

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO Y ACTUALIZACIÓN DE UN SISTEMA
AUTOMÁTICO Y OBJETIVO DE MEDIDA DE
VARIABLES CINEMÁTICAS DEL MOVIMIENTO DE
LA MANO EN PACIENTES CON INFARTO
CEREBRAL**

FERNANDO FERNÁNDEZ MARTÍN

2022

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y ACTUALIZACIÓN DE UN SISTEMA
AUTOMÁTICO Y OBJETIVO DE MEDIDA DE
VARIABLES CINEMÁTICAS DEL MOVIMIENTO DE
LA MANO EN PACIENTES CON INFARTO
CEREBRAL

Autor

FERNANDO FERNÁNDEZ MARTÍN

Tutores

MARÍA ALONSO DE LECIÑANA CASES

DAVIZ LÓPEZ MARTÍN

Departamento

TECNOLOGÍA FOTÓNICA Y BIOINGENIERÍA

2022

Resumen

El presente TFG tiene como propósito contribuir al desarrollo de una herramienta dirigida a proveer al neurólogo de una evaluación objetiva y automática para valorar el déficit funcional de la mano en pacientes con ictus. El ictus es la principal causa de discapacidad adquirida en la edad adulta y el déficit funcional de la mano es una de las secuelas que más impacta en la calidad de vida. Poder medirlo adecuadamente permitirá mejorar, adaptar y personalizar los distintos programas de rehabilitación.

Se trata de una aplicación clínica basada en realidad virtual tomando como referencia una primera versión existente de la herramienta, diseñada dentro de una línea de investigación desarrollada por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIT-UPM) y el Servicio de Neurología y Centro de Ictus del Hospital Universitario La Paz para el análisis computacional del movimiento de la mano, que emplea como motor gráfico Unity y como sensor de recogida de datos el dispositivo Leap Motion.

Una vez realizado el pilotaje y validación clínica de la aplicación, en este TFG se mejoran la accesibilidad y usabilidad de la misma para facilitar su uso en la práctica clínica y para ello se mejora la interfaz de uso y se implementan nuevas funcionalidades como la generación automática de informes tras el estudio de un paciente. A continuación, con el fin de enriquecer dichos reportes, se incluye un apartado que muestra cambios evolutivos integrando los resultados de los ejercicios realizados a lo largo del tiempo.

Finalmente, se proponen una serie de métricas para la evaluación de la usabilidad de la herramienta como la evaluación heurística, *Think Aloud* o *System Usability Scale* (SUS).

Palabras clave: Ictus, aplicación clínica, medición objetiva, Leap Motion, Unity, realidad virtual, evaluación.

Abstract

The purpose of this BSc is to contribute to the development of a tool aimed at providing the neurologist with a new objective and automatic evaluation to assess the functional deficit of the hand in stroke patients. Stroke is the main cause of acquired disability in adulthood and functional deficit of the hand is one of the aftermath that most impacts quality of life. Being able to measure it properly will allow us to improve, adapt and personalize the different rehabilitation programs.

It is a clinical application based on virtual reality taking as a reference a first existing version of the tool, designed within a line of research developed by the Higher Technical School of Telecommunication Engineers of the Polytechnic University of Madrid (ETSIT-UPM) and the Neurology Service and Stroke Center of the La Paz University Hospital for the computational analysis of hand movement, which uses the Unity graphic engine and the Leap Motion device as the data collection sensor.

Once the piloting and clinical validation of the application has been carried out, in this BSc its accessibility and usability are improved to facilitate its use in clinical practice. To do this, the user interface is improved and new features are implemented, such as the automatic generation of reports after studying a patient. Next, in order to enrich these reports, a section is included that shows evolutionary changes integrating the results of the exercises carried out over time.

Finally, a series of metrics are proposed for the evaluation of the usability of the tool, such as heuristic evaluation, Think Aloud or System Usability Scale (SUS).

Keywords: Stroke, clinical application, objective measurement, Leap Motion, Unity, virtual reality, evaluation.

Agradecimientos

A Álvaro Gutierrez, Dra. María Alonso de Leciñana y David López por el esfuerzo además de la gran ayuda que me han otorgado para facilitarme la elaboración de este trabajo.

A mis padres, hermanos y abuelos, quienes ha sido un pilar fundamental, siempre dándome el apoyo necesario.

A todos mis amigos y compañeros de estudios, que me han dado ánimo para terminar este proceso, en especial a Orianna, por ser un apoyo incondicional en todo momento.

Dedicado Javier Fernández Mendieta.

Índice general

Resumen	V
Abstract	VII
Agradecimientos	IX
Índice General	XI
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tablas	XV
Lista de Acrónimos	XVII
1. Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organización del documento	4
2. Estado del arte	5
2.1. Evaluación del déficit funcional y tratamiento de rehabilitación	5
2.2. Cuantificación del déficit mediante escalas clínicas	6
2.3. Evaluación instrumental de los déficits neurológicos	9
3. Metodología	13
3.1. Materiales y métodos	14
3.1.1. Leap Motion Controller	14
3.1.2. Unity	17
3.1.3. Python	19
3.1.4. Inno Setup	20
3.1.5. GitHub	20
3.1.6. Visual Studio Core	20
3.1.7. Figma	21
3.2. Diseño del sistema	21
3.2.1. Definición de roles de usuario	22
3.2.2. Requisitos funcionales y no funcionales	23
3.2.3. Diagrama Black-Box	27
3.2.4. Diagrama White-Box	27

3.2.5. Diseño del flujo de datos	28
3.2.6. Proceso lógico	29
3.3. Creación del instalador	31
3.4. Cronograma	31
4. Resultados	33
4.1. Herramienta Stroke Data Tracker	33
4.1.1. Nuevo nombre y creación del logo	33
4.1.2. Instalador	34
4.1.3. Batería de ejercicios	35
4.1.4. Interfaz de usuario final	36
4.1.5. Mejoras de la aplicación	43
4.2. Propuesta de evaluación	43
5. Conclusiones	45
5.1. Conclusiones	45
5.2. Líneas futuras	46
Referencias	47
A. Aspectos éticos, económicos, sociales y ambientales	51
A.1. Introducción	51
A.2. Descripción de impactos relevantes relacionados con el proyecto	51
A.3. Análisis detallado de alguno de los principales impactos	52
A.4. Conclusiones	52
B. Presupuesto económico	53
C. Think Aloud Test	55
D. Think Aloud Test	57
E. Manual de usuario	59
F. Código Inno Setup para comprobar pre-requisitos	61

Índice de figuras

1.	Clasificación de la enfermedad cerebrovascular	1
2.	Curva de recuperación en ECV	5
3.	Escala Fugl-Meyer. Mano.	7
4.	Escala NIHSS	8
5.	Kinarm Labs	9
6.	Kinarm Labs Standard Tests. Ejercicios	10
7.	Kinarm Labs Standard Tests. Ejemplo	11
8.	Machine Medicine. Kelvin PD	12
9.	Esquema actual de la investigación	14
10.	Dispositivo Leap Motion	15
11.	Sistema de coordenadas del dispositivo Leap Motion	16
12.	Soporte para las manos	16
13.	Pantallas de edición de Unity. Ventanas.	18
14.	Metodología empleada para el desarrollo de la aplicación. Elaboración propia.	22
15.	Diagrama Black-Box.	27
16.	Diagrama White-Box.	27
17.	Diagrama de clases. Elaboración propia	28
18.	Diagrama de secuencia. Recogida de datos y generación de informes.	30
19.	Diagrama de secuencia. Consulta de informes.	30
20.	Cronograma del proyecto.	31
21.	Logo de la aplicación <i>Stroke Data Tracker</i>	33
22.	Pantalla de inicio del instalador.	34
23.	Ejercicios incluidos en la aplicación	35
24.	Campo para la introducción del identificador del centro clínico.	36
25.	Pantalla de menú de inicio de la aplicación.	36
26.	Pantalla de configuración antes de comenzar un estudio.	37
27.	Pantalla de preparación del ejercicio número 1.	38
28.	Formato de guardado de datos recogidos por el dispositivo.	39
29.	Pantalla de procesamiento de informes.	39
30.	Informe de ejemplo 1.	40
31.	Informe de ejemplo 2.	41
32.	Formato de guardado de los informes generados por la aplicación.	41
33.	Pantalla de consulta de informes.	42

34.	Think Aloud Test	55
35.	SUS (System Usability Scale)	57
36.	Vídeo manual de usuario para instalación y uso de la aplicación.	59

Índice de tablas

1.	Versiones de los softwares empleados.	21
2.	Requisito funcional de identificación de acceso.	23
3.	Requisito funcional de gestión de usuarios.	23
4.	Requisito funcional de gestión de datos e informes.	24
5.	Requisito funcional de contenido de informes.	24
6.	Requisito funcional de recogida de datos por el Leap Motion.	24
7.	Requisito funcional de eliminación de datos.	25
8.	Requisito funcional de restricciones de integridad.	25
9.	Requisito no funcional de interfaz de usuario.	25
10.	Requisito no funcional de disponibilidad.	26
11.	Requisito no funcional de privacidad.	26
12.	Requisito no funcional de notificaciones.	26
13.	Tabla de mejoras	43
14.	Costes de personal.	53
15.	Costes de recursos materiales.	53
16.	Costes totales.	54

Lista de Acrónimos

ECV: Enfermedades cerebrovasculares.

AIT: Ataque isquémico transitorio.

TFG: Trabajo de fin de grado.

SDT: Stroke Data Tracker.

NIHSS: *National Institute of Health Stroke Scale.*

TIC: Tecnologías de la información y la comunicación.

SUS: System Usability Scale.

HULP: Hospital Universitario La Paz.

ETSIT: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación.

UPM: Universidad Politécnica de Madrid.

IdiPAZ: Instituto de Investigación del Hospital Universitario La Paz.

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

El **ictus** es una enfermedad cerebrovascular que tiene una alta incidencia y prevalencia, siendo la principal causa de discapacidad adquirida en adultos, lo que resulta en un importante impacto sanitario y social. Es causada por un trastorno circulatorio que altera temporal o permanentemente la función de una o más partes del cerebro [1]. El tipo de ictus depende de la naturaleza de la lesión, pudiendo distinguir entre ictus **isquémico** y **hemorrágico**. El ictus isquémico incluye el ataque isquémico transitorio (AIT) y el infarto cerebral y se debe a la falta de aporte de sangre a áreas específicas del parénquima cerebral como consecuencia de una oclusión arterial, mientras que el ictus hemorrágico se debe a la fuga de sangre del lecho vascular por la ruptura de un vaso sanguíneo en el cerebro. Dentro del ictus hemorrágico se distinguen la hemorragia cerebral y la hemorragia subaracnoidea.

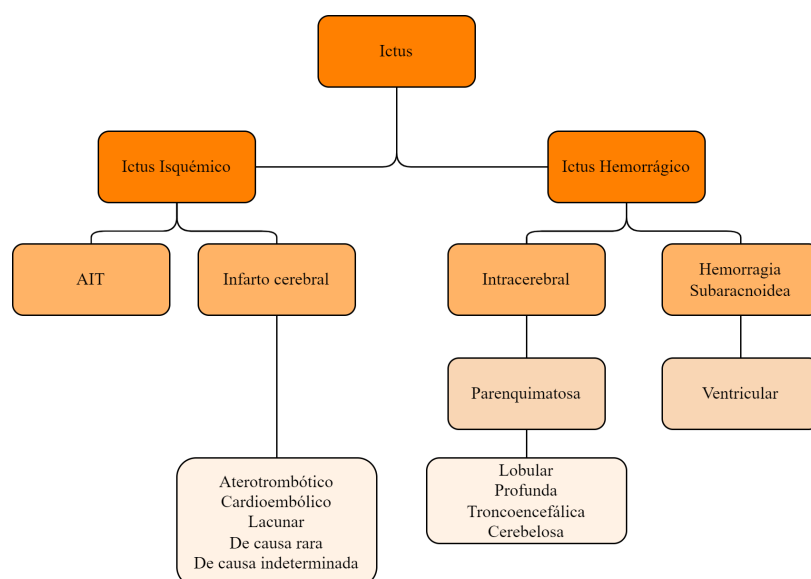


Figura 1: Clasificación de la enfermedad cerebrovascular (ECV) según su naturaleza [1]. Elaboración propia.

Los **síntomas** de un ictus [2] dependen del área cerebral afectada, pueden ser:

- Pérdida repentina de fuerza o sensibilidad en la cara, brazo o pierna en un lado del cuerpo.
- Dificultad o imposibilidad tanto para la expresión como la comprensión del lenguaje.
- Pérdida repentina de visión en uno o en ambos ojos.
- Dificultad repentina para caminar, aparición de mareos, o pérdida del equilibrio o de la coordinación.
- Dolor fuerte de cabeza, repentino, sin causa conocida.

Se debe tener en cuenta que los síntomas se producen en el lado del cuerpo contralateral al hemisferio cerebral afectado [3].

Actualmente, unas 27 000 personas mueren cada año en España a causa de un ictus. Se prevé que las muertes relacionadas con ictus aumenten un 39% entre 2015 y 2035, debido principalmente al continuo envejecimiento de la población [4]. Los supervivientes de enfermedades cerebrovasculares a menudo tienen secuelas físicas relacionadas con la movilidad, la visión o el habla, así como trastornos del estado de ánimo, cognitivos y de personalidad. Esto afecta su función y calidad de vida. Se estima que dos de cada tres supervivientes de un ictus presentan algún tipo de secuelas [4].

Debido a que, para su funcionamiento normal, el cerebro depende de un suministro directo de oxígeno y glucosa al flujo sanguíneo, es muy sensible a su deficiencia. Esto significa que los tratamientos agudos específicos deben aplicarse de manera temprana y urgente para minimizar el daño [5]. Una vez finalizada la fase aguda, la causa del ictus debe diagnosticarse para instaurar el tratamiento preventivo. A lo largo del proceso se debe realizar una evaluación adecuada de los déficits, tanto en la fase aguda para planificar y evaluar el proceso de rehabilitación, como en la fase crónica para determinar la magnitud de las secuelas. Esta evaluación se realiza en la práctica mediante **escalas clínicas** que clasifican a los pacientes en diferentes grados de afectación neurológica según las puntuaciones obtenidas [6].

Las escalas clínicas son de gran utilidad. Sin embargo, en el caso de la evaluación del déficit funcional de la mano, no son suficientemente sensibles ni discriminativas y están basadas en la subjetividad del evaluador lo que conduce a imprecisión en la cuantificación del déficit.

Es en este punto donde el Laboratorio de Robótica y Control (Robolabo) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT), junto con el Servicio de Neurología del Hospital Universitario La Paz (HULP), a través del Instituto de Investigación del Hospital Universitario La Paz (IdiPaz) colaboran con el fin de desarrollar una herramienta objetiva para la cuantificación del déficit funcional de la mano, que emplea tecnología relacionada con la captura óptica y el análisis de la cinemática.

Partiendo de una primera versión funcional básica de la herramienta, diseñada dentro de una línea de investigación para el análisis computacional del movimiento de

la mano, desarrollada por la ETSIT-UPM y el Servicio de Neurología y Centro de Ictus del Hospital Universitario La Paz el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) tiene como fin actualizar, ampliar y mejorar dicha herramienta facilitando su usabilidad en la práctica clínica. En relación con el *hardware* elegido, se emplea el dispositivo Leap Motion, tanto por sus importantes prestaciones, como por su fácil transporte. Todo ello conformaría una versión piloto que prepara el terreno para continuar el desarrollo, en un futuro, con la realización de un ensayo clínico a mayor escala.

1.2. Objetivos

El trabajo por desarrollar se puede dividir en:

1. La modificación (y mejora) de la **aplicación** actual en concreto:
 - 1.1. Mejora de **aspecto**: interfaz más simple e intuitiva junto con un aumento en las facilidades para su uso (instrucciones, videos de apoyo y manuales).
 - 1.2. Mejora de **seguridad**: reorganización del sistema de tal forma que fallos inesperados en la recogida de datos no comprometan el correcto guardado y procesado de la información.
 - 1.3. Mejora de **disponibilidad**: agregación de componentes que permitan la posibilidad de ejecución del sistema en más sistemas operativos o más procesadores, en resumen: en más dispositivos.
 - 1.4. Integración y mejora de generación de **informes**: del estudio realizado, de tal forma que el usuario tenga la opción de visualizar los informes en el momento de la prueba o bien almacenarlos para su posterior visualización. Además de ello, se diseñará un servicio de sistema de consulta de informes en la propia aplicación, de tal forma que el usuario podrá acceder a todos los informes de manera intuitiva. Este sistema de consulta será preciso y guiado, donde se especifique usuario y fecha para facilitar su selección. Cabe destacar que todas las modificaciones y nuevos servicios deberán estar integrados en la misma aplicación (desarrollada en Unity, lenguaje de programación C#)
 - 1.5. Creación de un **instalador** automático para la herramienta, que compruebe los requisitos necesarios e instale todos los programas necesarios desde un solo archivo.
2. La propuesta de **métodos de evaluación** para comprobar la usabilidad, viabilidad y el impacto de la herramienta.

