



Desarrollo de Interfaz y Diseño Electrónico para un Prototipo Artromotor Rehabilitador de Rodilla

Padilla-Silva, A.F.¹; González-Vargas, L.A.¹; Alvarado-Tovar, N.²; Machado-Díaz, E.¹

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Posgrado, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez-Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.

² Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Posgrado, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de la Laguna s/n, Primero de Cobián Centro, 27000, Torreón, Coahuila.

✉ mm2210965@itslerdo.edu.mx

Resumen – El presente trabajo detalla el desarrollo integral de una interfaz y diseño electrónico para un prototipo artromotor destinado a la rehabilitación de la articulación de la rodilla. El hardware electrónico seleccionado incluye el microcontrolador ESP32, un actuador de 12.5 Nm y una pantalla táctil TFT ST7789, elementos importantes para la interactividad y visualización de datos durante la terapia. En términos de software, el desarrollo se llevó a cabo en lenguaje C, aprovechando librerías específicas adaptadas al modelo de pantalla ST7789. Este enfoque permite una programación eficiente y optimizada para las funciones requeridas, garantizando una interacción fluida y precisa con el usuario durante las sesiones de rehabilitación. El artículo también aborda el diseño de una placa de circuito impreso (PCB) como parte integral del proyecto. La PCB se concibió para integrar de manera eficiente todos los elementos electrónicos y eléctricos del prototipo artromotor. Este diseño busca optimizar la conectividad, minimizar interferencias y mejorar la confiabilidad del sistema en su conjunto. El presente artículo proporciona una visión completa del desarrollo técnico, desde la elección del hardware hasta la programación en lenguaje C y la creación de una PCB, destacando la integración cuidadosa de componentes para lograr un prototipo artromotor electrónico efectivo y funcional en el contexto de la rehabilitación de la articulación de la rodilla.

Palabras Clave – Interfaz, Prototipo, Rehabilitación, Software.

Abstract – This work details the comprehensive development of an interface and electronic design for an arthromotor prototype intended for knee joint rehabilitation. The selected electronic hardware includes the ESP32 microcontroller, a 12.5 Nm actuator, and a TFT ST7789 touchscreen, which are essential elements for interactivity and data visualization during therapy. In terms of software, the development was carried out in C language, utilizing specific libraries adapted to the ST7789 screen model. This approach allows for efficient and optimized programming of the required functions, ensuring smooth and precise user interaction during rehabilitation sessions. The article also addresses the design of a printed circuit board (PCB) as an integral part of the project. The PCB was conceived to

efficiently integrate all the electronic and electrical components of the arthromotor prototype, optimizing connectivity, minimizing interference, and improving the overall reliability of the system. This article provides a comprehensive overview of the technical development, from hardware selection to C programming and PCB creation, highlighting the careful integration of components to achieve an effective and functional electronic arthromotor prototype for knee joint rehabilitation.

Keywords – Interface, Prototype, Rehabilitation, Software.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Sistemas artromotores de rehabilitación

La rehabilitación de la rodilla es un proceso crucial para el mejoramiento de la movilidad del funcionamiento articular después de una lesión o cirugía. Los dispositivos artromotores rehabilitadores de rodilla (ARTs) son herramientas que se utilizan para asistir y guiar el movimiento de la rodilla durante este proceso (Sánchez, 2015).

Los ARTs de rodilla se pueden clasificar en dos categorías principales:

- ARTs pasivos: Estos dispositivos no proporcionan ninguna fuerza motriz, sino que simplemente guían el movimiento de la rodilla a través de un rango de movimiento específico.
- ARTs activos: Estos dispositivos proporcionan fuerza motriz para asistir al movimiento de la rodilla, lo que puede ayudar a los pacientes con debilidad muscular o articular.

Estos dispositivos también pueden clasificarse según el tipo de movimiento que proporcionan:

- Flexo-extensión: Estos dispositivos solo realizan el movimiento de flexión y de la extensión de las rodillas.
- Multi-eje: Estos dispositivos permiten el movimiento de flexión, abducción, extensión y aducción de la articulación en cuestión.

1.2 Prototipo de órtesis aplicadas a rehabilitación

Existen actualmente diversas investigaciones en donde se busca aplicar sistemas mecatrónicos en rehabilitación, uno de ellos lo presenta (Veintimilla, 2023). El prototipo posee características similares a las órtesis utilizadas para alinear ó corregir deformidades en pacientes con movilidad reducida, ya sea parcial o temporal. Este prototipo, además, es de bajo costo y contribuye al tratamiento médico a través de terapias que ayudan a recuperar el movimiento natural de una extremidad inferior.

