

# Diseño mecánico de un exoesqueleto semiactivo de 3 GDL para rehabilitación de rodilla.

Oscar A. Flores-García<sup>1</sup>, Julio C. Chaparro-Rojas<sup>1</sup>, María G. Ángeles-Bautista<sup>1</sup>, René F. Santana-Cruz<sup>1</sup>, Armando Berrios-Martínez<sup>1</sup>, Martín Moreno-Guzmán<sup>1</sup> y Iván Trejo-Zúñiga<sup>1\*</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Av. La Palma No. 125, Col Vista Hermosa, 76800, San Juan del Río, Querétaro, México

\*Autor de correspondencia: [itrejoz@utsjr.edu.mx](mailto:itrejoz@utsjr.edu.mx)

## Resumen

La robótica de rehabilitación es una alternativa innovadora para mejorar o recuperar la movilidad en extremidades de personas con discapacidad motora. Un equipo robótico de esta naturaleza puede realizar ejercicios de una terapia optimizados en posición, velocidad y aceleración, con lo que se minimiza la atención necesaria del terapeuta. En este trabajo, se presenta el diseño de exoesqueleto de 3 Grados De Libertad (GDL) planar semiactivo que permite generar los movimientos requeridos para la rehabilitación de rodilla. El diseño permitirá ajustarse a diferentes tallas de extremidades en los pacientes tratados. Por otro lado, el análisis cinemático directo da la oportunidad de evaluar el movimiento del mecanismo de rehabilitación, ya que permite encontrar las relaciones que indique la localización en el espacio del extremo de la cadena cinemática, a partir de los valores de sus coordenadas articulares. Esto permitirá que el prototipo sea capaz de generar las trayectorias necesarias para ejecutar los ejercicios de rehabilitación.

**Palabras clave:** Exoesqueleto, Rehabilitación, Cinemática directa.

## Abstract

Rehabilitation robotics is an innovative alternative to improve or recover mobility in limbs of people with motor disabilities. Robotic equipment of this nature can perform therapy exercises optimized in position, speed and acceleration, thus minimizing the attention required from the therapist. In this work, we present the design of a 3 Degrees of Freedom (GDL) planar semi-active exoskeleton that allows to generate the movements required for knee rehabilitation. The design will allow adjusting to different limb sizes in the treated patients. On the other hand, the direct kinematic analysis gives the opportunity to evaluate the movement of the rehabilitation mechanism, since it allows finding the relationships that indicate the location in space of the end of the kinematic chain, from the values of its articular coordinates. This will allow the prototype to be able to generate the necessary trajectories to execute the rehabilitation exercises.

**Keywords:** Exoskeleton, Rehabilitation, Direct Kinematics.

## Introducción

De acuerdo con el análisis del artículo “Informe Mundial sobre la Discapacidad”, (Organización Mundial de la Salud, 2011), más de mil millones de personas viven en todo el mundo con alguna forma de discapacidad; de ellas, casi 200 millones experimentan dificultades considerables en su funcionamiento motriz.

A lo largo de la historia, la mayoría de las personas con discapacidad no logran realizar sus actividades de manera óptima ya que la sociedad les da una menor participación. Un ejemplo de ello tiene que ver con los servicios públicos, los cuales no se han mostrado empáticos con estas personas ya que no son accesibles para toda la comunidad. Además, se entorpecen sus resultados laborales o académicos, lo que afecta sus ingresos económicos. Una de estas consecuencias es la alteración del nivel de tasa de pobreza.

Existen dos tipos de robots para rehabilitación: los que ayudan a las personas con sus actividades diarias y los que se encargan de proporcionar terapia para después desacoplarse de la extremidad de la persona. En ocasiones, estos sistemas están conformados por la estructura (exoesqueleto), además de una plataforma virtual donde se pueden mostrar juegos o trayectorias que el paciente debe seguir como parte de la terapia. Lo anterior le permite al fisioterapeuta llevar a cabo un adecuado seguimiento del progreso en la recuperación del paciente.

