



UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

ENTREGABLE 7

Integrantes:

Almeyda Ochoa, Renato
Arrunategui Vila, Joaquin Alfredo
Campos Zapata, Angélica Gabriela
Castro Lozano, Criss Susan
Castro Saenz, Sarai Louise
Chavesta Plasencia, Ricardo Junior

Docente:

Juan Manuel Zuñiga

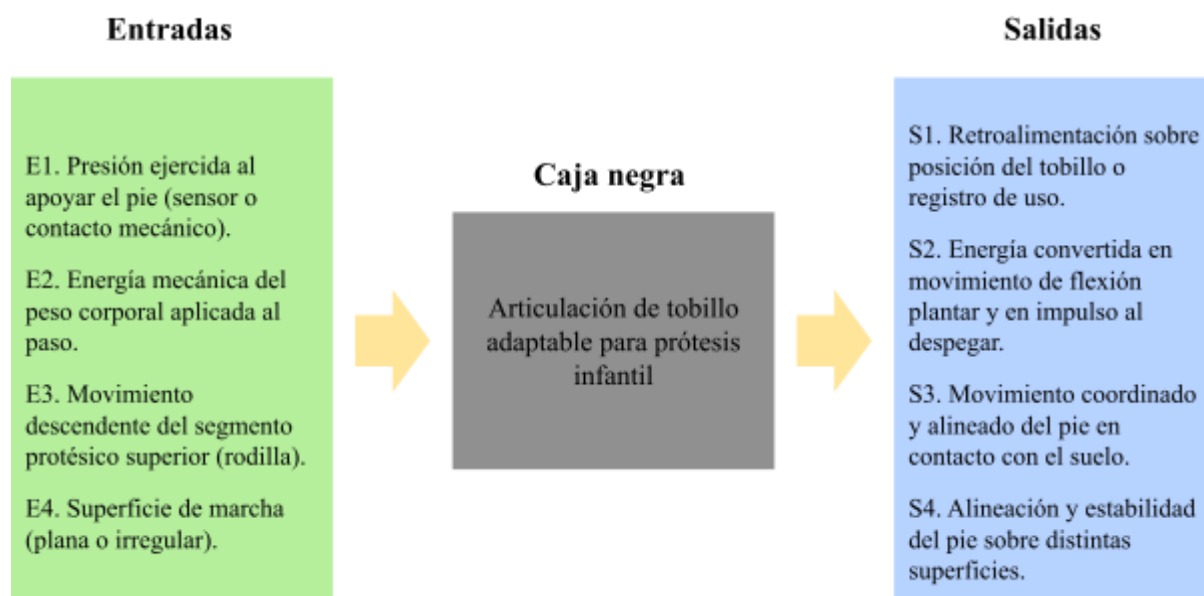
Curso:

Fundamentos de Biodiseño

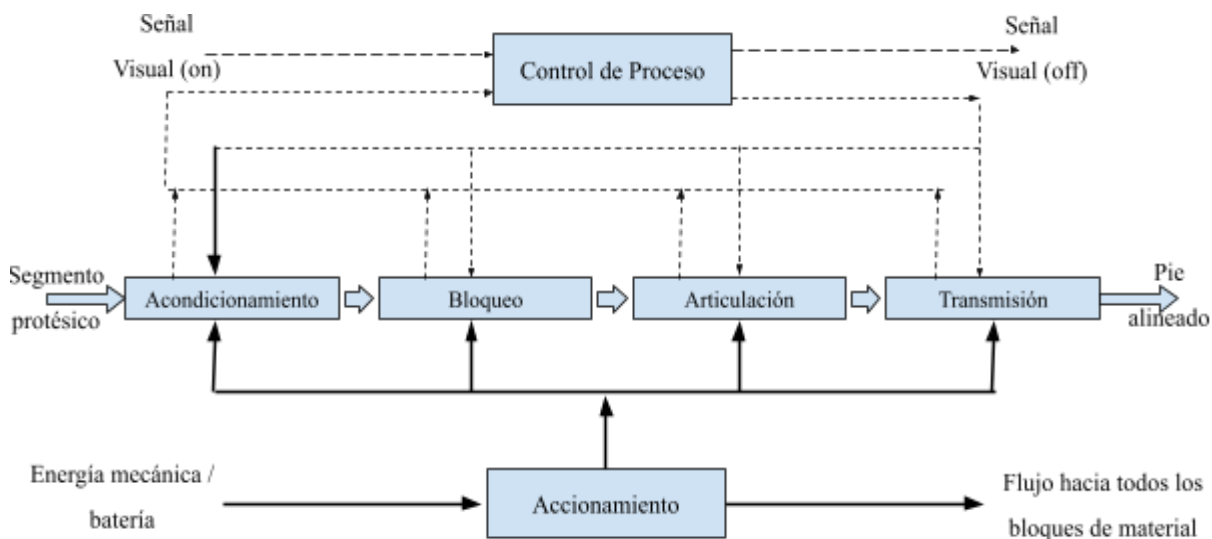
Checkpoint 3 – Architecture

1. Modelos y principios de solución

BLACK BOX



ESQUEMA DE FUNCIONES



MATRIZ MORFOLÓGICA

En la matriz morfológica se evaluaron las funciones principales del sistema (encaje, articulación, transmisión, control y energía), proponiendo distintas soluciones posibles para cada una.

A partir de estas combinaciones se generaron tres alternativas (A, B y C), que fueron analizadas y comparadas posteriormente.

Alternativas Funciones	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
F1 – Acondicionamiento del encaje	Encaje rígido impreso en PLA	Encaje flexible de silicona	Encaje modular con neopreno
F2 – Bloqueo y liberación	Mecanismo con resorte	Servo con sensor de presión (HX711)	Sistema electromagnético
F3 – Articulación adaptable	Bisagra simple	Servo controlado por ESP32	Articulación con elastómero variable
F4 – Transmisión del movimiento	Cable de acero trenzado	Eje mecánico articulado	Banda flexible de polímero
F5 – Control del proceso (ESP32)	Control ON/OFF	ESP32 con Bluetooth clásico	Control automático por ciclo de marcha
F6 – Accionamiento	Energía corporal	Batería Li-ion 3.7V	Mixta (energía corporal + batería)

● Solución A → Propuesta final seleccionada

● Solución B → Alternativa de respaldo

De la matriz se derivaron tres combinaciones funcionales:

- Alternativa 1: diseño básico con resorte mecánico.
- Alternativa 2: diseño semiautomático con servo y sensor HX711 (seleccionada).
- Alternativa 3: diseño avanzado con control electromagnético y materiales adaptativos.

TABLA DE VALORACIÓN:

Para determinar la alternativa más adecuada, se establecieron criterios técnicos, económicos y de usabilidad, evaluados en una escala de 0 a 4 (0 = deficiente, 4 = excelente).

Los criterios se basaron en viabilidad, costo, compatibilidad y grado de innovación.

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Facilidad de uso(colocación/ajuste)	3	4	3
Potabilidad/peso	3	4	3
Costo de tecnología	4	3	1
Costo de operación	4	3	2
Viabilidad de fabricación local	4	4	2
Seguridad / fail- safe	3	4	3

Tamaño / integración con calzado	2	3	2
Nivel de innovación	1	3	4
Disponibilidad de repuestos	4	4	2
Posibilidad de automatización	0	3	4
Compatibilidad con prótesis actual	3	4	3
Durabilidad de exteriores	3	3	3
Suma total	34	42	32

Los resultados indican que la Alternativa 2 es la más equilibrada (42 puntos), combinando facilidad de fabricación, costo accesible y compatibilidad con la prótesis actual de Oriana. La Alternativa 1 es más económica pero menos funcional, mientras que la Alternativa 3 presenta mayor innovación a un costo significativamente más alto.

2. Espacio de solución

2.1. Integración del sistema (Componentes principales y su función)

Encaje flexible de silicona:

Actúa como interfaz directa entre el muñón y la prótesis. Su función principal es distribuir uniformemente las presiones, mejorar la comodidad del uso prolongado y absorber pequeños impactos durante la marcha. Además, su elasticidad natural aporta un efecto de retorno pasivo que ayuda al sistema a recuperar la posición neutra del tobillo tras cada paso, reduciendo la carga del servo.

Sensor de presión + HX711 (integrado con el servo en la suela o placa plantar):

Detectar el contacto plantar y la distribución de carga durante las fases de apoyo y despegue de la marcha. Esta información se utiliza como señal de activación para controlar el servo de tobillo en el momento adecuado.

ESP32 con Bluetooth clásico:

Es el centro de procesamiento y control del sistema. Recibe las señales de los sensores (vía HX711), ejecuta la lógica de control, genera las señales PWM para el servo y permite comunicación inalámbrica con dispositivos externos.

