



UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

ENTREGABLE 4

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



Identificación de la necesidad

En el caso de Orihana, de 3 años y 10 meses, con amputación transfemoral izquierda traumática, la necesidad crítica a abordar es el desarrollo de un tobillo adaptable que complemente su prótesis actual. Este componente es esencial para favorecer una marcha más funcional y segura, evitando que dependa únicamente de saltar con la pierna sana para desplazarse. Dicho patrón no solo limita su autonomía, sino que incrementa el riesgo de sobrecarga en la extremidad contralateral y en la columna, con posibles deformidades y dolor a corto y mediano plazo.

El enfoque en el tobillo se justifica porque esta articulación es clave para lograr un apoyo estable, permitir la flexión plantar y dorsal en la marcha y facilitar la adaptación a distintas superficies. Además, un tobillo con cierta flexibilidad y capacidad de ajuste ayudaría a compensar la falta de simetría en el patrón de marcha, promoviendo su integración en actividades lúdicas y escolares, y reduciendo el riesgo de frustración o aislamiento social.

Un aspecto crítico en la población pediátrica es el crecimiento acelerado, que implica cambios constantes en el volumen del muñón y en la longitud corporal. Por ello, un diseño de tobillo adaptable y modular permitiría ajustar la prótesis sin necesidad de reemplazarla completamente, disminuyendo los costos y la frecuencia de complicaciones como el sobrecrecimiento óseo.

En conclusión, la necesidad prioritaria de Orihana se centra en disponer de un tobillo adaptable integrado a su prótesis actual, acompañado de fisioterapia para entrenamiento de la marcha. Esto no solo busca la recuperación funcional, sino también la prevención de complicaciones musculoesqueléticas, el fomento de la autonomía y la adecuada integración social y escolar, aspectos esenciales para su calidad de vida a mediano y largo plazo.

Tecnologías:

PRODUCTOS COMERCIALES

1. Rodilla Movido 3R68 de Ottobock

La rodilla Movido 3R68 es una articulación policéntrica ligera y compacta, diseñada para niños con un peso corporal de hasta 45 kg. Cuenta con control hidráulico de la



fase de balanceo, lo que permite una marcha más natural y estable. Está disponible en dos tamaños: Movido Explore para niños pequeños y Movido Play para escolares.

Ventajas:

- Diseño ligero y compacto, ideal para niños activos.
- Control hidráulico que facilita una marcha natural.
- Disponible en dos tamaños para adaptarse al crecimiento del niño.
- Facilita actividades como arrodillarse y jugar.

Desventajas:

- No es completamente impermeable; se recomienda evitar la exposición prolongada al agua.
- Costo medianamente alto.



2. Pie Maverick Junior F24 de Ottobock

El pie Maverick Junior F24 está diseñado para niños y adolescentes con un peso corporal de hasta 45 kg. Fabricado en fibra de vidrio, ofrece alta durabilidad, flexibilidad y un retorno de energía eficiente. Su diseño bajo permite una integración fácil con la rodilla Movido y otras más proporcionando una transición suave durante la marcha.

Ventajas:

- Material de fibra de vidrio que ofrece durabilidad y flexibilidad.



- Diseño bajo que facilita la integración con diferentes rodillas.
- Apto para actividades deportivas y recreativas.
- Resistente al agua, adecuado para uso en ambientes húmedos.

Desventajas:

- Requiere un ajuste profesional para garantizar su funcionamiento óptimo.
- Costo medianamente alto.



3. Össur Flex-Foot Junior / Flex-Run Junior

Flex-Foot Junior y Flex-Run Junior son familias pediátricas de pies protésicos de fibra de carbono diseñadas específicamente para niños activos. Son pies de respuesta dinámica con una hoja de carbono de longitud adaptada a la talla infantil, talón con cierto grado de compliance y puntera diseñada para devolver energía durante la fase de despegue. Están pensados para soportar actividades de juego y marcha en superficies variadas, además, ofrecen vertical compliance y retorno de energía mientras mantienen bajo peso, rasgos clave para pacientes pediátricos.

Ventajas:

- **Ligereza y tamaño pediátrico:** son exclusivamente diseñados para niños, ya que tiene menor masa que una prótesis de adulto, lo cual facilita el manejo del equilibrio.
- **Retorno de energía:** la hoja de carbono que posee ayuda a la propulsión en la fase de despegue, reduciendo el esfuerzo metabólico relativo durante la marcha. Esto favorece la resistencia en desplazamientos cortos/medios y juego activo.