Su diseño se basa en la documentación científica y en la ciencia médica, proporcionando soluciones viables para mejorar la calidad de vida humana.

La combinación de nuevas tecnologías y medicina avanza a un ritmo sorprendente, y este prototipo también incorpora dispositivos y componentes electrónicos, incluyendo sensores digitales y analógicos, así como plataformas de desarrollo como Arduino. Esto permite alcanzar resultados muy aceptables y fiables en comparación con dispositivos existentes en el mundo, especialmente en países que desarrollan prótesis y órtesis cada vez más inteligentes, las cuales asisten en la rehabilitación de pacientes con lesiones temporales.

1.3 Prototipo de rehabilitador con componentes mecánico – electrónico aplicado a extremidades superiores.

El sistema de rehabilitación funcional física para el brazo propuesto por (Arellano, 2010) surge de la necesidad de innovar nuevas herramientas y técnicas médicas que colaboren en el tratamiento de traumatismos articulares, específicamente enfocados en la extremidad superior del cuerpo humano (brazo). Este sistema presenta una nueva estrategia de rehabilitación física que emplea un sistema mecánico-electrónico. El proyecto funciona en base a un motor de C.C. y una caja de transmisión como reductor de velocidad.

Se utilizan componentes mecánicos y un servomotor el cual, genera el movimiento de contracción del antebrazo a partir de un eje fijado al antebrazo (en la posición del codo) y luego lo regresa a su posición original. Esto produce un movimiento cíclico de contracción y extensión que oscila entre 0 y 150°. Además, según el tiempo o el número de repeticiones seleccionados por el usuario, permite movimientos de pronación y supinación.

El objetivo de seleccionar estos movimientos fisiológicos es simular aquellos estimulados durante una sesión de terapia física para la recuperación. El sistema no está diseñado para reemplazar por completo el trabajo e interacción del especialista, sino para convertirse en una herramienta alternativa y práctica tanto para el especialista como para el paciente. De este modo, ofrece una opción adicional para la recuperación física "pasiva", permitiendo al paciente controlar su terapia, una vez diagnosticado y siguiendo las recomendaciones del especialista, sin la necesidad de la supervisión constante de un experto.

1.4 Rehabilitador pasivo de rodilla para postoperatorios

Tomando ejemplos de prototipos aplicados en rodillas se tiene el propuesto por (Ruiz, 2017). El análisis inicial del estudio abarca diversas alternativas que tienen como base los métodos de gestión de calidad, enfocándose en adaptarse a características necesarias como antropometría, movimientos de flexiones y extensión, portabilidad del dispositivo, costo y funcionalidad.

Se implementa un sistema de control integrado que define el rango de movimiento y la velocidad del rehabilitador. Además, el sistema tiene también una aplicación Android para mejorar el control del proceso de rehabilitación de la rodilla, añadiendo la posibilidad de almacenar los datos históricos de cada paciente. Al final del estudio, se presenta un eficiente rehabilitador de rodilla, que está adaptado a la antropometría ecuatoriana, con un rango de extensión de 0° a 120°, capacidad para realizar entre 1 y 99 repeticiones, y velocidad ajustable según las necesidades del paciente.

1.5 Dispositivo mecatrónico rehabilitador para rotura de meniscos.

Existen también investigaciones realizadas en donde se enfocan al diseño asistido por computadora. En la investigación realizada por (Flor, 2022).

Para su desarrollo, se plantearon, examinaron y evaluaron tres opciones, dimensionando los mecanismos para hacer una valoración precisa. Luego, la utilización de SolidWorks facilitó la creación del prototipo, incorporando simulación y análisis de esfuerzos, así como la posición y la velocidad.

Durante la fase de desarrollo, se eligieron materiales disponibles en el mercado y se utilizó el laboratorio de maquinado de la Universidad Politécnica Salesiana, para fabricar el tornillo que cargará con la potencia y su respectiva rosca de cuadro.

Se llevaron a cabo los cálculos necesarios para accionar y levantar la carga, lo que incluyó la selección del motor basándose en las mediciones obtenidas del par del tornillo, así como el diseño esquemático de los circuitos utilizados. Posteriormente, se implementaron los algoritmos de programación que establecen la comunicación inalámbrica entre el sistema embebido y la aplicación móvil.