Servo motor:

Actuar como mecanismo activo de flexión plantar y dorsiflexión del tobillo protésico, aportando asistencia durante la fase de despegue y control en la fase de apoyo.

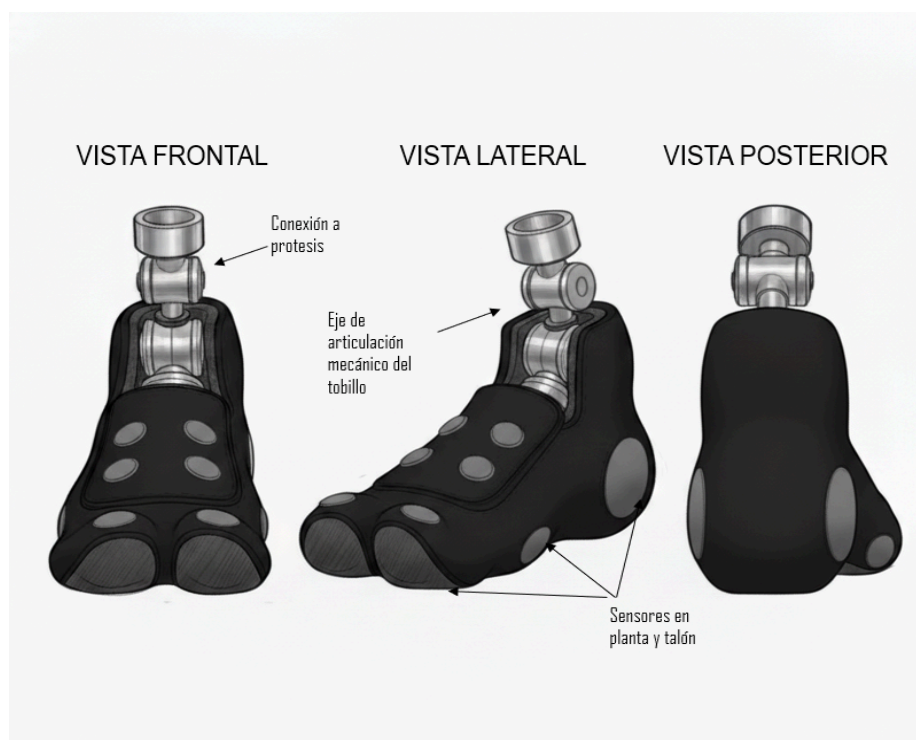
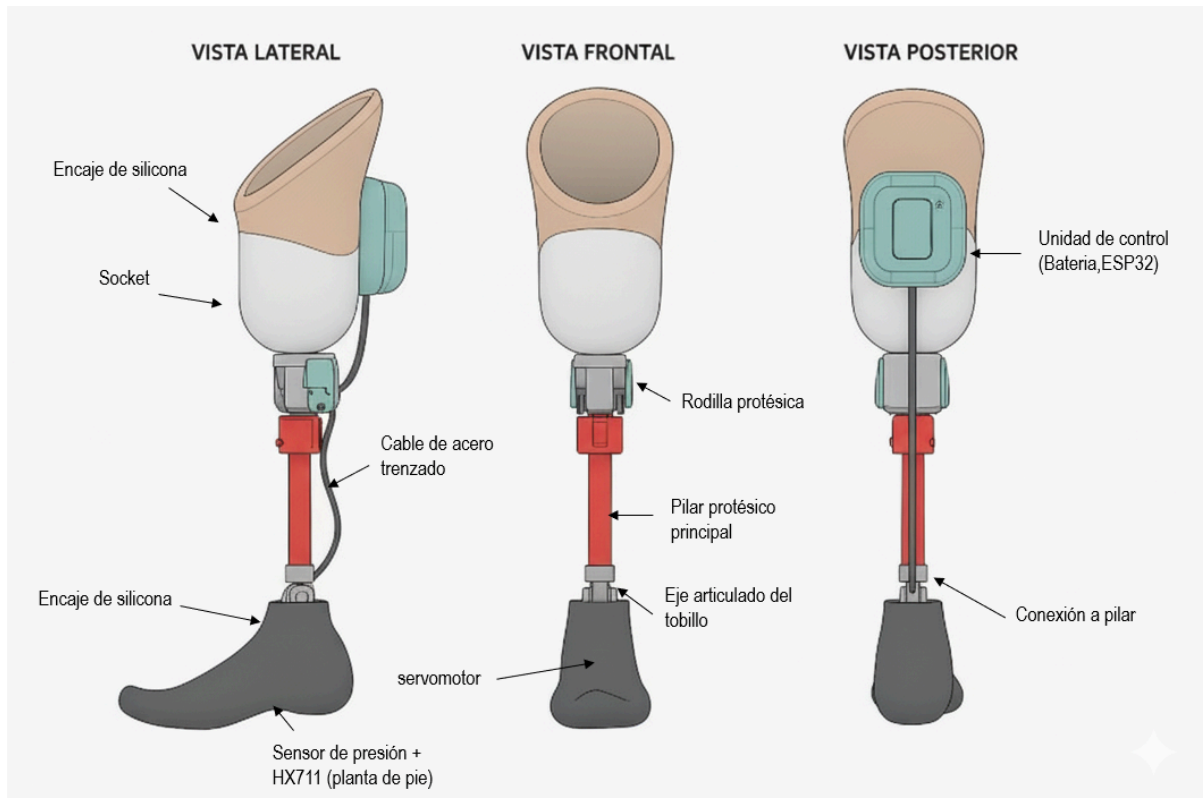
Cable de acero trenzado:

Transmitir el movimiento generado por el servo hacia la articulación del tobillo de forma eficiente, flexible y ligera.

Batería Li-ion 3.7 V:

Proveer la energía necesaria para el funcionamiento del ESP32, HX711 y servo motor.

2.2. Boceto conceptual del prototipado:



2.3 Justificación del diseño y componentes:

Confort y adaptación:

El uso de un encaje flexible de silicona proporciona un ajuste anatómico más preciso, distribuye uniformemente las presiones sobre el muñón y reduce puntos de fricción. Esto es especialmente relevante en pacientes pediátricos, ya que presentan variaciones de volumen y mayor sensibilidad cutánea. Además, el encaje contribuye de forma pasiva al retorno de la articulación, reduciendo la demanda energética del sistema.

Control inteligente y adaptable mediante ESP32:

ESP32 permite programar perfiles de asistencia (entrenamiento, apoyo diario, modo seguro) y ajustar parámetros vía Bluetooth sin intervención mecánica. Esto es ideal para una niña que progresa en rehabilitación.

Asistencia mecánica eficiente y segura:

La incorporación de un servo motor controlado por PWM permite aplicar par mecánico controlado en el momento exacto, favoreciendo la flexión plantar durante el despegue y ofreciendo estabilidad durante la fase de apoyo.

La transmisión mediante cable de acero trenzado traslada el movimiento del servo hacia el eje del tobillo, reduciendo el peso distal y manteniendo la agilidad del paso. Además, este mecanismo es compacto, de bajo mantenimiento y permite una fácil sustitución en caso de desgaste.

Optimización del peso y la distribución de componentes:

Ubicar el servo cerca del pilar y transmitir el movimiento mediante cable minimiza el peso en la parte distal de la prótesis. Esto mejora el control dinámico, reduce el gasto energético al caminar y evita sobrecargar la articulación de la cadera, algo especialmente importante en amputaciones transfemorales.

Seguridad funcional y redundancia pasiva:

El sistema integra topes mecánicos y la elasticidad del encaje como mecanismos de seguridad pasivos. En caso de pérdida de energía, error del microcontrolador o fallo del servo, el tobillo retorna automáticamente a una posición neutra, evitando movimientos bruscos o inestables que puedan provocar caídas.

Eficiencia energética y autonomía:

El control basado en eventos y activando el servo únicamente en momentos clave junto con el uso de una batería Li-ion de 3.7 V, permite un diseño compacto y

autónomo con una duración diaria adecuada, sin necesidad de grandes sistemas de alimentación.

Escalabilidad, mantenimiento y accesibilidad:

El uso de componentes ampliamente disponibles (ESP32, HX711, servos estándar) reduce costos, facilita el mantenimiento local y permite realizar mejoras progresivas sin rediseñar la estructura completa. Además, la modularidad del sistema hace posible reemplazar o actualizar elementos individuales conforme evolucionen las necesidades clínicas.

2.4 Descripción del uso:

I.-Contacto inicial (apoyo): las celdas de carga debajo del pie registran aumento de presión. HX711 convierte señal analógica a digital y la entrega al ESP32.

