

UNIVRSIDAD MODELO

INGENIERÍA BIOMÉDICA



PROTOTIPO DE SOFT EXOSUIT

ALUMNOS:

IVANNA JAUNETTE FAISAL CALDERAS

LÓPEZ POOT DARA ISABEL

GARRIDO VILLARREAL AURA SELENE

RODRÍGUEZ QUIJANO ANNA SAMARY

PÉREZ VÁSQUEZ OSCAR GERARDO

GARCIA CASTILLO IVAN ANTONIO

IV SEMESTRE

PROFESOR: CIELO GUADALUPE POOT BOTE

MATERIA: PROYECTOS IV

MÉRIDA, YUCATÁN, 09 DE MAYO DEL 2025.

Introducción

La sarcopenia es una afección caracterizada por la pérdida de masa y musculatura ocasionado por diversos factores como la edad, inactividad física y pérdida de neuronas motoras por el envejecimiento y aunque es una afección común en el envejecimiento, se documenta que puede llegar a presentarse a partir de los 30 años trayendo consigo dificultades en la cotidianidad de la persona como una caminata más lenta, caídas, dificultad para subir escaleras y en general debilidad en las extremidades inferiores de acuerdo con la Secretaría de Salud [1]. En el Estado de Yucatán según un estudio realizado por Martín et al [2], de un grupo de 121 adultos de 60 años el 50% padeció de sarcopenia demostrando que el riesgo de padecerla aumenta a partir de los 75 años, por otro lado, de acuerdo con el trabajo descrito de Cervantes et al. [3] este padecimiento influye de manera negativa en la vida de las personas ocasionando mayores riesgos en caídas y dependencia de otras personas.

Una de las alternativas utilizadas hoy en día para facilitar tareas tanto industriales y como de apoyo en la rehabilitación médica son los exoesqueletos. Los exoesqueletos son dispositivos vestibles capaces de apoyar al movimiento y mejorar las capacidades corporales de una persona y estos se pueden clasificar dependiendo su uso, funcionamiento o extremidad corporal que asista, pueden ser médicos o no médicos, pasivos o activos según un artículo publicado del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) de España [4], etc. En el área del envejecimiento estos dispositivos son funcionales a la hora de asistencia o apoyo brindando mayor independencia a la persona y reduciendo riesgos de accidentes, los materiales utilizados para este tipo de dispositivos usualmente consisten en metales como aleaciones de aluminio o fibra de carbono, sin embargo, para su aplicación en el área anteriormente mencionada es necesario procurar la comodidad del usuario, la suavidad de los materiales entre otras características. Los Soft Exosuit de acuerdo con Harvard Biodesign Lab [5] son un tipo de exoesqueleto que utiliza textiles que permiten mayor comodidad, discreción y que a diferencia de otros exotajes no necesita de estructuras rígidas y aparatosos permitiendo mayor ligereza.

Durante este artículo se expondrá la construcción de un prototipo de Soft Exosuit de asistencia en la marcha con aplicación potencial en pacientes con sarcopenia, donde se analizarán aspectos clave como el diseño ergonómico, la selección de materiales, los componentes electrónicos utilizados, así como las pruebas preliminares realizadas para evaluar su funcionamiento teniendo en cuenta que el objetivo principal es ofrecer una herramienta accesible que favorezca la movilidad de personas adultas mayores con pérdida de masa muscular, mejorando su autonomía. Este desarrollo se plantea como una alternativa de apoyo biomecánico liviano y adaptable, con miras a futuras implementaciones clínicas o domiciliarias.

El diseño del prototipo considera la biomecánica de la marcha humana y se centra en asistir específicamente a los músculos de las extremidades inferiores. Para ello, se incorporan sensores de movimiento, actuadores y un sistema de control basado en microcontroladores que permite adaptar la asistencia según las necesidades del usuario. A lo largo del documento

se detallarán los principios técnicos, el proceso de fabricación, así como los posibles retos y limitaciones encontrados durante su desarrollo, con el fin de sentar las bases para futuras mejoras y validaciones clínicas.

