



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA UN ROBOT GUÍA, ENFOCADO A LA
REHABILITACIÓN DE EXTREMIDADES INFERIORES**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

**ORLANDO XAVIER MINCHALA VEGA
KEVIN ALEJANDRO PINTADO PUGO**

Director:

MGTR. DANIEL CAPELO

CUENCA, ECUADOR

2026

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Orlando Minchala y Margarita Vega, quienes con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por sus enseñanzas, valores y por siempre brindarme un apoyo constante durante cada etapa de mi formación, motivándome siempre a seguir adelante y alcanzar mis metas.

A mi hermano Carlos, por su compañía, apoyo y motivación durante este proceso, por estar presente en los momentos difíciles y por ser un modelo a seguir.

A mi familia y amigos, que han sido parte de este logro esencial, les dedico con gratitud este trabajo, gracias por el apoyo incondicional brindado.

Orlando Xavier Minchala Vega

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Rodrigo y Zoila, por su apoyo incondicional a lo largo de este camino, por sus consejos en los momentos en los que yo mismo dudaba y por el esfuerzo realizado para ayudarme a alcanzar esta meta.

De igual manera, a todas las personas que, de una u otra forma, aportaron su granito de arena en el proceso de realización de este proyecto.

Kevin ALejandro Pintado Pugo

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a los docentes, por compartir sus conocimientos, su guía y acompañamiento a lo largo de este proceso, los cuales fueron esenciales para el desarrollo de este trabajo. A nuestro tutor, Mgtr. Daniel Capelo, por su paciencia y dedicación; gracias por sus consejos y por su guía a lo largo de este camino, los cuales fueron fundamentales para la culminación de este proyecto. A la fisioterapeuta Doménica, por sus consejos y orientación al momento de resolver dudas en el área de rehabilitación. Finalmente, agradecemos a mis compañeros y a nuestras amistades, quienes comenzaron siendo compañeros de aula y, de una u otra manera, compartimos conocimientos y nos brindamos apoyo constante para así lograr convertirnos en profesionales.

DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA UN ROBOT GUÍA, ENFOCADO A LA REHABILITACIÓN DE EXTREMIDADES INFERIORES.

El presente trabajo describe el desarrollo e implementación de un sistema integrado enfocado en la rehabilitación de extremidades inferiores, el cual se basa en un robot humanoide controlado mediante una aplicación móvil. El objetivo es brindar un mejor acceso a las terapias, permitiendo la ejecución independiente de los ejercicios, de esta manera el especialista no debe brindar una supervisión constante. El desarrollo incluyó la selección de ejercicios con la asistencia de un profesional en fisioterapia, la programación de los ejercicios se realizó en una plataforma de programación robótica usando cinemática inversa, mientras que la aplicación móvil fue desarrollada de manera independiente, también se usó un microcontrolador como puente de comunicación Bluetooth para enlazar el robot y la aplicación. El sistema fue evaluado con la participación de varios usuarios, los cuales al finalizar realizaron una encuesta. Los resultados evidencian un sistema funcional, aceptable y adaptable a cualquier entorno cotidiano.

Palabras clave: rehabilitación, robot humanoide, aplicación móvil, extremidades inferiores.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR A GUIDE ROBOT FOCUSED ON LOWER-LIMB REHABILITATION.

This work describes the development and implementation of an integrated system focused on the rehabilitation of lower limbs, which is based on a humanoid robot controlled by a mobile application. The objective is to provide better access to therapies, allowing the independent execution of the exercises, in this way the specialist should not provide constant supervision. The development included the selection of exercises with the assistance of a professional in physiotherapy, the programming of the exercises on a robotic programming platform using inverse kinematics, while the mobile app was developed independently, a microcontroller was also used as a Bluetooth communication bridge to connect the robot and the application. The system was evaluated with the participation of several users, who at the end carried out a survey. The results show a functional system, acceptable and adaptable to any everyday environment.

Keywords: rehabilitation, humanoid robot, mobile app, lower limbs.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Índice de Contenidos	vi
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	viii
I Introducción	1
II Metodología	3
II-A Selección de ejercicios	4
II-B Programación de ejercicios	4
II-C Aplicación móvil	5
II-D Programación del Mando	6
II-E Conexión	6
III Resultados	7
III-A Pruebas	7
III-B Resultados de las Encuestas	8
IV Conclusiones y Recomendaciones	
Referencias	9
ANEXO A: Anexo Fotográfico	10
ANEXO B: Anexo Encuesta	11

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Estadísticas de lesiones [2].	1
2	Esquema del proyecto.	3
3	Partes de RoboPlus Motion 1.	4
4	Partes de RoboPlus Motion 2.	4
5	Uso de 2 memorias.	4
6	Valores de los motores y motores apagados.	5
7	Bloques de Programación 1.	5
8	Diagrama del Sistema 1.	6
9	Diagrama del Sistema 2.	6
10	Programación del Control.	6
11	Circuito Esquemático.	7
12	PCB.	7
13	Fotos de ejercicios.	7
14	Pruebas con el robot.	8
15	Resultados Promedios.	8

ÍNDICE DE TABLAS

I	Ejercicios Seleccionados Para La Evaluación	5
II	Valores Designados a los Ejercicios	7
III	Encuesta	8

Desarrollo de un Sistema para un Robot Guía, Enfocado a la Rehabilitación de Extremidades Inferiores

Orlando Xavier Minchala Vega
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
Ominchala22@es.uazuay.edu.ec

Kevin Alejandro Pintado Pugo
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
Kevinp@es.uazuay.edu.ec

Resumen—El presente trabajo describe el desarrollo e implementación de un sistema integrado enfocado en la rehabilitación de extremidades inferiores, el cual se basa en un robot humanoide controlado mediante una aplicación móvil. El objetivo es brindar un mejor acceso a las terapias, permitiendo la ejecución independiente de los ejercicios, de esta manera el especialista no debe brindar una supervisión constante. El desarrollo incluyó la selección de ejercicios con la asistencia de un profesional en fisioterapia, la programación de los ejercicios se realizó en una plataforma de programación robótica usando cinemática inversa, mientras que la aplicación móvil fue desarrollada de manera independiente, también se usó un microcontrolador como puente de comunicación Bluetooth para enlazar el robot y la aplicación. El sistema fue evaluado con la participación de varios usuarios, los cuales al finalizar realizaron una encuesta. Los resultados evidencian un sistema funcional, aceptable y adaptable a cualquier entorno cotidiano.

Palabras clave—rehabilitación, robot humanoide, aplicación móvil, extremidades inferiores.

