PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

ANÁLISIS DE MOVIMIENTO EN EL GESTO TÉCNICO DEL MALABARISMO PARA LA PREVENCIÓN O RECUPERACIÓN FÍSICA DE MIEMBROS SUPERIORES

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Biomédico

Autor:

Luis Gustavo Loja Mauricio

Asesor:

Dante Ángel Elías Giordano

Lima, agosto, 2024

Informe de Similitud

Yo, Dante Angel Elias Giordano, docente de la Facultad de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada ANÁLISIS DE MOVIMIENTO EN EL GESTO TÉCNICO DEL MALABARISMO PARA LA PREVENCIÓN O RECUPERACIÓN FÍSICA DE MIEMBROS SUPERIORES, del autor Luis Gustavo Loja Mauricio, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 16%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15/08/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 15 de agosto de 2024

Apellidos y nombres del asesor: Elias Giordano, Dante Angel	
DNI: 10142907	Firma
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5920-9608	

RESUMEN

El presente trabajo de tesis contiene el desarrollo de un diseño experimental y un protocolo para la obtención de rangos de movimiento en las articulaciones del hombro, codo y muñeca durante la ejecución del gesto técnico del malabarismo en cascada con tres pelotas. Asimismo, contiene una caracterización del gesto técnico del malabarismo y su respectivo análisis enfocado en obtener su potencial aplicación como actividad lúdica para la prevención o recuperación física de miembros superiores.

El procedimiento para la elaboración se clasifica en dos etapas. La primera consta de una revisión bibliográfica del estado del arte sobre el análisis de gestos técnicos deportivos e investigaciones relacionadas con el movimiento del malabarismo. De esta forma fue posible identificar las fases principales que componen al gesto técnico del malabarismo y describir cualitativamente los movimientos articulares realizados. Con ello se logró seleccionar las variables representativas para el estudio. Tomando esto en cuenta, se planteó un método para adquirir los datos cuantitativos necesarios.

Finalmente, haciendo uso de un diseño experimental, fue posible desarrollar un protocolo que garantizó la correcta captura de datos. De esta forma se logró obtener una caracterización el movimiento. Esto a su vez hizo posible el análisis del uso potencial del malabarismo dentro de la rehabilitación y/o prevención de lesiones en el miembro superior. Los resultados obtenidos contribuirán al conocimiento en el campo de la ingeniería biomédica y permitirán establecer comparaciones con otras terapias de rehabilitación y/o prevención de lesiones en el miembro superior, posibilitando así la aplicación del malabarismo como actividad lúdica en dicha área.

Dedico esta tesis a mi familia, en especial a mi madre Delia Elenice Mauricio Martinez, a mi padre Luis Felipe Loja Ancajima, y a mi hermana Ana Sofia Loja Mauricio, por su apoyo incondicional y motivación a lo largo de este trayecto. Una dedicatoria especial también a mis amigos Julio Rivera, Carlos Oliva y Jose Cebrian, quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. Dante Angel Elias Giordano, mi asesor de tesis, por su invaluable guía, apoyo y paciencia a lo largo de este proceso. Su conocimiento y compromiso fueron fundamentales para la elaboración del presente documento.

Agradezco también profundamente a los profesionales de la salud que participaron en las entrevistas, cuyo aporte y enfoque fue crucial para el análisis realizado en este proyecto. Asimismo, mi gratitud se extiende a los artistas de La Torta Juggling Space y a los estudiantes universitarios que participaron como voluntarios en las pruebas realizadas, ya que sin ellos este proyecto no habría sido posible.

Quiero brindar un agradecimiento profundo también al Laboratorio de Investigación en Biomecánica y Robótica Aplicada (LIBRA) por brindarme el espacio y los equipos necesarios para la realización de las pruebas. En especial, quiero agradecer a la profesora Victoria Abarca, cuya coordinación y apoyo hicieron posible la ejecución exitosa de las pruebas.

Finalmente, quiero agradecer a mis dos universidades, la Pontificia Universidad Católica del Perú y la Universidad Peruana Cayetano Heredia, por proporcionarme las herramientas, recursos y un entorno académico que fomentaron mi crecimiento personal y profesional durante estos años.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Pág.
RESUMEN i
DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTOS iv
ÍNDICE DE TABLAS viii
ÍNDICE DE FIGURAS ix
LISTA DE SÍMBOLOS xiii
INTRODUCCIÓN 1
I. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE 4
1.1 Marco teórico 4
1.1.1 Anatomía y biomecánica de las articulaciones del miembro superior 4
1.1.2 Rango de movimiento de las articulaciones del miembro superior 6
1.2 Estadísticas 7
1.2.1 Adherencia en la terapia a nivel global 7
1.2.2 Adherencia en la terapia a nivel nacional 7
1.2.3 Falta de actividad física 8
1.3 Métodos lúdicos para terapia física de miembro superior 8
1.4 Dispositivos para la rehabilitación de miembro superior 11
1.5 Estudios relacionados al gesto técnico del malabarismo 13
1.5.1 Dinámica y fases del malabarismo 13
1.5.2 Control de postura durante el malabarismo 15
1.5.3 Características espaciotemporales durante el malabarismo 15
1.5.4 Modelamiento mecánico del brazo durante el malabarismo 16
1.6 Protocolos de rehabilitación de miembro superior 16
II. DISEÑO EXPERIMENTAL 18
2.1 Planteamiento del diseño experimental 18
2.2 Descripción cualitativa del movimiento 19
2.2.1 Fase de vuelo 19
2.2.2 Fase de impacto y agarre 20
2.2.3 Fase de preparación del lanzamiento 20
2.2.4 Fase de lanzamiento 21
2.2.5 Control de la postura en el malabarismo 22
2.3 Selección de las variables a medir 21
2.4 Técnicas y materiales a emplear 22

2.4.1 Planos para captura de movimiento 23
2.4.2 Posición de los marcadores 24
2.4.3 Sincronización de video 27
2.4.4 Software para captura del movimiento 28
2.5 Protocolo piloto del ensayo 29
2.5.1 Procedimiento de acceso a los datos 34
2.5.2 Datos a extraerse 35
2.5.3 Administración de los datos recolectados 35
2.5.4 Procesamiento de datos 36
III. IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO PILOTO 38
3.1 Consideraciones matemáticas 38
3.2 Implementación del primer ensayo piloto 41
3.3 Resultados obtenidos del ensayo 42
3.4 Discusión de los resultados obtenidos del ensayo piloto 49
3.5 Recomendaciones para futuros ensayos 51
3.5.1 En la comunicación de la cámara transversal 52
3.5.2 En la posición alternativa para marcadores 53
3.5.3 En la instalación y configuración previa de las cámaras 55
3.6 Implementación del segundo ensayo piloto 55
3.6.1 Consideraciones y cambios 56
IV. EJECUCIÓN DEL PROTOCOLO DE CAPTURA DE MOVIMIENTO .. 60
4.1 Selección de los participantes 60
4.1.1 Criterios de inclusión y exclusión 60
4.1.2 Proceso de convocatoria 62
4.2 Ejecución de los ensayos 62
4.2.1 Preparación del set de grabación 62
4.2.2 Preparación del participante y toma de muestras 64
4.2.3 Procesamiento de datos 66
V. ANÁLISIS DE RESULTADOS 71
5.1 Presentación de los resultados 71
5.2 Análisis de los resultados 75
5.3 Aplicación del malabarismo dentro de las terapias de rehabilitación y/o prevención 82
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES 86
CONCLUSIONES 87

BIBLIOGRAFÍA 89
A N E X O S 94
Anexo A: Protocolo para el análisis cinemático de movimiento en el gesto técnico del malabarismo para la prevención o recuperación física de miembros superiores 94
Anexo B: Protocolo de consentimiento informado para la toma y uso de datos biomecánicos durante la ejecución del gesto técnico del malabarismo 98
Anexo C: Aprobación de estudios en personas por parte del comité de ética.... 102
Anexo D: Lista e imágenes de los materiales empleados en los ensayos 104
Anexo E: Detalles de la convocatoria realizada por medio de redes sociales..... 106
Anexo F: Protocolo de consentimiento informado para entrevistas para participantes 107
Anexo G: Resultados obtenidos durante las sesiones 109

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1.1: Rango de movimiento de las articulaciones del miembro superior 6

Tabla 1.2: Dispositivos para rehabilitación de miembro superior 12

Tabla 2.1: Ángulos de las articulaciones como variables seleccionadas 22

Tabla 2.2: Especificaciones técnicas de la cámara de video digital SONY / FDR AX700 23

Tabla 3.1: Ángulos máximos durante la realización de la prueba piloto en el gesto técnico del malabarismo 48

Tabla 3.2: Duración aproximada de cada ciclo 48

Tabla 3.3: Duración de cada fase en los diferentes ciclos 48

Tabla 3.4: Rango de movimiento de las articulaciones del miembro superior 50

Tabla 5.1: Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 1 75

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1: Articulación glenohumeral 5

Figura 1.2: Articulación del codo 5

Figura 1.3: Articulación de la muñeca 6

Figura 1.4: Funcionamiento de la mesa lúdica..... 10

Figura 1.5: Principales movimientos de las articulaciones del miembro superior..... 11

Figura 1.6: Fases del malabarismo..... 13

Figura 1.7: Representación en 3D del segmento del brazo..... 14

Figura 1.8: Representación esquemática del malabarismo en cascada 14

Figura 1.9: Centros de presión de malabaristas intermedios y expertos 15

Figura 1.10: Equivalente biomecánico de los movimientos articulares..... 16

Figura 2.1 Procedimiento a seguir para la toma de datos 19

Figura 2.2: Recorrido del brazo izquierdo en la fase de vuelo..... 20

Figura 2.3: Fase de impacto y recepción en el brazo izquierdo 20

Figura 2.4: Recorrido del brazo izquierdo en la fase de preparación del lanzamiento 21

Figura 2.5: Recorrido del brazo izquierdo en la fase de lanzamiento..... 21

Figura 2.6: Distribución de las cámaras para la captura del movimiento 24

Figura 2.7: Posición de los marcadores en el plano sagital 25

Figura 2.8: Posición de los marcadores en el plano frontal 26

Figura 2.9: Posición de los marcadores en el plano transversal..... 27

Figura 2.10: Representación de la distancia total del brazo 32

Figura 2.11: Representación de la distancia total del antebrazo 32

Figura 2.12: Representación de la distancia total de la mano 32

Figura 2.13: Representación de la distancia total del hombro 32

Figura 2.14: Altura del participante total (a), parcial (b) 33

Figura 3.1 Planteamiento geométrico para determinar los ángulos en el plano sagital 39

Figura 3.2: Planteamiento geométrico para determinar los ángulos en el plano frontal 40

Figura 3.3: Planteamiento geométrico para determinar los ángulos en el plano transversal 40

Figura 3.4: Posicionamiento de los marcadores en el ensayo piloto..... 41

Figura 3.5: Seguimiento del movimiento en los planos..... 42

Figura 3.6: Seguimiento del marcador Fs en formato Excel..... 43

Figura 3.7: Fragmento de la gráfica de flexión-extensión del hombro 43

Figura 3.8: Gráfica representativa del ángulo de abducción-aducción del hombro obtenida del ensayo piloto..... 45

Figura 3.9: Gráfica representativa del ángulo de rotación interna-externa del hombro obtenida del ensayo piloto..... 46

Figura 3.10: Gráfica representativa del ángulo de flexión-extensión del hombro obtenida del ensayo piloto..... 47

Figura 3.11: Gráfica representativa del ángulo de flexión-extensión del codo obtenida del ensayo piloto 47

Figura 3.12: Gráfica representativa del ángulo de flexión-extensión de la muñeca obtenida del ensayo piloto..... 47

Figura 3.13: Fragmento del video donde se muestra el bloqueo de los marcadores.. 53

Figura 3.14: Posición alternativa de los marcadores en el plano frontal (reverso).... 54

Figura 3.15: Sistema de grabación alternativo de 4 cámaras..... 54

Figura 3.16: Fragmento del programa de edición DaVinci Resolve..... 57

Figura 3.17: Fotograma del video grabado en el plano frontal con vistas al anverso 57

Figura 3.18: Luminaria usada para la captura de movimiento..... 58

Figura 3.19: Imagen referencial de una de las gráficas resultantes..... 59

Figura 4.1 Alineamiento de las cámaras 63

Figura 4.2: Arreglo de la luminaria y la cámara correspondiente..... 63

Figura 4.3: Arreglo total de las cámaras utilizado para la grabación del participante64

Figura 4.4: Marcadores ubicados en el participante en el plano frontal reverso..... 64

Figura 4.5: Marcadores ubicados en el participante en el plano frontal sagital..... 65

Figura 4.6: Marcadores ubicados en el participante en el plano frontal transversal.. 65

Figura 4.7: Postura inicial para la ejecución del gesto técnico del malabarismo..... 66

Figura 4.8: Interfaz del software de edición de video DaVinci Resolve para la sincronización de los videos 67

Figura 4.9: Interfaz del software Kinovea para el seguimiento de los marcadores en el plano frontal 68

Figura 4.10: Interfaz de la hoja de cálculo Excel..... 69

Figura 4.11: Código en Matlab utilizado para obtener las gráficas 69

Figura 4.12: Ejemplo de gráfica de salida utilizando el software Matlab..... 70

Figura 5.1: Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 1 . 73

Figura 5.2: Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 1..... 73

Figura 5.3: Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 1 74

Figura 5.4: Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 1 74

Figura 5.5: Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 1..... 75

Figura 5.6 Duración de los ciclos en cada una de las sesiones. 76

Figura 5.7: Rango de movimiento angular de la Abducción-Aducción del Hombro en el plano frontal 77

Figura 5.8: Rango de movimiento angular de la Rotación Interna-Externa del Hombro en el plano transversal 78

Figura 5.9: Rango de movimiento angular de la Flexión-Extensión del Hombro en el plano sagital 79

Figura 5.10: Rango de movimiento angular de la Flexión-Extensión del Codo en el plano sagital 80

Figura 5.11: Rango de movimiento angular de la Flexión-Extensión de la Muñeca en el plano sagital 81

LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta_{flex-ext}$: Ángulo de flexión-extensión del hombro
θ_{elb} : Ángulo de flexión-extensión del codo
θ_{wrt} : Ángulo de flexión-extensión de la muñeca
$\theta_{abd-add}$: Ángulo de abducción-aducción del hombro
$\theta_{int-ext}$: Ángulo de rotación interna-externa del hombro
S_s : Punto central de la articulación del hombro en el plano sagital
S_e : Punto central de la articulación del codo en el plano sagital
S_w : Punto central de la articulación de la muñeca en el plano sagital
S_h : Punto de referencia ubicado en la mano en el plano sagital
F_s : Punto central de la articulación del hombro en el plano frontal
F_a : Punto de referencia ubicado en el brazo en el plano frontal
T_s : Punto central de la articulación del hombro en el plano transversal
T_w : Punto de referencia ubicado en la muñeca en el plano transversal

INTRODUCCIÓN

La eficacia de un tratamiento enfocado en la rehabilitación física se relaciona con la adherencia del paciente. En el caso de la rehabilitación del miembro superior, estas terapias suelen caracterizarse por ser prolongadas y sistemáticas, lo que frecuentemente las hace poco estimulantes para los pacientes, conduciendo a una disminución en la motivación y el cumplimiento. Como resultado, la recuperación puede ser lenta e incompleta. Por tanto, es crucial que las terapias físicas se orienten hacia la estimulación y la concentración de los pacientes.

En el contexto nacional actual, la falta de adherencia se asocia a dos factores clave: la distancia entre el paciente y el centro de terapia, y la edad del paciente, siendo los adultos jóvenes menores de 40 años quienes muestran una mayor tendencia a abandonar el tratamiento [Moya, 2022].

El desarrollo de trastornos musculoesqueléticos está fuertemente vinculado a la falta de actividad física. Según informes del Instituto Nacional de Estadística e Informática y del Instituto Nacional de Salud, aproximadamente el 60% de la población adulta mantiene la actividad física al mínimo. Además, a medida que la población envejece, la actividad física disminuye considerablemente, especialmente en mayores de 65 años [INEI, 2012; INS, 2018]. En consecuencia, es necesario que se promuevan ejercicios preventivos para evitar lesiones derivadas de la falta de actividad física. Dichos ejercicios deben ser atractivos para evitar el abandono, como se mencionó anteriormente.

La problemática central radica en la falta de adherencia a las terapias de rehabilitación y en la presencia de lesiones por sedentarismo, debidas a la ausencia de un ejercicio que resulte atractivo para los pacientes y que promueva tanto la adherencia como la actividad física. Es decir, es necesario encontrar un ejercicio que integre un enfoque lúdico a la rehabilitación física. Por lo tanto, la justificación de este estudio se basa en la necesidad de desarrollar una actividad con dichas características.

Al momento de diseñar una terapia física o un programa de prevención, es fundamental realizar un análisis biomecánico de un ejercicio que sea viable para un amplio rango de edades, que pueda realizarse en el hogar y que resulte estimulante para el paciente. En este contexto, el malabarismo se presenta como una alternativa viable. Esta actividad se caracteriza principalmente por la producción de movimientos rítmicos alternados de flexión y extensión de la muñeca, el codo y el hombro, movimientos que son comúnmente empleados en las terapias físicas. Al mismo tiempo, el malabarismo requiere concentración y toma de decisiones en tiempo real, lo que lo convierte en una actividad estimulante.

El presente trabajo tiene como objetivo principal analizar el movimiento del gesto técnico del malabarismo como una actividad lúdica con potencial para la prevención y recuperación física de miembros superiores. Para ello se plantearon los siguientes objetivos específicos. i) Se elabora un estado del arte sobre la biomecánica del gesto técnico del malabarismo, lo que permitió una comprensión más profunda de dicha actividad. Además, se integraron los principales protocolos y métodos de rehabilitación y prevención del miembro superior, proporcionando así una base sólida para un análisis preciso. Posteriormente, ii) se diseña un protocolo capaz de traducir las descripciones cualitativas del movimiento en datos cuantitativos, útiles para un análisis riguroso. Finalmente, iii) se implementa este protocolo en una muestra de personas, obteniendo los datos necesarios, que fueron analizados y comparados con los métodos actuales de rehabilitación y prevención, con el fin de evaluar el potencial del malabarismo en el desarrollo de terapias físicas efectivas.

El estudio se realizó con una muestra de 12 personas (18-29 años) con experiencia regular en la ejecución de malabares en cascada con tres pelotas. De este modo, se pudo llevar a cabo el análisis biomecánico y evaluar el nivel de estimulación de dicho gesto. Este documento incluye un análisis cinemático del gesto técnico del malabarismo, su comparación con terapias existentes, así como sus ventajas y desventajas, con el fin de verificar su utilidad en tratamientos preventivos y de recuperación física. Además, se incorporaron entrevistas realizadas a especialistas en salud involucrados en el campo de la rehabilitación.

Los resultados obtenidos contribuirán al conocimiento en el campo de la ingeniería biomédica y permitirán establecer comparaciones con otras terapias de rehabilitación y/o prevención de lesiones en el miembro superior, posibilitando así la aplicación del malabarismo como actividad lúdica en dicha área. A diferencia de otros estudios realizados [Ruffaldi, 2011; Huys, 2002; Rodrigues, 2016], aporta una perspectiva en tiempo real de los movimientos articulares realizados durante el gesto técnico del malabarismo en cascada con tres pelotas.

Se resalta también que el alcance del presente trabajo busca analizar el potencial del malabarismo dentro de la rehabilitación y/o prevención de lesiones del miembro superior. Esto sin aún realizar pruebas clínicas, y sin realizar un análisis estadístico que requiera de una muestra superior a los 12 participantes planteados, por consiguiente, se trata de un estudio del tipo prospectivo.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se expondrá el marco contextual de las personas con baja adherencia a las terapias físicas de miembro superior, así como las personas que presentan lesiones debido a la falta de actividad física. Primero, se definirá un marco teórico con los conceptos requeridos para el trabajo. Segundo, se mostrarán datos estadísticos sobre las principales causas que conllevan al abandono de una rehabilitación física. Finalmente, se presentarán los métodos lúdicos y dispositivos desarrollados para abarcar la problemática actual.

1.1 Marco teórico

Se presentan un conjunto de conceptos y teorías necesarias para la realización del proyecto. Esto abarca la anatomía y biomecánica del miembro superior, así como el rango de movimiento de las articulaciones que lo conforman.

1.1.1 Anatomía y biomecánica de las articulaciones del miembro superior

El miembro superior se divide anatómicamente en tres secciones principales, las cuales se encuentran unidas a tres articulaciones. La articulación del hombro, la cual marca también el inicio del miembro superior, une la cavidad glenoidea de la escápula con el hueso húmero. Se clasifica como articulación esférica con una cavidad mucho menos profunda, lo cual restringe menos el movimiento, convirtiéndola así en la articulación

con más movimiento del cuerpo [Chang, 2022] [Forro, 2022]. En la Figura 1.1 se puede observar la anatomía del hombro.

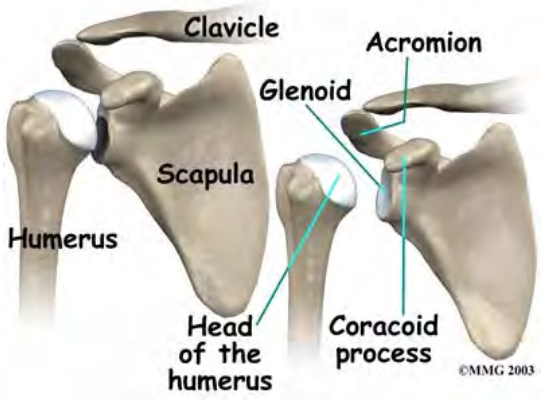


Figura 1.1 Articulación glenohumeral [Evidence, 2020]

La articulación del codo une las secciones al brazo y el antebrazo por medio de la unión de los huesos húmero, cúbito y radio, de este modo, se puede afirmar que su composición incluye la de tres articulaciones (húmero-cúbito, húmero-radio, radio-cúbito). Se clasifica como articulación en forma de pivote ya que permite el movimiento de un hueso sobre el otro. Debido a que muchos músculos se cruzan o unen en esta articulación, es una de las articulaciones con más frecuencia de lesiones en deporte [Card, 2022] [Forro, 2022]. En la Figura 1.2 se puede observar la anatomía del codo.

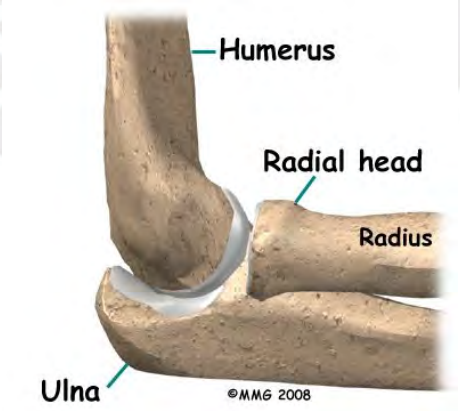


Figura 1.2 Articulación del codo [Evidence, 2020]

Finalmente, la articulación de la muñeca une la mano con el antebrazo, los huesos que conforman dicha articulación son el radio y los tres huesos carpianos proximales. Se

clasifica como una articulación condiloidea sinovial, pese a no permitir mucho movimiento. En el miembro superior también se encuentran otras articulaciones como las interfalángicas, las cuales se clasifican como bisagras [Erwin, 2022] [Forro, 2022]. En la Figura 1.3 se puede observar la anatomía de la muñeca.

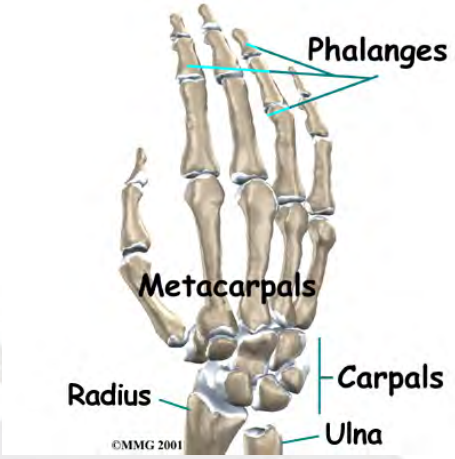


Figura 1.3 Articulación de la muñeca [Evidence, 2020]

1.1.2 Rango de movimiento de las articulaciones del miembro superior

En un estudio realizado en adultos jóvenes y adultos mayores se pudo obtener la amplitud máxima de movimiento voluntario de las principales articulaciones del miembro superior [Doriot, 2006]. En la Tabla 1.1 se pueden observar los resultados promedio obtenidos.

Tabla 1.1 Rango de movimiento de las articulaciones del miembro superior [Doriot, 2006]

Articulación	Movimiento	Rango (°)
Hombro	Aducción	129
	Abducción	9
	Extensión	75
	Flexión	53
	Rotación externa	19
	Rotación interna	119
Codo	Extensión	22
	Flexión	142
	Supinación	29
	Pronación	145
Muñeca	Aducción	23
	Abducción	20
	Extensión	60
	Flexión	44

1.2 Estadísticas

Se presentan datos estadísticos sobre la adherencia a la terapia física y rehabilitación en el miembro superior, así como la falta de actividad física a nivel nacional. También se encuentran incluidas las características principales por las cuales los pacientes suelen no adherirse al tratamiento.

1.2.1 Adherencia en la terapia a nivel global

La adherencia a un tratamiento terapéutico se relaciona con la mejora de efectividad en los resultados, por ende, representa un factor clave dentro de cualquier terapia física. De acuerdo con una revisión sistemática publicada en la revista "Journal of Hand Therapy" en 2019, el enfoque que demuestra mayor utilidad al momento de lograr una adherencia al tratamiento es aquel que fomenta la autoeficacia. Es decir, establecer un tiempo dedicado a la adquisición de habilidades por medio de la resolución de problemas y establecimiento de objetivos [Cole, 2019]. En dichas características queda incluido el aprendizaje de nuevas actividades.

Con el propósito de alcanzar una adecuada adherencia, y, en consecuencia, la eficacia del tratamiento propuesto, existen diversos obstáculos para el paciente. Como principales barreras se encuentran los bajos niveles de actividad física en el inicio del tratamiento y en las semanas previas al mismo y la baja autoeficacia [Jack, 2010]. Esto refleja que los pacientes, al iniciar una nueva actividad como en el caso de una terapia, deben percibir una mejoría en su capacidad de ejecutar dicha actividad.

1.2.2 Adherencia en la terapia a nivel nacional

Delimitando de acuerdo con el alcance del trabajo, se recopiló información sobre la adherencia a los tratamientos fisioterapéuticos en Perú. Por medio de un estudio realizado a 110 pacientes en el Instituto Nacional de Rehabilitación, se logró encontrar los principales factores de la adherencia al tratamiento. Estos fueron la distancia del instituto a la casa del paciente y la edad, siendo los adultos jóvenes alrededor de los 40 años quienes más abandonaban los tratamientos. En promedio, los pacientes que se

presentaron adherentes al tratamiento fueron el 53% del total (Desviación Estándar de 13,8%) [Moya, 2022].

El Instituto Nacional de Rehabilitación cuenta con una oficina de estadística e informática. Dicha oficina recolecta datos sobre las atenciones realizadas, encontrándose entre ellas las terapias físicas realizadas a lo largo del año. En el 2021, la terapia física representó el 40,6% del total de atenciones realizadas (60.962 de atenciones en terapia física) [INR, 2021]. Considerando ambos datos, las terapias no concluidas son aproximadamente 28.652.

1.2.3 Falta de actividad física

Según el informe técnico del Instituto Nacional de Salud el 61,9% de los adultos entre 18 a 50 años realizan una actividad física baja, el 35,1% realizan una actividad física moderada y el 3% realiza una actividad física alta. El criterio para considerar la actividad física como baja fue el siguiente: “Menos de 20 minutos de actividad vigorosa 3 días a la semana o menos de 30 minutos de actividad física moderada o caminata 5 días a la semana”. Cabe resaltar que también se encuentran incluidos en este grupo las personas que presentan una inactividad física [INS, 2017]. Al ser el ejercicio usado como estándar la caminata, puede considerarse la actividad del miembro superior como mínima o nula. Cabe resaltar aquí también que la actividad física disminuye al aumentar la edad, siendo los adultos mayores quienes tienden a tener altos niveles de sedentarismo [INEI, 2012].

1.3 Métodos lúdicos para terapia física de miembro superior

Dentro de la revisión bibliográfica se pueden encontrar diversos métodos de terapia física modernos con un complemento lúdico involucrado con el fin de aumentar la adherencia al proceso de rehabilitación por parte de los pacientes, mejorando así los resultados obtenidos.

El uso de juegos serios es cada vez más amplio dentro de las investigaciones sobre terapias de rehabilitación de miembro superior. Esto se debe a su naturaleza como videojuegos, los cuales resultan estimulantes y promueven la concentración. De este

modo es posible mejorar las terapias tradicionales, las cuales, al ser sistemáticas, carecen de dicho componente lúdico.

Dentro de los métodos de rehabilitación encontrados en investigaciones destaca el uso de la realidad virtual asociada a juegos serios para la rehabilitación de miembro superior en pacientes con esclerosis múltiple [Cuesta, 2020]. Asimismo, también es posible usar los juegos basados en realidad virtual para realizar programas de terapia ocupacional [Waliño, 2019]. Dichos programas de rehabilitación constan de un set de juegos a realizar durante las terapias y un programa de captura de movimientos con el cuál se monitorea al avance. Los resultados son favorecedores para los pacientes, obteniendo un aumento en la eficacia de los tratamientos y sobre todo una buena adaptabilidad a los mismos. Se comprueba, de este modo, que una actividad recreativa y estimulante como lo es un juego en este caso puede ayudar a evitar que los pacientes encuentren sistemático y tediosos los tratamientos.

Dicho principio es posible de aplicarlo junto a un componente robótico, como es el caso de una investigación enfocada a pacientes sobrevivientes de un ictus con escaza movilidad del miembro superior. El sistema robótico MERLIN asiste a la rehabilitación de miembro superior junto con una plataforma de software para la guía y medición de los movimientos, brindando de esta forma una rehabilitación personalizada con el seguimiento de un terapeuta [Guillén, 2021]. También es posible la aplicación del principio lúdico en conjunto con terapias de estimulación eléctrica, obteniendo resultados igualmente favorecedores [Montoya, 2022]. De este modo, se puede observar como el componente lúdico puede combinarse con diferentes terapias ya existentes.

El componente lúdico no es exclusivo de los juegos, siendo posible así incluirlo de diversas formas a los procesos de rehabilitación. Un ejemplo es el desarrollo de una mesa lúdica con el fin de agregar dicho componente a la rehabilitación. El principio es similar al de la rehabilitación tradicional, de forma sistemática se realiza una secuencia de ejercicios, los cuales mantienen a las articulaciones del miembro superior en constante flexión y extensión. El componente lúdico se añade por medio de unas luces LED de color rojo y verde, las cuales marcan el patrón que debe seguir el paciente [Alberti, 2022]. Su funcionamiento puede observarse gráficamente en la Figura 1.4.

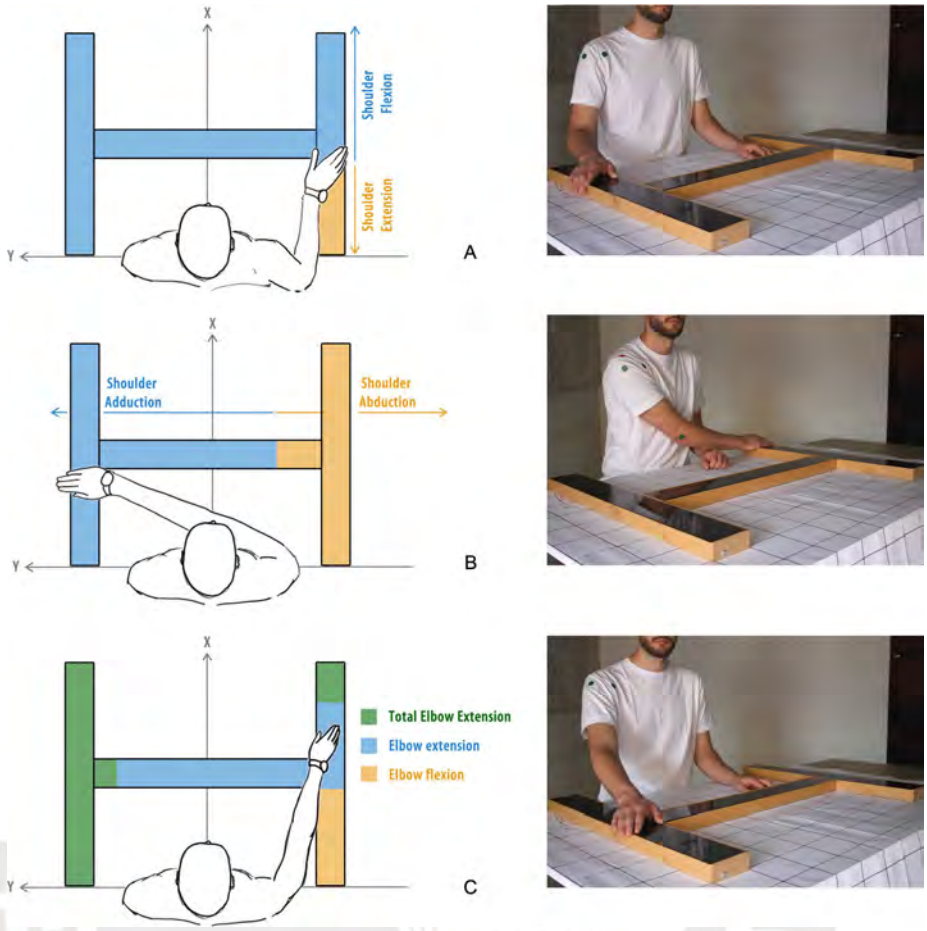


Figura 1.4 Funcionamiento de la mesa lúdica [Alberti 2022]

La cuantificación de los resultados obtenidos se realiza por medio de un análisis biomecánico del miembro superior. Los principales parámetros medidos son los ángulos máximos de flexión y extensión de las articulaciones del miembro superior antes y después de finalizar la terapia. En conclusión, para poder realizar un análisis correcto del gesto técnico del malabarismo con fines de prevención y rehabilitación física es necesario obtener el rango de movimiento de las articulaciones al momento de realizar dicho ejercicio.

Los efectos del malabarismo como actividad física lúdica se pueden observar dentro de un estudio analítico sobre los efectos de la actividad física de aprendizaje motor basada en malabares sobre el bienestar en personas mayores. Tomando como base el principio del malabarismo como actividad física y cognitiva, se observó el impacto de dicha actividad en el bienestar de personas mayores, obteniendo como resultado un aumento en el bienestar de acuerdo con la escala de la OMS [Malik, 2022].

1.4 Dispositivos para la rehabilitación de miembro superior

En el desarrollo de dispositivos de rehabilitación se requiere del conocimiento de las principales articulaciones presentes en el miembro superior, las que se pueden encontrar en la Figura 1.5, y del rango de movimiento abarcado de los dispositivos para dichas articulaciones. Esto se debe al objetivo principal de la rehabilitación, el cuál consisten en recobrar la movilidad de las áreas afectadas, usualmente la forma de cuantificar dicho objetivo es por medio del rango de movimiento de las articulaciones.

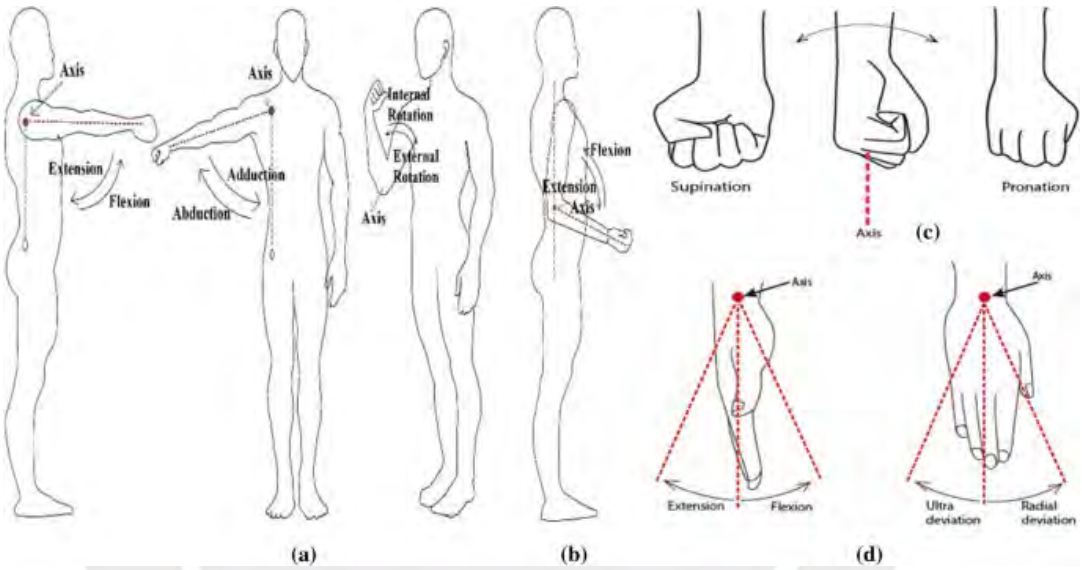


Figura 1.5 Principales movimientos en articulaciones del miembro superior [Narayan, 2021]

En la Tabla 1.2 se observan los principales dispositivos en investigación para rehabilitación de miembro superior y sus rangos de movimiento. Como se puede observar, los principales movimientos medidos son la flexión y la extensión de las articulaciones del hombro y el codo. Por lo tanto, es indispensable medir el rango de movimiento de dichas articulaciones si se desee analizar un gesto técnico con enfoques de rehabilitación.

Tabla 1.2 Dispositivos para rehabilitación de miembro superior

Dispositivo	**ROM Hombro**	**ROM Codo**	**ROM Muñeca**
[Xiao, 2018]	Flexión: 165° Extensión: 40° Abducción: 180° Aducción: 0° Rotación Interna: 60° Rotación externa: 60°	Flexión: 120° Extensión: 0°	Flexión: 60° Extensión: 60° Desviación radial: 27° Desviación cubital: 27°
[Beigzadeh, 2015]	Sin Movimiento	Flexión: 120° Extensión: 0°	Sin Movimiento
[Spencer, 2008]	Sin Movimiento	Sin Movimiento	Flexión: 90° Extensión: 70° Supinación: 85° Pronación: 90° Desviación radial: 10° Desviación cubital: 40°
[Mahdavian, 2015]	Sin Movimiento	Flexión: 90° Extensión: 0°	Sin Movimiento
[Klein, 2010]	Flexión: 99° Extensión: 0° Abducción: 76° Aducción: 0° Rotación Interna: 80° Rotación externa: 80°	Flexión: 68° Extensión: 0°	Sin Movimiento
[Otten, 2015]	Flexión: 120° Extensión: 0° Abducción: 120° Aducción: 0° Rotación Interna: 60° Rotación externa: 60°	Flexión: 135° Extensión: 0°	Sin Movimiento
[Garrec, 2008]	Flexión: 110° Extensión: 0° Abducción: 110° Aducción: 0° Rotación Interna: 55° Rotación externa: 55°	Flexión: 130° Extensión: 0°	Sin Movimiento
[Carignan, 2007]	Flexión: 147° Extensión: 46° Abducción: 105° Aducción: 75° Rotación Interna: 0° Rotación externa: 0°	Flexión: 142° Extensión: 0°	Sin Movimiento
[Tsagarakis, 2003]	Flexión: 110° Extensión: 25° Abducción: 100° Aducción: 20° Rotación Interna: 48° Rotación externa: 46°	Flexión: 102° Extensión: 0°	Flexión: 70° Extensión: 70°
[Tsai, 2010]	Flexión: 100° Extensión: 0° Abducción: 45° Aducción: 0° Rotación Interna: 20° Rotación externa: 0°	Flexión: 100° Extensión: 0°	Sin Movimiento

1.5 Estudios relacionados al gesto técnico del malabarismo

En la presente sección se realiza una revisión de estudios relacionados a la ejecución del gesto técnico del malabarismo. Se define la dinámica en la ejecución de la técnica del malabarismo, así como las diferentes fases existentes, los movimientos realizados por los brazos y la postura adoptada en todo instante de tiempo, así como un estudio relacionado con las características espaciotemporales.

1.5.1 Dinámica y fases del malabarismo

El factor clave para definir la dinámica del malabarismo es la tendencia de las extremidades superiores a realizar un movimiento sincronizado y cíclico. Dicha coordinación puede variar dependiendo del patrón de malabarismo que se busca seguir, sin embargo, se puede coincidir en la necesidad de un movimiento de trayectoria elíptica con las manos. Entonces, para una buena ejecución, se busca lanzar las pelotas en el interior de la elipse y atraparse en el exterior [Ruffaldi, 2011].

Según Ruffaldi [2011], en el malabarismo se identifican 4 fases en un plano que reporta la posición vertical de la pelota (eje de las ordenadas) y la velocidad vertical (eje de las abscisas), como se muestra en la Figura 1.6, siendo una fase de vuelo correspondiente a la parábola superior (1-2), seguida de una fase de impacto y agarre (2-3), una fase de preparación del lanzamiento (3-4) y finalmente la fase del lanzamiento (4 -1). Asimismo, se observa que durante las fases 3-4-1 la pelota y la mano comparten el diagrama de fase.

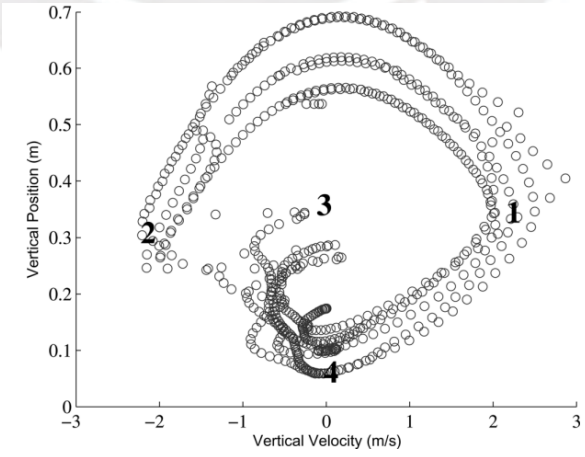


Figura 1.6 Fases del malabarismo [Ruffaldi, 2011].

Por otro lado, Huys [2003] realizó un análisis de cómo los subsistemas se acoplan dentro del gesto técnico del malabarismo, siendo uno de ellos los centros de presión obtenidos por el cambio de postura. La Figura 1.7 muestra una representación tridimensional de los movimientos del brazo. En dicha representación, el ángulo α se origina por un movimiento de rotación interna-externa del hombro, el ángulo β, por un movimiento de flexión-extensión del codo, el ángulo γ, por un movimiento de abducción-aducción del hombro, y el ángulo ψ por un movimiento de flexión-extensión del hombro. Al realizar un análisis biomecánico es común el patrón en cascada con tres pelotas, que se caracteriza por el cruce de las pelotas en el aire evitando la colisión. Para realizar dicho patrón de forma efectiva es necesario que una mano atrape al mismo ritmo que la otra lanza. La representación esquemática se puede visualizar en la Figura 1.8.

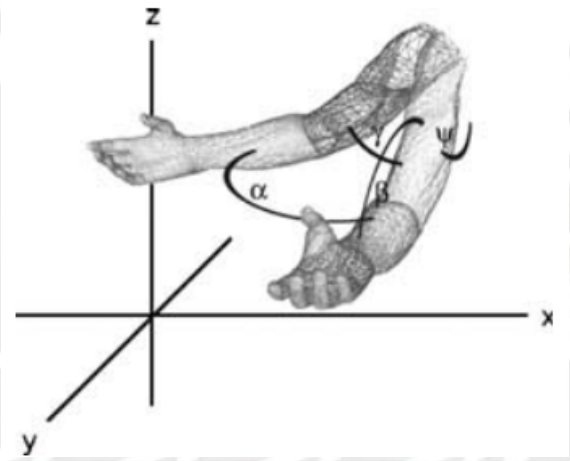


Figura 1.7 Representación en 3D del segmento del brazo, donde α y β representan la rotación del antebrazo en el plano XY y en el plano YZ, respectivamente, mientras que γ y ψ representan la rotación del brazo superior en el plano XZ y en el plano ZY, respectivamente. [Huys, 2003]

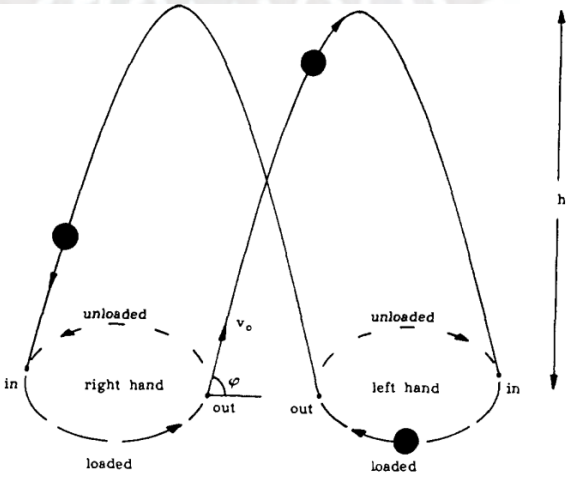


Figura 1.8. Representación esquemática del malabarismo en cascada [Beek, 1989]

1.5.2 Control de postura durante el malabarismo

La postura adoptada durante todo el instante de tiempo se puede observar en los resultados del estudio realizado por Rodrigues [2016]. Aquí se midieron los centros de presión anteroposterior y mediolateral en malabaristas de nivel intermedio y expertos, cada uno con dos posiciones diferentes, la primera con los pies alineados con los hombros y la segunda con los pies juntos. Se demostró así la tendencia a mantener el centro de presión en malabaristas expertos independientemente de la posición de los pies. En la Figura 1.9. pude observarse los resultados mencionados, en la parte izquierda por los malabaristas intermedio y en la parte derecha por los expertos. Del mismo modo, la parte superior representan los resultados obtenidos con los pies alineados en paralelo a los hombros y en la parte inferior con los pies juntos.

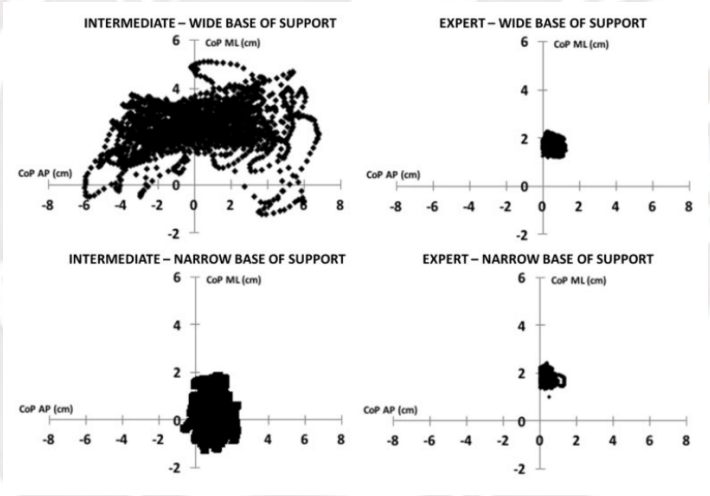


Figura 1.9. Centros de presión de malabaristas intermedios y expertos [Rodrigues, 2016]

En este mismo estudio pudo definirse las características principales del balanceo corporal de los malabaristas, el cual se caracterizó por su poca velocidad y amplitud en malabaristas expertos. De este modo, se pudo asociar un control de postura refinado con una mayor habilidad al momento de realizar los movimientos del malabarismo.

1.5.3 Características espaciotemporales durante el malabarismo

El estudio realizado por Post (2000) busca describir los componentes del patrón de cascada en el malabarismo, enfocándose principalmente en sus características

espaciotemporales. Una de las conclusiones obtenidas en el estudio es el uso de 4 dimensiones como máximo y suficiente para la descripción de la dinámica, contrastando con las 6 dimensiones originales (3 pelotas x 2 coordenadas planares), de este modo, solo se usó una grabación desde el plano frontal.

1.5.4 Modelamiento mecánico del brazo durante el malabarismo

De acuerdo con el marco propuesto por Kontaxis (2009), es recomendable formular un equivalente mecánico de las articulaciones de interés en caso de ser la cinemática de estas el objeto de estudio. El equivalente mecánico debe especificar los enlaces, grados de libertad y los ejes de rotación a analizar. En la Figura 1.10 se muestra gráficamente los movimientos de las articulaciones a ser estudiados.

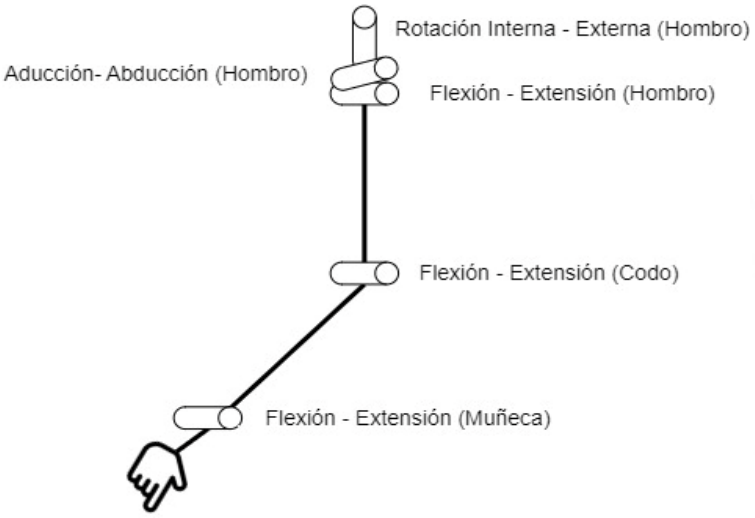


Figura 1.10. Equivalente biomecánico de los movimientos articulares definidos para el estudio, se cuenta con 3 articulaciones, la muñeca y el codo con un grado de libertad cada una. El hombro cuenta con tres grados de libertad.

1.6 Protocolos de rehabilitación de miembro superior

Dentro del contexto de la rehabilitación de lesiones en el miembro superior, es esencial comprender los protocolos y tratamientos empleados en clínicas y centros de terapia. En la presente sección se tiene como objetivo explorar las prácticas y terapias comúnmente usadas en el ámbito de la rehabilitación de extremidades superiores. Examinando estos protocolos se pretende establecer un punto de comparación y contraste con la posterior caracterización del gesto técnico del malabarismo,

identificando así posibles similitudes y oportunidades de aplicación del malabarismo dentro de las terapias físicas.

En el caso de lesiones más leves como pueden ser las ocasionadas al momento de realizar algún ejercicio no vigoroso o aquellas ocasionadas por falta de actividad física, la clínica de traumatología deportiva y cirugía ortopédica SportMe Medical Center presenta una guía de ejercicios de rehabilitación de miembro superior. Los ejercicios propuestos en dicha guía tienen como objetivo controlar el dolor y recuperar la función de las articulaciones del hombro, codo, muñeca y mano. Los ejercicios se realizan de forma lenta, aumentando el número de 10 - 15 repeticiones hasta llegar a 30. Si bien es cierto que abarca todos los rangos de movimiento, la mayoría de los ejercicios se enfocan en flexión y extensión [SportMe, 2023].

