



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE MECATRÓNICA

05/08/2026

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

“Repotenciación de un prototipo mecatrónico de rehabilitación de rodilla mediante la implementación de modos activos y resistivos con monitoreo inteligente”

**AUTORES: ACUÑA HERRERA JOSE ANDRES
VARGAS ALOMOTO DYLAN PATRICIO**

DIRECTORA: ING. COMINA TUBÓN MAYRA ELIZABETH Ph.D



CONTENIDO

- Antecedentes y justificación
- Objetivos
- Alcance del proyecto
- Estado del arte
- Diseño e implementación
- Pruebas y resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones

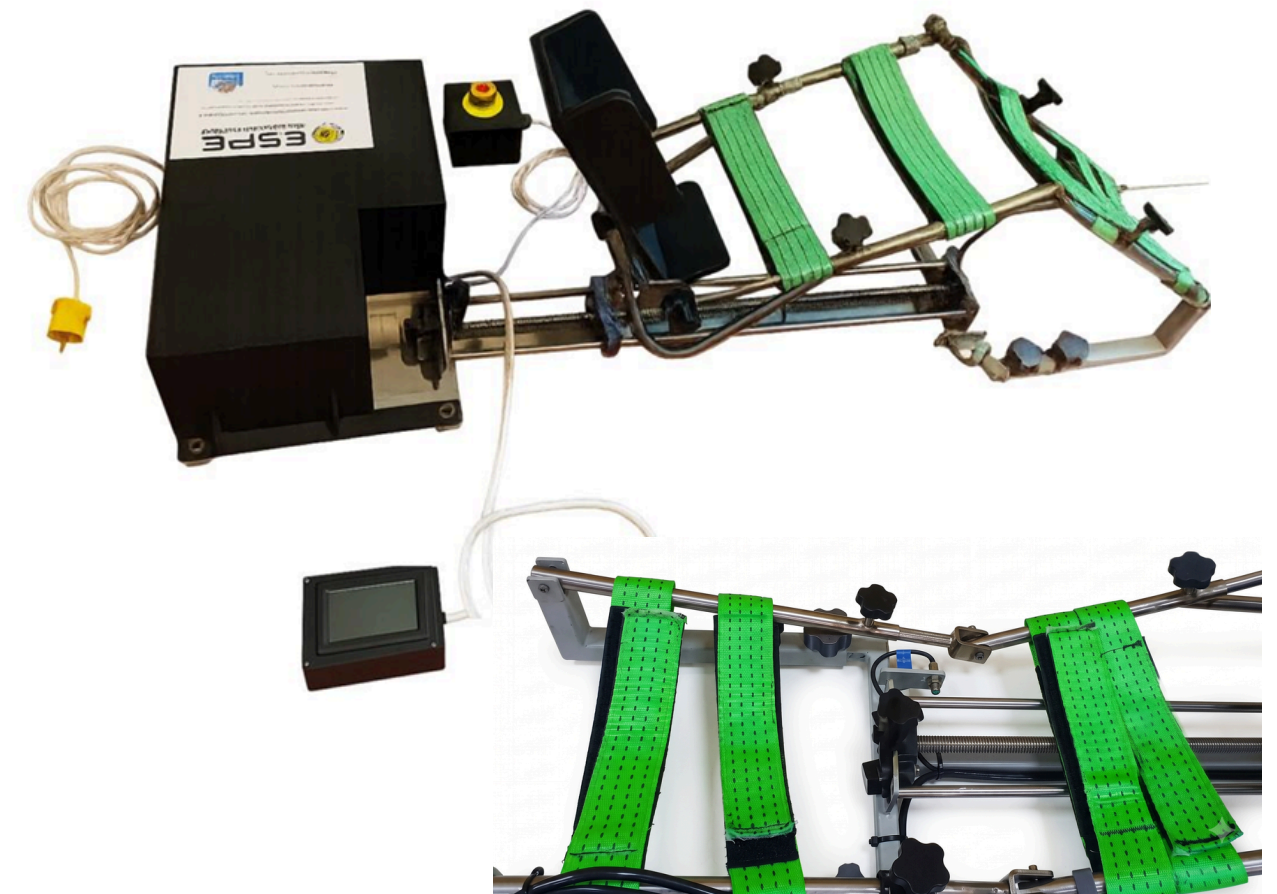
Antecedentes

Dispositivo comercial CPM tradicional puramente pasivo.



Fuente: www.medicalexpo.es

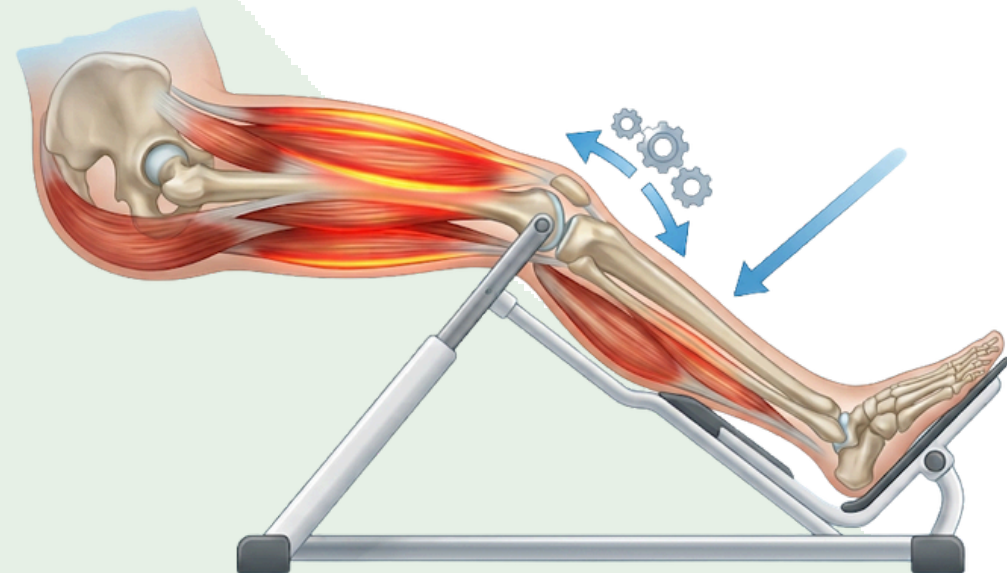
Prototipo CPM a repotenciar



Pachacama, M.: Diseño y construcción de un prototipo de rehabilitación automática mediante la implementación de una estructura mecatrónica de un solo grado de libertad para el movimiento pasivo continuo de extensión y flexión de la rodilla (2025)

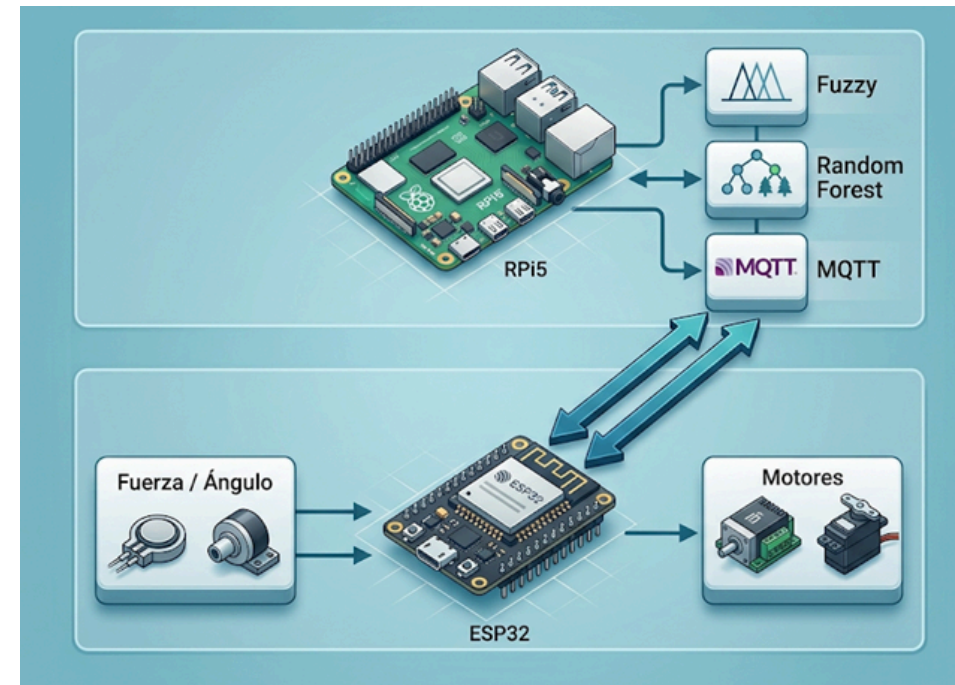
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- CPM tradicional: previene rigidez, pero es puramente pasivo.
- Prototipo anterior (Pachacama, 2025): sin sensor de fuerza, sin modos activo/resistivo, sin telemetría.
- Brecha: falta monitoreo inteligente y control adaptativo.

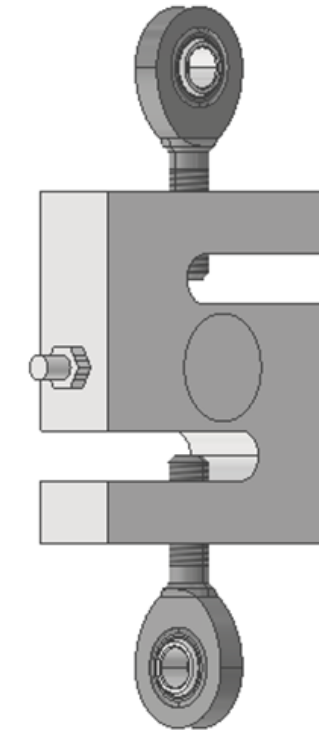


JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

➡ Evolución del prototipo hacia control más robusto



➡ Modos CPM, Resistivo y Activo-Asistido + medición de fuerza



➡ IA como apoyo, no como reemplazo del profesional



➡ Interfaz gráfica + app móvil vía MQTT



Fuente: Biblioteca de Canva

OBJETIVOS

Objetivo general:

Repotenciar un prototipo mecatrónico de rehabilitación de rodilla mediante la implementación de modos activos y resistivos con monitoreo inteligente.

Objetivos específicos:

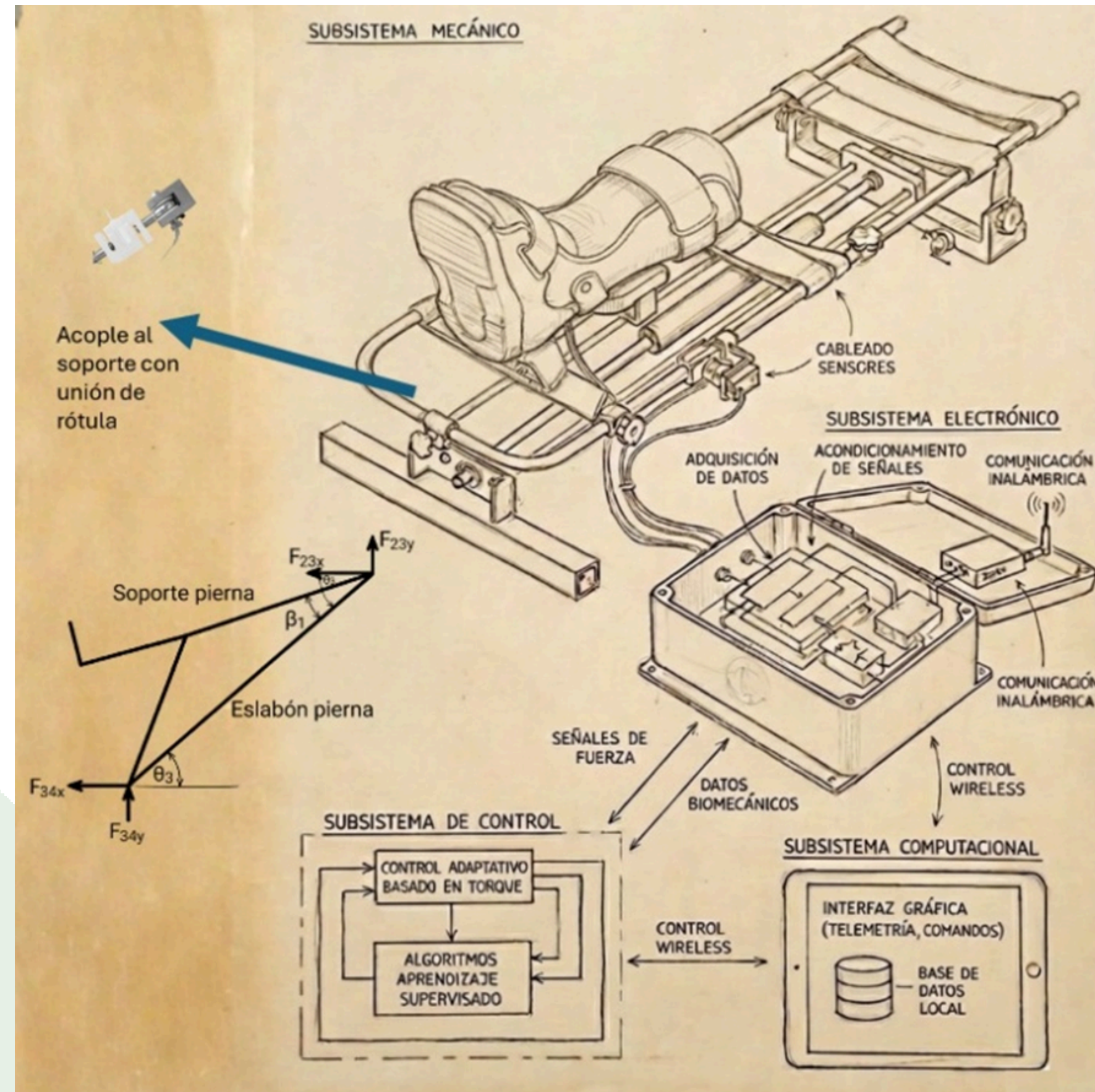
- Levantar los requerimientos y necesidades.
- Diseñar el sistema mecánico, electrónico y de control.
- Implementar algoritmos de inteligencia artificial.
- Implementar los sistemas diseñados.
- Realizar la validación y pruebas de laboratorio.



ALCANCE DEL PROYECTO

Incluye	No Incluye
3 modos: Pasivo, Activo, Resistivo	Pruebas clínicas con pacientes reales
Celda de carga tipo S, sensor electromiografía	Certificación médica (IEC 80601, ISO 14971)
Random Forest, Control Fuzzy	App móvil comercial
Telemetría MQTT + HMI Node-RED	

ALCANCE DEL PROYECTO



ESTADO DEL ARTE

Trabajo	Aporta	Falta
Wu et al. 2026	Robot híbrido asistivo-resistivo, rehabilitación completa de rodilla	Validación clínica limitada
Nicora et al. 2025	Revisión de 201 papers Inteligencia Artificial/Machine Learning en rehabilitación robótica; valida uso de Random Forest	Exige mas validación clínica/datos
Lee, M.C. et al. 2025	Lógica difusa para detección de fase de marcha	Enfocado en marcha, no en fuerza resistiva
Triwiyanto et al. 2023	EMG y Random Forest embebido en Raspberry Pi (tiempo real)	Miembro superior, no rodilla
Barrera Sanchez et al. 2022	Revisión de 210 articulos, órtesis pasivas/activas de rodilla	No aborda IA ni monitoreo inteligente

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Matriz QFD

			Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)	X	X	▲	▲	X	▼	▼	X	X
Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Rango angular máximo	Estrategia de control de interacción	Transparencia mecánica en modo activo	Resolución efectiva de fuerza / torque	Límites activos programables	Número de pasos para tarea	Costo de materiales (BoM)	Tipo de sujeción del pie	Material de superficies en contacto
9	12.5	5.0	Rango de movimiento extensión y flexión	⊙	▲	▲	▲	⊙	▲	▲	▲	▲
9	12.5	5.0	Capacidad de aplicar torque resistivo controlado	▲	⊙	⊙	⊙	⊙	▲	▲	▲	▲
9	12.5	5.0	Suavidad del movimiento en modo activo	▲	⊙	⊙	⊙	▲	▲	▲	▲	▲
9	12.5	5.0	Medición precisa de fuerza de interacción	▲	⊙	▲	⊙	▲	▲	▲	▲	▲
9	12.5	5.0	Seguridad en interacción	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	▲	▲	▲	▲
9	10.0	4.0	Interfaz de usuario intuitiva	▲	⊙	▲	▲	⊙	⊙	▲	▲	▲
9	10.0	4.0	Bajo costo	⊙	▲	▲	▲	▲	▲	⊙	⊙	⊙
9	10.0	4.0	Comodidad del paciente	▲	▲	▲	▲	▲	▲	⊙	⊙	⊙
9	7.5	3.0	Facilidad de limpieza y mantenimiento	▲	▲	▲	▲	▲	▲	⊙	▲	⊙

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Porcentajes de aprobación Matriz QFD

Requerimiento	Característica de calidad	Módulo	Porcentaje de aprobación [%]
Rango de movimiento extensión y Flexión	Rango angular máximo	Estructura	9.8
Capacidad de aplicar torque resistivo controlado	Estrategia de control de interacción	Control	17.8
Suavidad del movimiento en modo activo	Transparencia mecánica en modo activo	Control	10
Medición precisa de fuerza de interacción	Resolución efectiva de fuerza / torque	Sensores	17
Seguridad en interacción	Límites activos programables	Interfaz	13.8
Interfaz de usuario intuitiva	Número de pasos para tarea	Interfaz	7.2
Bajo costo	Costo de materiales (BoM)	Costo	8.6
Comodidad del paciente	Tipo de sujeción del pie	Estructura	8.0
Facilidad de limpieza y mantenimiento	Material de superficies en contacto	Costo	8.0