1.3. Organización del documento

El documento se estructura en los siguientes capítulos:

- En el Capítulo 2, se muestra el estado del arte. En la primera parte se presenta una explicación teórica de las enfermedades cerebrovasculares y en la segunda parte se detallan otras tecnologías de medición objetiva existentes.
- En el Capítulo 3, se muestra la metodología llevada acabo, detallando la situación de partida, materiales y métodos empleados, diseño del sistema y la planificación.
- En el Capítulo 4, se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la aplicación y la propuesta de evaluación sobre la usabilidad de la misma.
- En el Capítulo 5, se exponen las conclusiones resultantes del proyecto y se proponen líneas futuras.
- En el anexo A se detallan los impactos éticos, económicos, sociales y medioambientales.
- En el anexo B se muestra el presupuesto económico detallado del proyecto.
- En los anexos C y D se muestran diferentes propuestas de evaluación.
- En el anexo E se muestra un vídeo manual de la herramienta.
- En el anexo F se muestra el código necesario para los pre-requisitos del instalador.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Evaluación del déficit funcional y tratamiento de rehabilitación

Una vez establecido el déficit neurológico como consecuencia del ictus es fundamental realizar una adecuada rehabilitación para minimizar las secuelas, mejorar la funcionalidad del paciente, su calidad de vida y reducir el impacto de la enfermedad en todos sus aspectos. Para ello es necesario una adecuada cuantificación del déficit.

La rehabilitación debe iniciarse lo antes posible, ya que cuanto antes se realice, mayor será la recuperación funcional. Esta recuperación es máxima en el primer mes y se estima que se mantenga este período máximo de recuperación hasta el tercer mes. Después de este período, las posibilidades de recuperación disminuyen gradualmente. Como regla general, el patrón de daño es estable en unos 6 meses y posteriormente se considera difícil de mejorar. Desde este momento el período de recuperación del habla y el equilibrio es largo y puede durar hasta dos años [7]. (Ver Figura 2.)

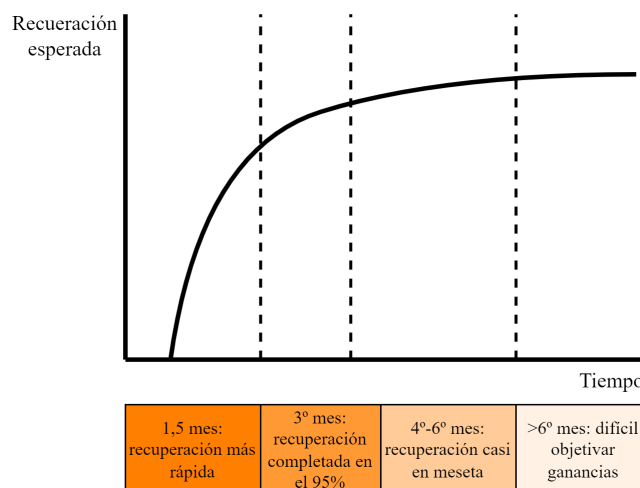


Figura 2: Curva de recuperación esperada en ECV [7]. Elaboración propia.

La **mano** es una parte del cuerpo fundamental para desarrollar las actividades de la vida cotidiana con normalidad, por lo que su déficit impacta muy negativamente en las capacidades del paciente. En adición, debido a la distancia de la línea media del cuerpo, la recuperación funcional de las manos suele ser más lenta que extremidades como brazos o piernas [8].

2.2. Cuantificación del déficit mediante escalas clínicas

La escala clínica es una herramienta que ayuda a evaluar el estado de un paciente y tomar decisiones tanto en el diagnóstico como en el tratamiento. Son fáciles de aplicar y un recurso necesario para los profesionales. Con respecto la cuantificación del déficit de los pacientes con ictus y de especial interés a mencionar en este TFG, existen escalas que evalúan distintos aspectos:

1. **Déficit neurológico:** nos permiten cuantificar la gravedad del ictus, detectar cambios evolutivos y planificar el tratamiento. Entre las escalas más utilizadas destacan:

1.1. **Fugl Meyer** (Sección C)

Se trata de una escala específica del ictus basada en la medición de la disfunción y los trastornos del movimiento tales como el equilibrio, la sensibilidad y el estado articular en pacientes que presentan hemiplejía/hemiplejía [9]. La escala es muy extensa, pero se puede dividir en secciones según el área a valorar. Para este TFG, es de relevancia la sección referente a la extremidad superior y en concreto a la mano, que se muestra en la figura 3.

1.2. **NIHSS** (*National Institute of Health Stroke Scale*)

Ayuda a establecer la gravedad del ictus con una puntuación total establecida entre cero (ausencia de déficit) y 42 puntos (déficit máximo). Según la puntuación obtenida se puede clasificar la gravedad del ictus en 0 si no hay déficit, 1-4 si déficit es leve, 5-15 se trata de un déficit moderado, entre 16-20 se clasifica como déficit moderado-grave y mayores que 20, grave [10]. En la figura 4 se muestra la escala detallada.

1.3. **Balance muscular** (Escala de Daniels)

La escala de Daniels o test de Daniels es un instrumento utilizado para medir la fuerza muscular, especialmente en pacientes con trastornos neuromusculares. Fue redactada en 1946 por la americana Lucille Daniels. En ella se valora la fuerza muscular numéricamente del cero (el músculo no se contrae, parálisis completa) al cinco (el músculo se contrae y se mueve al máximo para resistir la gravedad) [11].

2. Déficit funcional.

2.1. Índice de Barthel

Mide la capacidad de una persona para realizar diez actividades básicas cotidianas (comer, aseo personal, desplazamientos, etc.), obteniéndose el grado de dependencia del paciente de forma numérica. La puntuación total es de cien puntos [12].

2.2. Escala de Rankin modificada

Es una de las escalas más utilizadas actualmente. Mide el grado de discapacidad desde cero puntos (sin secuelas) a cinco (déficit grave) siendo la puntuación seis para el caso de fallecimiento [13].

3. Escalas de calidad de vida.

3.1. EQ-5D (*European Quality of Life-5 Dimensions*)

Se trata de un instrumento de medición de la calidad de vida relacionada con la salud. Los propios individuos primero evalúan su salud mediante un sistema descriptivo que gradúa la gravedad de la afectación en cinco dimensiones: movilidad, autocuidado, actividades de la vida diaria, dolor o malestar y ansiedad o depresión. Posteriormente se evalúa de forma general en una escala visual analógica [14].

C. MANO se puede dar apoyo en el codo para mantener flexión de 90°, no apoyo en la muñeca, compare con mano no afectada, los objetos están interpuestos, agarre activo		ning.	parcial	total
Flexión en masa	Desde extensión total activa o pasiva	0	1	2
Extensión en masa	Desde flexión total activa o pasiva	0	1	2
AGARRE				
a. Agarre de gancho flexión en IFP y IFD (dígitos II – V) Extensión en MCF II-V	No puede realizar Puede mantener posición pero débil Mantiene posición contra resistencia	0	1	2
b. Aducción de pulgar 1er CMC, MCF, IFP a 0°, trozo de papel Entre pulgar y 2da articulación MCF	No puede realizar Puede sostener papel pero no contra tirón Puede sostener papel contra tirón	0	1	2
c. Agarre tipo pinza, oposición Pulpejo del pulgar, contra pulpejo del 2 do dedo, se tira o hala el lápiz hacia arriba	No puede realizar Puede sostener lápiz pero no contra tirón Puede sostener lápiz contra tirón	0	1	2
d. Agarre cilíndrico Objeto en forma cilíndrica (pequeña lata) Se tira o hala hacia arriba con oposición en dígitos I y II	No puede realizar Puede sostener cilindro pero no contra tirón Puede sostener cilindro contra tirón	0	1	2
e. Agarre esférico Dedos en abducción/flexión, pulgar opuesto, bola de tenis	No puede realizar Puede sostener bola pero no contra tirón Puede sostener bola contra tirón	0	1	2
Total C (máx. 14)				

Figura 3: Escala Fugl-Meyer para la evaluación de la mano [15].

Sección C.

Escala NIHSS: <i>National Institute of Health Stroke Scale</i> . Fechas/hora:										
1a. Nivel de conciencia	Alerta	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Somnolencia	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Obnubilación	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Coma	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1b. Nivel de conciencia Preguntas verbales ¿En qué mes vivimos? ¿Qué edad tiene?	Ambas respuestas son correctas	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Una respuesta correcta	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Ninguna respuesta correcta	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1c. Nivel de conciencia. Órdenes motoras 1. Cierre los ojos, después ábralos. 2. Cierre la mano, después ábrala.	Ambas respuestas son correctas	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Una respuesta correcta	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Ninguna respuesta correcta	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2. Mirada conjugada (voluntariamente o reflejos oculocefálicos, no permitidos oculo vestibulares) Si lesión de un nervio periférico: 1 punto.	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Paresia parcial de la mirada	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Paresia total o desviación forzada	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3. Campos visuales (confrontación) Si ceguera bilateral de cualquier causa: 3 puntos. Si extinción visual: 1 punto	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Hemianopsia parcial	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Hemianopsia completa	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Ceguera bilateral	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4. Paresia facial	Normal.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Paresia leve (asimetría al sonreír.)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Parálisis total de músc. facial inferior	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Parálisis total de músc. facial superior e inferior.	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5. Paresia de extremidades superiores (ES) Se explora 1ª la ES no parética Debe levantar el brazo extendido a 45° (decúbito) o a 90° (sentado). No se evalúa la fuerza distal Se puntúa cada lado por separado. El 9 no se contabiliza en el cómputo global.	Mantiene la posición 10°.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Claudica en menos de 10° sin llegar a tocar la cama.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Claudica y toca la cama en menos de 10°.	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Hay movimiento pero no vence gravedad.	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6. Paresia de extremidades inferiores (EI) Se explora 1ª la EI no patética. Debe levantar la pierna extendida y mantener a 30°. Se puntúa cada lado por separado. El 9 no se contabiliza en el cómputo global.	Mantiene la posición 5°.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Claudica en menos de 5° sin llegar a tocar la cama.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Claudica y toca la cama en menos de 5°.	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Hay movimiento pero no vence gravedad.	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7. Ataxia de las extremidades. Dedo-nariz y talón-rodilla. Si déficit motor que impida medir dismetría: 0 pt.	Normal.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ataxia en una extremidad.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Ataxia en dos extremidades.	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8. Sensibilidad. Si obnubilado evaluar la retirada al estímulo doloroso. Si déficit bilateral o coma: 2 puntos.	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Leve o moderada hipoestesia.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Anestesia.	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9. Lenguaje. Si coma: 3 puntos. Si intubación o anartria: explorar por escritura.	Normal.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Afasia leve o moderada.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Afasia grave, no posible entenderse.	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Afasia global o en coma	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10. Disartria. Si afasia: 3 puntos	Normal.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Leve, se le puede entender.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Grave, ininteligible o anartria.	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Intubado. No puntúa.	9	9	9	9	9	9	9	9	9
11. Extinción-Negligencia-Inatención. Si coma: 2 puntos.	Normal.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Inatención/extinción en una modalidad	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Inatención/extinción en más de una modalidad.	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TOTAL										

Figura 4: Escala de ictus del *National Institute of Health Stroke Scale* (NIHSS) [10].

A pesar de su utilidad, las escalas clínicas tienen algunas limitaciones. Por un lado, tienen poca sensibilidad y capacidad discriminativa, especialmente en casos menos graves. Además, las puntuaciones asignadas a las distintas pruebas y ejercicios que las componen están sujetas a la subjetividad del personal clínico. En el caso de los déficits funcionales de la mano, estas limitaciones de las escalas se pueden traducir en una infravaloración de ciertos déficits y, por lo tanto, en aplicación de tratamientos inadecuados, lo que puede dificultar la recuperación funcional impactando negativamente en la calidad de vida del paciente.

2.3. Evaluación instrumental de los déficits neurológicos

La atención médica ha cambiado significativamente en los últimos años debido a la acumulación de conocimientos y avances tecnológicos en el sector de la salud y de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC). La aparición de tecnologías inimaginables hace tan solo unas décadas, ha provocado cambios importantes en la composición de los servicios de salud [16]. El desarrollo exponencial de la tecnología y el modelo de prevención-extensión en medicina (prevención de enfermedades y prolongación de la vida), se encuentran entre los seis motores de cambio que facilitarán el mundo para 2030, según futurólogos como Ray Hammond [17].

Gracias a la aparición de nuevas tecnologías, se facilita la creación de nuevas técnicas y sistemas para la medición objetiva, análisis y cuantificación del déficit motor en pacientes con ictus. A continuación se mencionan algunas de las tecnologías más relevantes en relación con el déficit motor del miembro superior.

En un enfoque hacia la rehabilitación, encontramos **KINARM**, un dispositivo de kinesiología que permite medir los patrones de movimiento del cuerpo a través de un sistema robot conectado con realidad virtual. El dispositivo ha evolucionado significativamente en sus últimas versiones, hasta el punto de que la empresa cuenta actualmente con un catálogo de sistemas denominado Kinarm Labs. Estos sistemas comparten una configuración de robot que permite a los sujetos interactuar con la realidad virtual 2D usando sus brazos y manos [18].

Cabe destacar el sistema **Kinarm Exoskeleton Lab**, que consiste en un soporte parecido a una silla de ruedas con un brazo adjunto que recoge las fuerzas aplicadas mediante sensores o torques y las simula a gran escala de forma que permite a los pacientes realizar movimientos de flexión y extensión en las articulaciones del hombro y el codo [19].



Figura 5: Kinarm Labs. (a) Kinarm Exoskeleton Lab y (b) su puesta en práctica.

citemisc6

Sin duda alguna, la revolución médica que caracteriza a la empresa son los **Kinarm Standard Tests**, que proporcionan medidas sensibles y objetivas de las funciones cognitivas, motoras y sensoriales a través de la medición precisa del comportamiento humano, un método novedoso que denominan *conductografía* (ver Figura 6). Dichas pruebas son elegidas por un investigador clínico que las selecciona entre un conjunto de protocolos estandarizados, desde una evaluación amplia y rápida en solo 20 minutos, hasta una evaluación más completa en 60 minutos. A los pocos segundos del examen, los algoritmos automatizados generan medidas objetivas y precisas de las deficiencias neurológicas [20].

Kinarm Standard Tests™			
Test	Behavioural Task	Brain Function	Duration
COGNITIVE			
Reverse Visually Guided Reaching 	Subject reaches from a central target to a peripheral target where the visual feedback is reversed compared to the actual hand position.	Cognitive control of visuomotor skills Inhibitory control Attention	3.5 min/arm
Object Hit & Avoid 	Subject hits away targets with either hand and avoids distractors. Speed and number of objects increase with time.	Rapid motor decisions Inhibitory control Spatial attention	2.5 min
Trails A&B 	Trail A: trace a sequence of targets numbered 1 to 25; Trail B: trace alternating numeric-alpha sequence of targets 1-A-2-B etc.	Executive function: task switching	2.5 min
Spatial Span 	Sequence of squares displayed; subject replays sequence by reaching to the appropriate squares in sequence.	Visuospatial working memory	5.5 min
Paired-Associates Learning* 	Images shown in spatial locations then hidden. Upon presentation of an image, subject must indicate the spatial location of the hidden image. *3.9 task only	Visuospatial working memory	5 min
MOTOR			
Visually Guided Reaching 	Subject reaches from a central target to a peripheral target.	Visuomotor skills Multi-joint coordination	2 min/arm
Object Hit 	Subject hits away balls with either hand. Speed and number of balls increase with time.	Rapid visuomotor skills Spatial skills	2.5 min
Ball on Bar 	Subject moves a virtual ball balanced on a bar held by both hands to spatial targets.	Bimanual coordination Visuomotor skills	3.5 min
Arm Posture Perturbation 	Subject maintains hand at target and returns to the target after an unexpected disturbance (Exo only).	Goal-directed motor corrections	2 min/arm
Elbow Stretch 	Subject relaxes; robot extends and flexes the elbow repeatedly (Exo only).	Assess presence of spasticity and high tone	5 min/arm
SENSORY			
Arm Position Matching 	Robot moves one arm; the subject mirror-matches position with their other arm.	Somatosensation: position sense	3 min/arm
Arm Movement Matching 	Robot moves one arm; the subject mirror-matches movement with their other arm.	Somatosensation: kinesthesia	3 min/arm

©2021 Kinarm Standard Tests, v. Dextent-E 3.9, BKIN Technologies Ltd.