Antecedentes

Los Soft Exosuits representan un avance significativo en el campo de la asistencia biomecánica, al ofrecer sistemas más ligeros y cómodos que los exoesqueletos tradicionales. Estas tecnologías han evolucionado considerablemente en los últimos años, permitiendo mejoras notables en la movilidad de personas con diferentes condiciones físicas. Estudios recientes han demostrado su eficacia en casos de pérdida de movilidad asociada a la sarcopenia.

Los cimientos de esta tecnología se establecieron con los trabajos iniciales del Harvard Biodesign Lab [6], donde se demostró que estructuras textiles con actuadores neumáticos podían reducir el costo energético de la marcha en aproximadamente un 7.2%. Estos primeros prototipos, aunque innovadores, presentaban limitaciones importantes en términos de eficiencia energética y complejidad del sistema, con un peso total que superaba los 7 kg y un consumo energético de casi 300W. Estas limitaciones motivaron el desarrollo de mejoras para crear dispositivos más prácticos y eficientes.

Un antecedente fundamental fue el desarrollo del prototipo descrito por Chen et al. [7], cuyo estudio representa uno de los avances más significativos en el campo de los exo-trajes blandos. Este trabajo demostró que mediante un diseño cuidadosamente optimizado era posible alcanzar un peso total de solo 1.8 kg, siendo el más ligero reportado hasta entonces para un sistema de asistencia activa, mientras se mantenía una eficacia comparable a dispositivos más pesados. La investigación, publicada en la revista *Biosensors*, mostró una reducción metabólica del 11.52% durante la marcha a 5 km/h, medida mediante análisis de gases espirados. Este logro fue posible gracias a tres innovaciones principales: la implementación de una arquitectura distribuida que concentraba el 84% del peso en la cintura, el uso de textiles técnicos de alta resistencia para los componentes de interfaz, y un sistema de transmisión por cables Bowden optimizado para minimizar pérdidas por fricción. Este estudio aportó además hallazgos relevantes sobre el impacto en la fatiga muscular. Mediante electromiografía de superficie, los investigadores cuantificaron reducciones significativas en la activación muscular durante el uso del dispositivo: 10.7% en el recto femoral, 40.5% en el vasto lateral y 5.9% en el gastrocnemio. Estos resultados, obtenidos en pruebas con seis sujetos (5 hombres, 1 mujer; edad 25 ± 2 años), demostraron por primera vez que la reducción de peso del sistema podía traducirse no solo en menores demandas metabólicas, sino también en una disminución sustancial del esfuerzo muscular localizado. El diseño incorporaba sensores IMU para la detección del movimiento y un sistema de control basado en la curva de torque biológico de la cadera, adaptando la asistencia a la fase específica de la marcha. Estos elementos han servido como referencia directa para el desarrollo de nuestro propio prototipo.

La investigación de Wei et al. [8] sobre sistemas de transmisión por cables Bowden para miembros superiores ha proporcionado aportaciones fundamentales para el desarrollo de nuestro prototipo. Este estudio demostró mediante un enfoque metodológico cómo la disposición estratégica de puntos de anclaje puede optimizar la transferencia de fuerzas en sistemas de exoesqueletos suaves. Los autores desarrollaron un modelo biomecánico detallado que consideraba tanto la dinámica articular como las propiedades de los tejidos blandos, estableciendo relaciones matemáticas precisas entre la configuración mecánica y las fuerzas de interacción. Sus resultados mostraron que mediante la implementación de tres puntos de anclaje distribuidos a 3 cm del centro articular, era posible reducir las presiones máximas en un 15.3% y mantener las fuerzas de interacción por debajo de 0.5 N/cm², umbral crítico para el confort del usuario.

Aunque el estudio original se centró en aplicaciones para miembro superior en rehabilitación post-ictus, sus principios fundamentales sobre la distribución de fuerzas y la minimización de cargas locales han demostrado ser transferibles a sistemas para miembros inferiores. En nuestro desarrollo, hemos adaptado estos hallazgos mediante una configuración ampliada a 2 puntos de anclaje situados arriba de la rodilla, optimizada para las mayores demandas biomecánicas de las articulaciones de la cadera. La metodología de evaluación establecida por los autores, que combinaba simulaciones en ADAMS con pruebas experimentales utilizando sensores de presión y mediciones de rango de movimiento, podrían ser útiles como base para nuestros propios protocolos de validación. Particularmente valioso ha sido su enfoque en la ergonomía del sistema, que enfatizaba no solo la eficiencia mecánica sino también factores humanos como el confort durante uso prolongado y la facilidad de ajuste. Estas consideraciones han sido incorporadas en nuestro prototipo mediante la selección de materiales de interfaz de bajo coeficiente de fricción y sistemas de fijación ajustables que permiten adaptarse a diversas morfologías corporales.

