

Diseño y simulación de un prototipo artromecánico para la aplicación de cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo

Padilla-Silva, A. F.¹; González-Vargas, L. A.¹; Alvarado-Tovar, N.¹; Machado-Díaz, E.¹; Huerta-Valenzuela F.¹

Datos de Adscripción:

¹ TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Posgrado, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez-Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.
mm2210965@itslerdo.edu.mx

Resumen – El enfoque del presente artículo radica en el diseño y simulación de un dispositivo artromotor, el cual tenga como función rehabilitar las lesiones causadas por la actividad física o deportes en las articulaciones de la rodilla y el tobillo específicamente, a través de la aplicación de la cinesiterapia.

Los objetivos principales del prototipo artromecánico son, recuperar o rehabilitar parcial o totalmente una lesión en las articulaciones de la rodilla y el tobillo a través del movimiento, así como también, reducir la carga física que realiza un fisioterapeuta al ofrecer una sesión de terapia.

Este dispositivo se diseñó a partir de la toma de medidas de la longitud del fémur, tibia, peroné y pie de una población de 69 personas (hombres y mujeres), las cuales están en un rango desde los 20 hasta los 40 años de edad. Todos los datos estadísticos, se realizaron en Microsoft Excel, donde se obtuvieron datos como el promedio, varianza, desviación estándar y las gráficas de la distribución normal. Lo anteriormente mencionado ayudó a que se le asignaran las medidas al dispositivo en donde se ubica el fémur y la tibia, principalmente.

Tanto el diseño mecánico como la simulación de movimiento se realizaron en el software de diseño NX, el cual nos ofreció resultados de rango de movimiento del prototipo, así como también el análisis estructural del mismo.

Palabras Clave – Artromotor, Cinesiterapia, Diseño Mecánico, Siemens NX.

Abstract - The focus of this article lies in the design and simulation of an arthromotor device, whose function is to rehabilitate injuries caused by physical activity or sports in the knee and ankle joints, specifically, through the application of the kinesitherapy.

The main objectives of the arthromechanical prototype are to partially or totally recover or rehabilitate an injury to the knee and ankle joints through movement, as well as to reduce the physical load that a physiotherapist performs when offering a therapy session.

This device was designed from taking measurements to a population of 69 people (men and women), who are in a range

from 20 to 40 years of age. All the statistical data were carried out in Microsoft Excel, where data such as the average, variance, standard deviation and graphs of the normal distribution were obtained. The aforementioned helped to assign the measurements to the device where the femur and tibia are located, mainly.

Both the mechanical design and the movement simulation were carried out in the NX design software, which offered us results of the range of movement of the prototype, as well as its structural analysis.

Keywords – Arthromotor, Kinesitherapy, Mechanical Design, Siemens NX.

I. INTRODUCCIÓN

La rehabilitación de lesiones de rodilla y el tobillo representa un desafío significativo para los profesionales de la salud y los pacientes. La cinesiterapia, que implica el uso de movimientos terapéuticos controlados, se ha convertido en una herramienta fundamental en el proceso de recuperación y fortalecimiento de las articulaciones afectadas. (Fernández de las Peñas & Melián Ortiz, 2019) En este contexto, el diseño y la simulación de prototipos artromotores han surgido como una prometedora solución para facilitar la aplicación precisa y personalizada de la cinesiterapia en estas áreas.

El presente artículo se centra en el desarrollo de un prototipo artromotor diseñado específicamente para la aplicación de cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo. A través de un enfoque multidisciplinario que combina la ingeniería biomédica, la biomecánica y la fisioterapia, se busca proporcionar a los profesionales de la salud y a los pacientes una herramienta efectiva y segura para la rehabilitación de estas articulaciones. Las lesiones de rodilla y tobillo son comunes en deportistas, personas mayores y aquellos que han sufrido accidentes traumáticos. Estas lesiones pueden variar desde esguinces y distensiones hasta fracturas y desgarros de ligamentos (Walker, 2017).

