



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis automático de la terapia de rehabilitación
en pacientes con enfermedad de Parkinson**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
Ingeniero en Sistemas Biomédicos

PRESENTA:

Bruno Esteban Carrillo Quintero

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Luis Jiménez Ángeles



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANALISIS AUTOMATICO DE LA TERAPIA DE REHABILITACION EN PACIENTES CON ENFERMEDAD DE PARKINSON que presenté para obtener el título de INGENIERO EN SISTEMAS BIOMÉDICOS es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

BRUNO ESTEBÁN CARRILLO QUINTERO
Número de cuenta: 316028604

Análisis automático de la terapia de rehabilitación en pacientes con enfermedad de Parkinson

por

Bruno Esteban Carrillo Quintero

Resumen

La enfermedad de Parkinson es un trastorno neurodegenerativo progresivo que afecta predominantemente el control del movimiento. Se caracteriza por síntomas motores como temblores, rigidez y bradicinesia. Aunque existen tratamientos farmacológicos y terapias de rehabilitación para mejorar la calidad de vida de los pacientes, la progresión de la enfermedad varía significativamente entre los individuos. Una de las motivaciones para realizar este trabajo fue la necesidad de comenzar a explorar alternativas de telemedicina, impulsada por situaciones como la pandemia de COVID-19, que obligó a mantener a la población en casa, dejando a los adultos mayores, un grupo particularmente vulnerable, en una situación de mayor riesgo.

En este contexto, el presente estudio se centra en la cuantificación de los patrones de movimiento en pacientes diagnosticados con enfermedad de Parkinson mediante el análisis automático de videos durante una terapia de rehabilitación específica. Para llevar a cabo esta investigación, se trabajó con 11 pacientes diagnosticados, quienes realizaron ejercicios enfocados en la columna cervical y lumbar, la movilidad de hombros y otros movimientos combinados. Las grabaciones se realizaron en dos etapas: antes y después de la terapia de rehabilitación.

Utilizando el software MediaPipe, se identificaron puntos clave del cuerpo relacionados con las articulaciones más importantes para estos ejercicios. Posteriormente, se analizaron parámetros como la frecuencia con la que los pacientes ejecutaban los movimientos y la amplitud de los ángulos articulares. Los resultados fueron representados en gráficos de cajas y bigotes que mostraban el rango de movimiento, además de gráficos de frecuencia y un histograma con los valores absolutos de los ángulos obtenidos. Estos gráficos permitieron comparar los cambios en los patrones de movimiento de los pacientes en ambas etapas del tratamiento.

El estudio concluye que es posible utilizar herramientas como MediaPipe para realizar un

análisis cuantitativo del movimiento en pacientes con Parkinson, ya que proporciona una forma precisa de identificar puntos clave del cuerpo sin necesidad de equipos especializados, siempre que se cuente con buenas condiciones de iluminación y calidad de grabación. Este trabajo complementa estudios previos dedicados al análisis del progreso de la enfermedad y sugiere que estas herramientas pueden aportar datos valiosos que complementen las evaluaciones clínicas tradicionales. Sin embargo, se resalta la necesidad de realizar un análisis más personalizado, considerando factores adicionales como la etapa de la enfermedad, el tratamiento farmacológico y la frecuencia de la terapia de rehabilitación.

Automatic Analysis of the Rehabilitation Therapy in Parkinson's Disease Subjects

by

Bruno Esteban Carrillo Quintero

Abstract

Parkinson's disease is a progressive neurodegenerative disorder that predominantly affects motor control. It is characterized by motor symptoms such as tremors, rigidity, and bradykinesia. Although there are pharmacological treatments and rehabilitation therapies aimed at improving patients' quality of life, the progression of the disease varies significantly among individuals. One of the motivations for conducting this work was the need to begin exploring telemedicine alternatives, driven by circumstances such as the COVID-19 pandemic, which forced the population to stay home, leaving older adults—a particularly vulnerable group—in a situation of increased risk.

In this context, the present study focuses on quantifying movement patterns in patients diagnosed with Parkinson's disease through the automatic analysis of videos during a specific rehabilitation therapy. To carry out this research, 11 diagnosed patients were engaged, who performed exercises targeting the cervical and lumbar spine, shoulder mobility, and other combined movements. The recordings were made in two stages: before and after the rehabilitation therapy.

Using the MediaPipe software, key points of the body related to the most important joints for these exercises were identified. Subsequently, parameters such as the frequency with which patients executed the movements and the amplitude of the joint angles were analyzed. The results were represented in box and whisker plots illustrating the range of movement, in addition to frequency graphs and a histogram showing the absolute values of the angles obtained. These graphs allowed for the comparison of changes in patients' movement patterns at both stages of treatment.

The study concludes that it is possible to use tools such as MediaPipe to perform a quantitative analysis of movement in patients with Parkinson's disease, as it provides a precise way to identify key points of the body without the need for specialized equipment, provided that good

lighting and recording quality conditions are met. This work complements previous studies dedicated to analyzing the progression of the disease and suggests that these tools can provide valuable data that enrich traditional clinical assessments. However, it emphasizes the need to conduct a more personalized analysis that considers additional factors such as the stage of the disease, pharmacological treatment, and the frequency of rehabilitation therapy.

Agradecimientos

A mis padres, mi hermano, mis abuelos y mis tíos, quienes me brindaron todo su apoyo para que pudiera concluir mis estudios de licenciatura y por siempre haberme dado un lugar al cual llamar hogar. Especialmente a mi madre, cuyo amor incondicional nunca permitió que me rendiera. Cada vez que enfrentaba un tropiezo, ella estuvo a mi lado para ayudarme a levantarme y seguir adelante. Estoy orgulloso de ser tu hijo, te amo, mamá.

A mi director de tesis, el Dr. Luis Jiménez Ángeles, quien con su experiencia y conocimientos me apoyó en la elaboración de este trabajo.

A mis amigos: Ricardo, Raúl, Diego, Denisse, Moises y especialmente a Tamara, con quien compartí todo mi paso por la licenciatura y se volvió mi mayor confidente. Gracias a todos por convertirse en mi segunda familia.

A Héctor y Abigail que, con sus conocimientos e ideas, me acompañaron e inspiraron durante la realización de este proyecto.

A la Dra. Ingrid Salomé Morales Sánchez y la Dra. Grecia Bustos Mancilla por brindar sus conocimientos en medicina para la exitosa realización de este trabajo.

Al proyecto UNAM-DGAPA-PAPIME "PE103323: Herramientas de enseñanza para el desarrollo de dispositivos médicos basados en inteligencia artificial". Gracias a su valioso apoyo, este trabajo se pudo llevar a cabo de manera más efectiva.

A mis compañeros de la 5ta generación y de otras generaciones de ISB, por haber compartido experiencias y conocimientos durante los 5 años que estuve en la universidad. Muchas gracias a todos.

Finalmente, agradezco a la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, que desde el bachillerato me ha llenado de experiencias inolvidables y personas increíbles. Así mismo, a la Facultad de Ingeniería por ayudarme a crecer tanto de forma personal y profesional al brindarme las herramientas para superar los retos que se me presenten en el futuro.

Muchas gracias a todos

Sinceramente:

Bruno Esteban Carrillo Quintero

Índice general

1. Antecedentes	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Estructura de la tesis	5
2. Marco teórico	6
2.1. Enfermedad de Parkinson	6
2.1.1. Definición	6
2.1.2. Causas	6
2.1.3. Epidemiología	7
2.1.4. Cuadro clínico	7
2.1.5. Diagnostico y clasificacion	9
2.1.6. Tratamientos	12
2.2. Captura de movimiento	15
2.2.1. Sin marcadores	15
2.2.2. Con marcadores	16
3. Estado del arte	17
3.1. Métodos de análisis automatizado de la enfermedad de Parkinson	18

3.1.1.	Análisis de la escritura	18
3.1.2.	Análisis del movimiento de la mano	20
3.1.3.	Análisis de la marcha	21
3.1.4.	Análisis del habla	22
3.1.5.	Análisis de expresiones faciales	24
3.2.	Métodos de análisis de la postura humana	24
4.	Metodología	26
4.1.	Obtencion de la base de datos	26
4.1.1.	Diseño	26
4.1.2.	Características de los participantes.	27
4.1.3.	Protocolo para la captura de videos.	27
4.1.4.	Distribución de los datos.	29
4.2.	Terapia física	30
4.2.1.	Parámetros asociados	31
4.2.2.	Ejercicios realizados	32
4.2.3.	Preparación de los marcadores	33
4.3.	Análisis de los videos	35
4.3.1.	Segmentos corporales	35
4.3.2.	Algoritmo para el análisis	36
5.	Resultados y discusiones	40
5.1.	Cervicales	41
5.2.	Lumbares	45
5.3.	Extremidades superiores	50
6.	Conclusiones y trabajo a futuro	67
6.1.	Conclusiones	67
6.2.	Trabajo a futuro	68

7. Anexos	69
Bibliografía	89

Índice de figuras

3.1. Detección automática de temblores en actividades diarias utilizando sensores situados en la muñeca [42]	20
4.1. Representacion esquemática del proyecto	29
4.2. Puntos clave y su ubicacion en el cuerpo [53]	33
4.3. Diagrama de flujo que representa el algoritmo para el análisis de los videos obtenidos	39
5.1. Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de CC donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente	41
5.2. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio CC01	42
5.3. Comparacion de los parametros obtenidos de la cabeza y los hombros durante el ejercicio 01 de Columna Cervical en etapa PRE y POS	42
5.4. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio CC02	44
5.5. Comparacion de los ángulos de inclinacion de la cabeza obtenidos durante el ejercicio 02 de Columna Cervical en etapa PRE y POS	44
5.6. Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de CL donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente	45
5.7. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio CL01	46
5.8. Comparacion de los ángulos de inclinacion de la espalda y cadera obtenidos durante el ejercicio 01 de Columna Lumbar en etapa PRE y POS	46

5.9. Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de CL02 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente	47
5.10. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio CL02	48
5.11. Comparacion de los ángulos de inclinacion de la espalda y la cadera obtenidos durante el ejercicio 02 de Columna Lumbar en etapa PRE y POS	48
5.12. Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de MH donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente	50
5.13. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio MH01	51
5.14. Comparacion de los ángulos de inclinacion del hombro izquierdo obtenidos durante el ejercicio 01 de Movilidad de Hombro en etapa PRE y POS	51
5.15. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio MH02	53
5.16. Comparacion de los ángulos de inclinacion del hombro derecho obtenidos durante el ejercicio 02 de Movilidad de Hombro en etapa PRE y POS	53
5.17. Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de EC02 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente	54
5.18. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio EC02	55
5.19. Comparacion de los ángulos de flexión de los codos obtenidos durante el ejercicio 02 de Ejercicios Combinados en etapa PRE y POS	55
5.20. Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de EC04 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente	57
5.21. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio EC04	59
5.22. Comparacion de los ángulos de flexión de los codos obtenidos durante el ejercicio 04 de Ejercicios Combinados en etapa PRE y POS	59
5.23. Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de EC05 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente	61
5.24. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio EC05	62
5.25. Comparacion de los ángulos de extension de los hombros obtenidos durante el ejercicio 05 de Ejercicios Combinados en etapa PRE y POS	62

5.26. Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de EC06 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente . . .	64
5.27. Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio EC06	65
5.28. Comparacion de los ángulos de flexión de los codos obtenidos durante el ejercicio 06 de Ejercicios Combinados en etapa PRE y POS	65

Índice de tablas

4.1. Relación entre el ejercicio realizado y el área específica evaluada.	32
4.2. Puntos clave y su ubicación en el cuerpo	34
4.3. Relación entre la terapia realizada y puntos clave utilizados.	35
4.4. Identificación y nomenclatura de los ángulos utilizados durante el monitoreo continuo en CC.	36
4.5. Identificación y nomenclatura de los ángulos utilizados durante el monitoreo continuo en CL y MH.	37
4.6. Identificación y nomenclatura de los ángulos utilizados durante el monitoreo continuo en EC.	38

Lista de acrónimos y abreviaturas

- EP: Enfermedad de Parkinson.
- HGM: Hospital General de México.
- UPDRS: Unified Parkinson's Disease Rating Scale
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- CC: Columna Cervical
- CL: Columna Lumbar
- MH: Movilidad de Hombro
- EC: Ejercicios Combinados

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Introducción

La enfermedad de Parkinson (EP) es la segunda enfermedad neurodegenerativa más frecuente, solo superada por la enfermedad de Alzheimer. Para el año 2016, se estimó que aproximadamente 6.1 millones de personas padecían la enfermedad, cifra que es más del doble de la reportada en 1990, la cual era de 2.5 millones aproximadamente. Se estima que para el 2040 habrá una duplicación de la cifra reportada en 2016, lo que coloca a la EP en la enfermedad neurodegenerativa con mayor crecimiento de las últimas 3 décadas. [1]

En México, no existe información precisa sobre la prevalencia de la enfermedad, sin embargo, en 2017 se estimó que esta era del 0.3 % y del 2 % en personas mayores de 60 años [2], mientras que la incidencia anual en el 2014 fue de 8.2, 10.4 en 2015, 11.4 en 2016, 12.7 en 2017 y 10.8 en 2018, todas estas cifras por cada 100,000 habitantes. Los tres estados de la república con mayor incidencia fueron Sinaloa, Colima y Durango; los tres estados con menor incidencia fueron Querétaro, Zacatecas y Guanajuato. Uno de los mayores factores de riesgo de la EP es la edad ya que se puede notar un incremento exponencial en la incidencia anual en personas mayores de 60 años, donde fue de 3.5 en adultos menores de 60 años, de 26.9 en aquellos entre 60 y 64 años, y de 65.9 en mayores de 65 años, todo esto por cada 100,000 habitantes. Se estima que para el 2023 la incidencia anual sea de 14.9 por cada 100,000 habitantes. [3]

Las manifestaciones clínicas de la EP van desde signos motores entre las que se encuentran la bradicinesia, temblores y la rigidez, hasta síntomas no motores como alteraciones sensoriales, cognitivas y psiquiátricas. Estas manifestaciones derivan en una baja en la calidad de vida de los pacientes con EP llegando incluso a ser incapaces de realizar tareas de la vida diaria como vestirse o alimentarse por sí mismos. La EP actualmente no tiene cura, sin embargo, existen tratamientos farmacológicos o no farmacológicos, que incluyen terapia física y dieta, y tratamientos quirúrgicos, los cuales pueden contribuir a ralentizar la progresión de la enfermedad y reducir sus síntomas. [4]

Existe una gran variedad de escalas y cuestionarios para diagnosticar y estudiar la EP las cuales evalúan la enfermedad de forma visual y mediante cuestionarios realizados al paciente. Dos de las más utilizadas son la Escala Unificada de Valoración de la Enfermedad de Parkinson (UPDRS, por sus siglas en inglés) y la clasificación por Estadios de Hoehn y Yahr. La primera está dividida en cuatro dominios, siendo el primero el encargado de evaluar los aspectos no motores de la enfermedad y los restantes 3 de evaluar los síntomas motores, cabe destacar que originalmente se consideraba a los estadios de Hoehn y Yahr como un quinto dominio. [5]

A pesar de la relevancia que ha tomado esta escala para la evaluación de la EP, cuenta con dos problemas importantes; el primer problema es que no hay evidencia de su desempeño en el estudio del progreso de la enfermedad en sus etapas tempranas, y el segundo es que se utilizan índices para asignar un valor dependiendo del nivel del síntoma para posteriormente sumar estos valores y asignar un grado de enfermedad, por lo que en ocasiones puede ser complicado determinar con exactitud estos índices y solo se cuenta con un limitado rango de valores (0 a 5, presente o no presente). [6] Un análisis automático de imágenes capturadas con una cámara de video podría permitir obtener información sobre las alteraciones motoras presentes en el paciente utilizando puntos clave para medir parámetros como ángulos de elevación, frecuencia y amplitudes de movimiento, lo que permitiría trabajar con datos precisos que permitan observar la progresión de la enfermedad incluso desde etapas tempranas.

Hablando de costos, una revisión de la literatura publicada en 2012 encontraba que la EP tenía un alto costo, entre €13,000.00 y €33,000.00 anuales por paciente [7], lo que equivaldría, aproximadamente, a \$221,000.00 y \$561,000.00 pesos mexicanos respectivamente (con un

promedio de \$391,000.00 pesos mexicanos) [8] y tomando en cuenta las cifras de prevalencia estimadas en 2017, se puede calcular un costo anual aproximado de \$140,760,000,000 de la EP.

1.2. Justificación

El aumento en la esperanza de vida ha hecho que el índice de adultos mayores haya aumentado en los últimos años, lo que ha provocado un incremento en la necesidad de terapias de rehabilitación para tratar de forma efectiva enfermedades importantes en este sector de la población, sin embargo, no ha existido un incremento significativo en recursos tales como instituciones o personal para atender esta demanda. Esto se debe a dos principales razones. La primera es que un proceso de rehabilitación asistido requiere una cantidad significativa de recursos económicos para atender la creciente demanda de rehabilitación. La segunda, es que no existe suficiente personal capacitado para darle seguimiento de forma individual a cada uno de los pacientes que necesitan rehabilitación. [9]

A esto se le suma el hecho de que en años recientes, debido a la pandemia por COVID-19, muchas de las actividades tuvieron que realizarse de forma remota, incluyendo rehabilitación y tratamientos médicos. [10]

La EP es una de las enfermedades neurodegenerativas que más podría beneficiarse de la rehabilitación remota. Un programa convencional de terapia física que combine ejercicios de fuerza, resistencia, equilibrio y flexibilidad pueden ser efectivos para reducir el grado de afectación motriz [11]. Se han realizado intentos para transferir los cuidados y la rehabilitación de EP desde el hospital hasta el hogar del paciente, teniendo como principales objetivos:

- Mejorar la calidad de vida del paciente, mediante la reducción de costos y tiempos de traslados.
- Reducir los gastos médicos mediante el incremento en el número de pacientes atendidos en un día, o por una única unidad profesional.
- Expandir las oportunidades de rehabilitación utilizando sistemas asistidos por computadora. [12]

Por lo tanto, el desarrollo tecnologico permite expandir la capacidad del tratamiento más allá de la fase aguda de la enfermedad y, al mismo tiempo, se desarrolla un nuevo modelo de intervencion con el objetivo de reemplazar el más tradicional, es decir, reemplazar la interaccion frente a frente entre el paciente y el fisioterapeuta. Considerando la aplicacion de la medicina a distancia en un entorno doméstico, se han realizado reportes acerca de sistemas para la evaluacion de movimientos corporales a partir de videos RGB estándar [13].

Por consiguiente, el objetivo principal de esta tesis es analizar los movimientos corporales de 11 sujetos diagnosticados con enfermedad de Parkinson y comparar su desempeño al inicio y al final del trabajo, procesando sus respectivos videos RGB con un software que identifica 11 puntos clave mientras ejecutan una terapia de rehabilitacion apuntando a 4 segmentos coroporales (columna cervical y lumbar, ejercicios combinados y movilidad de hombro).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Cuantificar los patrones de movimiento en la enfermedad de Parkinson con una terapia de rehabilitación especifica mediante el análisis automático de videos

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar ejercicios para la terapia de parkinson enfocandose en cuatro segmentos corporales (Columna cervical y lumbar, ejercicios combinados y movilidad de hombro).
- Identificar puntos clave de esqueleto axial y miembros superiores utilizando el software Mediapipe.
- Analizar el movimiento de los pacientes diagnosticados con EP y describir las diferencias entre la primera y la segunda etapa.

1.4. Estructura de la tesis

La presente tesis se encuentra estructurada en cinco capítulos en los que se describe el análisis automático de una terapia de rehabilitación para pacientes con parkinson a partir de videograbaciones para cuantificar los movimientos.

- El capítulo 2 “**Marco teórico**” presenta los conceptos básicos relacionados a la enfermedad de parkinson, como sus causas, síntomas, epidemiología y sus tratamientos. Asimismo, se mencionan aspectos de videogrametría, como la fotogrametría y la calibración de una imagen.
- El capítulo 3 “**Estado del arte**” describe las principales herramientas desarrolladas actualmente para un análisis automático de la enfermedad de Parkinson utilizando distintas aproximaciones, como la escritura, el habla o la marcha.
- El capítulo 4 “**Metodología**” menciona el diseño del proyecto, el protocolo para la captura de videos, los parámetros a utilizar, los ejercicios realizados en la terapia y el algoritmo para el análisis.
- En el capítulo 5 “**Resultados**” se presentan las gráficas obtenidas y su análisis.
- Finalmente, el capítulo 6 “**Conclusiones y trabajos a futuro**” detalla las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos de la presente tesis y los trabajos a futuro a desarrollar.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Enfermedad de Parkinson

2.1.1. Definición

La enfermedad de Parkinson es una enfermedad progresiva caracterizada por presentar bradicinesia, temblores, rigidez, cambios en la postura y la marcha, así como una degeneración neuronal. [14, 15]

Patológicamente, la enfermedad de Parkinson se define como la pérdida o degeneración de neuronas productoras de dopamina (dopaminérgicas) en la sustancia negra pars compacta del mesencéfalo y el desarrollo de cuerpos de Lewy en estas neuronas. Esta pérdida de neuronas dopaminérgicas resulta en un deterioro en el control motor. [4]

2.1.2. Causas

Actualmente no existe evidencia contundente que nos confirme la existencia de una causa determinante para la enfermedad de Parkinson, sin embargo, existen registros que demuestran que, efectivamente, existen factores que pueden propiciar su aparición y/o progresión.

Uno de los principales factores es la edad, siendo entre los 50 y 60 años el rango de edad con mayor frecuencia de aparición de la enfermedad. Del mismo modo, se han encontrado otros

dos factores de riesgo importantes: historia familiar y exposición a pesticidas.

Se han supuesto otros factores de riesgo, sin embargo la información epidemiológica aún no es conclusiva y no se ha logrado identificar la forma en que afectaría de forma diferente a hombres y mujeres. Entre estos se incluyen: consumo de lácteos y agua de pozo; sobrepeso; exposición a solventes de hidrocarburos, cobre, plomo y manganeso, así como consumo excesivo de hierro. [4]

2.1.3. Epidemiología

Según la OMS, la enfermedad de Parkinson es la segunda enfermedad neurológica más frecuente a nivel mundial, contando con un estimado de 8.5 millones de personas con esta enfermedad en 2019, siendo más del triple que en la década de 1990, siendo 2.5 millones los casos estimados. [16]

Se estima que para la década de 2040 habrá un aproximado de 17 millones de personas con esta enfermedad, lo que la convierte en la enfermedad neurológica de más rápido crecimiento a nivel mundial. Este aumento tan rápido en los casos puede deberse a una mayor exposición a los factores de riesgo, envejecimiento de la población, así como una mejora en el diagnóstico y reporte de casos. [1]

2.1.4. Cuadro clínico

La enfermedad se representa como un nexo de 4 componentes mayores: Síntomas motores, cambios cognitivos, cambios en la conducta y síntomas relacionados a fallas en el sistema nervioso autónomo. Las características motoras que más destacan de la enfermedad de Parkinson son temblores, bradicinesia, rigidez y, a medida que avanza la enfermedad, se presenta dificultad para mantener una postura estable.

Estudios patológicos recientes y de imagenología cerebral, han demostrado que los síntomas motores se manifiestan una vez que se han degenerado entre el 50 y el 70 de las neuronas de la sustancia negra. [4]

Sintomas motores

Entre los síntomas motores de la enfermedad de Parkinson se encuentran los ya mencionados anteriormente: Temblores en reposo (inicialmente de forma unilateral), bradicinesia, rigidez, inestabilidad en la postura y un arrastre de los pies durante la marcha.

Sin embargo, estos no son los únicos, y otras manifestaciones motoras pueden incluir: expresiones faciales reducidas (hipomimia), una reducción en la frecuencia del parpadeo, visión borrosa, dificultad para mirar hacia arriba, distonia, parálisis, dificultad para moverse en la cama, postura encorvada, hipofonía y palilalia.

Estos síntomas son progresivos, sin embargo, la tasa de progresión es muy variable. Debido a que la enfermedad aparece frecuentemente a edades avanzadas, muchos de los pacientes llegan a confundir estos síntomas con el propio envejecimiento. [4]

Sintomas no motores

Contrario a lo que se piensa, la enfermedad de Parkinson cuenta con una gran variedad de síntomas no motores. Entre los más comunes se encuentran las disfunciones del sistema nervioso autónomo (SNA), desórdenes de conducta y trastornos del sueño, sin embargo, los pacientes también pueden manifestar problemas cognitivos y sensitivos.

Las principales disfunciones del SNA que presentan los pacientes con Parkinson son la gastrointestinal, genitourinaria y cardiovascular con hipotensión ortostática. Este es el síntoma no motor con mayor prevalencia, estando presente en, aproximadamente, el 70% de los casos en cualquier etapa de la enfermedad en la que se encuentre el paciente.

Los problemas cognitivos pueden presentarse en distintos grados dependiendo del paciente y pueden ocurrir en etapas muy tempranas de la enfermedad, entre los cuales se encuentran la bradifrenia o el "pensamiento lento", así como la disfunción ejecutiva. Una vez que la disfunción cognitiva afecta el desarrollo de actividades cotidianas, esta se clasifica como demencia por Parkinson y suele aparecer años después de la aparición de los síntomas motores.

Entre los trastornos del sueño asociados a la enfermedad de Parkinson se incluyen trastornos del sueño REM, síndrome de piernas inquietas, insomnio y somnolencia diurna excesiva.

La ansiedad y la depresión son los dos principales desórdenes de conducta que afectan a los pacientes con enfermedad de Parkinson, sin embargo, también pueden presentar psicosis y apatía. Se ha reportado una prevalencia de depresión del 40% y, por otro lado, una prevalencia del 20% al 40% en el caso de ansiedad, la cual incluye ansiedad social, ansiedad generalizada, agorafobia y ataques de pánico.

