



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas**

**Carrera de Ingeniería en Mecatrónica**

**SISTEMA DE DETERMINACIÓN DEL CENTRO INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN  
(CIR) DE LA RODILLA MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**

**Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica**

Autor:

Wilson Anderson Tirira Pusda

Director:

MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría

Ibarra - 2023



## Universidad Técnica del Norte

### Biblioteca Universitaria

## Autorización de uso y publicación a favor de la Universidad Técnica del Norte

### 1. Identificación de la Obra

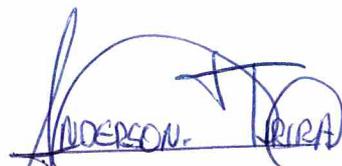
En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>Datos del Autor</b>			
Cédula de identidad	0401997044		
Apellidos y Nombres	Wilson Anderson Tirira Pusda		
Dirección	Barrio Chutan Bajo, Calle S/N		
Email	watirirap@utn.edu.ec		
Teléfono fijo	062271011	Teléfono móvil	0982336916
<b>Datos de la Obra</b>			
Tema	SISTEMA DE DETERMINACIÓN DEL CENTRO INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN (CIR) DE LA RODILLA MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL		
Apellidos y Nombres	Wilson Anderson Tirira Pusda		
Fecha	18 de octubre de 2023		
Programa	Pregrado		
Título por el que opta	Ingeniero en Mecatrónica		
Director	MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría		

## 2. Constancias

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló sin violar derechos de autor de terceros; por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 18 de octubre 2023



Wilson Anderson Tirira Pusda

C.I: 0401997044

## **Certificación del director del trabajo de grado**

En mi calidad de director del trabajo de grado “SISTEMA DE DETERMINACIÓN DEL CENTRO INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN (CIR) DE LA RODILLA MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL”, presentado por el egresado Wilson Anderson Tirira Pusda, que opta por el título de ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 18 de Octubre 2023

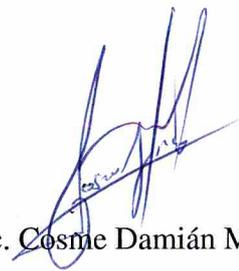


MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría  
Director de Tesis

## **Aprobación del comité calificador**

El Tribunal Examinador del trabajo de titulación “SISTEMA DE DETERMINACIÓN DEL CENTRO INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN (CIR) DE LA RODILLA MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL” elaborado por WILSON ANDERSON TIRIRA PUSDA, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, 18 de octubre de 2023.



MSc. Cosme Damián Mejía Echeverría

Director de Trabajo de Grado



PhD. David Alberto Ojeda Peña

Asesor de Trabajo de Grado

## **Dedicatoria**

Este trabajo es resultado de la constancia, esfuerzo y dedicación, no solamente mío; es por esto que el presente va dedicado a Dios por permitirme culminar los estudios superiores, a mis padres Eliecer y Cecilia que gracias a sus consejos y apoyo constante no desmayé y logré culminar el objetivo, a mis hermanas que siempre estuvieron ahí apoyándome.

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis profesores quienes compartieron sus conocimientos para poder formarme como buen profesional.

A mis compañeros de clases que de una u otra forma estuvieron ahí para pasar los buenos y malos momentos.

Finalmente, a todas las personas que estuvieron presentes en este trascurso y fueron parte de mi formación como profesional.

# Índice general

<b>Autorización</b>	<b>II</b>
<b>Constancias</b>	<b>III</b>
<b>Certificación del director del trabajo de grado</b>	<b>IV</b>
<b>Aprobación del comité calificador</b>	<b>V</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>VI</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Índice general</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Introducción</b>	<b>3</b>
Problema . . . . .	3
Objetivos . . . . .	3
Objetivo General . . . . .	3
Objetivos Específicos . . . . .	3
Justificación . . . . .	3

Alcance . . . . .	3
<b>I. Marco Referencial</b>	<b>7</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	7
1.2. Marco Teórico . . . . .	11
1.2.1. Marcha humana . . . . .	11
1.2.2. Biomecánica de la pierna humana . . . . .	11
1.2.3. La rodilla . . . . .	12
1.2.4. Rango de Movimiento . . . . .	13
1.2.5. Centro instantáneo de rotación . . . . .	14
1.2.6. Procesamiento digital de imágenes . . . . .	14
1.2.7. Técnicas de captura de movimiento . . . . .	15
1.2.8. Especificaciones de colores BGR . . . . .	15
1.2.9. Visión Artificial . . . . .	16
1.2.10. Adquisición de imagen . . . . .	17
1.2.11. Procesamiento de imagen . . . . .	18
1.2.12. Adquisición de datos . . . . .	18
1.2.13. Extracción de información . . . . .	18
<b>II. Marco Metodológico</b>	<b>19</b>
2.1. Enfoques y tipos de investigación . . . . .	19
2.2. Diseño de la investigación . . . . .	20
2.2.1. Fase 1: Investigar conceptos relacionados al cálculo del Centro instan- táneo de rotación de la rodilla . . . . .	20
2.2.2. Fase 2: Diseño del algoritmo para identificar el movimiento de la rodilla con la aplicación de visión artificial. . . . .	20
2.2.3. Fase 3: Integración del sistema de visión artificial . . . . .	21
2.2.4. Fase 4: Validar el sistema mediante la curva del CIR de la rodilla; rea- lizando las pruebas a algunas personas . . . . .	21
<b>III. Resultados y discusión</b>	<b>22</b>
3.1. Especificaciones del sistema de visión artificial a implementar . . . . .	22

3.2.	Alternativas de solución . . . . .	23
3.2.1.	Alternativa de solución 1 . . . . .	24
3.2.2.	Alternativa de solución 2 . . . . .	25
3.2.3.	Alternativa de solución 3 . . . . .	25
3.3.	Evaluación de criterios . . . . .	27
3.3.1.	Evaluación de cada criterio . . . . .	27
3.4.	Elementos . . . . .	30
3.4.1.	Cámara . . . . .	30
3.4.2.	Posición anatómica de la persona . . . . .	30
3.4.3.	Marcadores de colores . . . . .	31
3.4.4.	Ambiente . . . . .	32
3.4.5.	Python . . . . .	33
3.5.	Metodología para el diseño del algoritmo . . . . .	33
3.5.1.	OpenCv . . . . .	34
3.5.2.	NumPy y math . . . . .	34
3.5.3.	SQLite . . . . .	34
3.5.4.	Matplotlib . . . . .	34
3.6.	Diseño del Algoritmo . . . . .	35
3.6.1.	Pruebas Previas . . . . .	36
3.7.	Validación de resultados . . . . .	38
3.7.1.	Prueba 1 . . . . .	38
3.7.2.	Prueba 2 . . . . .	40
3.7.3.	Prueba 3 . . . . .	41
3.7.4.	Prueba 4 . . . . .	43
3.7.5.	Prueba 5 . . . . .	44
<b>IV.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>46</b>
4.1.	Conclusiones . . . . .	46
4.2.	Recomendaciones . . . . .	47
	<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>

<b>Anexos</b>	<b>52</b>
<b>A. Manual de Usuario</b>	<b>53</b>
<b>B. Código</b>	<b>57</b>
<b>C. Base de datos</b>	<b>67</b>

# Índice de figuras

1.1. Estudio de la marcha con fotogrametría . . . . .	8
1.2. Persona con marcadores colocados . . . . .	9
1.3. Modelo de 4 barras con coordenadas naturales . . . . .	10
1.4. Partes importantes de la pierna humana . . . . .	11
1.5. Partes principales de la articulación de la rodilla . . . . .	12
1.6. Flexión y extensión de la rodilla . . . . .	13
1.7. Representación de la función $(x_i, y_i)$ . . . . .	14
1.8. Espectro de luz . . . . .	15
1.9. Captación y procesamiento de una imagen digital . . . . .	17
3.1. Matriz morfológica . . . . .	23
3.2. Planos anatómicos . . . . .	31
3.3. Marcadores de colores . . . . .	32
3.4. Laboratorio de la Universidad donde se realizó las pruebas . . . . .	32
3.5. Diagrama de algoritmo . . . . .	36
3.6. Colocación de Marcadores . . . . .	36
3.7. Colocación de Marcadores . . . . .	37
3.8. Identificación de los marcadores de colores . . . . .	39
3.9. Curva del CIR de la persona 0.8 . . . . .	39
3.10. Identificación de los marcadores de colores . . . . .	40
3.11. Curva del CIR de la persona 2 . . . . .	41
3.12. Identificación de los marcadores de colores . . . . .	42
3.13. Curva del CIR de la persona 3 . . . . .	42
3.14. Identificación de los marcadores de colores . . . . .	43

3.15. Curva del CIR de la persona 4 . . . . .	44
3.16. Identificación de los marcadores de colores . . . . .	45
3.17. Curva del CIR de la persona 5 . . . . .	45

# Índice de tablas

1.1. Longitud de onda para cada color . . . . .	16
1.2. Ejemplos nomenclatura BGR . . . . .	16
3.1. Evaluación de criterios de diseño . . . . .	27
3.2. Evaluación de las alternativas respecto a la implementación del sistema . . . . .	27
3.3. Evaluación de las alternativas de solución respecto a la precisión . . . . .	28
3.4. Evaluación de las alternativas de solución respecto a la velocidad . . . . .	28
3.5. Evaluación de las alternativas de solución respecto al costo . . . . .	29
3.6. Evaluación del sistema de solución . . . . .	29
3.7. Características de la cámara del moto g41 . . . . .	30
3.8. Datos persona 1 . . . . .	38
3.9. Datos persona 2 . . . . .	40
3.10. Datos persona 3 . . . . .	41
3.11. Datos persona 4 . . . . .	43
3.12. Datos persona 5 . . . . .	44

## Resumen

La rodilla es la articulación más grande y una de las más importantes del cuerpo humano; el desarrollo de dispositivos que implican la rehabilitación o el remplazo parcial o total de esta articulación se ha convertido en un reto para los investigadores. En el presente trabajo se desarrolló un sistema no invasivo para determinar el CIR de la rodilla utilizando visión artificial. La metodología empleada para el desarrollo del algoritmo fue: revisión del estado del arte para luego iniciar con el desarrollo del algoritmo, el sistema depende de un algoritmo ejecutado de una computadora, y mediante una cámara obtener los datos proporcionados por marcadores de colores colocados en la pierna; luego del primer ensayo se procedió a la optimización del algoritmo. En la parte de resultados y análisis, se muestra lo obtenido de las pruebas realizadas en la Universidad Técnica del Norte; con la ayuda de fisioterapeutas que ayudaron a la colocación de los marcadores; esto a 5 personas que no hayan sufrido lesiones de la rodilla; el proceso llevado a cabo permitió el análisis del movimiento de flexo-extensión de la rodilla en el plano sagital y con los datos obtenidos se procedió a graficar la curva del CIR de cada persona.

**Keywords:** Rodilla, Centro instantáneo de rotación, Visión Artificial

## **Abstract**

The knee is the largest and one of the most important joints in the human body; the development of devices involving the rehabilitation or partial or total replacement of this joint has become a challenge for researchers. In the present work, a noninvasive system was developed to determine the ICR of the knee using artificial vision. The methodology used for the development of the algorithm was: review of the state of the art to then start with the development of the algorithm, the system depends on an algorithm executed from a computer, and by means of a camera to obtain the data provided by color markers placed on the leg; after the first test we proceeded to the optimization of the algorithm. The results and analysis section shows the results obtained from the tests performed at the Universidad Técnica del Norte; with the help of physiotherapists who assisted in the placement of the markers; this to 5 people who have not suffered knee injuries; the process carried out allowed the analysis of the flexo-extension movement of the knee in the sagittal plane and with the data obtained we proceeded to plot the CIR curve of each person.

**Keywords:** Knee, ICR, Artificial Vision

# Introducción

## Problema

A través de los años el uso de nuevas tecnologías ha permitido a las personas desarrollar nuevos productos que permitan agilizar los procedimientos de manera eficiente y en menores lapsos de tiempo; la ingeniería en biomédica no es la excepción; gracias a la aplicación de conocimiento los ingenieros en el área de medicina han permitido el desarrollo de diversos dispositivos electrónicos funcionales que facilitan los diagnósticos de algunas enfermedades.

Debido al aumento de personas que presentan movilidad reducida, se ha buscado mejorar los tratamientos de traumatología, ortopedia o reumatología [1]; es por esto que en la actualidad el desarrollo de técnicas que permiten evaluar y estudiar la marcha humana han superado a los procedimientos tradicionales, esto debido al avance de dispositivos y las formas de procesar datos; más personas buscan desarrollar productos basados en inteligencia artificial que permita resolver problemas de manera rápida y eficaz; por lo general se busca métodos no invasivos para aplicar en personas que presentan algún tipo de molestia en su cuerpo.

En el Ecuador se registran en el Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades un total de 471.205 personas que presentan discapacidad y el que sobresale es la física con 215.156 personas, equivalente al 45,71 %; de este porcentaje 121.836 personas de género masculino; 93.308 personas de género femenino y 12 personas LGBTI [2].

La rodilla es la articulación más grande e importante del cuerpo humano [3], por lo tanto, en el presente trabajo buscamos desarrollar un algoritmo que mediante visión artificial permita determinar la curva del CIR de la rodilla respecto al ángulo de flexión-extensión de la rodilla

en el plano sagital. El proyecto forma parte de un programa macro enfocado a la sociedad y el objetivo es hacer prótesis de rodilla para personas ecuatorianas; que por motivos económicos no pueden acceder a una.

La tecnología una herramienta que con el pasar del tiempo está ayudando a resolver muchos problemas; algunas de las actividades que solía hacer el ser humano de forma manual se automatizaron, se redujo el tiempo y se optimizaron recursos; estudios en la biomédica están permitiendo desarrollar dispositivos que sean fáciles de manipular y no sean invasivos, de esta forma se consigue que la persona se sienta tranquila y el diagnóstico sea más preciso; al tener la articulación de la rodilla como motivo de estudio; el principal objetivo es conseguir la curva del CIR en el movimiento de flexión-extensión, usando visión artificial, en el plano sagital.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

- Desarrollar un sistema que permita determinar el CIR de la rodilla, por medio de visión artificial, para encontrar la curva respecto al ángulo de flexión- extensión de la rodilla.

### **Objetivos Específicos**

- Conceptualizar los métodos para la obtención del centro instantáneo de rotación de la rodilla.
- Diseñar un algoritmo que permita identificar el movimiento de la rodilla mediante visión artificial.
- Implementar el sistema de obtención del CIR de la rodilla mediante visión artificial.
- Validar el sistema mediante la obtención de la curva del centro instantáneo de rotación (CIR) de diferentes personas.

## Justificación

En la pierna humano encontramos la articulación de la rodilla que esta ubicada aproximadamente a la mitad de la extremidad inferior, se denomina como una de las más grandes y complejas del cuerpo, y no está libre de sufrir lesiones, es por esto por lo que es un objeto de estudio para los fisioterapeutas e ingenieros [3, 4]. Captar, modelar, replicar y comprender el movimiento humano es un reto, y en el campo de la investigación el análisis de videos basado en secuencias de marcha humana ha crecido; en los últimos años ha sido más notable convirtiéndose en una necesidad en múltiples disciplinas como: medicina, deporte, construcción, agricultura, seguridad, videojuegos, entre otros [5]. El video-análisis es un instrumento muy usado en diversas áreas, como en la medicina de rehabilitación, donde el profesional utiliza esta herramienta para la evaluación y diagnóstico de pacientes con alguna discapacidad motora como lo son las diferentes discapacidades que se pueden presentar en el la pierna [6].