II.-Decisión (ESP32): compara la lectura con umbrales programados y el perfil de marcha activo. Si se detecta fase de apoyo/despegue programada, calcula la señal PWM adecuada.

III.-Actuación (impulso controlado): ESP32 envía PWM al servo (a través del driver si hace falta). El servo mueve la palanca o cable de acero para proporcionar dorsiflexión/plantar flexión asistida en el momento correcto.

IV.-Retorno y seguridad: el encaje de silicona, topes mecánicos y la propia geometría de la transmisión inducen retorno a posición neutra; si hay fallo o pérdida de energía el sistema queda en estado seguro (posición pasiva).

V.-Ciclo: el proceso se repite en cada paso; parámetros (umbral, tiempo, ángulo) se pueden ajustar vía Bluetooth.

3. Componentes de la prótesis

Para el desarrollo del sistema protésico pediátrico adaptativo destinado a Oriana, planteamos una combinación de componentes fabricados y componentes electrónicos adquiridos comercialmente, con la finalidad de optimizar los costos, la personalización y la precisión del dispositivo.

3.1 Pieza a fabricar:

- Estructura principal de la prótesis:

Conformada por el soporte encaje (socket), la unión intermedia y la carcasa externa de la prótesis. Estas piezas se diseñarán en CAD y se fabricarán mediante impresión 3D usando materiales biocompatibles y ligeros como el PLA reforzado o nylon con fibra de carbono. Este método de fabricación



permite la personalización anatómica según las medidas del muñón de Oriana, además facilita modificaciones conforme el crecimiento de la paciente.

- **Soporte o base de tobillo:**

Esta pieza mecánica conecta el encaje con el módulo de pie y se fabricará por mecanizado o corte láser, utilizando aluminio o acero inoxidable liviano para garantizar rigidez estructural y resistencia al impacto durante la marcha.

- **Cubiertas protectores y adaptadores modulares:**

Estas son piezas menores que tienen la función de proteger los sensores y permitir el ajuste de alineamientos, se fabricarán por impresión 3D o corte láser en acrílico o policarbonato.

3.2 Piezas a adquirir:

- **Sensores FSR:**

Sensores de presión colocados en la base de la prótesis para medir la distribución de carga y detectar la fase de apoyo durante la marcha.

- **Módulo ESP32:**

Microcontrolador encargado de recopilar los datos de los sensores, procesarlos y transmitirlos mediante Bluetooth o Wi-fi para el seguimiento médico.

- **Servo motor:**

Componente mecánico destinado a realizar microajustes en la alineación o simular el movimiento de flexión plantar/ dorsal en futuras versiones del prototipo.

Cuadro de Acciones y componentes a fabricar o adquirir:

Acción	Componente	Material	Justificación
Fabricar	Estructura principal (socket y carcasa)	PLA reforzado o nylon con fibra de carbono	Permite personalizar la forma del encaje al muñón de Oriana, es ligero, biocompatible y fácil de reemplazar conforme crezca. La impresión 3D facilita ajustes rápidos y económicos.
	Soporte del tobillo/ unión estructural	Aluminio o acero inoxidable liviano	Proporciona rigidez y estabilidad para soportar peso y movimiento. Resiste impactos y se adapta al terreno irregular donde vive la paciente.
	Cubierta protectora y adaptadores modulares	Acrílico o policarbonato	Protege sensores y electrónica del polvo, arena y humedad. Su bajo peso favorece la comodidad y movilidad.
Adquirir	Sensor FSR	Sensor electrónico comercial	Mide la presión y distribución de carga durante la marcha. Es un componente estandarizado, preciso y difícil de fabricar localmente.
	Módulo ESP32	Microcontrolador con Wi-Fi y Bluetooth integrados	Permite procesar y enviar datos de los sensores para el seguimiento médico. Es un módulo confiable, compacto y de bajo consumo energético.
	Servo motor	Aleación metálica y plásticos técnicos	Realiza microajustes de movimiento o alineación. Su precisión requiere tecnología comercial, no viable de fabricar artesanalmente.
	Tornillería y elementos de ensamblaje	Acero inoxidable	Asegura uniones firmes, resistentes a la corrosión y con posibilidad de desmontaje para mantenimiento o ajustes periódicos

4. Secuencia de procesos

El uso de la prótesis diseñada en base a Oriana se desarrolla a través de una secuencia estructurada para poder asegurar comodidad, seguridad y eficiencia durante su proceso en la terapia de marcha.