Finalmente, se realizaron pruebas de funcionamiento supervisadas por especialistas en salud física con la finalidad de validar el correcto funcionamiento del dispositivo. De igual forma se llevó a cabo un análisis de costos aproximados

1.6 Dispositivo de movimiento pasivo continuo para rehabilitación de rodilla.

Entrando en investigaciones basadas en microcontroladores de software libre como Arduino se tiene el propuesto por (López, 2021). En esta investigación se desarrolló una herramienta de rehabilitación que simula los movimientos de las rodillas mediante movimientos continuos de forma pasiva.

Para su realización, se utilizaron diversas herramientas, como Microsoft Visio para la creación de diagramas para el desarrollo de los algoritmos y el software SolidWorks® para el diseño asistido por computadora del prototipo, la simulación de movimientos y las pruebas de esfuerzos estáticos y dinámicos.

También se empleó una matriz de decisión, en la cual se consideraron los elementos más importantes de los materiales que fueron utilizados, determinando que el aluminio 6061 era el material más adecuado para el dispositivo después de evaluar estos factores.

Concluyó que los materiales y componentes que fueron implementados en el prototipo pueden soportar una carga máxima de 700 N y, una vez ensamblado, se tuvieron resultados satisfactorios en las pruebas de movimientos de flexión y de extensión de la rodilla.

1.7 Aplicación del microcontrolador ESP32 en sistemas de rehabilitación.

Para este artículo se pretende el uso del microcontrolador ESP32 el cual se ha utilizado en aplicaciones de rehabilitación como la mostrada por (Tipanluisa, 2023) que implementó un guante aplicado en la mejora de dedos. Este guante automatizado emplea presión neumática para estimular el movimiento de los dedos, mejorando la movilidad y la fuerza de la mano afectada (Valdés & Pallas Areny, 2007). La tarjeta ESP32 controla tanto el movimiento del guante como la aplicación de la presión neumática. El propósito de esta



tecnología es optimizar la rehabilitación, reduciendo el tiempo y los costos del tratamiento de manera eficaz. Además, la utilización de la tarjeta ESP32 facilita un control y una personalización del tratamiento más flexibles, adaptados a las necesidades individuales de los pacientes.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el autor determinó que el guante propuesto para la rehabilitación de dedos a través del ESP32® puede ser una herramienta prometedora como dispositivo alternativo para la recuperación de pacientes que tienen lesiones en dedos y manos. Esta técnica disminuye los costos en la rehabilitación y puede disminuir el tiempo de la misma.

Basado en el estudio del estado del arte, se define la metodología para esta investigación, que se centrará en la aplicación de actuadores de precisión, como los motores a pasos, para generar un movimiento angular que facilite la terapia física de pacientes con lesiones en la rodilla. Además, se propone el uso de ESP32 como una alternativa a los microcontroladores convencionales como Arduino o implementaciones FPGA, debido a sus capacidades de comunicación inalámbrica y su velocidad de procesamiento, que permiten optimizar los algoritmos de control de actuadores en el dispositivo.

1.8 Microcontroladores aplicados a medicina

El Trabajo Fin de Grado de (González, 2017) se centró en desarrollar sistemas integrados que combinan dispositivos electrónicos y software para aplicaciones médicas.

Durante este proyecto, se crearon dos prototipos: el primero, compuesto por las versiones A y B, se enfocó en mejorar la enseñanza médica mediante sistemas de medición ecográfica, mientras que el segundo abordó las limitaciones de un sistema de rehabilitación mediante realidad virtual existente.

Se llevó a cabo un análisis inicial de las necesidades específicas de cada sistema, evaluando los métodos disponibles para su desarrollo y su capacidad para complementar los enfoques tradicionales en educación médica y rehabilitación.

Tras seleccionar los métodos más adecuados, se procedió a describir detalladamente los prototipos desarrollados, proporcionando manuales de uso. Finalmente, se presentaron las conclusiones derivadas del proceso y se exploraron posibles direcciones futuras para la investigación en este campo.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Selección de componentes principales

El éxito del prototipo depende en gran medida de la correcta selección e integración de sus componentes principales. Estos elementos clave no solo permiten el funcionamiento eficaz del dispositivo, sino que también aseguran la precisión y la seguridad necesarias para los ejercicios de rehabilitación.