En la actualidad se utilizan equipos que permiten la captura de movimiento en 3D para el análisis de la marcha; para lo que se utiliza, cámaras infrarrojas, marcadores reflectantes en las articulaciones, scanner, sensores, entre otros. Por lo general este tipo de análisis se lo realiza en laboratorios equipados con esta tecnología y muchas veces acceder a esto resulta costoso es por esto por lo que se busca alternativas que permitan a las personas acceder de manera más fácil.

El movimiento de la rodilla desplaza el CIR a diversas posiciones y esto permite la construcción de una curva que se forma con cada movimiento de la articulación de la rodilla; la rodilla de cada persona es diferente y por ende para cada persona existe una curva del CIR distinta; así que se busca encontrar la curva del CIR correspondiente para cada persona. Además, pretender ayudar a personas amputadas, midiendo el CIR en la otra pierna y con estos datos construir una prótesis para que la persona tenga una marcha “normal”; si la prótesis no es adecuada se puede ocasionar problemas en el paciente.

## **Alcance**

Se pretende desarrollar un algoritmo de visión artificial que permita por medio de sensor encontrar el centro instantáneo de rotación de la rodilla en movimiento de flexión y extensión, en el plano sagital, con el algoritmo se implementará un sistema que obtenga los datos del movimiento y con ellos construir la curva del CIR de cada extremidad y mostrar en una interfaz; de la cual se podrá realizar el respectivo informe.

# Capítulo I

## Marco Referencial

En el presente capítulo se realiza una recopilación del estado del arte donde se abordan temas relacionados al objeto de estudio.

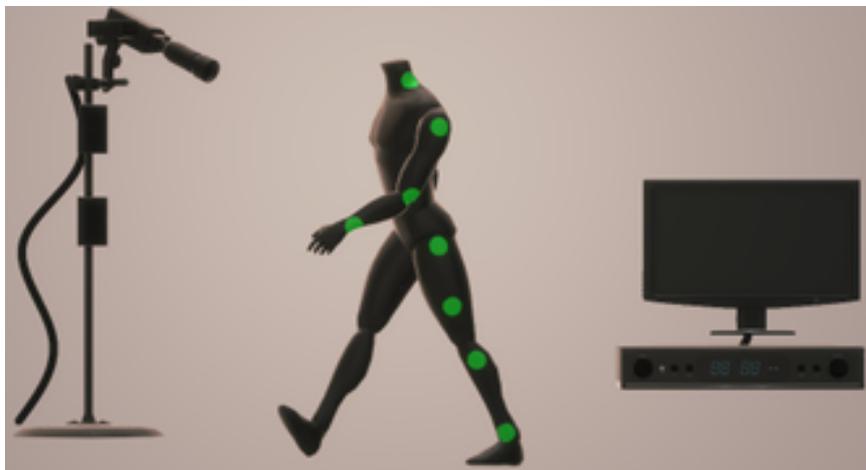
### 1.1. Antecedentes

La articulación de la rodilla tiene un contacto irregular entre los huesos de la tibia y el fémur y al realizar movimientos de flexión extensión se puede encontrar el CIR donde una de las características principales es que tiene la forma de  $J$  [7].

En el estudio cinemático de la biomecánica de la pierna en la actualidad se cuentan con métodos no invasivos que facilitan la obtención de datos en [4] utilizan un sistema de fotogrametría para el análisis de movimiento de la rodilla, y análisis de video como se observa en la figura 1.1; esto permitió determinar posiciones, velocidades y aceleraciones angulares descritos en el movimiento de flexión y extensión de la pierna. Las imágenes de radiografía son útiles para el estudio del CIR es por eso por lo que en [8], se tomó fotografías de seis personas con plastia de Ligamento Cruzado Anterior con la pierna en extensión, posteriormente a esto se desarrolla una aplicación informática que permitió identificar las estructuras anatómicas y encontrar el CIR de la rodilla, el estudio dio como resultado información que permite tratar la plastia de la rodilla de manera temprana e impedir complicaciones.

## Figura 1.1

*Estudio de la marcha con fotogrametría*



La estimación predictiva y técnicas funcionales son formas para estimar el CIR de la rodilla, en [9] analizan métodos para encontrar el CIR, donde usar marcadores pegados a la pierna de la persona y procesar los datos obtenidos por el dispositivo de captura, lo que permitió encontrar un método más efectivo que se utiliza para obtener el CIR de la rodilla.

Para evaluar el CIR de diferentes prótesis de rodilla en [10] se obtuvo el CIR de la rodilla, con programas computacionales de captura de imágenes y procesamiento para obtener y graficar los datos obtenidos, determinando varias curvas del CIR de la rodilla y seleccionar el mejor modelo de prótesis.

En [7] se seleccionó a una persona sana para obtener el CIR de rodilla, para lo cual se colocó a la persona en posición sagital y se le colocó 8 marcadores donde 4 se colocaron en el muslo y los restantes en la pantorrilla como se muestra en la figura 1.2, además se utilizó un dispositivo de captura de movimiento, con lo que se pudo obtener la curva del CIR de la rodilla.

El estudio del CIR de la rodilla es necesario en el campo de la biomecánica en [11], buscan determinar el CIR de un paciente sano para realizar pruebas de flexo-extensión de la rodilla en el plano sagital, el movimiento de la articulación de la rodilla es captado por un dispositivo de video y un programa con la ayuda de 4 marcadores colocados en: cadera, 2 en rodilla y 1 en el tobillo; con los datos obtenidos se localizó el CIR de la rodilla.

**Figura 1.2**

*Persona con marcadores colocados*



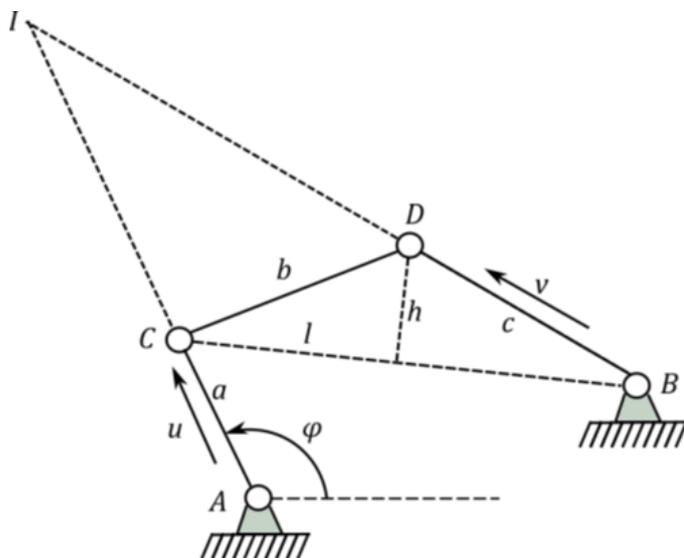
Nota. Adaptado de: "Design and optimization of single-degree-of-freedom six-bar mechanisms for knee joint of lower extremity exoskeleton robot", por B. Xiao, Y. Shao, and W. Zhang, 2019 [7]

Para el diseño policéntrico de una prótesis de 4 barras como indica [12] es necesario analizar la marcha humana para lo cual se colocaron 3 marcadores en el tobillo, la rodilla y la cadera, se consiguió las velocidades y aceleraciones, además los ángulos de la rodilla, esto ayudó para establecer el CIR y esto sirvió para encontrar las dimensiones del mecanismo de las 4 articulaciones giratorias y proceder a realizar la prótesis policéntrica de 4 barras.

El trabajo previo del diseño de una prótesis de rodilla en [13] pretende mejorar el diseño, para lo que analiza el CIR de la rodilla de forma gráfica y analítica, haciendo que la persona realice movimientos de flexo-extensión en el plano sagital y analizando los datos con un software, desarrollando un mecanismo de 4 barras funcionales similar al que se muestra en la figura 1.3.

**Figura 1.3**

*Modelo de 4 barras con coordenadas naturales*



Nota. Adaptado de: "Síntesis óptima de un mecanismo de cuatro barras para la rodilla utilizando coordenadas naturales para la formulación cinemática", por E. Flórez, R. Nuñez, and F. Martínez, 2022 [14]

A y B corresponden a pares fijos, C y D son pares cinemáticos;  $a, b, c, h, l$  son segmentos;  $\varphi$  es el ángulo que forma  $u$  con la horizontal;  $u, v$  son vectores unitarios; e  $I$  es el (CIR) del mecanismo.

El desarrollo de dispositivos médicos en la biomecánica de la marcha es fundamental; en [15] un grupo de profesionales desarrollaron una ortesis de rodilla con un análisis cinemático de la marcha, se colocaron marcadores para evaluar el movimiento de flexión y extensión en el plano sagital y se capturó el movimiento con cámaras de alta velocidad con la aplicación de fotogrametría, se obtuvo como resultado el CIR de la rodilla y se logró que el mecanismo de la ortesis se ajuste al movimiento natural de la rodilla y permitió el desarrollo de una ortesis para rodilla.

El diseño de exoesqueletos usados para la rehabilitación de las personas es importante es por eso que [16], propone la implementación de un exoesqueleto antropomórfico que tiene un CIR variable, para esto se analizó la marcha humana con un sistema óptico de captura de movimiento 3D, posteriormente se obtuvo las dimensiones para el diseño de un mecanismo de rodilla de 5

barras, los resultados que encontraron fue una similitud en la trayectoria de movimiento del cuerpo humano y el exoesqueleto.

## 1.2. Marco Teórico

### 1.2.1. Marcha humana

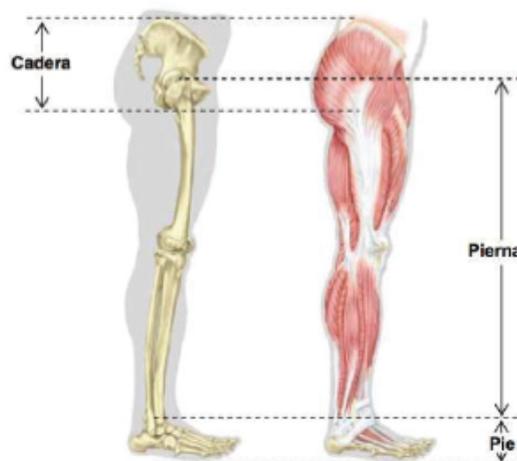
La marcha humana es una de las actividades más repetitivas que realiza el ser humano, donde las extremidades inferiores ayudan al cuerpo a impulsarse hacia adelante, inicia desde el despegue del talón hasta el reposo de este; por lo tanto, la pierna humana juega un papel importante en la marcha [17].

### 1.2.2. Biomecánica de la pierna humana

La biomecánica es la ciencia encargada de analizar los fenómenos cinemáticos y mecánicos presentes en la marcha humana donde se busca representar los movimientos y fuerzas que realiza el ser humano [18].

#### Figura 1.4

*Partes importantes de la pierna humana*



Nota. Adaptado de "Diseño e implementación de un sistema para visualizar la marcha humana biomecánica en la afectación de rodilla ante una gonartrosis", por D. Terán, 2017 [3].

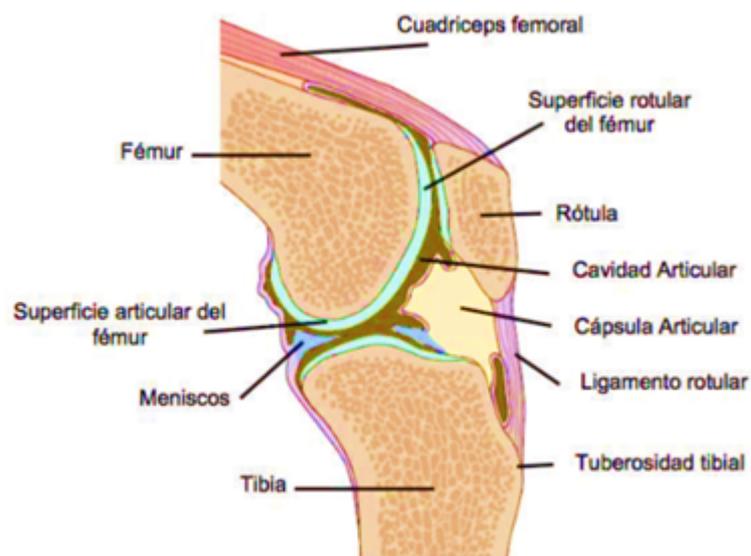
La parte inferior del cuerpo humano que comprende la cadera y tobillo como se muestra en la figura 1.4 se define como pierna humana, esta parte es de vital importancia porque ayuda al ser humano a soportar el peso y moverse de un lugar a otro es por esto por lo que las articulaciones presentes en la pierna humana tienen mayor volumen y presentan mejor estabilidad [3, 4]; además la pierna es considerada una de las partes más importantes del cuerpo humano.

### 1.2.3. La rodilla

La rodilla es la articulación más grande e importante del ser humano, en ella se encuentra la unión de tres huesos principales: fémur, tibia y rótula se muestran en la figura 1.5; por ende es importante para la marcha, además soporta el cuerpo humano [3, 4].

#### Figura 1.5

*Partes principales de la articulación de la rodilla*



Nota. Adaptado de "Diseño e implementación de un sistema para visualizar la marcha humana biomecánica en la afectación de rodilla ante una gonartrosis", por D. Terán, 2017 [3].

Para comprender el movimiento de la rodilla es necesario determinar algunas variables o segmentos que tienen relación con el resto del cuerpo [4]; la articulación de la rodilla soporta fuerzas y momentos elevados durante la marcha humana [19]; además la movilidad en esta articulación debe facilitar la marcha y orientación del pie debido a las irregularidades presentes

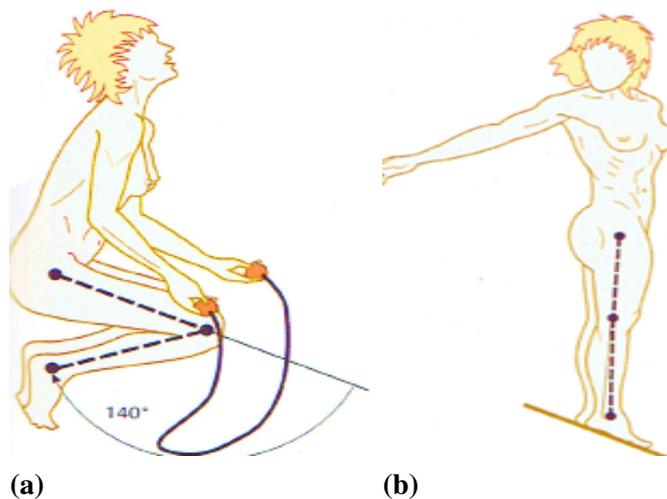
en el piso [3].

#### 1.2.4. Rango de Movimiento

Para determinar el rango del movimiento de la rodilla que se forma entre el fémur y la tibia, puede ser determinado con instrumentos sencillos como un goniómetro este sea análogo o digital [4]; en el plano sagital la pierna en extensión completa señala un ángulo de 0, como se muestra en figura 1.6a; mientras tanto en flexión completa normal puede alcanzar un ángulo de  $140^\circ$  como se muestra en la figura 1.6b; si previamente esta la cadera flexionada, hay que tomar en cuenta que en una hiperextensión el ángulo de la pierna es  $-10^\circ$  [3].

**Figura 1.6**

*Flexión y extensión de la rodilla*



Nota. Adaptado de: "Fisiología articular. Tomo 2: Miembro Inferior", por I. Kapanji, 2011 [20]. Donde (a) es la flexión de la rodilla y (b) es la extensión de la rodilla.

