

Efectos de las tecnologías de realidad virtual y la estimulación eléctrica funcional en el desempeño de pacientes con limitación de marcha en el contexto de la terapia de espejo



Johny Daniel Rosero Herrera
Trabajo de Grado de Maestría en Automática

Director: PhD. Wilber Acuña Bravo
Codirector: MSc. Jerónimo Londoño Prieto

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Maestría en Automática
Popayán, Noviembre de 2021

Johny Daniel Rosero Herrera

Efectos de las tecnologías de realidad virtual y la estimulación eléctrica funcional en el desempeño de pacientes con limitación de marcha en el contexto de la terapia de espejo

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para la obtención del título de

Magister en:
Automática

Popayán, Noviembre de 2021

Resumen

Recuperar el movimiento de dorsiflexión es importante para la estabilidad corporal en personas que han sufrido un ACV. Diferentes métodos de rehabilitación como la realidad virtual inmersiva, estimulación eléctrica funcional y rehabilitación por terapia de espejo presentan resultados satisfactorios en el tratamiento de extremidades afectadas; sin embargo, este trabajo pretende indagar la posibilidad de unificar estas tres técnicas en un solo proceso de rehabilitación destinado a la dorsiflexión del pie.

Por lo tanto se plantea como objetivo de este trabajo, comparar la incidencia de la aplicación de la terapia de espejo en un ambiente virtual inmersivo en conjunto con la estimulación eléctrica funcional, en la funcionalidad motriz de miembro inferior cuando se realiza entrenamiento motriz basado en un ambiente virtual.

Palabras clave: Miembro inferior, rehabilitación, estimulación eléctrica funcional, realidad virtual inmersiva

Abstract

Recovering dorsiflexion movement is important for body stability in people who have suffered a stroke. Different rehabilitation methods such as immersive virtual reality, functional electrical stimulation and mirror therapy rehabilitation present satisfactory results in the treatment of affected limbs; however, this work aims to investigate the possibility of unifying these three techniques in a single rehabilitation process aimed at foot dorsiflexion.

Therefore, the objective of this work, is to compare the incidence of the application of mirror therapy in an immersive virtual environment in conjunction with functional electrical stimulation, in the motor functionality of the lower limb when motor training is performed based on a virtual environment.

Keywords: Lower limb, rehabilitation, functional electrical stimulation, immersive virtual reality

Índice general

Índice de cuadros	VII
1. Conceptualización del tema de investigación	1
1.1. Accidente cerebrovascular	1
1.2. Rehabilitación	2
1.2.1. Rehabilitación con electro estimulación eléctrica funcional	3
1.2.2. Rehabilitación con realidad virtual	3
1.2.3. Rehabilitación con terapia de espejo	3
1.2.4. Planteamiento del problema	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Organización del documento	5
2. Funcionalidad motriz del miembro inferior	7
2.1. Anatomía del miembro inferior	7
2.1.1. Movimientos del miembro inferior y motricidad	8
3. Arquitectura del sistema de entrenamiento	9
3.1. Parámetros y diseño del sistema propuesto	9
3.2. Plataforma de entrenamiento	11

3.3. Aplicación RRV inmersiva	17
3.3.1. Desarrollo de la aplicación virtual para dispositivo móvil	20
3.4. Aplicación de escritorio	21
3.4.1. Integración de los sistemas que componen el sistema de entrenamiento . . .	24
4. Protocolo de rehabilitación propuesto	27
4.1. Introducción	27
4.2. Justificación	27
4.3. Objetivos	28
4.4. Alcance	28
4.5. definiciones	28
4.6. Desarrollo del proceso	28
4.7. Criterios de inclusión	29
4.8. Criterios de exclusión	29
4.9. Procedimiento de rehabilitación física	29
4.9.1. Preparación de equipos	29
4.9.2. Preparación del paciente	30
4.9.3. Aplicación del proceso	30
4.9.4. Evaluación	33
4.9.5. Flujo del protocolo de entrenamiento	33
5. Experimentación y resultados	35
5.1. Encuesta	35
5.2. Pruebas de usabilidad	36

5.2.1. Resultados	36
5.2.2. Población sin antecedentes médicos	37
5.2.3. Resultados	38
5.2.4. Encuesta	42
5.3. Participantes con antecedentes médicos	43
5.4. Tiempos y parámetros de estimulación eléctrica	47
5.5. Resultados	48
5.5.1. Participante 1	48
5.5.2. Participante 2	53
5.5.3. Participante 3	57
5.5.4. Participante 4	62
5.5.5. Efecto de los tratamientos	68
6. Discusión y conclusiones	71
6.1. Discusión	71
6.2. Conclusiones	73
6.3. Trabajos futuros	73
Bibliografía	75

Índice de cuadros

3.1. Resumen de parámetros para la linealización de los sensores de posición angular .	14
3.2. Resumen de parámetros para el cálculo de tiempos de contracción y relajación . . .	16
3.3. Componentes de la plataforma de entrenamiento	19
3.4. Criterios para el desarrollo de la aplicación de realidad virtual inmersiva.	19
5.1. Cuestionario de usabilidad aplicado a los participantes	35
5.2. Características de los participantes y valores de estimulación	37
5.3. Características de la población con antecedentes médicos	43
5.4. Niveles de electroestimulación por cada sesión de rehabilitación.	47
5.5. Porcentaje de ganancia en movilidad de dorsiflexión	68

Capítulo 1

Conceptualización del tema de investigación

Este capítulo introduce conceptual mente la temática del proyecto, realiza una revisión bibliográfica de conceptos relacionados con la rehabilitación motriz de miembro inferior, métodos de rehabilitación y tecnologías utilizadas; además describe los objetivos del proyecto y la organización de la monografía investigativa.

1.1. Accidente cerebrovascular

El accidente cerebrovascular (ACV) es una enfermedad que afecta las arterias que conducen sangre al cerebro [1], ocurre cuando un vaso sanguíneo que transporta oxígeno y nutrientes al cerebro se rompe o es bloqueado por un coágulo. En consecuencia, parte del cerebro no puede obtener el oxígeno que las neuronas necesitan por lo tanto estas mueren.

Accidente cerebrovascular isquémico

Esta afectación ocurre cuando un vaso que suministra sangre al cerebro es obstruido, este tipo de accidente representa el 87 % de los ACV [2], y puede generarse debido a 2 tipos de obstrucción:

- **Trombosis cerebral:** Se debe a un trombo(coágulo de sangre) que se desarrolla en la placa

grasa dentro de un vaso sanguíneo [3].

- **Embolia cerebral:** Se debe a un coágulo de sangre que se genera en otra parte del sistema circulatorio, generalmente en el corazón o arterias, parte de este coágulo se desprende alcanzando los vasos más pequeños del cerebro [4].

Accidente cerebrovascular hemorrágico

Este tipo de lesión representa el menor porcentaje de los ACV, es causado por el rompimiento de un vaso debilitado originando sangrado en el área circundante y en consecuencia comprime el tejido cerebral alrededor de la ruptura [5], este tipo de ACV se puede clasificar en:

- **Hemorragia intracerebral:** Es una agrupación de sangre dentro del parénquima cerebral, producida por una rotura vascular no traumática. Generalmente se inicia en el tejido cerebral, se clasifica en primaria; el tipo más frecuente y se debe a la rotura de cualquier vaso, el tipo secundario se producen por roturas de los vasos congénitamente anormales, o con alteraciones en sus paredes o por coagulación [6].
- **Hemorragia subaracnoidea:** Ocurre cuando un aneurisma(globo lleno de sangre que sobresale de una arteria) se rompe en la superficie del cerebro o cerca de este y sangra en el espacio ubicado entre el cerebro y el cráneo, generalmente se genera por la presión arterial alta [7].

1.2. Rehabilitación

Según la organización mundial de la salud, la rehabilitación se define como «*un conjunto de medidas que ayudan a las personas que hayan experimentado, o es probable que experimenten, un tipo de discapacidad que dificulte mantener un funcionamiento óptimo en interacción con su entorno*»¹. En las últimas décadas, han surgido en el ámbito de la rehabilitación para ACV una serie de nuevas técnicas y tecnologías como terapia con electroestimulación funcional (EEF), la terapia con realidad virtual (RRV) y funcional y terapia de espejo (TE), las dos últimas enfocadas en el concepto de re-aprendizaje motor en el tratamiento orientado a la realización de tareas rehabilitadoras.

¹https://www.who.int/disabilities/world_report/2011/chapter4.pdf

1.2.1. Rehabilitación con electro estimulación eléctrica funcional

La EEF surge como una posibilidad en la medida que a través de pulsos eléctricos se estimula la función del sistema nervioso y de esa manera recuperar la movilidad del miembro afectado [8] lograr resultados más efectivos, la EEF se ha vinculado a diferentes dispositivos que integran sistemas tecnológicos sensoriales tales como los giroscopios, acelerómetros o interruptores los cuales detectan la intencionalidad del miembro afectado y de esa manera aplicar una estimulación con el propósito de generar movimientos intencionales [9, 10].

1.2.2. Rehabilitación con realidad virtual

La RRV se presenta como una alternativa tecnológica que permite adaptar técnicas terapéuticas convencionales a un entorno virtual que puede ser presentado en una pantalla o en un visor de realidad virtual [11, 12]. Este tipo de tecnologías utilizan sensores o cámaras para la captura de movimiento del miembro afectado que permiten simular ejercicios de recuperación motora[13].

1.2.3. Rehabilitación con terapia de espejo

En sus inicios la TE se aplicó como tratamiento para solucionar el dolor producido por el síndrome del miembro fantasma[14], luego fue adaptada a los casos de rehabilitación en personas con ACV obteniendo buenos resultados en lo que refiere a la recuperación motora y movimiento del tobillo [15]. Generalmente, para la aplicación de la TE se requiere un andamio el cual contiene un espejo ubicado de tal manera que el miembro afectado quede oculto y a su vez permite visualizar el reflejo del miembro sano[16], esta dinámica hace que la persona de manera voluntaria repita los movimientos y así recupere la capacidad motriz; este dispositivo es conocido como «caja de espejo» [16, 17].

1.2.4. Planteamiento del problema

Los procesos de rehabilitación son prácticas complejas que a través de una combinación de aplicaciones técnicas integradas, buscan lograr que el individuo recupere su estado funcional y de esa manera ejecutar actividades cotidianas [15]. Existen diferentes tipos de personas que acceden a procesos de rehabilitación como por ejemplo los que padecen un ACV, los cuales a partir de técnicas y ejercicios repetitivos acompañados de diferentes tecnologías como la robótica, visión artificial, estimulación eléctrica entre otros [10], han logrado recuperar la habilidad motriz y la capacidad muscular [9]. Estas técnicas se enfocan en rehabilitar movimientos del miembro superior

(brazos y manos) al igual que en miembro inferior (rodilla y pie). Para el proceso de rehabilitación en miembro inferior (el cual hace énfasis este trabajo investigativo) por lo general se aplican técnicas ya validadas en miembro superior, que aunque el objetivo es siempre recuperar la movilidad del miembro afectado, es claro que es necesario adaptar dichas tecnologías a las exigencias complejas y demandantes de las necesidades físicas que cada uno requiere [13]. Diferentes tecnologías de rehabilitación para miembro superior o inferior han tenido buenos resultados, como por ejemplo la EEF, la RRV y TE por el efecto positivo obtenido en corto y largo plazo [17]. Algunas técnicas de rehabilitación se combinan entre sí, con el propósito de obtener mayores beneficios en la recuperación del miembro afectado de personas con casos de ACV [12]. Experiencias unificadas de la TE con RRV, han demostrado efectividad en el proceso de rehabilitación de miembro inferior, este tipo de combinación permite ocultar el miembro afectado y reemplazarlo por uno virtual donde los movimientos son simulados en un espacio virtual [18, 19]. Otra de las técnicas combinadas es la TE con la EEF el cual hace uso de la caja de espejo con dispositivos de estimulación eléctrica configurable [20]. Su aplicación se caracteriza principalmente en realizar ejercicios programados en la TE, dichos movimientos son capturados por el dispositivo estimulador, esto con el fin de aplicar pulsos eléctricos al miembro afectado y de esa manera rehabilitarlo [21]. En el caso de la combinación de la técnica RRV con la EEF, se aplica para identificar la recuperación de postura y equilibrio corporal [22]. Esta técnica permite visualizar el cuerpo en una pantalla externa identificando el nivel de desviación lateral con respecto a la posición central del cuerpo, cuando se produce algún tipo de desviación, se produce un impulso eléctrico para que la persona regrese a su estado de equilibrio natural; esta técnica ha sido implementada en la recuperación del movimiento en rodilla y tobillo [22]. Tanto la TE, la EEF y la RRV son técnicas modernas que han favorecido a los procesos de rehabilitación y su combinación cada vez toma más fuerza en el campo de la ingeniería fisioterapéutica. Ahora bien, surge el interrogante sobre las posibilidades reales de unificar estas tres técnicas en un solo proceso integrador, realidad que en el desarrollo investigativo no se evidencio en las diferentes bases de datos consultadas; por ende surge el interrogante sobre ¿qué incidencia tendría la aplicación de la TE acompañada de EEF dentro o fuera de un ambiente virtual en el desempeño de un paciente con limitación de la marcha a causa de un ACV, en comparación con la aplicación de la TE convencional?.

1.3. Objetivos

En esta sección se presenta el objetivo general del proyecto y los objetivos específicos para alcanzarlo.

Objetivo general

Evaluar el efecto de la implementación de tecnologías de realidad virtual inmersiva y estimulación eléctrica funcional al aplicar la rehabilitación por terapia de espejo en el desempeño de un paciente con limitación de marcha no crónica causada por un ACV.

Objetivo específicos

1. Implementar el procedimiento de rehabilitación con terapia espejo para miembro inferior en una plataforma de realidad virtual inmersiva.
2. Proponer un mecanismo para la integración de la estimulación eléctrica funcional con el entorno virtual en el contexto de la rehabilitación con terapia de espejo.
3. Comparar el desempeño de los pacientes según el conjunto de tecnologías aplicadas en el proceso de rehabilitación.

Publicación asociada a este trabajo de grado

A continuación se presenta la producción científica asociada a este trabajo:

- J.D. Rosero-Herrera, W. Acuña-Bravo, J. Londoño-Prieto, Propuesta de un sistema con realidad virtual y electroestimulación para tratar el movimiento de dorsiflexión del tobillo: a propósito de un caso, *Fisioterapia*, 2021, In Press, Corrected Proof, Available online 22 October 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ft.2021.09.002>

1.4. Organización del documento

La presente monografía se divide en 6 capítulos. El capítulo 1 (ya abordado) presenta una breve introducción al tema de investigación, para contextualizar al lector. El capítulo 2 abarca la información relacionada con las medidas para estimar la habilidad motriz. El capítulo 3 presenta la descripción y el proceso de desarrollo del sistema de rehabilitación propuesto. El capítulo 4 presenta una descripción del proceso de rehabilitación y el protocolo planteado para realizar el entrenamiento sugerido. El capítulo 5 presenta el proceso de experimentación llevado a cabo y los resultados obtenidos. Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Funcionalidad motriz del miembro inferior

En este capítulo se presenta una introducción conceptual al miembro inferior, su motricidad y la selección de un parámetro de evaluación para la cuantificación de la habilidad motriz de la extremidad afectada.

2.1. Anatomía del miembro inferior

El miembro inferior está especializado en manejar la postura erecta en la locomoción y en asegurar el equilibrio de la persona [23], el hueso más grande y proximal del miembro inferior es el fémur, distalmente se localiza la tibia y el peroné y finalmente los huesos del tarso, los metatarsianos y las falanges. La articulación de la cadera realiza la función de colocación del miembro inferior en el espacio; la articulación de la rodilla hace que el miembro inferior aumente o disminuya de longitud, según el principio del compás, y el complejo pie-tobillo permite el contacto pleno del miembro inferior con cualquier superficie de apoyo [24], en la figura 2.1 se ilustra la estructura básica del miembro inferior del cuerpo humano.

Para un desplazamiento eficaz es importante que el pie pueda establecer un contacto adecuado con la superficie de apoyo, con independencia de lo irregular que pueda ser esta. Para ello, el cuerpo utiliza la combinación de movimientos disponibles en la articulación del tobillo y en las pequeñas articulaciones del pie. Todas ellas se mantienen en contacto estrecho y cuando actúan en combinación lo hacen como si fueran una única articulación de gran movilidad y resistencia [23, 24].

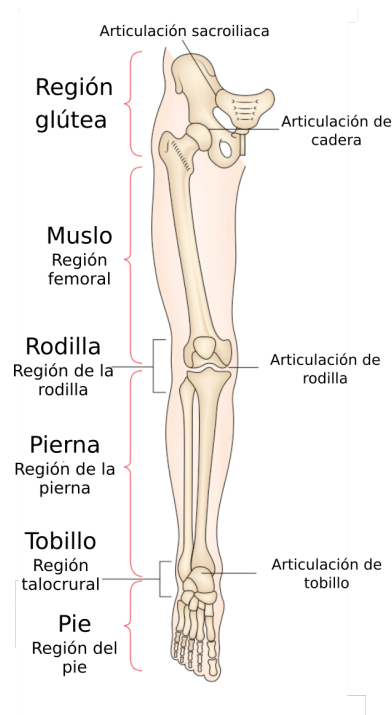


Figura 2.1: Estructura básica de la extremidad inferior [25]

2.1.1. Movimientos del miembro inferior y motricidad

La marcha humana es producto de procesos complejos que involucran al cerebro, la espina dorsal, los nervios periféricos, los músculos, los huesos y las articulaciones; así como la voluntad y la necesidad de realizar un movimiento específico en cada contexto de forma voluntaria o involuntaria [26].

El concepto de habilidad motriz básica viene a considerar toda una serie de acciones motrices que aparecen según la evolución biológica, tales como marchar, correr, girar, entre otras, por lo tanto se puede decir que habilidad motriz es la capacidad del movimiento humano adquirido por aprendizaje de posteriores acciones motrices más complejas [27, 28].

Capítulo 3

Arquitectura del sistema de entrenamiento

En el presente apartado se desglosan los aspectos relevantes en el proceso de desarrollo software-hardware tales como, el marco de trabajo, modelos, diseños y las herramientas de entorno de desarrollo integrado (IDE's) utilizados para la ejecución de este proyecto. Este capítulo está dividido en cuatro secciones, en la sección parámetros y diseño propuesto se describen los parámetros generales para el desarrollo del sistema propuesto, establecidos por un fisioterapeuta.

En la sección conceptualización diseño y construcción de la plataforma para medición angular de tobillo, se describe el proceso de construcción del sistema mecánico y electrónico que compone el módulo de entrenamiento, en la sección conceptualización diseño y desarrollo de aplicación de RRV inmersiva se describe la conceptualización y desarrollo de una aplicación para dispositivo móvil que combina la TE y la RRV inmersiva, finalmente en la sección conceptualización diseño y construcción de la aplicación para computador se describe el proceso de construcción de una aplicación de escritorio para la configuración y manipulación del sistema electrónico y el procesamiento de la información correspondiente al proceso de entrenamiento.

3.1. Parámetros y diseño del sistema propuesto

Se propone un sistema electromecánico con visión en RRV inmersiva para el análisis de desempeño y la rehabilitación de pacientes que presentan hemiplejía e incapacidad de movimiento en alguno de sus miembros inferiores, con requerimientos o necesidades específicas tanto de quien realizara el proceso de rehabilitación como de quien aplica el proceso. Para esta finalidad se

reunieron los atributos y requerimientos basados en la opinión de un fisioterapeuta, estos requerimientos son:

1. Plataforma de entrenamiento

- **Posición** La posición en la cual se realiza el proceso de entrenamiento, debe ser en posición sedente, ya que se requiere limitar los movimientos de la extremidad inferior y solo permitir el movimiento angular de tobillo en la extremidad afectada.
- **Ubicación de las extremidades inferiores:** La apertura entre la pierna y rodilla debe formar un ángulo entre 100 a 130 grados.
- **Variable a medir** El parámetro a evaluar es el ángulo de dorsiflexión de la extremidad afectada, en dorsiflexión, se puede medir hasta de 40 grados y en planiflexión hasta -30 grados.
- **Movimiento del pie** Se restringe el movimiento del tobillo para que solo se pueda ejecutar el movimiento angular del tobillo.
- **Electro estimulación** Debe tener la capacidad de suministrar la EEF cada vez que se ejecute un movimiento de dorsiflexión en el tobillo de la extremidad afectada, además generar niveles de estimulación desde nivel sensorial, hasta nivel motor.

2. TE Y RRV inmersiva

- **Ambiente** Un ambiente virtual inmersivo con un entorno urbano por ejemplo una sala de una casa, con iluminación natural y texturas aproximadas a la realidad.
- **Avatar** Este debe tener forma antropomorfa en posición de sedente con visión directa hacia los pies, el vestuario debe ser deportivo con los pies descalzos.
- **Dispositivo de visión** Cualquier dispositivo móvil con acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, que sea compatible con la visualización de realidad virtual inmersiva.
- **Movimiento corporal** El movimiento que se debe visualizar es la dorsiflexión de tobillo en ambos pies.

3. Aplicación de computador

- **Visualización** Permitir la visualización de los datos durante el tiempo de ejecución del proceso de entrenamiento, permitir la visualización de datos almacenados de cada sesión correspondiente a cada participante, configurar el tiempo de duración del proceso de entrenamiento.
- **presentación de la información** La presentación de los valores angulares correspondientes a la dorsiflexión de tobillo de ambas extremidades deben presentarse en gráficas (ángulo vs tiempo), durante la ejecución del proceso de entrenamiento y de los datos almacenados en cada sesión, presentar la información de forma clara y visual posible.

- **Almacenamiento de información** El sistema debe tener una base de datos que permita almacenar la información relevante del paciente como: nombre, edad, extremidad afectada, sesiones de entrenamiento.
- **Electroestimulación** Debe permitir configurar los parámetros de intensidad del electroestimulador correspondiente a los valores de fábrica en un rango de 0 a 10 siendo este último el valor máximo, también configurar el tiempo de aplicación de estimulación en un rango de 0 a 30 segundos y el tiempo de descanso en un rango de 0 a 60 segundos. El electroestimulador seleccionado debe ser capaz de suministrar un voltaje máximo de 120 voltios y una corriente máxima de 10 miliamperios, además debe estar avalado por el INVIMA.

3.2. Conceptualización diseño y construcción de la plataforma de entrenamiento

La importancia de este sistema radica en la adquisición del movimiento de dorsiflexión del tobillo en personas con ACV. Teniendo en cuenta los requerimientos del sistema, se procede a diseñar un boceto con los elementos y medidas que se aproximen a una idea inicial la cual es evaluada por el fisioterapeuta, para verificar el diseño de la plataforma de entrenamiento se desarrolla un modelo 3D en el software CAD Solid Edge versión estudiantil, donde se pueden visualizar los componentes, dispositivos, geometría, rangos y medidas que componen esta plataforma, también permite observar el desplazamiento angular de las bases que soportan los pies, ubicación de los sistemas electrónicos y la estabilidad de la plataforma en general, el modelo inicial es evaluado en las diferentes sesiones de revisión, donde se proponen cambios hasta llegar a un modelo final el cual se puede visualizar en las figuras 3.1a 3.1b 3.1c.

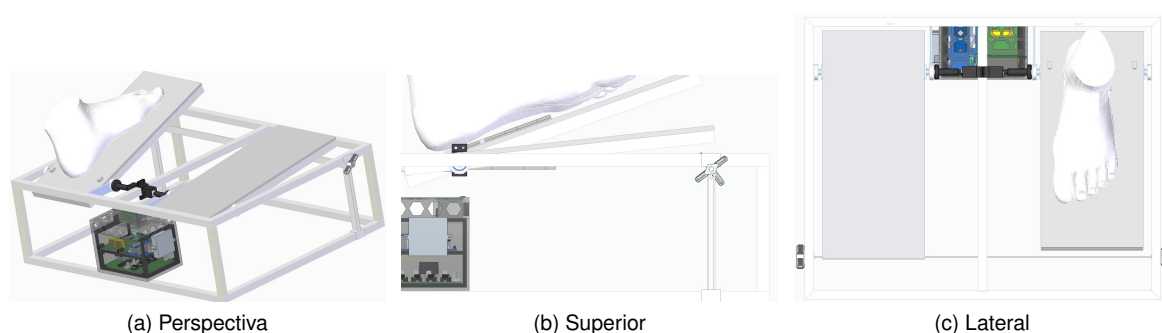


Figura 3.1: Modelo final 3d de la plataforma de entrenamiento

Con el modelo final, se procede a construir la plataforma de entrenamiento real. Para la estructura principal se utilizó tubo metálico para aportar rigidez y soportar el peso de las extremidades cuando se esté realizando el proceso de entrenamiento, el sistema de giro está apoyado sobre

cojinetes metálicos que permiten disminuir la fricción y fuerza requerida para generar el movimiento del pie, estos cojinetes están ubicados debajo del punto de giro del tobillo. Se utiliza un botón de plástico rígido que restringe los movimientos de pronación, supinación y los movimientos involuntarios de los dedos del pie durante la ejecución del proceso de entrenamiento, el botón está unido a una base que a su vez está unida a los cojinetes de rotación.