La investigación también aportó datos cuantitativos valiosos sobre las pérdidas por fricción en sistemas Bowden y estrategias para minimizarlas, conocimiento que hemos aplicado en nuestro diseño mediante la implementación de guías especializadas y un protocolo de tensado optimizado. Los principios establecidos en este trabajo continúan siendo relevantes para el desarrollo de nuevas generaciones de exoesqueletos suaves, particularmente en lo que respecta al equilibrio entre eficacia asistencial y comodidad del usuario.

El análisis de la literatura especializada nos permitió identificar aspectos clave que han sido considerados en el desarrollo del presente proyecto. Entre ellos destacan la necesidad de sistemas ligeros pero eficientes, la importancia de una interfaz cómoda y adaptable, y la relevancia de mecanismos de control que respondan adecuadamente a las variaciones en los patrones de movimiento.

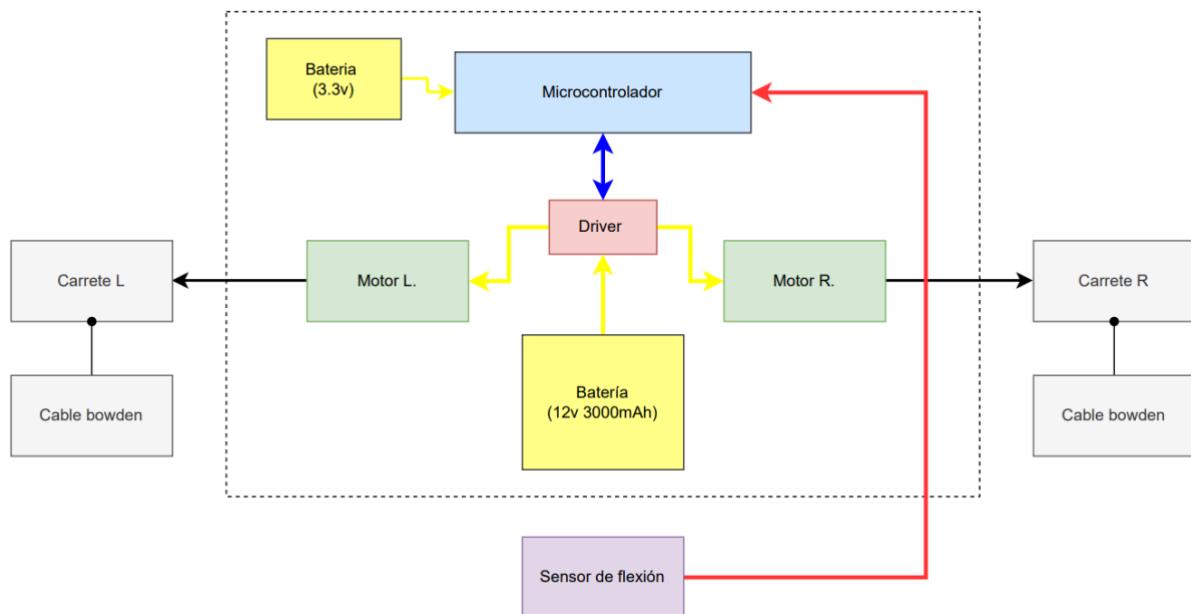
Objetivo general:

Desarrollar un prototipo de Soft Exosuit de asistencia en la marcha, con aplicación potencial en pacientes con sarcopenia, mediante el uso de materiales blandos, sensores y sistemas de control, con el fin de mejorar la movilidad y fuerza muscular de los usuarios.