Entre los componentes más importantes se encuentran el motor NEMA 34, el microcontrolador ESP32 y una pantalla táctil. A continuación, se detalla el papel y las características de cada uno de estos componentes en el contexto del prototipo artromotor (Putri, 2023).

El motor NEMA 34 es un componente crítico en el diseño del prototipo debido a su capacidad para proporcionar el torque y la precisión necesarios para los movimientos de flexión y extensión de la rodilla.

Tabla 1.
Datos del motor.

MOTOR 86HB250-156B NEMA 34	
Torque	12.5 Nm
Fuente de alimentación	60V
Corriente nominal	6A
Velocidad máxima	2000 rpm
Velocidad nominal	1000 rpm

Por otro lado, el controlador del motor es el responsable de gestionar la corriente que alimenta el motor, traduciendo las señales de control del microcontrolador en movimientos específicos del motor. Un controlador como el del motor NEMA 34 garantiza un funcionamiento suave y preciso del motor, evitando problemas como sobrecalentamiento o fallos en el control de movimiento.

En la Tabla 2, se muestran las características del controlador TB6600 utilizado para el movimiento del dispositivo.

Tabla 2.
Características del controlador TB6600

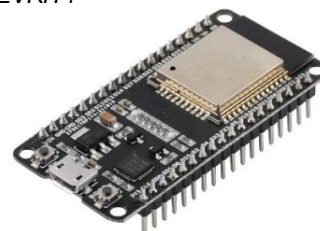
Característica	Descripción
Tipo de motor	Paso a paso bipolar
Voltaje de alimentación	9V a 42V
Corriente de salida	0.6A a 5A (ajustable)
Microstepping	Configurable (1, 2, 4, 8, 16)
Protección contra sobrecalentamiento	Sí
Modos de operación	CW (sentido horario), CCW (sentido antihorario), CW/CCW (bidireccional), Pulso/dirección

El segundo componente más importante es el ESP32 (Babiuch, 2019), éste es el núcleo del sistema de control del prototipo artromotor. Este microcontrolador es conocido por su capacidad de procesamiento eficiente y sus múltiples interfaces de comunicación, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones de control de motores y gestión de dispositivos.

El ESP32 se encarga de enviar las señales de control al controlador, ajustando parámetros como la velocidad, el ángulo y el rango de movimiento según los requisitos del programa de rehabilitación. También, puede recibir datos de varios sensores, proporcionando un feedback en tiempo real. El microcontrolador se presenta en la Figura 1.

Por último, ofrece capacidades de conectividad inalámbrica (Wi-Fi y Bluetooth), permitiendo actualizaciones y la monitorización en tiempo real del progreso del paciente.

Figura 1.
Placa ESP32 DEVKIT1



(Babiuch, 2019)

Para la comunicación con el operador se pretende el uso de una pantalla táctil, la cual, será la interfaz principal del usuario con el dispositivo artromotor. Agiliza la interacción directa, permitiendo a los pacientes y terapeutas configurar y monitorear las sesiones de rehabilitación de manera intuitiva y eficiente.

La pantalla cuenta con un diseño intuitivo, lo que quiere decir que está diseñada para ser fácil de usar, con menús y opciones de forma clara que permiten ajustar los parámetros del tratamiento sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados.

2.2 Programa de control del motor

El núcleo del sistema de control es el programa desarrollado para gestionar el motor NEMA 34. Este programa es responsable de interpretar las instrucciones del usuario, traducidas a través de la interfaz táctil, y convertirlas en movimientos precisos del motor.

En el código principalmente deben definirse los pines más importantes del motor: ENABLE, DIRECTION y PULL. El código siguiente muestra estas definiciones en lenguaje C dentro del IDE de Arduino.

```
1 #define ENA 13
2 #define DIR 12
3 #define PUL 14
```

Luego, definir las como salidas para que se pueda ver reflejado el movimiento del motor. También se puede observar que se está haciendo uso de la lógica invertida, estableciendo el pin ENABLE en un nivel bajo.

```
1 pinMode(ENA, OUTPUT);
2 pinMode(DIR, OUTPUT);
3 pinMode(PUL, OUTPUT);
4 digitalWrite(ENA, LOW);
```

Después se muestra como 'mover_motor' controla el motor paso a paso para moverse a un ángulo específico, calculando los pasos necesarios y ajustando la dirección según sea necesario.

