

Determinación de rangos de normalidad en movimientos de miembro inferior utilizando el Kinect 2 para ejercicios de rehabilitación de reconstrucción de ligamento cruzado anterior

Israel Ricardo Carreño Londoño

Proyecto de grado presentado como requisito parcial  
para aspirar al título de Ingeniero Electrónico

Directora.

Ms(C). Leydi Esperanza Pamplona.

Universidad Tecnológica De Pereira  
Facultad De Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Física Y De Sistemas  
Programa De Ingeniería Electrónica  
Pereira  
2018

## Tabla de contenido.

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
	1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
	1.2. JUSTIFICACIÓN .....	8
	1.3. OBJETIVOS.....	9
	1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
	1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
<b>2.</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>8</b>
	2.1. SISTEMAS MOCAP (MOTION CAPTURE).....	8
	2.2. MICROSOFT KINECT 2.....	10
	2.2.1. ARTICULACIONES PERMITIDAS POR KINECT 2.....	10
	2.2. LESIÓN DE RODILLA DE LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR (LCA).....	11
	2.3. FISIOTERAPIA.....	12
	2.3.1 REHABILITACIÓN EN FISIOTERAPIA PARA LESIONES DE LCA. ....	12
	2.3.2. MEDICIÓN DE ÁNGULOS PARA EJERCICIOS DE REHABILITACIÓN DE RODILLA.....	13
	2.3.3. FASES DE REHABILITACIÓN DE LESIÓN LCA... ..	13
	2.4. FILTRO DIGITAL.....	15
	2.4.1. FILTRO DE PROMEDIO MÓVIL.....	15
<b>3.</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>21</b>
	4.1. SELECCIÓN DE EJERCICIOS PARA EL ENTRENAMIENTO DE LA BASE DE DATOS. ....	21
	4.1.1. FASE DE ENTRENAMIENTO POST QUIRÚRGICA I.....	21
	4.1.2. SELECCIÓN DE EJERCICIOS. ....	22
	4.1.3. ARTICULACIONES A CAPTURAR EN KINECT. ....	22
	4.2. CREACIÓN DE BASE DE DATOS. ....	23
	4.2.1. POBLACIÓN DE ESTUDIO. ....	23
	4.2.2. DISPOSITIVO PARA CONTROL DE EJECUCIÓN DEL MOVIMIENTO. ....	23
	4.2.3. SOFTWARE DE CAPTURA DE ARTICULACIONES KINECT. ....	25
	4.2.4. PROCEDIMIENTO DE CAPTURA DE MOVIMIENTOS.....	29
	4.2.4.1. SENTADILLA 0°- 30°.....	29
	4.2.4.2. SENTADILLA 0°- 90°.....	30
	4.2.4.3. FLEXIÓN DE RODILLA DE PIE 0°-90° .....	31
	4.2.4.4. EXTENSIÓN DE RODILLA 90°-0°.....	32
	4.2.4.5. EXTENSIÓN DE RODILLA 30°-0°.....	33

4.3.	CÁLCULO DE ÁNGULOS.....	34
4.3.1.	RESULTADOS DE ÁNGULOS.....	37
4.3.1.1.	EXTENSIÓN 90 GRADOS.....	38
4.3.1.2.	SENTADILLA A 90 GRADOS.....	39
4.3.1.3.	FLEXIÓN DE PIE 90 GRADOS.....	41
4.3.1.4.	EXTENSIÓN 30 GRADOS:.....	42
4.3.1.5.	SENTADILLA 30 GRADOS.....	44
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....</b>	<b>46</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>46</b>
<b>7.</b>	<b>TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>48</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>48</b>
8.1.	ANEXO A: CONSENTIMIENTO INFORMADO.....	48
8.2.	ANEXO B: FORMULARIO DE CONSENTIMIENTO/ DISENTIMIENTO.....	50
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>51</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Microsoft Kinect 2 .....	9
Figura 2. Articulaciones (joints) del Kinect 2.....	10
Figura 3. Descripción de ligamentos de la rodilla. ....	11
Figura 4. Convención de ángulos para movimiento de miembro inferior.....	12
Figura 5. Ejemplo filtrado de media móvil. ....	15
Figura 6. Prótesis experimental para evaluación de la biomecánica de la rodilla y tensión en LCA. 15	
Figura 7. Relación tensión en LCA (mm) contra extensión de rodilla ortopédica.....	16
Figura 8. Fase de pruebas de tensión en LCA.....	17
Figura 9. Patrones de respuesta de tensión del LCA ante ejercicios dinámicos. ....	17
Figura 10. Equipo de rehabilitación activa de rodilla.....	18
Figura 11. Interfaz gráfica de juego para rehabilitación motora. ....	20
Figura 12. Articulaciones a capturar mediante Kinect 2. ....	22
Figura 13. Equipo para limitar movimiento en ejecución de ejercicio.....	23
Figura 14. Equipo de limitación de ángulo sujeto en pierna de colaborador. ....	24
Figura 15. Diagrama de flujo de aplicativo para captura de datos. ....	25
Figura 16. Panel frontal de interfaz de captura en LabView.....	26
Figura 17. Diagrama de bloques funcionales de LabVIEW para interfaz gráfica. ....	27
Figura 18. Interfaz gráfica de captura de datos Labview. ....	28
Figura 19. Procedimiento para sentadilla 30 grados... ..	27
Figura 20. Procedimiento para sentadilla 90 grados. ....	28
Figura 21. Procedimiento para flexión 90 grados. ....	29
Figura 22. Procedimiento para extensión 90 grados. ....	30
Figura 23. Procedimiento para extensión 30 grados. ....	31
Figura 24. Representación de coordenadas en 3D interconectadas. ....	32
Figura 25. Vectores requeridos para cálculo de ángulos. ....	33
Figura 26. Grafica de ángulos obtenidos para extensión 90°. ....	35
Figura 27. Gráfica de desviación estándar para extensión 90°. ....	36
Figura 28. Grafica de ángulos obtenidos para sentadilla 90°. ....	37
Figura 29. Gráfica de desviación estándar para sentadilla 90°. ....	37
Figura 30. Grafica de ángulos obtenidos para flexión 90°. ....	38
Figura 31 Gráfica de desviación estándar para flexión 90°. ....	39
Figura 32. Grafica de ángulos obtenidos para extensión 30°. ....	40
Figura 33. Gráfica de desviación estándar para extensión 30°. ....	40
Figura 34. Grafica de ángulos obtenidos para sentadilla 30°. ....	41
Figura 35. Gráfica de desviación estándar para sentadilla 30°. ....	41
Figura 36. Fenómeno de oclusión en Kinect. ....	41

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ejercicio de prueba dinámica para miembros superiores. ....	20
Tabla 2. Resumen de muestras obtenidas. ....	34
Tabla 3. Resumen rangos probables de normalidad de movimiento en personas sanas medidos con Kinect 2.....	45

## **1. INTRODUCCIÓN.**

Actualmente son utilizadas múltiples tecnologías y procedimientos relacionados con los desarrollos realizados en áreas de ingeniería electrónica, mecánica, sistemas y bioingeniería como parte integral y de apoyo al área de fisioterapia a los procesos de recuperación de personas con lesiones en sus miembros inferior, superior o limitaciones de movilidad ya sea por lesiones causadas debido a deportes, malas posturas o problemas de salud relacionados con articulaciones y músculos, que limitan la función motora normal del ser humano.

Algunos sistemas desarrollados como técnicas de apoyo son por ejemplo Biofeedback electromiográfico [6], para identificar patrones de movimientos musculares [2] y establecer los progresos en el proceso de recuperación de lesiones, enfocado principalmente en la respuesta eléctrica que presentan los músculos al ejecutar ciertas actividades, los cuales sirven de patrón de seguimiento para los especialistas al momento de evaluar la recuperación del paciente.

Además de tener actualmente desarrollos de aplicativos de interfaz gráfica de apoyo, que buscan guiar al paciente en ciertas actividades que debe realizar para su proceso de recuperación de una forma amigable, ya que se aplican métodos lúdicos de plantear los ejercicios como una especie de juego en el que el paciente deberá cumplir las actividades correctamente para llegar a la “meta”.

En el caso específico del proceso de rehabilitación post-quirúrgico de la reconstrucción de ligamento cruzado anterior (LCA) [9], la cual es una lesión común en deportistas, se lleva a cabo un proceso de recuperación que va desde la etapa de entrenamiento estático, hasta las fases de entrenamiento y adaptación dinámica con cargas progresivas [10], todo esto con el fin de que el paciente pueda regresar a sus actividades cotidianas y deportivas con una plena recuperación de su lesión de ligamento.

En cada fase de recuperación post-quirúrgico de LCA se realizan ejercicios de adaptación de movimiento para la rodilla a distintos ángulos específicos en cada fase de rehabilitación [11] y así estimular a que los ligamentos se adapten progresivamente a las flexiones y extensiones de la rodilla, ya que con el proceso de reconstrucción se genera cicatrización que tiende a limitar la capacidad de flexión y extensión del tejido, [12].

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La lesión de ligamento cruzado anterior (LCA) tiende a volverse un problema de salud [7] de mayores consecuencias si no se realiza el adecuado seguimiento a la rehabilitación de la misma, en el caso de los deportistas puede desde afectar su desempeño hasta limitarle la realización de actividad física a nivel competitivo. Existen algunos puntos clave en la correcta rehabilitación de este tipo de lesión rodilla, cabe aclarar que el procedimiento de rehabilitación varía según el tipo de lesión [8]. De acuerdo a esto se deben realizar ciertos ejercicios de movimiento libre, con bandas elásticas y equipo de fisioterapia que deben seguir estándares médicos [10] en las distintas fases de rehabilitación, tales como realizar ejercicios de flexión y extensión de la pierna teniendo en cuenta que para cada fase post-quirúrgica se deben cumplir con ciertos ángulos que se consideran correctos para que progresivamente el ligamento cicatrizado se adapte y mejore su elasticidad y fortaleza.

Actualmente se estos procesos de rehabilitación de lesiones de rodilla son guiados por fisioterapeutas, quienes realizan el seguimiento a la correcta ejecución de las técnicas de rehabilitación, entre ellas además de métodos con elementos de fisioterapia, tales como bandas elásticas, balones etc., se utilizan métodos de electro estimulación [4], también en el área de la biotecnología actualmente se desarrollan técnicas de rehabilitación tales como los exoesqueletos [5].

Algunos de estos métodos de recuperación son invasivos ya que se hace necesario entrar en contacto con el paciente por el proceso de instalación de electrodos y demás elementos, también se reduce a el criterio visual del especialista para guiar al paciente en las fases de rehabilitación en la correcta ejecución de los ejercicios.

Con el fin de en un futuro posiblemente reducir la dependencia de los criterios visuales o los métodos invasivos en los procesos de rehabilitación de reconstrucción de ligamento cruzado anterior (LCA), se plantea crear una base de datos para el reconocimiento de patrones de movimiento de miembros inferiores mediante Kinect 2, con el fin de hacer el seguimiento con base a estudios previos de los ejercicios y correctos ángulos de ejecución, de acuerdo a la etapa de recuperación en la que se encuentre el paciente.

Para el presente trabajo se realizará la creación de esta base de datos con personas sanas, es decir que no han tenido reconstrucción ni lesión de LCA, para el proceso de adquisición de datos se utilizará el software NI LABVIEW y la Kinect 2. se indicará a las personas cómo se deberán realizar los movimientos de cada fase de recuperación, posteriormente se hará el cálculo de los ángulos captados con base a los puntos de articulación para miembro inferior que permite Kinect 2 los cuales son cadera, rodilla y pie.

Con este proyecto se busca llegar a mejorar la forma en que se realizan los ejercicios de rehabilitación de lesión de LCA y posiblemente en un futuro extenderse a otros tipos de lesiones de miembros inferiores, ya que podría ser un apoyo para los fisioterapeutas en las terapias de rehabilitación de sus pacientes.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN.**

Existen actualmente diferentes métodos de apoyo para los fisioterapeutas y pacientes, en el proceso de rehabilitación de rodilla [4, 5, 6]. Estos métodos se basan en el seguimiento de los ejercicios de recuperación con apoyo del tacto y criterio del especialista en lesiones, también son utilizadas técnicas de electro estimulación de las fibras musculares para acelerar el proceso de recuperación. Aun así, se debe tener en cuenta que todas las personas tienen una respuesta muy variable con respecto a su proceso de recuperación, ya sea por la edad del paciente o condiciones físicas que comprometan el proceso de recuperación de las fibras musculares involucradas en la lesión.

Por esta razón y pensando en que los pacientes que padecen de una lesión de rodilla, puedan llegar a tener una satisfactoria terapia de recuperación, se plantea la creación de una base de datos con algunos de los movimientos correctos de ejecución de ejercicios realizados por personas sanas, ya que esta se plantearía como una referencia de patrón de normalidad del movimiento realizado para ejercicios de rehabilitación en la primera fase de rehabilitación de rodilla (fase post quirúrgica inicial) luego de una intervención quirúrgica de LCA, siendo así en un futuro integrable o escalable a interfaces de seguimiento y apoyo para los fisioterapeutas en los procesos de rehabilitación.



### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Crear base de datos con patrones de movimientos de ejercicios rehabilitación de rodilla para ejercicios de reconstrucción de ligamento cruzado anterior con pacientes sanos mediante KINECT 2.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

1. Definir ejercicios y ángulos correctos de ejecución de acuerdo a la fase de rehabilitación.
2. Crear base de datos de ejercicios con personas sanas en LABVIEW mediante captura de movimientos con Kinect 2.
3. Realizar comparación de resultados obtenidos con resultados de comportamientos morfológicos de estudios previos sobre el tema.
4. Realizar análisis de los resultados obtenidos.

## **2. MARCO CONCEPTUAL.**

### **2.1. SISTEMAS MOCAP (MOTION CAPTURE).**

La captura de movimiento llamada también Mocap (Motion Capture) por sus siglas en inglés, es un proceso que permite grabar y describir el movimiento de un cuerpo en el espacio, el cual es representado por los cambios de traslación y rotación, gracias a dichos cambios es posible calcular velocidades y aceleraciones que hoy en día son empleados como información valiosa ya sea para estudiar el comportamiento de un algún objeto en el espacio o de toda la cadena cinemática del cuerpo de una persona, un animal o alguna cosa.

Debido a la complejidad que tiene el lograr la captura del movimiento, ha sido necesario el desarrollo de tecnologías que permitan facilitar este proceso, en los comienzos fue necesario crear sistemas que permitieran disparar una secuencia de fotografías análogas que capturarán el movimiento del cuerpo y luego por medio de complejos procesos estimar la posición de los mismos, este proceso de estimación de las posiciones se conoce técnicamente como tracking y es la base de los sistemas de captura de movimiento, no obstante con los avances de la electrónica, la mecatrónica y la informática, en los sistemas de captura de movimiento se han ido implementando diversas tecnologías tales como cámaras infrarrojas de alta velocidad, sensores electromagnéticos y sistemas inerciales y de ultrasonido, que los han hecho más fáciles de usar y mejores en la velocidad de captura, a tal nivel que ya se pueden

encontrar sistemas que en tiempo real entregan la información capturada para ser usada en aplicaciones de videojuegos, robótica y entrenamiento en realidad virtual. [26].

## 2.2. MICROSOFT KINECT 2.

El sensor de Kinect 2 (figura 1) es una barra horizontal de aproximadamente 23 cm. conectada a una pequeña base [13] circular con un eje de articulación de rótula, y está diseñado para ser colocado longitudinalmente por encima o por debajo de la pantalla de vídeo.

El dispositivo cuenta con una cámara RGB, un sensor de profundidad, un micrófono de múltiples matrices y un procesador personalizado que ejecuta el software patentado, que proporciona captura de movimiento de todo el cuerpo en 3D, reconocimiento facial y capacidades de reconocimiento de voz.