Para la medición del movimiento angular se utiliza un potenciómetro de rotación lineal, para fijar el sensor a la plataforma se diseña un soporte en un modelo 3D para luego ser desarrollado en una impresora 3D, en las figuras 3.2a 3.2b se presentan el proceso de construcción del soporte, también se puede observar la posición del sensor, donde el vástago está unido al punto de giro del cojinete por medio de un extensor y el cuerpo fijado a la plataforma por medio del soporte construido.

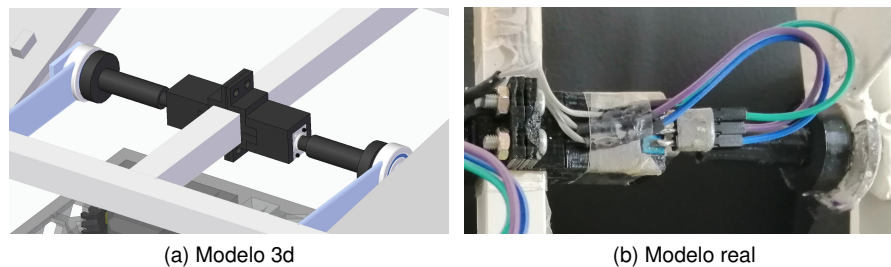


Figura 3.2: Construcción del soporte para el sensor de rotación

La adquisición, procesamiento de datos y control del sistema está implementado en una tarjeta *Arduino nano*. Las especificaciones de este dispositivo son suficientes para el desarrollo del sistema ya que permite realizar conversión analógica digital con una resolución de 10 bits, tiene la cantidad suficiente de pines digitales de entrada y salida y permite la creación de múltiples puertos para comunicación serial y comunicación por USB a un computador. La comunicación de datos hacia el dispositivo móvil se realiza por medio de un módulo Bluetooth y al computador por comunicación USB.

Caracterización de sensores para captura de movimiento angular

Como sensor de movimiento angular se utilizó un potenciómetro rotacional lineal de $10\text{ k}\Omega$, su funcionamiento se basa en el cambio de resistencia con el cambio de rotación angular del vástago, lo que significa que la resistencia cambia linealmente con la posición, donde el valor mínimo es de 50Ω y el máximo es de $10\text{ k}\Omega$, la variación del ángulo que se desea medir, está entre los -30 a 40 grados.

Calibración del sensor Se ubica el sensor en la mitad del recorrido del vástago con el fin de lograr el máximo recorrido angular positivo y negativo, como punto inicial de referencia se ubica la base de apoyo del pie en posición horizontal la cual corresponde a un valor angular igual a 0 grados, se ubica un transportador como patrón de medición el cual está centrado en el punto de giro de cada cojinete y diagonal a la plataforma. En intervalos de cinco grados se cambia la posición de la base iniciando con un ángulo de 0 grados hasta 35 grados, para la adquisición de datos se utiliza la tarjeta *Arduino* la cual envía los valores capturados por el conversor análogo digital a una aplicación de computador la cual almacena los datos para un posterior procesamiento. Para disminuir el error en el proceso de medición de los datos este proceso de calibración se repite cuatro veces capturando datos cada 10 milisegundos durante un minuto. Para transformar los datos digitales a sus correspondientes angulares se desarrolla una aplicación en Matlab la cual organiza los datos según el ángulo medido, se calcula la media de cada ángulo y se gráfica el resultado obteniendo una línea recta que describe la relación del valor digital capturado contra el ángulo medido. En las figuras 3.3a 3.3b se presentan los gráficos del proceso de transformación de valores digitales a grados por cada sensor.

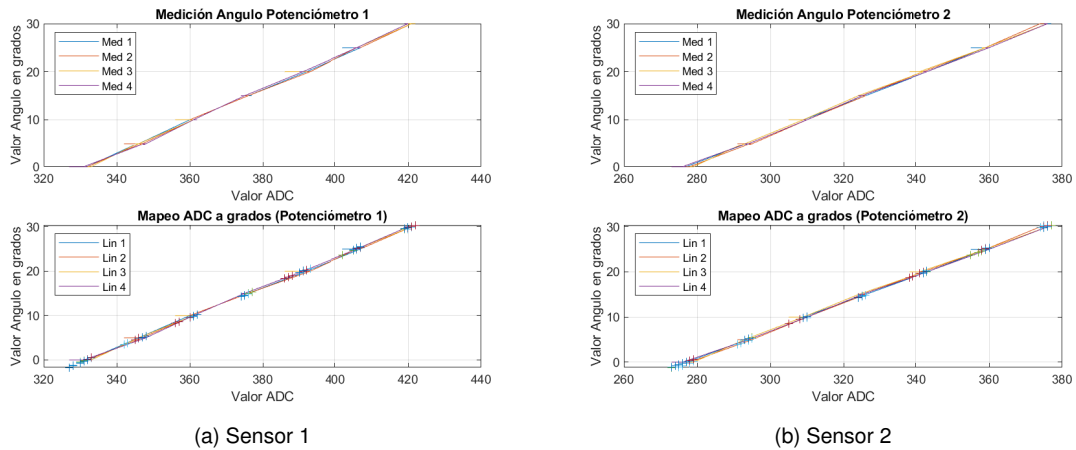


Figura 3.3: Transformación valores digitales a valores angulares

Con la herramienta `polyfit` de Matlab se encuentran los parámetros correspondientes a la ecuación de línea recta de cada sensor que permite realizar la transformación de valores digitales a angulares, la ecuación utilizada para la transformación de datos es:

$$y_i = p_{1i}z_i + p_{2i}, \quad i \in [1, 2], \quad y_i \in [-30^\circ, 30^\circ] \quad (3.1)$$

donde:

y_i es el valor angular calculado

x_i es el valor digital medido

μ_i es la media de x_i

σ_i es la desviación estándar de x_i

p_{1i} y p_{2i} son parámetros del polinomio

La pendiente se puede calcular mediante la relación

$$z_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}. \quad (3.2)$$

El término i hace referencia a la ubicación del sensor empleado, en donde $i = 1$ corresponde al pie izquierdo e $i = 2$ corresponde al pie derecho. Los demás parámetros de (3.1) y (3.2) se resumen en el Cuadro 3.1. En las Figuras 3.3a y 3.3b se presentan los gráficos del proceso de transformación de datos de los sensores.

Tabla 3.1: Resumen de parámetros para la linealización de los sensores de posición angular

Sensor	σ	μ	p_1	p_2
Izquierdo	32.58	326.2	9.99	15
Derecho	29.72	376.18	9.99	15

Cada ecuación es ingresada en el firmware de la tarjeta *Arduino* con el fin de realizar la conversión angular del movimiento del pie en tiempo real.

Electroestimulador

Se seleccionó un dispositivo de electroestimulación comercial, el cual es de uso común en procesos de rehabilitación por los fisioterapeutas, este dispositivo cuenta con el aval médico (INVIMA). Se trata de un dispositivo EMS 5.0 el cual tiene dos canales para electroestimulación, cada uno con un control de intensidad, además permite controlar el tiempo de contracción, tiempo de relajación y configurar la frecuencia de la señal. Las características principales de este dispositivo son:

- **Ancho de pulso:** 250 microsegundos.
- **Velocidad de pulso:** 5, 30, 100 Hz.
- **Desnivel de pulso:** 1, 3, 5 Segundos.
- **Amplitud de pulso:** Ajustable (0 - 80) mA.
- **Control de contracción:** 1 - 30 segundos.
- **Control de relajación:** 1 - 45 segundos.
- **Forma de onda:** Pulso cuadrado bifásico asimétrico.

Este dispositivo fue modificado para poder realizar la configuración de intensidad de electroestimulación, tiempo de contracción y relajación desde una aplicación de computador, a continuación se describen las modificaciones realizadas al equipo de electroestimulación.

Potenciómetros digitales Este electroestimulador utiliza cuatro potenciómetros análogos, dos de $10\text{ K}\Omega$ para modificar los valores de intensidad de estimulación y dos potenciómetros de $20\text{ K}\Omega$ para modificar los tiempos de contracción y relajación. Estos potenciómetros son reemplazados por potenciómetros digitales con un valor de resistencia similar los cuales son controlados por la tarjeta *Arduino* por medio de comunicación SPI.

La escala de intensidad del electro estimulador está en el rango de 0 a 10 (adim), la resolución del potenciómetro digital está en un rango de 0 a 255, donde cada cambio digital corresponde a un valor de $39\ \Omega$, por lo tanto para un valor de resolución igual a cero se obtiene $0\ \Omega$ y para un valor de resolución de 255 se obtiene $10\text{ k}\Omega$.

Para que coincidan los valores de resistencia del potenciómetro digital a los valores del electroestimulador se realiza un mapeo donde el valor 0 digital corresponde al valor 0 de intensidad y el valor 255 del potenciómetro digital corresponde al valor 10 de intensidad en el electroestimulador.

De igual forma se realiza un proceso de mapeo para los tiempos de contracción y relajación para la estimulación, donde 0 en resolución digital corresponde a $0\ \Omega$ que a su vez se traduce a un tiempo de 0 segundos tanto para contracción y relajación y 255 en resolución digital correspondiente a $20\text{ K}\Omega$ obteniendo un tiempo máximo de 30 segundos para contracción y 45 segundos para relajación.

Para realizar el mapeo de datos se obtiene una ecuación que transforma los valores de resolución digital a sus correspondientes en ohmios, que a su vez indican el tiempo de contracción y relajación permitiendo la configuración desde la aplicación de computador la cual se describe más adelante.

Para encontrar la ecuación correspondiente a cada potenciómetro se realiza el mismo proceso descrito para los sensores angulares, la ecuación (3.3) (3.4) describe la transformación de valores para el cálculo de tiempos de contracción y relajación, en la tabla 3.1 se presentan las constantes correspondientes a cada potenciómetro.

$$y = p_1z + p_2 \quad (3.3)$$

donde:

y es el valor angular calculado

x es el valor digital medido

μ es la media de x

σ es la desviación estándar de x

p_1 y p_2 son parámetros del polinomio

La pendiente se puede calcular mediante la relación

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}. \quad (3.4)$$

Tabla 3.2: Resumen de parámetros para el cálculo de tiempos de contracción y relajación

Sensor	σ	μ	p_1	p_2
Contracción	8.8034	15.5	9.8675	19.558
Relajación	8.8034	15.5	2.8441	6.0999

Para la activación de cada canal, se utilizan relés de estado sólido los cuales son controlados por pines digitales en la tarjeta arduino los cuales permiten la activación de cada canal de forma independiente. En la figura 3.4a 3.4b se muestra el diseño electrónico desarrollado para el control del sistema de electro estimulación y en la figura 3.5 se muestra la maquina de estados implementada en la tarjeta arduino.

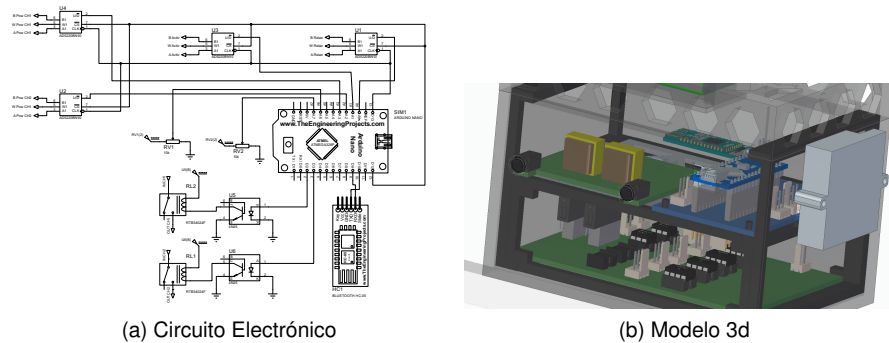


Figura 3.4: Diagrama electrónico del sistema de adquisición y procesamiento de datos

Con la integración de los elementos mecánicos y electrónicos que componen la plataforma de entrenamiento se obtiene el sistema con el cual se realizará el proceso de entrenamiento, adquisición y procesamiento de datos, en las figuras 3.6 se muestra la plataforma de entrenamiento construida y en la tabla 3.3 se describe los componentes que conforman la plataforma de entrenamiento.

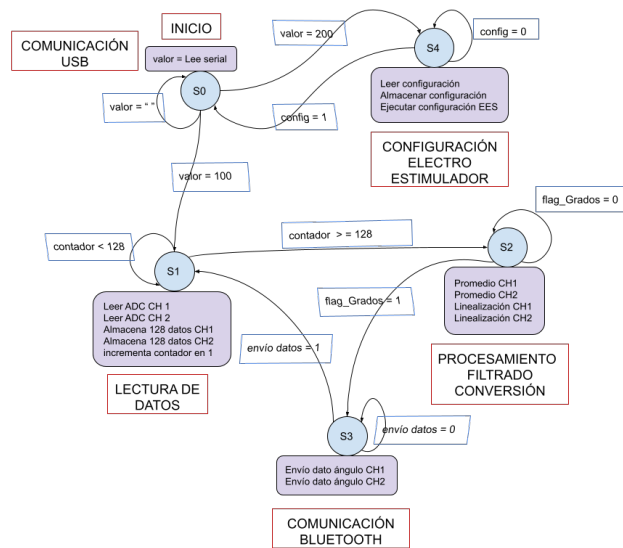


Figura 3.5: Máquina de estados implementada en el firmware

3.3. Conceptualización diseño y desarrollo de aplicación de realidad virtual inmersiva

El concepto de la aplicación se basa en el empleo de la TE en un ambiente de RV inmersiva, donde se visualiza el movimiento de cada extremidad inferior. Los criterios para el desarrollo del ambiente virtual fueron definidos por un fisioterapeuta, los cuales se pueden observar en la tabla 3.4

Estos criterios, permiten iniciar el proceso de construcción del ambiente virtual, selección del escenario, el avatar, texturas, materiales e iluminación que integrarán el ambiente virtual en el cual se visualizará el proceso de entrenamiento. A continuación se describe el desarrollo y construcción del ambiente virtual.

Modelado del ambiente virtual

Para el modelado del ambiente virtual y el avatar se utilizó el software de modelado 3D Blender, este software permite diseñar modelos 3D, integrar texturas y materiales adicionar puntos de iluminación, agregar controladores de movimiento al objeto 3d, lo cual cumple con los requerimientos par el desarrollo del ambiente virtual.

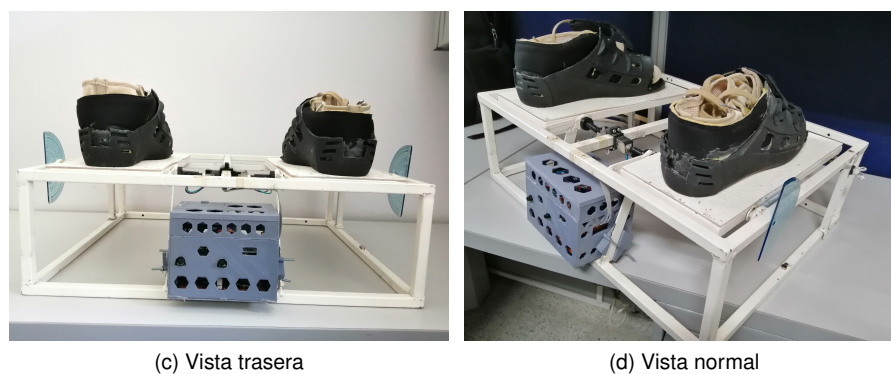
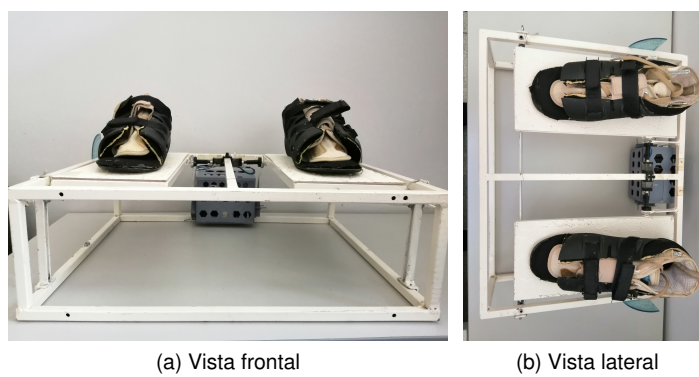


Figura 3.6: Plataforma de entrenamiento

Tabla 3.3: Componentes de la plataforma de entrenamiento

Componente	Descripción
Protector	Está hecho de espuma y tela con el fin de evitar contactos fuertes entre el pie y el zapato, evita desplazamientos involuntarios y acomoda el ajuste del pie durante la sesión de entrenamiento.
Zapato	Está hecho de plástico rígido, evita que el pie genere movimientos diferentes a los de la dorsiflexión del tobillo, tiene correas ajustables que permiten adaptar el tamaño del pie, estos zapatos están unidos a la plataforma de giro.
Plataforma de giro	Permite la dorsiflexión del pie, el valor de referencia está en posición horizontal permitiendo ángulos negativos de hasta -30 grados y ángulos positivos de hasta 40 grados.
Base	Brinda la estabilidad de todo el sistema, está construida en hierro para lograr la resistencia necesaria cuando se esté realizando el proceso de entrenamiento.
Base para electroestimulador	Contiene los sistemas electrónicos que permiten el control y proceso de electroestimulación, está fijada a la base para facilitar el transporte del sistema.
Tarjeta de control	Permite el control del sistema de electroestimulación, comunicación con la aplicación móvil y con la aplicación de computador.
Electroestimulador	Este sistema comercial está modificado con el fin de poder ser configurado desde la aplicación de computador.

Tabla 3.4: Criterios para el desarrollo de la aplicación de realidad virtual inmersiva.

Criterio	Descripción.
Ambiente	El ambiente de visualización debe ser similar a un ambiente urbano, puede ser un lugar de una casa; como por ejemplo una sala o una habitación.
Avatar	El avatar o personaje debe ser representativo para el género masculino y femenino, usar ropa deportiva con los pies descalzos sin ninguna obstrucción visual.
Iluminación	Preferiblemente natural, en horas de la mañana y debe permitir visualizar el movimiento de entrenamiento de forma correcta.
Posición	La posición del avatar debe ser similar a la de la persona que realizará el entrenamiento, en posición sedente que permita la visualización de las extremidades inferiores.

Ambiente virtual El ambiente virtual se diseñó basado en imágenes de sitios arquitectónicos de habitaciones y salas. El modelo propuesto representa una sala con un espacio amplio, el avatar se ubicará sobre un sillón de frente a una ventana con visualización a un jardín, esta sala se decora con varios elementos y diferentes tipos de muebles, se adiciona iluminación tanto ambiental(sol), como iluminación artificial(lámparas) para mejorar la visualización de las extremidades inferiores, las texturas y materiales son de tonos claros con diferentes diseños, se pretende que el participante se visualice en sitio común del hogar.

Avatar Para el diseño de avatar se utiliza un cuerpo humano completo, al cual se le elimina la cabeza, ya que en su lugar se ubicará la cámara que permite visualizar el movimiento de entrenamiento, a este cuerpo virtual se adiciona un esqueleto que permite controlar el movimiento de las extremidades, para la vestimenta se adiciona una camiseta y un pantalón corto con colores comunes en la ropa deportiva. En general los modelos tanto del ambiente virtual como del avatar están desarrollados con el método de «pocos polígonos», esto significa que se reduce al mínimo la cantidad de puntos o vértices que componen los objetos, con el fin de disminuir los cálculos de traslación y rotación en el sistema donde se realizará la visualización del ambiente virtual. En la figuras 3.7a 3.7b 3.7c se presenta el diseño del ambiente virtual y el avatar.

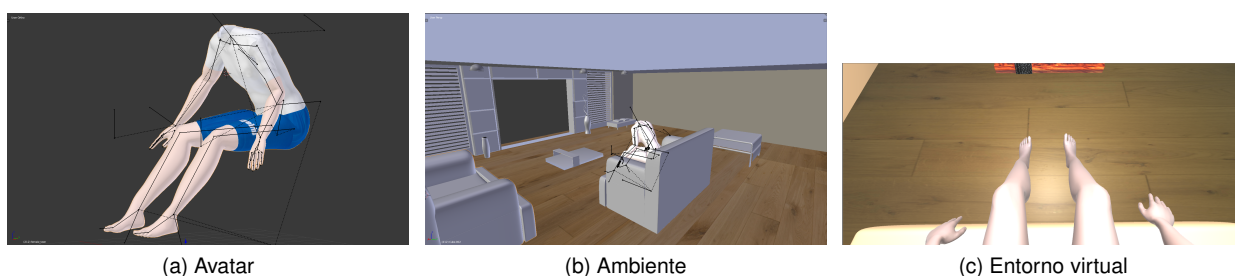


Figura 3.7: Modelos para el ambiente virtual

3.3.1. Desarrollo de la aplicación virtual para dispositivo móvil

Para el desarrollo de la aplicación de visualización para dispositivo móvil se utilizó el motor de videojuegos Unity3d, esta herramienta es generalmente utilizada para el desarrollo de juegos de entretenimiento, visualización arquitectónica, visualización médica, entre otros. Permite la integración de objetos 3D desarrollados en blender, controlar el movimiento de los objetos 3D, manipular la visualización de cámaras, integrar realidad virtual inmersiva y generar aplicaciones para dispositivos móviles, permite el desarrollo de scripts en lenguaje C#, e integrar módulos para el control de periféricos como el bluetooth del dispositivo móvil. Se implementa un script el cual captura los datos correspondientes al movimiento angular de tobillo generados en la plataforma de entrenamiento y recibidos por medio del Bluetooth del dispositivo móvil, estos datos son utilizados para generar el movimiento de las extremidades inferiores del avatar en el ambiente virtual. Con Unity 3D también se crea la aplicación de realidad virtual inmersiva compatible con el dispositivo móvil. En las imágenes 3.8a 3.8b 3.8c se muestra el entorno de Unity 3D y la aplicación de realidad virtual en el dispositivo móvil.

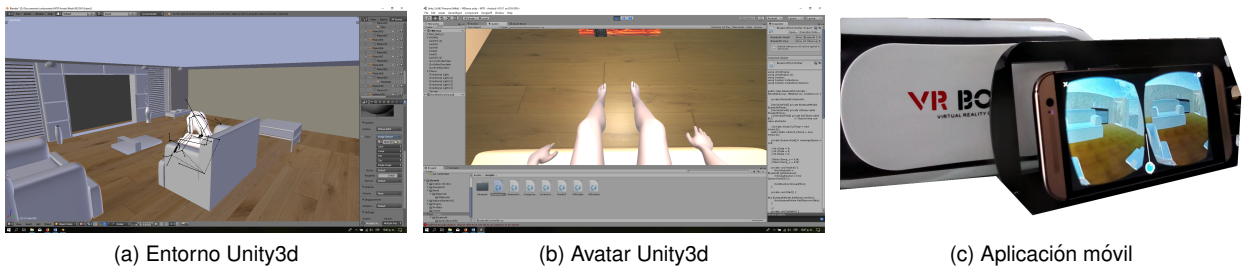


Figura 3.8: Unity 3d y aplicación de RV

3.4. Conceptualización diseño y construcción de la aplicación para computador

Esta aplicación se desarrolla con el fin de almacenar la información de personas que realizan el proceso de entrenamiento, la cantidad de sesiones realizadas y la visualización e interpretación de los resultados obtenidos los cuales serán analizados por el fisioterapeuta con el fin de evaluar el progreso en la recuperación motora de la extremidad inferior. La aplicación propuesta se compone de una base de datos, una interfaz para visualizar el movimiento angular de dorsiflexión en las extremidades inferiores en tiempo real, también cuenta con una interfaz que permite visualizar los datos almacenados del movimiento y una interfaz para la configuración del dispositivo de electroestimulación.

Para el desarrollo se utilizó el IDE de VisualStudio utilizando C# como lenguaje de programación, en la Figura 3.9 se observa el modelo UML que se diseñó para esta aplicación.

