

Exoesqueleto bípedo de tronco inferior

Benítez Mendoza, Carlos Daniel

2025

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/6197>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

Exoesqueleto bípedo de tronco inferior

Benítez Mendoza Carlos Daniel (cuarto semestre en Ingeniería Biomédica)¹, De La Peña Paz Pablo (cuarto semestre en Ingeniería Biomédica)¹, Espinosa Morales José Manuel (cuarto semestre en Ingeniería Biomédica)¹, *Moreno Hernández Ana (profesor responsable)¹, Girón Nieto Huber (profesor asesor)¹,

¹Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México

Palabras clave: Ciclo de la marcha, exoesqueleto tronco inferior, fase de apoyo, fase de balanceo. ***Autor**

Corresponsal: 199309@iberopuebla.mx

Introducción

El ciclo de la marcha se define como el intervalo de tiempo que transcurre entre dos apariciones sucesivas de uno de los eventos repetitivos de la locomoción [1]. El primer doble apoyo ocurre cuando el talón derecho hace contacto con el suelo mientras el pie izquierdo aún permanece apoyado. Durante la fase de balanceo del pie izquierdo, el pie derecho es el único en contacto con el suelo, lo que da lugar a una fase de apoyo unilateral derecho que concluye con el contacto del talón izquierdo. La fase de apoyo representa aproximadamente el 40 % del ciclo, la fase de balanceo otro 40 %, y las fases de doble apoyo comprenden en conjunto cerca del 20 % [2].

Un exoesqueleto se entiende como una estructura mecatrónica diseñada para acoplarse externamente a una extremidad, permitiendo el desarrollo de movimientos en sus diferentes articulaciones. Estos movimientos son ejecutados mediante actuadores, los cuales determinan los grados de libertad del dispositivo [3].

El objetivo de este proyecto es diseñar, modelar y construir un prototipo funcional de un exoesqueleto para el tronco inferior que simule el ciclo de la marcha, integrando servomotores y sistemas de programación, asegurando su viabilidad estructural y operativa. Se busca que el proyecto aporte valor al campo de la ingeniería biomédica en el área de rehabilitación, al ofrecer pruebas de manera escalada con el prototipo, en un futuro pueda usarse para terapias asistidas y mejorar el movimiento de los pacientes con dificultades de locomoción.

Metodología

El exoesqueleto se desarrolló en fases:

Fase 1:

Una vez definidos los requerimientos y características del exoesqueleto, se realizaron bocetos y esquemas conceptuales para determinar la viabilidad del diseño.

Fase 2:

Se realizó el diseño del exoesqueleto en el software CATIA y se cortaron las piezas en láminas de MDF con un grosor de 3 mm.

Fase 3:

Se programó un código que simuló el ciclo de la marcha con los distintos ángulos y sincronización de tiempos de las partes del exoesqueleto en el prototipo. Fase 4:

Se armaron las partes del exoesqueleto con los materiales de menor peso que se encontraron (pegamento industrial y tornillos de 5 mm). Se colocaron los servomotores en sus respectivos lugares. Se calibraron las hélices de estos en 90 grados para el inicio del ciclo, ya que era el ángulo estable con el peso del exoesqueleto y permitía girar en ambas direcciones.

Fase 5:

Se llevaron a cabo dos pruebas, diez veces cada una. La primera consistió en que el exoesqueleto caminara a lo largo de 5 metros; se determinó cuántos pasos y el tiempo que le tomó completar el circuito. La segunda consistió en sostener el exoesqueleto desde la base superior, donde realizó los pasos durante un periodo de 1 minuto. En cada prueba se observó si se cumplían las tres fases (balanceo, apoyo y doble apoyo). Se registró como "1" si se cumplía y "0" si no se cumplía. Se consideró como cumplido si cada fase duraba el tiempo correspondiente al porcentaje dentro del ciclo de la marcha establecido para la prueba: fase de apoyo 40% (40 segundos), fase de balanceo 40% (40 segundos) y fase de doble apoyo 20% (20 segundos).

