDWARE	CAMARA	\$ 1.400
		CABLE USB 5 MTS	\$ 80
		DISCO COMPACTO	\$ 4
	ENVACE		\$ 3
	MANUAL DE USUARIO		\$ 20
	SOFTWARE		\$ 4.000
DISTRIBUCION		COSTO DE ENVIO	\$ 250
CAPACITACION A TERCERO		JORNADA DE 4 HORAS	\$ 400
MARGEN DE GANANCIA		200%	\$ 12.314
COSTO TOTAL			\$ 18.471

Tabla 4.3 1

En función a los costos de los productos de la competencia y al mercado en el cual apuntamos competir, se considera que un margen de ganancia del 200% del valor del producto es totalmente viable y accesible para los usuarios.

De esta manera el costo total del producto queda definido en \$18471.

4.4 - Amortización

Una vez definido el costo del producto, podremos proyectar de qué manera se amortizará. De manera muy simple realizamos el siguiente calculo:

AMORTIZACION	840HS DE PROGRAMACION	\$ 168.000
COSTO TOTAL DEL PRODUCTO		\$ 18.471
↓		
CANTIDAD DE UNIDADES POR VENDER		9,10

Tabla 4.4 1

Podemos ver que se deben vender 10 unidades para amortizar las horas invertidas en la programación de la aplicación. Teniendo en cuenta que no es un número elevado y esperando vender al menos 3 unidades al mes, se podrán ver ganancias a partir del cuarto mes de ventas. Claramente esto es hipotético y la inserción al mercado probablemente sea paulatina y mucho más lenta.

Recuperar la inversión en el lapso de un año sería más que aceptable.

5 - Discusión y conclusión

Luego de varios días ideando el proyecto y varios meses para su desarrollo, hemos logrado crear un software para el estudio biomecánico del cuerpo humano utilizando el procesamiento digital de imágenes. Tal y como se buscaba, se desarrolló una herramienta precisa, sencilla y con una interfaz intuitiva la cual agiliza el aprendizaje durante su uso, de bajo costo que puede ayudar a médicos y deportólogos en el estudio de sus pacientes. Para ello se utilizó un reconocido software libre llamado Qt creator, y una poderosa librería de la biblioteca OpenCV.

El proceso pasó por varios estadios. Como primer paso, se debió generar el código adecuado para poder procesar las imágenes en tiempo real desde una cámara web. No conforme con esto se buscó además la capacidad de procesar otros dos tipos de fuentes de entrada: la secuencia de imágenes y el archivo de video.

El punto más crítico y dificultoso durante el desarrollo fue la detección sin fallos de los "Puntos de interés", principio básico para el cálculo de todas las variables del análisis.

Para ello se creó la función `ProcesarFrame()` la cual es el alma de la aplicación y está constituida por más de 660 líneas de código C++.

A esto se le agregó la posibilidad de contar con un registro de pacientes, la generación de 5 gráficas en las cuales se puede ver en tiempo real el comportamiento de cada uno de los ángulos, la generación de 2 minigráficas con el acumulado de las uniones y articulaciones del paciente y la posibilidad de personalizar cada una de las gráficas antes mencionadas como así también la visualización en tiempo real del análisis.

Buscando un plus, se desarrolló la posibilidad de generar un informe en PDF de manera automática desde la aplicación, en el cual se pueden agregar de manera dinámica cada una de las gráficas que el especialista desee, permitiéndole manejar el grado de complejidad del estudio.

Dado que el producto está apuntado a especialistas que dan sus primeros pasos, se buscó que el costo del producto sea accesible, pero que a su vez permita una rápida amortización del tiempo invertido en su desarrollo. Es por esto, que su valor quedó establecido en \$18471, lo cual representa menos del 15% del costo del producto de la competencia extranjera. Si a esto le sumamos un plan de financiación a corto plazo, la posibilidad de contar con nuestra aplicación queda al alcance de cualquier profesional argentino.

El costo real del producto es poco más que un 33% de su valor, esto permite un crecimiento relativamente rápido, lo cual da la posibilidad de costear un servicio de postventa y desarrollar aun más la aplicación.

Como ya hemos mencionado con anterioridad, la aplicación puede mejorarse notablemente permitiendo hacerla útil para mas usuarios. Algunos de los puntos a mejorar son: la incorporación de sensores para sumar otras magnitudes al estudio, incorporar la comparación de gráficas, incorporar el estudio biomecánico para vista posterior, mejorar el estudio biomecánico para ciclistas, mejorar el estudio biomecánico para salto in situ, incorporar visualización en 3D, incorporar un asistente de calibración, entre otras.

Como conclusión podemos decir que se logró el objetivo planeado durante el inicio: crear una aplicación para el estudio biomecánico del cuerpo humano, de bajo costo y que pueda competir en el mercado local y que también tiene potencial para salir del país. Creemos que hemos creado la base de un producto que tiene proyección y que es realmente útil para estudiar y mejorar la vida de las personas.

6 - Literatura Citada

[1] Dr. José Pablo Alvarado Moya, 2012, Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales.

[2] L. Enrique Sucar y Giovani Gomez, 2012, Procesamiento de Imágenes y Visión computacional.

[3] Ramón Gomez, 2005, Estudio Biomecánico de la marcha en pacientes con artrosis de cadera.

[4] Carlos Medrano, 2008, Tutorial de OpenCV.

[5] Amador Jesus Lara Sanchez, 2007, Biomecánica de la arquitectura muscular y potencia mecánica de salto en jóvenes.

[6] L. E. Contreras, J. A. Tristancho y L. F. Vargas, 2012, Análisis Biomecánico de Marcha Humana a Través de Técnicas de Modelaje.

[7] Anonimo, 2014, Aprenda Qt4 desde hoy mismo.

[8] <https://opencv.org/books.html>

[9] <https://www1.qt.io/es/>

[10] José A. Acero Jáuregui, 2014, Principio de la con_abilidad en la Medición de la fuerza: Tecnología Biomecánica.

[11] Utkarsh Sinha, 2010, Circle Hough Transform.

[12] https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Plano_anatomico_Transversal.svg#

[13] https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Plano_anatomico_Frontal.svg

[14] https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Plano_anatomico_Sagital.svg

[15] <https://oscarenfotos.com/2014/05/17/la-luz-como-elemento-fotografico-2/>

[16] www.librovision.eii.uva.es/ppt/8.2__HoughCirc.pptx

[17] http://www.eco.unlpam.edu.ar/objetos/materias/contador-publico/5-ano/produccion-y-comercializacion/aportes-teoricos/PRECIO_Modo_de_compatibilidad.pdf

[18] <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/185000-189999/185701/norma.htm>