Con los sistemas robóticos para asistencia y rehabilitación, el paciente logra una recuperación más eficiente, ya que tienen el potencial de mejorar y aumentar los resultados obtenidos de la terapia. Lo anterior quiere decir que, en el ámbito de la medicina, el enfoque del exoesqueleto es recuperar capacidades (movilidad y fuerza) que ha perdido el paciente, debido a diferentes razones, por ejemplo enfermedades o accidentes.

Finalmente, vale la pena mencionar que se cuenta con diferentes tecnologías que brindan opciones de rehabilitación; pero el desarrollo tecnológico no ha sido la suficiente. He ahí la importancia de desarrollar

alternativas que permitan abordar problemas sociales, que ayuden al sector salud eje prioritario.

## Metodología

El diseño del prototipo parte de las necesidades observadas en el usuario, además de buscar que este sea cómodo y ergonómico. De acuerdo con el planteamiento de los principios anteriores, realizaremos el análisis de los antecedentes e iremos sumando o descartando ideas. Trabajaremos con articulaciones, eslabones, motor y transmisión; para ello, es esencial tener noción del significado y principios de funcionamiento, pues, de esta manera, se implementen de la mejor manera dentro de nuestro prototipo.

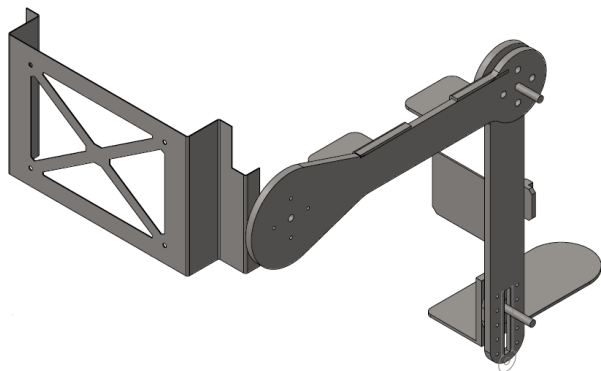
a) Articulaciones: es la unión que existe entre dos o más huesos o entre un hueso y un cartílago. Su labor principal es formar estructuras de unión permitiendo el movimiento del cuerpo humano o la movilización de las partes involucradas (Lacambra, 2019).

b) Eslabones: cada uno de los sólidos rígidos que componen la máquina. En la literatura técnica suelen usarse también otros nombres como elemento, miembro o barra. El concepto de pieza se halla en un nivel inferior al de eslabón, pues una sola pieza, o un conjunto de piezas unidas formando un sólido rígido, constituyen un eslabón (Galán Marín & Reino Flores, 2020).

c) Motor: el motor es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de campos magnéticos. Los motores eléctricos se componen de lo siguiente: el estator, la carcasa, la base, el rotor, la caja de conexiones, las tapas y los cojinetes, no obstante, un motor puede funcionar solo con el estator y el rotor (Fernando, 2018).

d) Transmisión: realiza el proceso de conversión de energía generalmente con transformaciones de los momentos, fuerzas, velocidades, a veces, con la variación del carácter y de la ley del movimiento. (Patiño Duque, López Posada & Mosquera Angulo, 2017).

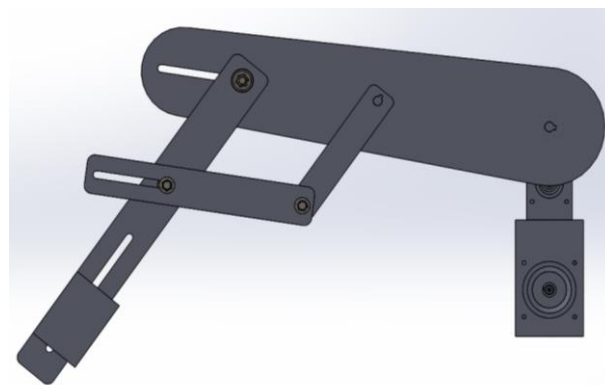
## Diseño de la estructura del robot



**Figura 1.** Prototipo 1 de exoesqueleto para rehabilitación. Cuenta con 2 grados de libertad activos en rodilla y cadera y dos eslabones de longitud fija. Fuente: elaboración propia