En el presente documento el estudio de los ángulos es importante debido a que con esta información se pretende determinar el CIR de la rodilla.

### 1.2.5. Centro instantáneo de rotación

El CIR es el punto en el cual un objeto gira y donde la velocidad relativa es 0 en un instante dado [21], el CIR es importante en el área de la biomecánica debido a que permite analizar y predecir cómo se comportará el objeto en términos de velocidades, aceleraciones y fuerzas y es por ello por lo que puede ayudar en la construcción de dispositivos médicos en el presente caso ayudar a desarrollar prótesis o exoesqueletos enfocados en la marcha humana [7, 15].

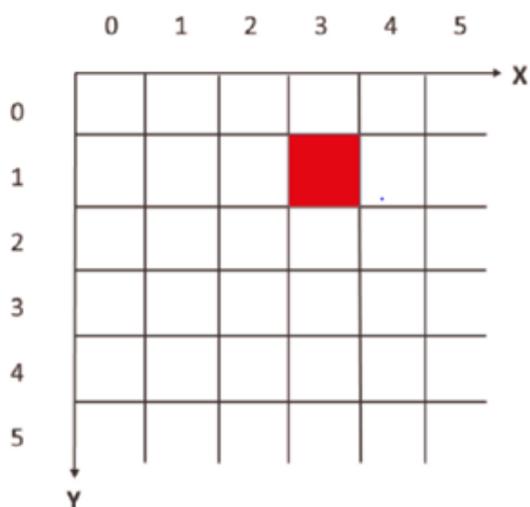
Es importante destacar que el centro instantáneo de rotación puede cambiar a medida que el objeto se mueve y gira [22]; es por ello por lo que en el presente trabajo se busca encontrar los puntos del CIR de la rodilla para posteriormente construir una gráfica referencial.

### 1.2.6. Procesamiento digital de imágenes

Una imagen digital constituye un conjunto de píxeles que toman valores numéricos y pueden ser representados con función  $f(x,y)$  que representan las coordenadas en un plano como se muestra en la figura 1.7. Cualquier acción relacionada con: guardar, transmitir, extraer y comprender la información de la imagen se denomina procesamiento digital de imágenes [23].

**Figura 1.7**

*Representación de la función  $(x_i, y_i)$*



Nota. Adaptado de: "Visión artificial: aplicaciones prácticas con OpenCV-Python", por T. Domínguez, 2021 [24].

### 1.2.7. Técnicas de captura de movimiento

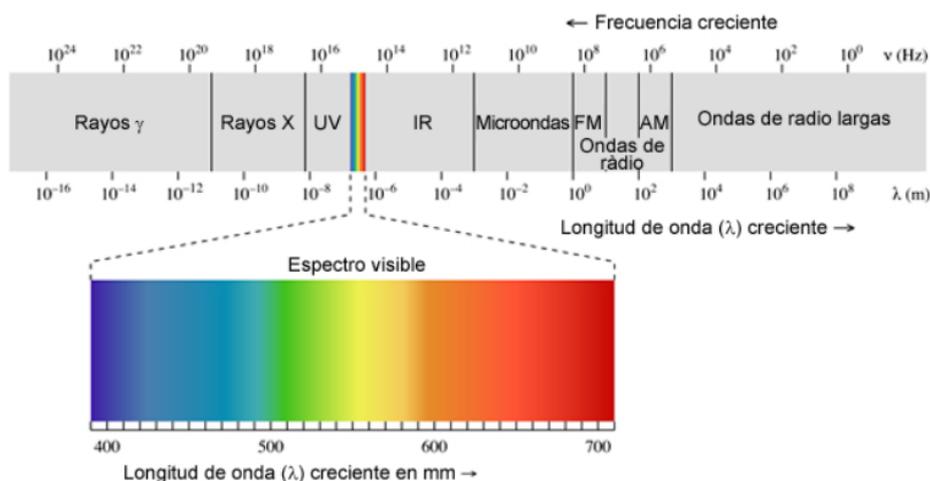
En el estudio de la biomecánica existen diversos equipos para la captura de movimiento del ser humano; dispositivos como teléfonos celulares, cámaras de alta definición, laboratorios de estudios de marcha, entre otros; cada uno de estos se adaptan a las necesidades del usuario, una de las técnicas comúnmente utilizadas para el análisis de marcha en este caso para analizar el movimiento de la rodilla en el plano sagital en el movimiento de flexo-extensión, la fotogrametría es una buena opción debido a que presenta un alto índice de fiabilidad y los datos obtenidos se asemejan a la realidad, entre otros, es por esto que esta técnica es de gran utilidad en el área de biomecánica [4].

### 1.2.8. Especificaciones de colores BGR

El color que se forma con BGR (Blue, Green, Red; Azul, Verde, Rojo), estos tres colores considerados como primarios y la mezcla de estos colores permite la generación de nuevos colores con valores de intensidad máximo 255 y mínimo 0, como se muestra en la figura 1.8; la física óptica ayuda a contemplar el color como un modelo RGB.

**Figura 1.8**

*Espectro de luz*



Nota. Adaptado de: "Diseño de algoritmo de visión artificial para la lectura de códigos de barras por medio de dispositivos android", por M. Jimenez, 2022 [23].

La tabla 1.1 muestra el valores aproximados de la longitud de onda para cada color

**Tabla 1.1**

*Longitud de onda para cada color*

<b>Color</b>	<b>Longitud de Onda</b>
Ultravioleta	< 380 nm
Violeta	380-450 nm
Azul	450-495 nm
Verde	495-570 nm
Amarillo	570-590 nm
Naranja	590-620 nm
Rojo	620-750 nm
Infrarrojo	>750nm

Nota. Adaptado de: "Visión artificial: aplicaciones prácticas con OpenCV-Python", por T. Domínguez, 2021 [24].

Existe una infinidad de colores y para seleccionar el color adecuado hay que tomar en cuenta la posición donde se encuentra el color mencionado; en la tabla1.2 se muestran algunos ejemplos de nomenclatura BGR:

**Tabla 1.2**

*Ejemplos nomenclatura BGR*

<b>Color</b>	<b>Nomenclatura</b>
Blanco	(255,255,255)
Negro	(0,0,0)
Azul	(255,0,0)
Verde	(0,255,0)
Rojo	(0,0,255)
Cian	(255,255,0)
Morado	(255,0,255)
Amarillo	(0,255,255)

Nota. Adaptado de: "Visión artificial: aplicaciones prácticas con OpenCV-Python", por T. Domínguez, 2021 [24].

### 1.2.9. Visión Artificial

La visión artificial forma parte de la inteligencia artificial cuyo objeto es interpretar y procesar imágenes para obtener información de utilidad y conseguir un objetivo que sería el estudio

de los datos que se consiguen de imágenes digitales [24].

En biomédica la visión artificial ayuda a analizar procesos como: análisis y prevención de tumores, herramienta para que las cirugías se las puede realizar por imagen, ayuda en el diagnóstico de enfermedades, también en el estudio de la marcha humana, cada día la visión artificial tiene más impacto debido a que es una técnica no invasiva.

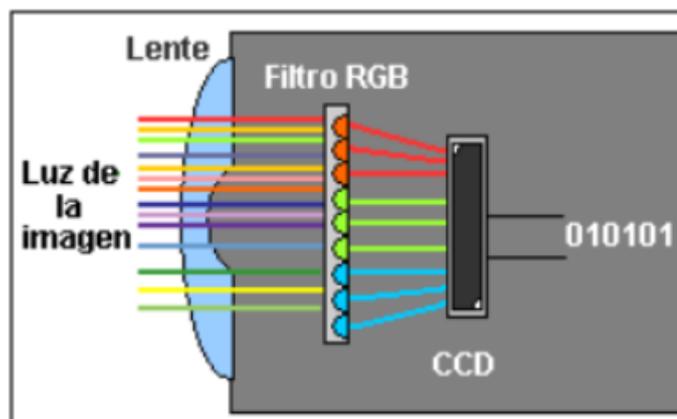
Para analizar imágenes usando visión artificial hay que tener en cuenta ciertos procesos enfocados al análisis y procesamiento de imágenes por visión artificial, entre los cuales tenemos: adquisición, procesamiento, extracción de datos y de información [25].

### 1.2.10. Adquisición de imagen

Esta parte del proceso se denomina etapa sensorial como se muestra en la figura 1.9, la imagen digital que se genera debido a los sensores presentes en la cámara o en otros dispositivos digitales, generan una imagen en 2D, donde para el análisis de esta hay que tener en cuenta que la imagen es un conjunto de (x,y) píxeles, y tomar el área que vamos a analizar [26].

**Figura 1.9**

*Captación y procesamiento de una imagen digital*



Nota: Adaptado de: "Diseño de algoritmo de visión artificial para la lectura de códigos de barras por medio de dispositivos android", por M. Jiménez, 2022 [23]

### **1.2.11. Procesamiento de imagen**

Previo a extraer información de una imagen, hay que considerar el procesamiento esto con el fin de que posteriormente el proceso de análisis y obtención de datos de la imagen sea más sencillo. Existen funciones dentro de la programación utilizadas para: modificar la luminosidad, cambiar el contraste, cambiar el tamaño de imagen, cambiar el color, cambiar el formato, variar el enfoque, entre otros [26].

### **1.2.12. Adquisición de datos**

Cuando la imagen esta lista es momento de aplicar el algoritmo para poder extraer los datos requeridos, donde podemos determinar en la imagen aspectos principales como: líneas, puntos, coordenadas, movimiento, colores, o las variables que hayamos determinado previamente en el algoritmo [26]. Luego de determinar en la imagen cada una de las variables necesarias, podemos obtener: colores, coordenadas, posición, ángulos, de acuerdo con las variables planteadas en el algoritmo.

### **1.2.13. Extracción de información**

La información es el resultado final luego de la obtención de los datos de la imagen, con esto se procede a tomar decisiones dentro del sistema diseñado [27]. En el caso del estudio del CIR de la rodilla luego de determinar los colores principales, los ángulos, se procesa la información y se grafica lo que en este caso vendría a ser la curva del CIR.

# Capítulo II

## Marco Metodológico

En el presente capítulo se indica cual es el enfoque de la investigación y cuáles son los tipos de investigación utilizados; además se detalla paso a paso el diseño de investigación.

### 2.1. Enfoques y tipos de investigación

En el desarrollo del presente trabajo de integración curricular se empleó diversos tipos de investigaciones que ayudaron a culminar el presente documento.

La investigación documental, implicó la revisión de material con información relevante y necesaria relacionado con el objeto de estudio [28]; permitió la comprensión de los conceptos relacionados al diseño del Sistema de determinación del CIR de la rodilla mediante visión artificial.

Investigación descriptiva, con una serie de pruebas se recolecta los datos necesarios obtenidos de una observación cuantitativa [29]; a través de un dispositivo de captura de imágenes (cámara) y el algoritmo se procede a procesar la imagen y generar los datos requeridos.

Investigación experimental donde vamos a obtener datos por observación que son condicionados, donde se considera una variable y se espera encontrar respuesta [30], es por eso por lo que con el algoritmo y visión artificial se evaluara los parámetros para encontrar el CIR de la rodilla.

El problema se resolvió con un enfoque ingenieril, con la revisión del estado del arte, las condiciones necesarias para poder determinar el CIR de la rodilla usando visión artificial, determinando las herramientas necesarias para resolver el problema, se plantearon las soluciones posibles.

La opción considerada para la solución de este planteamiento es la ingeniería y de una manera adecuada se logró obtener la curva del CIR de la rodilla utilizando visión artificial.

## **2.2. Diseño de la investigación**

### **2.2.1. Fase 1: Investigar conceptos relacionados al cálculo del Centro instantáneo de rotación de la rodilla**

Actividad 1. Revisar del estado del arte referente al CIR, velocidades y aceleraciones.

Actividad 2. *Estudiar de la anatomía de la articulación de la rodilla:* huesos, músculos y ligamentos principales.

Actividad 3. *Conocer la fisiología de la rodilla:* movimientos principales: “flexión, extensión” considerando el plano sagital, y la amplitud de los ángulos.

Actividad 4. Analizar el procedimiento para obtener el CIR de la rodilla

Actividad 5: *Realizar una matriz morfológica:* esto con el fin de evaluar algunas opciones y seleccionar la mejor

### **2.2.2. Fase 2: Diseño del algoritmo para identificar el movimiento de la rodilla con la aplicación de visión artificial.**

Actividad 1: *Definición de variables para el desarrollo del algoritmo para la determinación del movimiento de la rodilla necesitamos tomar en cuenta variables como:* puntos de referencia, vectores de desplazamiento, coordenadas, velocidades y aceleraciones.

Actividad 2: Desarrollar el diagrama de flujo y algoritmo para el cálculo del CIR de la rodilla.

Actividad 3: Integrar el algoritmo con el sistema de visión artificial para adquirir los datos del exterior.

### **2.2.3. Fase 3: Integración del sistema de visión artificial**

Actividad 1: *Funcionamiento del algoritmo*: comprobar si el algoritmo funciona y la cámara toma las primeras imágenes de la rodilla.

Actividad 2: *Toma de las primeras imágenes*: proceder a hacer las primeras tomas de la rodilla en el plano sagital con movimientos de flexo-extensión.

Actividad 3: *Puntos de referencia*: identificar puntos de referencia en la rodilla, como la cabeza del fémur y la superficie tibial, para ayudar a calcular la posición del centro de rotación con el algoritmo previamente desarrollado.

Actividad 4: *Calibración de la cámara*: calibrar la cámara para asegurar que las mediciones de las imágenes sean precisas.

Actividad 5: *Segmentación de la imagen*: segmentar la imagen para aislar la rodilla y eliminar cualquier ruido que pueda inferir con la detección del centro de rotación.

Actividad 6: *Análisis de la imagen*: Realizar un análisis de la imagen para determinar la posición del centro de rotación mediante el algoritmo previamente desarrollado.

### **2.2.4. Fase 4: Validar el sistema mediante la curva del CIR de la rodilla; realizando las pruebas a algunas personas**

Actividad 1: *Optimización del algoritmo*: optimizar el algoritmo utilizado para mejorar la precisión de la detección del centro de rotación.

Actividad 2: Hacer pruebas en algunas personas para obtener de una base de datos.

Actividad 3: *Datos que permitan graficar la curva*: Con los datos obtenidos a través del algoritmo y la cámara se procede a la realización de la curva del CIR de la rodilla.

Actividad 4: Mostrar los resultados obtenidos.

Actividad 5: Escribir las conclusiones y recomendaciones.

# Capítulo III

## Resultados y discusión

En este capítulo se muestran las especificaciones del sistema y se utiliza una matriz morfológica que permita seleccionar la mejor opción para el desarrollo del sistema entre ellos; seleccionando los principales elementos para la consecución del objetivo planteado que va con el desarrollo de un algoritmo para determinar el CIR de la rodilla por medio de visión artificial en el movimiento de flexo-extensión en el plano sagital; se describirán cada uno de los elementos utilizados para posteriormente validar el sistema en personas y luego procesar los datos del movimiento para graficar la curva del CIR de la rodilla.

### **3.1. Especificaciones del sistema de visión artificial a implementar**

A continuación, se presentan los requerimientos del sistema de visión artificial para determinar el CIR de la rodilla:

- Sistema no invasivo.
- Dirigido a personas que estudian el desarrollo de prótesis y ortesis para rodilla.
- Detecta los marcadores de colores colocados a través de la pierna.