La misma clínica cubre las lesiones de diferentes articulaciones, cuyos tratamientos pueden variar dependiendo del tipo de lesión en cuestión. El tratamiento puede variar dependiendo de si existe algún requerimiento quirúrgico o no [SportMe, 2023]. Esto último puede verse reflejado también en el libro de Aude Quesnot y Jean-Claude Chanussot [2010] “Rehabilitación de miembro superior”. En dicho libro se menciona más a profundidad los protocolos a realizar en lesiones específicas, considerando también fracturas y procedimientos postquirúrgicos. Otro ejemplo es la información brindada por la clínica Integral Human Care [IHC, 2023], un centro de fisioterapia deportiva de Madrid, donde se muestra como el protocolo de terapias puede variar dependiendo del segmento corporal a tratar. En este caso, coincide la división por articulaciones como lo son el hombro, codo y muñeca. Al mismo tiempo, el protocolo a seguir depende del tipo de lesión generada en cada una.

Finalmente, en el caso de rehabilitación debido a ictus y daño cerebral, las terapias pueden ir acompañadas de terapias paralelas como son el caso de la estimulación eléctrica, realidad virtual y robótica [CEN, 2023]. Sin embargo, de acuerdo con el servicio ofrecido por el centro de rehabilitación Cefine [2023], se toma como ejemplo un ejercicio posible de realizar para la rehabilitación tras un ictus, este ejercicio consiste en el movimiento de un objeto de un punto A hacía un punto B. Sin embargo, el objetivo aquí es aumentar la frecuencia cardiaca para conseguir una activación general de todo el sistema cardiovascular.

CAPÍTULO 2
DISEÑO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describirá el diseño del experimento para el análisis del patrón del malabarismo en cascada con tres pelotas. Se toma como punto de partida la descripción cualitativa de cada una de las fases con ayuda de un video obtenido en internet [Professional Juggler, 2008]. Tomando esto en cuenta se identifican las variables significativas a medir y se plantean los materiales y técnicas a emplear.

2.1 Planteamiento del diseño experimental

El planteamiento del diseño experimental inicia con una descripción cualitativa de los movimientos realizados por las articulaciones del miembro superior en cada una de las fases del movimiento. De esta forma, es posible identificar las variables significativas a medir. Una vez esto sea definido, se plantean los materiales y técnicas a emplear para la adquisición de datos cuantitativos. Esto por medio de la grabación de videos en diferentes planos y su posterior procesamiento por medio de un software de captura de movimiento. La secuencia de pasos se encuentra organizada en la Figura 2.1. El análisis cualitativo del movimiento permite obtener que movimientos articulares se realizan, asegurando así que, posteriormente, las variables a medir cuantitativamente sean las correctas para caracterizar el movimiento.

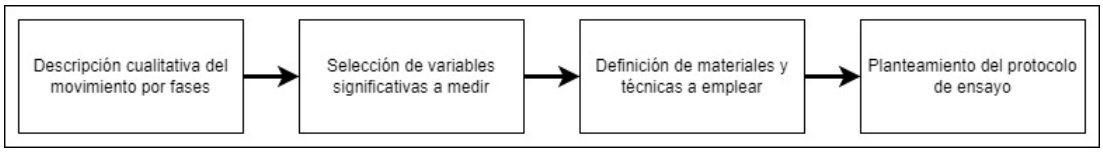


Figura 2.1 Procedimiento a seguir para la toma de datos

De acuerdo con estudios de gestos técnicos deportivos, por ejemplo, el gesto técnico del remate [Tilp, 2008] o el pase por encima de la cabeza [Ozawa, 2019], ambos en el voleibol, los análisis biomecánicos inician con una descripción del gesto técnico dividido en fases. Dicha descripción resulta de utilidad para identificar los movimientos realizados por las articulaciones durante la ejecución de la actividad que se busca analizar, siento útil también en la selección de variables a medir. Finalmente, y luego de identificar de forma precisa las variables que desean medirse, se puede plantear el método para adquirir los datos numéricos necesarios.

2.2 Descripción cualitativa del movimiento

De acuerdo con las fases definidas previamente, se procede a realizar una descripción de los movimientos del miembro superior en cada fase. Ambos brazos realizan un ciclo similar con un ligero desfase, por lo tanto, al momento de realizar las fases se analiza para un brazo. El movimiento elíptico se realiza en el plano frontal. Durante las 4 fases la postura del cuerpo se mantiene constante, por lo tanto, también se realizará una descripción de esta en el inciso a continuación.

La descripción toma como referencia lo observado en un video donde se muestra la ejecución de la técnica en el plano frontal [Professional Juggler, 2008], los estudios realizados por Ruffaldi [2011] y Huys [2003] y la tesis elaborada por Nickl [2018].

2.2.1 Fase de vuelo

Esta fase se caracteriza por el alcance de la altura máxima de la bola, siendo un intermedio entre el lanzamiento y la recepción. El recorrido realizado por el brazo se da en la parábola superior que compone la elipse, siendo este más lateral que vertical, es decir, se da entre dos puntos opuestos ubicados a la misma altura de la elipse. El recorrido se ilustra en la Figura 2.2. El hombro presenta un movimiento de abducción y rotación externa en toda la fase. Durante la primera mitad, el codo, realiza un

movimiento de flexión y finalmente un movimiento de extensión durante la segunda mitad.

Figura 2.2. Recorrido del brazo izquierdo en la fase de vuelo, vista frontal [Professional Juggler, 2008]

2.2.2 Fase de impacto y agarre

La fase se define como el momento donde la pelota realiza el primer contacto con la mano. El recorrido del brazo es prácticamente nulo, como se puede observar en la Figura 2.3. Sin embargo, el impacto puede generar un ligero movimiento de flexión y extensión de la muñeca.

Figura 2.3 Fase de impacto y recepción en el brazo izquierdo, vista frontal. [Professional Juggler, 2008]

2.2.3 Fase de preparación del lanzamiento

Previo al lanzamiento y posterior a la recepción de la pelota, se da una fase de preparación. Aquí, el recorrido realizado por el brazo se da desde un punto lateral hasta

llegar al vértice inferior de la elipse. El recorrido se muestra en la Figura 2.4. Para esta fase de movimiento, el hombro inicia el movimiento de rotación interna y aducción mientras que el codo realiza un movimiento de extensión, alcanzando su ángulo máximo.

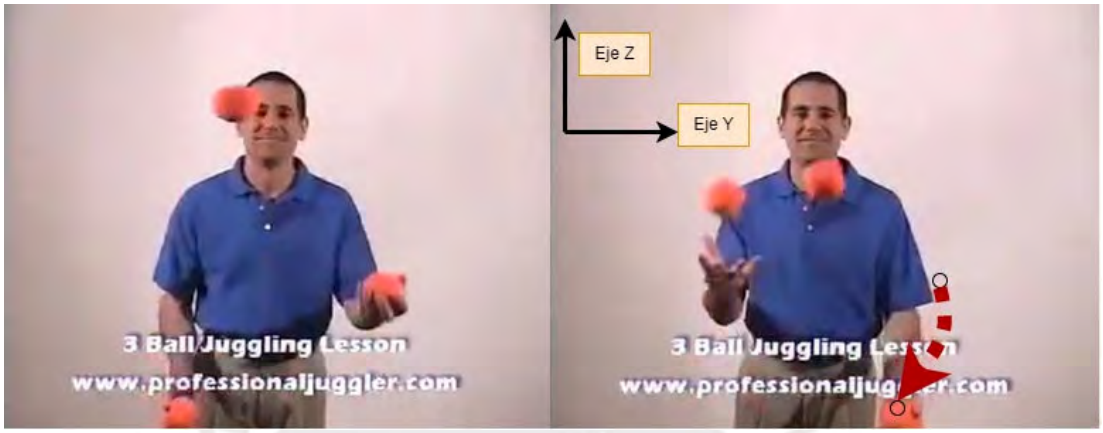


Figura 2.4 Recorrido del brazo izquierdo en la fase de preparación del lanzamiento, vista frontal [Professional Juggler, 2008]

2.2.4 Fase de lanzamiento

La fase de lanzamiento se caracteriza por un recorrido desde el vértice inferior de la elipse hasta llegar a un punto lateral ubicado a la misma altura que el punto de inicio de la fase anterior en el lado opuesto. El recorrido se muestra en la Figura 2.5. En esta última fase el hombro finaliza el movimiento de rotación interna y aducción mientras que el codo realiza un movimiento de flexión, cerrando la elipse.

Figura 2.5. Recorrido del brazo izquierdo la fase de lanzamiento, vista frontal [Professional Juggler, 2008]

2.2.5 Control de la postura en el malabarismo

De acuerdo con lo observado anteriormente, al momento de realizar el malabarismo se tiende a mantener una postura vertical erguida con los hombros relajados, la espalda recta y la pelvis alineada con la columna vertebral. Esta descripción coincide con los resultados del estudio realizado por Rodrigues [2016] y se mantiene constante a lo largo de toda la duración de la técnica.

2.3 Selección de las variables a medir

De acuerdo con la descripción del movimiento realizada en la sección anterior, la articulación del codo presenta un movimiento prominente de flexión-extensión durante las fases 3 y 4 del malabarismo. El hombro presenta un movimiento en sus tres grados de libertad durante la primera fase, mientras que en las fases finales presenta un movimiento en dos grados de libertad. Finalmente, la muñeca presenta un mínimo de movimiento, siendo este de flexión-extensión. Las variables seleccionadas se pueden observar en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Ángulos de las articulaciones como variables seleccionadas

Articulaciones	Rango de movimiento por medir
Hombro	Rotación interna - externa, Abducción - Aducción, Flexión - Extensión
Codo	Flexión - Extensión
Muñeca	Flexión - Extensión

2.4 Técnica y materiales a emplear

Con el objetivo de obtener el rango de los movimientos en las articulaciones seleccionadas. Se plantea realizar una captura del movimiento en video y realizar un análisis biomecánico con el uso de software. La definición de las técnicas a emplear abarca definir los planos para la captura del movimiento, la posición de los marcadores, el método de sincronización de video y el software de análisis biomecánico a emplear.

2.4.1 Planos para captura de movimiento

Con el fin de poder realizar un seguimiento de la cinemática del miembro superior, se propone realizar una captura del movimiento desde los tres planos, con el fin de medir las variables seleccionadas. Los movimientos de flexión-extensión de las tres articulaciones se podrán observar en el plano sagital. Los movimientos del hombro de rotación interna-externa y aducción-abducción se podrán capturar en los planos transversal y frontal respectivamente.

En la grabación se plantea el uso de cámaras de video digitales SONY / FDR AX700 para los planos frontal y sagital, y una cámara de celular Xiaomi 11T PRO / 2107113SG para el plano transversal.

La instalación de la cámara en el plano transversal se realizará por medio de una viga con un soporte para celular flexible, mientras que para las dos cámaras restantes se utilizarán trípodes para estabilizarlas. Las especificaciones técnicas de la cámara de video digital SONY / FDR AX700 se pueden encontrar en la página web oficial de Sony [2023]. Se tomarán en cuenta las especificaciones técnicas de grabación considerando como objetivo del presente proyecto realizar una captura en video. Las especificaciones se pueden encontrar ordenadas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Especificaciones técnicas de la cámara de video digital SONY / FDR AX700

Especificación	Descripción
Formato de grabación	AVCHD
Tipo de enfoque	Enfoque automático
Resolución de video	14,2 megapíxeles efectivos (16:9)
Velocidad de grabación	100 Mbps / 120 FPS

La posición de las cámaras para la grabación de los diferentes planos y el área delimitada para la posición del sujeto se puede observar en la Figura 2.6. El área total definida para la posicionar al sujeto es un cuadrado de aproximadamente 2.25 m^2. La distancia de la lente de la cámara al piso es de aproximadamente 140 cm. Las cámaras deben encontrarse perpendiculares a sus respectivos planos, con la lente alineada con el centro del área cuadrada definida. La distancia de la lente de la cámara transversal al centro del cuadrado es aproximadamente 300 cm, mientras que las otras dos cámaras se encontrarán a una distancia aproximada de 190 cm del centro del cuadrado.

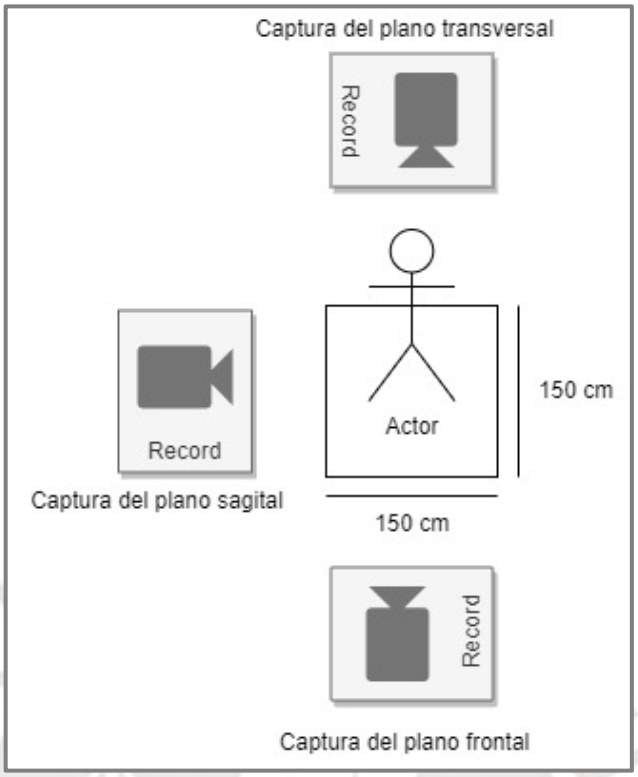


Figura 2.6. Distribución de las cámaras para la captura del movimiento

2.4.2 Posición de los marcadores

Durante la captura del movimiento de un gesto técnico deportivo, es común el uso de marcadores con la finalidad de aumentar la precisión al momento de realizar el seguimiento de puntos específicos del cuerpo, como es el caso de las articulaciones. Un ejemplo de ellos se puede observar en el estudio realizado por Reeser [2010] sobre la biomecánica de las extremidades superiores durante el saque y remate del voleibol. Aquí se emplearon marcadores reflectantes ubicados sobre la superficie de la piel en puntos de referencia óseos. Cabe resaltar que la posición de los marcadores depende de las variables a medir, y se ubican de forma estratégica de acuerdo con ello. Para el caso del rango de movimiento de las articulaciones, al ser ángulos, se requiere de un punto que actúe como vértice y de dos líneas que actúen como lados. De este modo, se busca convertir el modelo mecánico planteado anteriormente en un sistema de medición con el fin de obtener datos cuantitativos [Rau, 2000].

En la Figura 2.7 se observa la posición de los marcadores en el plano sagital. Estos se encuentran clasificados como S_s, S_e, S_w y $S_h$de acuerdo con las articulaciones del

hombro, codo y muñeca, y la mano respectivamente. Los ángulos de flexión-extensión del hombro, codo y muñeca se nombraron como $\theta_{flex-ext}$, θ_{elb} y θ_{wrt} respectivamente. El ángulo $\theta_{flex-ext}$ tiene como vértice el marcador S_s y como lados la línea $S_s - S_e$ y la línea paralela al eje longitudinal que cruza por el punto S_s. El ángulo θ_{elb} tiene como tiene como vértice el marcador S_e y como lados las líneas $S_s - S_e$ y $S_e - S_w$. Finalmente, el ángulo θ_{wrt}tiene como vértice el marcador S_w y como lados las líneas $S_e - S_w$ y $S_w - S_h$.

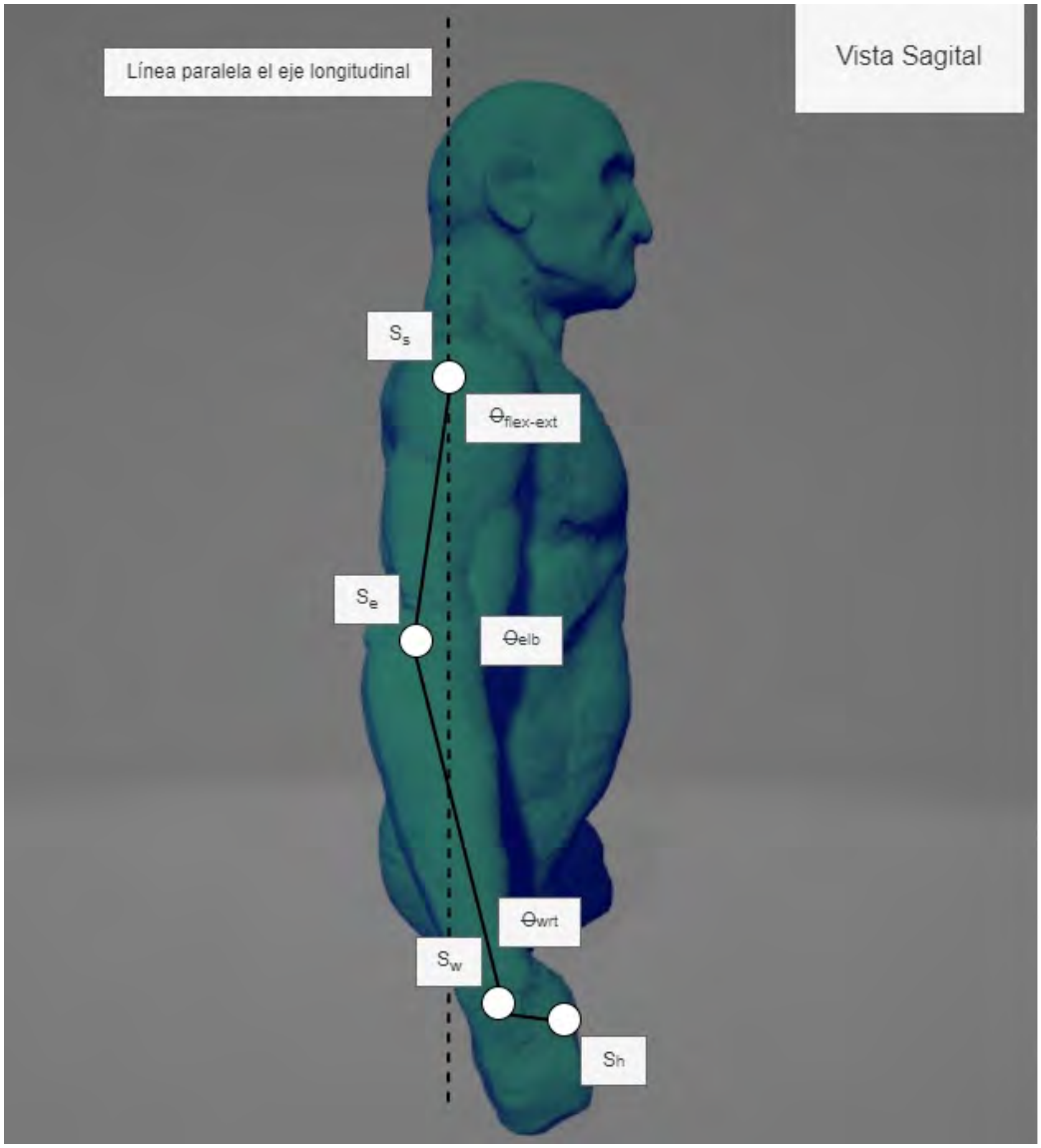


Figura 2.7. Posición de los marcadores en el plano sagital. El marcador S_s se encuentra ubicado a la altura del troquiter del húmero, el marcador S_e, en la intersección húmero-radial, el marcador S_w, en el extremo distal del radio y el marcador S_h, en el hueso metacarpiano del pulgar [Sketchfab, 2017]

En la Figura 2.8 se observa la posición de los marcadores en el plano frontal. Estos se encuentran clasificados como F_s y F_a de acuerdo con la articulación del hombro y el segmento superior del brazo respectivamente. El ángulo de abducción-aducción del hombro se nombró como $\theta_{abd-add}$. Este ángulo tiene como vértice el marcador F_s y como lados la línea $F_s - F_a$ y la línea paralela al eje longitudinal que atraviesa el punto F_s.

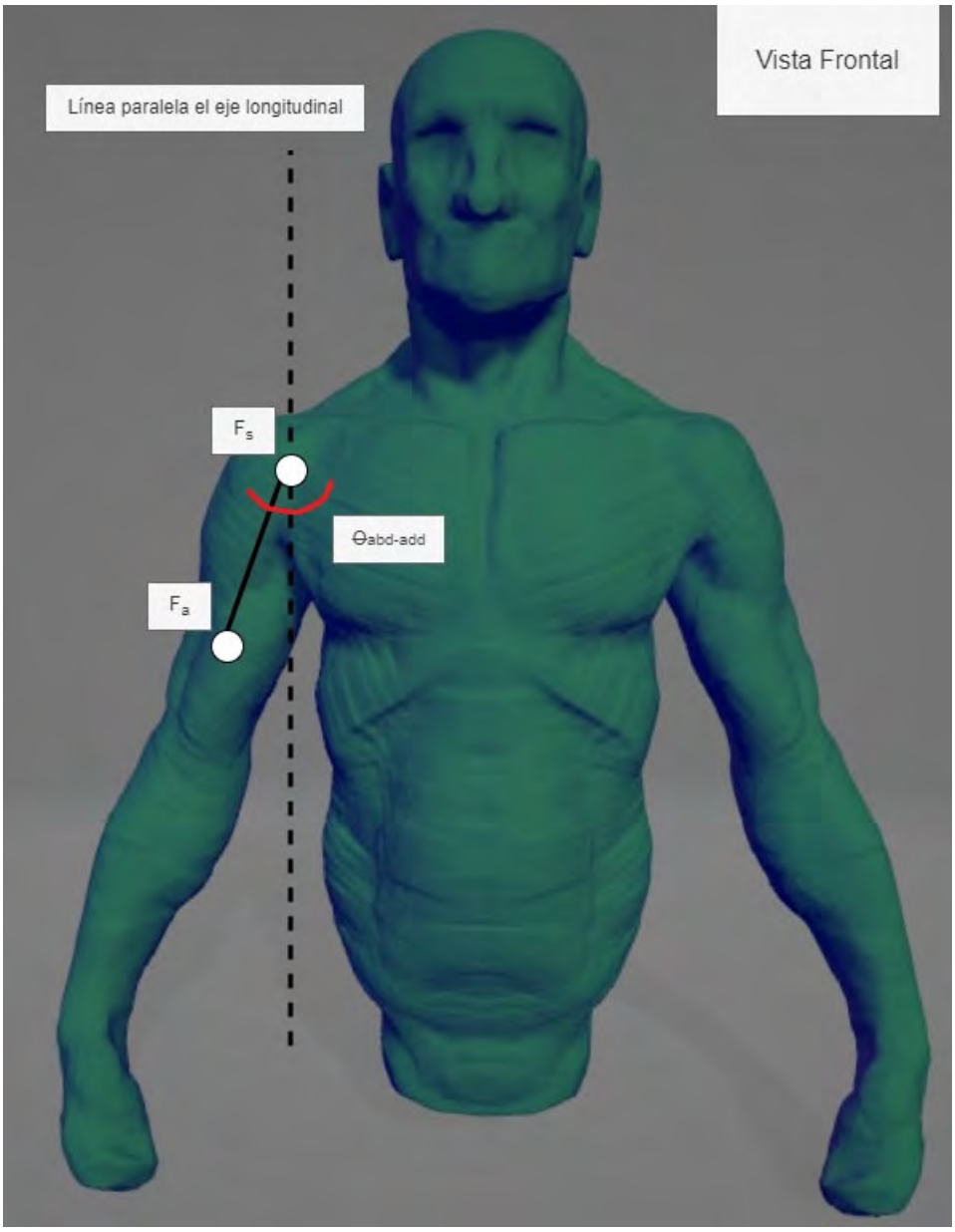


Figura 2.8. Posición de los marcadores en el plano frontal. El marcador F_s se encuentra ubicado entre el troquín y la cabeza humeral mientras que el marcador F_a, en la tuberosidad deltoidea [Sketchfab, 2017]

Por último, en la Figura 2.9 se observa la posición de los marcadores en el plano transversal. Estos se encuentran clasificados como T_s y T_w de acuerdo con las

articulaciones del hombro y la muñeca respectivamente. El ángulo de rotación interna-externa del hombro se nombró $\theta_{int-ext}$. Este ángulo tiene como vértice el marcador T_s y como lados la línea $T_s - T_w$ y la línea paralela al eje anteroposterior que cruza por el punto T_s. Se debe considerar que para este posicionamiento de los marcadores la palma de la mano siempre debe encontrarse apuntando hacia arriba, como lo es en el caso del patrón de cascada del malabarismo con tres pelotas.

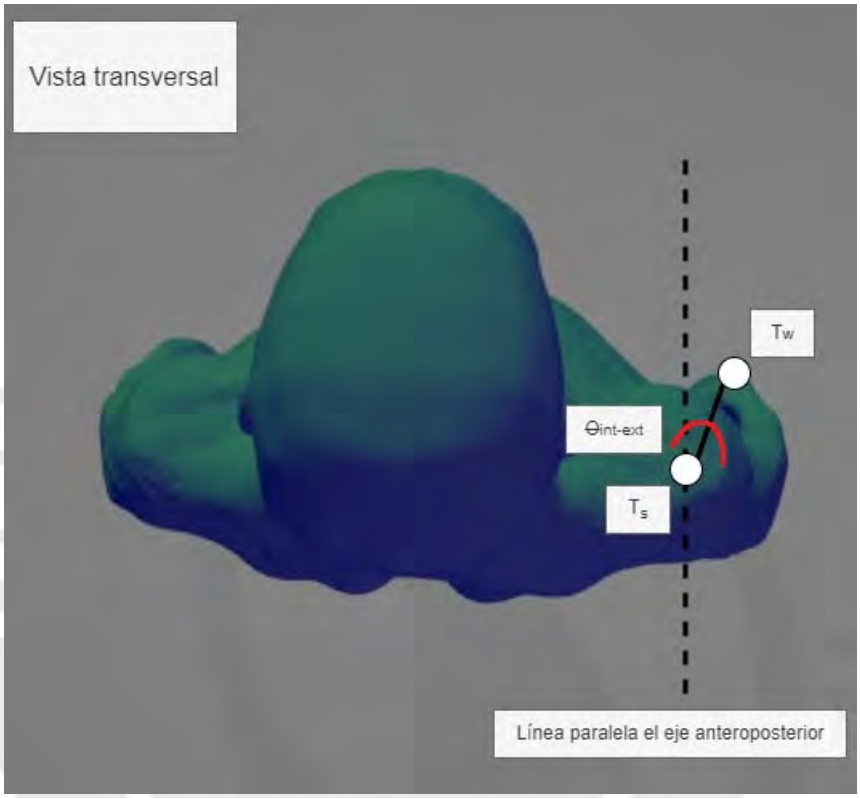


Figura 2.9. Posición de los marcadores en el plano transversal. El marcador T_s se encuentra ubicado en el acromion mientras que el marcador T_w, en la altura del hueso semilunar (la palma de la mano apuntando hacia arriba) [Sketchfab, 2017]

2.4.3 Sincronización de video

La precisión temporal y espacial de la captura de movimiento en diferentes planos ayuda a evaluar y comprender de manera correcta las características cinemáticas de un gesto técnico. Considerando que la división del movimiento es cíclica, y que cada fase en la que se encuentra dividido presenta un tiempo y patrón de movimientos específicos, hace necesario la sincronización de los tres videos grabados en distintos planos. Esto permite tener una visión completa y coherente del movimiento, así como

facilitar la identificación de puntos clave entre fases y la medición de las variables seleccionadas previamente.

En un estudio donde se evalúa la precisión de captura de movimiento en 3D, con varias cámaras de video, se utilizó una luz para sincronizar los datos obtenidos de todas las cámaras de video [Nakano, 2020]. De acuerdo con el procedimiento planteado, se busca que todas las cámaras capten el momento en que se enciende y apaga la luz. Posteriormente, con ayuda de un programa de edición de video se detecta el fotograma de encendido de la luz, el cual se determina como uno de los fotogramas iniciales. Para el caso del experimento planteado, se usará una linterna como fuente de luz y el programa DaVinci Resolve para la detección del fotograma inicial y la edición de video.

2.4.4 Software para captura del movimiento

Una vez definidos los movimientos articulares a medir, se selecciona el software para la cuantificación de los datos necesarios. Kinovea es un software de análisis de video que permite medir variables biomecánicas, usado en diversos contextos, como análisis de gestos deportivos o estudios científicos. La ventaja principal que presenta es su flexibilidad y facilidad de uso, cuenta con una interfaz intuitiva y un conjunto de herramientas que permiten la medición de las variables necesarias. Dentro de las herramientas que posee, se encuentran las funciones de marcado y etiquetado, las cuales facilitan el seguimiento de las variables a medir. Al mismo tiempo, cuenta con una función de exportación de datos y gráficos, facilitando así su integración con otros programas.

La validación y fiabilidad del software Kinovea para la medición de variables biomecánicas de miembro superior se ha estudiado evaluando el sentido de la posición de la articulación del hombro en jugadoras de Voleibol. Se evaluaron los movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción en tres ángulos diferentes (45°, 80°, 135°), medidos previamente con un goniómetro. Se obtuvo una correlación de significancia positiva las dos veces que se realizó la prueba, obteniendo así la validación y fiabilidad de los resultados. El estudio recomienda el uso del software Kinovea como una alternativa de acceso libre para la medición de ángulos durante el movimiento del hombro [Yazdani, 2023].

2.5 Protocolo piloto del ensayo

En la presente sección se describirá paso por paso el procedimiento preliminar planteado para la correcta realización del experimento. El protocolo piloto se encuentra basado en el análisis biomecánico de otros gestos técnicos como lo son el caso de la técnica del remate [Pavlov, 2019] [Tilp, 2008], el pase [Ozawa, 2019] y recepción [Callupe, 2022] en el voleibol. El objetivo es obtener grabaciones en los tres planos de la ejecución del patrón de malabarismo en cascada con tres pelotas.

Previo a realizar cualquier procedimiento, se debe brindar adecuadamente al sujeto la información detallada sobre los objetivos y los pasos a realizar del experimento. Luego de esto, se le hará firmar un documento de consentimiento informado para garantizar que el participante tiene conocimiento pleno sobre el ensayo a realizar. El documento del consentimiento informado se puede encontrar en el Anexo B. Una vez obtenida la firma del participante se podrá comenzar con los ensayos.

La descripción del protocolo de ensayo se encuentra a continuación.

I. Lista de materiales a emplear
   a) Tres pelotas para malabares (aprox. 6.35 cm de diámetro)
   b) Ocho marcadores reflectantes
   c) Una cinta métrica
   d) Una linterna
   e) Dos cámaras de video digitales SONY / FDR AX 700
   f) Una cámara de celular (Xiaomi 11T PRO / 2107113SG)
   g) Dos trípodes
   h) Soporte para celular flexible
   i) Cinta de enmascarar (para delimitar un área)
   j) Cinta doble contacto
   k) Alcohol de farmacia
   l) Algodón

II. Procedimientos previos al protocolo

a) Se coordinará con los participantes seleccionados una fecha y hora para realizar el experimento de acuerdo con su disponibilidad de tiempo. La sesión tendrá una duración aproximada de 30 minutos. Se le informará también de la vestimenta requerida, la cual consta de un polo negro, de preferencia, sin mangas.

b) Los participantes deberán proporcionar los datos necesarios para gestionar su ingreso al campus PUCP de acuerdo con el horario establecido, el experimento se llevará a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Biomecánica y Robótica Aplicada (LIBRA).

III. Preparación del experimento

a) Previo a la llegada del participante, con ayuda de la cinta métrica, se delimitará un área cuadrada (1.5 m x 1.5 m) con cinta de enmascarar. Las dimensiones de dicha área son lo suficientemente espaciosas para realizar movimientos con las extremidades superiores con total libertad.

b) Se deberá también tener instalado el set de grabación. La cámara del celular, colocada con ayuda del soporte flexible, se ubicará perpendicularmente al plano transversal con la lente alineada al centro del cuadrado definido anteriormente. La distancia de la lente de la cámara al centro del cuadrado será de aproximadamente 3 m.

c) Se ensamblarán las dos cámaras restantes con los trípodes, a una altura aproximada de 1.4 m desde el piso, y se posicionarán a una distancia tal que se pueda enfocar en el cuerpo del participante en su totalidad, las cámaras deben encontrarse perpendiculares a los planos transversal y sagital y con la lente alineada con el centro del cuadrado definido anteriormente. La distancia de la lente de las cámaras hasta el centro del cuadrado es de aproximadamente 1.9 m.

IV. Preparación del participante

a) Una vez el participante se encuentre dentro del laboratorio, se le brindará la información necesaria para la firma del documento de consentimiento informado. Esta información abarca los objetivos de la investigación, así

como los procedimientos involucrados y el acceso y manejo de los datos obtenidos. Se le asignará también un número.

b) Antes de iniciar cualquier movimiento y después de firmado el documento de consentimiento informado, se le limpiará la piel al participante con alcohol y algodón para luego colocarle los marcadores reflectantes. Estos se ubican sobre la piel en puntos anatómicos estratégicos, todos en la misma extremidad superior. Estos puntos se determinaron de acuerdo con las variables representativas a medir, su representación gráfica se muestra en la sección 2.4.2 y son:

- Altura del troquiter del húmero
- Intersección húmero radial
- Extremo distal del radio
- Metacarpo del pulgar
- Entre el troquín y la cabeza humeral
- Tuberosidad deltoidea
- Acromion
- Altura del hueso semilunar

c) Una vez que los marcadores reflectantes están posicionados correctamente, se toma las medidas del brazo al participante, con el objetivo de servir al momento de calibración el software de captura de movimiento. Se consideran las distancias entre los marcadores posicionados anteriormente y las siguientes mediciones:

- La distancia total del brazo será medida desde el cuello humeral hasta la tróclea humeral (referencia en la Figura 2.10).
- La distancia total del antebrazo será medida desde la tróclea humeral hasta el carpo. (referencia en la Figura 2.11).
- La distancia total de la mano medida desde el carpo hasta la tercera falange distal (referencia en la Figura 2.12).
- La distancia total del hombro será medida tomando en cuenta toda la sección transversal del cuello humeral (referencia en la Figura 2.13).

Figura 2.10 Representación de la distancia total del brazo [Png Tree, 2016]

Figura 2.11 Representación de la distancia total del antebrazo [Png Tree, 2016]

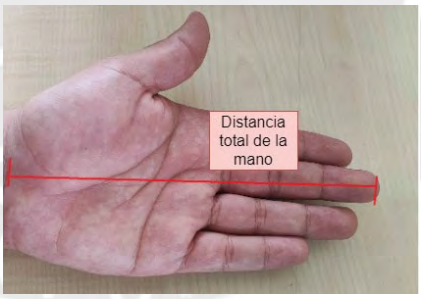
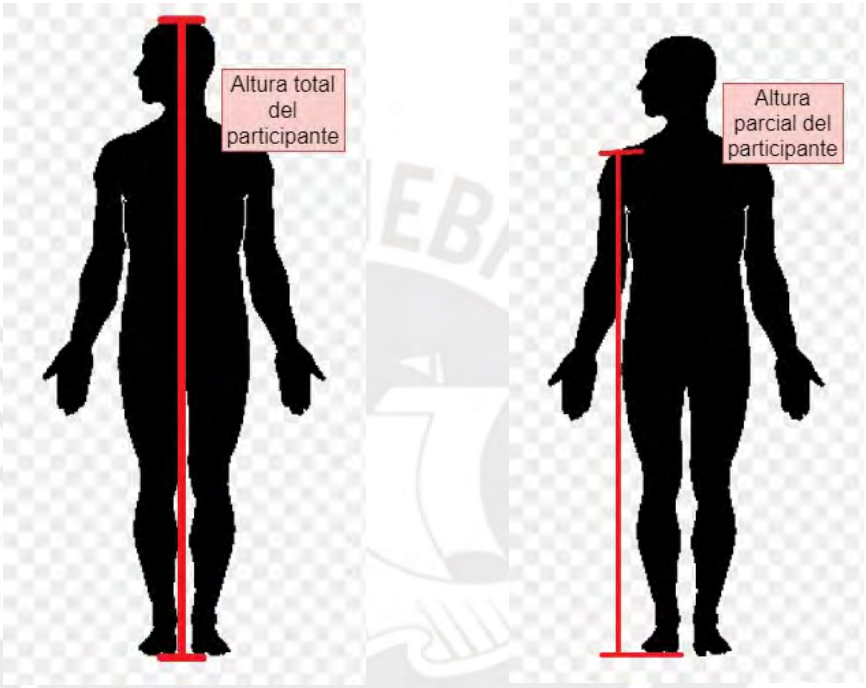


Figura 2.12 Representación de la distancia total de la mano

Figura 2.13 Representación de la distancia total del hombro

- La altura total del participante será medida desde la planta del pie hasta el cráneo (referencia en la Figura 2.14a).
- La altura parcial del participante será medida desde la planta del pie hasta el cuello humeral (referencia en la Figura 2.14b).



(a) (b)

Figura 2.14 Altura del participante (a) total, (b) parcial [Png Egg, 2023]

d) Previo a la grabación, se le pedirá al participante que realice un calentamiento con el fin de evitar lesiones durante el movimiento. El tiempo y forma del calentamiento dependerá del criterio del participante, se tiene aquí como condición que no exceda los 5 minutos.

e) Cuando el participante termine el calentamiento previo, se procederá a explicar con detalle el movimiento de malabarismo en cascada con tres pelotas. La descripción cualitativa del gesto técnico puede encontrarse detallada en el apartado 2.2. Aquí se le informará también al participante sobre la postura que debe mantener en todo momento, esta será vertical erguida con los hombros relajados, la espalda recta y la pelvis alineada con la columna vertebral. El participante puede decidir si mantener los pies

juntos o alineados con los hombros, sin embargo, se recomienda la segunda postura. Luego, se posicionará al participante en el centro de la zona designada con anterioridad con el eje craneocaudal alineado con el punto central del cuadrado.

f) Antes de comenzar las grabaciones, se pedirá al participante que realice el movimiento un par de veces. Esto con el fin de asegurar la correcta posición y enfoque de las cámaras, así como garantizar la correcta comprensión del participante del gesto técnico a realizar y su comodidad al momento de ejecutar el movimiento. Durante esta prueba se emitirá un destello de luz haciendo uso de la linterna, aquí se debe asegurar que todas las cámaras capten el destello.

V. Ejecución del ensayo

a) Una vez finalizada la preparación, se procederá a iniciar las grabaciones. Para ello, se le pedirá al participante ejecutar el movimiento descrito, manteniendo la postura detallada anteriormente. Una vez iniciado el movimiento, se iniciará la grabación en cada una de las cámaras, unos segundos después se emitirá el destello de luz mencionado anteriormente haciendo uso de la linterna. Se dejará pasar 2 minutos y se emitirá otro destello de luz. Finalmente, se cortará la grabación en cada una de las cámaras y se le dirá al participante que deje de realizar el movimiento.

b) Se finaliza así la primera grabación, de la que se obtendrán tres videos en simultáneo y en tres planos diferentes. Para los siguientes participantes se repetirán los pasos 4 y 5 del protocolo.

2.5.1 Procedimiento de acceso a los datos

Los datos se encontrarán disponibles en su totalidad para los investigadores involucrados en el experimento por medio del servicio Google Drive. El participante puede ponerse en contacto con los investigadores por medio de correo electrónico y pedir el acceso a los datos. En caso de que alguien ajeno al experimento desee acceder a los datos, deberá solicitarlo mediante un correo electrónico a uno de los investigadores detallando el motivo de la solicitud y el tiempo de acceso.

2.5.2 Datos a extraerse

De acuerdo con lo detallado en el protocolo experimental, se obtendrá una serie de videos del participante ejecutando el patrón del malabarismo en cascada con tres pelotas. Se obtendrán 48 videos, divididos en 12 sesiones de 4 videos cada una. Cada sesión contará con un video en el plano frontal anverso y reverso, plano sagital y plano transversal, grabados de forma simultánea. Cada sesión consta de 30 minutos durante los cuales se ejecutarán las partes del protocolo que involucren la participación de un participante.

También se obtendrán las medidas anatómicas de las extremidades superiores del participante con el fin de ser usadas en el proceso de calibración durante el procesamiento de los vídeos en el software Kinovea.

2.5.3 Administración de los datos recolectados

El acceso de los datos será exclusivo de las personas involucradas en la investigación y administrado por medio del servicio de alojamiento y administración de archivos Google Drive. La división de las carpetas de forma jerárquica contempla una carpeta principal que se denominar “Datos Gesto Técnico del Malabarismo”, seguida de carpetas secundarias como:

i. “Videos sin Editar”: Subcarpeta que contiene los videos subidos directamente luego de la grabación. La nomenclatura de los videos subidos es la siguiente “Sesión n - Plano a - Crudo”, donde “n” representa el número de grabación y “a” representa uno de los planos (Frontal, Sagital o Transversal).
ii. “Videos Sincronizados”: Subcarpeta que contiene los videos luego de ser procesados con el programa de edición. La nomenclatura de los videos subidos es la siguiente “Sesión n - Plano a - Sincronizado”, donde “n” representa el número de grabación y “a” representa uno de los planos (Frontal, Sagital o Transversal).
iii. “Videos Kinovea”: Subcarpeta que contiene el grupo de videos obtenidos luego del procesamiento mediante el software Kinovea. La nomenclatura de los videos subidos es la siguiente “Sesión n - Plano a - Kinovea”, donde “n” representa el

número de grabación y “a” representa uno de los planos (Frontal, Sagital o Transversal).

iv. “Datos Excel”: Subcarpeta que contiene los datos en formato Excel extraídos luego del procesamiento con Kinovea. La nomenclatura de los archivos es la siguiente “Sesión n - Plano a - Articulación b - Movimiento c”, donde “n” representa el número de grabación, “a” representa uno de los planos (Frontal, Sagital o Transversal), “b” representa la articulación (Hombro, Codo o Muñeca) y “c” representa el movimiento (Abducción - Aducción, Flexión - Extensión o Rotación Interna - Externa”. Esta carpeta contiene también un código en Matlab con el nombre “Datos Matlab” para la elaboración de gráficas.

2.5.4 Procesamiento de datos

Una vez obtenidas las grabaciones en crudo, estas se subirán a una computadora para su edición por medio del programa DaVinci Resolve. El objetivo de esto es obtener videos sincronizados de los tres planos anatómicos disponibles. Para ello se utilizará la información de la Sección 2.4.3.

Haciendo uso del programa de edición, se seleccionará el fotograma en que la luz se enciende por primera vez en cada uno de los videos. Este se considerará como el fotograma de inicio, los fotogramas previos a este serán descartados. Luego, se buscará el fotograma en que la luz se enciende por segunda vez, el cuál será considerado como fotograma final. Los fotogramas posteriores a este serán descartados igualmente. Al terminar la edición se obtendrán los tres videos tomados de cada prueba sincronizados.

Una vez finalizada la edición de todos los videos. Por medio de un análisis visual se decidirá qué grupo de videos en simultáneo se usarán para el procesamiento por medio del software Kinovea. Se utilizarán criterios como la correcta ejecución de la técnica, la mayor amplitud de las articulaciones del miembro superior durante el movimiento y la menor cantidad de desplazamiento del cuerpo. Se tomará aquí como referencia la descripción cualitativa realizada anteriormente.

Luego de seleccionar el grupo óptimo de videos grabados en simultáneo, se procederá a realizar el procesamiento de datos por medio del software de captura de movimiento Kinovea. Para ello se importará uno de los videos en el programa y se realizará la configuración de la velocidad de grabación del video y la unidad de tiempo a medir. Se definirá también la zona de trabajo, es decir, el intervalo de tiempo en que se va a trabajar, así como el centro y los ejes de coordenadas. Al trabajar con un movimiento cíclico, dentro del software Kinovea es posible delimitar el video únicamente a la acción de interés. De este modo se puede trabajar de forma más cómoda, tomando en cuenta solo un ciclo del movimiento.

Después de definir lo anterior y antes de iniciar con el seguimiento de los ángulos a medir se realizará una calibración para medir en longitudes reales y no en píxeles. Para dicha calibración, se utilizarán las medidas anatómicas extraídas anteriormente.

Una vez finalizada la configuración y la calibración, se procede a realizar el seguimiento de la trayectoria de los marcadores. Durante este proceso, en caso alguno de los puntos se desconfigure, es posible corregir su trayectoria con el mismo programa. Al finalizar este proceso se obtendrá un video en formato .mkv y varios archivos Excel con los valores de los ángulos en el tiempo de acuerdo con las variables seleccionadas en el video, esto para cada uno de los videos usados como entrada.

Una vez obtenido el archivo en Excel, con el rango de movimiento de las articulaciones requeridas, se procederá a realizar el procesamiento de los datos. El objetivo es obtener gráficas con los ángulos de las articulaciones en el eje de las ordenadas y el tiempo en el eje de las abscisas. Esto se realizará por medio del programa Matlab. Aquí se dividirán también las gráficas de acuerdo con las fases del movimiento definidas en la Sección 2.2. Para ello se tomará como referencia el video obtenido como salida, luego del procesamiento por Kinovea y la descripción del movimiento realizada previamente.

CAPÍTULO 3
IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO PILOTO

El presente capítulo contiene de forma detalla todo lo realizado para la implementación del ensayo piloto con el fin de validar el protocolo obtenido. De este modo, se toman en cuenta las consideraciones matemáticas para realizar el cálculo de los ángulos. La descripción de lo realizado al momento de implementar el ensayo, los resultados obtenidos con su respectiva discusión, las recomendaciones para futuros ensayos y una repetición del ensayo piloto a modo de validación.

3.1 Consideraciones matemáticas

El objetivo de realizar la captura de movimiento y el procesamiento por Kinovea es obtener los valores necesarios del rango de movimiento angular realizado por las articulaciones del hombro, codo y muñeca durante la ejecución del gesto técnico del malabarismo. El software Kinovea nos permite realizar el seguimiento de un marcador en cada instante de tiempo, sin embargo, es necesario realizar algunos planteamientos geométricos y fórmulas para calcular los ángulos necesarios.

En el caso del plano sagital, los ángulos $\theta_{flex-ext}$, θ_{elb} y θ_{wrt} se determinaron usando las coordenadas obtenidas por los marcadores S_s, S_e, S_w y S_h. El planteamiento geométrico puede observarse en la Figura 3.1, mientras que las Ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3 contiene las relaciones matemáticas para expresar los ángulos de flexión-extensión del hombro, codo y muñeca ($\theta_{flex-ext}$, θ_{elb} y θ_{wrt}) respectivamente.

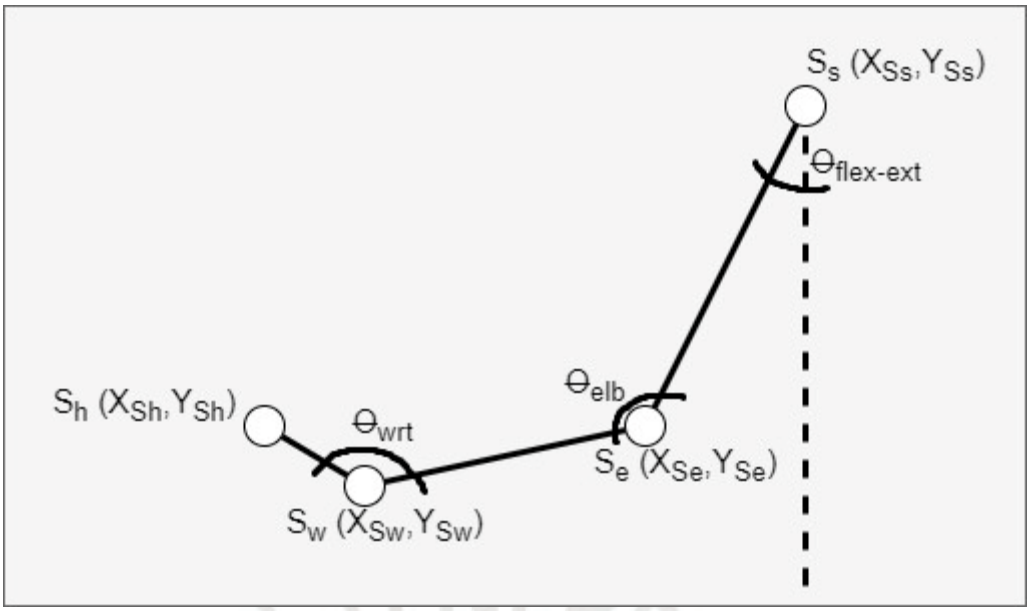


Figura 3.1 Planteamiento geométrico para determinar los ángulos de flexión-extensión del hombro, codo y muñeca en el plano sagital. Cada marcador se encuentra clasificado con su respectiva coordenada X e Y.

$$\theta_{flex-ext} = \cos^{-1}\left(\frac{Y_{Ss} - Y_{Se}}{\sqrt{(X_{Ss} - X_{Se})^2 - (Y_{Ss} - Y_{Se})^2}}\right) \tag{3.1}$$

$$\theta_{elb} = \cos^{-1}\left(\frac{X_{Se}^2 - X_{Ss}.X_{Se} - Y_{Ss}.Y_{Se} + Y_{Se}^2 + X_{Sw}.(X_{Ss} - X_{Se}) + Y_{Sw}.(Y_{Ss} - Y_{Se})}{\sqrt{(X_{Ss} - X_{Se})^2 + (Y_{Ss} - Y_{Se})^2}.\sqrt{(X_{Se} - X_{Sw})^2 + (Y_{Se} - Y_{Sw})^2}}\right) \tag{3.2}$$

$$\theta_{wrt} = \cos^{-1}\left(\frac{X_{Sw}^2 - X_{Se}.X_{Sw} - Y_{Se}.Y_{Sw} + Y_{Sw}^2 + X_{Sh}.(X_{Se} - X_{Sw}) + Y_{Sh}.(Y_{Se} - Y_{Sw})}{\sqrt{(X_{Se} - X_{Sw})^2 + (Y_{Se} - Y_{Sw})^2}.\sqrt{(X_{Sw} - X_{Sh})^2 + (Y_{Sw} - Y_{Sh})^2}}\right) \tag{3.3}$$

En el caso del plano frontal, el cálculo de ángulo $\theta_{abd-add}$ se realizó utilizando las coordenadas obtenidas por los marcadores F_s y F_a. El planteamiento geométrico puede observarse en la Figura 3.2, mientras que la Ecuación 3.4 contiene la relación matemática que nos permite obtener ángulo $\theta_{abd-add}$.

$$\theta_{abd-add} = \cos^{-1}\left(\frac{Y_{Fs} - Y_{Fa}}{\sqrt{(X_{Fs} - X_{Fa})^2 - (Y_{Fs} - Y_{Fa})^2}}\right) \tag{3.4}$$

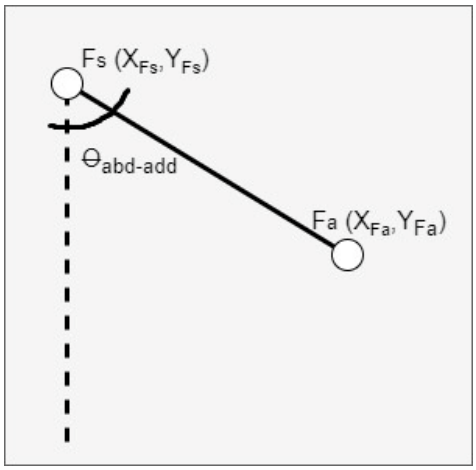


Figura 3.2 Planteamiento geométrico para el ángulo de abducción-aducción del hombro en el plano frontal. Cada uno de los marcadores se encuentra clasificado con su respectiva coordenada X e Y.