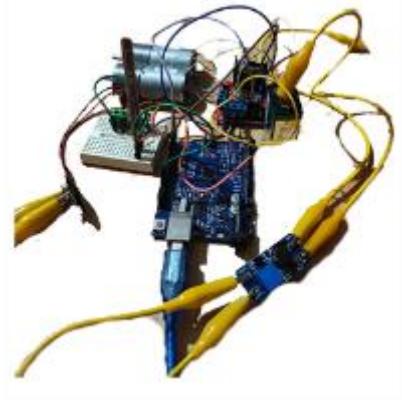
Objetivos específicos:

- Analizar los requerimientos biomecánicos mediante revisión bibliográfica y entrevistas a: ortopedistas, fisioterapeutas e ingenieros.
- Diseñar el sistema estructural del Soft Exosuit, incluyendo materiales blandos y puntos de asistencia.
- Integrar sensores y actuadores que permitan captar el movimiento logrando un sistema básico de control que active la asistencia de marcha de acuerdo con el patrón de movimiento del usuario.
- Implementar el prototipo completo y observar su funcionamiento.

Resultados



Se obtuvo un mecanismo en base a un motor “25ga 370” accionado por medio de un sensor Flexi resistivo 2.2. Así mismo se realizó el diseño del anclaje que tendrá la cuerda a la pierna del usuario, la carcasa que sostendrá el motor y se obtuvo una faja la cual sostendrá todo el mecanismo al usuario.



Discusión

La sarcopenia representa un desafío creciente en el ámbito de la salud pública, pues esta condición, caracterizada por la pérdida progresiva de masa y fuerza muscular, no solo compromete la movilidad y la independencia de los afectados, sino que también incrementa el riesgo de caídas y dependencia funcional. En este contexto, el desarrollo de tecnologías asistivas como los Soft Exosuits emerge como una solución innovadora y prometedora. A diferencia de los exoesqueletos tradicionales, que suelen ser rígidos y pesados, pues estos emplean materiales blandos y textiles que priorizan la comodidad y la discreción, aspectos cruciales para su aceptación y uso prolongado por parte de los usuarios.

Nuestro trabajo se enfoca en la construcción de un prototipo de Soft Exosuit destinado a asistir en la marcha de pacientes con sarcopenia, con el objetivo de mejorar su movilidad y fuerza muscular. Este enfoque es particularmente relevante dado el impacto negativo de la sarcopenia en la calidad de vida, como se evidencia en la literatura revisada. La integración de sensores de movimiento y actuadores controlados por microcontroladores permite adaptar la asistencia a las necesidades específicas del usuario, lo que representa un avance significativo en comparación con sistemas más estáticos o menos personalizables.

Los antecedentes presentados destacan la evolución de los Soft Exosuits, desde los primeros prototipos desarrollados en el “Harvard Biodesign Lab” hasta investigaciones más recientes que han logrado reducir drásticamente el peso y el consumo energético de estos dispositivos. Por ejemplo, el trabajo de Chen et al. (2021) demostró una reducción metabólica del 11.52% durante la marcha, utilizando un sistema de solo 1.8 kg. Estos avances han sido fundamentales para inspirar y guiar el diseño del prototipo actual, especialmente en lo que respecta a la optimización de la distribución del peso y la minimización de las pérdidas por fricción en los sistemas de transmisión por cables Bowden. Estos elementos no solo mejoran la eficiencia del dispositivo, sino que también reducen la fatiga muscular, un aspecto crítico para los pacientes con sarcopenia.

A pesar de los avances, el desarrollo de Soft Exosuits enfrenta desafíos significativos como lo podrían ser la ergonomía y la adaptabilidad a diferentes morfologías corporales, que son aspectos críticos los cuales requieren una cuidadosa consideración en el diseño. La selección de materiales debe equilibrar durabilidad y comodidad, mientras que la integración efectiva de sensores y actuadores para lograr un control preciso en tiempo real presenta retos técnicos considerables.

Otro aspecto clave es la necesidad de validación clínica. La literatura sugiere que métricas como la reducción en la activación muscular y el costo metabólico son esenciales para medir el impacto de estos dispositivos. Futuras iteraciones del prototipo deberían incluir pruebas con usuarios reales, idealmente en colaboración con profesionales de la salud como fisioterapeutas y ortopedistas, para garantizar que el dispositivo cumpla con los requerimientos biomecánicos y las expectativas de los pacientes.