Figura 6: Kinarm Labs Standard Tests. Ejercicios de la *conductografía* [20].

Las tareas involucran varios aspectos de los sistemas sensoriales, motores y cognitivos del sujeto en (a veces) conductas activas y altamente exigentes. Cada tarea es fácil de entender, breve y proporciona parámetros cinemáticos y posicionales con gran validez. Dentro del campo sensorial, las tareas se enfocan a hacer coincidir de la posición de un brazo con la del otro (movido por el robot), mientras que en el campo motor los ejercicios se basan en alcances guiados visualmente. Por último, en el campo cognitivo se basa en el trazado de senderos siguiendo una secuencia de dianas numeradas del 1 al 25.

Una vez que las pruebas se han realizado, un análisis automático proporciona informes de tareas y sesiones. El informe de tareas proporciona valores de parámetros y percentiles asociados con una gran cantidad de sujetos sanos (controles) y describe el impacto de la edad, el sexo y la destreza manual en el rendimiento.

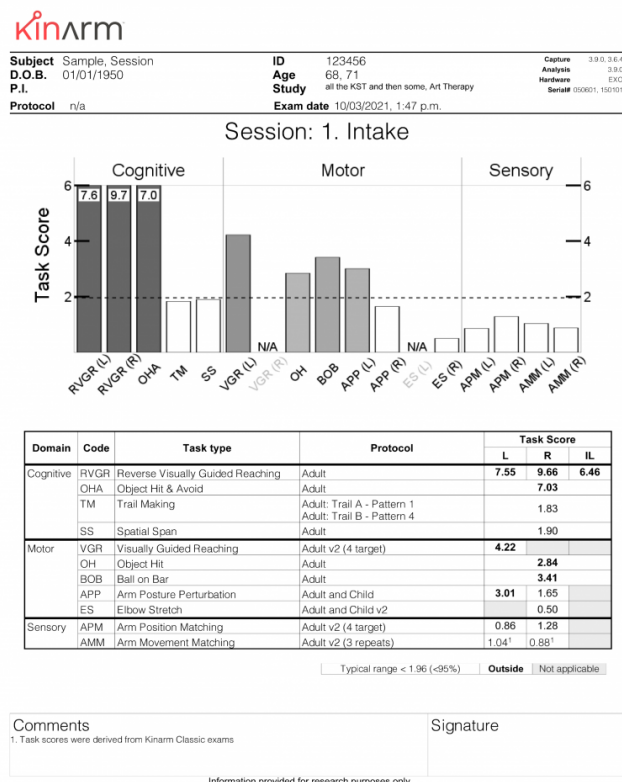


Figura 7: Kinarm Labs Standard Tests. Informe de sesión de muestra [20].

La anterior figura 7 muestra un ejemplo de informe generado para un paciente de 71 años, en el que se puede apreciar una gráfica que muestra la puntuación para cada una de las pruebas en sus respectivos campos. En la tabla inferior se recogen los datos de una forma más detallada.

Por otro lado, la empresa **Machine Medicine** también ha desarrollado un sistema que mide objetivamente los movimientos del cuerpo. Esta herramienta se denomina *Kelvin PD*, está dirigida a pacientes con enfermedad de Parkinson y utiliza un

algoritmo de inteligencia artificial que busca correlacionar los resultados con una escala clínica. Su funcionamiento se basa en la grabación de un vídeo de un sujeto realizando un ejercicio guiado. Tras ello, la herramienta analiza el video para determinar el movimiento de una parte del cuerpo del paciente con suficiente precisión para detectar el movimiento de los dedos, entre otras funcionalidades [21].

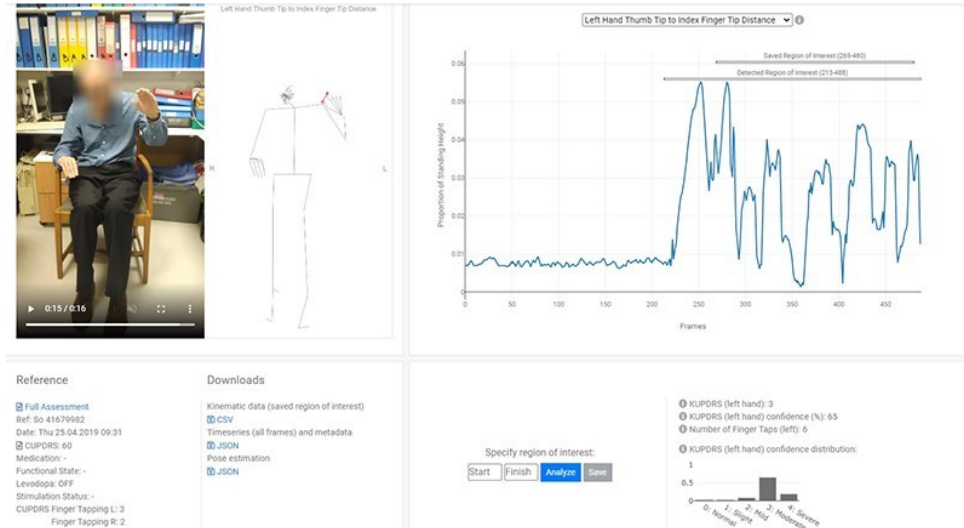


Figura 8: Machine Medicine. Registro de paciente realizando la actividad de evaluación neurológica empleando la herramienta *Kelvin PD* [21].

Por otra parte, **ArmeoSenso** [22] comprende un sistema de captura de movimiento basado en sensores portátiles junto con un robot diseñado para restaurar el movimiento de las extremidades superiores, que funciona en tres dimensiones y consta de un soporte para el brazo, un soporte para el antebrazo y una empuñadura sensible a la presión. Un programa informático interactivo controla el dispositivo y proporciona información visual en la pantalla. El objetivo de este dispositivo es mejorar la fuerza y resistencia a las personas con deterioro leve del miembro superior [23].

En 2021 un estudio [24] de la Universidad Federal de Itajubá, identificó los dispositivos de movimiento de las extremidades superiores más utilizados y los clasificaron en cinco categorías diferentes: *RGB-D skeletal tracking* (Kinect), *RGB object tracking* (Regular RGB), *IR marker tracking* (Optitrack), *Leap Motion* y *RGB markerless body tracking* (Playstation EyeToy). Concluye que la mayoría de los dispositivos empleados usan Kinect, debido a su bajo coste, gran disponibilidad y buena eficacia de seguimiento. Por el contrario, hay ciertas limitaciones como la distancia de detección, incapacidad de capturar movimiento a menos de cinco imágenes por segundo y los problemas de detección ante la luz solar, que hacen que su uso esté disminuyendo con el paso del tiempo. También se concluyó que Leap Motion ha incrementado su uso, debido a que comparte muchas de las ventajas que posee la Kinect a la vez que soluciona problemas mediante el empleo de sensores infrarrojos.

Capítulo 3

Metodología

Este trabajo es parte de un proyecto más amplio fruto de la colaboración entre la ETSIT-UPM y el Servicio de Neurología del Hospital Universitario La Paz, dirigido al desarrollo de herramientas para el análisis cinemático de la funcionalidad de la mano en pacientes con ictus. Tras una primera versión de la aplicación pilotada y validada en un estudio observacional caso-control y en un estudio longitudinal para valorar la capacidad de la herramienta para detectar cambios evolutivos, en este trabajo se plantea la realización de mejoras en la interfaz para facilitar el uso por los pacientes y el clínico, la habilitación de funciones de identificación de los pacientes y sus datos evolutivos. Además de ello, se propone la generación de informes clínicos y reportes de los datos evolutivos, el almacenamiento de datos con fines de investigación y desarrollo posterior (como paso previo a la implantación en clínica).

En el esquema de la figura 9, se puede observar en detalle el estado actual de la investigación en la que se enmarca el presente trabajo.

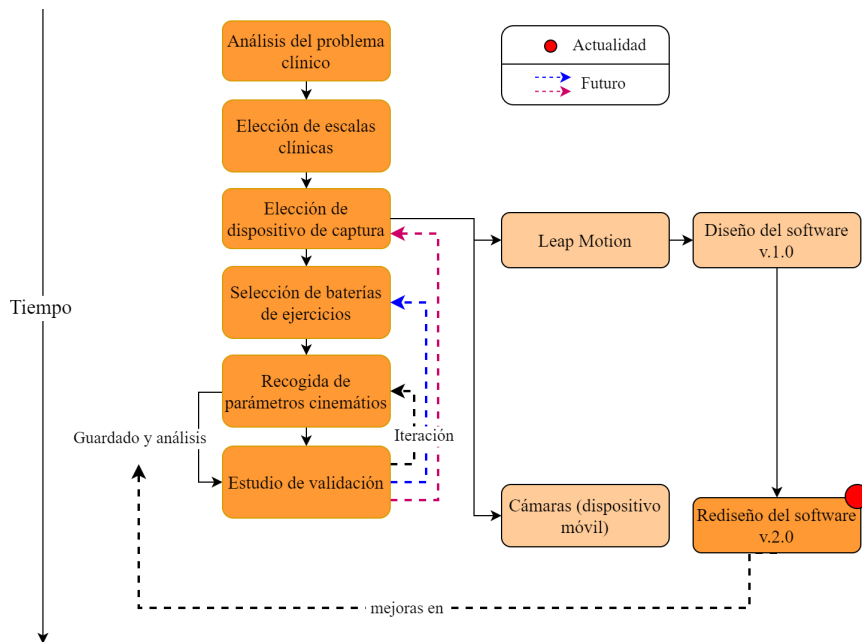


Figura 9: Esquema del estado actual de la investigación.
Elaboración propia.

3.1. Materiales y métodos

Para comenzar, se procede a la elección de las tecnologías y sistemas utilizados para el desarrollo de la herramienta de medición objetiva de patrones de movimiento de la mano en pacientes con infarto cerebral.

Como dispositivo de medición, se empleará el **Leap Motion** junto con un soporte para las manos creado anteriormente (figura 12) mediante impresión 3D con el fin de que la medición sea lo más homogénea posible y que los brazos de los pacientes se mantuvieran fijos a la hora de realizar los ejercicios. En el plano de diseño de la herramienta, el programa gráfico que más se ajusta a las necesidades es **Unity** y para el procesamiento, análisis y generación de informes se empleará el lenguaje de programación **Python**.

Por último, gracias al sistema de instalación basado en scripts de software libre empleando como lenguaje de programación Pascal, **Inno Setup**, se empleará para la creación del instalador.

3.1.1. Leap Motion Controller

Se trata de un dispositivo de captura óptica del movimiento, muy económico (90€), creado por la empresa **Ultraleap** [25], que es conectado a través de USB a un ordenador con sistema operativo Mac o Windows. Su tecnología se basa en dos cámaras y tres LEDs infrarrojos, que poseen una gran precisión (0,01 mm) y una alta frecuencia de muestreo (120 Hz). El diseño de este dispositivo está destinado

al reconocimiento 3D del movimiento y resulta adecuado para el reconocimiento del movimiento de las manos.



Figura 10: Dispositivo Leap Motion: (a) tamaño del dispositivo y (b) visualización de las manos virtuales captadas en un ejercicio real [25].

Su funcionamiento es el siguiente: el dispositivo lee la información que recibe del sensor y la envía al *tracking software*, que procesa la información de la imagen extrayendo la información coincidente con elementos como los dedos, manos y brazos. Tras ello podemos observar una visualización virtual interactiva de nuestras manos [25].

Dentro de las especificaciones técnicas del dispositivo destacamos las siguientes: posee un gran campo de visión $140 \times 120^\circ$ y un área de interacción de entre 2,5 y 60 cm. Tiene la capacidad de distinguir 27 elementos distintos de la mano (huesos y articulaciones) y rastrearlos incluso cuando están ocultos por las propias manos. Pesa 32 gramos y tiene unas dimensiones de $30 \times 80 \times 13\text{mm}$ [26], un tamaño ideal para su fácil transporte, atributo muy importante para el proyecto.

Leap Motion cuenta con una amplia comunidad de desarrolladores, muy activos en plataformas como GitHub o en la propia web de la empresa Ultraleap. Entre los lenguajes de programación más empleados para el desarrollo del Leap Motion destacan **JavaScript** y **C#**.

Cuenta con una plataforma de seguimiento de las manos muy robusto y flexible, que en su última versión llamada *Gemini* [27] ha lanzado una serie de mejoras en el registro de manos que se solapan, mayor precisión insensibilidad en la rotación, mayor velocidad de inicialización y la adaptación a diferentes manos anatómicamente hablando, entre otras muchas mejoras. Respecto a la API de Leap Motion, se divide en una serie de objetos:

- **Frame**, mediante el cual se accede a toda la información capturada.
- **Hand**, posee una lista de manos, dedos y gestos capturados en cada frame. El objeto **Finger** contiene cuatro objetos **Bone** que representan los huesos anatómicos de los dedos.

El dispositivo emplea un sistema de coordenadas cartesianas en la que el plano XZ está situado de forma paralela al lugar en el que se apoya el Leap Motion. El eje Y representa lo vertical con respecto al dispositivo.

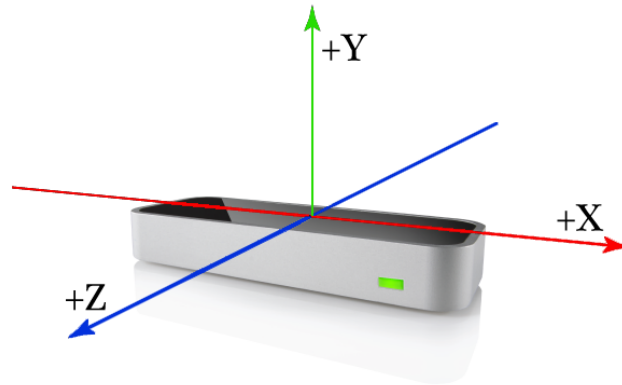


Figura 11: Sistema de coordenadas del dispositivo Leap Motion [25]

El hecho de que este dispositivo no emplea ningún tipo de marcadores hace que resulte de especial interés para los pacientes con ictus, ya que no se producen artefactos en la recogida de datos al encontrarse las manos totalmente desnudas. Junto con sus características de fácil transporte y las últimas mejoras para el reconocimiento de manos de diferentes formas y tamaños, se decide continuar con el empleo de este dispositivo para la recogida de datos.



Figura 12: Soporte de manos impreso 3D para la correcta colocación de las manos por parte de los pacientes [28] .

3.1.2. Unity

Unity [29] es un motor gráfico diseñado para el desarrollo de videojuegos, creado por la empresa Unity Software Inc. Fue lanzado al mercado por primera vez en el año 2005, para uso exclusivamente de la plataforma Mac, obteniendo un gran éxito consolidándose en 2010 con el lanzamiento de Unity 3 [30] (en ese momento solo la pueden usar desarrolladores profesionales).

Es en el año 2017 cuando Unity pasa a denominar sus versiones según el año en el que eran lanzadas, siendo la versión estable Unity 2020.3.30f1 la empleada en el presente TFG.

Una de las características más atractivas de Unity es la gran comunidad que lo engloba, lo que facilita el acceso a documentación actualizada, interactiva y hace que la curva de aprendizaje sea más rápida. Además, posee una serie de *plugins* que permiten la interacción con dispositivos como el Leap Motion y una interfaz muy intuitiva y fácilmente interactuarle. Una de las razones por las que se emplea Unity es por la libertad de desarrollo que permite al usuario.

Otras características importantes son:

- Servicios que complementan la creación del videojuego, como analítica, colaboración y su capacidad de monitorización.
- Soporta la exportación a diversas plataformas sin necesidad de rediseñar la aplicación.
- Soporta distintos lenguajes de programación como UnityScript, C# o Boo (sintaxis inspirada en Python). Se empleará C# debido a su potencia, al paso de parámetros, a los objetos y sus propiedades, control de versiones, buena interacción con el sistema operativo... [30]

Para poder usar el programa es necesario descargar *Unity Hub* y crear una cuenta con un identificador. Esto permite el acceso al programa Unity con todas sus funcionalidades.



