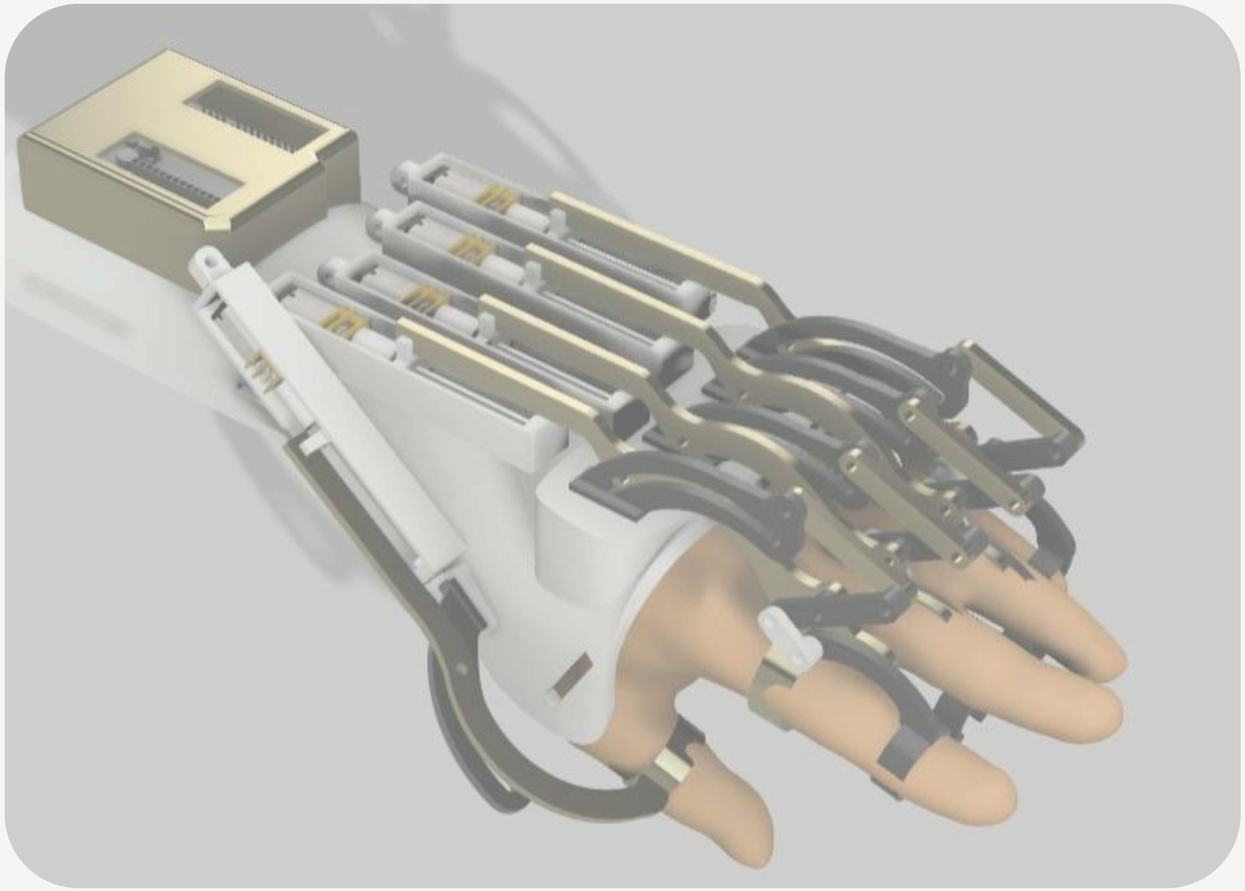
UNIVERSIDAD MODELO

# Desarrollo de un Exoesqueleto de Mano Controlado por Señales Electromiográficas del Antebrazo para Rehabilitación Motora



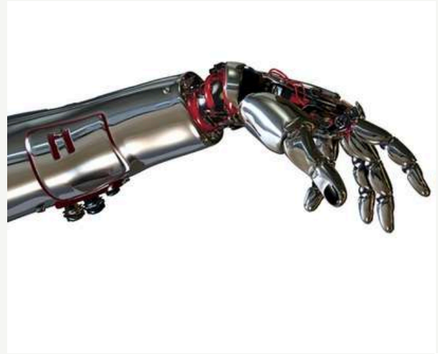
4 semestre Ingenieria Biomedica
Juan José Zaldivar Rosado
Emilio Adrián Carrillo
Carlos Colli Avila
Christian Andrey Durán Zúñiga