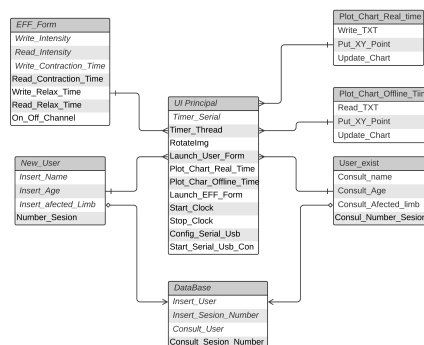


Figura 3.9: Diagrama UML de la aplicación de computador

A continuación se describen los módulos que componen esta aplicación.

Interfaz principal

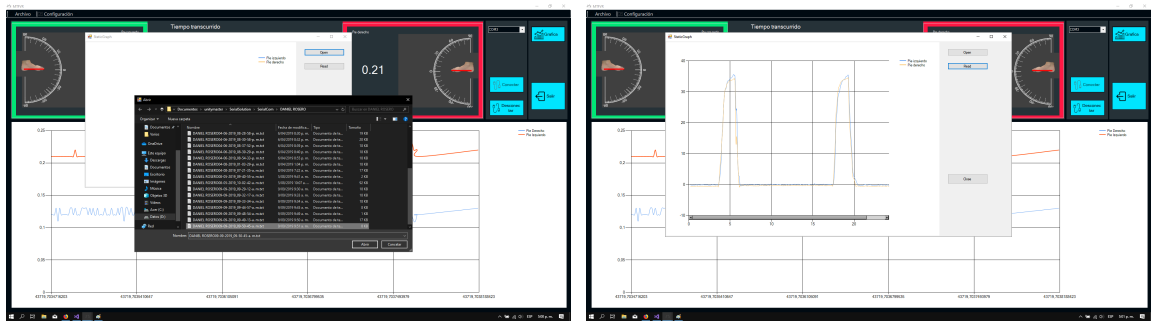
La interfaz principal se compone de dos espacios ubicados en los extremos de la parte superior, cada uno con una imagen del pie derecho e izquierdo los cuales giran con respecto a los datos obtenidos desde la plataforma de entrenamiento, en la parte inferior se encuentra una gráfica que despliega el comportamiento de los valores angulares con respecto al tiempo, además posee un contador de tiempo que indica la duración del proceso de entrenamiento, la interfaz también cuenta con controles que permiten realizar la conexión y comunicación con la plataforma de entrenamiento. Para la captura, visualización y almacenamiento de datos se utiliza procesamiento multi hilo con el fin de evitar retardos entre la captura de datos y la visualización, lo cual permite representar los datos angulares en las diferentes gráficas de la interfaz en tiempo real. En la figura 3.10 se puede observar el modelo de multi hilos implementado para la captura y visualización de la información.



Figura 3.10: Interfaz Principal

Interfaz *offline*

Esta interfaz tiene como objetivo la visualización de los datos de las diferentes sesiones, con el fin de analizar de forma detallada el proceso de cada sesión. Presenta los datos angulares almacenados con respecto al tiempo en una gráfica. Esta interfaz permite seleccionar los datos que se desean visualizar según la sesión que se desee analizar. En las figuras 3.11a 3.11b se presentan las interfaces que permiten la visualización de datos fuera de línea.



(a) Selección del participante

(b) Visualización de la información

Figura 3.11: Interfaces OffLine para visualización de datos

Interfaz de configuración electroestimulador

Esta interfaz se compone de controladores que permiten administrar el rango de intensidad de cada canal, estos niveles se presentan con valores desde 0 a 10 similar a los rangos del electroestimulador, para controlar el tiempo de contracción y relajación se utilizan controladores que indican el tiempo en segundos para cada parámetros, para contracción un rango de 1 a 30 segundos y para relajación un rango de 1 a 45 segundos, Los valores de configuración del electroestimulador son transmitidos por comunicación serial a la tarjeta arduino la cual es la encargada de controlar el electroestimulador, en la Figura 3.12 se puede observar la distribución de los controladores en esta interfaz.

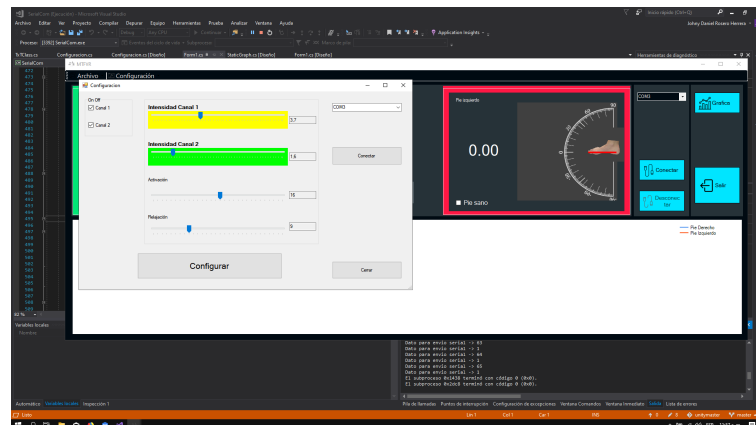


Figura 3.12: Interfaz de configuración para el electroestimulador

Base de datos

La base de datos implementada tiene como objetivo almacenar la información relevante de cada participante, como el nombre, edad, extremidad afectada y sesiones realizadas, esta base de

datos está implementada en el motor de base de datos SQLite. La base de datos desarrollada está compuesta de dos tablas relacionadas; en la primera se almacena los datos correspondientes al nombre, edad y extremidad afectada y en la segunda tabla se almacena la cantidad de sesiones realizada por cada participante. En la Figura 3.13 se puede observar el modelo relacional de la base de datos implementada.

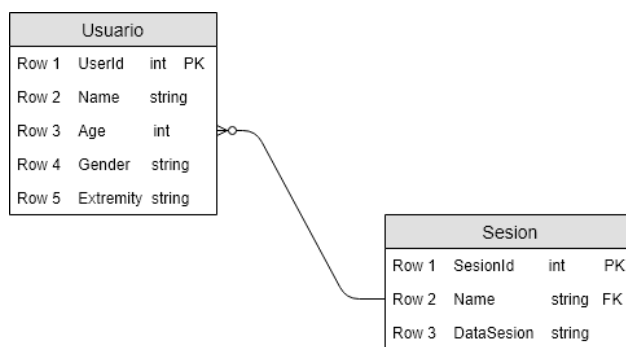


Figura 3.13: Base de datos Pacientes

3.4.1. Integración de los sistemas que componen el sistema de entrenamiento

La plataforma de entrenamiento es el sistema principal, ya que es el encargado de la captura de los valores angulares, procesamiento y envío de la información al dispositivo móvil y a la aplicación de computador, como también de recibir la información correspondiente al inicio y finalización del proceso de entrenamiento y la configuración del sistema de electroestimulación. La comunicación entre la plataforma de entrenamiento y el dispositivo móvil se realiza por medio de comunicación bluetooth, esta comunicación es en un solo sentido, donde la plataforma envía los datos del movimiento angular generado por la dorsiflexión a la aplicación de realidad virtual inmersiva la cual hace uso del Bluetooth del dispositivo móvil. Para la comunicación entre la plataforma de entrenamiento y la aplicación de computador se utiliza comunicación serial por medio de un cable USB, esta comunicación es en doble vía, la plataforma envía los datos generados por la dorsiflexión a la aplicación de computador para que esta pueda dibujarlos y desde la aplicación hacia la plataforma se envían los parámetros de configuración del electroestimulador y los comandos de inicio y finalización del proceso de entrenamiento. En la Figura 3.14 se observa el modelo de bloques y la interacción entre ellos.

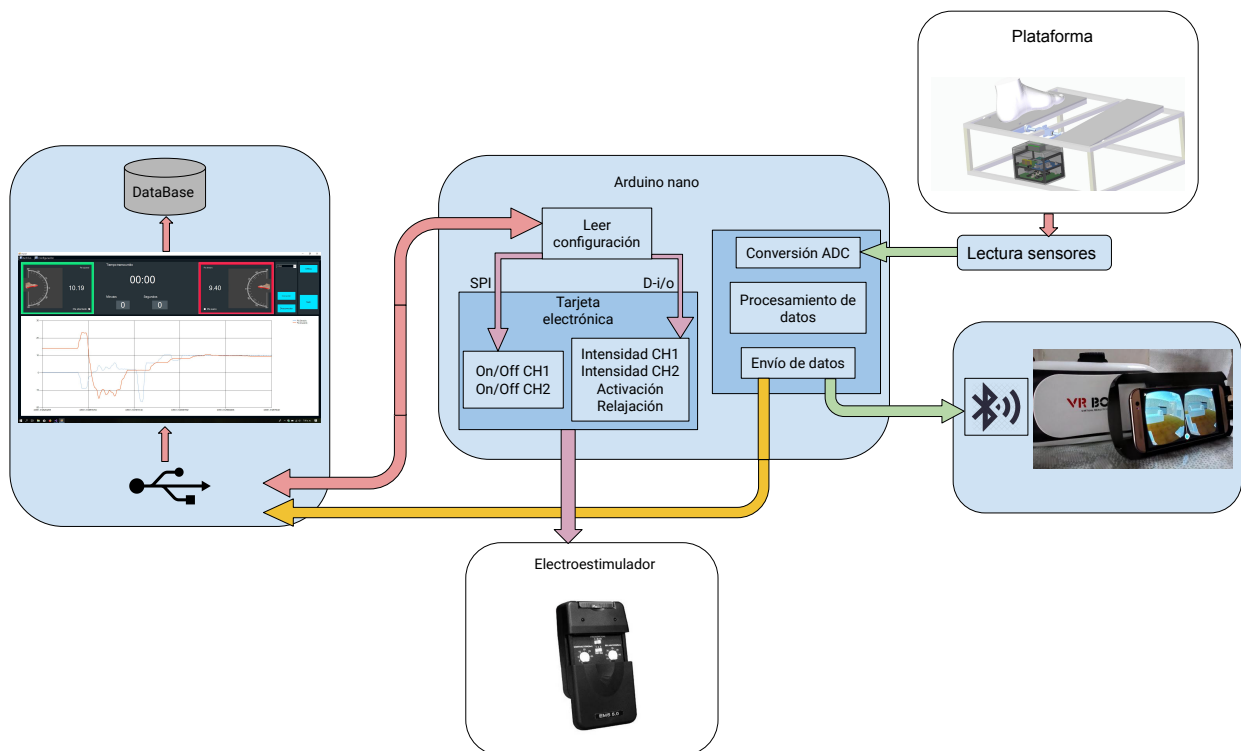


Figura 3.14: Modelo de bloques del sistema de entrenamiento.

Capítulo 4

Protocolo de rehabilitación propuesto

4.1. Introducción

El accidente cerebro vascular es un padecimiento potencialmente discapacitante que repercute negativamente en el ámbito familiar y social. Dependiendo del hemisferio cerebral afectado, se verá alterado un lado u otro del cuerpo, así que en la hemiplejia derecha la lesión ACV es en el hemisferio izquierdo del cerebro. Los síntomas del ACV se manifiestan repentinamente, a veces de forma súbita y empeoran en cuestión de horas, o a veces días. Es significativo saber que la mayoría de ACV isquémicos o hemorrágicos causan uno o más de los siguientes síntomas: desviación de la boca, pérdida de la fuerza en el rostro, en uno de los brazos, pierna o de todo un lado del cuerpo, dolor de cabeza intenso, brusco y sin causa aparente, alteración de la sensibilidad, pérdida brusca de la visión de uno o ambos ojos, parcial o total, alteración repentina del lenguaje, dificultad para caminar o pérdida del equilibrio, pérdida de la audición, y desorientación. Esta patología deja importantes limitaciones e incapacidades, por lo que el proceso de rehabilitación debe intentar restaurar un nivel de autonomía que permita a la persona volver a su domicilio en las mejores condiciones posibles, tanto físicas como psíquicas.

4.2. Justificación

La necesidad de rehabilitación cubre todas las edades, aunque a menudo en función de esta difieren su tipo, grado, y objetivos. La recuperación de la capacidad para llevar a cabo las actividades necesarias para el cuidado personal requieren de un proceso detallado del tratamiento que se piensa aplicar. Por otro lado se quiere evaluar los efectos de la implementación de tecnologías de realidad virtual y estimulación eléctrica funcional al aplicar la rehabilitación con terapia de es-

pejo en el desempeño de un paciente con limitación de marcha debido a un accidente cerebro vascular.

4.3. Objetivos

- Procurar restablecer las funciones perdidas o disminuidas en la extremidad inferior afectada.
- Dar información sobre los progresos en la recuperación motora de la extremidad afectada a la familia y/o paciente.
- Explicar en detalle el procedimiento y su importancia como apoyo al tratamiento rehabilitador facilitando el cuidado y maniobrabilidad del paciente.
- Motivar al paciente con una aplicación novedosa de rehabilitación para la recuperación de movimiento en el miembro inferior.

4.4. Alcance

Este protocolo esta dirigido a orientar el manejo de personas con diagnostico de ACV.

4.5. definiciones

ACV: Accidente Cerebro vascular, es el resultado de una brusca interrupción del flujo sanguíneo al cerebro, por oclusión o ruptura de un vaso.

REHABILITACIÓN: Conjunto de técnicas y métodos que sirven para recuperar una función o actividad del cuerpo que ha disminuido o se ha perdido a causa de un accidente o una enfermedad.

ACTIVIDADES TERAPÉUTICAS: Actividades destinadas al logro de los objetivos terapéuticos planteados en el plan de tratamiento individual a través de acciones individuales, grupales y comunitarias.

4.6. Desarrollo del proceso

Al participante con capacidad de realizar el proceso de rehabilitación, se les explicara el procedimiento de forma detallada con el fin de guiarlo en la rehabilitación, introduciendo los conceptos

necesarios sobre la tecnología utilizada para que el paciente apropie la idea del proceso y poder realizar el ejercicio propuesto en el tiempo establecido. Los participantes del estudio deben leer, aceptar y firmar el consentimiento informado. A cada participante se le debe realizar una evacuación antes, durante (finalización de la segunda etapa), y al finalizar el proceso(día hábil inmediatamente termine la intervención), del arco de movilidad que tiene para la dorsiflexión del tobillo comprometido.

4.7. Criterios de inclusión

Personas que cumplan los siguientes requisitos:

- Personas que hayan sufrido un ACV de cualquier etiología (hemorrágico, trombótico o embólico).
- Personas con un rango de edad entre 18 a 70 años de edad, con un tiempo de evolución desde los 6 meses en adelante.
- La capacidad de movimiento angular de tobillo afectado (dorsiflexión) debe estar mínimo entre los 2 grados a 10 grados.

4.8. Criterios de exclusión

- personas que presenten algún tipo de enfermedad mental.
- Personas que presenten algún tipo de discapacidad visual.
- Sensibilidad elevada a la electroestimulación.

4.9. Procedimiento de rehabilitación física

4.9.1. Preparación de equipos

Para el proceso de rehabilitación se necesitan los siguientes equipos:

- Computador.
- Plataforma de entrenamiento.

- Visor de realidad virtual.
- Dispositivo móvil con aplicación de realidad virtual inmersiva.
- Cables de conexión USB y electroestimulación.
- Electrodo para electroestimulación.

Los equipos se deben ubicar en lugares que permitan facilitar la conexión entre los dispositivos, tal como lo muestra la gráfica, seguido se debe encender el computador y colocar la batería al dispositivo electroestimulador. Se debe conectar por medio de un cable USB la plataforma de entrenamiento y el computador, a continuación se debe iniciar la aplicación que permite configurar la plataforma y visualizar los datos del proceso de entrenamiento (es necesario que la plataforma y el computador este conectados por medio del cable USB, para que la aplicación de computador funcione). El dispositivo de electroestimulación inicia con parámetros de nivel de intensidad en el valor mínimo y con los canales desactivados. Luego de haber inicializado la aplicación en el computador y la plataforma de entrenamiento, se debe activar la conexión Bluetooth del dispositivo móvil y ejecutar la aplicación de realidad virtual, esta se conectara de forma automática a la plataforma de entrenamiento por medio de comunicación Bluetooth. Se debe conectar los cables de electroestimulación a los canales correspondientes en el electroestimulador y a cada extremidad inferior. En la imagen 4.1 se observa el esquema general de la ubicación de los equipos para la aplicación del proceso de rehabilitación.

4.9.2. Preparación del paciente

La ubicación del paciente es importante, este debe estar en posición sedente, sobre una silla que permita ajustar la altura de la misma con el fin de acomodar la postura de las piernas sobre la plataforma de entrenamiento. El paciente debe utilizar ropa cómoda que permita el fácil acceso a la superficie de la piel en las rodillas para la colocación de los electrodos para la electroestimulación. Se debe indicar la posición de la cabeza de tal forma que se observen los pies de la persona, además se debe ubicar las piernas del paciente en un ángulo que permita lograr el mayor recorrido en la dorsiflexión del pie en las dos extremidades inferiores. La ubicación de las manos pueden estar sobre las piernas para evitar generar esfuerzos innecesarios. Se debe limpiar con un algodón y alcohol la zona en la cual se ubicaran los electrodos, posteriormente ubicar estos electrodos como se muestra en la Figura 4.2.

4.9.3. Aplicación del proceso

- Insertar los pies del paciente en la plataforma de entrenamiento, de tal forma que el talón del pie presione la parte de atrás del botín y asegurar el pie firmemente para evitar que haya

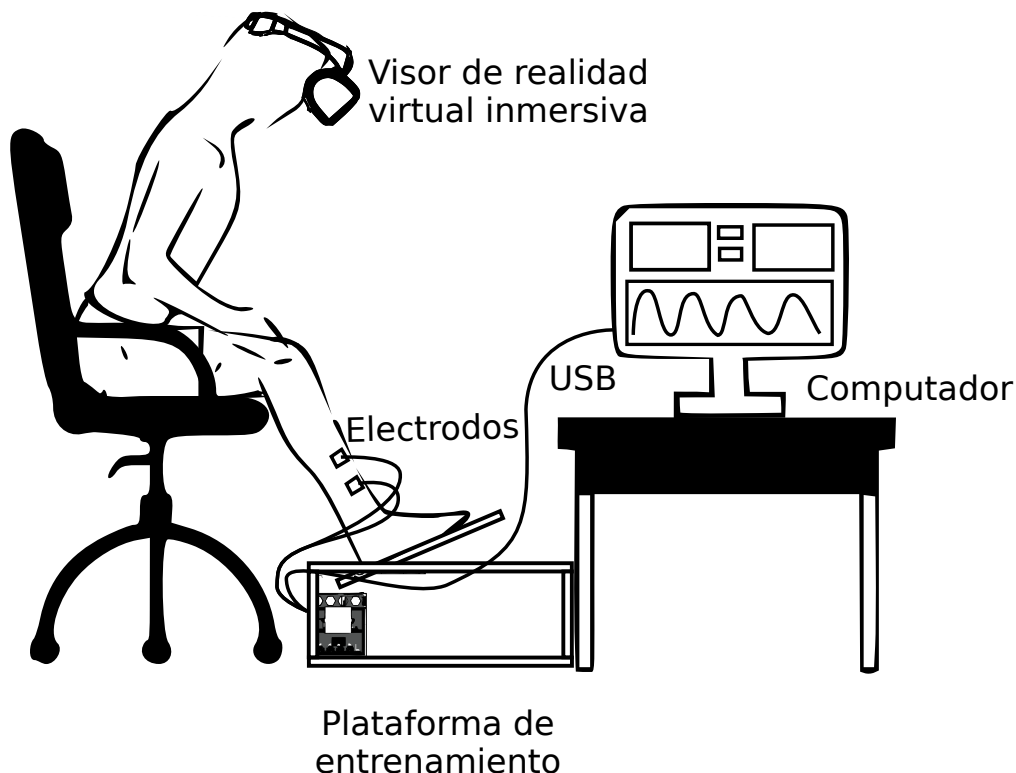


Figura 4.1: Ubicación de los electrodos en las extremidades inferiores

movimientos no requeridos. Ubicar los electrodos para electroestimulación en las regiones sugeridas y conectar los cables a los electrodos, este proceso se realiza con los canales del electroestimulador desactivados,

- Iniciar la aplicación de computador para realizar la configuración del electroestimulador, seguido ubicar los controladores de nivel de intensidad del electroestimulador en el nivel mínimo, a continuación activar los canales de estimulación, se inicia con el canal correspondiente a la extremidad no afectada aumentando en nivel de intensidad desde el controlador correspondiente preguntado continuamente al participante sobre el nivel de sensación generada por la estimulación de tal forma que sea perceptible y no ocasione movimientos involuntarios o dolor, al encontrar el nivel de intensidad necesario se debe desactivar el canal correspondiente.
- Para la extremidad afectada se debe activar el canal correspondiente con el nivel de intensidad mínimo, este se incrementa de forma controlada hasta que haya una respuesta de movimiento en el pie de la extremidad afectada, consultando continuamente al paciente si siente dolor durante el proceso y si es posible incrementar la intensidad de estimulación, a continuación desactivar el canal correspondiente. Al encontrar los niveles correctos de estimulación se deben anotar estos parámetros con el fin de establecerlos como punto de referencia en la siguiente sesión.

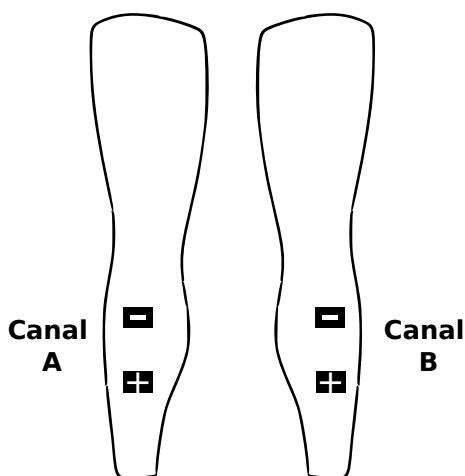


Figura 4.2: Ubicación de los electrodos en las extremidades inferiores

- Luego de haber configurado la intensidad del electro estimulador, se debe configurar el tiempo de contracción (tiempo de de estimulación eléctrica) y tiempo de relajación (tiempo de no estimulación eléctrica) en rangos de 1:5 respectivamente, por ejemplo 5 segundos de activación y 25 segundos de relajación o 7 segundos de activación y 35 segundos de relajación.
- Colocar el visor sobre la cabeza del paciente cubriendo la parte frontal del rostro, para que el participante observe la imagen proyectada por el visor de realidad virtual.
- Ubicados todos los elementos de forma correcta en las posiciones sobre el paciente, se debe configurar el tiempo de rehabilitación en la aplicación de computador y pulsar el botón de inicio para iniciar el proceso. Cada vez que el paciente sienta un pulso de estimulación eléctrica, debe intentar subir los dos pies al tiempo, en el visor de realidad virtual se refleja el movimiento en los dos pies con el movimiento detectado por la extremidad sana.
- En la interfaz de computador se visualiza un conteo en retroceso del tiempo hasta llegar a cero, indicando la finalización del proceso de rehabilitación, la información generada por cada sesión se almacena de forma automática para luego poder ser analizada en el visor de señales incorporado en la aplicación, al terminar el tiempo configurado en la aplicación, se desactivan los canales de electroestimulación.
- A continuación se debe retirar el visor de realidad virtual, y los electrodos de electroestimulación y almacenarlos en sus correspondientes empaques. (Electrodos, cables de conexión, visor de realidad virtual, dispositivo móvil y computador).
- Abrir el visualizador de señales e importar el archivo con los datos correspondientes al paciente que finalizó la sesión actual y cargar estos datos para que sean dibujados en pantalla para ser analizados por el fisioterapeuta.

4.9.4. Evaluación

Por cada sesión realizada se almacena la información del progreso, pero la evaluación se realizará con las sesiones en las cuales no se utiliza la estimulación eléctrica ni la realidad virtual, los datos obtenidos de estas sesiones indicaran el valor máximo de dorsiflexión en cada intento de movimiento durante la sesión, estos puntos serán utilizados para encontrar el valor medio y la dispersión de los datos, con el fin de concluir si el participante ha logrado aumentar el movimiento en la extremidad afectada.

4.9.5. Flujo del protocolo de entrenamiento

Para tener una mayor claridad en el proceso de entrenamiento propuesto se desarrolla un diagrama de flujo el cual describe los pasos y procesos que se deben ejecutar para realizar el proceso de rehabilitación en las figuras 4.3 4.4a 4.4b se observan los diagramas de flujo.