Resultados y Discusión

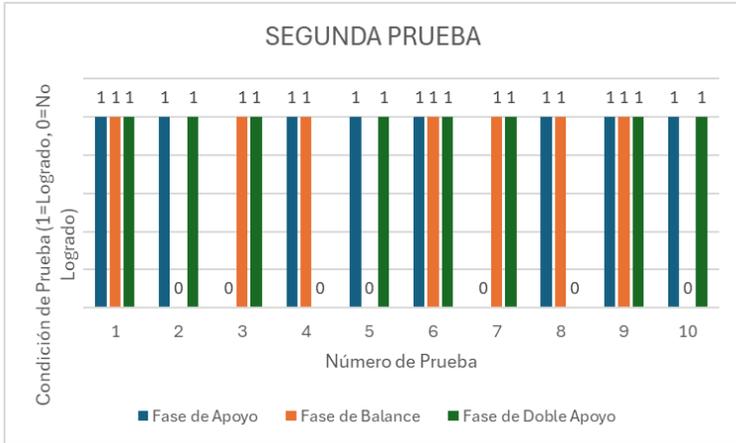


Figura 2. Resultados de la segunda prueba

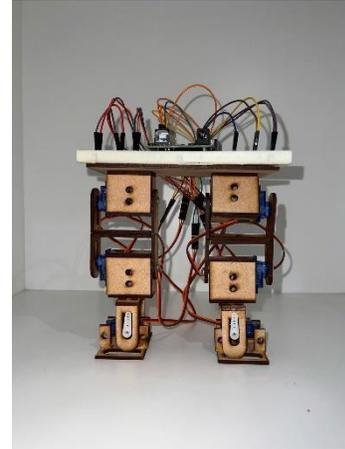


Figura 1. Exoesqueleto bípedo armado

Tabla 1. Comparación resultados de la primera prueba

Prueba #	PASOS	TIEMPO (segundos)
1	20	30
2	19	29
3	17	28
4	17	28
5	19	29
6	20	30
7	19	29
8	17	28
9	18	30
10	19	30
Promedio	18.5	29.1

En la fase 1, donde se definieron los requerimientos funcionales del dispositivo y se elaboraron bocetos y esquemas conceptuales, obtuvimos permitió evaluar la viabilidad técnica del diseño final, como se evidencia en la Figura 1.

En la fase 2, se trasladó al entorno digital mediante el software CATIA, lo que permitió generar planos técnicos. Posteriormente, se cortaron las piezas en láminas de MDF de 3 mm. El montaje (Figura 1) confirmó que el diseño estructural fue adecuado, ya que el exoesqueleto logró soportar su propio peso y alojar los seis servomotores.

En la fase 3, se creó el código de programación. Se analizó el ciclo de la marcha con distintos ángulos, los tiempos correspondientes y su funcionamiento. Se probó para realizar movimientos repetitivos y consistentes, como se describe en la Tabla 1 y Figura 2.

En la fase 4, las piezas se ensamblaron utilizando materiales de bajo peso, como pegamento industrial y tornillos de 5 mm. Los servomotores se instalaron y se calibraron en una posición inicial de 90°, elegida por ser el punto de equilibrio bajo el peso del exoesqueleto, se observó una ligera variabilidad en el movimiento, atribuible a fricción en las articulaciones o pérdida de torque, como reflejan las pequeñas variaciones en la repetitividad de los pasos (Tabla 1).

En la fase 5, se realizaron dos tipos de pruebas. La primera, caminando de forma autónoma en un tramo de 5 metros, reveló una media de 18.5 pasos y 0.636 pasos/segundo (Tabla 1), lo que indica una ejecución funcional, aunque lenta. La segunda prueba, sostenida desde la parte superior, permitió analizar el cumplimiento de las fases de la marcha, se visualizó la ejecución del exoesqueleto y en los tiempos que lo realizó como se ve en la Figura 2.

Conclusiones

Aunque en algunas ocasiones se detectaron pequeñas variaciones en los tiempos de las fases de la marcha, los resultados generales muestran que el exoesqueleto es funcional y cumple los objetivos propuestos, demostrando la viabilidad del diseño tanto mecánico como de control. Gracias a su diseño en conjunto, el exoesqueleto pudo sostener su propio peso y lograr un movimiento adecuado. Uno de los principales aspectos a mejorar es que, con el uso continuo, se observa un desfase en los servomotores. Con este avance, al escalarlo a un tamaño real, podría utilizarse en pacientes para rehabilitación, sin embargo, será necesario optimizar el diseño para mejorar la resistencia al desgaste y asegurar que el rendimiento no disminuya con el tiempo.

Referencias

- [1] C. C. M. Alejandro, R. S. Felipe y B. L. Asfur, "Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación." URL: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-97622010000100008&script=sci_arttext
- [2] D. A. Tibaduiza-Burgos, P. A. A. Parra y M. A. Vejar, "Exoesqueleto para rehabilitación de miembro inferior con dos grados de libertad orientado a pacientes con accidentes cerebrovasculares," *Inge CUC*, vol. 15, no. 2, pp. 36–47, Sep. 2019, doi: 10.17981/ingecuc.15.2.2019.04.
- [3] P. Gras, J. M. Casillas, V. Dulieu y J. P. Didier, "La marche," *Encycl. Méd. Chir. (Elsevier, Paris-France), Kinésithérapie-Rééducation fonctionnelle*, 26-013-A-10, 1996, 18 p.
- [4] R. López, H. Aguilar, S. Salazar, R. Lozano y J. A. Torres, "Modelado y control de un exoesqueleto para la rehabilitación de extremidad inferior con dos grados de libertad," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 11, no. 3, pp. 304–314, 2014, doi: 10.1016/j.riai.2014.02.008.