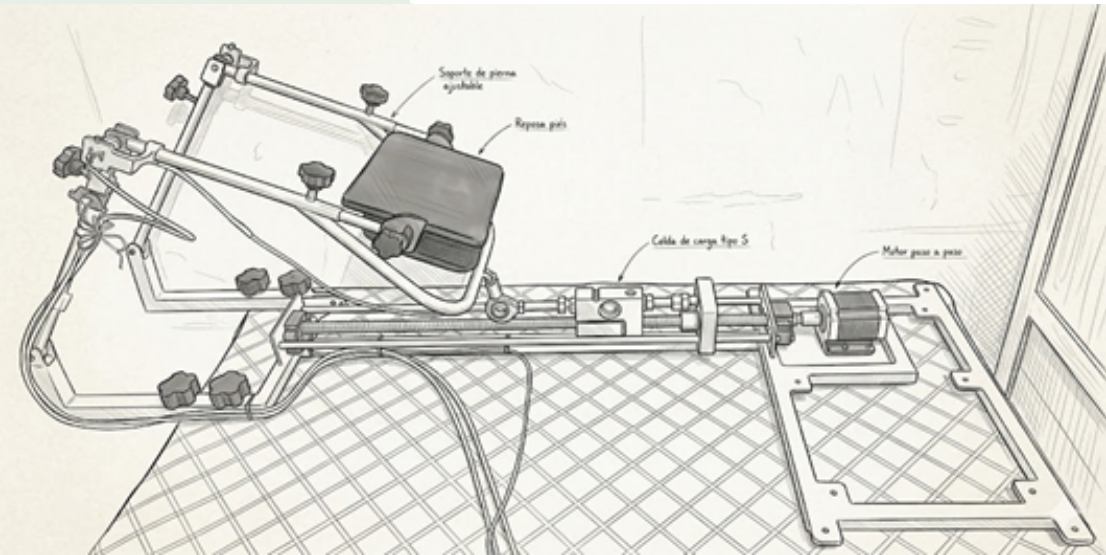
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Matriz de selección módulo sensores

Criterio de selección	Alternativa 1 Celda de carga tipo S	Alternativa 2 Actuadores Elásticos en serie (SEA)	Alternativa 3 Sensores de Electromiografía (EMG)	Ideal
Precisión y Resolución	5	4	3	5
Facilidad de Implementación	3	2	5	5
Inmunidad al Desgaste	4	3	3	5
Dimensiones (Tamaño)	3	3	5	5
Costo y Disponibilidad	4	3	4	5
Linealidad	5	4	2	5
Sumatorio	24	19	22	30
Índice porcentual	24/30	19/30	22/30	30/30
Orden de selección [%]	80.00	63.33	73.33	



Matriz de selección módulo estructura (acople)



Criterio de selección	Alternativa 1 Acople lineal para Celda de carga	Alternativa 2 Acople en Horquilla para Celda de Carga	Alternativa 3 Acople en horquilla para SEA	Ideal
Rango Angular Máximo	4	4	3	5
Seguridad Mecánica	4	4	4	5
Facilidad de Fabricación en AISI 304	5	4	3	5
Compacidad (Volumen Ocupado)	4	5	3	5
Rigidez Mecánica y Ausencia de Juego	5	4	4	5
Simplicidad de Montaje y Mantenimiento	5	3	3	5
Sumatorio	27	24	20	30
Índice porcentual	27/30	24/30	20/30	30/30
Orden de selección [%]	90.00	80.00	66.67	

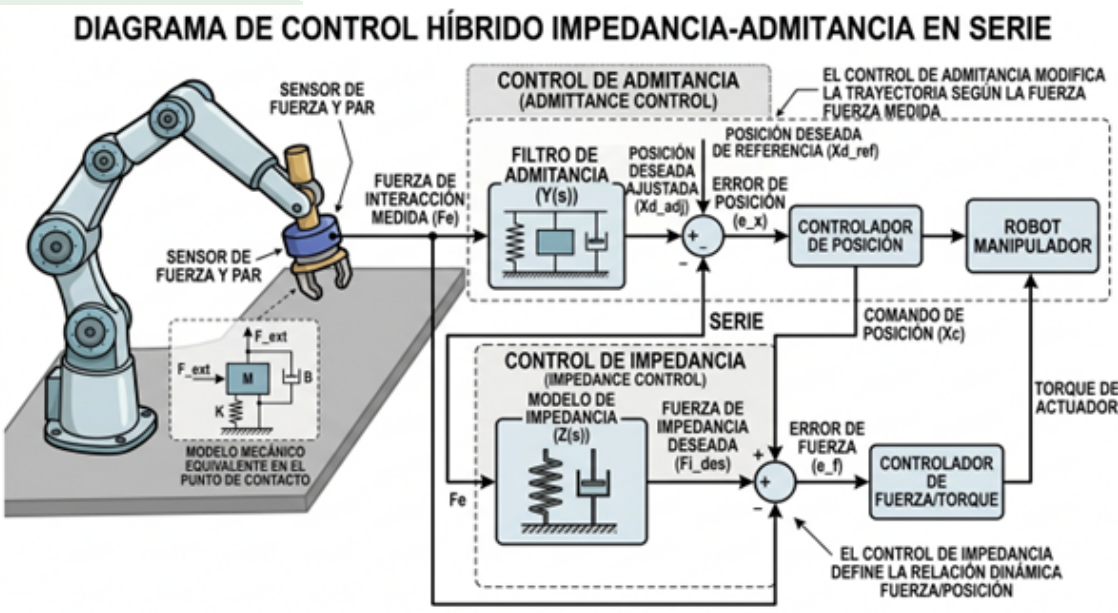
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Matriz de selección módulo estructura

Criterio de selección	Alternativa 1 Soporte sujetado con correas	Alternativa 2 Soporte simple con sujeción al tobillo	Alternativa 3 Soporte de bota completa	Ideal
Eficiencia de Transmisión de Fuerza de Tracción	5	3	4	5
Eficiencia de Transmisión de Fuerza de Compresión	5	4	5	5
Confort y Distribución de Presión	4	2	5	5
Rigidez Estructural	4	3	5	5
Facilidad de Colocación y Ajuste	4	5	3	5
Manufacturabilidad e Integración	4	4	3	5
Sumatorio	26	21	25	30
Índice porcentual	26/30	21/30	25/30	30/30
Orden de selección [%]	86.67	70.00	83.33	



Matriz de selección módulo control

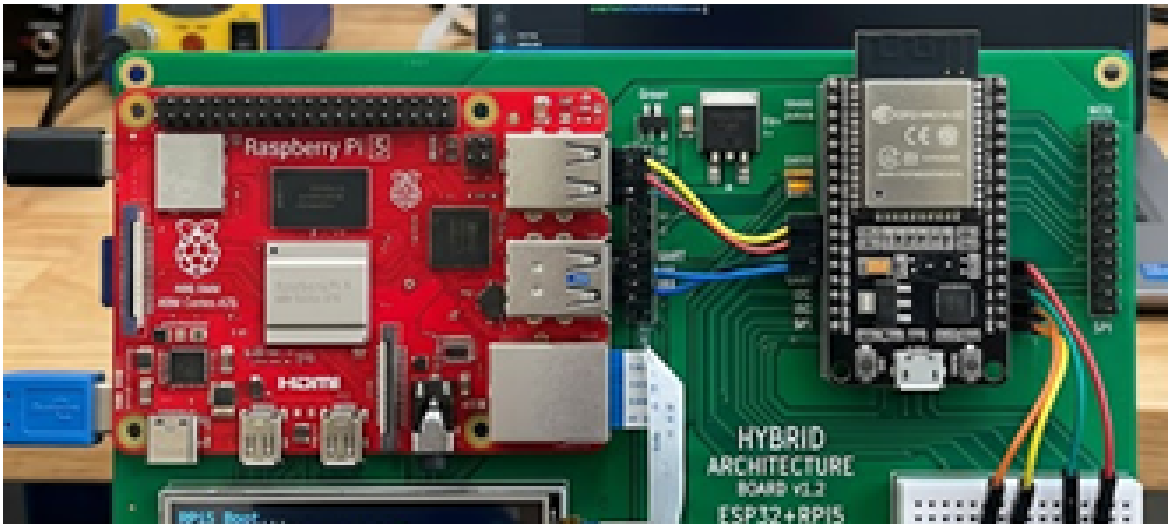


Criterio de selección	Alternativa 1 Control de Impedancia con Rigidez Variable	Alternativa 2 Control Híbrido Impedancia- Admitancia en Serie	Alternativa 3 Control de Par con Impedancia Modulada	Ideal
Precisión de seguimiento (Error)	4	4	3	5
Suavidad del movimiento	4	5	3	5
Transparencia/ Backdrivability (Torque residual)	4	4	3	5
Tiempo de respuesta a cambios de intención	4	5	3	5
Robustez a incertidumbres	3	4	4	5
Facilidad de implementación	5	4	3	5
Costo computacional	5	4	3	5
Sumatorio	29	30	22	35
Índice porcentual	29/35	30/35	22/35	35/35
Orden de selección [%]	82.86	85.71	62.86	

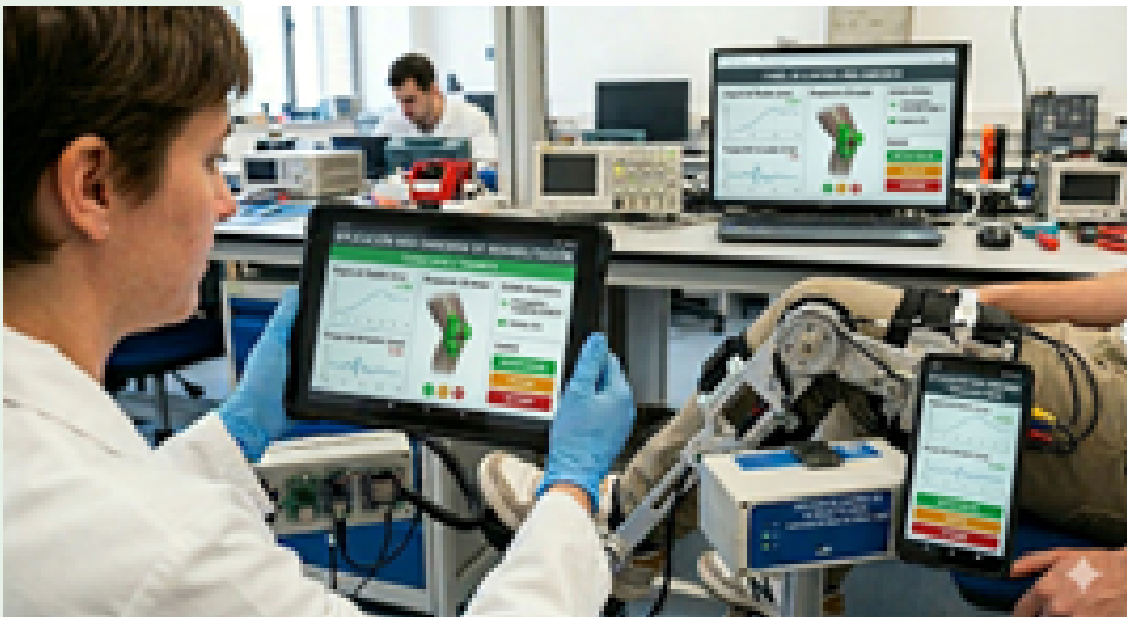
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Matriz de selección módulo control

Criterio de selección	Alternativa 1 Arquitectura Híbrida (ESP32 + Raspberry Pi 5)	Alternativa 2 Raspberry Pi 5 (Plataforma Única)	Alternativa 3 NVIDIA Jetson Orin Nano	Ideal
Costo	5	5	3	5
Eficiencia Energética	5	5	3	5
Rendimiento en Tiempo Real	5	3	3	5
Capacidad de ML	4	3	5	5
Facilidad de Desarrollo	3	5	2	5
E/S y Conectividad	5	5	5	5
Sumatorio	27	26	21	30
Índice porcentual	27/30	26/30	21/30	30/30
Orden de selección [%]	90	86.67	70	



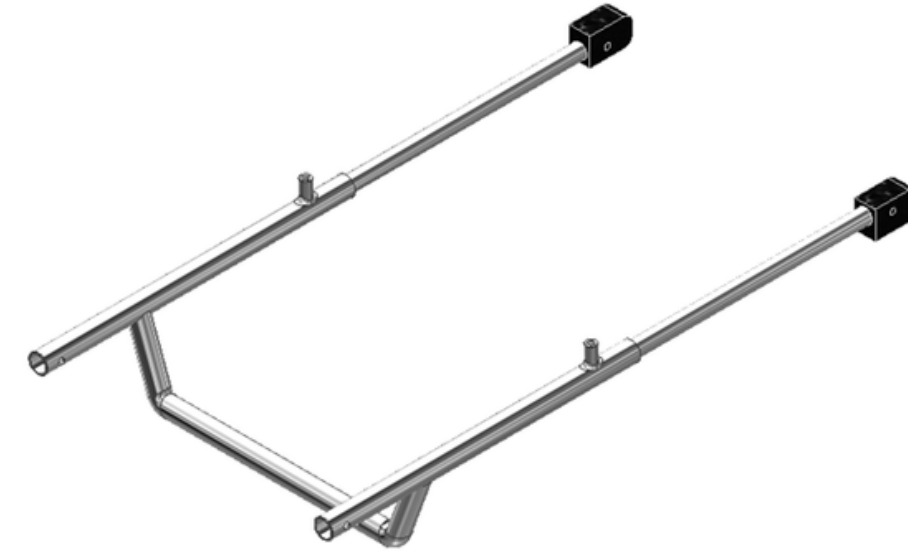
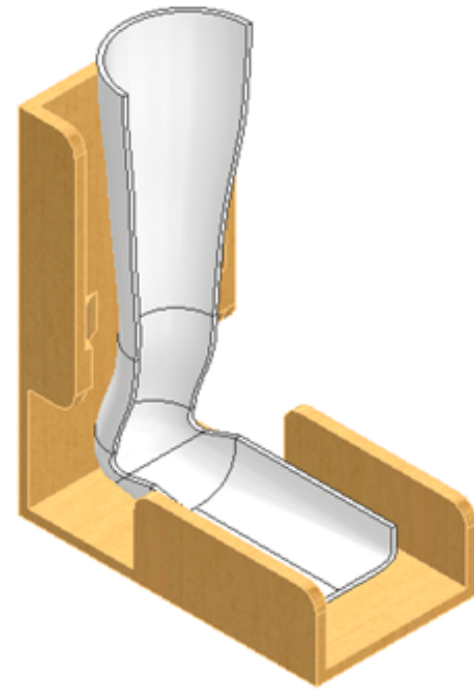
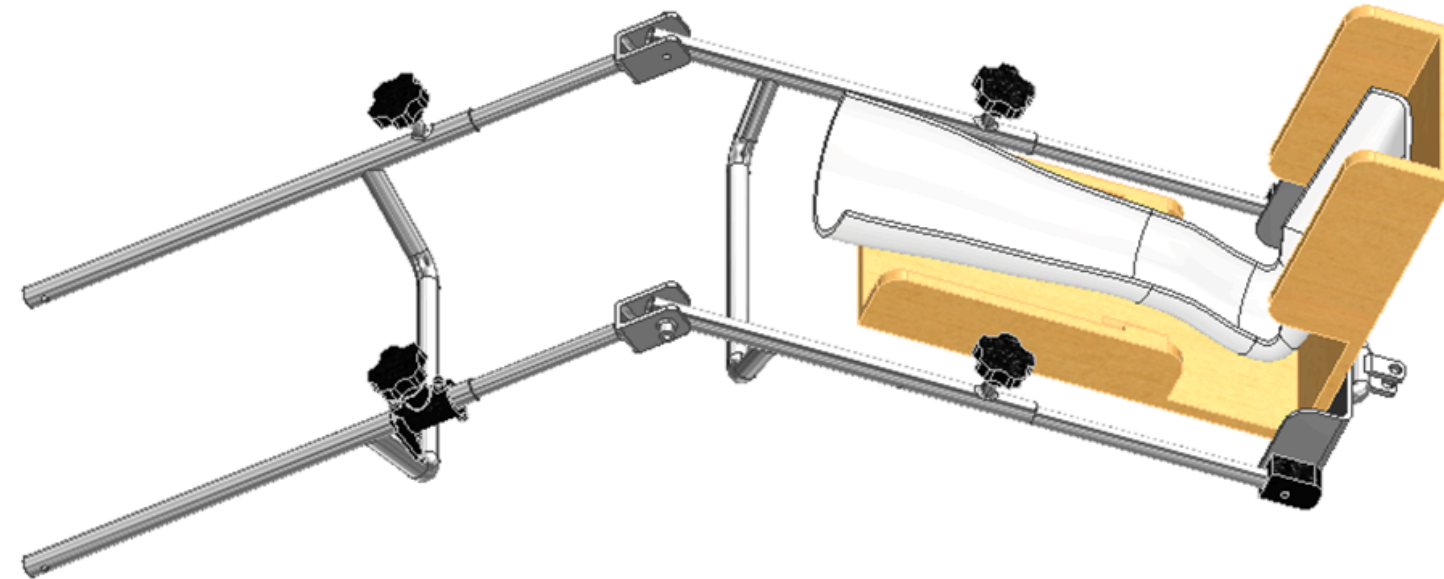
Matriz de selección módulo interfaz



Criterio de selección	Alternativa 1 Aplicación Web Embebida (Node- Red)	Alternativa 2 Cliente-Servidor Nativo	Alternativa 3 Base de Datos Sincronizada	Ideal
Fiabilidad de la comunicación	4	5	3	5
Costo	5	3	3	5
Carga cognitiva para tareas críticas (Tiempo o Número de pasos)	5	4	3	5
Curva de aprendizaje (Tiempo)	5	4	3	5
Consistencia entre plataformas	5	4	3	5
Latencia de actualización de parámetros	4	5	2	5
Funcionamiento offline	5	5	5	5
Sumatorio	33	30	22	35
Índice porcentual	33/35	30/35	22/35	35/35
Orden de selección [%]	94.29	85.71	62.86	