- **Robustez y tolerancia al terreno:** las propiedades elásticas ofrecen cierta adaptación a impactos en suelos irregulares (pequeñas piedras, arena compacta), mejor que un pie SACH rígido.
- Disponibilidad pediátrica: Existen en el mercado diferentes modelos y tallas.

Desventajas:

- **Multiaxialidad limitada:** muchos pies tipo blade son principalmente en un plano (flexión dorsal/plantar) y ofrecen menos movimiento de inversión/eversión que un tobillo hidráulico multiaxial, lo que puede limitar adaptación rápida a pendientes muy inclinadas o roca suelta.
- **No control activo:** no posee potencia motorizada pero es adaptable para la paciente (prioridad: marcha funcional), pero limita recuperación de «potencia» en subidas largas.
- **Ajuste fino necesario:** para marcha estable en terrenos irregulares puede requerirse combinación con adaptadores multiaxiales o tacos/almohadillas específicas; el protesista debe ajustar alineamiento y talla frecuentemente por crecimiento.



Figura 3: Flex-Foot Junior

4. Blatchford (Endolite) Echelon (tobillo hidráulico multiaxial con auto-alineación)

Echelon es un sistema de tobillo-pie que integra un módulo de tobillo hidráulico multiaxial con una unidad ESR (lámina o keel) y amortiguación al talón. Está diseñado explícitamente para mejorar la adaptación a superficies irregulares, absorber impactos y auto-alinearse en pendientes (auto-dorsiflexión al toe-off), reduciendo presiones en el muñón y mejorando la estabilidad en rampas/terrenos desiguales.



Estudios biomecánicos y clínicos muestran que los tobillos hidráulicos multiaxiales facilitan la adaptación a terrenos irregulares comparado con pies no articulados.

Ventajas:

- **Adaptación a terreno irregular:** el eje multiaxial y la hidráulica permiten movimientos de inversión/eversion y dorsiflexión controlada, muy útiles en cerros, piedras y arena inestable. Esto reduce el riesgo de torceduras y caídas.
- **Absorción de impacto y confort:** el amortiguador de talón y la propia hidráulica atenúan choques al pisar terreno abrupto, lo que protege el muñón y facilita una marcha más natural.
- **Mejora del roll-over shape:** el control del movimiento en el tobillo ayuda a una transición más suave en superficies no niveladas, mejorando simetría y reduciendo compensaciones en la cadera/espalda.

Desventajas:

- **Peso y complejidad:** los módulos hidráulicos son más pesados y voluminosos que una hoja de carbono simple.
- **Costo y mantenimiento:** costo elevado y necesidad de mantenimiento constante.
- **Tallas pediátricas limitadas:** algunos módulos están optimizados para adolescentes/adultos; puede requerir adaptaciones o versiones pediátricas específicas.

Imagen:



Figura 4:Echelon



PROYECTOS OPEN HARDWARE RECONOCIDOS

5. Tecnología 5 [5]

Nombre del producto o artículo: *Open-Source Bionic Leg*

Autor / Institución responsable: Universidad de Michigan y Shirley Ryan AbilityLab.

Descripción funcional: Este proyecto corresponde a una pierna biónica de código abierto que integra rodilla y tobillo. Permite probar algoritmos de control y hardware en condiciones reales, ofreciendo una plataforma de investigación y adaptación para usuarios con amputaciones.

Ventajas:

- Plataforma abierta que fomenta la colaboración y la innovación en prótesis.
- Gran flexibilidad para adaptar el control a distintos tipos de marcha.
- Posibilidad de personalizar el diseño según las necesidades del usuario.

Desventajas:

- Complejidad técnica y costos de fabricación elevados.
- Peso considerable, lo que dificulta su uso en población infantil.
- Obstáculos regulatorios para uso clínico directo.

6. Tecnología 6 [6]

Nombre del producto o artículo: *Open-Source 3D Printed Foot Prosthesis*

Autor / Institución responsable: Northern Arizona University (equipo 18F04) en colaboración con E-nable.

Descripción funcional: Pie protésico impreso en 3D, de bajo costo, diseñado para personas con amputación por debajo de la rodilla. Enfocado en accesibilidad y facilidad de fabricación local.

Ventajas:



Muy económico en comparación con prótesis comerciales.
Personalizable y replicable mediante impresión 3D.
Fácil de instalar y ajustar.

Desventajas:

Durabilidad limitada por el uso de plásticos impresos.
Solo funcionalidad pasiva, sin asistencia en la marcha.
Apariencia menos acabada que dispositivos comerciales.