I. INTRODUCCIÓN

La terapia física es fundamental para prevenir la pérdida de masa muscular y conservar la movilidad, situación que se vuelve muy común si el paciente descuida la rehabilitación, ya que puede llegar a producirse atrofia muscular. Lamentablemente, muchas personas no cumplen con la terapia de manera adecuada. Por lo general, este proceso de rehabilitación se realiza con la ayuda de un profesional; según [1] esta área de la medicina tiene una gran demanda. En ausencia de una intervención oportuna, la lesión puede volverse permanente. Otro factor es el elevado costo de las terapias, lo que dificulta que muchas personas accedan a centros especializados, generando una asistencia limitada a las sesiones, o un largo tiempo de espera para agendar una cita.

Las lesiones en la actualidad son muy comunes debido a la mayor intensidad en el ámbito deportivo. Existen diversos tipos de lesiones que pueden afectar distintas extremidades del cuerpo, siendo las del tren inferior las más frecuentes. Según [2], debido a la alta exposición que presentan los deportistas durante prácticas y competiciones, estos son propensos a sufrir lesiones, las cuales requieren una rehabilitación óptima para prevenir afectaciones futuras. En la Fig. 1. se puede

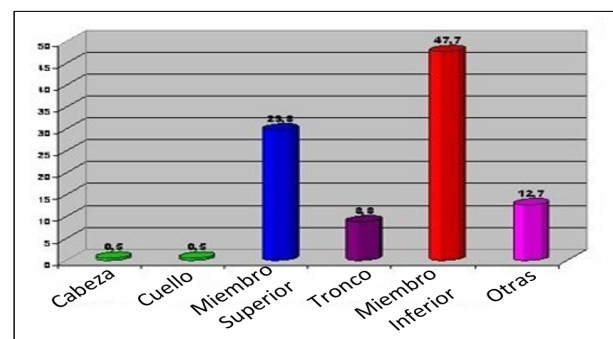


Fig. 1. Estadísticas de lesiones [2].

observar las estadísticas referentes a las lesiones que pueden sufrir los deportistas, la mayoría de lesiones se dan en el tren inferior.

Existen diversas lesiones en el tren inferior. De acuerdo con los resultados de [3], un 56,25% de las lesiones ocurren en las extremidades inferiores, mientras que un 43,75% corresponde a lesiones del tren superior. Se considera al esguince como la lesión más común; dependiendo de su gravedad, puede requerir o no intervención quirúrgica. En todos los casos, es fundamental rehabilitar la parte afectada.

Las terapias de rehabilitación conforme a [4] son técnicas orientadas principalmente a mejorar la calidad de vida de las personas que sufren algún tipo de discapacidad. Actualmente, y en base a los derechos humanos, la rehabilitación debe tener un enfoque más amplio, dado que las personas deben integrarse a la sociedad; ninguna persona debe ser excluida de la misma. Por ello, se mejoran las infraestructuras, el transporte, entre otros aspectos. Para este tipo de terapias es necesaria una atención médica oportuna y el desarrollo de un cronograma para la realización de las sesiones de rehabilitación, las cuales pueden apoyarse en dispositivos complementarios.

Conforme lo indica [5] las lesiones de ligamento cruzado, fracturas, desgarro de menisco, bursitis de la rodilla y tendinitis rotuliana son las más comunes en los deportistas de alto rendimiento, debido a la exposición de esta parte del cuerpo. De igual manera, estas lesiones deben ser tratadas con cirugía si la gravedad lo sugiere. La rehabilitación luego de la operación debe iniciarse de manera inmediata y llevar un seguimiento individual, ya que, dependiendo de la evolución del paciente, podría durar más o menos tiempo. Algunos ejercicios recomendados son la flexión de la rodilla, que puede ser apoyada con una banda de goma para ejercer presión, levantar la pierna hacia el frente e isométricos de cuádriceps; cabe recalcar que al realizar los ejercicios se debe respetar un rango antes del dolor. Las lesiones más comunes en el tobillo de los deportistas son los esguinces y fracturas. En algunos casos requieren cirugía y posteriormente un periodo de rehabilitación. Para lograr buenos resultados en la recuperación, se deben considerar dos etapas: la fase de inmovilización, en la que la extremidad debe permanecer elevada gran parte del día; y la fase de movilización, en la que se realiza un vendaje y masajes, para posteriormente ejecutar una serie de ejercicios, entre los que se incluyen apoyo de puntillas, apoyo en zonas inestables, saltos sobre suelo estable y subir y bajar escaleras.

Actualmente, los robots tienen presencia en diversos campos, aunque su uso es más frecuente en la industria debido a su alta precisión en las tareas. Con el tiempo, su aplicación se ha extendido al ámbito médico, impulsando la innovación y evidenciando nuevas formas de medicina asistida. El desarrollo de aplicaciones destinadas al control de estos robots puede incentivar a las personas que requieren terapia a realizarla, reduciendo los costos y mejorando su accesibilidad.

La aplicación desarrollada en [6] establece comunicación inalámbrica mediante Bluetooth con el robot, transmitiendo órdenes hacia un microcontrolador. Los datos recibidos por el puerto serial son interpretados para controlar diferentes movimientos del brazo robótico. La aplicación fue creada utilizando en una plataforma de código abierto, cuyo lenguaje de programación está basado en bloques, lo que permite arrastrar y soltar elementos gráficos para construir la aplicación.

En [7] se presenta un prototipo cuyo objetivo principal es implementar la sesión de rehabilitación mediante el juego del espejo, promoviendo la interacción entre el robot y el humano. El estudio realizado buscó comprobar la relación existente entre ambos, y los resultados fueron alentadores, ya que el prototipo resultó amigable para el paciente.

Según [8] los robots se utilizan ampliamente en diversos ámbitos, principalmente en la industria, y han interactuado con los seres humanos durante varios años. El autor señala

que, con los avances tecnológicos, estos dispositivos han empezado a incorporarse en áreas más delicadas, como la medicina. En particular, en el campo de la rehabilitación se genera una interfaz humano-máquina en la que los robots asisten a las personas en la ejecución de los ejercicios necesarios, mientras el personal médico supervisa las terapias que debe seguir cada paciente.

En [9] se describe la terapia espejo asistida por un robot para pacientes con hemiparesia, una condición neurológica que dificulta la movilidad en la mitad del cuerpo. Según los autores, esta terapia se realiza mediante un dispositivo terapéutico que incluye motores y dos sensores: el primero mide la posición y el segundo la torsión. El robot se coloca tanto en la parte afectada como en la sana, y, basándose en los movimientos realizados con la parte sana, el paciente debe imitar dichos movimientos con la parte afectada, siendo asistido por el robot durante todo el proceso.