- El algoritmo interpreta el movimiento de flexo-extensión.
- Funcionalidad: El sistema funciona en un ambiente controlado.
- Muestra la curva del CIR de la rodilla en el movimiento de flexo-extensión
- Software libre: el algoritmo utilizado fue desarrollado en Python de software libre
- Costo: Tiene un costo accesible

## 3.2. Alternativas de solución

Figura 3.1

Matriz morfológica

	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
Setup	Manual	Automático	
Posición anatómica de la rodilla	Frontal	Sagital	
Cámara	Web	Teléfono	Kinect
Conexión	Bluthooth	USB	Wi-fi
Luminosidad	Lámparas	Ambiente	
Software	Python	C#	
Almacenamiento de datos	Computador	Disco Externo	One Drive
Vizualización de resultados	Excel	Interfaz Desarrollada	App Celular

Para el desarrollo del presente trabajo de integración curricular denominado: “Sistema de determinación del centro instantáneo de rotación (CIR) de la rodilla mediante visión artificial”; se utilizó una matriz morfológica como se muestra en la figura 3.1 para generar alternativas de solución y luego de la respectiva evaluación por criterios ponderados escoger la mejor opción.

A continuación se describen cada una de las alternativas de solución con las ventajas y desventajas.

### **3.2.1. Alternativa de solución 1**

El inicio del sistema es manual, consideramos el plano anatómico frontal; para realizar las capturas de la rodilla se lo realiza con una cámara web conectada mediante bluthooth, el ambiente es de iluminación controlada mediante lámparas; el lenguaje para el desarrollo del algoritmo para el funcionamiento del sistema es Python, los datos obtenidos se guardarán en el computador para posteriormente ser guardados en Excel además de la proyección de la curva del CIR.

#### **Ventajas**

- Fácil implementación del sistema
- Materiales disponibles en el medio
- Bajo costo
- Alta precisión

#### **Desventajas**

- Difícil obtención del CIR en el plano frontal
- Conexión inestable o de bajo alcance
- Velocidad media de adquisición de datos

### **3.2.2. Alternativa de solución 2**

El sistema tiene un inicio manual, consideramos el plano anatómico sagital; para las capturas del movimiento se lo realiza con un teléfono móvil conectado mediante Wi-fi, el ambiente de iluminación es el del medio ambiente; el lenguaje para el desarrollo del algoritmo se utiliza el lenguaje de programación Python los datos obtenidos se guardarán en el computador y se creara una base de datos en Excel y luego del procesamiento se graficarán los datos obteniendo la curva de CIR de la rodilla.

#### **Ventajas**

- Fácil implementación del sistema
- Materiales disponibles en el medio
- Bajo costo
- Alta precisión
- Velocidad alta de adquisición de datos
- Facilidad de obtención del CIR en el plano Sagital

#### **Desventajas**

- Consumo moderado de recursos del computador
- Disco externo puede dañarse

### **3.2.3. Alternativa de solución 3**

El sistema inicia de manera automática al detectar la rodilla en movimiento y en posición anatómica sagital se usa Kinect de Microsoft con conexión USB, la captura de las imágenes se las realizará en un ambiente de luminosidad controlado por lámparas; para el desarrollo del

algoritmo se considera trabajar con C#; los datos obtenidos serán almacenados en OneDrive, y para mostrar los datos se considera desarrollar una App de Celular disponible para Android.

### **Ventajas**

- Fácil implementación del sistema
- Alta precisión
- Velocidad alta de procesamiento de datos
- Mejor calidad de imagen

### **Desventajas**

- Alto costo
- Alto consumo de recursos del computador

### 3.3. Evaluación de criterios

A continuación se evalúan los criterios y las alternativas para seleccionar cuál de las 3 alternativas es la mejor para el desarrollo e implementación del sistema.

#### 3.3.1. Evaluación de cada criterio

**Tabla 3.1**

*Evaluación de criterios de diseño*

	Implementar	Precisión	Velocidad	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderado
Implementar		0.5	0	0.5	2	0.200
Precisión	0.5		0.5	1	3	0.300
Velocidad	1	0.5		1	3.5	0.350
Costo	0.5	0	0		1.5	0.150
TOTAL					10	1

Luego del desarrollo de criterio de diseño en la tabla 3.1 se puede observar que la velocidad del sistema es el criterio de mayor importancia en el diseño de este sistema; la precisión > implementación > costo.

**Tabla 3.2**

*Evaluación de las alternativas respecto a la implementación del sistema*

IMPLEMENTAR	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	Ponderado
Alternativa 1		0	1	2	0.33
Alternativa 2	1		0.5	2.5	0.42
Alternativa 3	0	0.5		1.5	0.25
Suma				6	1

*Alternativa 2 > Alternativa 1 > Alternativa 3*

Después de evaluar las alternativas de solución respecto a la implementación del sistema; en la Tabla 3.2, observamos que para la implementación del sistema la Alternativa 2 es la mejor opción.

**Tabla 3.3**

*Evaluación de las alternativas de solución respecto a la precisión*

<b>PRECISIÓN</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>	$\Sigma + 1$	<b>Ponderado</b>
<i>Alternativa 1</i>		0.5	0	1.5	0.25
<i>Alternativa 2</i>	0.5		0.5	2	0.33
<i>Alternativa 3</i>	1	0.5		2.5	0.42
			Suma	6	1

*Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 1*

En la tabla 3.3, observamos que, en cuanto a la precisión, la alternativa 3 es la mejor opción.

**Tabla 3.4**

*Evaluación de las alternativas de solución respecto a la velocidad*

<b>VELOCIDAD</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>	$\Sigma + 1$	<b>Ponderado</b>
<i>Alternativa 1</i>		0.5	0	1.5	0.25
<i>Alternativa 2</i>	0.5		1	2.5	0.42
<i>Alternativa 3</i>	1	0		2	0.33
			Suma	6	1

*Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1*

En la tabla 3.4, observamos que, en cuanto a la velocidad, la alternativa 3 es la mejor opción.

**Tabla 3.5***Evaluación de las alternativas de solución respecto al costo*

<b>COSTO</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>	$\Sigma + 1$	<b>Ponderado</b>
<i>Alternativa 1</i>		0.5	1	2.5	0.42
<i>Alternativa 2</i>	0.5		1	2.5	0.42
<i>Alternativa 3</i>	0	0		1	0.17
			Suma	6	1

*Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3*

En la tabla 3.5, observamos que, en cuanto al costo, la alternativa 1 y alternativa 2 son las mejores opciones.

**Tabla 3.6***Evaluación del sistema de solución*

	<b>Implementar</b>	<b>Precisión</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Costo</b>	$\Sigma$	<b>Ponderado</b>
<i>Alternativa 1</i>	0.20*0.33	0.30*0.25	0.35*0.25	0.15*0.25	0.266	<b>3</b>
<i>Alternativa 2</i>	0.20 * 0.42	0.30*0.33	0.35*0.42	0.15*0.25	0.368	<b>1</b>
<i>Alternativa 3</i>	0.20*0.25	0.30*0.42	0.35*0.33	0.15*0.17	0.317	<b>2</b>

*Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1*

En la tabla 3.6, luego de hacer la respectiva evaluación de alternativas, observamos que la alternativa 2 es la mejor opción; con las evaluaciones hechas previamente podemos considerar la alternativa 2 como la solución para el proyecto.

## 3.4. Elementos

A continuación, se detallan los elementos usados para el desarrollo del sistema de detección del CIR usando visión artificial.

### 3.4.1. Cámara

Para el desarrollo del sistema de determinación del CIR de la rodilla mediante visión artificial, se utilizó una cámara que adquiera imágenes en formato digital, donde se eligió una cámara de teléfono motorola g41 que va a estar conectada al computador por wifi; se eligió esta cámara debido a que está al alcance y las características son suficientes para el desarrollo del presente proyecto, donde se necesita que identifique los colores utilizados para la obtención del CIR de la rodilla a continuación, en la tabla 3.7 se muestra los detalles de la cámara:

**Tabla 3.7**

*Características de la cámara del moto g41*

<b>Cámara moto g41</b>
Sensor de 48 MP
Estabilización óptica de la imagen
Ultra gran angular de 118°
Flash LED
Color selectivo
Optimización de escena
HDR
Nivelador
Zoom digital de alta resolución (8x)

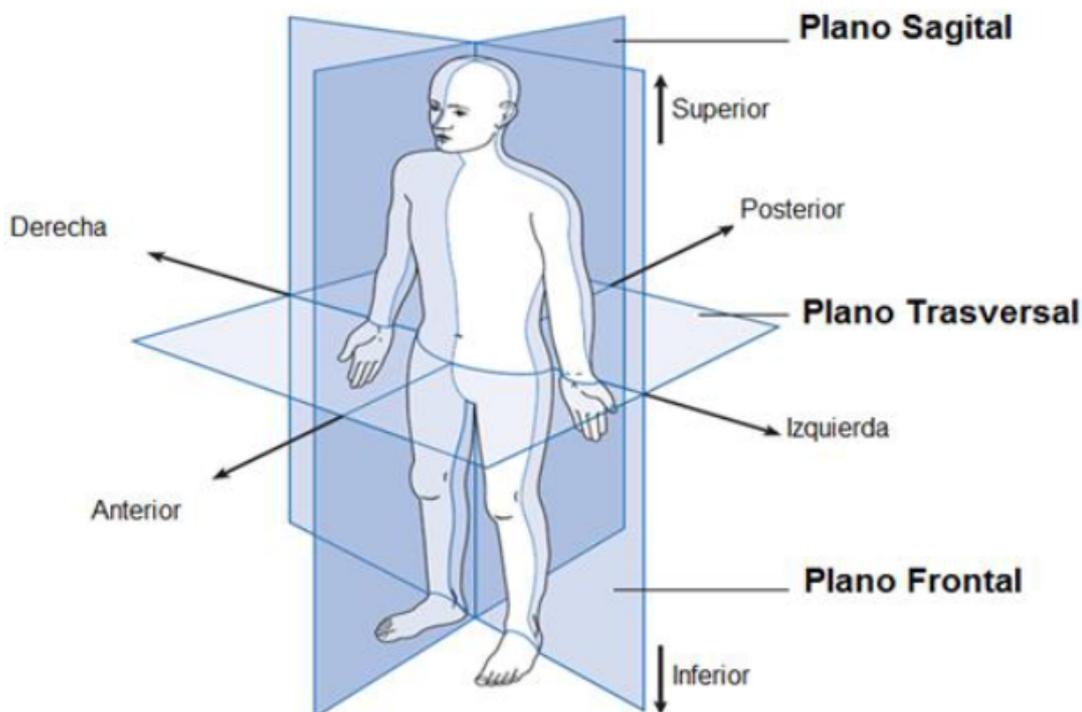
Nota. Adaptado de: "Descripción motog41", por Motorola, 2023 [31]

### 3.4.2. Posición anatómica de la persona

La persona está de pie y el video análisis será en el plano sagital cuando la persona realice movimientos de flexo-extensión de la rodilla en la figura 3.2 se muestran los planos.

**Figura 3.2**

*Planos anatómicos*



Nota. Adaptado de: ".Estudio preliminar del uso del Kinect para el análisis de marcha humana en base a la cinemática de la rodilla", por R. Dongo, 2016 [6]. en la figura se muestra cada uno de los planos anatómicos de la persona: Frontal, transversal y sagital el cual fue objeto de estudio.

### **3.4.3. Marcadores de colores**

Para desarrollar el presente informe del proyecto hay que considerar que los colores facilitan la identificación de partes anatómicas que se encuentran en la pierna humana como son: la cadera en los extremos del hueso denominado fémur, la rodilla, en el perone en la parte proximal y distal de este estos puntos son claves para el desarrollo del sistema de visión artificial en consecuencia para este caso se optó por cuatro (4) colores básicos (Violeta, Azul, Rojo, Verde) como se muestra en la figura 3.3, que están colocados en lugares específicos. Los marcadores de colores pueden comprarse o ser impresos en una impresora 3D, van a ir colocados sobre una banda que permita sujetarse a la pierna.

### **Figura 3.3**

*Marcadores de colores*



#### **3.4.4. Ambiente**

Para el desarrollo de las pruebas con la persona se lo realiza en un ambiente controlado, dentro de un cuarto con buena iluminación (si se requiere se puede optar por agregar luz extra que permita la mejor identificación de colores); como se muestra en la siguiente figura 3.4.

### **Figura 3.4**

*Laboratorio de la Universidad donde se realizó las pruebas*



### **3.4.5. Python**

Es un lenguaje de programación que es utilizado por una gran cantidad de personas en el mundo, esto debido a lo fácil y sencillo de usar, cuenta con la programación orientada a objetos, lo que facilita el uso de diversas librerías dentro del entorno de programación, es un lenguaje de multiplataforma es por eso por lo que se puede usar en Windows, Linux y Mac [24]. En el desarrollo del sistema para determinar el CIR de la rodilla se usó Spyder que es parte de Anaconda que se utiliza para el desarrollo de algoritmos en Python y es muy utilizado en el ambiente de análisis de datos.

## **3.5. Metodología para el diseño del algoritmo**

En trabajos previos similares se diseñan diversos sistemas para encontrar la curva del CIR de la rodilla, se selecciona a una persona sana que va a estar sentada o de pie y procede a hacer un movimiento de flexo-extensión de la articulación de la rodilla en el plano sagital; en la pierna se colocan marcadores en puntos clave como: fémur, tibia y peroné en la parte distal y proximal de cada uno de estos segmentos de la pierna de la persona. Empleamos una cámara como medio de captura del movimiento en un ambiente con iluminación regulable para poder obtener mejores datos para ubicar la posición de los puntos para posteriormente graficar la curva del CIR. En el desarrollo del proyecto se considera la persona realizando un movimiento de flexo-extensión en el plano sagital, colocando marcadores de colores en puntos estratégicos de la pierna y es así como se procede con el diseño del algoritmo donde se considerada lo siguiente: librerías que ayudan a la ejecución de manera correcta del algoritmo; las variables a considerar para la implementación y ejecución del algoritmo. Las librerías son importantes para el desarrollo y nos ayuda a determinar el CIR de la rodilla, las librerías utilizadas en el desarrollo del sistema se muestran a continuación:

### **3.5.1. OpenCv**

Esta librería permite el análisis y procesamiento de imágenes y es una de las más utilizadas en el desarrollo de programas o proyectos que están enfocados en visión artificial [24].

Dentro del algoritmo para encontrar la curva del CIR de la rodilla, cumple con la función de procesar la imagen obtenida, en este caso el video y permite adquirir datos como identificar los colores ubicados en la pierna de la persona para luego realizar un procesamiento.

### **3.5.2. NumPy y math**

Son bibliotecas disponibles para Python; en el desarrollo para la obtención del CIR de la rodilla mediante visión artificial ayudan a la realizar las diversas operaciones matemáticas, desde una suma hasta una operación con matrices.

### **3.5.3. SQLite**

Esta librería ayuda en el desarrollo del sistema para la obtención de la curva del CIR, creando una base de datos que se guarda dentro de nuestro dispositivo para posteriormente poder graficar

### **3.5.4. Matplotlib**

Para la conseguir la gráfica de la curva del CIR de la rodilla con los datos obtenidos previamente, esta librería es la que ayudó a la gráfica de la curva.