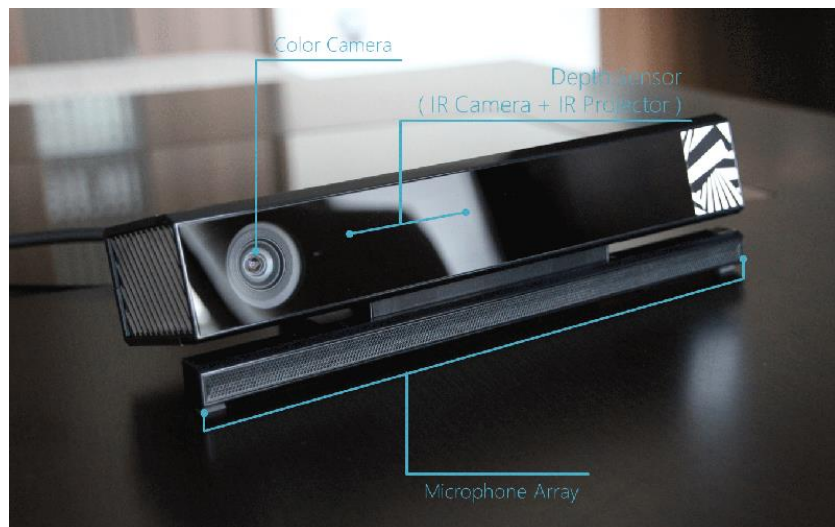


Figura 1. Microsoft Kinect 2.

### 2.2.1. ARTICULACIONES PERMITIDAS POR KINECT 2.

El sensor Kinect 2, permite realizar seguimiento de las articulaciones de movimiento de la figura 2, las cuales pueden ser representadas en espacio 3D mediante la obtención de las coordenadas XYZ.

En total se tienen disponibles 24 articulaciones para 6 partes del cuerpo:

- Cuello y cabeza.
- Pierna Derecha.

- Pierna Izquierda.
- Brazo derecho y mano derecha.
- Brazo izquierdo y mano izquierda.
- Tronco (pecho, abdomen cintura).

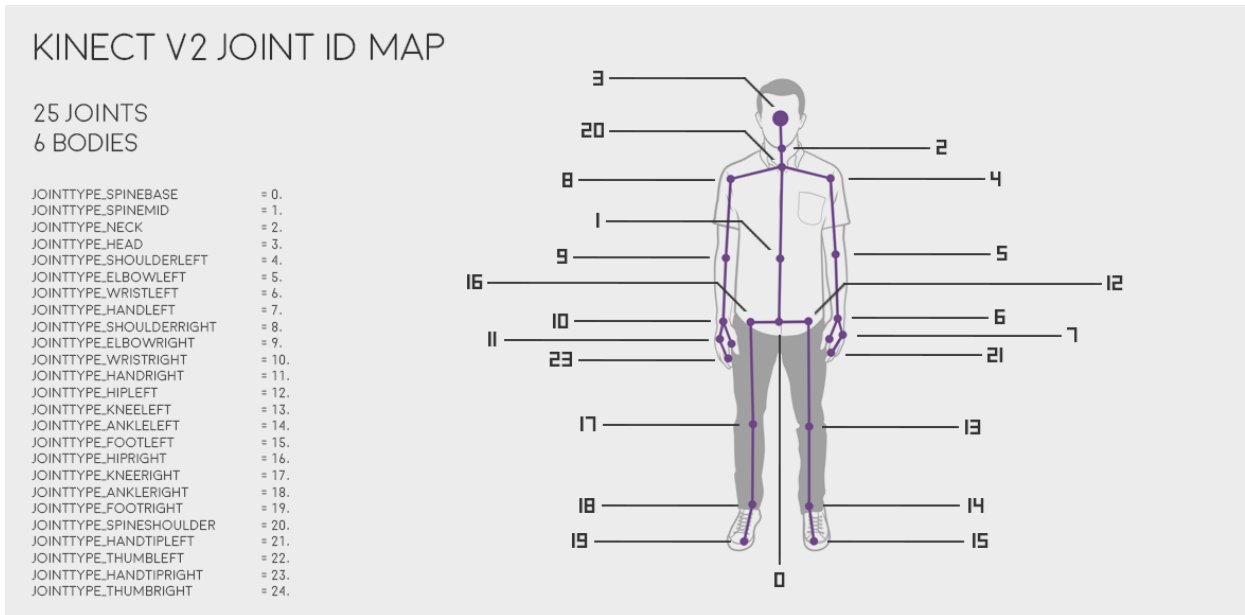


Figura 2. Articulaciones (joints) del Kinect 2.

### 2.3. LESIÓN DE RODILLA DE LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR (LCA).

Una lesión de ligamento cruzado anterior (LCA) es una rotura parcial o total de este ligamento. Un ligamento es un tejido elástico y fuerte que une un hueso con otro, [14]. El LCA está localizado en la rodilla (ver figura 3) y une la tibia (hueso de la espinilla) con el fémur (hueso del muslo). Este ligamento impide que la tibia se desplace exageradamente hacia delante y también mantiene la estabilidad en la rodilla. Cuando el LCA es lesionado, también pueden resultar afectados otros ligamentos de la rodilla. Uno o más de los meniscos de la rodilla (cartílagos amortiguadores de golpes entre los huesos de la rodilla) también podrían lesionarse. La lesión del LCA también puede hacer que este ligamento arranque (desgarre) una parte de la tibia.

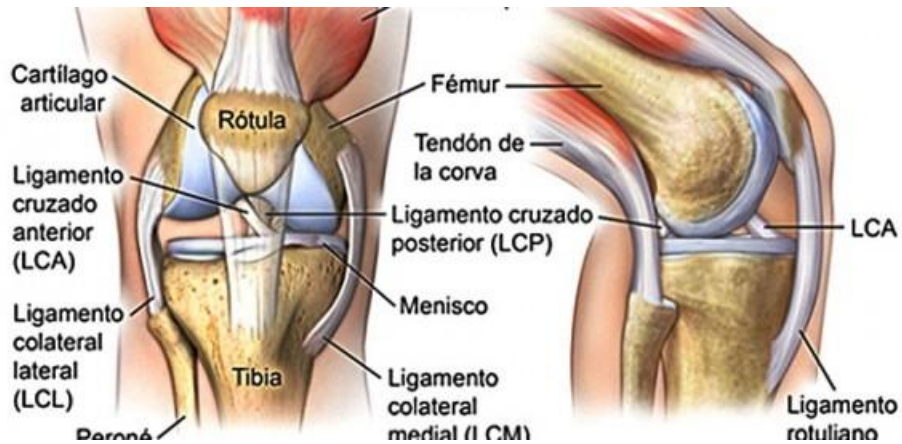


Figura 3. Descripción de ligamentos de la rodilla.

## 2.4. FISIOTERAPIA.

La fisioterapia también conocida como terapia física, es una disciplina de la salud que ofrece una alternativa terapéutica no farmacológica para diagnosticar, prevenir y tratar síntomas de múltiples dolencias, tanto agudas como crónicas, por medio del ejercicio terapéutico, calor, frío, luz, agua, técnicas manuales entre ellas la electricidad, [15].

### 2.4.1. REHABILITACIÓN EN FISIOTERAPIA PARA LESIONES DE LCA.

La rehabilitación de fisioterapia es un programa que ayuda a estabilizar la rodilla después de haber sufrido una lesión de LCA, [16]. El objetivo de este programa es hacer que su rodilla recupere el rango de movimiento normal y fortalecer los músculos del muslo. Se pueden establecer la realización de algunos ejercicios, como subir escaleras o ponerse en cuclillas y luego levantarse varias veces seguidas; con tratamiento, como medicamentos y cirugía, es usual que el paciente pueda volver a sus actividades acostumbradas.

Existen distintos métodos de rehabilitación y técnicas usadas por los expertos para ayudar al paciente a mejorar la estabilidad y funcionalidad normal de la rodilla, Estos métodos se basan en realizar ejercicios de movimientos a ángulos progresivos con el fin de generar una adaptación de los ligamentos a las actividades diarias; es decir, gradualmente aumentar la elasticidad de la rodilla y fuerza. Algunos de los ejercicios realizados para rehabilitación son:

- Flexión y extensión de rodilla asistida (aumento progresivo de ángulo).
- Flexión acostada y de pie con bandas elásticas (Mejora de estabilidad y fortalecimiento de ligamentos).
- Sentadillas.

## 2.4.2. MEDICIÓN DE ÁNGULOS PARA EJERCICIOS DE REHABILITACIÓN DE RODILLA.

Se ha definido por la comunidad científica en el área de la medicina una convención de medición de ángulos del movimiento de la pierna, lo cual involucra directamente la acción de giro de la rodilla. (ver figura 4), [8] [9] [10].

A continuación, observa que para la extensión completa de la pierna se tiene como referencia cero (0) grados, esto para cualquier movimiento del miembro inferior.

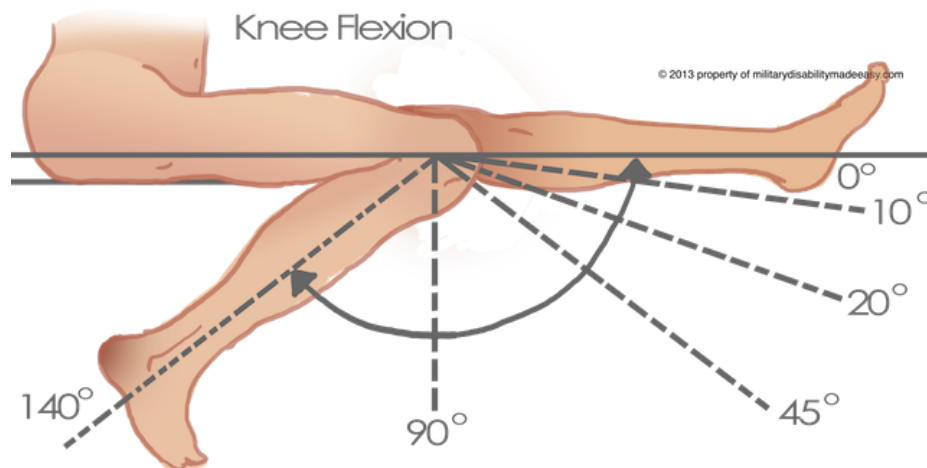


Figura 4. Convención de ángulos para movimiento de miembro inferior [24].

## 2.4.3. FASES DE REHABILITACIÓN DE LESIÓN LCA.

Luego de una intervención quirúrgica para reconstrucción del LCA causada por una lesión, se debe seguir un programa de rehabilitación y de adaptación progresiva del paciente, dado que existen múltiples métodos avalados para seguir un plan de rehabilitación para el presente trabajo se toma como referencia en particular el establecido en [17].

### Programa propuesto de Rehabilitación tras cirugía del LCA.

#### FASE INMEDIATA

(Primera semana tras la cirugía).

- Control del dolor y la inflamación.
- Ejercicios isométricos.
- Apoyo sin muletas hacia el 4° día.

## **FASE POSTQUIRÚRGICA I**

(2 a 4 semanas tras la cirugía)

- Control del dolor y la inflamación.
- Ejercicios activos y pasivos para mejorar el arco de movilidad.
- Extensión completa y flexión a 90°.
- 

## **FASE POSTQUIRÚRGICA II**

(5 a 10 semanas tras la cirugía).

- Ejercicios activos y pasivos para mejorar el arco de movilidad.
- Hiperextensión y flexión completa.
- Potenciación muscular.
- Ejercicios concéntricos y excéntricos en CCC (Cadena Cinética Cerrada)..
- Ejercicios de marcha
- 2ª fase de recuperación de la propiocepción

## **FASE POSTQUIRÚRGICA III**

(2 a 3 meses tras la cirugía).

- Potenciación muscular
- Ejercicios concéntricos y excéntricos en CCC y en CCA (Cadena Cinética Cerrada y Cadena Cinética Abierta).
- Ejercicios de carrera
- Recuperación resistencia aeróbica
- Natación, bicicleta
- 3ª fase de recuperación de la propiocepción

## **FASE ENTRENAMIENTO FUNCIONAL**

(4 meses tras la cirugía).

- Aumento progresivo de la carrera en distancia e intensidad
- Ejercicios pliométricos

## **FASE RETORNO A LA ACTIVIDAD FÍSICA**

(6 A 12 meses tras la cirugía).

Retorno a actividades deportivas y cotidianas.

## 2.5. FILTRO DIGITAL.

Un filtro digital, es un filtro que opera sobre señales digitales. Es una operación matemática que toma una secuencia de números (la señal de entrada) y la modifica produciendo otra secuencia de números (la señal de salida) con el objetivo de resaltar o atenuar ciertas características, tales como ruido y cambios bruscos en las señales. [25]

### 2.5.1. FILTRO DE PROMEDIO MÓVIL.

En un filtro de media móvil de largo M, la salida actual consiste en el promedio de las últimas M muestras de la entrada, a continuación, se presenta la ecuación de un filtro de media móvil por método de convolución. [25]

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n - k] \quad (1).$$

Ejemplo del cálculo de la muestra n=80 de la salida de un filtro de largo M=5.

$$y[80] = \frac{x[80] + x[79] + x[78] + x[77] + x[76]}{5} \quad (2).$$

Un ejemplo de aplicación es la eliminación del ruido blanco en señales digitales:

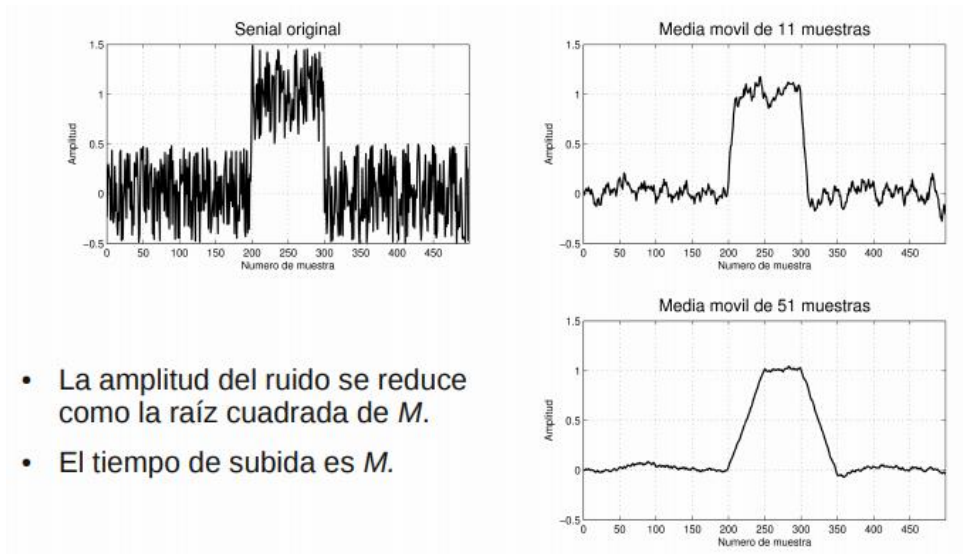


Figura 5. Ejemplo filtrado de media móvil.

### 3. MARCO TEÓRICO.

Se presentan algunas de las investigaciones más relevantes sobre temas directamente relacionados con la finalidad de este proyecto que sirvieron como referencia para la fase de investigación y planteamiento del mismo.

En el año 1984, en el departamento de ortopedia de la universidad de Cincinnati, Estados Unidos, se realiza estudio con aparato experimental que simula las biomecánicas de la pierna humana [28], en el cual se hace análisis de los ángulos de extensión de la rodilla y cómo éstas presentan tensión el ligamento cruzado anterior.

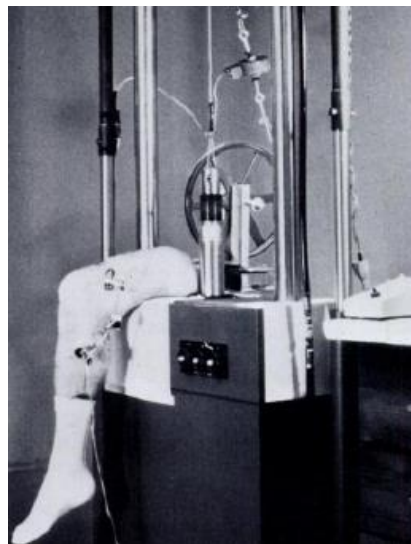


Figura 6. Prótesis experimental para evaluación de la biomecánica de la rodilla y tensión en LCA.



En el experimento se analizan las tensiones el LCA ante el movimiento a diferentes ángulos de extensión del aparato experimental, la relación de tensión – desplazamiento en (mm) de el ligamento (tensión), se puede observar en la figura 7.