Otros síntomas no motores que se han reportado se asocian a la farmacoterapia, entre los cuales se encuentran el trastorno de control de impulsos (Compras compulsivas, alimentarse de forma compulsiva, hipersexualidad), alucinaciones y delirios. [17]

2.1.5. Diagnóstico y clasificación

Escala De Evaluación Unificada (UPDRS)

La Escala de Evaluación Unificada (UPDRS por sus siglas en inglés) es una escala desarrollada en 1984 por el neurologo Stanley Fahn y colaboradores, con el objetivo de llevar un seguimiento longitudinal de la evolución de la enfermedad de Parkinson. Esta escala se encarga de evaluar 4 ejes principales. Los primeros 3 se califican con una puntuación de 0 (normal) hasta 4 (afección severa), mientras que el último se califica, además, con 0 (ausente) y 1 (presente), y la cantidad de reactivos varía entre estos 4 ejes, resultando de la siguiente manera:

- Primer eje: Mental, conductual y de ánimo
4 reactivos con un rango de puntuación entre 0 y 16
- Segundo eje: Actividades de la vida diaria
13 reactivos con un rango de puntuación entre 0 y 52
- Tercer eje: Evaluación motora
17 reactivos con un rango de puntuación entre 0 y 68
- Cuarto eje: Complicaciones motoras
11 reactivos con un rango de puntuación entre 0 y 23

El rango de puntuación de la escala es de 0 hasta 159, donde 159 representa incapacidad total y 0 representa "ninguna incapacidad". Cabe destacar que dentro de esta escala se contemplaba un quinto (escala modificada de Hoehn y Yahr) y sexto (escala de discapacidad) eje. Posteriormente la Sociedad de Movimientos Anormales (MDS por sus siglas en inglés) publicó una revisión de la UPDRS, la cual se denominó Escala Unificada de la Enfermedad de Parkinson modificada por la MDS (MDS-UPDRS) [5]

Cuestionario de calidad de vida en Enfermedad de Parkinson (PDQ-39)

El Cuestionario en Enfermedad de Parkinson (PDQ por sus siglas en inglés) es una escala desarrollada con el objetivo de evaluar el impacto de la enfermedad en el desarrollo de las actividades diarias y en el bienestar del paciente, es decir, evalúa su calidad de vida. Esta escala se encarga de evaluar 8 dominios principales. Dichos dominios suman un total de 39 ítems o preguntas, las cuales se responden con la frecuencia con la que el paciente ha tenido el problema en el último mes, y las posibles opciones de respuesta son: 0 (nunca), 1 (ocasionalmente), 2 (algunas veces), 3 (frecuentemente), 4 (siempre o incapaz de hacerlo). La cantidad de ítems se distribuye de la siguiente manera: [18, 19]

- **Primer dominio:** Movilidad

Cuenta con 10 ítems y se encarga de evaluar la dificultad con la que se realiza una actividad de ocio, tareas domésticas; la dificultad con la que se cargan paquetes y se caminan distancias cortas, y la preocupación por caerse en público

- **Segundo dominio:** Actividades de la vida diaria

Cuenta con 6 ítems y se encarga de evaluar la dificultad con la que se realizan tareas de aseo personal; dificultad para vestirse solos, cortar alimentos, sostener un vaso, así como para abotonarse la ropa y atarse los zapatos.

- **Tercer dominio:** Bienestar emocional

Cuenta con 6 ítems y se encarga de evaluar la sensación de depresión, ansiedad, enfado o soledad.

- **Cuarto dominio:** Estigma

Cuenta con 4 ítems y se encarga de evaluar la tendencia a ocultar su enfermedad; evitar comer y/o beber en público; sentir vergüenza de padecer Enfermedad de Parkinson, así como los sentimientos de preocupación por la reacción de la gente al saber de su padecimiento.

- **Quinto dominio:** Apoyo social

Cuenta con 3 ítems y se encarga de evaluar los problemas en las relaciones personales y apoyo por parte de su familia, según las necesidades del paciente.

- **Sexto dominio:** Estado cognitivo

Cuenta con 4 ítems y se encarga de evaluar los problemas de concentración y de memoria, así como la sensación de tener alucinaciones y/o pesadillas.

- **Septimo dominio:** Comunicación

Cuenta con 3 ítems y se encarga de evaluar la dificultad para comunicarse con los demás y la sensación de sentirse ignorado.

- **Octavo dominio:** Malestar corporal

Cuenta con 3 ítems y se encarga de cuantificar los dolores en articulaciones, calambres y sensaciones desagradables de calor y/o frío.

Al finalizar el cuestionario, se genera una puntuación mediante la escala de Likert (también denominado método de evaluaciones sumarias), posteriormente, la puntuación se transforma a una escala de 0 a 100, donde una puntuación de cero (0) representa un perfecto estado de salud, mientras que una puntuación de cien (100) representa el peor estado de salud. [20]

Clasificación por Estadios de Hoehn y Yahr

La Clasificación por Estadios de Hoehn y Yahr es un método de clasificación creado por la neurologa Margaret M. Hoehn y el médico Melvin D. Yahr, presentada por primera vez en 1967 en un artículo de su autoría titulado "Parkinsonism", donde crearon y utilizaron dicha escala. Esta clasificación de estadios tiene como objetivo clave de establecer el estadio evolutivo y la progresión de la enfermedad y califica al paciente de acuerdo a la severidad de sus síntomas. [21]

La puntuación de esta escala va desde 0 hasta 5, teniendo 2 puntos intermedios: uno entre la etapa 1 y 2, y el segundo entre la etapa 2 y 3. Por lo que la escala resulta de dicha manera: [22]

- 0: No existen signos de la enfermedad.
- 1: Enfermedad exclusivamente unilateral.
- 1.5: Afectación unilateral y axial.
- 2: Afectación bilateral sin alteraciones en el equilibrio
- 2.5: Afectación bilateral leve con recuperación en la prueba de retroimpulsión
- 3: Afectación bilateral leve a moderada, con inestabilidad postural pero el paciente es independiente físicamente
- 4: Incapacidad grave, aunque puede permanecer en pie sin ayuda
- 5: Se encuentra en cama o en silla de ruedas

2.1.6. Tratamientos

Actualmente, no existe ningún medicamento ni procedimiento quirúrgico que detenga o revierta el progreso de la enfermedad de Parkinson, sin embargo, existen distintos tratamientos que han demostrado ser beneficiosos al retrasar el avance de la enfermedad. [23]

Farmacológicos

Actualmente existe una variedad de medicamentos que son capaces de administrar sustancias que contrarresten el efecto de depleción de dopamina en la sustancia nigra.. [22]

El *gold standard* y el fármaco con más eficiencia en la actualidad para tratar los síntomas motores es el precursor oral de la dopamina: La levodopa (L-Dopa).

Existen otros medicamentos que han mostrado tener una buena eficiencia para el tratamiento de los síntomas motores y que, a su vez, tienen un efecto en las manifestaciones no motoras de la enfermedad, como es el caso de algunos agonistas dopaminérgicos no ergóticos como la rotigotina, pramipexol o ropinirol. Estos actúan aumentando la actividad del neurotransmisor al estimular los receptores dopaminérgicos, sin embargo, pueden producir ciertos efectos secundarios como ataques de sueño, alucinaciones o alteraciones del comportamiento, por mencionar algunos, con mayor frecuencia que al utilizar L-Dopa.

Cabe destacar que anteriormente se utilizaban agonistas dopaminérgicos ergóticos, sin embargo, han caído en desuso debido a las complicaciones que pueden ocasionar como una fibrosis valvular cardíaca. [22, 23]

Otros medicamentos funcionan inhibiendo las enzimas encargadas de la destrucción de la dopamina, como la catecol-O-metiltransferasa (COMT) y la monoamino oxidasa tipo B (MAOB), una vez que esta ha sido recapturada en la neurona presináptica. La *seleginina* y la *rasagilina* son ejemplos de fármacos que inhiben a la MAOB, y pueden utilizarse desde el inicio del tratamiento de la EP, aunque se recomienda para etapas más avanzadas y en situaciones donde la L-Dopa tenga efectos adversos. Por otro lado, la *entacapona* actúa inhibiendo a la enzima COMT y regularmente no se utiliza sola, más bien es un complemento de la L-Dopa para el tratamiento de los síntomas motores, sin embargo, los beneficios que ofrece pueden ser menores que los efectos secundarios que ocasiona, como náuseas, diarrea y un aumento en el riesgo de cáncer de próstata y problemas cardiovasculares [22, 24]

Quirúrgicos

En términos generales, existen dos tipos de tratamientos o procedimientos quirúrgicos: Procedimientos lesionales y la estimulación cerebral profunda. [25]

Para los procedimientos lesionales, se introduce un electrodo en el cerebro con el objetivo de quemar el núcleo o las fibras que son el blanco para mejorar los síntomas. Dentro de estas cirugías se encuentran:

- **Talamotomía:** Consiste en la destrucción del Núcleo Ventral Intermedio del tálamo. Demostró reducir temblores de larga duración en el 90% de los pacientes
- **Palidotomía:** Consiste en la lesión del globo pálido interno.
- **Leucotomía de RAPRL:** Consiste en radiaciones prelemniscas
- **Subtalamotomía:** Consiste en la fulguración del núcleo subtalámico

Para aquellos pacientes que no pueden aliviar sus síntomas motores con un tratamiento farmacológico, la estimulación cerebral profunda ha demostrado ser efectiva. Se tiene como base el mismo principio que un marcapasos cardíaco y consiste en la implantación de electrodos en los mismos blancos que en el procedimiento anterior, por ejemplo, en el tálamo para aliviar el temblor, o en el globo pálido para aliviar la rigidez y, en menor grado, el temblor.

El trasplante de células productoras de dopamina, fetales o de la medula suprarrenal también son dos maniobras quirúrgicas utilizadas en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson, sin embargo, se ha disminuido su uso. Pero las células madre parecen tener un potencial muy grande para el desarrollo en la terapéutica de la enfermedad. [26]

2.2. Captura de movimiento

La captura de movimiento se refiere a técnicas de grabación del movimiento del cuerpo humano que capturan datos espaciotemporales y se representan digitalmente. Existe una gran variedad de tecnología para la captura de movimiento y se pueden utilizar diferentes sensores dependiendo de la aplicación y las necesidades de cada situación. Entre los procedimientos de captura estandarizados se encuentran los móviles y los estacionarios. Generalmente los sistemas consisten en cámaras infrarrojas, de video, sensores y, en algunos casos, marcadores. Todos estos dispositivos en conjunto digitalizan la información real para poder trabajarla en un entorno virtual. [27]

2.2.1. Sin marcadores

Estos sistemas generalmente utilizan cámaras de videograbación y cámaras infrarrojas para poder obtener la profundidad de un cuerpo. Una de las mayores ventajas de este sistema es que permiten el libre movimiento del cuerpo humano al no tener que adherir objetos al sujeto, lo que a su vez reduce el costo de estos sistemas, sin embargo, una de las mayores desventajas es que no cuentan con una precisión alta al realizar mediciones de profundidad, y aquellos sistemas que sí cuentan con una alta precisión son de muy alto costo además de que requieren software y programas más especializados para su uso. [28, 29]

Actualmente existen sistemas de captura de movimiento por visión computarizada, los cuales han sido capaces de realizar estimaciones tridimensionales a partir de un único fotograma bidimensional, lo que se traduce en el uso de una única cámara para este método. Existen aquellos más especializados y otros más ligeros, por lo que no requieren de hardware especializado, además de ser de código abierto, por lo que el acceso a estos sistemas es libre, permitiendo mejoras y la adición de nuevas características más rápidamente. [30]

2.2.2. Con marcadores

Estos sistemas funcionan colocando cámaras alrededor del sujeto o del área de interés y se calibran con dispositivos iluminados o reflectantes, los cuales se colocan en puntos específicos del cuerpo para utilizarse como referencia. Estos se colocan comúnmente cerca de las articulaciones y puntos como la cabeza, estomago y pecho. [27] Estos puntos son identificados por las cámaras, lo que aumenta la precisión de la captura del movimiento, sin embargo, este método presenta ciertas desventajas. Una de las mayores desventajas de este método es su alto costo, al requerir de varias cámaras y marcadores, además de que requieren de personas especializadas y expertas en el tema para poder colocar los dispositivos de forma correcta. Otra de las desventajas es que al adherir objetos al sujeto, no permiten un libre movimiento del cuerpo y puede ocurrir cierta oclusión de los objetos al realizar ciertas acciones. [29]

Capítulo 3

Estado del arte

Los avances tecnológicos de los últimos años han permitido que se desarrollen métodos de análisis automáticos de la EP utilizando modelos de estimación de la postura basados en el procesamiento de imágenes o videos. Esto representa una solución no invasiva que está ganando popularidad debido a que logra una integración más sencilla e intuitiva a los métodos de rehabilitación, ya que permite que más personas puedan hacer uso de esta tecnología sin la necesidad de recibir un entrenamiento previo ni requiere de complejos métodos de calibración. [13]

En los últimos años, el campo de la estimación de la postura humana ha experimentado avances considerables, sobre todo en el contexto de aplicaciones clínicas como la monitorización y el diagnóstico de la EP. El desarrollo de conjuntos de datos exhaustivos, como el "MPII Human Pose", ha sido fundamental para impulsar este campo. Este conjunto de datos abarca una amplia gama de actividades humanas y proporciona amplias anotaciones, incluidas las posiciones de las articulaciones del cuerpo y las orientaciones 3D, que son cruciales para el entrenamiento y la evaluación de los modelos de estimación de la pose [31].

La aplicación de algoritmos de estimación de postura basados en aprendizaje profundo ha demostrado un potencial significativo en la evaluación automática y objetiva de las anomalías posturales en pacientes con EP. Por ejemplo, un estudio aplicó exitosamente tal algoritmo a fotos laterales de pacientes con EP, permitiendo la medición automática del ángulo de flexión anterior (AFA) y el ángulo de cabeza caída (DHA). Los resultados mostraron un alto grado de

concordancia con los métodos convencionales de etiquetado manual, lo que sugiere que estos algoritmos pueden medir de forma fiable las anomalías posturales en pacientes con EP [32].

Además, los avances en la estimación de la postura humana se han aplicado para estimar la longitud de la zancada, un parámetro crítico en el diagnóstico de la EP. Utilizando estimaciones de la postura en 3D a partir de vídeo y analizando el movimiento del pie, los investigadores han desarrollado un método para determinar la longitud de la zancada sin necesidad de sensores invasivos que podrían alterar la marcha del paciente. Este enfoque aprovecha la asequibilidad y facilidad de configuración de los sistemas de cámaras, ofreciendo una alternativa prometedora para el diagnóstico de la EP [33].

La integración de la estimación de la postura humana en el campo médico, particularmente para la EP, resalta el potencial de las técnicas de visión computarizada para contribuir a evaluaciones no invasivas, precisas y objetivas de los síntomas motores. El continuo refinamiento de los métodos de estimación de la postura y la adaptación de los modelos del cuerpo humano para abordar las fallas inherentes mejoran aún más la confiabilidad y aplicabilidad de estas tecnologías en escenarios clínicos [33].

3.1. Métodos de análisis automatizado de la enfermedad de Parkinson

3.1.1. Análisis de la escritura

Los avances en el análisis de la escritura para el diagnóstico de la enfermedad de Parkinson son multifacéticos y abarcan el desarrollo de herramientas digitales basadas en sensores, la creación de bases de datos especializadas para aplicaciones de aprendizaje automático y la identificación de nuevos marcadores de la escritura. Estas innovaciones han conducido a métodos más objetivos y precisos para diagnosticar y evaluar la EP, con aplicaciones potenciales tanto en entornos clínicos como de rehabilitación. A continuación se enlistan algunas de las principales aportaciones que se han reportado en la literatura:

- Se han desarrollado nuevos sistemas de sensores integrados con bolígrafos digitales, como la plataforma Manus, para proporcionar evaluaciones objetivas de la escritura a mano para el diagnóstico diferencial de la EP [34].
- Se han creado bases de datos de escritura a mano, como la PaHaW, para analizar las características cinemáticas y de presión en la escritura a mano con modelos de aprendizaje automático como las máquinas de vectores de soporte que muestran una alta precisión de clasificación para la EP [35].
- Las tareas estandarizadas de escritura pueden medir cuantitativamente la bradicinesia, la micrografía y el temblor; distinguiendo a los pacientes con EP de los controles sanos [36].
- El análisis de la escritura basado en imágenes, utilizando técnicas como 2D-DFT y clasificación de aprendizaje automático, puede ayudar en el diagnóstico de enfermedades neurodegenerativas [34].
- Se han identificado nuevos marcadores de la escritura a mano, incluyendo la entropía y la energía de la señal, y los modelos predictivos que utilizan estas características han logrado una alta precisión en el diagnóstico de la EP [37].
- Se han desarrollado sistemas innovadores que proporcionan análisis de la escritura a mano en tiempo real y retroalimentación vocal para la rehabilitación de la escritura en pacientes con EP, enfatizando una experiencia de escritura natural [38].
- Se ha demostrado que el análisis del movimiento en el aire durante la escritura a mano mejora significativamente la precisión de la clasificación de la enfermedad, lo que sugiere su potencial como marcador de la EP [39].
- Se han propuesto técnicas de visión por computadora y electromiografía de superficie combinadas con clasificadores para diferenciar a los pacientes con EP de los sujetos sanos basándose en el análisis de la escritura a mano [40].

- El análisis biométrico de la escritura a mano utilizando señales geométricas, dinámicas y de activación muscular ha demostrado una alta precisión en la detección y clasificación de la EP [40].
- Los enfoques semisupervisados para caracterizar la escritura a mano, como el análisis de la escritura árabe en línea, han sido eficaces para discriminar a los pacientes con EP de los controles sanos [41].

3.1.2. Análisis del movimiento de la mano

San-Segundo, et al. [42] mencionan que una de las mayores dificultades al intentar analizar de forma continua los síntomas motores de la EP en el día a día es distinguir los temblores de actividades cotidianas, por ejemplo, lavarse los dientes . Además, la variabilidad entre pacientes, tanto en sus actividades diarias como en la severidad de sus síntomas, es alta. Debido a esto, decidieron utilizar algoritmos de *machine learning* para desarrollar un método de análisis que tuviera un buen desempeño y lograra diferenciar los temblores de actividades diarias con precisión.

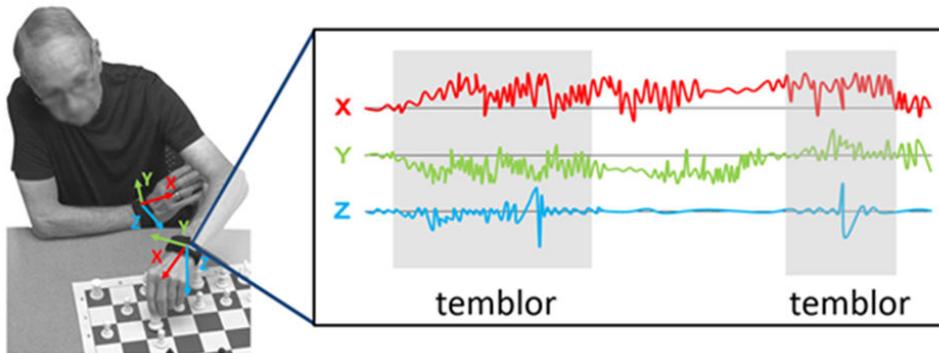


Figura 3.1: Detección automática de temblores en actividades diarias utilizando sensores situados en la muñeca [42]

Evaluaron el desempeño de varias configuraciones tanto en un ambiente de laboratorio como en ambientes no controlados. El mejor resultado lo obtuvieron utilizando una configuración que combinaba un modulo de preprocesamiento para extraer información del temblor y una Red

Neuronal Profunda para el aprendizaje de características relevantes y detectar segmentos del temblor.

Sin embargo, una de las mayores limitaciones de este modelo es que no puede detectar la intensidad ni el tipo de temblor, es decir, si es en reposo, al realizar una determinada acción o al mantenerse en una postura específica.

3.1.3. Análisis de la marcha

Los recientes avances en el análisis de la marcha para la EP se han centrado en el desarrollo de tecnologías portátiles y sofisticados algoritmos capaces de proporcionar asistencia en tiempo real y monitorización a largo plazo. Estas tecnologías han demostrado su eficacia para detectar anomalías en la marcha, mejorar la movilidad y ofrecer información sobre la progresión de la enfermedad, mejorando así la calidad de vida de los pacientes con EP. Algunas de las principales aportaciones reportadas en la literatura son:

- Los sensores inerciales portátiles combinados con algoritmos como los modelos ocultos de Markov (HMM) y la adaptación de parámetros, son eficaces para segmentar las fases de la marcha y detectar anomalías en pacientes con EP [43].
- Los sistemas portátiles en tiempo real que detectan el congelamiento de la marcha (FOG, por sus siglas en inglés) y proporcionan señales sonoras han demostrado su potencial para ayudar a los pacientes con EP durante la marcha, con comentarios positivos tanto de los pacientes como de los fisioterapeutas [44].
- Los sistemas de análisis de la marcha basados en la acelerometría que utilizan sensores montados en el tronco pueden detectar con precisión los eventos de la zancada y pueden servir como herramientas prácticas para evaluar las características de la marcha diaria en pacientes con EP [45].
- Los métodos de análisis de la marcha ambulatoria que utilizan giroscopios pueden estimar los parámetros espaciotemporales de la marcha y han sido validados para monitorizar la

marcha a largo plazo en pacientes con EP, observándose mejoras significativas durante la estimulación cerebral profunda (ECP) [46].

- El entrenamiento con señales visuales y estrategias atencionales puede normalizar temporalmente la longitud de la zancada en pacientes con EP, lo que sugiere que la hipocinesia de la marcha puede deberse a dificultades en la activación del sistema de control motor [47].
- Un sistema de medición inercial portátil con un algoritmo de filtro complementario puede proporcionar información espacio-temporal precisa sobre la marcha, sirviendo como indicadores clínicos para la EP [48].
- Los sistemas de análisis de la marcha basados en sensores portátiles han alcanzado aplicabilidad clínica, proporcionando alta resolución biomecánica para el deterioro de la marcha y reflejando la progresión de la enfermedad en la EP [49].
- Los enfoques de aprendizaje automático aplicados a los datos de los sensores portátiles pueden clasificar la gravedad de la EP y detectar la FOG, mejorando el diagnóstico clínico de la EP [50].
- La estimulación cerebral profunda (ECP) bilateral del núcleo pedunculopontino (NPP) y del núcleo subtalámico (NST) ha demostrado mejorar la marcha y la estabilidad postural en pacientes con EP [51].
- La monitorización a largo plazo de la marcha mediante acelerometría puede proporcionar un índice cuantitativo del comportamiento al caminar, contribuyendo a refinar el diagnóstico y el tratamiento de la EP [52].

3.1.4. Análisis del habla

Los avances en el análisis del habla en la EP implican una variedad de técnicas computacionales, incluyendo algoritmos genéticos, aprendizaje profundo, transformadas wavelet, procesos gaussianos y fusión de características, que han mejorado significativamente la precisión y robustez de la detección y monitorización de la EP. Estos métodos ofrecen herramientas prometedoras

ras para el diagnóstico no invasivo y temprano de la EP, ayudando potencialmente a una mejor gestión y tratamiento de la enfermedad. Dentro de las principales aportaciones de este tipo de análisis podemos mencionar las siguientes:

- Se han utilizado algoritmos de procesamiento de señales del habla, incluidos algoritmos genéticos y máquinas de vectores de soporte, para seleccionar características optimizadas de señales de voz para el diagnóstico de la EP, logrando precisiones de clasificación de hasta el 94.50 %.
- Los enfoques de aprendizaje profundo, como las redes neuronales convolucionales, se han aplicado para modelar las dificultades en las transiciones del habla, y cuando se combinan con información multimodal del habla, la escritura a mano y la marcha, muestran una alta precisión en la clasificación de pacientes con EP y la evaluación de las etapas de la enfermedad.
- Se ha desarrollado un modelo de aprendizaje profundo personalizado, la red U-lossian, para la evaluación de la EP, demostrando alta generalizabilidad y precisión de clasificación médicamente apropiada en corpus de habla.
- Se ha introducido la transformada wavelet de factor Q sintonizable para la extracción de características de las señales de voz, mostrando un rendimiento mejor o comparable al de otras técnicas de procesamiento de señales de voz para la clasificación de la EP.
- Los procesos gaussianos combinados con la Determinación Automática de Relevancia se han utilizado para la selección de características y la detección de EP a partir del habla, superando a otros métodos de aprendizaje automático con una precisión del 96 %,92 %.
- La fusión de varios conjuntos de características de audio procedentes de grabaciones de voz y del habla ha mejorado la detección de EP, con una reducción significativa de la tasa de error en comparación con los conjuntos de características individuales.
- Se han propuesto marcos automatizados que utilizan señales de EEG y redes neuronales convolucionales para la detección de la EP, logrando altas precisiones y superando a las

técnicas existentes.

- La descomposición modal variacional y el análisis del espectro de Hilbert se han utilizado para investigar el temblor de la voz, y nuevas características, como los coeficientes cepstrales de Hilbert, han demostrado una gran precisión en la evaluación de la EP.
- El análisis automatizado del habla conectada ha revelado biomarcadores tempranos de EP, capaces de captar déficits parkinsonianos subliminales del habla en pacientes con trastorno del comportamiento del sueño por movimientos oculares rápidos.

3.1.5. Análisis de expresiones faciales

3.2. Métodos de análisis de la postura humana

La estimación de la postura humana (EPH) es un área crítica de investigación que ha experimentado avances significativos en los últimos años, en particular con la aplicación de técnicas de aprendizaje profundo. La integración de la HPE en la evaluación y el diagnóstico de la enfermedad de Parkinson (EP) representa una intersección prometedora de la visión por ordenador y la práctica clínica.