### 3.6. Diseño del Algoritmo

Para el diseño del algoritmo hay que tener en cuenta los ángulos de la articulación de la rodilla donde en el momento de flexión es  $155^\circ$  y en extensión total el ángulo que corresponde es  $0^\circ$ . Este sistema de obtención del CIR de la rodilla mediante visión artificial se considera un método no invasivo, el algoritmo está basado en el teorema de Kennedy que considera el centro de rotación como el punto de intersección de 2 rectas; entonces para el desarrollo de nuestro proyecto se conectan los marcadores de colores en este caso las rectas estarán formadas por los colores (violeta, verde) que corresponde a nuestro eje de coordenadas ubicado en el fémur y (azul y rojo) que corresponde a V2, para tener como puntos  $P_1(x_1, y_1)$  y  $P_2(x_2, y_2)$  con estos datos se procede a hallar la ecuación de la recta con la ecuación 3.1:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (3.1)$$

También usamos los parametros de la ecuación 3.2:

$$y = mx + b \quad (3.2)$$

Donde:

$y$  = la ordenada de la recta

$x$  = la abscisa de la recta

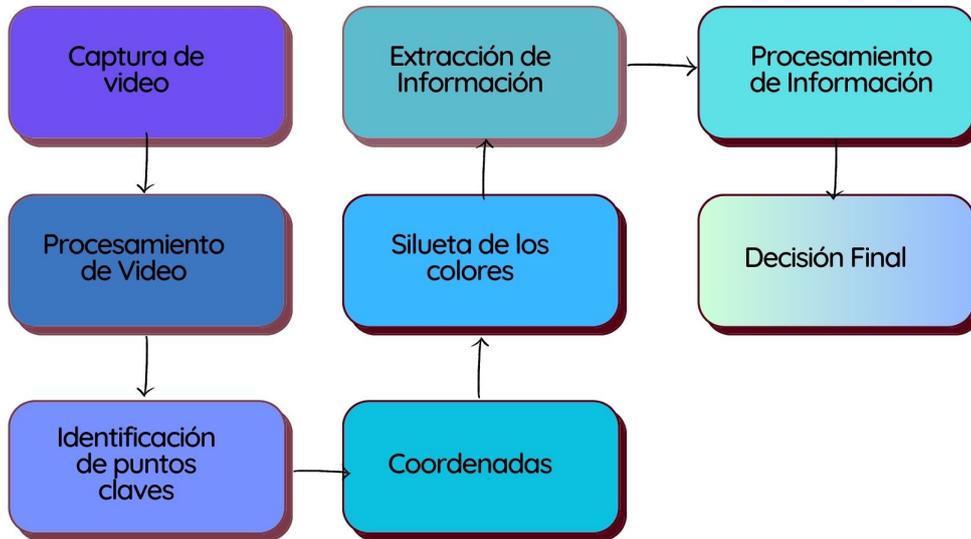
$m$  = la pendiente de la recta

Para entender el funcionamiento del algoritmo en la figura 3.5 tenemos el siguiente diagrama que muestra el proceso de la obtención de la imagen hasta el procesamiento de datos y la gráfica del CIR de la rodilla de cada una de las personas.

En este punto ya tenemos presente las librerías que vamos a utilizar, la lógica matemática del funcionamiento del algoritmo y el proceso de cómo va a funcionar nuestro sistema del CIR de la rodilla, entonces tomando en cuenta cada una de estas cosas procedemos al desarrollo del algoritmo y lo encontramos en: Anexos B.

**Figura 3.5**

*Diagrama de algoritmo*



### 3.6.1. Pruebas Previas

Para validar el funcionamiento del algoritmo se realizó la primera prueba con una persona para posteriormente corregir errores y ajustar elementos para obtener un mejor resultado.

**Figura 3.6**

*Colocación de Marcadores*



En primer lugar, se acomodó el escenario de manera óptima entonces se sentó a la persona en posición sagital y se lo colocó los marcadores en las respectivas posiciones como se muestra en la figura 3.6 y se dio inicio a las primeras capturas.

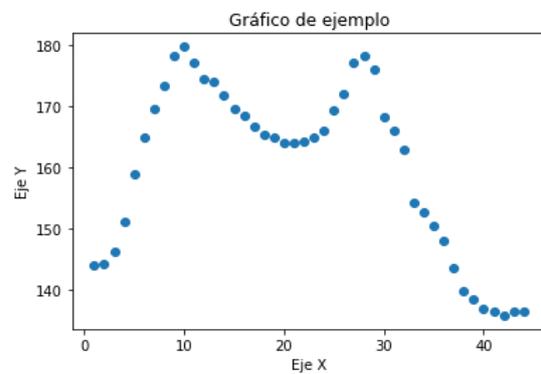
En la figura 3.7 se puede ver los colores principales que son amarillo, verde, azul y rojo, el algoritmo logra captar los colores e identificar cada una de las posiciones para realizar cada una de las gráficas correspondientes. Con el primer ensayo se obtuvo la gráfica del CIR de la rodilla de la persona:

**Figura 3.7**

*Colocación de Marcadores*



(a)



(b)

Nota. En la figura (a) tenemos la identificación de los marcadores de colores y en la figura (b) tenemos la obtención previa de la gráfica.

### 3.7. Validación de resultados

En este punto se procedió a realizar la validación de resultados dentro de la Universidad Técnica del Norte donde obtuvimos los datos de 6 personas; las personas evaluadas cumplen con las características: no hayan sufrido lesiones de rodilla o que no hayan sido intervenidos; también hay que tomar en cuenta que las personas tienen que estar con pantalón o licra negra; fisioterapeutas ayudaron con la colocación correcta de los marcadores de colores en la pierna de las personas voluntarias.

Cabe aclarar que cada una de las personas con las cuales trabajamos no fueron obligadas, sino que ayudaron de manera voluntaria para la consecución de los objetivos del presente trabajo. El promedio de la edad de las personas es de 19 a 25 años.

Cada persona evaluada por medio del sistema para obtener el CIR por medio de visión artificial se recolectó datos como: edad, estatura, sexo, etnia, y la pierna en la cual se realizó las pruebas

#### 3.7.1. Prueba 1

**Tabla 3.8**

*Datos persona 1*

Descripción	Valor
Edad	21 años
Estatura	162 cm
Sexo	F
Etnia	Mestizo
Pierna	Derecha

A continuación, se muestra la ejecución del programa para encontrar los puntos como se muestra en la figura 3.8.

**Figura 3.8**

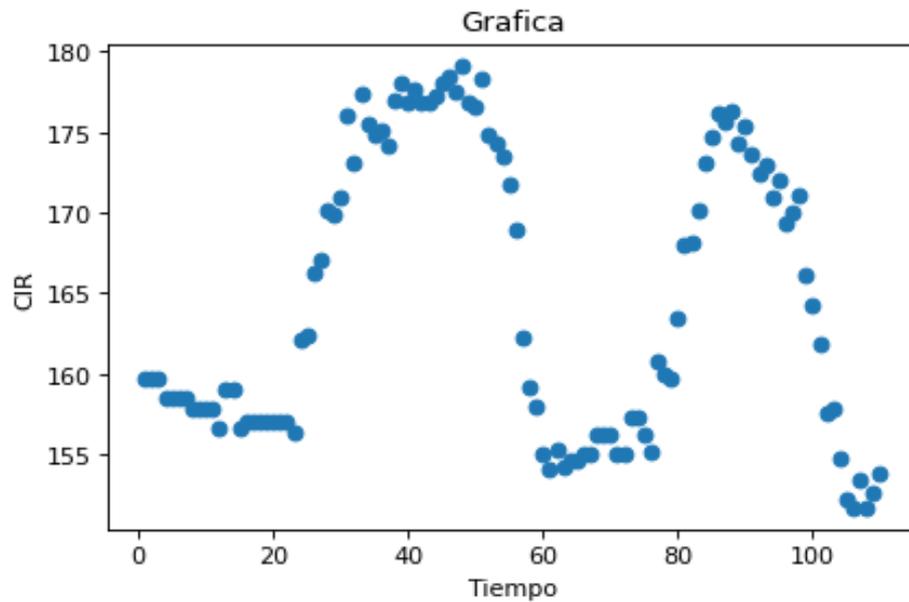
*Identificación de los marcadores de colores*



Los datos obtenidos se muestran en la figura 3.9, la base de datos esta en Anexos: C.

**Figura 3.9**

*Curva del CIR de la persona 1*



### 3.7.2. Prueba 2

**Tabla 3.9**

*Datos persona 2*

Descripción	Valor
Edad	19 años
Estatura	162 cm
Sexo	F
Etnia	Mestizo
Pierna	Derecha

A continuación, se muestra la ejecución del programa para encontrar los puntos como se muestra en la figura 3.10.

**Figura 3.10**

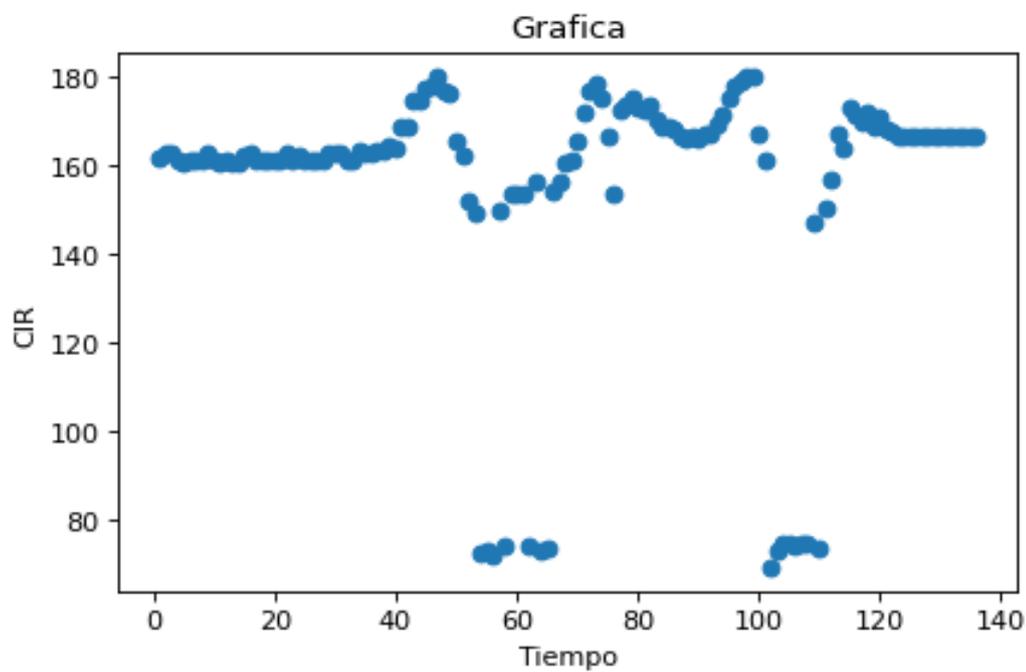
*Identificación de los marcadores de colores*



Los datos obtenidos se muestran en la figura 3.11 y la base de datos esta en: Anexos C.

**Figura 3.11**

*Curva del CIR de la persona 2*



### 3.7.3. Prueba 3

**Tabla 3.10**

*Datos persona 3*

Descripción	Valor
Edad	24 años
Estatura	160 cm
Sexo	M
Etnia	Mestizo
Pierna	Derecha

A continuación, se muestra la ejecución del programa para encontrar los puntos como se muestra en la figura 3.12.

**Figura 3.12**

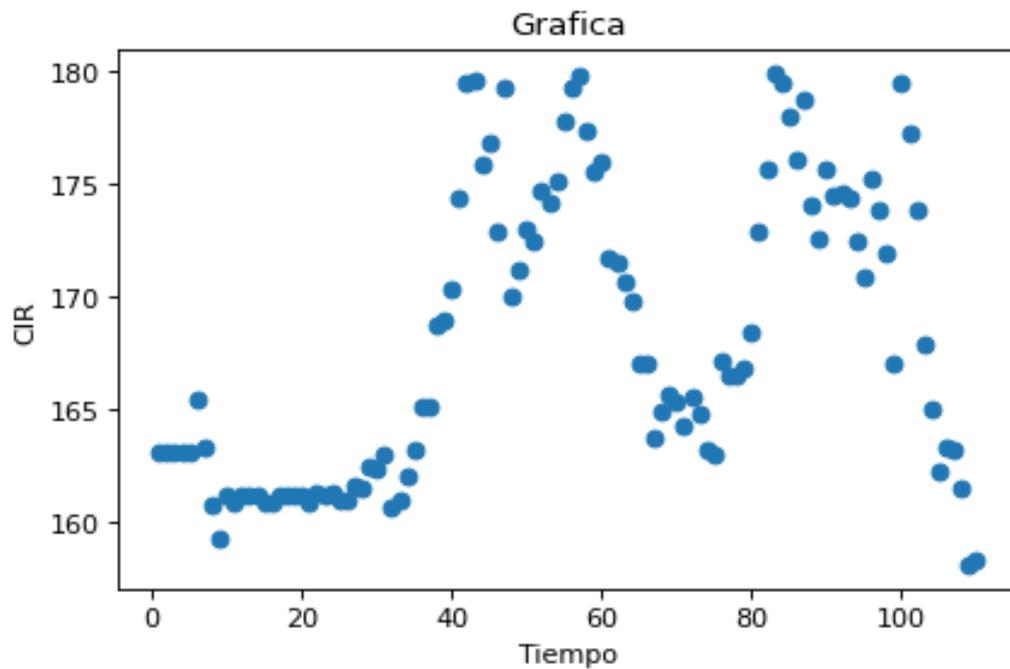
*Identificación de los marcadores de colores*



Los datos obtenidos se muestran en la figura 3.13 la base de datos esta en: Anexos C.

**Figura 3.13**

*Curva del CIR de la persona 3*



### 3.7.4. Prueba 4

**Tabla 3.11**

*Datos persona 4*

Descripción	Valor
Edad	24 años
Estatura	160 cm
Sexo	M
Etnia	Mestizo
Pierna	Derecha

A continuación, se muestra la ejecución del programa para encontrar los puntos como se muestra en la figura 3.14.

**Figura 3.14**

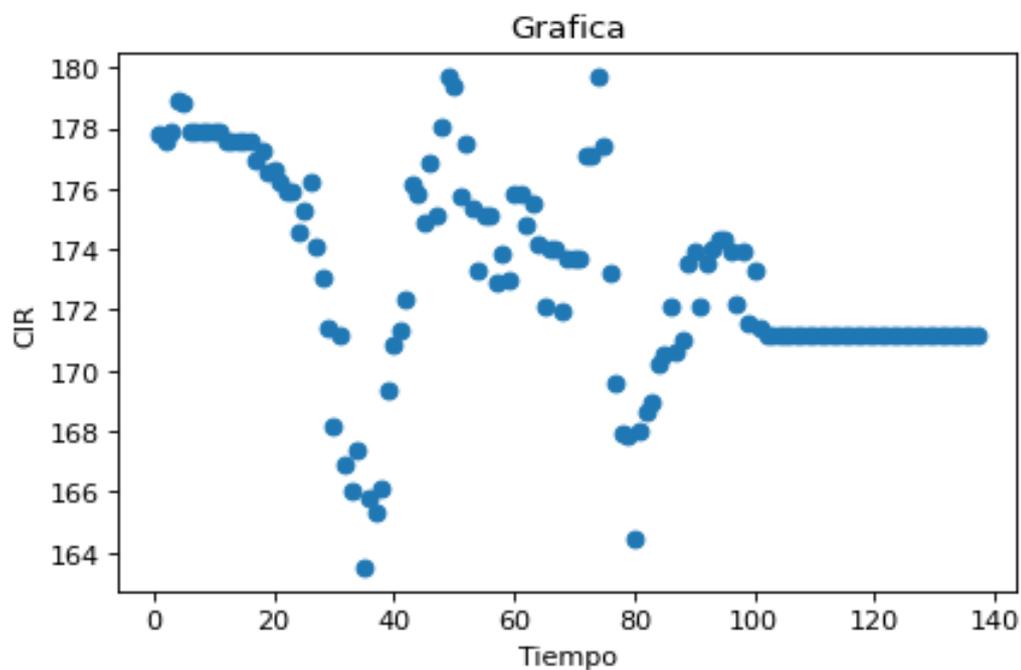
*Identificación de los marcadores de colores*



Los datos obtenidos se muestran en la figura 3.15 y la base de datos esta en: Anexos C.