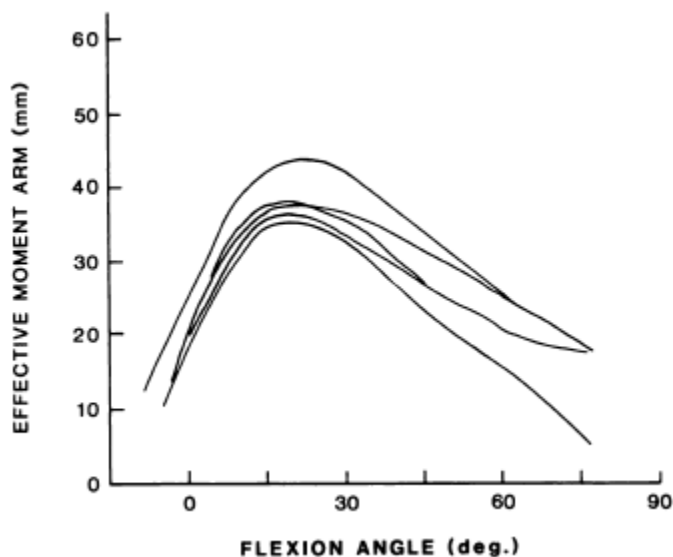


Figura 7. Relación tensión en LCA (mm) contra extensión de rodilla ortopédica.

En el departamento de ortopedia y rehabilitación en la universidad de Vermont, USA, se realiza estudio en el año 2005, se realizó experimento para la evaluación de tensión el ligamento cruzado anterior durante ejercicios de cadena cinética cerrada, Se plantea el estudio sobre 9 pacientes en proceso post quirúrgico de reconstrucción de LCA de los niveles de tensión presentados en el ligamento cruzado anterior al realizar la ejecución de ejercicios de rehabilitación en fase inmediata (ver sección 2.3.4). [18]

La medición de la tensión en el ligamento en recuperación se realiza mediante adquisición de respuestas eléctricas de tensión gracias a un sensor de tensión Microminiature DVRT.



Figura 8. Fase de pruebas de tensión en LCA.

Se obtienen patrones de respuesta de tensión pico por cada ejercicio realizado, el autor plantea los patrones en la figura 6.

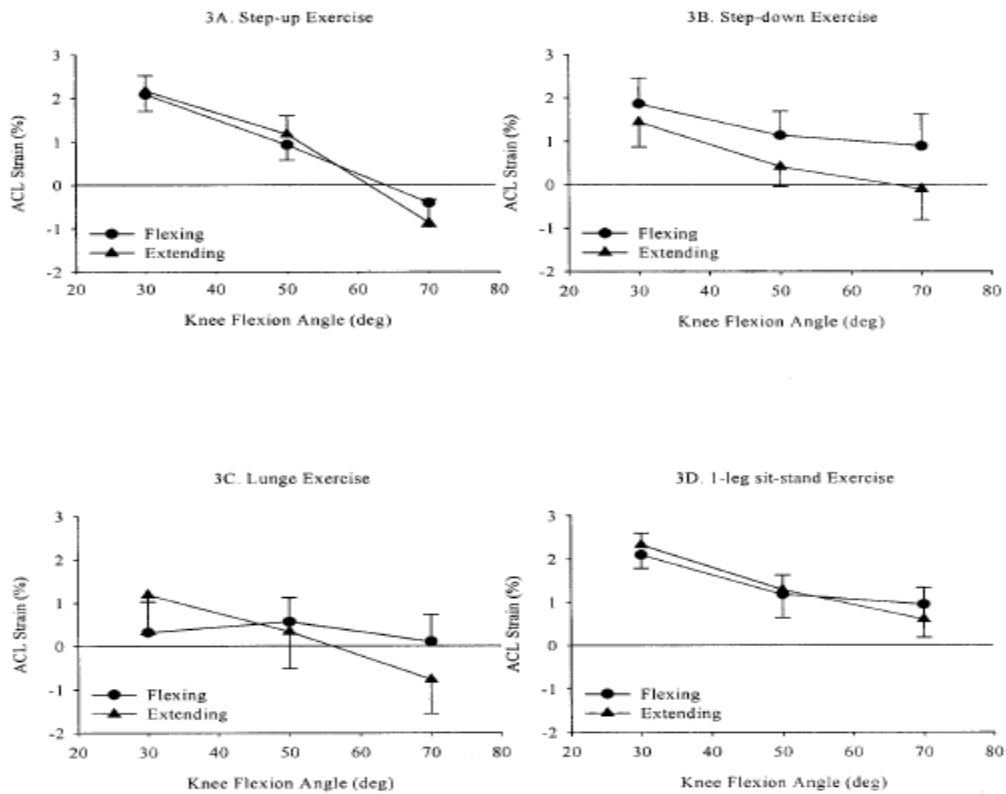


Figura 9. Patrones de respuesta de tensión del LCA ante ejercicios dinámicos.

En temas de apoyo ortopédico a los procesos de rehabilitación de rodilla, el departamento de mecánica e ingeniería industrial de la universidad de Northeastern, Boston, Estados Unidos, plantea el desarrollo de un equipo de rehabilitación activa, el cual permite generar el movimiento controlado de la extensión de la rodilla, pudiendo controlar velocidad y ángulos de movimiento, este equipo permite forzar de cierta forma el movimiento en el paciente, siendo una ayuda para controlar las etapas de apertura arco de movilidad, en la figura 7 se puede observar el equipo diseñado. [27]

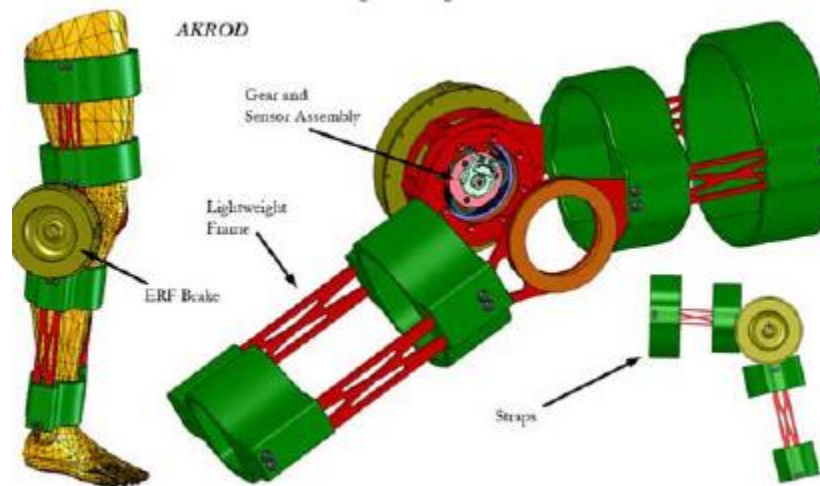


Figura 10. Equipo de rehabilitación activa de rodilla.

Con base a sistemas MOCAP, se han realizado múltiples investigaciones y desarrollos para procesos de rehabilitación de miembro inferior, dado que plantean una herramienta no invasiva y didáctica interesante al momento de evaluar movimientos, como es el caso de un trabajo desarrollado por Sven Nomm y Kirill Buhhalko del Instituto de Cibernética de la Universidad Tecnológica de Tallin, Estonia (2013) [19], en el cual se plantea un sistema de monitoreo de funciones motoras del cuerpo humano mediante interfaz gráfica, se plantea el aprendizaje del sistema mediante redes neuronales, para evaluación de rangos de normalidad en brazos.

Se realiza la captura de movimientos por medio de Kinect, posteriormente se realiza tratamiento de los datos en software para análisis de movimientos e identificación de patrones de movimiento.

El modelo está basado en la red neuronal que evalúa el movimiento correcto, se usa entonces para predecir las posiciones de las extremidades. Una vez la diferencia entre las posiciones pronosticadas y reales excede cierto umbral la computadora interrumpe el ejercicio e indica al paciente que debe repetirlo nuevamente.

En 2012 en la 6a Conferencia Internacional sobre Tecnologías de Computación Transmisibles para la Atención Sanitaria (PervasiveHealth) en la Universidad Southern California, Estados Unidos, se plantea proyecto para la rehabilitación física generalizada mediante Kinect [20], consiste en la creación de un sistema de bajo costo con interfaz gráfica basado en el concepto de juego de realidad virtual, se plantea como una opción para métodos de rehabilitación física para miembro superior.

Se realizan pruebas con movimientos de brazos como flexión y extensión para validar movimientos y patrones de respuestas en ángulos, los ejercicios planteados para esta publicación se observan en la tabla 1.

Motor Task	Description
External Rotation	External rotation of the shoulder with elbow at 90 degrees flexion
Shoulder Adduction (Diagonal Pull Down)	Shoulder flexion and adduction from arm above head across midline of body towards opposite knee with elbow extended
Scapular Retraction	Arms extended in front of body at 45 degrees flexion, elbows extended - flexing elbows to bring hands back towards body
Shoulder Abduction	Shoulder abduction with elbow extended
Shoulder Flexion	Shoulder flexion with elbow extended
Shoulder Extension	Arm outstretched in front of body with shoulder at 90 degrees flexion, elbow extended to arm outstretched at side at 90 degrees abduction, elbows extended

Tabla 1. Ejercicio de prueba dinámica para miembros superiores.

Bajo este mismo concepto de apoyo en fisioterapia con métodos MOCAP, en 2015 en la Conferencia internacional sobre realidad virtual y aumentada en educación en la Universidad de Valladolid, España [21], se presenta el desarrollo de un sistema de realidad virtual personalizado basado en un juego que permite al usuario llevar a cabo terapias de rehabilitación física y cognitiva utilizando una interfaz de usuario natural basada en Microsoft Kinect.

La plataforma de realidad virtual propuesta consiste en diferentes tipos de ejercicios mediante los cuales el usuario puede entrenar o rehabilitar varios aspectos tales como la fuerza, la capacidad aeróbica o cognitiva.

El sistema ha sido modelado por lo que no se requiere la presencia física de un terapeuta durante el curso de la sesión y no es necesario usar ningún tipo de marcador o sensor. Además, todos los parámetros de los diferentes ejercicios se pueden configurar sin la presencia física de un terapeuta. Los informes de cada sesión también se pueden leer sin

conexión, por lo tanto, el terapeuta siempre sabrá si un usuario ha realizado la sesión de una buena manera y actuar en consecuencia modificando lo que él considere necesario en la

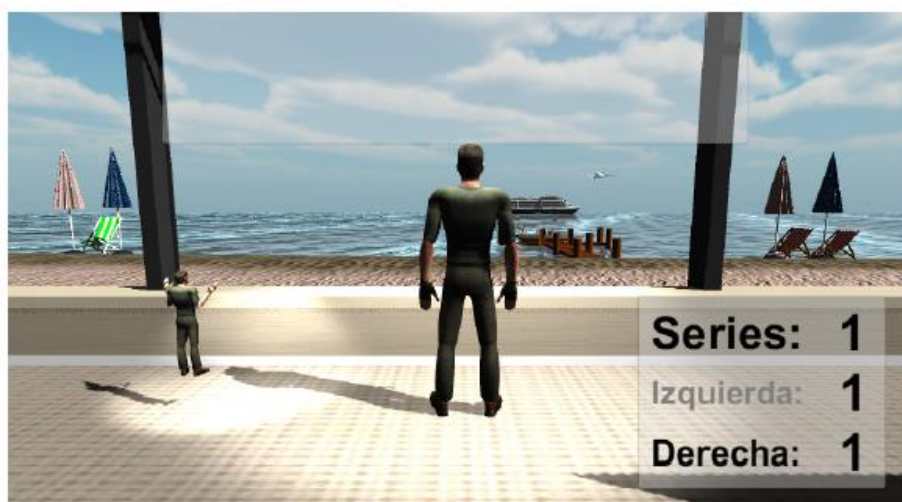


Figura 11. Interfaz gráfica de juego para rehabilitación motora.

#### **4. METODOLOGÍA.**

En este trabajo se busca crear una base de datos de ángulos de movimiento de rodilla, basados en ejercicios dinámicos con personas sanas para etapa post quirúrgica I, donde el paciente estará en proceso de adaptación al movimiento con ejercicios de flexión – extensión.

Se Presenta a continuación de manera detallada las diferentes etapas del proyecto, las cuales fueron necesarias para la ejecución del mismo.

##### **4.1. SELECCIÓN DE EJERCICIOS PARA EL ENTRENAMIENTO DE LA BASE DE DATOS.**

###### **4.1.1. FASE DE ENTRENAMIENTO POST QUIRÚRGICA I.**

Se toma como referencia para este proyecto la etapa de recuperación post quirúrgica 1 (ver sección 2.3.4) en la cual se realizarán ejercicios activos y pasivos para mejorar el arco de movilidad del paciente y así evitar limitación en la movilidad de la pierna.

Para el presente trabajo en el cual se busca determinar los rangos de normalidad y patrones de movimiento de miembro inferior, esta etapa establece un perfecto referente ya que no se hace uso de cargas estáticas ni control de tiempos de ejecución de ejercicios, como son los realizados en etapas posteriores para incrementar la estabilidad y fuerza del paciente, en este caso solo se hace seguimiento al ángulo de ejecución del ejercicio propuesto a la persona.

#### **4.1.2. SELECCIÓN DE EJERCICIOS.**

Se realiza una revisión bibliográfica de las técnicas y ejercicios propuestos por expertos en fisioterapia para este proceso de rehabilitación, en caso específico para el presente proyecto se toma como referencia el trabajo la guía de ejercicios planteados para rehabilitación física de lesiones deportivas [22] para esta etapa de ejercicios de rehabilitación, movimientos de libre Flexión – Extensión, sin cargas ni métodos de resistencia como bandas elásticas.

Dado que en esta etapa se busca llegar en lo posible a una extensión de 90 grados, con base a esto se eligen los siguientes ejercicios:

- Sentadilla 0°- 30°.
- Sentadilla 0°- 90°.
- Flexión de rodilla de pie 0°-90°.
- Extensión de rodilla 90°-0°.
- Extensión de rodilla 30°-0°.

#### **4.1.3. ARTICULACIONES A CAPTURAR EN KINECT.**

Dado que el seguimiento a los movimientos se realiza utilizando los puntos articulados del Kinect, que corresponden a la ubicación espacial de estos en tres dimensiones (x, y, z), se plantea para hacer un análisis del ángulo de ejecución del ejercicio, evaluar los puntos de articulación (joints): 16, 17 y 18 (ver figura 2), con lo cual se establece que el seguimiento y captura de los movimientos que se realizarán en la pierna derecha de la persona. Dado que se considera que hay simetría de ambas piernas al realizar los ejercicios, no implica diferencia al momento de evaluar los ángulos sea con pierna izquierda o derecha, con el fin de establecer un protocolo estándar de captura para todos los colaboradores se elige miembro inferior derecho.

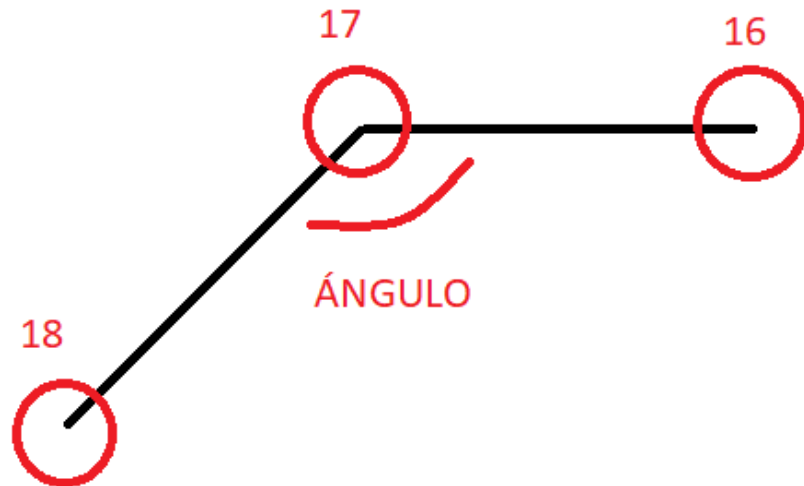


Figura 12. Articulaciones a capturar mediante Kinect 2.

Con el seguimiento a estas articulaciones se analizará el ángulo de flexión y extensión de la rodilla, de acuerdo a la convención para esta medida.