7. Tecnología 7

Nombre del producto o artículo: *Mechanized Prosthetic Foot*

Autor, empresa o institución responsable: Aractapod (equipo de ingenieros, exalumnos de la University of Southern Maine)

Descripción funcional: Pie protésico que busca mejorar la marcha frente a pies pasivos, usando componentes impresos en 3D, un sistema micro-hidráulico y control electrónico para ofrecer flexión asistida, amortiguación y mejor absorción de impacto.

Ventajas:

Impresión 3D que reduce costos.
Sistemas dinámicos (sensores, hidráulica, amortiguación).
Enfoque en bajo peso y resistencia estructural.

Desventajas:

Proyecto en fase de prototipo, sin validación clínica extensa.
Complejidad mecánica y alto mantenimiento.
Movimientos multiaxiales limitados.

8. Tecnología 8

Nombre del producto o artículo: *Design of an Underactuated Powered Ankle and Toe Prosthesis*

Autor, empresa o institución responsable: Lukas Gabert, Minh Tran, Tommaso Lenzi.



Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Utah.

Descripción funcional: Prótesis que combina tobillo y articulación de dedo mediante underactuated, lo cual trata de un solo actuador lineal que impulsa ambos grados de libertad a través de un sistema de barras y engranajes. El movimiento del tobillo se transmite mecánicamente al dedo que es liberado para aportar impulso extra. Esto reduce el tamaño del sistema, ahorra energía y mejora la naturalidad de la marcha.

Ventajas:

Menor consumo de energía.

Movimiento de tobillo y dedo coordinado.

Tamaño y peso similares a prótesis microprocesadas existentes.

Desventajas:

Peso elevado para niños pequeños.

Costos y mantenimiento complejos

Aún en etapa de validación, sin estudios clínicos extensivos.

INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

9. Tecnología 9

Nombre del producto o artículo: *Effectiveness of a crossover prosthetic foot in active children*

Autor, empresa o institución responsable: M. H. G. Verheul, et al. (2020), Prosthetics and Orthotics International.

Breve descripción funcional: El estudio analiza el impacto del uso de un pie protésico de tipo crossover en niños amputados transfemorales y transtibiales. Este pie busca combinar la estabilidad para caminar y la elasticidad para correr, lo cual responde a la necesidad de los niños de realizar actividades físicas variadas sin cambiar de prótesis.

Ventajas:



- Permite a los niños realizar tanto actividades de la vida diaria como juegos y deportes ligeros con un solo pie protésico.
- Reducción del gasto energético comparado con pies estándar no articulados.
- Mayor satisfacción reportada por los pacientes al sentirse más incluidos en actividades de sus pares.
- Diseño relativamente accesible en comparación con pies protésicos totalmente mecatrónicos.

Desventajas:

- No reproduce completamente el rango de movimiento de un tobillo natural.
- Puede resultar costoso frente a pies fijos tradicionales en contextos de bajos recursos.
- Requiere ajustes y entrenamiento para aprovechar al máximo la respuesta dinámica.

Imágenes:



Figura x: Diferentes tipos de pies protésicos pediátricos usados en el estudio: (a) SACH, pie convencional; (b) Vari-Flex Junior, pie de almacenamiento de energía; (c) Pro-Flex LP Junior, pie liviano y flexible; (d) Cheetah Xplore Junior, pie deportivo tipo cuchilla.

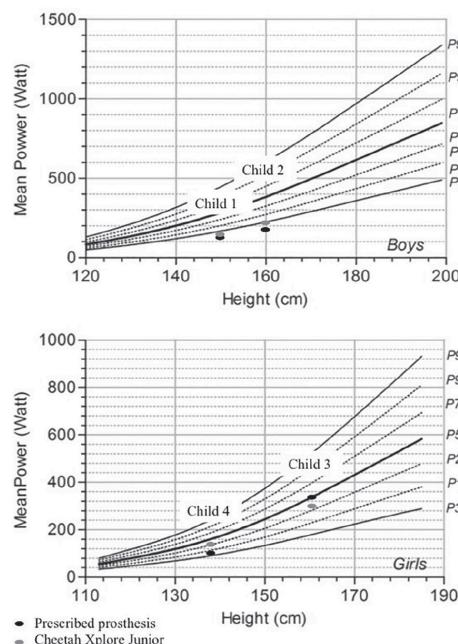




Figura x: Comparación de la potencia muscular obtenida en la prueba de sprint entre niños con prótesis convencionales y con prótesis deportivas (Cheetah Xplore Junior), en relación con los valores de referencia por altura y sexo.