El trabajo realizado en [10] describe la utilización de un dispositivo para la terapia de hemiparesia, que combina rehabilitación asistida y tipo espejo. Según los autores, el robot está construido con un motor, encargado del movimiento, y dos sensores que indican la posición y la torsión de la muñeca. La terapia se realiza utilizando la extremidad sana para que la afectada imite los movimientos, se aplicaron tanto a pacientes sanos como a pacientes con hemiparesia durante un lapso de 10 minutos, con el objetivo de comprobar el funcionamiento y la adaptabilidad de la ortesis.

Como solución a los altos costos de las terapias de rehabilitación, [11] describe un dispositivo robótico de bajo costo destinado a la realización de terapias para personas que han sufrido lesiones cerebrales. El dispositivo está diseñado para aplicar la técnica en modo espejo y cuenta con un grado de libertad, el cual posee un ancho de banda suficiente para detectar el movimiento típico de la mano humana.

El estudio desarrollado [12] señala que mediante el robot humanoide Nao se realizaron terapias de rehabilitación en niños, enfocadas específicamente en las extremidades superiores. El objetivo del proyecto fue desarrollar un sistema que integrara la interacción entre humanos y robots. Para las pruebas, se realizaron cinco ejercicios con niños sanos, los cuales fueron monitoreados mediante una unidad portátil de medición. Los resultados mostraron una alta correlación entre los ejercicios ejecutados por los niños y los realizados por el robot, y además se observó que el dispositivo fue bien aceptado por los niños en este tipo de rehabilitación.

En [13] se presenta el desarrollo de un sistema de rehabilitación dirigido a la extremidad superior. El prototipo está diseñado para los movimientos de rotación de muñeca, extensión y contracción de los dedos, utilizando ejercicios activos y pasivos. El sistema mecánico es robusto y operado mediante actuadores lineales y rotacionales, teniendo como

controlador un microcontrolador. Los autores concluyen que el dispositivo posee un alto potencial para asistir y rehabilitar el movimiento, y que su costo es accesible en comparación con otras máquinas de características similares.

El trabajo realizado en [14] indica el uso de barras paralelas, las mismas tienen como funcionalidad brindar estabilidad al paciente, debido a que al realizar el ejercicio las capacidades se limitan y se tiende a perder el equilibrio. De igual manera ayudan al fortalecimiento de las extremidades inferiores, en su gran mayoría se las utiliza para la rehabilitación de extremidades inferiores, pero también se pueden utilizar para realizar ciertos ejercicios de rehabilitación del tren superior, porque este tipo de apoyos permite ajustar la altura, para la comodidad del paciente.

Con la implementación del presente proyecto se busca ayudar a las personas a recibir una rehabilitación adecuada mediante el uso del robot Bioloid Premium, programable y diseñado para asistir al paciente en modo espejo. Esto significa que la persona deberá imitar los ejercicios que se van a realizar. El sistema contará con un número determinado de ejercicios, y a medida que el usuario avance en sus rutinas, será responsable de seleccionar su siguiente actividad. El robot será controlado mediante una aplicación en un dispositivo móvil, desarrollada con una interfaz amigable para el usuario.

Se busca que las terapias sean más accesibles, de modo que no sea necesaria la presencia constante de un terapeuta, sino únicamente el seguimiento del progreso del paciente. El objetivo es despertar el interés por el cambio en las personas, sobre la importancia de realizar este tipo de rehabilitación asistida, ya que el robot funcionará como apoyo al entendido en el tema, permitiendo que la recuperación sea más independiente.

II. METODOLOGÍA

Este proyecto busca integrar la fisioterapia con un sistema de rehabilitación espejo, el mismo consta de un robot humanoide el cual es comandado por una aplicación móvil. Los ejercicios para la rehabilitación previamente fueron consultados a un especialista, que al cargarlos en el robot, es éste el encargado de realizar los ejercicios. Todo este proceso es controlado por una aplicación móvil destinada a seleccionar cada uno de los ejercicios que se desea realizar, la aplicación tiene un diseño que busca ser amigable e intuitiva para que el usuario la maneje sin ninguna dificultad.

Como se puede observar en la Fig. 2, se presenta un esquema representativo del proyecto en mención, el cual consta de cinco pasos a seguir dentro del proceso del sistema, que a continuación se detalla brevemente:

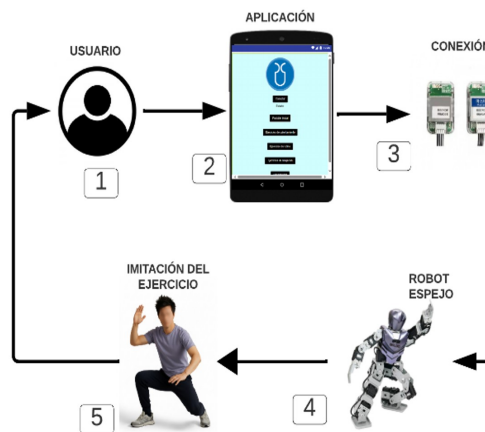


Fig. 2. Esquema del proyecto.

- 1) Ingresar a la aplicación en el dispositivo móvil.
- 2) Establecer la conexión entre la aplicación móvil y el módulo Bluetooth bajo la orden del usuario.
- 3) El módulo Bluetooth recibe datos enviados por el usuario mediante el dispositivo móvil, con la finalidad que el robot lleve a cabo el ejercicio seleccionado.
- 4) El robot ejecuta las rutinas seleccionadas desde la aplicación.
- 5) El paciente imita el ejercicio y una vez terminado, selecciona en la aplicación la siguiente actividad.

RoboPlus Motion

RoboPlus Motion, es un submódulo del software Roboplus perteneciente a Robotis, dentro de esta sección se programan movimientos.

En las Fig. 3 y Fig. 4, se detalla de manera breve las partes del submódulo RoboPlus Motion.

- a) Espacio de Memoria:

En esta sección, se coloca el nombre para diferenciar cada ejercicio, el programa cuenta con una memoria de 255 espacios y una sección siguiente que permite usar mas pasos.
- b) Pasos:

Este apartado permite como máximo generar 6 pasos, gracias a ello se genera diferentes movimientos, pero los 6 pasos ejercen una limitación en diferentes ejercicios, por ello se usa la sección siguiente que se mencionó en el punto A.
- c) Cargar Datos de los Motores:

La funcionalidad descrita permite subir los valores al robot y comprobar la posición inicial y final de los motores.
- d) Obtener Datos de los Motores:

Esta herramienta permite modificar los valores de los motores de 3 maneras: mediante el teclado, a través de los movimientos de los motores de forma manual y por medio de la perilla.