## 4.2. CREACIÓN DE BASE DE DATOS.

### 4.2.1. POBLACIÓN SELECCIONADA.

Para la creación de la base de datos, se eligen estudiantes de la universidad tecnológica pertenecientes al grupo de investigación de ingeniería electrónica, quienes fueron informados del procedimiento a realizar y aceptaron ser partícipes del proceso.

**Rangos de edad:** 17 y 23 años.

**Cantidad de personas:** 13.

**Hombres:** 11.

**Mujeres:** 2.

Estas personas aseguran no haber tenido nunca lesiones de intervención quirúrgica de LCA ni lesiones mayores que limiten su movilidad.

### 4.2.2. DISPOSITIVO PARA CONTROL DE EJECUCIÓN DEL MOVIMIENTO.

Para hacer control del ángulo de movimiento que realizarán las personas en el entrenamiento de la base de datos, se utiliza un equipo fabricado con medida de ángulos y posibilidad de

sujetar a la pierna de la persona por medio de cinta tipo velcro, con lo cual se garantiza una sujeción correcta a la pierna de la persona.

Este equipo se realizó bajo la necesidad de limitar los movimientos de ejecución de ejercicios y no depender de la estimación visual del ángulo de flexión o extensión.

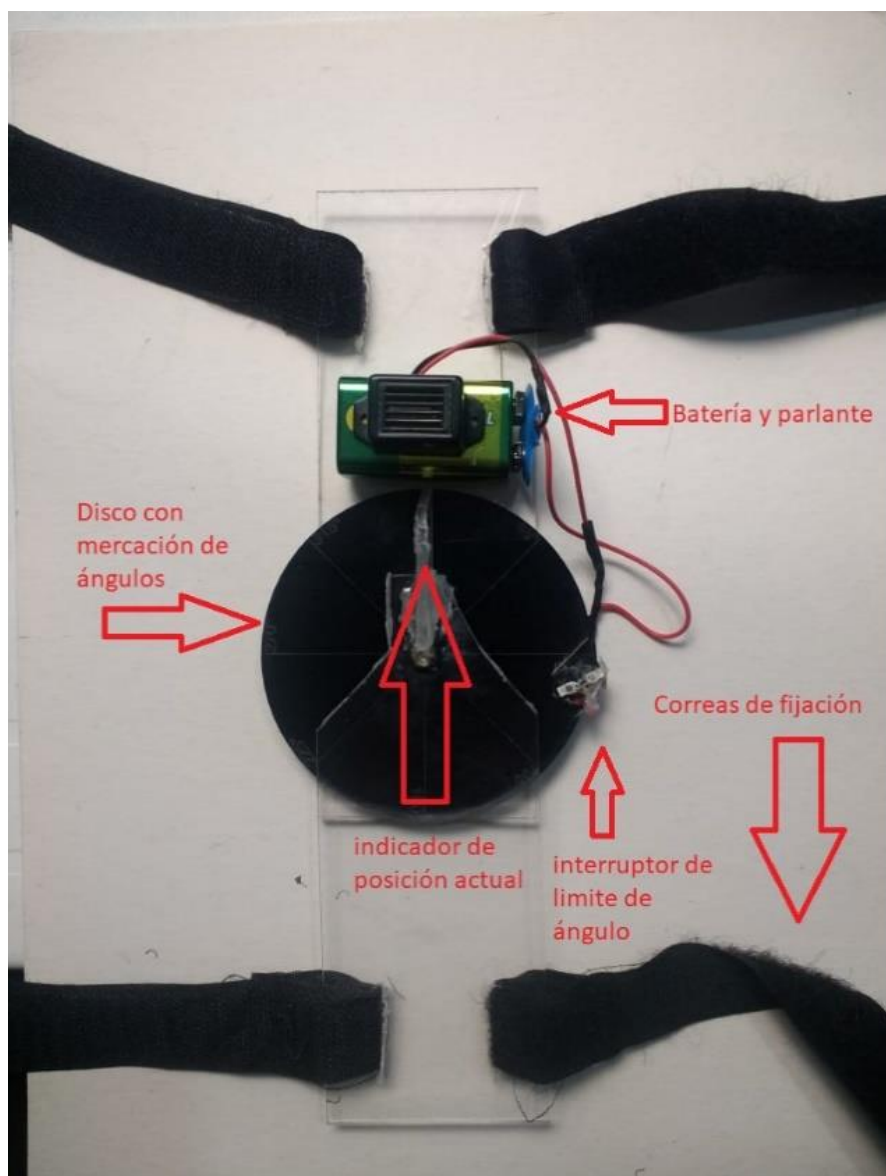


Figura 13. Equipo para limitar movimiento en ejecución de ejercicio.

El equipo está compuesto como se observa en la figura 9 de:

- Disco que permite visualización de posición angular.
- Paletas transparentes para fijación en lateral de cuádriceps y lateral de pantorrilla, con indicador de posición.



- Interruptor de final de carrera y conexión eléctrica con batería y parlante que indica el límite del ángulo calibrado.

En la figura 10 se observa cómo debe ser la sujeción del equipo a la pierna de la persona que realizará los ejercicios.



Figura 14. Equipo de limitación de ángulo sujeto en pierna de colaborador.

#### **4.2.3. SOFTWARE DE CAPTURA DE ARTICULACIONES KINECT.**

Con apoyo del software LABVIEW 2013, se implementa una interfaz de captura de las coordenadas tridimensionales XYZ generadas por el sensor Kinect, en la figura 15 se muestra un diagrama de flujo del funcionamiento general del aplicativo.



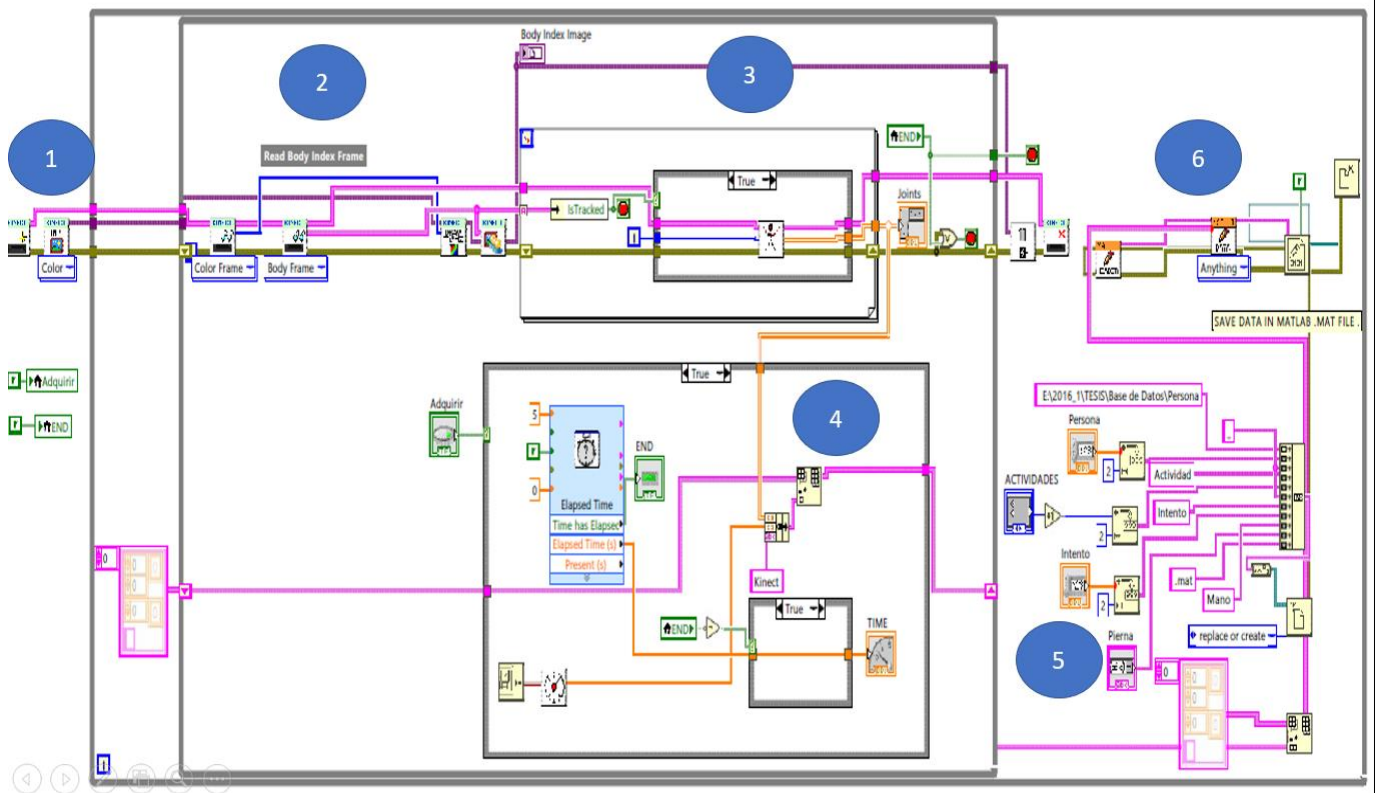


Figura 17. Diagrama de bloques funcionales de LabVIEW para interfaz gráfica.

En la figura 17 se plantea muestra el diagrama de bloques funcionales de la interfaz gráfica diseñada para el procedimiento de captura de datos y exportación de estos, a continuación, se describe la función de cada bloque:

**Bloque 1:** Inicializa la conexión con el equipo Kinect.

**Bloque 2:** Crea una imagen IMAQ para almacenar el marco de color y lee los marcos de color y cuerpo del Kinect.

**Bloque 3:** Convierte la salida de Kinect en una imagen IMAQ y extrae la información esquelética de las articulaciones.

**Bloque 4:** Realiza la gestión de los tiempos de ejecución de ejercicios.

**Bloque 5:** Realiza la gestión de número de intentos, persona a capturar, selección de actividad y pierna (panel de control del usuario).

**Bloque 6:** Realiza la exportación de las muestras tomadas durante el tiempo de ejecución de cada ejercicio a un archivo (.MAT), en la ruta especificada por el usuario, por cada persona e intento genera un archivo único.

La interfaz gráfica contiene:

- Selección de actividad, es decir el ejercicio a evaluar.
- Número de persona para guardar datos de ejercicios.
- Numero de intento (los ejercicios de deben realizar varias veces por una misma persona)
- Selección de pierna (en este caso solo pierna derecha).
- Indicador del tiempo disponible para la ejecución del movimiento, en este caso se establecieron 5 segundos para realizar la ejecución del movimiento completo.
- Indica en pantalla la imagen actual y descripción de articulaciones captadas.

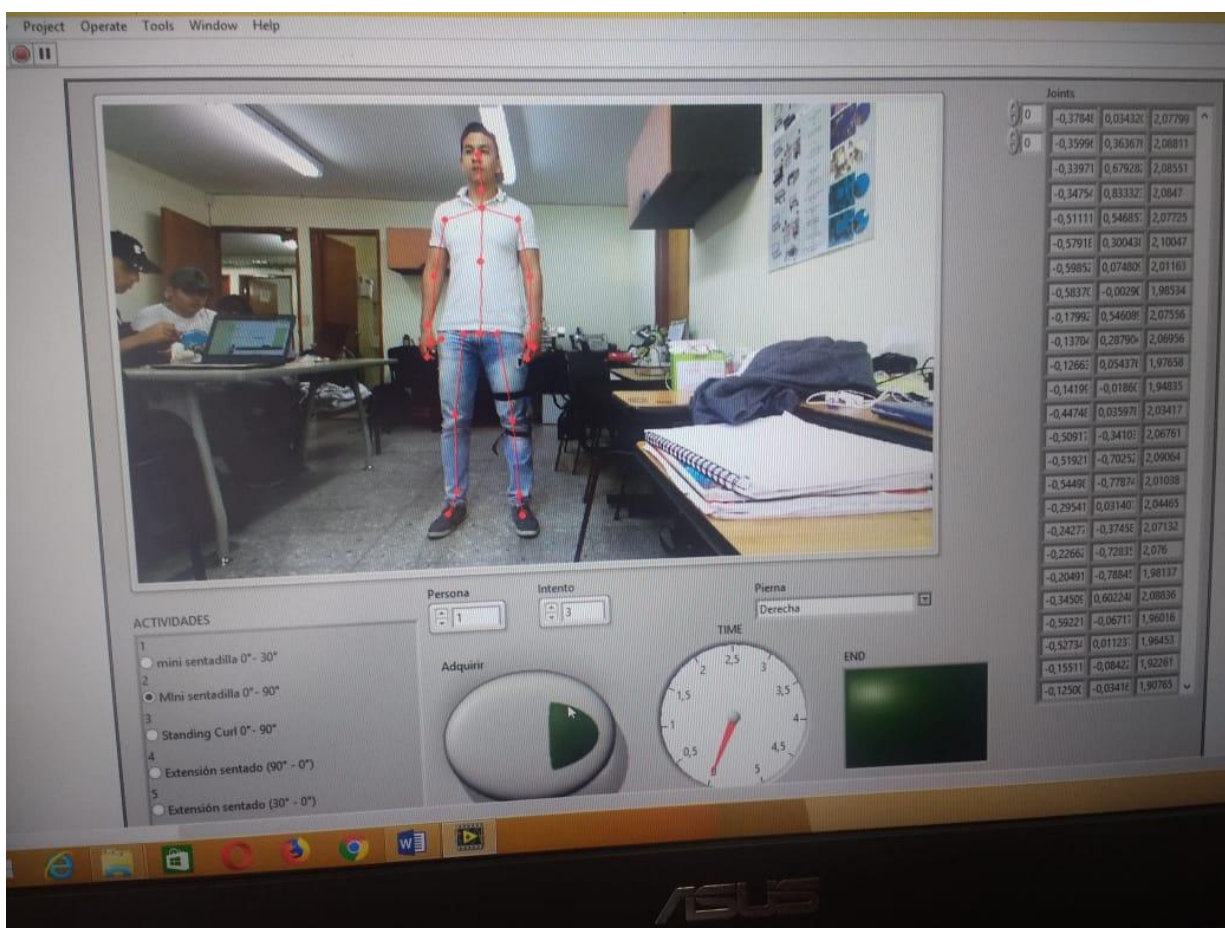


Figura 18. Interfaz gráfica de captura de datos Labview.

#### **4.2.4. PROCEDIMIENTO DE CAPTURA DE MOVIMIENTOS.**

Se invita previamente a las personas mediante formato (Anexo A), y en caso de aceptar o desistir diligencian el formato encontrado en el Anexo B.

Para el proceso de recolección de muestras de ejercicios se establecen procedimientos estándar para garantizar que los colaboradores realizarán de forma correcta los ejercicios planteados, por cada ejercicio se establece un procedimiento y se explica con claridad antes de la ejecución de cada uno.

Para la grabación de esta base de datos se toman como muestra 13 personas, cada una realizará 4 intentos por ejercicio.

##### **4.2.4.1 SENTADILLA 0°- 30°:**

###### **Preparación:**

1. Se realiza posición del interruptor de límite de ángulo a posición 30° en el equipo de entrenamiento.
2. Se posiciona el equipo en la Pierna y pantorrilla de la persona cuidadosamente con la pierna en posición de 0°, garantizando una buena fijación del equipo.

###### **Movimiento:**

1. De pie con la espalda recta (Posición A).
2. Bajar lentamente manteniendo la espalda, durante la ejecución del movimiento las rodillas nunca deben sobrepasar la punta de los pies y además no deben abrirse ni juntarse flexionando las rodillas, parando a 30 grados (Posición B).
3. Subir lentamente hasta la posición 0° (Posición A) nuevamente.