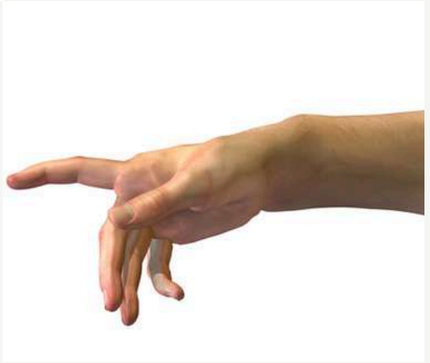
UNIVERSIDAD MODELO

# Introducción

Las lesiones cerebrovasculares y medulares pueden provocar pérdida de movilidad en la mano, afectando la independencia y calidad de vida de los pacientes [1]. Actualmente, existen sistemas de rehabilitación robótica que ayudan en la recuperación motora; sin embargo, muchos son costosos, complejos y de difícil acceso.

Ante esta problemática, se propone el desarrollo de un exoesqueleto de mano controlado por señales electromiográficas (EMG)[2] del antebrazo, capaz de detectar la intención muscular del usuario para asistir los movimientos de apertura y cierre durante la rehabilitación motora.





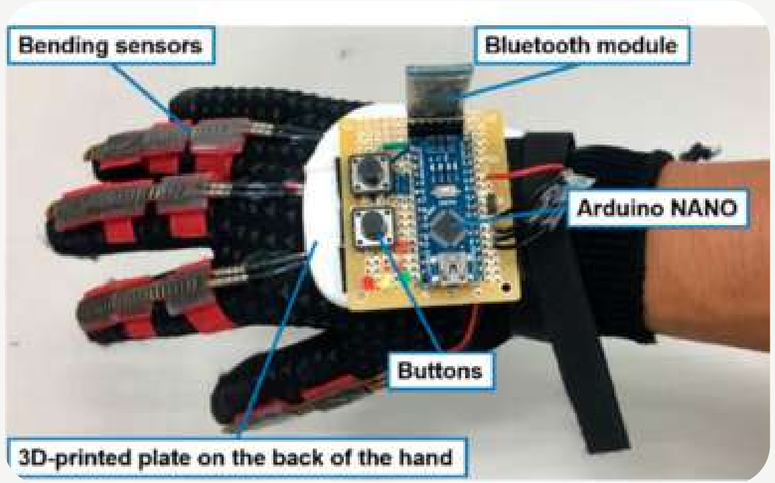
[1] Cisnal A et al. Sensors. 2023
[2]Xia K et al. Bioengineering. 2022

UNIVERSIDAD MODELO

# Antecedente

Uno de los antecedentes más relevantes para este proyecto es el estudio de Yang et al. (2021) [3], enfocado en el uso de señales electromiográficas (EMG) para el control de exoesqueletos de mano en rehabilitación motora.

En este trabajo, las señales musculares del antebrazo son utilizadas para detectar la intención de movimiento del paciente y activar el sistema de asistencia, permitiendo movimientos de apertura y cierre de la mano de forma más natural e interactiva. Además, los autores demostraron que el control mediante EMG mejora la interacción entre el usuario y el exoesqueleto, favoreciendo una participación activa durante el proceso de rehabilitación [3].



[3]