- e) Posición del Paso:
Muestra el valor de los 18 motores.
- f) Posición del robot:
Se reflejan los valores en tiempo real de los motores.
- g) Encendido y Apagado de los Motores:
La opción permite el apagado de los motores, para poder realizar un movimiento o varios dependiendo del ejercicio, posteriormente encender los motores para poder grabar el movimiento en un paso.
- h) Parámetros de los Motores:
Aquí se controla el torque, y la velocidad de los motores.
- i) Perilla de los Valores de los Motores:
La perilla permite modificar los valores, dependiendo del lado que se gire aumentará o disminuirá el valor.

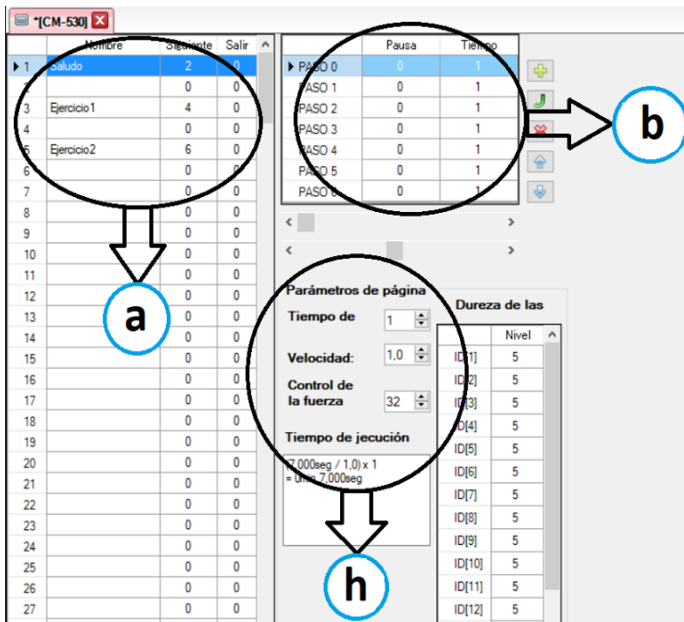


Fig. 3. Partes de RoboPlus Motion 1.

Para el desarrollo del proyecto, se siguen los siguientes puntos.

A. Selección de ejercicios

Para la selección de los diferentes ejercicios, se realizaron varias sesiones con una fisioterapeuta, con el objetivo de definir y validar los ejercicios, para esto hay que tomar en cuenta las limitaciones cinemáticas y mecánicas del robot, de modo que los movimientos se ejecuten de una manera correcta, se descartaron ciertos ejercicios que involucran movimientos poco demostrativos que puede realizar el robot, y que consecuentemente son poco comprensibles para los pacientes.

Los ejercicios seleccionados:

- Ejercicio 1: Flexión y Extensión de Rodilla
Movimiento en el cual la rodilla se dobla y posteriormente se estira.

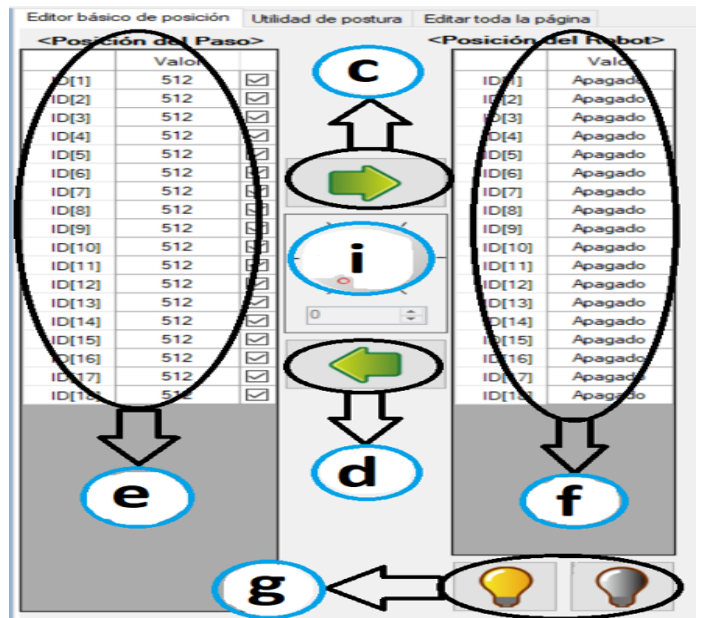


Fig. 4. Partes de RoboPlus Motion 2.

- Ejercicio 2: Subida y Bajada de Escaleras
Es la combinación de la flexión y extensión con elevación del pie.
- Ejercicio 3: Flexión para atrás
Movimiento en el que la rodilla se dobla llevando el talón hacia la parte posterior del muslo.
- Ejercicio 4: Dorsiflexión
Movimiento del tobillo en el que el pie se eleva acercando los dedos hacia la tibia.
- Ejercicio 5: Inversión y Eversión
Es el movimiento del pie hacia dentro y hacia fuera.
- Ejercicio 6: Plantiflexión
Movimiento del tobillo en el que el pie apunta hacia abajo, alejando los dedos de la tibia.

B. Programación de ejercicios

Una vez seleccionados los diferentes ejercicios, se procede a implementarlos en el software RoboPlus Motion. Primero en el espacio de memoria se crea el nombre del ejercicio, haciendo uso de cinemática inversa se procede a guardar los valores de los motores correspondientes a cada ejercicio, cabe recalcar que si para la ejecución de un ejercicio se necesitan mas de seis pasos, en la sección de memoria existe la columna etiquetada como siguiente, que llama a pasos adicionales, como se puede observar en la Fig. 5.

	Nombre	Siguiete	Salir
3	Ejercicio1	4	0
4		0	0

Fig. 5. Uso de 2 memorias.

Para realizar el ejercicio se ejecuta el apagado de uno, varios o de todos los motores como se visualiza en la Fig. 6, esto se lo ejecuta con el fin de facilitar la implementación de los movimientos, para lograr obtener un ejercicio claro a la vista del paciente.

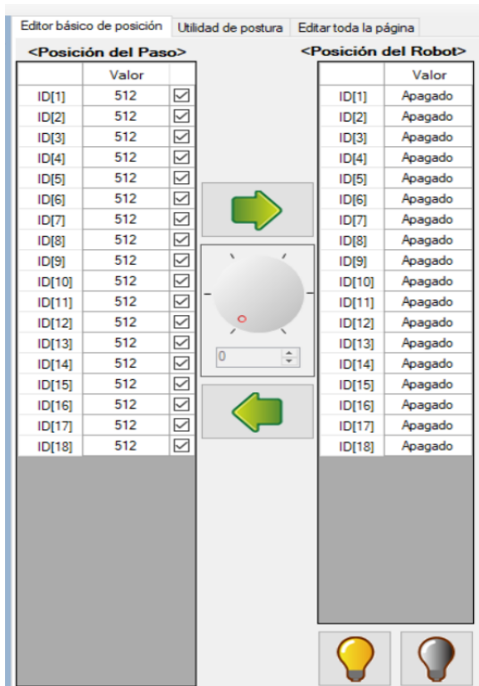


Fig. 6. Valores de los motores y motores apagados.