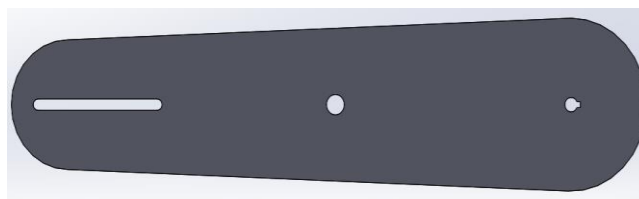
Partiendo del análisis del prototipo 1 que se muestra en la Figura 1, se identifican algunas fallas importantes en el diseño. Primero, el prototipo no contaba con la capacidad de variar la longitud del eslabón principal, lo que impide la posibilidad de ajuste a las dimensiones de pierna de diferentes usuarios. Esta situación genera que las articulaciones del exoesqueleto no concordaban con las articulaciones correspondientes de la anatomía del paciente. Esto ocasionaba incomodidad al usuario y el movimiento durante su terapia era deficiente con lo que se provocaba un mayor daño.

Se propone entonces modificar el diseño incorporando un mecanismo de cuatro barras, Figura 2, el cual dará mayor estabilidad al realizar el movimiento y permitirá adecuar el largo para el fémur y para la tibia o pantorrilla. Con lo anterior, se colocaría el punto de flexión del exoesqueleto exactamente al nivel de la rodilla.



**Figura 2.** Diseño con mecanismo de 4 barras. Exoesqueleto de 3 grados de libertad, 2 activos para rodilla y cadera y 1 pasivo para ajuste de longitud del primer eslabón. Fuente: elaboración propia

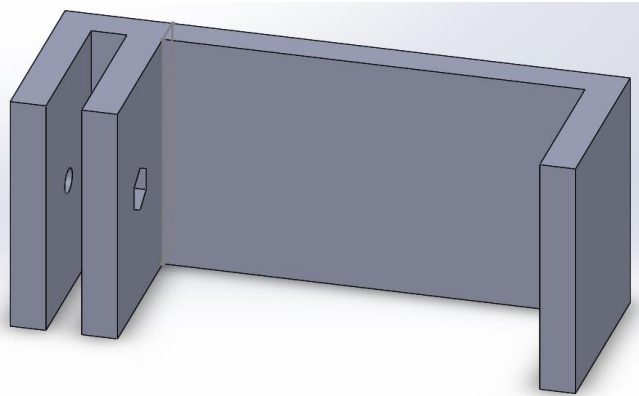
Se inicia por modificar de manera sencilla el eslabón principal, Figura 3, se añade una ranura por la cual puede pasar un rodamiento y un tornillo que permitirá ajustar el largo del eslabón; además de barrenar para la transmisión de movimiento del segundo eslabón del mecanismo.



**Figura 3.** Eslabón principal. Se muestra la ranura que permitirá el ajuste adecuado para igualar la longitud de la pierna del usuario, además, se muestran los barrenos para la transmisión de movimiento para rodilla y cadera.

Fuente: elaboración propia

Se diseñaron los otros tres eslabones ranurando para el ajuste de la distancia y se perforó para la transmisión del movimiento. Con lo anterior, se crearían las uniones o puntos de flexión. Se diseñó también la pieza que sostendrá la pantorrilla del usuario, Figura 4, la que encaja y se desliza por la ranura del eslabón secundario para permitir el ajuste de longitud.