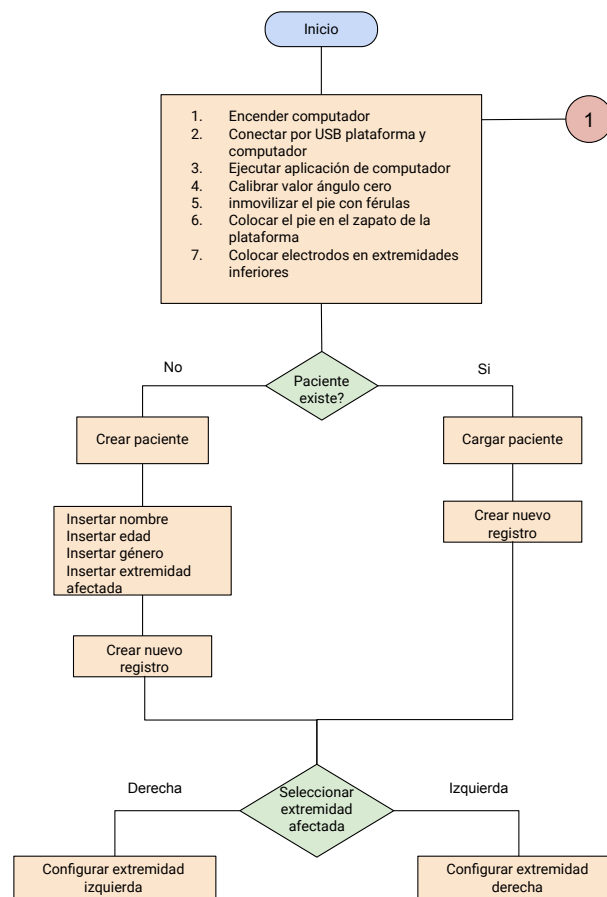


Figura 4.3: Configuración aplicación de computador

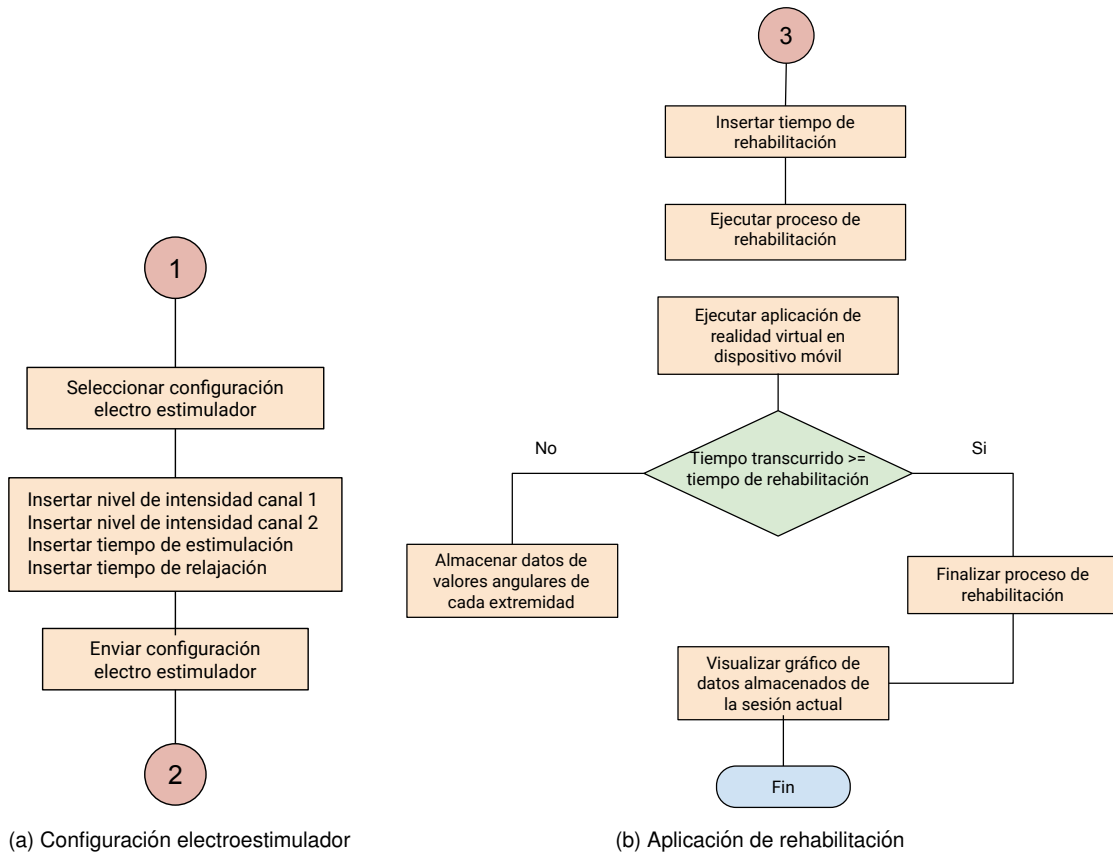


Figura 4.4: Protocolo de rehabilitación.

Capítulo 5

Experimentación y resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de demostración a personas sanas, profesores y estudiantes de fisioterapia de la universidad del Cauca, también a cuatro personas que han sufrido un ACV y cumplen con los requisitos expuestos en el protocolo propuesto.

5.1. Encuesta

El cuestionario se enfoca en la facilidad de uso de la plataforma de entrenamiento, la aplicación de realidad virtual y la aplicación de computador. Para la creación y evaluación de la encuesta se utilizó «la escala de Likert» [29], esta escala ofrece una gama de opciones que abarcan un espectro de respuestas, desde «extremadamente probable» hasta «nada probable». Normalmente estas respuestas incluyen un punto medio, moderado o neutral. La Tabla 5.1 resume las preguntas del cuestionario aplicado a los participantes.

Tabla 5.1: Cuestionario de usabilidad aplicado a los participantes

No pregunta	Pregunta
1	Considera Ud. que el sistema de sujeción es
2	El contacto de la planta y los dedos del pie con la superficie del botín es
3	Considera Ud. que el botín se adapta al pie de forma adecuada
4	El soporte de inmovilización y el acolchado del zapato proporcionan una estabilidad del pie
5	El peso de la base y el botín en el desarrollo de la aplicación es

6	La posición de las piernas permite que el pie se mueva de forma
7	Considera Ud. que la comodidad de la postura corporal en posición sedente para la aplicación de la rehabilitación es
8	Considera Ud. que el ambiente virtual se asemeja a uno real de forma
9	La visualización de las extremidades en el entorno virtual se asemejan a las reales de forma
10	Considera Ud. que el avatar en el ambiente virtual lo representa de forma

5.2. Pruebas de usabilidad

En una única presentación del sistema propuesto, se exponen las características de la aplicación de realidad virtual, plataforma de entrenamiento y aplicación de computador a once personas entre profesores y estudiantes de últimos semestres del Programa de fisioterapia de la Universidad del Cauca. La demostración se realizó con una persona sana a la cual se le aplicó el protocolo propuesto y las demás observaban el procedimiento, al finalizar la sesión se solicitó a cada participante completar una encuesta sobre la usabilidad del sistema de entrenamiento.

5.2.1. Resultados

Los participantes opinaron que el sistema cumple con los requerimientos, tanto en los movimientos que se pueden ejecutar como en las restricciones necesarias para evitar los movimientos no deseados; en cuanto a la información presentada en la aplicación de computador, la gráfica y el movimiento de las imágenes muestra de forma clara el recorrido angular del pie.

El proceso de configuración del electroestimulador se facilita, ya que es similar a como se realiza en el sistema real, en las secciones que están relacionadas con el ambiente virtual se esperaba que la visualización del ambiente virtual y el avatar fueran más realistas, que se presentara la opción para la selección del género, color de piel y ambiente virtual.

En general los resultados de la encuesta se encuentran sobre el 75 % indicando que en términos generales el dispositivo propuesto cumple con los requerimientos planteados en la etapa de conceptualización, la pregunta 8 presenta un porcentaje sobre el 69 % indicando que la presentación del ambiente virtual en el dispositivo móvil no es tan satisfactorio, esto se debe a que los modelos 3D se desarrollaron con la menor calidad posible para que puedan ser visualizados en un dispositivo móvil el cual posee recursos de procesamiento menor a otros dispositivos para la visualización de realidad virtual.

En la Figura 5.1 se presenta un diagrama de barras con los resultados a las preguntas planteadas en la encuesta.

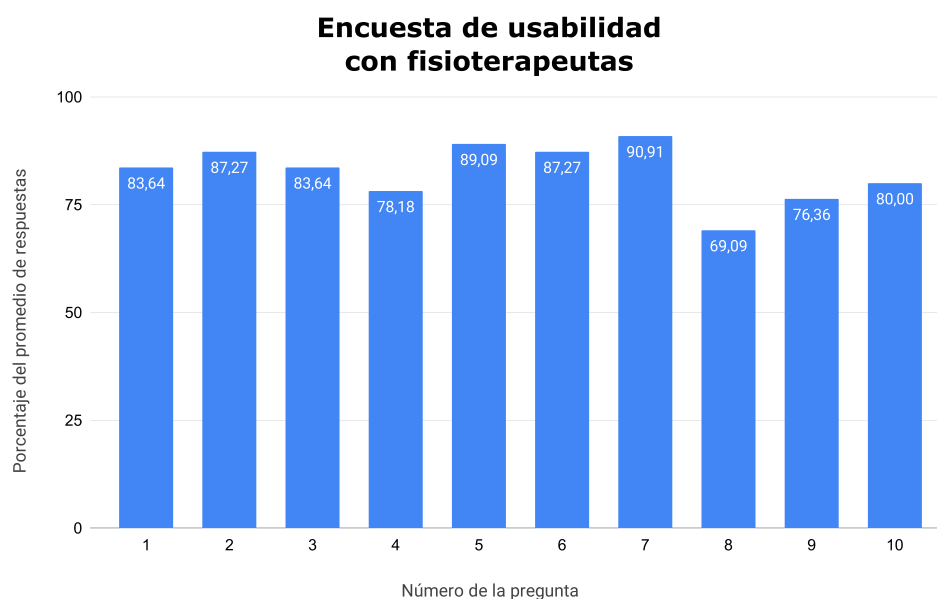


Figura 5.1: Resultados de la encuesta de usabilidad

5.2.2. Población sin antecedentes médicos

Para validar la usabilidad del sistema, previo a la aplicación del protocolo de rehabilitación en pacientes con patología post-ACV, se aplicó el proceso planteado en el protocolo del capítulo 4 a tres personas sanas, las cuales no presentaban ningún tipo de afectación motora ni cognitiva. Se inició explicando de forma detallada el proceso de rehabilitación propuesto a los participantes, los cuales aceptaron de forma voluntaria realizar la prueba de funcionalidad.

Los 3 participantes son de género masculino, diestros con edades de 27 años, 29 años y 45 años respectivamente. La prueba se realizó según el protocolo de rehabilitación propuesto y el tiempo de aplicación se redujo a un minuto, con el objetivo de evaluar la usabilidad del sistema en personas sanas. En la Tabla 5.2 se presentan las características de los participantes y parámetros aplicados para la prueba.

Tabla 5.2: Características de los participantes y valores de estimulación

Participante	Edad	Género	Pie	Intensidad
1	27	M	Diestro	1.5
2	29	M	Diestro	1.8
3	54	M	zurdo	1.3

5.2.3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos del proceso de dorsiflexión para los voluntarios sanos en las dos extremidades inferiores, evaluando el comportamiento del movimiento angular frente al proceso de electroestimulación y visualización de realidad virtual inmersiva, analizando los valores angulares máximos correspondientes a cada participante.

Participante 1

La Figura 5.2 muestra el movimiento de dorsiflexión generado en las dos extremidades inferiores durante el proceso de entrenamiento, se observa que el valor angular máximo logrado es similar en los dos pies. El participante obtiene el máximo movimiento angular permitido por la plataforma, también se observa que las respuestas a la electroestimulación son simétricas en las dos extremidades tanto en tiempo de contracción como de descanso, así como sincronizadas según los estímulos aplicados.

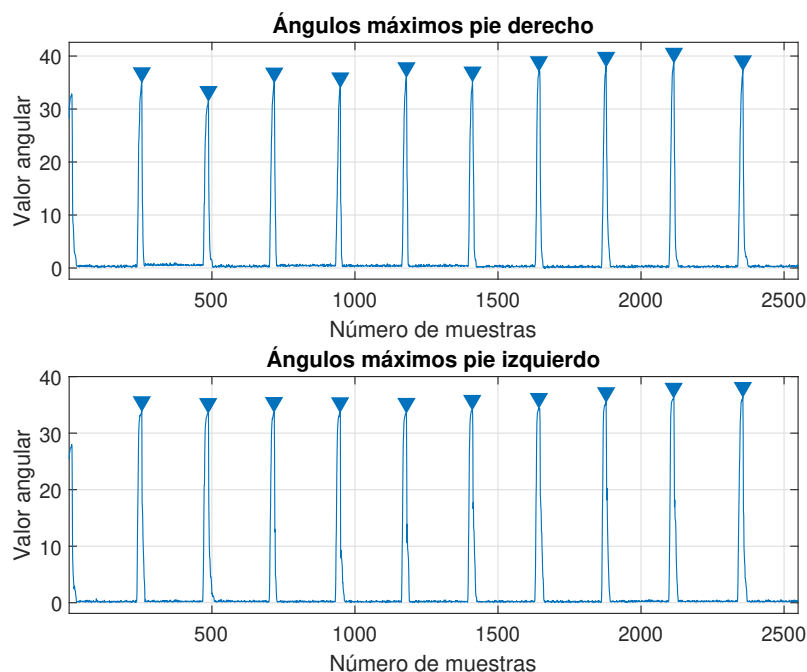


Figura 5.2: Movimiento angular extremidad derecha e izquierda, participante 1.

En la Figura 5.3 se presentan los valores máximos alcanzados por el voluntario a lo largo de la prueba. La gráfica superior muestra la dispersión de los ángulos máximos logrados por la extremidad derecha, se puede apreciar que los valores están concentrados alrededor de los 35° con una dispersión entre los 36° a 37.5°. Para la extremidad izquierda correspondiente a la gráfica

inferior, los datos de movimiento angular están concentrados alrededor de los 33.9° con un rango entre los 34.3° a 33.7° .

El nivel de motricidad del participante tiene un comportamiento dentro de los rangos normales de funcionalidad, la dispersión de los datos muestran una dispersión de dos grados, lo cual indica que el participante posee control en el movimiento de la extremidad, ya que alcanza valores angulares similares.

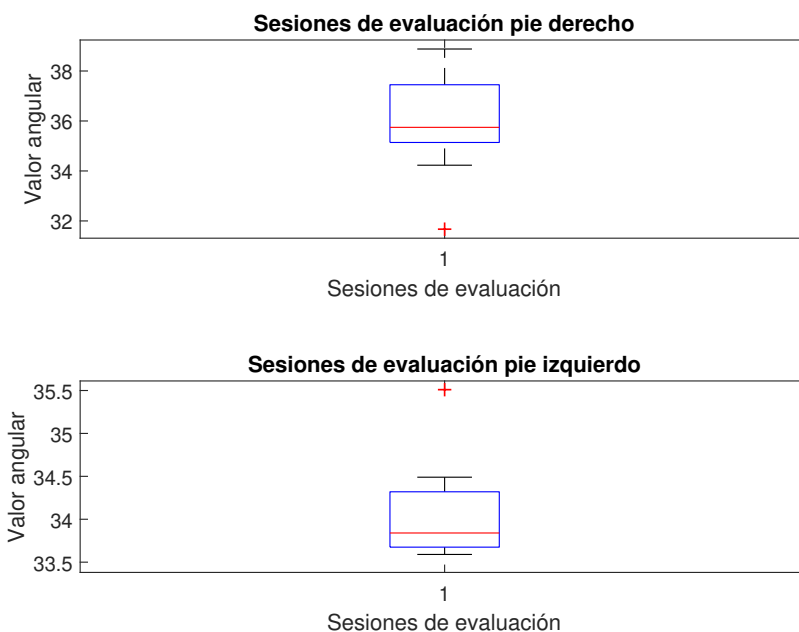


Figura 5.3: Dispersión en los ángulos máximos alcanzados, participante 1

Participante 2

En la Figura 5.4 se presentan los datos correspondientes a la dorsiflexión de las dos extremidades inferiores, el nivel máximo de dorsiflexión alcanzado es similar en las dos extremidades, logrando alcanzar el límite de movimiento de la plataforma, con respecto a la frecuencia de movimiento, en las dos extremidades es similar, además corresponde a los tiempos de contracción y descanso generados por el electroestimulador.

La Figura 5.5 indica que este participante puede realizar los movimientos de dorsiflexión en las dos extremidades inferiores con precisión, los valores angulares máximos para la extremidad derecha están concentrados de 37.4° con un máximo de 37.7° y un mínimo de 36.6° , con una dispersión de un grado para esta extremidad, para la extremidad izquierda se observa que el

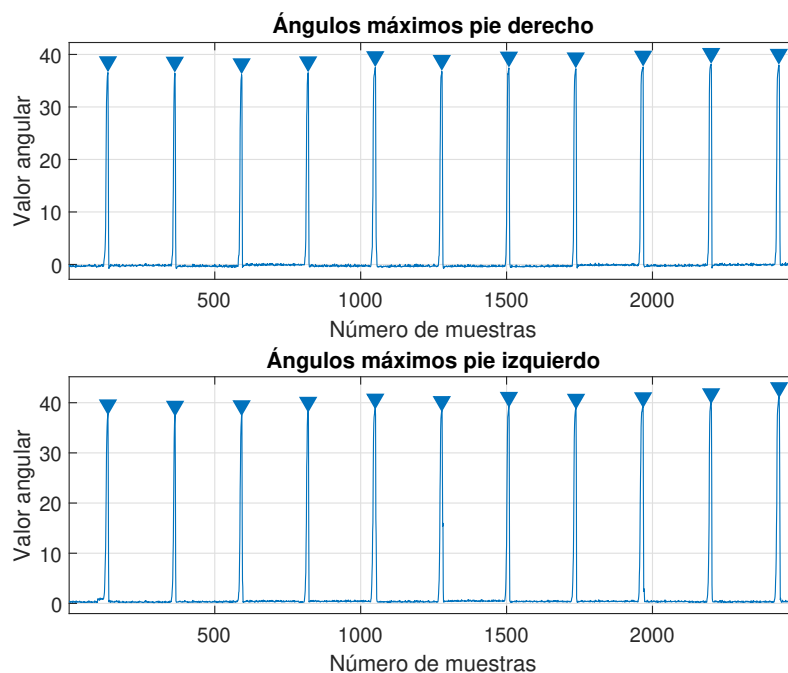


Figura 5.4: Movimiento angular extremidad derecha e izquierda, participante 2

movimiento angular máximo están concentrado en 38.9° , con un rango entre los 39.3° y 38.3° , los movimientos de este participante están dentro de los rangos normales de funcionalidad motora, los rangos de dispersión muestran que la persona tiene control sobre la habilidad funcional ya que los movimientos se realizan con precisión.

Participante 3

En la Figura 5.6 se aprecia el comportamiento del movimiento angular de las extremidades inferiores, en comparación a los participantes 1 y 2, el participante no logra mantener un nivel de movilidad con rangos de movimiento similares, esto se debe a que la persona presenta hipersensibilidad a la electroestimulación, razón por la cual el nivel de intensidad de estimulación es configurado a nivel sensorial en las dos extremidades. Esto produjo un efecto diferente en el experimento, pues el movimiento no es inducido por la intensidad de la estimulación sino, por la voluntad de movimiento del participante a partir de un estímulo de baja amplitud. Debido a esto, no se logró generar una contracción muscular que permitiera alcanzar el nivel máximo de dorsiflexión, por otro lado se puede apreciar que la frecuencia de contracción y descanso esta acorde con la configuración realizada en el electroestimulador.

La Figura 5.7 muestra que los valores máximos angulares en las extremidades inferiores tiene un

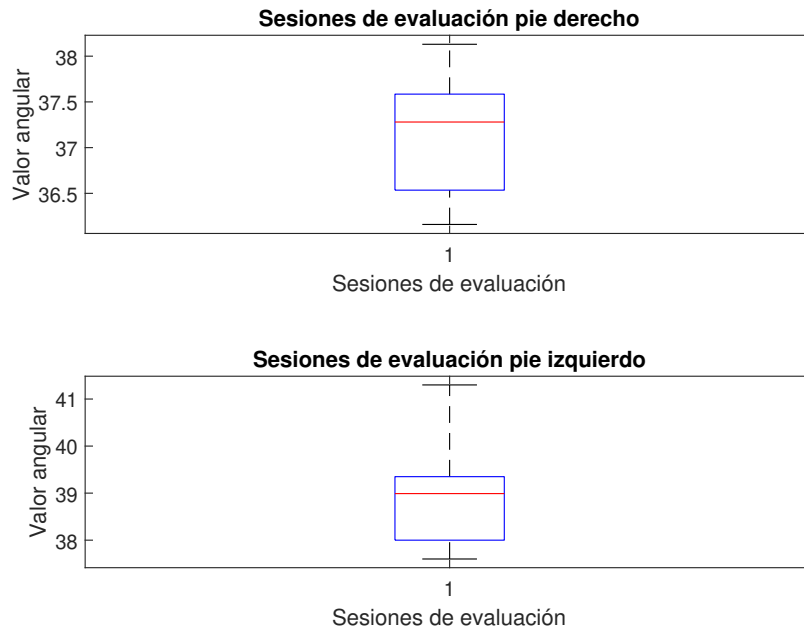


Figura 5.5: Dispersión en los ángulos máximos alcanzados, participante 2

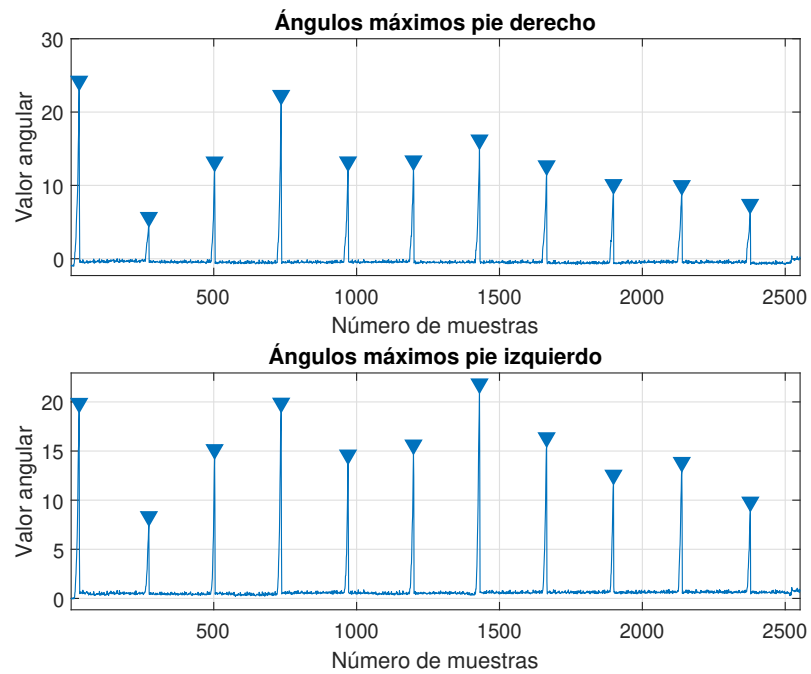


Figura 5.6: Movimiento angular extremidad derecha participante 3

mayor rango de dispersión, debido a que no se logra alcanzar nivel de contracción necesario para todos los movimientos, para la extremidad derecha el ángulo de dorsiflexión está concentrado en 12° con un máximo de 14° y un mínimo de 8° obteniendo una dispersión de 6° , para la extremidad izquierda se obtiene un valor medio de 14° con un máximo de 18° y un mínimo de 12° , para una dispersión de 6° , aunque este participante presenta un rango de dispersión mayor a los participantes 1 y 2, el nivel de motricidad está dentro de los rangos normales de movilidad.

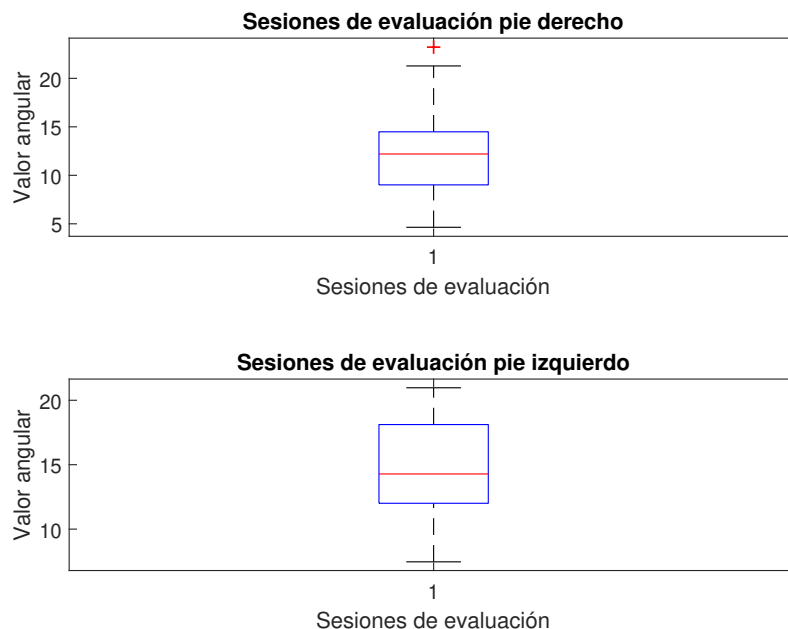


Figura 5.7: Dispersión en los ángulos máximos alcanzados participante 3

5.2.4. Encuesta

Al finalizar el proceso de evaluación con los participantes sanos, se realizó una encuesta con las preguntas resumidas en la Tabla 5.1, esta encuesta esta enfocada en general en la usabilidad de la plataforma de entrenamiento, posición corporal y visualización del ambiente virtual. En la Figura 5.8 se presentan los resultados a la encuesta realizada a los participantes sanos.