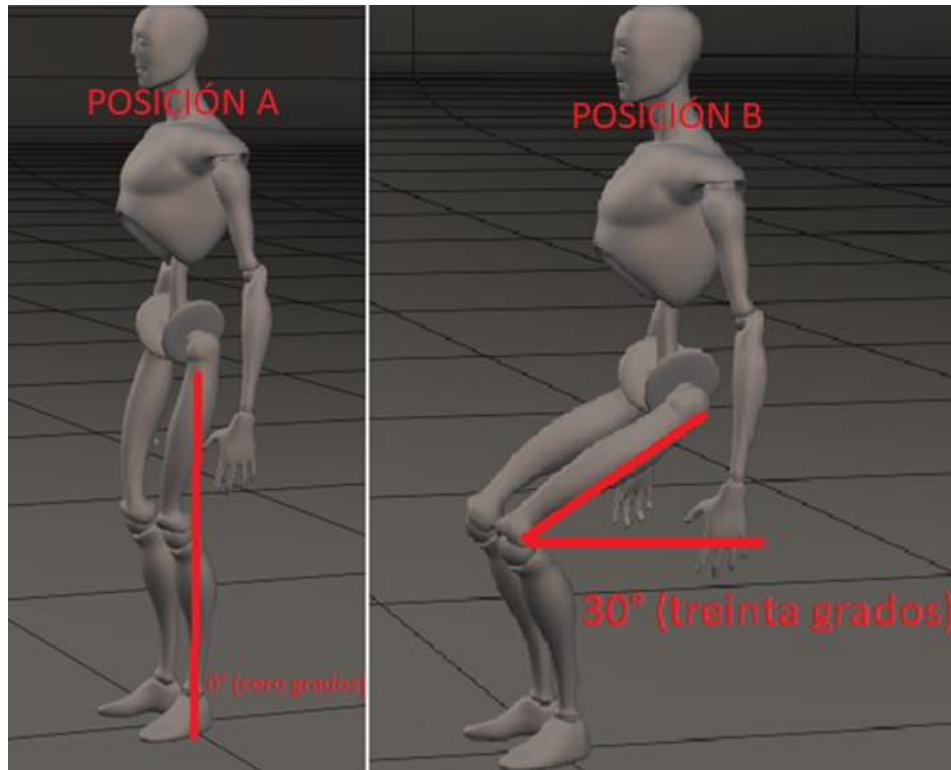


Figura 19. Procedimiento para sentadilla 30 grados.

#### 4.2.4.2 SENTADILLA 0° - 90°:

##### **Preparación:**

1. Se realiza posición del interruptor de límite de ángulo a posición 90° en el equipo de entrenamiento.
2. Se posiciona el equipo en la Pierna y pantorrilla de la persona cuidadosamente con la pierna en posición de 0°, garantizando una buena fijación del equipo.

##### **Movimiento:**

1. De pie con la espalda recta (Posición A).
2. Bajar lentamente manteniendo la espalda, durante la ejecución del movimiento las rodillas nunca deben sobrepasar la punta de los pies y además no deben abrirse ni juntarse flexionando las rodillas, parando a 90 grados (Posición B).
3. Subir lentamente hasta la posición 0° nuevamente.

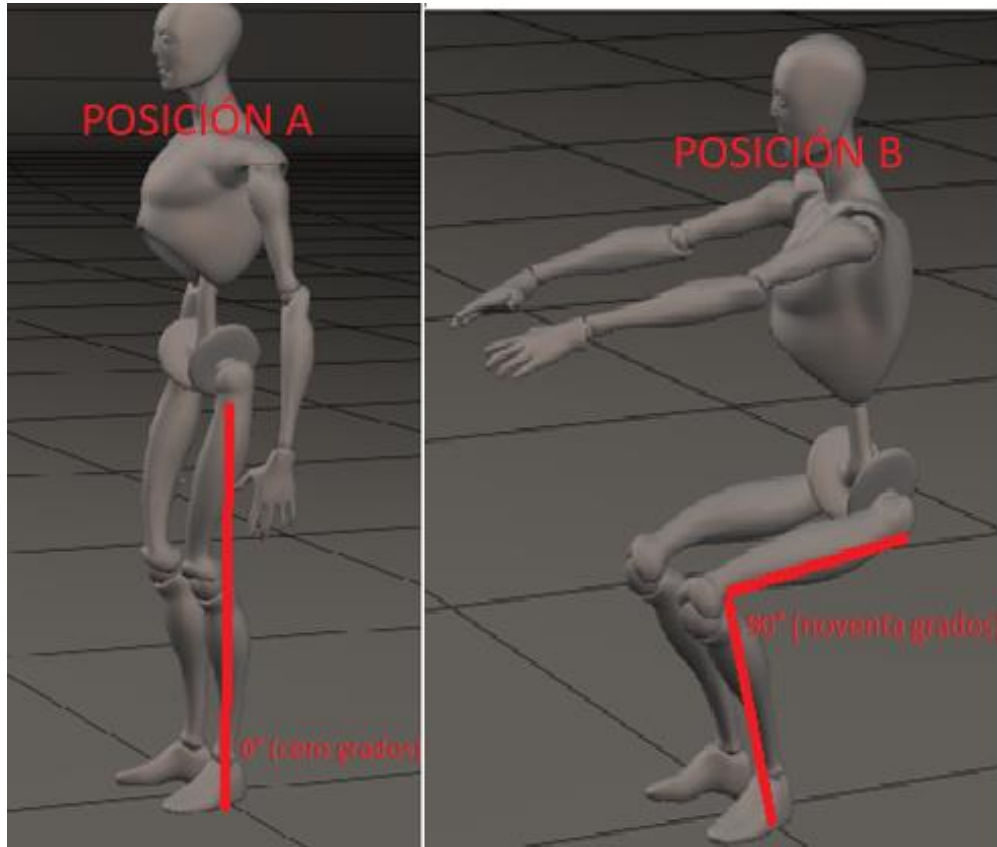


Figura 20. Procedimiento para sentadilla 90 grados.

#### 4.2.4.3. FLEXIÓN DE RODILLA DE PIE 0°-90°

##### **Preparación:**

1. Se realiza posición del interruptor de límite de ángulo a posición 90° en el equipo de entrenamiento.
2. Se posiciona el equipo en la Pierna y pantorrilla de la persona cuidadosamente con la pierna en posición de 0°, garantizando una buena fijación del equipo.

##### **Movimiento:**

1. De pie con la espalda recta sujetado a una silla en frente para mantener el equilibrio durante el ejercicio.
2. Flexione lentamente el pie y doble la rodilla como se ve en la figura # levantando el talón hacia los glúteos hasta llegar al tope de 90°.
3. baje lentamente hasta la posición 0° nuevamente.

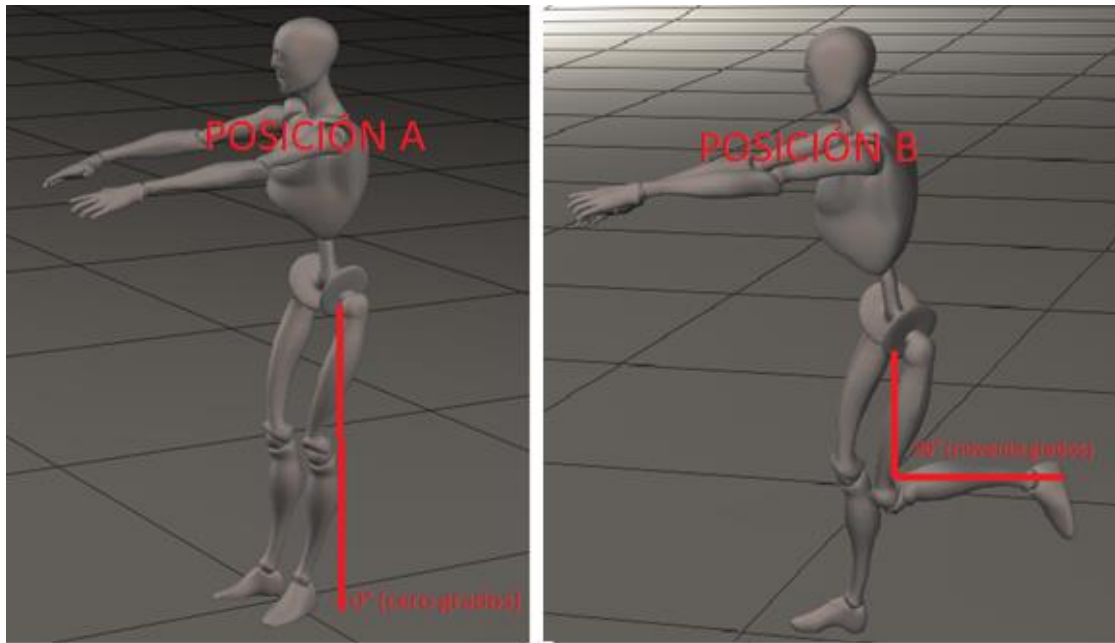


Figura 21. Procedimiento para flexión 90 grados.

#### 4.2.4.4. EXTENSIÓN DE RODILLA 90°-0°

##### **Preparación:**

1. Se realiza posición del interruptor de límite de ángulo a posición 90° en el equipo de entrenamiento.
2. Se posiciona el equipo en la Pierna y pantorrilla de la persona cuidadosamente con la pierna en posición de 90°, garantizando una buena fijación del equipo.

##### **Movimiento:**

1. De pie con la espalda recta sujetado a una silla en frente para mantener el equilibrio durante el ejercicio.
2. Sentado en una silla alta y con la espalda bien recta, estire la pierna hasta la horizontal con el pie hacia usted hasta llegar al tope de 0°.
3. extienda la pierna hasta la posición 90°.
4. Vuelva a la posición 0°.



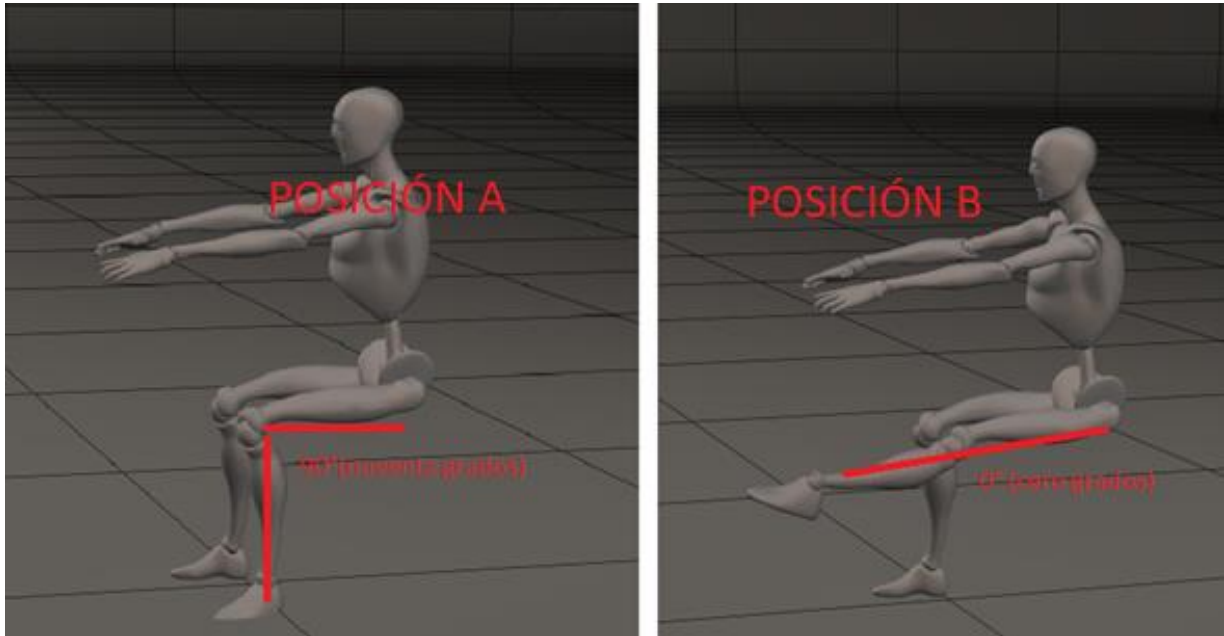


Figura 22. Procedimiento para extensión 90 grados.

#### 4.2.4.5. EXTENSIÓN DE RODILLA 30°-0°

##### **Preparación:**

1. Se realiza posición del interruptor de límite de ángulo a posición 30° en el equipo de entrenamiento.
2. Se posiciona el equipo en la Pierna y pantorrilla de la persona cuidadosamente con la pierna en posición de 30°, garantizando una buena fijación del equipo.

##### **Movimiento:**

1. De pie con la espalda recta sujetado a una silla en frente para mantener el equilibrio durante el ejercicio.
2. Sentado en una silla alta y con la espalda bien recta, estire la pierna hasta la horizontal con el pie hacia usted hasta llegar al tope de 0°.
3. baje lentamente hasta la posición 30° nuevamente.
4. vuelva nuevamente a la posición 0°.

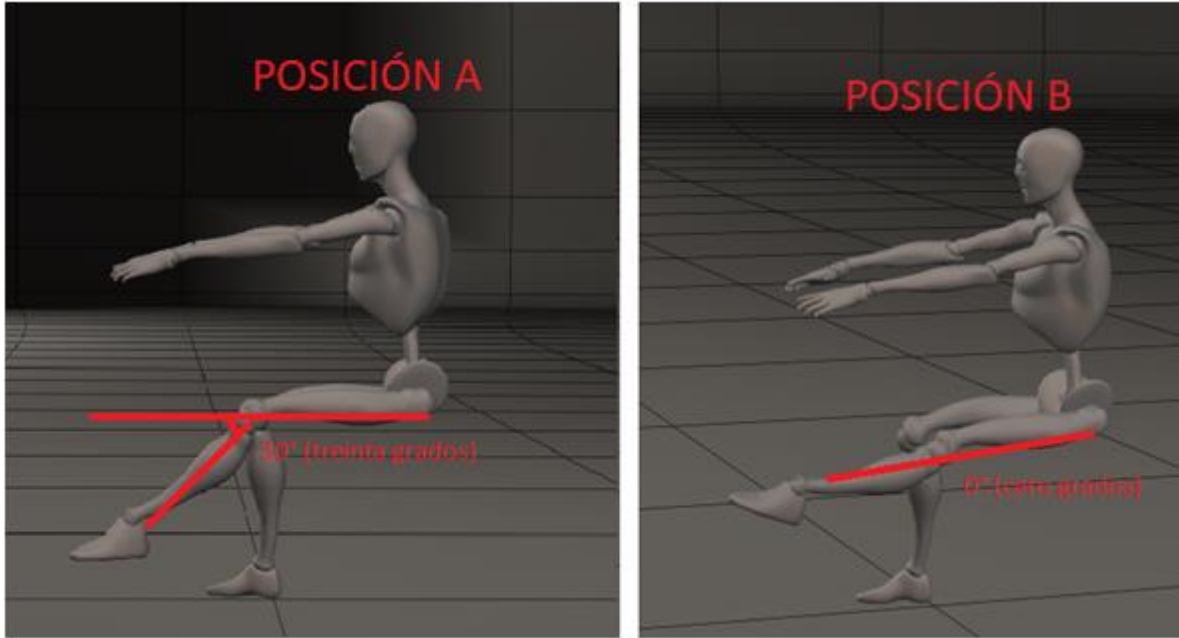


Figura 23. Procedimiento para extensión 30 grados.

### 4.3. CÁLCULO DE ÁNGULOS.

Hasta este punto ya se cuenta con la adquisición de 52 muestras por cada ejercicio como se observa en la tabla 2.

persona	INTENTOS POR EJERCICIO				
	SENTADILLA 30°	SENTADILLA 90°	EXTENSIÓN 30°	EXTENSIÓN 90°	FLEXIÓN 90°
1	4	4	4	4	4
2	4	4	4	4	4
3	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4
5	4	4	4	4	4
6	4	4	4	4	4
7	4	4	4	4	4
8	4	4	4	4	4
9	4	4	4	4	4
10	4	4	4	4	4
11	4	4	4	4	4
12	4	4	4	4	4
13	4	4	4	4	4
<b>Total muestras</b>	52	52	52	52	52

Tabla 2. Resumen de muestras obtenidas.

Cada intento ejecutado por una Persona se registra en un archivo (.mat) el cual contiene los valores de las coordenadas XYZ por cada punto de articulación, para el proceso de captura de datos de cada persona se tienen las siguientes condiciones para la interfaz de captura.

**Tiempo total de muestreo:** 5 segundos.

**Frecuencia de Muestreo:** 13 Muestras/Segundo.

Lo cual establece un máximo de muestras por persona de 69.

Se hace uso del software MATLAB para hacer el análisis de las coordenadas obtenidas y poder calcular los ángulos de interés para este proyecto.

Se diseña un código que extrae las coordenadas de los archivos (.mat) que entrega LABVIEW, al generar conexión entre los puntos e identificar cada coordenada se obtiene representaciones como las de la figura 18 por cada intento realizado.