Finalmente, en el caso del plano frontal, el cálculo del ángulo de rotación externa e interna $\theta_{int-ext}$ se realizó utilizando las coordenadas obtenidas por los marcadores T_S y T_W. El planteamiento geométrico puede observarse en la Figura 3.3, mientras que la Ecuación 3.5 contiene la relación matemática obtenida para el cálculo del ángulo $\theta_{int-ext}$

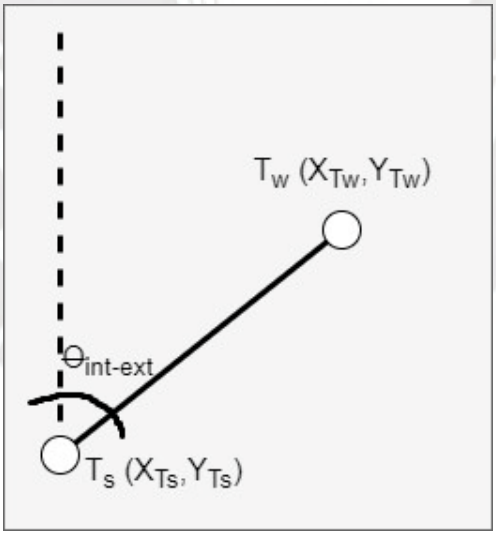


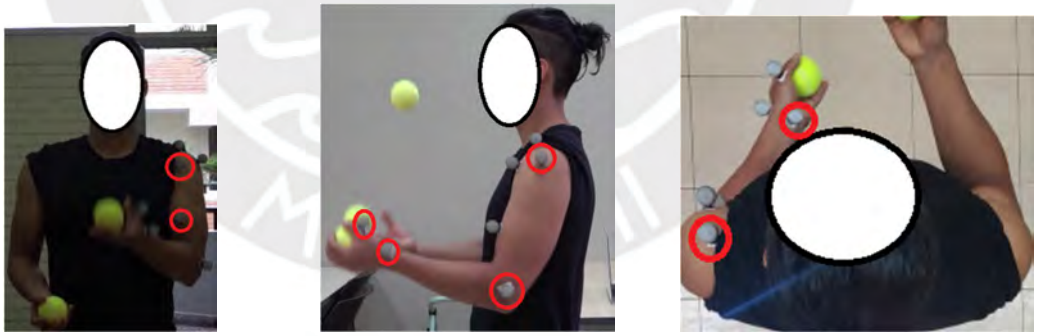
Figura 3.3 Planteamiento geométrico para el ángulo de abducción-aducción del hombro en el plano frontal. Cada uno de los marcadores se encuentra clasificado con su respectiva coordenada X e Y.

$$\theta_{int-ext} = \cos^{-1}\left(\frac{Y_{Tw} - Y_{Ts}}{\sqrt{(X_{Tw} - X_{Ts})^2 - (Y_{Tw} - Y_{Ts})^2}}\right) \quad (3.5)$$

De acuerdo con los cálculos matemáticos empleados, no se considera necesario tomar medidas anatómicas para la calibración del software Kinovea. El objetivo de dicha calibración es de poder obtener la trayectoria en función de centímetros en lugar de pixeles. Sin embargo, como se puedo observar, al momento de realizar los cálculos de los ángulos las unidades de distancia se vuelven irrelevantes, quitando así la necesidad de conversión.

3.2 Implementación del primer ensayo piloto

La implementación de un ensayo preliminar se realizó con el objetivo de validar y afinar los procedimientos establecidos. Dicho ensayo consistió en la grabación de tres videos en los planos frontal, sagital y transversal con un participante realizando el gesto técnico del malabarismo, posteriormente, se realizó un procesamiento de los videos y se obtuvieron los valores de los ángulos requeridos. El proceso seguido se realizó de acuerdo con lo establecido en el protocolo detallado en la Sección 2.5 del presente documento. En el Anexo C se pueden encontrar la representación gráfica de los materiales empleados para la implementación del ensayo piloto. El posicionamiento de los marcadores se puede observar en los fotogramas obtenidos de los videos previo al procesamiento de la Figura 3.4.

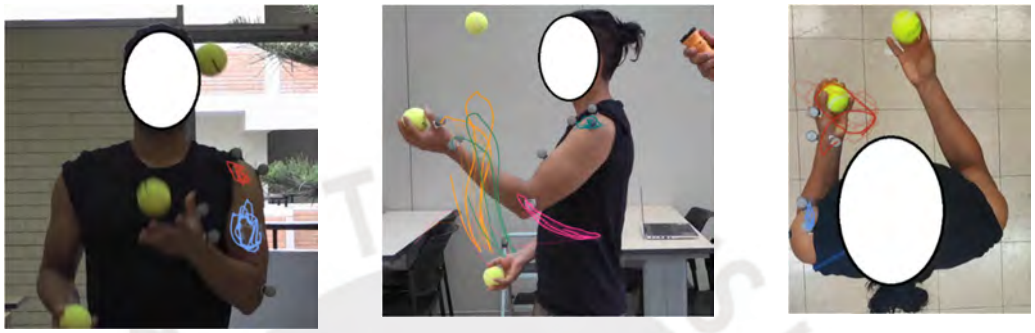


(a) (b) (c)

Figura 3.4 Posicionamiento de los marcadores en los planos (a) frontal, (b) sagital y (c) transversal en el ensayo piloto. Los marcadores de cada plano se encuentran resaltados con rojo.

En la Figura 3.5 se pueden observar fotogramas de los videos en los planos mencionados luego de realizar la captura de movimiento y procesamiento con el software Kinovea, obteniendo así la trayectoria de cada uno de los marcadores. Se

extrajeron los datos en formato de archivo Excel, donde se realizaron los cálculos de acuerdo con las ecuaciones planteadas. Posteriormente, se realizó un procesamiento de los ángulos resultantes con el software Matlab, de esa forma se elaboraron gráficas que muestran la variación del ángulo en función del tiempo. De acuerdo con lo planteado en el documento de Consentimiento Informado (Anexo B), en la que señala que la identidad del participante se mantendrá confidencial.



(a) (b) (c)

Figura 3.5 Seguimiento del movimiento en los planos (a) frontal, (b) sagital y (c) transversal.

3.3 Resultados obtenidos del ensayo piloto

El procesamiento de datos se realizó luego de obtenidos los videos del participante ejecutando el movimiento en los tres planos simultáneamente. El software Kinovea permite realizar un seguimiento de distintos puntos a través del tiempo, en este caso, se realizó el seguimiento de los marcadores midiendo la posición en pixeles y el tiempo en milisegundos. Asimismo, el software permitió exportar los datos en un archivo Excel, un ejemplo gráfico de esto se puede observar en la Figura 3.6. Los cálculos de los ángulos se realizaron en el archivo Excel siguiendo las consideraciones de la Sección 3.1. Finalmente, los valores obtenidos se exportaron y convirtieron en vectores en Matlab para poder obtener las gráficas necesarias.

2	Track		
3	Label :	Shoulder	
4	Coords (x,y:px; t:time)		
5	x	y	t
6	591.85	306.5	0
7	591.86	300.21	42
8	594.18	293.61	83
9	597.5	292.92	125
10	593.53	289.28	167
11	592.86	287.64	208
12	587.89	285.99	250
13	581.61	286.99	292
14	570.01	293.28	333

Figura 3.6 Seguimiento del marcador F_S en formato Excel. Los datos obtenidos son los puntos en X e Y para todo instante de tiempo.

Tomando en consideración la correcta sincronización de los videos y como referencia el video en el plano frontal, se establecieron líneas verticales en la gráfica que señalan el inicio de las distintas fases anteriormente definidas. Se trazaron líneas rojas verticales para marcar el inicio de las distintas fases. La línea continua señala el inicio de la fase de vuelo, así como el inicio de un nuevo ciclo, la línea discontinua el inicio de la fase de impacto y recepción, la línea de puntos el inicio de la fase de preparación del lanzamiento y, finalmente, la línea de puntos y rayas el inicio de la fase de lanzamiento. En la Figura 3.7 se puede observar un fragmento de la gráfica de flexión-extensión del hombro que ejemplifica todo lo descrito anteriormente. Se tomaron en cuenta los 5 primeros ciclos completos, los cuales tuvieron un tiempo de duración de 3958 milisegundos. Cada uno de los ciclos comprenden las 4 fases definidas y ordenadas en la Sección 2.2.

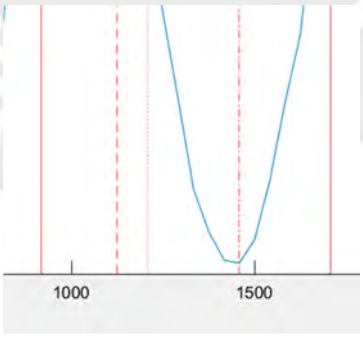


Figura 3.7 Fragmento de la gráfica de flexión-extensión del hombro. Cada una de las líneas rojas representa el inicio de una fase dentro de un ciclo completo de acuerdo con lo redactado anteriormente. La línea continua representa también el inicio de un ciclo y el fin del inmediato anterior.

Una vez realizado el procesamiento de los datos obtenidos en el ensayo piloto, el resultado final fueron las gráficas que representan la variación de los ángulos a través del tiempo. Los ángulos se encuentran medidos en grados sexagesimales mientras que el tiempo se midió en milisegundos. Las gráficas demostrativas obtenidas del ensayo piloto para los ángulos de abducción-aducción, rotación interna-externa y flexión-extensión del hombro pueden observarse de la Figura 3.8 a la Figura 3.10. En el caso de los ángulos de flexión-extensión del hombro y la muñeca, estos pueden observarse en la Figura 3.11 y la Figura 3.12 respectivamente. En el presente apartado se presentan también un análisis de los ángulos en cada uno de los respectivos planos.

Análisis de los ángulos del plano frontal

En el plano frontal se tomó como parámetro cuantificar el ángulo de abducción-aducción descrito por el hombro. Este análisis se realizó a partir de la Figura 3.8. Se destacó que la amplitud, es decir, el ángulo máximo alcanzado, puede variar de forma significativa entre los ciclos, por ejemplo, en los ciclos 2 y 3 se obtuvieron ángulos considerablemente mayores en comparación a los ciclos 1 y 4. Además, se identificó que el ángulo máximo de cada ciclo se encuentra generalmente entre las fases de vuelo y preparación del lanzamiento.

La variación drástica del ángulo mencionado se puede relacionar directamente con la trayectoria horizontal de la pelota, poniendo de ejemplo, si el desplazamiento de la pelota hacia los lados aumenta, alejándose así del cuerpo del participante, este debe aumentar el ángulo para poder atraparla de forma efectiva. De esta forma, se tienen indicios de la influencia del movimiento de la pelota sobre la amplitud del ángulo, lo que puede implicar una adaptabilidad dinámica para el gesto técnico del malabarismo de acuerdo con el objeto en movimiento.

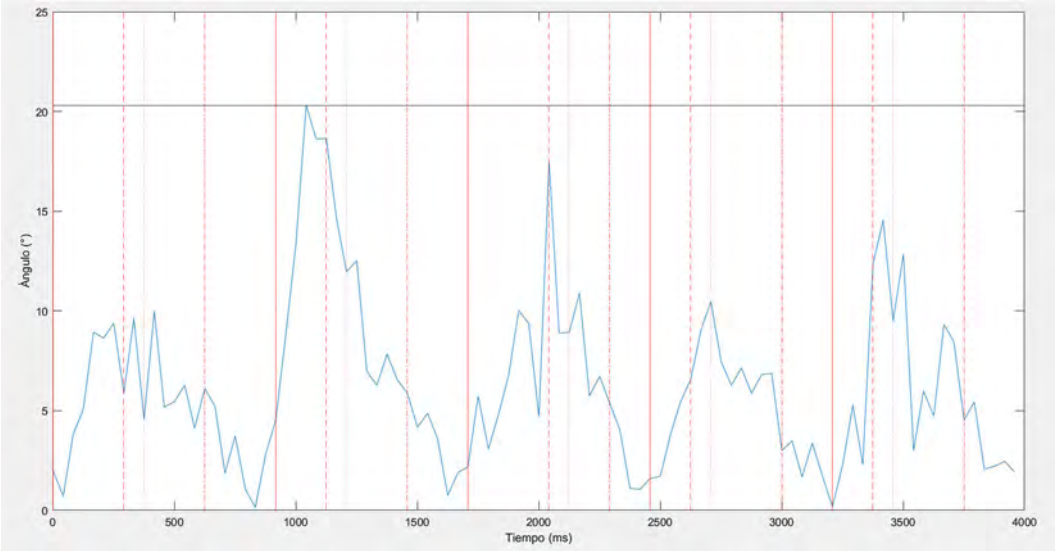


Figura 3.8 Gráfica representativa del ángulo de abducción-aducción del hombro obtenida del ensayo piloto.

Análisis de los ángulos en el plano transversal

En cuanto al plano transversal, se midió el ángulo de rotación interna-externa del hombro durante el gesto técnico. El presente análisis se realizó a partir de la observación de la Figura 3.9. El movimiento cíclico obtenido es más pronunciado, al mismo tiempo, se observa que las amplitudes principales de cada ciclo presentan variaciones poco significativas entre ellas. Es importante destacar que el ángulo de rotación interna-externa del hombro contribuye al movimiento horizontal del brazo, sin embargo, este movimiento tiende a ser más constante en comparación a los ángulos de abducción-aducción de acuerdo con lo obtenido en este ensayo. Esto sugiere que la rotación interna-externa del hombro es más independiente de la trayectoria horizontal de la pelota, ya que se mantiene relativamente estable a lo largo de los ciclos.

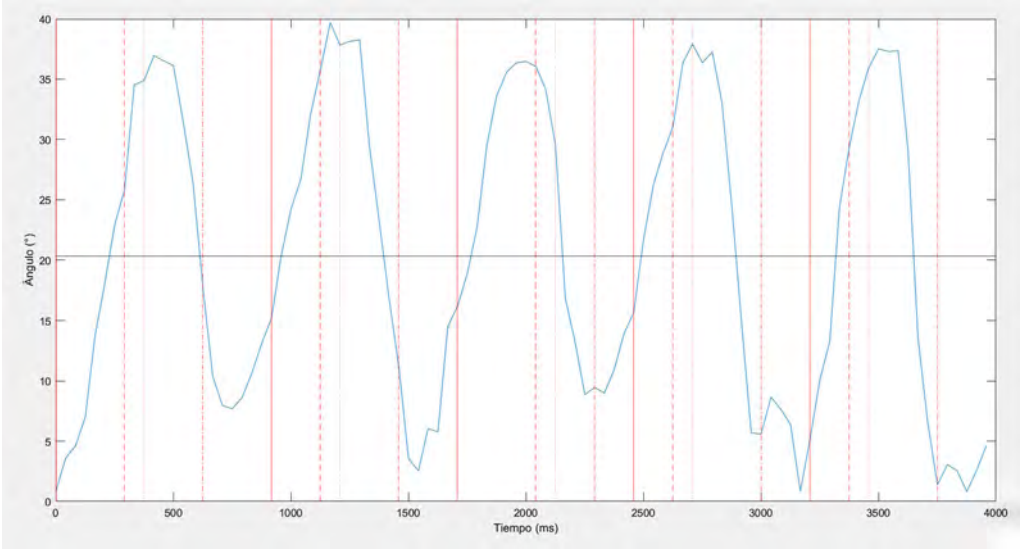


Figura 3.9 Gráfica representativa del ángulo de rotación interna-externa del hombro obtenida del ensayo piloto.

Análisis de los ángulos en el plano sagital

Finalmente, en el plano sagital, se midieron los ángulos de flexión-extensión del hombro, codo y muñeca. Las figuras que acompañan el presente análisis van desde la Figura 3.10 a la Figura 3.12. Aquí se pudo observar que los ángulos del hombro y el codo presentan un movimiento cíclico más marcado, con amplitudes similares en cada ciclo. Se resalta aquí que dichos movimientos son responsables del movimiento vertical del brazo. Los resultados sugirieron que, a pesar de ello, estos ángulos no son dependientes de la trayectoria vertical de la pelota. Es decir, en la trayectoria vertical de la pelota, esta va hacia a la mano en lugar de la mano hacia ella. Por último, para el caso de la muñeca, si bien se pueden observar ciertos patrones cíclicos, su gráfica destaca por su gran variedad de puntos. Esto da un acercamiento sobre como el movimiento de la muñeca es clave al momento de atrapar la pelota, ya que los picos sugieren que el participante adapta el movimiento de la muñeca con el objetivo de atrapar la pelota.

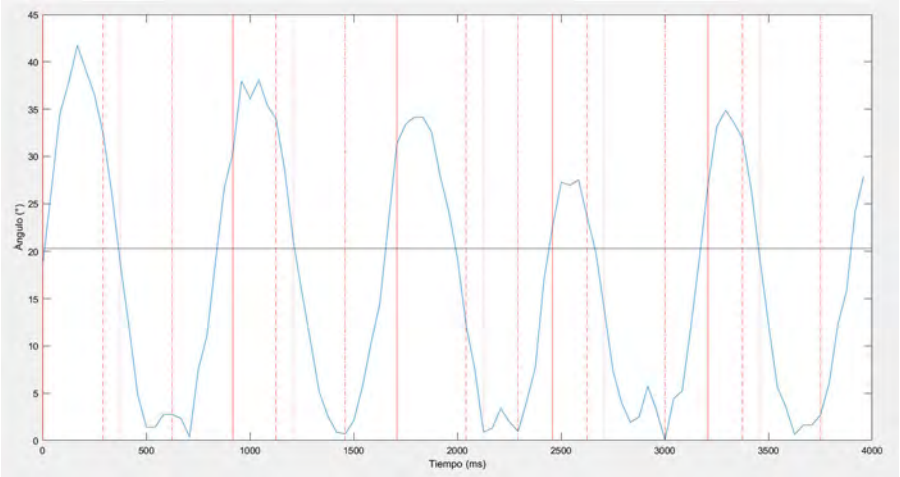


Figura 3.10 Gráfica representativa del ángulo de flexión-extensión del hombro obtenida del ensayo piloto.

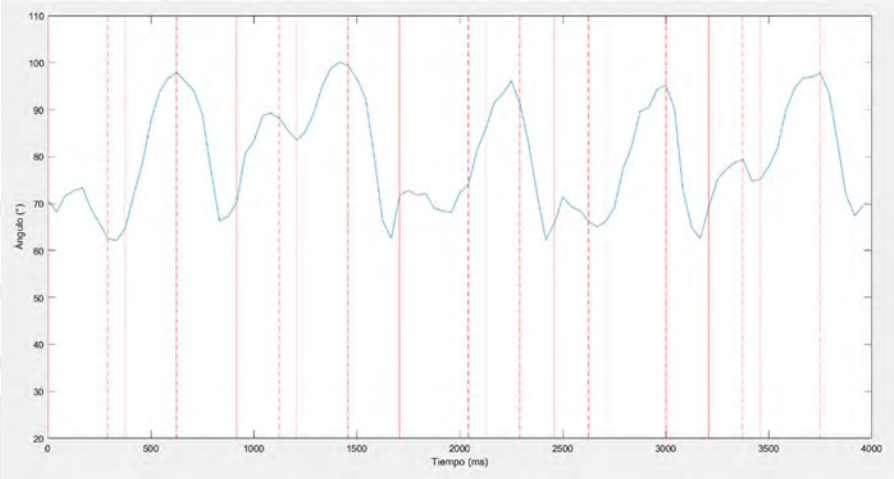


Figura 3.11 Gráfica representativa del ángulo de flexión-extensión del codo obtenida del ensayo piloto.

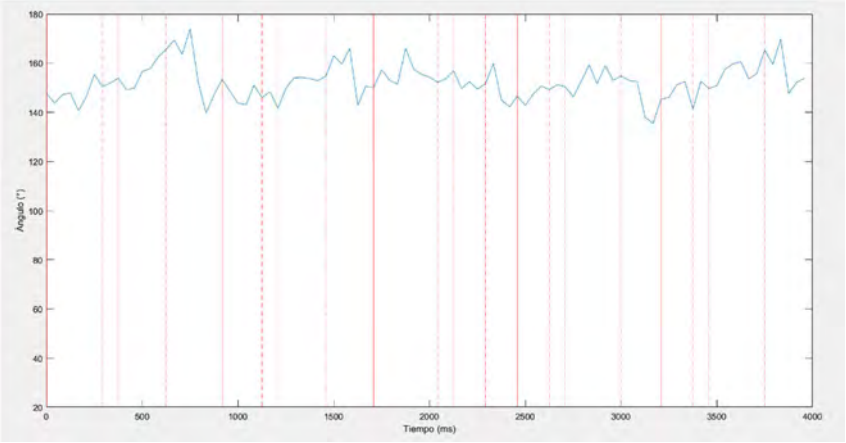


Figura 3.12 Gráfica representativa del ángulo de flexión-extensión de la muñeca obtenida del ensayo piloto.

El tiempo final considerado para el primer ensayo fue de 4333 milisegundos, el cual marcaría el inicio de un sexto ciclo, el cuál fue descartado al no estar completo, es decir, no contar con sus 4 fases totales. Además, se consideró como tiempo inicial 0 milisegundos, el cual representa el inicio del primer ciclo completo. Se consideró también una línea horizontal de color negro en cada gráfica que señala el ángulo máximo obtenido en el rango de tiempo anteriormente definido. Los valores de dichos ángulos se encuentran organizados en la Tabla 3.1. Asimismo, el tiempo aproximado de cada ciclo se puede encontrar en la Tabla 3.2; en la que se consideró un ciclo desde el instante en que inicia la fase de vuelo del ciclo en cuestión hasta el instante en que inicia la fase de vuelo del siglo inmediato siguiente. Finalmente, la duración de cada fase se puede observar en la Tabla 3.3.

Tabla 3.1 Ángulos máximos durante la realización de la prueba piloto en el gesto técnico del malabarismo.

Movimiento	Ángulo Máximo (°)
Abducción-aducción del hombro	20.31
Rotación interna-externa del hombro	39.69
Flexión-extensión del hombro	41.73
Flexión-extensión del codo	100.13
Flexión-extensión de la muñeca	173.89

Tabla 3.2 Duración aproximada de cada ciclo

Ciclo	Tiempo (milisegundos)
Ciclo 1	917
Ciclo 2	791
Ciclo 3	750
Ciclo 4	750
Ciclo 5	750

Tabla 3.3 Duración de cada fase en los diferentes ciclos

Ciclo	Tiempo de cada fase (milisegundos)			
	Vuelo	Impacto	Preparación	Lanzamiento
Ciclo 1	292	83	250	292
Ciclo 2	208	83	250	250
Ciclo 3	334	83	167	166
Ciclo 4	167	83	292	208
Ciclo 5	167	83	292	208
Tiempo Promedio	233.6	83	250.2	224.8

3.4 Discusión de los resultados obtenidos del ensayo piloto

En un primer instante, observando las gráficas, es posible apreciar un patrón cíclico, sugiriendo así una suma de sinusoidales. Sin embargo, la amplitud máxima, es decir, el ángulo máximo obtenido en cada ciclo puede variar. La muestra tomada del ensayo piloto incluyó un total de cinco ciclos completos de un movimiento continuo, con una duración promedio de 791.6 milisegundos por ciclo. El primer ciclo tuvo una duración significativamente mayor, siendo esta de 917 milisegundos, en comparación con el promedio. A partir del segundo ciclo, el tiempo de duración disminuyó de forma progresiva hasta alcanzar una estabilidad alrededor de los 750 milisegundos. Este cambio sugiere que el participante inició el movimiento de una forma más lenta, posiblemente buscando una mejor estabilidad y concentración. A medida que el movimiento continúa, el tiempo de cada ciclo disminuye, lo que podría indicar una mayor fluidez y confianza ejecutando la técnica, esto es posible interpretarlo como una mayor rapidez para realizar los malabares. Estos resultados ofrecen indicios sobre la forma en que el participante se adapta y perfecciona con el tiempo. Sin embargo, es necesario aplicar el protocolo en otros participantes con el fin de observar si la característica en cuestión se repite. Esto deberá tenerse en consideración se si se desea emplear el malabarismo al momento de proponer terapias de rehabilitación o prevención.

Análisis de los resultados preliminares con relación a la cinemática del malabarismo

Estos resultados preliminares ofrecen una perspectiva relevante sobre la cinemática del hombro, codo y muñeca durante la práctica del malabarismo. Los resultados indican que cada articulación tiene un papel específico en la ejecución del movimiento, siendo la coordinación entre ellas esencial para lograr una ejecución exitosa del gesto. Esto coincide con los estudios realizados por Ruffaldi (2011), Huys (2002) y Rodríguez (2016) mencionados anteriormente en el estado del arte. Debe considerarse también que los resultados se extrajeron de una sola participante, por lo tanto, es necesario ampliar la muestra antes de caracterizar el movimiento en su totalidad.

Análisis de resultados preliminares con relación a las terapias de miembro superior

La información recopilada en el presente estudio piloto presenta implicaciones para las terapias de rehabilitación y prevención de lesiones en el miembro superior. En estudios

relacionados con el desarrollo de terapias, como el uso de juegos serios [Cuesta, 2020] [Waliño, 2019] o el desarrollo de dispositivos [Guillén, 2021] [Alberti, 2022], estas se diseñan usando movimientos repetitivos, es decir, se establece un patrón de movimiento específico para estimular cada articulación. En este contexto, las articulaciones que presentan un movimiento cíclico durante la ejecución del gesto técnico del malabarismo en cascada con tres pelotas son las que entrarían en dicha definición, siendo por lo tanto las más probables de trabajar al diseñar una terapia basada en dicho gesto. Las articulaciones mencionadas son las del hombro y el codo, ambos con el movimiento de flexión y extensión para el caso del hombro; también se considera el movimiento de rotación interna y externa. De acuerdo con el alcance del estudio, este se enfocará en las articulaciones mencionadas, dejando de lado el movimiento de los dedos.

Otra característica presente en el diseño de terapias, y también de dispositivos para rehabilitación [Narayan, 2021], es el objetivo de imitar el rango de movimiento típico de las articulaciones del miembro superior. En la Tabla 3.4 se pueden encontrar los valores máximos de los rangos de movimiento angulares de las articulaciones del miembro superior, los valores se han modificado del estudio de Doriot [2006] de acuerdo con el nivel de referencia usado para tomar medidas en el presente estudio. De acuerdo con los valores obtenidos y registrados en la Tabla 3.1, los ángulos máximos del movimiento del hombro son considerablemente menores a los del rango normal de una persona. Los ángulos del codo y la muñeca son más amplios, sin embargo, siguen siendo considerablemente menores a los ángulos encontrados en el estudio.

Tabla 3.4 Rango de movimiento de las articulaciones del miembro superior [Doriot, 2006]

Articulación	Movimiento	Rango (°)
Hombro	Abducción - Aducción	129
	Flexión - Extensión	128
	Rotación Interna - Externa	119
Codo	Flexión - Extensión	162
Muñeca	Flexión - Extensión	240

En la literatura revisada, los métodos de rehabilitación buscaban aumentar en la medida de los posible el rango de movimiento de las articulaciones hasta acercarse al rango de movimiento normal. De acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo

piloto, si se desea aplicar el malabarismo en el diseño de terapias es necesario investigar si es posible aumentar el rango de movimiento de este.

Por lo tanto, dado que los resultados del ensayo piloto apuntan a que es posible la aplicación del gesto técnico del malabarismo en terapias de rehabilitación y prevención de lesiones en el miembro superior, esta debe ser aprovechada de forma estratégica considerando las limitaciones de los bajos valores de los ángulos, así como el requisito de la concentración y coordinación requeridos al momento de utilizar la técnica. Los indicios del malabarismo en terapias de prevención se pueden ver más claramente, esto debido a que estimula de manera constante las articulaciones, evitando así lesiones por sedentarismo. En el caso de terapias de rehabilitación, su uso puede ser enfocado principalmente en terapias no intensivas o que no requieran de un amplio rango de movimiento.

Debe considerarse que el movimiento se caracteriza por ser repetitivo, tener un rango de movimiento corto en comparación con el rango de movimiento normal de una persona, y por realizarse de forma consecutiva únicamente en un periodo de tiempo menor a un minuto. En cuanto a las articulaciones se refiere, este movimiento genera una tensión acumulada en los músculos que rodean dichas articulaciones, generando fatiga si el movimiento en general se realiza por un tiempo prolongado. Por lo tanto, es necesario tomar en cuenta dicho riesgo al momento de ser utilizado en el ámbito de las terapias de rehabilitación o prevención. Esto último puede ampliarse si se realizan estudios clínicos a futuro sobre el uso del malabarismo como técnica de rehabilitación.

3.5 Recomendaciones para futuros ensayos

Una vez finalizada la discusión de los resultados obtenidos, se presentan recomendaciones con la finalidad de mejorar la metodología y optimizar la realización del estudio. Las recomendaciones presentadas a continuación se basan en las observaciones, desafíos y resultados obtenidos luego de la implementación del protocolo en un ensayo piloto. De tal forma, se busca garantizar una investigación precisa para el correcto análisis biomecánico del gesto técnico del malabarismo aplicado en la rehabilitación y prevención de lesiones en el miembro superior.

Uno de los principales desafíos durante la preparación del set de grabación fue la configuración de la cámara perpendicular al plano transversal. Al encontrarse instalada en el techo no fue posible realizar un seguimiento de su grabación durante todo el tiempo, por lo que se recomienda, previo a la toma de futuras pruebas, establecer un método de comunicación entre el dispositivo móvil Xiaomi 11T PRO / 2107113 SG y una computadora con el propósito de monitorear en todo momento lo grabado por la cámara, así como iniciar y pausar la grabación.

Se recomienda también realizar una configuración previa de las cámaras y tomar nota del número de fotogramas por segundo en que se está grabando, esto con el fin de usarse para calibraciones posteriores en el software Kinovea. Asimismo, es posible que no sean necesarias las mediciones anatómicas. Esto último debido a que al momento de realizar las ecuaciones detalladas en la Sección 3.1 para encontrar los ángulos las unidades de distancia se anulan, siendo así irrelevantes al momento de hacer cálculos. Para ello se recomienda emplear un nivel para asegurarse que la lente de la cámara se encuentra lo más paralela posible al plano que se desea grabar.

En cuanto al posicionamiento de los marcadores, se recomienda mover el marcador del brazo en el plano frontal de forma proximal al hombro, esto debido a que, al momento de realizar el movimiento de flexión del codo, el antebrazo bloquea temporalmente la vista del marcador. La sincronización de video se puede realizar de forma práctica solamente con un destello de luz en lugar de dos. Finalmente, el tiempo de realización de la técnica puede ser disminuido a aproximadamente 15 segundos, debido a que es tiempo suficiente para realizar más de 5 ciclos completos y asegurar la comodidad del participante.

3.5.1 En la comunicación con la cámara transversal

De acuerdo con los desafíos mencionados y con la finalidad de establecer un método para monitorear y controlar la cámara del dispositivo Xiaomi 11T PRO / 2107113 SG en tiempo real durante la grabación del plano sagital, se eligió la aplicación AnyDesk como herramienta de acceso remoto. La ubicación de la cámara en el techo representó un desafío durante la ejecución del ensayo preliminar, esto debido a que dificulta la supervisión visual directa en la toma de datos y el control para el inicio y fin de la grabación. En este contexto,

la aplicación AnyDesk facilita la labor de monitoreo, así como la posibilidad de iniciar y pausar la grabación desde un dispositivo remoto como una laptop o computadora. La aplicación en cuestión permite tener un acceso remoto de cualquier dispositivo desde otro dispositivo diferente, siempre y cuando se le permita el acceso.

3.5.2 En la posición alternativa para marcadores en el plano frontal

En lo relacionado a la posición de los marcadores ubicados en el plano frontal, es decir, los marcadores F_S y F_a, se recomienda moverlos hacia el reverso como se observa en la Figura 3.14 manteniendo las distancias. Esto se debe a que, como puede observarse en la Figura 3.13, durante unos instantes el movimiento, el brazo del participante bloquea la visión de los marcadores, dificultando su seguimiento en todo instante de tiempo. Sin embargo, la vista del anverso frontal es necesaria al momento de realizar el análisis, ya que nos sirve como referencia para dividir el movimiento por fases. Por lo tanto, se propone también cambiar el sistema de grabación de 3 cámaras a un sistema de grabación de 4 cámaras como se muestra en la Figura 3.15. Considerando la disponibilidad de recursos, se utilizará una cámara de video Panasonic HC-VX980.

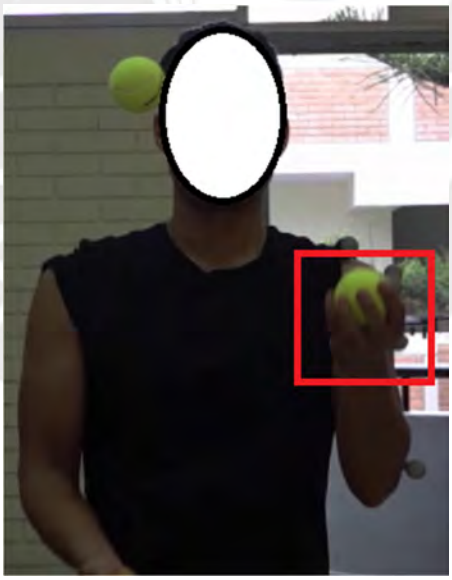


Figura 3.13 Fragmento del video donde se muestra el bloqueo de los marcadores, extraído de los videos previos al procesamiento con Kinovea.

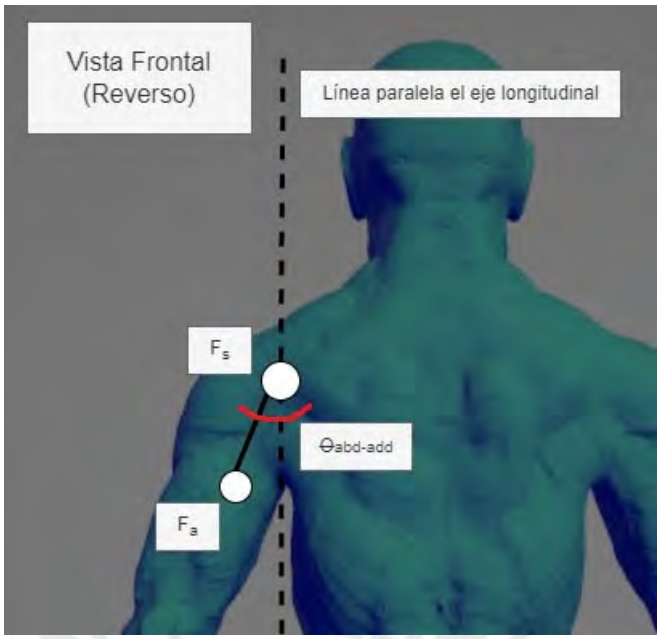


Figura 3.14 Posición alternativa de los marcadores en el plano frontal (reverso)

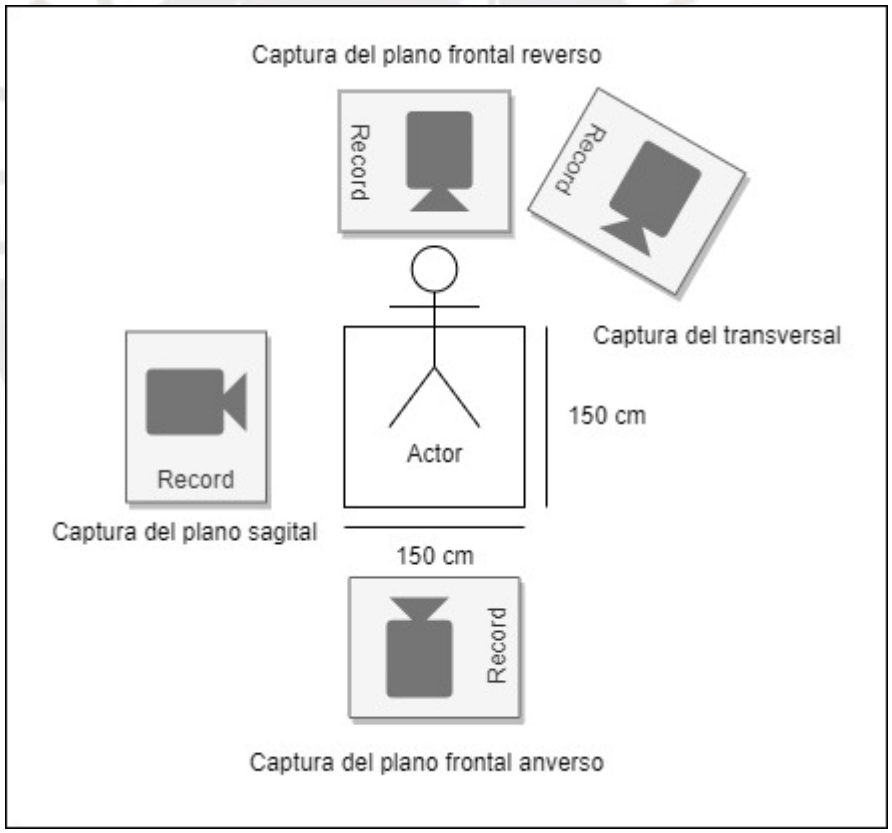


Figura 3.15 Sistema de grabación alternativo de 4 cámaras. Las cámaras se encuentran ubicadas en el plano sagital, transversal y frontal anverso y reverso.

3.5.3 En la instalación y configuración previa de las cámaras

De acuerdo con lo documentado anteriormente, se propone el uso de un nivel al momento de instalar las cámaras, esto con la finalidad de asegurarse que la lente se encuentre lo más perpendicular posible al plano que se desea grabar. De este modo, al momento de realizar el procesamiento con el software Kinovea, la perspectiva y proporciones serán lo más precisas posibles. La instalación de las cámaras continuará de forma similar a lo anteriormente planteado en el protocolo, el cual define el uso de dos trípodes y un soporte para celular en el caso del plano transversal, sin embargo, a este paso se le añadirá el uso de un nivel para alinear la cámara. Esto se recomienda tomar en cuenta tanto para las cámaras digitales como para la cámara del dispositivo móvil.

En lo relacionado a las cámaras de video digitales SONY / FDR AX 700, se debe usar la guía de ayuda para configurar el modo de cámara lenta [Sony Corporation, 2017]. En cuanto la cámara del dispositivo móvil Xiaomi 11T PRO / 2107113 SG, la configuración del modo cámara lenta se puede realizar desde la propia aplicación de grabación. En el caso de la cámara añadida, Panasonic HC-VX980, esta cuenta con un modo de configuración en cámara lenta de acuerdo con su manual de usuario, los pasos a seguir serán los detallados en dicho manual. El término cámara lenta se refiere a la captura de video a una velocidad de fotogramas mayor que la velocidad real de reproducción, en ambos casos se consideró una velocidad de 120 fotogramas por segundo, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de fotogramas sin perder calidad de imagen.

3.6 Implementación del segundo ensayo piloto

Con el objetivo de validar los cambios realizados a partir de las recomendaciones redactadas, se ha realizado un segundo ensayo piloto. Al ser las recomendaciones enfocadas en el arreglo de las cámaras y de los marcadores, y considerando la disponibilidad y tiempo requeridos para encontrar participantes, se ha realizado la validación con un participante sin experiencia regular al momento de realizar malabares. Por lo tanto, se tomó en cuenta el movimiento realizado por los brazos con una sola pelota.

La realización del segundo ensayo piloto se realizó siguiendo los pasos del protocolo inicial, salvo las consideraciones anteriores. Se utilizaron 4 cámaras en total siguiendo la referencia de la Figura 3.15. Asimismo, los marcadores posicionados en el plano frontal fueron cambiados de vista. Anteriormente estos se encontraban capturados por una cámara con vistas al anverso del participante, sin embargo, por motivos de eficiencia, estos fueron capturados por una cámara ubicada con vistas al reverso del participante, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 3.14. Los cambios realizados supusieron una respuesta al problema del bloqueo de los marcadores en el plano frontal, permitiendo así un mejor seguimiento. Sin embargo, el nuevo arreglo de cámaras supuso también otros desafíos al momento de implementar el ensayo.

3.6.1 Consideraciones y cambios

Acorde con los resultados obtenidos a partir de la implementación del segundo ensayo piloto se obtuvieron una serie de consideraciones para los futuros ensayos a realizar. Estas se enfocaron principalmente en la iluminación requerida al momento de realizar las pruebas, lo cual afecto al momento de realizar el procesamiento con el software Kinovea ya que complicaba al momento de realizar el seguimiento de los marcadores. Asimismo, se realizaron una serie de cambios en el protocolo con la finalidad de aumentar su efectividad al momento de tomar y procesar los datos.

Sincronización de video

Al ser un mayor número de cámaras enfocando en múltiples direcciones al participante, se dificulta la sincronización de video haciendo uso de una linterna, esto debido a que no todas las cámaras captan la luz emitida por la misma. Una alternativa que ha demostrado ser efectiva es el uso de una palmada como referencia, a su vez, esta servirá como señal para dar entender al participante que inicie con la ejecución del movimiento. Al momento de procesar los videos en el programa de edición DaVinci Resolve para su sincronización, el programa detecta en el audio el momento exacto en que se da la palmada como se muestra en la Figura 3.16.

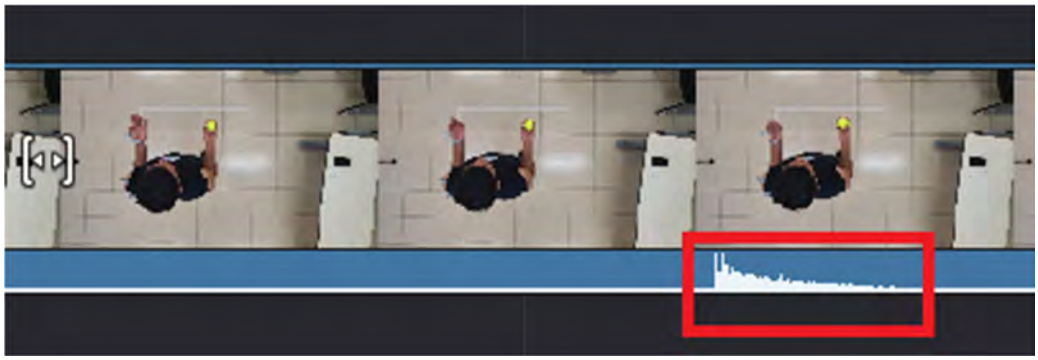


Figura 3.16 Fragmento del programa de edición DaVinci Resolve, la parte encerrada con el rectángulo rojo representa el instante en que la cámara capta la palmada

Iluminación

Cuando se realizó el procesamiento del video en el plano frontal con vistas al reverso, se pudo apreciar un problema con la iluminación del video (referencia Figura 3.17). Esto a su vez causo problemas al momento de procesar el video en el software Kinovea, ya que era más complicado para el programa realizar el seguimiento de los marcadores. Por lo tanto, y considerando también la reflectividad de los marcadores, se van a usar luminarias (referencia Figura 3.18) en conjunto con las cámaras de los planos sagital y frontal con vistas al anverso, los cuales son dos de los planos en los cuales se realizará el seguimiento de los marcadores.

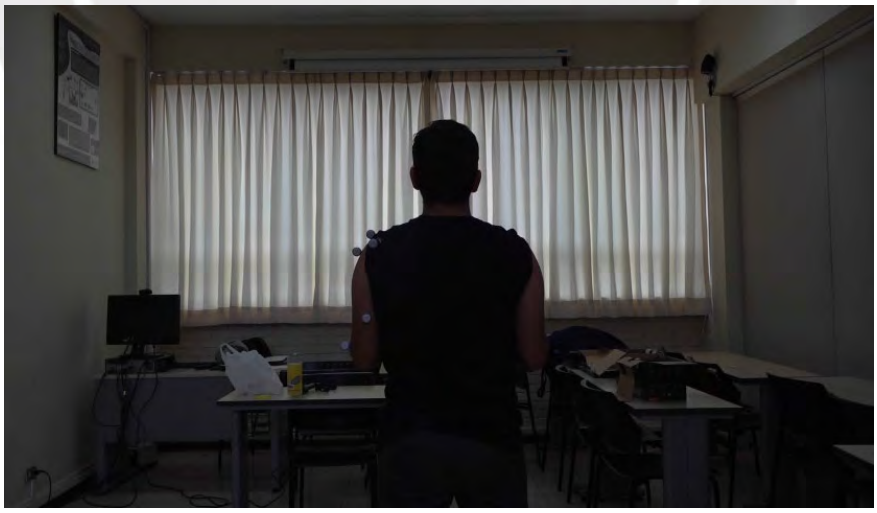


Figura 3.17 Fotograma del video grabado en el plano frontal con vistas al anverso.

Figura 3.18 Luminaria usada para la captura de movimiento.

Configuración de las cámaras y velocidad de los fotogramas

De acuerdo con lo visto experimentalmente al momento de realizar las grabaciones, las cámaras digitales SONY / FDR AX700 graban de forma predetermina a una velocidad de 120 fotogramas por segundo, por lo que la configuración en cámara lenta aplicaría para el dispositivo móvil Xiaomi 11T PRO / 2107113SG. En ambos casos, al momento de exportar el video la velocidad de grabación no afecto a la velocidad de reproducción de este. Sin embargo, en el caso de la cámara digital Panasonic HC-VX980, la velocidad de reproducción varía al momento de exportarlo.

Asimismo, no se capturó el audio al momento de grabar en el plano frontal con vistas al anverso, por lo que no fue posible usarlo como referencia para dividir el movimiento por fases al momento de obtener las gráficas (referencia Figura 3.19). Para evitar estos problemas, y considerando que la grabación en el plano frontal anverso no se usará para realizar el seguimiento de marcadores, se grabará de forma predeterminada con dicha cámara.

Finalmente, cabe resaltar que el software de edición DaVinci Resolve solo permite exportar los videos una vez editados a una velocidad de 60 fotogramas por segundo. Esto afecta mayormente al procesamiento de los videos, sin embargo, no afecta al proceso de captura de estos. En caso se requiera, es posible considerar el uso de otro programa una vez los datos sean adquiridos.

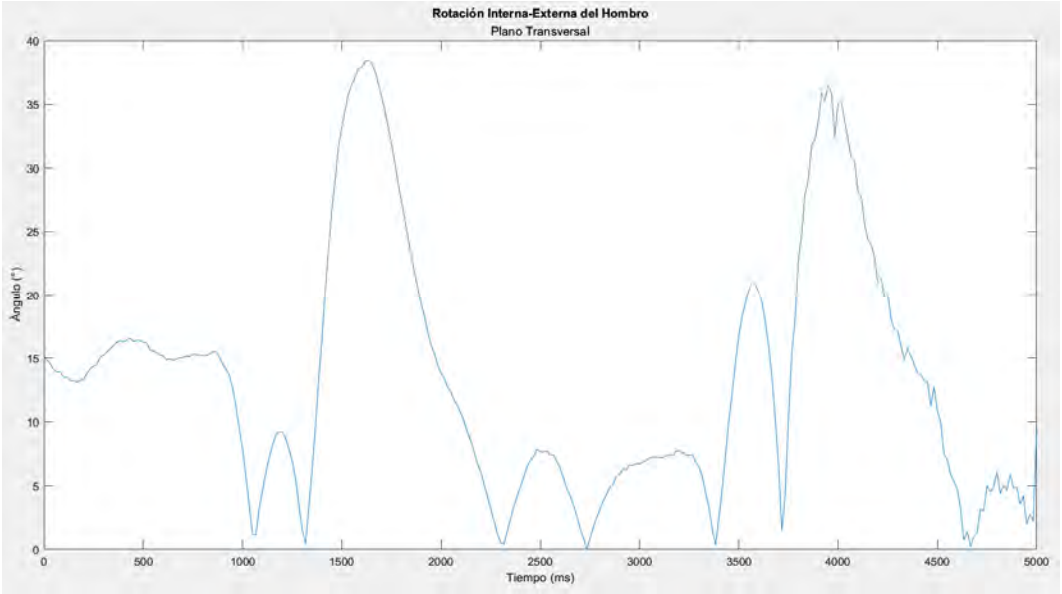


Figura 3.19 Imagen referencial de una de las gráficas resultantes.

Una vez finalizada con la realización de las dos pruebas piloto con su respectivo análisis y consideraciones, se pudo obtener una versión final del protocolo la cuál fue utilizada al momento de realizar las pruebas oficiales. La versión completa puede encontrarse en el Anexo A.

CAPÍTULO 4
EJECUCIÓN DEL PROTOCOLO DE CAPTURA DE MOVIMIENTO

En el presente capítulo se presenta a detalle las actividades y procedimientos realizados para la obtención de datos biomecánicas cuantitativos para la caracterización del movimiento. Se toma en cuenta el proceso relacionado a la convocatoria y selección de los participantes. Además, se documenta también el proceso seguido para la ejecución de las 12 pruebas realizadas con el protocolo final obtenido, así como los resultados obtenidos luego del procesamiento de datos.

4.1 Selección de los participantes

El proceso de selección de los participantes inició con la definición de los criterios de inclusión y exclusión. Esto se realizó con la finalidad de aumentar la probabilidad de obtener resultados fiables, lo que simboliza una correcta caracterización del movimiento a estudiar. Posteriormente, se detallará el proceso de convocatoria realizado para encontrar voluntarios y la forma en que se estableció el contacto con ellos.

4.1.1 Criterios de inclusión y exclusión

El estudio presente en el documento busca extraer valores cuantitativos a momento de ejecutar el gesto técnico del malabarismo en cascada con tres pelotas. Tomando esto en consideración, se toma como principal criterio de inclusión tener regular experiencia al momento de realizar malabares. Además, con el fin de encontrar sujetos

con una biomecánica muscular similar, se busca que el rango de edad se encuentre entre los 18 y 29 años para poder ser voluntario en el estudio.

El principal criterio de inclusión se basó en el estudio realizado por Rodrigues (2016). De acuerdo con este, las personas que no poseen experiencia en el malabarismo presentan dificultados para realizar ajustes posturales de forma anticipatoria, dando como resultado poca estabilidad. Tomando esto en cuenta, se consideró que tener poca experiencia en el malabarismo representa una mejora en el ajuste postural, sin embargo, la estabilidad postural sigue presente. Tener una regular experiencia se traduce en una mayor habilidad para realizar ajustes posturales anticipatorios y tener una mejor estabilidad, esto le permite al malabarista mantener el torso y los pies en una postura casi constante.

El tamaño de la muestra, es decir, la cantidad de 12 participantes se estableció tomando en cuenta la posibilidad de reclutamiento y el tamaño muestral de estudios anteriores que involucran el análisis de un gesto técnico deportivo. Se tomó como ejemplo el estudio realizado por Callupe [2022], Ozawa [2019], Reeser [2010] y Tilp [2008], donde participaron 6, 20, 14 y 8 personas voluntarias respectivamente. En base a estos estudios se definió también el rango de edad de los participantes. De acuerdo con la revisión, se puede obtener un amplio rango de edad que va desde los 18 años [Callupe, 2020] hasta los 29 años [Tilp, 2008]. Asimismo, el rango de edad se justifica con el cambio de la biomecánica muscular debido a la edad, donde, al aumentar la edad, los músculos tienden a volverse rígidos y, por lo tanto, más difíciles de contraer.

Los criterios de exclusión se definieron con la finalidad de evitar perjuicios a los participantes y reducir riesgos. Por ello, se excluirán a los sujetos que presenten reacciones alérgicas al contacto con adhesivos, algodón o alcohol. Esto debido a que, durante la fase de preparación del participante del protocolo, su piel entrará en contacto con dichos materiales. Asimismo, se excluirán a los sujetos que presenten lesiones en el miembro superior o falta de movilidad. Esto último es coherente si se considera que se va a realizar un movimiento de forma constante.