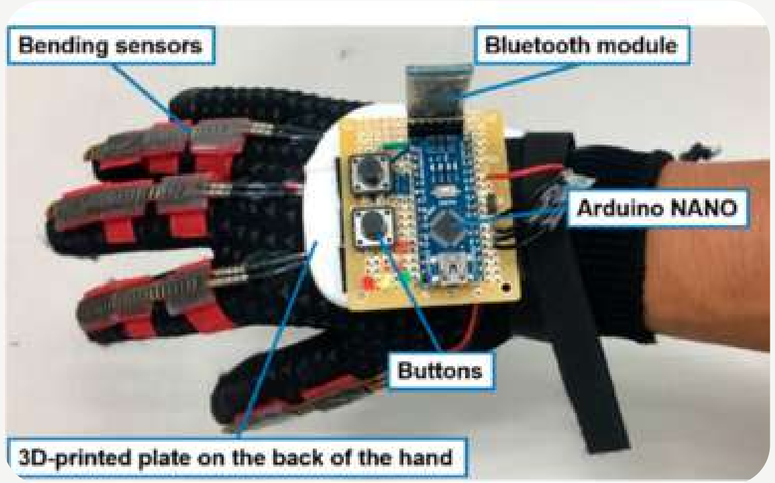
[3] Yang SH et al. Biosensors. 2021

UNIVERSIDAD MODELO

# Antecedente

Para el desarrollo de este proyecto, se trabajó en la implementación de un sistema de control basado en los principios establecidos por Yang et al. (2021).

- Uso de señales electromiográficas (EMG)
- Mecanismo de asistencia interactivo
- Participación activa del usuario
- Procesamiento con ESP32
- Control de motores lineales




[3]

[3] Yang SH et al. Biosensors. 2021

UNIVERSIDAD MODELO

# Objetivos

## Generales

- Desarrollar un **prototipo de exoesqueleto** para mano accionado por motores lineales y controlado mediante señales electromiográficas del antebrazo, para asistir en la rehabilitación de movimientos de apertura y cierre.

## Específicos

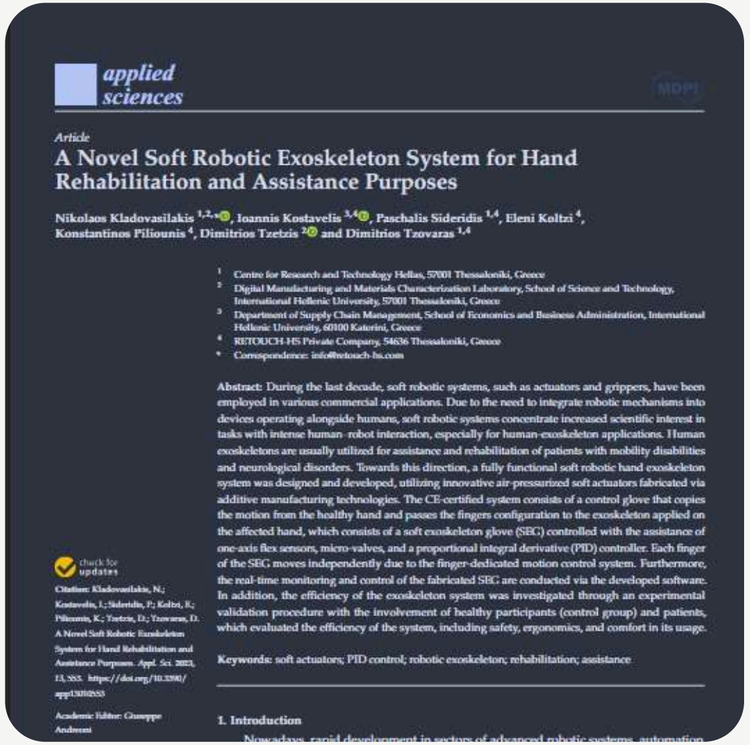
- Diseñar el exoesqueleto en Fusion 360, permitiendo visualizar, ajustar y validar la estructura mecánica del sistema antes de su fabricación.
- Desarrollar un mecanismo rígido (tipo eslabones) que convierta el movimiento rotatorio de los motores en trayectorias anatómicas seguras para los dedos.
- Integrar un sistema de control básico utilizando un microcontrolador y un sensor EMG que traduzca las señales musculares en movimientos para el exoesqueleto

UNIVERSIDAD MODELO

# Metodología

## 1 Investigación previa

- Se realizó una revisión bibliográfica de exoesqueletos de mano con control EMG para identificar áreas de oportunidad técnica y establecer los puntos clave de mejora en el diseño del prototipo.



applied sciences

Article

A Novel Soft Robotic Exoskeleton System for Hand Rehabilitation and Assistance Purposes

Nikolaos Kladovasilakis [1,2,*], Ioannis Kostavelis [3,4], Paschalis Sideridis [1,4], Eleni Koltzi [4], Konstantinos Piliounis [4], Dimitrios Tzetzis [2] and Dimitrios Tzovaras [1,4]

