



UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

ENTREGABLE 12

Integrantes:

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

Docente:

Juan Manuel Zuñiga

Curso:

Fundamentos de Biodiseño

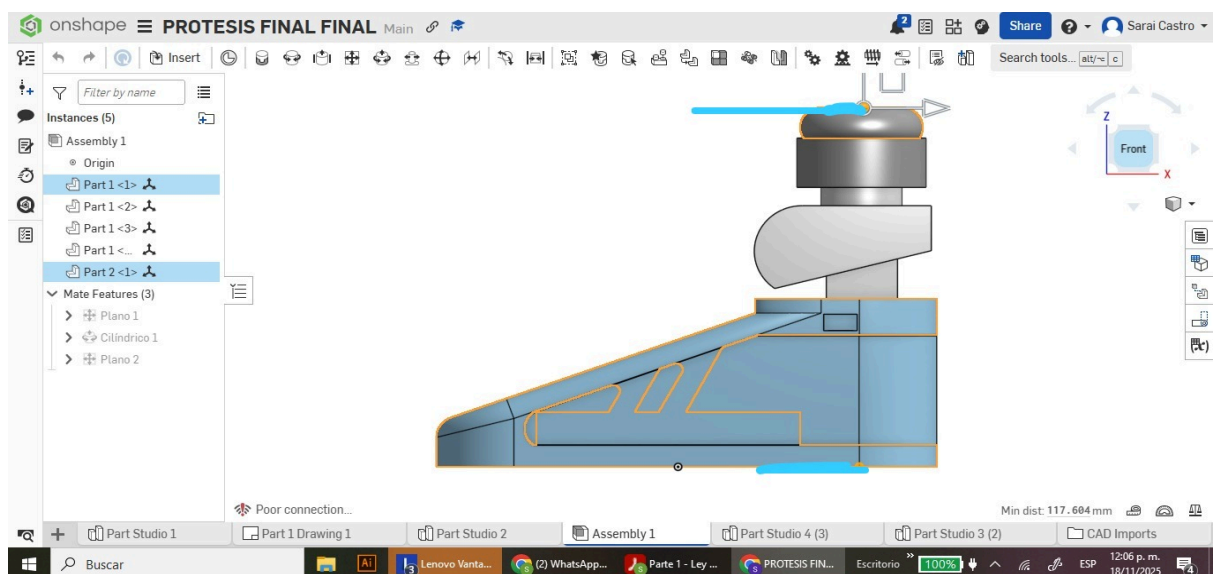
1. CONTEXTO DE USO

El proyecto Ankle Flex está diseñado para mejorar la marcha de una niña de 4 años con amputación transfemoral izquierda, residente en un entorno urbano con presencia de superficies irregulares. Según Lathouwers et al. [1], el uso de articulaciones funcionales en prótesis pediátricas mejora la estabilidad y el patrón de marcha, especialmente en contextos donde el usuario enfrenta variaciones constantes del terreno.

El prototipo integra un módulo de tobillo con un resorte impreso en 3D que permite un retorno elástico natural durante la marcha, brindando una transición más suave entre apoyo y despegue. Este elemento mecánico actúa de forma pasiva, absorbiendo carga y devolviendo energía para facilitar el impulso, mientras que un sistema electrónico complementario registra parámetros terapéuticos (fases de carga, cantidad de pasos, ángulos de flexión).

El sistema electrónico utiliza dos celdas de carga, ubicadas en el talón y el metatarso, que detectan las fases de apoyo. Un servo de baja potencia ya no actúa sobre la articulación, sino que se emplea únicamente como encoder para medir el ángulo resultante del tobillo durante la marcha. Esta información es utilizada con fines de monitoreo. El prototipo cuenta con un botón general de encendido (On/Off) y una autonomía aproximada de 30–40 minutos, adecuada para sesiones terapéuticas supervisadas.

La implementación final incluye una aplicación móvil para que el terapeuta pueda visualizar estados del sistema, alertas de peso excedido, número de pasos durante la sesión y registro de eventos relevantes para la terapia. Este diseño prioriza no solo la funcionalidad mecánica, sino también la seguridad, la rehabilitación y el bienestar emocional de la niña usuaria [2], [3].



2. PERFIL DE USUARIO

La usuaria es una niña de 3 años y 10 meses con amputación transfemoral izquierda (AK F2) debido a un accidente de tránsito ocurrido en 2024. Vive con su abuela en Villa El Salvador, quien la acompaña a sus sesiones de rehabilitación y supervisa el uso de dispositivos de asistencia. Antes del accidente, la niña mostraba un estilo de vida activo y lúdico; actualmente, experimenta frustración y tristeza durante el proceso de adaptación, lo cual es consistente con lo reportado en pacientes pediátricos con amputación según Highsmith et al. [3].

La solución Ankle Flex se articula sobre su prótesis actual, añadiendo un módulo mecánico-elástico en el tobillo capaz de adaptarse al terreno y permitir un movimiento más natural. Las celdas de carga detectan cómo distribuye su peso; el servo sensor registra el ángulo del tobillo durante la marcha y el sistema electrónico documenta parámetros relevantes para su terapia.