4.1.2 Proceso de convocatoria

El proceso de convocatoria se realizó por medio de redes sociales y círculos cercanos a las personas involucradas en el proyecto. Se cercioró que los voluntarios cumplieran con los criterios de inclusión y exclusión para su selección. Una vez completada la selección, se mantuvo contacto con los participantes por medio de redes sociales y/o correo electrónico. El proceso incluyó la difusión de la convocatoria por medio de redes, por lo cual se crearon avisos y publicaciones, los detalles pueden encontrarse en el Anexo D.

4.2 Ejecución de los ensayos

Una vez obtenida la confirmación de los participantes, se procedió a realizar la ejecución de los ensayos de acuerdo con lo detallado con la versión final del Protocolo para el análisis cinemático de movimiento en el gesto técnico del malabarismo para la prevención o recuperación física de miembros superiores, el cual se encuentra descrito en el Anexo A.

4.2.1 Preparación del set de grabación

Como se detalla en el protocolo, previo a la llegada del participante se acondicionó el entorno para la correcta grabación del participante ejecutando el gesto técnico del malabarismo. Para ello se utilizaron las cámaras de video digitales, la cámara de celular, las luminarias y los trípodes. Al mismo tiempo, para determinar un área donde el participante debe posicionarse se usó la cinta de enmascarar. Para determinar la correcta distancia de las cámaras al área donde se ubicó el participante se utilizó la cinta métrica. Al mismo tiempo, para alinear la cámara perpendicularmente se utilizó el nivel, esto último se puede observar en la Figura 4.1. El arreglo utilizado de cámara y luminaria puede observarse en la Figura 4.2. Finalmente, el arreglo total de cámaras puede encontrarse en la Figura 4.3.

Figura 4.1 Alineamiento de las cámaras utilizando un nivel con el objetivo de tener la lente perpendicular al plano que se desea grabar.

Figura 4.2 Arreglo de la luminaria y la cámara correspondiente. Este arreglo se usó en los planos sagital y frontal reverso, la lenta y la cara de la luminaria se encuentran enfocando al plano que se desea grabar.

Figura 4.3. Arreglo total de las cámaras utilizado para la grabación del participante. El círculo rojo muestra el área donde se posicionará el participante.

4.2.2 Preparación del participante y toma de muestras

Siguiendo con los lineamientos del protocolo, se preparó al participante para la grabación y posterior correcta obtención de datos. Para ello, se le brindó la información correspondiente y se le hizo firmar el protocolo de consentimiento informado detallado en el Anexo B. Seguidamente, se le ubicaron los marcadores en los puntos establecidos. Los marcadores pueden observarse ubicados en la vista frontal reverso, sagital y transversal en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 respectivamente. Los marcadores se posicionaron en el brazo izquierdo.

Figura 4.4 Marcadores ubicados en el participante en el plano frontal reverso. Los marcadores específicos del plano se encuentran dentro de los círculos rojos.

Figura 4.5 Marcadores ubicados en el participante en el plano frontal sagital. Los marcadores específicos del plano se encuentran dentro de los círculos rojos.

Figura 4.6 Marcadores ubicados en el participante en el plano frontal transversal. Los marcadores específicos del plano se encuentran dentro de los círculos rojos.

Una vez posicionados los marcadores, se le indició al participante donde posicionarse y la posición inicial que debe adoptar antes de iniciar el movimiento. Seguidamente, se inició la grabación con las 4 cámaras y se le indició que inicia el movimiento luego de escuchar una palmada. La postura inicial se puede observar en la Figura 4.7. Finalmente, pasados 15 segundos, se le indició que finalicé con la ejecución del movimiento y se terminó con la grabación en las 4 cámaras.

Figura 4.7. Postura inicial para la ejecución del gesto técnico del malabarismo.

4.2.3 Procesamiento de datos

Una vez obtenidas las grabaciones necesarias, estas se exportaron en formato MP4 a una computadora que contenga los softwares DaVinci Resolve, Kinovea, Excel y Matlab. En este proceso tiene como objetivo final obtener gráficas con los rangos de movimientos angulares a través del tiempo de las diversas articulaciones del miembro superior. Para ejemplificar el proceso se utilizará el ángulo de abducción-aducción del hombro en el plano frontal, para ello se tomó la Sesión 3.

Sincronización de video

El primer paso del procesamiento de datos de acuerdo con el protocolo planteado fue realizar una sincronización de los 4 videos obtenidos, cada uno de diferentes cámaras. Los videos fueron grabados en simultáneo, sin embargo, no se ha determinado aún un fotograma inicial igual para todos ellos. Para esto, se ubica el fotograma en que inicia la palmada y se descartan todos los fotogramas anteriores a ello, esto puede realizarse visualizando el audio del video en el programa DaVinci Resolve y utilizando la función de cortar. En la Figura 4.8 puede observarse una imagen referencial de este proceso. Posteriormente, se consideraron 11 segundos después del fotograma inicial y

se usó nuevamente la función de corte, de esta manera se determinó el tiempo final de los videos.

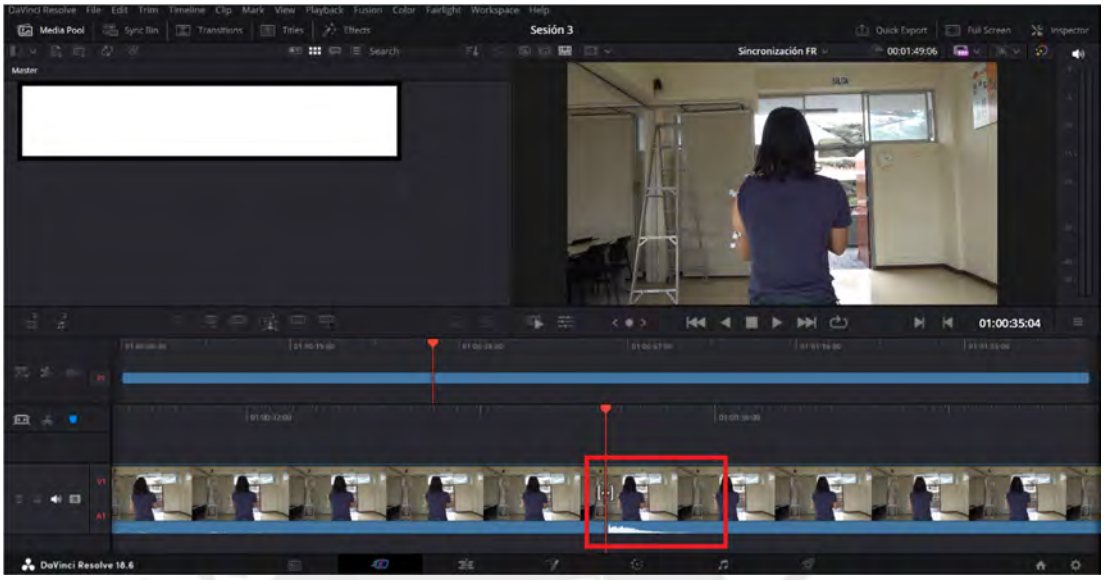


Figura 4.8 Interfaz del software de edición de video DaVinci Resolve para la sincronización de los videos. El instante en que se da la palmada se encuentra encerrado en el rectángulo rojo.

Seguimiento de los marcadores

Siguiendo con el procedimiento establecido en el protocolo, una vez obtenidos los videos sincronizados, se procedió a realizar un seguimiento de los marcadores con ayuda del software Kinovea. Para ello, primero se definió un área de trabajo en el video a procesar, esta se consideró desde el milisegundo 0 hasta el milisegundo 10000. Posteriormente, se ubicó el sistema de referencia del programa en la esquina inferior izquierda, de tal modo que los valores obtenidos sean siempre positivos, y se realizó un seguimiento de los marcadores con la herramienta “Seguir trayectoria” del mismo software. Una vez finalizado este proceso se exportaron los datos y por cada video se obtuvieron dos resultados, un video en formato Matroska con la trayectoria de los marcadores y un archivo en formato Excel con la ubicación de los marcadores en cada instante de tiempo. La ilustración del proceso se muestra en la Figura 4.9.

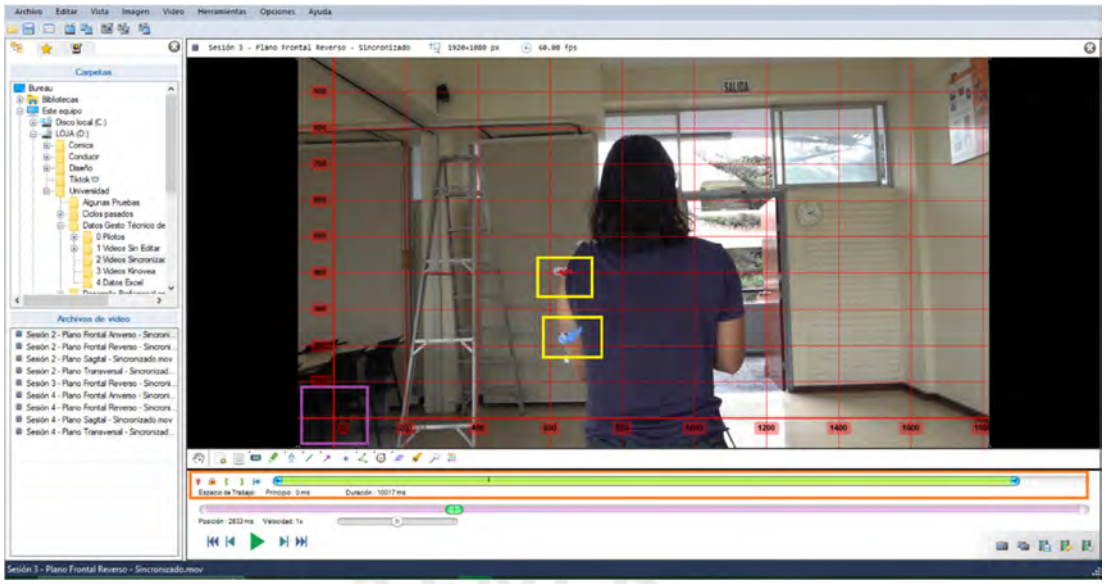
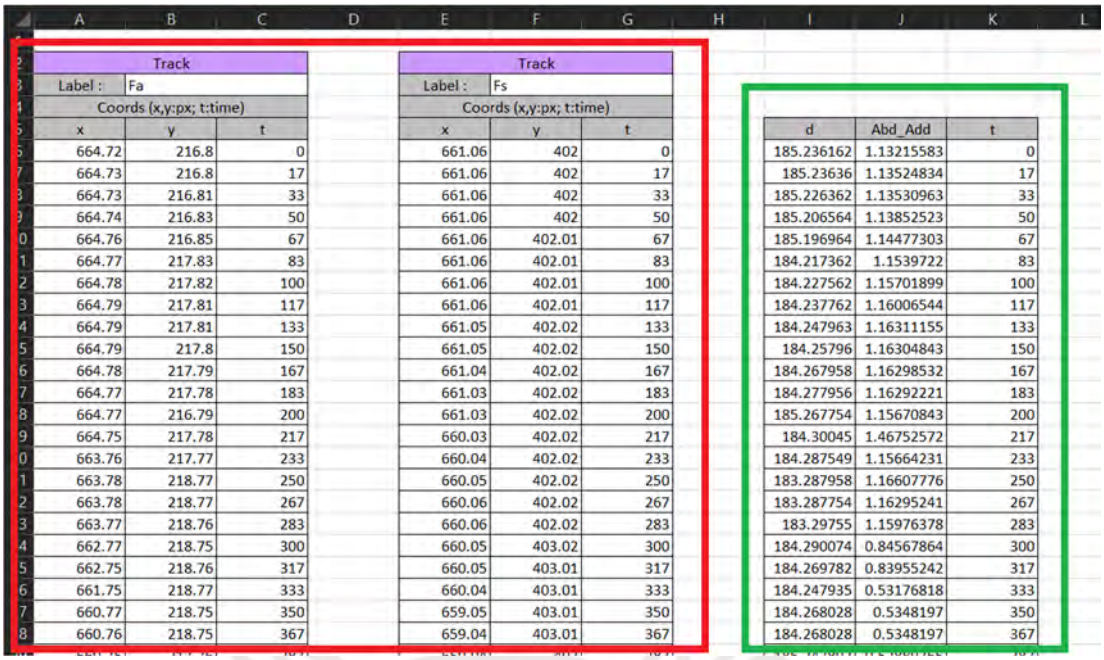


Figura 4.9 Interfaz del software Kinovea para el seguimiento de los marcadores en el plano frontal. El área de trabajo se encuentra encerrada en el rectángulo naranja, los marcadores y su trayectoria se encuentran encerrados en los rectángulos amarillos y el centro del eje de coordenadas se encuentra encerrado en el rectángulo morado.

Estimación de los ángulos

Una vez obtenido el archivo en formato Excel, se procedió a realizar los cálculos necesarios para la obtención de los ángulos. Esto se realizó empleando las fórmulas de Excel y las ecuaciones obtenidas en las consideraciones matemáticas. En el caso del plano frontal, se busca obtener el ángulo de abducción-aducción del hombro. El proceso se ilustra en la Figura 4.10. Cada marcador contiene su coordenada en X e Y, así como su tiempo correspondiente expresado en milisegundos. Los cálculos realizados con tienen los valores de “d” que representa la distancia entre los puntos y “Abd-Add” que represente el ángulo de abducción-aducción del hombro en el plano frontal. Cada ángulo se encuentra relacionado con su respectivo instante de tiempo.



Track		
Label :	Fa	
Coords (x,y:px; t:time)		
x	y	t
664.72	216.8	0
664.73	216.8	17
664.73	216.81	33
664.74	216.83	50
664.76	216.85	67
664.77	217.83	83
664.78	217.82	100
664.79	217.81	117
664.79	217.81	133
664.79	217.8	150
664.78	217.79	167
664.77	217.78	183
664.77	216.79	200
664.75	217.78	217
663.76	217.77	233
663.78	218.77	250
663.78	218.77	267
663.77	218.76	283
662.77	218.75	300
662.75	218.76	317
661.75	218.77	333
660.77	218.75	350
660.76	218.75	367

Track		
Label :	Fs	
Coords (x,y:px; t:time)		
x	y	t
661.06	402	0
661.06	402	17
661.06	402	33
661.06	402	50
661.06	402.01	67
661.06	402.01	83
661.06	402.01	100
661.06	402.01	117
661.05	402.02	133
661.05	402.02	150
661.04	402.02	167
661.03	402.02	183
661.03	402.02	200
660.03	402.02	217
660.04	402.02	233
660.05	402.02	250
660.06	402.02	267
660.06	402.02	283
660.05	403.02	300
660.05	403.01	317
660.04	403.01	333
659.05	403.01	350
659.04	403.01	367

d	Abd_Add	t
185.236162	1.13215583	0
185.23636	1.13524834	17
185.226362	1.13530963	33
185.206564	1.13852523	50
185.196964	1.14477303	67
184.217362	1.1539722	83
184.227562	1.15701899	100
184.237762	1.16006544	117
184.247963	1.16311155	133
184.25796	1.16304843	150
184.267958	1.16298532	167
184.277956	1.16292221	183
185.267754	1.15670843	200
184.30045	1.46752572	217
184.287549	1.15664231	233
183.287958	1.16607776	250
183.287754	1.16295241	267
183.29755	1.15976378	283
184.290074	0.84567864	300
184.269782	0.83955242	317
184.247935	0.53176818	333
184.268028	0.5348197	350
184.268028	0.5348197	367

Figura 4.10 Interfaz de la hoja de cálculo Excel. Las columnas que contienen la posición de los marcadores se encuentran encerrados en el rectángulo rojo y las columnas que contienen los cálculos realizados se encuentran encerrados en el rectángulo verde.

Elaboración de gráficas

Finalmente, luego de obtener los valores de los ángulos en todo instante de tiempo, es posible importar los datos de la hoja de cálculo en Excel a un archivo en Matlab para obtener una gráfica con los datos requeridos para el análisis. En la Figura 4.11 puede observarse el código base para obtener una gráfica en Matlab por medio de datos en un archivo Excel, los comentarios especifican que acciones realizan las líneas de código. En la Figura 4.12 se puede observar la gráfica final obtenida.

```
%Plano Frontal
%Abducción - Aducción del hombro

plano_frontal = xlsread("Sesión 3 - Plano Frontal Reverso - Excel.xlsx",'J6:K606'); %Importamos datos
abd_add = plano_frontal(:,1)'; %Extraemos los ángulos en un vector
t_frontal = plano_frontal(:,2)'; %Extraemos el tiempo en un vector

%Creamos la gráfica
figure;
subplot(111);
plot(t_frontal,abd_add);
title("Abducción-Aducción del Hombro");
subtitle("Plano Frontal");
xlabel("Tiempo (ms)");
ylabel("Ángulo (°)");
```

Figura 4.11 Código en Matlab utilizado para obtener las gráficas. Las líneas de código se encargan de importar y extraer los datos requeridos para finalmente crear una gráfica.

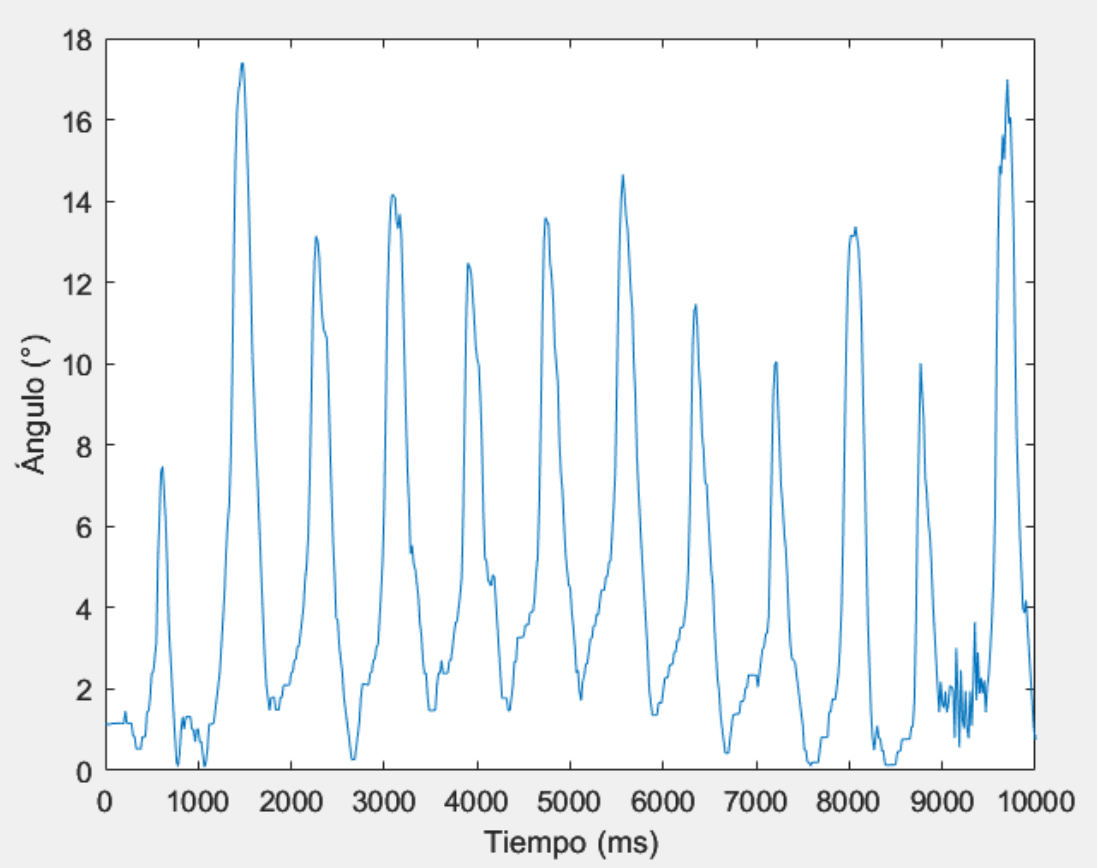


Figura 4.12 Ejemplo de gráfica de salida utilizando el software Matlab. Para este caso en particular puede observarse que el movimiento es cíclico en el movimiento de abducción – aducción del hombro en el plano frontal.

CAPÍTULO 5
ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo tiene como objetivo presentar y analizar los resultados obtenidos tras la realización de las 12 pruebas destinadas a caracterizar el gesto técnico del malabarismo. Estos resultados se presentan en forma de gráficas en función del tiempo, proporcionando una visión detallada de cómo se desarrolla el gesto técnico en condiciones reales. El enfoque de los resultados son los movimientos de abducción-aducción, rotación interna-externa y flexión-extensión del hombro, así mismo, se consideró la flexión-extensión del codo y la muñeca. Adicionalmente, el capítulo ofrece una discusión y comparación de los movimientos obtenidos con los movimientos realizados en las técnicas de rehabilitación y prevención presentadas en capítulos anteriores.

5.1 Presentación de los resultados

Una vez finalizado el procesamiento de datos correspondientes, se obtuvieron gráficas detalladas de los movimientos del miembro superior durante la ejecución del gesto técnico del malabarismo. Los resultados de cada sesión se documentaron en orden secuencial, permitiendo así una evaluación de los patrones de movimiento a lo largo del tiempo.

Cabe resaltar que, luego de la sincronización de los videos, se definió como punto inicial para el análisis el momento en que inicia el primer ciclo completo. Esto con el fin de obtener una sincronización de cada una de las fases. La duración total del

análisis fue de aproximadamente 10 segundos, sin embargo, no se consideró el último ciclo ya que, al definir el área de trabajo del video, este queda incompleto. Por lo tanto, solo se consideraron los ciclos completos una vez definida el área de trabajo.

Las gráficas presentadas de la Figura 5.1 a la 5.5 presentan un formato consistente, buscando así una rápida interpretación. Estas gráficas corresponden a la Sesión 1 y sirven como ejemplo para comprender el análisis realizado, cuyos resultados en su totalidad se ubican en el Anexo G. La variable del tiempo, medida en milisegundos, se encuentra en el eje de las abscisas, permitiendo así el seguimiento temporal de los movimientos. Del mismo modo, la variable que representa al ángulo, medido en grados sexagesimales, se encuentra en el eje de las ordenadas, de este modo es posible observar el rango de movimiento obtenido. Las líneas rojas verticales marcan la separación de ciclos de movimiento, de tal forma que se pueda distinguir claramente el fin de un ciclo con el inicio del inmediato siguiente. Cabe resaltar que la cantidad de ciclos completos realizados en 10,000 milisegundos puede variar dependiendo del participante. Las líneas negras horizontales representan el ángulo máximo y mínimo obtenido en cada sesión, definiendo así el rango angular máximo en que la articulación realiza el movimiento.

Las características de las gráficas facilitan la comprensión de los patrones de movimiento y la comparación entre sesiones de prueba. Con ayuda de las gráficas elaboradas fue posible extraer la duración de cada ciclo, así como el ángulo máximo y mínimo en cada una de estas. En el Anexo G se pueden encontrar también las tablas con información relevante de cada sesión. Estas comprenden la duración de cada ciclo, así como la diferencia obtenida de su ángulo máximo y mínimo. Los valores se redondearon a dos decimales para facilitar la lectura. El ejemplo de esto se puede encontrar en la Tabla 5.1, la cual hace referencia a la Sesión 1. Se consideró únicamente la cantidad de ciclos completos realizados en el tiempo definido, por lo que se descartó el último ciclo.

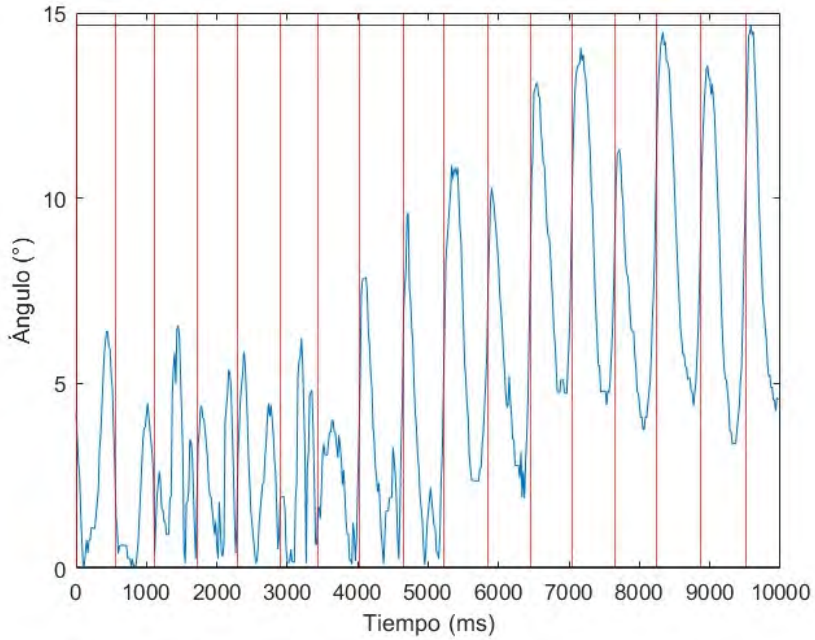


Figura 5.1 Movimiento abducción–aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 1.

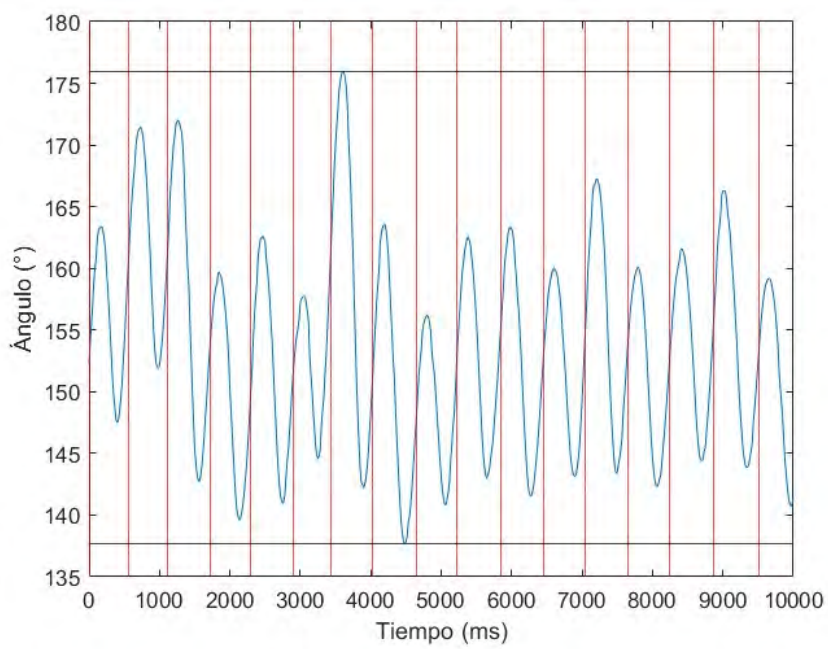


Figura 5.2 Movimientos rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 1

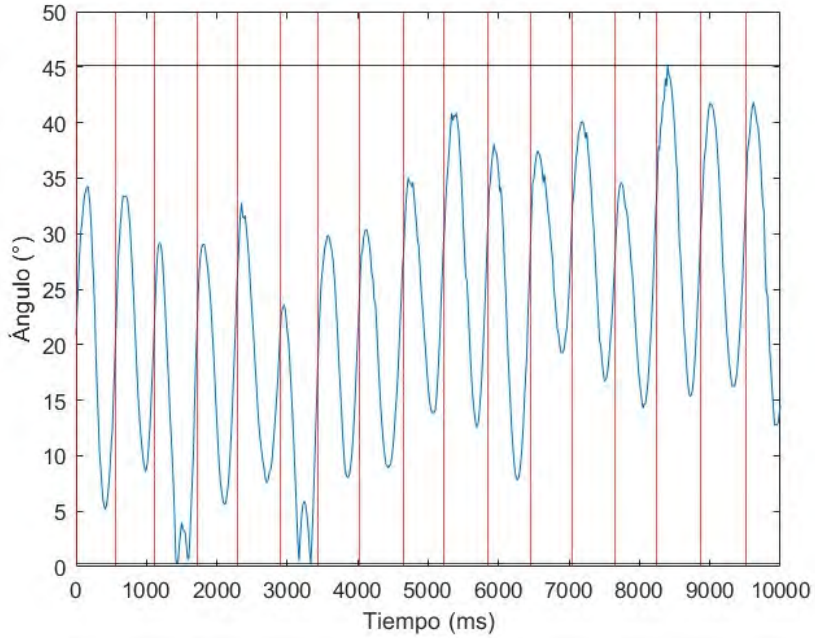


Figura 5.3 Movimiento flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 1.

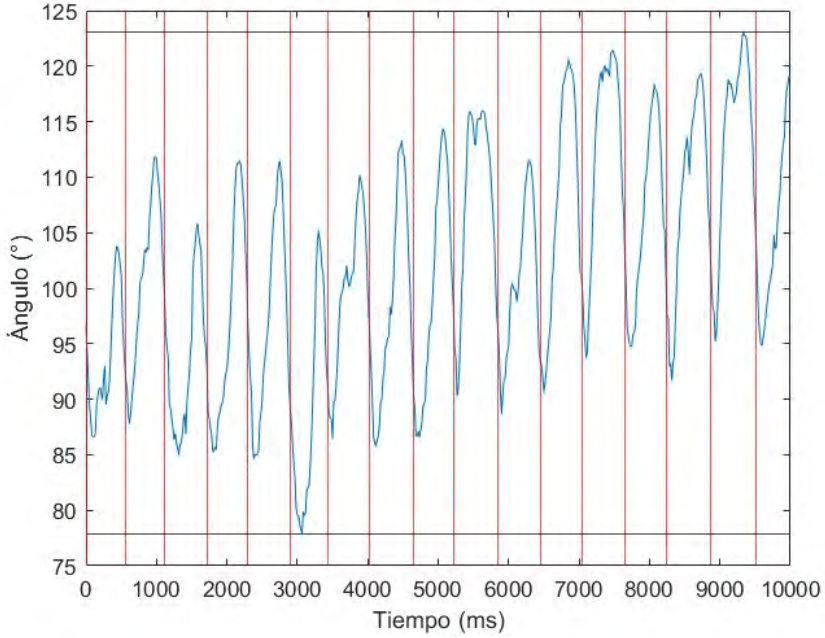


Figura 5.4 Movimiento flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 1.

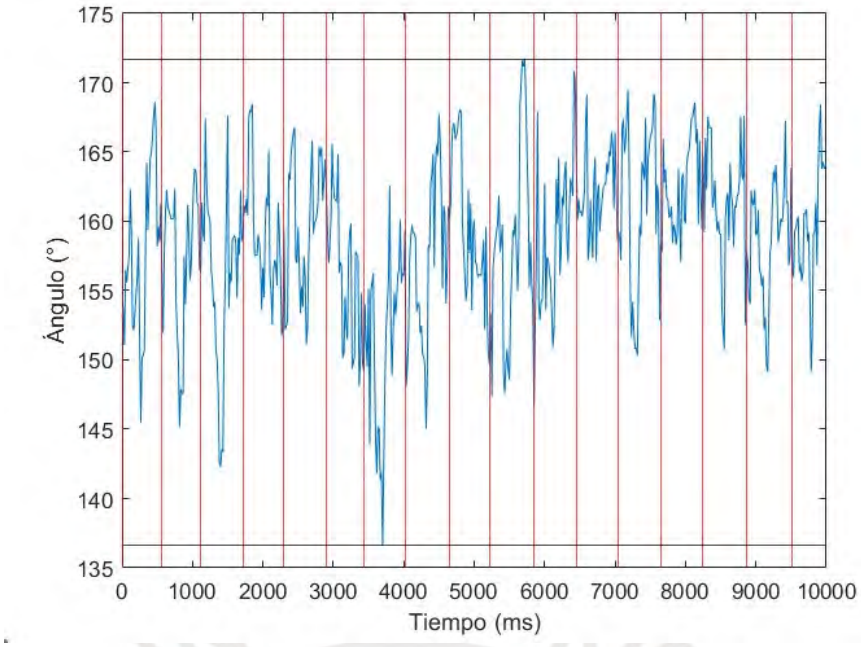


Figura 5.5 Movimiento flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 1.

Tabla 5.1. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 1.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	567	6.32	15.88	29.08	17.17	23.15
2	550	4.40	19.57	24.75	24.06	18.66
3	600	6.42	29.28	28.92	20.83	25.30
4	583	5.09	20.08	23.42	26.23	16.71
5	600	5.70	21.69	25.16	26.81	15.65
6	533	6.07	17.00	23.29	27.28	17.50
7	600	4.89	33.70	21.79	23.73	25.97
8	617	7.74	25.90	21.50	27.51	22.72
9	567	9.49	15.42	21.20	27.81	18.43
10	633	8.52	19.59	28.30	25.68	25.06
11	600	8.38	21.80	30.27	22.91	24.17
12	600	8.37	16.93	18.22	29.97	12.07
13	600	9.64	23.86	23.35	27.71	19.20
14	600	8.16	17.77	20.26	23.67	11.51
15	617	10.09	17.19	29.84	27.63	16.83
16	650	10.21	22.45	25.54	27.84	18.08

5.2 Análisis de los resultados

En la presente sección se muestran las gráficas propuestas para el análisis y discusión de los resultados obtenidos. Para ello, se tomó cada uno de los ciclos obtenidos en cada sesión diferente, tomando en consideración el tiempo y la diferencia entre el ángulo máximo y

mínimo obtenido durante un ciclo. Esto último se realizó con el fin de obtener el rango de movimiento completo que puede alcanzar una articulación específica durante la realización del gesto técnico del malabarismo. Para facilitar la revisión de las gráficas, cada una de estas fue representada por un patrón y color particular, en cada imagen se puede observar una leyenda que permite su identificación.

En relación con el tiempo

De acuerdo con los resultados obtenidos luego del procesamiento de datos, se observa cómo varía la duración de cada ciclo a lo largo de una sesión. En la Figura 5.6 se observa la variación total del tiempo por cada ciclo completo de cada sesión realizada. El tiempo promedio de los ciclos varía significativamente de sesión a sesión en un rango aproximado de 590 a 980 milisegundos y, por lo tanto, varían según el participante. Anteriormente, en base a la prueba piloto, se observó que los primeros ciclos eran significativamente mayores a los demás, atribuyendo esto a un aumento de la fluidez del movimiento a medida que el participante se adapta. Con el aumento de la muestra, se puede observar que, en muchos casos, esta característica no es observable. Al mismo tiempo, no existe una disminución constante del tiempo en cada ciclo hasta llegar a un tiempo estable.

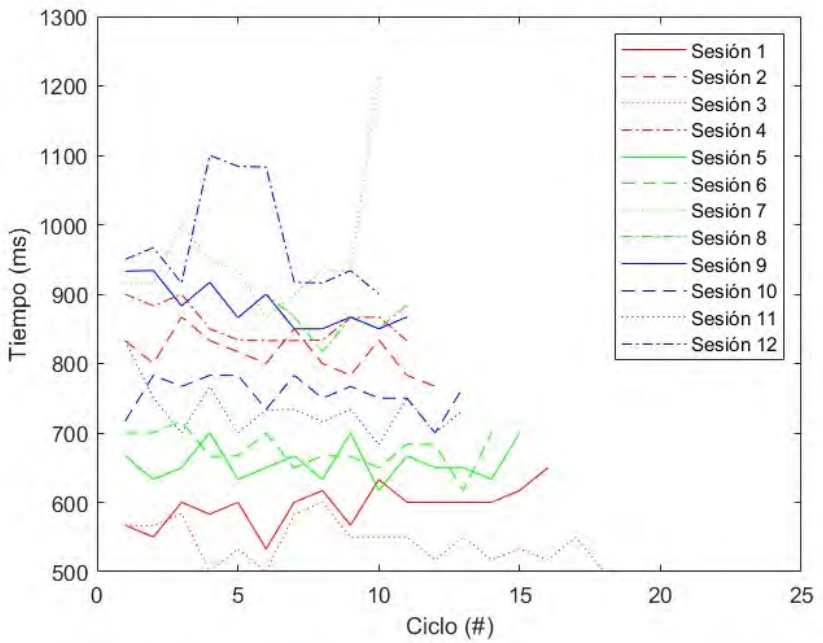


Figura 5.6 Duración de los ciclos en cada una de las sesiones. El eje horizontal representa el número de ciclo mientras que el eje vertical el tiempo total del ciclo.

En relación con el rango de movimiento de la abducción-aducción del hombro

La Figura 5.7 contiene el rango de movimiento por ciclo en cada una de las sesiones del ángulo de abducción-aducción del hombro en el plano frontal. Manteniendo lo planteado en la prueba piloto, se puede observar que la amplitud puede variar de forma significativa en cada uno de los ciclos sin mostrar una disminución o aumento constante. A diferencia de los resultados obtenido en los ensayos preliminares, en este caso se puede observar un patrón cíclico, siendo este más notorio en las tres primeras sesiones y en la Sesión 6. En las sesiones restantes el patrón se encuentra menos definido, sin embargo, es posible notar cierta tendencia cíclica. En el caso particular de la Sesión 4 se puede observar que los ángulos no superan los 3°. Por lo tanto, no se puede distinguir claramente su comportamiento. De esta forma, es posible desligar la hipótesis de que la abducción-aducción del hombro en el malabarismo es dependiente de la trayectoria de la pelota, y refuerza la idea de que el movimiento es cíclico en el hombro. El promedio total del rango angular obtenido en todos los ciclos es de aproximadamente 7°; asimismo, en ningún momento el ángulo fue mayor a 22°.

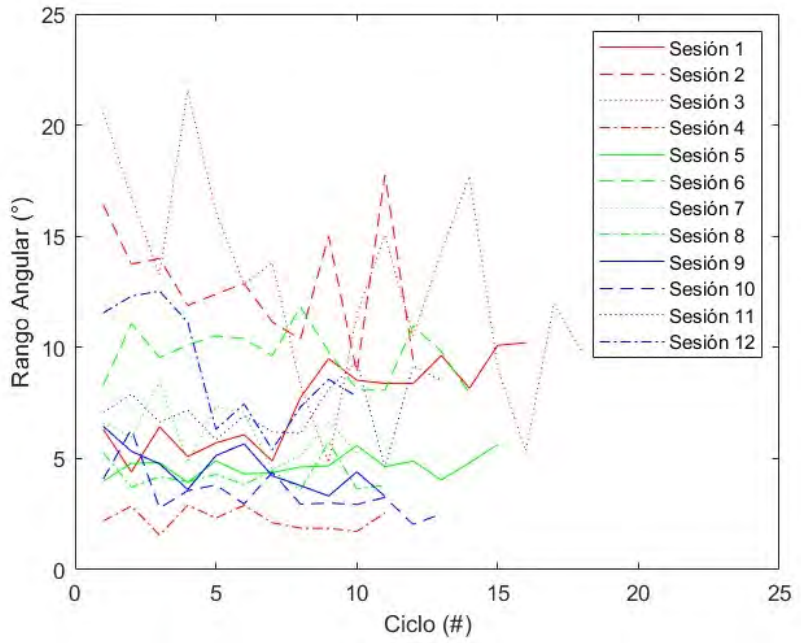


Figura 5.7 Rango de movimiento angular de la abducción-aducción del hombro en el plano frontal. El eje horizontal representa el número de ciclo mientras que el eje vertical representa el ángulo en grados sexagesimales.

En relación con el ángulo de rotación interna-externa del hombro

La Figura 5.8 contiene el rango de movimiento por ciclo en cada una de las sesiones del ángulo de rotación interna-externa del hombro en el plano transversal. Similar a lo obtenido en el ensayo preliminar, el movimiento cíclico es notorio en los presentes casos, siendo los más difíciles de apreciar en la Sesión 8 y 12. El movimiento de rotación contribuye al movimiento horizontal del brazo, sin embargo, anteriormente este se consideró independiente a la trayectoria horizontal de la pelota, concluyendo así que la rotación interna-externa del hombro era constante mientras que la abducción-aducción era variable a la posición de la pelota de acuerdo con el lanzamiento. Con los resultados actuales, puede afirmarse que ambos movimientos tienden a ser constantes con variaciones en su amplitud. Esto puede verse en las gráficas con la disminución en el número de picos. De forma similar al movimiento de abducción-aducción del hombro, el presente movimiento se caracteriza por ser cíclico. El promedio total del rango angular obtenido en todos los ciclos es de aproximadamente 25°, asimismo, en ningún momento el ángulo fue mayor a 50°.

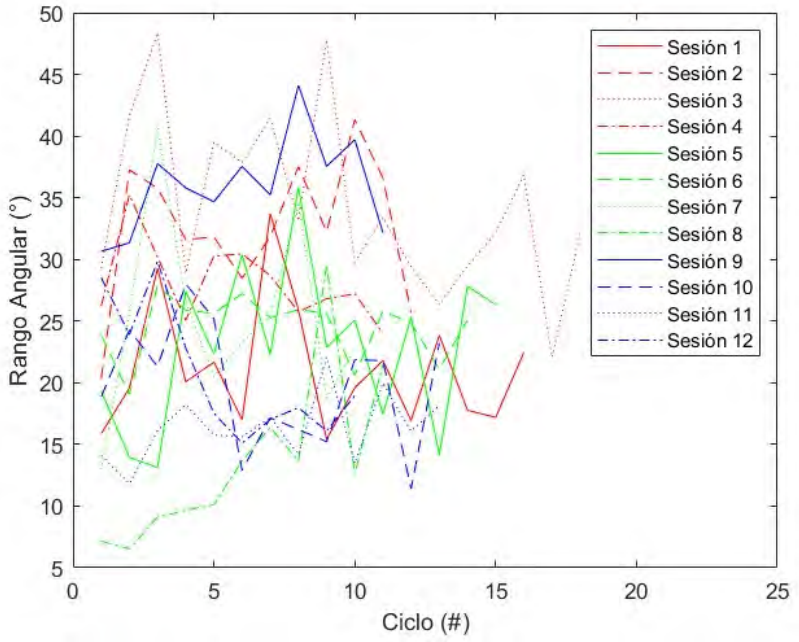


Figura 5.8 Rango de movimiento angular de la rotación interna-externa del hombro en el plano transversal. El eje horizontal representa el número de ciclo mientras que el eje vertical el ángulo en grados sexagesimales.

En relación con el ángulo de flexión-extensión del hombro

La Figura 5.9 contiene el rango de movimiento por ciclo en cada una de las sesiones del ángulo de flexión-extensión del hombro en el plano sagital. En coincidencia con el ensayo preliminar, el movimiento cíclico se puede observar de forma marcada al mismo tiempo que las amplitudes pueden variar significativamente de ciclo en ciclo. Asimismo, se mantiene la premisa del movimiento independiente de la pelota. El promedio total del rango angular obtenido en todos los ciclos es de aproximadamente 26.45°, asimismo, en ningún momento el ángulo fue mayor a 55.06°.

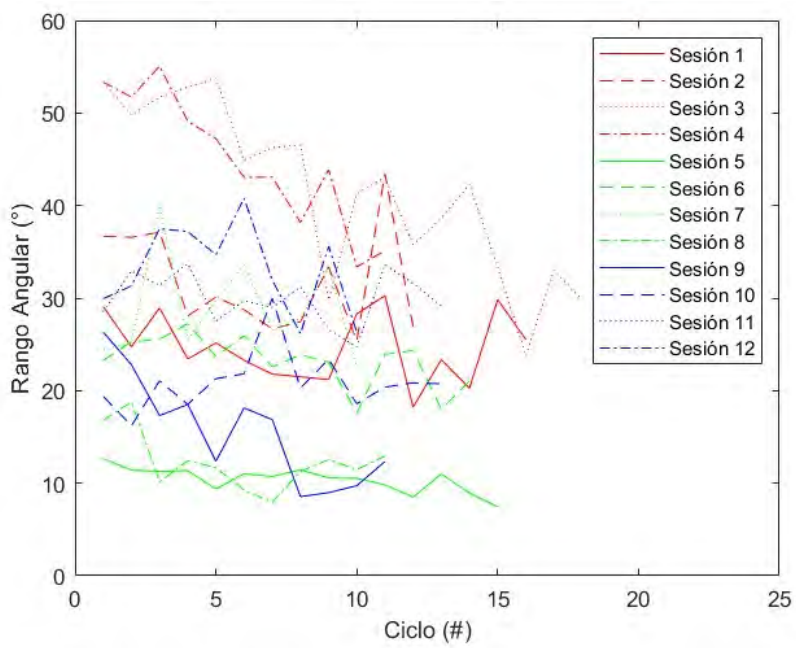


Figura 5.9 Rango de movimiento angular de la flexión-extensión del hombro en el plano sagital. El eje horizontal representa el número de ciclo mientras que el eje vertical representa el ángulo en grados sexagesimales.

En relación con el ángulo de flexión-extensión del codo

La Figura 5.10 contiene el rango de movimiento por ciclo en cada una de las sesiones del ángulo de flexión-extensión del codo en el plano sagital. Al igual que el movimiento angular anterior, el patrón cíclico puede observarse de forma marcada. Igualmente, tanto la flexión-extensión del codo como el hombro son responsables del movimiento vertical del brazo. El promedio total del rango angular obtenido en todos los ciclos es de aproximadamente 45.66°, asimismo, en ningún momento el ángulo fue mayor a 72.62°.

En relación con el ángulo de flexión-extensión de la muñeca

La Figura 5.11 contiene el rango de movimiento por ciclo en cada una de las sesiones del ángulo de flexión-extensión de la muñeca en el plano sagital. El presente caso es significativamente diferente a los rangos de movimiento angular anteriores debido a que la muñeca presenta una trayectoria con una gran cantidad de picos. A pesar de ellos es posible distinguir cierta tendencia cíclica. Difiriendo de los ensayos piloto, es posible que la muñeca no presente necesariamente un movimiento independiente al resto de articulaciones. El promedio total del rango angular obtenido en todos los ciclos es de aproximadamente 34.70°, asimismo, en ningún momento el ángulo fue mayor a 67°.

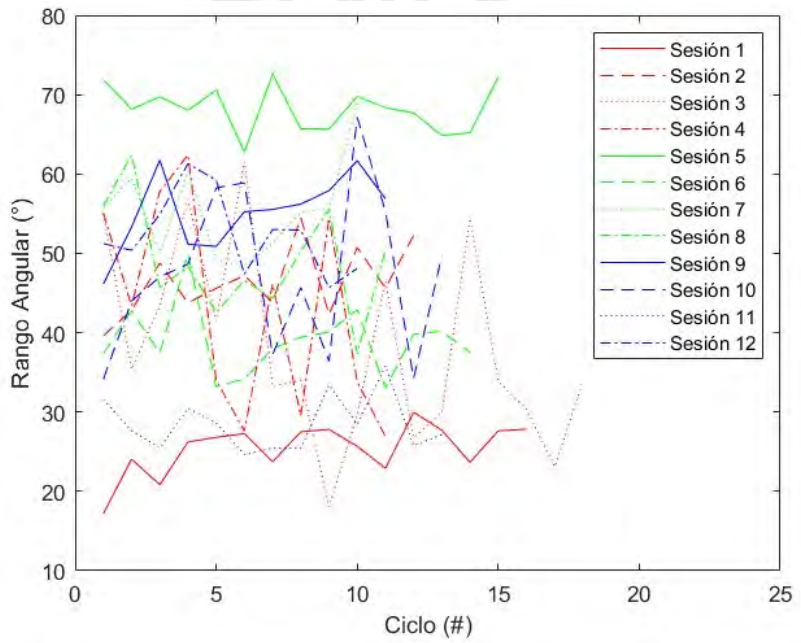


Figura 5.10 Rango de movimiento angular de la flexión-extensión del codo en el plano sagital. El eje horizontal representa el número de ciclo mientras que el eje vertical representa el ángulo en grados sexagesimales.

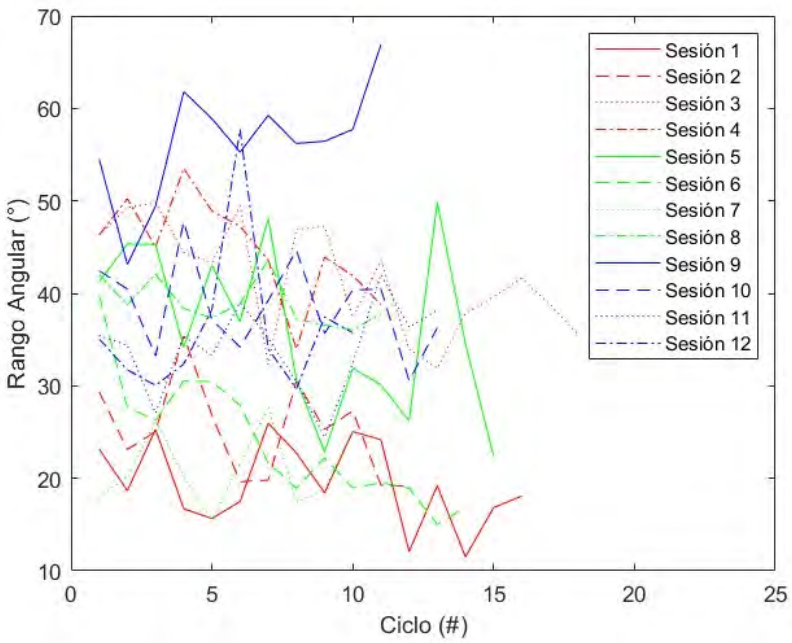


Figura 5.11 Rango de movimiento angular de la flexión-extensión de la muñeca en el plano sagital. El eje horizontal representa el número de ciclo mientras que el eje vertical representa el ángulo en grados sexagesimales.

Análisis en relación con la cinemática del malabarismo

Al momento de ampliar la muestra y comparar con el estado del arte y los resultados preliminares, fue posible corroborar las premisas planteadas sobre el movimiento y al mismo tiempo caracterizarlo. Los resultados nuevamente coinciden con los estudios realizados por Ruffaldi (2011), Huys (2002) y Rodrigues (2016), donde se indica que las articulaciones del miembro superior presentan una coordinación entre ellas para ejecutar efectivamente el movimiento. A esto se le añade una mayor compresión del movimiento articular a lo largo del tiempo, incluyendo valores cuantitativos. En los estudios anteriores no se han realizado análisis del movimiento en tiempo real con malabaristas. Por lo tanto, es la primera vez que se trabaja con este tipo de datos. De acuerdo con los resultados obtenidos, las articulaciones involucradas en la ejecución exitosa del movimiento son el codo y el hombro, sus patrones cíclicos específicos sugieren una coordinación entre sus diferentes movimientos con el fin de poder realizar el movimiento. Asimismo, las características de estos, es decir, sus amplitudes variables, sugieren que tanto el movimiento de la pelota como el del brazo se encuentran coordinados y dependientes entre sí. Mientras que el patrón cíclico sugiere un movimiento constante, las amplitudes sugieren una variación en el ángulo con el fin de poder adaptarse a la trayectoria de la pelota en tiempo real.

5.3 Aplicación del malabarismo en rehabilitación o prevención de lesiones

El uso potencial del malabarismo dentro de la rehabilitación de miembro superior depende de múltiples factores relacionados con la característica misma del movimiento. Como se ha definido anteriormente, los dos principales son la naturaleza cíclica del movimiento y el rango angular al que pueden llegar las articulaciones cuando se desenvuelve el mismo. Asimismo, se destaca la naturaleza lúdica del movimiento y la coordinación requerida para su ejecución. De acuerdo con la revisión de terapias lúdicas similares [Cuesta, 2020] [Waliño, 2019] [Guillén, 2021] [Alberti, 2022], es necesario establecer un patrón de movimiento específico para cada articulación. Tomando esto en consideración, tanto el hombro como el codo presentan dicha característica durante la ejecución del malabarismo en cascada con tres pelotas. A diferencia del ensayo piloto, al ampliar la muestra y mejorar el protocolo, se pudo observar un patrón cíclico en el movimiento abducción-aducción del hombro. Por lo tanto, el único movimiento que no presenta dicho patrón es la flexión-extensión de la muñeca.