1 Centre for Research and Technology Hellas, 57001 Thessaloniki, Greece
2 Digital Manufacturing and Materials Characterization Laboratory, School of Science and Technology, International Hellenic University, 57001 Thessaloniki, Greece
3 Department of Supply Chain Management, School of Economics and Business Administration, International Hellenic University, 60100 Katerini, Greece
4 RETOUCH-HS Private Company, 54636 Thessaloniki, Greece
* Correspondence: info@retouch-hs.com

Abstract: During the last decade, soft robotic systems, such as actuators and grippers, have been employed in various commercial applications. Due to the need to integrate robotic mechanisms into devices operating alongside humans, soft robotic systems concentrate increased scientific interest in tasks with intense human–robot interaction, especially for human-exoskeleton applications. Human exoskeletons are usually utilized for assistance and rehabilitation of patients with mobility disabilities and neurological disorders. Towards this direction, a fully functional soft robotic hand exoskeleton system was designed and developed, utilizing innovative air-pressurized soft actuators fabricated via additive manufacturing technologies. The CE-certified system consists of a control glove that copies the motion from the healthy hand and passes the fingers configuration to the exoskeleton applied on the affected hand, which consists of a soft exoskeleton glove (SEG) controlled with the assistance of one-axis flex sensors, micro-valves, and a proportional integral derivative (PID) controller. Each finger of the SEG moves independently due to the finger-dedicated motion control system. Furthermore, the real-time monitoring and control of the fabricated SEG are conducted via the developed software. In addition, the efficiency of the exoskeleton system was investigated through an experimental validation procedure with the involvement of healthy participants (control group) and patients, which evaluated the efficiency of the system, including safety, ergonomics, and comfort in its usage.

Keywords: soft actuators; PID control; robotic exoskeleton; rehabilitation; assistance

check for updates

Citation: Kladovasilakis, N.; Kostavelis, I.; Sideridis, P.; Koltzi, E.; Piliounis, K.; Tzetzis, D.; Tzovaras, D. A Novel Soft Robotic Exoskeleton System for Hand Rehabilitation and Assistance Purposes. Appl. Sci. 2023, 13, 565. https://doi.org/10.3390/app13010565

Academic Editor: Giuseppe Andreoni

1. Introduction

Nowadays, rapid development in sectors of advanced robotic systems, automation

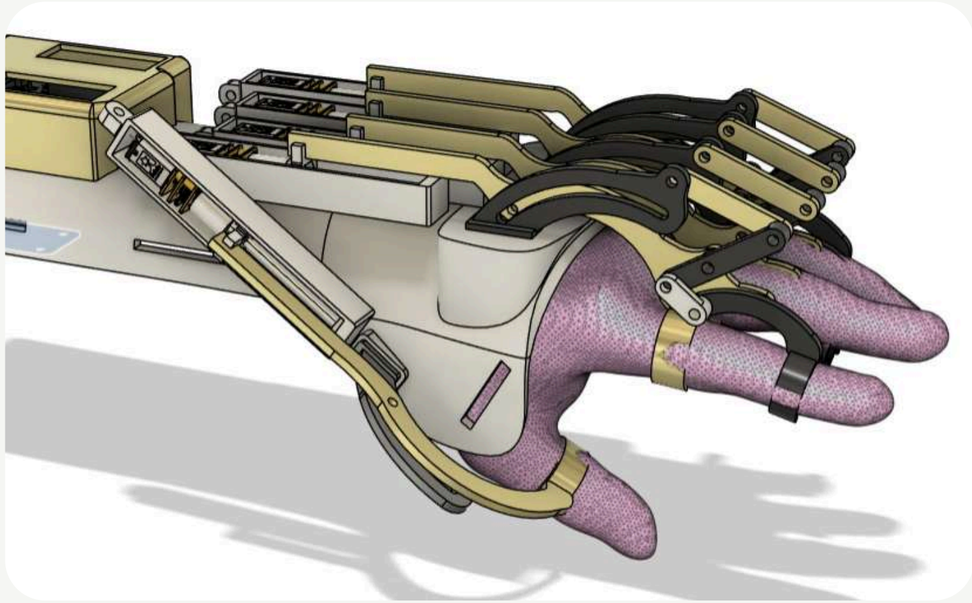
[3] Kladovasilakis N et al. Appl Sci. 2023.