En la Tabla I se explican los ejercicios a realizar, además indican las articulaciones que actúan en el movimiento y los motores que se accionan en el robot, cabe mencionar que los números de los motores impares pertenecen a la extremidad inferior derecha, y los pares a la extremidad inferior izquierda.

TABLA I
EJERCICIOS SELECCIONADOS PARA LA EVALUACIÓN

Ejercicio	Articulación	Motores
Flexión y Extensión	Cadera y Rodilla	(11,13),(12,14)
Escalón	Cadera, Rodilla y Tobillo	(11,13,15),(12,14,16)
Flexión para atrás	Rodilla	(13),(14)
Dorsiflexión	Cadera y Tobillo	(11,15),(12,16)
Inversión y Eversión	Cadera y Tobillo	(11,15),(12,16)
Plantiflexión	Tobillo	(15),(16)

Para la ejecución de los ejercicios se tomó en cuenta la recomendación de una persona profesional en temas sobre la rehabilitación, la indicación planteada es que exista un tiempo de descanso entre cada serie.

C. Aplicación móvil

Para el desarrollo de la aplicación móvil, se utiliza la plataforma MIT App Inventor, esta permite crear la aplicación mediante dos interfaces, una gráfica y un diagrama de bloques, en la gráfica se disponen todas las visuales que observa y

puede manejar el usuario como: botones, imágenes, videos, etc. En el módulo de bloques se realiza la programación de las diferentes funciones que ejecuta la aplicación móvil.

Los elementos que se utilizan para desarrollar la aplicación:

- Disposiciones:**
Este apartado permite generar diferentes pantallas, optimizando espacio y a su vez logrando una aplicación fluida.
- Cliente Bluetooth:**
La función Cliente Bluetooth permanece oculta, este elemento es primordial ya que genera la conexión de la aplicación con otro dispositivo.
- Notificador:**
Es una alerta que genera un mensaje informativo o de advertencia.
- AnimatedGif:**
Esta extensión logra reproducir los formatos de intercambio de gráficos (GIFs por sus siglas en inglés), permite una interacción amigable con el usuario.
- TinyBD:**
Esta sección ayuda a crear una base de datos.

Se visualiza las diferentes pantallas que conforman la aplicación, entre ellas se tiene el ingreso de datos y una disposición oculta para el especialista para poder acceder a los datos de los pacientes, a continuación, se presenta otra pantalla del sistema donde se realiza la conexión para posteriormente dirigirse a la sección de ejercicios, basado en las instrucciones del especialista, seleccionando la articulación y los ejercicios a realizar. Para mayor detalle se puede dirigir al Anexo A.

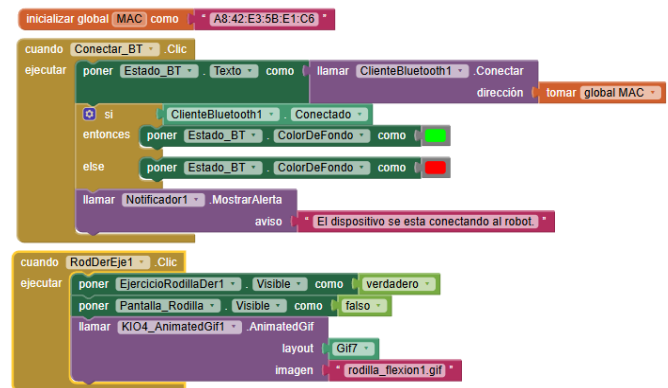


Fig. 7. Bloques de Programación 1.

Para la lógica de la aplicación se utiliza los bloques de programación, como se observa en la Fig. 7, en el primer gráfico se desarrolla la conexión Bluetooth entre la aplicación y el robot, en la app cuando se pulsa el botón de conectar se visualiza un mensaje que indica que los dispositivos se están conectando y paralelamente una etiqueta que, mediante su cambio de color, permite identificar si la conexión fue exitosa.

En el siguiente bloque se aprecia el método que se emplea para ocultar y mostrar las diferentes disposiciones que conforman la aplicación, adicionalmente se genera el GIF que sirve como un apoyo visual para una mejor interpretación del ejercicio.

En otra disposición del ejercicio se encuentra un botón de inicio, este al momento de pulsar transmite un texto mediante Bluetooth hacia el mando, en este caso como se observa en el gráfico envía la letra **A**, dicho texto activa un ejercicio.

Para que el especialista tenga un control adecuado, se crea un listado con el nombre, apellido y edad del paciente, esta información se guarda en una base de datos.

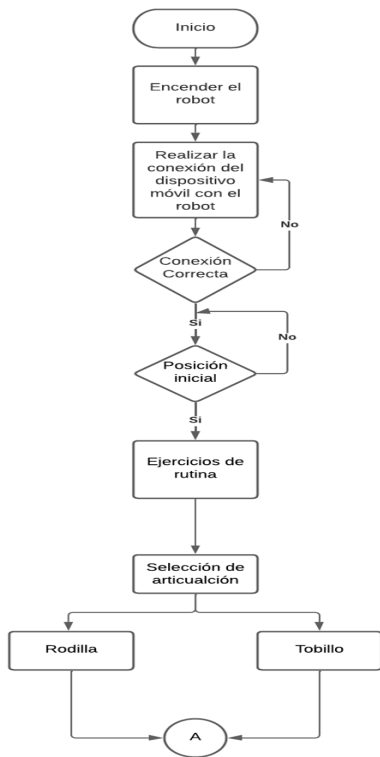


Fig. 8. Diagrama del Sistema 1.

En las figuras 8 y 9, se tiene los diagramas de flujo que representan el funcionamiento del sistema.

Adicionalmente, en la aplicación móvil el paciente contará con un botón el cual le redirigirá a una página web, donde podrá realizar la encuesta de satisfacción sobre el sistema. Para más información dirigirse al Anexo B.