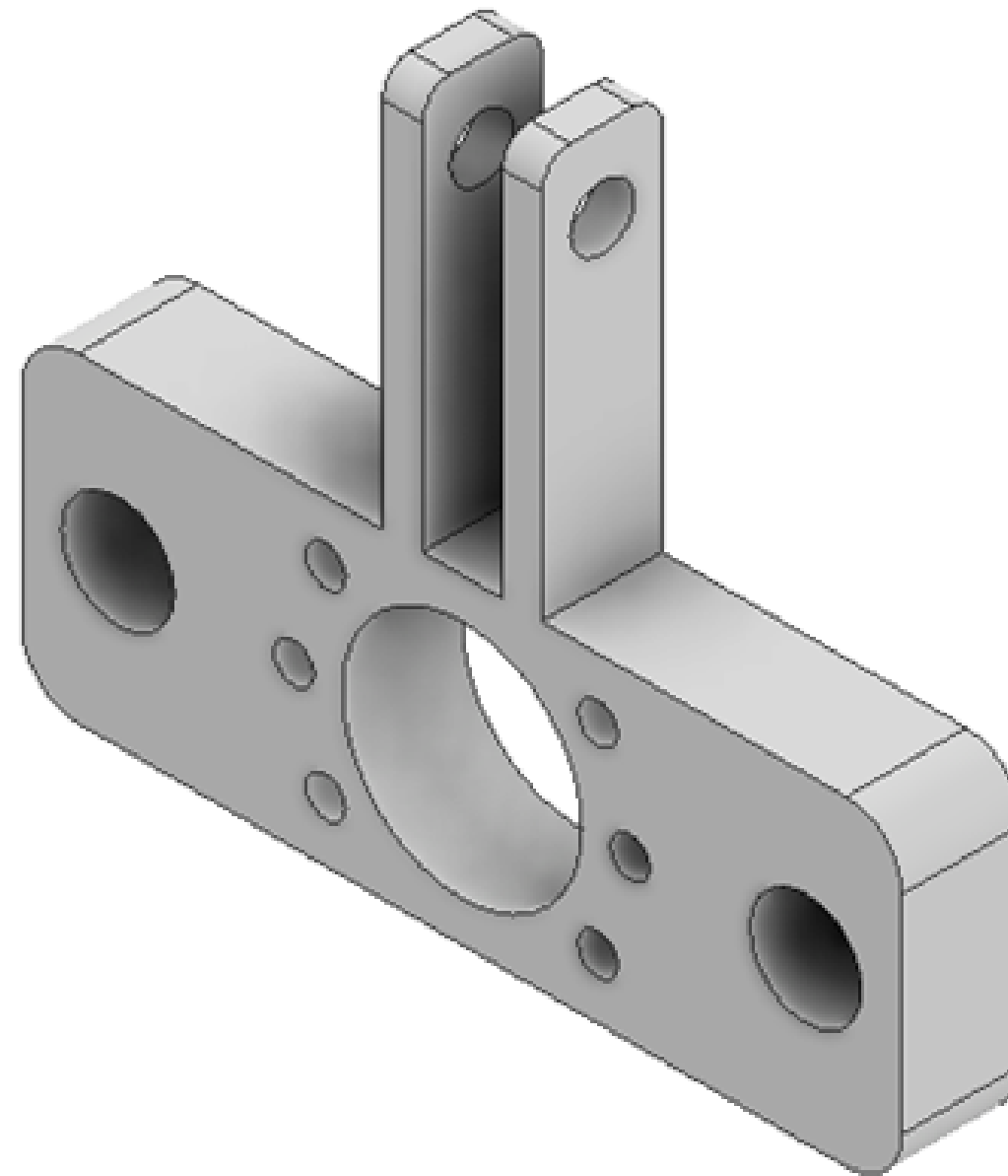
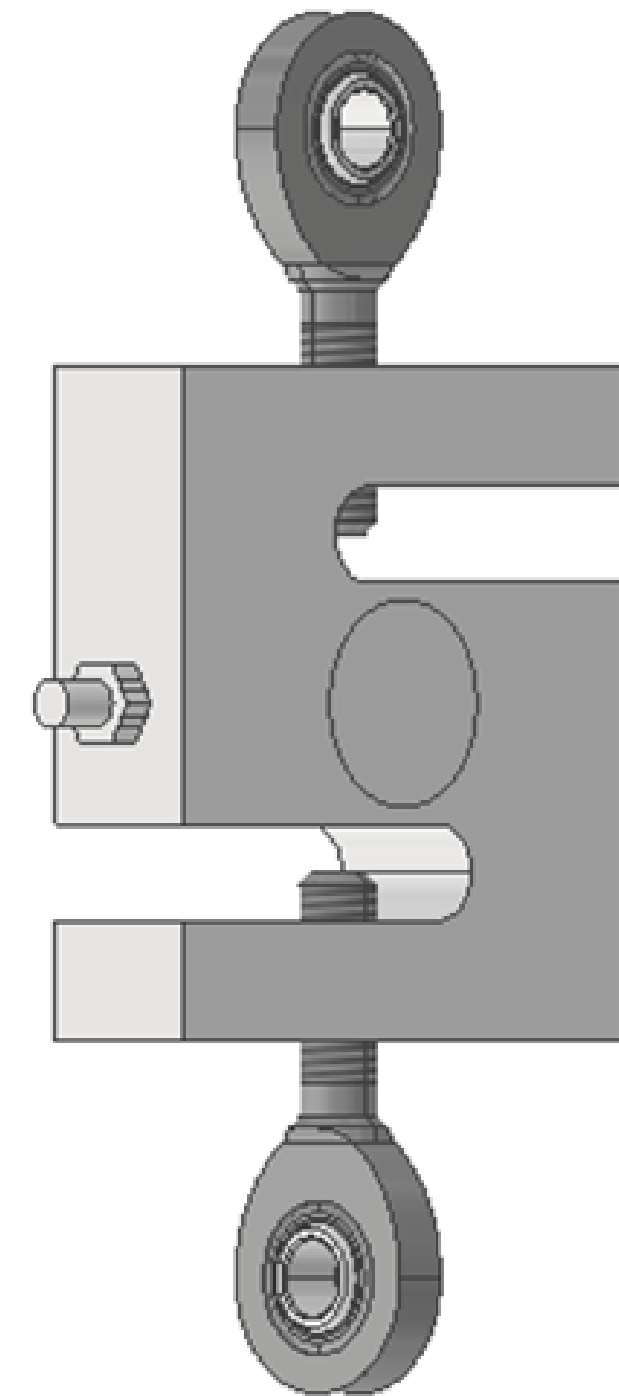
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Mecánico-Cambios estructurales



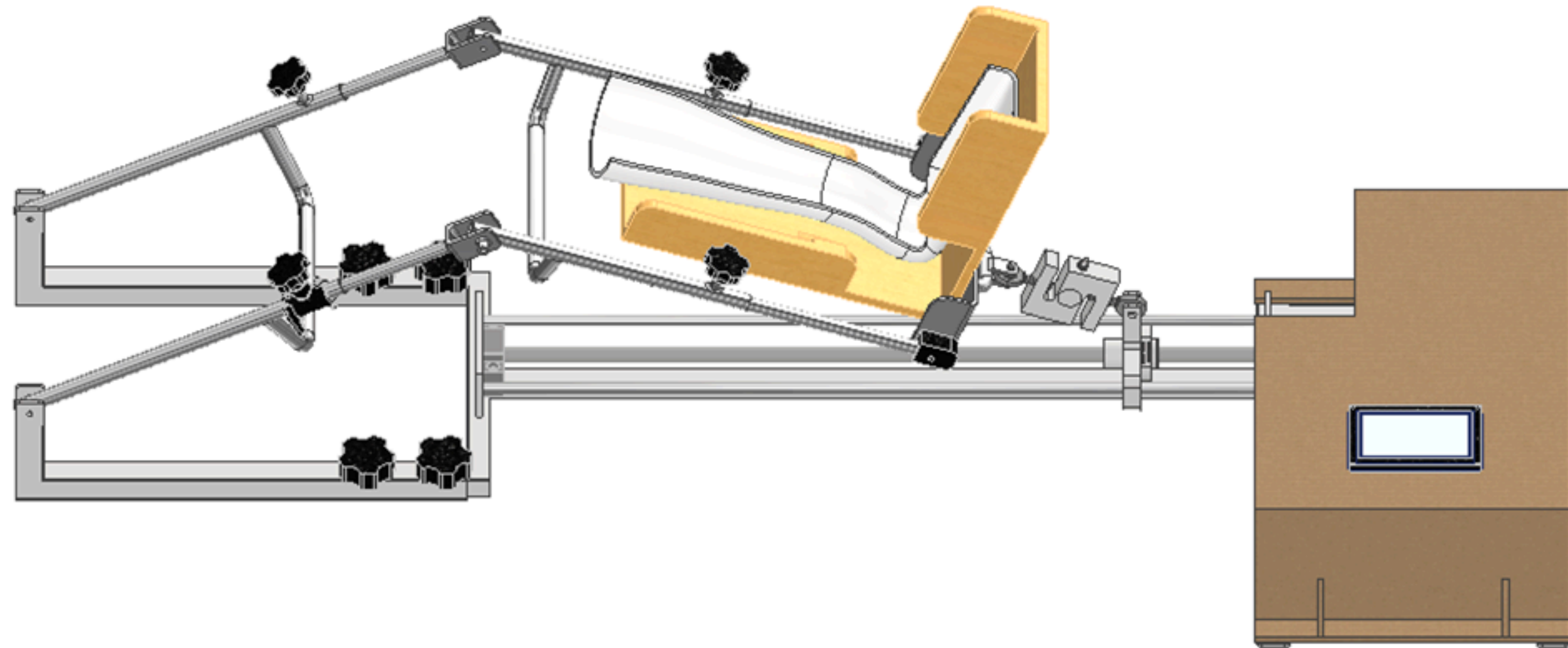
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Mecánico-Cambios acople



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Mecánico-Sistema ensamblado



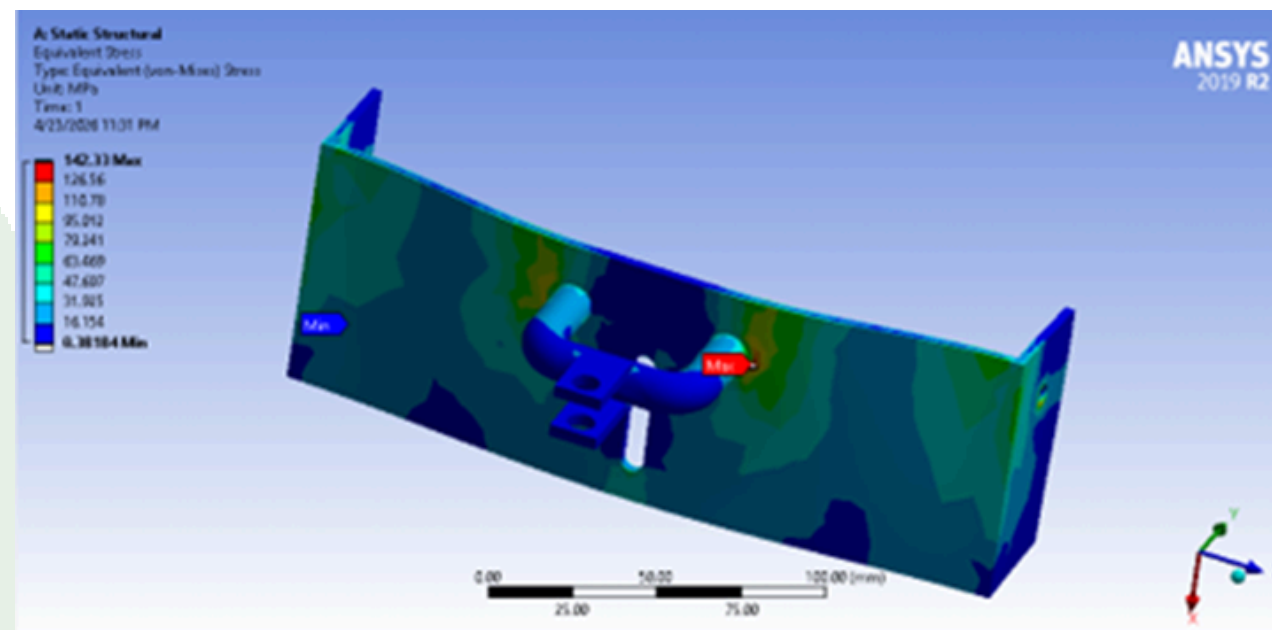
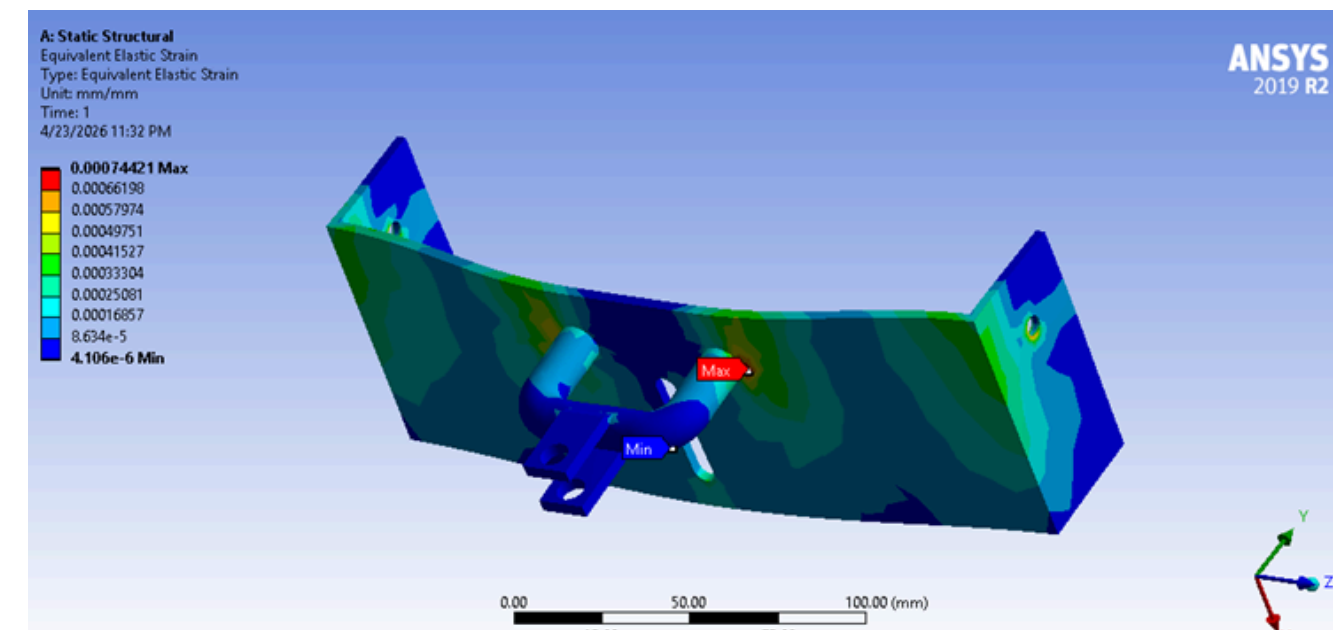
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Mecánico-Análisis estructural

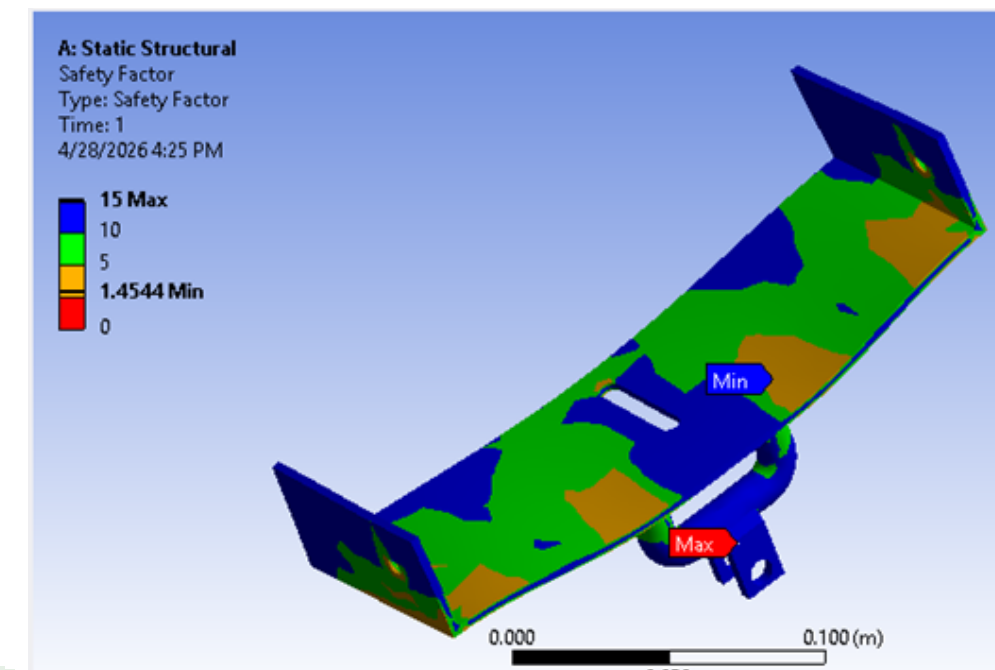
Soporte celda de carga – base pie

Esfuerzo máximo es de 142.33 [MPa]

Máxima deformación es de 7.4421×10^{-4} [mm/mm]