10. Tecnología 10

Nombre del producto o artículo: *Design, Characterization, and Preliminary Assessment of a Two-Degree-of-Freedom Powered Ankle–Foot Prosthesis*

Autor, empresa o institución responsable: Tsung-Han Hsieh, Hyungeun Song, Tony Shu, Junqing Qiao, Seong Ho Yeon, Matthew Carney, Luke Mooney, Jean-François Duval, Hugh Herr. Publicado en Biomimetics, 2024.

Breve descripción funcional: Este estudio desarrolla una prótesis de tobillo-pie motorizada con dos grados de libertad (2-DoF) que puede controlar tanto la flexión plantar / dorsiflexión como la inversión / eversión del pie. Busca mejorar el equilibrio, la estabilidad lateral y la eficiencia en la marcha en terreno plano, ofreciendo un prototipo untethered (sin conexión fija) para pruebas de marcha.

Ventajas:

- Movimiento más cercano al tobillo natural gracias a los 2-DoF.
- Mejora del control lateral (inversión/eversión) que es importante para balance en superficies irregulares.
- Buen rendimiento en pruebas de torque con errores bajos.
- Prototipo abierto para más estudios, puede servir como base para mejoras.

Desventajas:

- No se ha probado en niños, sino en sujetos adultos, por lo que su rendimiento pediátrico es desconocido.
- Complejidad mecánica y electrónica elevada — más partes que pueden fallar o requerir mantenimiento.
- Costo potencialmente alto comparado con prótesis pasivas o de bajo costo.
- La durabilidad y adaptación al uso intenso (correr, brincar) no está validada aún.

Imágenes





Figura x: Vista general de la prótesis de tobillo con 2 grados de libertad.



Figura x: Aplicación clínica en un paciente con amputación transtibial

Bibliografía:

[1] Ottobock. (s.f.). *3R68-107250: Articulación de rodilla para jóvenes aventureros.*

<https://www.ottobock.com/es-es/product/3R68-107250>

[2] Ottobock. (s.f.). *F24-65358: Maverick junior.*

<https://www.ottobock.com/es-es/product/F24-65358>

[3] S. Noroozi, A. A. Malekian, J. A. van der Kooij, “Dynamic characterisation of Össur Flex-Run prosthetic feet,” *Gait & Posture*, 2019

[4] S. A. Gard, et al., “The Effect of Prosthetic Ankle Units on Roll-Over Shape,” *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 2011.

[5] E. Rouse, A. Long, M. Holgate, and J. Lenzi, “Open-Source Bionic Leg: First-of-Its-Kind Platform Aims to Rapidly Advance Prosthetics,” *University of Michigan – Robotics Institute*, 2019. [Online]. Available: <https://www.robotics.umich.edu/news/2019/open-source-bionic-leg-first-of-its-kind-platform-aims-to-rapidly-advance-prosthetics>

[6] S. Oman, “Open-Source 3D Printed Foot Prosthesis,” *Northern Arizona University – Team 18F04 with E-nable*, 2018. [Online]. Available:

<https://www.sambuz.com/doc/open-source-3d-printed-foot-prosthesis-ppt-presentation-342228>

[7] Aractapod. (2016). Mechanized prosthetic foot. Hackaday.io.

<https://hackaday.io/project/13312-mechanized-prosthetic-foot>



[8] Gabert, L., Tran, M., & Lenzi, T. (2021). Design of an underactuated powered ankle and toe prosthesis. 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2100–2103.
<https://doi.org/10.1109/EMBC46164.2021.9630855>

[9] F. J. M. G. Verheul, O. Verschuren, M. Zwinkels, M. Herwegen, A. Michielsen, M. de Haan, e I. van Wijk, *Effectiveness of a crossover prosthetic foot in active children with a congenital lower limb deficiency: an explorative study*, *Prosthetics & Orthotics International*, vol. 44, no. 5, pp. 305–313, Oct. 2020, doi: 10.1177/0309364620912063.

[10] T.-H. Hsieh, H. Song, T. Shu, J. Qiao, S. H. Yeon, M. Carney, L. Mooney, J.-F. Duval y H. Herr, Design, characterization, and preliminary assessment of a two-degree-of-freedom powered ankle–foot prosthesis, *Biomimetics*, vol. 9, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.3390/biomimetics9020076.

[11]

[12]