Figura 13: Pantalla de edición principal de Unity con los nombres de las ventanas principales.

La ventana principal del editor se compone de ventanas con pestañas que pueden ser variadas según las preferencias personales del desarrollador y el tipo de trabajo que realiza.

- La ventana de jerarquía consta de una representación de texto jerárquica de cada objeto en la escena.
- La ventana de proyecto muestra los activos disponibles para su uso en la biblioteca. Cuando se importan recursos al proyecto, aparecen aquí. Algunas de las subcarpetas dentro de los archivos del proyecto son: fuentes, imágenes y gifs, scripts y por último los paquetes de compatibilidad de Leap Motion (*Ultraleap Unity Modules*).
- La ventana de edición, como su nombre indica, permite una fácil navegación y edición de escenas. La vista de escena puede mostrar una perspectiva 2D o 3D según el tipo de proyecto en el que esté trabajando. Es en esta ventana donde se crean los elementos de las escenas.
- La ventana de previsualización nos permite interactuar con el modelo final del proyecto. Además, permite cambiar la escala a distintas resoluciones de pantalla para comprobar si el proyecto tiene un diseño responsivo.
- La ventana de inspección se utiliza para ver y modificar propiedades de objetos, opciones y otras configuraciones. Cuando se selecciona un objeto en una jerarquía o vista de escena, el inspector muestra las propiedades de todos los elementos y materiales del objeto y le permite modificarlos.

3.1.3. Python

Python es un lenguaje de programación de código abierto operado por *Python Software Foundation*. Fue creado por Guido van Rossum a fines de la década de 1980, aunque no se publicó por primera vez hasta 1991. Desde entonces, se han publicado varias versiones y se clasifican en tres grupos principales: Python 1, Python 2 y Python 3. Python 1 se lanzó en 1994 y recibió varios lanzamientos hasta que se suspendió en Python 2 en 2000. Fue entonces cuando Python se volvió muy popular, especialmente con los lanzamientos de Python 2.7. X. Python 2 ha quedado obsoleto para reemplazar a Python 3 en 2020, y la última versión estable actualmente es Python 3.10.5, lanzada en junio de 2022 [31]. La versión empleada en el presente TFG es la 3.10.

Entre las características más importantes de Python destacan las tres siguientes [32]:

- Es interpretado, por lo que el código se traduce a través de un intérprete de forma instantánea, a diferencia de los lenguajes de programación compilados, en los que el código debe de pasar un proceso de empaquetado para poder ser ejecutado. Para la mejor comprensión de la diferencia entre interpretado o compilado, algunos ejemplos del segundo tipo son C, C# o Java. una ventaja importante de que Python sea interpretado es que nuestro código fuente se puede ejecutar en distintos softwares.
- Es de tipo dinámico, ya que permite que las variables tomen distintos valores de distintos tipos en diferentes momentos. Es decir, basta con introducir las variables para que este detecta automáticamente su tipo.
- Es un lenguaje muy popular, lo que ha permitido que cada vez dispongan de más librerías y por lo tanto demás opciones de programación distintas. Además, posee una curva de aprendizaje bastante rápida.

En el actual trabajo, se emplean las siguientes librerías:

- **Numpy**: librería especializada en el cálculo matemático y numérico. Junto con **Pandas** [33], facilita el análisis masivo y la manipulación de datos [31].
- **Winshell**: librería que controla ciertos aspectos de la interfaz de usuario de Windows. Se emplea principalmente para gestionar el guardado de los datos en carpetas especiales del sistema como documentos o escritorio [34].
- **Matplotlib**: librería empleada para la creación de visualizaciones gráficas de datos. Se emplea para realizar las gráficas de los datos obtenidos.
- **Reportlab**: librería destinada a la creación de documentos PDF Con multitud de funcionalidades [35].
- **Os**: librería empleada para comprobar la existencia de carpetas, y en su defecto crearlas.

- **Sys**: librería destinada al acceso a diferentes variables que interactúan con el intérprete. En el trabajo se emplea para pasar una serie de argumentos a un script de Python.
- **Csv**: Librería empleada para la creación y lectura (junto con *pandas*) de los archivos *.csv*.
- **Py2exe**: extensión de Python que convierte los scripts en programas De Windows ejecutables *.exe* [36].

Para la mejor organización de los scripts Python que se crean, se emplea **Jupyter Notebook** [37], una extensión de código abierto que permite una mayor limpieza y organización del código. Esto se consigue gracias a las diferentes unidades en las que se divide el código, que junto con *Markdown* (para la escritura de texto), permite ser ejecutado por separado y llevar un mayor control de su ejecución.

3.1.4. Inno Setup

Inno Setup es un software gratuito que permite la generación de instaladores para Window, cuyo lenguaje de programación *Pascal* [38].

El software nos permite una multitud de funcionalidades cómo la descarga de archivos de internet, la personalización visual del instalador, la gestión de ubicación de descarga, creación de des instaladores y diferentes opciones para implementar requisitos funcionales.

Se empleará en este TFG para crear un instalador único y poder integrar diferentes archivos necesarios para el correcto funcionamiento tanto de la aplicación como de Leap Motion (instalador del *driver* pertinente).

3.1.5. GitHub

Plataforma de alojamiento de código que permite el control de versiones y brinda herramientas para el trabajo en equipo [39].

3.1.6. Visual Studio Core

Editor de código fuente independiente que posee una serie de características muy interesantes como el soporte nativo de los principales lenguajes de programación, gran capacidad de personalización mediante extensiones y configuraciones de vista y, por último, la existencia de múltiples atajos de código [40].

3.1.7. Figma

Es un motor de creación de prototipos y un editor de gráficos vectoriales que, a diferencia de otras herramientas, está alojado en la web. Es muy intuitivo y fácil de usar, que permite al usuario realizar diseños muy sofisticados o *sketchs* para el prototipado de la interfaz de la aplicación [41]

Nombre	Versión
Ultraleap Gemini	5.6.1
Unity	2020.3.30f1
Python	3.10.2
Inno setup	6.2.0
Github	3.5
Figma	114.6.2
Visual Studio Core	1.68.1

Tabla 1: Versiones de los softwares empleados.

3.2. Diseño del sistema

Para proporcionar una descripción precisa y una comprensión técnica de la herramienta desarrollada, es necesario referirse a los aspectos de análisis y diseño de la aplicación, así como su modelado.

El proceso de cumplimiento de requisitos implica descubrir, analizar, documentar y verificar los servicios que el sistema debe proporcionar, es decir, sus funciones, limitaciones y restricciones. Esto se realiza a través de la comunicación con los clientes, usuarios y aquellos que tienen un papel en el desarrollo del sistema.

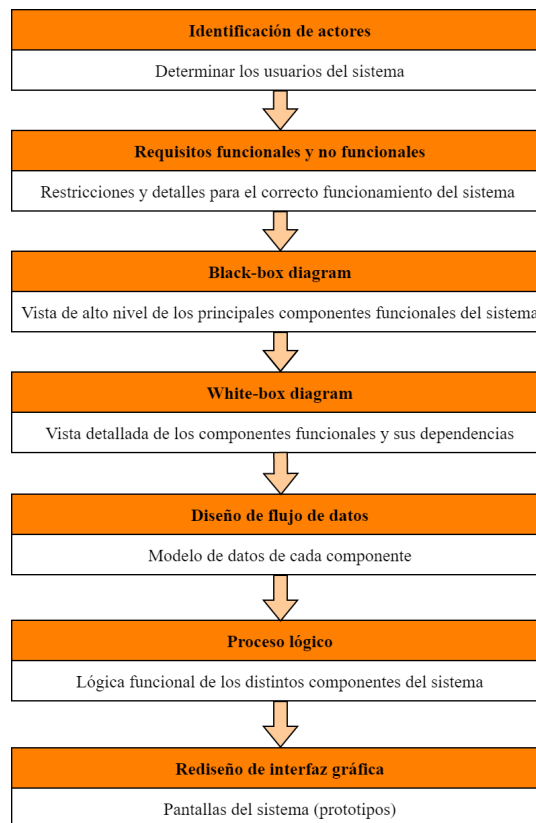


Figura 14: Metodología empleada para el desarrollo de la aplicación. Elaboración propia.

3.2.1. Definición de roles de usuario

Para obtener y analizar estos requisitos, es necesario determinar previamente los usuarios del sistema. Al actor o usuario se le asigna un rol asumido por una entidad externa que interactúa directamente con el sistema. Para ello, los usuarios se categorizan en primarios, secundarios y externos.

Los actores **primarios** son los usuarios de la funcionalidad principal del sistema. En este caso, los centros médicos (representado por profesionales sanitarios, en concreto neurólogos, aunque, en casos excepcionales, enfermeros/as) son quienes realizan las tareas principales y en los que la aplicación está centrada. Este grupo incluye al propio usuario (pudiéndose diferenciar entre controles y pacientes que han sufrido de algún tipo de ictus, siempre y cuando tengan capacidad, aunque sea mínima, de mover las manos) quien realiza las pruebas y es el motivo de uso del dispositivo.

Como actores **secundarios**, encontramos a las personas que brindan soporte o participan en los casos de uso y equipos de mantenimiento (técnicos) de la aplicación que se incluyen si hay algún problema o problema en el proceso de uso de la aplicación. Esta función es realizada por un ingeniero biomédico.

Finalmente, como actores **externos**, son entidades usuarias, pero no participan activamente en el proceso, ni están obligadas a ser parte del proceso. Esto puede

incluir el hospital o clínica médica en dónde se usará la aplicación.

3.2.2. Requisitos funcionales y no funcionales

Los requisitos específicos de la aplicación se resumen en funcionales y no funcionales.

- Se consideran los requisitos **funcionales** aquellos que definen tanto la funcionalidad como los servicios que el sistema debe poseer y sus restricciones sobre el funcionamiento.
- En segundo lugar, encontramos los requisitos **no funcionales** que se encargan de definir las propiedades que el sistema debe tener. Los requisitos se identificarán numéricamente, junto con el nombre y la descripción de cada uno.

Para ello, se dividirán todas las funcionalidades que se quieran implementar en el sistema. La especificación de requisitos se envía al desarrollador, para que pueda comprender fácilmente el flujo de trabajo y las funciones que debe cumplir cada aspecto del trabajo.

Identificador	RF-1
Nombre	Identificación de acceso
Versión	1.0
Prioridad	Muy alta
Descripción	El sistema solo permitirá interactuar si se ha realizado una identificación del centro clínico en el cual se está trabajando.

Tabla 2: Requisito funcional de identificación de acceso.

Identificador	RF-2
Nombre	Gestión de usuarios
Versión	1.0
Prioridad	Muy alta
Descripción	El sistema permitirá registrar a usuarios siempre y cuando completen un estudio, tras ello futuros estudios se asociarán al mismo usuario. Para el registro de usuarios se precisará de un identificador junto con la información de si es paciente o doctor.

Tabla 3: Requisito funcional de gestión de usuarios.

Identificador	RF-3
Nombre	Gestión de datos e informes
Versión	1.0
Prioridad	Muy alta
Descripción	el sistema recogerá todos los datos proporcionados por el dispositivo Leap Motion y los guardará en un archivo <i>.csv</i> . El sistema generará un informe en todos los estudios y se permitirá su visualización en un apartado de consulta de informes o bien directamente al completarse un estudio.

Tabla 4: Requisito funcional de gestión de datos e informes.

Identificador	RF-4
Nombre	Contenido de informes
Versión	1.0
Prioridad	Alta
Descripción	El informe generado debe de contener la identificación del paciente junto con la fecha y el número de estudio. Dicho informe contendrá una visualización global del ejercicio, una detallada y por último una evolución. En el informe deben aparecer los diferentes logos de las entidades colaboradoras.

Tabla 5: Requisito funcional de contenido de informes.

Identificador	RF-5
Nombre	Recogida de datos por el Leap Motion
Versión	1.0
Prioridad	Alta
Descripción	El sistema debe comprobar que no ha habido ningún tipo de error a la hora de recoger los datos proporcionados por el dispositivo Leap Motion. En caso de que así sea, nunca deberán guardarse los datos para el ejercicio erróneo.

Tabla 6: Requisito funcional de recogida de datos por el Leap Motion.

Identificador	RF-6
Nombre	Eliminación de datos
Versión	1.0
Prioridad	Alta
Descripción	En caso de que algún usuario pida la eliminación completa de su información, este debe de ser borrado por completo.

Tabla 7: Requisito funcional de eliminación de datos.

Identificador	RF-7
Nombre	Restricciones de integridad
Versión	1.0
Prioridad	Alta
Descripción	Al iniciarse el sistema debe comprobar qué todos los pacientes o controles poseen datos consistentes y completos. En caso de faltar algún tipo de dato que conlleve a una información incompleta, se eliminará la inconsistencia borrando únicamente lo necesario. No se debe perder la información total del paciente si hay algún tipo de inconsistencia.

Tabla 8: Requisito funcional de restricciones de integridad.

Identificador	RNF-1
Nombre	Interfaz de usuario
Versión	1.0
Prioridad	Alta
Descripción	La interfaz de la aplicación debe estar organizada de manera que el acceso a la información y a las diferentes opciones sea sencillo y claro. Los botones deben de estar diseñados con el fin de poder ser interactuados mediante pantallas táctiles o teclado, por lo tanto, deben de tener un tamaño grande.

Tabla 9: Requisito no funcional de interfaz de usuario.

Identificador	RNF-2
Nombre	Disponibilidad
Versión	1.0
Prioridad	Alta
Descripción	El sistema estará disponible online, las 24 horas del día, 7 días a la semana. El sistema estará disponible en sistemas operativos Windows 10 u 11. siempre y cuando su procesador sea Intel Core i3 de quinta generación, tenga al menos 2 GB de RAM y un puerto USB 2.0. Todo ello debe ser comprobado por el instalador antes de descargarse la aplicación.

Tabla 10: Requisito no funcional de disponibilidad.

Identificador	RNF-3
Nombre	Privacidad
Versión	1.0
Prioridad	Alta
Descripción	El sistema deberá cumplir la normativa de protección de datos aplicable en cada región donde se implante.

Tabla 11: Requisito no funcional de privacidad.

Identificador	RNF-4
Nombre	Notificaciones
Versión	1.0
Prioridad	Alta
Descripción	El sistema genera mensajes de notificación cuando se realiza correctamente una exportación o si existen campos vacíos a falta de completar. Cada vez que se realiza un ejercicio debe aparecer un mensaje de confirmación.

Tabla 12: Requisito no funcional de notificaciones.

3.2.3. Diagrama Black-Box

En el diagrama **Black-Box**, podemos ver las principales funcionalidades de la aplicación y los usuarios con los que se relacionan (usuarios, centro médico e ingeniero biomédico). Contamos con dos secciones principales, que coinciden con las funcionalidades de la aplicación: herramienta de recogida de datos y generación de informes. Todas ellas se apoyan en la infraestructura del sistema o plataforma (ver Figura 15).

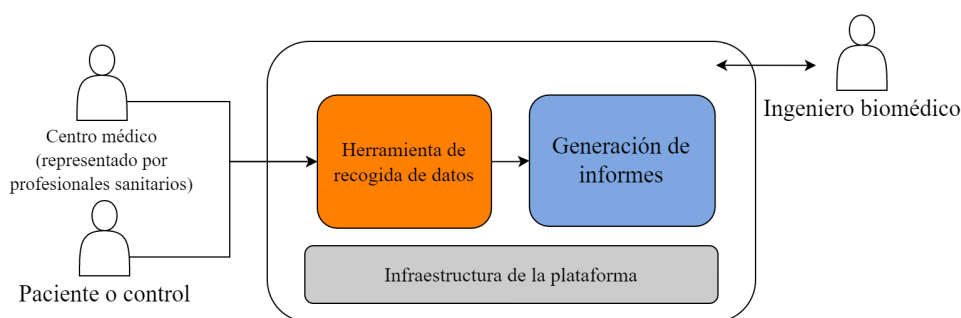


Figura 15: Diagrama Black-Box.

3.2.4. Diagrama White-Box

En el diagrama **White-Box**, se mantiene el mismo diseño, pero en este caso vemos en detalle la tecnología detrás de cada una de las funcionalidades. Se muestran también las relaciones entre los distintos usuarios que interactúan en el sistema (ver Figura 16).