Los resultados de la encuesta aplicada a las personas sanas muestran un nivel elevado de aceptación, por encima del 80 %, indicando que los diferentes sistemas que componen la plataforma de entrenamiento cumplen con los requerimientos y por lo tanto es posible aplicar el procedimiento en personas que presentan el tipo de afección el cual se desea tratar, solo en la pregunta 6 se obtiene un porcentaje sobre el 50 %, esta pregunta esta relacionada con la postura del participante con respecto a la silla utilizada no tenia la opción de graduación de altura; haciendo

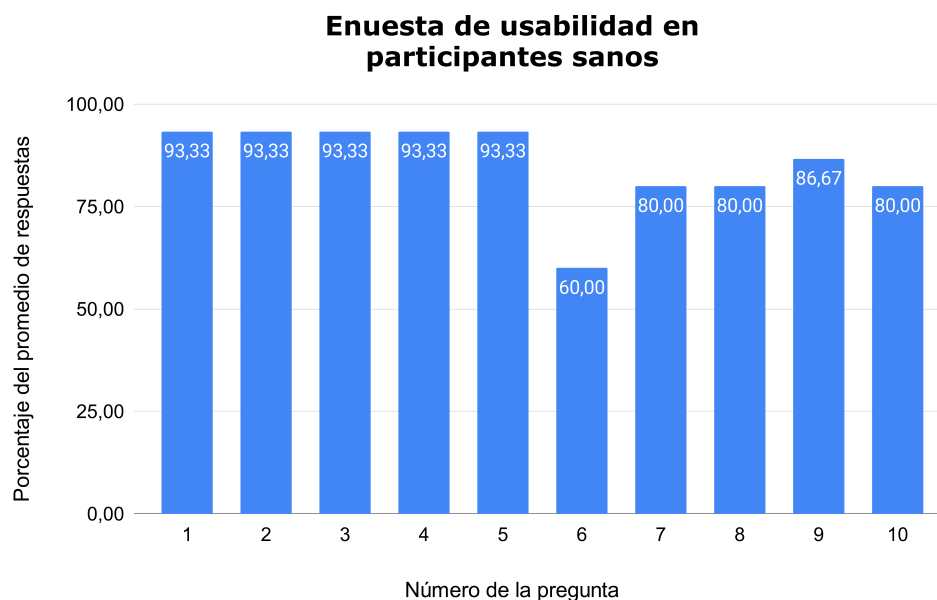


Figura 5.8: Resultado de la encuesta de usabilidad.

que el ángulo de las rodillas no fuera el adecuado para cada persona, situación que no se pudo solucionar en el proceso, debido a que no se pudo realizar la selección de la silla con anticipación.

5.3. Participantes con antecedentes médicos

Para la prueba experimental se contó con la participación de 4 voluntarios, los cuales están en un rango de edad entre los 18 a 80 años, quienes aceptaron realizar el proceso de rehabilitación propuesto, todos los participantes presentan antecedentes médicos mencionados en los criterios de inclusión. Todos los participantes firmaron el consentimiento informado para permitir el análisis y publicación de los datos obtenidos en el presente trabajo.

La Tabla 5.3 presenta a los participantes en el procedimiento piloto y captura de la información correspondiente a las sesiones de entrenamiento utilizando el sistema propuesto.

Tabla 5.3: Características de la población con antecedentes médicos

Participante	Edad	Género	Extremidad afectada
1	67	M	Izquierdo
2	72	M	Derecho
3	65	M	Izquierdo
4	29	F	Derecho

A continuación se presentan los 4 participantes para el caso de estudio:

Participante 1

El participante de género masculino con 62 años de edad, presentó un ACV de tipo isquémico, lo cual le ocasionó parálisis en el lado izquierdo del cuerpo, esta persona presenta el mayor grado de pérdida de movilidad en las extremidades afectadas, debido al nivel de espasticidad del participante, tiene apoyo de un auxiliar de enfermería que le asiste en las AVD, el tiempo de asistencia es de 8 horas al día, esta persona asiste a sesiones de rehabilitación tres días a la semana con una duración de una hora por sesión en un centro de rehabilitación especializado. El proceso propuesto se aplica en conjunto con el trabajo que la persona viene realizando. La figura 5.9 muestra al participante con los elementos necesarios para realizar el proceso de entrenamiento, las sesiones de entrenamiento y valoración se realizaron en el hogar de la persona.



Figura 5.9: Aplicación del método de entrenamiento participante 1

Participante 2

El participante de género masculino de 72 años de edad, presentó un ACV de tipo hemorrágico, debido a esta lesión se hizo necesario realizar una cirugía en la cual fue necesario extirpar una parte de la zona afectada del cerebro, durante el proceso de recuperación, el participante tuvo que estar conectado a un respirador artificial el cual le afectó las cuerdas bucales y agrupado a

las secuelas del ACV, la capacidad del habla resultó disminuida. Presenta disminución de motricidad en el lado derecho del cuerpo, con mayor rigidez en la mano de la extremidad afectada, el participante presenta dificultad al caminar, necesita de asistencia para el desplazamiento en el hogar, la masa muscular es menor con respecto a las extremidades sanas, esta persona asiste a procesos de rehabilitación 3 veces en semana en un centro especializado con un tiempo de una hora por sesión, el proceso de rehabilitación se aplica en conjunto al trabajo que la persona viene realizando. La figura 5.10 muestra al participante 2 con los elementos necesarios para realizar el proceso de entrenamiento, las sesiones de entrenamiento y valoración se realizaron en el hogar de la persona.



Figura 5.10: Aplicación del metodo de entrenamiento participante 2

Participante 3

El participante de género masculino de 65 años, presentó un ACV de tipo isquémico, que le ocasionó parálisis del lado derecho del cuerpo, esta persona presenta una espasticidad menor en comparación a los demás participantes, puede desplazarse y realizar actividades de la vida diaria sin asistencia de algún tipo, para caminar utiliza un bastón como apoyo; puede sentar el talón del pie de la extremidad afectada lo cual mejora su equilibrio durante el desplazamiento, además subir y bajar gradas. Al momento de aplicar el proceso de rehabilitación propuesto el participante no se encuentra realizando rehabilitación con personal especializado. Esta persona es quien presenta mejor ánimo y positivismo con respecto a lograr la recuperación de motricidad en sus extremidades afectadas. La figura 5.11 muestra al participante 3 con los elementos necesarios para realizar el proceso de entrenamiento, las sesiones de entrenamiento y valoración se realizaron en el hogar de la persona.



Figura 5.11: Aplicación del metodo de entrenamiento participante 3

Participante 4

El participante de genero femenino de 29 años, presentó un ACV debido a problemas de coagulación de sangre y debilidad en las venas cerebrales, el cual sufrió aproximadamente hace 1 años, debido al ACV, presenta una cirugía para el drenado de la sangre acumulada en el cerebro, presenta problemas de motricidad en el lado derecho del cuerpo, perdida en la capacidad del habla y asociación de conceptos con las cosas, ha estado asistiendo a procesos de rehabilitación física para la recuperación de la capacidad motora y rehabilitación lingüística con un periodo de tres horas, cinco días a la semana, para las extremidades superior e inferior; el proceso de rehabilitación propuesto se aplica en conjunto al trabajo que ya está realizando. La participante es capaz de desplazarse de forma voluntaria, presenta dificultad al caminar ya que no puede sentar el talón de la extremidad afectada.

La figura 5.12 muestra al participante 4 con los elementos necesarios para realizar el proceso de entrenamiento, las primeras 4 sesiones de entrenamiento y valoración se realizaron en el hogar de la persona y desde la sexta hasta la ultima, en el centro de rehabilitación de la Universidad del Cauca.



Figura 5.12: Aplicación del método de entrenamiento participante 4

5.4. Tiempos y parámetros de estimulación eléctrica

En la tabla 5.4 se presentan los valores de electroestimulación para la extremidad afectada y la extremidad sana de cada participante en cada sesión de rehabilitación.

Tabla 5.4: Niveles de electroestimulación por cada sesión de rehabilitación.

Tiempo Act / Des	Participante 1		Participante 2		Participante 3		Participante 4	
	Izq	Der	Izq	Der	Izq	Der	Izq	Der
5 seg / 25 seg	3	1.5	1.1	2.7	2	2.7	1.5	4.5
5 seg / 25 seg	3.5	1.8	1.3	3	1.5	2.2	1.8	5
5 seg / 25 seg	3	1.5	3	3.2	1.6	2.5	1.5	5.5
8 seg / 28 seg	3.4	1.6	1.5	3	1.4	2.3	1.6	5
8 seg / 28 seg	3.5	1.5	1.2	3	2.5	2.2	1.8	5
8 seg / 28 seg	5	1.2	1.2	3	2.5	2.2	1.5	6.5
8 seg / 28 seg	5	1.2	1.2	3	2.5	2	1.1	2.3
8 seg / 28 seg	8.5	1.2	1.2	3	2.5	2	1.1	2.3
8 seg / 28 seg	8	1.3	1.2	2.2	2.5	2	1.1	2.6
8 seg / 28 seg	10	1.2	1.2	2.7	2.5	2	1.1	2.7
8 seg / 28 seg	10	1.2	1.2	2.7	2.5	2	1.1	2.7
8 seg / 28 seg	10	1.2	1.5	4.3	3.5	2	1.1	3

8 seg / 28 seg	10	1.2	1.5	4.3	3.5	2	1.1	3
8 seg / 28 seg	10	1.2	1.5	4.3	3.5	2	1.1	3
8 seg / 28 seg	10	1.2	1.5	4.3	3.5	2	1.1	3

5.5. Resultados

Para evaluar el proceso de rehabilitación, se obtienen los datos de las sesiones de entrenamiento y de las sesiones de evaluación. Las sesiones de entrenamiento se realizaron aplicando estimulación eléctrica y utilizando la aplicación de realidad virtual inmersiva, estas sesiones se aplicaron durante 15 días, cinco días a la semana con un tiempo de duración de 15 minutos por sesión. Las sesiones de evaluación se realizaron los días 1, 7, 15 del proceso de rehabilitación, estas sesiones tienen como objetivo comparar el progreso en el movimiento angular de la extremidad afectada. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la etapa de entrenamiento y evaluación para cada participante.

5.5.1. Participante 1

Sesiones de entrenamiento

La figura 5.13 presenta los rangos de movimiento en la extremidad sana, aunque en cada sesión los rangos presentan dispersión, el valor medio en la mayoría de las sesiones es similar entre los 10 a 20 grados, este valor de movimiento angular muestra que la extremidad presenta funcionalidad motora dentro de los parámetros normales. Para la estimulación a nivel sensorial, se obtiene un máximo de 2, el cual desciende hasta un valor de 1.3 hasta finalizar las sesiones de entrenamiento.

En la figura 5.14 se observan los valores angulares alcanzados en cada sesión de entrenamiento para la extremidad afectada junto a los rangos de estimulación eléctrica aplicada, el movimiento angular alcanzado está en un rango de 2 a 5 grados. En las primeras 7 sesiones se observa que el nivel de electroestimulación está alrededor de 5 en la intensidad aplicada, de la sesión 8 en adelante se aplica el mayor valor de estimulación, debido a que la persona reporta que no puede sentir la estimulación eléctrica, por otro lado se observa que se tiene mayor respuesta de movimiento en las primeras sesiones y en las últimas el rango de movimiento disminuye.

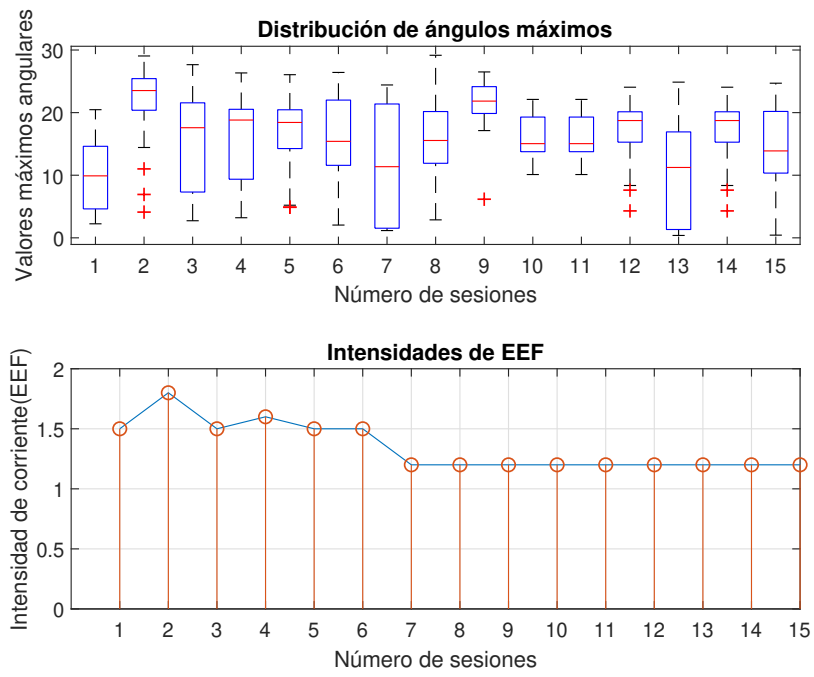


Figura 5.13: Sesiones de entrenamiento de la extremidad sana, participante 1

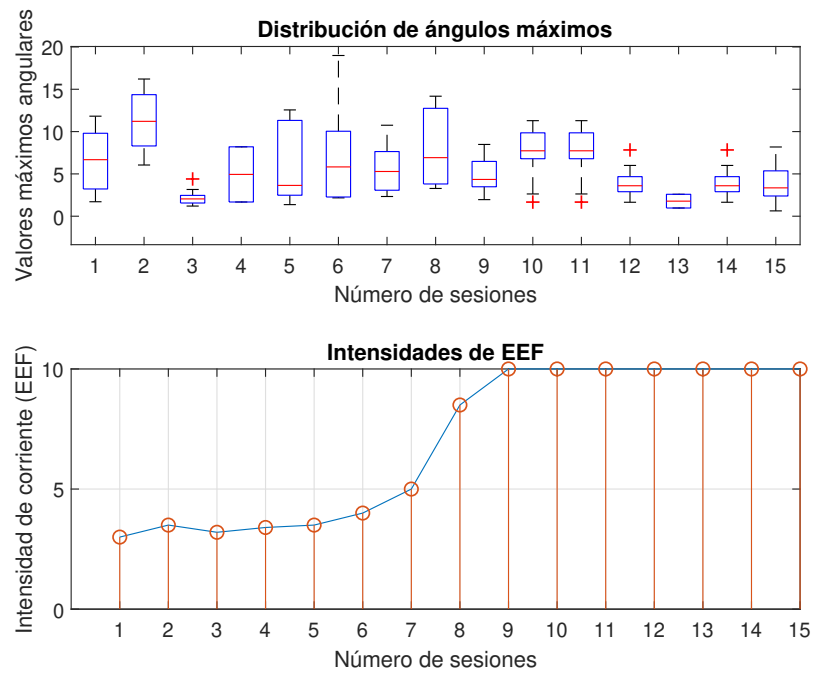


Figura 5.14: Sesiones de entrenamiento de la extremidad afectada, participante 1

Sesiones de evaluación

A continuación se presentan los resultados del movimiento angular realizado por el participante durante las sesiones de evaluación para la extremidad sana y la extremidad afectada.

Sesión 1 En la figura 5.15 se puede apreciar que el participante presenta coordinación al realizar los movimientos con las extremidades, ya que los intentos de movimientos se realizan de forma simultánea en ambas extremidades. Con respecto al movimiento angular, para la extremidad sana se observa que en los 3 primeros intentos se obtiene un rango de movimiento por encima de los 10 grados y luego alcanza un valor máximo de 5 grados, esto debido a que el participante estaba enfocado en realizar los movimientos con la extremidad afectada. Para la extremidad afectada se observa que el movimiento angular no sobrepasa los 7 grados, en los intentos donde alcanza el valor máximo de movimiento, es donde el participante aplica un mayor esfuerzo físico.

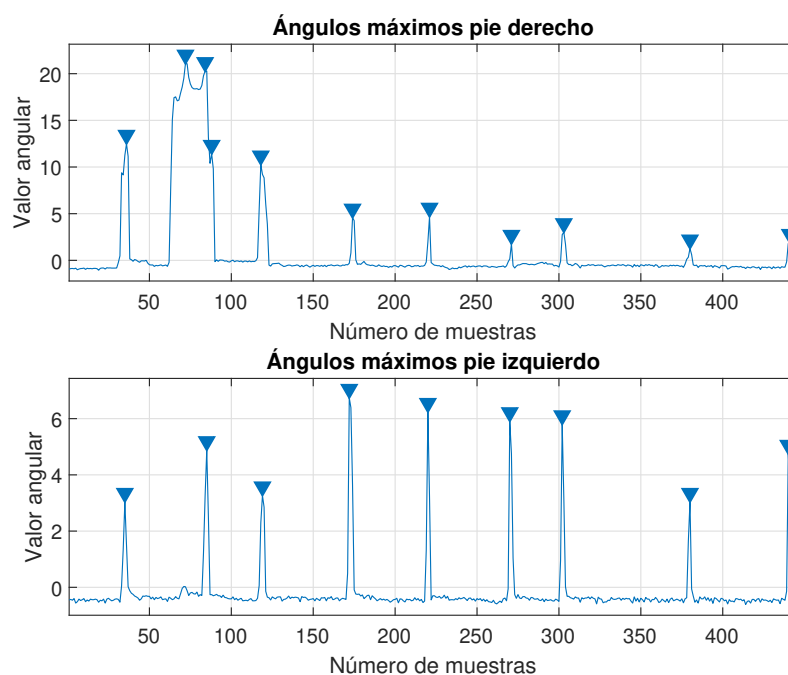


Figura 5.15: Primera sesión de evaluación, participante 1

Sesión 2 En la figura 5.16 se observa que el movimiento angular en la extremidad afectada disminuye en comparación a los resultados obtenidos en la primera sesión, en general el rango de movimiento máximo está entre los 3 grados, con respecto a la frecuencia de movimientos, se presenta una correspondencia en los movimientos entre la extremidad sana y la afectada, por lo tanto se observa que hay coordinación entre las dos extremidades.

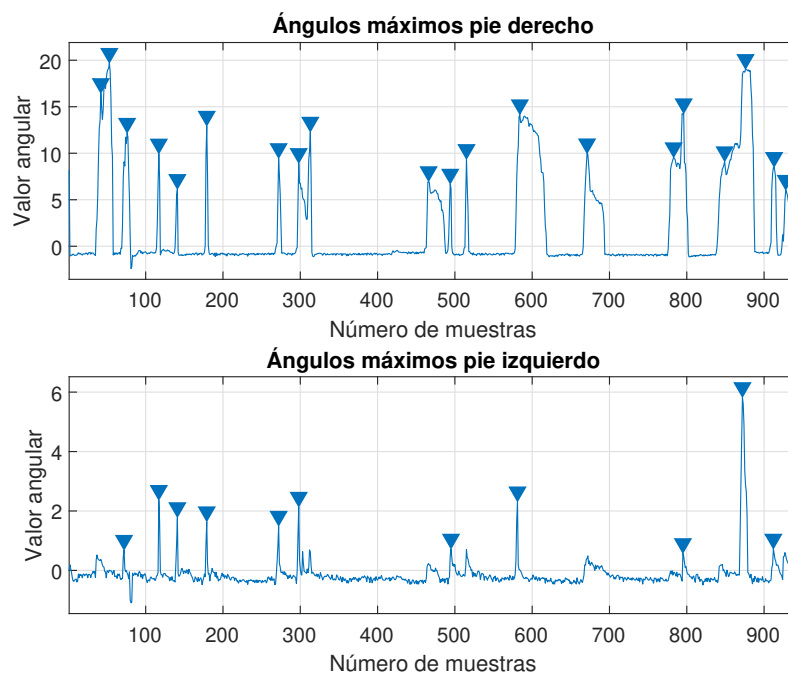


Figura 5.16: Segunda sesión de evaluación, participante 1

Sesión 3 En la figura 5.17 se aprecia que el movimiento en la extremidad afectada a disminuido al nivel en el cual la persona no puede realizar el movimiento de dorsiflexión, con respecto a los rangos de movimiento, aunque son escasos; corresponden a los movimientos realizados por la extremidad sana, aunque el participante intenta realizar el movimiento colocando el mayor esfuerzo físico, no logra realizar los movimientos solicitados.

La Figura 5.18 presenta los rangos de movimiento logrados en la extremidad sana y afectada, en la extremidad sana se observa que los rangos de movimiento son similares, en la primera sesión se observa una mayor dispersión en los ángulos máximos logrados en comparación a la segunda y tercera sesión donde los datos están concentrados alrededor del valor angular de 10 grados. Para la extremidad afectada se observa que el rango de movimiento decrece en cada sesión, en la primera sesión es donde se logra el mayor rango de movimiento con un valor medio de 5 grados, en la segunda sesión este valor disminuye a un rango de 1.5 grados con un mínimo de 0.5 a 2 grados, para la tercera sesión, se observa que el rango de movimiento logrado esta alrededor de 1 grado, con un máximo de 1.5 y mínimo de 0.5, en comparación a la primera sesión el rango de movimiento disminuyó en 4.5 grados.

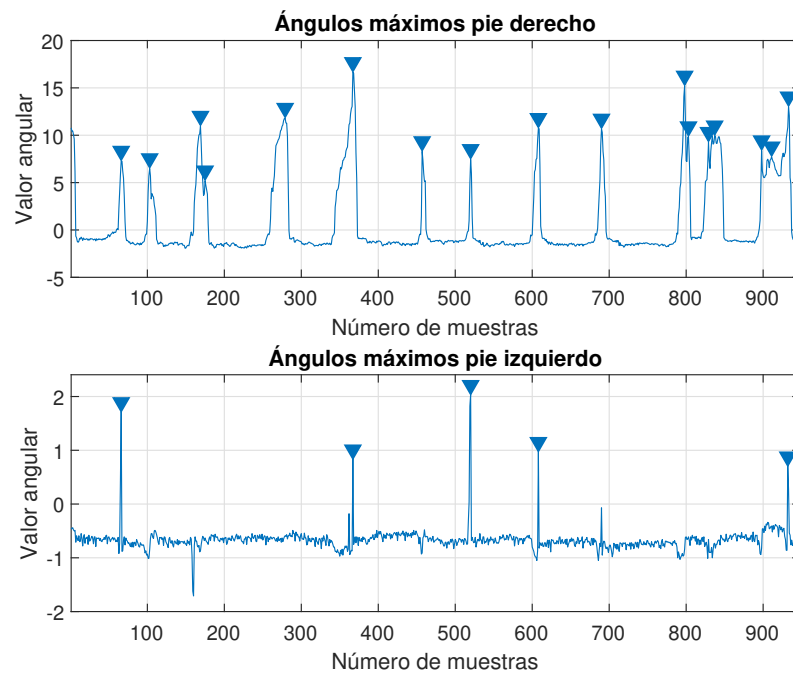


Figura 5.17: Tercera sesión de evaluación, participante 1

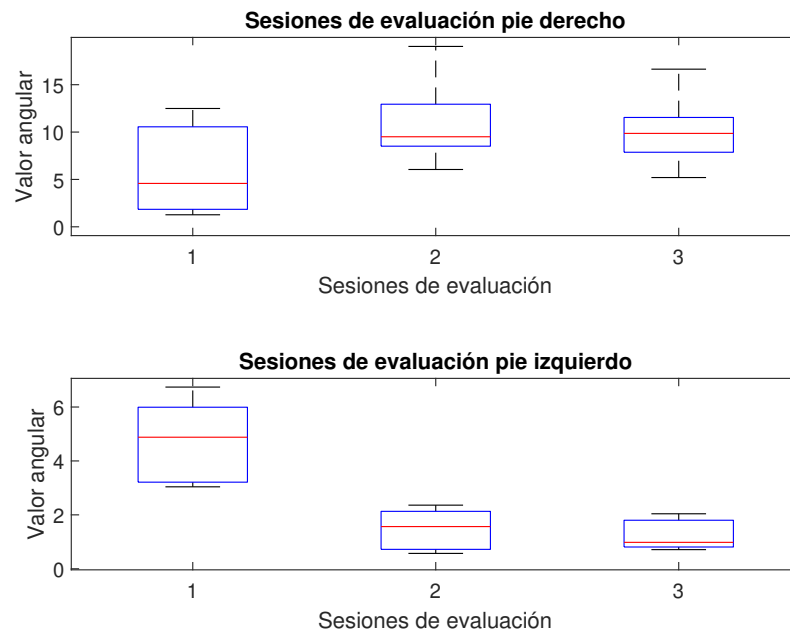


Figura 5.18: Extremidad sana(superior), afectada(inferior), participante 1

5.5.2. Participante 2

Sesiones de entrenamiento

Las siguientes figuras presentan los datos de movimiento angular y los valores de electroestimulación correspondiente a las sesiones de entrenamiento realizadas por el participante para las extremidades sana y afectada. En la figura 5.19 se presentan los datos correspondientes al ángulo máximo alcanzado por la extremidad afectada durante las sesiones de entrenamiento. Se puede observar que no hay un patrón entre cada sesión, los valores medios angulares difieren en cada sesión. No se puede apreciar que en el avance de las sesiones el valor angular aumente, disminuya o se mantenga, en las primeras sesiones se tiene el menor valor alcanzado, en las siguientes sesiones los datos están entre los 5 a 17 grados, por otro lado se observa que en cada sesión los datos están concentrados alrededor del valor medio alcanzado, esta similitud en los datos indica que el participante tiene una respuesta similar a la estimulación eléctrica durante la sesión. Con respecto a los niveles de electroestimulación, hasta la sesión 8 se mantiene un nivel de estimulación de 3, en la sesión 9 se disminuye al nivel de 2.3 y desde las sesiones 10 en adelante se incrementa hasta un valor de 4.2, en las sesiones 9 y 12 se tiene una respuesta de movimiento similar, aunque los niveles de estimulación son diferentes.