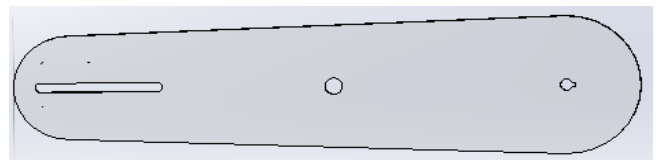
**Figura 4.** Soporte para pantorrilla. Fuente: elaboración propia

Finalmente, el segundo problema a resolver del prototipo 1 es el mal diseño para la transmisión del movimiento articular. Se diseñó de tal manera que el actuador conectara directamente en la posición extremo del eslabón principal para generar una palanca y aplicar una fuerza en la articulación de la cadera, lo que dificulta el movimiento de esta. Para solucionar este problema, se optó por un mecanismo de banda dentada y poleas, el cual permite una transmisión del movimiento de la rodilla sin que el actuador esté directamente conectado a la articulación de la rodilla para evitar la palanca que se generaba en el prototipo 1, véase Figura 5.

**Figura 5.** Mecanismos de transmisión de movimiento. Sistema de transmisión con banda y poleas. Fuente: elaboración propia

*Análisis de materiales para la construcción del eslabón principal.*

Se realizaron diferentes análisis estáticos y topológicos mediante el software SolidWorks® para poder analizar los diferentes pesos y resistencias mecánicas que otorgan los materiales; además, determinar cuál sería una materia viable y con esto lograr un prototipo funcional. Los materiales seleccionados son acrílico de impacto medio-alto y aleación de aluminio 6063, los cuales colocaremos como material de la pieza principal, véase Figura 6.



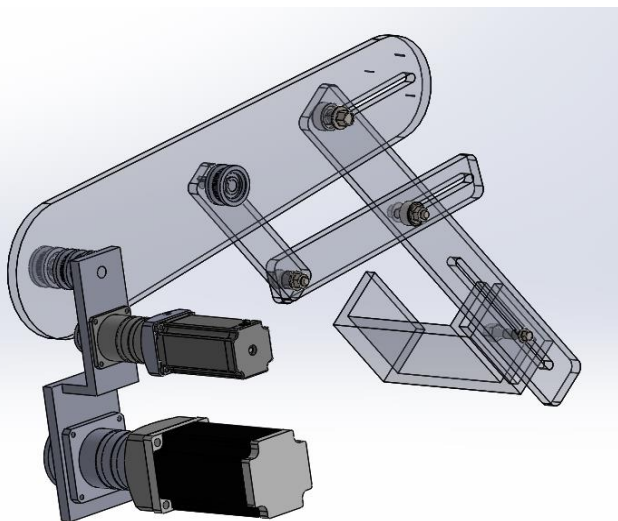
**Figura 6.** Pieza principal para análisis.

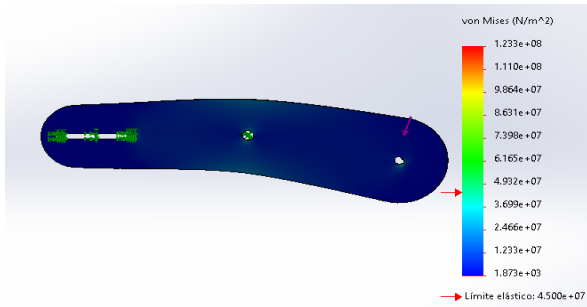
El primer análisis ejecutado fue con acrílico, el cual da como resultado el valor de la Figura 7.