El éxito de este prototipo podría sentar las bases para el desarrollo de versiones más avanzadas y su eventual implementación en entornos clínicos o domiciliarios. Esto no solo mejoraría la calidad de vida de las personas con sarcopenia, sino que también podría extenderse a otras condiciones que afecten la movilidad, como la rehabilitación postoperatoria o el apoyo a personas con discapacidades motoras. La naturaleza ligera y discreta de los Soft Exosuits podría facilitar su adopción en comparación con exoesqueletos más voluminosos, lo que representa una ventaja competitiva en el mercado de tecnologías asistivas. Además, el enfoque en la accesibilidad y la personalización podría convertir a este tipo de dispositivos en una herramienta estándar en la atención a adultos mayores.

Cronograma

<https://drive.google.com/file/d/1gZQSMiyeeTT99LVw2fRGDpj3IkRmVrws/view?usp=sharing>

Actividad	Responsable	Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
Toma de videos y recolección de datos del movimiento de 5 participantes.	<ul style="list-style-type: none"> Ivanna Faisal Aura Garrido Dara Poot 										
Adquisición de los materiales	<ul style="list-style-type: none"> Oscar Pérez Dara Poot Ivanna Faisal Aura Garrido Anna Garrido Iván García 										
Diseño de las carcasa para colocar los sensores y motores	<ul style="list-style-type: none"> Iván García Oscar Pérez Anna Rodríguez 										
Creación del código para la unidad de actuación	<ul style="list-style-type: none"> Aura Garrido 										
Diseño de la polea/carrete para el cable bowden	<ul style="list-style-type: none"> Oscar Pérez 										
Elaboración de los puntos de anclaje para las rodilleras	<ul style="list-style-type: none"> Ivanna Faisal Dara Poot 										
Ensamblado de los componentes electrónicos en PCB/placa perforada											
Sujeción de todos los componentes en el traje											

Referencias

- [1] De Salud, S. (s. f.). ¿Qué es la Sarcopenia? Gob.mx.
<https://www.gob.mx/salud/articulos/que-es-la-sarcopenia>
- [2] Vista de Sarcopenia y factores asociados en los adultos mayores de una unidad de medicina familiar en Yucatán, México. (s. f.).
https://revistas.unam.mx/index.php/atencion_familiar/article/view/79585/70332
- [3] Carrillo-Cervantes, A. L., Medina-Fernández, I. A., Sánchez-Sánchez, D. L., Cortez-González, L. C., Medina-Fernández, J. A., Cortes-Montelongo, D. B., Carrillo-Cervantes, A. L., Medina-Fernández, I. A., Sánchez-Sánchez, D. L., Cortez-González, L. C., Medina-Fernández, J. A., & Cortes-Montelongo, D. B. (s. f.). Sarcopenia como factor predictor de dependencia y funcionalidad en adultos mayores mexicanos.
https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1132-12962022000300007
- [4] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2021). NTP 1162: Exoesqueletos I: Definición y clasificación. <https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/34-serie-ntp-numeros-1152-a-1168-ano-2021/ntp-1162-exoesqueletos-i-definicion-y-clasificacion>
- [5] Soft exosuits. (s. f.). Harvard Biodesign Lab. <https://biodesign.seas.harvard.edu/soft-exosuits>

- [6] Reducing the metabolic cost of running with a tethered soft exosuit. (s. f.). Harvard Biodesign Lab. <https://biodesign.seas.harvard.edu/publications/reducing-metabolic-cost-running-tethered-soft-exosuit>
- [7] Chen, L., Chen, C., Wang, Z., Ye, X., Liu, Y., & Wu, X. (2021). A Novel Lightweight Wearable Soft Exosuit for Reducing the Metabolic Rate and Muscle Fatigue. *Biosensors*, 11(7), 215. <https://doi.org/10.3390/bios11070215>
- [8] Wei, W., Qu, Z., Wang, W., Zhang, P., & Hao, F. (2018). Design on the Bowden Cable-Driven Upper Limb Soft Exoskeleton. *Applied Bionics And Biomechanics*, 2018, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2018/1925694>