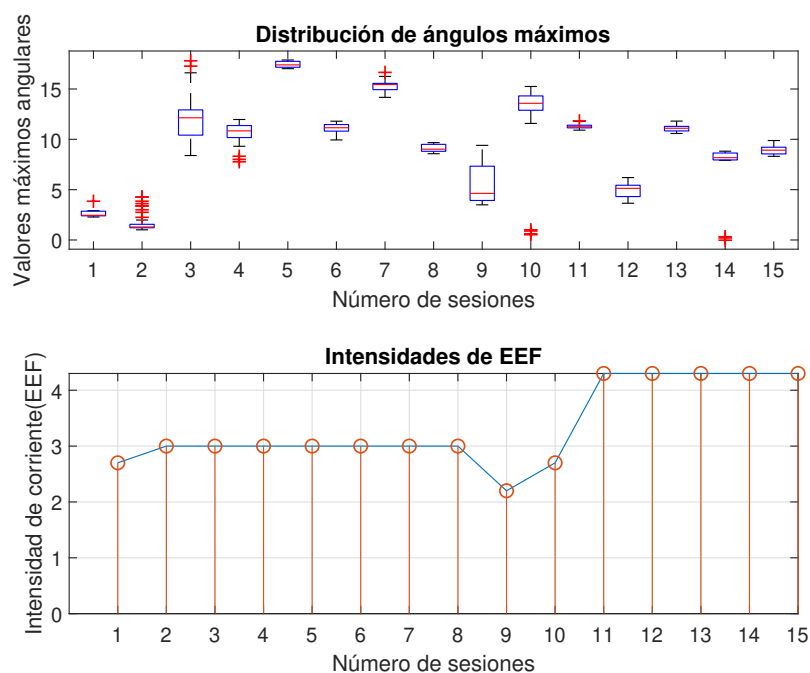


Figura 5.19: Sesiones de entrenamiento de la extremidad afectada, participante 2

La figura 5.20 muestra los resultados de movimiento de la extremidad sana, en general el promedio del rango de movimiento está alrededor de los 15 grados, este rango se mantiene en todas

las sesiones, indicando que esta extremidad tiene una respuesta similar a la electroestimulación, además se aprecia que la variación en los rangos de estimulación es mínima durante las sesiones.

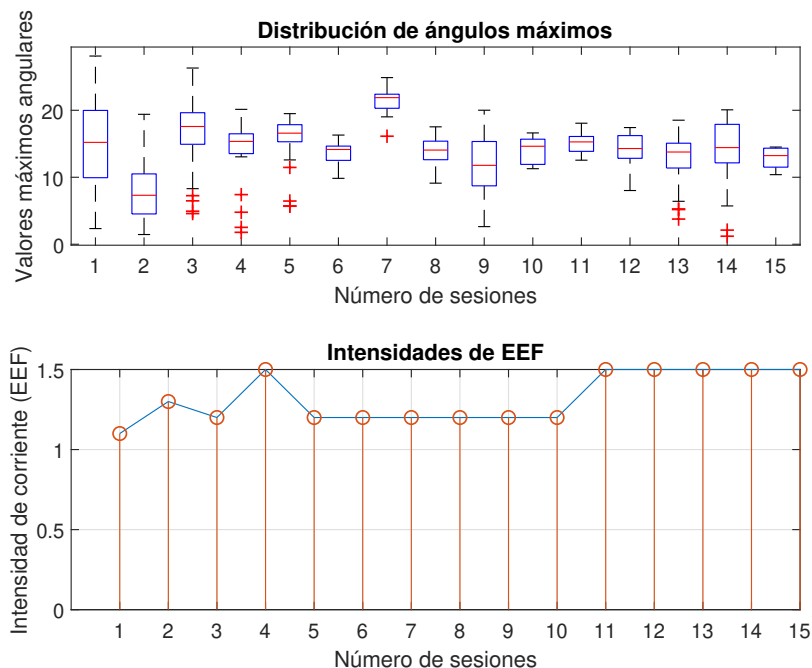


Figura 5.20: Sesiones de entrenamiento de la extremidad sana, participante 2

Sesiones de evaluación

Sesión 1 La figura 5.21 presenta los datos correspondientes a la primera sesión de evaluación. La gráfica superior correspondiente a la extremidad afectada, muestra los resultados obtenidos de los ángulos máximos obtenidos correspondientes a la primera evaluación, se observa que el rango de movimiento está entre los -0.5 a 0.5 grados, aunque el participante intenta aplicar el mayor esfuerzo posible para realizar el movimiento, no es capaz de ejecutar los movimientos solicitados. En la gráfica inferior, correspondiente a la extremidad sana se observa el movimiento angular máximo, el cual está entre los 28 grados, además la frecuencia de movimiento muestra que la persona presenta coordinación en la ejecución de los movimientos solicitados.

Sesión 2 La figura 5.22 contiene los datos correspondientes a la segunda sesión de evaluación, la gráfica superior presenta los movimientos de dorsiflexión de la extremidad afectada. En comparación a la primera sesión, el participante es capaz de realizar movimientos con un alcance máximo entre los 3.8 grados, este rango de movimientos muestra que el participante logra ejecu-

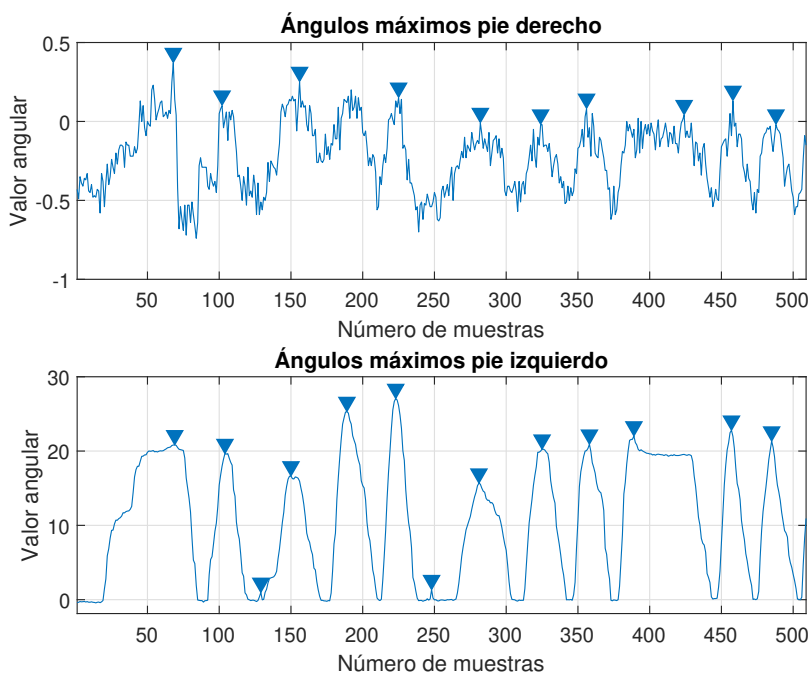


Figura 5.21: Primera sesión de evaluación, participante 2

tar movimientos con su propio esfuerzo; con respecto a la frecuencia de movimientos realizados, en la primera sección de la gráfica el rango de frecuencia no es similar, también hay segmentos donde no se observan movimientos, solo en la última parte de la gráfica se observan movimientos periódicos, donde el participante logra responder a las peticiones de movimientos solicitadas. En la extremidad sana se observan valores angulares similares a los de la primera sesión, en la frecuencia del movimiento se presentan algunos instantes donde no se realiza el movimiento y en otros donde mantiene levantado el pie, solo en los últimos 6 intervalos se observa que se logra coordinar los movimientos de la extremidad afectada y la sana.

Sesión 3 El resultado del movimiento angular del participante se presenta en la figura 5.23, la gráfica superior correspondiente a los movimientos realizados por la extremidad afectada muestra el progreso del participante en la dorsiflexión de tobillo, se observa un incremento en el ángulo, además se observa que el participante intenta mantener el movimiento en el valor angular máximo, se observan rampas descendentes en cada intento de movimiento, lo que indica que el participante tiene un mayor control en fuerza y control del movimiento. En la frecuencia de movimientos realizados, con respecto a los movimientos realizados con la extremidad sana, la extremidad afectada es capaz de seguir la frecuencia en periodos similares indicando que el nivel funcional ha incrementado con respecto a las sesiones anteriores.

La figura 5.24 muestra los rangos del movimiento de dorsiflexión angular máximos alcanzados

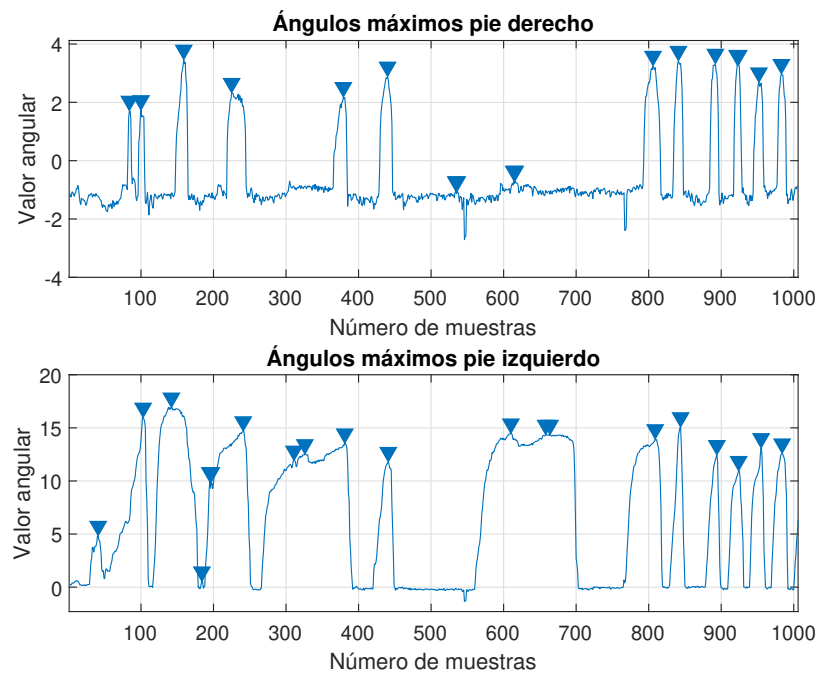


Figura 5.22: Segunda sesión de evaluación, participante 2

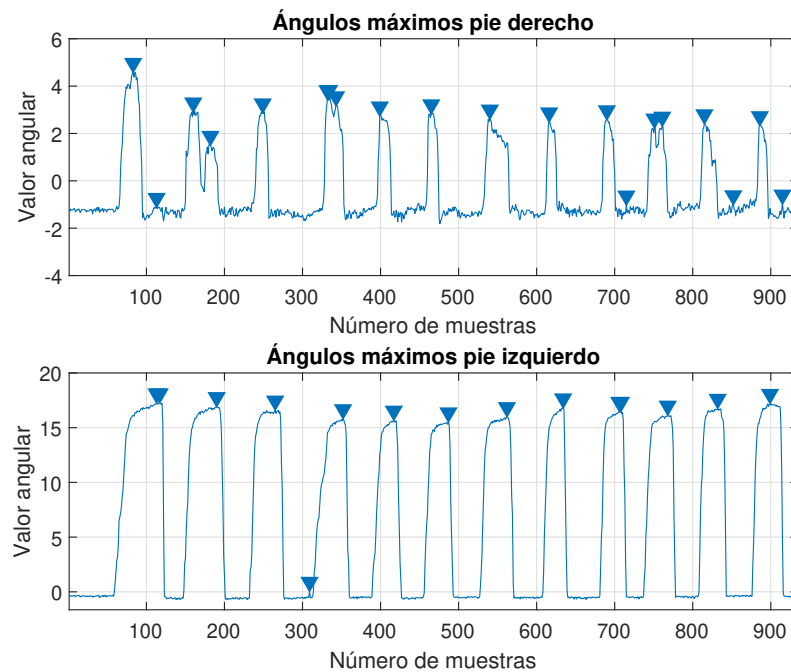


Figura 5.23: Tercera sesión de evaluación, participante 2

por las extremidades inferiores, para la extremidad afectada, para la primera sesión se observa que el rango de movimiento es nulo, en la segunda sesión se obtiene un valor medio alrededor de los 3.4 grados con una dispersión entre los 2.4 a 3.5 grados, para la tercera sesión se observa que el valor medio disminuye en comparación a la sesión 2, pero los datos se encuentran más concentrados con respecto al valor medio de 2.7 grados con una dispersión entre los 2.5 a 2.7 grados.

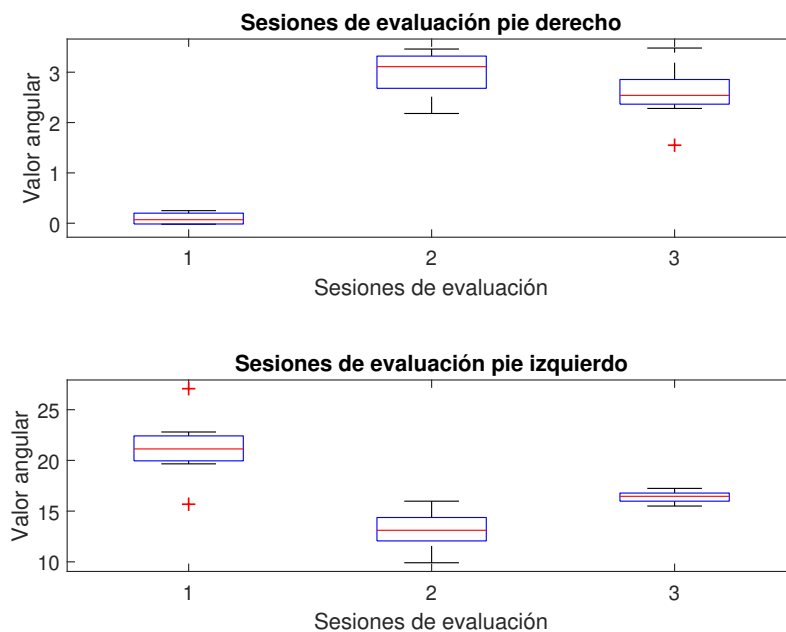


Figura 5.24: Extremidad afectada(superior), sana(inferior), participante 2

5.5.3. Participante 3

Sesiones de entrenamiento

Las figuras a continuación, presentan los resultados con respecto a los valores angulares máximos alcanzados y los rangos de estimulación eléctrica aplicados en las sesiones de entrenamiento. La figura 5.25 muestra la respuesta del movimiento de dorsiflexión de la extremidad sana, en las primeras tres sesiones se presenta la mayor dispersión en el rango de movimiento angular de tobillo, desde la cuarta sesión en adelante los rangos se concentran en el valor medio, también se observa que los promedios incrementan en cada sesión. Los rangos de electroestimulación están entre 1 y 2 lo que significa que el participante presenta un nivel sensorial de estimulación adecuado en esta extremidad.

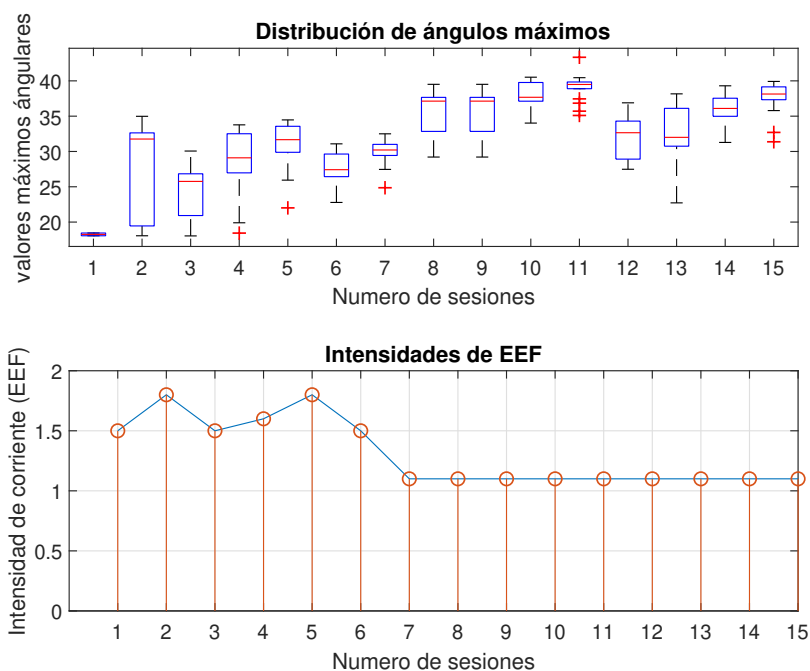


Figura 5.25: Sesiones de entrenamiento de la extremidad sana, participante 3

En la figura 5.26 se observa la respuesta al proceso de entrenamiento de la extremidad afectada, el movimiento de dorsiflexión en las diferentes sesiones está en un rango elevado, entre los 25 a 33 grados, se puede observar que el participante, a pesar de haber sufrido un ACV, presenta habilidad motriz que está dentro de los rangos de funcionalidad normal. Se observa progreso en los valores medios de cada sesión, esto puede deberse a que el participante presenta una mayor respuesta a la estimulación eléctrica, ya que se observa el incremento en el movimiento angular y disminución en los valores de intensidad aplicados. En los rangos de estimulación, se observa que en las 6 primeras sesiones hay un incremento gradual en la intensidad de electroestimulación iniciando en 4.2 a 6.2, desde la sesión 7 a 15 el rango de estimulación disminuye a 2.1, y el incremento es gradual en rangos pequeños hasta alcanzar una intensidad de 3 en la última sesión.

Sesiones de evaluación

A continuación se presentan los resultados de las sesiones de evaluación para el movimiento de dorsiflexión en las extremidades inferiores.

Sesión 1 La gráfica superior de la figura 5.27 presenta los ángulos máximos logrados en el movimiento de dorsiflexión de la extremidad sana, se observa que se alcanza el máximo ángulo

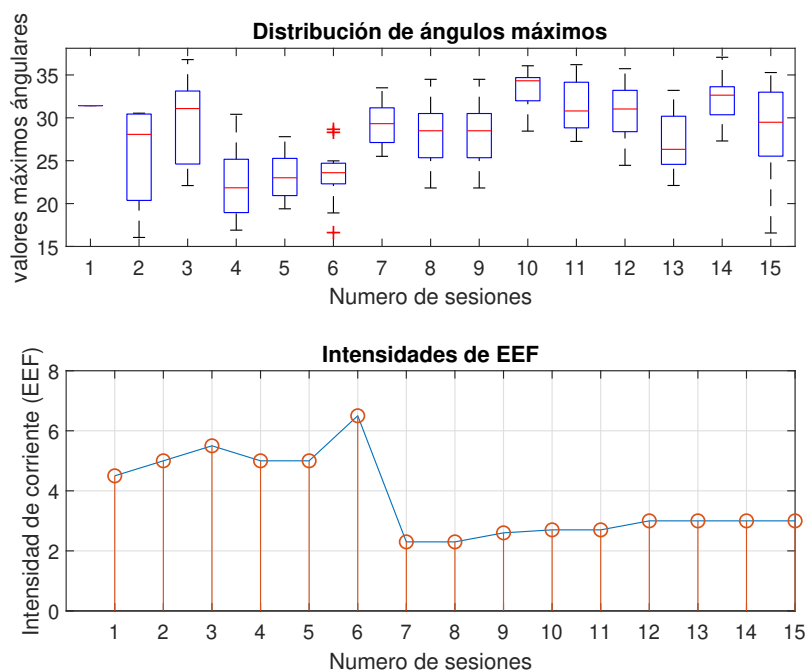


Figura 5.26: Sesiones de entrenamiento de la extremidad afectada, participante 3

permitido por la plataforma de entrenamiento, en algunos intervalos de movimiento en la etapa de descenso presentan una pendiente, indicando que el participante tiene control en la fuerza y velocidad aplicada en la generación de la dorsiflexión del tobillo, además intervalos que representan los movimientos se realizan en intervalos periódicos, indicando que el participante tiene control sobre la extremidad. En la gráfica inferior se observan los resultados para la extremidad afectada, se aprecia que los movimientos de dorsiflexión son muy similares a los realizados por la extremidad sana, los ángulos logrados se encuentran desde los 20 a los 35 grados, este valor angular muestra que la persona tiene un control en la fuerza aplicada para generar el movimiento de dorsiflexión, algunos intervalos presentan una pendiente en el instante de descenso del pie, lo que demuestra que existe control motor para la generación del movimiento.

Sesión 2 En la figura 5.28 se presentan los resultados del movimiento de dorsiflexión para la extremidad sana y afectada, se observa que los movimientos en las dos extremidades son similares tanto en la amplitud angular como en la frecuencia de movimiento, en los intervalos de movimiento realizados por la extremidad afectada en algunos intervalos se observa que las crestas son casi horizontales, donde el participante logra mantener la posición elevada del pie durante un rango de tiempo, evidenciando el incremento en la fuerza de la extremidad afectada. Algunos movimientos realizados por la extremidad sana están por debajo del valor máximo, esto se debe a que el participante estaba enfocado en realizar de forma correcta los movimientos con la extremidad afectada.