- 'EnviarDatos' envía información sobre el estado actual del sistema al puerto serie.
- 'Regresar' mueve el motor de vuelta a una posición predeterminada (0 grados).
- 'calc_velocidad' ajusta el tiempo de retraso entre los pasos del motor, controlando así su velocidad.

Estos componentes trabajan juntos para crear un sistema que puede controlar un motor paso a paso para la rehabilitación de la rodilla, ajustar la velocidad del movimiento y proporcionar retroalimentación a través del puerto serie.

```
1 void mover_motor(int angulo_objetivo){
2   direccion = HIGH;
3   int angulo_a_mover = angulo_objetivo -
4   posicion_actual;
5   if(angulo_a_mover < 0){
6     direccion = LOW;
7     angulo_a_mover = -angulo_a_mover;
8   }
```

```
9   int pasos = angulo_a_mover *3200 / 360;
10  digitalWrite(DIR, direccion);
11
12  for(int i = 0; i < pasos; i++){
13    digitalWrite(PUL, HIGH);
14    delay(retraso);
15    digitalWrite(PUL, LOW);
16    delay(retraso);
17  }
18  posicion_actual = angulo_objetivo;
19 }
20 void enviarDatos() {
21   Serial.println("Enviando datos...");
22   Serial.print("Repeticiones: ");
23   Serial.println(repeticiones);
24   Serial.print("Velocidad: ");
25   Serial.println(velocidad);
26   Serial.print("Movimiento: ");
27   Serial.println(movimiento);
28 }
29 void regresar(int angulo_regreso) {
30   angulo_regreso = 0;
31   boolean direccion = HIGH;
32   angulo_objetivo = angulo_regreso;
33   mover_motor(angulo_objetivo);
34 }
35 void calc_velocidad (int velocidad) {
36   switch (velocidad) {
37     case 1:
38       retraso = 20;
39       break;
40     case 2:
41       retraso = 15;
42       break;
43     case 3:
44       retraso = 10;
45       break;
46     case 4:
47       retraso = 7;
48       break;
49     case 5:
50       retraso = 1;
51       break;
52   }
53   if (velocidad < 1){
54     retraso = 20;
55   }
56   else if(velocidad > 5){
57     retraso = 3;
58   }
59 }
```


2.3 Proceso de diseño electrónico

El proceso de diseño electrónico es fundamental en el desarrollo del prototipo artromotor, ya que implica la creación y fabricación de una placa de circuito impreso (PCB) que integra todos los componentes electrónicos de manera eficiente y segura.

El diseño de la PCB comienza con la creación de un esquemático que representa la interconexión de los componentes electrónicos. En este esquemático, se definen las conexiones entre los pines de los componentes y se establece la lógica de funcionamiento del circuito. Se tuvieron en cuenta consideraciones como la disposición física de los componentes, la señalización de los pines y la optimización del espacio en la PCB, dando de resultado la Figura 4 y la Figura 5.

Figura 1.
Diseño del circuito impreso diseñado Eagle de AutoDesk©

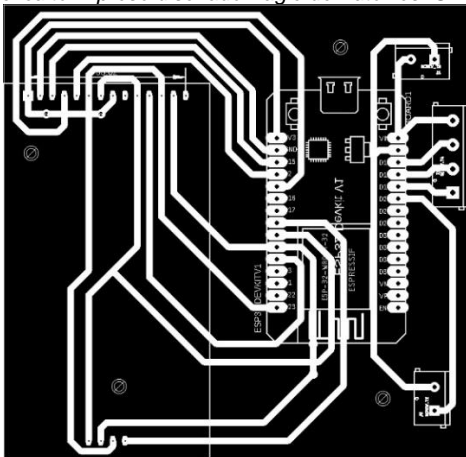
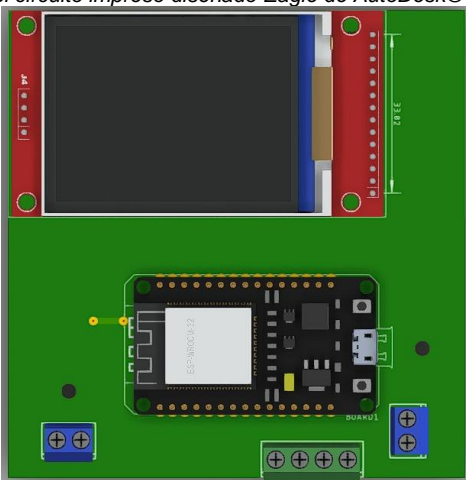