4.1 Montaje en el paciente

El especialista se encarga de colocar la prótesis, verificando que esta tenga un contacto uniforme, asegurando que quede estable y cómoda para el paciente. A su vez, se le da inicio a los componentes electrónicos para comprobar su funcionalidad antes de calibrarlos.

4.2 Calibración inicial

Mediante la conexión Bluetooth, la persona encargada, accede a la interfaz de perfiles de asistencia. Gracias a el ESP32, el sistema se puede comprobar y/o ajustar los parámetros básicos del dispositivo como la posición neutra del tobillo y la sensibilidad del sensor sin necesidad de intervención mecánica. En general, en esta etapa se verifica la seguridad y el movimiento de la prótesis sea correcto antes de iniciar la marcha.

4.3 Sesión de terapia y marcha

Durante la sesión, Oriana realizará ejercicios de equilibrio y desplazamientos progresivos; así como ejercicios que ayuden a mejorar la confianza al apoyarse sobre la prótesis. El sistema procesa datos que detecta el sensor, registrando las cargas que se aplican y ajustando el equipo para facilitar la marcha natural. El terapeuta es quien monitorea el desempeño del sistema y podrá modificar parámetros de asistencia desde el interfaz sin intervenir en la prótesis directamente. Al finalizar la sesión, se revisan los datos registrados y la comodidad que se tuvo. Si se llegan a presentar molestias o desbalance se recalibran los parámetros iniciales y necesarios para poder garantizar mejor aún su adaptación y un uso seguro.

4.4 Desmontaje y limpieza

Finalizada completamente la sesión, se apaga el sistema y se retira cuidadosamente la prótesis. Se limpia el encaje y otras partes de la prótesis con una solución neutra o con ayuda de una material que no dañe esta misma. Los datos recolectados podrán ser guardados para poder tener un seguimiento clínico de la rehabilitación.

5. Técnicas de producción

5.1 Impresión 3D:

Se utilizará para realizar las piezas anatómicas personalizadas de la paciente y el socket de la prótesis. Permite obtener geometrías complejas, reducir peso y adaptar el diseño a las dimensiones específicas del muñón de Oriana. Además, facilita reemplazos rápidos y económicos conforme el crecimiento de la paciente.

5.2 Corte laser:

Aplicado para producir placas de soporte, tapas y adaptadores. Este proceso ofrece alta precisión en piezas planas de aluminio, acrílico o acero, con buenos acabados y tolerancias ajustadas.

5.3 Mecanizado (fresado o torneado):

Utilizado para crear piezas estructurales metálicas (ejes, uniones y soportes de carga). Además, aseguran la durabilidad y estabilidad de la prótesis, en especial en aquellas zonas sometidas a esfuerzos.

5.4 Ensamblaje:

Los componentes impresos y mecanizados se unirán mediante tornillería de acero inoxidable y adhesivos epóxicos (adhesivo extrafuerte). Se integrarán los sensores FSR, el ESP32 y el servo motor con cableado interno protegido. El ensamblaje final permitirá una estructura modular, ligera y de fácil mantenimiento.

6. Estaciones de trabajo

El sistema será evaluado y utilizado en distintos espacios de rehabilitación para garantizar la seguridad del paciente y la correcta supervisión del personal clínico.

6.1 Estación de evaluación inicial

Esta primera etapa se busca verificar las conexiones y componentes del sistema, entre ellos el ESP32, sensor, entre otros; siendo necesaria un amplio espacio de trabajo junto a una laptop y/o tablet con el software de control y herramientas necesarias para la verificación electrónica básica.

6.2 Estación de calibración y prueba de marcha asistida

Esta fase se podría llevar a cabo en un laboratorio de marcha o gimnasio terapéutico. En este entorno se realizarán los ejercicios que ayudarán en su proceso bajo supervisión del fisioterapeuta. Mientras tanto el sistema registrará los datos de carga y movimiento a través de los sensores lo que permitirá calibrar el sistema mediante la interfaz. En esta estación se podría utilizar barras paralelas, caminadora terapéutica, sistema de arnés de suspensión parcial, entre otros; además, de un dispositivo portátil que permitirá visualizar en tiempo real el rendimiento del sistema y respuesta del paciente.