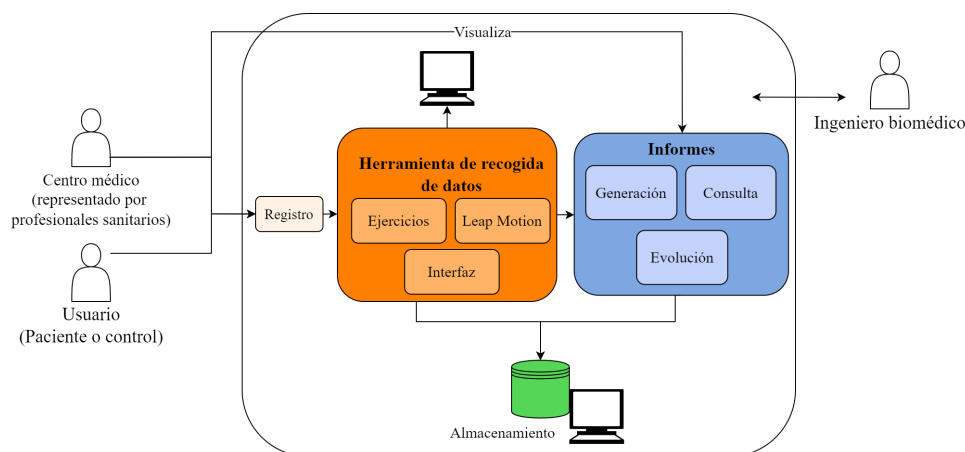


Figura 16: Diagrama White-Box.

3.2.5. Diseño del flujo de datos

Los datos que se manejan por toda la herramienta deben de seguir una ruta eficaz y segura. Siguiendo un orden cronológico, los datos y su transporte por la aplicación se detallan a continuación.

En primer lugar, se debe almacenar el identificador del centro médico en el dispositivo en el que se instale de tal forma que cada vez que se accede a la aplicación, automáticamente se inicia la sesión. Ese dato se guardará en un archivo dentro de la carpeta de almacenamiento de la herramienta.

Tras ello, se deben de guardar los datos para la creación de un usuario. En primer lugar, se deberá distinguir entre paciente (P) o control (C). Tras ello se deberá escribir el identificador que el examinador desee. Los usuarios se guardarán entonces mediante una concatenación del tipo de usuario y el identificador. Los datos obtenidos por el dispositivo Leap Motion para cada ejercicio deben de guardarse junto con el identificador del usuario, la fecha, el número de estudio y el número de ejercicio. la forma de guardar estos datos deberá ser en formato *.csv* para su posterior tratamiento con mayor facilidad.

Por último, los informes deben guardarse con el identificador del paciente, el número de estudio, la fecha y una palabra identificativa como *reports* y en formato *.pdf*. Para generar una evolución dentro de estos informes, se propone crear un archivo en formato *.csv* cuyas filas se rellenen automáticamente tras la finalización de un estudio, de tal forma que podamos almacenar un seguimiento completo de un paciente a lo largo del tiempo. Se muestra a continuación el diagrama de clases de la aplicación (ver Figura 17).

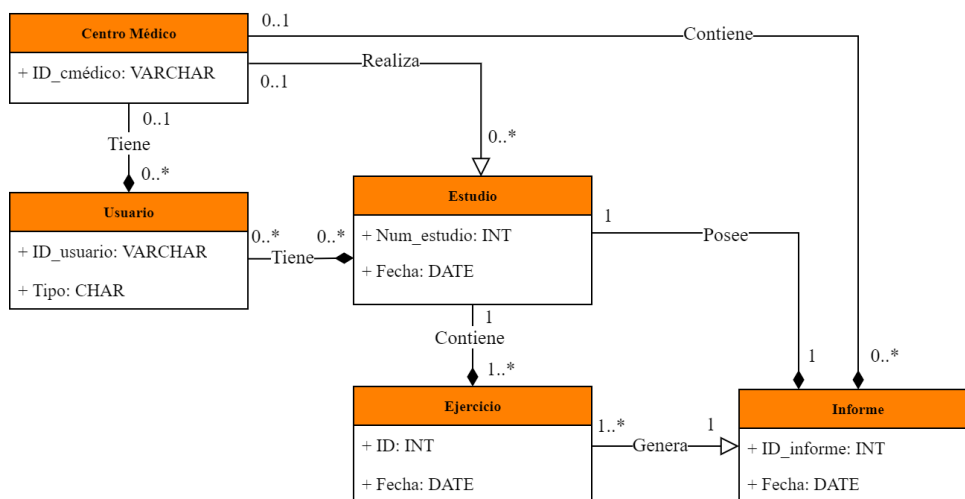


Figura 17: Diagrama de clases. Elaboración propia

Por una buena organización de los datos se propone generar dos carpetas, la primera de ellas denominada *LeapData* deberá contener subcarpetas con cada uno de los pacientes en cuyo interior se encuentren carpetas con los diferentes estudios

realizados. En el interior de las carpetas con los estudios, deben almacenarse los datos recogidos por el Leap Motion para cada ejercicio. Por otro lado, se creará la carpeta *Reports* en la que, a su vez, contendrá carpetas individuales para cada paciente en cuyo interior estén almacenados todos los informes y el archivo de evolución.

3.2.6. Proceso lógico

Dentro del proceso lógico, detallaremos la funcionalidad y el diseño de cada uno de los componentes del sistema.

- **Herramienta de recogida de datos:** primeramente, se guardarán los datos introducidos por el clínico sobre el usuario (paciente o control) así como el tiempo de duración de los ejercicios. Estos datos se guardarán dentro de variables y no se borrarán hasta que se complete el estudio. Tras ello, se realizará cada uno de los ejercicios durante el tiempo establecido anteriormente y una vez finalizados se define una función que lee los datos recogidos y detecta posibles fallos para casos en los que no se haya detectado correctamente el dispositivo Leap Motion o bien se haya recogido en tan solo la mitad del tiempo de duración de los ejercicios o bien se ha recogido solo los datos de una de las dos manos. Automáticamente la función definida anteriormente hará que repitamos los ejercicios con alguna de estas inconsistencias. Cada vez que un ejercicio se realice de forma correcta según la herramienta, necesitará una verificación por parte del examinador para poder proseguir.
- Para la **generación de informes**, una vez finalizados los ejercicios de la herramienta de recogida de datos, se modifica un script en Python que analiza los ejercicios de tal forma que transforma los datos en valores útiles para ser comparados con valores de normalidad generados en estudios clínicos anteriores [42]. Una vez finalizado el análisis, se crea un **PDF** a modo de informe en la que se incluyen todas las comparaciones con valores de normalidad organizados en gráficas y por último, lee el archivo de evolución y en una tabla muestra una gráfica evolutiva del usuario. Todo ello se pretendía introducir en Unity mediante un *plugin* que ejecutaba un intérprete de Python. Las versiones de ese plugin no permitían la ejecución de ciertas librerías, por lo que se generó un archivo ejecutable que era llamado desde Unity a través de la **terminal**.
- **Consulta de informes**, en la que se pueden observar todos los pacientes creados y cada uno de sus estudios junto con la fecha. Cuando se seleccionan, se concatena la ruta hasta el archivo para lograr su apertura.

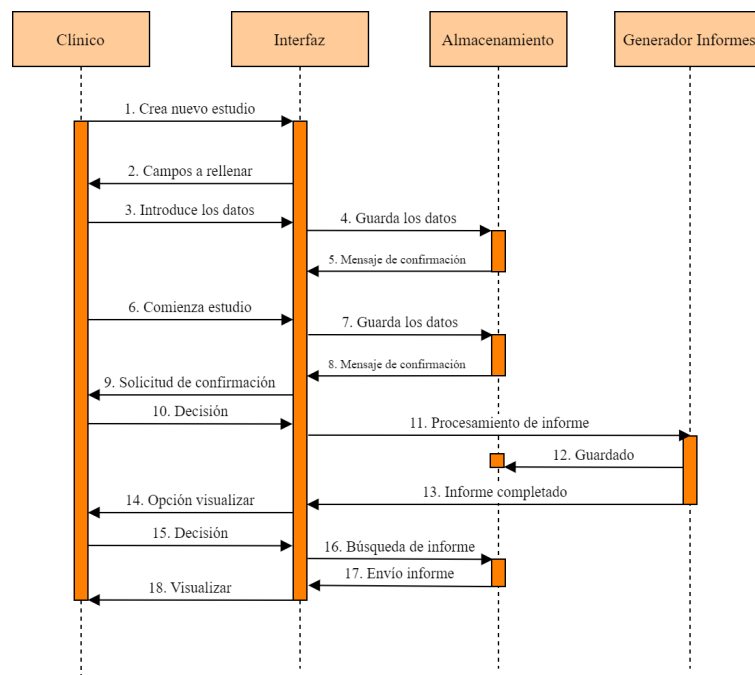


Figura 18: Diagrama de secuencia para el módulo de recogida de datos y generación de informes.

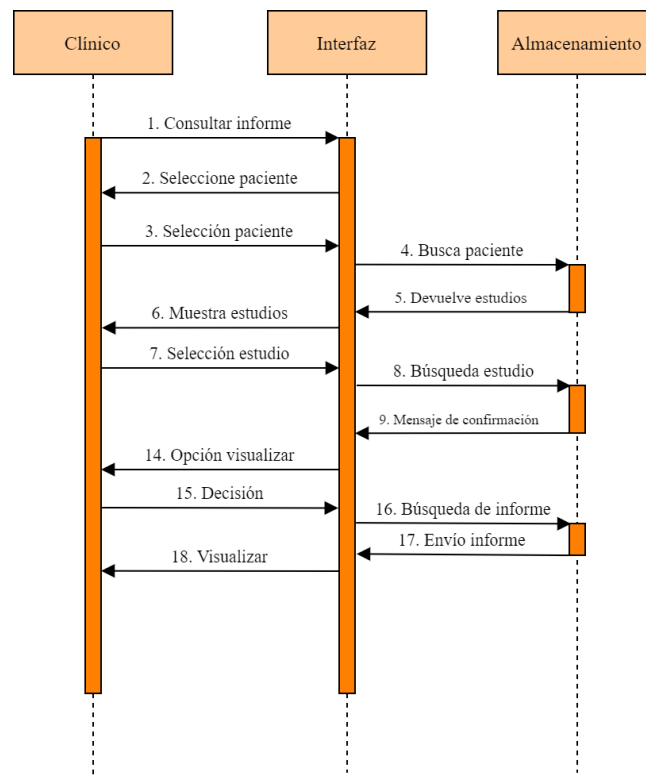


Figura 19: Diagrama de secuencia para el módulo de consulta de informes.

3.3. Creación del instalador

Empleando el software **Inno Setup**, se diseña el instalador de tal forma que en primer lugar compruebe si el sistema operativo es Windows 10 o superior y su arquitectura es de 64 bits. Tras ello comprueba si en total hay una cantidad de memoria mayor que 2 GB. En caso de que viole alguna de las condiciones anteriores, se generará un mensaje con el error encontrado, De tal forma que el usuario pueda entender el motivo por el cual no se puede descargar la aplicación.

No se da la opción al usuario para poder elegir la carpeta de destino y se instala automáticamente en la carpeta de archivos de programa. Esto se debe a que, al emplear comandos que necesitan la creación de carpetas o la apertura de terminales sí si instalas en una carpeta que necesita permiso de administrador, no se podrían automatizar los procesos y no funcionaría la aplicación.

Una vez que se han descargado e instalado los archivos necesarios para el correcto funcionamiento de la aplicación abre automáticamente el instalador del software necesario para el funcionamiento del dispositivo Leap Motion. En caso de tener una versión anterior a la indicada, se da la opción de rescribir los datos y en el caso de no tenerla la instala. Se muestra el código detallado en el anexo F.

3.4. Cronograma

Se usa el gráfico de Gantt para ilustrar el desarrollo temporal de las fases del proyecto según se muestra en la figura 20 a continuación.

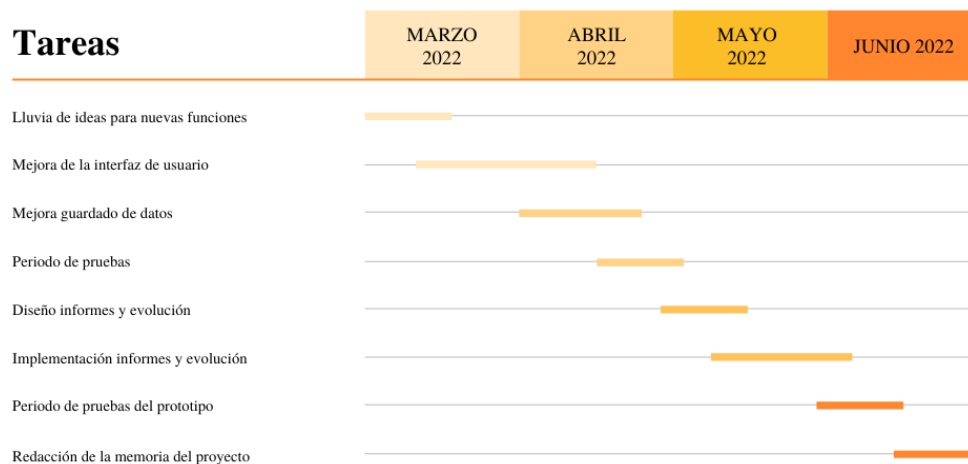


Figura 20: Cronograma del proyecto.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Herramienta Stroke Data Tracker

En este apartado se va a describir el resultado final de la aplicación, mostrando su aspecto a través de distintas pantallas, ejemplos de las nuevas funcionalidades implementadas, informes generados, guardado de datos y más ejemplos relacionados con la aplicación.

4.1.1. Nuevo nombre y creación del logo

En primer lugar, se ha creado un nuevo nombre para la aplicación. El nuevo nombre es **SDT** (*Stroke Data Tracker*) que traducido al español significa rastreador de datos de ictus. El hecho de que el nombre esté en inglés es debido a que da una imagen más moderna y facilita la internacionalización, ya que es el idioma predominante en la red y de esta forma se puede llegar a un mayor número de usuarios potenciales.

Junto con el nuevo nombre se ha creado un logo característico y representativo del proyecto general en el que está englobado ese trabajo de fin de grado. En él se puede apreciar un cerebro que representa las enfermedades cerebrovasculares junto con una mano que representa la parte del cuerpo que se desea rastrear. Además, el logo está encerrado en un rectángulo con bordes redondeados de manera que simula la forma del dispositivo empleado para la medición de las variables cinemáticas, el Leap Motion.



Figura 21: Logo de la aplicación *Stroke Data Tracker*

Este logo (Figura 21) se encuentra presente en la mayoría de las pantallas de la aplicación, así como el instalador y en los informes que se generan.

4.1.2. Instalador

Gracias al software Inno Setup, se ha creado un instalador totalmente automatizado que comprueba que no se viole ninguna restricción para poder descargar e instalar la aplicación y así se pueda asegurar su correcto funcionamiento. Tras realizar diferentes pruebas con entornos y usuarios relevantes se ha habilitado al sistema para otorgar al usuario la posibilidad de poder descargar la aplicación en la carpeta que elija.

Sin duda esto es un gran avance para la aplicación ya que el instalador se encuentra publicado en un repositorio privado de GitHub desde el cual se puede acceder a la versión más actualizada del instalador junto con la documentación asociada.

El hecho de proveer de un instalador de la aplicación hace que la instalación sea mucho más fácil y segura, evitando fallos de descarga debido a incompatibilidad u otros problemas debidos al sistema operativo del ordenador.

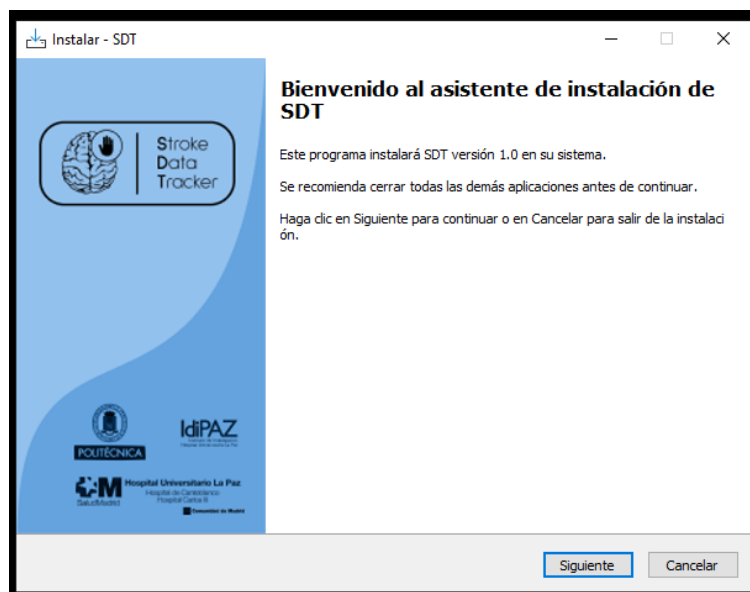


Figura 22: Pantalla de inicio del instalador.