Factor de seguridad es de 1.4544



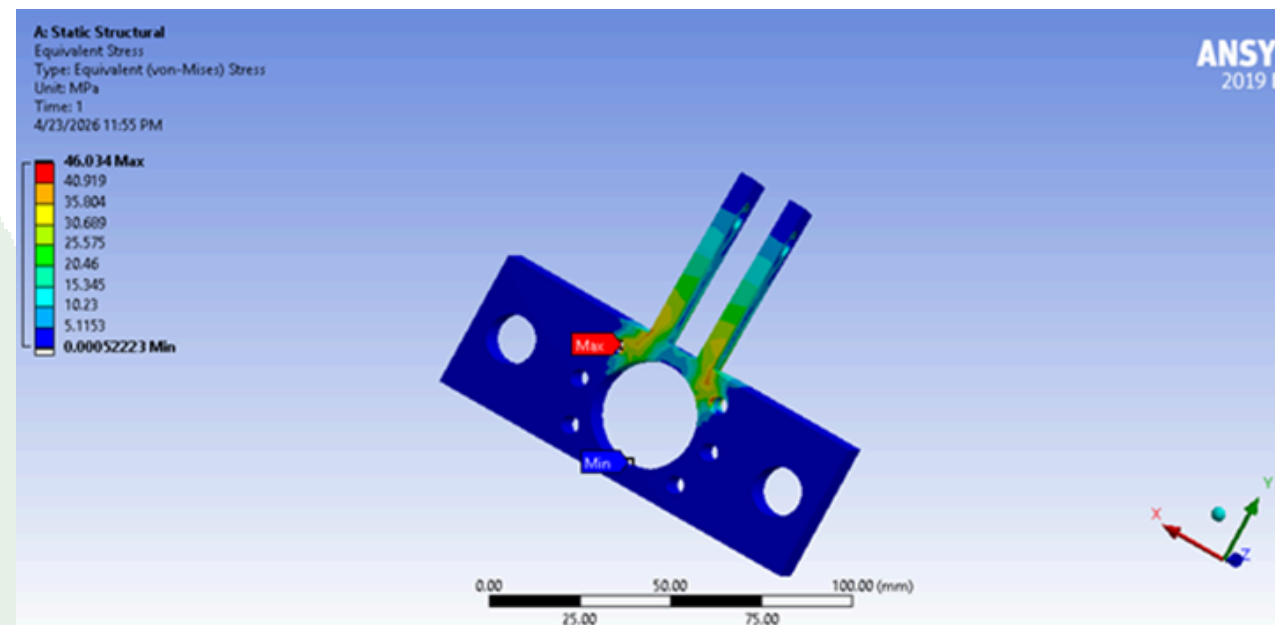
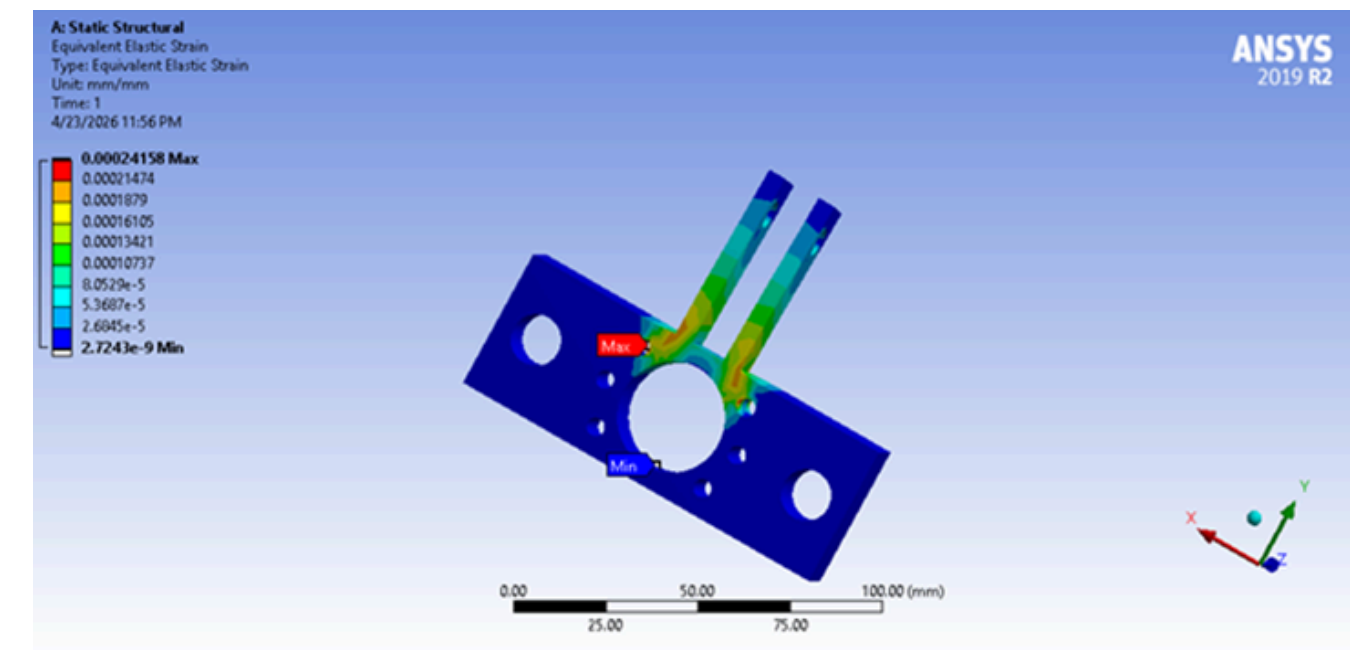
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Mecánico-Análisis estructural

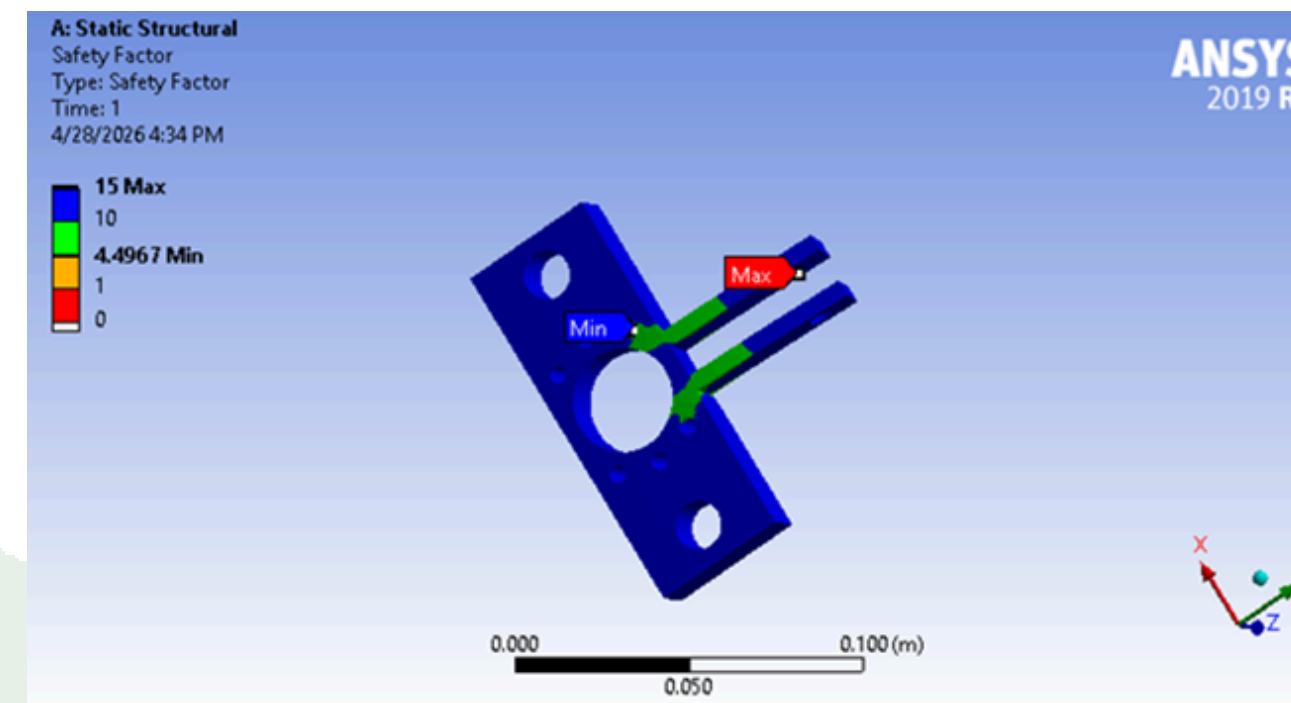
Soporte husillo

Esfuerzo máximo es de 46.034 [MPa]

Máxima deformación es de 2.4158×10^{-4} [mm/mm]



Factor de seguridad es de 4.4967



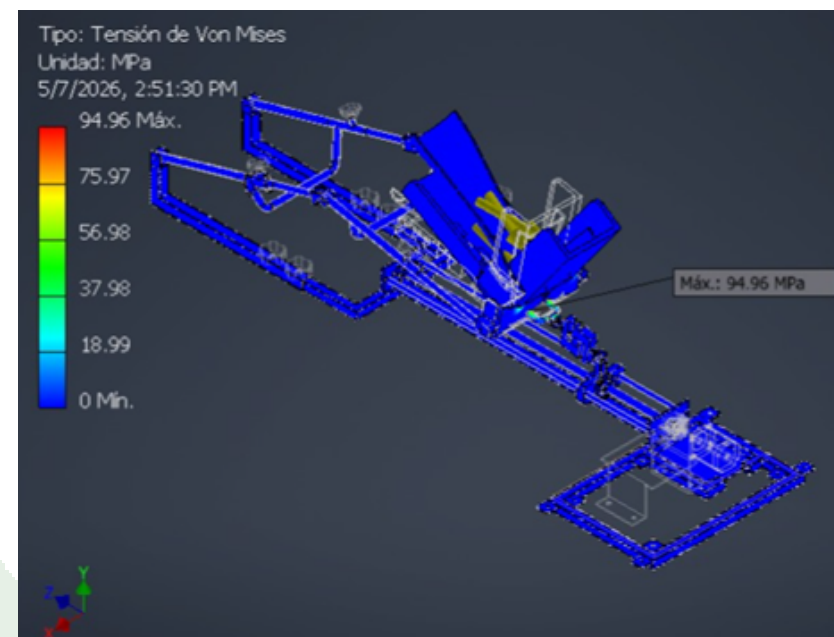
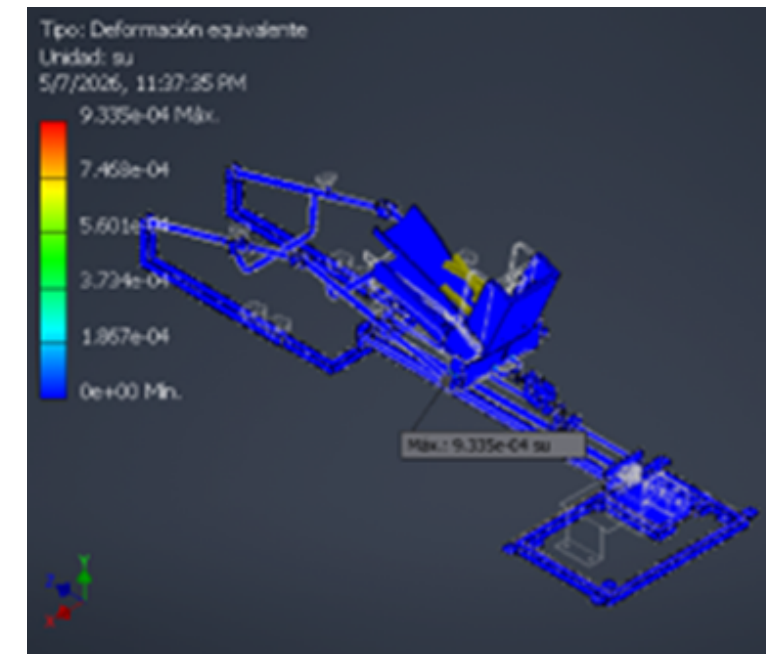
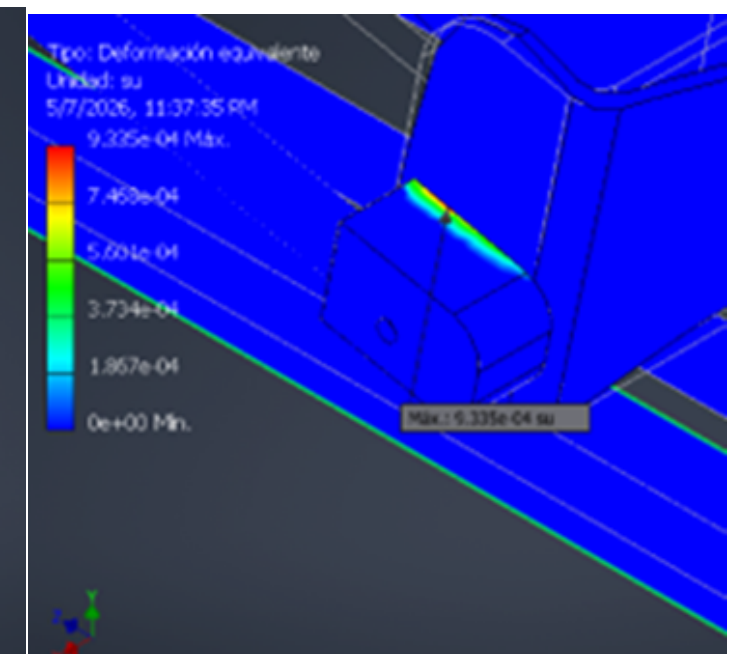
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Mecánico-Análisis estructural

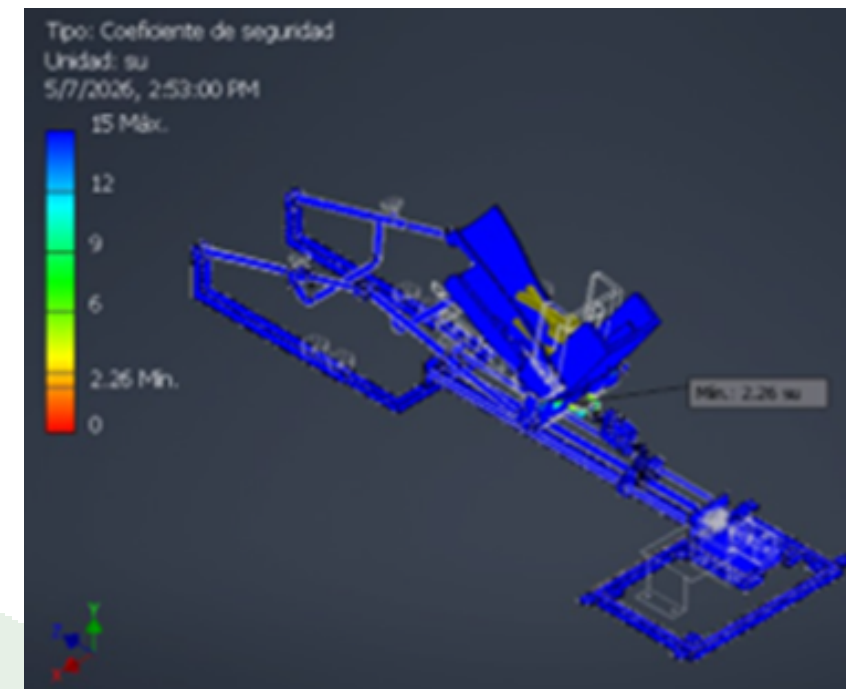
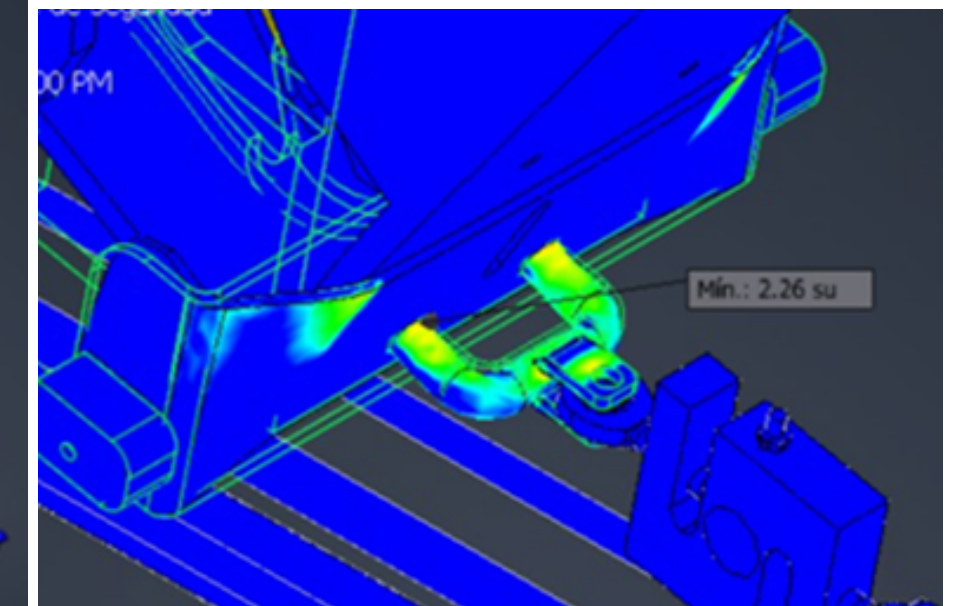
Ensamble completo

Esfuerzo máximo es de 94.96 [MPa]

Máxima deformación es de 9.35×10^{-4} [mm/mm]



Factor de seguridad es de 2.26



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Electrónico-Sensores utilizados