6.3 Estación de análisis y retroalimentación

Esta área está ubicada en fisioterapia donde se centrará en procesar la información obtenida durante la sesión. Estos datos serán analizados por el mismo fisioterapeuta quién detectará posibles desbalances y definirá los próximos objetivos a lograr en el paciente.

6.4 Estación de limpieza

Finalmente, esta área se realizará en una zona limpia del laboratorio o un área destinada únicamente para el mantenimiento del dispositivo. Una vez terminada la sesión, se procede a finalizar las acciones del dispositivo, se retira el dispositivo para

realizar una limpieza y revisión del estado general de la prótesis garantizando una conservación del equipo e higiene del sistema para próximos usos. Teniendo en cuenta el uso de guantes, paños, soluciones desinfectantes que no afecten a la prótesis.

7. Automatización

Nivel de automatización: Medio (semiautónomo)

El sistema propuesto presenta un nivel medio de automatización, ya que el control de movimiento del tobillo se realiza automáticamente a partir de la lectura de un sensor de presión FSR, procesada por el ESP32, mientras que el fisioterapeuta supervisa y calibra los parámetros del sistema (umbral de presión, velocidad del servo y ángulo de movimiento).

Justificación técnica y clínica:

Técnica: El uso del ESP32 permite leer directamente el sensor FSR y generar una señal PWM para accionar el servomotor. Este control automático responde en tiempo real al apoyo o levantamiento del pie, sin requerir intervención manual. El sistema mantiene una estructura simple, confiable y de bajo consumo, adecuada para un prototipo pediátrico.

Clínica: El nivel semiautónomo permite que el tobillo se mantenga firme al apoyar el pie y flexible al levantarlo, imitando el patrón natural de la marcha. A la vez, el terapeuta puede ajustar la sensibilidad del sensor o detener el sistema durante las terapias, garantizando seguridad y adaptabilidad al progreso de la paciente.

Escenarios de seguridad

- Si el paciente se desmaya o pierde equilibrio:
El sensor FSR deja de detectar presión; el ESP32 interpreta esto como pérdida de apoyo y ordena al servo colocarse en posición neutra y estable, evitando movimientos bruscos.
- Si ocurre una falla eléctrica o del sistema:
El tobillo cuenta con topes mecánicos que limitan el ángulo de movimiento, manteniendo una postura segura. El ESP32 incluye una función de reinicio automático (watchdog) para restablecer el control si hay un fallo momentáneo.
- Botón de parada de emergencia:
Se incorpora un botón físico conectado al ESP32. Al presionarlo, corta la señal PWM hacia el servomotor y deja el tobillo en estado seguro. Puede acompañarse con una señal visual o sonora (LED o buzzer) que confirme la desactivación del sistema.

8. Interfaces de red global

8.1 Esquema de conexión

El sistema se basa en una red local simple de Internet de las Cosas (IoT) que permite transmitir los datos obtenidos por los sensores hacia un dispositivo de control externo.

El flujo general de conexión es el siguiente:

Sensor de presión (FSR)



Microcontrolador ESP32 (procesamiento y envío Bluetooth)



Laptop del terapeuta (recepción y visualización de datos)

8.2 Información recolectada del paciente

Durante las sesiones de marcha, el sistema registrará datos básicos de uso relacionados con la actividad física del paciente:

- Presión plantar promedio: detectada por el sensor FSR al apoyar el pie.
- Número de pasos realizados.
- Duración total de la sesión de marcha.
- Frecuencia de activación del servo (indicador del esfuerzo o movimiento asistido).

Estos datos permiten evaluar la evolución del patrón de apoyo y la eficiencia del sistema durante la rehabilitación.

8.3 Visualización para el terapeuta

Los datos se envían vía Bluetooth clásico a una laptop o tablet, donde se visualizan en un formato simple, como:

- Tabla en Excel con los valores registrados (presión, pasos, tiempo).



- Gráfica lineal o de barras que muestra la evolución de la presión o la cantidad de pasos por sesión.

De esta manera, el terapeuta puede analizar el desempeño del paciente y realizar ajustes al sistema de forma remota, sin intervención mecánica.

8.4 Seguridad y privacidad

Para proteger la información del paciente:

Los datos se guardan con un código anónimo (por ejemplo, “Paciente A01”), sin nombres personales.

Los archivos exportados se pueden proteger con contraseña o almacenarse localmente en la computadora del terapeuta sin conexión a internet.

Solo el personal autorizado (terapeuta o docente) tiene acceso a la información registrada.