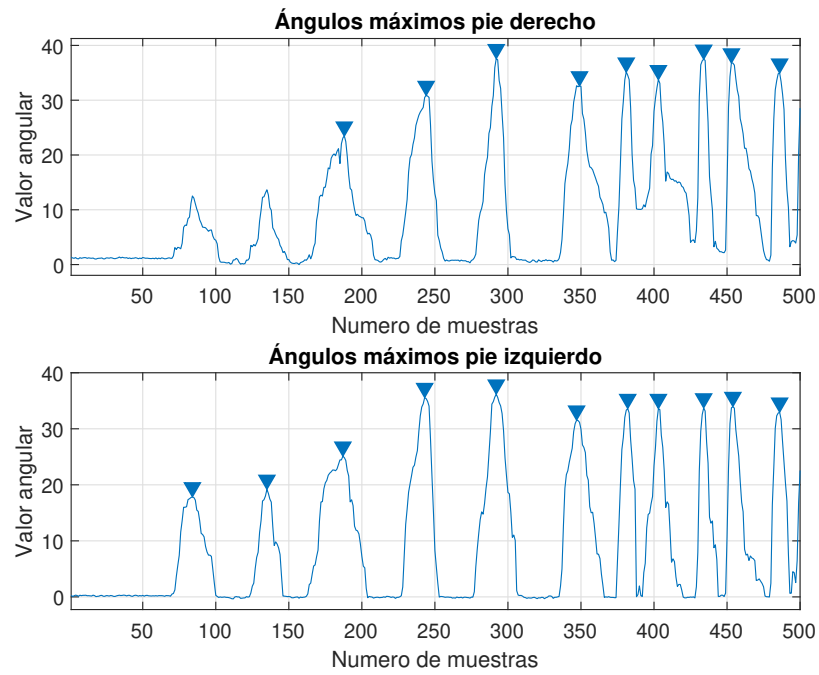


Figura 5.27: Primera sesión de evaluación participante 3

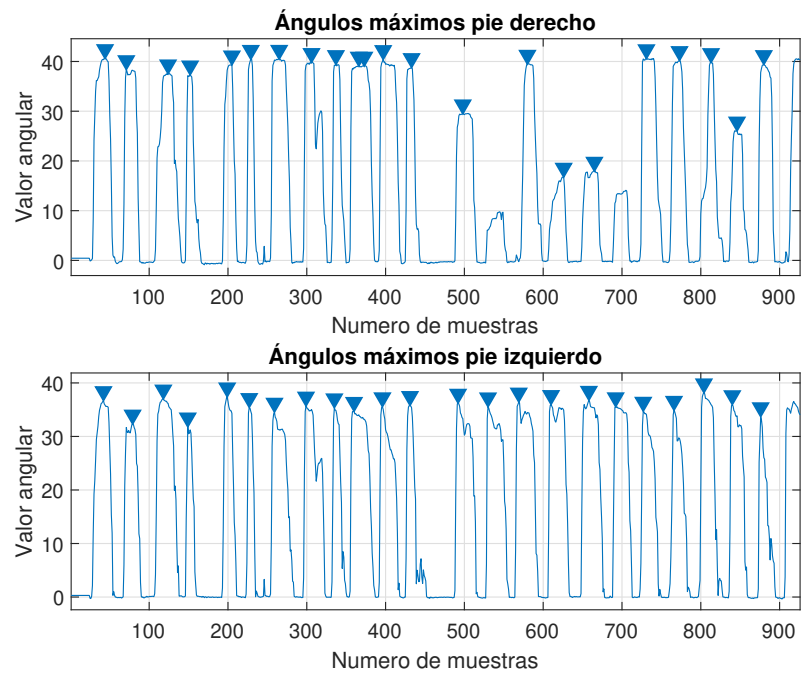


Figura 5.28: Segunda sesión de evaluación, participante 3

Sesión 3 En la figura 5.29 se observan los movimientos realizados por las extremidades inferiores, la amplitud del movimiento en las dos extremidades son similares, en la gráfica superior se observa similitud en los rangos de movimiento angulares y la frecuencia de movimiento es periódica. En la gráfica inferior correspondiente a la extremidad afectada, se observan variaciones en el rango alcanzado, aunque con un nivel angular sobre los 30 grados; en los intervalos ubicados en la parte media de la gráfica, el participante no baja completamente el pie, este movimiento es voluntario disminuyendo la velocidad, cuando está cerca de tocar el limitador de la plataforma, en los intervalos de frecuencia de movimientos la extremidad afectada es capaz de seguir a la extremidad sana, también se observa un incremento en los movimientos ejecutados, el participante es capaz de incrementar la velocidad de ejecución de los movimientos solicitados.

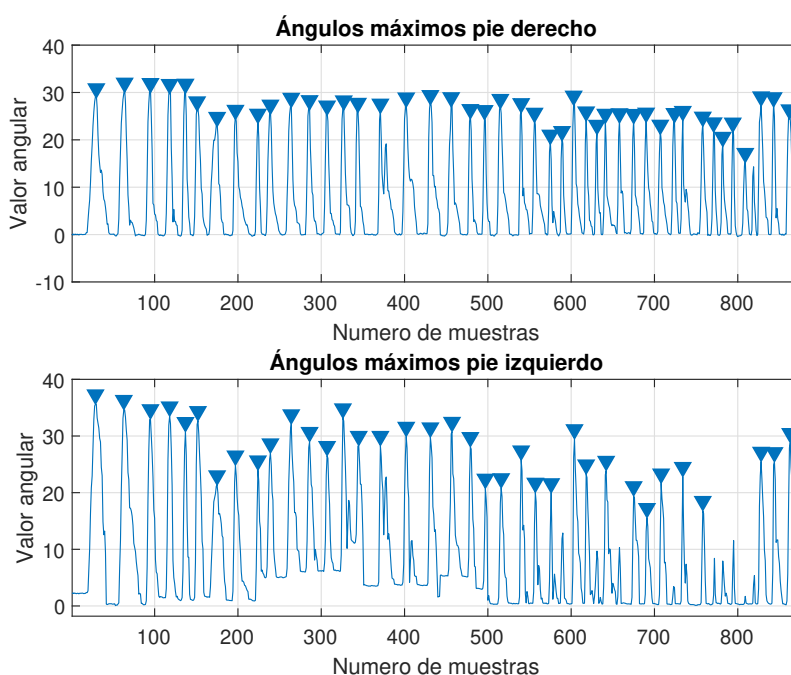


Figura 5.29: Tercera sesión de evaluación, participante 3

Dispersión de los datos En la figura 5.30 se muestra la dispersión de los datos de dorsiflexión para las sesiones de evaluación, en la primera sesión la extremidad sana presenta un valor medio ubicado en 35 grados con una dispersión entre los 33 a 36 grados, para la segunda sesión el valor medio disminuye a 25 grados de movimiento, con una dispersión entre 24 a 28 grados y en la última sesión el valor medio se encuentra en 38 grados con una dispersión entre 36.8 a 39 grados de movimiento. este rango de movimiento y la concentración de los datos indica que el participante tiene control en fuerza y funcionalidad sobre la extremidad sana. Para la extremidad afectada, la primera sesión presenta un valor medio angular en 34 grados, con una dispersión entre los 32 a 34.2 grados, este rango de dispersión muestra que el participante tiene control

en la precisión de los movimientos ejecutados, el ángulo medio alcanzado es similar al de la extremidad sana. En la segunda sesión, el valor medio de dorsiflexión está ubicado en los 25 grados, con una dispersión entre los 22 a 28 grados, comparado con la sesión anterior el rango de movimiento disminuye y la dispersión es mayor, el descenso de movimiento es similar al de la extremidad sana. Para la sesión 3 se tiene un valor medio de 36 grados con una dispersión entre los 35 a 37 grados, el rango de movilidad aumenta en comparación a la dos primeras sesiones, y el rango de dispersión disminuye, indicando el incremento en el control motor, ya que el movimiento se ejecuta con mayor precisión. Las dos gráficas muestran rangos de movimientos similares, aunque el participante presenta una pequeña inclinación a caminar, comparado con los demás participantes es quien tiene mejor balance y control de equilibrio en el desplazamiento.

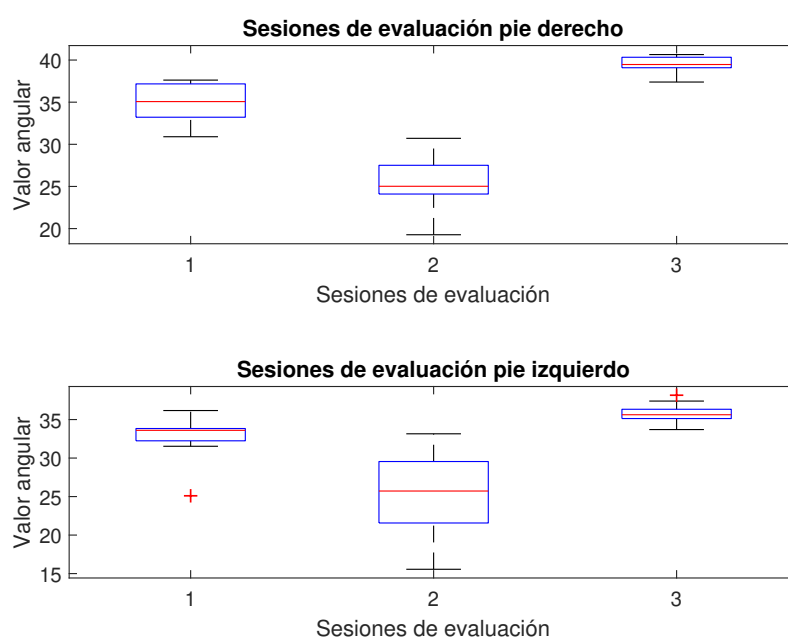


Figura 5.30: Extremidad afectada(superior), sana(inferior) participante 3

5.5.4. Participante 4

Sesiones de entrenamiento

A continuación se presentan los datos recolectados del movimiento angular de dorsiflexión en las extremidades inferiores y los rangos de intensidades de estimulación eléctrica aplicados en cada sesión de entrenamiento. En la figura 5.31 se observan los rangos de dispersión en el movimiento angular de tobillo en la extremidad afectada, en las primeras cinco sesiones, el valor

medio angular alcanzado esta alrededor de los 25 grados, desde la sexta hasta la última sesión, el valor medio de movimiento angular aumenta entre los 35 a 39 grados de movilidad. Desde la sesión 1 hasta la 4 se observa un rango de estimulación eléctrica similar, entre 1.5 a 2, en estas sesiones se presentan los mayores rangos de dispersión en el movimiento de tobillo, desde la sesión 5 hasta la sesión 10, el rango de estimulación aumenta a un nivel de 2.5, donde los rangos de estimulación son similares, en la sesión 11 y 12 se incrementa el nivel de estimulación a 3.5, donde los niveles de movimiento angular son diferentes, esto se debe a que en la sesión 12 la participante había finalizado un proceso de rehabilitación de mayor exigencia y presentaba agotamiento en la extremidad afectada, en la sesión 14 y 15 el nivel de estimulación vuelve a 2.5, donde el rango de movimiento es similar.

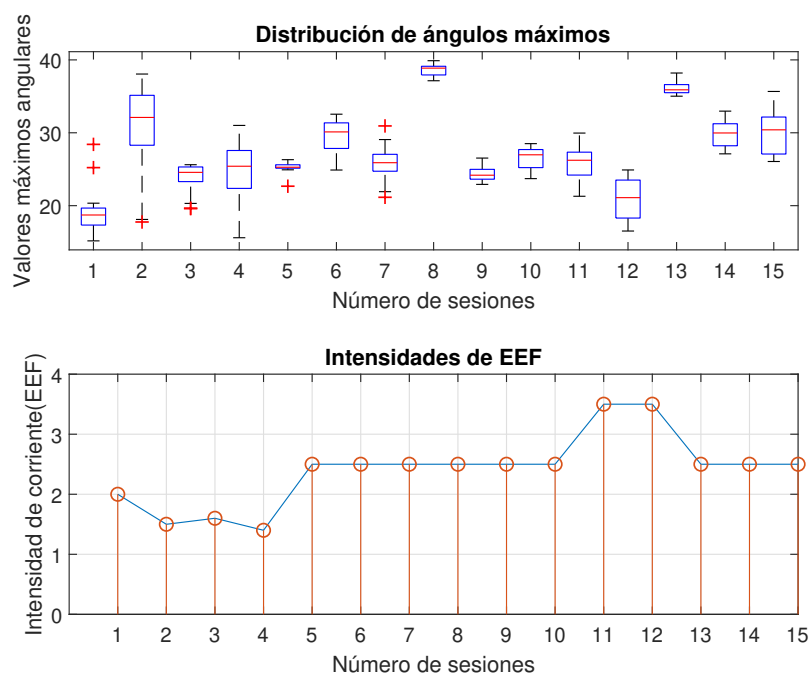


Figura 5.31: Sesiones de entrenamiento de la extremidad afectada, participante 4

En la figura 5.32 se presentan los movimientos de dorsiflexión de la extremidad sana, la primera sesión de entrenamiento es la que presenta un mayor rango de dispersión, en las demás sesiones el rango está más concentrado, además se observa que en cada sesión el nivel de movimiento angular incrementa en el valor medio. Desde la sesión 1 hasta la 6 se observa un decremento en el nivel de estimulación eléctrica, iniciando en 2.7 y finalizando en 2, desde la sesión 6 en adelante este nivel se mantiene. El incremento del rango angular de movimiento, con los niveles de estimulación similares en cada sesión indican que la participante tiene buen control funcional y motriz en la extremidad sana.

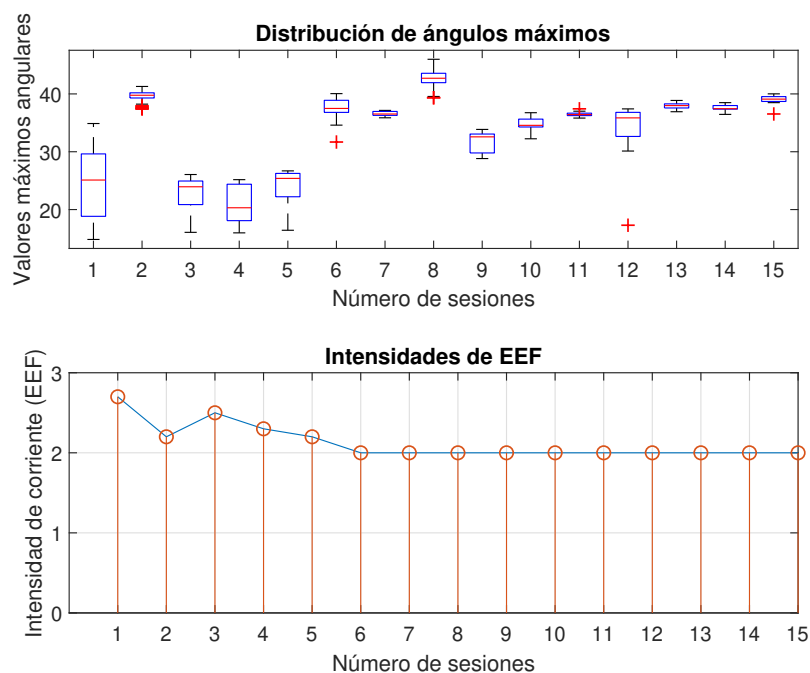


Figura 5.32: Sesiones de entrenamiento de la extremidad sana, participante 4

Sesiones de evaluación

Las siguiente figuras muestran los resultados del movimiento de dorsiflexión de las extremidades inferiores en las sesiones de evaluación.

Sesión 1 En la figura 5.33 se observan los valores máximos alcanzados en el proceso de dorsiflexión. En la gráfica superior, se muestra el comportamiento del movimiento angular de tobillo de la extremidad afectada, la mayoría de movimientos realizados están por encima de los 20 grados, se presenta una variabilidad entre los ángulos alcanzados, indicando que el participante tiene la fuerza necesaria para ejecutar el movimiento, pero no tiene la fuerza necesaria para controlar el movimiento. La frecuencia de movimientos realizados es similar, además se observa que el participante es capaz de controlar el ascenso y descenso del movimiento angular. En la gráfica inferior se muestran los valores angulares alcanzados por la extremidad sana, están sobre los 35 grados, la frecuencia de movimientos generados tiene un patrón similar, lo que demuestra que se tiene un control motor sobre las dos extremidades inferiores. Los movimientos realizados en las dos extremidades concuerdan en la frecuencia de ejecución, indicando que el participante es capaz de controlar sus extremidades inferiores en el mismo instante de tiempo.

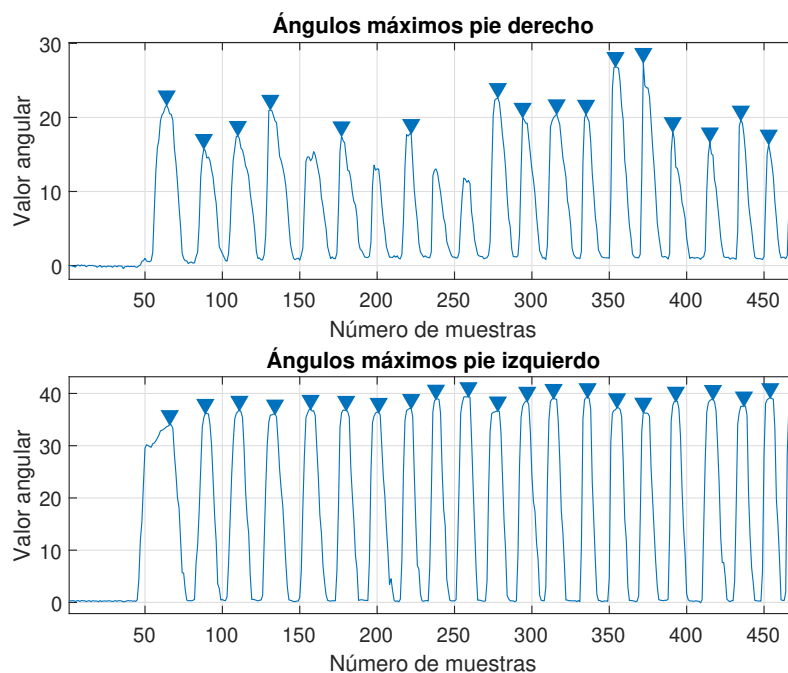


Figura 5.33: Primera sesión de evaluación participante 4

Sesión 2 En la figura 5.34 se presentan los resultados de los datos del movimiento angular de las dos extremidades inferiores. En la gráfica superior correspondiente a los movimientos angulares realizados por la extremidad afectada, la dispersión entre los ángulos alcanzados es menor en comparación a la primera sesión, se observa que algunas crestas tiene una forma curva, esto significa que la persona mantiene por un instante de tiempo la posición máxima angular, en algunos intervalos de movimiento se observa que el participante intenta recuperar el valor angular máximo lo que requiere un mayor esfuerzo en el proceso. La figura inferior presenta los movimientos realizados por la extremidad, en amplitud y frecuencia los movimientos son similares. las gráficas muestran que las extremidades pueden realizar movimientos en instantes de tiempo similares como en la sesión 1.

Sesión 3 En la figura 5.35 se observan los datos correspondientes a la última sesión de evaluación. En la gráfica superior se encuentran los datos del movimiento angular generado por la extremidad afectada. En comparación a la sesión anterior, el alcance máximo angular es menor en cambio se observa que el alcance máximo es similar en los movimientos realizados, indicando mejora en la aplicación de fuerza y control motriz en la extremidad afectada, en algunos intervalos de movimiento se observan, pendientes que inician en la cresta de cada curva indicando que la participante es capaz de controlar la velocidad de descenso en el proceso de dorsiflexión. La gráfica inferior presenta los movimientos generados por la extremidad sana, los rangos máximos alcanzados son similares en todos los movimientos, además se observa que la participante

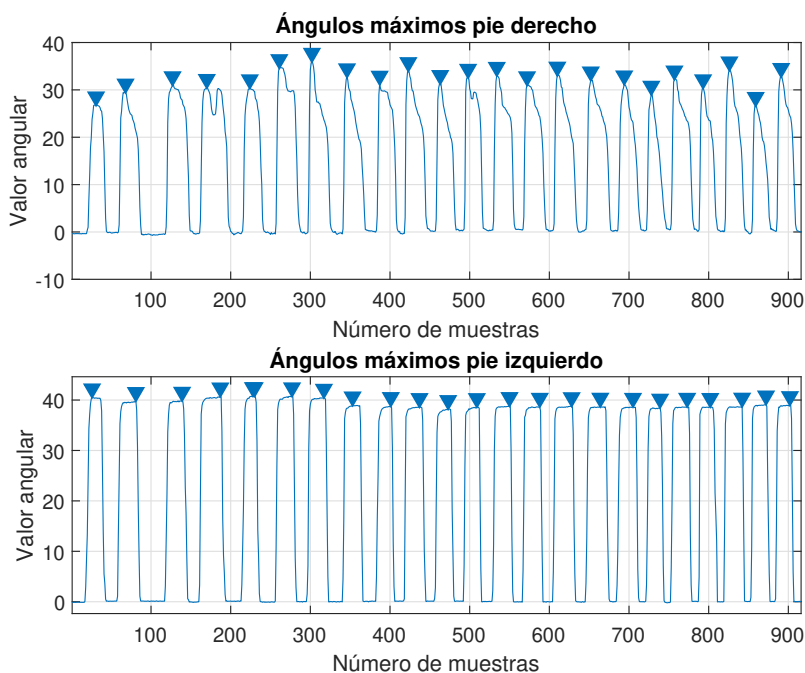


Figura 5.34: Segunda sesión de evaluación participante 4

mantiene el pie elevado durante un instante de tiempo, la frecuencia de movimientos en las dos extremidades es similar, indicando que la persona puede controlar los movimientos en las dos extremidades al mismo tiempo.

Dispersión de los datos En la figura 5.36 para la primera sesión de evaluación, se obtiene el mayor rango de dispersión en el movimiento realizado por la participante, con un valor medio de 18 grados y una dispersión entre los 16 a 22 grados; aunque este nivel de dispersión en el movimiento es el mayor en todas las sesiones, el valor promedio alcanzado esta dentro del rango de funcionalidad motriz normal, en la segunda sesión; se obtiene una media en 32 grados con un rango de dispersión entre los 31 a 43 grados indicando que el movimiento angular y la precisión en la ejecución de los movimientos ha aumentado, indicando que la participante ha aumentado el rango de fuerza y funcionalidad motriz en la extremidad afectada. Para la sesión 3, la media del valor angular disminuye en comparación a la sesión anterior, con una media de 24 grados y una dispersión entre los 23 a 25 grados, esta disminución de movimiento no indica que el participante haya disminuido la habilidad motriz en la extremidad inferior, por otro lado, en esta sesión se obtiene el menor rango de dispersión en el movimiento angular, esto indica un aumento en el control de la fuerza aplicada, para lograr ejecutar movimientos con mayor precisión. Para la extremidad sana, se observa que aunque las medias de los ángulos alcanzados en cada sesión son diferentes, la dispersión del movimiento angular es similar en todas las sesiones. Los valores máximos alcanzados son superiores a los 20 grados de dorsiflexión indicando que esta

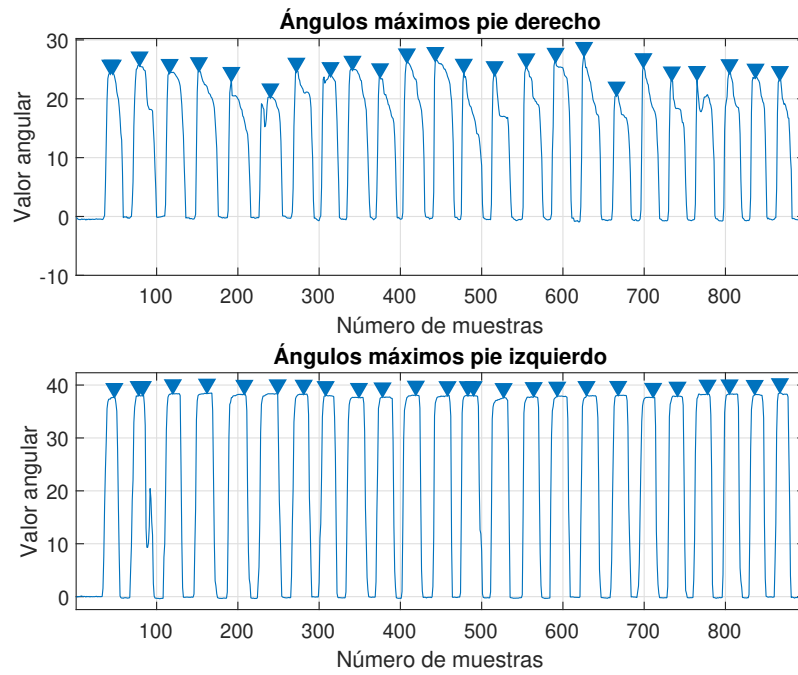


Figura 5.35: Tercera sesión de evaluación participante 4

extremidad tiene un funcionamiento motor normal.