**Figura 3.15**

*Curva del CIR de la persona 4*



### 3.7.5. Prueba 5

**Tabla 3.12**

*Datos persona 5*

Descripción	Valor
Edad	25 años
Estatura	171 cm
Sexo	M
Etnia	Mestizo
Pierna	Derecha

A continuación, se muestra la ejecución del programa para encontrar los puntos como se muestra en la figura 3.16.

**Figura 3.16**

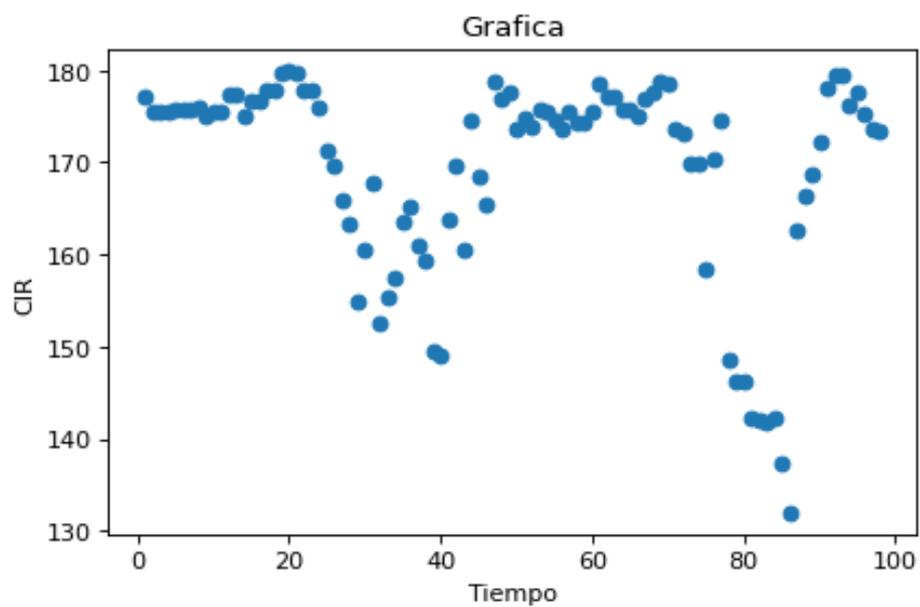
*Identificación de los marcadores de colores*



Los datos obtenidos se muestran en la figura 3.17 y la base de datos esta en: Anexos C.

**Figura 3.17**

*Curva del CIR de la persona 5*



# Capítulo IV

## Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

- La rodilla una de las articulaciones más grandes e importantes del cuerpo humano donde el centro instantáneo de rotación (CIR) fue el objeto de estudio; con revisión literaria se encontró las principales características a considerar: fisiología, anatomía y movimientos de la rodilla, CIR, procesamiento digital de imágenes, técnicas de captura de movimiento, especificaciones de colores, visión artificial, adquisición de datos, extracción de información; posteriormente permitió el desarrollo del algoritmo para encontrar por medio de visión artificial la curva del CIR de la rodilla en el movimiento de flexo-extensión.
- En el algoritmo se consideró las diferentes variables y permitió por medio de una cámara de teléfono (motog41) captar los cuatro marcadores de colores colocados en partes específicas de la pierna humana: violeta en el trocanter mayor, verde en el epicóndilo lateral derecho, rojo en la cabeza del peroné, azul en el maleolo lateral; donde la intersección de las rectas formadas por los marcadores de colores: violeta y verde  $m1$  y rojo y azul  $m2$ ; permitieron la obtención de la curva del CIR.
- Integrar el algoritmo desarrollado en Python con el sistema de visión artificial que permita la obtención de datos de la persona colocada en posición sagital desarrollando diversas

pruebas donde se realizó la segmentación y optimización del algoritmo; se logró con éxito graficar la curva del CIR de la rodilla, de las 5 personas evaluadas.

- El porcentaje de error promedio del algoritmo desarrollado es de: 15.8 %; esto debido a factores como: espacio pequeño, poca iluminación, vestimenta inadecuada, baja calidad de imagen, conexión wi-fi inestable; que fueron elementos que impidieron obtener un menor margen de error en el presente proyecto.

## 4.2. Recomendaciones

- El sistema desarrollado cumple con lo establecido en el alcance, pero se puede proponer una optimización del algoritmo para que el sistema de visión artificial para encontrar el CIR de la rodilla donde se inicie de manera automática, esto definiendo parámetros nuevos que permitan una mayor precisión y rapidez del algoritmo.
- Si bien el algoritmo desarrollado para el sistema cumple con lo establecido, por medio de visión artificial se identifica los puntos importantes para la obtención de datos y posteriormente hacer la gráfica del CIR de la rodilla, pero se puede probar con otros métodos , por ejemplo: mayor cantidad, diferentes tipos de marcadores, nuevos sensores, otros ambiente; posiblemente se puedan obtener una mayor cantidad de datos con mayor precisión que permita una gráfica de la curva del CIR más aproximada.
- La cámara es un elemento importante y hay que tener en cuenta la cámara que se utilizó y los datos que se obtuvo; si se mejora el elemento de captura de imagen es posible que haya que cambiar algunos parámetros dentro del algoritmo para tener un resultado optimo.
- Para realizar las pruebas en personas hay que tener el consentimiento de estas, si el sistema es no invasivo accederan con mayor facilidad; además para encontrar el CIR de la rodilla hay que considerar a personas que en el pasado no hayan sufrido alguna lesión en la rodilla o tengan alguna afección en esta; esto para que la curva del CIR obtenida cumpla

con las características que debería tener como la forma de J; además se aproxime a otras curvas del CIR de trabajos previos realizados

# Bibliografía

- [1] F. Rosique, F. Losilla, and P. J. Navarro, “Using artificial vision for measuring the range of motion,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, pp. 1129–1136, 2021.
- [2] C. N. para la Igualdad de Discapacidades, “Estadísticas de discapacidad.” <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/>, 2023.
- [3] D. F. Terán, *Diseño e implementación de un sistema para visualizar la marcha humana biomecánica en la afectación de rodilla ante una gonartrosis*. 2017.
- [4] W. R. T. Torres, *Estudio cinemático de la biomecánica de la pierna con aplicación de fotogrametría*. 2022.
- [5] C. O. Ochoa, J. V. Valencia, J. L. Córdova, A. O. López, and M. M. Ortiz, “Análisis de marcha mediante plataforma kinect,” *La Investigación y las Aplicaciones en Ciencias de la Computación. FCC-BUAP. Puebla, México*, pp. 17–21, 2011.
- [6] R. J. Dongo, *Estudio preliminar del uso del Kinect para el análisis de marcha humana en base a la cinemática de la rodilla*. 2016.
- [7] B. Xiao, Y. Shao, and W. Zhang, “Design and optimization of single-degree-of-freedom six-bar mechanisms for knee joint of lower extremity exoskeleton robot,” pp. 2861–2866, IEEE, 12 2019.
- [8] D. Santos, “Estudio de los centros de rotación instantáneos de la rodilla en pacientes con plastia de ligamento cruzado anterior,” 2014.
- [9] M. Traullé, J. Mazeas, A. Vandebrouck, P. Duffiet, L. Ratte, and F. Forelli, “Identification of methods for estimating knee rotation axis,” *Journal of Orthopaedics and Sports Medicine*, vol. 2, pp. 108–115, 2020.
- [10] A. I. C. Sánchez, *Análisis dinámico de una articulación de rodilla externa comercial, para mejorar la cinemática respecto a la marcha humana, para personas con amputación transfemoral de la zona 1 del ecuador mediante herramientas computacionales*.

- [11] H. A. Tinoco and A. J. Arias-Moreno, “Análisis cinemático de un miembro inferior para determinar el centro de rotación en el plano sagital,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 16, pp. 195–205, 2014.
- [12] J. F. Soriano, J. E. Rodríguez, and L. A. Valencia, “Performance comparison and design of an optimal polycentric knee mechanism,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, pp. 1–13, 2020.
- [13] G. Nicolás and J. Emilio, “Diseño de una rodilla protésica,” 2018.
- [14] E. Flórez, N. N. R. Nuñez, and Y. A. F. Martínez, “Síntesis óptima de un mecanismo de cuatro barras para la rodilla utilizando coordenadas naturales para la formulación cinemática,” *Tecnura*, vol. 26, pp. 115–129, 7 2022.
- [15] S. A. P. Palau, J. M. B. Bertomeu, P. P. Fiszman, C. S. Garcia, J. U. Moltó, J. R. Miró, D. I. López, I. B. Bosch, L. F. Barrachina, and P. F. Barrachina, “Co-creación+ biomecánica: claves de éxito para el diseño de ortesis de rodilla,” *Revista de Biomecánica (Online)*, pp. 1–9, 2019.
- [16] J. Jiang, P. Chen, J. Peng, X. Qiao, F. Zhu, and J. Zhong, “Design and optimization of lower limb rehabilitation exoskeleton with a multiaxial knee joint,” *Biomimetics*, vol. 8, p. 156, 2023.
- [17] J. P. Singh, S. Jain, S. Arora, and U. P. Singh, “Vision-based gait recognition: A survey,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70497–70527, 2018.
- [18] J. J. Z. Molina, *Análisis de Video del Comportamiento Cinemático de la Rodilla, Usando el Método de Eje Finito Helicoidal*. 2017.
- [19] M. A. F. Rivera, B. C. P. Sigcha, P. A. J. Maldonado, L. F. F. Cruz, P. F. U. Ortiz, P. J. G. Medina, and L. A. C. Arevalo, “Analysis of knee torque to implement in an exoskeleton,” 2014.
- [20] I. KAPANDJI, *Fisiología articular. Tomo 2: Miembro Inferior*. panamericana ed., 2011.
- [21] B. P. Self, D. F. Mazurek, E. R. Johnston, and F. P. Beer, *Mecánica Vectorial para ingenieros; Dinámica*. 11 ed., 2017.
- [22] R. C. Hibbeler, *Ingeniería Mecánica Dinámica*. 14 ed., 2016.
- [23] M. E. J. Avila, “Diseño de algoritmo de visión artificial para la lectura de códigos de barras por medio de dispositivos android.”

- [24] T. Domínguez, *Visión artificial: aplicaciones prácticas con OpenCV-Python*. Marcombo, 2021.
- [25] D. Briseño, *Sistema electrónico para la detección de posición angular y ergonomía de ciclistas empleando visión artificial*. 2023.
- [26] E. García, “Visión artificial,” *FUOC Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya*, 2012.
- [27] A. G. Marcos, F. J. M. de Pisón Ascacibar, F. A. Elías, M. C. Limas, J. B. O. Meré, and E. P. V. González, “Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial,” *Técnicas y Algoritmos Básicos de Visión Artificial*, 2006.
- [28] Sampieri, *Metodología de la Investigación*.
- [29] G. P. G. Alban, A. E. V. Arguello, and N. E. C. Molina, “Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción),” *Recimundo*, vol. 4, pp. 163–173, 2020.
- [30] A. Álvarez Risco, “Clasificación de las investigaciones,” 2020.
- [31] Motorola, “Características moto g41.” <https://www.motorola.com.mx/moto-g41/p/>, 2023.

# **Anexos**

# Anexos A

## Manual de Usuario

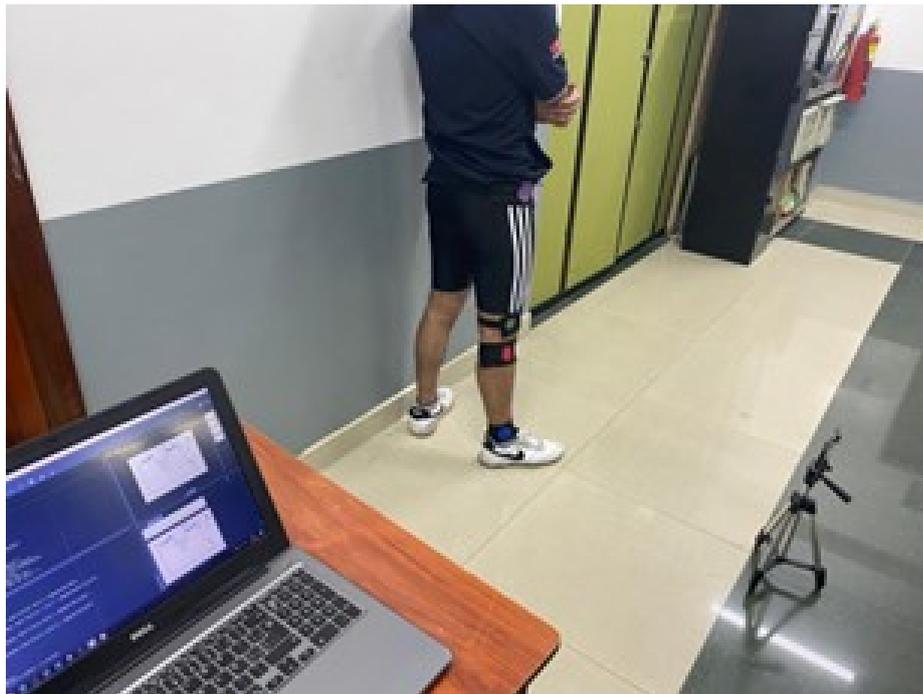
El presente manual de usuario tiene como finalidad mostrar el funcionamiento del sistema para la obtención del CIR de la rodilla en el movimiento de flexo-extensión.

En primer lugar, se colocan los marcadores de colores en puntos estratégicos de la pierna como se muestra en las siguientes figuras:

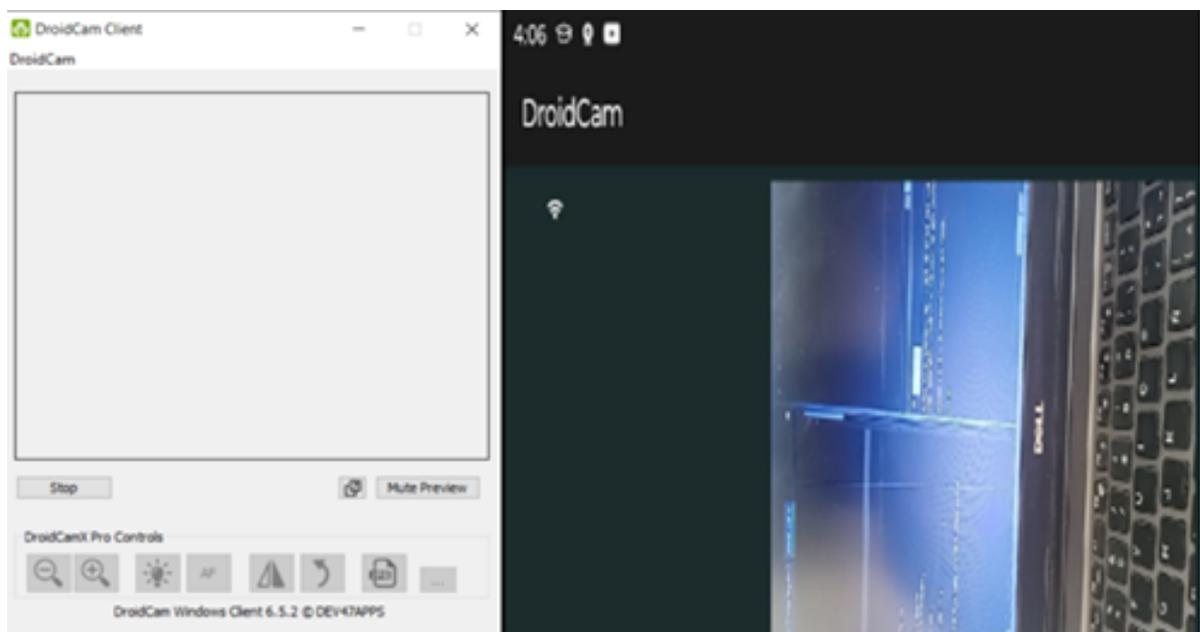
En la figura se muestra la colocación del marcador del tobillo (azul), colocación del marcador en la cabeza del peroné (rojo), finalmente tenemos los marcadores restantes colocados en el fémur: cóndilo lateral (verde) y trocante mayor (violeta).