Con respecto a los rangos de movimiento, se busca abarcar el rango de movimiento máximo al momento de diseñar un dispositivo [Narayan, 2021] o técnica para rehabilitación. Al momento de ampliar la muestra de participantes se mantiene la premisa inicial de que el rango de movimiento del malabarismo es considerablemente menor al rango de movimiento normal del ser humano. Sin embargo, como se verá más adelante, es posible aún con esta limitación, incluir al malabarismo dentro de un protocolo de terapia física.

Con el objetivo de obtener información para el análisis potencial del malabarismo dentro de las terapias de rehabilitación y/o prevención de lesiones en el miembro superior, se realizó un total de 3 entrevistas a profesionales de la salud, dentro de los que se encuentra un fisioterapeuta, un terapista ocupacional y un especialista en medicina física y rehabilitación. El protocolo seguido para la realización de la entrevista y uso de las respuestas dadas se encuentra en el Anexo F.

De acuerdo con una entrevista realizada a un especialista en fisioterapia de la clínica privada Corpus Et Vitas, al momento de realizar una terapia de rehabilitación esta

puede variar de acuerdo con los requerimientos del paciente. Se suele priorizar los movimientos más cotidianos posibles, dentro de esto se pueden encontrar los movimientos de abducción-aducción, rotación interna-externa y flexión-extensión del hombro, así como la flexión-extensión del codo. Estos movimientos se encuentran cubiertos al momento de realizar malabares. Asimismo, para poder personalizar la terapia del paciente, se trabaja con una escala visual analógica enumerada del 1 al 10, la cual se usa para describir el dolor del paciente al momento de realizar un movimiento. En base a esto, se va cambiando el procedimiento y los rangos de movimiento. Finalmente, cabe resaltar que luego de cierto número de terapias, la clínica se encarga principalmente de enseñar el movimiento que debe hacer para poder continuar la terapia de forma casera. Siguiendo con los resultados de la entrevista, si bien es cierto que esto puede cambiar dependiendo de la intensidad de la terapia, en casos de lesiones por deporte y/o sedentarismo, este patrón se cumple.

Teniendo todo lo anterior en cuenta y mostrándole al entrevistado los resultados obtenidos, los cuales involucran el patrón de movimiento y los rangos articulares del malabarismo, se le pidió su opinión de la participación de este ejercicio dentro de las terapias. De acuerdo con la respuesta obtenida, es posible su uso siempre y cuando se tenga en consideración ciertas pautas. Primero, debido al dolor que puede generar el movimiento para el paciente, en etapas agudas de la rehabilitación no es posible su uso. Esto se debe al dolor que le provoca al paciente realizar un movimiento fluido. Según su experiencia, a partir de la terapia 15 esto no suele ser un problema. Sin embargo, luego de este periodo de tiempo, si el paciente no presenta molestas para realizar el movimiento, este puede ser de suma ayuda por los rangos y patrones mencionados anteriormente.

En la entrevista se planteó también la problemática del corto rango de movimiento de las articulaciones en comparación con el rango de movimiento normal. De acuerdo con la respuesta del terapista, el corto rango no afecta de forma negativa alguna al paciente y, si el ejercicio puede ayudar a que el paciente se mantenga en actividad, el beneficio es mucho mayor que el posible abandono de la terapia. El fundamento principal para dicha afirmación es que en la vida diaria no se usa el rango de movimiento de la articulación en su totalidad. Asimismo, el malabarismo, al abarcar los movimientos del hombro y el codo puede ser útil dentro de la prevención de lesiones. Finalmente,

el entrevistado está de acuerdo con la autoeficacia, es decir, que la mayoría de las personas abandonan el tratamiento debido a que no ven mejoras. Al momento de aprender una nueva habilidad como es el malabarismo, es posible que la persona se encuentra motivada a continuar con la terapia. Del mismo modo, esto podría ayudar en casos donde el paciente no acude al centro de salud debido a la distancia, de modo que puede ayudar a mantener una constancia de forma domiciliaria.

Estos resultados se encontraron en lineamiento con los obtenidos posterior a la entrevista con el especialista en medicina física y rehabilitación. Aquí se remarcó la importancia de adaptar los movimientos estratégicamente de acuerdo los requerimientos del paciente y al tipo de lesión sufrida. Asimismo, se mencionó nuevamente que el malabarismo resulta posible aplicarse en las etapas tardías de la rehabilitación, cuando no exista un dolor agudo. La característica principal del malabarismo, como movimiento cíclico, se alinea con los de las terapias de rehabilitación física, lo cual fue discutido y confirmado en la entrevista. Finalmente, se mencionó el término de la propiocepción, aquí, el malabarismo puede ser de ayuda ya que sus patrones de movimiento pueden servir como estimulación. Se recuerda aquí que el malabarismo es un movimiento complejo que requiere de la coordinación de varios sistemas y movimientos articulares simultáneos.

Por otro lado, durante la entrevista con el terapista ocupacional, se obtuvieron respuestas que hacen al malabarismo no recomendable en ciertas circunstancias. En el caso de patologías más complejas, terapias ocupacionales y discapacidades, el malabarismo difícilmente encaja en estos perfiles. Asimismo, se mencionó que la terapia toma ciertos movimientos de otros ejercicios y no necesariamente al patrón completo. Por último, se resaltó que la actividad realizada debe ser del agrado del paciente, es decir, si el paciente no encuentra relevante la actividad que se encuentra realizando o le resulta poco atractiva, será difícil que se vean resultados eficientes en el transcurso del tiempo.

En síntesis, y en concordancia con lo obtenido anteriormente en los resultados de la prueba piloto, es posible el uso del malabarismo dentro de la terapia física, siempre y cuando este se adapte de forma estratégica. Para ello, primero es necesario identificar cada caso en particular, en el caso de lesiones agudas o que requieren recuperar el

movimiento en general, el malabarismo supone una limitación al momento de incluirse. Sin embargo, en el caso de lesiones crónicas, lesiones deportivas, lesiones por sedentarismo o lesiones menores, el uso potencial del ejercicio puede derivar en resultados satisfactorios. Esto se cumple siempre y cuando se pueda ajustar el malabarismo en un momento de la terapia en la que el paciente no presente dolor al realizar movimientos fluidos. Cabe resaltar que para poder llegar a dichas conclusiones se tuvo que caracterizar correctamente el movimiento, mostrando así su rango y su patrón típico del mismo. Además, es necesario señalar que las conclusiones obtenidas deben ser validadas en futuros trabajos por medio de ensayos clínicos.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

1. La ejecución del protocolo se realizó considerando diferentes factores. Entre los principales se encuentran la disponibilidad de equipos y espacios del Laboratorio de Biomecánica y Robótica Aplicada y la posibilidad para el reclutamiento de participantes. Asimismo, el protocolo se encuentra dentro de los lineamientos éticos y, de acuerdo con lo dictaminado por el comité, este tiene vigencia hasta luego de un año de su aprobación. Estas características no impiden que la caracterización del malabarismo pueda realizarse con diferentes equipos o sistemas de captura de movimiento.

2. La principal limitante es el número de malabaristas requeridos para obtener una muestra amplia. Si bien es cierto que, en base a la revisión bibliográfica, es posible con 12 personas caracterizar el movimiento con el objetivo de observar su potencial en la rehabilitación, también es cierto que el ampliar la muestra nos permite una caracterización más precisa cada vez. El patrón se repite en la mayoría de las muestras; por lo tanto, fue posible redactar conclusiones en base a esto. Asimismo, si en un futuro se busca replicar el experimento con el fin de amentar la muestra total, esto puede hacerse siguiendo los lineamientos planteados en el presente documento.

CONCLUSIONES

1. Al finalizar el proyecto se obtuvo un análisis del valor potencial del malabarismo dentro de las terapias de rehabilitación y/o prevención de lesiones en el miembro superior. Al finalizar el proyecto puede observarse un análisis describiendo las características principales del movimiento y cómo estás pueden adaptarse dentro de programas de rehabilitación, cumpliendo así el propósito de la investigación. La metodología planteada incluye la elaboración e implementación de un protocolo de captura de movimiento, así como una revisión sobre los métodos usados en terapia física, los cuales fueron puntos clave para la realización del presente trabajo. Se incluye aquí también la revisión del estado del arte existente sobre el análisis del gesto técnico del malabarismo.

2. El protocolo de ensayo establecido, en el presente documento, es capaz de proporcionar una guía clara y detallada de los procesos a realizar para la obtención de datos cinemáticos durante la ejecución del gesto técnico del malabarismo en cascada con tres pelotas. Esto se logró gracias a la correcta revisión de la bibliografía relacionada con la caracterización de gestos deportivos, así como a las pruebas piloto que ayudaron en el mejoramiento del protocolo para los ensayos definitivos. Asimismo, este método puede ser tomado como referencia para futuras investigaciones dentro del campo de la biomecánica deportiva y el análisis de movimiento, esto gracias a su facilidad para adaptarse y replicarse.

3. El análisis biomecánico de un gesto técnico deportivo o lúdico parte de una descripción cualitativa del movimiento para posteriormente llegar a un análisis cuantitativo. Esto se demuestra a lo largo del presente trabajo al momento de definir un procedimiento para obtener los rangos de movimiento articulares, ya que para ello es necesario conocer las variables representativas a medir, siendo esto posible por medio del conocimiento de los movimientos realizados mientras se ejecuta la técnica. Finalmente, para poder afirmar que el movimiento se ha caracterizado correctamente, es necesario realizar múltiples pruebas para obtener resultados cuantitativos que definan el movimiento.

4. La caracterización del gesto técnico del malabarismo permite obtener el patrón y rango de movimiento de este. De esta forma, es posible realizar una comparativa del patrón de movimiento con los patrones de movimiento establecidos en los métodos de rehabilitación o prevención de lesiones. Esto da la posibilidad para el desarrollo de nuevos programas de rehabilitación o prevención. En el presente trabajo se mostró como las articulaciones del hombro y el codo durante el malabarismo se encuentran dentro de los parámetros necesarios para ser aplicados en las terapias. Asimismo, con ayuda de un terapista, fue posible determinar un aproximado de cómo, estratégicamente, este puede ser usado dentro de las terapias de rehabilitación de miembro superior.

BIBLIOGRAFÍA

[Alberti, 2012] E. J. Alberti, A. D. S. Targa, S. F. Pichorim, and A. Brawerman, "Ludic Table: a comparative study between playful rehabilitation and kinesiotherapy in restricting upper limb movements in individuals with stroke," Medical & Biological Engineering & Computing, vol. 60, no. 4, pp. 1187–1198, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.1007/s11517-022-02532-0

[Billebot, 2018] M.-N. Billebot et al., "Measurement and Knowledge in Health," Connected Healthcare for the Citizen, pp. 59–83, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-298-4.50006-3

[Beek, 1989] P. J. Beek, "Timing and Phase Locking in Cascade Juggling," Ecological Psychology, vol. 1, no. 1, pp. 55–96, 1989, doi: https://doi.org/doi.org/10.1207/s15326969eco0101_4.

[Beigzadeh, 2015] B. Beigzadeh, M. Ilami, and S. Najafian, "Design and development of one degree of freedom upper limb exoskeleton," 2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), Oct. 2015, doi: https://doi.org/10.1109/icrom.2015.7367788.

[Callupe, 2022] R. L. Callupe et al., "Testing Protocol for Evaluating Underhand serve-reception Biomechanics in Volleyball," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, vol. 0, no. 0, Jun. 2022, doi: https://doi.org/10.1177/17543371221106360.

[Card, 2022] R. K. Card and J. B. Lowe, "Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Elbow Joint," Nih.gov, Jul. 25, 2022. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK532948/ (accessed Apr. 21, 2023).

[Carignan, 2007] C. Carignan, J. Tang, S. Roderick, and M. Naylor, "A Configuration-Space Approach to Controlling a Rehabilitation Arm Exoskeleton," 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, Jun. 2007, doi: https://doi.org/10.1109/icorr.2007.4428425.

[Cefine, 2023] "Cefine Neurología," Cefine, Apr. 17, 2023. https://cefine.es/ (accessed Aug. 26, 2023).

[CEN, 2023] "Centro de Neurorehabilitacion Madrid | Neurorehabilitacion Avanzada," CEN, Jan. 03, 2023. https://www.eneurocenter.com/ (accessed Aug. 26, 2023).

[Chang, 2022] L.-R. Chang, P. Anand, and M. Varacallo, "Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Glenohumeral Joint," Nih.gov, Aug. 08, 2022. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537018/ (accessed Apr. 21, 2023).

[Cole, 2019] T. Cole, L. Robinson, and L. O'Brien, "Effectiveness of Interventions to Improve Therapy Adherence in People with Upper Limb conditions: A Systematic Review," Journal of Hand Therapy, vol. 32, no. 2, pp. 175–183, Jun. 2019, doi: https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jht.2017.11.040.

[Cuesta, 2020] A. Cuesta-Gómez et al., "Effects of virtual reality associated with serious games for upper limb rehabilitation in patients with multiple sclerosis: randomized controlled trial," Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, vol. 17, no. 1, Jul. 2020, doi: https://doi.org/10.1186/s12984-020-00718-x

[Doriot, 2006] N. Doriot and X. Wang, “Effects of age and gender on maximum voluntary range of motion of the upper body joints,” Ergonomics, vol. 49, no. 3, pp. 269–281, Aug. 2006, doi: https://doi.org/10.1080/00140130500489873.

[Erwin, 2022] J. Erwin and M. Varacallo, “Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Wrist Joint,” Nih.gov, Sep. 05, 2022. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK534779/ (accessed Apr. 21, 2023).

[Evidence, 2020] “Advanced Physiotherapy in Calgary: Evidence Sport and Spine,” Evidencesportandspinal.com, 2020. https://www.evidencesportandspinal.com/ (accessed Apr. 21, 2023).

[Forro, 2022] S. D. Forro, A. Munjal, and J. B. Lowe, “Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Arm Structure and Function,” Nih.gov, Jul. 25, 2022. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507841/#:~:text=The%20upper%20extremity%20or%20arm,and%20veins)%2C%20and%20muscles. (Accessed Apr. 21, 2023).

[Garrec, 2008] P. Garrec, J. P. Friconneau, Y. Measson, and Y. Perrot, “ABLE, an innovative transparent exoskeleton for the upper-limb,” 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sep. 2008, doi: https://doi.org/10.1109/iros.2008.4651012.

[Guillén, 2021] S. Guillén-Climent et al., “A usability study in patients with stroke using MERLIN, a robotic system based on serious games for upper limb rehabilitation in the home setting,” Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, vol. 18, no. 1, Feb. 2021, doi: https://doi.org/10.1186/s12984-021-00837-z

[Huys, 2003] R. Huys, A. Daffertshofer, and P. J. Beek , “Learning to juggle: on the Assembly of Functional Subsystems into a task-specific Dynamical Organization,” Biological Cybernetics, vol. 88, no. 4, pp. 302–318, Apr. 2003, doi: https://doi.org/doi.org/10.1007/s00422-002-0379-1.

[IHC, 2023] “Centro de fisioterapia Madrid - Fisioterapia IHC,” Fisioterapia-ihc.es, 2023. https://www.fisioterapia-ihc.es/?_fcdev=auto (accessed Aug. 26, 2023).

[INEI, 2012] “Factores de Riesgo de las Enfermedades Crónicas no Transmisibles” (2012) in Situación de Salud de la Población Adulta Mayor. Lima: INEI.

[INR, 2021] “Indicadores Hospitalarios” (2021). Lima: INR

[INS, 2018] “Actividad física de adultos de 18 a 59 años – VIANEV 2017-2018” (2018). Lima: INS.

[Jack, 2010] K. Jack, S. M. McLean, J. K. Moffett, and E. Gardiner, “Barriers to Treatment Adherence in Physiotherapy Outpatient clinics: A Systematic Review,” Manual Therapy, vol. 15, no. 3, pp. 220–228, Jun. 2010, doi: https://doi.org/doi.org/10.1016/j.math.2009.12.004.

[Klein, 2010] J. Klein, S. Spencer, J. Allington, J. E. Bobrow, and D. J. Reinkensmeyer, “Optimization of a Parallel Shoulder Mechanism to Achieve a High-Force, Low-Mass, Robotic-Arm Exoskeleton,” IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no. 4, pp. 710–715, Aug. 2010, doi: https://doi.org/10.1109/tro.2010.2052170.

[Kontaxis, 2009] A. Kontaxis, A. G. Cutti, G. R. Johnson, and H. E. J. Veeger, “A Framework for the Definition of Standardized Protocols for Measuring upper-extremity Kinematics,” Clinical Biomechanics, vol. 24, no. 3, pp. 246–253, Mar. 2009, doi: https://doi.org/doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2008.12.009.

[Mahdavian, 2015] M. Mahdavian, A. G. Toudeshki, and A. Yousefi-Koma, “Design and fabrication of a 3DoF upper limb exoskeleton,” 2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), Oct. 2015, doi: https://doi.org/10.1109/icrom.2015.7367808.

[Malik, 2022] J. Malik and J. Maciaszek, “Effect of the Juggling-Based Motor Learning Physical Activity on Well-Being in Elderly: a Pre–Post Study with a Special Training Protocol,” Healthcare, vol. 10, no. 12, p. 2442, Dec. 2022, doi: https://doi.org/doi.org/10.3390/healthcare10122442.

[Montoya, 2022] D. Montoya et al., “Biomechanical Assessment of Post-Stroke Patients’ Upper Limb before and after Rehabilitation Therapy Based on FES and VR,” Sensors, vol. 22, no. 7, p. 2693, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/s22072693

[Moya, 2022] C. R. Moya Nolli, F. de M. Gordillo Sotomayor, and C. Santiago Bazán, “Factores en la adherencia del tratamiento fisioterapéutico en un instituto nacional de rehabilitación,” Revista Médica Basadrina, vol. 16, no. 2, pp. 21–30, oct. 2022, doi: https://doi.org/10.33326/26176068.2022.2.1551

[Nakano, 2020] N. Nakano et al., “Evaluation of 3D Markerless Motion Capture Accuracy Using OpenPose with Multiple Video Cameras,” vol. 2, May 2020, doi: https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00050.

[Narayan, 2021] J. Narayan, B. Kalita, and S. K. Dwivedy, “Development of Robot-Based Upper Limb Devices for Rehabilitation Purposes: a Systematic Review,” Augmented Human Research, vol. 6, no. 1, Jan. 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s41133-020-00043-x

[Nickl, 2018] R. W. Nickl, “Spatial and Timing Regulation of Upper-Limb Movements in Rhythmic Tasks,” PhD Thesis, Johns Hopkins University, 2018.

[Otten, 2015] A. Otten, C. Voort, A. Stienen, R. Aarts, E. van Asseldonk, and H. van der Kooij, “LIMPACT:A Hydraulically Powered Self-Aligning Upper Limb Exoskeleton,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20, no. 5, pp. 2285–2298, Oct. 2015, doi: https://doi.org/10.1109/tmech.2014.2375272.

[Ozawa, 2019] Y. Ozawa, S. Uchiyama, K. Ogawara, K. Kanosue, and H. Yamada, “Biomechanical Analysis of Volleyball Overhead Pass,” Sports Biomechanics, vol. 20, no. 7, pp. 844–857, May 2019, doi: https://doi.org/doi.org/10.1080/14763141.2019.1609072.

[Pavlov, 2019] Pavlov, Pavel & Buzhinskiy, Alexander. (2019). Original Article Comparison of Spike Techniques in College Beach and Classical Volleyball. Journal of Physical Education and Sport. 19. 10.7752/jpes.2019.01106.

[Png Egg, 2023] “Silueta del cuerpo humano, silueta, animales, fotografía png,” Png Egg, 2023. https://www.pngegg.com/es/png-yaixk (accessed jun. 20, 2023).

[Png Tree, 2016] “Diseño De Brazo PNG, Brazo, Dedo, Extremidad PNG y PSD para Descargar Gratis,” Png Tree, 2016. https://es.pngtree.com/freepng/arm-design_307264.html (accessed jun. 20, 2023)

[Post, 2000] A. A. Post, A. Daffertshofer, and P. J. Beek, “Principal components in three-ball cascade juggling,” Biological Cybernetics, vol. 82, no. 2, pp. 143–152, Jan. 2000, doi: https://doi.org/10.1007/pl00007966.

[Professional Juggler, 2008] Professional Juggler, “Basic Juggling Lesson/ 3 Ball Cascade,” YouTube. Jan. 24, 2008. Accessed: May 09, 2023. [YouTube Video]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=TG8lAzrdLFo&list=WL&index=4&ab_channel=professionaljuggler

[Quesnot, 2010] A. Quesnot and J.-C. Chanussot, Rehabilitación Del Miembro Superior. Editorial Médica Panamericana, 2010.

[Rau, 2000] G. Rau, C. Disselhorst-Klug, and R. Schmidt, “Movement Biomechanics Goes upwards: from the Leg to the Arm,” Journal of Biomechanics, vol. 33, no. 10, pp. 1207–1216, Oct. 2000, doi: https://doi.org/doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00062-2.

[Rodrigues, 2016] S. T. Rodrigues et al., “Postural Control during Cascade Ball Juggling: Effects of Expertise and Base of Support,” Perceptual and Motor Skills, vol. 123, no. 1, pp. 279–294, Aug. 2016, doi: https://doi.org/doi.org/10.1177/0031512516660718.

[Reeser, 2010] J. C. Reeser, G. S. Fleisig, B. Bolt, and M. Ruan, “Upper Limb Biomechanics During the Volleyball Serve and Spike,” Sports Health: A Multidisciplinary Approach, vol. 2, no. 5, pp. 368–374, Sep. 2010, doi: https://doi.org/doi.org/10.1177/1941738110374624.

[Ruffaldi, 2011] E. Ruffaldi, “Haptic Rendering of Juggling with Encountered Type Interfaces,” Presence, vol. 20, no. 5, pp. 480–501, Oct. 2011, doi: https://doi.org/doi.org/10.1162/PRES_a_00067.

[Sketchfab, 2017] Sketchfab, “Male Upper Body,” Feb. 09, 2017. https://sketchfab.com/3d-models/male-upper-body-13d4e5021ab84f30afd31f35c213cccb (accessed May 25, 2023).

[Sony, 2023] “Sony Videocámara FDR-AX700 4K HDR,” Sony, 2023. https://www.sony.com.pe/electronics/videocamaras-handycam/fdr-ax700/specifications (accessed Jun. 20, 2023).

[Sony Corporation, 2017]. Sony Corporation, “FDR-AX700 | Guía de Ayuda | Grabación a cámara lenta y rápida,” Sony.net, 2017. https://helpguide.sony.net/cam/1710/v1/es/contents/TP0001508649.html (accessed jul. 31, 2023).

[Spencer, 2008] S. J. Spencer, J. Klein, K. Minakata, V. Le, J. E. Bobrow, and D. J. Reinkensmeyer, “A low cost parallel robot and trajectory optimization method for wrist and forearm rehabilitation using the Wii,” 2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, Oct. 2008, doi: https://doi.org/10.1109/biorob.2008.4762902.

[SportMe, 2023] “Clínica SportMe Sevilla,” Sportme Traumatología Deportiva Sevilla, Mar. 15, 2023. https://clinicabernaldez.com/ (accessed Aug. 26, 2023).

[Tilp, 2008] M. Tilp, H. Wagner, and E. Müller, “Differences in 3D Kinematics between Volleyball and Beach Volleyball Spike Movements,” Sports Biomechanics, vol. 7, no. 3, pp. 386–397, Sep. 2008, doi: https://doi.org/doi.org/10.1080/14763140802233231.

[Tsai, 2010] B.-C. Tsai, W.-W. Wang, L.-C. Hsu, L.-C. Fu, and J.-S. Lai, "An articulated rehabilitation robot for upper limb physiotherapy and training," 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oct. 2010, doi: https://doi.org/10.1109/iros.2010.5649567

[Tsagarakis, 2003] N. G. Tsagarakis and D. G. Caldwell, Autonomous Robots, vol. 15, no. 1, pp. 21–33, 2003, doi: https://doi.org/10.1023/a:1024484615192.

[Waliño, 2019] C. N. Waliño-Paniagua et al., "Effects of a Game-Based Virtual Reality Video Capture Training Program Plus Occupational Therapy on Manual Dexterity in Patients with Multiple Sclerosis: A Randomized Controlled Trial," Journal of Healthcare Engineering, vol. 2019, pp. 1–7, Apr. 2019, doi: https://doi.org/10.1155/2019/9780587

[Wu, 1995] G. Wu and P. R. Cavanagh, "ISB recommendations for standardization in the reporting of kinematic data," Journal of Biomechanics, vol. 28, no. 10, pp. 1257–1261, Oct. 1995, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00017-c.

[Xiao, 2018] F. Xiao, Y. Gao, Y. Wang, Y. Zhu, and J. Zhao, "Design and evaluation of a 7-DOF cable-driven upper limb exoskeleton," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 32, no. 2, pp. 855–864, Feb. 2018, doi: https://doi.org/10.1007/s12206-018-0136-y.

[Yazdani, 2022] S. Yazdani, H. Eftekhari, and Khaffafpour Komeili, Mohammad, "Validity and Reliability of Kinovea Software in Evaluation of Shoulder Joint Position Sense in Female Volleyball Players," Journal of Advanced Sport Technology, vol. 6, no. 2, pp. 146–155, Nov. 2022, doi: https://doi.org/10.22098/jast.2022.2210.

ANEXO A

Protocolo para el análisis cinemático de movimiento en el gesto técnico del malabarismo para la prevención o recuperación física de miembros superiores

1. Lista de materiales a emplear:

    1.1 Tres pelotas para malabares (6.35 cm de diámetro)
    1.2 Ocho marcadores reflectantes
    1.3 Una cinta métrica
    1.4 Dos cámaras de video digitales SONY / FDR AX 700
    1.5 Una cámara de video digital PANASONIC / HCV VX 980
    1.6 Un nivel
    1.7 Dos luminarias
    1.8 Una cámara de celular XIAMI 11T PRO / 2107113SG
    1.9 Cinco trípodes
    1.10 Soporte para celular flexible
    1.11 Cinta de enmascarar
    1.12 Cinta doble contacto
    1.13 Alcohol de farmacia
    1.14 Algodón de farmacia

2. Procedimientos previos al protocolo

    1.1 Se coordinó con los participantes seleccionados una fecha y hora para realizar el experimento de acuerdo con su disponibilidad de tiempo. La sesión de captura de movimiento tuvo una duración aproximada de 30 minutos. Se le informó también de la vestimenta recomendada, la cual consta de un polo negro, de preferencia sin mangas.
    1.2 Los participantes deben proporcionar los datos necesarios para gestionar su ingreso al campus PUCP de acuerdo con el horario coordinado previamente, el experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Biomecánica y Robótica Aplicada (LIBRA).

3. Preparación del entorno para grabación

    3.1 Se adecuó el entorno de grabación para la toma de pruebas previo a la llegada del participante. Para ello se tomó como referencia la cámara destinada a capturar el plano transversal. Con ayuda del soporte flexible para celular, se ubicó la lente de la cámara del dispositivo móvil Xiaomi 11 T Pro de forma perpendicular al plano transversal. La cámara se alineó correctamente con la ayuda del nivel. Una vez realizado este proceso, y tomando como referencia al investigador, se delimitó un área donde el participante se posicionará con ayuda de la cinta métrica y la cinta de enmascarar. Las dimensiones de dicha área fueron de 0.25 m x 0.5 m donde se ubicarán los pies del participante. Se busco que la cámara del plano sagital pudiera capturar de forma completa los movimientos realizados.

    3.2 Se posicionaron las tres cámaras restantes con ayuda de los trípodes, la lente se ubicó aproximadamente a 1.4 m de distancia del suelo. Asimismo, se mantuvo

una distancia de 1.2 m aproximadamente entre la base del trípode y cada uno de los bordes del área delimitada. Esto se hace con el objetivo de enfocar en totalidad el torso y los brazos de una persona. Las dos cámaras digitales Sony se posicionaron con la lente alineada perpendicularmente a los planos sagital y frontal, este último con vistas al reverso, la cámara digital Panasonic se posicionó en el plano frontal con vistas al anverso. Las medidas se realizaron con ayuda de la cinta métrica y el alineamiento de las cámaras con ayuda del nivel.

3.3 Finalmente, se posicionaron las luminarias a una distancia aproximada de 0.5 m del piso y 0.25 m del borde del área delimitada, esto en el plano frontal reverso y en el plano sagital. El propósito de las luminarias es aumentar la efectividad de los marcadores por medio de su propiedad reflectora de la luz. Se busca que estás se encuentren lo más cerca posible del participante y al mismo tiempo que no obstruyan la grabación de las cámaras.

4. Preparación del participante

4.1 Una vez armado el set de grabación y luego de la llegada del participante, se procedió a realizar los preparativos necesarios que involucran al participante para la toma de datos. El primer paso realizado fue brindarle la información necesaria sobre los procedimientos a realizar y hacerle entrega del documento de consentimiento informado para su firma. Aquí se le brindó información detallada sobre el movimiento que debe realizar, es decir, el malabarismo en cascada con tres pelotas. También se le informó sobre la postura que debe mantener durante todo momento, siendo esta vertical erguida, con los hombros relajados y la pelvis alineada con la columna vertebral. La posición de los pies dependerá de la comodidad del participante, siendo estos juntos o alineados con los hombros, sin embargo, se les recomendó la segunda postura. Finalmente, se les explicó dónde y cómo posicionarse. Esto fue en el área de 0.25 cm x 0.5 cm delimitada y con la mirada en la lente de la cámara digital Panasonic en el plano frontal con vistas al anverso.

4.2 Se posicionaron los marcadores reflectantes en el brazo izquierdo del participante. Para ello, primero se limpió la piel del participante con ayuda del algodón y el alcohol de farmacia. Luego, utilizando la cinta de doble contacto, se posicionaron los marcadores como se describe en la tabla A.1. En el caso del plano frontal, los marcadores se ubicaron con vistas al reverso.

Tabla A.1 Posicionamiento de los marcadores de acuerdo con los planos anatómicos

Plano	**Marcadores**
Sagital	Altura del troquiter del húmero
	Intersección húmero-radio
	Extremo distal del radio
	Hueso metacarpiano del pulgar
Frontal	Entre el troquín y la cabeza humeral
	Altura de la tuberosidad deltoidea
Transversal	Altura del acromion
	Altura del hueso semilunar

4.3 Finalmente, se le pidió al participante que realice un calentamiento previo al inicio de las grabaciones con el fin de evitar lesiones durante el movimiento. Se le dio libertad para el tiempo y forma del calentamiento recomendando que este no exceda los 5 minutos. Luego de esto, se le pidió que se posicione en el lugar indicado, se aseguró el correcto enfoque de las cámaras y se encendieron las luminarias.

5. Ejecución del ensayo

5.1 Finalizados los preparativos, se procedió a realizar la toma de datos. Primero se aseguró que todas las cámaras se encuentren grabando en simultáneo y se encuentren enfocadas correctamente. Luego, se le indició al participante que adopte una posición de inicio, la cual consistió en mantener las palmas de las manos hacia arriba y los codos flexionados a 90 grados. Se le indicó al participante también la instrucción para el inicio de movimiento, esta consistía en una palmada la cual también será usada para sincronizar las cámaras. Es decir, inmediatamente luego de escuchar la palmada, el participante inició con el movimiento.

5.2 Luego de aproximadamente 15 segundos, se le indició al participante que se detenga. Una vez finalizado se detuvo la grabación en cada una de las cámaras y se aseguró que los videos se grabaran correctamente. Si hubo algún error al momento de la grabación se pueden repetir estos dos últimos pasos.

6. Procesamiento de datos

6.1 Edición de video. Una vez finalizadas las grabaciones, se exportaron los videos a una computadora que cuente con los softwares DaVinci Resolve, Kinovea, Excel y Matlab. Con la finalidad de sincronizar los videos grabados en simultáneo se utilizó el programa de edición de video DaVinci Resolve. Para ello se tomó como referencia la palmada dada al momento de grabación, determinando así el fotograma inicial, los fotogramas anteriores a este se descartaron. Así mismo, se consideró un tiempo de 11 segundos a partir de dicho fotograma, descartando los fotogramas posteriores al tiempo indicado.

6.2 Procesamiento con Kinovea. Una vez sincronizados los videos, estos se importaron al software Kinovea para el análisis. Primero se definió una zona del trabajo para el video, es decir, el intervalo de tiempo en que se va a trabajar, para ello se consideró un total de 1000 ms. Luego se definió el centro de coordenadas en la esquina inferior izquierda con el fin de trabajar únicamente con valores positivos. Una vez realizadas estas configuraciones, se realizó el seguimiento de los marcadores a lo largo del tiempo. Finalmente, se exportaron los resultados, los cuales consistieron en un video en formato Matroska con la trayectoria y un archivo en formato Excel con los puntos en todo instante de tiempo.

6.3 Cálculos con Excel. Utilizando el archivo en formato Excel, se utilizaron los puntos obtenidos en todo instante de tiempo para obtener los ángulos. Para ello

se realizaron cálculos matemáticos para finalmente obtener un resultado expresado en grados sexagesimales.
6.4 Procesamiento con Matlab. Utilizando los archivos en formato Excel con los ángulos calculados, estos se importaron al software Matlab. Aquí se elaboraron gráficas con el valor de los ángulos vs. el tiempo de ejecución de la técnica. Posteriormente, con ayuda del video grabado en el plano frontal anverso, se dividió la gráfica en las diferentes fases de movimiento.

7. Plan de contingencia en caso de lesiones musculares o malestar.

7.1 Durante la ejecución de la técnica: Se alentará al participante a informar de cualquier malestar o incomodidad que pueda experimentar mientras ejecuta la técnica. Además, el investigador presente estará atento ante cualquier señal de malestar. De este modo se busca prevenir lesiones al momento de realizar las repeticiones.

7.2 Primeros auxilios: Si la situación lo amerita, se coordinará inmediatamente el traslado del voluntario al centro médico de la PUCP donde recibirá la atención necesaria.

7.3 Seguimiento y registro: Se registrará en un documento cualquier incidente relacionado con lesiones musculares o malestar. Asimismo, se mantendrá contacto con el participante para realizar un seguimiento y brindarle el apoyo necesario durante su proceso de recuperación.

ANEXO B

Protocolo de consentimiento informado para la toma y uso de datos biomecánicos durante la ejecución del gesto técnico del malabarismo

Estimado/a participante:

Reciba un cordial saludo y una especial invitación para participar en la presente investigación. En este documento se brindará una explicación sobre el objetivo del estudio y cómo será su participación en los procesos involucrados.

El objetivo principal del estudio es realizar un análisis del gesto técnico del malabarismo como actividad lúdica para la prevención o recuperación física de miembros superiores. Para ello, se busca realizar una serie de grabaciones de usted como participante ejecutando el movimiento de malabarismo en cascada con tres pelotas. Para las grabaciones se usan cuatro cámaras posicionadas con la lente perpendicular a los tres planos anatómicos (frontal anverso y reverso, sagital y transversal).

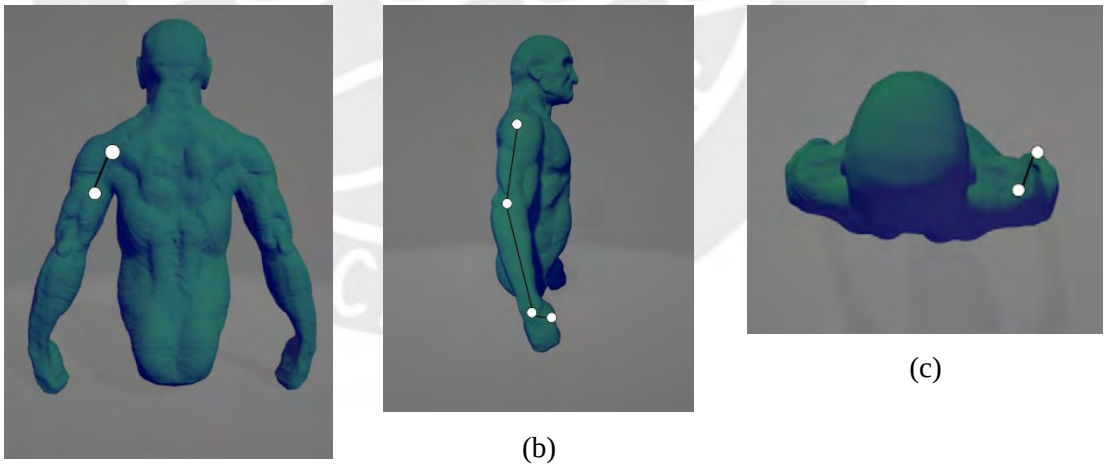
El estudio requiere que usted como participante posea regular experiencia en la ejecución del gesto técnico del malabarismo, esto se identifica con una habilidad al momento de realizar ajustes posturales anticipatorios al momento de ejecutar la técnica, así como una mejor estabilidad, de tal modo que el torso y los pies se mantengan en una postura casi constante. Asimismo, se requiere que usted como participante haya practicado durante el último mes malabares de forma constante.

Su participación es completamente voluntaria. Si usted accede a participar en este experimento, se le solicitará su atención al momento de realizar las explicaciones pertinentes, disponibilidad aproximada de un tiempo de 30 minutos, colaboración al momento de realizar los procedimientos requeridos y su consentimiento para el uso de los datos obtenidos. Así mismo, usted debe declarar no tener reacciones alérgicas al contacto de materiales adhesivos, ni al alcohol o algodón, debido a que se usarán marcadores reflectantes sobre su piel, previo a ello se le realizará una limpieza en la piel. Se le ruega también puntualidad al momento de presentarse al ensayo, caso contrario, se le cancelará la cita.

Al tratarse de un experimento que involucra movimiento físico, se le solicitará realizar un calentamiento previo con el fin de evitar lesiones. Al no tratarse de una actividad física vigorosa el riesgo es mínimo. Se le recuerda aquí también que el experimento no presenta riesgos en aspectos psicológicos, económicos o sociales.

El procedimiento se encuentra dividido en las siguientes fases, todo en una misma sesión en un solo día:

1. Calentamiento: Se le pide que realice un calentamiento de la forma que usted encuentre conveniente en un tiempo de 5 minutos. Se recomienda realizar estiramientos suaves y progresivos de las articulaciones del hombro, codo y muñeca.
2. Preparación: En esta fase se procederá a realizar una limpieza en la piel haciendo uso del algodón y el alcohol en las zonas donde se posicionarán los marcadores. Se posicionarán un total de 8 marcadores reflectantes en uno de sus brazos haciendo uso de la cinta doble contacto, estos se encontrarán distribuidos desde el hombro hasta los dedos de la mano. La posición de los marcadores puede observarse en la Figura 1. Se le indicará también donde posicionarse. A continuación, se pedirá que realice el movimiento por aproximadamente 15 segundos.



(a) (b) (c)

Figura 1. Imagen referencial de la distribución de los marcadores, (a) 2 en el plano frontal, (b) en el plano sagital y (c) 2 en el plano transversal. Extraída de: Sketchfab, “Male Upper Body”

3. Toma de ensayos: Una vez finalizada la preparación, se iniciará la grabación con las tres cámaras. Posteriormente se le pedirá que inicie el movimiento, un segundo

luego se emitirá un destello de luz enfocado únicamente a las cámaras, evitando así generar molestia alguna. El tiempo aproximado que se mantendrá realizando el movimiento constante será de 15 segundos. Este último paso se repetirá un total de 4 veces.

Su identidad siempre será tratada de manera confidencial y se le asignará un número de modo que en ningún momento se utilizará su nombre más allá de la firma del presente documento. Sin embargo, acepta el uso de su imagen en las grabaciones y posible elaboración de figuras, las cuales serán modificadas, ocultando su rostro, en caso se usen en publicaciones, de modo que no sea posible identificarlo. Es decir, en caso sea necesaria la publicación de imágenes o videos, se realizará una edición de estas cubriendo su rostro con una elipse como se observa en la Figura 2. Toda su participación quedará registrada y guardada en los archivos obtenidos luego de la grabación, edición y procesamiento de los videos. Asimismo, toda la información extraída y procesada de los vídeos quedará registrada en los documentos relacionados al ensayo.

Figura 2. Ejemplo de foto editada con la finalidad de conservar la confidencialidad. Extraída de: Professional Juggler, “Basic Juggling Lesson/ 3 Ball Cascade,” YouTube. Jan. 24, 2008.

Al ser su participación completamente voluntaria, usted podrá retirarse de la misma sin ninguna repercusión, así como solicitar la eliminación de todos los datos involucrados si así lo considera. Así mismo, si usted desea tener acceso a los datos, lo podrá hacer poniéndose en contacto por medio de correo electrónico con los involucrados en el experimento. De este modo, se le anima también a expresar cualquier disconformidad o preocupación que pudiera surgir, así como solicitar un descanso en caso lo considere necesario.

Al finalizar esta investigación, usted podrá tener acceso a los resultados poniéndose en contacto con el correo electrónico de las personas involucradas. Por ese mismo medio, usted podrá solicitar más información si así lo desea. Las direcciones de correo electrónico se encuentran al final del presente documento. Además, si tiene alguna consulta sobre aspectos éticos, puede comunicarse con el Comité de Ética de la Investigación de la universidad, al correo electrónico etica.investigacion@pucp.edu.pe.

Usted recibirá una copia firmada de este documento.

Si está de acuerdo con su participación, proceda a completar los datos a continuación. Con esto, usted declara haber leído y comprendido completamente sobre los objetivos y su participación voluntaria en el presente experimento, así como los riesgos y beneficios involucrados en el mismo, autorizando así su participación.

_____

Nombre completo del (de la) participante Firma Fecha

_____

Nombre del Investigador responsable Firma Fecha

Direcciones de contacto:

Dante Angel Elías Giordano (Investigador principal): delias@pucp.pe

Luis Gustavo Loja Mauricio (Asistente de investigación): a20181016@pucp.edu.pe

ANEXO C

Aprobación de estudios en personas por parte del comité de ética

Vicerrectorado de Investigación

Comité de Ética de la Investigación para Ciencias de la Vida y Tecnologías

PUCP

DICTAMEN

Datos del documento:

Número de dictamen:	N° 074-2023-CEICVyT/PUCP
Título del protocolo:	Análisis cinemático de movimiento en el gesto técnico del malabarismo para la prevención o recuperación física de miembros superiores
Número de solicitud:	N° 052-2023

Documentos revisados:

1. Declaración de compromiso con los principios éticos de la investigación con seres humanos
2. Protocolo de investigación
   - Protocolo de consentimiento informado para la toma y uso de datos biomecánicos durante la ejecución del gesto técnico del malabarismo

Dictamen:

Aprobado

Fecha de aprobación:

21 de agosto del 2023

Instituciones o lugares en los que se realizarán el protocolo experimental:

Campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú

Sobre el investigador principal:

Nombre completo:	Dante Ángel Elías Giordano
Institución a la que está adscrito:	Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

Datos del CEI que ha evaluado el presente proyecto:

CEI para Ciencias de la Vida y Tecnologías
Dirección: Av. Universitaria 1801, San Miguel
Teléfono: 6262000 anexo 2237
Correo: oetiic.secretariatecnica@pucp.edu.pe

Información sobre la constitución y funcionamiento del CEI:

Número de miembros:

Se encuentra compuesto de 10 miembros.
Se logra el quórum con 6 miembros.

Miembros presentes en la toma de decisión:

Dr. César Armando Beltrán Castañón (Presidente)
Dr. Rosendo Franco Rodríguez (miembro titular)
Dra. Myriam Virginia Pajuelo Cubillas (miembro titular)
Dra. Paloma Friedda Salas Fernandez (miembro titular)
Mg. Fernando Del Mastro Puccio (miembro titular)
Mg. Sergio Sánchez Gambetta (miembro titular)
Dra. María Elena López Herrera (miembro titular)

Celia Adriana Trejo Toro (miembro titular)
Luz Ainaí Morales Pino (miembro alterno que reemplaza a titular)

Alicia Pérez García (Secretaria Técnica)

Fechas de las sesiones en las que se evaluó el proyecto

14 de julio del 2023:	El proyecto fue observado. Las observaciones emitidas fueron enviadas al investigador principal.
18 de agosto del 2023:	El levantamiento de observaciones fue evaluado por el CEI-CVyT. Las nuevas observaciones emitidas fueron enviadas al investigador principal.
21 de agosto del 2023:	El proyecto fue aprobado luego de que los miembros evaluadores del CEI-CVyT verificaran que las observaciones fueron levantadas.

Información a tener en cuenta:

1. El presente protocolo de investigación solo podrá llevarse a cabo en el centro de investigación que se ha indicado y bajo la conducción del investigador principal a partir del día siguiente de contar con la aprobación ética respectiva.
2. Cualquier enmienda que desee realizar, debe ser comunicada a la Secretaría Técnica del CEI-CVyT-PUCP, antes de la realización de la misma.
3. Asimismo, si surgieran eventos adversos serios, reacciones adversas serias o inesperadas, o la necesidad de desviar el protocolo, el investigador está obligado a reportarlos al CEI-CVyT-PUCP.
4. Este dictamen es válido solo para el proyecto evaluado por el CEI-CVyT-PUCP. Cualquier otro proyecto que se quiera llevar a cabo utilizando la información recogida en el marco de este proyecto, debe solicitar la evaluación ética correspondiente.
5. Este dictamen tiene una vigencia de un año (al 21 de agosto del 2024). Pasado este periodo, los investigadores deberán solicitar una renovación, con una anticipación de 30 días al vencimiento de la vigencia.
6. Al finalizar la investigación, se deberá presentar un informe de cierre, según el formulario establecido por el CEICVyT-PUCP.

Dr. César Armando Beltrán Castañón
Presidente
Comité de Ética de la Investigación para
Ciencias de la Vida y Tecnologías

ANEXO D

Lista e imágenes de los materiales empleados en los ensayos

Tres pelotas para malabares (6.35 cm de diámetro)

Ocho marcadores reflectantes

Una cinta métrica

Dos cámaras de video digitales SONY / FDR AX 700

Una cámara de video digital PANASONIC / HC VX 980

Una cámara de celular XIAOMI 11 T PRO / 20107113SG

Un nivel

Dos luminarias

Tres trípodes

Soporte flexible para celular

Cinta de enmascarar

Cinta doble contacto

Alcohol de farmacia

Algodón de farmacia

ANEXO E

Detalles de la convocatoria realizada por medio de redes sociales

ANEXO F

Protocolo de consentimiento informado para entrevistas para participantes

Estimado/a participante,

Le pedimos su apoyo en la realización de una investigación en categoría de proyecto de tesis realizada por el estudiante *Luis Gustavo Loja Mauricio,* alumno de la Carrera de Ingeniería Biomédica de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesorada por el docente Dante Angel Elías Giordano. La investigación, denominada "Análisis de movimiento en el gesto técnico del malabarismo para la prevención o recuperación física de miembros superiores", tiene como propósito comprender las características del malabarismo y su potencial aplicación dentro de la rehabilitación y/o prevención de lesiones en el miembro superior.

Se le ha contactado a usted en calidad de especialista en Terapia Física. Si usted accede a participar en esta entrevista, se le solicitará responder diversas preguntas sobre el tema antes mencionado, lo que tomará aproximadamente entre 30 y 60 minutos. La información obtenida será únicamente utilizada para la elaboración de una tesis. Asimismo, únicamente el alumno y el asesor tendrán acceso a las notas de la entrevista. Su participación en la investigación es completamente voluntaria. Usted puede interrumpir la misma en cualquier momento, sin que ello genere ningún perjuicio. Además, si tuviera una consulta sobre la investigación, puede formularla como considera conveniente, a fin de clarificarla oportunamente.

Al concluir la investigación, si usted brinda su correo electrónico, se le enviará un informe ejecutivo de los resultados de la tesis por dicho medio.

En caso de tener alguna duda sobre la investigación, puede comunicarse al siguiente correo electrónico: a20181016@pucp.edu.pe o al número +51 961 532 812. Además, si tiene alguna consulta sobre aspectos éticos, puede comunicarse con el Comité de Ética de la Investigación de la universidad, al correo electrónico etica.investigacion@pucp.edu.pe. Si está conforme con lo expresado, complete la siguiente información.

Yo, _____, doy mi consentimiento para participar en el estudio y autorizo que mi información se utilice en este.

Asimismo, estoy de acuerdo que mi identidad sea tratada de manera (*marcar una de las siguientes opciones*):

	Declarada, es decir, que en la tesis se hará referencia expresa de mi nombre.
	Confidencial, es decir, que en la tesis **no** se hará ninguna referencia expresa de mi nombre y el/la tesista utilizará un código de identificación o pseudónimo.

Finalmente, entiendo que recibiré una copia de este protocolo de consentimiento informado.

Nombre completo del (de la) participante	Firma	Fecha

Correo electrónico del participante: _____

Nombre del Investigador responsable	Firma	Fecha

ANEXO G

Resultados obtenidos durante las sesiones

Sesión 1

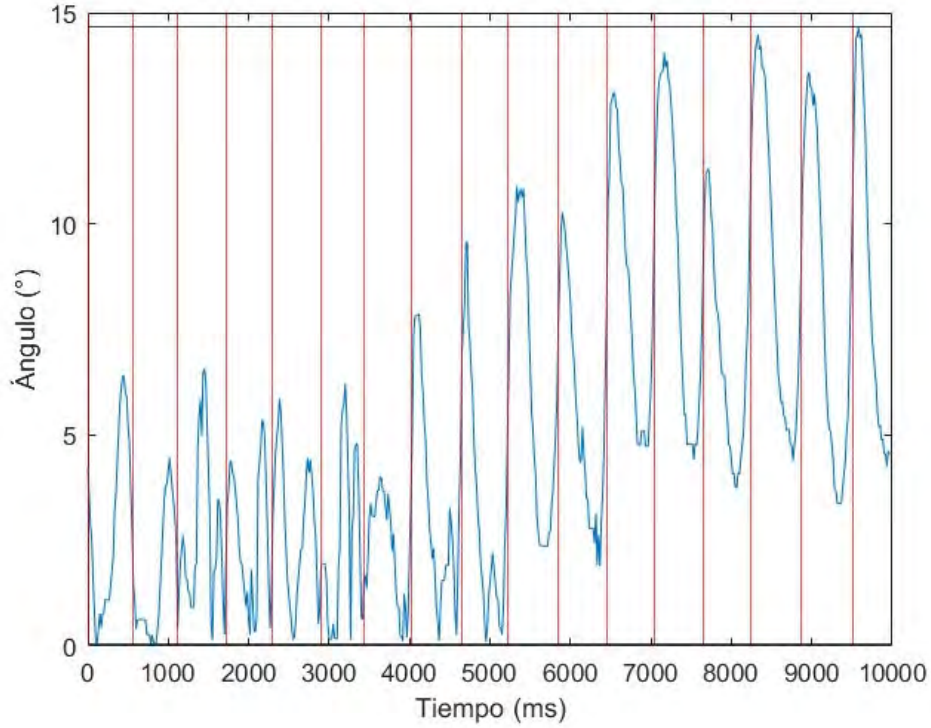


Figura G.1 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 1.