En la actualidad, la cinesiterapia conlleva una serie de pasos para ofrecerle al paciente la rehabilitación más adecuada para su lesión. Primero, se hace una evaluación inicial, en la que se recaba el historial médico, lesiones anteriores, síntomas actuales y objetivos de tratamiento. Después, procede al diseño del plan de tratamiento, esto es personalizado, en el cual define la frecuencia y duración de las sesiones de cinesiterapia. Luego, siguen las sesiones de tratamiento, en las cuales se sigue el plan de tratamiento para que posteriormente, el terapeuta supervise y

corrija los movimientos realizados por el paciente para que los lleve a cabo de manera segura, también puede realizar ajustes y correcciones al plan de tratamiento. Finalmente, a medida que avanza el tratamiento, el terapeuta realiza un seguimiento regular del progreso del paciente y ajusta el plan de tratamiento según sea necesario. Esto puede implicar aumentar la intensidad de los ejercicios, agregas nuevas técnicas o modificar los objetivos en función de los cambios en la condición del paciente.

La rehabilitación adecuada es crucial para restaurar la función y la movilidad de la articulación afectada, reducir el dolor y prevenir complicaciones a largo plazo (Hüter-Becker, Schewe, & Heipertz, 2005), es por eso, que esta área ha resultado de gran interés para muchos investigadores, por lo cual aquí se mencionan algunos de los trabajos relacionados:

Un primer trabajo corresponde a Suleidy Quesada (Cuéllar & Obregón Sánchez, 2021), quien realizó la: "Propuesta de rediseño ergonómico del modelo de utilidad: Órtesis de rodilla para personas con discapacidad motriz". En este trabajo se propone un rediseño de órtesis para obtener como producto un dispositivo funcional, seguro, eficiente, estético y confortable, tomando en cuenta las dimensiones antropomórficas para dar soporte a la articulación durante el ciclo de la marcha en pacientes con lesiones de rodilla o ausencia de control muscular. Este dispositivo tiene una segunda función, que es la de servir como equipo de diagnóstico de patologías del sistema muscular. Uno de sus principales aportes fue definir que un dispositivo que tiene como propósito ayudar a mejorar el movimiento de un ser humano, tiene que ser diseñado basándose en el usuario, esto para garantizar que tenga las dimensiones y el peso adecuados, que se adapte ergonómicamente a la extremidad y que se utilicen los materiales correctos para el fin de este dispositivo.

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso, ya que propone un diseño basado en el usuario, en el que se estén realizando pruebas experimentales directamente con un paciente piloto para llevar a cabo las mejoras al dispositivo de una manera más rápida y eficiente.

Un segundo trabajo corresponde a R. Gutiérrez (Gutiérrez, Venegas, Duque, & Avilés, 2017) quien realizó el estudio: "Diseño y control de un exoesqueleto para rehabilitación motora en miembro superior".

Primeramente, expone la necesidad de la creación de un dispositivo mecatrónico como soporte para los fisioterapeutas ya que, al realizar las terapias de forma manual, provocan en el profesional cansancio físico y potenciales lesiones en el sistema musculoesquelético.

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso, ya que también toma en cuenta la biomecánica del cuerpo y conceptos como flexión, extensión y rotación de las articulaciones, que, aunque R. Gutiérrez trabajó con las articulaciones de los miembros superiores, los conceptos igualmente se aplican a las articulaciones de los miembros inferiores, como en esta investigación, la rodilla y el tobillo. También se relaciona, ya que incluyó un método de control para los ciclos de terapia, así como una base de datos para generar un historial del paciente y su rehabilitación.

El último trabajo corresponde a Gustavo Castellón (Castillón Ramírez, 2021) quien realizó la tesis titulada "Diseño y desarrollo de un dispositivo de asistencia para la rehabilitación motriz de extremidades inferiores de pacientes con secuela de accidente

cerebrovascular".

Lo anterior se basa principalmente en una técnica llamada "terapia espejo", la cual es ampliamente utilizada en la fisioterapia, ya que se caracteriza por la creación de una imagen virtual de una parte del cuerpo, en este caso, de la pierna.

Su trabajo se relaciona con el presente proyecto, ya que se pretende crear una estructura mecánica muy parecida a la propuesta por Castellón, así como también integrarle un método de control y una interfaz gráfica para que haya interacción fisioterapeuta-dispositivo y dispositivo-usuario.