En el contexto de la EP, un estudio ha desarrollado una herramienta automatizada que utiliza un algoritmo de estimación de pose basado en aprendizaje profundo para evaluar anomalías posturales en pacientes con EP. El algoritmo fue aplicado a fotos laterales de pacientes, y los resultados mostraron una excelente concordancia con los métodos de etiquetado manual, sugiriendo que tales herramientas pueden medir objetivamente las anomalías posturales en pacientes con EP².

Otro esfuerzo de investigación aplicó algoritmos de estimación de pose de aprendizaje profundo para la evaluación basada en la visión del parkinsonismo y la discinesia inducida por levodopa (LID, por sus siglas en inglés). El estudio utilizó trayectorias de movimiento extraídas de videos de evaluaciones de EP para detectar y estimar la severidad del parkinsonismo y la LID. Los resultados indicaron que el sistema podía predecir la severidad de los síntomas con

una precisión razonable, demostrando el potencial del aprendizaje profundo para ser traducido en prácticas clínicas para la EP3.

Además, se ha introducido el concepto de Coestimación de la Pose Humana (PCE), donde las poses de múltiples personas que realizan la misma actividad se estiman conjuntamente. Mientras que esta investigación no aborda directamente la EP, las técnicas desarrolladas podrían potencialmente ser adaptadas para actividades sincronizadas en pacientes con EP, tales como ejercicios grupales, lo cual podría ser beneficioso para propósitos de monitoreo y rehabilitación1.

La importancia de los conjuntos de datos exhaustivos para el avance de la EPH se pone de relieve mediante la introducción de un nuevo punto de referencia, "MPE Human Pose", que proporciona un conjunto diverso y desafiante de imágenes y anotaciones. Este conjunto de datos podría servir como un valioso recurso para desarrollar y evaluar modelos de EPH que podrían aplicarse a la investigación de la EP4.

Finalmente, una tesis sobre la estimación de la postura humana y la longitud de la zancada discute el desarrollo de métodos de visión computarizada para estimar la longitud de la zancada a partir de video, lo cual es particularmente relevante para diagnosticar la EP. El estudio afirma que su método, que utiliza estimaciones de pose 3D por fotograma, puede ser útil en el diagnóstico de la EP, ofreciendo una alternativa a los métodos basados en sensores que actualmente se utilizan5.

En resumen, la aplicación de la EPH en la investigación de la EP es un campo emergente que aprovecha los avances en la visión por computadora y el aprendizaje profundo. Los estudios revisados aquí proporcionan evidencia de la factibilidad y efectividad del uso de HPE para la medición objetiva de los síntomas de la EP, lo que podría conducir a mejores herramientas de diagnóstico y monitoreo para esta condición

Capítulo 4

Metodología

4.1. Obtencion de la base de datos

4.1.1. Diseño

Se solicitó a 11 sujetos con diagnóstico de EP su participación para la obtención de los videos para la realización de la presente tesis. Dichos videos consistieron en varias sesiones de grabaciones en las que se solicitó a los participantes realizar una terapia de rehabilitación desarrollada en conjunto con estudiantes de la facultad de medicina, de la carrera de fisioterapia. Todos los participantes fueron informados del objetivo del estudio y se les dieron las instrucciones para que siguieran el protocolo para la captura de los videos. Se les instruyó y fueron supervisados para la realización de un set de 10 ejercicios (2 de columna cervical, 2 de columna lumbar, 2 de movilidad de hombro y 4 ejercicios combinados) por un fisioterapeuta. Todos los videos se analizaron por un software específico capaz de detectar 32 puntos corporales clave de forma que se pudieran calcular parámetros como ángulos de rotación, frecuencia y amplitud del movimiento para la cabeza, hombros, espalda, codos y cadera

Criterios de selección

Pacientes con diagnóstico clínico de Enfermedad de Parkinson en etapa Hoehn y Yahr I y II en tratamiento farmacológico y que acepten bajo consentimiento informado participar en el

proyecto.

Criterios de exclusión

Pacientes con que presenten alguna otra enfermedad neurologica o de otro sistema que tenga repercusion en la motricidad o que genere limitación funcional por otras causas.

Criterios de eliminación

Pacientes que suspendan tratamiento farmacologico por cualquier motivo o que presenten o desarrollen algun otro estado de salud que tenga repercusion en la motricidad o que genere limitación funcional por otras causas, posterior al enrolamiento. Aquellos a los que no se les realizó la grabacion de la rutina de ejercicios en alguna de sus dos etapas.

4.1.2. Características de los participantes.

Se consideraron 10 pacientes diagnosticados con Enfermedad de Parkinson: 8 hombres y 2 mujeres con edades de entre 57.2 ± 9.51 años. Dicho grupo esta compuesto por pacientes que han recibido consultas en el Servicio de Medicina Física y Rehabilitación del Hospital General de México "Dr. Eduardo Liceaga" desde 2018 hasta la fecha y por pacientes referidos de otras instituciones de Salud que no cuentan con Servicio de Rehabilitacion. A todos los pacientes se les dio a firmar una carta de responsabilidades para participar en el proyecto de acuerdo a la declaracion de Helsinki y aprobado por el comité de ética del Hospital General de México "Dr. Eduardo Liceaga" (DI/22/601/04/17) y recibieron compensacion economica por su participacion.

4.1.3. Protocolo para la captura de videos.

El beneficio de un enfoque basado en la captura mediante camara de video es la capacidd de detectar el movimiento desde cualquier video RGB captado de forma regular, sin embargo, se deben considerar ciertos aspectos como el espacio, color de fondo y de la ropa, luminosidad y la resolución de la cámara antes de realizar cualquier videograbación. Para facilitar la obtencion de los puntos clave, el protocolo que se utilizó fue el siguiente:

- Se eligió un lugar amplio y libre de cualquier obstaculo para prevenir alguna caida o accidente durante la realizacion de la terapia de ejercicios.
- Se les solicitó a los sujetos que utilizaran ropa cómoda, que les permitiera resaltar del fondo y del resto de los objetos que se llegaran a encontrar al rededor.
- Las fuentes de luz se colocaron frente de la persona, de forma que estas iluminaran su cuerpo y rostro para que se pudieran observar claramente en la grabación.
- No se encontraba ninguna otra persona en el campo de vision de la cámara y retratos o fotos fueron evitados
- La cámara se colocó en un tripie de forma que se mantuviera estable y en la misma posición durante todas las grabaciones.
- La linea horizontal de la cámara se colocó de forma paralela al piso y se tomó como referencia para las videograbaciones.
- La resolucion del video fue de 1920x1080 pixeles, con una velocidad de captura de 24 fotogramas por segundo con un formato de escena de 16:9.

Cada video fue revisado para verificar que el cuerpo del sujeto se encontrara en una buena posicion dentro del campo de vision durante toda la grabacion. Posteriormente se realizo un acategorizacion de forma manual en grupos especificos. Casos en los que hubiera errores en la grabacion o que no se presentara el paciente para posteriores grabaciones fueron excluidos.

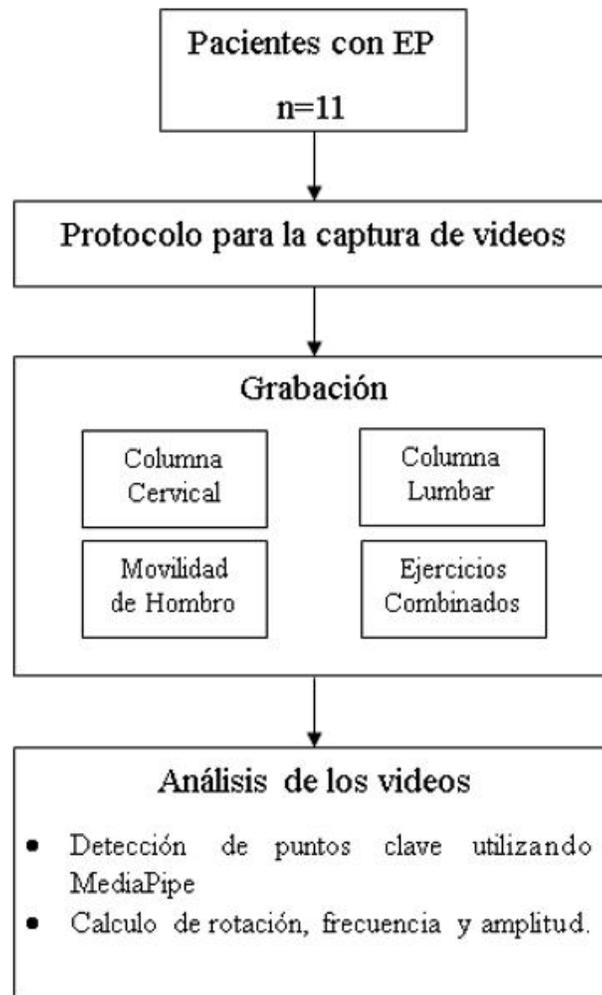


Figura 4.1: Representacion esquemática del proyecto

4.1.4. Distribución de los datos.

Como se mencionó anteriormente, los videos se categorizaron de forma manual y se utilizó la siguiente nomenclatura:

WWWPXXYYZZ

Donde:

WWW representa la si la grabacion se realizó en la primera o en la segunda etapa. Si se realizó en la primera etapa se coloca **PRE** y si se realizó en la segunda etapa se coloca **POS**.

PXX representa la etiqueta del paciente, las cuales van desde **P00**, que representa al primer paciente y continua de forma consecutiva hasta **P10**, que representa al onceavo paciente.

YY representa la categoría a la que corresponden los ejercicios realizados, las cuales son:

- Columna Cervical representada con **CC**
- Columba Lumbar representada con **CL**
- Ejercicios Combinados representados con **EC**
- Movilidad de Hombro representada con **MH**

Finalmente, **ZZ** representa el tipo de ejercicio realizado en dicha categoría. Mientras Columna Cervical, Columna Lumbar y Movilidad de Hombro cuentan con dos tipos de ejercicio solo se tiene numeración **01** y **02**, mientras que los Ejercicios Combinados son seis, por lo que la numeración va desde **01** hasta **06**. Dichos ejercicios se explican a detalle en la siguiente sección.

Por ejemplo, para una grabación realizada en la primer etapa, del paciente **00** realizando el primer ejercicio de Columna Cervical la nomenclatura sería la siguiente: **PREP00CC01**

4.2. Terapia física

Se diseñó una terapia física por médicos especialistas en rehabilitación con el objetivo de evaluar ángulos específicos relacionados con la preservación del movimiento articular y la coordinación en motricidad gruesa, y se consideraron 4 categorías de ejercicios con el objetivo de cubrir segmentos corporales :

- Columna Cervical
- Columba Lumbar
- Ejercicios Combinados (Utilizados para espalda, pelvis y extremidades superiores)
- Movilidad de Hombro

. Estos ángulos fueron cuantificados mediante el procesamiento de las grabaciones realizadas utilizando el software Mediapipe identificando 10 puntos clave dentro de las 4 categorías (nariz, boca, hombros, cadera, codos y muñecas).

4.2.1. Parámetros asociados

Se determinaron tres parámetros (rotación, frecuencia y amplitud) para medir el movimiento que realizaron los pacientes mientras realizaban la terapia física con el objetivo de analizar los efectos de la terapia y comparar estos parámetros entre la primera y la segunda etapa. Los parámetros se definieron de la siguiente manera tomando como referencia la cara, hombros, codos, pelvis y espalda:

- La rotación de la cabeza se midió como el cambio en el ángulo de un plano horizontal imaginario formado por los puntos clave detectados en la nariz. Los valores máximos negativos de rotación se calcularon con la inclinación máxima hacia la izquierda, y los valores máximos positivos de rotación se calcularon con la máxima inclinación hacia la derecha.
- La rotación de los hombros se midió como el cambio en el ángulo de un plano horizontal imaginario formado por los puntos clave detectados en el hombro derecho e izquierdo.
- La rotación de los brazos se midió como el cambio en el ángulo formado por la flexión y extensión de los hombros utilizando los puntos clave detectados en la pelvis, hombros y codos.
- La rotación de los antebrazos se midió como el cambio en el ángulo formado por la flexión y extensión de los codos utilizando los puntos clave detectados en las muñecas, codos y hombros.
- La rotación de la espalda se midió como el cambio en el ángulo de un plano perpendicular imaginario que comienza en el punto medio entre los trocánteres mayores y termina en el punto medio entre el hombro derecho e izquierdo.
- La rotación de la pelvis se midió como el cambio en el ángulo de un plano horizontal imaginario formado por los puntos clave detectados en el trocánter derecho e izquierdo.
- En todos los casos la frecuencia se definió como el número de ciclos por minuto; calculados a partir de las señales obtenidas de la rotación.

- En todos los casos, la amplitud fue la diferencia en valor absoluto entre valores máximos y mínimos consecutivos de las señales obtenidas de la rotación.

4.2.2. Ejercicios realizados

En la tabla 4.1 se describen las áreas específicas evaluadas con los tipos de ejercicios realizados durante la terapia.

Área	Etiqueta	Ejercicio
Columna Cervical	CC01	-Inclinación lateral izquierda únicamente de la cabeza
	CC02	-Inclinación lateral derecha únicamente de la cabeza
Columna Lumbar	CL01	-Manos en la cadera y flexión lateral del tronco
	LS02	-Extensión del brazo contralateral a la flexión del tronco sobre la cabeza
Movilidad de Hombro	MH01	-Elevación de la mano izquierda por encima de la cabeza
	MH02	-Elevación de la mano derecha por encima de la cabeza
Ejercicios Combinados	EC02	-Mano al hombro contralateral
	EC04	-Mano al hombro y codo contralateral
	EC05	-Elevación de un brazo y separación del otro brazo, ambos por encima de la cabeza
	EC06	-Manos cruzadas frente al cuello tocando el hombro contralateral

Tabla 4.1: Relación entre el ejercicio realizado y el área específica evaluada.

4.2.3. Preparación de los marcadores

El software Mediapipe tiene la capacidad de detectar la presencia de un cuerpo humano así como la de realizar un mapeo completo utilizando hasta 33 puntos clave los cuales representan ubicaciones en el cuerpo humano, la mayoría encontrándose en articulaciones como hombros, codos, muñecas, cadera, rodillas y tobillos. La siguiente imagen muestra la distribución completa de los puntos clave y su ubicación aproximada:

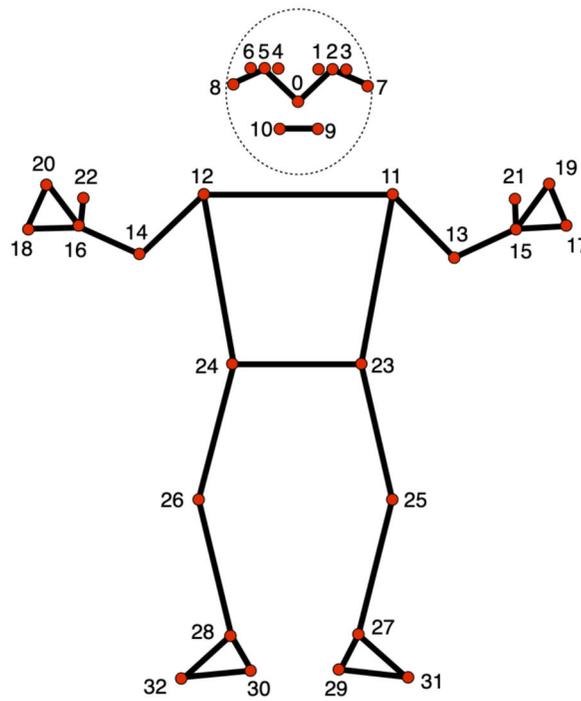


Figura 4.2: Puntos clave y su ubicación en el cuerpo [53]

0 - Nariz	11 - Hombro izquierdo	22 - Pulgar derecho
1 - Parte interna del ojo izquierdo	12 - Hombro derecho	23 - Cadera izquierda
2 - Ojo izquierdo	13 - Codo izquierdo	24 - Cadera derecha
3 - Parte externa del ojo izquierdo	14 - Codo derecho	25 - Rodilla izquierda
4 - Parte interna del ojo derecho	15 - Muñeca izquierda	26 - Rodilla derecha
5 - Ojo derecho	16 - Muñeca derecha	27 - Tobillo izquierdo
6 - Parte externa del ojo derecho	17 - Meñique izquierdo	28 - Tobillo derecho
7 - Oído izquierdo	18 - Meñique derecho	29 - Talón izquierdo
8 - Oído derecho	19 - Índice izquierdo	30 - Talón derecho
9 - Extremo izquierdo de la boca	20 - Índice derecho	31 - Índice de pie izquierdo
10 - Oído externo de la boca	21 - Pulgar izquierdo	32 - Índice de pie derecho

Tabla 4.2: Puntos clave y su ubicación en el cuerpo

Como se mencionó anteriormente, los ejercicios se clasificaron en segmentos corporales clave, por lo que no se utilizaron cada uno los 33 puntos para el análisis del movimiento. La relación entre el área específica evaluada y los puntos clave utilizados es la siguiente:

Área	Etiqueta	Puntos clave utilizados
Columna Cervical	CC01	9, 10, 11, 12
	CC02	
Columna Lumbar	CL01	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 23, 24
	CL02	
Movilidad de Hombro	MH01	11, 12, 13, 14, 23, 24
	MH02	
Ejercicios Combinados	EC02	11, 12, 13, 14, 15, 16, 23, 24
	EC04	
	EC05	
	EC06	

Tabla 4.3: Relación entre la terapia realizada y puntos clave utilizados.

4.3. Análisis de los videos

4.3.1. Segmentos corporales

Para llevar a cabo la terapia de rehabilitación, a menudo se utilizan los segmentos corporales que pertenecen al esqueleto apendicular. Estos segmentos permiten el movimiento traslacional de los miembros corporales a través de movimientos cíclicos repetidos, como se describe en la sección correspondiente. Se analizaron las grabaciones de los pacientes con enfermedad de Parkinson utilizando el algoritmo MediaPipe, y se calcularon ángulos a partir de puntos clave detectados para inferir la rotación, velocidad y amplitud de movimiento de la cabeza, los hombros, los codos, la espalda y la pelvis. En las tablas 4.4, 4.5 y 4.6 se muestra una representación esquemática de los ángulos calculados mientras se realiza la terapia especificada.

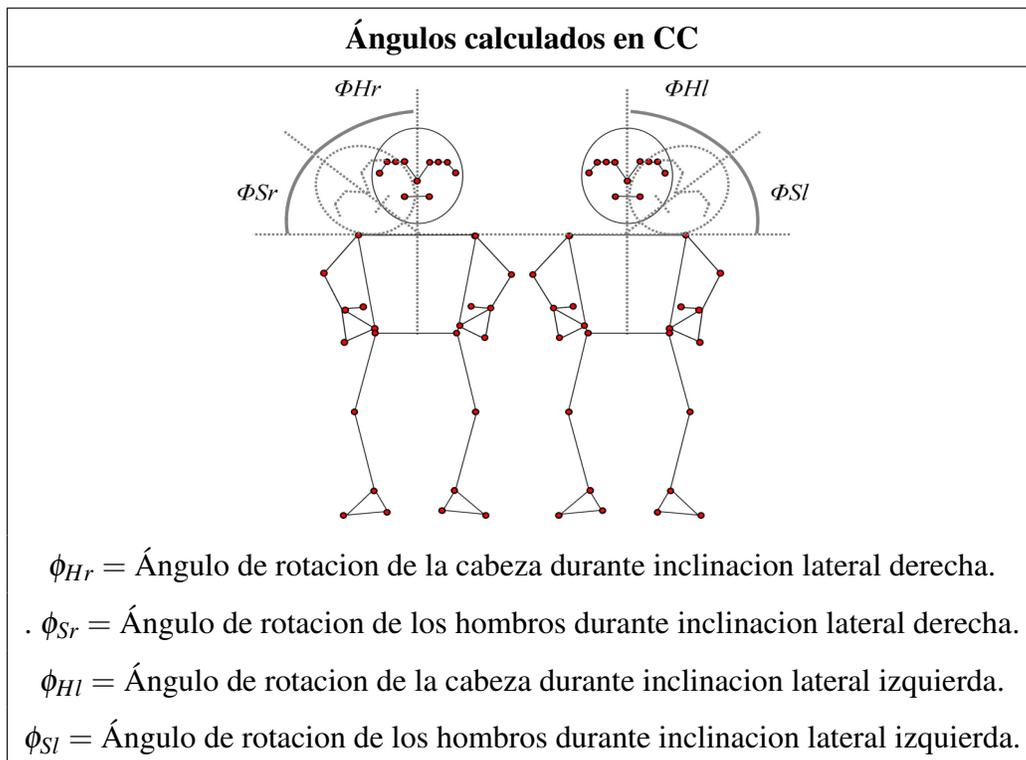


Tabla 4.4: Identificación y nomenclatura de los ángulos utilizados durante el monitoreo continuo en CC.

4.3.2. Algoritmo para el análisis

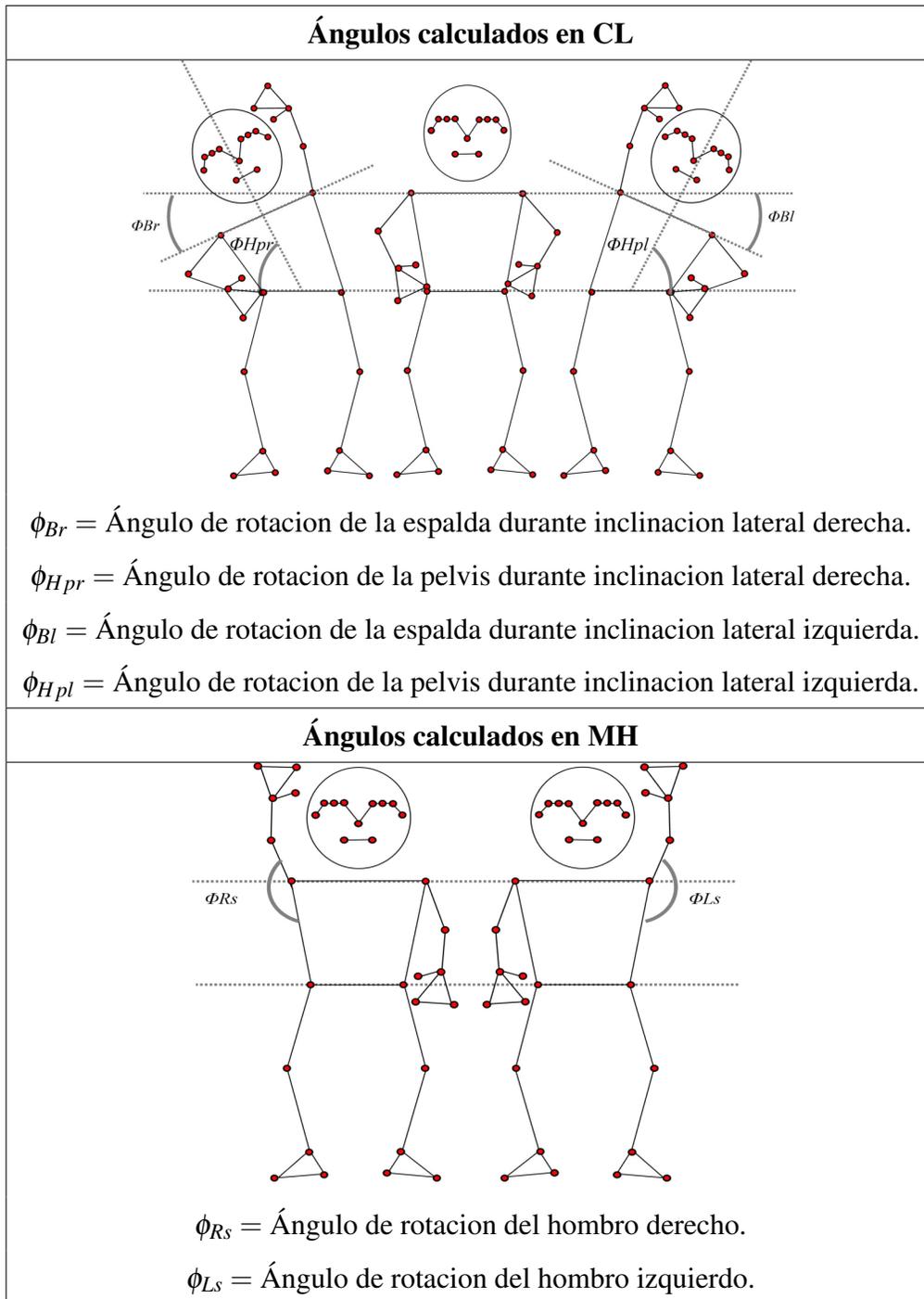


Tabla 4.5: Identificación y nomenclatura de los ángulos utilizados durante el monitoreo continuo en CL y MH.