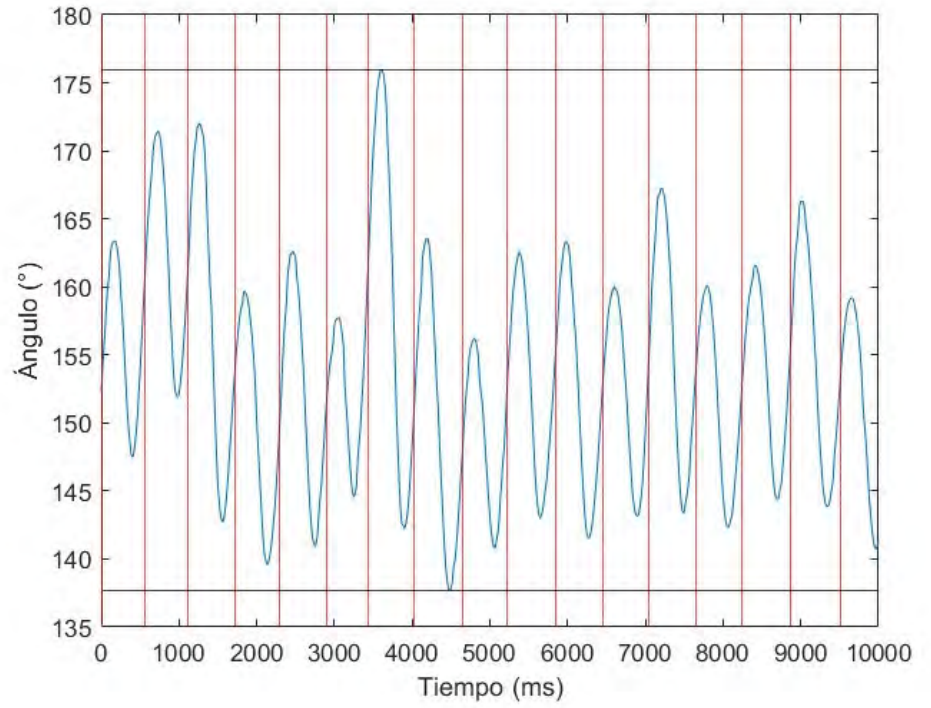


Figura G.2 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 1.

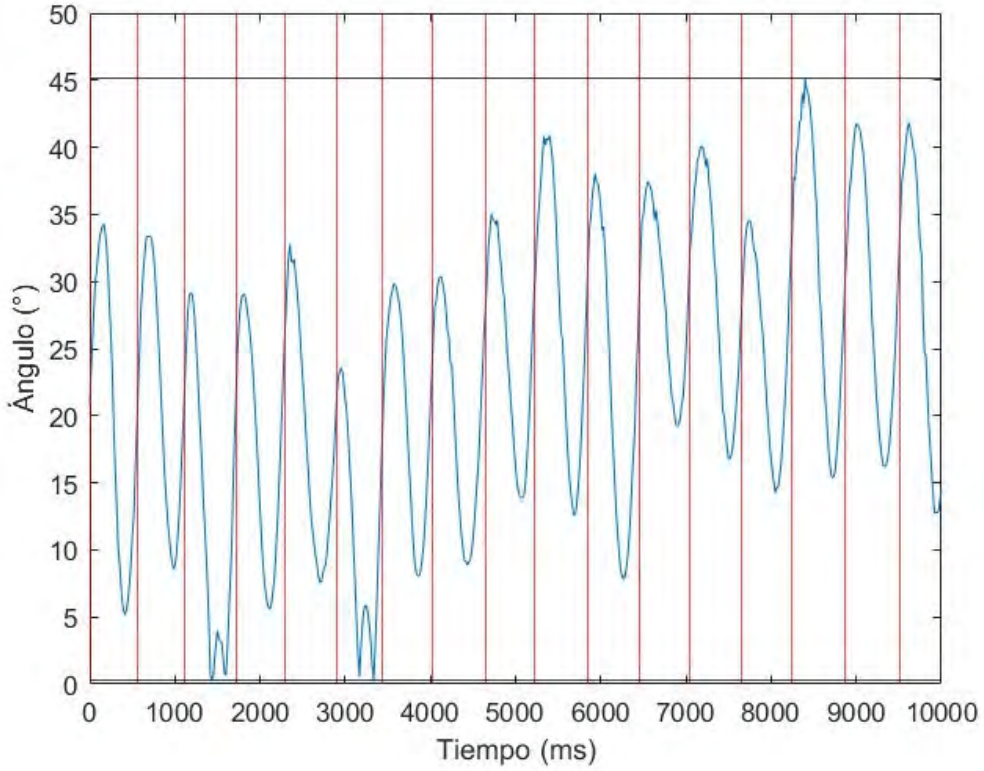


Figura G.3 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 1.

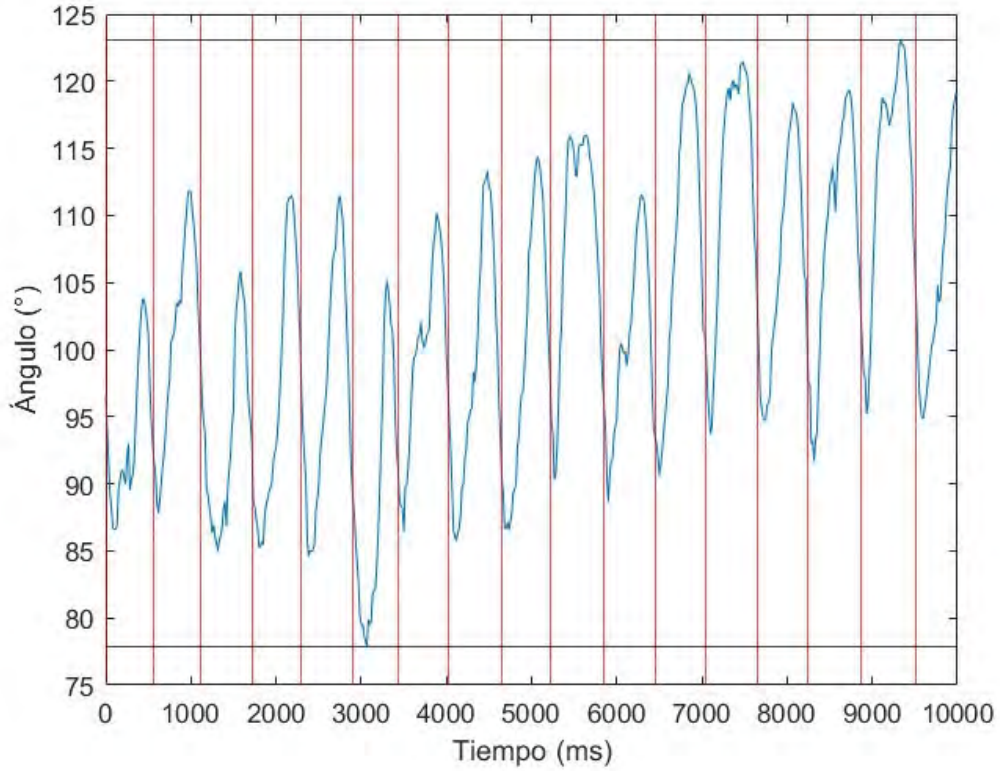


Figura G.4 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 1.

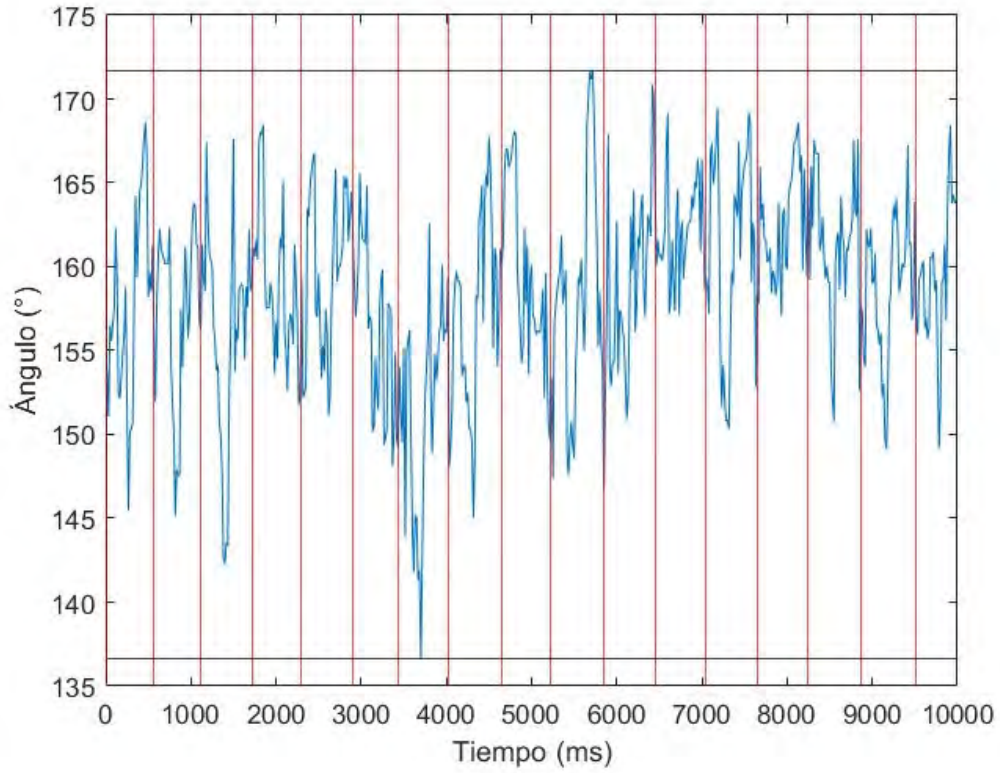


Figura G.5 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 1.

Tabla G.1. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 1.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	567	6.32	15.88	29.08	17.17	23.15
2	550	4.40	19.57	24.75	24.06	18.66
3	600	6.42	29.28	28.92	20.83	25.30
4	583	5.09	20.08	23.42	26.23	16.71
5	600	5.70	21.69	25.16	26.81	15.65
6	533	6.07	17.00	23.29	27.28	17.50
7	600	4.89	33.70	21.79	23.73	25.97
8	617	7.74	25.90	21.50	27.51	22.72
9	567	9.49	15.42	21.20	27.81	18.43
10	633	8.52	19.59	28.30	25.68	25.06
11	600	8.38	21.80	30.27	22.91	24.17
12	600	8.37	16.93	18.22	29.97	12.07
13	600	9.64	23.86	23.35	27.71	19.20
14	600	8.16	17.77	20.26	23.67	11.51
15	617	10.09	17.19	29.84	27.63	16.83
16	650	10.21	22.45	25.54	27.84	18.08

Sesión 2

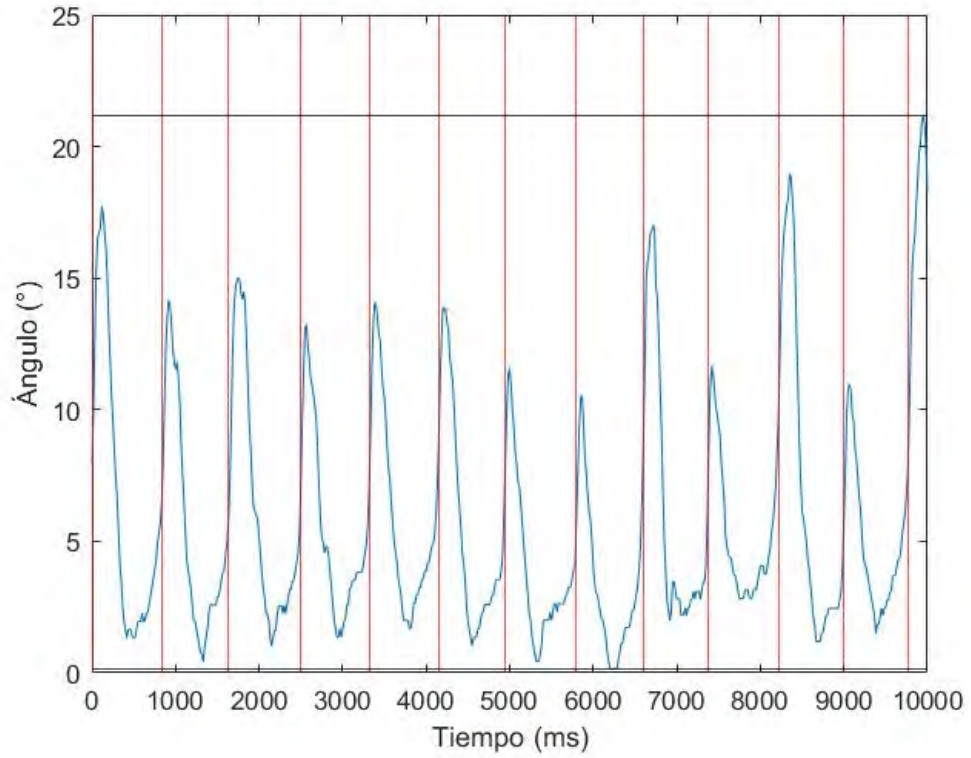


Figura G.6 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 2.

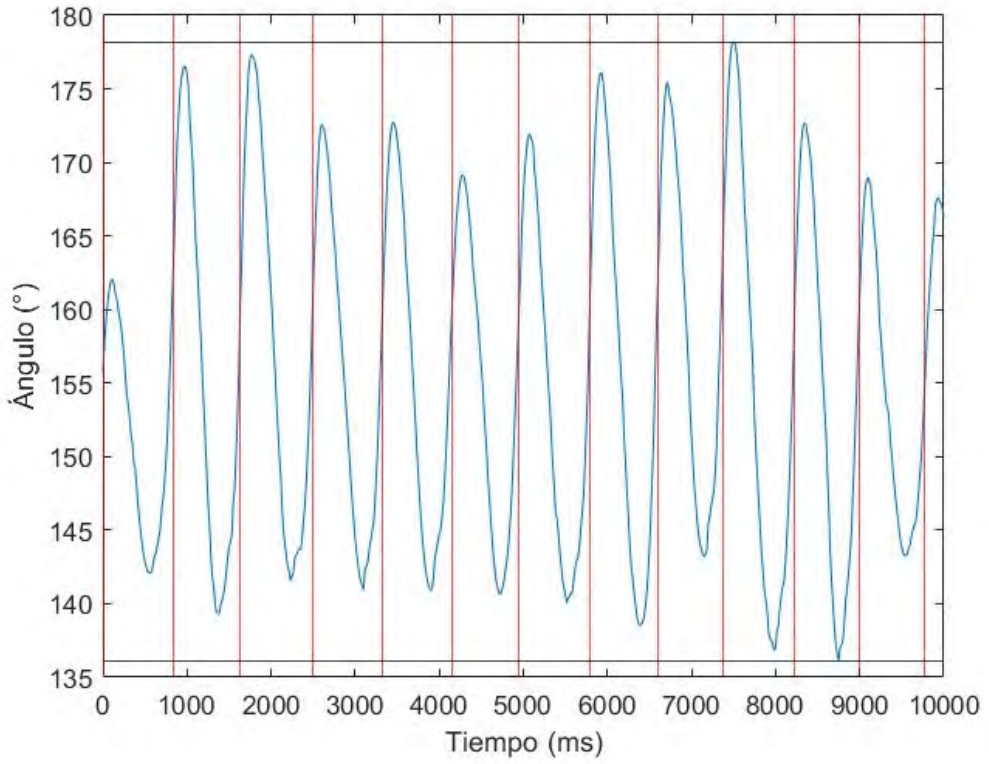


Figura G.7 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 2.

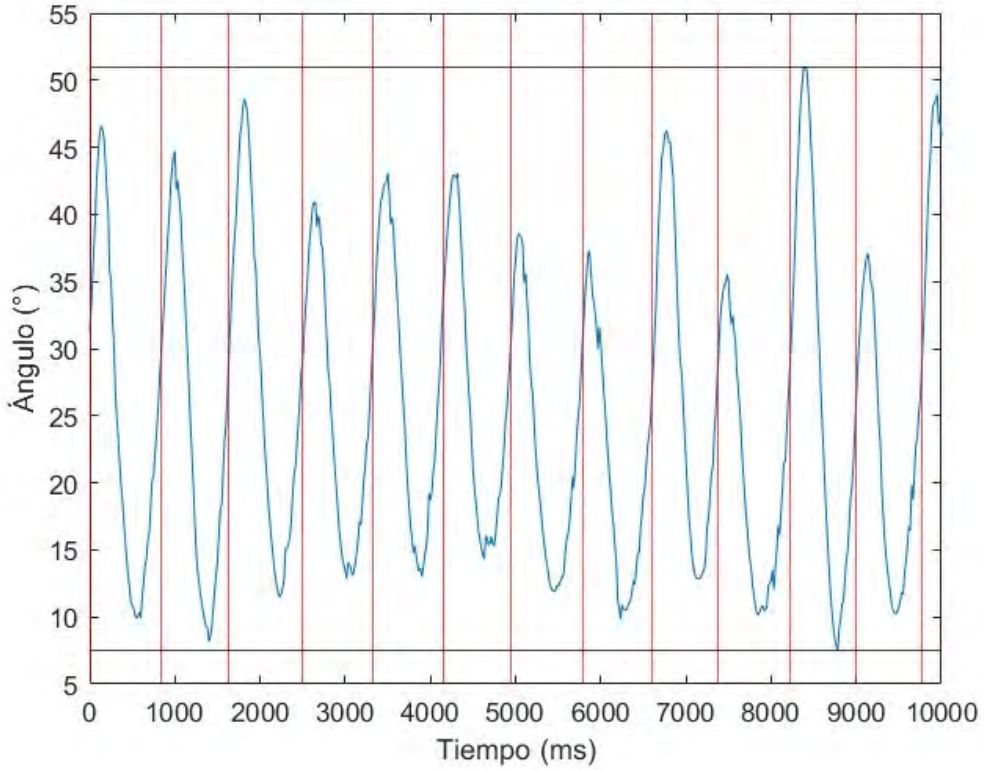


Figura G.8 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 2.

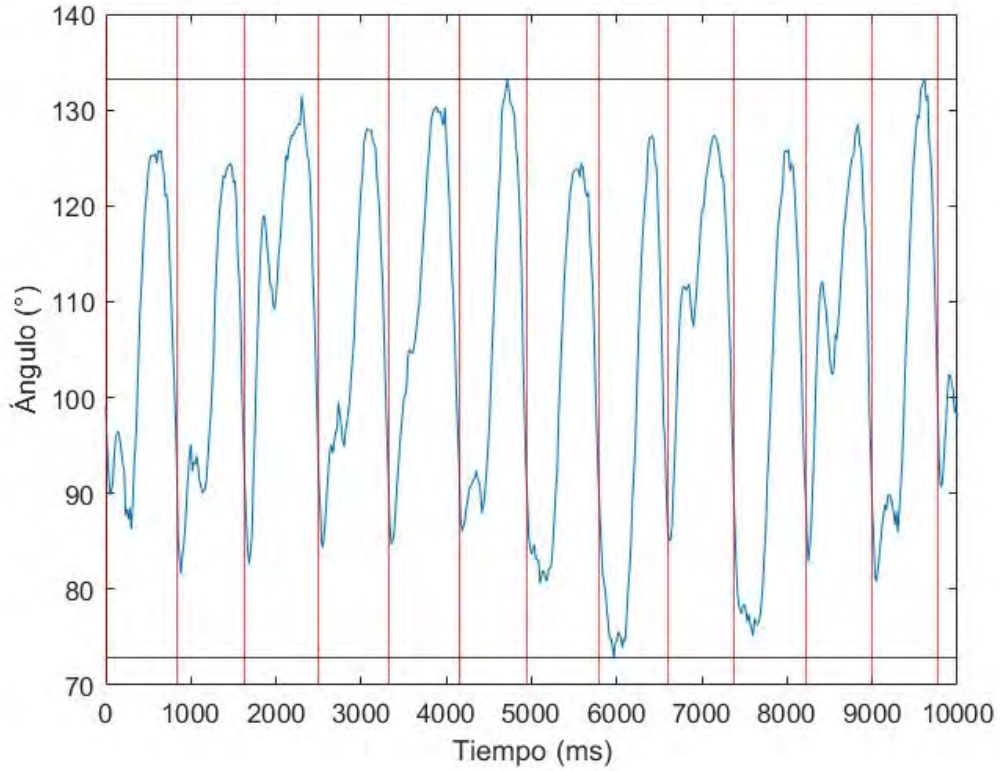


Figura G.9 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 2.

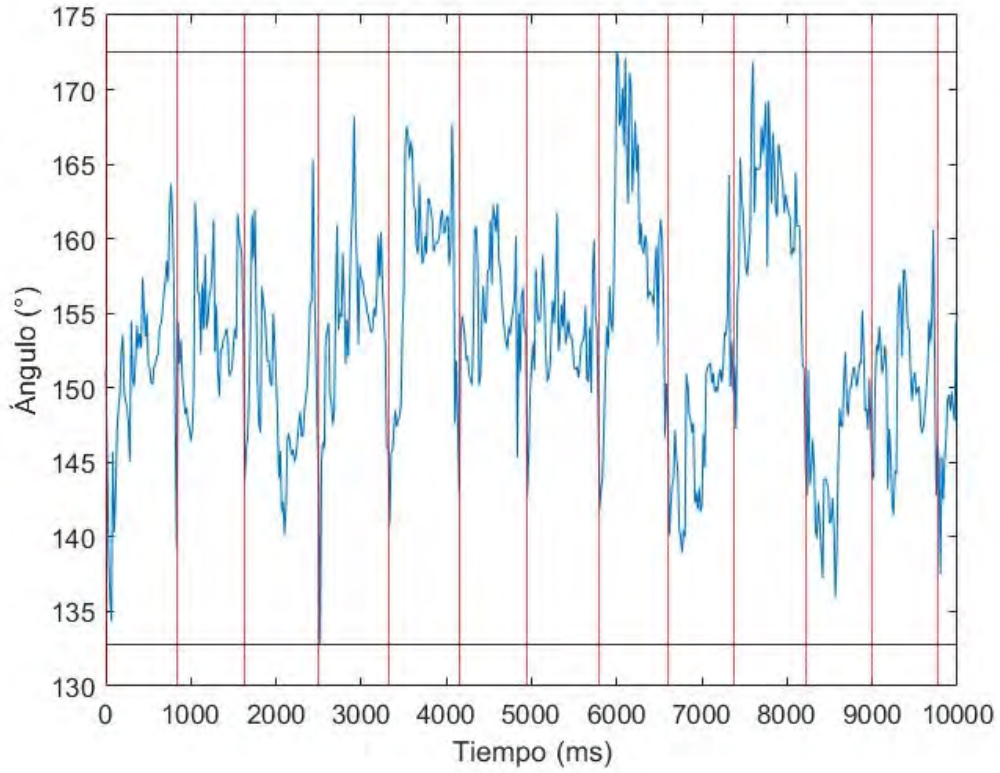


Figura G.10 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 2.

Tabla G.2. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 2.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	833	16.42	20.32	36.68	39.61	29.34
2	800	13.75	37.26	36.58	42.82	23.12
3	867	14.00	35.77	37.12	48.78	25.08
4	833	11.89	31.62	28.07	43.76	35.38
5	817	12.40	31.81	30.11	45.58	26.81
6	800	12.88	28.48	28.75	47.18	19.63
7	850	11.14	31.85	26.67	43.84	19.80
8	800	10.38	37.52	27.45	54.50	30.54
9	783	15.01	32.24	33.37	42.28	25.27
10	834	8.84	41.33	25.37	50.73	27.29
11	783	17.76	36.60	43.46	45.63	19.26
12	767	9.45	25.69	26.87	52.26	19.13

Sesión 3

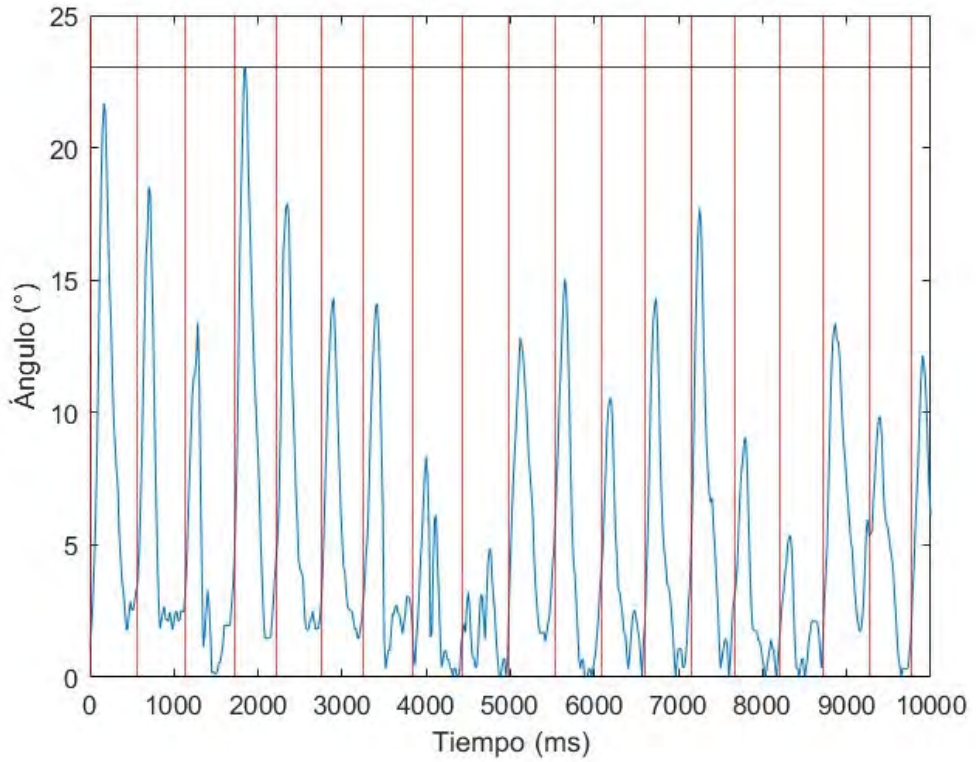


Figura G.11 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 3.

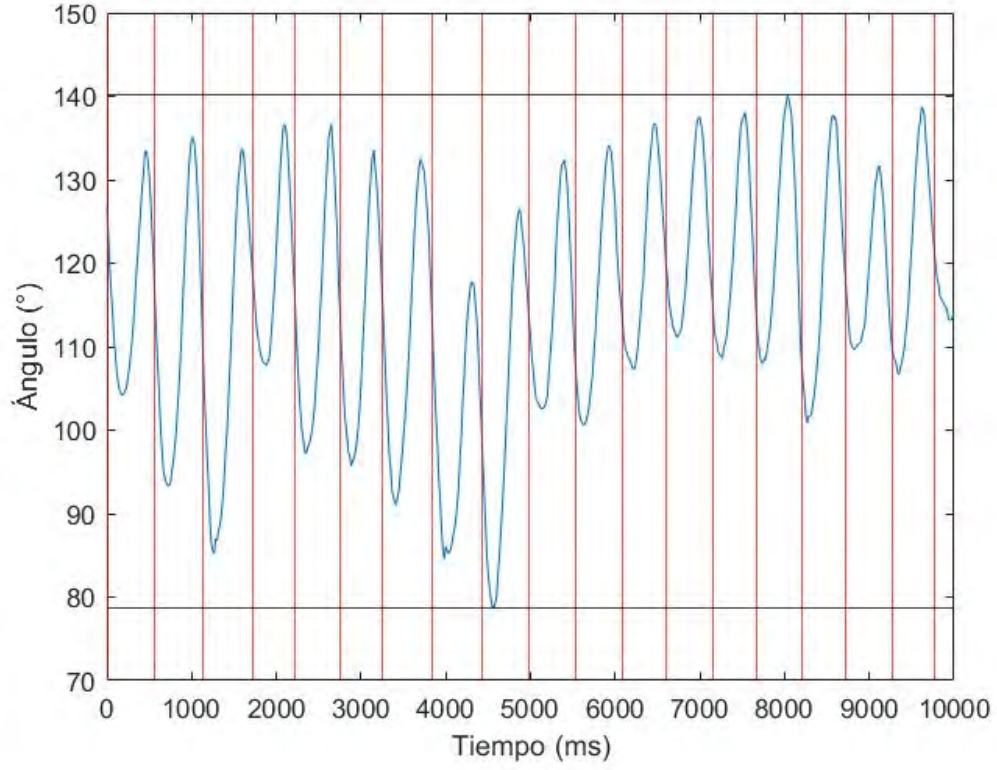


Figura G.12 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 3.

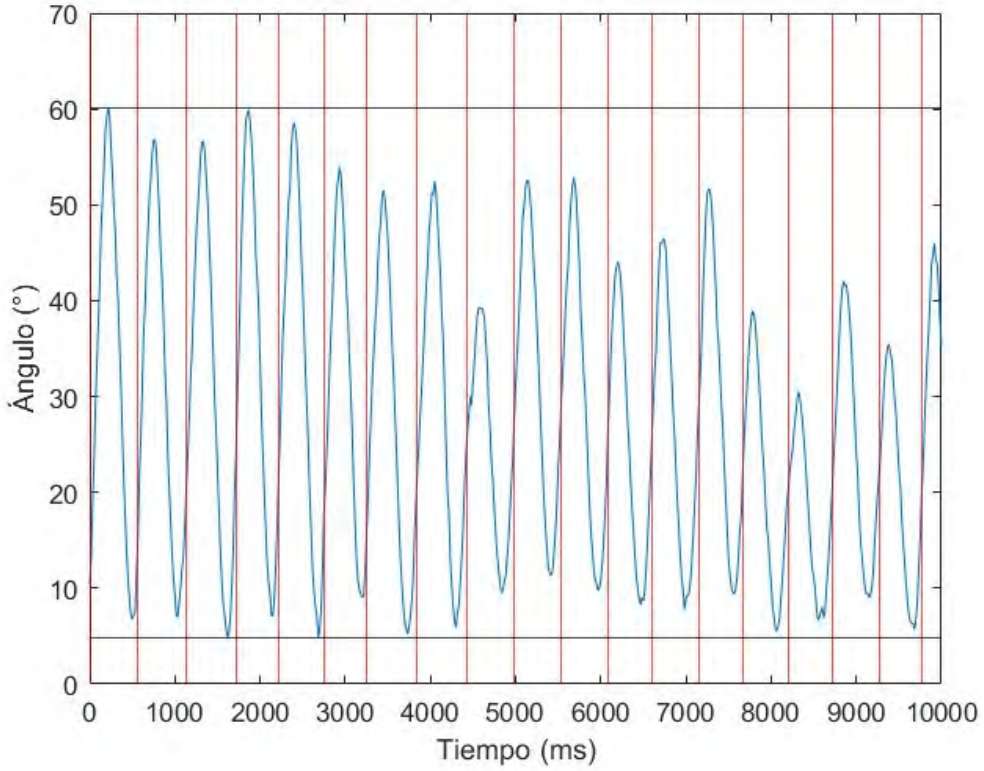


Figura G.13 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 3.

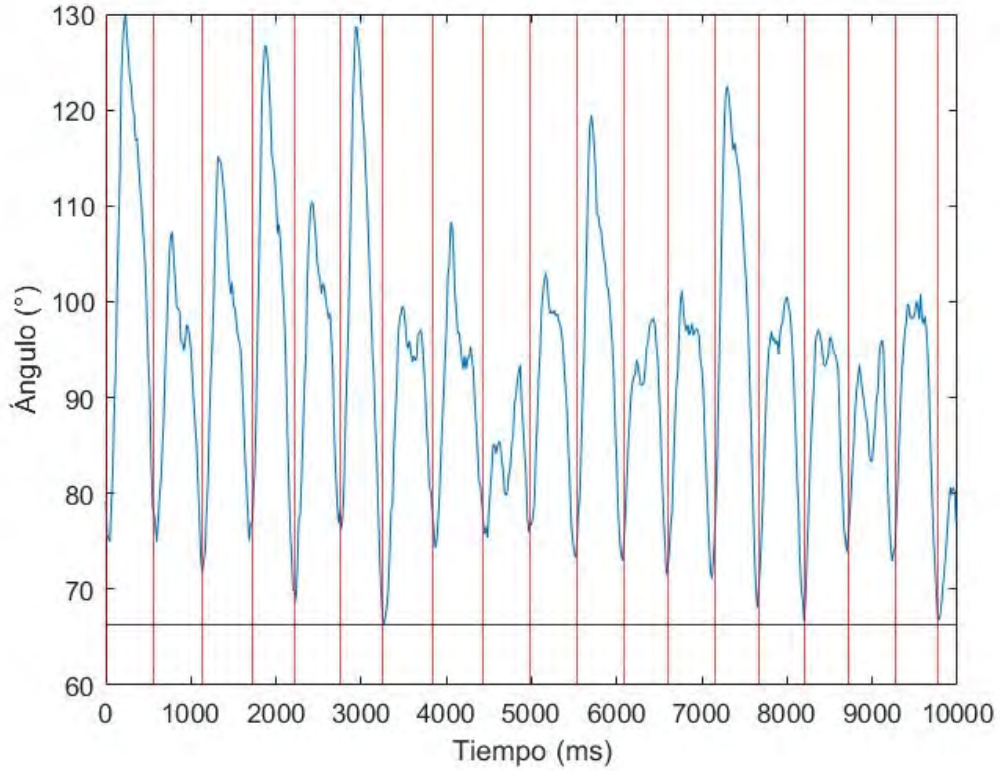


Figura G.14 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 3.

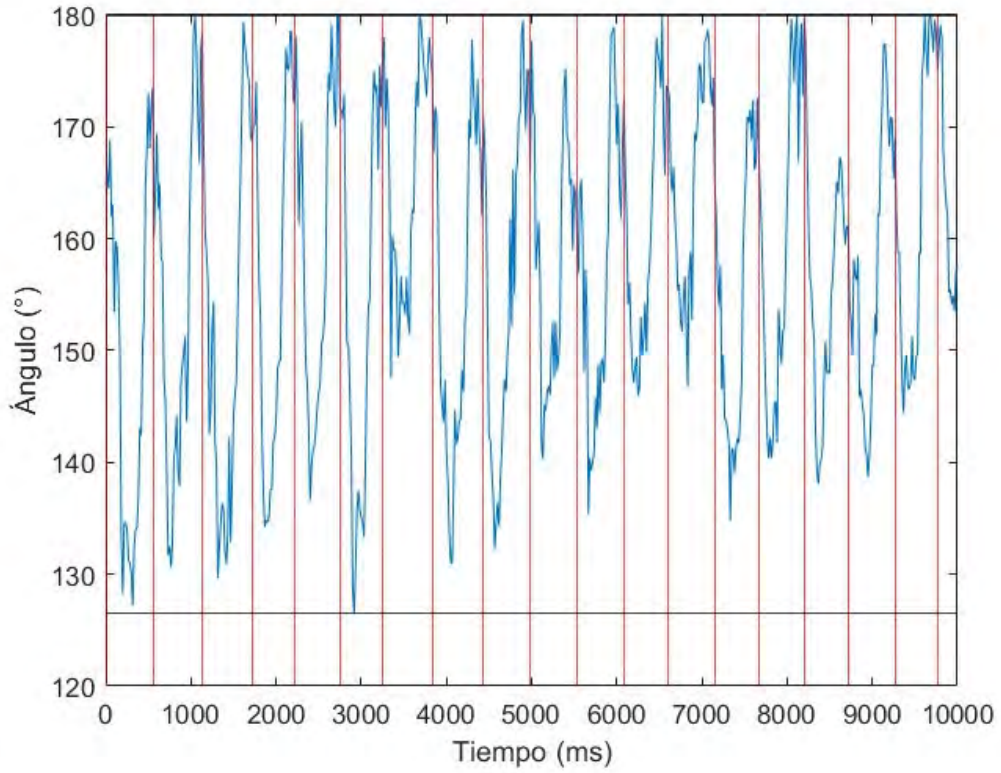


Figura G.15 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 3.

Tabla G.3. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 3.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	567	20.55	29.30	53.34	55.00	46.30
2	566	16.75	41.67	49.80	35.41	49.28
3	584	13.27	48.38	51.73	43.36	49.77
4	500	21.55	28.87	52.81	56.84	44.41
5	533	16.10	39.49	53.73	41.54	43.33
6	500	12.85	37.86	44.91	61.53	49.49
7	583	13.80	41.43	46.26	33.28	32.30
8	600	8.30	33.12	46.55	33.99	46.90
9	550	4.81	47.78	29.78	18.05	47.25
10	550	11.47	29.77	41.26	29.66	37.38
11	550	15.04	33.41	43.07	46.47	43.56
12	517	10.51	29.38	35.77	26.75	33.97
13	550	14.30	26.34	38.62	29.97	31.89
14	517	17.70	29.49	42.30	54.41	37.84
15	533	9.04	32.14	33.37	33.84	39.64
16	517	5.34	36.84	23.81	30.37	41.66
17	550	11.98	22.05	33.01	23.10	38.79
18	500	9.79	32.10	29.78	33.81	35.54

Sesión 4

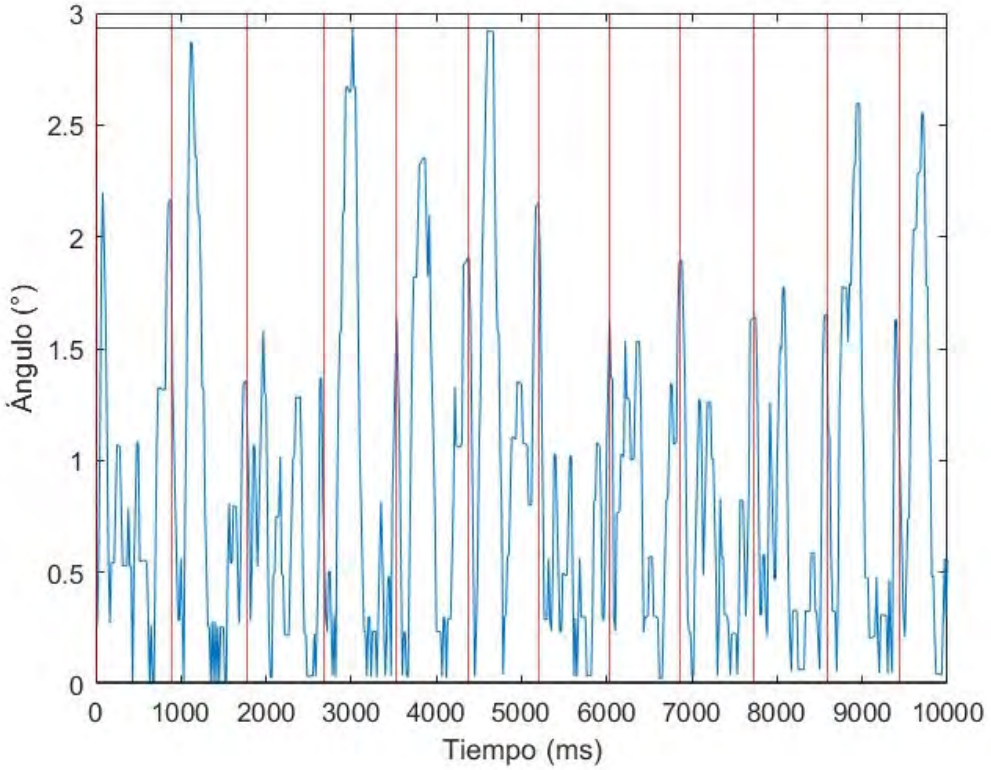


Figura G.16 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 4.

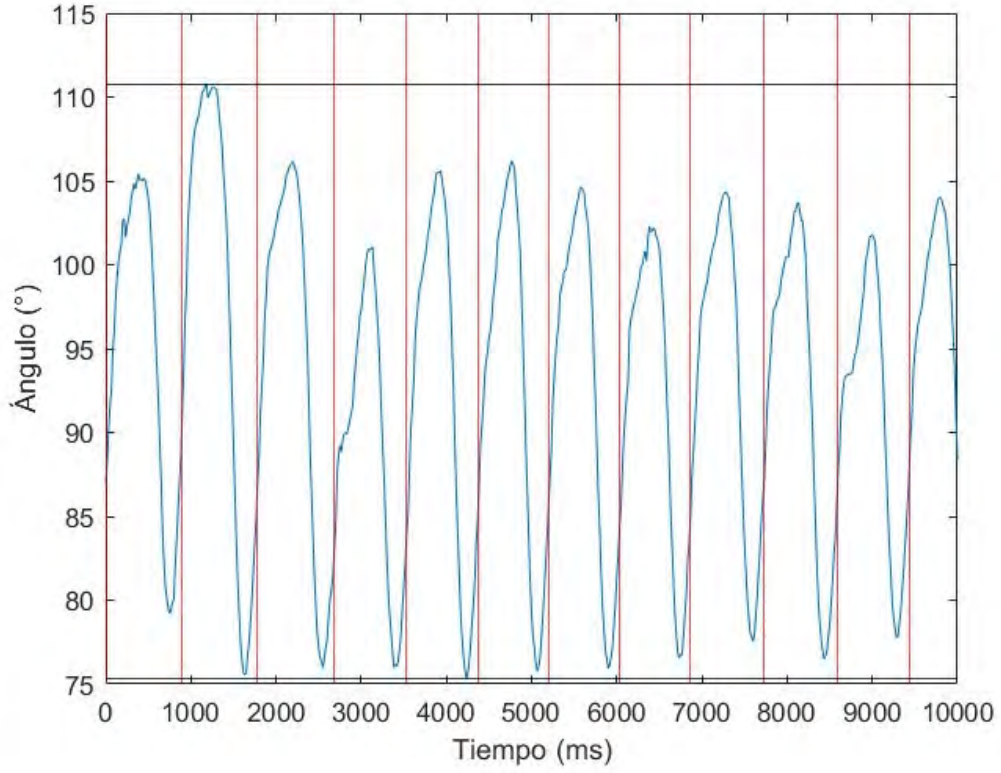


Figura G.17 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 4.

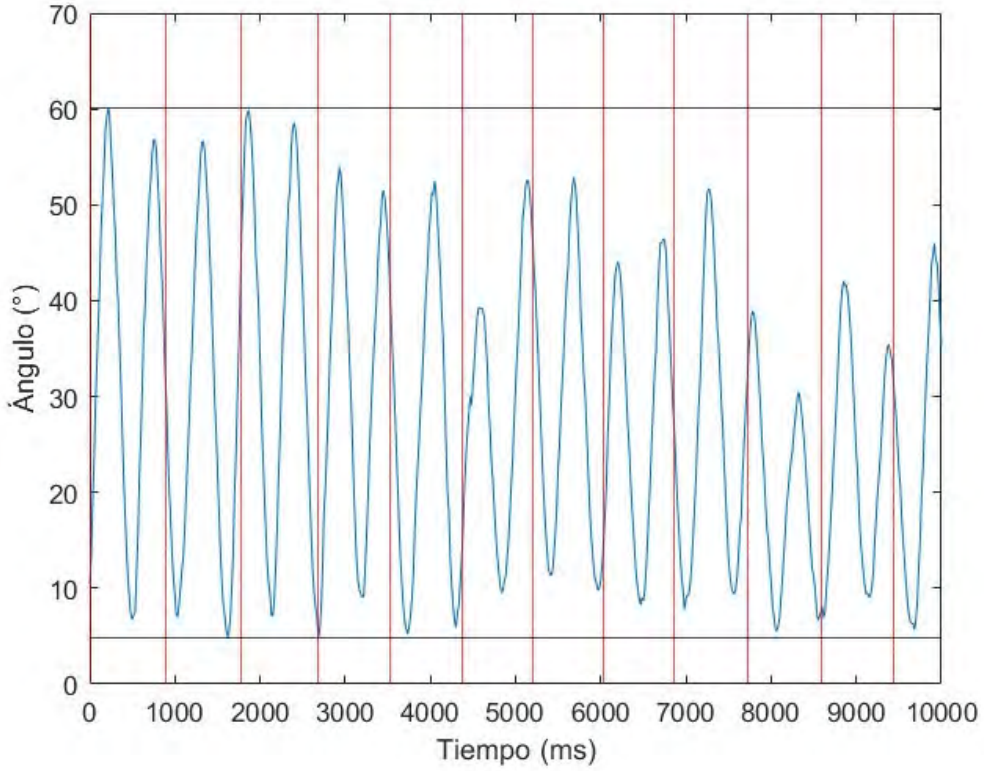


Figura G.18 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 4.

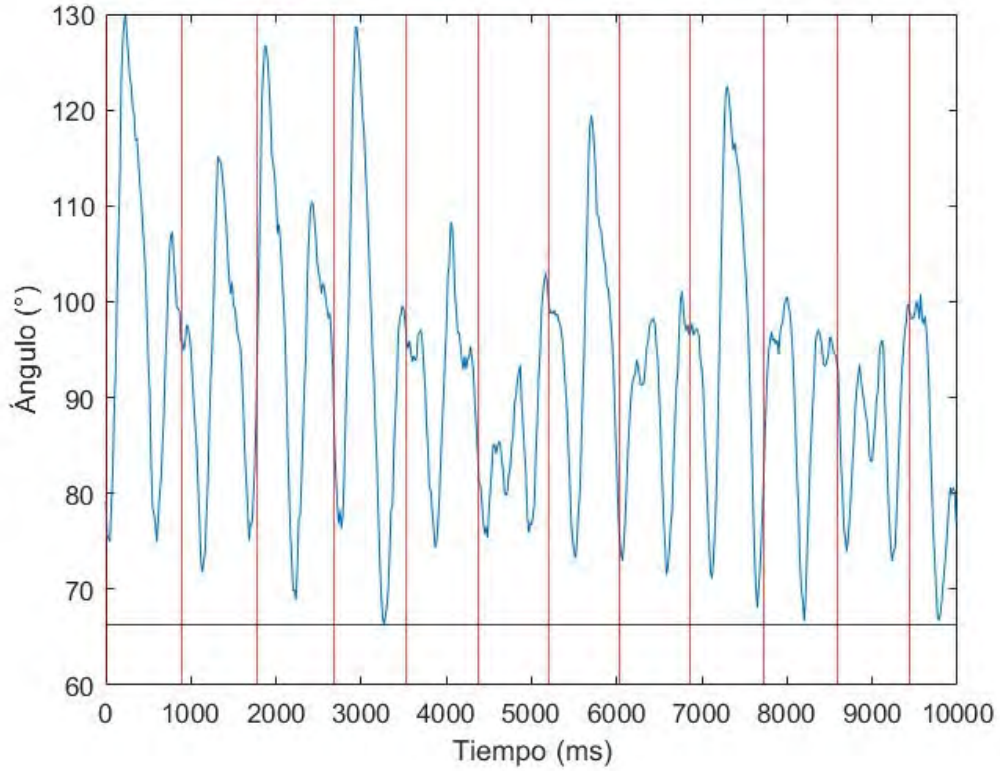


Figura G.19 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 4.

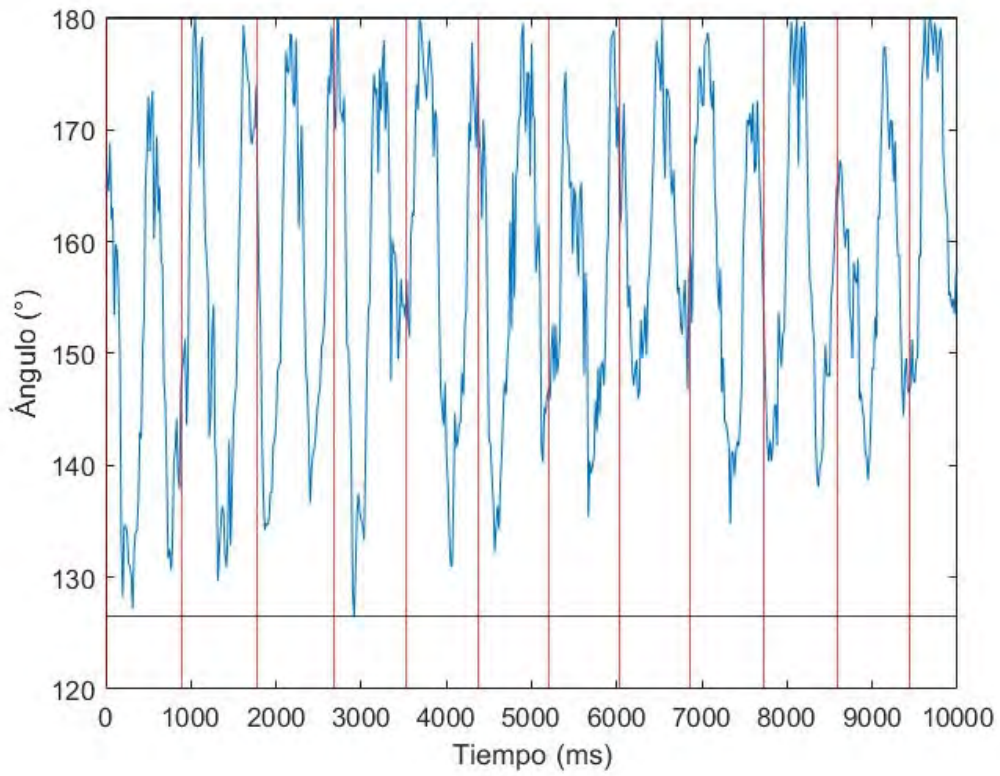


Figura G.20 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 4.

Tabla G.4. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 4.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	900	2.19	26.22	53.34	55.08	46.30
2	883	2.86	35.22	51.73	43.36	50.24
3	900	1.55	30.19	55.06	57.79	45.01
4	850	2.91	25.06	49.12	62.39	53.50
5	834	2.33	30.27	47.22	33.99	48.92
6	833	2.89	30.45	43.03	27.61	47.25
7	833	2.12	28.68	43.07	46.13	43.56
8	834	1.87	25.75	38.17	29.53	33.97
9	866	1.86	26.81	43.86	54.41	43.92
10	867	1.72	27.22	33.37	33.84	41.92
11	833	2.55	24.01	35.13	26.89	38.79

Sesión 5

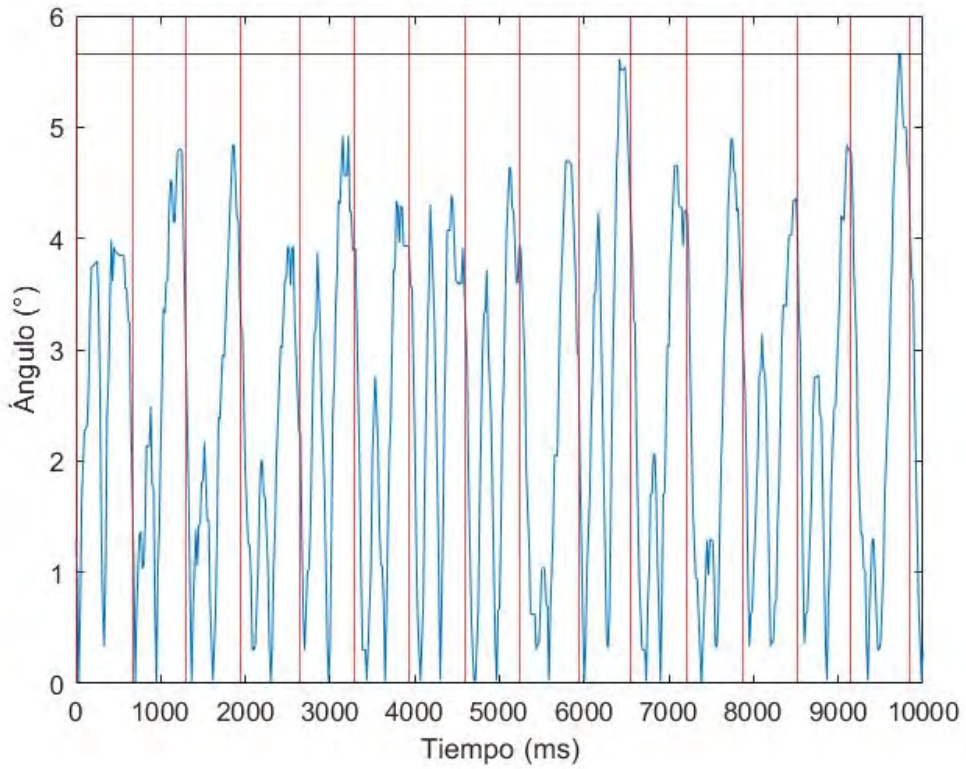


Figura G.21 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 5.