UNIVERSIDAD MODELO

# Metodología

## 2 Diseño de la estructura

- Se realizó el modelado tridimensional de la estructura en Fusion 360 y su fabricación mediante impresión 3D, utilizando filamentos PLA y PETG para asegurar resistencia y funcionalidad.



Diseño hecho en Fusion 360

UNIVERSIDAD MODELO

# Metodología

## 3 Desarrollo del prototipo

- Se realizó el montaje de la arquitectura electrónica integrando el microcontrolador, los sensores EMG y los actuadores mediante conexiones físicas para validar la continuidad y el funcionamiento del sistema.

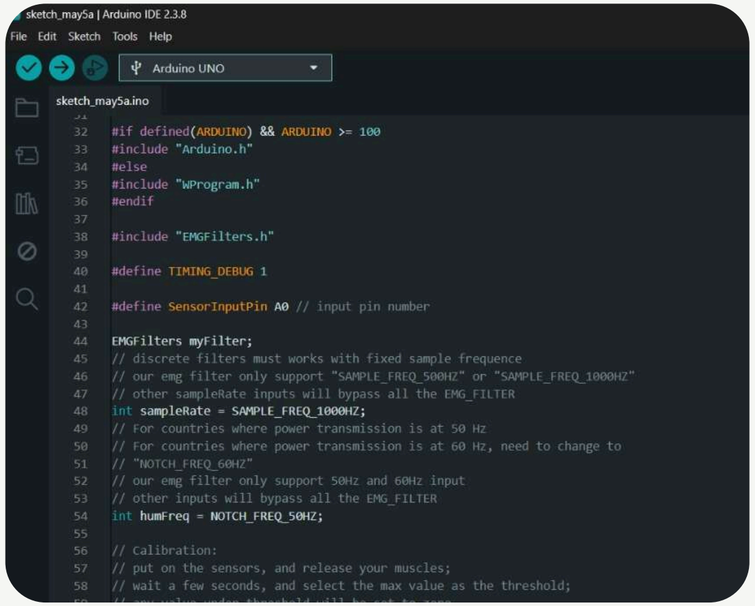
Impresión 3D completa

UNIVERSIDAD MODELO

# Metodología

## 4 Programación del exoesqueleto

- Se realizó la programación del microcontrolador y la calibración del sensor EMG para validar la respuesta de los motores, asegurando que los movimientos de apertura y cierre correspondieran a la intención del usuario.




Codigo conexión ESP32 con el sensor EMG

UNIVERSIDAD MODELO

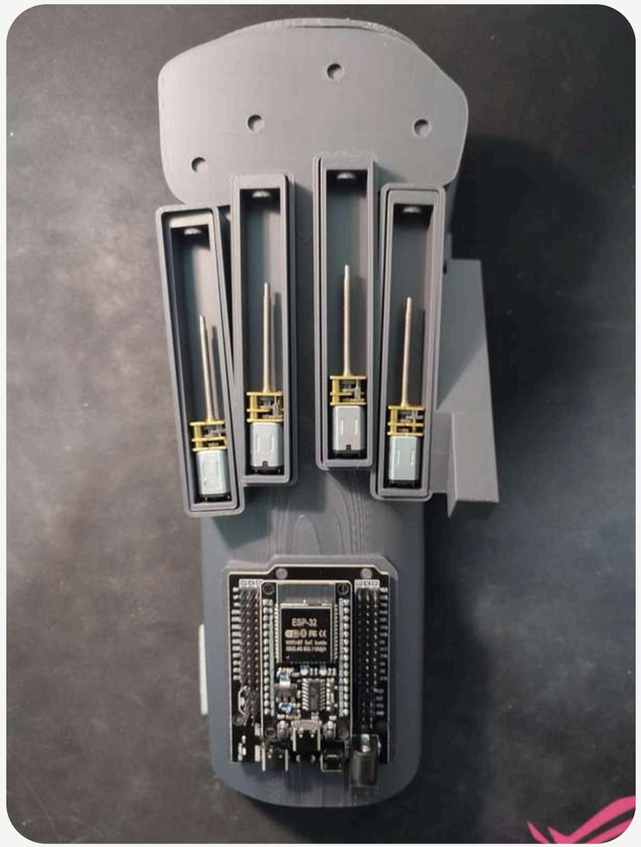
# Metodología

## 5 Pruebas de la intencidad de torque

- Se realizaron pruebas de torque y limitación de fuerza en los motores para garantizar que el movimiento asistido sea seguro y no comprometa la integridad física ni el estado clínico del paciente.