**Masa = 612.13 gramos**

**Figura 7.** Masa de la pieza en acrílico. Fuente: elaboración propia

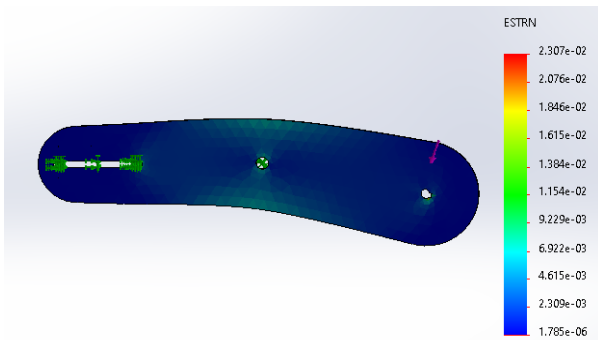
De acuerdo con la gráfica de Von Mises ( $N/m^2$ ), este resultado hace referencia a las tensiones que se están ejerciendo sobre la pieza en un milímetro cuadrado el límite elástico de la pieza. Con este material, está en los  $4.5e+07$  indicando que nuestra pieza se verá deformada a partir de ese valor. El color rojo resulta ser el indicador de los puntos críticos en la pieza, es decir los puntos con mayor fuerza aplicada, véase Figura 8.





**Figura 8.** Gráfica de Von Mises acrílico. Fuente: elaboración propia

La deformación es un punto importante para analizar en una pieza expuesta a fuerzas y poder predecir los posibles cambios físicos que tendrá en diferentes puntos. Por lo anterior, analizamos la gráfica de deformaciones en la Figura 9, la cual nos da una escala en ESTRN, deformación unitaria equivalente que podremos observar las deformaciones.



**Figura 9.** Gráfica de deformaciones acrílico. Fuente: elaboración propia

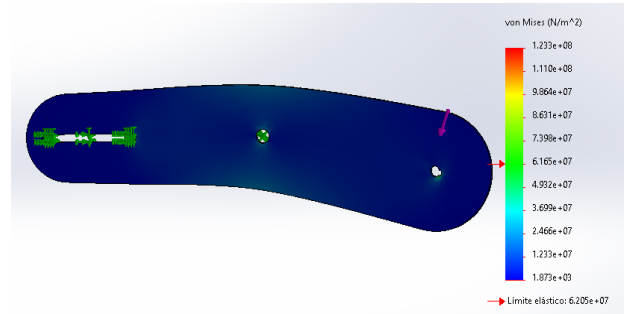
El segundo material a analizar sería el aluminio 6063, con el cual tendremos el mismo procedimiento que anteriormente desarrollamos con el acrílico. Esto da como resultado en la masa el valor de la Figura 10.

**Masa = 1377.29 gramos**

**Figura 10.** Masa de la pieza en aluminio

En la gráfica de Von Mises, Figura 11, logramos observar que el coeficiente elástico del material es más alto que el del acrílico con un valor de  $6.205 \times 10^7$ . Como se observa, este material es más confiable en

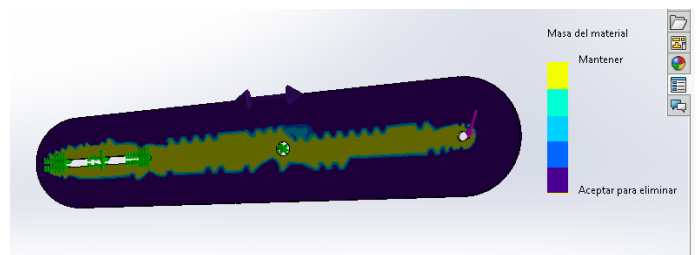
cuanto a resistencia mecánica con una diferencia del 36 % con el acrílico.



**Figura 11.** Gráfica de Von Mises para aluminio. Fuente: elaboración propia

En este material, tenemos una gran ventaja en cuanto a resistencia mecánica, pero una gran desventaja en el peso de la pieza: esta se eleva a poco más del doble en comparación de la pieza fabricada en acrílico. Por lo anterior, optamos por hacer una combinación de materiales y se colocaron algunos refuerzos de aluminio dentro de un marco de acrílico. Con ello, se logró obtener lo mejor de cada material por lo cual ejecutaremos un último análisis llamado análisis topológico para poder identificar las partes que necesitan refuerzo.

En la Figura 12 podemos observar de color oscuro las partes que no son críticas, por lo que optamos no conservar y de color amarillo las partes que necesariamente se requieren conservar en material de aluminio. Por lo tanto, la parte amarilla será reformada para su mecanizado en aluminio y la parte azul, para su mecanizado en acrílico.