Celda de carga tipo S QILICHUANGAN A1S3

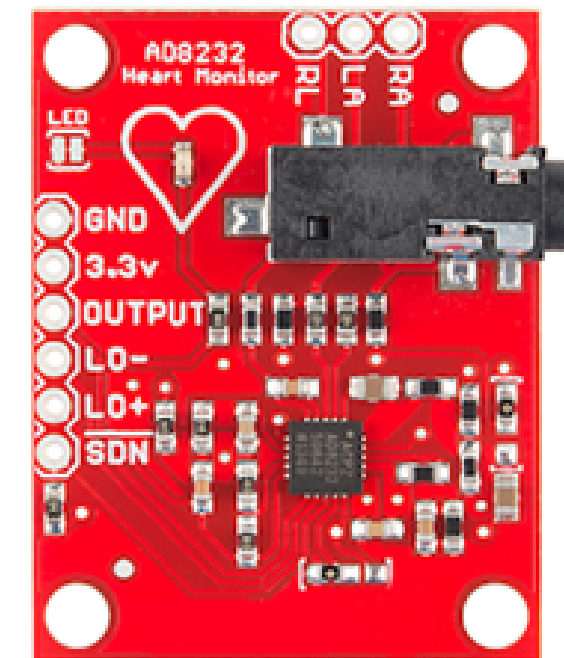
Sensor Sharp GP2Y0A41SK0F



Sensor Encoder AS5600

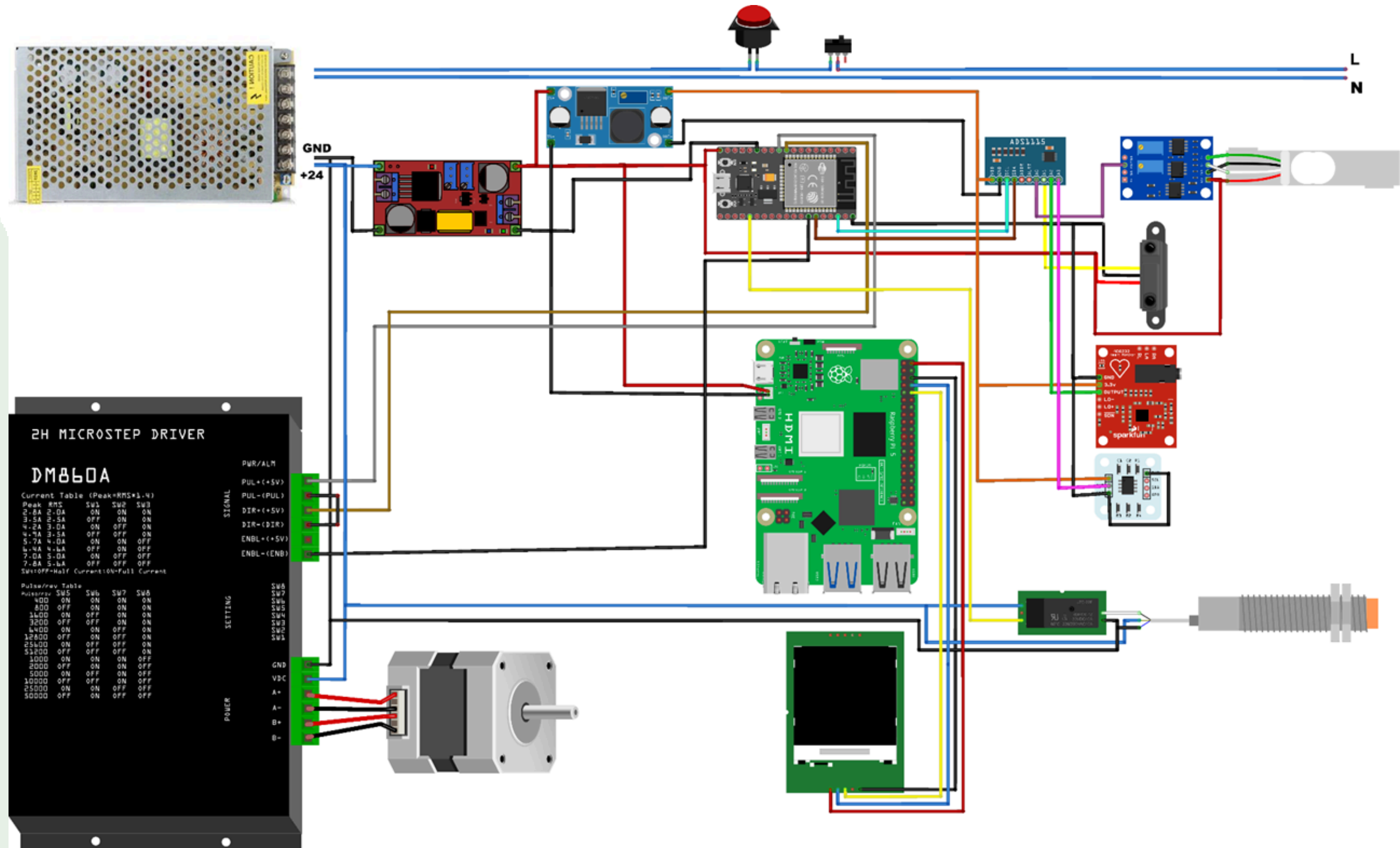


Sensor EMG AD8232



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Electrónico-Circuito electrónico



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Electrónico-Diseño PCB

Cálculo ancho de pistas

$$A = \left(\frac{I}{(k \cdot (\Delta T)^b)} \right)^{1/c} \quad (1)$$

$$W = \frac{A}{(t \cdot 1.378) [\text{mils/oz}]} \quad (2)$$

Línea 24V

$$W = 0.044 [\text{mm}]$$

Línea 5V

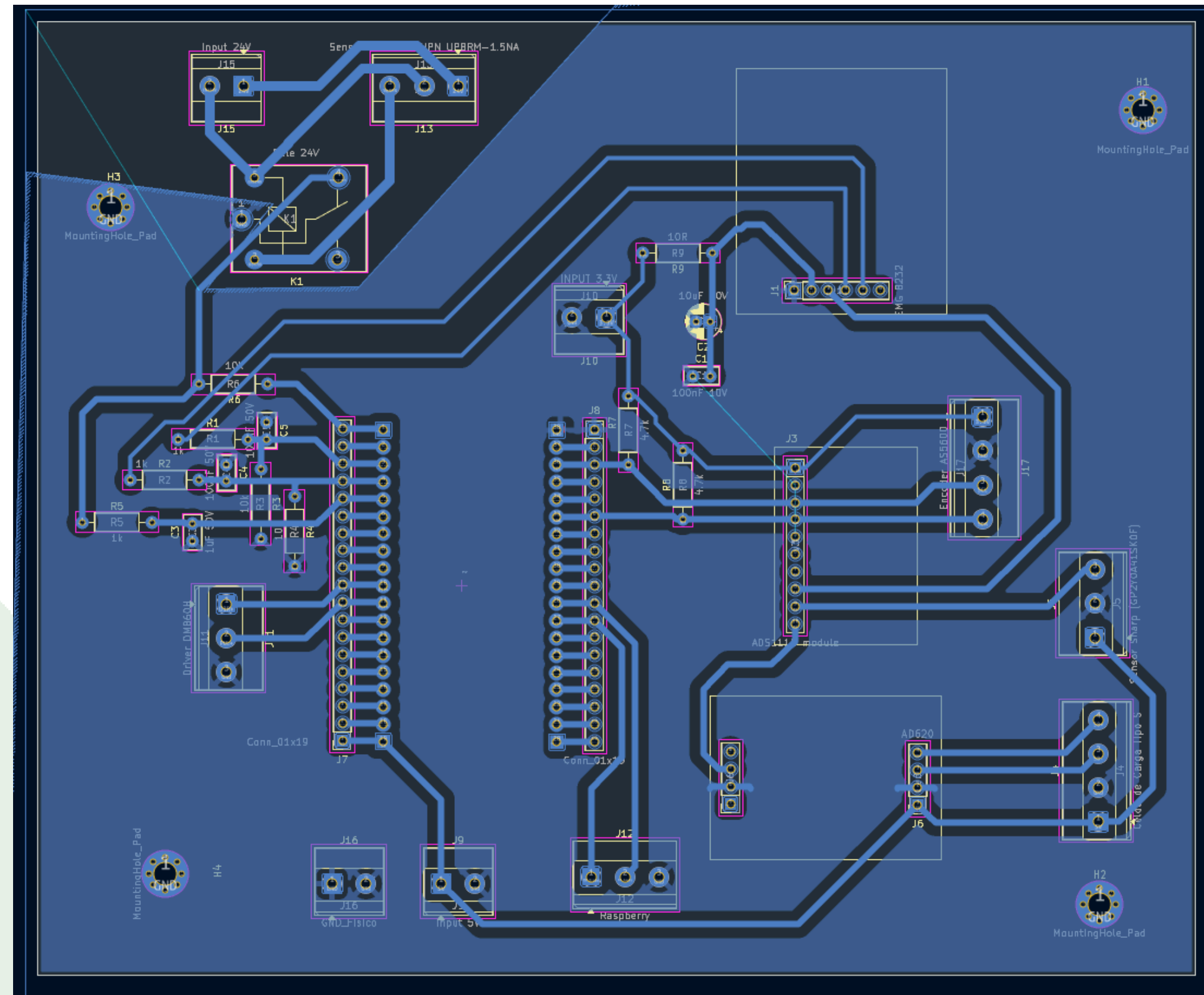
$$W = 0.134 [\text{mm}]$$

Línea 3.3V

$$W = 0.000313 [\text{mm}]$$

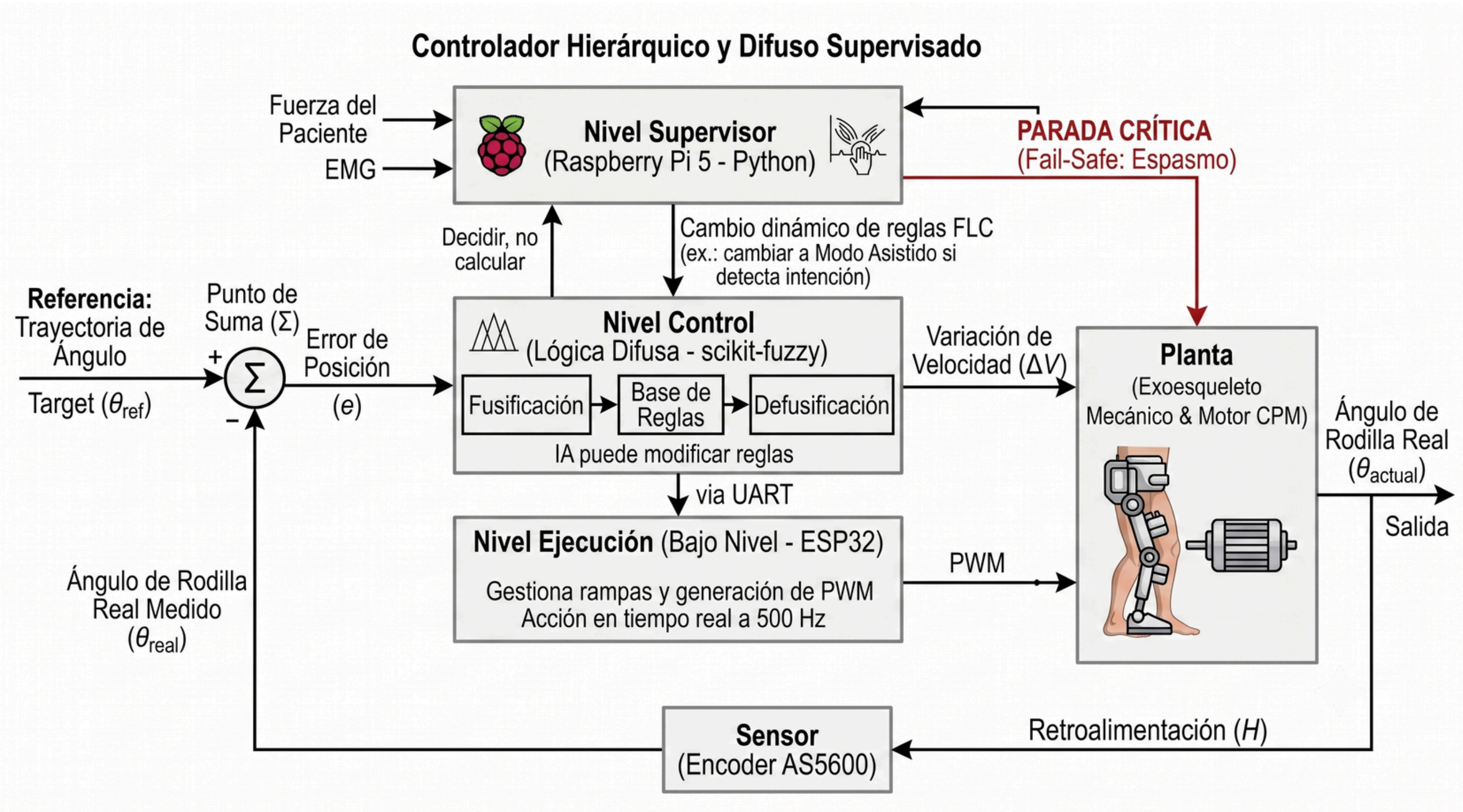
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño Electrónico-Diseño PCB



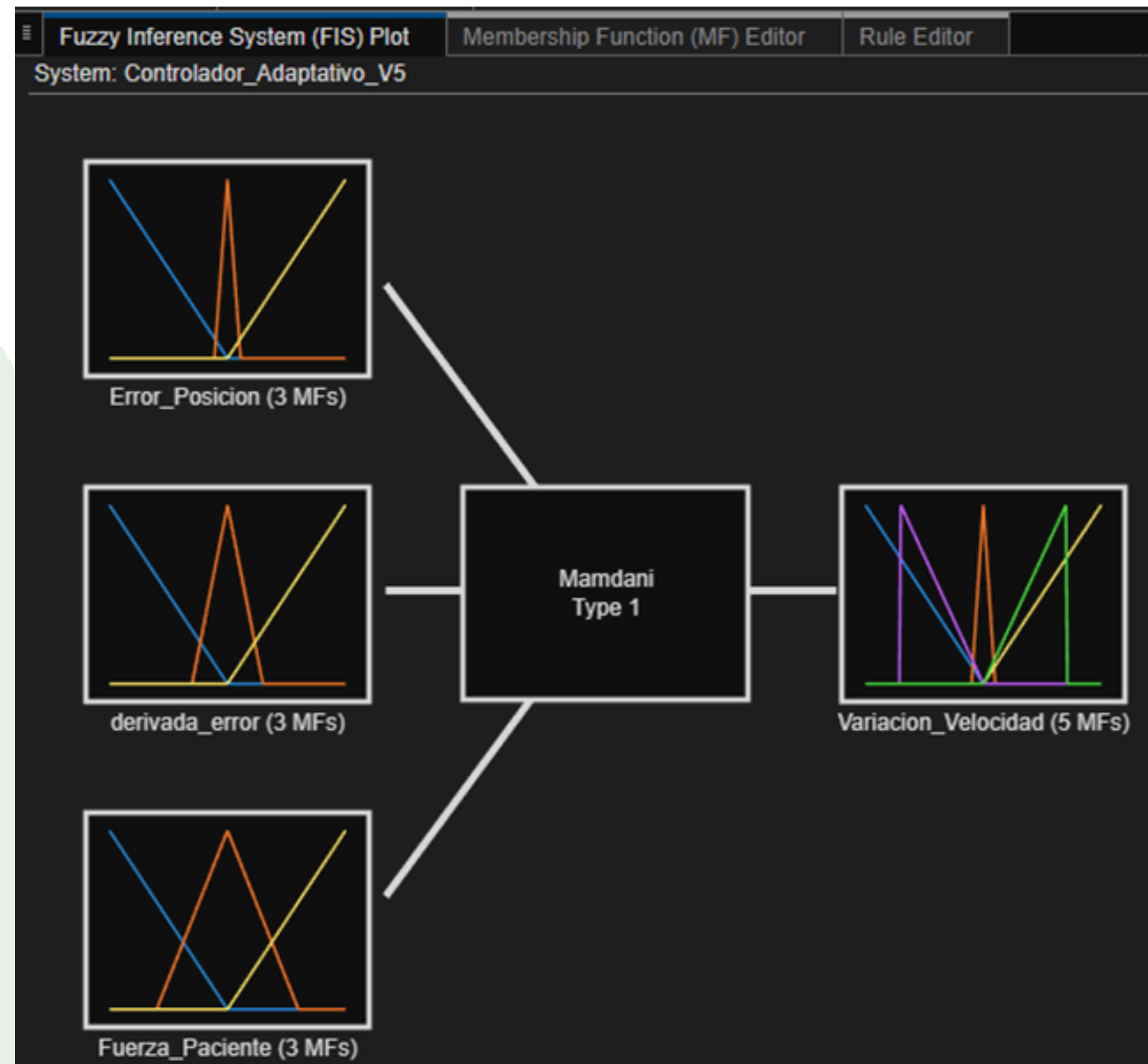
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Sistema de control y procesamiento-Diseño de control