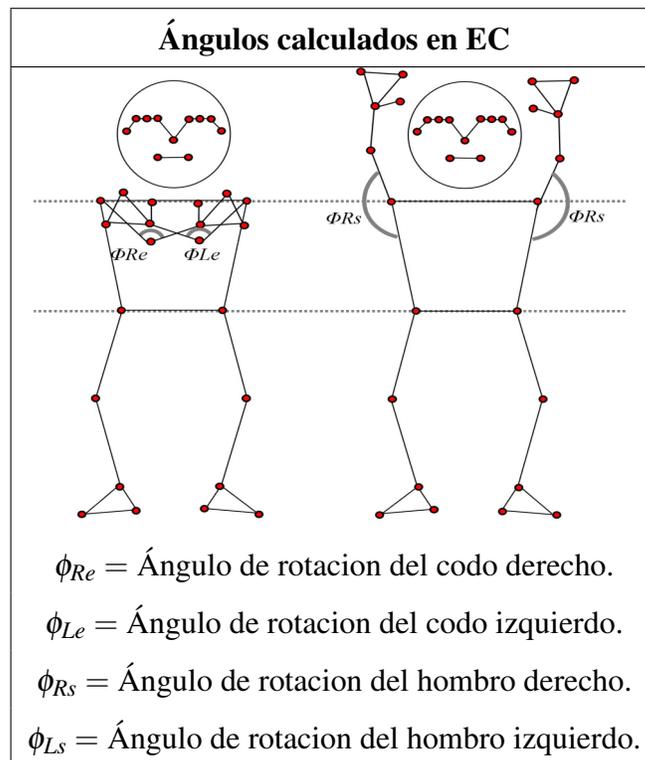


Tabla 4.6: Identificación y nomenclatura de los ángulos utilizados durante el monitoreo continuo en EC.

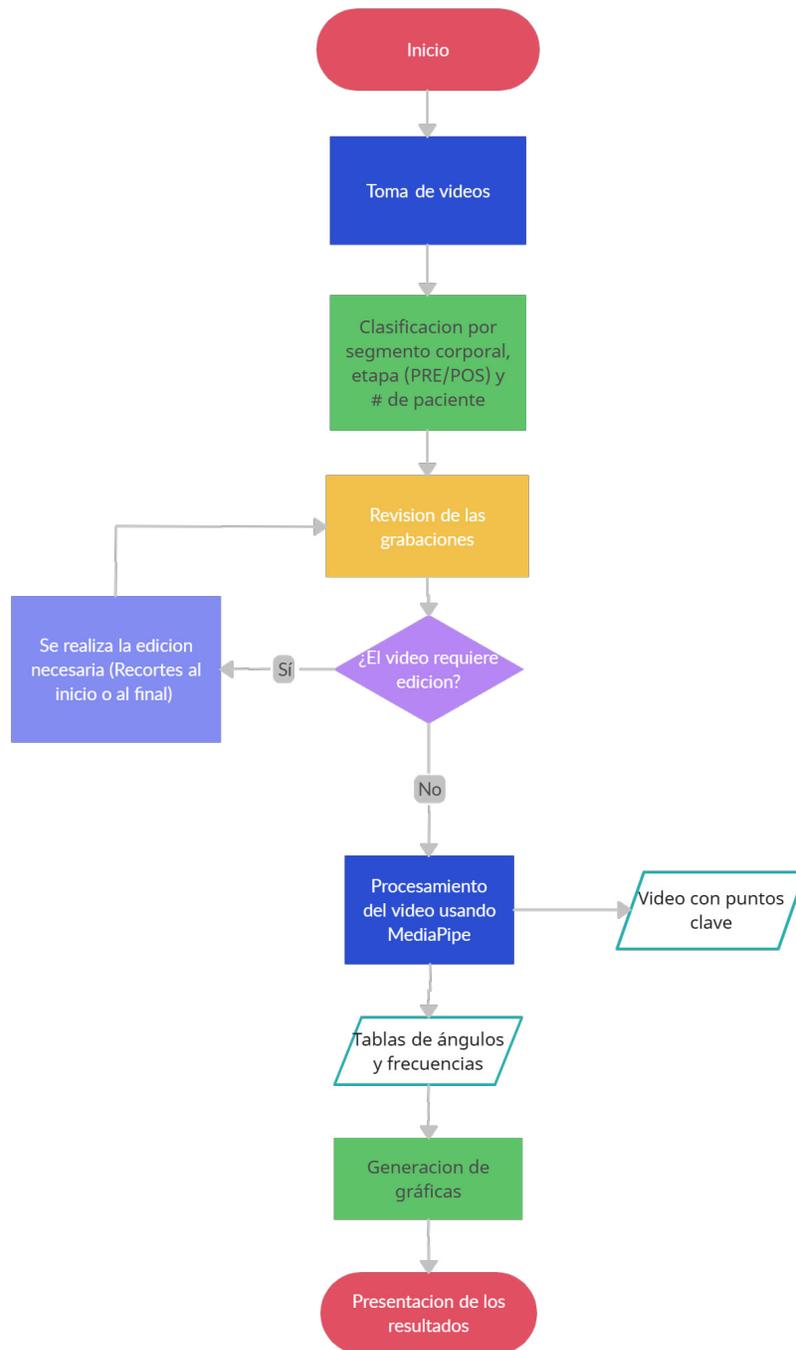


Figura 4.3: Diagrama de flujo que representa el algoritmo para el análisis de los videos obtenidos

Capítulo 5

Resultados y discusiones

Para comenzar este capítulo y poder realizar una descripción de los datos utilizando las gráficas es importante mencionar ciertas decisiones que se tomaron para poder presentar los resultados de la forma más adecuada.

- El paciente P04 fue descartado totalmente tanto en etapa PRE como etapa POS debido a que no asistió a ninguna de las sesiones de grabación.
- Los pacientes P00 y P08 fueron descartados de la etapa POS debido a que no asistieron a las sesiones de grabación.
- El paciente P02 fue descartado de la etapa POS en los ejercicios de CC debido a que al momento de realizar las grabaciones se encontraba utilizando cubrebocas, lo que provocó que el software no pudiera identificar los puntos clave en el rostro y fuera imposible realizar un análisis adecuado.
- Al inicio de cada sección corporal se incluirán capturas de los videos obtenidos al procesarlos para una mejor visualización y entendimiento de los ejercicios y del postprocesamiento.
- En la primera gráfica, se muestran los ángulos de rotación obtenidos durante los ejercicios. La segunda gráfica ilustra la amplitud de estos ángulos, derivada de la primera. Por último,

la tercera gráfica representa la frecuencia con la que se llevaron a cabo los movimientos a lo largo de la sesión.

- Cada ejercicio cuenta con una o dos tercias de gráficas. Cada tercia representa un área de interés para el análisis de dicho ejercicio.

5.1. Cervicales

A continuación se muestran imágenes obtenidas del P01 al realizar los ejercicios de CC en etapa PRE una vez procesado el video obtenido en dicha sesión.



Figura 5.1: Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de CC donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente

En la figura 5.1 se puede observar en las 3 imágenes el seguimiento corporal que realiza el algoritmo utilizando los puntos clave mencionados anteriormente. Se puede observar la línea horizontal que conecta los puntos clave del hombro izquierdo y el hombro derecho, y los puntos de la boca, ojos y nariz.

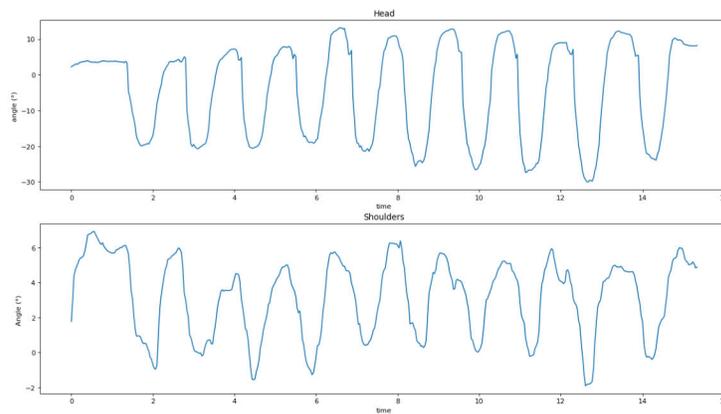


Figura 5.2: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio CC01

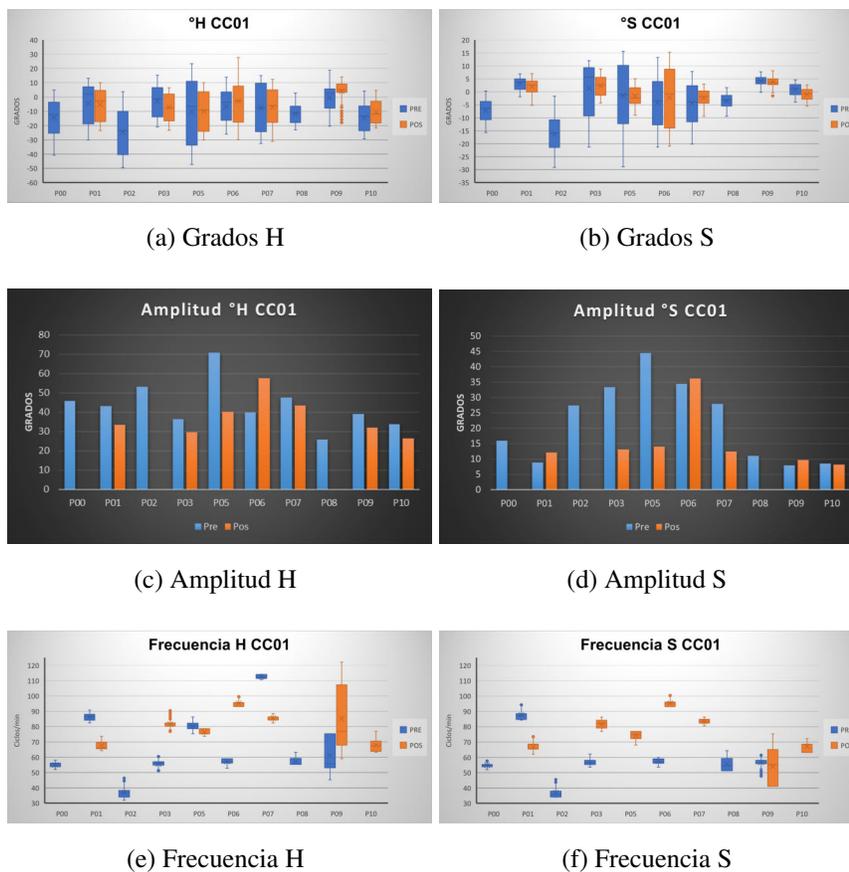


Figura 5.3: Comparacion de los parametros obtenidos de la cabeza y los hombros durante el ejercicio 01 de Columna Cervical en etapa PRE y POS

Para el ejercicio CC01 se puede notar que, en la mayoría de los pacientes, los grados y la amplitud, se mantienen de forma similares tanto en etapa PRE como en etapa POS, siendo el paciente P05 quien tiene una mayor variabilidad en la amplitud, mostrando un mejor desempeño en la etapa PRE, siendo que su desempeño bajó un 40% en la etapa POS. Cabe resaltar que el paciente P06 aumentó su amplitud en un 50% en la etapa POS con respecto a la etapa PRE. Observando la tabla de frecuencia, se puede observar que la mayoría de los pacientes tuvo cambios considerables entre la etapa PRE y POS, siendo los pacientes P03, P06 y P09 quienes obtuvieron una mayor frecuencia en la etapa POS, mientras que los pacientes P01, P05 y P07 obtuvieron una menor frecuencia, siendo el segundo quien tuvo una menor variación. En general los pacientes mantuvieron una velocidad constante mientras realizaban el ejercicio tanto en etapa PRE como en etapa POS, siendo el P09 el único que tuvo una variación considerable mientras ejecutaba la terapia observándose que en la etapa POS fue cuando esta variación fue mayor.

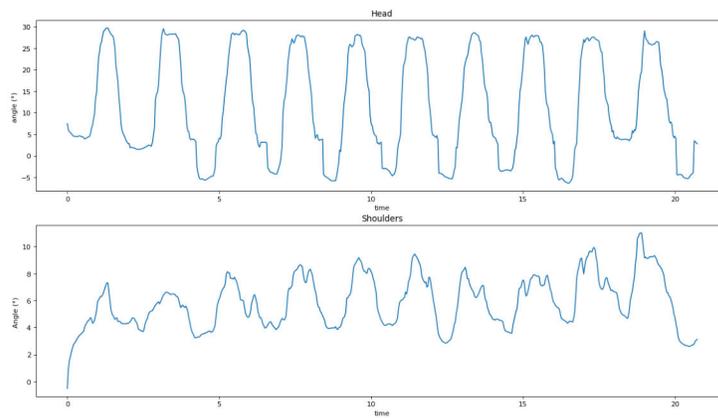


Figura 5.4: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio CC02

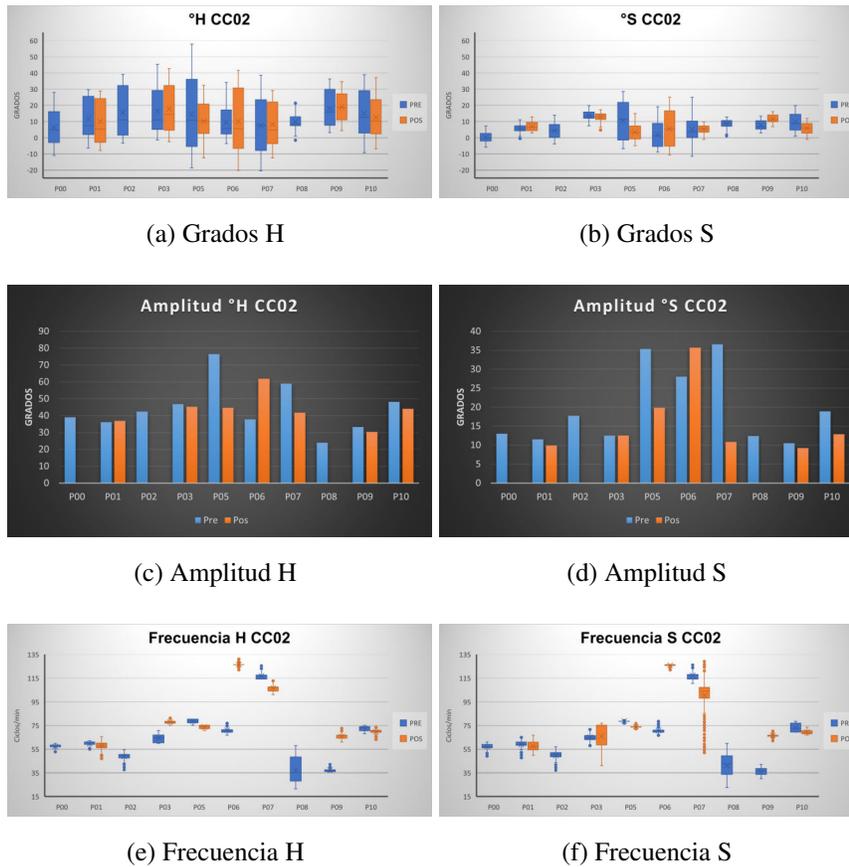


Figura 5.5: Comparacion de los ángulos de inclinacion de la cabeza obtenidos durante el ejercicio 02 de Columna Cervical en etapa PRE y POS

Para este ejercicio, en el caso de los grados y la amplitud, se puede observar un comportamiento muy parecido al visto en el ejercicio CC01, manteniéndose muy similar en la mayoría de los casos, siendo el paciente P05 quien obtuvo una disminución bastante notable y el P06 quien nuevamente tuvo un aumento considerable. Con respecto a la frecuencia se puede observar que existe un comportamiento más constante entre la etapa PRE y la etapa POS, siendo el paciente P06 y el P09 quienes registraron un mayor cambio entre una etapa y otra, ambos obteniendo un aumento en este parámetro.

5.2. Lumbares

A continuación se muestran imágenes obtenidas del P01 al realizar los ejercicios de CL01 en etapa PRE una vez procesado el video obtenido en dicha sesión

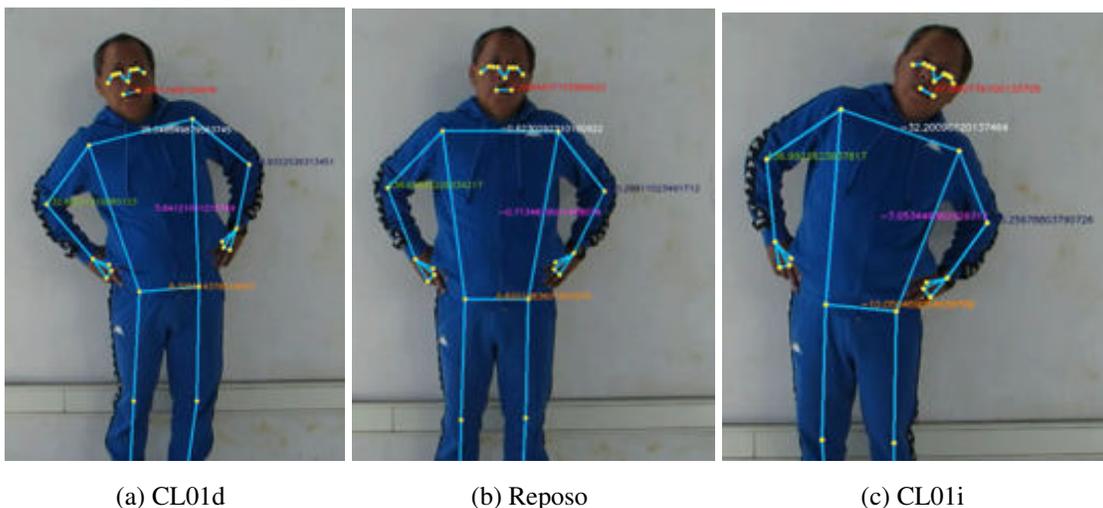


Figura 5.6: Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de CL donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente

En la figura 5.6. se puede observar al paciente realizar el ejercicio de CL01 realizando la inclinación hacia ambos lados mientras mantiene sus manos colocadas en la cadera. Es importante resaltar que se pueden observar los puntos clave que identifica MediaPipe colocados sobre el paciente, así como números que indican el ángulo de inclinación en dichos puntos.

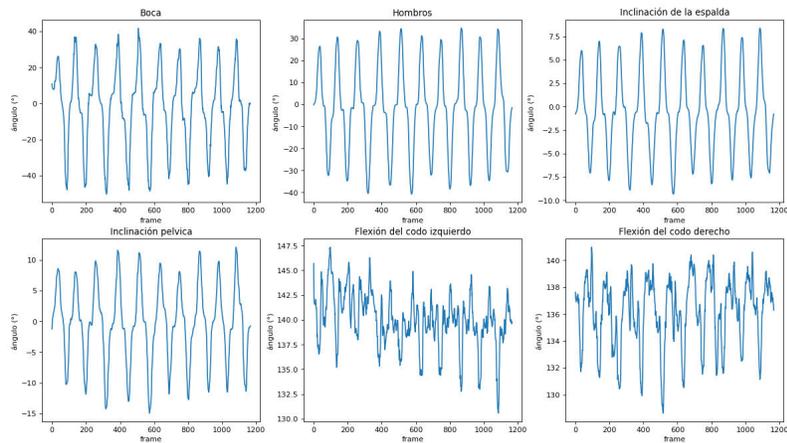


Figura 5.7: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio CL01

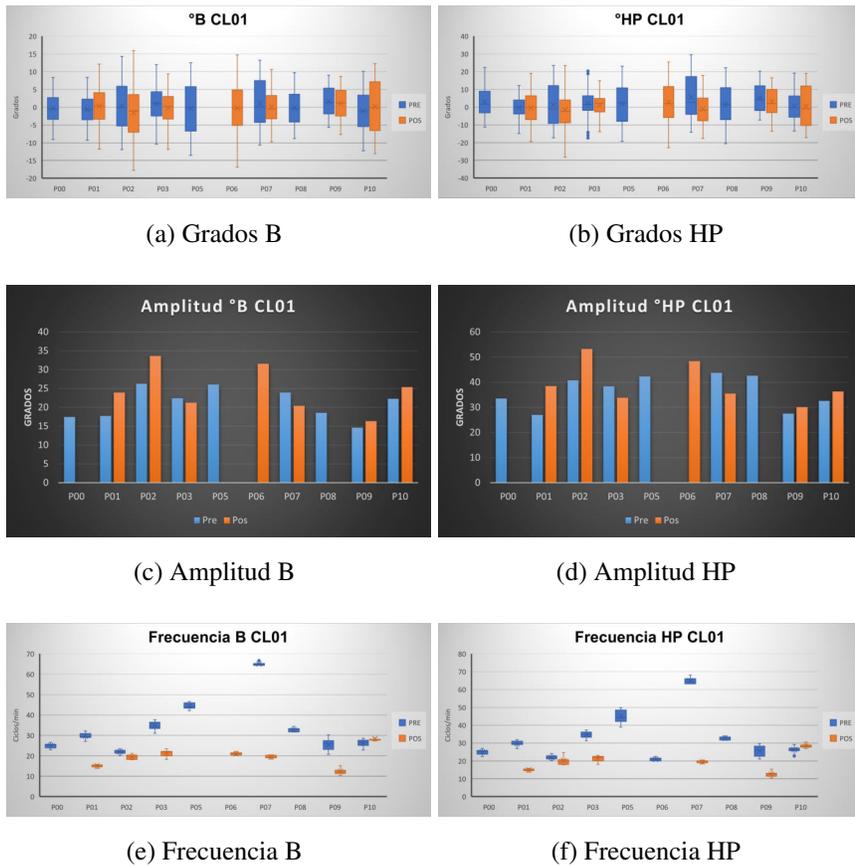


Figura 5.8: Comparacion de los ángulos de inclinacion de la espalda y cadera obtenidos durante el ejercicio 01 de Columna Lumbar en etapa PRE y POS

En estas gráficas podemos observar que tanto el paciente P01, P02, P09 y P10 tienen un aumento en la amplitud de los ángulos de rotación de la espalda al realizar el ejercicio en etapa POS con respecto a la etapa PRE, teniendo un aumento del 30 % aproximadamente los pacientes P01 y P02, mientras que los pacientes P09 y P10 un aumento aproximado del 10%. En cuestión de las frecuencias, se puede observar que en ambas etapas se mantuvo constante para todos los pacientes mientras realizaban el ejercicio, sin embargo, en la mayoría de los casos fue durante la etapa PRE donde su frecuencia fue mayor, siendo los pacientes P02 y P10 quienes mantuvieron frecuencias similares en ambas etapas.

A continuación se muestran imágenes obtenidas del P01 al realizar los ejercicios de CL02 en etapa PRE una vez procesado el video obtenido en dicha sesión.

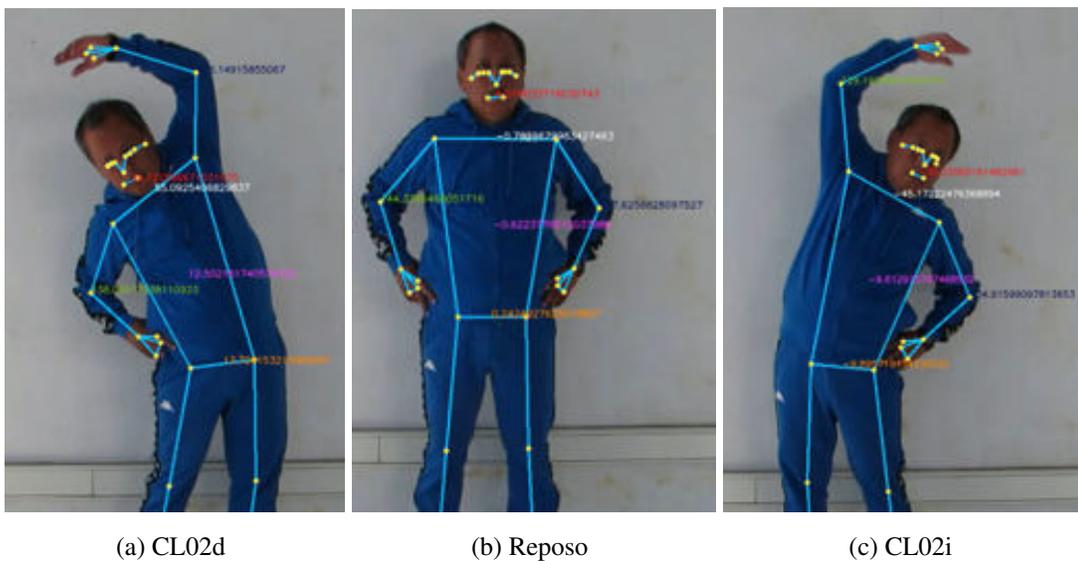


Figura 5.9: Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de CL02 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente

En la figura 5.9 se puede observar al paciente realizando el ejercicio de CL02 que es muy similar al ejercicio CL01 con la característica de que ahora se levanta el brazo contralateral al lado que se está inclinando por encima de la cabeza.