D. Programación del Mando

El mando RC-100B es parte del kit original del robot, su comunicación es unidireccional que envía códigos numéricos a un controlador CM-530 diseñado por Robotis. La programación se realiza en RoboPlus Task que es otro

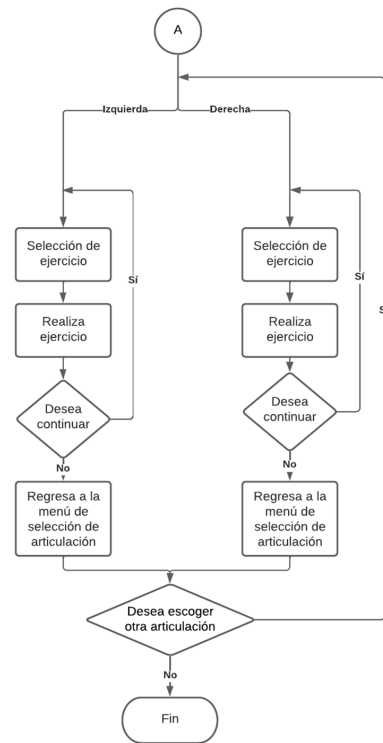


Fig. 9. Diagrama del Sistema 2.

submódulo de RoboPlus, este entorno utiliza una abstracción de código basada en bloques lógicos, esto quiere decir que no se usa código textual, sino utiliza bloques predefinidos, su lógica se arma visual y secuencialmente.

```

Start Program
{
  ENDLESS LOOP
  {
    IF ( Remocon RXD == 1 )
    {
      Motion Index Number = 1
    }
  }
}

```

Fig. 10. Programación del Control.

En la Fig. 10, se observa que la programación se realiza llamando un botón del control, ya que en otros ejercicios debido a la limitación de botones será necesario el uso de dos botones. Dentro de la estructura condicional **IF** la función **Motion Index Number**, ejecuta cada uno de los ejercicios según la Tabla III, donde se observa el número de paso y el botón que activa la acción.

E. Conexión

Para la conexión entre la aplicación móvil y el robot se usan dos partes, la primera es el mando, esto se hace debido a que el CM-530 es considerado como la parte principal del robot,

TABLA II
VALORES DESIGNADOS A LOS EJERCICIOS

Ejercicio	Pierna	Espacio de Memoria	Control
Flexión y Extensión	Derecha	1	U
Escalón	Derecha	5	R
Flexión para atrás	Derecha	8	D
Dorsiflexión	Derecha	12	L
Inversión y Eversión	Derecha	16	1
Plantiflexión	Derecha	21	2
Flexión y Extensión	Izquierda	25	3
Escalón	Izquierda	29	4
Flexión para atrás	Izquierda	33	U+1
Dorsiflexión	Izquierda	37	L+2
Inversión y Eversión	Izquierda	41	D+3
Plantiflexión	Izquierda	45	R+4

este tiene un protocolo de comunicación de varios paquetes, lo que dificulta la simulación del mando. La segunda parte es un circuito diseñado para este proyecto, con la finalidad de activar los botones sin correr el riesgo de dañar ningún componente del mando, dicho circuito esta conformado de: optoacopladores y resistencias, como se observa en el diseño de la Fig. 11. Adicionalmente se usa un microcontrolador (ESP32), el cual es una placa que permite realizar una programación, mediante esto se puede controlar diferentes recursos. Los datos se pueden receptor de diferentes maneras, una es por cable o también se los puede realizar por Wi-Fi y Bluetooth.

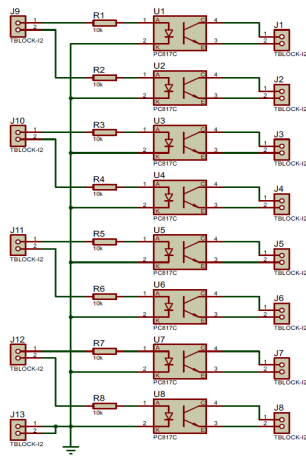


Fig. 11. Circuito Esquemático.

El circuito se diseña en una placa de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés), la cual consta de borneras en los extremos, como se observa en la Fig. 12, en las borneras derechas se conectan los cables que se dirigen a los botones del mando, y en las borneras izquierdas se conectan los cables que provienen del ESP32. Este microcontrolador cumple una función indispensable del proyecto, ya que este es el puente entre la aplicación móvil y el mando, con la finalidad de ejecutar cualquier acción en el robot. El módulo de desarrollo es utilizado como un elemento de interfaz de entrada y salida digital dentro del sistema. A través de la aplicación móvil se transmite un bit de control que es recibido

por el microcontrolador como una entrada lógica. Dicha señal es procesada internamente conforme al software implementado y, como resultado, la tarjeta de control conmuta un pin de salida previamente configurado. Esta salida genera un pulso eléctrico con características temporales definidas, equivalente al accionamiento de un pulsador mecánico.



Fig. 12. PCB.

III. RESULTADOS

Para la comprobación del funcionamiento correcto del sistema, se realizaron pruebas con un grupo de 15 usuarios encargados de interactuar, estas pruebas permiten evaluar la interacción con el sistema completo, además el comportamiento de la conexión entre los dispositivos y el tiempo de respuesta en el que el robot ejecuta la acción.

A. Pruebas

Como se puede observar en la Fig. 13 y Fig. 14, se muestra la funcionalidad del sistema, primero se puede observar solo al robot realizando los ejercicios, luego se observa al robot con gente realizando las pruebas de los ejercicios.



Fig. 13. Fotos de ejercicios.

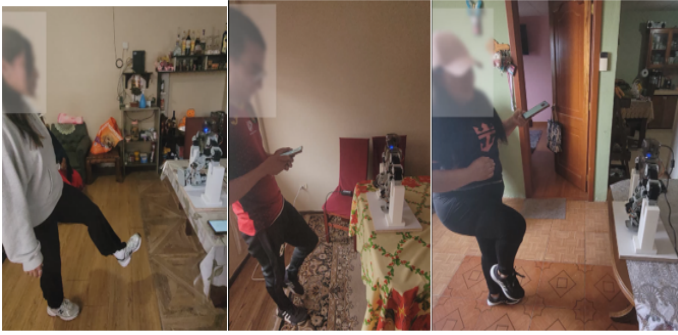


Fig. 14. Pruebas con el robot.

B. Resultados de las Encuestas

En base a los resultados que se evidencian en la encuesta realizada a cada uno de los usuarios, se obtuvo el valor promedio para cada una de las preguntas, esto con la finalidad de obtener una información en general de cómo los usuarios aceptan o como les pareció el sistema, se presenta un análisis mediante valores promedios para facilitar la interpretación de los datos.

En la Tabla III, se puede observar de manera simplificada cada una de las preguntas, además se puede observar el valor promedio de cada una de las preguntas.

TABLA III
ENCUESTA

Preguntas	Puntuación promedio
Usabilidad de la aplicación	5
Navegación de la aplicación	4,92
Comprensión de ejercicios	5
Utilidad de descripciones	5
Utilidad de GIFs	4,69
Respuesta del robot	4,84
Satisfacción del sistema	5

Como podemos observar en la Fig. 15, los resultados de cada una de las preguntas se encuentran por un valor superior a 4 sobre 5, esto indica que el sistema tiene una alta valoración por parte de los usuarios consultados.