Este enfoque permite mejorar estabilidad, reducir fatiga y recuperar sensación de control sobre su extremidad, especialmente útil en superficies irregulares típicas de su entorno cotidiano. Al evitar elementos mecánicos pesados o rígidos, se prioriza la comodidad y la seguridad, factores fundamentales en usuarios pediátricos [3].



3. ANÁLISIS DE TAREAS

Las tareas se basan en literatura reciente sobre biomecánica pediátrica, control de rigidez, y prácticas clínicas de seguridad en prótesis infantiles [3]–[5]. El sistema combina la detección de carga plantar con un mecanismo elástico que facilita el retorno durante el despegue.

Funcionamiento del sistema

- Detección de carga: dos celdas TAL220B registran presión en talón y metatarso.
- Interpretación de fases: el HX711 envía datos al ESP32 para distinguir entre apoyo inicial, apoyo medio e inicio del impulso.
- Actuación mecánica: el resorte impreso absorbe impacto y ayuda al despegue.
- Registro terapéutico: el servo mide ángulos de flexión/dorsiflexión para cuantificar pasos y rango de movimiento.

Lista de tareas operativas

- Verificar condiciones mecánicas del módulo (holguras, tope elástico, tornillos).
- Calzar correctamente la prótesis y asegurar alineación del tobillo.
- Revisar piel del muñón antes y después de su uso para evitar puntos de presión.
- Encender el dispositivo mediante el interruptor principal.
- Comprobar detección básica de carga (balanceo talón-punta).
- Confirmar que el resorte retorna adecuadamente sin atascos.
- Realizar marcha asistida en superficie plana (5–10 m).
- Realizar pequeños cambios de dirección o desniveles suaves.
- Preguntar por comodidad; revisar signos de dolor o irritación.
- Registrar observaciones en la app o cuaderno de terapia.

Tabla de tareas y riesgos

Tarea crítica	Riesgo principal si falla	Justificación de criticidad	Medida de control (qué hacer)
Calce y alineación inicial	Dolor, puntos de presión, mala mecánica del tobillo	Una alineación deficiente amplifica momentos en rodilla/cadera y degrada el patrón apoyo-impulso [3]	Recalzar, verificar planta neutra; repetir prueba estática antes de caminar
Chequeo de sensores (talón/metatarso)	Activación tardía o ausencia de rigidez en apoyo (inestabilidad/caída)	El control dependiente de carga requiere señal confiable para modular rigidez [4], [5]	Prueba de balanceo talón-punta; si un canal no responde, no iniciar marcha
Prueba estática de rigidez	Colapso del tobillo bajo peso	Validar que el sistema soporta carga antes de marcha dinámica	Ensayo monopodal breve con soporte del terapeuta; abortar si hay hundimiento
Marcha asistida inicial	Tropiezos, asimetría, fatiga prematura	La adaptación pediátrica exige progresión supervisada y repeticiones cortas [3]	Trayectos ≤ 10 m, pausas; feedback del terapeuta y corrección inmediata
Marcha en superficie irregular	Inestabilidad; incremento de carga en rodilla	El beneficio del módulo es mayor en irregularidad, pero el riesgo también	Progresar tras dominar superficie plana; acompañamiento continuo

4. CRITERIOS DE ÉXITO

Estos criterios validan el desempeño del módulo en condiciones reales de uso:

- a. Integridad mecánica del módulo
El resorte impreso y el ensamblaje deben soportar el peso de la niña ($\approx 20\text{--}25$ kg) sin deformarse ni fallar durante una sesión de 10 minutos.
- b. Detección plantar correcta
Las celdas deben diferenciar de manera clara las fases de apoyo y despegue, enviando señales estables al ESP32 [4].
- c. Registro correcto de ángulos
El servo usado como encoder debe capturar el movimiento de flexión y dorsiflexión con sincronía respecto a la pisada.
- d. Autonomía energética
El sistema debe mantener 30–40 minutos de operación segura, sin sobrecalentamiento de reguladores ni del microcontrolador.
- e. Seguridad y confort
Sin movimientos inesperados, sin puntos de presión añadidos, y con respuesta estable del resorte durante la marcha.
- f. Aceptación emocional y clínica
La niña debe ser capaz de caminar sin temor ni rechazo, mostrando confianza durante el apoyo y transición de pasos [3].

5. **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] E. Lathouwers, P. Malcolm, and D. Lefeber, “Evaluation of an articulated passive ankle–foot prosthesis,” *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 21, no. 28, pp. 1–15, 2022.
- [2] . Marinopoulos et al., “Toward adjustable, low-cost ankle-foot components: design options and stiffness control for improved push-off,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. —, 2023. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.192.
- [3] A. J. Highsmith, S. Kahle, and R. Lewandowski, “Pediatric prosthetics: gait adaptation and comfort in lower limb prostheses,” *Prosthetics and Orthotics International*, vol. 44, no. 2, pp. 85–94, 2020.
- [4] A. Athanasiou et al., “Bio-inspired ankle mechanisms and stiffness tuning for energy-efficient gait assistance,” *Biomimetics*, vol. 9, no. 2, 2024. doi: 10.3390/biomimetics9020076.
- [5] K. Bhuvaneswar, A. Epstein, and L. Stern, “Rehabilitation and psychosocial aspects of limb loss in children,” *Journal of Pediatric Rehabilitation Medicine*, vol. 11, no. 2, pp. 75–86, 2018.