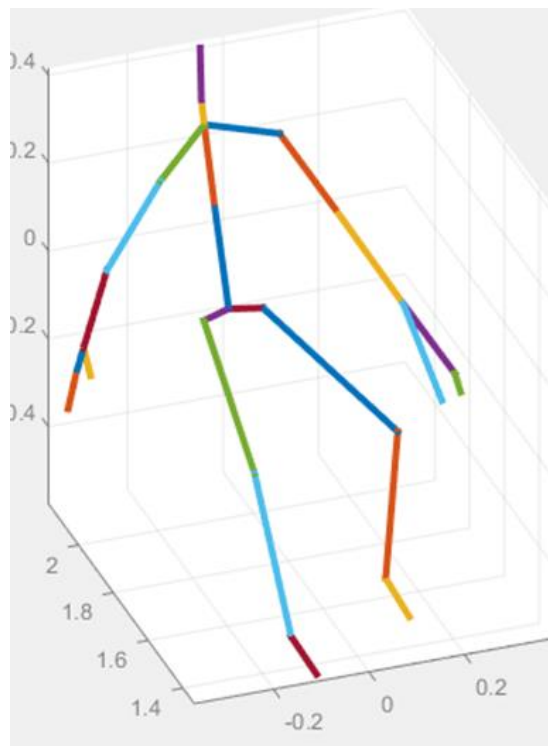


Figura 24. Representación de coordenadas en 3D interconectadas.

Para el cálculo de los ángulos, como se aclaró en la sección 4.1.2 (figura 18) se realiza el cálculo de los ángulos con base a estas articulaciones: 16, 17 y 18.

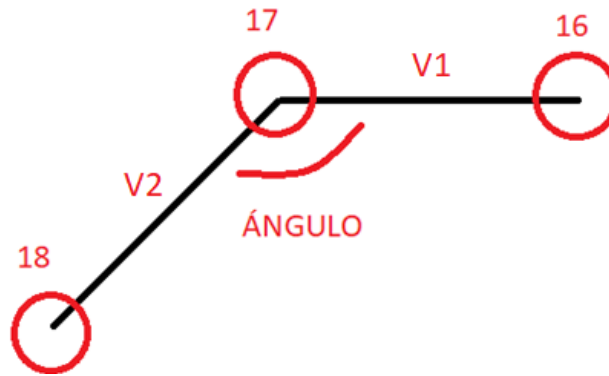


Figura 25. Vectores requeridos para cálculo de ángulos.

Se describen a continuación las ecuaciones para obtener los vectores y posteriormente los ángulos a estudiar, partiendo del hecho de que cada articulación contiene coordenadas en las tres dimensiones (x y z).

**1. Calcular vectores:**

Cálculo de vector V1:

$$V1 = ((17x - 16x), (17y - 16y), (17z - 16z))$$

$$V1 = (V1x, V1y, V1z) \quad (3)$$

Cálculo de vector V2:

$$V2 = ((18x - 17x), (18y - 17y), (18z - 17z))$$

$$V2 = (V2x, V2y, V2z) \quad (4)$$

## 2. Calcular magnitud de vectores.

Inicialmente se realiza el cálculo de la magnitud de cada vector hallado con la siguiente ecuación:

$$|Vn| = \sqrt{Vnx^2 + Vny^2 + Vnz^2} \quad \text{Donde } n = (1,2) \quad (5)$$

Cuando se tiene la magnitud de ambos vectores, se obtienen los vectores unitarios usando:

$$Un = \frac{Vn}{|Vn|} \quad \text{Donde } n = (1,2) \quad (6)$$

## 3. Calcular Producto punto.

Se calcula el producto punto o escalar entre vectores con la ecuación (7):

$$V1 \cdot V2 = (V1x * V2x + V1y * V2y + V1z * V2z). \quad (7)$$

## 4. Cálculo de ángulo.

Finalmente se puede proceder a calcular los ángulos con la ecuación 8.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{V1 \cdot V2}{|V1| * |V2|}\right) \quad (8)$$

Todos estos cálculos son realizados en ciclos iterativos recorriendo cada vector de muestras (por cada intento realizado).

### 4.3.1. RESULTADOS DE ÁNGULOS.

Luego de realizar la extracción y cálculos de los ángulos por cada intento realizado, se procede a realizar la gráfica de los resultados obtenidos.

A continuación, se presentan los resultados generales obtenidos para cada ejercicio, cada gráfica está definida ángulo contra porcentaje de ejecución del ejercicio, adicional se implementa un filtro de media móvil en Matlab [25], debido a que se presentaron algunas

respuestas angulares con altas variaciones y este filtro permite suavizar la señal y mantener la forma promedio de la respuesta a analizar.

#### 4.3.1.1. EXTENSIÓN 90 GRADOS:

Para determinar cuáles son los rangos más probables de movimiento los que una persona sana puede llegar se obtienen la media y desviación estándar, donde se observa en la figura que se llega hasta un valor máximo y mínimo de acuerdo al ejercicio a evaluar.

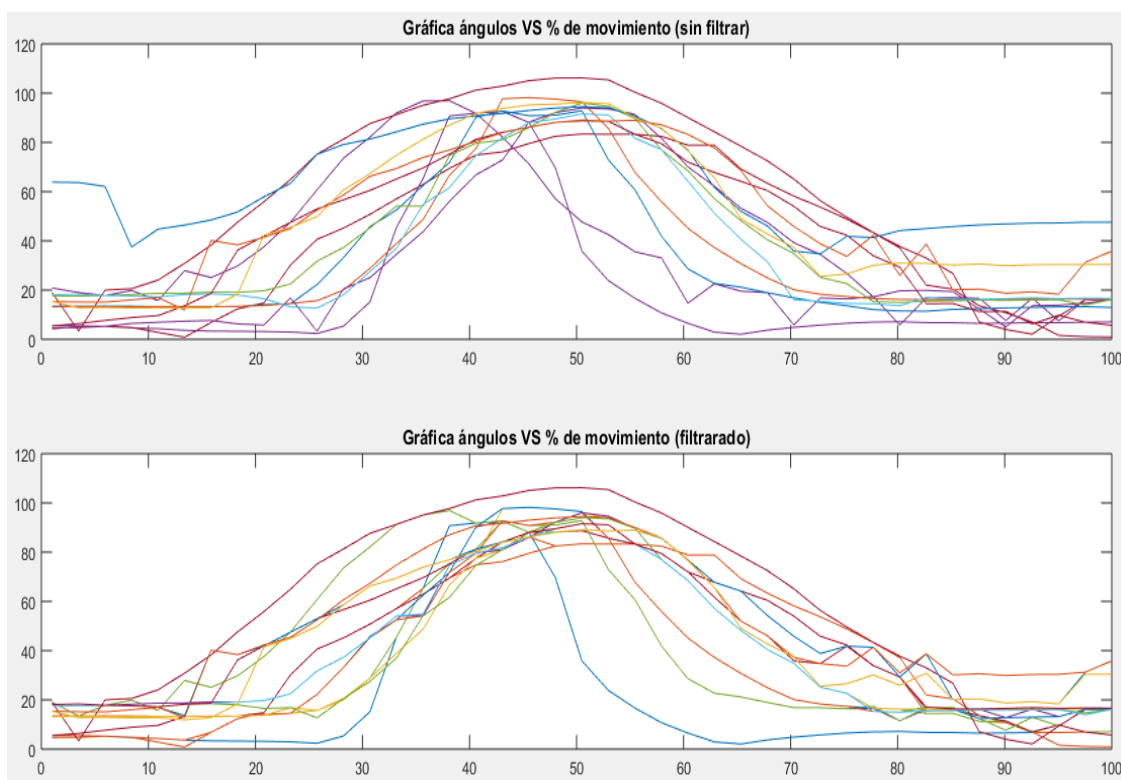


Figura 26. Grafica de ángulos obtenidos para extensión 90°

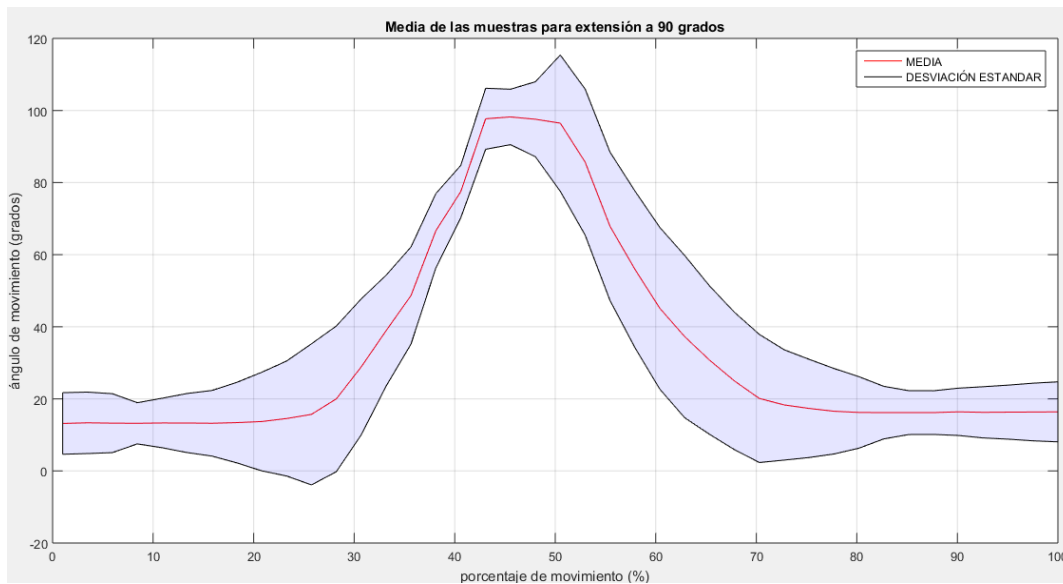


Figura 27. Gráfica de desviación estándar para extensión 90°.

En este caso, se obtienen los siguientes datos:

**Ángulo medio máximo:**

98.21°.

**Desviación estándar media:**

(+/-) 15 grados del Valor medio.

#### 4.3.1.2. SENTADILLA A 90 GRADOS:

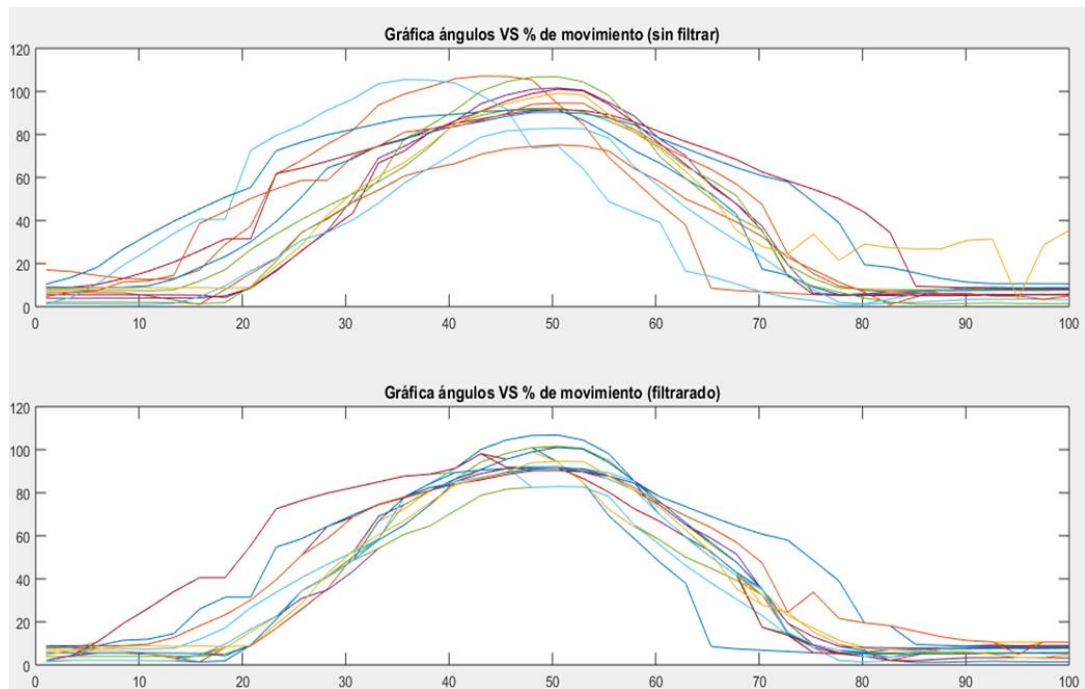


Figura 28. Grafica de ángulos obtenidos para sentadilla 90°.

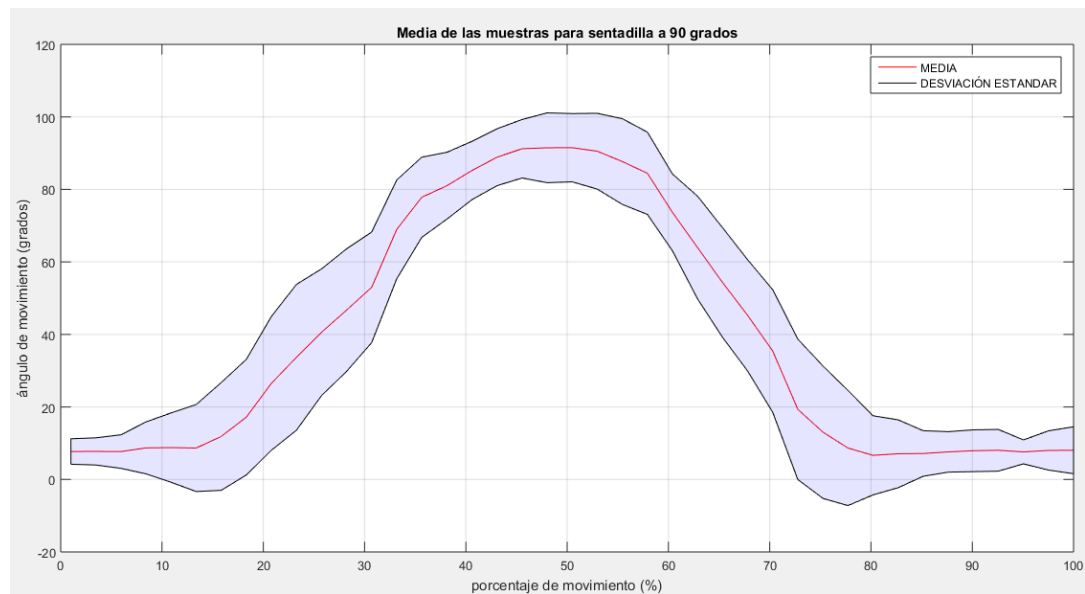


Figura 29. Gráfica de desviación estándar para sentadilla 90°.

Para este ejercicio se obtiene:

**Ángulo medio máximo:**

91.5°.

**Desviación estándar media(grados):**



(+/-) 10,59°.