En la pregunta uno, tres y cuatro se obtiene el valor máximo de 5, esto indica que la aplicación tuvo una navegación e interacción adecuada, además los ejercicios del robot fueron interpretados en su totalidad, apoyadas por las descripciones que se encuentran en la aplicación, permitiendo una mejor apreciación de los ejercicios. Estos primeros resultados indican que los objetivos planteados se cumplen.

Se puede observar un alto porcentaje en la pregunta dos con un promedio de 4,92, esto nos refleja que la aplicación es intuitiva para los usuarios, evitando que la navegación se le dificulte al usuario.

La pregunta cinco de la encuesta, relacionada con el uso de GIFs para poder entender mejor el ejercicio, presenta un valor promedio que se encuentra más bajo que las demás preguntas, este valor se encuentra dentro de un rango de aceptación, que

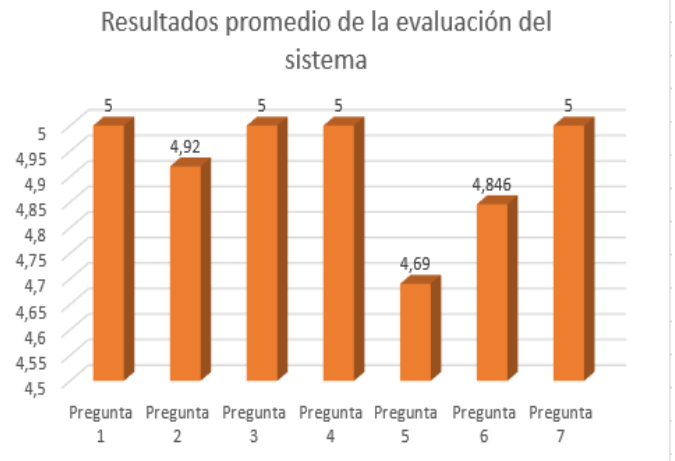


Fig. 15. Resultados Promedios.

nos sugiere que los usuarios interpretaron las instrucciones. No obstante, debido a la calificación por debajo del promedio de las otras preguntas, hay espacio para la mejora de animaciones y lograr una mayor comprensión de los ejercicios.

En la pregunta sobre el tiempo de reacción entre la aplicación móvil y el robot, la calificación se considera aceptable, 4,85 evidencia una alta apreciación de rapidez por parte de los usuarios, lo que indica que la comunicación entre los dispositivos se realiza de manera eficiente.

Finalmente la aceptación en general del sistema que se obtuvo por parte de los usuarios fue sobresaliente, obteniendo la máxima puntuación de 5 sobre 5 lo que refleja que el sistema tiene un buen desempeño en términos de uso, interacción y tiempo.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró implementar de manera apropiada los ejercicios de rehabilitación en el robot, demostrando su funcionalidad y capacidad para realizar rutinas enfocadas al tren inferior. De la misma manera, el desarrollo de la aplicación móvil permitió la selección de los ejercicios cargados previamente en el robot, lo cual demostró una interacción fácil y amigable para el usuario.

Por otra parte, la comunicación entre el dispositivo móvil y el robot se realizó correctamente, mediante un puente conformado por un módulo electrónico, esto permitió obtener una conexión funcional y estable, además se comprobó que el robot responde de manera adecuada a los comandos enviados desde la aplicación, corroborando que el funcionamiento del sistema en conjunto sea óptimo.

Se concluye que el sistema desarrollado cumple de manera satisfactoria con los objetivos propuestos, demostrando una alta aceptación por parte de las personas que realizaron las pruebas del sistema, los resultados evidencian que este tipo de rehabilitación es una solución innovadora y útil, debido a que se podría llevar a cabo desde el hogar, lugar de trabajo, centro de rehabilitación, etc.

A pesar de ello, la plataforma propuesta es factible y efectiva en la realización de la tarea, no obstante en ciertas preguntas no se obtuvo el valor máximo, lo cual, si bien mantiene un promedio alto, esto evidencia que existe lugar para mejoras puntuales, las mismas no afectan de manera significativa el desempeño general del proyecto.

En base a los resultados obtenidos en las encuestas, se recomienda mejorar pequeños aspectos de la aplicación móvil y del sistema que no alcanzaron la puntuación máxima en las encuestas, con el objetivo de que el usuario tenga una mejor experiencia y así tener una mejor apreciación de calidad del proyecto.

Además se sugiere incorporar ejercicios adicionales para las extremidades superiores, lo que permitiría ampliar el grupo de pacientes, mejorando su aplicabilidad en entornos reales.

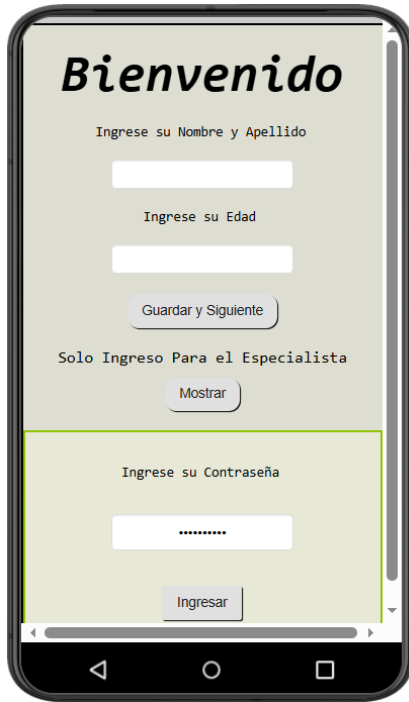
Se recomienda, incluir en las pruebas a profesionales especializados en el área. Esto permitirá obtener criterios técnicos, basado en su experiencia práctica. De tal modo que se garantice una apreciación real desde el punto de vista de un profesional.

Es aconsejable incorporar un seguimiento corporal mediante cámaras y el uso de Inteligencia Artificial (IA), lo cual facilitaría un monitoreo durante el proceso de rehabilitación.