En resumen, este trabajo pretende ofrecer una solución innovadora y accesible para la rehabilitación de lesiones de rodilla y tobillo a través del diseño y simulación de un prototipo artromotor. Se espera que este prototipo pueda contribuir significativamente a la mejora de los resultados terapéuticos y la calidad de vida de los pacientes con estas lesiones.

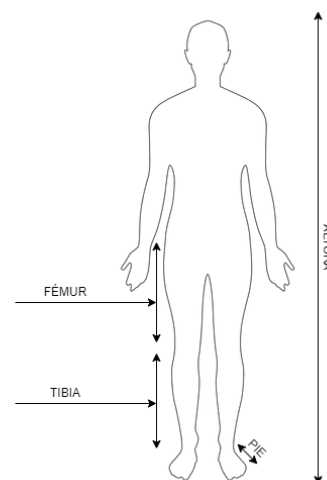
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Definición de medidas para el prototipo mediante el muestreo estadístico.

Una de las primeras actividades a llevar a cabo, fue la toma de medidas a una población, en el presente trabajo los sujetos de estudio están compuestos por un total de 69 personas, hombres y mujeres, de entre 20 a 40 años de edad. Se tomaron cuatro medidas principales, las cuales fueron: la altura, longitud del fémur, longitud de la tibia y el peroné y la medida del pie, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 1.

Medidas tomadas en una persona.



Todo lo anterior para definir las medidas que deberá tener el prototipo artromotor, el cual de la misma forma deberá ser ajustable a diferentes medidas para que sea adaptable a toda la población que se eligió.

Una vez que se tomaron las medidas, se procedió a realizar los análisis estadísticos para obtener los resultados buscados. La obtención de los datos estadísticos y gráficos se trabajaron a

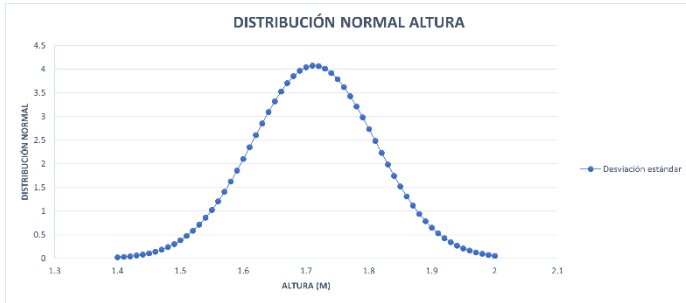
través del uso de Excel. Los datos de mayor importancia son: el máximo y el mínimo de cada una de las medidas tomadas, el promedio de éstas, así como también la desviación estándar y la distribución normal, ésta última sirve para indicar cuánto se alejan los valores de un conjunto de datos de su media, lo cual permite comprender mejor la forma en que se distribuyen los datos. Ver tabla 1.

Tabla 1.
Datos estadísticos obtenidos.

	ALTURA (M)	LONGITUD FÉMUR (CM)	LONGITUD TIBIA (CM)	MEDIDA PIE (CM)
PROMEDIO	1.7126087	48.3115942	39.51449275	26.572464
MÁXIMO	1.97	61	50	30
MÍNIMO	1.42	38	33	22
NÚMERO DE DATOS	69	69	69	69
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.0978993	3.836839088	3.285407816	1.8889683
VARIANZA	0.0095843	14.72133419	10.79390452	3.5682012
COEF. DE VARIACIÓN	0.0571638	0.079418598	0.083144375	0.0710874
LÍMITE MÁXIMO	1.810508	52.14843329	42.79990057	28.461432
LÍMITE MÍNIMO	1.6147094	44.47475512	36.22908494	24.683495

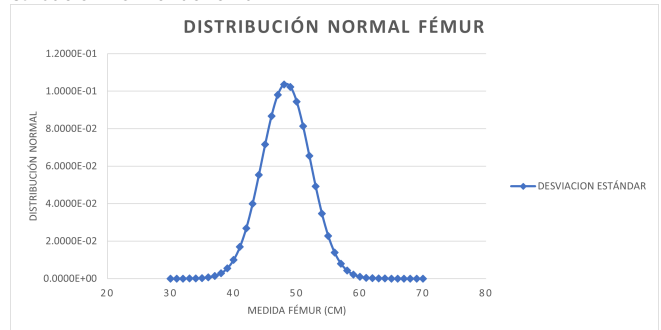
El primer dato obtenido fue la media de la altura, la cual según la muestra que se tomó, es de aproximadamente 1.70 m, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 2.
Distribución normal de la altura.