UNIVERSIDAD MODELO

# Resultados

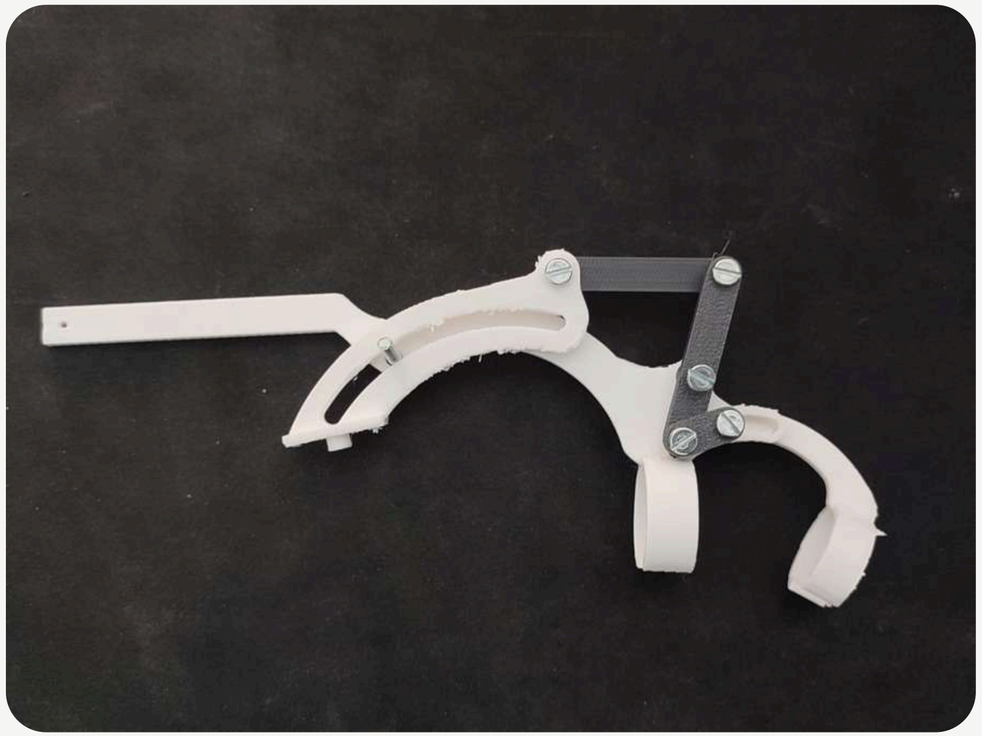


Prototipo con los motores y el ESP32 incorporado

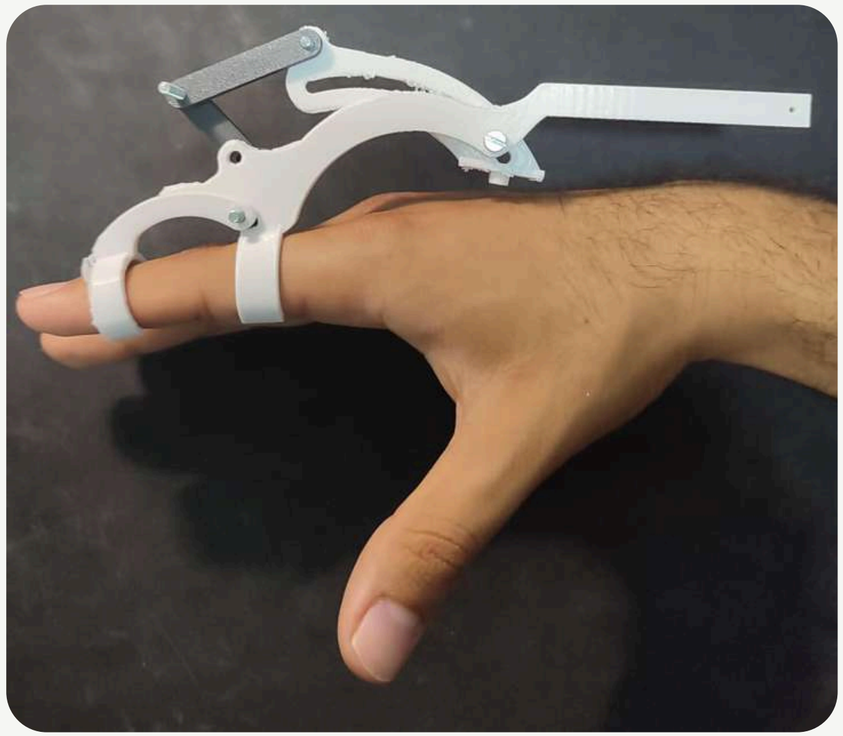
Prototipo con la carcasa de protección para el ESP32