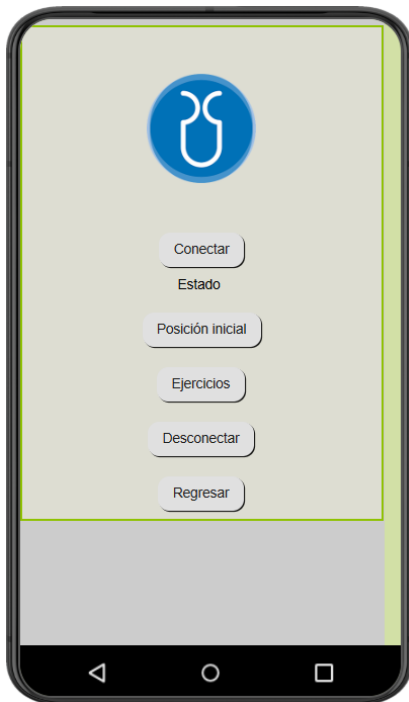
REFERENCIAS

- [1] UTPL. UTPL, “Fisioterapia, una carrera con proyección laboral,” 10 de febrero del 2022.
- [2] R. Barceló, “Estudio de las lesiones deportivas en atletas de alto rendimiento de la provincia de Las Tunas en el año 2012,” *Junio 2014*, vol. Año 19, no. 193, p. 1, Jun. 2014.
- [3] L. López González, I. Rodríguez Costa, and A. Palacios Cibrián, “INCIDENCIA DE LESIONES DEPORTIVAS EN JUGADORES Y JUGADORAS DE BALONCESTO AMATEUR / INJURY INCIDENCE RATE AMONG AMATEUR BASKETBALL PLAYERS,” *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*, vol. 66, no. 2017, 2017.
- [4] F. Salinas Durán, L. H. Lugo Agudelo, and R. Restrepo Arbeláez, *Rehabilitación en la salud*, segunda ed. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia, Jul. 2008, vol. Dos.
- [5] N. E. Freis, “La rehabilitación en ortopedia y traumatología,” *2006*, no. Tres, pp. 272–277, Septiembre de 2006.
- [6] E. Mejía, N. Castro, R. Villafuerte, and J. Medina, “Mobile application to control a robot arm,” *04*, pp. 1–13, 2016.
- [7] S. Levy-Tzedek, S. Berman, Y. Stiefel, E. Sharlin, J. Young, and D. Rea, “Robotic Mirror Game for movement rehabilitation,” in *2017 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*. Montreal, QC, Canada: IEEE, Jun. 2017, pp. 1–2.
- [8] M. Berry and C. Martínez, “Medicina y Robótica,” *2005*, vol. 16, no. Tres, pp. 157–167, Jul. 2005.
- [9] G. Cheng and L. Xu, “Compliance Control of a Lower Limb Rehabilitation Robot in Mirror Therapy,” in *2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*. Budapest, Hungary: IEEE, Feb. 2021, pp. 77–82.
- [10] J. Kim and J. Kim, “Robot-Assisted Mirroring Exercise as a Physical Therapy for Hemiparesis Rehabilitation,” in *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. Seogwipo: IEEE, Jul. 2017, pp. 4243–4246.
- [11] C. Morris, Y. Fu, S. McCormick, B. Wachter, and S. Devasia, “Low-Cost Assistive Robot for Mirror Therapy Rehabilitation,” in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Macau: IEEE, Dec. 2017, pp. 2057–2062.
- [12] A. Guneyusu, B. Arnrich, and C. Ersoy, “Children’s Rehabilitation with Humanoid Robots and Wearable Inertial Measurement Units,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*. Istanbul, Turkey: ICST, 2015.
- [13] C. A. C. Florez, J. A. M. Montanez, and R. J. Moreno, “Design and Construction of a Prototype Rehabilitation Machine to Hand and Wrist,” in *2013 II International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA)*. Colombia: IEEE, Oct. 2013, pp. 1–6.
- [14] B. Sears, “Parallel Bars in Physical Therapy,” Oct. 2025.

ANEXO A
ANEXO FOTOGRÁFICO



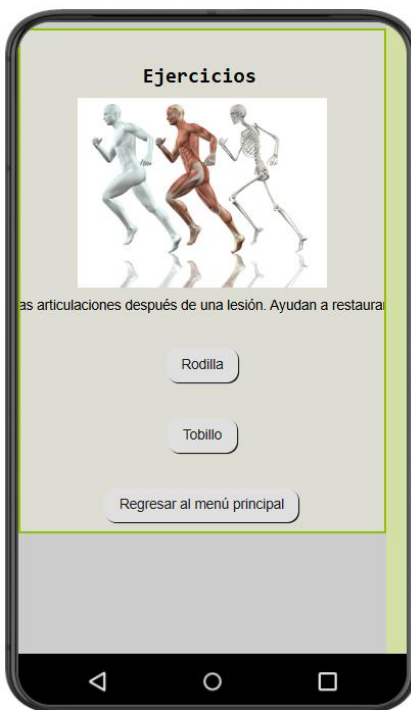
Ingreso de Datos



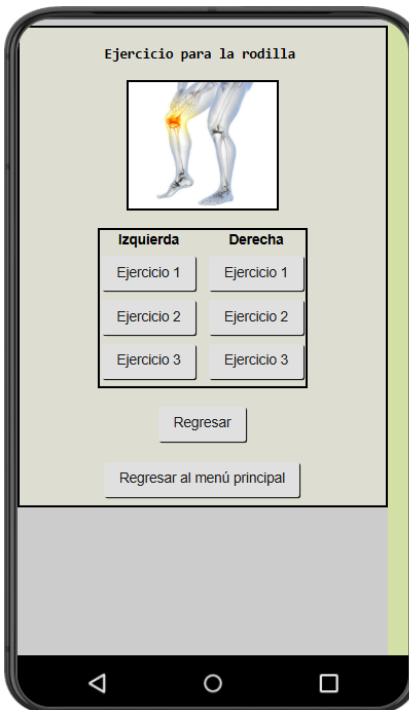
Pantalla de Inicio



Datos de los Pacientes



Selección de Extremidad



Elección de Ejercicio



Inicio de Ejercicio

ANEXO B
ANEXO ENCUESTA

Encuesta de satisfacción

1. Nombre:*

Descripción

T

2. Edad:*

Descripción

11

3. Escala de valoración:

Descripción

T 1 = Muy malo 2 = Malo 3 = Regular 4 = Bueno 5 = Excelente

4. ¿Cómo calificaría la facilidad de uso y la amigabilidad de la interfaz de la aplicación móvil?*

Descripción

1

2

3

4

5

5. ¿Qué tan intuitiva le pareció la navegación dentro de la aplicación?*

Descripción

1

2

3

4

5

6. ¿Qué tan comprensibles fueron los ejercicios que realiza el robot dentro de la aplicación?*

Descripción

1

2

3

4

5

7. ¿Qué tan útiles le parecieron las descripciones de cada ejercicio mostrado?*

Descripción

1

2

3

4

5

8. ¿Considera que los GIFs incluidos son acordes con las acciones del robot y ayudan a comprender mejor sus movimientos?*

Descripción

1

2

3

4

5

9. ¿Qué tan adecuada le pareció la velocidad de respuesta entre el envío del comando desde la aplicación móvil y la ejecución del movimiento por parte del robot?*

Descripción

1

2

3

4

5

10. ¿Qué tan satisfecho se encuentra con la experiencia general de uso del sistema?

*

Descripción

1

2

3

4

5

11. ¿Qué opinión general tiene sobre la aplicación?

Descripción

≡