4.1.3. Batería de ejercicios

La batería de ejercicios que incluye el proyecto son los elegidos en el desarrollo inicial de la aplicación y se muestran a continuación. Dichos ejercicios deben de realizarse durante un mínimo de cinco segundos, de tal forma que la aplicación parametriza el movimiento de cada uno.

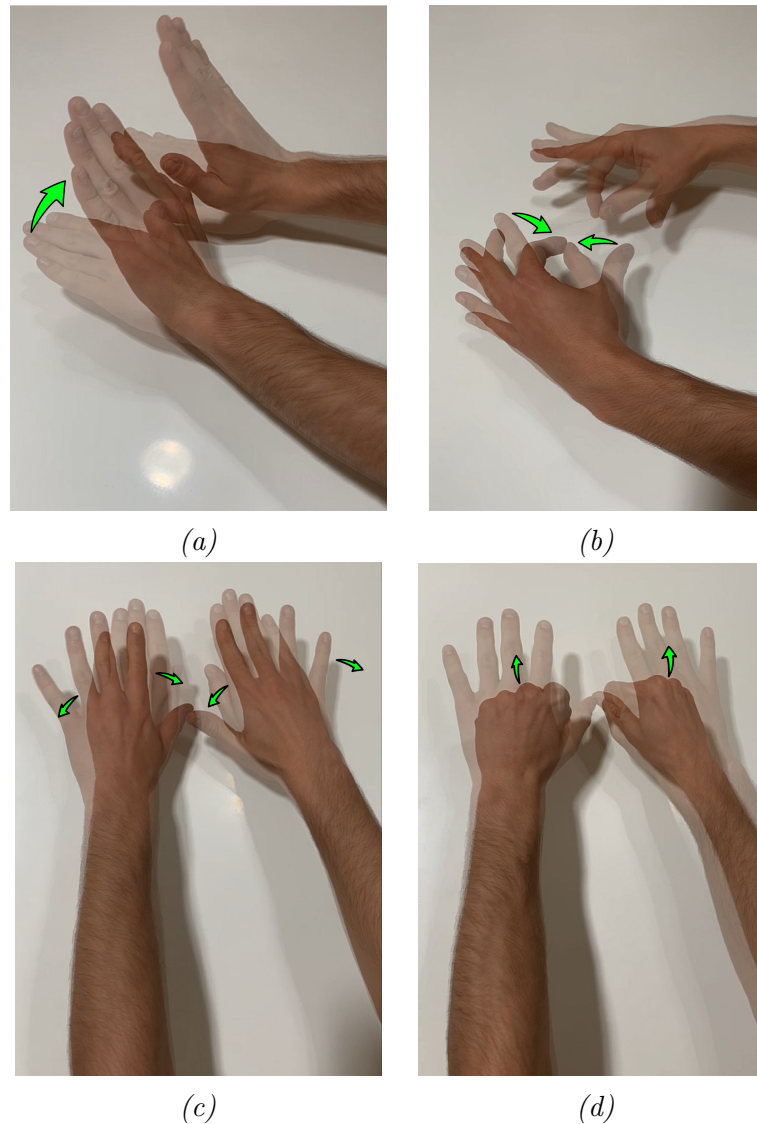


Figura 23: Ejercicios para la evaluación funcional que contiene la aplicación. (a) Flexo-extensión de muñeca, (b) Pinza índice - pulgar, (c) Separación de dedos, (d) Apertura - cierre de puño.

4.1.4. Interfaz de usuario final

La aplicación desarrollada contiene una interfaz gráfica muy cuidada en la que el usuario puede cambiar fácilmente de pantalla, establecer los datos y parámetros de configuración, elegir entre paciente o control y consultar la ejecución de ejercicios mediante informes de estudios.

La aplicación está completamente automatizada para que el usuario no pueda acceder a pantallas o funciones que puedan hacer que la recogida de datos se comprometa desde el punto de vista de la seguridad y la organización (guardado en carpetas que no le corresponde) de los mismos. Además, todas las pantallas están provistas de algún tipo de confirmación manual para que no haya ningún tipo de error, por ejemplo, cuando se comprueba que la realización de un determinado ejercicio es correcta.

El formulario tiene un fondo azul claro. A la izquierda, el texto "Introduzca el identificador del hospital o clínica" está en negro. A la derecha de este texto hay un campo de entrada rectangular con el texto "Identificador..." en gris. Al lado del campo de entrada hay un botón rectangular azul con el texto "Guardar" en blanco.

Figura 24: Campo para la introducción del identificador del centro clínico.

La primera vez que se ejecuta la aplicación se pide introducir un identificador del centro en el que se desarrolla el estudio, para evitar que existan pacientes con el mismo identificador.

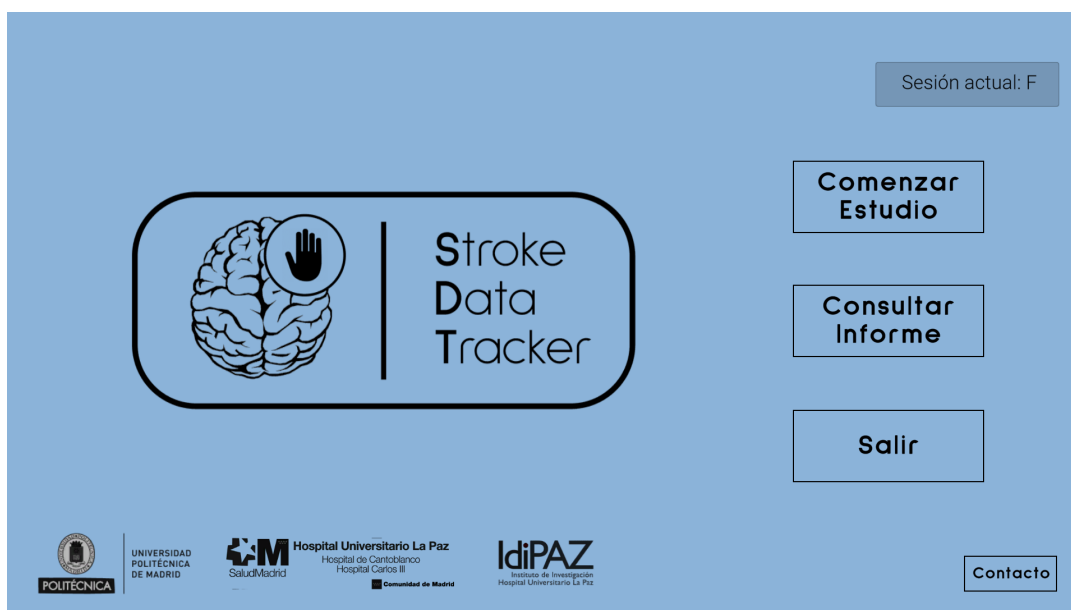


Figura 25: Pantalla de menú de inicio de la aplicación.

Existen dos opciones en la pantalla de menú de inicio: **comenzar estudio** y **consultar informe**. La pantalla posee el logo de la aplicación junto con los logos de las entidades colaboradoras con el proyecto, de izquierda a derecha: Universidad Politécnica de Madrid, Hospital Universitario La Paz, Instituto de Investigación el hospital La Paz . A esta pantalla se regresa siempre que se termina un estudio

La primera pantalla que aparece al comenzar un estudio es la pantalla de configuración, en la cual aparecen tres campos de selección de parámetros. El primero de ellos es la duración de los ejercicios, el segundo es un desplegable que nos muestra dos opciones: paciente o control. Se ha decidido proporcionar ambas opciones ya que esta aplicación está pensada tanto para el desarrollo de proyectos de investigación como para su uso clínico. Por ello en este prototipo existe la posibilidad de incluir sujetos sanos que se diferencian a priori. El último de los 3 campos es el campo de identificación en el cual los examinadores o neurólogos deben de asignar un código al sujeto que puede ser numérico, alfanumérico, alfabético, del tipo que deseen.

Cumpliendo con la Ley General de Protección de Datos (LGPD), la aplicación nunca va a identificar a los pacientes mediante algún dato personal (no se guardan datos acerca de la edad, raza, sexo, nombre, número de historia clínica, etc.). Los evaluadores deben de tener la clave que permita la identificación de cada paciente según su código.

Tras haber completado los campos mencionados anteriormente, se otorga un código de identificación de cada paciente, como en el caso que se ve en la siguiente figura 26:

The screenshot shows the 'CONFIGURACION' (Configuration) screen of the Stroke Data Tracker application. The interface is on a blue background. At the top, there's a title bar with a close button 'X' and a session indicator 'Sesión actual: F'. The main title 'CONFIGURACION' is prominently displayed. Below it, three configuration fields are visible: 'DURACION' (Duration) with a 'Tiempo' (Time) input field and a default hint '(por defecto, 5 segundos)'; 'TIPO' (Type) with a dropdown menu currently set to 'Paciente'; and 'IDENTIFICACION' (Identification) with a text input field containing the number '1'. A red rectangular box highlights the 'IDENTIFICADOR: FP1' label and the 'FP1' text. From 'FP1', two arrows point downwards to labels 'Identificación paciente' and 'Identificación centro médico'. Below the configuration fields are two buttons: 'GUARDAR' (Save) and 'COMENZAR' (Start). At the very bottom, the text 'DURACION EJERCICIO: 5s' is displayed.

Figura 26: Pantalla de configuración antes de comenzar un estudio para un tipo: *paciente* con identificador: *1* y el centro: *F*.

Una vez que hemos comenzado el estudio aparecerá en cada uno de los cuatro ejercicios ordenados los siguientes elementos:

- En la parte superior, el título del ejercicio.

- En la parte central, las manos virtuales proporcionadas por el Leap Motion.
- En la parte izquierda, unas breves instrucciones de uso.
- En la parte derecha, aparece un gif reproduciéndose en bucle con el movimiento que el usuario debe realizar

El paciente deberá imitar el movimiento mostrado en el gif, y una vez que el examinador comprueba que está haciendo el ejercicio de forma correcta, pulsará el botón de listo y comenzará la cuenta atrás de un temporizador. Mientras está reproduciéndose el temporizador, se están recogiendo los datos cinemáticos. Una vez terminado Aparecerá una pantalla de confirmación siempre y cuando no haya ocurrido ningún error de recogida de datos por parte del dispositivo.



Figura 27: Pantalla de preparación del ejercicio número 1.

Las variables cinemáticas que se recogen son las siguientes: la posición en la punta de cada uno de los dedos, la posición en el centro de las palmas de las manos, el vector velocidad y el vector normal al centro de las palmas de las manos. Todas estas variables se recogen cada veinte milisegundos (o a una frecuencia de muestreo de 50 Hz).

Todos los datos se almacenan en archivos *.csv* con el siguiente formato:

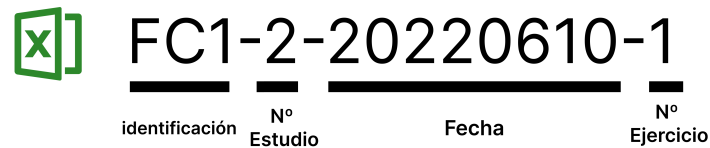


Figura 28: Formato de guardado de datos recogidos por el dispositivo.

Una vez que los datos son guardados, se procederá a su análisis y a la generación de un informe del estudio realizado. Mientras los informes son generados, aparece una pantalla de carga y una vez finalizado el proceso el sistema nos da opción a elegir entre ver el informe o bien terminar el estudio.

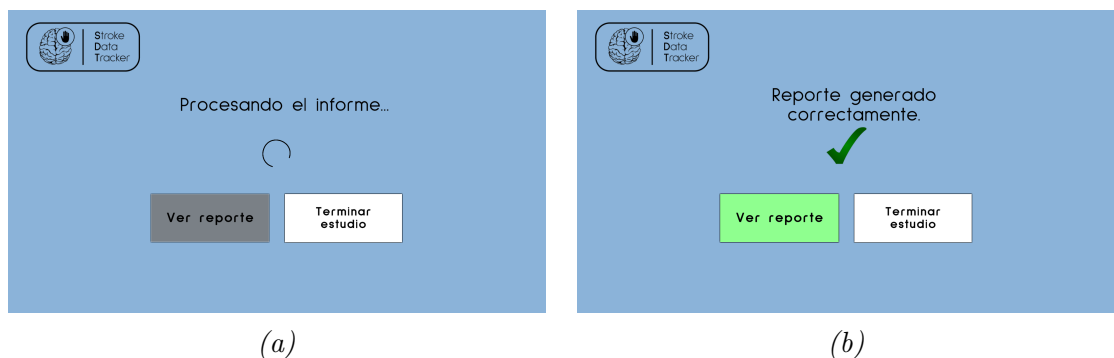


Figura 29: Pantalla de procesado de informes (a) antes de finalizar y (b) una vez finalizado.

Estos informes poseen la siguiente estructura:

- En primer lugar, una página de inicio en la que aparecen los logos de las diferentes entidades colaboradoras junto con el logo de la propia aplicación, un título con el nombre *Reporte de resultados, evaluación computacional del miembro superior* y por último un apartado de **registro** en el que aparece el identificador del paciente junto con el número de estudio y la fecha en la que se ha realizado el estudio.
- En la siguiente página, encontramos un resumen de los cuatro ejercicios que muy rápidamente nos da una visión global de los resultados de la ejecución, mostrando cada mano por separado. Mediante un código de color (verde: normal, rojo: alterado) podemos tener una primera impresión del déficit. Los datos de normalidad se obtuvieron del estudio de validación de la herramienta realizado previamente según se ha mencionado [42].

- Sin embargo, los cuatro ejercicios evalúan a su vez diferentes parámetros. El primer ejercicio evalúa el rango de flexo-extensión de la muñeca; el ejercicio dos (pinza índice-pulgar) evalúa cuatro parámetros que son: la apertura máxima de la pinza, el rango máximo del pulgar, el rango máximo índice y perímetro de movimiento del dedo anular. En el tercer ejercicio (separación de dedos) se valora el rango máximo del pulgar, índice, anular y meñique mientras que en el cuarto (apertura y cierre de puños) se valora el perímetro de movimiento y el rango máximo del pulgar. Por lo tanto, las siguientes páginas contienen cada uno de los parámetros mencionados anteriormente colocados en gráficas y siendo comparados con valores de normalidad. El único caso excepcional es el del ejercicio uno, en el cual se añade una gráfica que representa el vector normal a la palma en función del tiempo (figura 30).
- La última página, siempre y cuando se hayan realizado más de una evaluación en distintos momentos evolutivos, generará una serie de gráficos de evolución de los parámetros más relevantes de cada uno de los cuatro ejercicios básicos. La selección de parámetros es fruto del estudio de validación de la herramienta mencionado previamente. En las gráficas, el eje de abscisas representa el número de los estudios junto con su fecha.