UNIVERSIDAD MODELO

# Resultados



Falange para un dedo ensamblada



Prueba de relación de tamaño con la falange 3D

UNIVERSIDAD MODELO

# Resultados

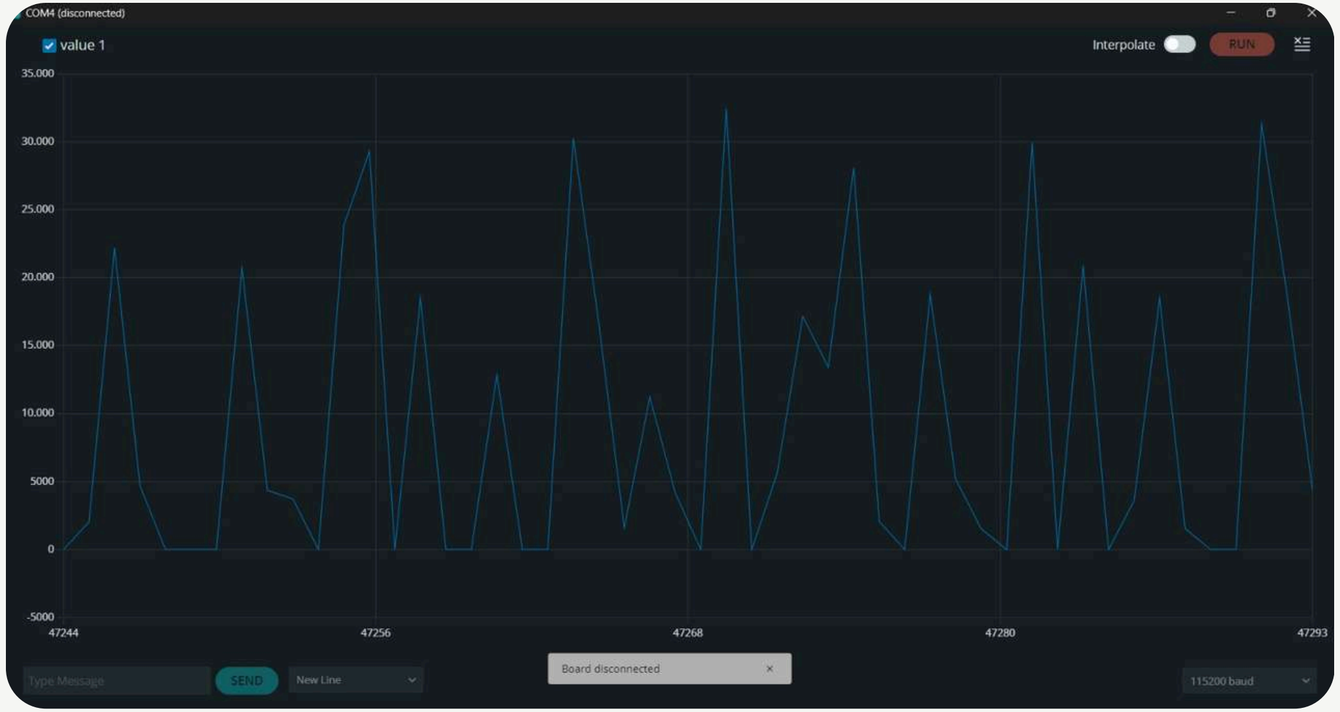
```cpp
// Configuración de Pines
// ======================================
const int pinEMG = 34; // Pin ADC del ESP32 para leer el sensor muscular


// Pines para los controladores de motor (Ej. DRV8833 o L298N)
// Cada motor necesita 2 pines (Adelante / Atrás)
const int pinesMotorAdelante[5] = {16, 18, 21, 23, 26};
const int pinesMotorAtras[5]    = {17, 19, 22, 25, 27};


// ======================================
// Parámetros Ajustables (Calibración)
// ======================================
// Umbral de voltaje (0 a 4095 en el ADC del ESP32 de 12 bits)
// Ajusta este valor según la lectura en reposo y en contracción del paciente
const int UMBRAL_EMG = 2000;


// Tope lógico: Tiempo máximo en milisegundos que los motores avanzarán
const unsigned long TIEMPO_MAXIMO_ACTUACION = 2500; // Ej. 2.5 segundos


// ======================================
// Máquina de Estados
// ======================================
enum EstadoMano {
 REPOSO_ABIERTA,
 CERRANDO,
 MANTENIENDO_CERRADA,
 ABRIENDO
};


EstadoMano estadoActual = REPOSO_ABIERTA;
```