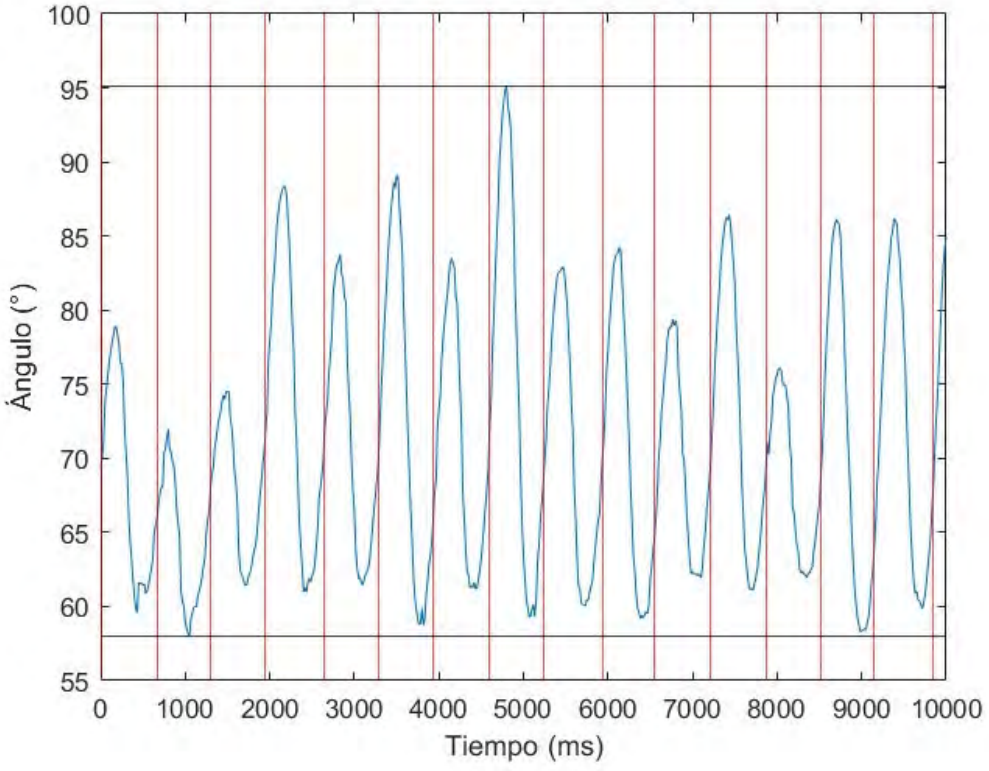


Figura G.22 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 5.

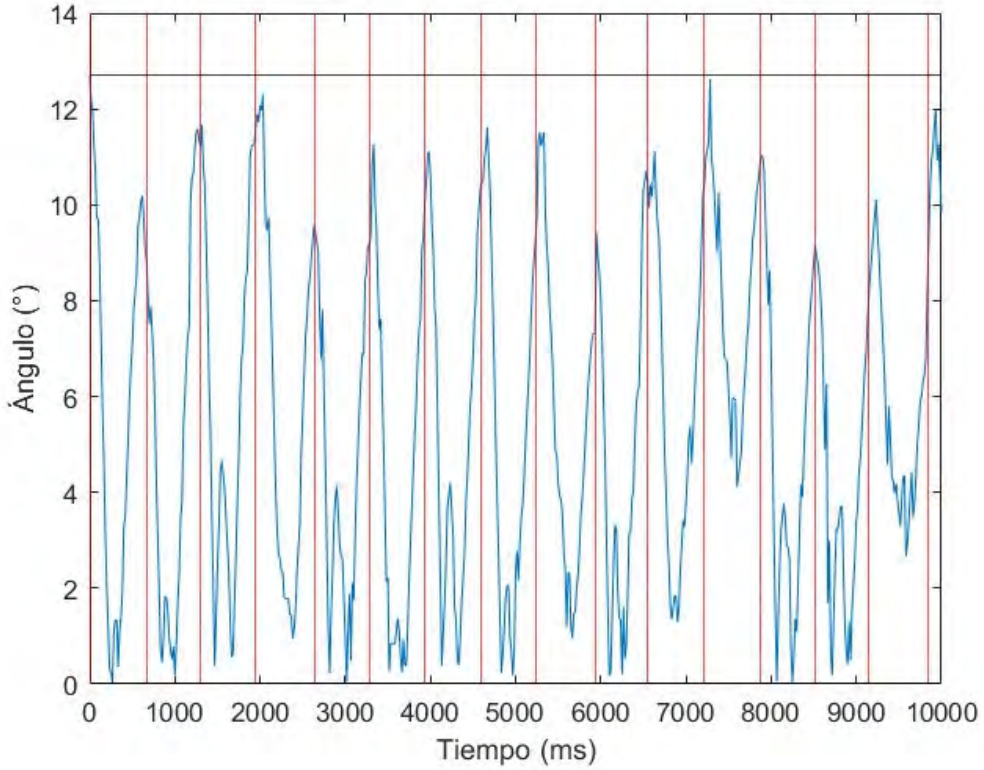


Figura G.23 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 5.

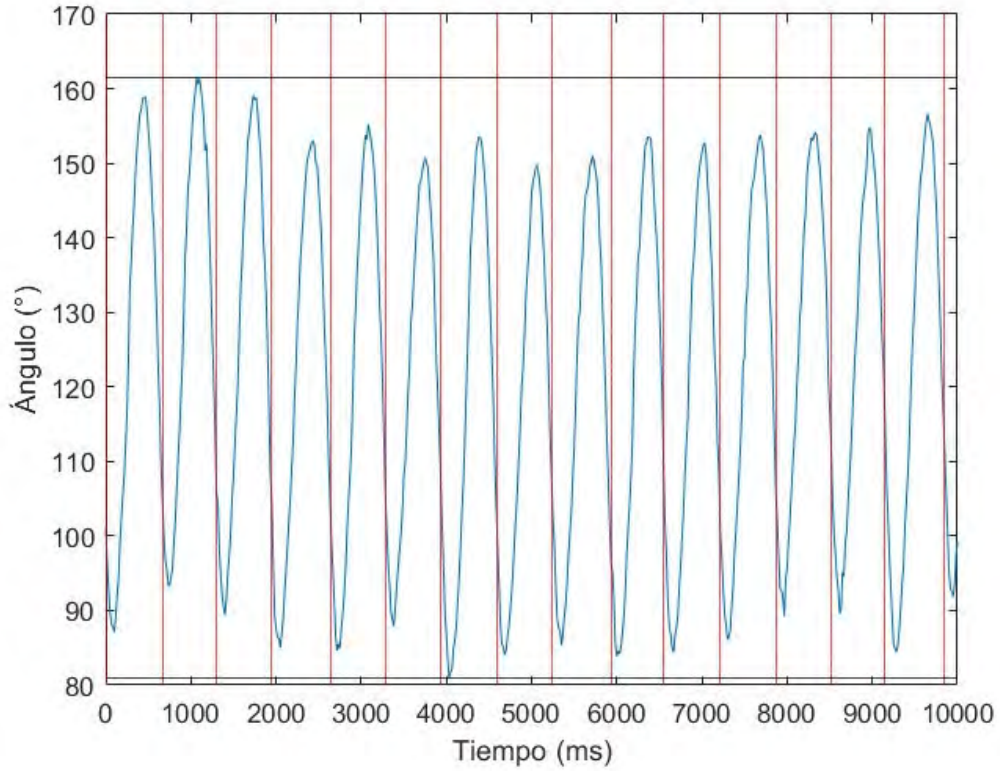


Figura G.24 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 5.

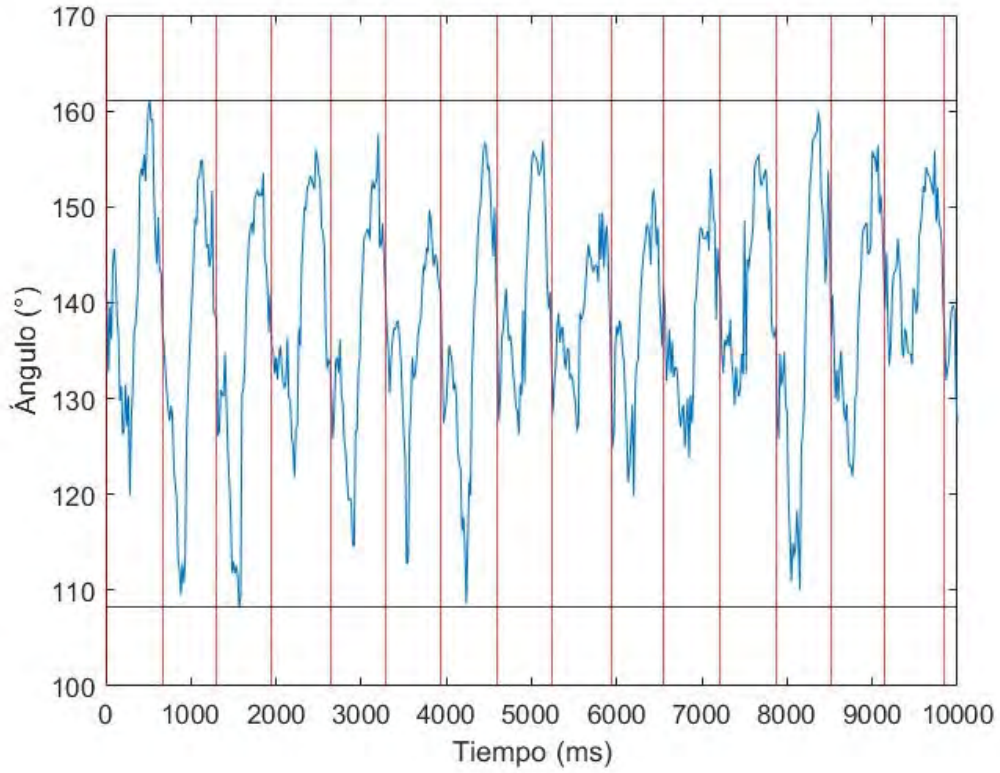


Figura G.25 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 5.

Tabla G.5. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 5.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	667	3.98	19.32	12.68	71.83	41.24
2	633	4.79	13.94	11.40	68.14	45.34
3	650	4.82	13.13	11.28	69.73	45.29
4	700	3.92	27.41	11.36	68.01	34.16
5	633	4.90	22.32	9.37	70.58	43.05
6	650	4.31	30.38	11.03	62.76	36.96
7	667	4.36	22.29	10.73	72.61	48.11
8	633	4.62	35.85	11.44	65.69	30.60
9	700	4.67	22.89	10.57	65.68	22.85
10	617	5.58	25.10	10.52	69.78	31.90
11	667	4.64	17.45	9.83	68.34	30.10
12	650	4.89	25.31	8.50	67.69	26.21
13	650	4.03	14.14	10.99	64.85	49.84
14	633	4.81	27.82	8.94	65.20	34.52
15	700	5.63	26.32	7.44	72.20	22.40

Sesión 6

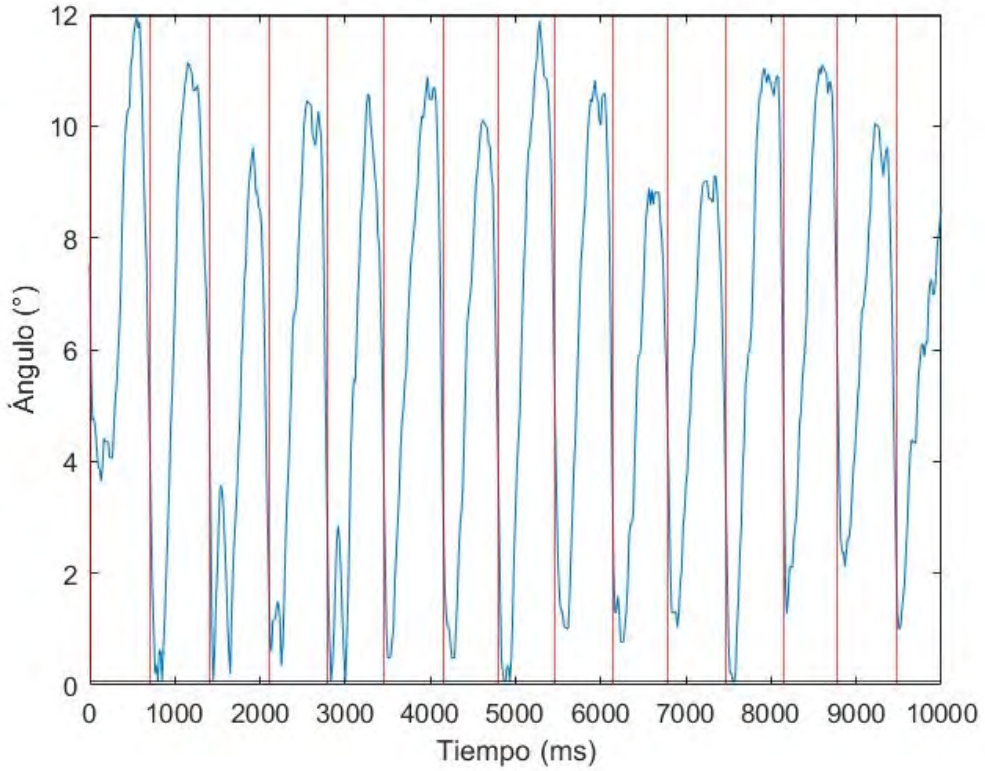


Figura G.26 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 6.

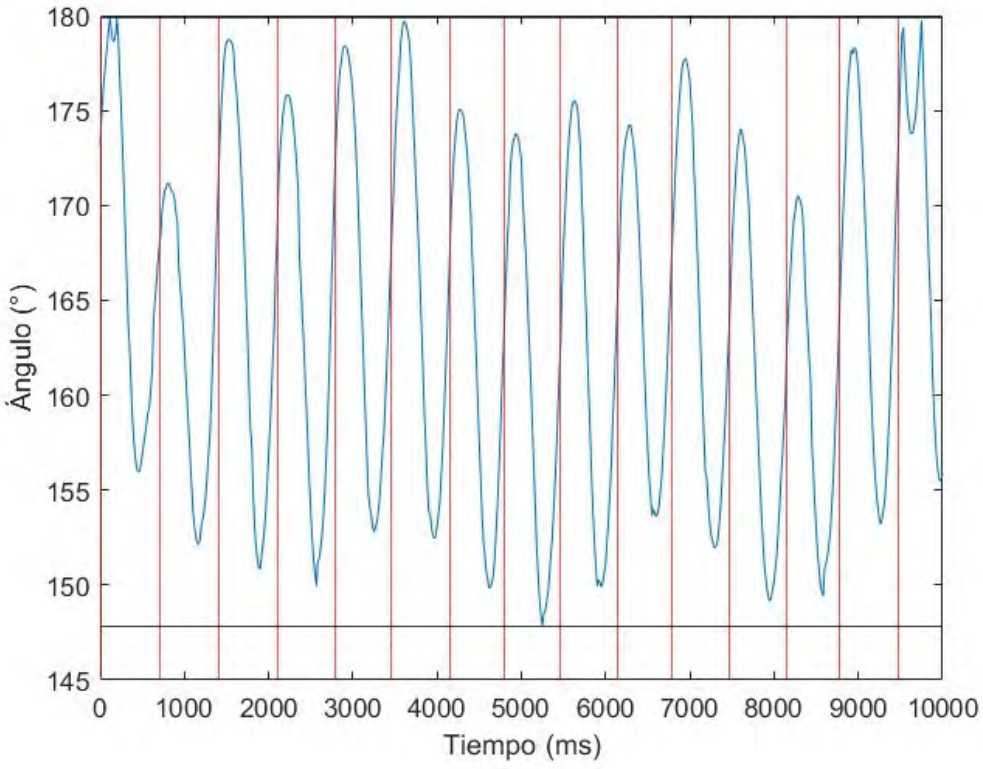


Figura G.27 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 6.

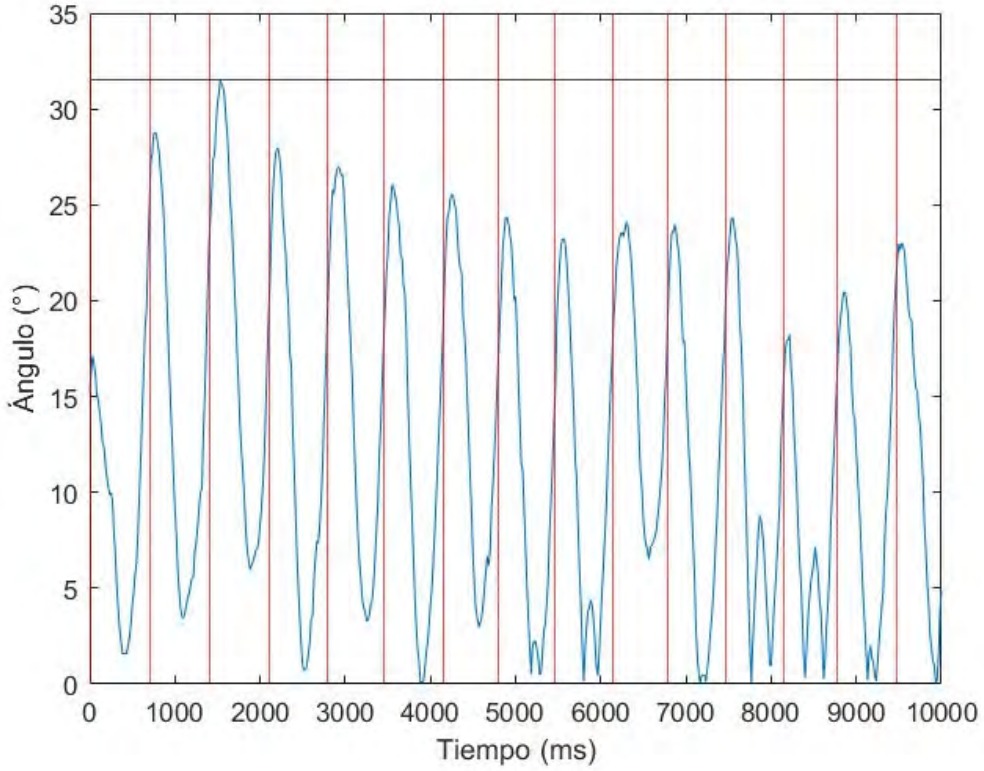


Figura G.28 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 6.

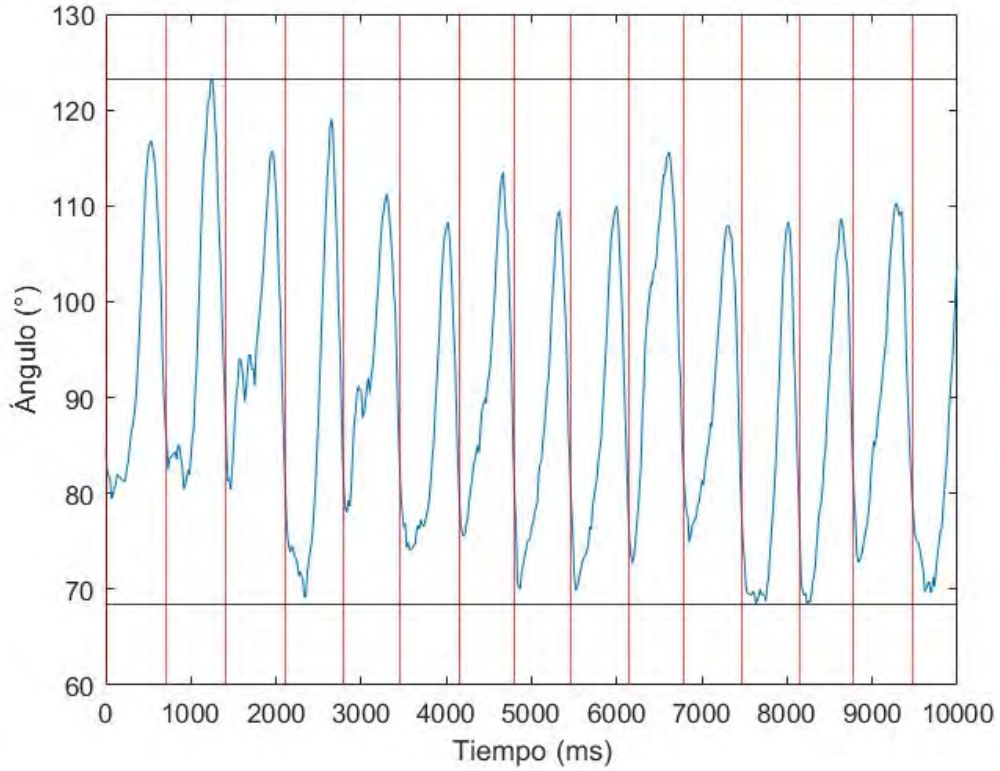


Figura G.29 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 6.

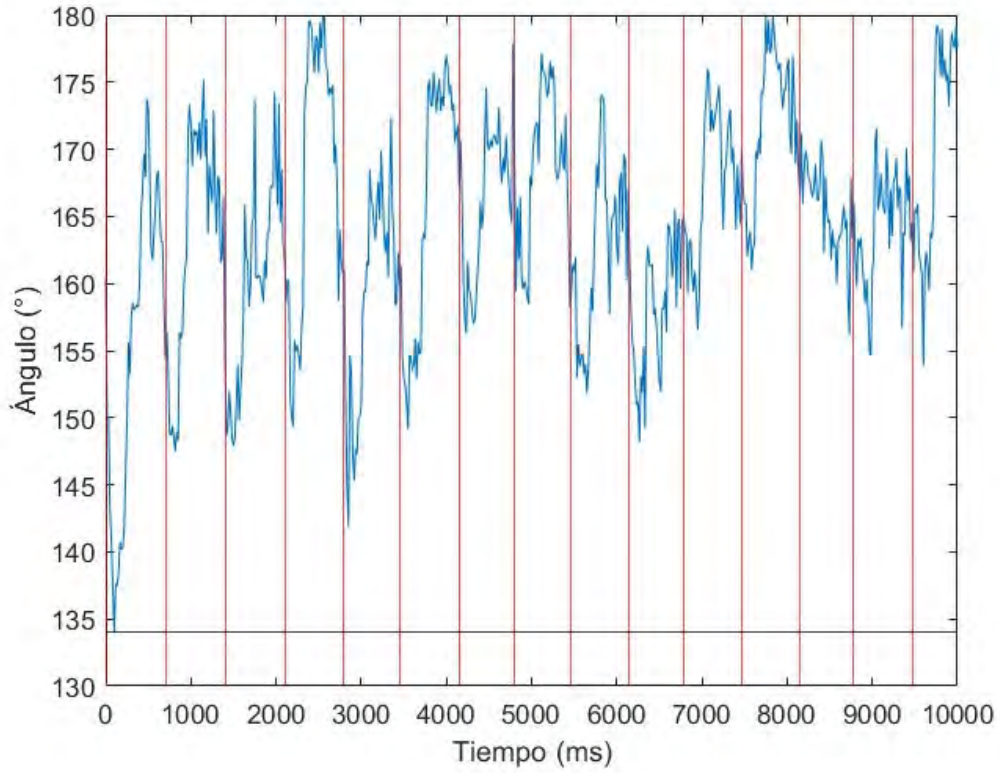


Figura G.30 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 6.

Tabla G.6. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 6.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	700	8.30	23.90	23.28	37.34	39.78
2	700	11.07	19.03	25.29	42.78	27.64
3	717	9.54	27.89	25.55	37.40	26.29
4	666	10.11	25.88	27.23	49.91	30.55
5	667	10.51	25.63	23.70	33.22	30.46
6	700	10.40	27.23	25.96	34.17	27.90
7	650	9.62	25.25	22.56	37.97	21.65
8	667	11.82	25.93	23.86	39.42	18.92
9	666	9.81	25.63	23.08	40.10	22.24
10	650	8.12	20.64	17.59	42.87	18.96
11	684	8.07	25.78	23.94	33.01	19.52
12	683	10.97	24.86	24.34	39.80	18.94
13	617	9.81	21.10	17.97	40.16	15.01
14	700	7.94	25.08	21.02	37.46	16.87

Sesión 7

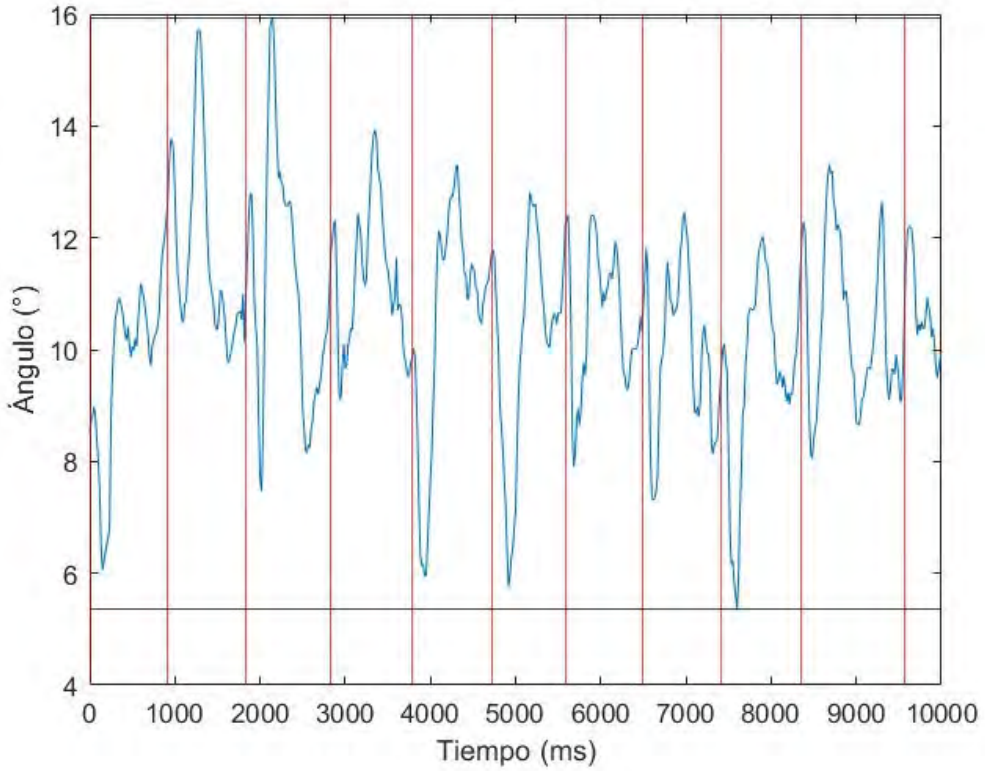


Figura G.31 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 7.

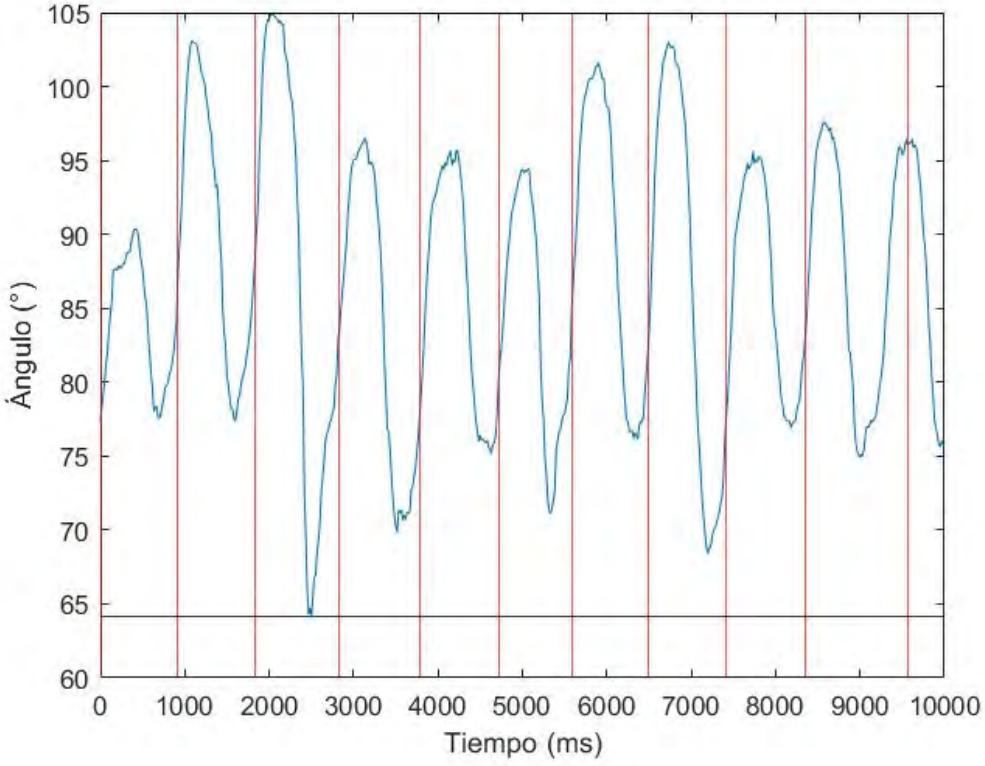


Figura G.32 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 7.

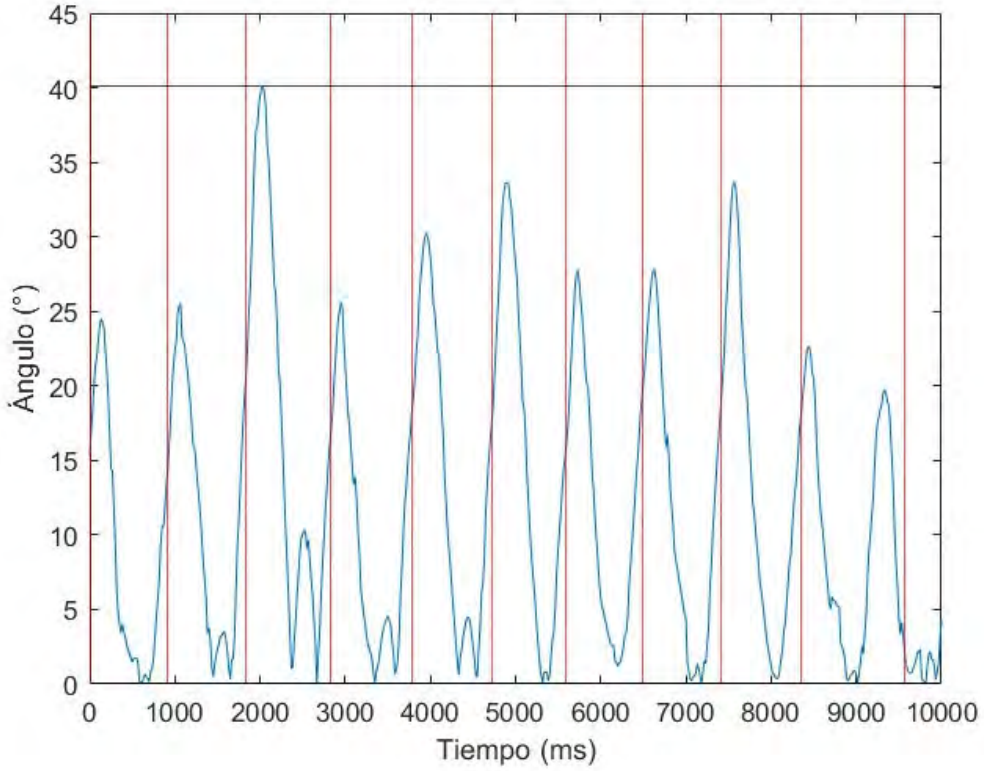


Figura G.33 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 7.

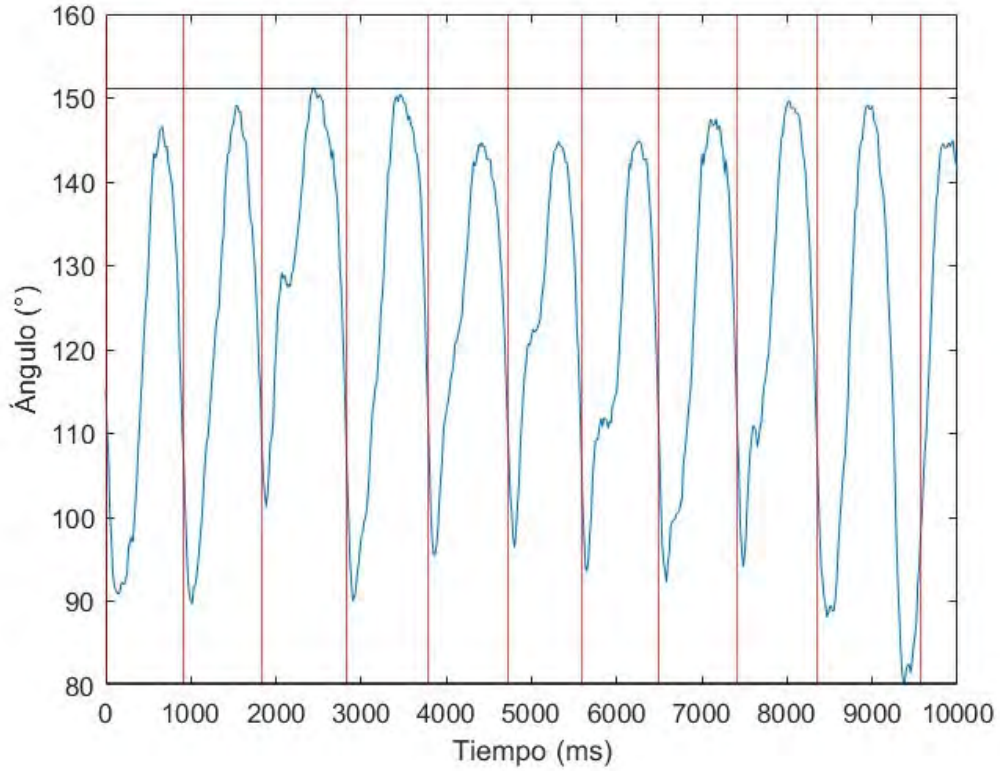


Figura G.34 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 7.

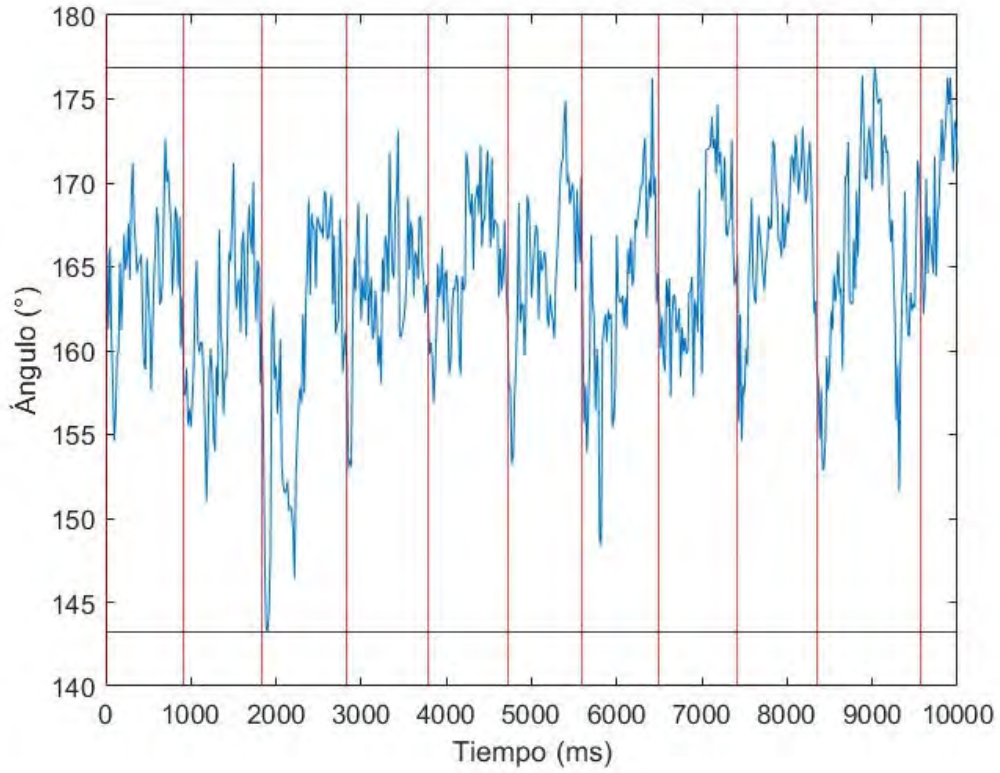


Figura G.35 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 7.

Tabla G.7. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 7.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	917	6.60	12.97	24.38	55.75	18.01
2	916	5.96	25.70	25.19	59.46	20.17
3	1000	8.46	40.70	40.01	49.97	26.26
4	950	4.82	26.60	25.52	60.38	20.16
5	934	7.36	20.53	29.76	49.22	15.33
6	866	7.06	23.32	33.62	48.40	21.64
7	900	4.50	25.41	26.52	51.25	27.74
8	934	5.14	34.63	27.77	55.23	17.43
9	933	6.67	18.73	33.28	55.58	18.73
10	1217	5.24	22.73	22.53	68.91	25.28

Sesión 8

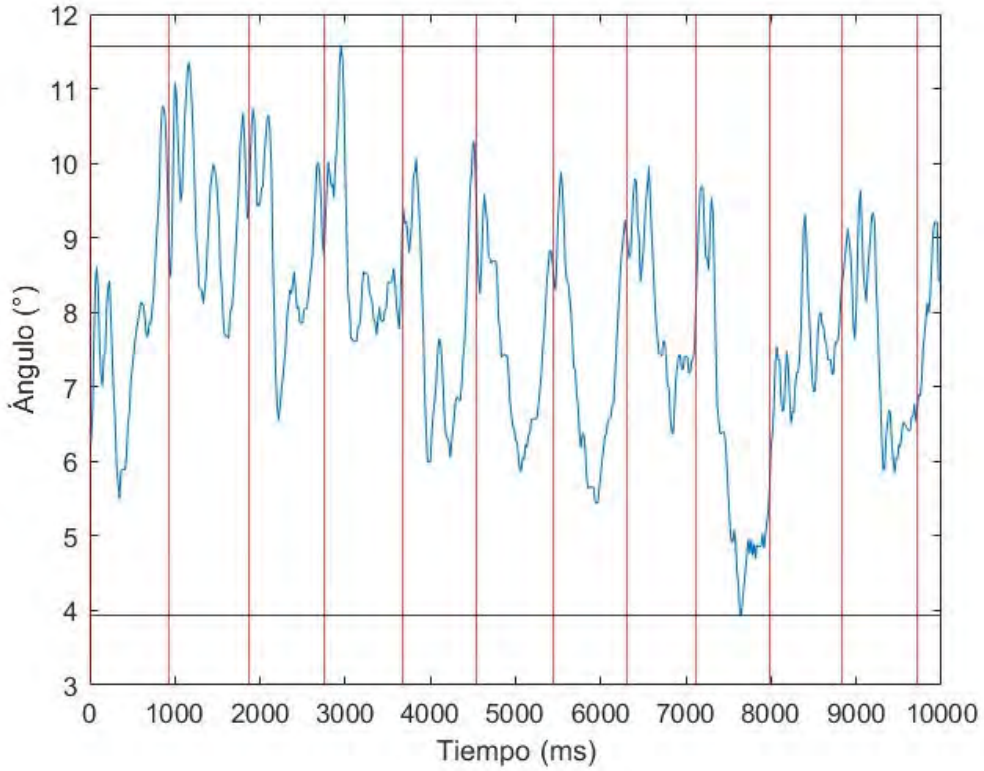


Figura G.36 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 8.

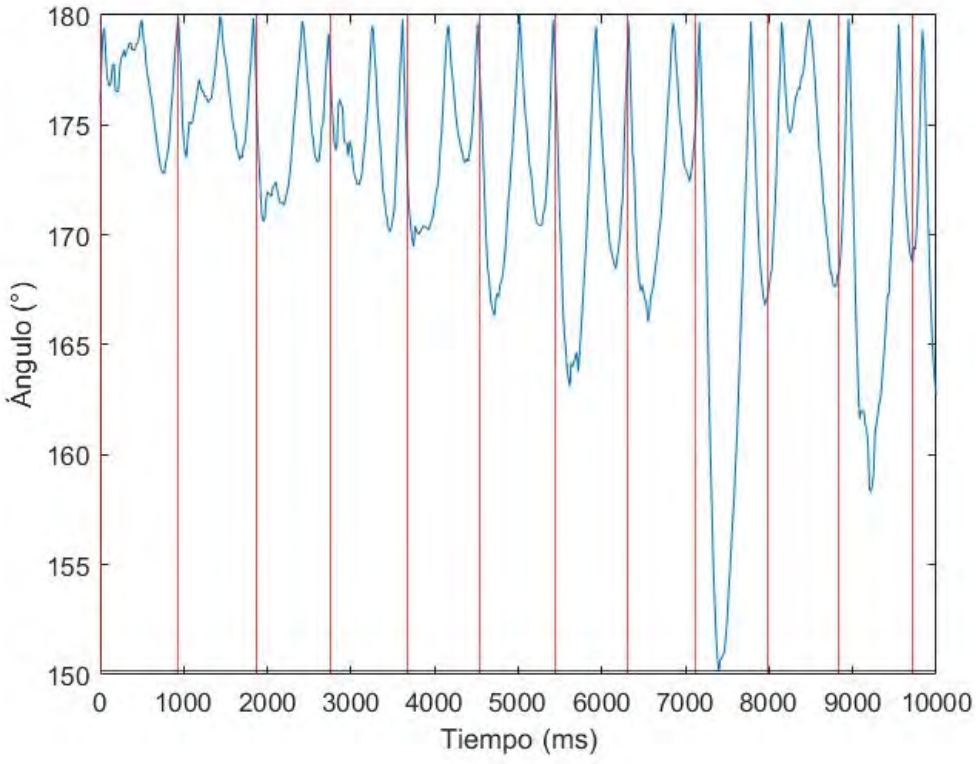


Figura G.37 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 8.

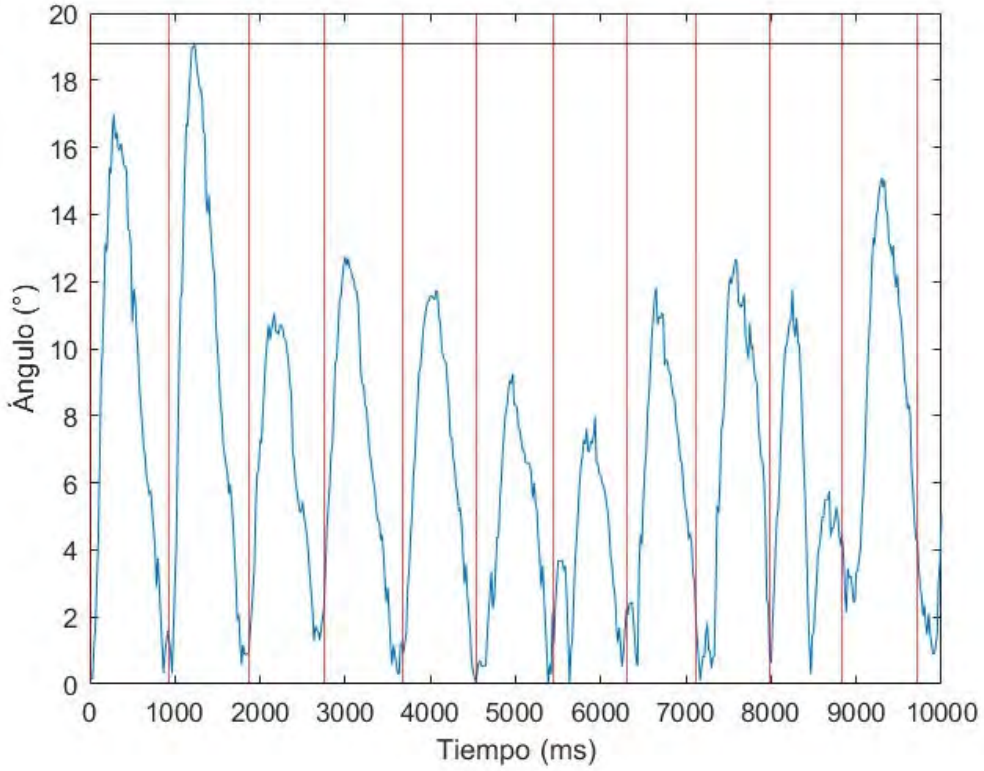


Figura G.38 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 8.

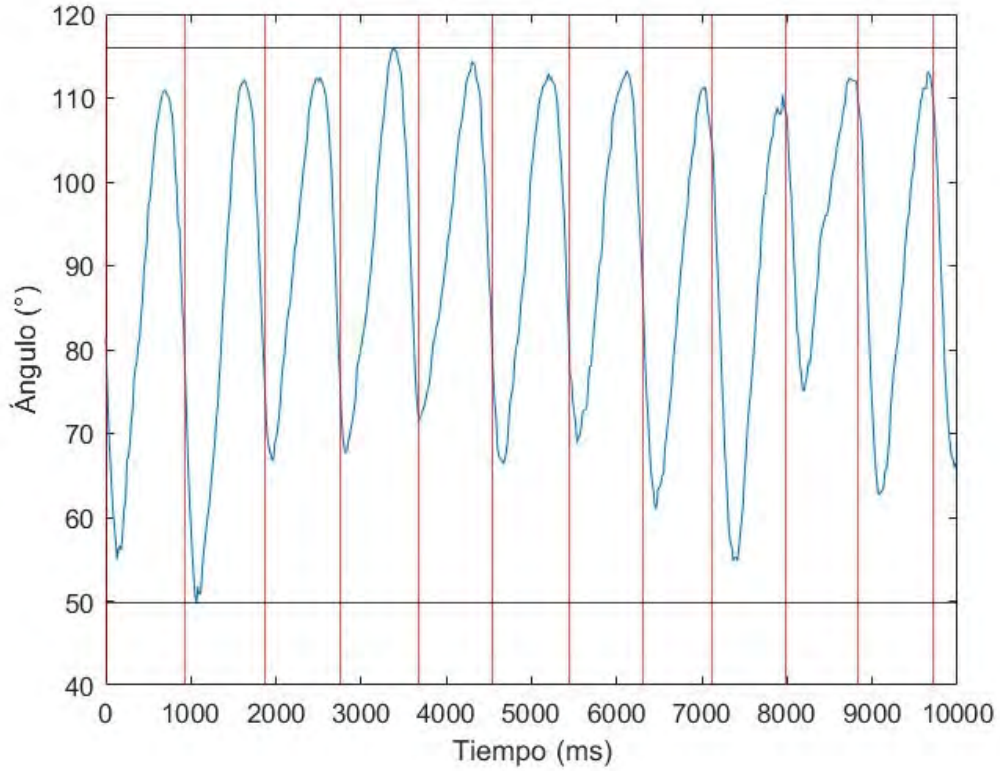


Figura G.39 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 8.

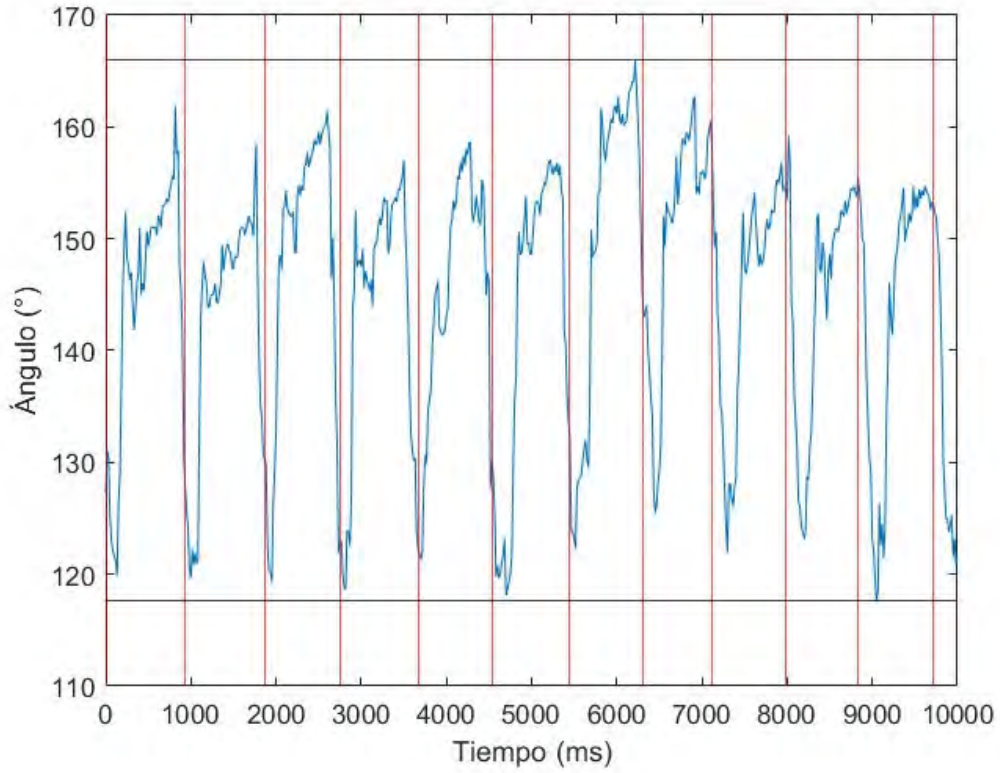


Figura G.40 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 8.

Tabla G.8. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 8.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	933	5.27	7.15	16.83	55.91	42.03
2	934	3.70	6.52	18.76	62.40	38.78
3	883	4.18	9.10	10.14	45.71	42.09
4	917	3.96	9.66	12.43	48.33	38.35
5	866	4.29	10.13	11.68	42.58	37.35
6	900	3.83	13.66	9.23	46.55	38.93
7	867	4.44	16.40	7.93	44.31	43.59
8	817	3.59	13.63	11.28	50.26	37.22
9	866	5.75	29.57	12.56	55.55	36.57
10	850	3.63	12.61	11.47	37.34	36.05
11	884	3.80	21.52	12.95	50.44	37.82

Sesión 9

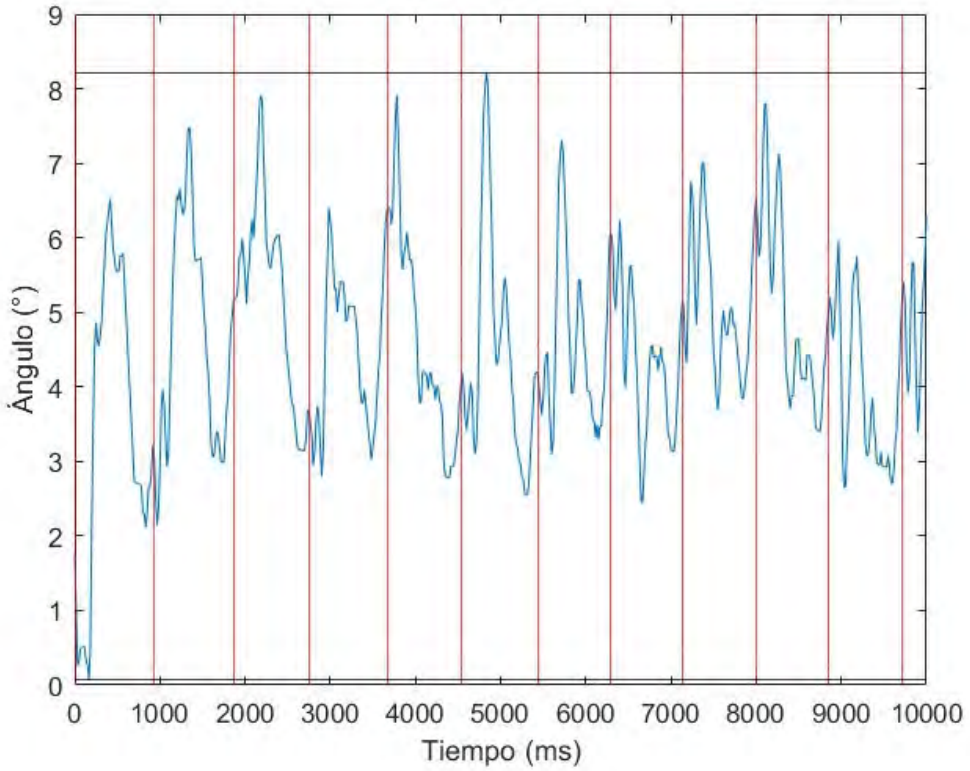


Figura G.41 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 9.