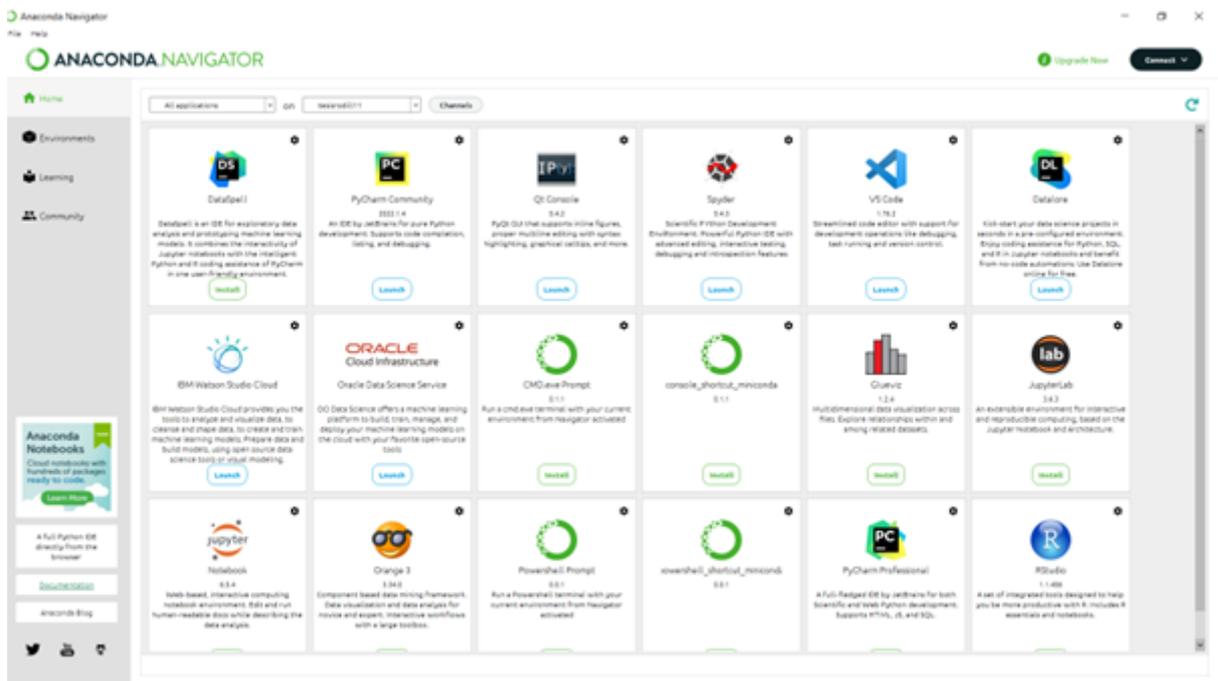
Luego de esto colocamos los elementos necesarios para la obtención de datos, en este caso tenemos: Cámara con conexión (wifi) al computador, trípode donde se va a colocar la cámara o teléfono móvil como se muestra en la figura, en caso de ser necesario colocar una silla para que la persona pueda hacer los movimientos de flexo-extensión de la pierna, siempre la persona va a estar en posición sagital.



Conectamos la cámara a la computadora por medio de una aplicación como se muestra en la figura; en este caso utilizamos DroidCam.



A continuación, se ejecuta Anaconda como se muestra en la figura.



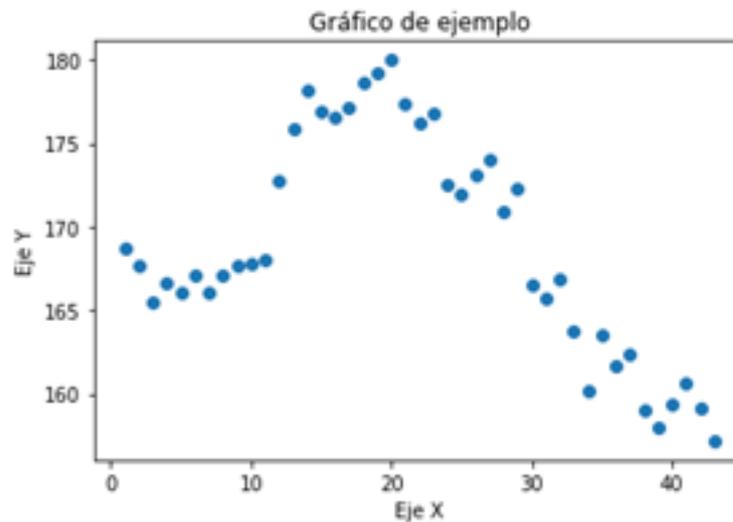
Abrimos Spyder donde está desarrollado nuestro algoritmo figura y la ejecución de la interfaz que va a permitir la obtención de datos:



Cuando se ejecuta el algoritmo este muestra una interfaz que permite capturar la imagen y los datos; la base de datos de los movimientos de la persona se guarda en un archivo .CSV el cual puede ser ejecutado desde una aplicación en el ordenador, en la nube o abrir con cualquier otro visualizador de datos.

	A	B	C	D
1	ID	anguloCIR	coordenadaCIRx	coordenadaCIRy
2	1	174.8289476	303.4832215	443.3221477
3	2	175.2184825	298.715415	575.458488
4	3	172.8776619	303.7350158	436.3438486
5	4	172.8723236	304.2860759	398.9734177
6	5	173.2619766	301.1148849	510.3716216
7	6	172.8723236	304.2690355	398.2258883
8	7	172.8723236	304.2690355	398.2258883
9	8	173.0887729	304.8241901	372.4341253
10	9	172.8776619	304.6185345	371.8409828
11	10	173.2619766	301.1812081	507.1208054
12	11	172.8723236	304.2690355	398.2258883
13	12	172.8723236	304.2519084	399.4847328
14	13	172.8723236	303.7370892	437.3239437
15	14	173.0887729	302.9012346	498.2098765
16	15	172.8723236	304.2519084	399.4847328
17	16	172.8723236	303.7370892	437.3239437
18	17	173.0887729	304.2544987	399.4215838
19	18	172.8723236	304.2690355	398.2258883
20	19	172.8723236	304.2690355	398.2258883
21	20	173.0887729	304.2544987	399.4215838
22	21	175.0069698	304.5426621	391.5904437
23	22	172.8723236	303.7370892	437.3239437
24	23	172.8723236	303.7370892	437.3239437
25	24	172.8776619	304.2512821	398.6564103

El sistema luego de generar datos muestra una gráfica que corresponde al CIR de la rodilla de la persona evaluada figura .



# Anexos B

## Código

```
import cv2
import numpy as np
import math
import sqlite3
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
import tkinter as tk
from PIL import Image, ImageTk
import time
import os

x = 0
x2 = 0
x3 = 0
x4 = 0
y = 0
y2 = 0
y3 = 0
y4 = 0
angulo_grados = 0
angulo_complementario = 0
angulo_grados2 = 0
angulo_complementario2 = 0
anguloCIR = 0
coordenadasCIRx=0
```

```

coordenadasCIRy=0
cont = 0
last_key_press_time = 0
vector = []
figure = None
axes = None
conn = sqlite3.connect('base.db')

# Crear un cursor para ejecutar comandos SQLite
cursor = conn.cursor()
# Crear una tabla
cursor.execute('''CREATE TABLE IF NOT EXISTS angulos
(id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
anguloCIR REAL NOT NULL,
coordenadasCIRx REAL NOT NULL,
coordenadasCIRy REAL NOT NULL)''')

while True:
cap = cv2.VideoCapture(1)

azulBajo = np.array([100, 100, 20], np.uint8)
azulAlto = np.array([130, 255, 255], np.uint8)
amarilloBajo = np.array([145, 50, 50], np.uint8)
amarilloAlto = np.array([165, 255, 255], np.uint8)

rojoBajo1 = np.array([0, 100, 20], np.uint8)
rojoAlto1 = np.array([10, 255, 255], np.uint8)
rojoBajo2 = np.array([170, 100, 20], np.uint8)
rojoAlto2 = np.array([179, 255, 255], np.uint8)

verdeBajo = np.array([40, 50, 50], np.uint8)
verdeAlto = np.array([80, 255, 255], np.uint8)

font = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX

def capture_frame():

```

```

ret , frame = cap.read()
global camara
ret , frame = cap.read()
frame = cv2.cvtColor(frame , cv2.COLOR_BGR2RGB)
frame = cv2.resize(frame , (640 , 480))

def dibujar_rojo(mask , color):
contornos , _ = cv2.findContours(mask , cv2.RETR_EXTERNAL ,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for c in contornos:
area = cv2.contourArea(c)
if area > 100:
M = cv2.moments(c)
if M["m00"] == 0:
M["m00"] = 1
global x
global y
x = int(M["m10"] / M["m00"])
y = int(M["m01"] / M["m00"])
nuevoContorno = cv2.convexHull(c)
cv2.circle(frame , (x , y) , 7 , (0 , 255 , 0) , -1)
cv2.putText(frame , '{} , {}'.format(x , y) , (x + 10 , y) ,
font , 0.75 , (0 , 255 , 0) , 1 , cv2.LINE_AA)
cv2.drawContours(frame , [nuevoContorno] , 0 , color , 3)

def dibujar_azul(mask , color):
contornos2 , _ = cv2.findContours(mask , cv2.RETR_EXTERNAL ,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for c2 in contornos2:
area2 = cv2.contourArea(c2)
if area2 > 100:
M2 = cv2.moments(c2)
if M2["m00"] == 0:
M2["m00"] = 1
global x2
global y2
x2 = int(M2["m10"] / M2["m00"])

```

```

y2 = int(M2['m01'] / M2['m00'])
nuevoContorno2 = cv2.convexHull(c2)
cv2.circle(frame, (x2, y2), 7, (0, 255, 0), -1)
cv2.putText(frame, '{},{ {}'.format(x2, y2), (x2 + 10, y2),
font, 0.75, (0, 255, 0), 1, cv2.LINE_AA)
cv2.drawContours(frame, [nuevoContorno2], 0, color, 3)

def dibujar_amarillo(mask, color):
contornos3, _ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for c3 in contornos3:
area3 = cv2.contourArea(c3)
if area3 > 70:
M3 = cv2.moments(c3)
if M3["m00"] == 0:
M3["m00"] = 1
global x3
global y3
x3 = int(M3["m10"] / M3["m00"])
y3 = int(M3['m01'] / M3['m00'])
nuevoContorno3 = cv2.convexHull(c3)
cv2.circle(frame, (x3, y3), 7, (0, 255, 0), -1)
cv2.putText(frame, '{},{ {}'.format(x3, y3), (x3 + 10, y3),
font, 0.75, (0, 255, 0), 1, cv2.LINE_AA)
cv2.drawContours(frame, [nuevoContorno3], 0, color, 3)

def dibujar_verde(mask, color):
contornos4, _ = cv2.findContours(mask,
cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for c4 in contornos4:
area4 = cv2.contourArea(c4)
if area4 > 100:
M4 = cv2.moments(c4)
if M4["m00"] == 0:
M4["m00"] = 1
global x4
global y4

```

```

x4 = int(M4["m10"] / M4["m00"])
y4 = int(M4['m01'] / M4['m00'])
nuevoContorno4 = cv2.convexHull(c4)
cv2.circle(frame, (x4, y4), 7, (0, 255, 0), -1)
cv2.putText(frame, '{},{ }'.format(x4, y4),
(x4 + 10, y4), font, 0.75, (0, 255, 0), 1, cv2.LINE_AA)
cv2.drawContours(frame, [nuevoContorno4], 0, color, 3)

def calcular_angulo(a1, b1, a2, b2, a3, b3, a4, b4)
global x, y, x1, y1, x2, y2, x3, y3, x4, y4
global angulo_grados, angulo_complementario, angulo_grados2,
angulo_complementario2, anguloCIR, coordenadasCIRx,
coordenadasCIRy

\# Calcular los vectores entre los puntos
vec1 = (a1 - a2, b1 - b2)
vec2 = (a3 - a2, b3 - b2)
vec5 = (a4 - a3, b4 - b3)
vec6 = (a1 - a2, b1 - b2)

\# Calcular las magnitudes de los vectores
magnitud1 = math.sqrt(vec1[0]**2 + vec1[1]**2)
magnitud2 = math.sqrt(vec2[0]**2 + vec2[1]**2)
magnitud3 = math.sqrt(vec5[0]**2 + vec5[1]**2)
magnitud4 = math.sqrt(vec6[0]**2 + vec6[1]**2)

\# Verificar que las magnitudes no sean cero
if magnitud1 != 0 and magnitud2 != 0 and magnitud3 != 0
and magnitud4 != 0:
\# Calcular los productos escalares
dot_product1 = vec1[0] * vec2[0] + vec1[1] * vec2[1]
dot_product2 = vec5[0] * vec6[0] + vec5[1] * vec6[1]

\# Verificar que los productos escalares dentro del rango
if -magnitud1 * magnitud2 <= dot_product1 <=
magnitud1 * magnitud2 and -magnitud3 * magnitud4 <=
dot_product2 <= magnitud3 * magnitud4:

```

```

\# Calcular los ngulos
angulo_rad = math.acos(dot_product1 / (magnitud1 * magnitud2))
angulo_rad2 = math.acos(dot_product2 / (magnitud3 * magnitud4))

\# Convertir los ngulos a grados
angulo_grados = math.degrees(angulo_rad)
angulo_grados2 = math.degrees(angulo_rad2)
angulo_complementario = 180 - angulo_grados
angulo_complementario2 = 180 - angulo_grados2

\# Calcular las intersecciones de las rectas
m1 = (y3 - y4) / (x3 - x4)
b1 = y3 - m1 * x3
m2 = (y - y2) / (x - x2)
b2 = y - m2 * x

coordenadasCIRx = (b2 - b1) / (m1 - m2)
coordenadasCIRy = m1 * coordenadasCIRx + b1

\# Guardar los resultados en las variables correspondientes
anguloCIR = angulo_grados

return angulo_grados , angulo_complementario ,
angulo_grados2 , angulo_complementario2 , anguloCIR ,
coordenadasCIRx , coordenadasCIRy

return None

if ret == True:
frameHSV = cv2.cvtColor(frame , cv2.COLOR_BGR2HSV)
maskAzul = cv2.inRange(frameHSV , azulBajo , azulAlto)
maskAmarillo = cv2.inRange(frameHSV , amarilloBajo , amarilloAlto)
maskRojo1 = cv2.inRange(frameHSV , rojoBajo1 , rojoAlto1)
maskRojo2 = cv2.inRange(frameHSV , rojoBajo2 , rojoAlto2)