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

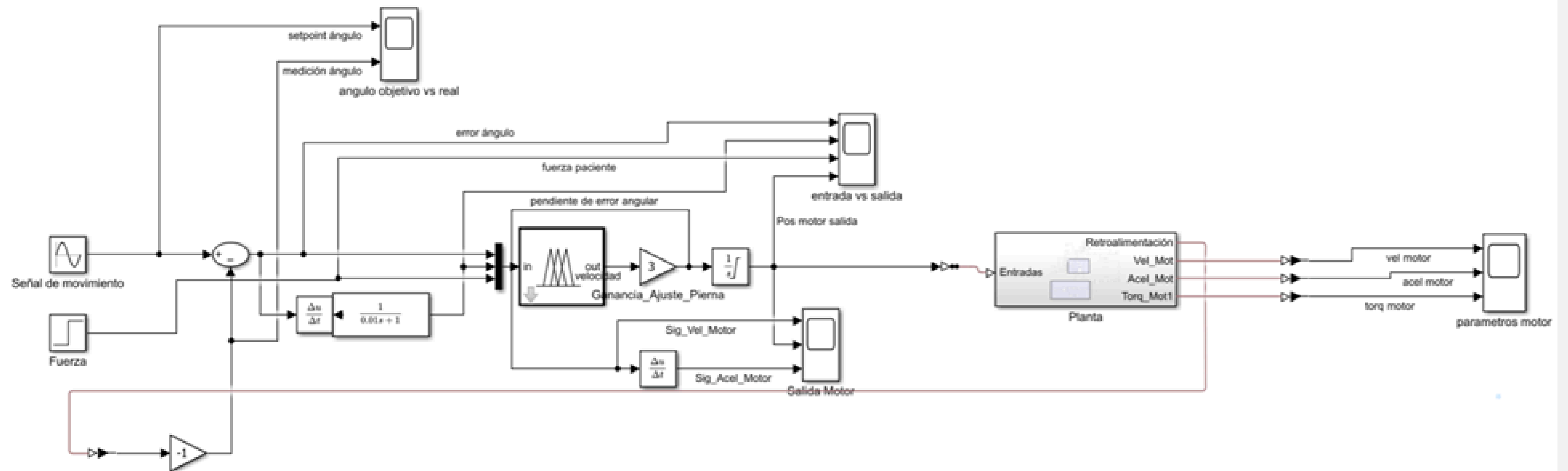
Sistema de control y procesamiento-Controlador Fuzzy



- Tipo Mamdani
- 27 reglas
- 3 entradas
- 1 salida

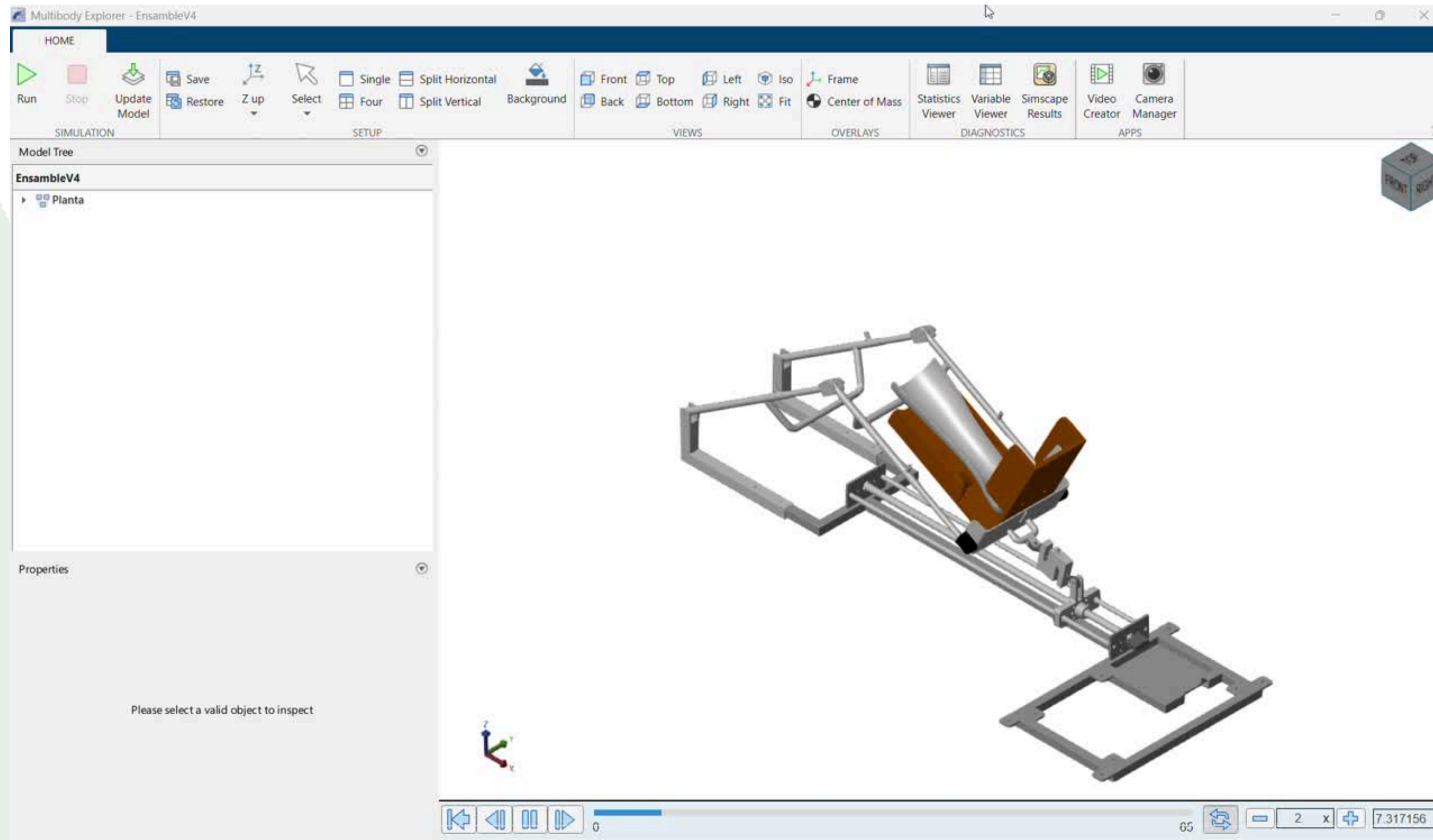
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Sistema de control y procesamiento-Lazo de control Simulink



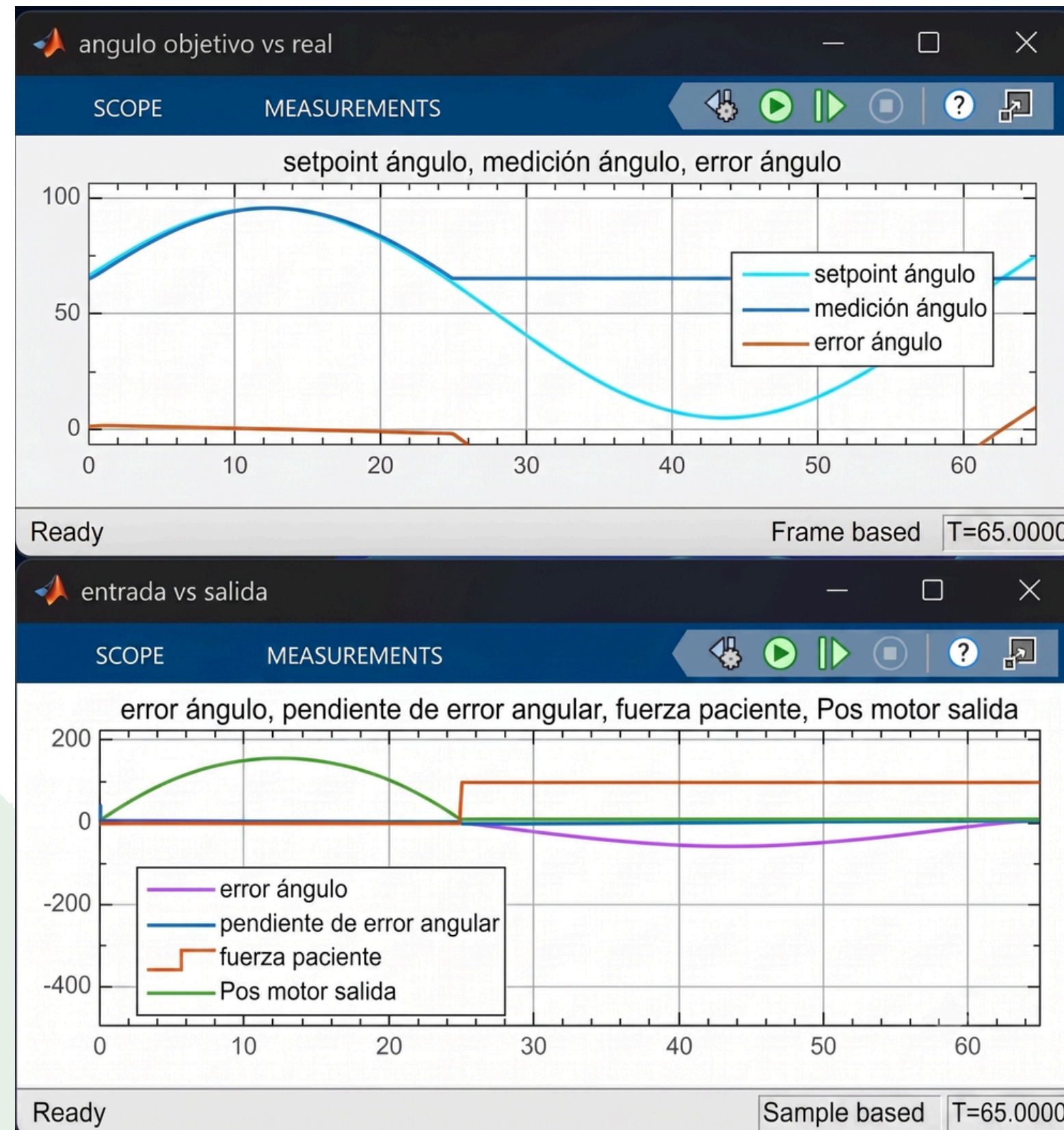
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Sistema de control y procesamiento-Simulación Multibody



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

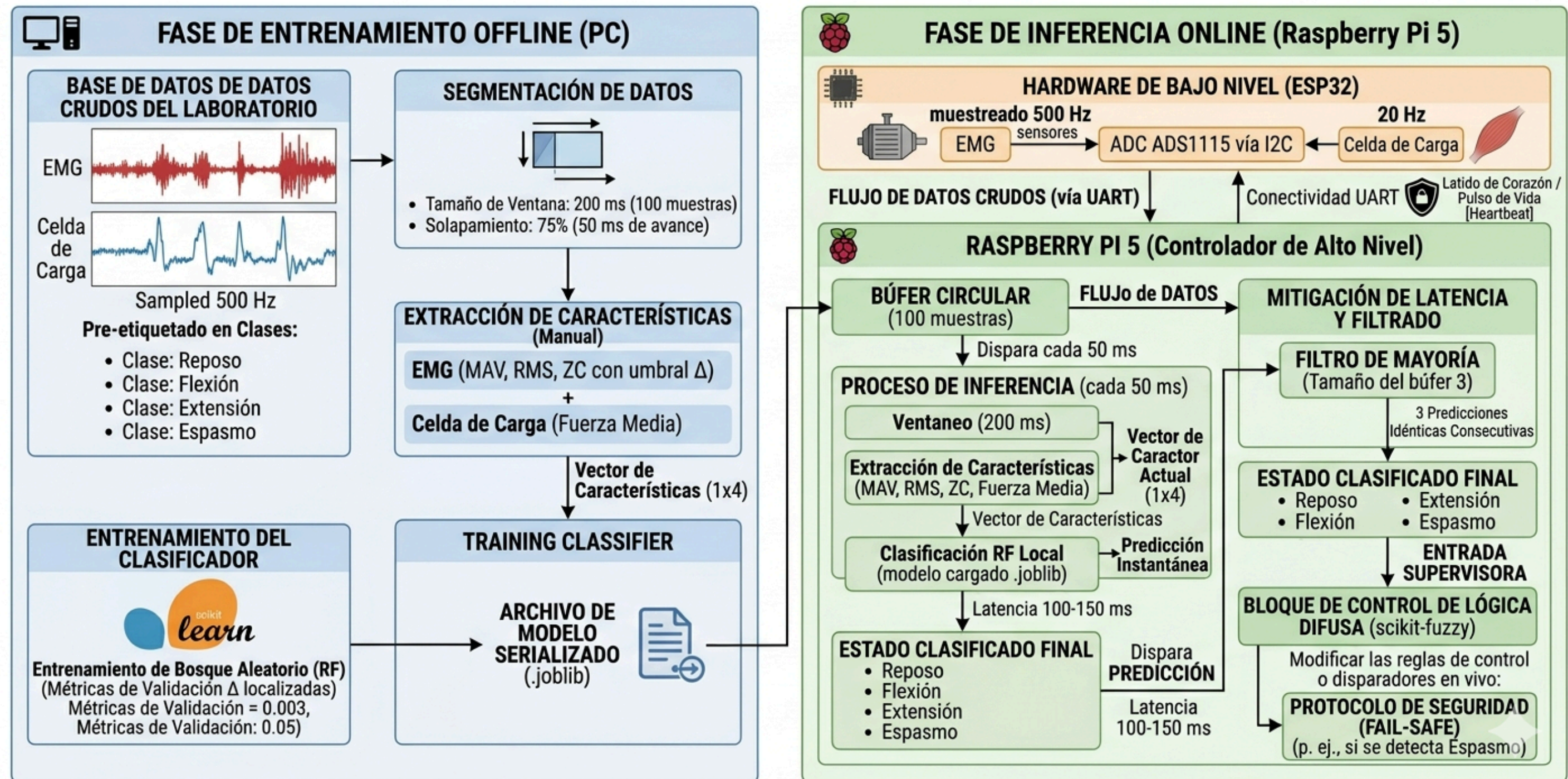
Sistema de control y procesamiento-Gráficas de control



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

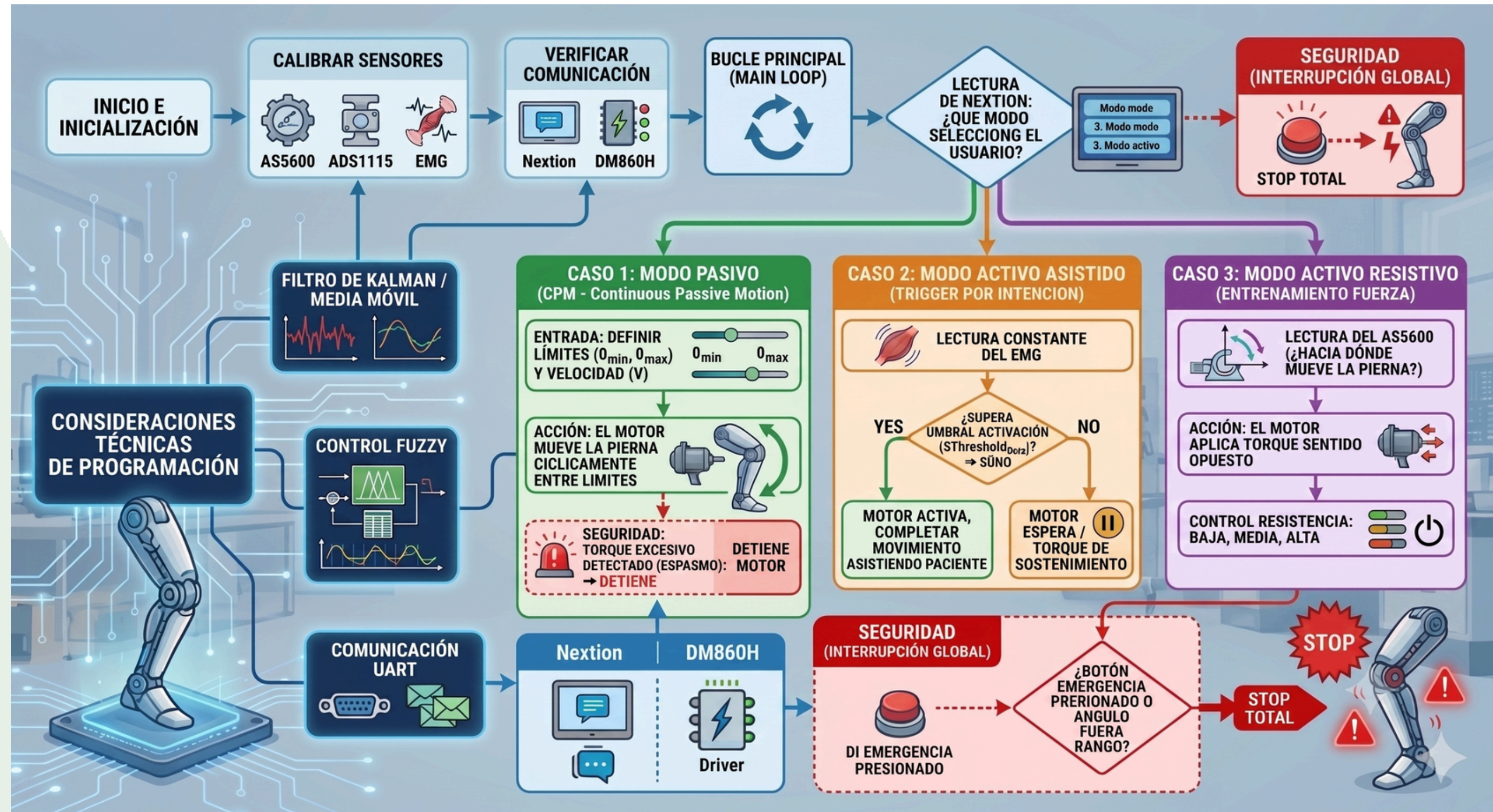
Sistema de control y procesamiento-Flujo de Trabajo IA

FLUJO DE TRABAJO DE IA PARA EL EXOESQUELETO DE REHABILITACIÓN DE RODILLA



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño de software-Flujo de control



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Diseño de software-Interfaz gráfica