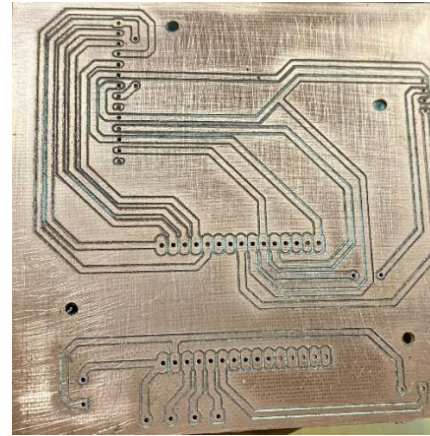
Figura 2.
Vista 3D del circuito impreso diseñado Eagle de AutoDesk©



Una vez completado el diseño del esquemático, se procede a la fabricación de la PCB utilizando un mini CNC. Esta máquina de control numérico por computadora permite grabar el diseño del circuito en una placa de material aislante, como fibra de vidrio o baquelita, mediante la eliminación de material con una fresa o punto de grabado.

Este proceso garantiza una alta precisión en la reproducción del diseño y una calidad uniforme en la producción de la PCB. La placa maquinada se presenta en la Figura 6.

Figura 3.
Circuito impreso maquinado en CNC.



Una vez que se fabrica la PCB, se procede a la integración de los componentes electrónicos. Esto implica soldar los componentes en sus respectivas ubicaciones en la placa, siguiendo el diseño del esquemático. Se presta especial atención a la correcta orientación y alineación de los componentes, así como la calidad de las soldaduras para asegurar una conexión estable y duradera.

Ensamblada la PCB, se realizan pruebas para verificar su funcionamiento y rendimiento. Esto incluye la comprobación de la continuidad de las conexiones eléctricas, la detección de posibles cortocircuitos o fallos de soldadura, y la evaluación del correcto funcionamiento de cada componente individual y del circuito en su conjunto. El sistema armado se ve en la Figura 7.

Figura 4.
Circuito impreso ensamblado



2.4 Diseño de la interfaz en la pantalla táctil

El diseño de la interfaz en la pantalla táctil se basa en principios de accesibilidad, con el objetivo de proporcionar una experiencia de usuario intuitiva y sin complicaciones. Se prioriza la simplicidad y la claridad en la disposición de los elementos de

la interfaz, como botones y displays, para facilitar la navegación y la selección de opciones por parte del usuario.

Una de las características clave de la interfaz de usuario es la capacidad de personalizar los parámetros de rehabilitación según las necesidades individuales del usuario. Se proporcionan opciones para ajustar el rango de movimiento, número de repeticiones y la velocidad, lo que permite adaptar el tratamiento a diferentes niveles de condición física, etapas de recuperación y objetivos terapéuticos.

En cuestiones de programación de la interfaz en la pantalla táctil, se hizo en lenguaje C, haciendo uso de librerías exclusivas para el modelo de la pantalla, TFT ST7789, las cuales permitían darle color, dimensión, ubicación, entre otras cosas, a los elementos visuales.

Para comenzar a diseñar la interfaz visual fue necesario determinar ciertas coordenadas, para a través de ellas, asignarle una ubicación a cada uno de los textos, botones y displays contenidos en la pantalla, como se muestra en el siguiente segmento de código:

```
1 #include "FS.h"
2 #include <TFT_eSPI.h>
3 #include <SPI.h>
4
5 #define FRAME_X 5
6 #define FRAME_Y 65
7 #define FRAME_W 160
8 #define FRAME_H 35
```

Luego, a través de ciertas funciones, se definía el color del borde, el relleno del recuadro, el color, tamaño y tipo de fuente a elegir, así como también asignarles ciertas funciones a los botones/displays, como se muestra a continuación:

```
void drawFrame()
1 {
2 //dibujar el rectángulo
3 tft.drawRect(FRAME_X, FRAME_Y, FRAME_W, FRAME_H,
4 TFT_BLACK);
5 tft.fillRect(FRAME_X, FRAME_Y, FRAME_W, FRAME_H,
6 TFT_BLACK);
7 //añadir la etiqueta al botón
8 tft.setCursor(FRAME_X + 5, FRAME_Y + 7);
9 tft.setTextColor(TFT_YELLOW);
10 tft.setFont(4);
11 tft.print("Repeticiones");
}
```