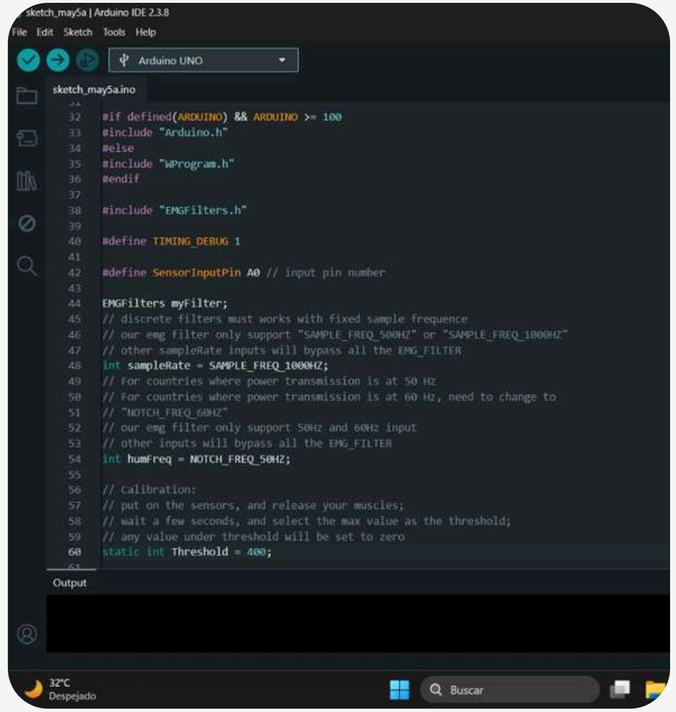
```cpp
// 2. Lógica de control (Máquina de Estados)
switch (estadoActual) {

  case REPOSO_ABIERTA:
    if (lecturaEMG > UMBRAL_EMG) {
      Serial.println("Umbral superado. Cerrando mano...");
      accionMotores(HIGH, LOW); // Avanzar
      tiempoInicioMovimiento = tiempoActual;
      estadoActual = CERRANDO;
    }
    break;


  case CERRANDO:
    // Tope lógico: Si han pasado X segundos, detener motores
    if (tiempoActual - tiempoInicioMovimiento >= TIEMPO_MAXIMO_ACTUACION) {
      Serial.println("Tope lógico alcanzado. Motores detenidos.");
      accionMotores(LOW, LOW); // Detener
      estadoActual = MANTENIENDO_CERRADA;
    }
    break;


  case MANTENIENDO_CERRADA:
    // Si el voltaje cae por debajo del umbral, regresar a posición inicial
    if (lecturaEMG < UMBRAL_EMG) {
      Serial.println("Voltaje disminuyó. Abriendo mano...");
      accionMotores(LOW, HIGH); // Retroceder
      tiempoInicioMovimiento = tiempoActual;
      estadoActual = ABRIENDO;
    }
    break;

```

Código del ESP32 para controlar la mano por EMG

UNIVERSIDAD MODELO

# Resultados




Pruebas del sensor EMG