Pantalla HMI Nextion Basic

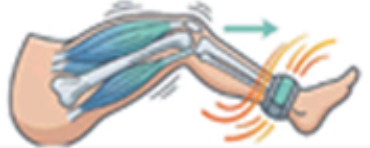
SISTEMA DE REHABILITACIÓN DE RODILLA



MENÚ







DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

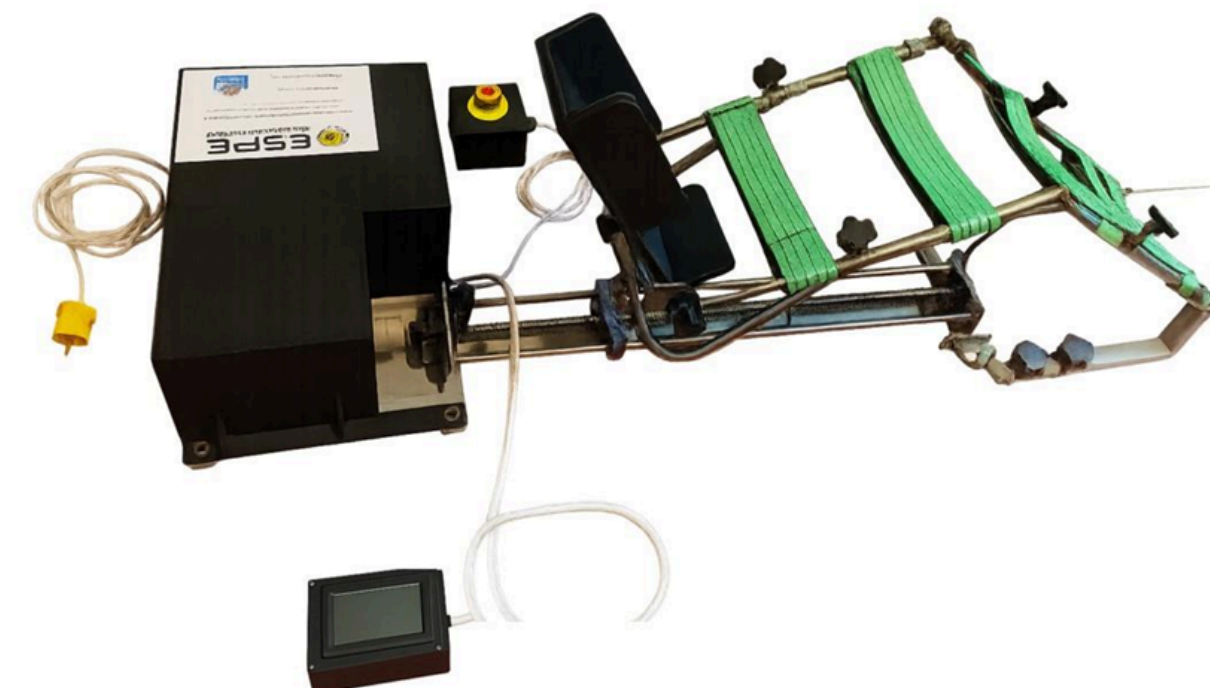
Diseño de software-Interfaz gráfica

Node-Red



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Implementación



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Implementación-Modos de operación

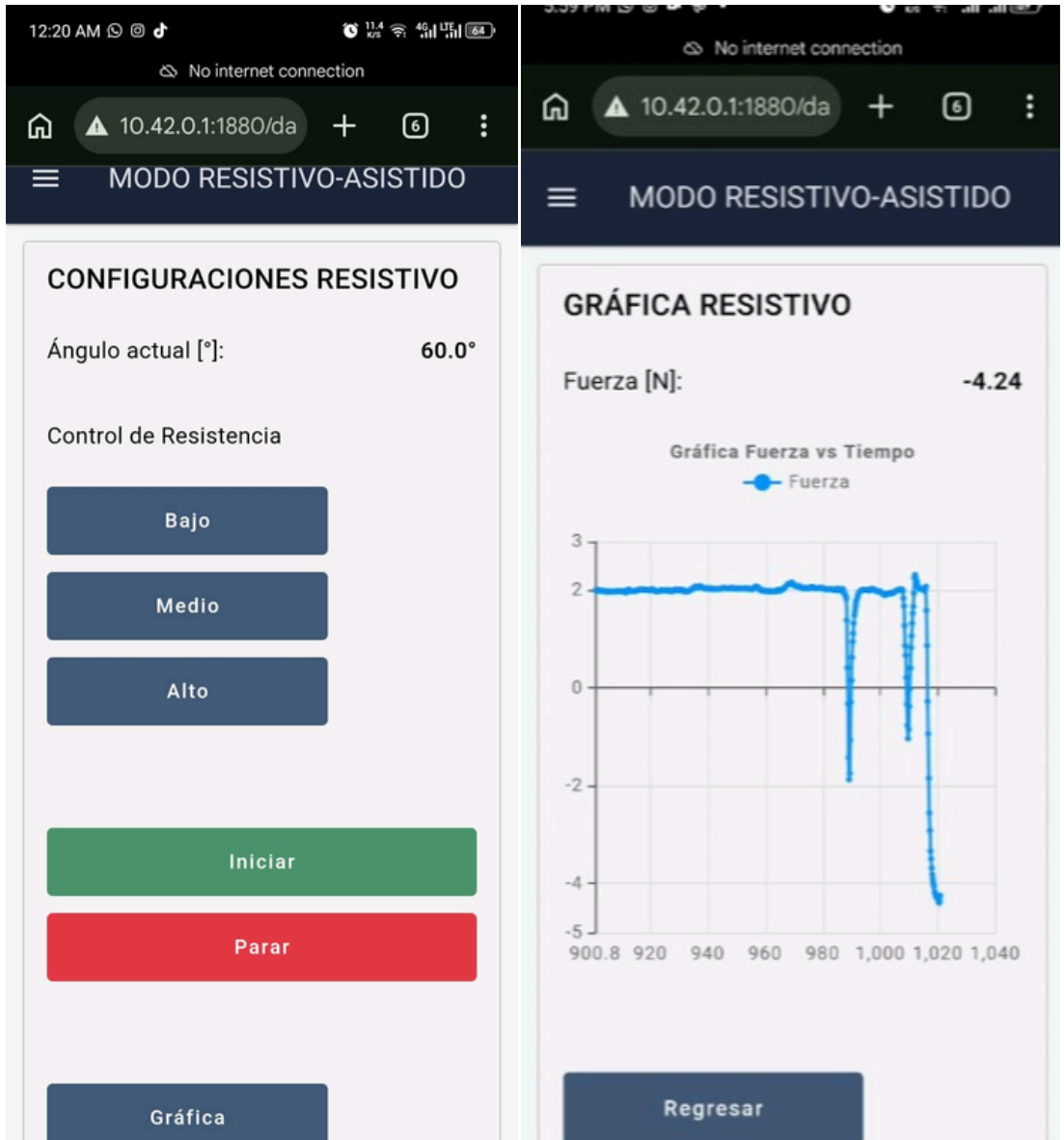
Modo Pasivo



Modo Activo-Asistido



Modo Resistivo-Asistido



PRUEBAS Y RESULTADOS

Validación de la comunicación del sistema distribuido Node Red, HMI, Raspberry Pi 5, ESP32



- UART ESP32-RPi5: 115200 baudios, 25 Hz
- HMI Nextion-RPi5: 9600 baudios, 5 Hz
- RPi5 - Node-RED con MQTT : telemetría remota funcional

PRUEBAS Y RESULTADOS

MODOS PASIVO

Error de posicionamiento promedio: 2 grados

Tolerancia clínica: $\pm 2-3$ grados

Fuerza alta (>7 kg) genera detención inmediata (regla fuzzy)



PRUEBAS Y RESULTADOS

MODO ACTIVO

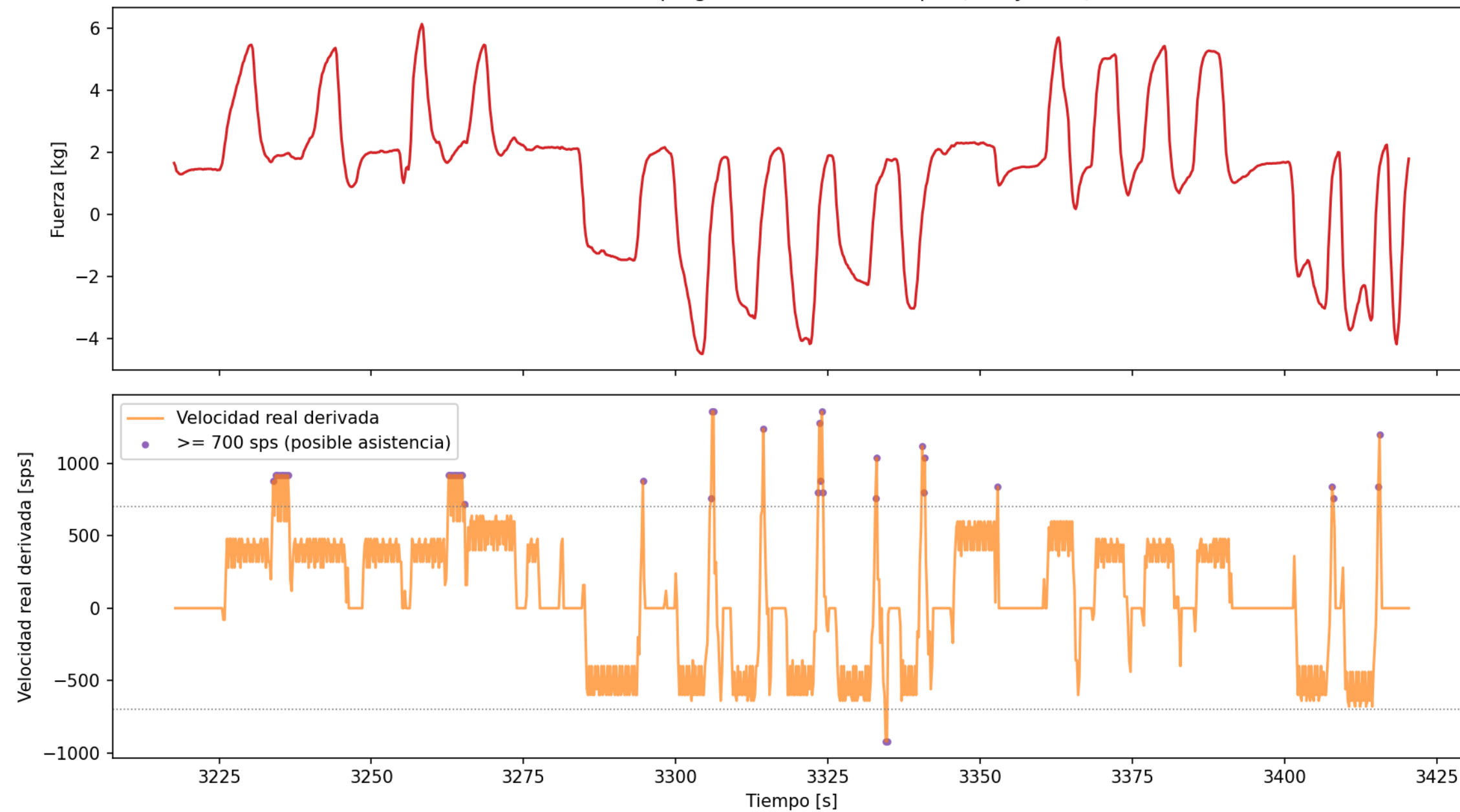
Fuerza vs vel_motor

$r=0.54$ extensión

$r=0.25$ flexión

latencia parada 31.61 ms

ACTIVO - fuerza progresiva + fuerza abrupta (EXT y FLEX)



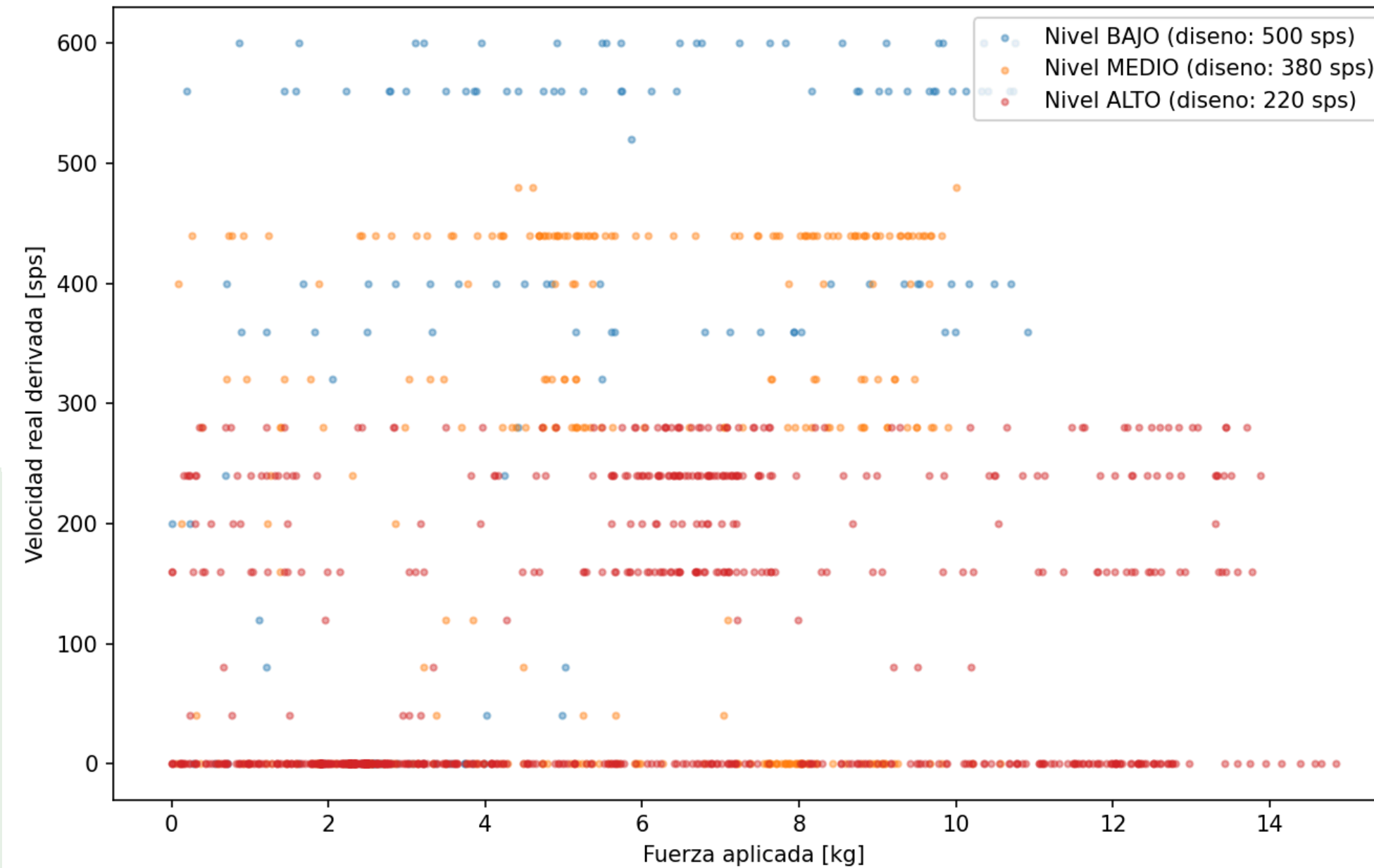
PRUEBAS Y RESULTADOS

MODO RESISTIVO

(pasos/s):

- BAJO 600
- MEDIO 480
- ALTO 280

RESISTIVO - Fuerza vs Velocidad real, comparacion BAJO/MEDIO/ALTO



PRUEBAS Y RESULTADOS

CLASIFICADOR IA: OFFLINE VS TIEMPO REAL

- Offline (validación cruzada): 91.83%
- Tiempo real (5.684 muestras etiquetadas en vivo): 57.7%
- Por modo: PASIVO 68.4%, ACTIVO 73.9%, RESISTIVO 33.5%

AJUSTADO (+/-3 muestras)

Etiqueta real (ground_truth)	REPOSO	FLEXION	EXTENSION	ESPASMO	
REPOSO	1729	447	314	163	
FLEXION	118	726	121	232	
EXTENSION	273	273	736	262	
ESPASMO	24	132	45	89	
		REPOSO	FLEXION	EXTENSION	ESPASMO
		Prediccion IA (estado)			

Fuentes de error posibles:

- Ruido EMG real
- Variabilidad fisiológica
- Imprecisión del etiquetado manual

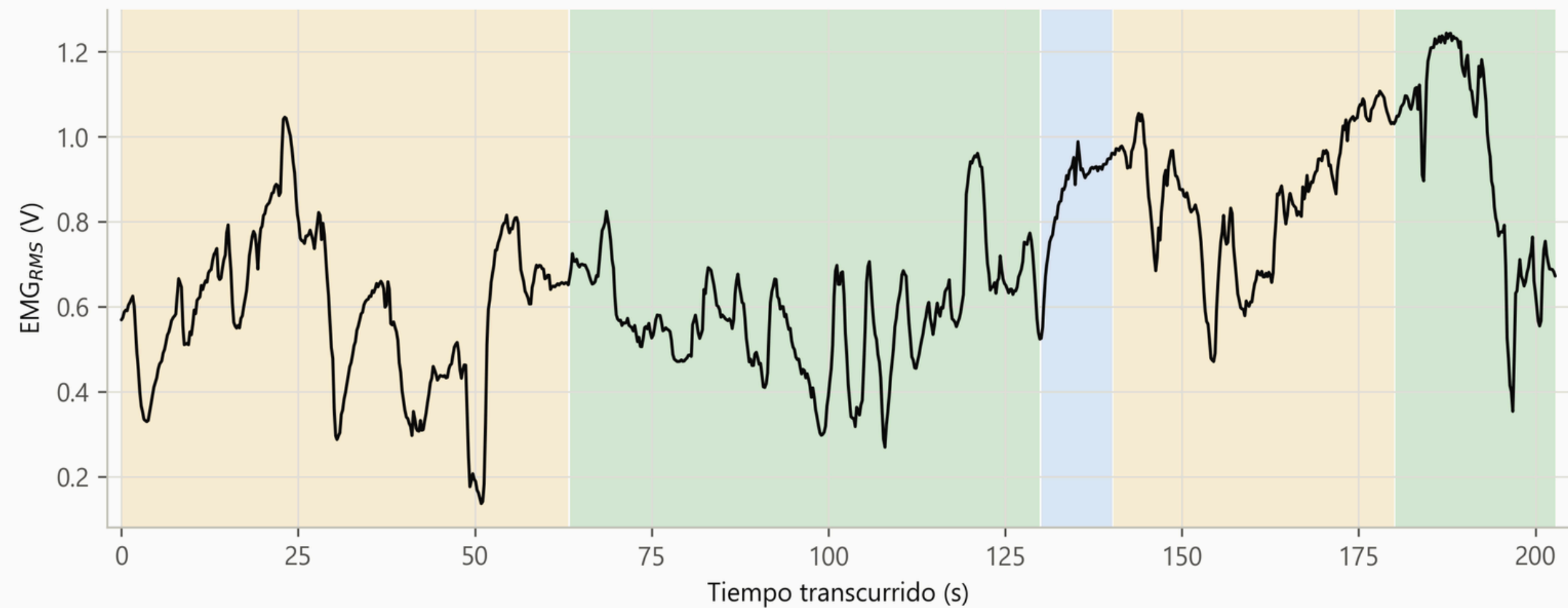
PRUEBAS Y RESULTADOS

Señal EMG

Caso 1 — Contracción voluntaria (modo ACTIVO): fuerza progresiva vs. abrupta

Señal EMG_{RMS} registrada; regiones de color = estado real (ground truth) del ciclo de movimiento.