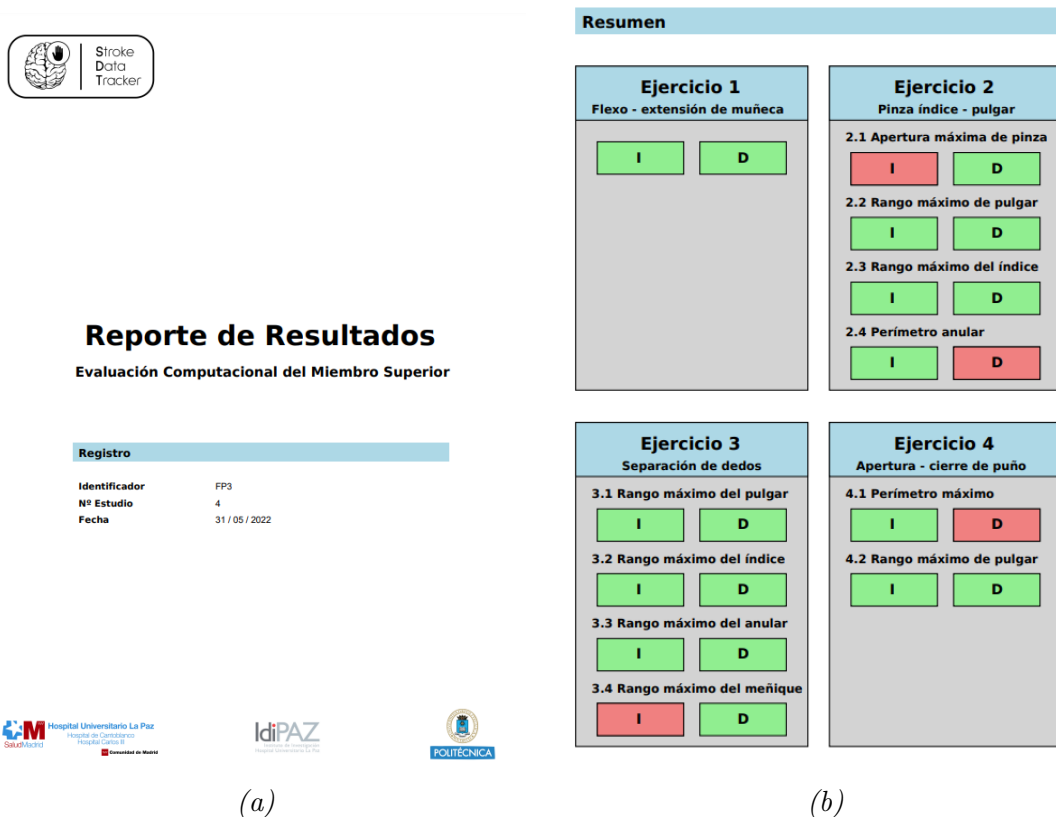
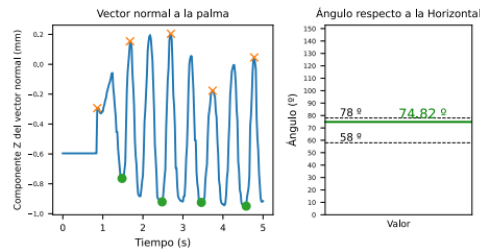


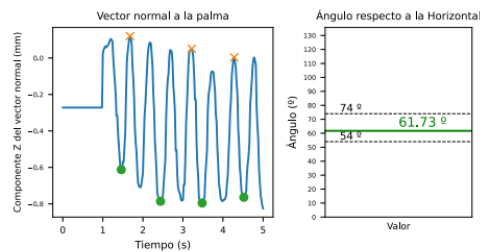
Figura 30: Informe de ejemplo en el que se observa (a) la pantalla principal con el registro y (b) la pantalla de resumen de los ejercicios realizados.

Ejercicio 1: Flexo - Extensión de muñeca**Mano Izquierda**

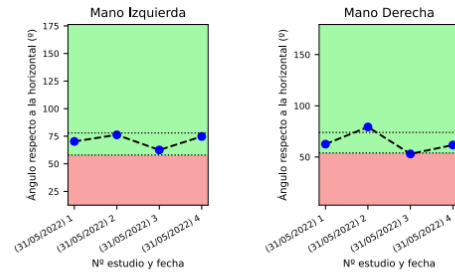
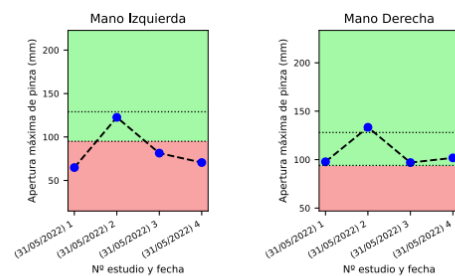
Ángulo máximo desde la horizontal Izda : 74.82 °

**Mano Derecha**

Ángulo máximo desde la horizontal Dcha : 61.73 °



(a)

Evolución**Ejercicio 1: Flexo - Extensión de muñeca****Ejercicio 2: Pinza índice - Pulgar**

(b)

Figura 31: Informe de ejemplo en el que se observa (a) la página de análisis del primer ejercicio y (b) la pantalla de evolución de los estudios realizados previamente.

Todos los informes se almacenan en archivos *.pdf* con el siguiente formato:

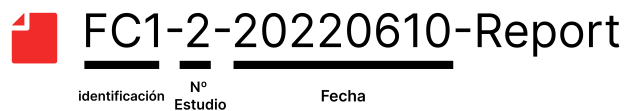


Figura 32: Formato de guardado de los informes generados por la aplicación.

Volviendo al menú inicial, la segunda opción disponible es la consulta de informes. Se trata de una funcionalidad que muestra todos los pacientes y sus estudios y permite al usuario poder abrir el estudio que desee. Encontramos dos desplegables, el primero de ellos con todos los pacientes disponibles y el segundo de ellos con los estudios para el paciente seleccionado acompañados de la fecha en que se realizó y el número del estudio.

A continuación, se muestra un ejemplo de uso:

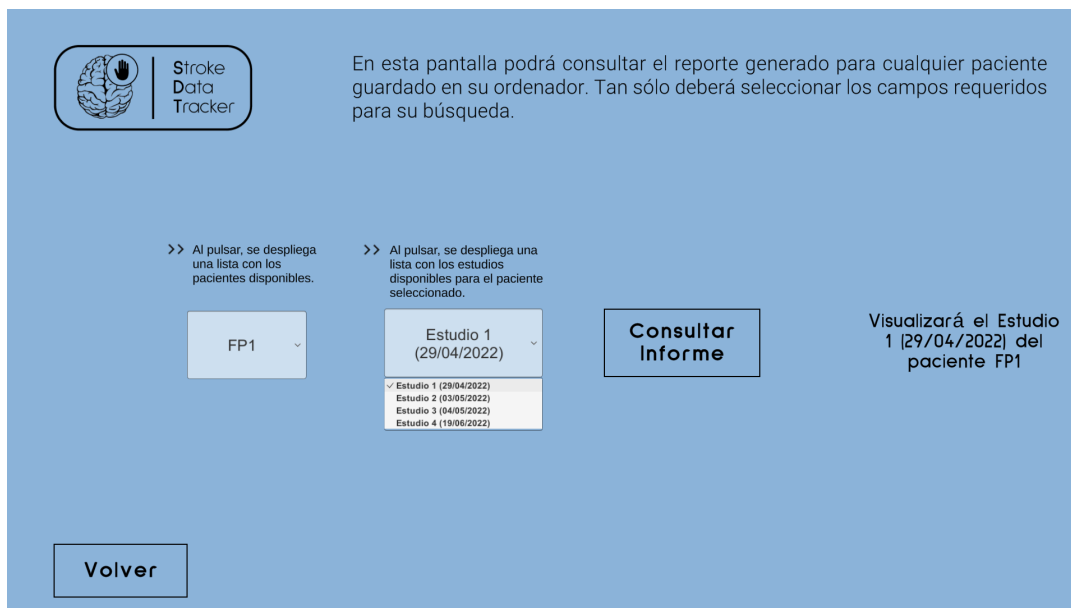


Figura 33: Pantalla de consulta de informes.

En el anexo E se proporciona un vídeo-manual de la aplicación.

4.1.5. Mejoras de la aplicación

Durante el periodo de desarrollo de la aplicación se han detectado una serie de mejoras necesarias para su mejora, desde el punto de vista tecnológico como de utilidad.

A modo de resumen, se expondrán a continuación las mejoras y características más relevantes de la herramienta Stroke Data Tracker. Para que la visualización sea más cómoda se elaborará una tabla con las necesidades detectadas y cómo se han solucionado. La mayoría de estas necesidades se han detectado al ver a algún paciente realizar la prueba, todas ellas se han anotadas y posteriormente han sido resueltas.

Necesidad	Solución
Distracción de los pacientes a la hora de realizar los ejercicios, pierden la concentración muy fácilmente y dejan de mirar la pantalla.	Creación de gifs animados con los movimientos de los cuatro ejercicios.
Incomodidad para el médico cuando tiene que pasar los ejercicios y confirmarlos, emplean ratones (lentitud).	Control por boton del teclado (Flecha izquierda y derecha para movimientos de avance o repetición de ejercicio).
Fallos en la detección del Leap por haber muchos cambios entre escenas en Unity. Conexión y desconexión entre los ejercicios.	Creación de una única pantalla, por lo que el Leap solo se conecta una vez. Solo cambian los gifs y títulos en cada ejercicio.
Recogida de datos en blanco o fallo en la detección de alguna de las manos.	Análisis una vez terminado el ejercicio para que, en caso de que sea erróneo, se repita.
Leap Motion no detecta ciertos dedos si se solapan con otros.	La nueva versión de Gemini corrige ese error.

Tabla 13: Tabla que recoge las mejoras más importantes realizadas en la aplicación.

4.2. Propuesta de evaluación

La evaluación sistemática es uno de los pasos más importantes en el desarrollo de soluciones, especialmente en el mundo sanitario, ya que los resultados estarán estrechamente relacionados con la salud del usuario y la asistencia sanitaria. Cuando se evalúan soluciones, hay que asegurarse de que cumplan con los estándares de seguridad aplicables, sean efectivas y aseguren la continuidad de iniciativas similares. El enfoque que tomará la evaluación propuesta será una evaluación de factibilidad, en todas sus dimensiones, y una evaluación de impacto.

El enfoque que tendrá la evaluación propuesta será la evaluación de la viabilidad.

Existen tres tipos principales de viabilidad: técnica, institucional y económica.

La viabilidad técnica estudia la relación entre las necesidades específicas y los detalles del sistema para satisfacer esas necesidades. Para evaluar la viabilidad técnica, nos basaremos en estudios de usabilidad. Los estudios de usabilidad tienen como objetivo medir la eficacia, la eficiencia y la satisfacción del usuario. Se proponen medidas cuantitativas (tiempo de aprendizaje, velocidad de ejecución, tasa de error del usuario, tiempo de retención...) y medidas cualitativas (evaluaciones heurísticas, cognitive walkthrough o análisis de acciones).

Para este trabajo, proponemos tres tipos de evaluación para la usabilidad:

1. El primer método se dirigirá a los pacientes y médicos para su uso. Hemos elegido el método de *Think Aloud*, donde se observa al usuario mientras realiza una actividad y se le hacen una serie de preguntas sobre qué está haciendo, cómo se siente, qué está pensando... Para ello, se desarrollan dos guías de usuario (paciente y profesional) incluyendo una serie de actividades a seguir y algunas preguntas para responder en voz alta durante las mismas. Ejemplo en el anexo C.
2. El segundo enfoque estará dirigido a profesionales en aplicaciones de salud digital. Se determina de acuerdo con el método de evaluación de heurísticas propuesto por Nielsen y Mlich, o también conocidos como *Ten Nielsen Heuristics*. En este tipo de evaluación se proporciona un marco experto que incluye una serie de columnas (el código de violación de la heurística, escenario, dónde se ha producido, comentarios, valoración individual de severidad y valoración global de severidad).

El proceso deberá realizarse dos veces para cada uno de los módulos. La valoración irá del 0 al 4, siendo:

- 0: No estoy de acuerdo en que esto sea un problema de usabilidad en absoluto.
 - 1: problema *cosmético* solamente, no es necesario solucionarlo a no ser que se disponga de tiempo extra en el proyecto para hacerlo.
 - 2: problema menor de usabilidad, se debe dar prioridad baja a solucionarlo.
 - 3: problema importante de usabilidad, es importante solucionarlo y se le debe dar alta prioridad.
 - 4: problema grave de usabilidad, imprescindible solucionar este problema antes de que el producto sea lanzado.
3. Por último, empleamos el método de usabilidad con usuarios finales **SUS** (**System Usability Scale**) ya que sus características se ajustan correctamente a las necesidades. Es relativamente fiable con muestras pequeñas y puede diferenciar de manera fiable sistemas usables de no usables. (Ver anexo D).

Cabe destacar que estas métricas no se han evaluado aún, ese es el siguiente paso del proyecto previo a la implantación clínica.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones

El presente trabajo de fin de grado ha contribuido sustancialmente, al diseño de una nueva herramienta objetiva y automática para valorar el déficit funcional de la mano en pacientes con ictus. Esta se ha desarrollado con el mayor alcance posible, para su uso sin necesidad de adaptación o diseño especializado. Este desarrollo ha sido posible gracias al trabajo colaborativo y a las sinergias establecidas entre la ETSIT-UPM y el Servicio de Neurología y Centro de Ictus del Hospital Universitario La Paz-IdiPAZ y forma parte de una línea de investigación consolidada entre las dos entidades, lo que pone de manifiesto la necesidad del trabajo multidisciplinar para buscar soluciones centradas en conseguir el mayor beneficio para los pacientes.

La aplicación cumple con los principios de Diseño para todos, entre los que destaca por un uso equitativo cuyas características de privacidad garantía y seguridad están disponibles para todos los usuarios. Además, la aplicación posee un uso flexible ya que se puede modificar el tiempo de cada ejercicio amoldándose al ritmo de cada usuario.

Por otra parte, la aplicación siempre se ha diseñado teniendo en mente que sea fácil de usar y entender independientemente del conocimiento o experiencia, proporcionando avisos y métodos de respuesta eficaces. Cabe destacar la facilidad de la entrada de datos que posee la aplicación, que necesita un mínimo número de acciones para introducir datos y por lo tanto se convierte en una herramienta mucho más productiva y con menos probabilidad de errores. Con respecto a los programas que se han creado para la generación de informes y post procesado de datos funcionan correctamente, cumpliendo con los objetivos planteados y acercándose mucho a una versión definitiva de estos informes.

Se ha creado con éxito un instalador que permite la instalación segura y eficaz de todos los programas relacionados con la herramienta que garantizan su buen funcionamiento.

Finalmente, el desarrollo del TFG ha conseguido con éxito la mayoría de los objetivos marcados. La aplicación desarrollada tiene una gran perspectiva de implantación en la práctica cotidiana. Además, este proyecto me ha ayudado a poder comprobar de primera mano a gran importancia de la colaboración estrecha entre profesionales sanitarios, que buscan la solución a sus necesidades clínicas en la

tecnología, e ingenieros biomédicos, que gracias a sus conocimientos y pericia, pueden ofrecer dichas soluciones de manera eficaz.

5.2. Líneas futuras

Sin duda el potencial y la proyección que tiene la línea de investigación en la que está englobado el TFG es muy extenso. A lo largo que se ha realizado este trabajo, he podido imaginar bastantes ideas con una gran factibilidad. Entre ellas destacan:

- Realizar la generación de informes y análisis de datos directamente en C#, evitando tener que requerir Python y transformar programas ejecutables. Esto conllevaría a una mayor capacidad de cálculo menor tiempo y mayor eficacia al estar todos los módulos de la aplicación integrados en un mismo lenguaje.
- Siguiendo esta línea de trabajo, un reto muy interesante para conseguir sería la creación de una base de datos relacional Unificada y conectarla a algún servidor para que todas las clínicas y hospitales implicados en esta línea de investigación, puedan proporcionar sus datos y así construir un data set más grande con el que poder trazar rutas de validación más eficaces mediante, por ejemplo, algoritmos de Machine Learning como herramienta de apoyo para un diagnóstico del déficit automatizado.
- Para terminar, cabe destacar que la adaptación de la aplicación para dispositivos móviles o Tablet facilitaría mucho su uso. Además, junto con el dispositivo Leap Motion y su fácil transporte se convertiría en un sistema global totalmente accesible y cómodo para transportar. Se debería poder crear un soporte con mayor capacidad plegable.
- Por último una línea muy interesante sería el desarrollo de objetivos o *misiones* para terapias de rehabilitación, que ayuden a los pacientes a lograr los objetivos de una forma más eficaz apoyándose en la propiocepción como base fundamental.