**Figura 12.** Análisis Topológico. Fuente: elaboración propia

Para reestructurar la pieza haremos uso del resultado del análisis topológico de la pieza para poder crear una pieza de forma irregular la cual será tiene un rol de núcleo.

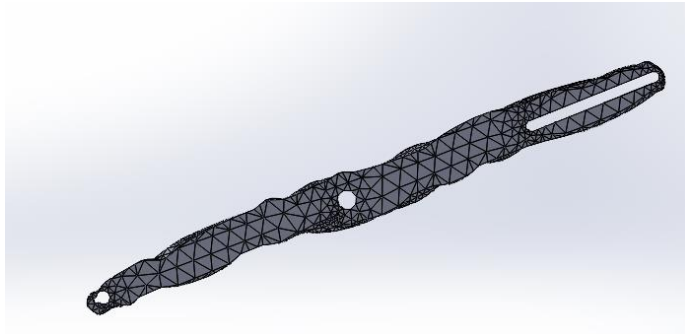


Figura 13. Pieza resultante. Fuente: elaboración propia

Con el resultado mostrado en la Figura 13 podemos simplificarlo y desarrollar una pieza para manufacturar con mayor facilidad, véase Figura 14.

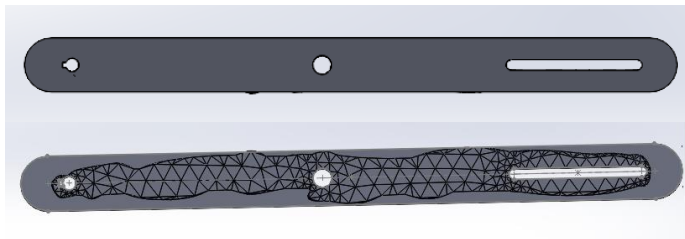


Figura 14. Pieza resultante optimizada en aluminio.  
Fuente: elaboración propia

## Conclusiones

El uso de herramientas de diseño computacional nos proporciona una ventaja sustancial cuando se necesita un prototipado ágil y para el desarrollo de piezas de fácil manufactura, que brindan un rendimiento esperado. En este trabajo, se presentó la propuesta de un prototipo para rehabilitación de miembro inferior con 3 GDL, 2 activos para cadera y rodilla y 1 pasivo. Con lo anterior, el propósito fue el ajuste en del exoesqueleto a la anatomía del paciente haciéndolo versátil y estable con el sistema de 4 barra incluido. Se presenta una metodología para el diseño de piezas optimizadas con el propósito de reducir peso y espacio, sin perder las propiedades mecánicas de las piezas del prototipo.

## Referencia

- Organización Mundial de la Salud & Banco Mundial. (2011). *Informe mundial sobre la discapacidad 2011*. Organización Mundial de la Salud.
- Burbano-Ortiz, J. F., (2018). *Reparación de una bicicleta eléctrica*. [Proyecto Técnico]. Colegio de Ciencias e Ingeniería, Universidad San Francisco de Quito, USFQ. <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7287/1/138226.pdf>
- Reino-Flores, M. & Galán-Marín, G., (2020). *Cinemática de Mecanismos Planos Teoría y Problemas Resueltos*. (1ª ed.) Universidad de Extremadura. Servicio de publicaciones. <https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/11670/1/978-84-09-25222-0.pdf>
- Gil-Casares, & Lacambra, Pablo. (2019). *Estudios biomecánicos de las articulaciones humanas mediante modelos fotoelásticos 2D y la técnica de congelación de tensiones*. [Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado]. E.T.S.I. Industriales (UPM). <https://oa.upm.es/view/institution/Industriales/>
- Patiño-Duque, H. D., Lopez-Posada, L. M., & Mosquera-Angulo, E. S. (2017). Metodología del diseño y modelado de un accionamiento mecánico. *Scientia Et Technica*, 22(1), 24–33. <https://doi.org/10.22517/23447214.12801>