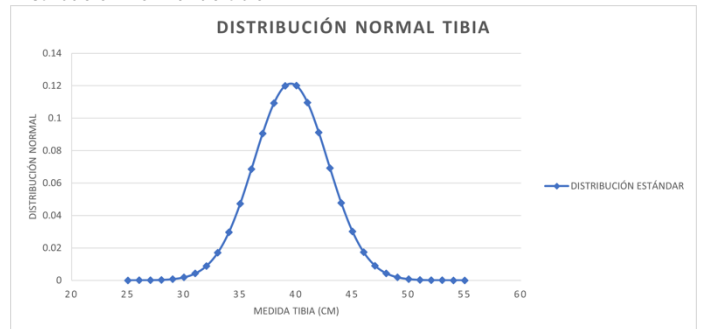
En el caso de la medida del fémur, la media es de 50 cm aproximadamente, sin embargo, como se mencionó anteriormente, las medidas del fémur como de la tibia y peroné tienen que ser ajustables para que se adapten a las medidas de cada una de las personas de la población muestreada, por lo cual, a partir de su mínimo y su máximo, se definió que la medida de esta parte del prototipo sería ajustable desde los 35 centímetros hasta los 65 centímetros. Los resultados se pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 3.
Distribución normal de fémur.



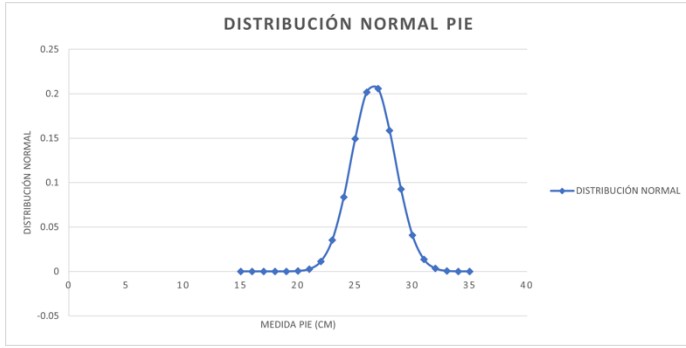
La definición de la medida de la pieza que soporta a la tibia y el peroné se hizo de la misma forma que con el fémur, por lo cual la medida de esta parte quedó ajustable desde los 30 centímetros hasta los 50 centímetros. Los resultados se pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 4.
Distribución normal de tibia.



Finalmente, la medida de la pieza que soportará al pie, quedó en aproximadamente 30 centímetros. Es importante mencionar que esta pieza en particular no será ajustable, ya que el hecho de que no sea así, no afecta el funcionamiento del prototipo ni resulta molesto para el usuario. Los resultados se pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 5.
Distribución normal de pie.



2.2 Creación de modelo 3D en software de diseño NX a partir de las referencias de medidas recabadas en el muestreo.

Como segundo paso, se realizaron las piezas necesarias para hacer una primera propuesta de prototipo en el software especializado NX, el cual otorga soluciones efectivas en diseño, simulación y fabricación, para que la persona encargada del proyecto no duplique esfuerzos (SIEMENS, 2023). El diseño del prototipo artromotor de la presente investigación se realizó a través de la aplicación de ingeniería inversa sobre distintos dispositivos existentes en el mercado, para así realizarle mejoras y proponer alguna innovación al mismo, por lo cual el resultado se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 6.
Vista isométrica del ensamble de propuesta.