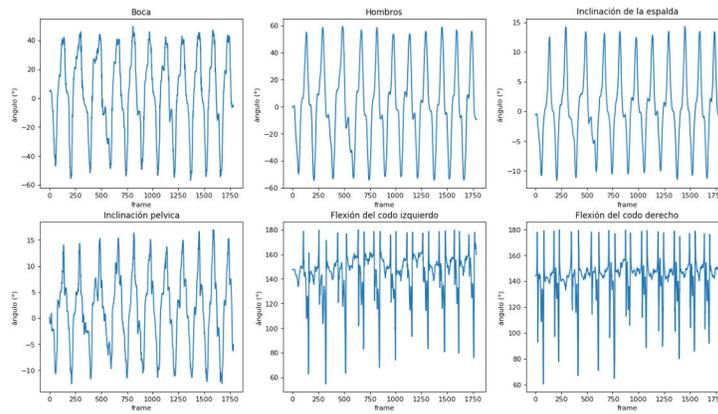


Figura 5.10: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio CL02

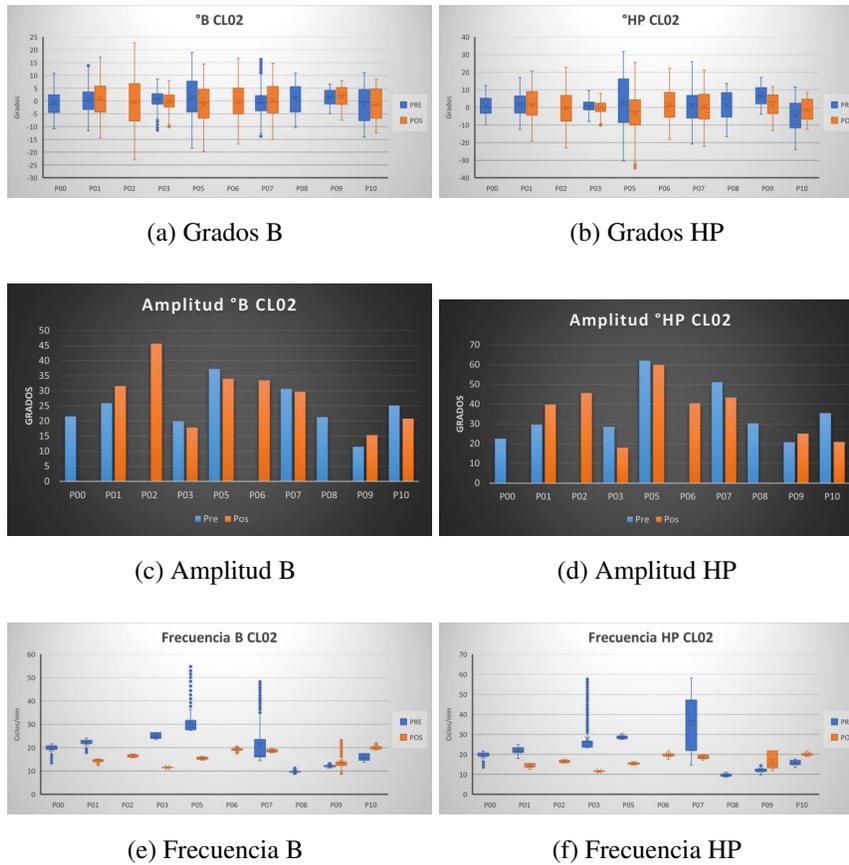


Figura 5.11: Comparacion de los ángulos de inclinacion de la espalda y la cadera obtenidos durante el ejercicio 02 de Columna Lumbar en etapa PRE y POS

Durante este ejercicio podemos observar que en la mayoría de los pacientes, la amplitud de los ángulos obtenidos fue menor en la etapa POS, únicamente con la excepción de los pacientes P01 y P09, quienes si obtuvieron un aumento entre el 20% y 30%. En cuestión de la frecuencia, los pacientes P03 y P07 fueron quienes tuvieron una mayor variabilidad en este parametro durante la etapa PRE, aspecto que se corrigió en la etapa POS, donde se puede observar que mantienen una frecuencia constante.

5.3. Extremidades superiores

A continuación se muestran imágenes obtenidas del P01 al realizar los ejercicios de MH en etapa PRE una vez procesado el video obtenido en dicha sesión.

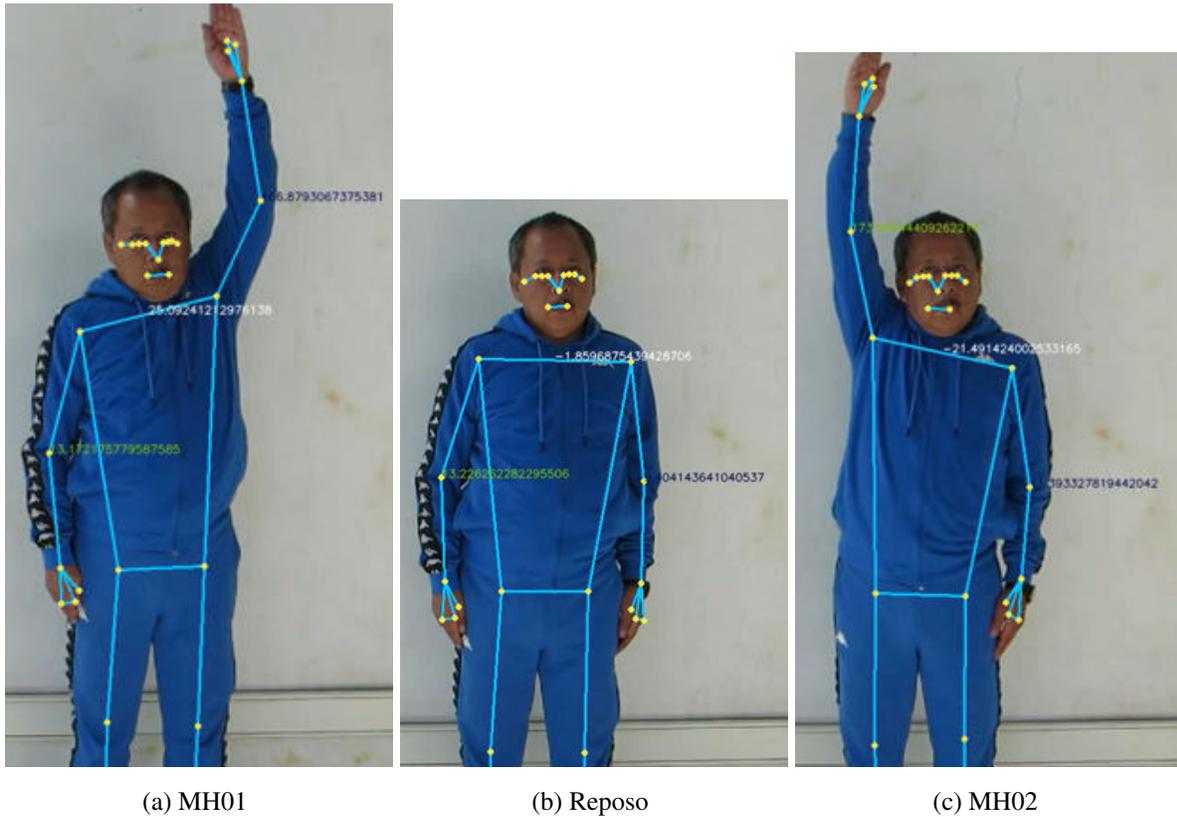


Figura 5.12: Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de MH donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente

En la figura 5.15 se puede observar en las 3 imágenes el seguimiento corporal que realiza el algoritmo utilizando 3 puntos clave, mismos que muestran el ángulo formado entre estos mientras se realiza el ejercicio. Se pueden observar los puntos clave que conectan la cadera, el hombro y el codo del paciente.

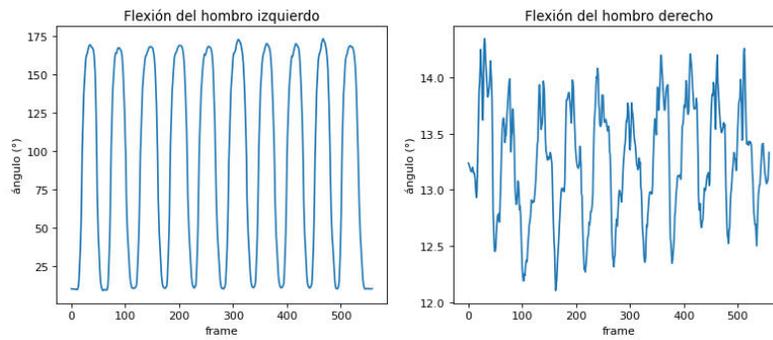
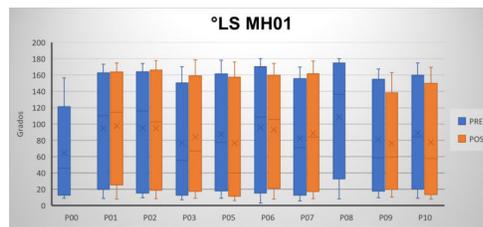
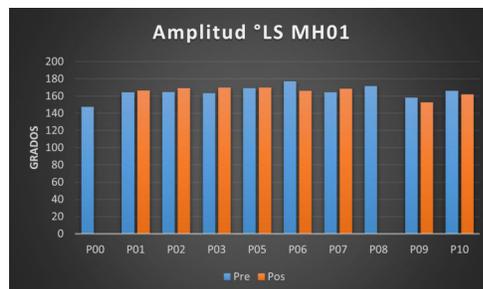


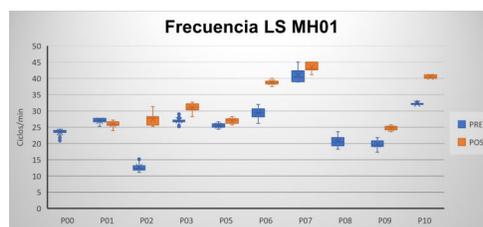
Figura 5.13: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio MH01



(a) Grados



(b) Amplitud



(c) Frecuencia

Figura 5.14: Comparacion de los ángulos de inclinacion del hombro izquierdo obtenidos durante el ejercicio 01 de Movilidad de Hombro en etapa PRE y POS

En el ejercicio MH01 los pacientes mostraron un comportamiento similar durante las etapas PRE y POS, logrando formar prácticamente los mismos ángulos en ambas etapas. El cambio entre estas se observa en la frecuencia con la que realizan el ejercicio en cada etapa. Quienes presentan un aumento notable en este parámetro son los pacientes P02, P06 y P10, así mismo, los pacientes P03, P07 y P09 muestran aumento, sin embargo, este no es tan notable como los anteriores. Mientras que los pacientes P01 y P05 tienen frecuencias muy similares entre etapas.

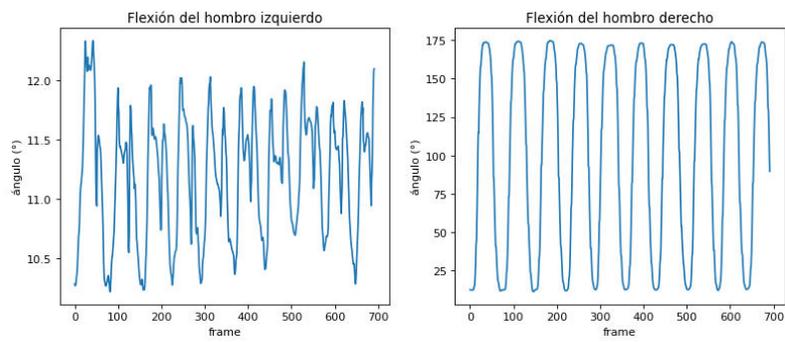
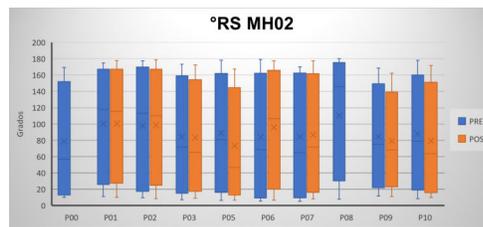
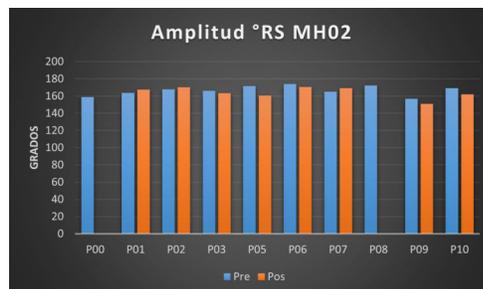


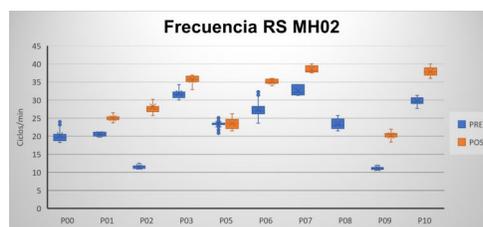
Figura 5.15: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio MH02



(a) Grados



(b) Amplitud



(c) Frecuencia

Figura 5.16: Comparacion de los ángulos de inclinación del hombro derecho obtenidos durante el ejercicio 02 de Movilidad de Hombro en etapa PRE y POS

Similar al caso anterior, en el ejercicio MH02 los pacientes lograron realizar el ejercicio con amplitudes muy similares entre etapas, viendose las diferencias en la frecuencia en la que realizaban el ejercicio. Los pacientes P02, P06, P09 y P10 presentan los mayores aumentos en este parametro, siendo el paciente P02 quien tiene el aumento más notable, mientras que los pacientes P01, P03 y P07 tambien muestran un aumento, aunque es menor que los pacientes anteriores, siendo el paciente P05 el unico que mantuvo una frecuencia constante en ambas etapas.

A continuacion se muestran imagenes obtenidas del P01 al realizar los ejercicios de EC02 en etapa PRE una vez procesado el video obtenido en dicha sesión.

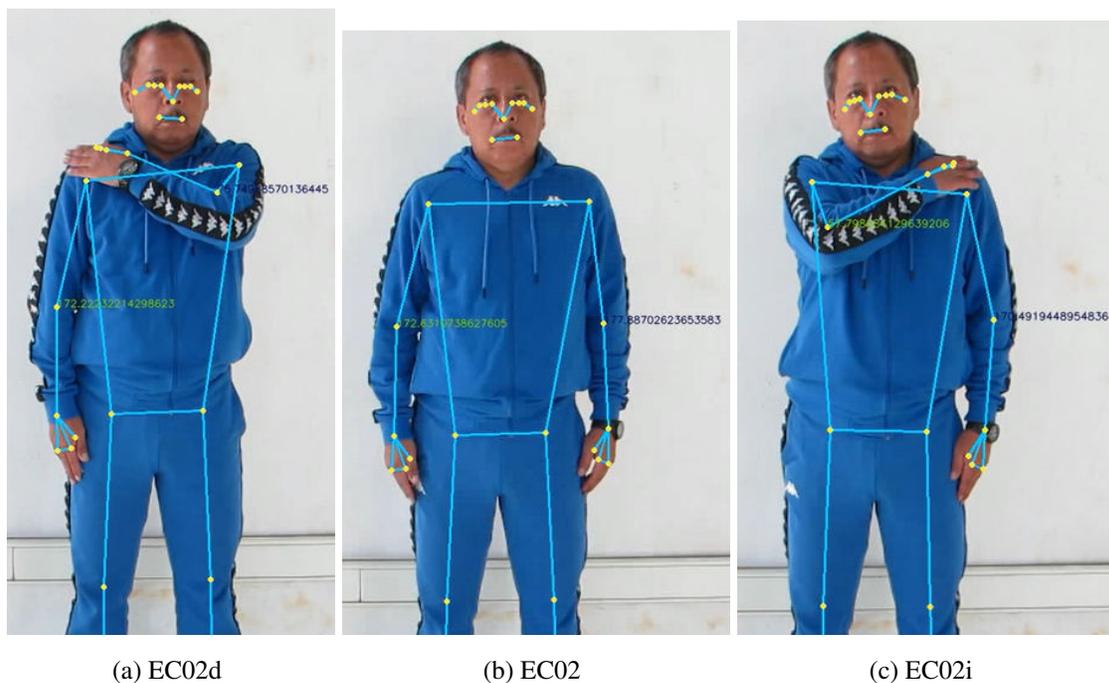


Figura 5.17: Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de EC02 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente

En la figura se puede observar en las 3 imagenes el seguimiento corporal que realiza el algoritmo utilizando 3 puntos clave, mismos que muestran el angulo formado entre estos mientras se realiza el ejercicio. Se pueden observar los puntos clave que conectan la cadera, el hombro y el codo del paciente.

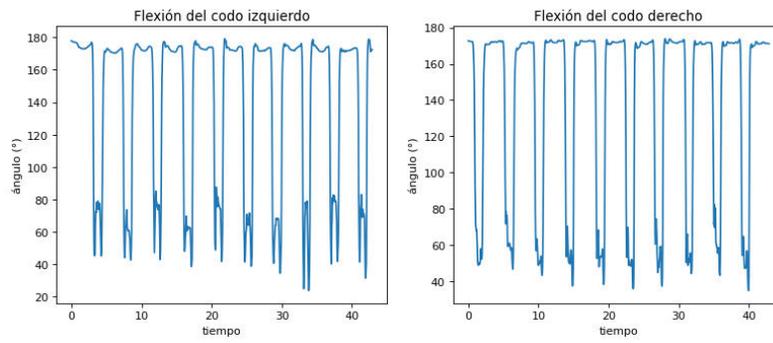


Figura 5.18: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio EC02

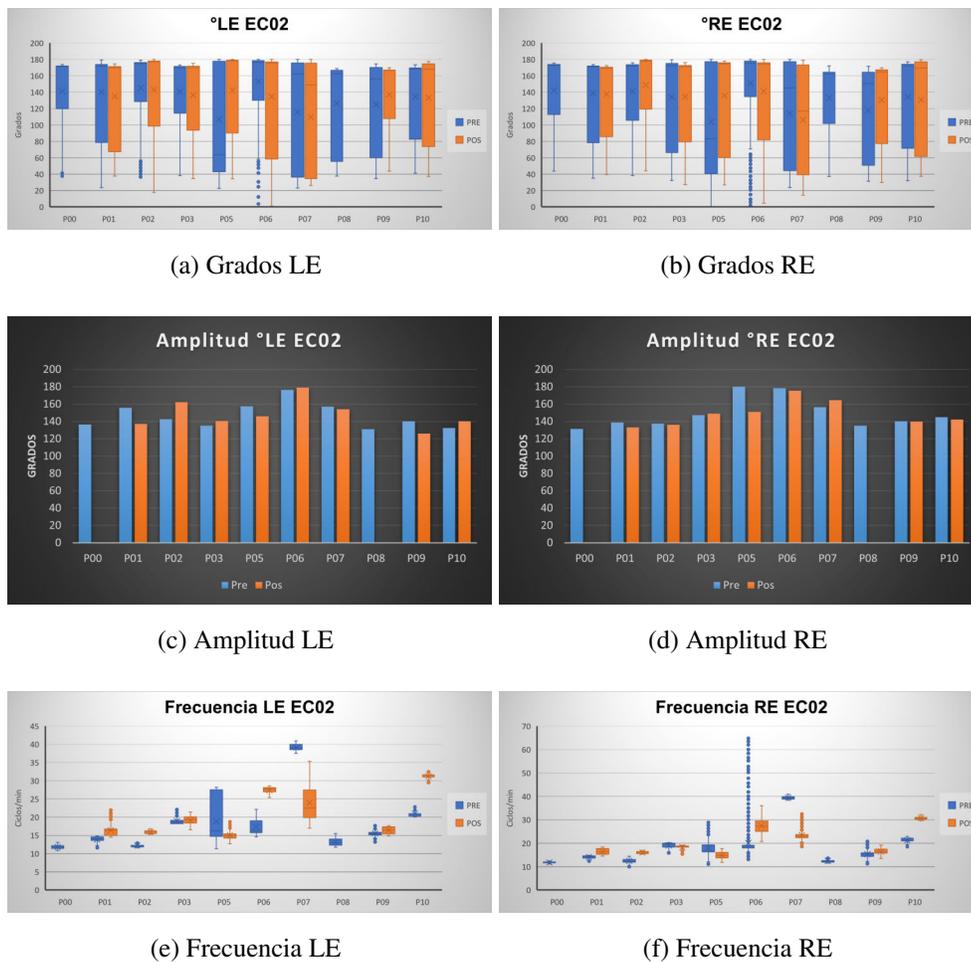


Figura 5.19: Comparacion de los ángulos de flexión de los codos obtenidos durante el ejercicio 02 de Ejercicios Combinados en etapa PRE y POS

Al observar las gráficas de ángulos, se puede notar que todas las cajas terminan aproximadamente en los 180° , esto debido a que los codos se mantienen extendidos la mayor parte del tiempo del ejercicio, como se puede observar en la imagen 5.18, por lo que podría considerarse como el ángulo de reposo, entonces la parte que nos interesa analizar es la parte baja de las gráficas. Podemos notar que en la mayoría de los casos las cajas y bigotes tienen límites muy similares entre etapas PRE y POS de cada paciente, siendo el paciente P06 quien parece tener un aumento en la flexión lograda por el codo, sin embargo, al observar la gráfica de la amplitud, podemos observar que sí mantuvo una flexión constante en ambas etapas. En cuestión de la frecuencia, los pacientes P01, P03 y P09 mantuvieron una frecuencia similar en ambas etapas, mientras que los pacientes P02, P06 y P10 realizaron los ejercicios con una frecuencia mayor en la etapa POS, siendo el paciente P07 quien obtuvo una disminución en la segunda etapa.

A continuación se muestran imágenes obtenidas del P01 al realizar los ejercicios de EC04 en etapa PRE una vez procesado el video obtenido en dicha sesión.



Figura 5.20: Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de EC04 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente

En la figura 5.15 se puede observar en las 3 imágenes el seguimiento corporal que realiza

el algoritmo utilizando 3 puntos clave, mismos que muestran el ángulo formado entre estos mientras se realiza el ejercicio. Se pueden observar los puntos clave que conectan la muñeca, el hombro y el codo del paciente.

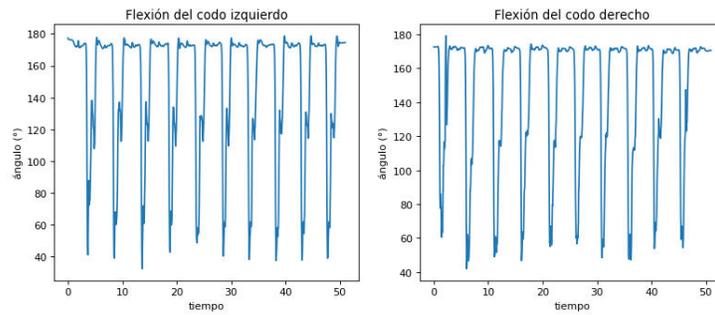


Figura 5.21: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio EC04

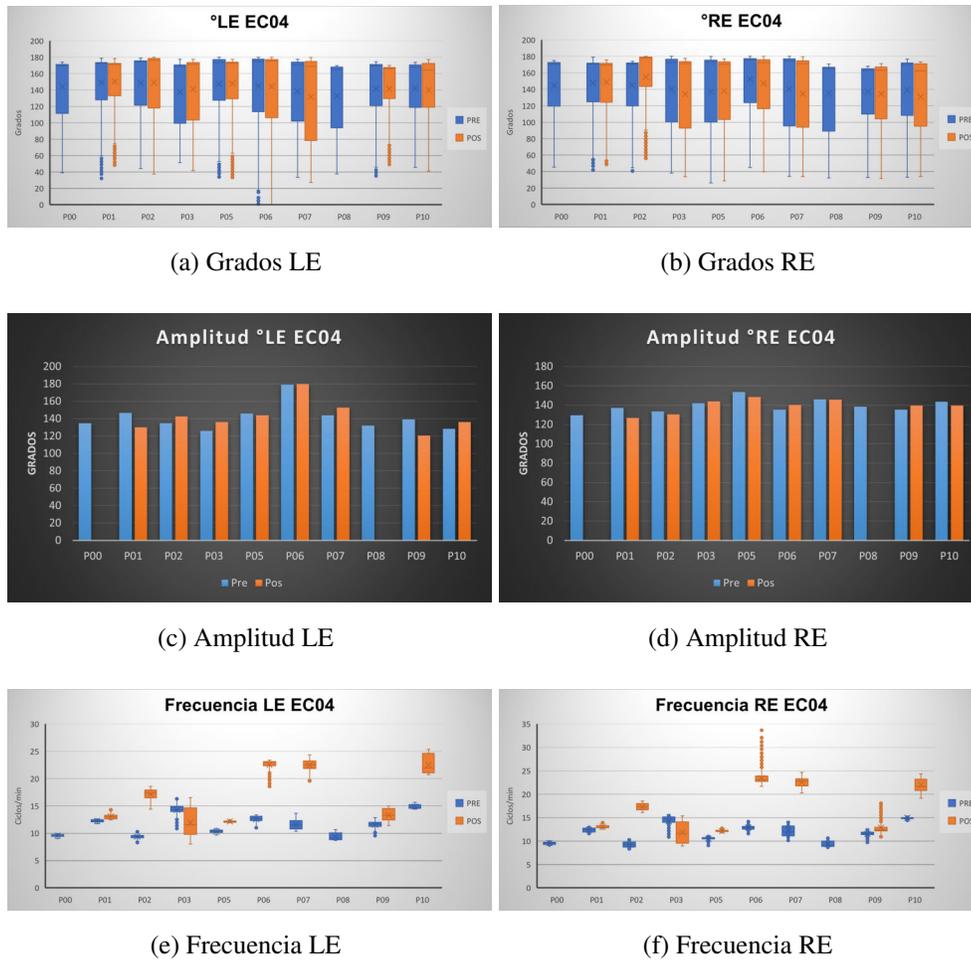


Figura 5.22: Comparacion de los ángulos de flexión de los codos obtenidos durante el ejercicio 04 de Ejercicios Combinados en etapa PRE y POS

Similar al ejercicio anterior, los pacientes lograron unas amplitudes muy similares en ambas etapas, tanto para el codo izquierdo como para el codo derecho, siendo el paciente P01 quien mostró un menor desempeño en este parámetro con ambos brazos. Observando las gráficas de la frecuencia, podemos notar que la mayoría de los pacientes obtuvieron un aumento en este parámetro en la etapa POS para ambos brazos, siendo el paciente P03 quien obtuvo una disminución en la etapa POS en ambos brazos.

A continuación se muestran imágenes obtenidas del P01 al realizar los ejercicios de EC05 en etapa PRE una vez procesado el video obtenido en dicha sesión.