#### 4.3.1.3. FLEXIÓN DE PIE 90 GRADOS:

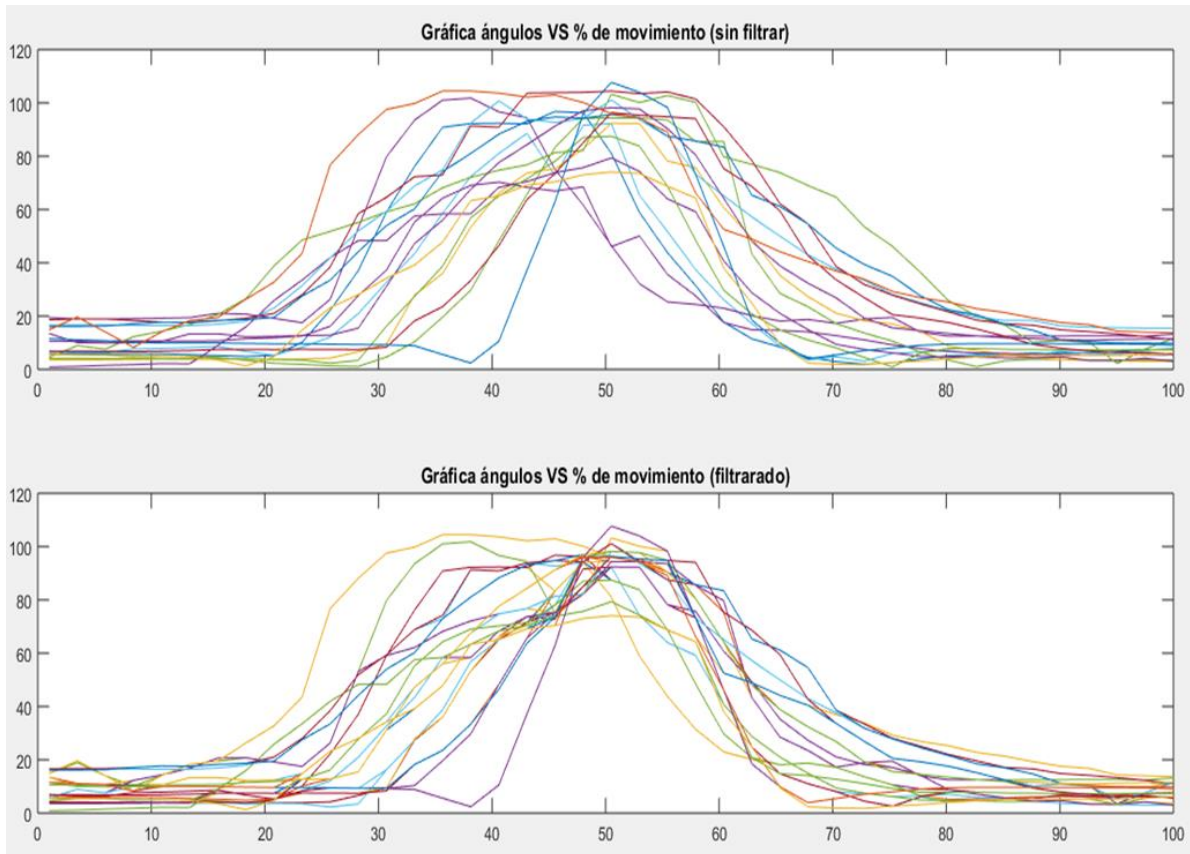


Figura 30. Grafica de ángulos obtenidos para flexión 90°.

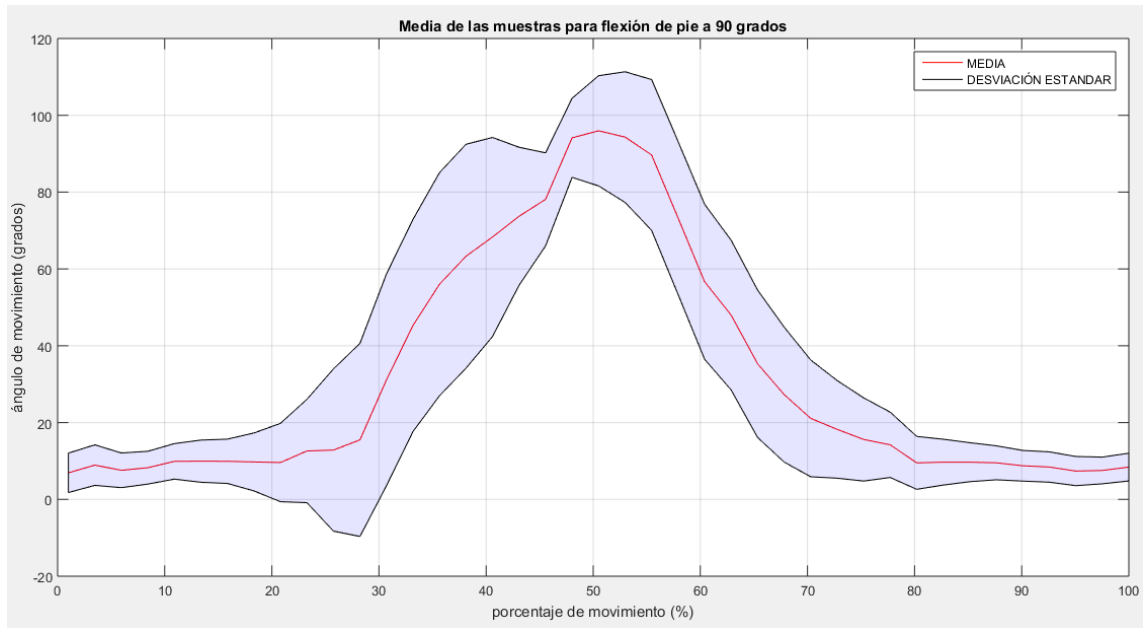


Figura 31. Gráfica de desviación estándar para flexión 90°.

Para este ejercicio se obtiene:

**Ángulo medio máximo:**

95.96°.

**Desviación estándar media (grados):**

(+/-) 10,82°.

#### 4.3.1.4. EXTENSIÓN 30 GRADOS:

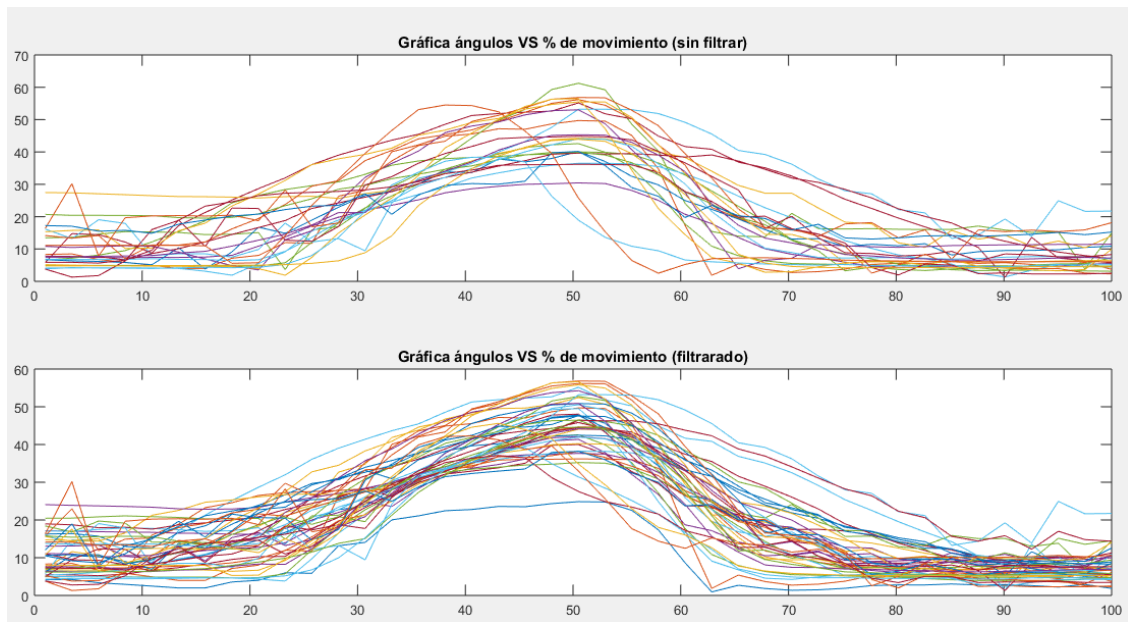


Figura 32. Gráfica de ángulos obtenidos para extensión 30°.

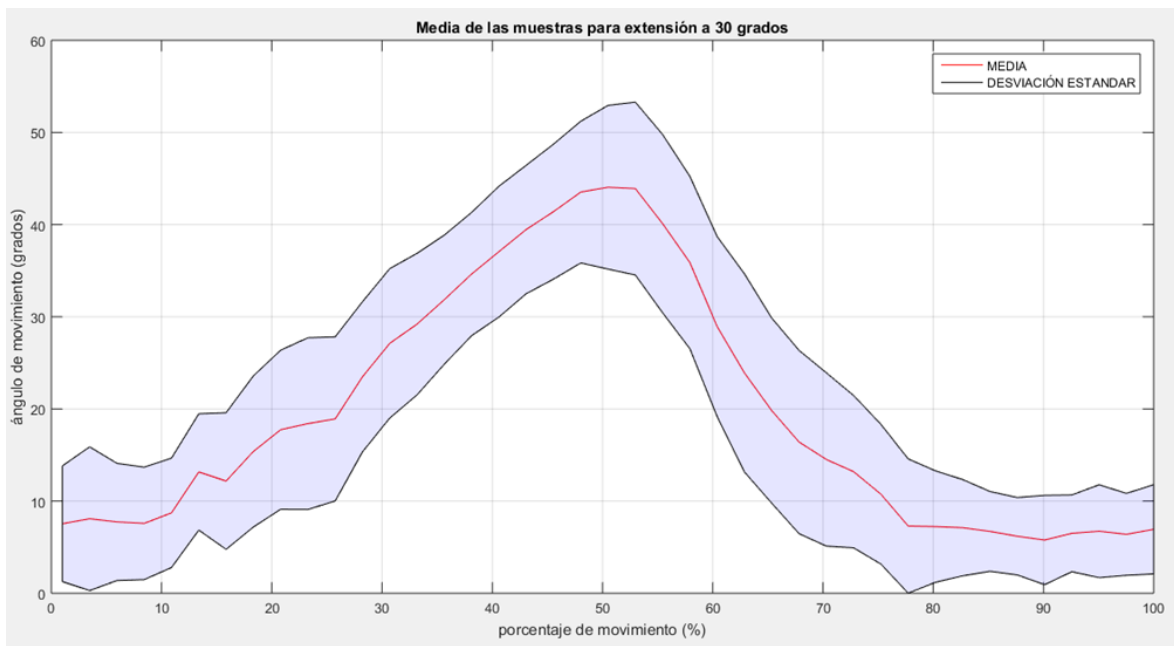


Figura 33. Gráfica de desviación estándar para extensión 30°.

Para este ejercicio se obtiene:

**Ángulo medio máximo:**

44.05°.

**Desviación estándar media (grados):**

(+/-) 7,41°.

#### 4.3.1.5. SENTADILLA 30 GRADOS:

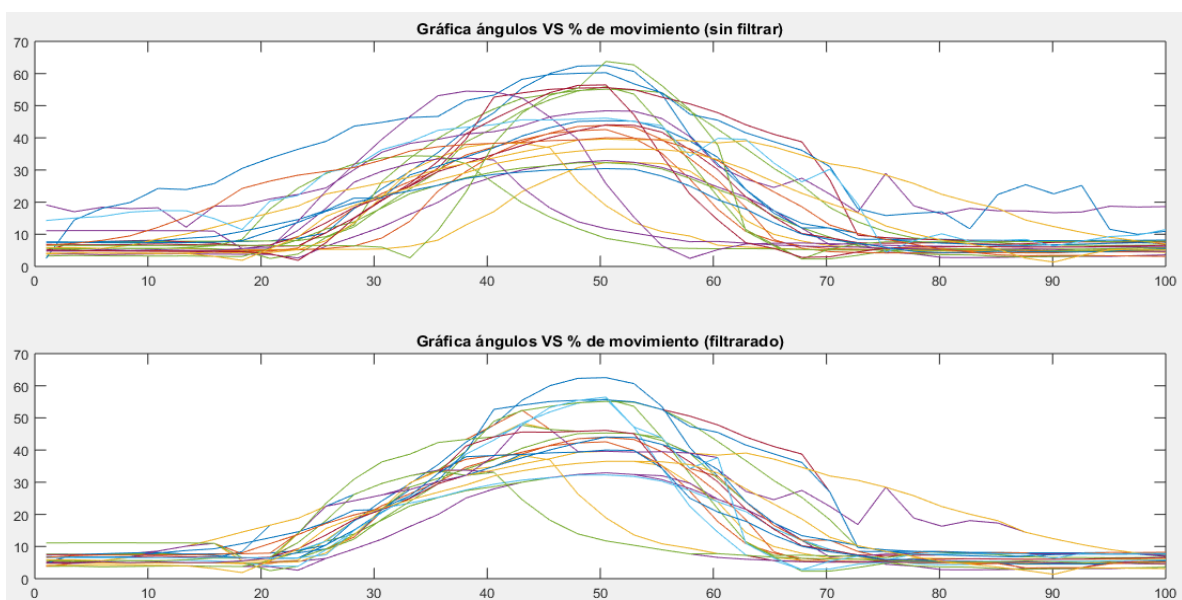


Figura 34. Grafica de ángulos obtenidos para sentadilla 30°.

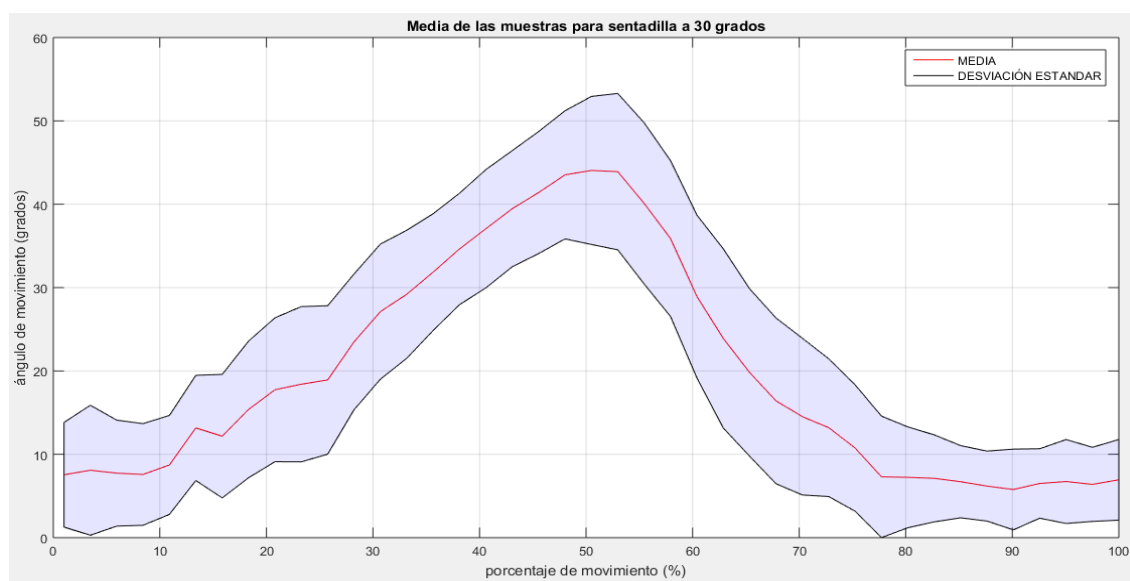


Figura 34. Gráfica de desviación estándar para sentadilla 30°.

Para este ejercicio se obtiene:

**Ángulo medio máximo:**

41.29°.

**Desviación estándar media (grados):**

(+/-) 7,18°.

A modo de resumen de los datos obtenidos al analizar las desviaciones y promedios se presenta la Tabla 3.

Ejercicio	Ángulo máximo de referencia	Ángulo medio máximo obtenido	Desviación estándar media (+/-) (grados)
Extensión 90°	90°	98,21°	15°
Sentadilla 90°	90°	91,5 °	10,59°
Flexión de pie 90°	90°	95,96°	10,82°
Extensión 30°	30°	44,05°	7,41°
Sentadilla 30°	30°	41,29°	7,18°

Tabla 3. Resumen rangos probables de normalidad de movimiento en personas sanas medidos con Kinect 2.

**5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

- De acuerdo a la revisión y análisis bibliográfico realizado, se definieron ejercicios de movilidad controlada que son de fácil ejecución para efectos de entrenamiento de la base de datos, se evidencia que las personas no tuvieron mayor dificultad al momento de realizar el ejercicio y pueden ser un referente de evaluación de movilidad en pacientes en recuperación.
- Realizando análisis de los resultados obtenidos contra lo esperado de acuerdo a los ángulos definidos para el entrenamiento, se puede evidenciar que este método se considera efectivo al momento de validar el movimiento de miembro inferior, ya que se encuentran tolerancias angulares no mayores a 15 grados como se puede evidenciar en la tabla 3.

- Se realizó de esta forma con el fin de que realizar comparaciones cuantitativas del proceso de recuperación de un paciente en el tiempo y no sólo dejarlo de forma cualitativa, ya que se permite mirar el tiempo de ejecución y los rangos alcanzados en el proceso de recuperación del paciente, esto da pie para que se pueda analizar en etapas posteriores de recuperación como fortalecimiento de ligamentos, en los que se miden tiempos de ejecución de ejercicios con cargas progresivas.