Todo lo anterior se repetía las veces que fueran necesarias para crear la interfaz visual en la pantalla táctil. Cabe mencionar que para hacer uso de la función TOUCH de la pantalla había que definirla dentro del programa, así como también una función para calibrarla, la cual se podía hacer cada vez que se encendiera la pantalla o dejarla predeterminada para calibrarla una única vez. Se tomó como referencia el archivo de ejemplo de la librería de Adafruit para el manejo de la pantalla. A continuación, se muestran las funciones anteriormente mencionadas:

```
void touch_calibrate()
1 {
2 uint16_t calData[5];
3 uint8_t calDataOK = 0;
4 if (!SPIFFS.begin()) {
5 Serial.println("Formateando archivo de sisema");
6 SPIFFS.format();
7 SPIFFS.begin();
8 }
9 if (SPIFFS.exists(CALIBRATION_FILE)) {
10 if (REPEAT_CAL)
11 {
12 SPIFFS.remove(CALIBRATION_FILE);
13 }
14 else
15 {
16 File f = SPIFFS.open(CALIBRATION_FILE, "r");
17 if (f) {
18 if (f.readBytes((char *)calData, 14) == 14)
19 calDataOK = 1;
20 f.close();
21 }
22 }
23 }
24 if (calDataOK && !REPEAT_CAL) {
25 tft.setTouch(calData);
26 } else {
27 tft.fillScreen(TFT_BLACK);
28 tft.setCursor(20, 0);
29 tft.setTextFont(2);
30 tft.setTextSize(1);
31 tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);
32
33 tft.println("Presiona las esquinas indicadas");
34 tft.setTextFont(1);
35 tft.println();
36
37 if (REPEAT_CAL) {
38 tft.setTextColor(TFT_RED, TFT_BLACK);
39 tft.println("Calibrar de nuevo");
40 }
41 tft.calibrateTouch(calData, TFT_MAGENTA,
42 TFT_BLACK, 15);
43 tft.setTextColor(TFT_GREEN, TFT_BLACK);
44 tft.println("Calibración completada");
45 File f = SPIFFS.open(CALIBRATION_FILE, "w");
46 if (f) {
47 f.write((const unsigned char *)calData, 14);
48 f.close();
49 }
50 }
}
```

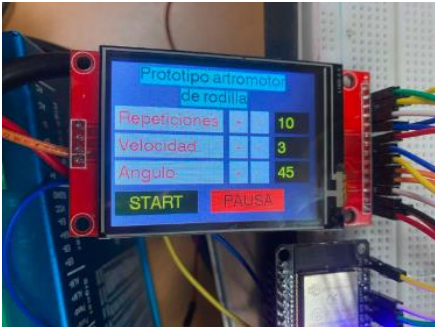
El diseño de la interfaz se centra en diseñar una experiencia de usuario intuitiva, interactiva y personalizable.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se llevaron a cabo pruebas para evaluar el funcionamiento del diseño electrónico y el desarrollo de software del prototipo artromotor. Estas pruebas incluyeron la verificación de la funcionalidad de los componentes electrónicos. Además, se evaluó la comunicación correcta entre los diferentes elementos del sistema, como la transmisión de datos entre el microcontrolador y la pantalla táctil. La pantalla funcionando se muestra en la Figura 8.

Figura 5.

Ejemplo de interfaz visual



Como se puede observar en la Figura 9. la interfaz visual cuenta con tres parámetros ajustables, 'Repeticiones', 'Velocidad (en escala del 1 al 5, siendo 1 la más lenta y la 5 la más alta)' y 'Ángulo'(grados), en los cuales se puede disminuir o aumentar el valor, según sea necesario; y también cuenta con los botones 'Start' y 'Pausa', que como sus nombres lo indican, sirven para iniciar el ciclo de terapia y para interrumpirla, respectivamente.

Las pruebas incluyeron la programación de varios ángulos de movimiento a través de la pantalla táctil. Los resultados mostraron que el sistema podía ejecutar estos movimientos con una buena precisión, lo cual es adecuado para los fines de rehabilitación.

La interfaz táctil permitió a los usuarios ajustar fácilmente los parámetros de movimiento, como el ángulo y la velocidad, observándose que el motor respondía de manera rápida y precisa a estos ajustes.

Figura 6.