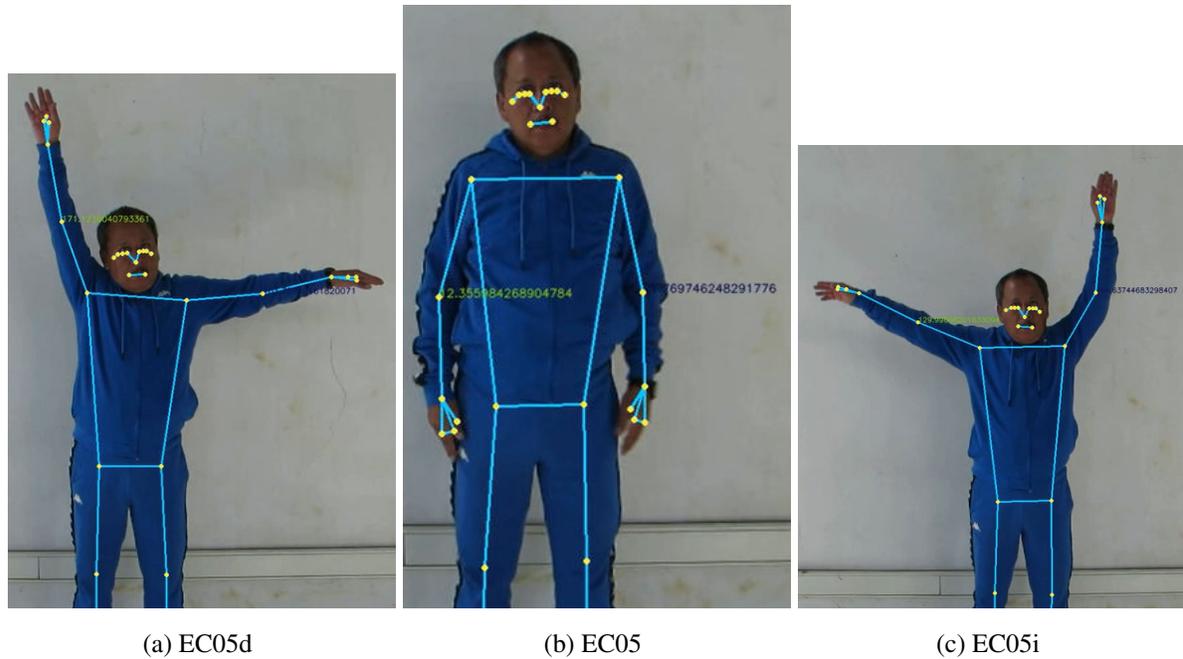


Figura 5.23: Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de EC05 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente

En la figura 5.23 se puede observar en las 3 imágenes el seguimiento corporal que realiza el algoritmo utilizando 3 puntos clave, mismos que muestran el ángulo formado entre estos mientras se realiza el ejercicio. Se pueden observar los puntos clave que conectan la cadera, el hombro y el codo del paciente.

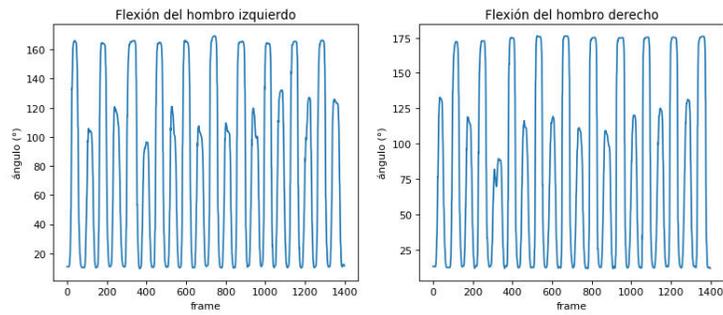


Figura 5.24: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio EC05

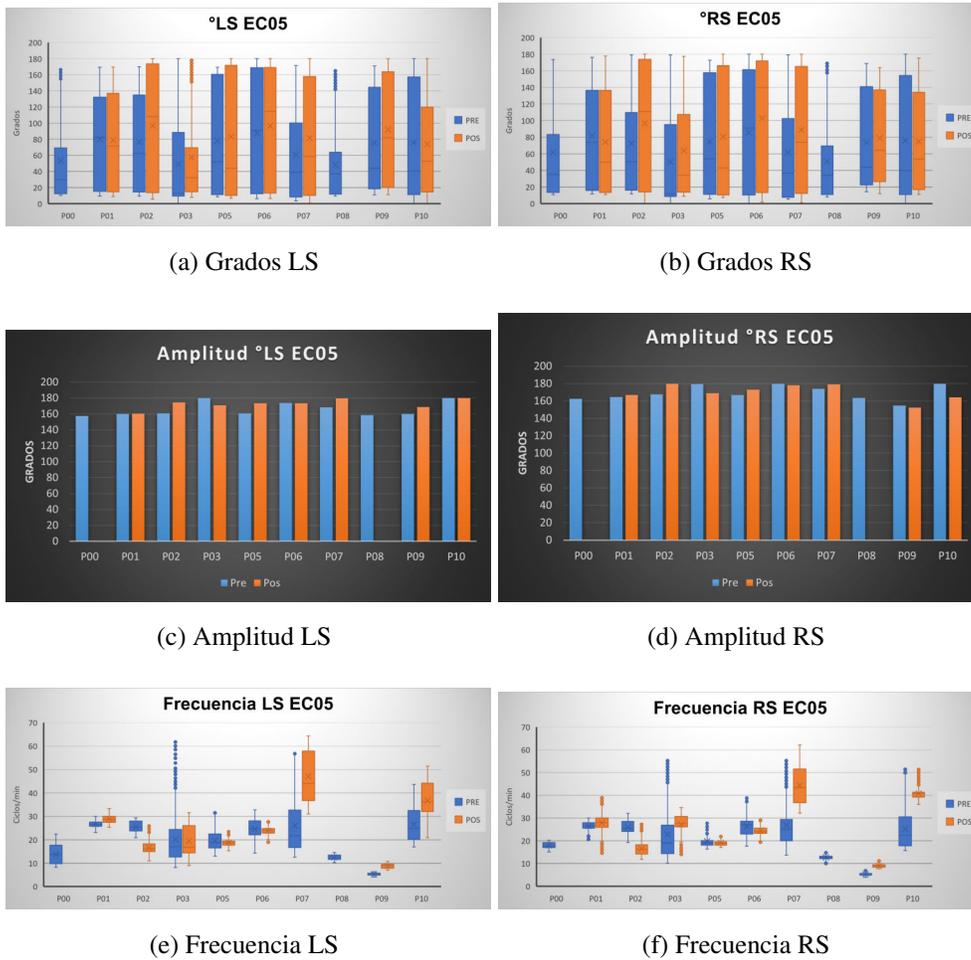


Figura 5.25: Comparacion de los ángulos de extension de los hombros obtenidos durante el ejercicio 05 de Ejercicios Combinados en etapa PRE y POS

Para este ejercicio nos fijaremos más en las gráficas de los datos obtenidos del paciente P01, los cuales se pueden observar en la figura 5.24. Si sobreponemos las gráficas del hombro izquierdo y del hombro derecho, se puede observar un comportamiento que pareciera invertido entre cada una, es decir, cuando hay una cresta *máxima* en una gráfica, en la otra hay una cresta *mínima*. Una cresta máxima representa el momento en el que el paciente tiene completamente levantado su brazo, mientras que una cresta mínima representa el momento en el que un paciente eleva su brazo y lo mantiene horizontal. En general podemos observar que las amplitudes de la mayoría de los pacientes se mantienen similares en etapa PRE como en etapa POS, sin embargo, las frecuencias son las que tienen la mayor variación. Podemos observar como los pacientes P03 y P10 son quienes tienen una variación mayor en este parámetro, lo que podría indicar cierta dificultad al realizar el ejercicio de forma coordinada, resultando en momentos donde lo realizan rápidamente y otros donde lo realizan más lentamente. Por otro lado, los pacientes P05 y P06 muestran una menor variación en este parámetro en la etapa POS, lo que significa una velocidad más constante durante todo el ejercicio. Finalmente, los pacientes P01 y P09 muestran un aumento de la velocidad a la que realizan el ejercicio con respecto a la etapa PRE.

A continuación se muestran imágenes obtenidas del P01 al realizar los ejercicios de EC06 en etapa PRE una vez procesado el video obtenido en dicha sesión.

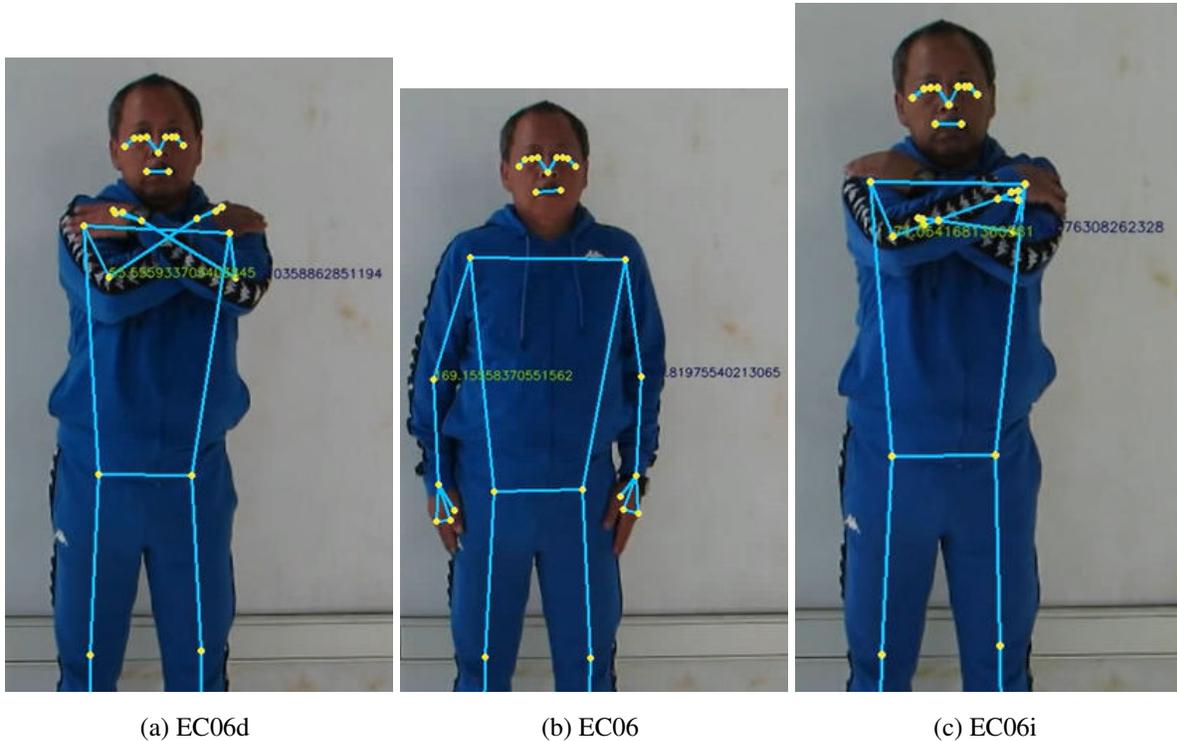


Figura 5.26: Capturas obtenidas del P01 en etapa PRE de EC06 donde se pueden observar los puntos clave detectados por el algoritmo colocados encima del paciente

En la figura 5.26 se puede observar en las 3 imágenes el seguimiento corporal que realiza el algoritmo utilizando 3 puntos clave, mismos que muestran el ángulo formado entre estos mientras se realiza el ejercicio. Se pueden observar los puntos clave que conectan la muñeca, el hombro y el codo del paciente.

A diferencia del ejercicio anterior, si sobreponemos las gráficas de los datos obtenidos, podemos notar que son gráficas que coinciden en la mayoría de sus puntos, ya que tanto el brazo izquierdo, como el derecho, se flexionan al mismo tiempo. Se puede observar que en cuestión de la amplitud de los movimientos no hubo un cambio drástico entre etapas PRE y POS de ambos brazos, habiendo cambios del 10% aproximadamente, siendo el paciente P01 quien obtuvo un aumento en ambos brazos con respecto a la etapa PRE, mientras que los pacientes P05, P07 y

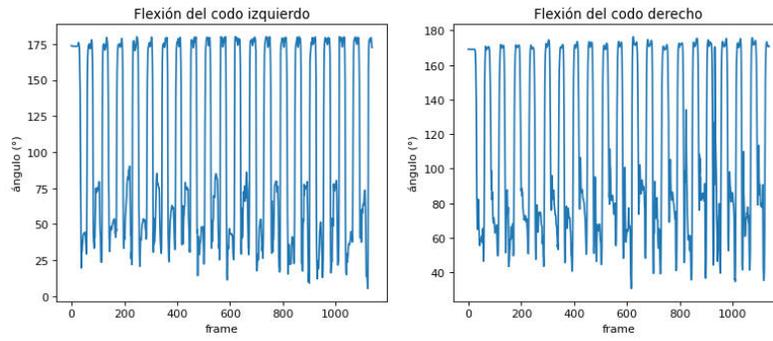


Figura 5.27: Datos obtenidos del P01 durante la etapa PRE del ejercicio EC06

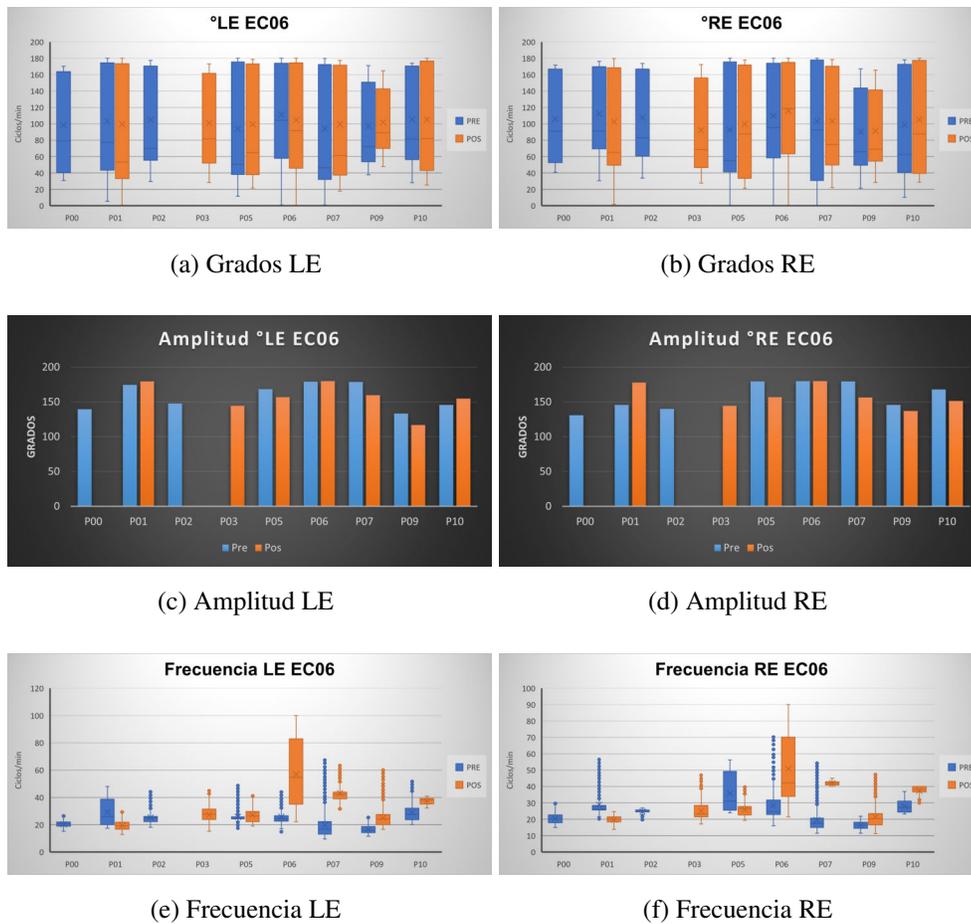


Figura 5.28: Comparación de los ángulos de flexión de los codos obtenidos durante el ejercicio 06 de Ejercicios Combinados en etapa PRE y POS

P09 tuvieron una disminucion en su etapa POS en ambos brazos. Con respecto a la frecuencia, se puede notar que el paciente P06 tuvo una mayor variacion en la velocidad a la que realizaba los ejercicios con respecto a la etapa PRE, mientras que los demas pacientes mantenian una frecuencia constante en ambas etapas, siendo los pacientes P07 y P10 quienes obtuvieron un aumento en este parametro en la etapa POS en ambos brazos.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo a futuro

6.1. Conclusiones

El presente trabajo complementa otros trabajos realizados anteriormente dedicados al estudio de la progresión de la enfermedad de parkinson y al uso de herramientas basadas en la captura de movimiento a través de videograbaciones, tales como los realizados por Rojas-Arce et al. [54], para poder obtener un análisis cuantitativo de los ejercicios realizados durante una terapia de rehabilitación y tener mediciones que permitan realizar una comparación entre el avance de la enfermedad reportado con las escalas mencionadas y los datos obtenidos con herramientas como MediaPipe. Sin embargo, es importante recordar que los tratamientos y el progreso de la enfermedad no es igual para todos los pacientes diagnosticados con EP, por lo que se requiere un análisis más personalizado que tome en cuenta más factores, como lo es la etapa de la EP en la que se encuentra el paciente, la frecuencia con la que recibe tratamiento farmacológico y de que tipo, así como la frecuencia con la que realiza terapia de rehabilitación. Finalmente, se puede concluir que es posible utilizar el software MediaPipe para realizar un análisis del movimiento por su capacidad de identificar puntos clave del cuerpo humano de forma precisa sin necesidad de equipo especializado, mientras existan las condiciones adecuadas de iluminación y calidad de grabación, así como por la información que es capaz de generar al identificar y señalar aquellos puntos clave para la cuantificación de los movimientos.

6.2. Trabajo a futuro

Una desventaja encontrada al realizar este trabajo, es la cantidad tan grande de datos que se obtienen al realizar el procesamiento de los videos, por lo que encontrar maneras de descartar aquella información que no es de interés resulta en una prioridad. El área de oportunidad es enorme, como se señaló al inicio de este trabajo, la capacidad para volverse una herramienta de telemedicina es notable al no necesitar de equipos especializados. Una de las mayores limitaciones sigue siendo la baja precision en contraste a métodos con equipos y hardware más sofisticado, sin embargo, el desarrollo de nuevos algoritmos puede ayudar a mejorar estos sistemas, lo que aumentaría su fiabilidad para finalmente poder lograr su implementación en telemedicina como métodos confiables para el complemento de diagnósticos y el seguimiento de terapias de rehabilitación.

-

Capítulo 7

Anexos

Anexo 1: Quantitation of Body Movement in a Motor Physical Therapy for Parkinson's Disease por el Dr. Rojas Arce, et al.

EAI Endorsed Transactions

on Pervasive Health and Technology

Research Article **EAI.EU**

Quantitation of Body Movement in a Motor Physical Therapy for Parkinson's Disease

Jorge L. Rojas-Arce¹, Jose A. Marmolejo-Saucedo² and Luis Jimenez-Angeles^{1,*}

¹Department of Biomedical Systems Engineering, Engineering Faculty, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Ciudad de Mexico, 04510, Mexico

²Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Av. Universidad 3000, Ciudad de Mexico, 04510, Mexico

Abstract

The present work shows the quantitation of body movement in a motor physical therapy for Parkinson's Disease (PD). In recent years, many activities of therapy were carried out remotely using common RGB cameras to capture the body movements. We analyze the body movements of 8 subjects with clinical diagnosis of PD, and compare them with a control group of 11 healthy volunteers, processing their respective RGB video recordings with a software that identifies 17 specific body keypoints while subjects perform two motor rehabilitation therapies (cervical and lumbar spine). All videos were analyzed by OpenPose algorithm and angles from keypoints detected were computed to infer the rotation, rate and amplitude of movement of head, shoulder, back and pelvis. The results show that OpenPose algorithm could be used in a home environment specially in follow-up and management of the motor rehabilitation therapy for Parkinson's disease.

Received on 04 May 2023; accepted on 28 August 2023; published on 25 September 2023

Keywords: Remote sensor, Physical therapy, Body movement, Parkinson's disease

Copyright © 2023 Jimenez-Angeles *et al.*, licensed to EAI. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unlimited use, distribution and reproduction in any medium so long as the original work is properly cited.

doi:10.4108/eetpht.9.3149

1. Introduction

The pace of population aging in recent years has involved an increased and urgent request for rehabilitation therapies to effectively treat important illnesses in old age. Conversely, there has not been an increase of resources in terms of facilities and ad-hoc personnel to address this demand. The reason is at least twofold. First, an assisted rehabilitation process requires significant economic resources to accommodate the growing request for rehabilitation. Secondly, there is insufficient skilled staff to follow up, individually, all the patients in need of rehabilitation [2]. Added to this situation is the fact that in recent years, the consequences of the COVID-19 pandemic meant that many activities were carried out remotely, including medical rehabilitation treatments [3]. Parkinson's disease (PD) is one of the neurodegenerative disorders where remote rehabilitation could have major benefits. PD is considered the second most common chronic neurodegenerative disorder worldwide, clinically characterized by a constellation

of motor and nonmotor symptoms that may have a direct effect on daily activities as well as in the patients quality of life [9]. However, a conventional physical therapy program that combines strength, resistance, and flexibility exercises, as well as balance training, could be effective to reduce the degree of motor disability [4, 5, 7]. Attempts are being made to transfer care and rehabilitation of PD from the hospital setting to the patient's home, specifically focusing on: [10]

- Improve the patients quality of life, through a reduction of transfer times and costs.
- Reduce medical costs by increasing the number of patients treated in a single day, or by a single professional unit.
- Expand rehabilitation opportunities using computer-assisted systems.

Therefore, the development of technology allows to expand the treatment capacity beyond the acute phase of the disease and, at the same time, it develops an intervention model aimed at replacing the traditional one, that is, replacing face-to-face

*Corresponding author. Email: luis.jimenez@ieee.org



interaction between patient and physician/therapist. Considering the application of distance medicine in a home environment, there are several reports about systems for the evaluation of body movements from commonly used standard RGB video recordings [6]. Thus, the main aim of this work is to analyze body movements of 8 subjects with clinical diagnosis of Parkinson's disease, and compare them with a control group of 11 healthy volunteers, processing their respective RGB video recordings with a software that identifies 17 specific body keypoints while subjects perform two motor rehabilitation therapies (cervical and lumbar spine).

2. Methodology

2.1. Design.

Nineteen subjects (11 control and 8 with diagnosis of PD) were enrolled to participate in this study. All subjects were informed about the main objective of the study and instructed to follow a protocol for the video capture. A set of 4 body movement therapies (2 for cervical spine and 2 for lumbar spine) were instructed to be followed by all subjects and supervised by physiotherapist. All video recordings were analyzed by a specific software that detect 17 body points in order to compute indices of angles of rotation, rate and amplitude of movement for head, shoulder, back and pelvis respectively. A non-parametric statistical analysis was performed in order to quantify the significant differences ($p < 0.05$) between groups. The complete view of the study is shown in Fig. 1.

2.2. Participants.

Two subject groups were considered in this study: 11 healthy control volunteers (9 males, 2 females; 21.02 ± 3.29 years old) and 8 subjects with clinical diagnosis of Parkinson's disease (6 males, 2 females; 57.64 ± 9.04 years old). All subjects signed a responsibility letter to participate in the study according to the Helsinki declaration [1] and approved by the ethics committee of the Hospital General de México "Dr. Eduardo Liceaga" (DI/22/601/04/17), and only subjects with PD received economical compensation for their participation involvement.

2.3. Video capture protocol.

The advantage of the camera-based approach is the ability to detect motion from any regular RGB video, however specific considerations (like space, background, clothes, luminosity, field of view, image resolution, etc.) must be considered in a video capture protocol before the video acquisition. To facilitate the key-points detection, the video capture protocol consisted of:

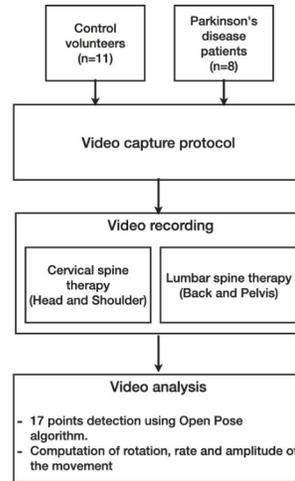


Figure 1. Schematic representation of the study.

- Selection of a large place as possible and free of obstacles to prevent falls during the evolution of the therapy exercises.
- Subjects wore clothes that allow them to stand out from the rest of the objects in the background.
- The lighting was directed towards the front of a person, in such a way that it illuminates its face and does not create a shadow.
- There was no other person in the area and large photos or portraits of people were avoided.
- A support for the video capture device was used in all acquisition.
- The floor plane was the reference for the video capture image.
- The resolution of video was 1920x1080 pixels with 24 frames per second and the format of the capture space was 16:9.

Each video was verified to validate that the entire trainee's body was in a correct position at the field of view throughout the recording. At the same time, manual categorization into specific groups was done by a single rater. Border cases were excluded from the analysis.



Anexo 2: Guía para la captura de movimientos en la evaluación clínica sistematizada de rehabilitación en el paciente con enfermedad de Parkinson

Table 1. Relationship between therapy and the specific target evaluated.

Target	Code	Therapy
Cervical spine	CS01	-Left lateral tilt of only the head
	CS02	-Right lateral tilt of only the head
Lumbar spine	LS01	-Hands on the waist and lateral flexion of the trunk
	LS02	-Arm contralateral to flexion extended to the sides of the trunk above the head

2.4. Physical therapy.

A physical therapy was designed by medical specialist in rehabilitation in order to evaluate specific angles related to the preservation of joint mobility and gross motor coordination. These angles were quantified after video recording by a small camera embedded into a micro-controller board (OpenMV Cam H7 plus, OpenMV) with capabilities to run a neural network and identify 17 points of the body (shoulders, hips, elbows, wrists, knees and ankles). Table 1 shows the target evaluated while the subject performs a specific therapy.