## **6. CONCLUSIONES.**

- La base de datos creada en este proyecto con personas sanas, establece una referencia de método no invasivo para evaluación en fisioterapia de los rangos de normalidad de movimiento de miembro inferior en una persona.
- Se evidencia que las personas que colaboraron, no presentaron mayor dificultad para realizar el ejercicio, aunque muchas de ellas presentaron mala postura de la espalda, la cual debe mantener recta, se debe tener especial cuidado con esta postura, ya que afecta directamente la estabilidad de las rodillas al descender en el ejercicio y en personas con lesión de LCA puede afectar su recuperación.
- Al momento de realizar la gráfica de las respuestas angulares obtenidas de las personas, se evidenciaron cambios bruscos en la señal en puntos de extensión completa a 0 (cero) grados al inicio y al final del ejercicio, esto se debe a la pérdida de referencia de los puntos de articulación del Kinect en pequeños periodos de tiempo debido a los problemas de oclusión que este tiene, se realizó filtrado de la señal de salida para suavizar la respuesta sin afectar el comportamiento angular requerido.
- El Kinect y los procesos de adquisición de imágenes, se establecen como una herramienta de apoyo útil al momento de realizar ejercicios de fisioterapia, ya que permite evaluar con gran precisión los movimientos ejecutados por los pacientes.
- La necesidad de aplicar el filtro de media móvil para suavizar la respuesta de los ángulos obtenidos en la sección (4.3.1) se da debido a que en ejercicios como extensión a 30 y 90 grados se presenta fenómeno de oclusión entre puntos de articulación (ver figura 34), para lo cual fue necesario indicar a las personas a l momento de realizar esta actividad que separaran las piernas no máximo posible para evitar que se encontraran juntos los puntos de articulación de pierna derecha e izquierda, lo que plantea una limitante del Kinect al momento de requerir evaluar movimientos complejos en los que se pueden encontrar puntos de articulación juntos, como por ejemplo ejercicios aeróbicos complejos.



Figura 36. Fenómeno de oclusión en Kinect.

## **7. TRABAJO FUTURO.**

- La base de datos creada en este proyecto se ve como un referente para integración a sistemas de seguimiento y control en fisioterapia [21], pudiendo integrarse a estos sistemas como interfaz gráfica que indique de forma didáctica la correcta ejecución del ejercicio. Se espera que de esta forma pueda ser usada para evaluar rangos de normalidad en pacientes que se encuentren en etapa de recuperación post- quirúrgica de LCA.
- El Kinect puede llegar a ser comparado con sistemas MOCAP [26], evaluando su rango de precisión ante diferentes actividades y validando que limitaciones se tienen ante estas.

## **8. ANEXOS.**

### **8.1. ANEXO A.**

#### **CONSENTIMIENTO INFORMADO.**

Este consentimiento informado es para sujetos a quienes se les va a pedir participación en el proyecto de investigación “DETERMINAR RANGOS DE NORMALIDAD EN

## MOVIMIENTOS DE MIEMBRO INFERIOR UTILIZANDO EL KINECT 2 PARA EJERCICIOS DE REHABILITACIÓN DE RECONSTRUCCIÓN DE LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR”

Los profesionales que conforman el grupo de investigadores son:

Israel Ricardo Carreño Londoño, Estudiante de ingeniería electrónica.

Andrés Felipe Calvo Salcedo, MSc

Leidy Esperanza Pamplona Beron, MSc(c)

### INFORMACIÓN

Yo Israel Ricardo Carreño Londoño, Le voy a brindar la información suficiente para invitarlo a que participe en el proceso de adquisición de datos para una base de datos de movimientos de miembro inferior mediante Kinect 2, No tiene que decidir hoy si está de acuerdo o no en hacer parte de esta investigación.

Si encuentra alguna pregunta o palabra que no entienda por favor pídamelo, y tomaré tiempo para explicárselas.

Usted ha sido elegido para participar en esta investigación porque es importante para ello.

Si usted acepta hacer parte de esta investigación, el proceso que se realizará será LA EVALUACION DE LA MOVILIDAD COMPUTARIZADA DE MIEMBRO INFERIOR DERECHO. Esto quiere decir que se REALIZARA MOVIMIENTOS SENCILLOS DE LAS EXTREMIDADES INFERIORES Y SE REALIZARÁ EL REGISTO DE LOS MISMOS POR MEDIO DEL KINECT 2 PARA LA DETECCIÓN DE MOVIMIENTO.

No se corre riesgos en la realización de estos procedimientos.

Su decisión de participar en este estudio es completamente voluntaria, si usted elige no participar, todos los servicios que la institución le presta no cambiarán. Usted puede cambiar su decisión más tarde y dejar de participar, aun cuando haya aceptado previamente, esto no afectará los servicios que el instituto le preste.

Si usted acepta participar en esta investigación, podrá aportar información que posiblemente beneficiará en un futuro a las personas en proceso de recuperación Post quirúrgica de Ligamento Cruzado anterior, ya que nos permitirá encontrar patrones para EVALUAR LA MOVILIDAD NORMAL DE MIEMBRO INFERIOR EN PERSONAS SANAS, ES DECIR QUE NO HAN TENIDO, NI ESTÁN EN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LESIONES DE RODILLA, ESPECÍFICAMENTE LCA (LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR).



La información que recolectamos para este proyecto se mantendrá confidencial, esta será aislada y solo los investigadores podrán verla. Cualquier información recolectada se le asignará un número de identificación en lugar de su nombre. Solamente los investigadores sabrán el vínculo de ese número con el nombre y la información se mantendrá en total reserva. No se compartirá la información ni se le dará a nadie excepto al personal que hace parte de la investigación, quienes son:

Israel Ricardo Carreño Londoño, Estudiante de ingeniería electrónica.  
Andrés Felipe Calvo Salcedo, MSc  
Leidy Esperanza Pamplona Beron, MSc(c)

El conocimiento obtenido de este estudio se compartirá con usted antes de que se haga ampliamente disponible al público. No se compartirá información confidencial. Habrá encuentros académicos donde se divulguen los resultados y luego se publicarán para que otras personas interesadas aprendan de nuestra investigación.

Si usted tiene alguna pregunta puede hacerla ahora e incluso después de que haya terminado la entrevista, si desea hacer preguntas más tarde puede contactar a la siguiente persona:

Nombre: Israel Ricardo Carreño Londoño  
Cargo: Estudiante de ingeniería electrónica  
Institución: Universidad tecnológica de Pereira  
Teléfono: 3114729391 - 3168755716  
e-mail: Israel\_carre@utp.edu.co

## **8.2. ANEXO B.**

### **FORMULARIO DE CONSENTIMIENTO/ DISENTIMIENTO**

Yo, \_\_\_\_\_ identificado con la cédula No. \_\_\_\_\_, en pleno uso de mis facultades mentales, manifiesto:

1. Que he sido invitado a participar en una investigación sobre “EVALUACION DE RANGOS DE NORMALIDAD DE MIEMBRO INFERIOR”
2. Que he sido ampliamente informado el proyecto de investigación.
3. Que se me han explicado ampliamente los riesgos generales del procedimiento que son: ninguno en este caso. Además, entiendo que existen riesgos de imposible o difícil previsión, los cuales por esta razón no pueden ser advertidos y en consecuencia declaro expresamente que los acepto.

4. Se me han explicado ampliamente el procedimiento (análisis de movimiento),
5. Autorizo la toma de fotografías y/o filmación de algunas partes de mi cuerpo antes, los cuales pueden ser posteriormente presentados en eventos médico-científicos y/o publicados en revistas o libros especializados con fines científicos y académicos, advirtiéndome que en ningún caso seré identificado por mi nombre en los mencionados eventos y/o publicaciones.
6. Soy consciente de que puede que no haya un beneficio personal y que no seré compensado económicamente por mi participación en la investigación, entiendo que este proceso puede ser susceptible a patentes y entiendo que no obtendré un beneficio económico en el futuro si este se convierte en un producto comercial. Se me ha proporcionado el nombre de un investigador que puede ser contactado fácilmente usando el número que se me dio.

Yo he leído la información proporcionada, o me ha sido leída. Yo he tenido la oportunidad de hacer preguntas y se me ha respondido satisfactoriamente.

Por lo anterior:

Consiento (  ) voluntariamente participar en la investigación “DETERMINAR RANGOS DE NORMALIDAD EN MOVIMIENTOS DE MIEMBRO INFERIOR UTILIZANDO EL KINECT 2 PARA EJERCICIOS DE REHABILITACIÓN DE RECONSTRUCCIÓN DE LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR” y entiendo que tengo el derecho de retirarme del estudio en cualquier momento sin que afecte de ninguna forma la atención médica que me proporciona

No consiento (  ) participar en la investigación “DETERMINAR RANGOS DE NORMALIDAD EN MOVIMIENTOS DE MIEMBRO INFERIOR UTILIZANDO EL KINECT 2 PARA EJERCICIOS DE REHABILITACIÓN DE RECONSTRUCCIÓN DE LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR”

Nombre del participante: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Nombre del investigador: Israel Ricardo Carreño Londoño

Fecha: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Nombre del testigo: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Se ha proporcionado una copia de este documento de Consentimiento Informado al participante \_\_\_\_\_

## 9. BIBLIOGRAFÍA

[1] fayerwayer. (2017). *FayerWayer*. [online] Available at: <https://www.fayerwayer.com/2013/02/thalamic-labs-myoe-un-brazaletes-para-controlar-gadgets-a-traves-del-movimiento/>. [Accessed 02 Jul 2017].

[2] Martínez-Miguel, A., Vargas-Pérez, S. A., Gómez-Merlín, E., Arias-Montiel, M., Lugo-González, E., & Miranda-Luna, R. Control de Movimiento de una Mano Robótica Mediante Señales Electromiográficas/. [Accessed 02 Jul 2017].

[3] De la Rosa Steinz, R., & Liptak, L. (2002). Entrenador mioeléctrico de prótesis para amputados de brazo y mano. *Mapfre Medicina*, /. [Accessed 02 Jul 2017].

[4] Autónomos, S. (2017). *Electro estimulación en lesiones de rodilla*. [online] Sanitas. Available at: <http://www.sanitas.es/sanitas/seguros/es/particulares/biblioteca-de-salud/Lesiones/prevencion-recuperacion/electroestimulacion-rodilla.html>. /. [Accessed 02 Jul 2017].

[5] Autónomos, S. (2017). *Electroestimulación en lesiones de rodilla*. [online] Sanitas. Available at: <http://www.sanitas.es/sanitas/seguros/es/particulares/biblioteca-de-salud/Lesiones/prevencion-recuperacion/electroestimulacion-rodilla.html>. /. [Accessed 02 jul 2017].

[6] Efdeportes.com. (2017). *Lecturas: Educación física y Deportes, Revista Digital*. [online] Available at: <http://www.efdeportes.com/efd15/lesion.htm> /. [Accessed 08 Jul 2017].

[7] Matas, R. B. (2004). Patología muscular en el deporte: diagnóstico, tratamiento y recuperación funcional. *Masson*.

[8] Berdejo, D., Sánchez, S., González, M., & Jiménez, F. (2007). Protocolo de recuperación funcional de una lesión ligamentosa de rodilla en baloncesto. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 28, 319-329. [Accessed 08 Jul 2017].

[9] Journals.sagepub.com. (2017). The biomechanics of anterior cruciate ligament rehabilitation and reconstruction *The American Journal of Sports Medicine* - Steven W. Arms, Malcolm H. Pope, Robert J. Johnson, Richard A. Fischer, Inga Arvidsson, Einar Eriksson, 1984. [online] Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/036354658401200102> [Accessed 3 Jul. 2017].

[10] Journals.sagepub.com. (2017). Knee rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction and repair *The American Journal of Sports Medicine* - Lonnie Paulos, Frank R. Noyes, Edward Grood, David L. Butler, 1981. [online] Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/036354658100900303> [Accessed 3 Jul. 2017].

[11] Grood, E. S., et al. "Biomechanics of the knee-extension exercise. Effect of cutting the." J. Bone Joint Surg. Am 66 (1984): 725-734.

[12] Crain, Evan H., et al. "Variation in anterior cruciate ligament scar pattern: does the scar pattern affect anterior laxity in anterior cruciate ligament-deficient knees?." Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery 21.1 (2005): [Accessed 08 Jul 2017].

[13] Kinectfordevelopers.com. (2018). Características Kinect 2 | Kinect for Developers. [online] Available at: <http://www.kinectfordevelopers.com/es/2014/01/28/caracteristicas-kinect-2/> [Accessed 2 Jun. 2018].

[14] (LCA), L. (2018). Lesión del ligamento cruzado anterior (LCA): MedlinePlus. [online] Medlineplus.gov. Available at: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/001074.htm> [Accessed 2 Jun. 2018].

[15] Kinectfordevelopers.com. (2018). Características Kinect 2 | Kinect for Developers. [online] Available at: <http://www.kinectfordevelopers.com/es/2014/01/28/caracteristicas-kinect-2/> [Accessed 2 Jun. 2018].

[16] Barber-Westin, S. D., & Noyes, F. R. (1993). The effect of rehabilitation and return to activity on anterior-posterior knee displacements after anterior cruciate ligament reconstruction. Am J Sports Med, 21(2), 264-270. [Accessed 2 Jun. 2018].

[17] Rehabilitación del paciente con lesión del ligamento cruzado anterior de la rodilla (LCA). Revisión. Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte vol. 8 (29) pp. 62-92 [Http://cdeporte.rediris.es/revista/revista29/artLCA66.htm](http://cdeporte.rediris.es/revista/revista29/artLCA66.htm). [Accessed 2 Jun. 2018].

[18] Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction using patellar tendon or hamstring grafts Open and closed kinetic chain exercises. (n.d.). 2007-03-23: Institutionen för molekylär medicin och kirurgi / Department of Molecular Medicine and Surgery. [Accessed 2 Jun. 2018].

[19] Monitoring of the Human Motor Functions Rehabilitation by Neural Networks Based System with Kinect Sensor - Sven Nomm Kirill Buhhalko (Institute of Cybernetics at Tallinn University of Technology, Akadeemia tee 21, 12618, Tallinn, Estonia (e-mail: [sven@cc.ioc.ee](mailto:sven@cc.ioc.ee)).

[20] Towards Pervasive Physical Rehabilitation Using Microsoft Kinect - Chien-Yen Chang<sup>1</sup>, Belinda Lange, Mi Zhang, Sebastian Koenig, Phil Requejo, Noom Somboon, Alexander A. Sawchuk<sup>2</sup>, and Albert A. Rizzo (Institute for Creative Technologies, University of Southern California, Playa Vista, CA). [Accessed 02 may. 2018].

[21] Rehabilitation using Kinect-based Games and Virtual Reality - Miguel Pedraza-Huesoa\*, Sergio Martín-Calzóna, Francisco Javier Díaz-Pernasa, Mario Martínez-Zarzuelaa (aDepartment of Signal Theory, Communications and Telematics Engineering of the University of Valladolid, Spain). [Accessed 02 may. 2018].

[22] Andrews, J. (2012). Physical rehabilitation of the injured athlete. Philadelphia, PA: ElsevierSaunders. [Accessed 02 may. 2018].

**[23]** La.mathworks.com. (2018). 1-D median filtering - MATLAB medfilt1- MathWorks America Latina. [online] Available at: <https://la.mathworks.com/help/signal/ref/medfilt1.html> [Accessed 2 Jun. 2018].

**[24]** Militarydisabilitymadeeasy.com. (2018). Military Disability Ratings for Knee and Lower Leg Conditions. [online] Available at: <http://www.militarydisabilitymadeeasy.com/kneeandleg.html> [Accessed 2 Jun. 2018].

**[25]** umus.edu.uy. (2018). [online] Available at: <https://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza/electivas/dsp/presentaciones/clase10.pdf> [Accessed 18 Jun. 2018].

**[26]** Sistemas Mocap 3D. (2018). Que es Mocap?. [online] Available at: <https://mocap3d.wordpress.com/2011/03/31/que-es-mocap/> [Accessed 18 Jun. 2018].

**[27]** Semantic scholar.org. (2018). Design, Control and Human Testing of an Active Knee Rehabilitation Orthotic Device - Semantic Scholar. [online] Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design%2C-Control-and-Human-Testing-of-an-Active-Knee-Weinberg-Nikitczuk/4ec23a7849711b51629ea5edee92d3fc5d93b1ee> [Accessed 02 may. 2018].

**[28]** Grood ES, e. (2018). Biomechanics of the knee-extension exercise. Effect of cutting the anterior cruciate ligament. - PubMed - NCBI. [online] Ncbi.nlm.nih.gov. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6725319> [Accessed 2 May 2018].