Referencias

References

- [1] E. Díez Tejedor y B. Fuentes. *Guía para el diagnóstico y tratamiento del ictus*. Prous Science, 1 edition, 2006.
- [2] Xavier Ustrell-Roig y Joaquín Serena-Leal. Ictus. diagnóstico y tratamiento de las enfermedades cerebrovasculares. *Rev Esp Cardiol.*, 60(7):753–769, 2007.
- [3] Sánchez-Chávez JJ. El área de penumbra. *Rev Neurol.*, 28(8):815–816, 1999.
- [4] Sociedad Española de Neurología. Nota de prensa día del ictus. <https://www.sen.es/saladeprensa/pdf/Link284.pdf>, 2019.
- [5] Antonio J. Ruibal León et al. Tratamiento de la enfermedad cerebrovascular en su fase aguda. *Rev cubana med.*, 42(2):124–127, 2003.
- [6] Víctor Cruz-Guisado et al. Medición de resultados en el daño cerebral adquirido en una unidad de neurorrehabilitación. *Rev Neurol.*, 42(1):257–263, 2017.
- [7] Arias Cuadrado A. Rehabilitación del acv: evaluación, pronóstico y tratamiento. *Galicia Clínica / Sociedade Galega de Medicina Interna*, 70(3):25–40, 2009.
- [8] Unidad de Neurorrehabilitación de Hermanas Hospitalarias. Ictus: máxima capacidad de recuperación en los primeros meses. <https://xn--daocerebral-2db.es/jornada-avances-y-evidencias-en-neurorrehabilitacion-del-ictus/>, 2011.
- [9] Fugl-Meyer AR et al. The post-stroke hemiplegic patient. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, 7(1):13–31, 1975.
- [10] National Institute of Health Stroke Scale. Nih stroke scale. <https://www.nihstrokescale.org/>, 2021.
- [11] H. et al. Hislop. Examen de los músculos de la extremidad superior. pruebas funcionales musculares. *Marbán libros*, 4(4):57–166, 2021.
- [12] National Institute of Health Stroke Scale. Barthel index. <https://www.nihstrokescale.org/BarthelNew.html>, 2021.

- [13] Wilson JT et al. Improving the assessment of outcomes in stroke: use of a structured interview to assign grades on the modified rankin scale. *Stroke*, 33(9):2243–6, 2002.
- [14] M et al. Herdman. El euroqol-5d: una alternativa sencilla para la medición de la calidad de vida relacionada con la salud en atención primaria. *Atención Primaria*, 28(6):425–430, 2001.
- [15] Barbosa NE and Forero SM. *Valoración de FUGL-MEYER extremidad superior*. Universidad Nacional de Colombia, 1 edition, 2017.
- [16] Jordi Altés. Papel de las tecnologías de la información y la comunicación en la medicina actual. *Seminarios de la Fundación Española de Reumatología*, 14(2):31–35, 2013.
- [17] Ray Hammond. *The world in 2030*. Editions Yago, 2 edition, 2007.
- [18] Kinarm. Kinarm products. <https://kinarm.com/kinarm-products/our-platforms/>, 2021.
- [19] Kinarm. Kinarm exoskeleton lab. <https://kinarm.com/kinarm-products/kinarm-exoskeleton-lab/>, 2021.
- [20] Kinarm. Kinarm standard tests. <https://kinarm.com/kinarm-products/kinarm-standard-tests/>, 2021.
- [21] Machine Medicine. Kelvin pd standard tests. <https://machinemedicine.com/>, 2021.
- [22] Armeo Senso. Hocoma. <https://www.hocoma.com/solutions/armeo-senso/>, 2022.
- [23] Mehrholz J. et al. Electro-mechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*, 9(9), 2018.
- [24] Júlia Tannús de Souza. Computer vision devices for tracking gross upper limb movements in post-stroke rehabilitation. *Research, Society and Development*, 10(6):2525–3409, 2021.
- [25] Ultraleap. Leap motion controller. <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>, 2022.
- [26] Ultraleap. Leap motion controller data sheet. https://www.ultraleap.com/datasheets/Leap_Motion_Controller_Datasheet.pdf, 2022.
- [27] Ultraleap. Gemini tracking software. <https://www.ultraleap.com/tracking/gemini-hand-tracking-platform/>, 2022.

- [28] Álvaro García Casado. Diseño e implementación de un sistema para el análisis del movimiento de la mano en pacientes con infarto cerebral mediante el dispositivo leap motion. http://www.robolabo.etsit.upm.es/publications/TFG/TFG_AlvaroGarciaCasado.pdf, 2021.
- [29] Unity Software Inc. Unity. <https://unity.com/es/>, 2022.
- [30] Wikipedia. Unity (motor de videojuego). [https://es.wikipedia.org/wiki/Unity_\(motor_de_videojuego\)#:~:text=La%20primera%20versi%C3%B3n%20de%20Unity,desarrollo%20del%20motor%20y%20herramientas.](https://es.wikipedia.org/wiki/Unity_(motor_de_videojuego)#:~:text=La%20primera%20versi%C3%B3n%20de%20Unity,desarrollo%20del%20motor%20y%20herramientas.), 2022.
- [31] NumPy. Numpy. <https://numpy.org/>, 2022.
- [32] Becerra-García et al. El lenguaje de programación python. *Ciencias Holguín*, 1(2):1–13, 2014.
- [33] Pandas. Pandas. <https://pandas.pydata.org/>, 2022.
- [34] Winshell. Winshell. <https://winshell.readthedocs.io/en/latest/>, 2022.
- [35] Reportlab. Reportlab. <https://www.reportlab.com/>, 2022.
- [36] Py2exe. Py2exe. <https://www.py2exe.org/>, 2022.
- [37] Jupyter. Jupyter notebook. <https://jupyter.org/>, 2022.
- [38] Inno Setup. Inno setup. <https://jrsoftware.org/isinfo.php>, 2022.
- [39] Wikipedia. Github. <https://es.wikipedia.org/wiki/GitHub>, 2022.
- [40] Microsoft. Visual studio core. <https://visualstudio.microsoft.com/es/>, 2022.
- [41] Figma. Figma on figma. <https://www.figma.com/blog/figma-on-figma-how-we-built-figma-dot-coms-design-system/>, 2022.
- [42] European Stroke Organisation. Rehab and recovery computational assessment of hand motors in stroke patients. *European Stroke Journal*, 7(1):3–545, 2022.
- [43] Emiel J. Krahmer and Nicole Ummelen. Thinking about thinking aloud: a comparison of two verbal protocols for usability testing. *IEEE Transactions on Professional Communication*, 47:105–117, 2004.
- [44] UIUX Research. Measuring and interpreting system usability scale (sus). <https://uiuxtrend.com/measuring-system-usability-scale-sus/>, 2022.

Apéndice A

Aspectos éticos, económicos, sociales y ambientales

A.1. Introducción

El presente proyecto surge por la necesidad de crear una nueva herramienta que facilite la visualización y obtención de datos cinemáticos de la mano en pacientes con ictus, de forma que la toma de decisiones clínicas sea lo mas ajustada y personalizada posible para cada paciente. Para implementar estos proyectos, siempre es necesario tener buenas prácticas sin desperdiciar recursos, beneficios para la sociedad y tener en cuenta las limitaciones éticas, económicas, ambientales y de potencial humano.

A.2. Descripción de impactos relevantes relacionados con el proyecto

El proyecto se engloba en el sector tecnológico, específicamente en el campo de aplicaciones de salud digital. Entran en contacto con ella tanto pacientes como profesionales sanitarios, por lo que son los usuarios de interés.

Analizando el interés del proyecto, se han seleccionado los siguientes impactos como principales:

- Ético.
- Económico.
- Social.
- Medioambiental.

A.3. Análisis detallado de alguno de los principales impactos

Impacto ético.

En el mundo de la medicina, humanizar significa referirse al ser humano en todo lo posible para promover y proteger la salud, tratar las enfermedades y asegurar un ambiente propicio para una vida sana y satisfactoria. Es razonable asumir que el presente proyecto busca centralizar la atención al paciente en todo momento.

Impacto económico.

Se estima que el coste hospitalario de la ECV en España en 2004 superó los 1.500 millones de euros, convirtiéndose en una de las principales causas de gasto de recursos económicos a nivel nacional e internacional, por lo que el desarrollo de una nueva herramienta que agilice y cerciore el diagnóstico y seguimiento de la enfermedad cerebrovascular, puede beneficiar de forma importante a la economía. A dicho factor se añade que el dispositivo empleado en este proyecto, el Leap Motion, se trata de un dispositivo muy económico y asequible para los hospitales.

Impacto social.

La herramienta desarrollada, en ningún momento sustituye el trabajo del profesional, sino que le sirve como complemento para ayudarlo en la toma de decisiones médicas. Desde el punto de vista de los pacientes, emplear el sistema conllevaría a una mejora en su recuperación y en el seguimiento de dichas enfermedades, existiendo la posibilidad de explotar los datos para trazar rutas genéticas y poder descubrir información adicional sobre ellas.

Impacto medioambiental.

El gasto de energía (luz) requerido por este proyecto es mínimo. Ofrece una propuesta muy sostenible desde el punto de vista ambiental porque no requiere materiales peligrosos o de vida corta, pero sí requiere una renovación constante. Todos los informes generados y los archivos de exportación son digitales, por lo que no habrá necesidad de gastar papel. Es razonable asumir que se trata de un proyecto que respeta el medioambiente.

A.4. Conclusiones

Para concluir, la implementación de este proyecto ha conseguido controlar la mayoría de los impactos sociales, económicos, ambientales y éticos planteados, aspecto fundamental a la hora de determinar el empleo de herramientas como la desarrollada.

Apéndice B

Presupuesto económico

En esta sección se detalla el presupuesto económico del presente Trabajo de fin de grado, dividido en dos bloques: el gasto personal y el gasto material. Por último se muestra el gasto combinado total.

- **Personal:** Se incluyen gastos de los tres directores de proyecto junto con el estudiante de ingeniería biomédica que realiza el proyecto (ver Tabla 14).

	Coste horario (€)	Horas	Total (€)
Director del trabajo 1	60	30	1800
Director del trabajo 2	60	30	1800
Director del trabajo 3	60	30	1800
Estudiante de ingeniería	30	360	10800
TOTAL			16200

Tabla 14: Costes de personal.

- **Costes de recursos materiales:** Se incluyen los gastos materiales como el ordenador personal (*ASUS S406U Inter Core i7 8th Generation*) cuya amortización es del 26 % cada año según la agencia tributaria. Por otro lado, se incluye el coste del dispositivo Leap Motion, del cual no se calcula su amortización sino su coste íntegro. (ver Tabla 15).

	Tiempo de vida (años)	Uds.	Coste (€)	Amortización (€/mes)	Uso (meses)	Total (€)
Ordenador	5	1	1299	21,66	5	108,3
Leap Motion	5	1	90	Íntegro	5	90
TOTAL						198,3

Tabla 15: Costes de recursos materiales.

- **Costes totales:** A continuación, se muestran los gastos combinados del bloque de personal y materiales (ver Tabla 16).

	Coste
Costes de personal	16200 €
Costes de material	198,3 €
Subtotal	16398,3 €
IVA	3443,64 €
Total	19841,64 €

Tabla 16: Costes totales.

Apéndice C

Think Aloud Test

Problem type	Description	Typical protocol-items signalling the problem
Uncertainty about action planning	Subjects do not see where they possibly could go (click) next, or they see several possibilities but haven't got a clue about which one to select	I see books, I see a lot of things...but where should I go now? Can I click this at all? OK, let me see of something is clickable here.
Orientation	Subjects do not understand where they are or cannot interpret their current location in the context of other locations in the website	What does this mean? Where am I now? I guess I should be in a completely different part of the website?
Stuck in loops	Subjects think they move on to a different location in the website but appear to (repeatedly) return to where they came from	... hey, I've been here before! **, again this stupid page.
Unexpected result	Subjects expect a certain result after clicking a link, but this result does not occur	...and then I click this and hope something happens...but it doesn't.
Failed repetition of actions	Subjects think they remember how to navigate because they feel they did that before, but the (assumed) repetition fails	Oh ... yes...and now I should be able to select a title here.... Oh no, apparently I can't.
Reasoning about navigation logic	Subjects start reasoning about why the interface makes them think they can find certain information behind a link	A clock that is ticking... ah, perhaps that's a time machine. Let me try that....
Interface manipulation problem	Subject have problems handling certain objects in the interface (e.g. dragging a pointer over a calendar in order to get to information about a certain year)	There's a calendar here, but when I click it nothing happens... how can I do this?

Figura 34: Think Aloud Test [43].

Apéndice D

Think Aloud Test

SUS	Strongly Disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly Agree
1. I think that I would like to use this website frequently.	☐	☐	☐	☐	☐
2. I found the website unnecessarily complex.	☐	☐	☐	☐	☐
3. I thought the website was easy to use.	☐	☐	☐	☐	☐
4. I think that I would need the support of a technical person to be able to use this website.	☐	☐	☐	☐	☐
5. I found the various functions in this website were well integrated.	☐	☐	☐	☐	☐
6. I thought there was too much inconsistency in this website.	☐	☐	☐	☐	☐
7. I would imagine that most people would learn to use this website very quickly.	☐	☐	☐	☐	☐
8. I found the website very cumbersome / awkward to use.	☐	☐	☐	☐	☐
9. I felt very confident using the website.	☐	☐	☐	☐	☐
10. I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.	☐	☐	☐	☐	☐

Source: UIUXTrend.com

Figura 35: SUS (*System Usability Scale*) [44].

Apéndice E

Manual de usuario

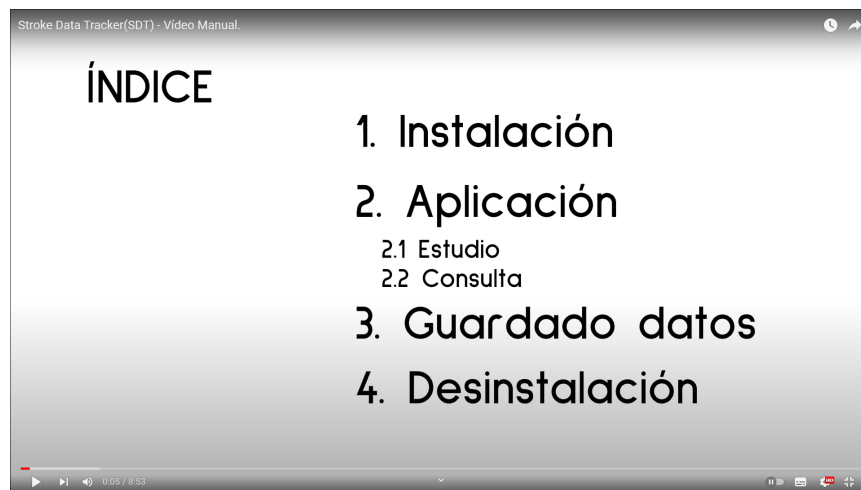


Figura 36: Vídeo manual de usuario para instalación y uso de la aplicación.

<https://www.youtube.com/watch?v=cIywK00e-1E>

Apéndice F

Código Inno Setup para comprobar pre-requisitos

```
1 [Code]
2
3 function EsWin10: Boolean;
4 begin
5     Result:=(GetWindowsVersion >= $0A002800)
6     if not Result then
7     begin
8         SuppressibleMsgBox('El programa funciona unicamente con Windows 10 o
9             posterior. Por favor compruebe su sistema operativo.',
10             mbCriticalError, MB_OK, IDOK);
11     end;
12 end;
13
14 type
15     DWORDLONG = Int64;
16     TMemoryStatusEx = record
17         dwLength: DWORD;
18         dwMemoryLoad: DWORD;
19         ullTotalPhys: DWORDLONG;
20         ullAvailPhys: DWORDLONG;
21         ullTotalPageFile: DWORDLONG;
22         ullAvailPageFile: DWORDLONG;
23         ullTotalVirtual: DWORDLONG;
24         ullAvailVirtual: DWORDLONG;
25         ullAvailExtendedVirtual: DWORDLONG;
26     end;
27
28 function GlobalMemoryStatusEx(var lpBuffer: TMemoryStatusEx): Boolean;
29     external 'GlobalMemoryStatusEx@kernel32.dll stdcall';
30
31 function CheckRAM: Boolean;
32 var
33     MemoryStatus: TMemoryStatusEx;
34 begin
35     Result:=True;
36     MemoryStatus.dwLength := SizeOf(MemoryStatus);
```

```
37  if GlobalMemoryStatusEx(MemoryStatus) then
38      if MemoryStatus.ullTotalPhys < 2147483648 then
39          begin
40              SuppressibleMsgBox('Son necesarias al menos 2GB de RAM para el
correcto funcionamiento del programa.',mbCriticalError, MB_OK, IDOK
              )
41              Result := False;
42          end;
43  end;
44
45  function InitializeSetup: Boolean;
46  begin
47      if CheckRAM and EsWin10 then
48          Result:=True
49      else
50          Result:=False;
51  end;
52
53
54  procedure RunWinPcapInstaller;
55  var
56      ResultCode: Integer;
57  begin
58      Exec(ExpandConstant('{app}\Ultraleap_Tracking_Installer_5.4.5_win64.
exe'), '', '', SW_SHOWNORMAL,
59      ewWaitUntilTerminated, ResultCode);
60  end;
```

Listing F.1: Pascal Inno Setup pre-requisitos.