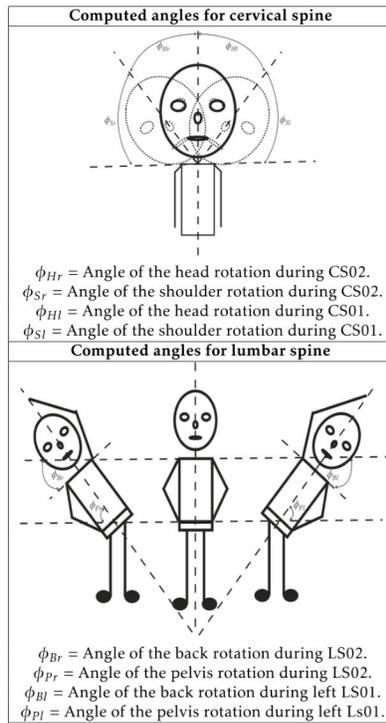
2.5. Video analysis.

In order to perform the rehabilitation therapy, the body segments that belong to the appendicular skeleton are very often measured [11]. These segments allow for translational movement of the body targets through repeated cyclic movements as described in section 2.4. Video recordings of control and PD subjects were analyzed by OpenPose algorithm [8] and angles from keypoints detected were computed to infer the rotation, rate and amplitude of movement of head, shoulder, back and pelvis. Table 2 shows a schematic representation of the computed angles while a subject perform an specific therapy.

Motion indices (rotation, rate and amplitude) of head, shoulders, back and pelvis were computed for all subjects after performing the therapies for cervical and lumbar spine respectively and were defined as follow:

- Rotation of the head was the angular change of an horizontal imaginary plane formed by keypoints detected for the mouth. Maximum negative rotation values were computed when the head had a maximum tilt to the left and maximum positives values were computed for maximum tilt to the right.
- Rotation of shoulders was the angular change of an imaginary horizontal plane formed by detected keypoints from left and right shoulders.

Table 2. Identification and nomenclature of the angles used in continuous monitoring.



- Rotation of back was the angular change of the trunk (a perpendicular imaginary plane that starts in the midpoint between the femur greater trochanters ending at the midpoint between shoulders).
- Rotation of pelvis was the angular change of an imaginary horizontal plane of left and right trochanters.
- In all cases rate was defined by the number of cycles per minute computed from rotation signal.

- In all cases amplitude was the absolute difference between consecutive minimum and maximum values of the rotation signal.

3. Results and Discussions

In this work we compare motion indices of 8 subjects with clinical diagnosis of Parkinson's disease with those computed for 11 healthy control volunteers to infer the control motion parameters of two specific motor rehabilitation therapies (cervical spine and lumbar spine).

Table 3 depicts the keypoints computed by OpenPose software for a control volunteer during a specific therapy. Angles for head, shoulder, back and pelvis are displayed overlaid on the image (see Table 2 for reference and nomenclature). As observed, OpenPose software has a high sensitivity to identify and follow 11 keypoints of face and 17 keypoints of trunk, lower and upper extremities during the proposed therapies. To achieve these results it is mandatory to follow the video capture protocol described in subsection 2.2.

The first row of Table 3, concerning to cervical spine target therapy, we observe at the central column the reference (0 degrees of head rotation), and the maximum rotation to right and left at the first and third columns respectively. In maximum rotations can be observed a slight difference between left and right keypoints for shoulders (horizontal plane), despite of the indication for this therapy is that the subject only rotates the head.

In the second and third rows of Table 3, corresponding to lumbar spine target therapy, we can observe in the central column the reference (0 degrees of rotation for pelvis and back), and the maximum rotation in the first and third columns. Imaginary planes for shoulders, back and pelvis are more evident and how it change according to therapy.

Fig. 2 and Fig. 3 depicts the comparison indices among of head and shoulders (rotation, rate and amplitude) between a control subject and a PD patient during the cervical spine therapy. Instantaneous rate (in cycles per minute) and the instantaneous amplitude (in grades) were computed using the minimum and maximum peaks in the rotation plots (red points). For head and shoulder the Control subject make 15 cycles in 30 seconds while the PD patients makes only 10 cycles in 26 seconds. It means that instantaneous rate of the PD patient is lower than the Control subject, as can be observed in the second row of both figures. Instantaneous amplitude for PD patients is bigger than the Control subject in the middle of the exercise and decreases suddenly at the end of the exercise. Rate and amplitude behaviour can be explained by the stiffness of movement as a consequence of PD. As previously explained, despite the therapy indicates that the subject

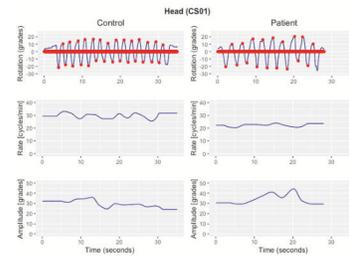


Figure 2. Rotation, rate and amplitude of the head while a Control and a PD patient exercises their cervical spine (CS01).

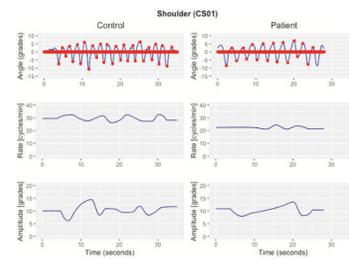


Figure 3. Rotation, rate and amplitude of shoulders while a Control and a PD patient exercises their cervical spine (CS01).

only turns his head, we can observed that shoulders have a similar pattern for rate although a marked difference in amplitude. This results confirm the high sensitivity of OpenPose algorithm to detect and follow slight changes in the motion parameters. Special care must be taken to quantify speed and amplitude of the movement at the beginning or at the end of the exercise, since, being of lower amplitude, there are limitations to identify the maximum and minimum peaks, so these parameters can be overestimated.

Table 4 summarize the motion parameters for head and shoulders for all subjects after perform the cervical spine therapy. Non-significant differences were found in all parameters between PD and Control groups, however all indices had a wider range for PD patients than Control subjects. Distribution of the instantaneous rate of head in PD patients was lower than Control subjects (15.00-51.43 for PD vs 21.18-45.57 for Control in CS01, and 8.78-53.33 for PD vs 17.14-50.00 for Control in CS02), showing the effects of stiffness

Table 3. Keypoints and computed angles for a control volunteer in all therapy exercises.

Target	Keypoints and angles		
Cervical spine			
Lumbar spine			
			

movement as a consequence of the disease. Distribution of instantaneous amplitude of head in PD patients was greater than control subjects (14.19-65.50 for PD vs 14.36-53.75 for Control in CS01, and 5.17-65.67 for PD vs 7.04-49.56 for Control in CS02), showing that PD patients have a less control of the movement. Similar results can be observed for indices of shoulder, which suggest that PD patients tend to have a less control of the movement with lower instantaneous rate and greater instantaneous amplitude, however they were in different stages of the disease such that they were non-statistically different from the control group.

Fig. 4 and Fig. 5 depicts the comparison indices among of back and pelvis (rotation, rate and amplitude) between a control subject and a PD patient during the lumbar spine therapy. In both figures can be observed that PD patient make 10 cycles in 60 seconds while the PD patients makes 8 cycles in 30 seconds. These results confirm that instantaneous rate of the PD patient was

lower than the Control subject but a less variability of the trace can be observed too. For back, instantaneous amplitude of the PD patient was lower than the Control subject in all the exercise, having a tendency to increase at the end. However, for pelvis instantaneous amplitude of PD patient was almost equal than Control subject at the end of the exercise. These results suggest that for lumbar therapy, PD patient had a lower amplitude of movement (back) and a less balance during the exercise reflected as an increase of the amplitude in the pelvis.

Table 5 summarize the motion parameters of back and pelvis for Control subjects and PD patients after perform the lumbar spine therapy. Non-significant differences were found in all parameters between PD and Control groups, however values of back rotation were wider for Control subjects than PD patients (-51.79-49.40 for Controls vs -18.20-14.96 for PD patients in LS01, -52.99-50.91 for Controls vs -19.96-17.82 for PD patients in LS02) and similar results were

Table 4. Indices of movement for head and shoulder during cervical spine therapy.

		Head			
		CS01		CS02	
		Controls	Patients	Controls	Patients
Rotation (grades)	Range:	-35.12 to 27.52	-51.64 to 57.58	-26.12 to 44.11	-48.87 to 54.94
	1st. Quartile:	-9.52	-11.76	-8.40	-8.53
	Median:	-0.06	1.35	-1.40	-2.18
	3rd. Quartile:	9.24	10.01	9.01	9.56
Rate (cycles/min)	Range:	21.18 to 45.57	15.00 to 51.43	17.14 to 50.00	8.78 to 53.33
	1st. Quartile:	25.00	22.17	24.00	21.64
	Median:	27.30	27.71	26.49	25.71
	3rd. Quartile:	33.00	32.00	34.60	29.96
Amplitude (grades)	Range:	14.36 to 53.75	14.19 to 65.50	7.04 to 49.56	5.17 to 65.67
	1st. Quartile:	24.99	26.74	21.28	26.58
	Median:	28.76	31.21	34.43	32.35
	3rd. Quartile:	37.33	39.84	40.60	38.23
		Shoulder			
		CS01		CS02	
		Control	Patients	Control	Patients
Rotation (grades)	Range:	-13.06 to 10.88	-30.10 to 38.07	-9.52 to 14.13	-29.66 to 29.18
	1st. Quartile:	-1.64	-3.18	-1.59	-2.30
	Median:	0.10	0.81	0.09	-0.23
	3rd. Quartile:	2.23	3.29	1.89	2.76
Rate (cycles/min)	Range:	19.31 to 52.50	15 to 48	16.07 to 55.38	9.79 to 49.65
	1st. Quartile:	25.45	21.82	23.33	20.28
	Median:	27.54	27.30	26.19	25.71
	3rd. Quartile:	30.52	32.00	33.87	29.38
Amplitude (grades)	Range:	0.29 to 21.11	3.61 to 31.11	0.93 to 18.16	3.19 to 34.66
	1st. Quartile:	4.31	6.43	3.65	6.10
	Median:	8.38	9.51	6.40	8.32
	3rd. Quartile:	11.64	20.99	11.10	14.79

found for instantaneous amplitude, meaning that head amplitude of movement during the lumbar therapy was lower for PD patients.

Values of the instantaneous rate of back were similar between groups for LS01 but wider in PD patients in LS02, suggesting that PD patients made a great effort to follow the activity in LS02. Distribution of instantaneous amplitude of back in PD patients was lower than Control subjects (median of 17.16 for PD patients vs 32.28 for Control subjects in LS01, and 20.11 for PD patients vs 36.06 for Control subjects in LS02), showing that PD patients have a less control of the movement.

Instantaneous amplitude of pelvic movement was greater in PD patients than Control subjects (median of 28.60 in PD vs 17.74 in LS01 and 25.50 vs 11.93 in LS02), which suggest that PD patients tend to have a less control of the movement.

4. Conclusion

There have been many recent publications describing the possibility of using RGB video recordings for home rehabilitation. In this work we propose to quantify the body movement of cervical and lumbar spine motor therapies for Parkinson's disease using indices like rotation, instantaneous rate and instantaneous amplitude of head, shoulders, back and pelvis. Based on our findings, we can say that OpenPose algorithm is a sufficiently robust algorithm that is capable of detecting slight motion parameters of an specific rehabilitation therapy, that could facilitate their use in a home environment specially in follow-up and management of the motor rehabilitation therapy for Parkinson's disease. In the Control subjects quantitation of motion parameters were similar in amplitude and rate regardless of whether the exercise therapy is to the right or to the left. However for PD patients the estimated motion parameters suggested that PD

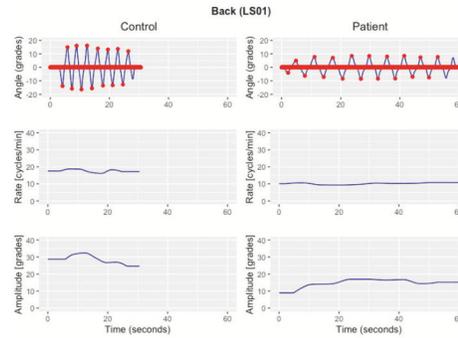


Figure 4. Rotation, rate and amplitude for pelvis and back while a control volunteer exercises their lumbar spine target.

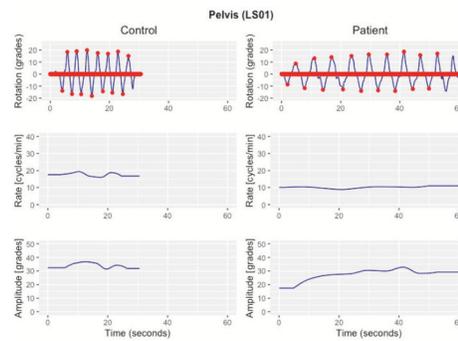


Figure 5. Rotation, rate and amplitude for pelvis and back while a control volunteer exercises their lumbar spine target.

patients tend to have a less control of the movement with tendency of lower instantaneous rate and greater variability in the instantaneous amplitude. It could be explained by the stiffness of movement as a consequence of PD, however all PD patients were in different stages of the disease such that they were non-statistically different from the control group. As future work we will increase the sample size of video recordings considering exercises therapies for another targets like arms, hands, elbows, etc. We will include an analysis of facial expressions to identify patterns of stage in PD and quantify body movement before and

after a physical rehabilitation therapy for Parkinson's disease.

Acknowledgments

This project was partially funded by the program UNAM-DGAPA-PAPIME "PE103323: Herramientas de enseñanza para el desarrollo de dispositivos médicos basados en inteligencia artificial".

References

- [1] Association, W.M.: World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for



Table 5. Back and pelvis parameters of movement during lumbar spine therapy.

		Back			
		LS01		LS02	
		Control	Patients	Control	Patients
Rotation (grades)	Range:	-51.79 to 49.40	-18.20 to 14.96	-52.99 to 50.91	-19.96 to 17.82
	1st. Quartile:	-6.57	-3.69	-6.49	-3.69
	Median:	-0.34	-0.12	-0.09	-0.09
	3rd. Quartile:	6.52	3.85	5.64	3.55
Rate (cycles/min)	Range:	10.23 to 19.78	8.42 to 19.45	8.53 to 15.92	5.47 to 48.00
	1st. Quartile:	11.92	10.63	8.95	8.42
	Median:	13.15	12.74	9.46	9.88
	3rd. Quartile:	15.41	15.23	13.39	12.04
Amplitude (grades)	Range:	14.32 to 91.49	8.96 to 25.89	21.41 to 98.44	4.86 to 37.45
	1st. Quartile:	24.68	14.35	28.62	14.32
	Median:	32.28	17.16	36.06	20.11
	3rd. Quartile:	59.83	21.73	67.67	23.69
		Pelvis			
		LS01		LS02	
		Control	Patients	Control	Patients
Rotation (grades)	Range:	-26.33 to 37.16	-27.65 to 25.72	-24.69 to 27.64	-38.77 to 28.62
	1st. Quartile:	-3.83	-6.97	-2.50	-4.88
	Median:	-0.36	-0.71	0.24	0.37
	3rd. Quartile:	3.29	7.08	2.52	5.38
Rate (cycles/min)	Range:	10.29 to 46.15	8.67 to 20.57	8.61 to 20.57	5.47 to 57.60
	1st. Quartile:	12.43	10.65	9.51	8.42
	Median:	14.44	12.97	12.76	10.89
	3rd. Quartile:	16.82	15.00	17.05	13.45
Amplitude (grades)	Range:	3.67 to 54.40	17.37 to 39.06	1.29 to 50.69	2.16 to 59.97
	1st. Quartile:	13.90	24.31	8.90	17.92
	Median:	17.74	28.60	11.93	24.50
	3rd. Quartile:	31.80	34.06	18.35	28.73

Medical Research Involving Human Subjects. JAMA 310(20), 2191–2194 (11 2013), <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

[2] Baldi, M.M., Mavrodiev, P.A., Galuzzi, B.G., Mantovani, F., Realdon, O., Messina, E.: A decision support system in the context of an applied game for telerehabilitation (2021)

[3] Chen, K.L., Brozen, M., Rollman, J.E., Ward, T., Norris, K.C., Gregory, K.D., Zimmerman, E.J.: How is the covid-19 pandemic shaping transportation access to health care? Transportation Research Interdisciplinary Perspectives 10, 100338 (6 2021)

[4] Crizzle, A.M., Newhouse, I.J.: Is physical exercise beneficial for persons with parkinson's disease? Clinical Journal of Sport Medicine 16 (2006)

[5] Dibble, L.E., Addison, O., Papa, E.: The effects of exercise on balance in persons with parkinson's disease: A systematic review across the disability spectrum. Journal of Neurologic Physical Therapy 33 (2009)

[6] Farulla, G.A., Pianu, D., Cempini, M., Cortese, M., Russo, L.O., Indaco, M., Nerino, R., Chimienti, A., Oddo, C.M., Vitiello, N.: Vision-based pose estimation for robot-mediated hand telerehabilitation. Sensors 16 (2016), <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/2/208>

[7] Gobbi, L.T.B., Oliveira-Ferreira, M.D.T., Caetano, M.J.D., Lirani-Silva, E., Barbieri, F.A., Stella, F., Gobbi, S.: Exercise programs improve mobility and balance in people with parkinson's disease. Parkinsonism Related Disorders 15, S49–S52 (2009), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353802009707801>

[8] Hidalgo, G., Cao, Z., Simon, T., Wei, S.E., Joo, H., Sheikh, Y.: Openpose library. CMU-Perceptual-Computing-Lab/<https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab> (2017)

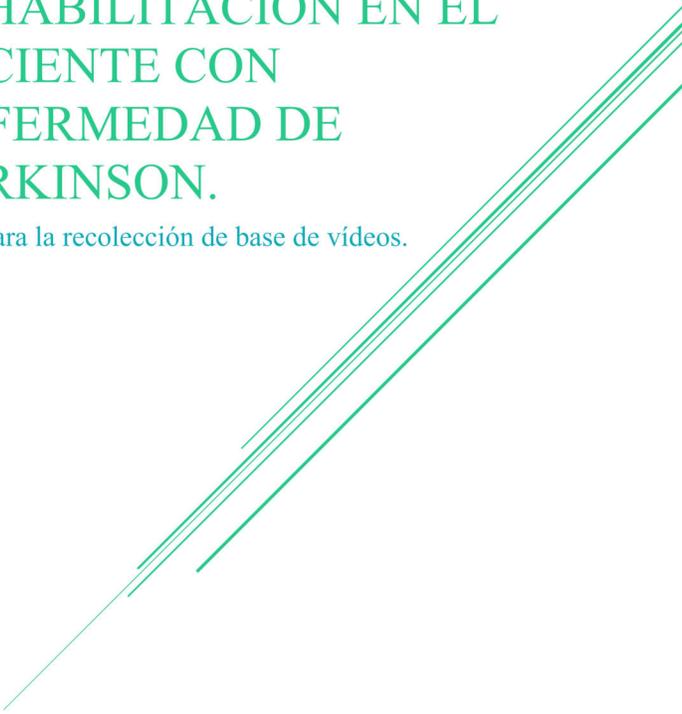
[9] Rodriguez-Violante, M., Cervantes-Arriaga, A., Corona, T., Martínez-Ramírez, D., Morales-Briceno, H., Martínez-Martin, P.: Clinical determinants of health-related quality of life in mexican patients with parkinson's disease. Archives of Medical Research 44 (2013)

[10] Rogante, M., Grigioni, M., Cordella, D., Giacomozzi, C.: Ten years of telerehabilitation: A literature overview of

- technologies and clinical applications (2010)
- [11] Stirling, D., Hesami, A., Ritz, C., Adistambha, K., Naghdy, E: Symbolic modelling of dynamic human motions. In: Serra, P.A. (ed.) Biosensors, chap. 16. IntechOpen, Rijeka (2010), <https://doi.org/10.5772/7215>

GUÍA PARA LA CAPTURA DE
MOVIMIENTOS EN LA
EVALUACIÓN CLÍNICA
SISTEMATIZADA DE
REHABILITACIÓN EN EL
PACIENTE CON
ENFERMEDAD DE
PARKINSON.

Guía para la recolección de base de vídeos.



Elaboró: Alba Laura Rivera Escarcega

SUGERENCIAS PARA LA CAPTURA DE MOVIMIENTOS EN LA EVALUACIÓN CLÍNICA SISTEMATIZADA DE REHABILITACIÓN EN EL PACIENTE CON ENFERMEDAD DE PARKINSON.

Con el fin de poder realizar la evaluación clínica de forma correcta, se sugiere lo siguiente:

1. Elige un lugar amplio y quitar la mayoría de los obstáculos para evitar caídas durante la evolución de los ejercicios, Ilustración 1.

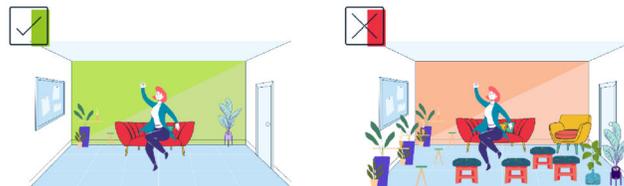


Ilustración 1 Sugerencia no. 1

2. Usar ropa que permita resaltar sobre el resto de los objetos del fondo, es decir seleccionar un color contrario al fondo, por ejemplo: si el fondo es blanco usa ropa negra, Ilustración 2.

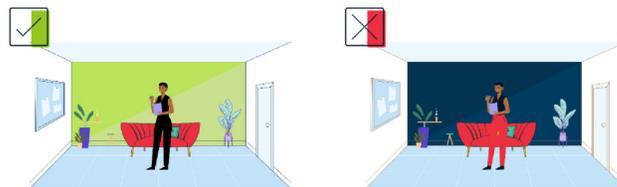


Ilustración 2 Sugerencia no. 2

3. La iluminación debe estar dirigida al frente de la persona, de tal forma que ilumine su rostro y no genere sombra. La sombra se genera cuando la fuente de iluminación se encuentra atrás de la persona del video o del dispositivo de captura del video, Ilustración 3.

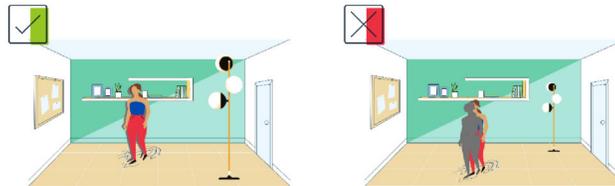


Ilustración 3 Sugerencia no. 3

4. No debe encontrarse otra persona en el área, así como se debe evitar fotos o retratos de personas de tamaño grande (60cm x 70cm), Ilustración 4.

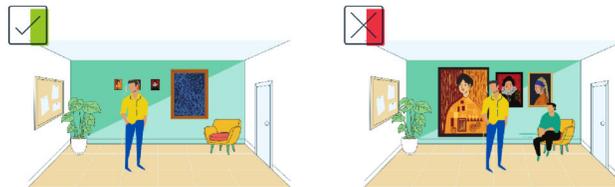


Ilustración 4 Sugerencia no. 4.

5. Usar un soporte para el dispositivo de captura de video, si esto no es posible se debe mantener estático el dispositivo el mayor tiempo posible y evitar movimientos bruscos, Ilustración 5.

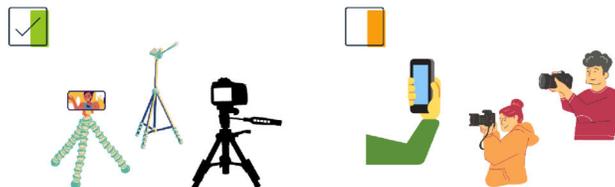


Ilustración 5 Sugerencia no. 5.

6. El suelo debe encontrarse paralelo al eje horizontal de la imagen de captura de video, Ilustración 6.



Ilustración 6 Sugerencia no. 6.

7. En la captura de video utilizar una resolución de 480p, 720p o 1080p. El formato del espacio de captura es indistinto (16:9,4:3,11:9, etc.) siempre y cuando cumpla con el tipo de captura, más adelante se indica los tipos de captura.

TIPOS DE TOMA PARA LA CAPTURA DE MOVIMIENTOS EN LA EVALUACIÓN CLÍNICA SISTEMATIZADA DE REHABILITACIÓN EN EL PACIENTE CON ENFERMEDAD DE PARKINSON.

Para realizar una correcta captura de video, dividir el área en tercios (algunas cámaras permiten esta opción), Ilustración 7.

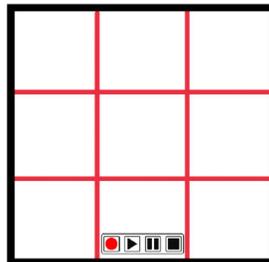


Ilustración 7 División del área de captura de video.

En la toma de video se consideran cinco posiciones del cuerpo respecto al área de captura del video.

- A. Toma del rostro, Ilustración 8: Ubicar el rostro en el centro de la cuadrícula, y no debe saturar la imagen.

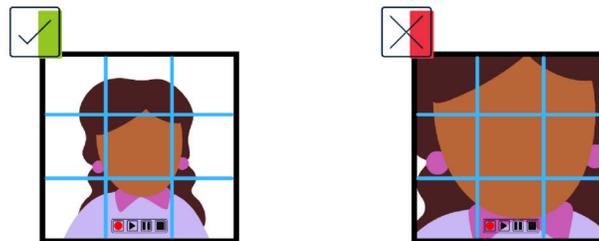


Ilustración 8 Toma tipo A.

- B. Toma de la parte superior del cuerpo, Ilustración 9: La cabeza se encuentra centrada en la cuadrícula y en el tercio inferior se observan a los hombros y el área del pecho.

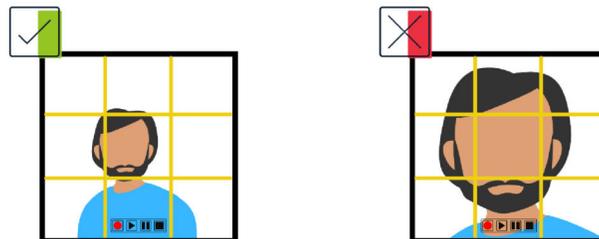


Ilustración 9 Toma tipo B.