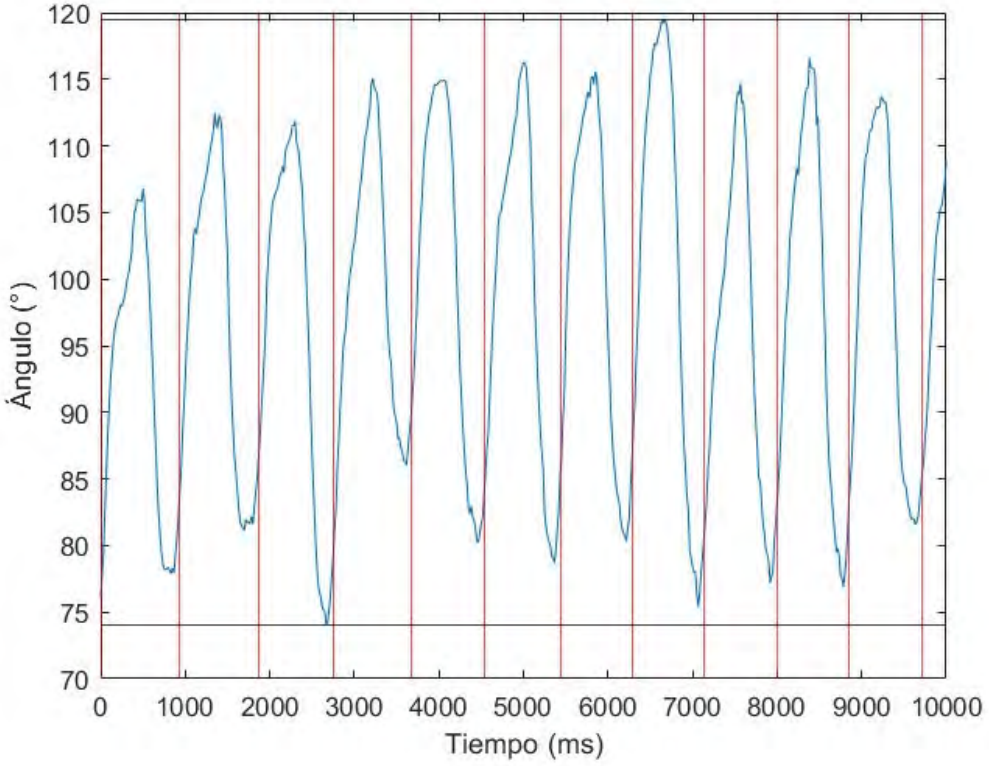


Figura G.42 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 9.

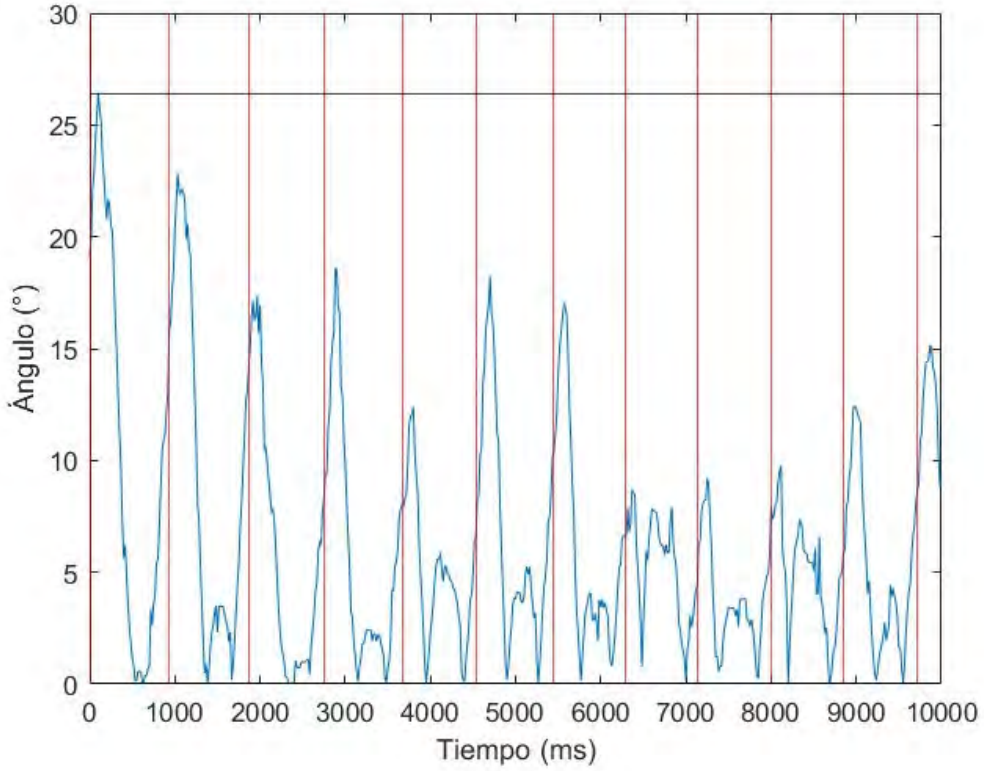


Figura G.43 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 9.

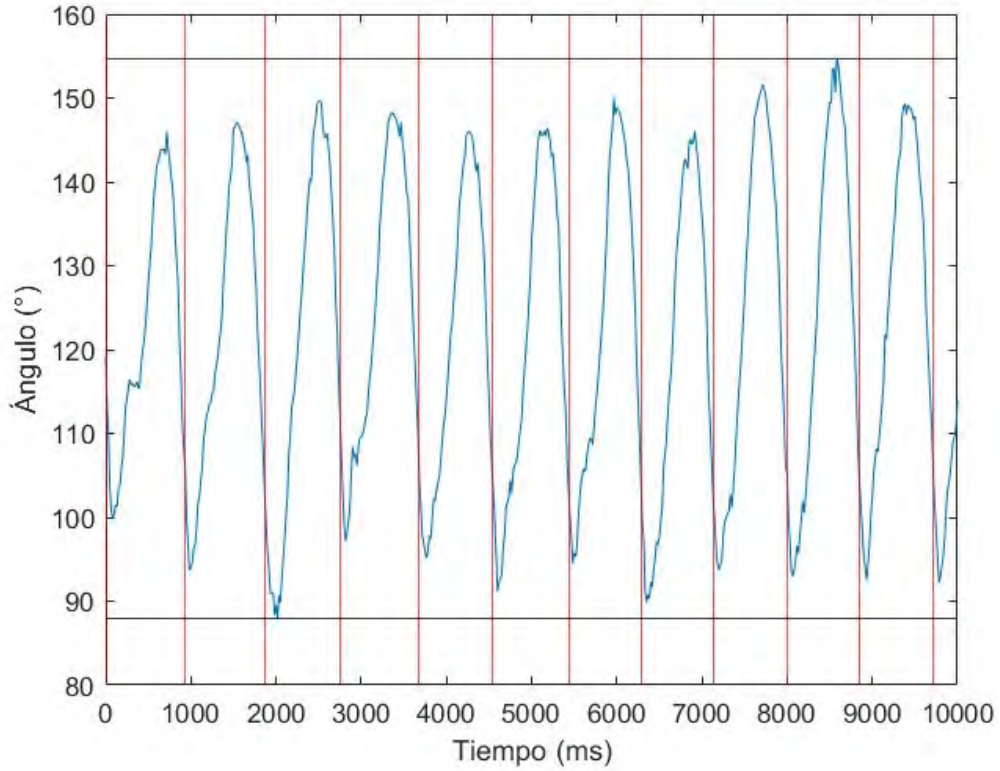


Figura G.44 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 9.

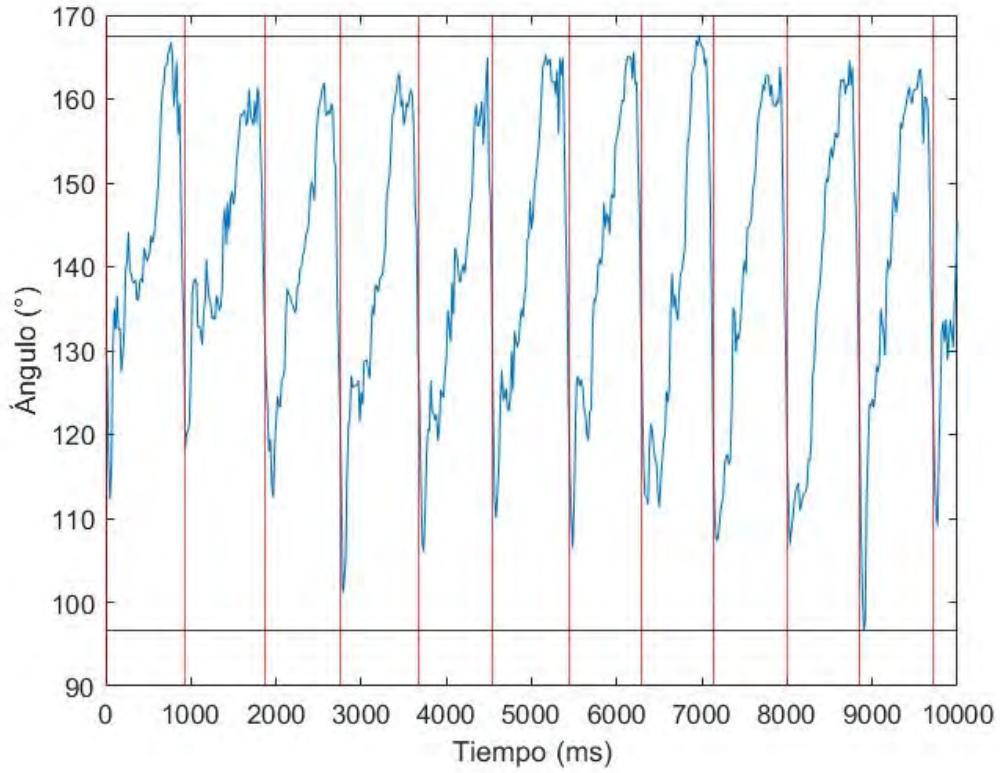


Figura G.45 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 9.

Tabla G.9. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 9.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	933	6.45	30.66	26.34	46.14	54.51
2	934	5.32	31.34	22.80	53.30	43.12
3	883	4.76	37.77	17.30	61.74	49.43
4	917	3.60	35.80	18.51	51.15	61.80
5	866	5.14	34.67	12.37	50.87	58.89
6	900	5.66	37.55	18.13	55.24	55.27
7	850	4.22	35.23	16.87	55.54	59.26
8	850	3.78	44.11	8.55	56.21	56.21
9	867	3.31	37.54	8.98	57.90	56.45
10	850	4.40	39.71	9.73	61.66	57.73
11	867	3.30	32.15	12.34	56.87	66.92

Sesión 10

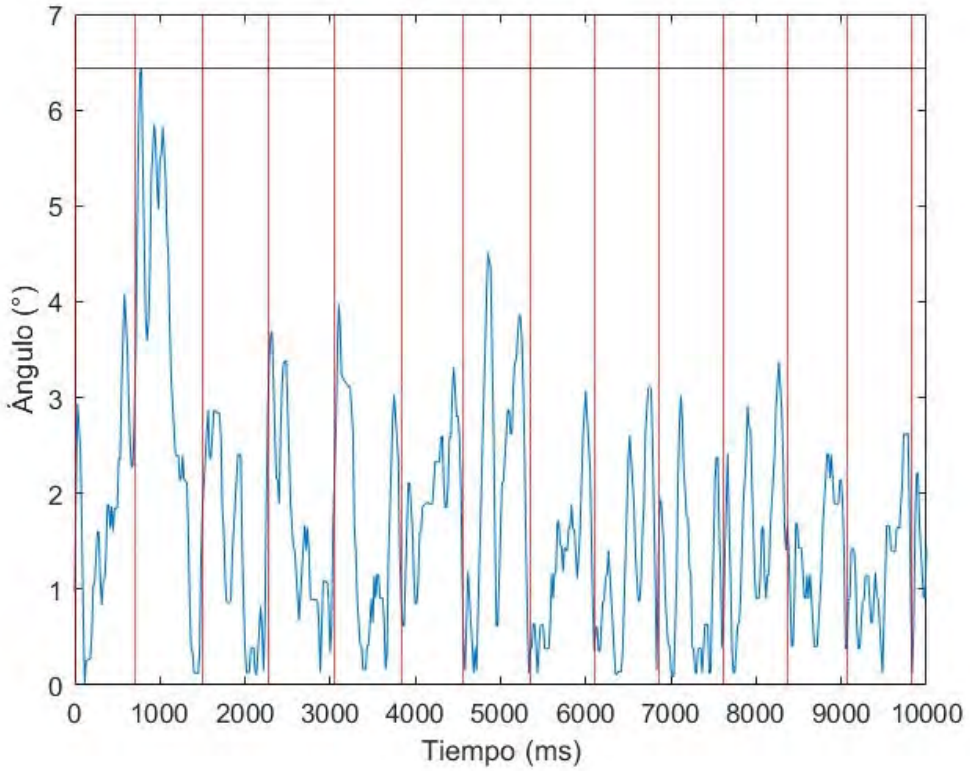


Figura G.46 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 10.

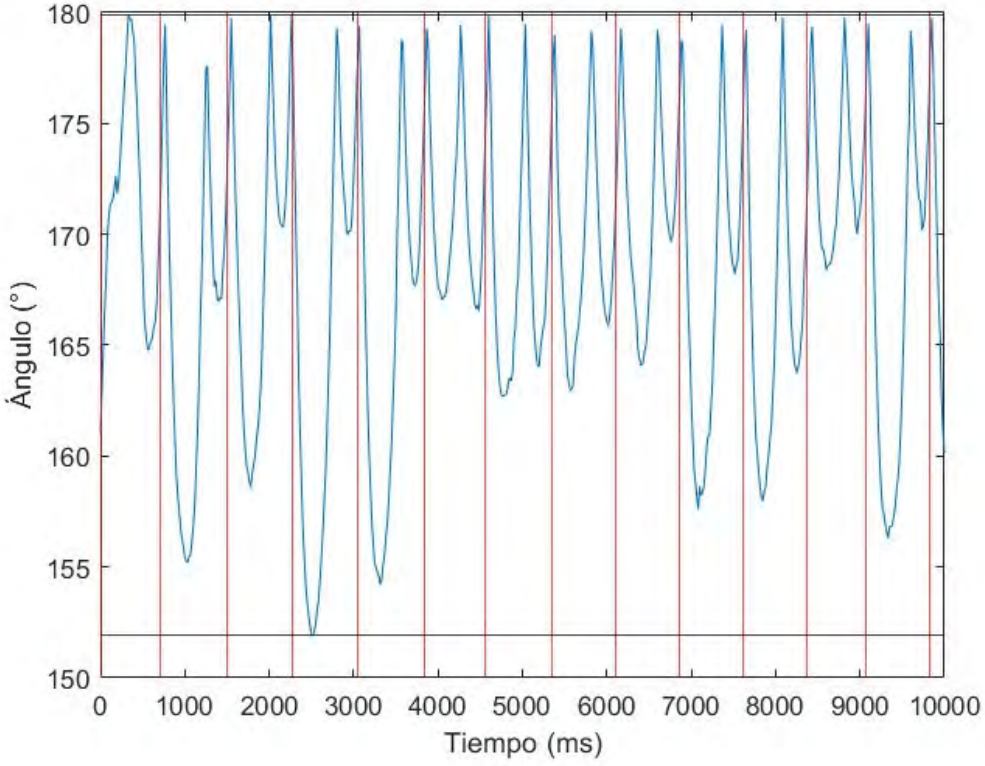


Figura G.47 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 10.

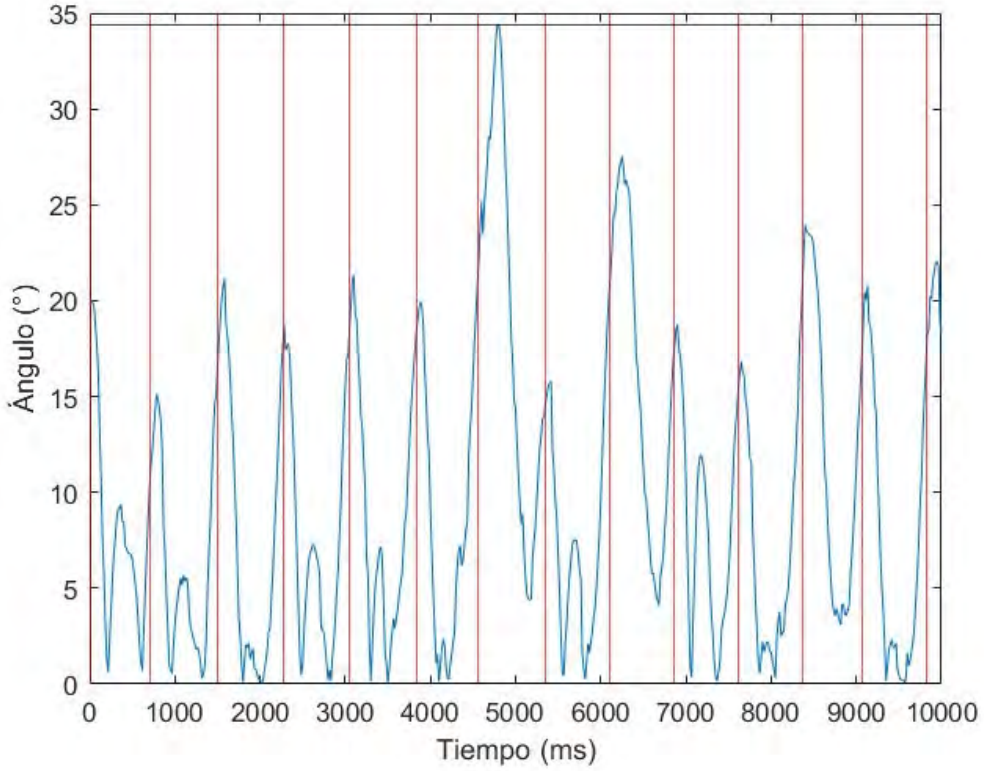


Figura G.48 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 10.

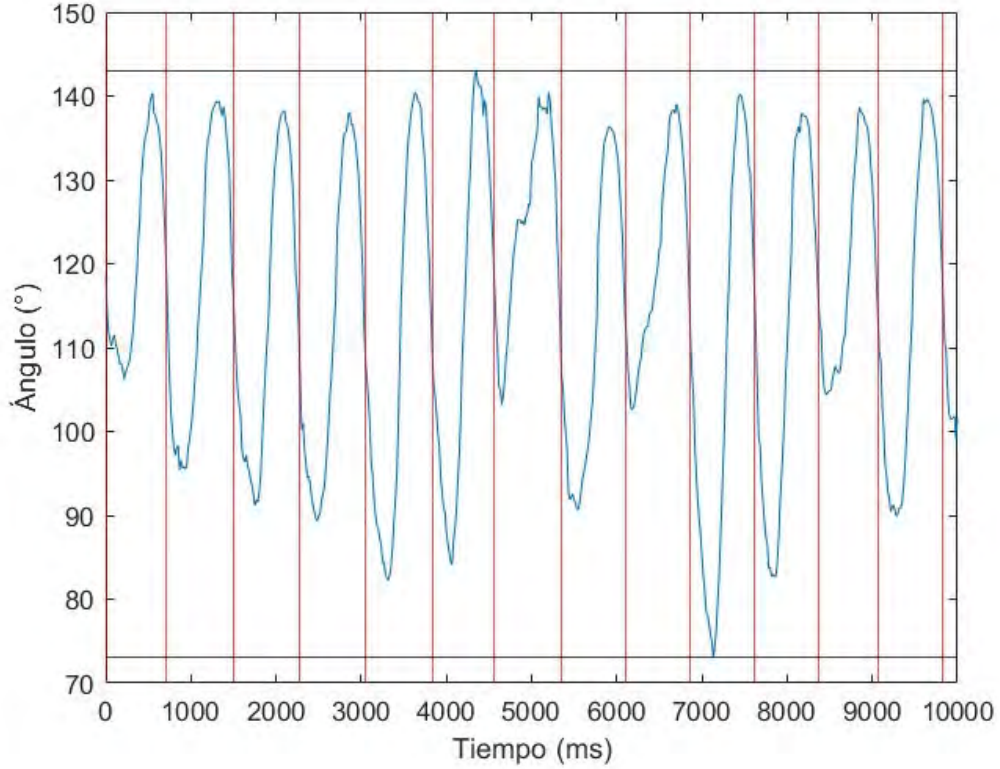


Figura G.49 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 10.

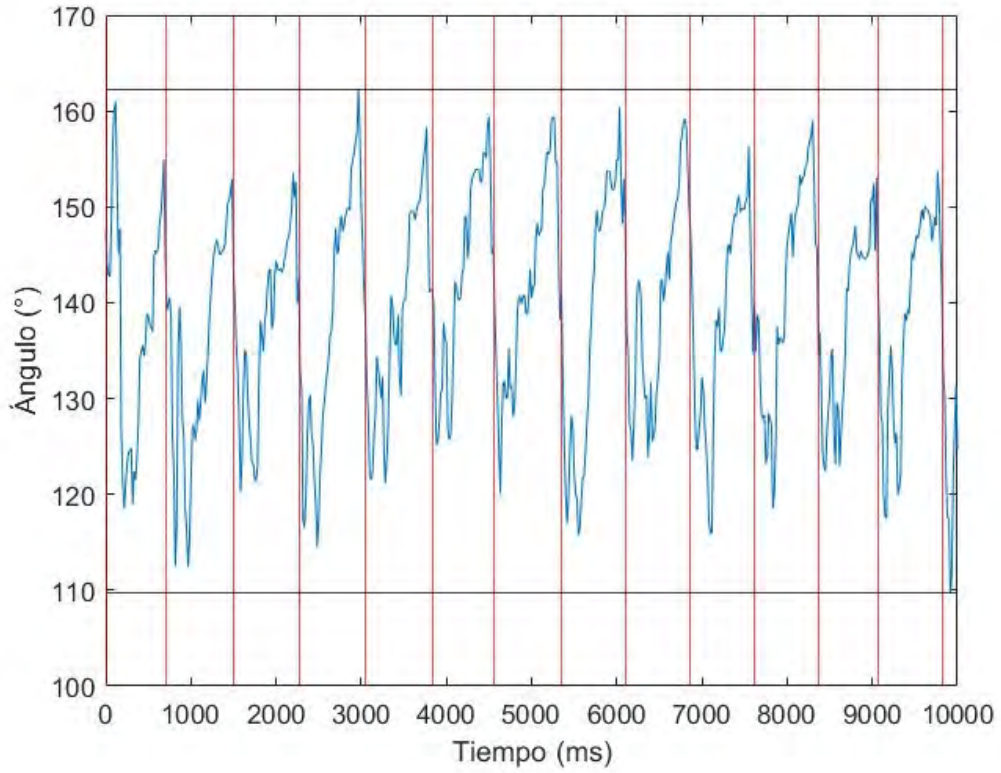


Figura G.50 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 10.

Tabla G.10. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 10.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	717	4.07	18.85	19.38	34.13	42.45
2	783	6.32	24.28	16.22	43.98	40.45
3	767	2.77	21.32	21.05	47.03	33.22
4	783	3.55	28.01	18.52	48.66	47.77
5	783	3.81	25.20	21.29	58.25	37.16
6	734	2.96	12.88	21.82	58.89	34.19
7	783	4.38	17.16	30.00	37.23	39.24
8	750	2.95	16.21	20.27	45.69	44.63
9	767	3.00	15.22	23.40	36.41	35.66
10	750	2.93	21.86	18.58	67.14	40.38
11	750	3.25	21.80	20.38	55.30	40.46
12	700	2.04	11.41	20.84	34.24	30.56
13	766	2.50	23.21	20.74	49.68	36.27

Sesión 11

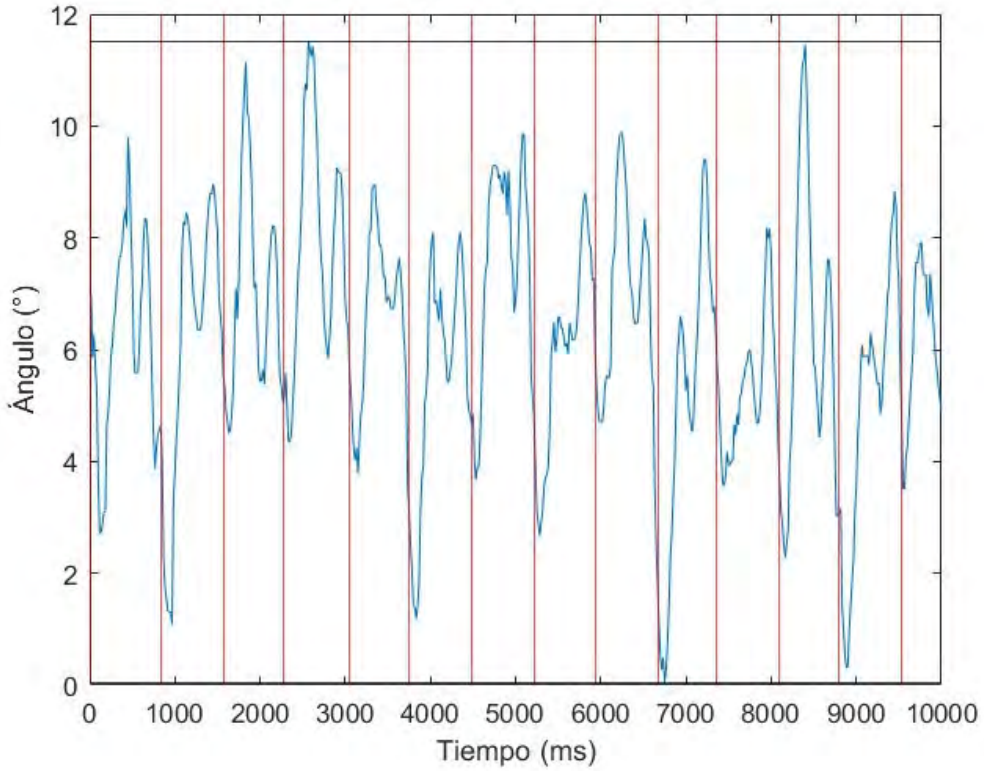


Figura G.51 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 11.

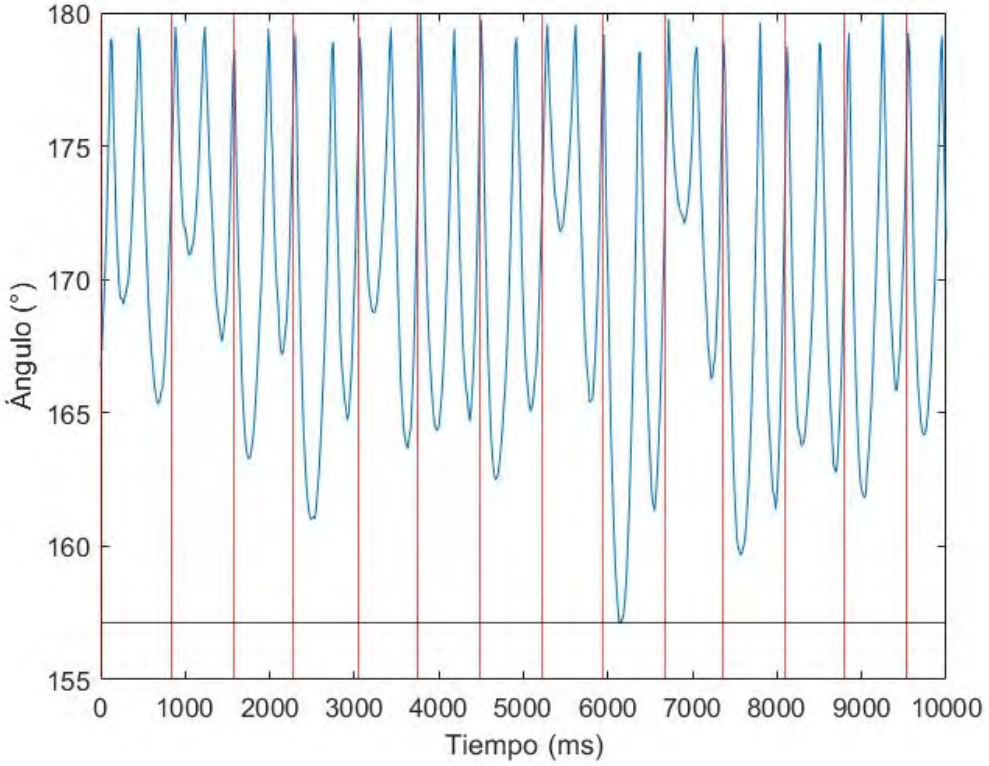


Figura G.52 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 11.

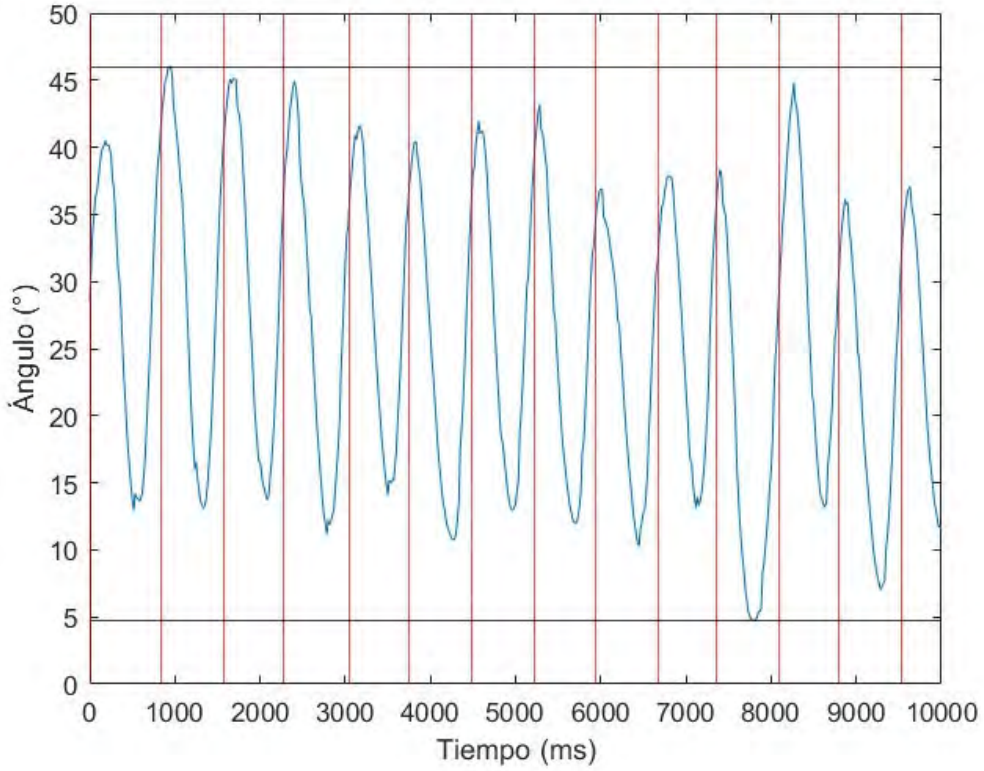


Figura G.53 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 11.

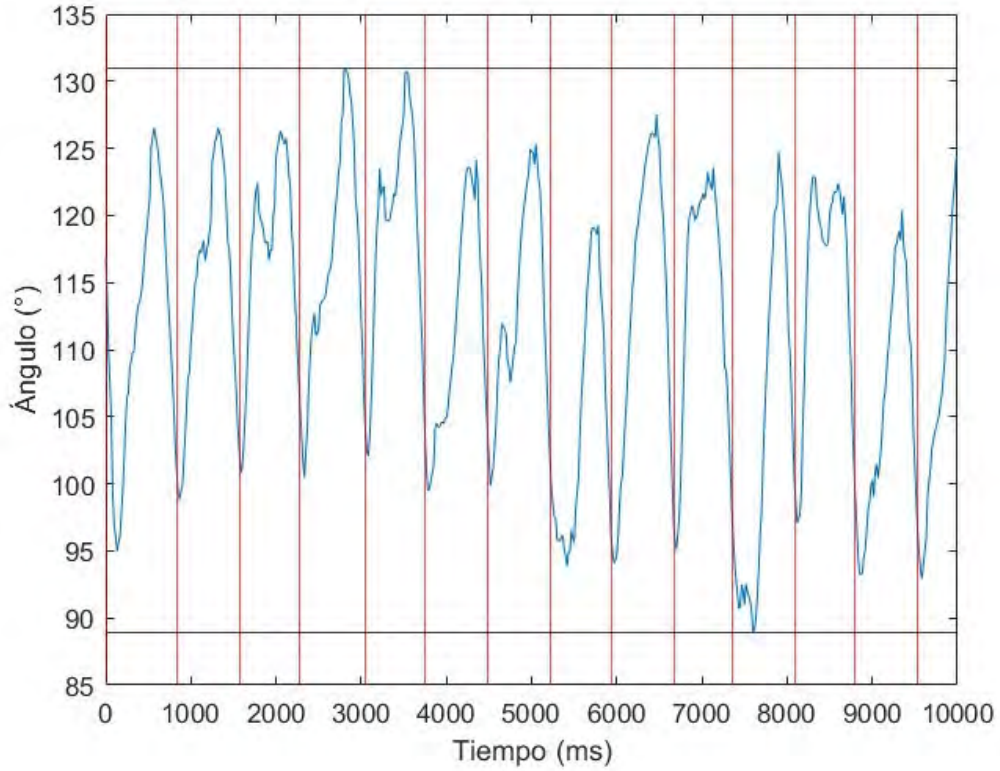


Figura G.54 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 11.

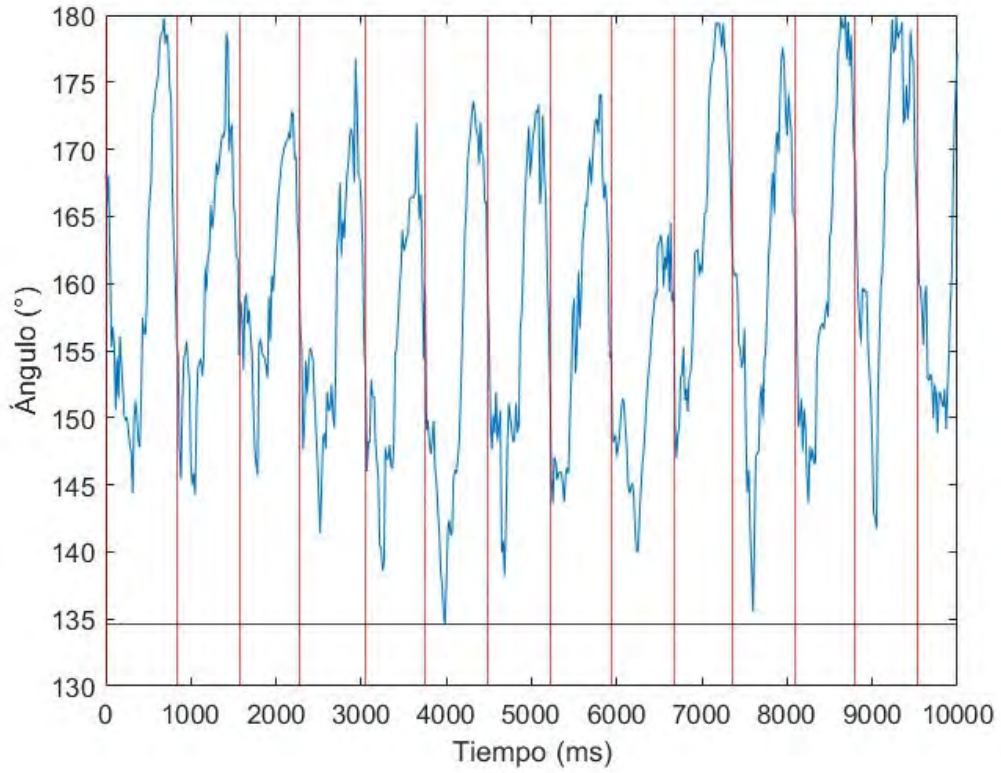


Figura G.55 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 11.

Tabla G.11. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 11.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	833	7.08	14.09	28.53	31.55	35.42
2	750	7.89	11.80	32.93	27.69	34.38
3	700	6.64	16.13	31.38	25.45	27.05
4	767	7.17	18.21	33.74	30.48	35.39
5	700	5.84	15.77	27.52	28.62	33.30
6	733	6.92	15.61	29.70	24.65	38.99
7	734	6.20	17.21	28.98	25.47	35.14
8	716	6.13	14.17	31.21	25.44	30.47
9	734	8.12	22.06	26.62	33.42	24.44
10	683	9.36	13.48	24.73	28.45	32.42
11	750	4.61	19.97	33.61	35.79	42.03
12	700	9.17	16.08	31.61	25.77	36.34
13	733	8.52	18.16	29.13	27.14	38.18

Sesión 12

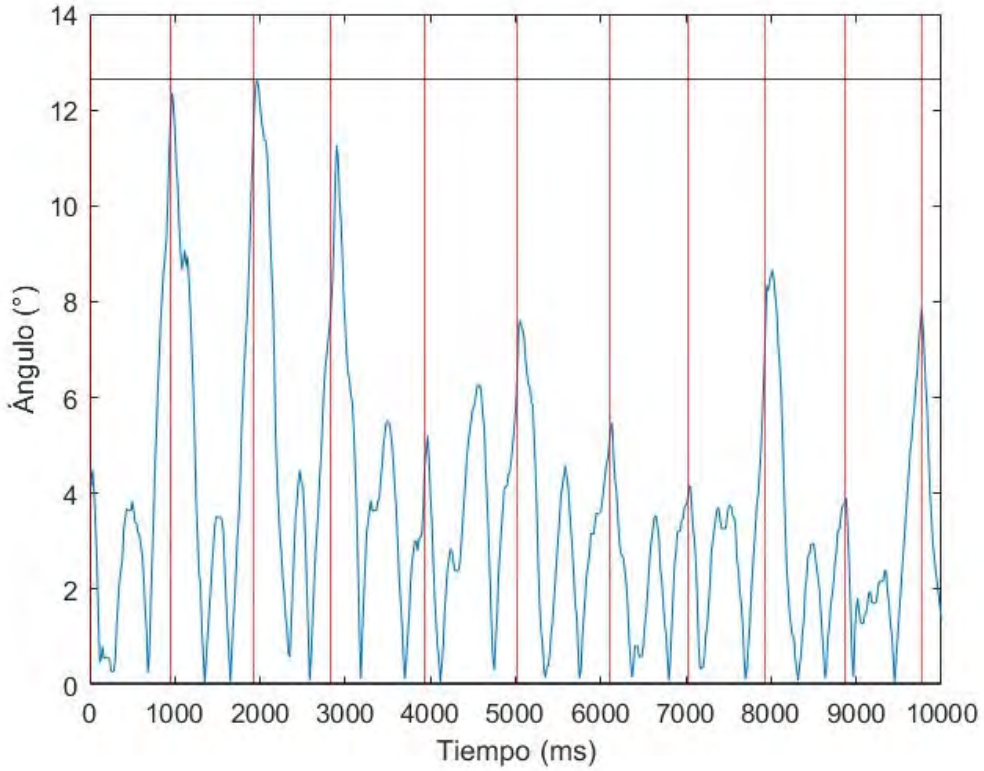


Figura G.56 Abducción – aducción del hombro durante la ejecución de la Sesión 12.

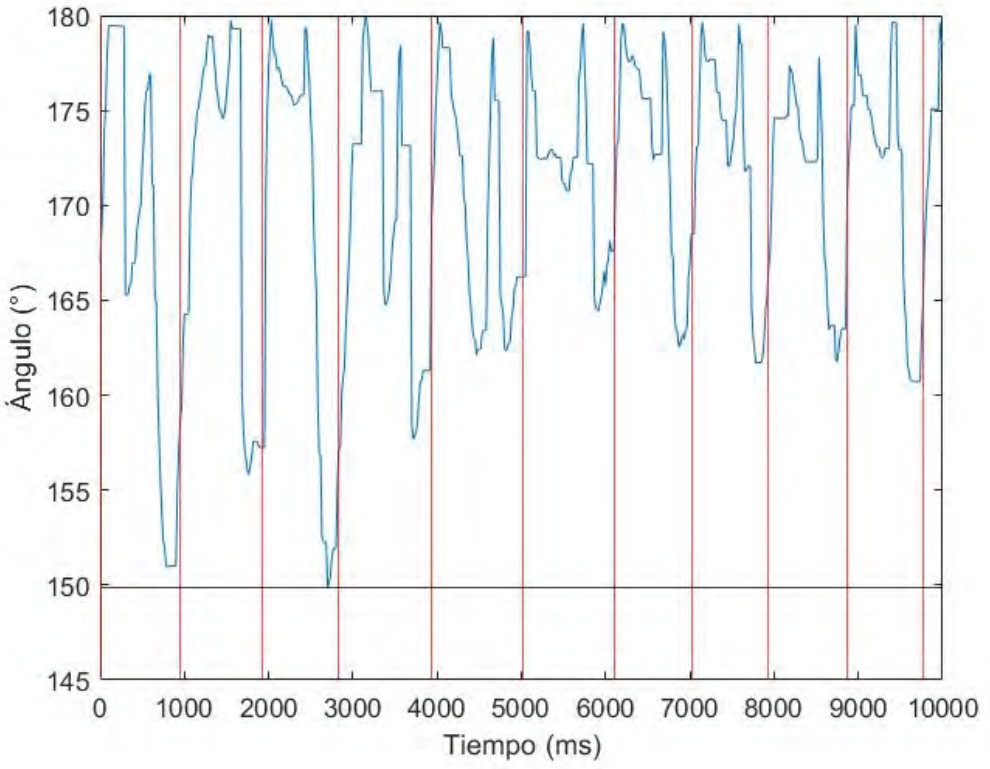


Figura G.57 Rotación interna-externa del hombro durante la ejecución de la Sesión 12.

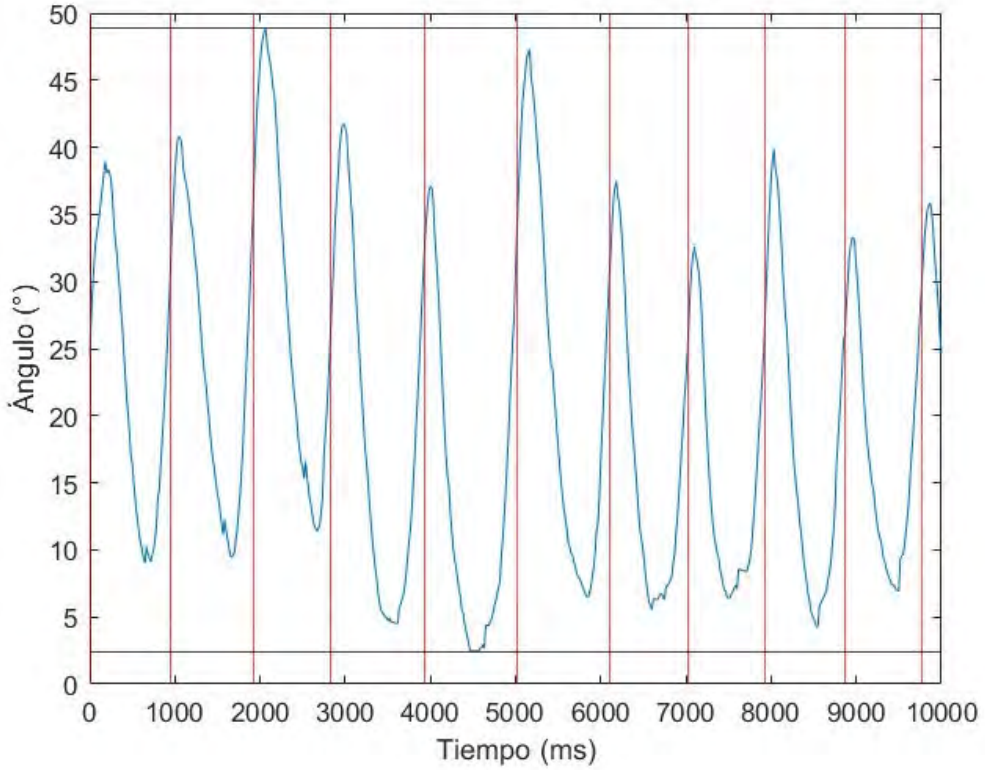


Figura G.58 Flexión-extensión del hombro durante la ejecución de la Sesión 12.

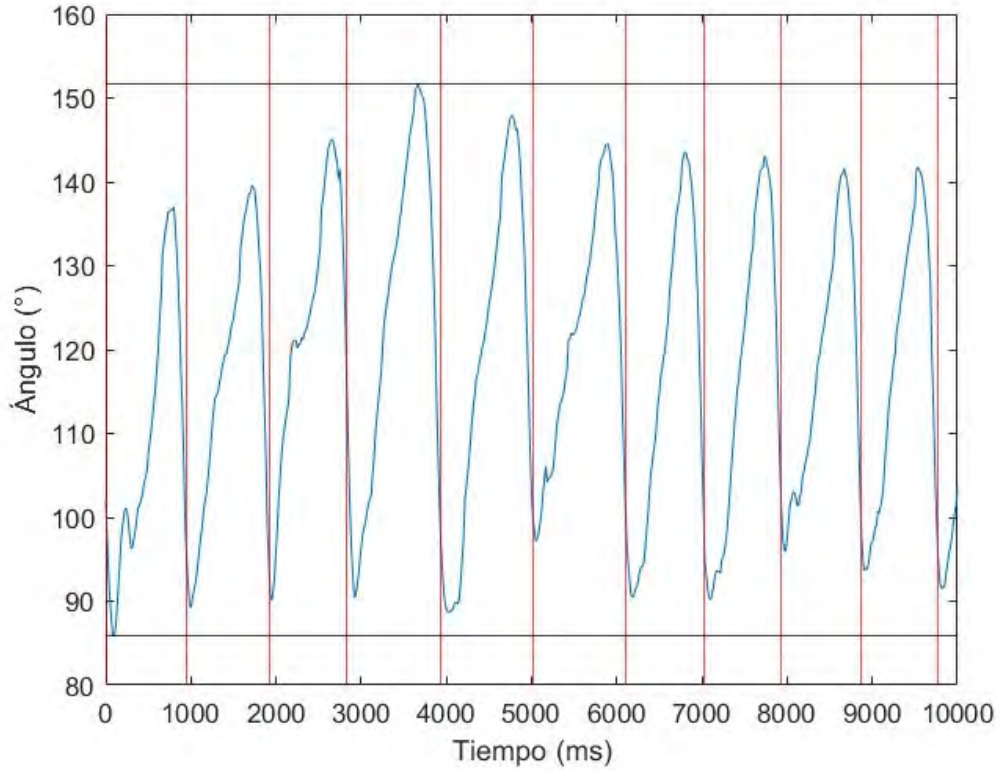


Figura G.59 Flexión-extensión del codo durante la ejecución de la Sesión 12.

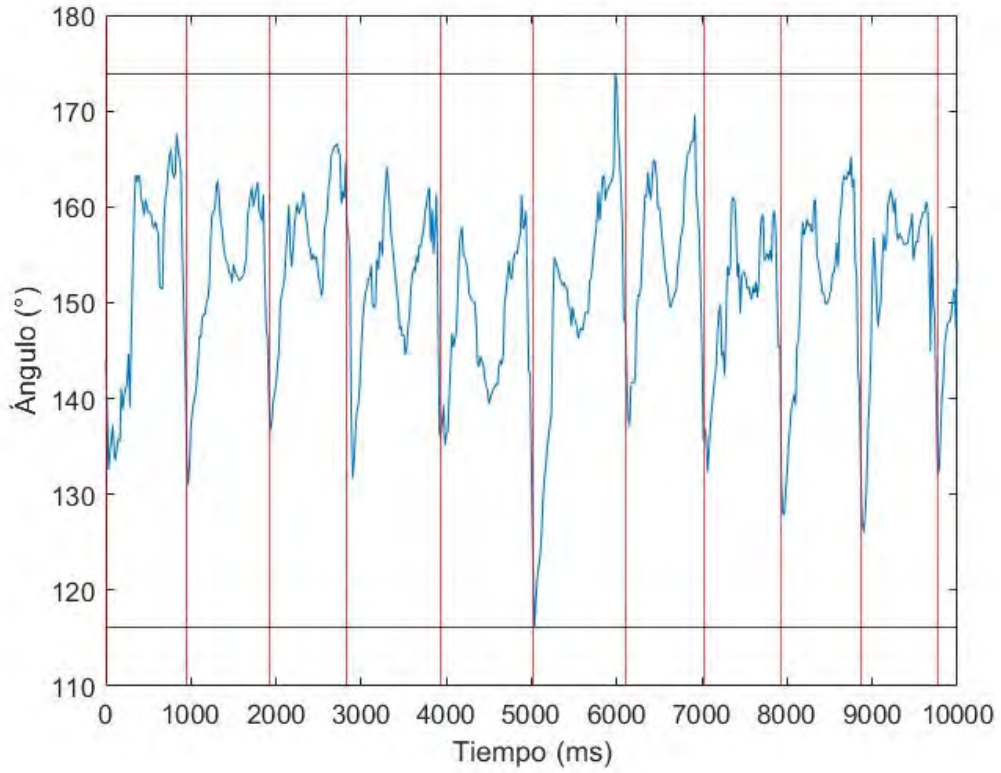


Figura G.60 Flexión-extensión de la muñeca durante la ejecución de la Sesión 12.

Tabla G.12. Descripción de la duración y los ángulos por ciclo de la Sesión 12.

Ciclo	**Duración (ms)**	**Ángulo máximo (°) – Ángulo Mínimo (°)**				
		$\theta_{abd-add}$	$\theta_{int-ext}$	$\theta_{flex-ext}$	θ_{elb}	θ_{wrt}
1	950	11.55	28.52	29.93	51.22	35.07
2	967	12.31	23.91	31.32	50.37	31.72
3	916	12.53	29.85	37.49	54.89	30.05
4	1100	11.14	22.82	37.19	61.31	32.36
5	1084	6.31	17.53	34.69	59.21	38.24
6	1083	7.46	15.10	40.79	47.39	57.72
7	917	5.40	17.03	31.94	52.99	34.00
8	916	7.31	17.98	26.16	52.93	29.69
9	934	8.57	16.09	35.58	45.69	37.45
10	900	7.79	18.95	26.32	48.09	35.73