Ejemplo de movimiento de motor con interfaz

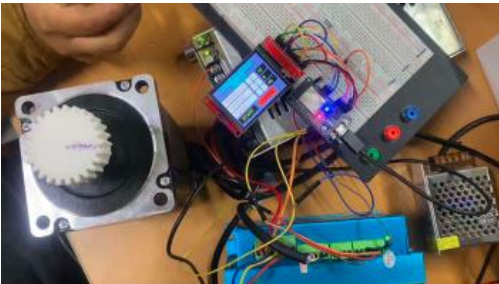
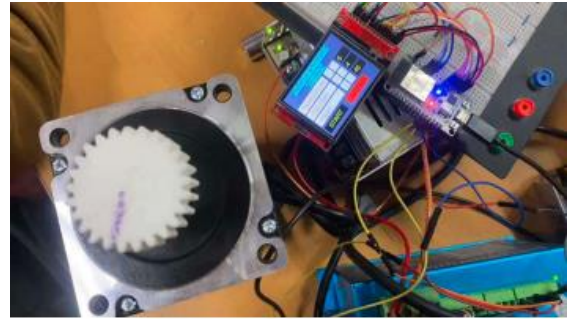


Figura 7.

Ejemplo 2 de movimiento a través de interfaz.



IV. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto, se ha demostrado la viabilidad y efectividad de integrar tecnología electrónica y mecánica para proporcionar un enfoque innovador y personalizado en la recuperación de lesiones de rodilla.

El diseño cuidadoso del sistema de control, que incluye el movimiento preciso del motor paso a paso y la ajustable velocidad, ofrece la posibilidad de adaptar los ejercicios de rehabilitación a las necesidades específicas de cada paciente. La implementación de un microcontrolador ESP32 y una pantalla táctil facilita la interacción intuitiva y el monitoreo del progreso durante las sesiones de rehabilitación.

Los resultados obtenidos de este proyecto sugieren que el prototipo artromotor tiene el potencial de mejorar significativamente los tiempos de recuperación y la eficacia del tratamiento para una variedad de lesiones deportivas de rodilla. Además, la versatilidad y la capacidad de personalización del dispositivo lo hacen adecuado para su aplicación en diferentes entornos.

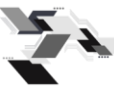
En última instancia, este trabajo subraya la importancia de la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, terapeutas y profesionales médicos para el desarrollo de soluciones innovadoras en el campo de la rehabilitación.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo. En especial a la división de Posgrado.

VI. REFERENCIAS

- Arellano, L. (2010). SISTEMA ROBÓTICO DE REHABILITACIÓN FUNCIONAL. *Intercon*.
- Babiuch, M. (2019). Using the ESP32 microcontroller for data processing. *20th International Carpathian Control Conference*.
- Flor, J. (2022). *Diseño y construcción de un prototipo rehabilitador post-operatorio pasivo de rodilla para rotura de meniscos*. Universidad Politécnica Salesiana.



- González Alonso, J. (2017). *Periféricos basados en Arduino para interacción con sistemas médicos de simulación y rehabilitación*. Universidad de Valladolid.
- López, J. (2021). *Diseño de un dispositivo de movimiento pasivo continuo para rehabilitación de rodilla*. San Pedro Sula: UNITEC.
- Putri, A. (2023). Implementation of nema-17 stepper motor and SG-90 servo motor as mechanical drivers on spinal needle positioning test equipment. *IEEE International Biomedical Instrumentation and Technology Conference (IBITeC)*, 52-57.
- Ruiz, B. (2017). *Prototipo de rehabilitador pasivo de rodilla para asistencia postquirúrgica*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Sánchez Mayo, B. (2015). Recuperación de la artroplastia de rodilla a través de la movilización pasiva continua. *Anales del sistema sanitario de Navarra* , 297-310.
- Tipanluisa, C. (2023). *Control de un guante automatizado para la rehabilitación de dedos por medio de una tarjeta esp32*. Tecnológico Universitario Vida Nueva.
- Valdés, F., & Pallas Areny, R. (2007). *Microcontroladores*. Barcelona: Marcombo.
- Veintimilla, M. (2023). *Diseño e implementación de un dispositivo electrónico para la rehabilitación de extremidad inferior en pacientes con pérdida de movilidad parcial*. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo.

VII. AUTORES

Andrea Fernanda Padilla Silva

 <https://orcid.org/0000-0003-2447-8925>

Luis Amado González Vargas

 <https://orcid.org/0009-0008-9094-6188>

Noe Alvarado Tovar

 <https://orcid.org/0000-0001-6465-9961>

Eduardo Machado Díaz

 <https://orcid.org/0000-0003-2610-7570>