```

```

maskRojo = cv2.add(maskRojo1, maskRojo2)
maskVerde = cv2.inRange(frameHSV, verdeBajo, verdeAlto)
dibujar_azul(maskAzul, (255, 0, 0))
dibujar_amarillo(maskAmarillo, (255, 255, 0))
dibujar_rojo(maskRojo, (0, 0, 255))
dibujar_verde(maskVerde, (0, 255, 0))
calcular_angulo(x, y, x2, y2, x4, y4, x3, y3)
cv2.line(frame, (x3, y3), (x4, y4), (255, 0, 0), 4)
cv2.line(frame, (x4, y4), (x2, y2), (255, 0, 0), 4)
cv2.line(frame, (x2, y2), (x, y), (255, 0, 0), 4)
frame = Image.fromarray(frame)
frame = ImageTk.PhotoImage(frame)
label.config(image=frame)
label.image = frame
if capture_flag:
label.after(10, capture_frame)
def stop_capture():
global capture_flag
capture_flag = False
cap.release()

def save_data():
global angulo_grados, angulo_complementario,
angulo_grados2, angulo_complementario2, anguloCIR,
coordenadasCIR
cursor.execute("INSERT INTO angulos
(anguloCIR, coordenadasCIRx, coordenadasCIRy)
VALUES (?, ?, ?)",
(anguloCIR, coordenadasCIRx, coordenadasCIRy))
conn.commit()
def export_to_excel():
cursor.execute("SELECT * FROM angulos")
rows = cursor.fetchall()
df = pd.DataFrame(rows, columns=['ID', 'anguloCIR',
'coordenadasCIRx', 'coordenadasCIRy'])
df.to_csv('angulos.csv', index=False)

```

```

def key_press(event):
    global cont, last_key_press_time
    key = event.char.lower()
    if key == 'a' and time.time() - last_key_press_time > 0.02:
        save_data()
        cont += 1
        last_key_press_time = time.time()

window = tk.Tk()
window.title("Aplicaci n de Captura")
window.geometry("800x850")
window.bind('<KeyPress-a>', key_press)
label_font = ("Arial", 18)
label_text =
"Los datos tambi n se pueden guardar al presionar la letra 'a'"
label =
tk.Label(window, text=label_text, font=label_font, justify="center")
label.pack()
container = tk.Frame(window)
container.pack(side=tk.LEFT, padx=15, pady=15)
container.pack()
button_container = tk.Frame(window)
button_container.pack(side=tk.RIGHT,
anchor=tk.CENTER, padx=10, pady=200)
label = tk.Label(container)
label.pack()

def update_frame():
    ret, frame = cap.read()
    if ret:
        global capture_flag
        capture_flag = True
        capture_frame()
        conn.commit()

def show_plot():
    global figure, axes

```

```

cursor.execute("SELECT id, anguloCIR FROM angulos")
registros = cursor.fetchall()
dato = [registro[0] for registro in registros]
dato2 = [registro[1] for registro in registros]

if figure is None:
figure = plt.figure(figsize=(6, 4), dpi=80)
axes = figure.add_subplot(111)
else:
axes.clear()
fig = plt.figure(figsize=(6, 4), dpi=80)
ax = fig.add_subplot(111)
ax.clear()
ax.scatter(dato, dato2)
ax.set_title('Gráfico de ejemplo')
ax.set_xlabel('Eje X')
ax.set_ylabel('Eje Y')

canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=window)
canvas.draw()
for widget in container.winfo_children():
if isinstance(widget, FigureCanvasTkAgg):
widget.pack_forget()
widget.destroy()
canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=container)
canvas.get_tk_widget().pack()

def clear_data():
cursor.execute("DROP TABLE IF EXISTS angulos")
cursor.execute(' 'CREATE TABLE IF NOT EXISTS angulos
(id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
anguloCIR REAL NOT NULL,
coordenadasCIRx REAL NOT NULL,
coordenadasCIRy REAL NOT NULL)')
conn.commit()

def on_closing():

```

```
cap.release()
cv2.destroyAllWindows()
window.quit()

save_button = tk.Button(window, text=
"Guardar datos", command=save_data)
save_button.pack()
export_button = tk.Button(window,
text="Exportar a Excel", command=export_to_excel)
export_button.pack()

clear_button = tk.Button(window, text=
"Limpiar datos", command=clear_data)
clear_button.pack()

plot_button = tk.Button(window, text=
"Mostrar gráfico", command=show_plot)
plot_button.pack()

update_frame()
window.mainloop()
cap.release()
cv2.destroyAllWindows()
window.protocol("WM_DELETE_WINDOW", on_closing)
```

# Anexos C

## Personal1

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
1	174	303	443
2	175	298	575
3	172	303	436
4	172	304	396
5	173	301	510
6	172	304	398
7	172	304	398
8	173	304	372
9	172	304	371
10	173	301	507
11	172	304	398
12	172	304	399
13	172	303	437
14	173	302	498
15	172	304	399
16	172	303	437
17	173	304	399
18	172	304	398
19	172	304	398
20	173	304	399
21	175	304	391
22	172	303	437
23	172	303	437

Continued on next page

**Tabla 3.1 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
24	172	304	398
25	172	304	371
26	173	301	507
27	172	302	497
28	172	302	497
29	172	304	396
30	170	304	380
31	174	304	391
32	171	302	655
33	172	304	396
34	172	301	613
35	172	304	354
36	172	301	609
37	172	297	887
38	170	302	654
39	171	294	104
40	170	304	402
41	174	302	531
42	172	303	434
43	174	294	859
44	173	300	608
45	173	296	894
46	172	302	582
47	174	299	747
48	174	302	527
49	174	302	527
50	174	305	341
51	174	302	527
52	174	305	341
53	174	-64	464
54	175	317	287
55	178	316	224
56	179	324	238
57	179	332	235

Continued on next page

**Tabla 3.1 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
58	178	342	235
59	173	354	236
60	166	368	235
61	164	371	234
62	164	375	231
63	163	375	231
64	159	375	230
65	164	373	226
66	164	373	226
67	169	373	224
68	171	373	224
69	170	373	224
70	170	373	224
71	171	373	223
72	171	372	223
73	171	372	223
74	171	372	223
75	172	372	223
76	169	372	223
77	303	333	810
78	165	373	224
79	164	373	224
80	299	335	798
81	304	335	792
82	302	335	806
83	158	379	227
84	268	340	888
85	167	379	228
86	158	346	118
87	569	351	175
88	179	358	230
89	179	350	232
90	179	347	237
91	178	341	232

Continued on next page

**Tabla 3.1 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
92	179	333	234
93	174	327	465
94	176	321	316
95	173	317	298
96	172	313	280
97	171	311	276
98	173	310	268
99	171	311	277
100	169	311	286

**Persona 2**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
1	161	282	369
2	162	282	369
3	162	283	381
4	160	283	390
5	160	283	378
6	160	283	389
7	160	283	390
8	160	284	397
9	162	283	381
10	160	283	389
11	160	283	377
12	160	283	383
13	160	283	377
14	160	282	372
15	162	282	369
16	162	282	374
17	160	282	373
18	160	282	377

Continued on next page

**Tabla 3.2 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
19	161	282	377
20	161	283	383
21	161	283	383
22	162	283	375
23	160	283	383
24	162	282	369
25	161	282	383
26	161	283	383
27	160	283	383
28	160	283	378
29	162	283	375
30	162	283	374
31	162	283	380
32	161	283	383
33	161	282	383
34	163	282	389
35	162	283	381
36	162	283	374
37	163	284	403
38	163	288	427
39	164	322	193
40	163	287	-13
41	168	304	173
42	168	322	213
43	174	345	229
44	174	349	227
45	177	356	226
46	177	357	226
47	179	359	225
48	176	360	225
49	175	358	220
50	165	353	212
51	162	352	210
52	151	351	204

Continued on next page

**Tabla 3.2 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
53	149	351	202
54	726	-76	-32
55	727	-88	-36
56	718	131	397
57	149	351	203
58	740	-10	-31
59	153	356	206
60	153	356	206
61	153	356	207
62	742	203	549
63	156	357	209
64	731	105	245
65	735	192	517
66	154	355	209
67	156	355	210
68	160	355	212
69	160	357	213
70	165	359	216
71	171	361	219
72	176	363	223
73	178	363	223
74	175	362	222
75	166	360	239
76	153	359	252
77	172	346	224
78	173	343	225
79	174	344	227
80	172	342	224
81	172	338	221
82	173	330	221
83	169	327	209
84	168	318	197
85	168	316	191
86	167	309	162

Continued on next page

**Tabla 3.2 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
87	166	306	818
88	165	306	886
89	166	305	922
90	165	306	121
91	166	309	165
92	166	311	175
93	169	324	212
94	171	330	219
95	175	346	229
96	177	352	230
97	178	358	229
98	179	362	227
99	179	361	227
100	166	357	216

**Persona3**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
1	161	282	369
2	162	282	369
3	162	283	381
4	160	283	390
5	160	283	378
6	160	283	389
7	160	283	390
8	160	284	397
9	162	283	381
10	160	283	389
11	160	283	377
12	160	283	383
13	160	283	377

Continued on next page

**Tabla 3.3 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
14	160	282	372
15	162	282	369
16	162	282	374
17	160	282	373
18	160	282	377
19	161	282	377
20	161	283	383
21	161	283	383
22	162	283	375
23	160	283	383
24	162	282	369
25	161	282	383
26	161	283	383
27	160	283	383
28	160	283	378
29	162	283	375
30	162	283	374
31	162	283	380
32	161	283	383
33	161	282	383
34	163	282	389
35	162	283	381
36	162	283	374
37	163	284	403
38	163	288	427
39	164	322	193
40	163	287	-13
41	168	304	173
42	168	322	213
43	174	345	229
44	174	349	227
45	177	356	226
46	177	357	226
47	179	359	225

Continued on next page

**Tabla 3.3 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
48	176	360	225
49	175	358	220
50	165	353	212
51	162	352	210
52	151	351	204
53	149	351	202
54	726	-76	-32
55	727	-88	-36
56	718	131	397
57	149	351	203
58	740	-10	-31
59	153	356	206
60	153	356	206
61	153	356	207
62	742	203	549
63	156	357	209
64	731	105	245
65	735	192	517
66	154	355	209
67	156	355	210
68	160	355	212
69	160	357	213
70	165	359	216
71	171	361	219
72	176	363	223
73	178	363	223
74	175	362	222
75	166	360	239
76	153	359	252
77	172	346	224
78	173	343	225
79	174	344	227
80	172	342	224
81	172	338	221

Continued on next page

**Tabla 3.3 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
82	173	330	221
83	169	327	209
84	168	318	197
85	168	316	191
86	167	309	162
87	166	306	818
88	165	306	886
89	166	305	922
90	165	306	121
91	166	309	165
92	166	311	175
93	169	324	212
94	171	330	219
95	175	346	229
96	177	352	230
97	178	358	229
98	179	362	227
99	179	361	227
100	166	357	216

**Persona 4**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
1	163	342	273
2	163	342	273
3	163	342	273
4	163	342	273
5	163	342	273
6	165	350	154
7	163	370	-18
8	160	379	-10

Continued on next page

**Tabla 3.4 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
9	159	398	-27
10	161	392	-12
11	160	396	-20
12	161	392	-12
13	161	392	-12
14	161	392	-12
15	160	397	-21
16	160	397	-22
17	161	392	-12
18	161	392	-12
19	161	392	-12
20	161	392	-12
21	160	397	-22
22	161	387	-74
23	161	392	-12
24	161	388	-79
25	160	394	-19
26	160	395	-19
27	161	383	-72
28	161	396	-33
29	162	376	-11
30	162	373	-80
31	162	369	-99
32	160	380	-61
33	160	367	-18
34	162	366	850
35	163	365	910
36	165	370	170
37	165	370	170
38	168	384	209
39	169	387	210
40	170	396	215
41	174	406	222
42	179	417	226

Continued on next page

**Tabla 3.4 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
43	179	417	224
44	175	420	228
45	176	420	227
46	172	424	229
47	179	425	223
48	170	428	229
49	171	427	228
50	173	425	228
51	172	425	229
52	174	426	227
53	174	427	226
54	175	428	225
55	177	427	222
56	179	427	221
57	179	423	221
58	177	418	220
59	175	415	219
60	175	412	221
61	171	408	217
62	171	407	216
63	170	403	215
64	169	402	214
65	167	395	207
66	167	393	207
67	163	383	189
68	164	382	192
69	165	378	184
70	165	378	182
71	164	376	170
72	165	374	173
73	164	373	162
74	163	372	149
75	162	373	156
76	167	375	181

Continued on next page

**Tabla 3.4 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
77	166	378	192
78	166	384	205
79	166	387	207
80	168	393	214
81	172	402	224
82	175	409	228
83	179	410	231
84	179	411	232
85	178	414	232
86	176	416	233
87	178	417	230
88	174	421	231
89	172	423	232
90	175	426	229
91	174	428	229
92	174	430	230
93	174	431	230
94	172	432	231
95	170	434	232
96	175	433	228
97	173	435	230
98	171	436	231
99	167	437	235
100	179	434	224

**Persona 5**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
1	177	289	187
2	177	290	183
3	177	289	187

Continued on next page

**Tabla 3.5 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
4	178	288	197
5	178	288	197
6	177	289	186
7	177	289	186
8	177	289	186
9	177	289	187
10	177	289	186
11	177	289	186
12	177	290	181
13	177	290	182
14	177	290	181
15	177	290	182
16	177	290	182
17	176	291	169
18	177	290	175
19	176	292	160
20	176	292	164
21	176	294	149
22	175	298	112
23	175	299	953
24	174	302	209
25	175	345	-70
26	176	297	803
27	174	354	-93
28	173	284	393
29	171	296	276
30	168	301	270
31	171	307	246
32	166	310	255
33	166	317	244
34	167	320	236
35	163	322	236
36	165	327	226
37	165	328	224

Continued on next page

**Tabla 3.5 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
38	166	333	217
39	169	336	211
40	170	338	207
41	171	338	205
42	172	344	199
43	176	346	194
44	175	351	192
45	174	355	191
46	176	355	187
47	175	355	189
48	178	353	187
49	179	351	185
50	179	350	185
51	175	349	182
52	177	349	183
53	175	348	180
54	173	348	179
55	175	347	181
56	175	347	181
57	172	346	180
58	173	346	181
59	173	346	181
60	175	346	183
61	175	346	183
62	174	345	183
63	175	345	182
64	174	343	182
65	172	343	180
66	173	342	183
67	173	342	183
68	171	341	181
69	173	341	183
70	173	341	183
71	173	341	183

Continued on next page

**Tabla 3.5 – continued from previous page**

<b>Tiempo</b>	<b>Angulo</b>	<b>CIR X</b>	<b>CIR Y</b>
72	177	341	186
73	177	341	186
74	179	340	190
75	177	340	193
76	173	338	200
77	169	336	208
78	167	335	211
79	167	333	214
80	164	333	218
81	168	326	225
82	168	324	226
83	168	317	234
84	170	316	235
85	170	315	239
86	172	315	240
87	170	314	254
88	171	312	260
89	173	309	268
90	173	306	303
91	172	303	346
92	173	301	363
93	173	300	406
94	174	299	462
95	174	266	117
96	173	291	618
97	172	305	338
98	173	309	309
99	171	308	319
100	173	311	286