- C. Toma del cuerpo completo estático, Ilustración 10: El cuerpo se encuentra centrado en la cuadrícula de forma vertical; al extender ambos brazos a los lados y hacia la cabeza, no deben salir del cuadro; así mismos los pies se deben de observar en el cuadro.

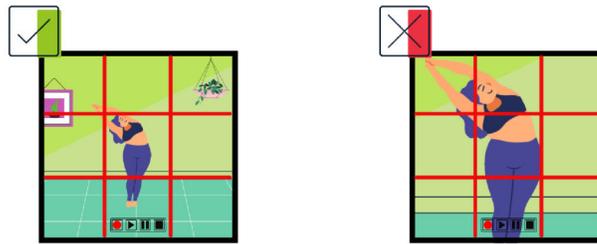


Ilustración 10 Toma tipo C.

- D. Toma del cuerpo completo en movimiento, Ilustración 11: Se considera el movimiento más próximo al dispositivo de captura y se debe cumplir en esta toma con lo establecido en la toma tipo C.

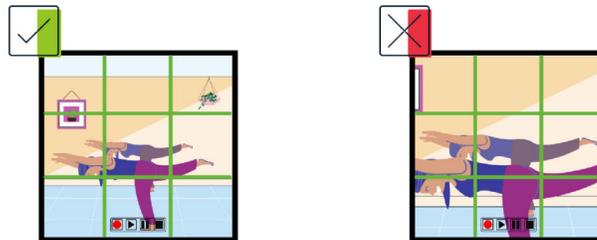


Ilustración 11 Toma tipo D.

- E. Toma del cuerpo superior estático, Ilustración 12: El cuerpo se encuentra centrado en la cuadrícula de forma vertical; al extender ambos brazos a los lados y hacia la cabeza, no deben salir del cuadro; en el cuadro como mínimo se debe observar la cadera y parte de las piernas. Este tipo de toma debe considerarse siempre y cuando no sea posible tener la toma C.

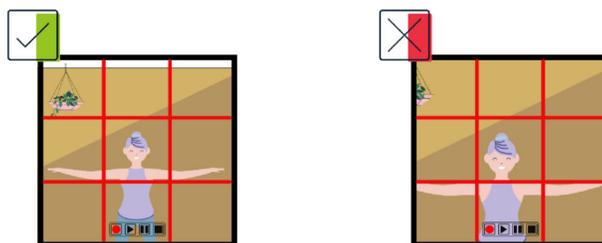


Ilustración 12 Toma tipo E.

INSTRUCCIONES PARA LA CAPTURA DE MOVIMIENTOS EN LA EVALUACIÓN CLÍNICA SISTEMATIZADA DE REHABILITACIÓN EN EL PACIENTE CON ENFERMEDAD DE PARKINSON.

1. Ingresar a la liga [Formulario para la captura de movimientos en la evaluación clínica](#). Al finalizar, a más tardar una semana después, recibirá un número serie y la liga de una carpeta en la nube para subir los videos correspondientes.
2. La lista de ejercicios a realizar es:
 - a. Ejercicios de columna cervical (CC)
 - i. Inclinación lateral izquierda, [ver video](#).
 - ii. Inclinación lateral derecha, [ver video](#).
 - b. Ejercicios de columna lumbar (CL)
 - i. Manos en la cintura, flexión lateral del tronco, [ver video](#).
 - ii. Brazo contralateral a la flexión extendido a los costados del tronco por arriba de la cabeza, [ver video](#).
 - c. Ejercicios combinados (EC)
 - i. Sentarse y levantarse de una silla, sin apoyo de brazos, [ver video](#).
 - ii. Mano al hombro contralateral, [ver video](#).
 - iii. Mano al oído contralateral, ipsilateral, [ver video](#).
 - iv. Mano al hombro y codo contralateral, [ver video](#).
 - v. Elevación del brazo derecho y separación del brazo izquierdo, [ver video](#).
 - vi. Manos cruzadas frente al cuello, [ver video](#).
 - vii. Tres pasos al frente, tres atrás, braceo alternado, ultimo con elevación del brazo, [ver video](#).
 - d. Ejercicios de mímica facial (MF)

- i. Elevación de cejas, [ver vídeo](#).
- ii. Fruncir el ceño, [ver vídeo](#).
- iii. Cerrar los ojos, [ver vídeo](#).
- iv. Arrugar la nariz, [ver vídeo](#).
- v. Sonreír sin mostrar dientes, [ver vídeo](#).
- vi. Sonreír mostrando dientes, [ver vídeo](#).
- vii. Fruncir labios (beso), [ver vídeo](#).
- viii. Mostrar los dientes (gruñir), [ver vídeo](#).
- e. Ejercicios de movilidad del hombro (MH)
 - i. Elevación de la mano por arriba de la cabeza con el codo extendido izquierdo, [ver vídeo](#).
 - ii. Elevación de la mano por arriba de la cabeza con el codo extendido derecho, [ver vídeo](#).

2.1 Cada ejercicio cuenta con un tipo de toma indicado en la Tabla 1.

2.2 Por cada ejercicio se deberá realizar 15 repeticiones.

Tabla 1 Tipo de captura por ejercicio. *Cuando no sea posible la captura C es posible usar la captura E.

Tipo de ejercicios	Número	Descripción de ejercicio	Etiqueta	Tipo de captura
Columna cervical	01	Inclinación lateral izquierda	CC01	B
	02	Inclinación lateral derecha	CC02	B
Columna lumbar	01	Manos a la cintura, flexión lateral del tronco	CL01	C*
	02	Brazo contralateral a la flexión extendido a los costados del tronco por arriba de la cabeza	CL02	C*
Combinados	01	Sentarse y levantarse de una silla, sin apoyo de brazos	EC01	C*
	02	Mano al hombro contralateral	EC02	C*
	03	Mano al oído contralateral, ipsilateral	EC03	C*
	04	Mano al hombro y codo contralateral	EC04	C*
	05	Elevación del brazo derecho y separación del brazo izquierdo	EC05	C*
	06	Manos cruzadas frente al cuello	EC06	C*
	07	Tres pasos al frente, tres atrás, braceo alternado, último con elevación del brazo	EC07	D
Mímica facial	01	Elevación de cejas	MF01	A
	02	Fruncir el ceño	MF02	A
	03	Cerrar los ojos	MF03	A
	04	Arrugar la nariz	MF04	A
	05	Sonreír sin mostrar los dientes	MF05	A
	06	Sonreír mostrando los dientes	MF06	A
	07	Fruncir los labios (beso)	MF07	A
	08	Mostrar los dientes	MF08	A
Movilidad del hombro	01	Elevación de la mano por arriba de la cabeza	MH01	C*
	02	Elevación con el codo extendido derecho	MH02	C*

3. Iniciar la grabación y esperar en posición erguida por un tiempo mínimo de 2 segundos para comenzar los ejercicios, al finalizar los ejercicios espere en posición erguida por un tiempo mínimo de 2 segundos para finalizar el video. De ser necesario editar el video, recortar las partes del video no necesarias.
4. Antes de subir el video a la plataforma, debe **renombrarlo** de la siguiente manera:

EEXX
ZXX
.mp4
Etiqueta *Número de serie (alfanumérico)* *Extensión del video*

La etiqueta se conforma de dos iniciales del tipo de ejercicio y dos dígitos para el número de ejercicio, el número de serie lo conforma una letra y dos dígitos, la extensión del video puede ser formato .mp4, .mov. En la Tabla 1, se encuentra la etiqueta de cada ejercicio. Observe un ejemplo en la Ilustración 13 Ejemplo visual para el nombre de un video. Ilustración 13.

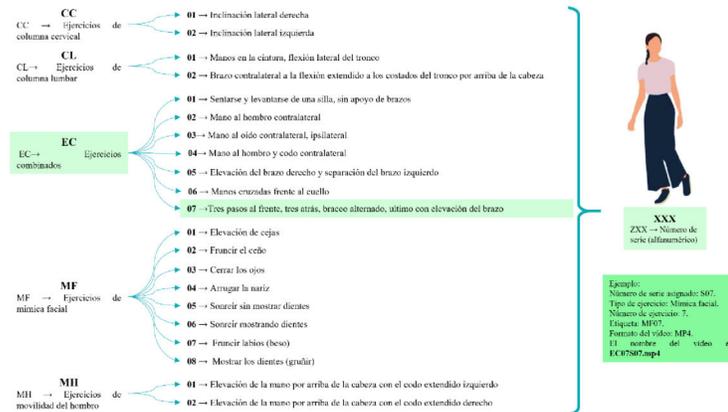


Ilustración 13 Ejemplo visual para el nombre de un video.

5. Una vez subido los videos a la nube, ingrese a la siguiente liga [cuestionario de envios de videos](#). Si existe algún problema con un video se le notificará y deberá volver a realizar los videos correspondientes, subirlos y volver a rellenar el cuestionario. Cuando obtenga una calificación de 240 puntos, indicara que, como el tipo de captura, el nombre de videos y la ejecución del ejercicio ha sido correcta.

OBSERVACIONES O COMENTARIOS

Si se llegase a presentar alguna duda, favor de hacerla llegar a cualquiera de las siguientes direcciones de correo electrónico:

Dr. Jorge Luis Rojas Arce

Departamento de Ingeniería en Sistemas Biomédicos.

Email: jorge.rojas.arce@comunidad.unam.mx

Dr. Luis Jiménez Ángeles

Departamento de Ingeniería en Sistemas Biomédicos.

Email: luis.jimenez@comunidad.unam.mx

Bibliografía

- [1] J. S. S. Moreno, P. A. Millán, and O. F. B. Henao, “Introducción, epidemiología y diagnóstico de la enfermedad de parkinson,” *Acta Neurológica Colombiana*, vol. 35, pp. 2–10, 8 2019. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-87482019000500002 1, 7
- [2] F. Salvador, “Posicionamiento al dictamen de la comision de salud sobre el punto de acuerdo en materia de parkinson.” 4 2017. [Online]. Available: https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/63/2/2017-04-25-1/assets/documentos/41_INT_Salvador_Lopez_parkinson.pdf 1
- [3] D. Martínez-Ramírez, M. Rodríguez-Violante, E. S. Velázquez-Ávila, A. Cervantes-Arriaga, A. González-Cantú, T. Corona-Vázquez, and L. Velásquez-Pérez, “Incidencia y distribución geográfica de la enfermedad de parkinson en méxico,” *Salud Pública de México*, vol. 62, pp. 873–875, 11 2020. [Online]. Available: <https://www.saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/11750> 1
- [4] J. M. Beitz, “Parkinson s disease a review,” *Frontiers in Bioscience*, vol. S6, pp. 65–74, 1 2014. [Online]. Available: <https://www.imrpress.com/journal/FBS/6/1/10.2741/S415> 2, 6, 7, 8
- [5] M. Rodríguez-Violante and A. Cervantes-Arriaga, “La escala unificada de la enfermedad de parkinson modificada por la sociedad de trastornos del movimiento (mds-updrs): aplicación clínica e investigación,” *Archivos de Neurociencias*, vol. 19, pp. 157–163, 4 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/266559368_

La escala unificada de la enfermedad de Parkinson modificada por la Sociedad de Trastornos del Movimiento MDS-UPDRS aplicacion clinica e investigacion 2, 10

- [6] A. Regnault, B. Borojerd, J. Meunier, M. Bani, T. Morel, and S. Cano, “Does the mds-updrs provide the precision to assess progression in early parkinson’s disease? learnings from the parkinson’s progression marker initiative cohort,” *Journal of Neurology*, vol. 266, pp. 1927–1936, 8 2019. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s00415-019-09348-3> 2
- [7] A. C. Toro and O. F. Buriticá, “Enfermedad de parkinson: criterios diagnósticos, factores de riesgo y de progresión, y escalas de valoración del estadio clínico,” *Acta Neurológica Colombiana*, vol. 30, pp. 300–306, 2014. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/anco/v30n4/v30n4a10.pdf> 2
- [8] “Cambio euro peso mexicano 2012.” [Online]. Available: <https://www.cambioeuro.es/cambio-historico-peso-mexicano-2012/> 3
- [9] M. M. Baldi, P. A. Mavrodiev, B. G. Galuzzi, F. Mantovani, O. Realdon, and E. Messina, “A decision support system in the context of an applied game for telerehabilitation,” 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9581225/> 3
- [10] K. L. Chen, M. Brozen, J. E. Rollman, T. Ward, K. C. Norris, K. D. Gregory, and F. J. Zimmerman, “How is the covid-19 pandemic shaping transportation access to health care?” *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 10, p. 100338, 3 2021. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969996119303754> 3
- [11] A. M. Crizzle and I. J. Newhouse, “Is physical exercise beneficial for persons with parkinson’s disease?” *Clinical Journal of Sport Medicine*, vol. 16, 2006. [Online]. Available: <https://journals.lww.com/00042752-200609000-00009> 3
- [12] M. Rogante, M. Grigioni, D. Cordella, and C. Giacomozzi, “Ten years of tele-rehabilitation: A literature overview of technologies and clinical applications,” 2010.

- [Online]. Available: <https://www.medra.org/servlet/aliasResolver?alias=iospress&doi=10.3233/NRE-2010-0612> 3
- [13] G. A. Farulla, D. Pianu, M. Cempini, M. Cortese, L. O. Russo, M. Indaco, R. Nerino, A. Chimienti, C. M. Oddo, and N. Vitiello, “Vision-based pose estimation for robot-mediated hand telerehabilitation,” *Sensors*, vol. 16, 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/2/208> 4, 17
- [14] E. Tolosa, A. Garrido, S. W. Scholz, and W. Poewe, “Challenges in the diagnosis of parkinson’s disease,” *The Lancet Neurology*, vol. 20, pp. 385–397, 5 2021. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8185633/> 6
- [15] A. M. Bonnet and J. L. Houeto, “Pathophysiology of parkinson’s disease,” *Biomedicine Pharmacotherapy*, vol. 53, pp. 117–121, 3 1999. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10349507> 6
- [16] OMS, “Enfermedad de parkinson,” 8 2023. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/parkinson-disease> 7
- [17] V. W. Sung and A. P. Nicholas, “Nonmotor symptoms in parkinson’s disease: Expanding the view of parkinson’s disease beyond a pure motor, pure dopaminergic problem,” *Neurologic Clinics*, vol. 31, pp. S1–S16, 8 2013. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23931951> 9
- [18] C. C. González and P. C. Trandafir, “Estudio de calidad de vida con la pdq39 en pacientes con enfermedad de parkinson tratados con terapias avanzadas,” *Revista Científica de la Sociedad Española de Enfermería Neurológica*, vol. 48, pp. 9–14, 7 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2013524618300175> 10
- [19] C. JENKINSON, R. FITZPATRICK, V. PETO, R. GREENHALL, and N. HYMAN, “The parkinson’s disease questionnaire (pdq-39): development and validation of a parkinson’s disease summary index score,” *Age and Ageing*, vol. 26, pp. 353–357, 9 1997. [Online]. Available: <https://academic.oup.com/ageing/article/26/5/353/35976> 10

- [20] P. Hagell and C. Nygren, “The 39 item parkinson’s disease questionnaire (pdq-39) revisited: implications for evidence based medicine,” *Journal of Neurology, Neurosurgery amp; Psychiatry*, vol. 78, pp. 1191–1198, 11 2007. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2117601/> 11
- [21] E. P. Sánchez, A. V. González, J. A. Vicuña, and L. Villamizar, “Calidad de vida en los pacientes con enfermedad de parkinson valorados en un hospital universitario de bogotá, colombia,” *Neurología Argentina*, vol. 11, pp. 151–158, 7 2019. [Online]. Available: <https://www.elsevier.es/es-revista-neurologia-argentina-301-articulo-calidad-vida-pacientes-con-enfermedad-S1853002819300266> 12
- [22] E. Chávez-León, M. P. Ontiveros-Uribe, and J. D. Carrillo-Ruiz, “La enfermedad de parkinson: neurología para psiquiatras,” *Salud mental*, vol. 36, pp. 315–324, 7 2013. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33252013000400006&lng=es&nrm=iso&tlng=es 12, 13
- [23] R. Martínez-Fernández., C. G.-S. C., Álvaro Sánchez-Ferro, and J. Ángel Obeso, “Actualización en la enfermedad de parkinson,” *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 27, pp. 363–379, 5 2016. [Online]. Available: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-medica-clinica-las-condes-202-articulo-actualizacion-en-la-enfermedad-de-S071686401> 12, 13
- [24] T. Pringsheim, G. S. Day, D. B. Smith, A. Rae-Grant, N. Licking, M. J. Armstrong, R. M. de Bie, E. Roze, J. M. Miyasaki, R. A. Hauser, A. J. Espay, J. P. Martello, J. A. Gurwell, L. Billinghamurst, K. Sullivan, M. S. Fitts, N. Cothros, D. A. Hall, M. Rafferty, L. Hagerbrant, T. Hastings, M. D. O’Brien, H. Silsbee, G. Gronseth, A. E. Lang, T. Pringsheim, G. S. Day, D. Smith, A. Rae-Grant, N. Licking, M. J. Armstrong, R. M. A. de Bie, E. Roze, J. M. Miyasaki, R. A. Hauser, A. J. Espay, J. P. Martello, J. Gurwell, L. Billinghamurst, K. Sullivan, M. S. Fitts, N. Cothros, D. A. Hall, M. Rafferty, L. Hagerbrant, T. Hastings, M. D. O’Brien, H. Silsbee, G. Gronseth, and A. E.

- Lang, “Dopaminergic therapy for motor symptoms in early parkinson disease practice guideline summary,” *Neurology*, vol. 97, pp. 942–957, 11 2021. [Online]. Available: <https://www.neurology.org/doi/10.1212/WNL.0000000000012868> 13
- [25] C. W. Olanow, M. B. Stern, and K. Sethi, “The scientific and clinical basis for the treatment of parkinson disease (2009),” *Neurology*, vol. 72, pp. S1–S136, 5 2009, doi: 10.1212/WNL.0b013e3181a1d44c. [Online]. Available: <https://www.neurology.org/doi/10.1212/WNL.0b013e3181a1d44c> 13
- [26] H. Narabayashi, “Stereotaxic vim thalamotomy for treatment of tremor,” *European Neurology*, vol. 29, pp. 29–32, 1989. [Online]. Available: <https://www.karger.com/Article/FullText/116450> 14
- [27] L. L. G. Echeverry, A. M. J. Henao, M. A. R. Molina, S. M. V. Restrepo, C. A. P. Velásquez, and G. J. S. Bolívar, “Sistemas de captura y análisis de movimiento cinemático humano: una revisión sistemática,” *Prospectiva*, vol. 16, pp. 24–34, 7 2018. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v16n2/1692-8261-prosp-16-02-00024.pdf> 15, 16
- [28] Y. Desmarais, D. Mottet, P. Slangen, and P. Montesinos, “A review of 3d human pose estimation algorithms for markerless motion capture,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 212, p. 103275, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314221001193> 15
- [29] M. Bravo, R. Rengifo, and R. Agredo, “Comparación de dos sistemas de captura de movimiento por medio de las trayectorias articulares de marcha,” *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica*, vol. 37, 8 2016. [Online]. Available: <http://www.rmib.mx/index.php/rmib/article/view/89> 15, 16
- [30] E. P. Washabaugh, T. A. Shanmugam, R. Ranganathan, and C. Krishnan, “Comparing the accuracy of open-source pose estimation methods for measuring gait kinematics.” *Gait*

- posture*, vol. 97, pp. 188–195, 9 2022. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35988434> 15
- [31] M. Andriluka, L. Pishchulin, P. Gehler, and B. Schiele, “2d human pose estimation: New benchmark and state of the art analysis,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2014. 17
- [32] J. Shin, K. Woo, C. Y. Lee, S. Jeon, H.-J. Kim, and B. Jeon, “Automatic measurement of postural abnormalities with a pose estimation algorithm in parkinson’s disease,” *Journal of Movement Disorders*, vol. 15, pp. 140 – 145, 2022. 18
- [33] E. Hedlin, “Human pose and stride length estimation,” 2021. 18
- [34] P. Drotár, J. Mekyska, I. Rektorová, L. Masarová, Z. Smekal, and M. Faúndez-Zanuy, “Analysis of in-air movement in handwriting: A novel marker for parkinson’s disease,” *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 117 3, pp. 405–11, 2014. 19
- [35] E. Smits, A. Tolonen, L. Cluitmans, M. van Gils, B. Conway, R. Zietsma, K. Leenders, and N. Maurits, “Standardized handwriting to assess bradykinesia, micrographia and tremor in parkinson’s disease,” *PLoS ONE*, vol. 9, 2014. 19
- [36] P. Drotár, J. Mekyska, I. Rektorová, L. Masarová, Z. Smekal, and M. Faúndez-Zanuy, “Evaluation of handwriting kinematics and pressure for differential diagnosis of parkinson’s disease,” *Artificial intelligence in medicine*, vol. 67, pp. 39–46, 2016. 19
- [37] G. D. Cascarano, C. Loconsole, A. Brunetti, A. Lattarulo, D. Buongiorno, G. Losavio, E. Sciascio, and V. Bevilacqua, “Biometric handwriting analysis to support parkinson’s disease assessment and grading,” *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 19, 2019. 19
- [38] A. Ammour, I. Aouraghe, G. Khaissidi, M. Mrabti, G. Aboulem, and F. Belahsen, “A new semi-supervised approach for characterizing the arabic on-line handwriting of parkinson’s disease patients,” *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 183, p. 104979, 2020. 19

- [39] R. Walker, R. Zietsma, and W. Gray, “Could a new sensory pen assist in the early diagnosis of parkinson’s?” *Expert Review of Medical Devices*, vol. 11, pp. 243 – 245, 2014. 19
- [40] C. Loconsole, G. D. Cascarano, A. Brunetti, G. F. Trotta, G. Losavio, V. Bevilacqua, and E. Sciascio, “A model-free technique based on computer vision and semg for classification in parkinson’s disease by using computer-assisted handwriting analysis,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 121, pp. 28–36, 2019. 19, 20
- [41] J. Meng, X. Huo, H. Zhao, L. Zhang, X. Wang, and Y. Wang, “Image-based handwriting analysis for disease diagnosis,” *2022 41st Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 4058–4062, 2022. 20
- [42] R. San-Segundo, A. Zhang, A. Cebulla, S. Panev, G. Tabor, K. Stebbins, R. E. Massa, A. Whitford, F. de la Torre, and J. Hodgins, “Parkinson’s disease tremor detection in the wild using wearable accelerometers,” *Sensors*, vol. 20, p. 5817, 10 2020. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7602495/> X, 20
- [43] A. Stefani, A. Lozano, A. Peppe, P. Stanzione, S. Galati, D. Tropepi, M. Pierantozzi, L. Brusa, E. Scarnati, and P. Mazzone, “Bilateral deep brain stimulation of the pedunculo-pontine and subthalamic nuclei in severe parkinson’s disease.” *Brain : a journal of neurology*, vol. 130 Pt 6, pp. 1596–607, 2007. 21
- [44] M. Morris, R. Ianssek, T. Matyas, and J. Summers, “Stride length regulation in parkinson’s disease. normalization strategies and underlying mechanisms.” *Brain : a journal of neurology*, vol. 119 (Pt 2), pp. 551–68, 1996. 21
- [45] J. Schlachetzki, J. Barth, F. Marxreiter, J. Goßler, Z. Kohl, S. J. Reinfelder, H. Gassner, K. Aminian, B. Eskofier, J. Winkler, and J. Klucken, “Wearable sensors objectively measure gait parameters in parkinson’s disease,” *PLoS ONE*, vol. 12, 2017. 21
- [46] M. Yoneyama, Y. Kurihara, K. Watanabe, and H. Mitoma, “Accelerometry-based gait analysis and its application to parkinson’s disease assessment— part 1: Detection of stride

- event,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 22, pp. 613–622, 2014. 22
- [47] A. Salarian, H. Russmann, F. Vingerhoets, C. Dehollain, Y. Blanc, P. Burkhard, and K. Aminian, “Gait assessment in parkinson’s disease: toward an ambulatory system for long-term monitoring,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, pp. 1434–1443, 2004. 22
- [48] L. Liu, H. Wang, H. Li, J. Liu, S. Qiu, H. Zhao, and X. Guo, “Ambulatory human gait phase detection using wearable inertial sensors and hidden markov model,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 21, 2021. 22
- [49] M. Bächlin, M. Plotnik, D. Roggen, N. Giladi, J. M. Hausdorff, and G. Tröster, “A wearable system to assist walking of parkinson’s disease patients,” *Methods of Information in Medicine*, vol. 49, pp. 88 – 95, 2009. 22
- [50] A. Balakrishnan, J. Medikonda, P. K. Namboothiri, and M. Natarajan, “Role of wearable sensors with machine learning approaches in gait analysis for parkinson’s disease assessment: A review,” *Engineered Science*, 2022. 22
- [51] H.-C. Chang, Y.-L. Hsu, S.-C. Yang, J.-C. Lin, and Z.-H. Wu, “A wearable inertial measurement system with complementary filter for gait analysis of patients with stroke or parkinson’s disease,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 8442–8453, 2016. 22
- [52] M. Yoneyama, Y. Kurihara, K. Watanabe, and H. Mitoma, “Accelerometry-based gait analysis and its application to parkinson’s disease assessment— part 2 : A new measure for quantifying walking behavior,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 21, pp. 999–1005, 2013. 22
- [53] “Mediapipe,” 1 2024. [Online]. Available: [https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/pose_landmarker X](https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/pose_landmarker_X), 33

- [54] J. L. Rojas-Arce, L. Jimenez-Angeles, and J. A. Marmolejo-Saucedo, “Quantitation of body movement in a motor physical therapy for parkinson’s disease,” *EAI Endorsed Transactions on Pervasive Health and Technology*, vol. 9, 9 2023. 67