REPOSO FLEXION EXTENSION



PRUEBAS Y RESULTADOS

Señal EMG

Caso 2 — Episodios de espasmo detectados (modo RESISTIVO)

Señal EMG_{RMS} registrada; regiones de color = estado real (ground truth), incl. episodios ESPASMO.

REPOSO FLEXION EXTENSION ESPASMO





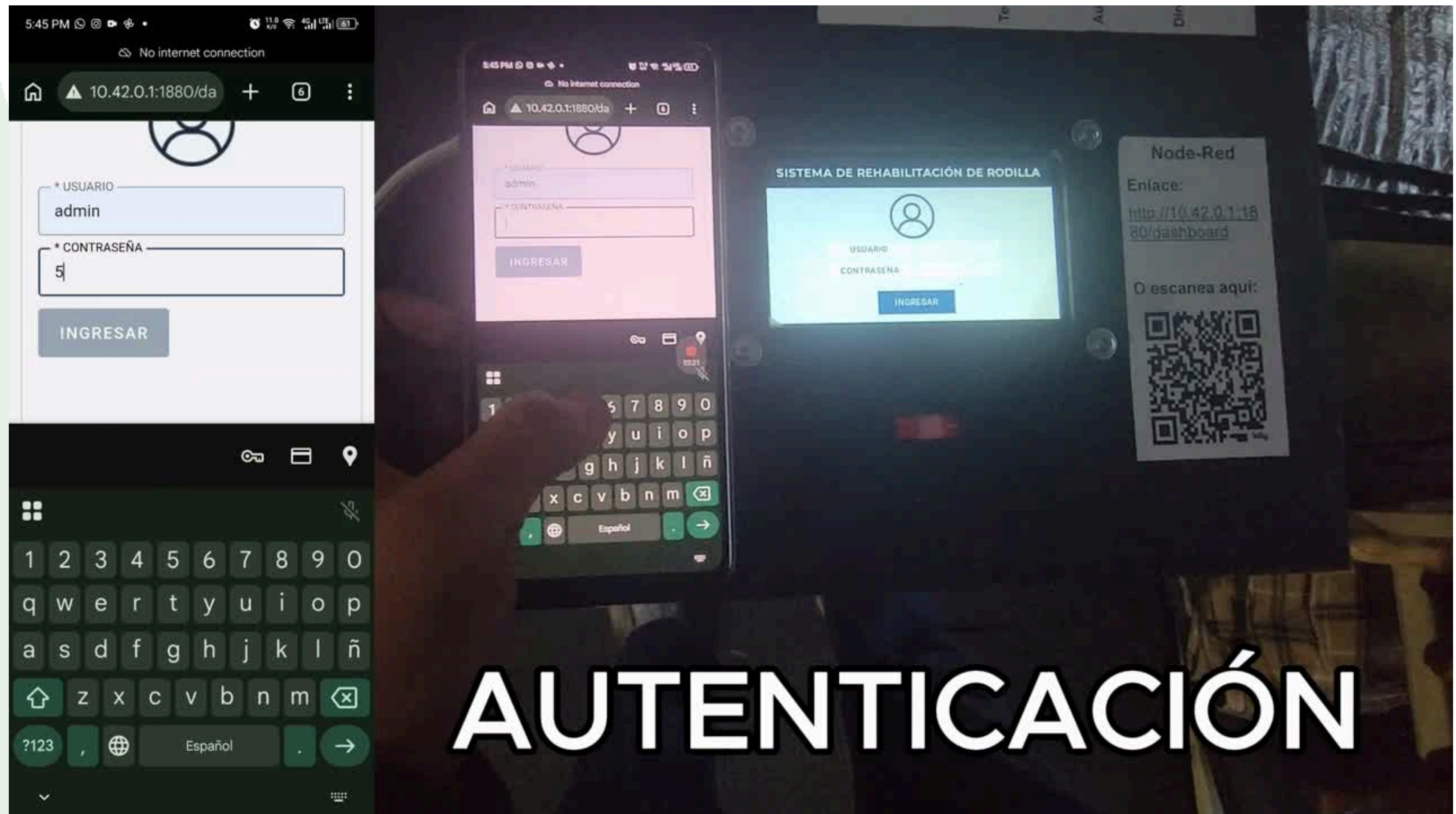
PRUEBAS Y RESULTADOS

Validación con fisioterapeuta

Parámetro Evaluado	Criterio de Validación	Diagnóstico Especialista
Modo Pasivo (CPM)	Correspondencia de trayectorias	Conforme / Seguro
Modo Activo	Sincronización de intención	Alineado a fases
Modo Resistivo	Oposición de carga controlada	Adecuado para tono
Seguridad Activa	Tiempo de parada ante espasmos	Excelente (Inmediato)

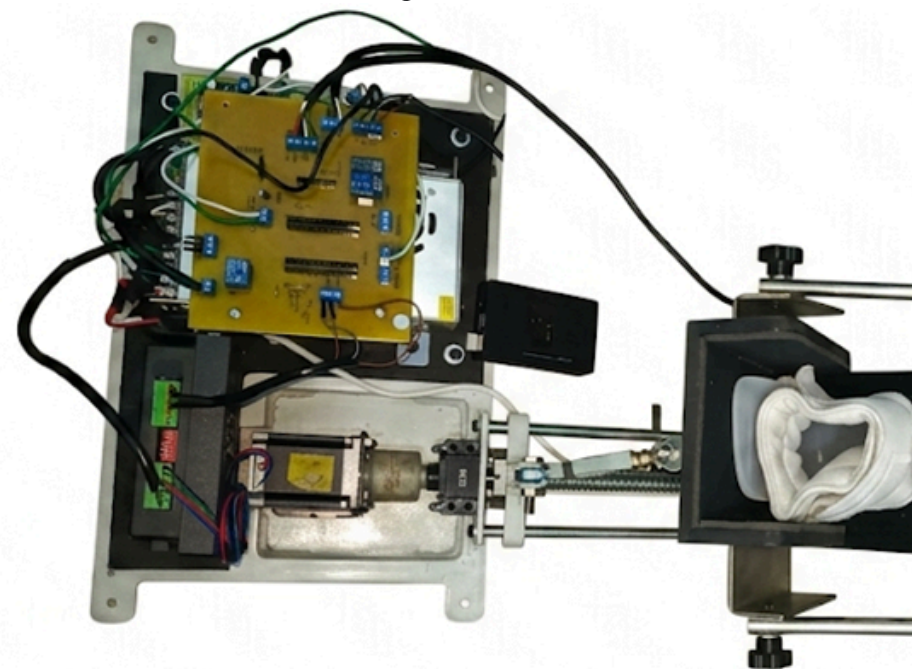
Validación de Correspondencia Clínica:	La especialista ratificó la correlación fisiológica de los 3 modos de operación (Pasivo, Activo y Resistivo) con las fases de rehabilitación biomecánica del paciente.
Adaptabilidad Biológica Dinámica:	Se determinó la necesidad de integrar una rutina de calibración previa de los umbrales de activación de fuerza, adaptándose a la masa muscular y sensibilidad de cada individuo para evitar falsos positivos.

VIDEO DE FUNCIONAMIENTO



CONCLUSIONES

Arquitectura híbrida ESP32+RPi5 viable y estable.



Modo Pasivo: error 2 grados, dentro de tolerancia clínica.



Modos Activo y Resistivo: velocidad proporcional al esfuerzo, niveles diferenciados.



Clasificador:
91.83% offline y 57.7% en tiempo real. Viable para pruebas en laboratorio.

AJUSTADO (+/-3 muestras)

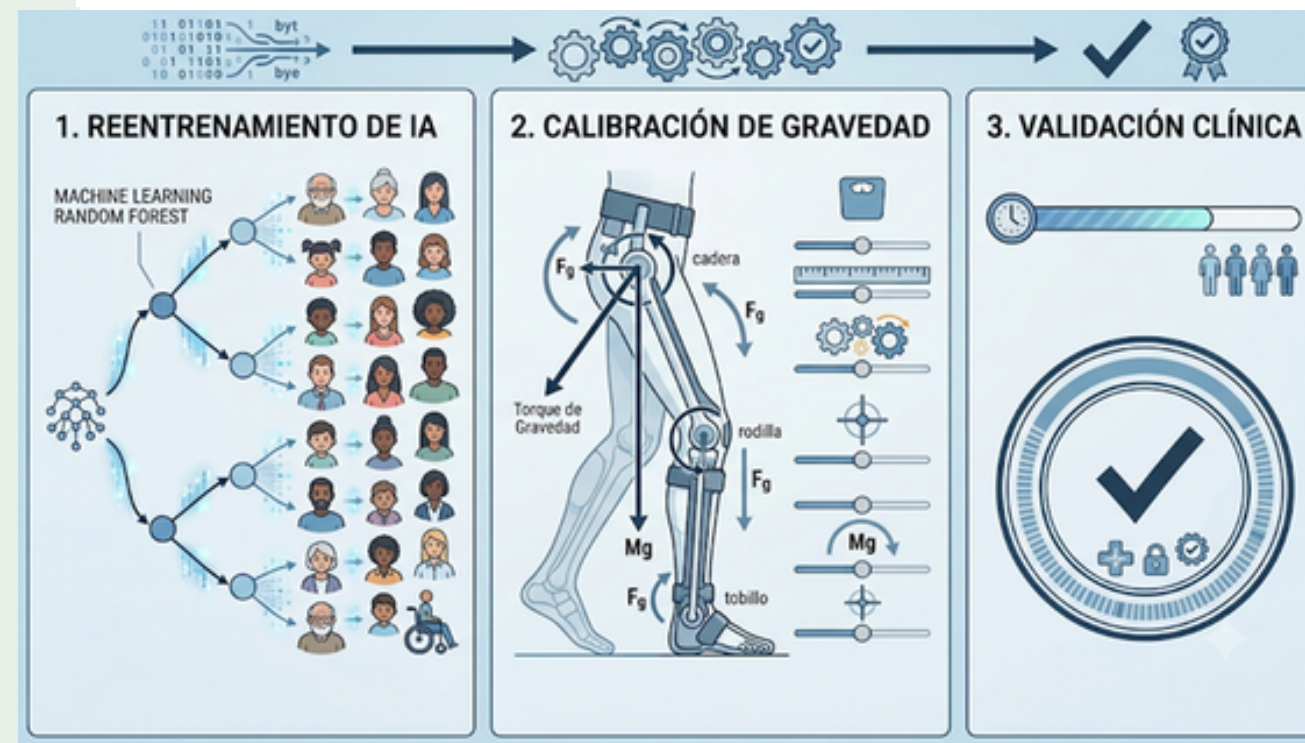
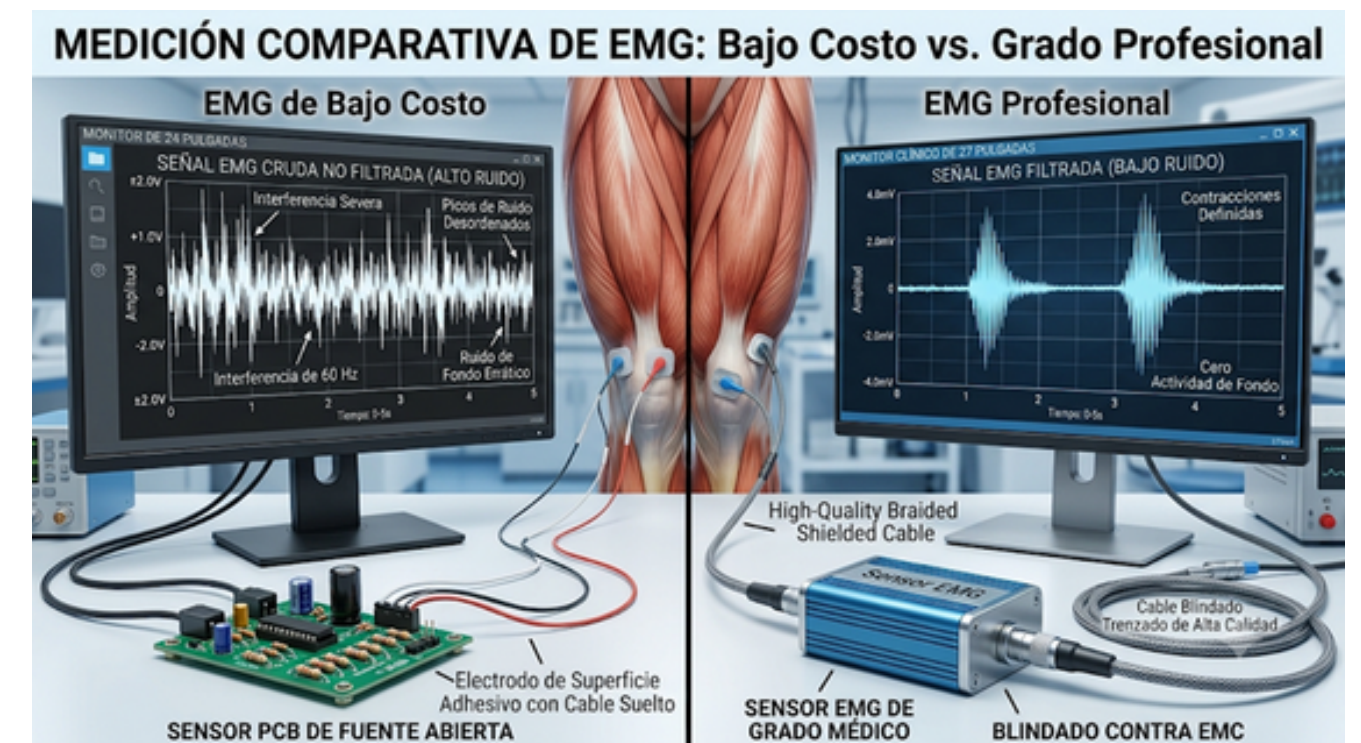
	REPOSO	FLEXION	EXTENSION	ESPASMO
REPOSO	1729	447	314	163
FLEXION	118	726	121	232
EXTENSION	273	273	736	262
ESPASMO	24	132	45	89

Etiqueta real (ground_truth)

Prediccion IA (estado)

TRABAJO A FUTURO

- Optimización del modelo de IA mediante el reentrenamiento multi-sujeto para ampliar y diversificar el espectro de perfiles
- Modelo de compensación de gravedad personalizado mediante calibración individual por paciente.
- Mejora de los elementos de instrumentación.
- Validación clínica: estudio piloto 5 a 10 pacientes + IEC 80601-2-78



REFERENCIAS

- Barrera Sánchez, A., Blanco Ortega, A., Martínez Rayón, E., Gómez Becerra, F. A., Abúndez Pliego, A., Campos Amezcua, R., & Guzmán Valdivia, C. H. (2022). State of the Art Review of Active and Passive Knee Orthoses. In *Machines* (Vol. 10, Number 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/machines10100865>
- Lee, M. C., Pan, C. T., Huang, J. S., Hoe, Z. Y., & Hwang, Y. M. (2025). Integrated Lower Limb Robotic Orthosis with Embedded Highly Oriented Electrospinning Sensors by Fuzzy Logic-Based Gait Phase Detection and Motion Control. *Sensors*, 25(5). <https://doi.org/10.3390/s25051606>
- Nicora, G., Pe, S., Santangelo, G., Billeci, L., Aprile, I. G., Germanotta, M., Bellazzi, R., Parimbelli, E., & Quaglini, S. (2025). Systematic review of AI/ML applications in multi-domain robotic rehabilitation: trends, gaps, and future directions. In *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* (Vol. 22, Number 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01605-z>
- Pachacama, M. (2025). Diseño y construcción de un prototipo de rehabilitación automática mediante la implementación de una estructura mecatrónica de un solo grado de libertad para el movimiento pasivo continuo de extensión y flexión de la rodilla.
- Triwiyanto, T., Caesarendra, W., Abdullayev, V., Ahmed, A. A., & Herianto, H. (2023). Single Lead EMG signal to Control an Upper Limb Exoskeleton Using Embedded Machine Learning on Raspberry Pi. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 4(1). <https://doi.org/10.18196/jrc.v4.i1.17364>
- Wu, H., Chen, W., Tuo, L., Ren, J., Ju, L., Hu, X., Shao, Y., Shi, D., Ruan, L., Huang, Y., Zhang, B., Wang, K., Feng, Y., & Zhang, W. (2026). A Hybrid Assistive-Resistive Isokinetic Training Robot for Full-cycle Knee Rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2026.3661538>



COMENTARIOS

Y

PREGUNTAS

**GRACIAS
TOTALES**