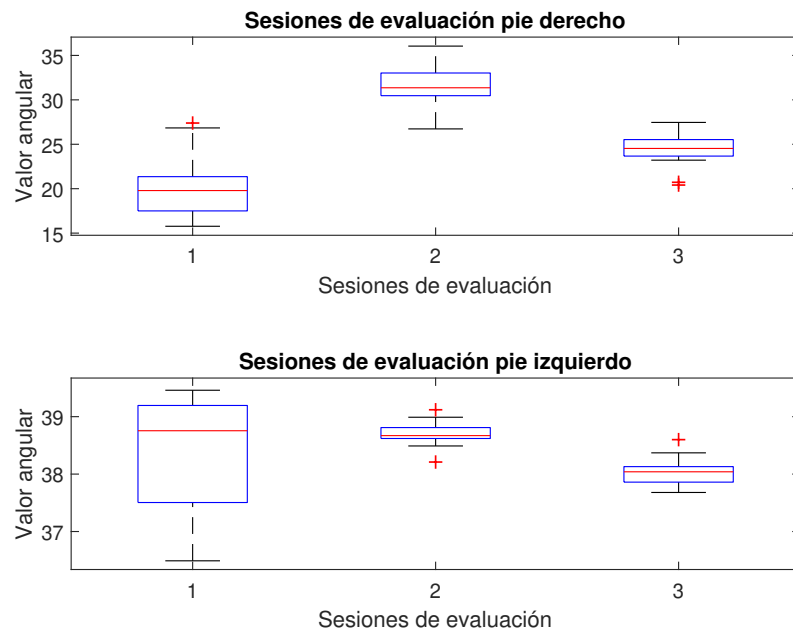


Figura 5.36: Extremidad afectada(superior), sana(inferior)

En la tabla 5.5 se muestran los porcentajes de ganancia en dorsiflexión, tomando como punto inicial los los valores medios de la primera sesión para cada participante y comparando los resultados con la ultima sesión.

Tabla 5.5: Porcentaje de ganancia en movilidad de dorsiflexión

Participante	Angulo en grados sesión inicial	Angulo en grados sesión final	Porcentaje
1	5	0.5	-11.28 %
2	0	2.7	6.75 %
3	35	38	7.5 %
4	20	24	10 %

5.5.5. Efecto de los tratamientos

Con el objetivo de analizar el efecto del tratamiento alternativo propuesto, se realiza una prueba ANOVA de dos vías, a partir de los máximos valores de dorsiflexión de cada paciente para las sesiones de evaluación. Para la aplicación de la prueba ANOVA, se tomaron como variables independientes la sesión y el tratamiento, mientras que los puntos máximos de dorsiflexión en las sesiones de evaluación fueron considerados la variable dependiente.

Es importante recordar que como tratamiento 1 (T1) se entiende al grupo en el cual no se está aplicando terapia de rehabilitación tradicional, en este caso específico, es un paciente en donde ya finalizó el proceso de terapia tradicional, y el procedimiento alternativo es aplicado de manera independiente. Por su parte los pacientes con tratamiento 2, indica que están recibiendo terapia tradicional y adicionalmente, en paralelo, reciben la terapia alternativa. La Figura 5.37 presenta

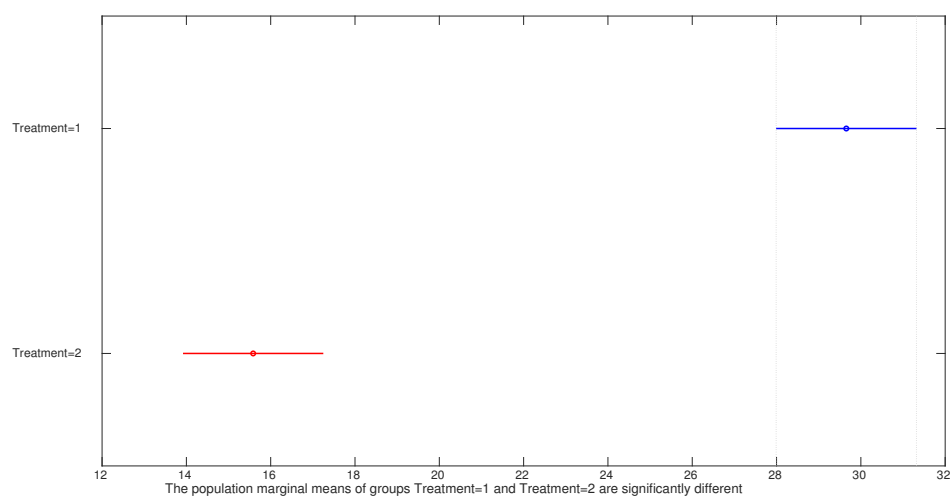


Figura 5.37: Comparación de medias Tukey-Kramer para los dos grupos de tratamientos

el resultado de comparar estadísticamente el efecto de los dos tratamientos en la respuesta de dorsiflexión de los pacientes. Es claro que el paciente del grupo T1, desde el inicio de las sesiones con este tratamiento ya cuenta con una movilidad superior al resto de los pacientes. Su evolución es ascendente y se evidencia que su mejoría no es dependiente de la aplicación de otro tratamiento, tal y como se aprecia en la Figura 5.38

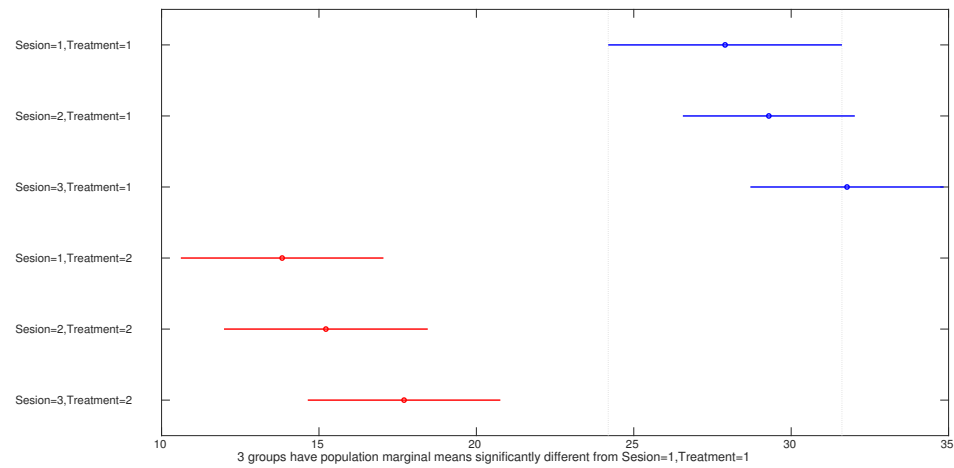


Figura 5.38: Comparación de medias Tukey-Kramer para los dos grupos de tratamientos

Capítulo 6

Discusión y conclusiones

6.1. Discusión

En este proyecto se realizó una exploración sobre los efectos de la aplicación de la TE y la EEF dentro de un contexto de RV inmersiva, en la recuperación de la movilidad de tobillo en personas que han sufrido un ACV, las pruebas realizadas están enfocadas en la medición de tobillo durante tres etapas de evaluación sobre el proceso de rehabilitación propuesto. Los porcentajes de movilidad muestran una ganancia en la dorsiflexión entre el 6.75 %, 7.75 % y 10 % para los participante 2,3,4 respectivamente, para el participante 1 se observa una pérdida de movilidad del 11.25 %. Debido a cuestiones personales, y de estado de ánimo, el participante 1 no logró incrementar el nivel de movilidad de angular del tobillo de la extremidad afectada. Aunque con el participante 1 no se obtienen los resultados esperados los resultados de los demás participantes muestran que el sistema y protocolo propuesto tienen un efecto positivo en la ganancia de movimiento angular de tobillo. Los resultados indican que los participantes aumentan la capacidad de movimiento, lo cual indica aumento en el control de la fuerza y motricidad de la extremidad afectada, por lo tanto los movimientos realizados con la extremidad afectada se ejecutan con una precisión mayor que al inicio del proceso propuesto. El método de evaluación implementado está basado en la medición del movimiento angular de tobillo, el sistema propuesto está desarrollado con un dispositivo electrónico el cual está calibrado con un patrón de medición estándar, métodos similares al propuestos en [30] [31] [32] evalúan el movimiento de dorsiflexión utilizando sensores de captura de movimiento, como cámaras y sensores de velocidad los cuales están implementados en cintas rodantes, o sistemas de entrenamiento basados en videojuegos, otros sistemas evalúan la velocidad de giro en sistemas de pedaleo con sensores magnéticos o giroscopios, el sistema propuesto presenta un punto de giro fijo, el cual esta ubicado debajo del punto de giro del tobillo, a diferencia de los sistemas mencionados los cuales presentan puntos de giro diferentes al del tobillo como los sistemas de pedaleo, o los giroscopios los cuales no tienen un punto de giro específico, ya que

cambian según el movimiento de la extremidad; al comparar los sistemas de medición en [33] [34] [35] [36] [37] [38], los cuales utilizan sensores de presión para la evaluación de equilibrio, análisis de caminata con cámaras y sensores de fuerza, captura de movimiento con cámaras para el análisis de marcha, sensores de movimiento angular para cadera y rodilla, giroscopios para en análisis de la dorsiflexión con el sistema de medición de este proyecto no se encuentran similitudes con los cuales comparar la precisión y exactitud en el proceso de medición del sistema. Por otro lado en [39] [40], [12] [41] se utiliza el BI, en [30] se aplica el test 10MWT, en [42] se utiliza el 6MWT, en [43] [32] y [33] el TimeUp&GoTest y en [43] [38] el MI, métodos que evalúan la fuerza muscular, capacidad motora y funcional y el desempeño de las AVD, métodos que en este estudio no se tuvieron en cuenta, aunque se incrementa el rango de movimiento de la extremidad afectada, no es posible determinar en qué porcentaje se incrementa la funcionalidad de los participantes con respecto a las AVD. En [30] [31] [32] la realidad virtual es utilizada principalmente en pantallas que proyectan los movimientos ejecutados por un avatar según la acción requerida, donde cada movimiento permite realizar la medición del progreso del participante, en el sistema propuesto se utiliza realidad virtual inmersiva en un dispositivo móvil, aunque existe un amplio estudio de la rehabilitación con RV, el desarrollo de la RV inmersiva en la rehabilitación de personas con ACV aún es escasa, a diferencia de los sistemas de rehabilitación con RV; el sistema propuesto no realiza ningún proceso de evaluación en el ambiente virtual, no se visualizan puntajes o ítems que muestran el progreso en el desarrollo de la rehabilitación. La electroestimulación funcional es ampliamente utilizada para la recuperación de movimiento en las extremidades de la persona que ha sufrido un ACV, métodos novedosos como los mostrados en [44] utilizan la EEF para la rehabilitación y asistencia de movimiento en la extremidad inferior afectada, midiendo la intención de movimiento, ya se con interruptores que detectan el contacto del talón del pie con el suelo o acelerómetros que detectan el cambio de aceleración en la acción de caminar, no se encontró un sistema similar que aplique la estimulación para generar el movimiento como en el sistema propuesto, por otro lado en [45] [21] se evidencian métodos en los cuales se aplica la TE y la EEF en conjunto, concluyendo que la combinación de estos métodos incrementa la recuperación motora, resultado que son similares a los alcanzados en este proyectos, aunque no se aclaran los niveles de electroestimulación o valores de frecuencia y amplitud del dispositivo implementado, además no se evidencia el proceso y protocolo utilizado para la configuración del electroestimulador. Aunque los efectos de la EEF son evidentes en el corto plazo tal como lo muestran en [46] [42], en el mediano y largo plazo no son evidentes, solo en [39] se presenta un resultado positivo en un periodo mayor a 12 meses, con la diferencia que el método de EEF aplicado es intramuscular, en comparación al método utilizado en la metodología propuesta el cual es superficial, en el desarrollo de este proyecto, no fue posible determinar si los efectos de la EEF perduran en el tiempo, ya que no fue posible realizar un seguimiento de la movilidad del tobillo después de haber finalizado con la etapa de rehabilitación.

6.2. Conclusiones

- El nivel de EEF no está relacionado con la capacidad del movimiento de la extremidad afectada.
- Los profesionales en fisioterapia y los participantes sanos recomendaron mejorar la calidad del ambiente virtual.
- Los resultados de la etapa de evaluación con los fisioterapeutas y los participantes sanos muestra que el sistema cumple con los requerimientos.
- Todos los participantes a excepción del participante 1, lograron niveles de recuperación en el movimiento angular.
- La sincronización de la EEF con la visualización del movimiento en el ambiente virtual, permite que el participante asocie los movimientos visualizados en el ambiente virtual con los movimientos realizados.
- Aunque la aplicación del proceso de rehabilitación propuesto permite recuperar el movimiento de las extremidades afectadas, no es posible afirmar que el efecto sea duradero.
- El proceso de recuperación de la extremidad afectada depende no solo de los procesos de rehabilitación, sino también de que la persona realice ADV de forma independiente.

6.3. Trabajos futuros

En esta sección se proponen otros trabajos para llevar a cabo.

- Realizar estudios con más usuarios sobre la incidencia de la realidad virtual inmersiva, la estimulación eléctrica funcional y la terapia de espejo en los procesos de rehabilitación motriz en miembro inferior.
- Realizar un estudio con diferentes métodos de control que permitan asociar el nivel de estimulación eléctrica funcional al movimiento angular de dorsiflexión en las extremidades inferiores.
- Desarrollar una plataforma software que entregue información relacionada con las variables de interés del experto en rehabilitación para su posterior análisis.
- Utilizar sistemas que permitan asistir en el movimiento angular de dorsiflexión durante el proceso de rehabilitación en la plataforma de entrenamiento.

Bibliografía

- [1] G. R. Pa and S. Cb, “Abordaje del accidente cerebrovascular,” 2002.
- [2] J. I. Rojas, M. C. Zurru, M. Romano, L. Patrucco, and E. Cristiano, “Accidente cerebrovascular isquémico en mayores de 80 años,” *Medicina (Buenos Aires)*, vol. 67, no. 6, pp. 701–704, 2007.
- [3] A. Arauz and A. Ruíz-Franco, “Enfermedad vascular cerebral,” *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, vol. 55, no. 3, pp. 11–21, 2012.
- [4] R. Prieto-Arribas, A. Moreno-Gutiérrez, P. Simal-Hernández, J. Pascual-Garvi, J. Matías-Guiu, J. Roda, and J. Barcia-Albacar, “Modelos experimentales de isquemia cerebral,” *Rev Neurol*, vol. 47, no. 8, pp. 414–426, 2008.
- [5] R. Escalante, M. Lourido, C. Melcón, and L. Curatolo, “Accidente cerebrovascular en la policlínica bancaria: Registro de 1699 eventos consecutivos,” *Revista Neurológica Argentina*, vol. 28, no. 2, pp. 91–95, 2003.
- [6] M. Rodríguez-Yáñez, M. Castellanos, M. Freijo, J. L. Fernández, J. Martí-Fàbregas, F. Nombela, P. Simal, J. Castillo, E. Díez-Tejedor, B. Fuentes *et al.*, “Guías de actuación clínica en la hemorragia intracerebral,” *Neurología*, vol. 28, no. 4, pp. 236–249, 2013.
- [7] J. Vivancos, F. Gilo, R. Frutos, J. Maestre, A. García-Pastor, F. Quintana, J. M. Roda, A. Ximénez-Carrillo, E. D. Tejedor, B. Fuentes *et al.*, “Guía de actuación clínica en la hemorragia subaracnoidea. sistemática diagnóstica y tratamiento,” *Neurología*, vol. 29, no. 6, pp. 353–370, 2014.
- [8] F. Bethoux, H. L. Rogers, K. J. Nolan, G. M. Abrams, T. M. Annaswamy, M. Brandstater, B. Browne, J. M. Burnfield, W. Feng, M. J. Freed *et al.*, “The effects of peroneal nerve functional electrical stimulation versus ankle-foot orthosis in patients with chronic stroke: a randomized controlled trial,” *Neurorehabilitation and neural repair*, vol. 28, no. 7, pp. 688–697, 2014.
- [9] B. Xu, T. Yan, Y. Yang, R. Ou, and S. Huang, “Effect of normal-walking-pattern-based functional electrical stimulation on gait of the lower extremity in subjects with ischemic stroke: a self controlled study,” *NeuroRehabilitation*, vol. 38, no. 2, pp. 163–169, 2016.

- [10] J. Chae, L. Sheffler, and J. Knutson, "Neuromuscular electrical stimulation for motor restoration in hemiplegia," *Topics in stroke rehabilitation*, vol. 15, no. 5, pp. 412–426, 2008.
- [11] J.-W. Hung, M.-Y. Yu, K.-C. Chang, H.-C. Lee, Y.-W. Hsieh, and P.-C. Chen, "Feasibility of using tetrax biofeedback video games for balance training in patients with chronic hemiplegic stroke," *PM&R*, vol. 8, no. 10, pp. 962–970, 2016.
- [12] L. F. Dos Santos, O. Christ, K. Mate, H. Schmidt, J. Krüger, and C. Dohle, "Movement visualisation in virtual reality rehabilitation of the lower limb: a systematic review," *Biomedical engineering online*, vol. 15, no. 3, p. 144, 2016.
- [13] D. Webster and O. Celik, "Systematic review of kinect applications in elderly care and stroke rehabilitation," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 11, no. 1, p. 108, 2014.
- [14] K. N. Arya, S. Pandian, and V. Kumar, "Effect of activity-based mirror therapy on lower limb motor-recovery and gait in stroke: A randomised controlled trial," *Neuropsychological rehabilitation*, vol. 29, no. 8, pp. 1193–1210, 2019.
- [15] S.-N. Jeon and J.-H. Choi, "The effects of ankle joint strategy exercises with and without visual feedback on the dynamic balance of stroke patients," *Journal of physical therapy science*, vol. 27, no. 8, pp. 2515–2518, 2015.
- [16] K. Hartman and E. L. Altschuler, "Mirror therapy for hemiparesis following stroke: A review," *Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports*, vol. 4, no. 4, pp. 237–248, 2016.
- [17] L. D. Crosby, S. Marrocco, J. Brown, and K. K. Patterson, "A novel bilateral lower extremity mirror therapy intervention for individuals with stroke," *Heliyon*, vol. 2, no. 12, p. e00208, 2016.
- [18] G. J. Barton, A. R. De Asha, E. C. van Loon, T. Geijtenbeek, and M. A. Robinson, "Manipulation of visual biofeedback during gait with a time delayed adaptive virtual mirror box," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 11, no. 1, p. 101, 2014.
- [19] M. Diers, S. Kamping, P. Kirsch, M. Rance, R. Bekrater-Bodmann, J. Foell, J. Trojan, X. Fuchs, F. Bach, H. Maaß *et al.*, "Illusion-related brain activations: a new virtual reality mirror box system for use during functional magnetic resonance imaging," *Brain research*, vol. 1594, pp. 173–182, 2015.
- [20] K.-C. Lin, Y.-T. Chen, P.-C. Huang, C.-Y. Wu, W.-L. Huang, H.-W. Yang, H.-T. Lai, and H.-J. Lu, "Effect of mirror therapy combined with somatosensory stimulation on motor recovery and daily function in stroke patients: A pilot study," *Journal of the Formosan Medical Association*, vol. 113, no. 7, pp. 422–428, 2014.
- [21] D. Lee, G. Lee, and J. Jeong, "Mirror therapy with neuromuscular electrical stimulation for improving motor function of stroke survivors: a pilot randomized clinical study," *Technology and health care*, vol. 24, no. 4, pp. 503–511, 2016.

- [22] D. Kumar, A. Das, U. Lahiri, and A. Dutta, "A human-machine-interface integrating low-cost sensors with a neuromuscular electrical stimulation system for post-stroke balance rehabilitation," *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, no. 110, p. e52394, 2016.
- [23] J. Sobotta, *Atlas de anatomía humana: Cabeza, cuello, miembro superior. Vol. 1*. Ed. Médica Panamericana, 2006, vol. 1.
- [24] A. Voegeli, "Anatomía funcional y biomecánica del tobillo y el pie," *Revista española de reumatología*, vol. 30, no. 09, 2003.
- [25] V. Singh, *Textbook of Anatomy Abdomen and Lower Limb; Volume II*. Elsevier Health Sciences, 2014, vol. 2.
- [26] T. Rose, C. S. Nam, and K. B. Chen, "Immersion of virtual reality for rehabilitation-review," *Applied ergonomics*, vol. 69, pp. 153–161, 2018.
- [27] M. Arrate, "Características propioceptivas en el esguince de tobillo," 2015.
- [28] E. F. García, M. L. G. Torralba, and F. S. Bañuelos, *Evaluación de las habilidades motrices básicas: determinación de escala para la evaluación de desplazamiento, giro y manejo de móviles*. Inde, 2007, vol. 40.
- [29] A. Matas, "Diseño del formato de escalas tipo likert: un estado de la cuestión," *Revista electrónica de investigación educativa*, vol. 20, no. 1, pp. 38–47, 2018.
- [30] K. Hemmi, Y. Kondo, T. Tobina, and T. Nishimura, "Floor projection type serious game system for lower limb rehabilitation using image processing," in *International Conference on Computing and Information Technology*. Springer, 2019, pp. 119–128.
- [31] A. Kanbe, S. Ishihara, and M. Nagamachi, "Development and evaluation of ankle mobility vr rehabilitation game," in *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, 2017, pp. 325–336.
- [32] H. Tannous, D. Istrate, M. H. B. Tho, and T. Dao, "Feasibility study of a serious game based on kinect system for functional rehabilitation of the lower limbs," *European Research in Telemedicine/La Recherche Européenne en Télémédecine*, vol. 5, no. 3, pp. 97–104, 2016.
- [33] L. W. Forrester, A. Roy, C. Hafer-Macko, H. I. Krebs, and R. F. Macko, "Task-specific ankle robotics gait training after stroke: a randomized pilot study," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 13, no. 1, pp. 1–6, 2016.
- [34] B. Guo, J. Han, X. Li, T. Fang, and A. You, "Research and design of a new horizontal lower limb rehabilitation training robot," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 1, p. 10, 2016.
- [35] S. L. Chaparro-Cárdenas, A. A. Lozano-Guzmán, J. A. Ramirez-Bautista, and A. Hernández-Zavala, "A review in gait rehabilitation devices and applied control techniques," *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, vol. 13, no. 8, pp. 819–834, 2018.

- [36] N. Berezny, D. Dowlatshahi, and M. Ahmadi, "Interaction control and haptic feedback for a lower-limb rehabilitation robot with virtual environments," in *Proceedings of the 6th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics*, 2019.
- [37] J. A. Saglia, A. De Luca, V. Squeri, L. Ciaccia, C. Sanfilippo, S. Ungaro, and L. De Michieli, "Design and development of a novel core, balance and lower limb rehabilitation robot: Hunova®," in *2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. IEEE, 2019, pp. 417–422.
- [38] T. Mikolajczyk, I. Ciobanu, D. I. Badea, A. Iliescu, S. Pizzamiglio, T. Schauer, T. Seel, P. L. Seiciu, D. L. Turner, and M. Berteau, "Advanced technology for gait rehabilitation: An overview," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 7, p. 1687814018783627, 2018.
- [39] K. Daniilidis, E. Jakubowitz, A. Thomann, S. Ettinger, C. Stukenborg-Colsman, and D. Yao, "Does a foot-drop implant improve kinetic and kinematic parameters in the foot and ankle?" *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, vol. 137, no. 4, pp. 499–506, 2017.
- [40] R. J. Davies, J. Parker, P. McCullagh, H. Zheng, C. Nugent, N. D. Black, and S. Mawson, "A personalized self-management rehabilitation system for stroke survivors: a quantitative gait analysis using a smart insole," *JMIR rehabilitation and assistive technologies*, vol. 3, no. 2, p. e5449, 2016.
- [41] C. Luque-Moreno, A. Oliva-Pascual-Vaca, P. Kiper, C. Rodriguez-Blanco, M. Agostini, and A. Turolla, "Virtual reality to assess and treat lower extremity disorders in post-stroke patients," *Methods Inf Med*, vol. 55, no. 1, pp. 89–92, 2016.
- [42] G. Salhab, A. R. Sarraj, and S. Saleh, "Mirror therapy combined with functional electrical stimulation for rehabilitation of stroke survivors' ankle dorsiflexion," in *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2016, pp. 4699–4702.
- [43] S. Chen, F.-f. Fu, Q.-l. Meng, and H.-l. Yu, "Development of a lower limb rehabilitation wheelchair system based on tele-doctor–patient interaction," in *Wearable Sensors and Robots*. Springer, 2017, pp. 211–223.
- [44] J. Zhan, R. Pan, M. Zhou, F. Tan, Z. Huang, J. Dong, and Z. Wen, "Electroacupuncture as an adjunctive therapy for motor dysfunction in acute stroke survivors: a systematic review and meta-analyses," *BMJ open*, vol. 8, no. 1, 2018.
- [45] M. Li, G. Xu, J. Xie, and C. Chen, "A review: Motor rehabilitation after stroke with control based on human intent," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 232, no. 4, pp. 344–360, 2018.
- [46] K. Kawakami, H. Miyasaka, S. Nonoyama, K. Hayashi, Y. Tonogai, G. Tanino, Y. Wada, A. Narukawa, Y. Okuyama, Y. Tomita *et al.*, "Randomized controlled comparative study on effect of training to improve lower limb motor paralysis in convalescent patients with post-stroke hemiplegia," *Journal of physical therapy science*, vol. 27, no. 9, pp. 2947–2950, 2015.