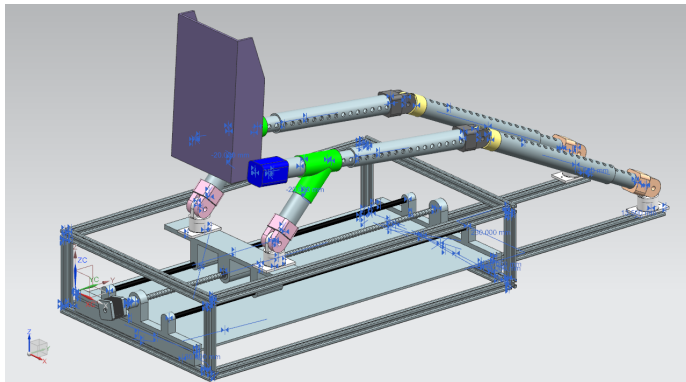
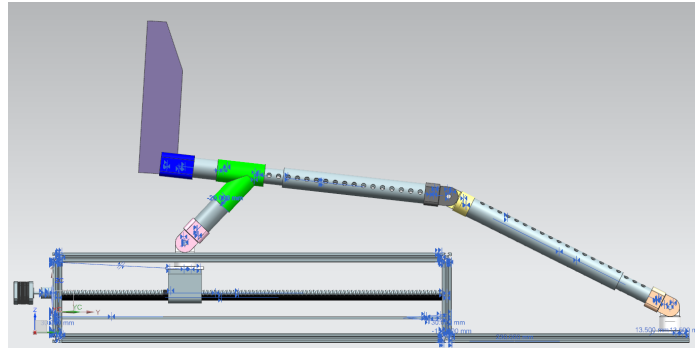


Figura 7.
Vista lateral derecha del ensamble.



En general, se realizó una base con perfiles de aluminio estructural 20x20 mm, la cual soportará a la pierna, la cual contiene tubos redondos de aluminio 6061 de 1 y 1 1/4 de pulgada, que tienen las medidas que se mencionaron en la definición de medidas para el prototipo mediante el muestreo estadístico, y que también cuenta con perforaciones a lo largo de todo el tubo, lo cual hace que pueda ser ajustable a diferentes medidas. El prototipo también cuenta con piezas fabricadas de PETG, ya que es un material que resulta práctico sin perder calidad, es reciclable, soporta altas presiones sin agrietarse y es resistente a entornos hostiles.

Por otro lado, en la parte del mecanismo, el prototipo cuenta con un husillo de 1000 mm de longitud y un grosor de 12 mm, el cual hace que la estructura que soporta a la pierna se mueva a través de él. También cuenta con dos varillas lisas que cumplen la función de soportar el peso y servir como guía lineal. Finalmente, el prototipo cuenta con piezas complementarias como: coples, escuadras para perfil de aluminio, soportes para varillas y husillo, entre otras.

2.3 Simulación y análisis estructural.

La simulación es una técnica que se utiliza para imitar o modelar el comportamiento de un sistema real mediante la construcción de un modelo matemático o físico. En ingeniería, la simulación se utiliza para analizar y diseñar sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos, hidráulicos, térmicos, entre otros.

El análisis estructural es una técnica que se utiliza para analizar el comportamiento de una estructura. El análisis estructural se basa en la mecánica de materiales y la teoría de las estructuras para determinar cómo se comportará una estructura bajo diferentes cargas y condiciones (Hibbeler, 2006).

La simulación y análisis estructural se complementan mutuamente, ya que la simulación se puede utilizar para modelar una estructura y simular su comportamiento ante diferentes cargas y condiciones, mientras que el análisis estructural se utiliza para analizar la respuesta de una estructura a diferentes carga y condiciones. En general, la simulación y el análisis estructural son herramientas importantes en la ingeniería y otras áreas para comprender y predecir el comportamiento de los sistemas complejos.

Primeramente, es importante mencionar que en este caso se optó por analizar solamente algunas piezas individualmente, las cuales fueron en su mayoría las piezas fabricadas con PETG, ya que son las únicas piezas con la que no se contaba la certeza de que soportaría el peso de la pierna de una persona.

Por otro lado, la forma en la cual se determinó el peso de una pierna en un individuo, es que, según la información obtenida, el

peso de una sola pierna en un ser humano conforma el 10% del total de su peso, de forma que, si se determina un peso máximo de 150 kilogramos, la estructura soportará 15 kilogramos aproximadamente.

Figura 8.
Análisis de deformación de pieza base-articulación.

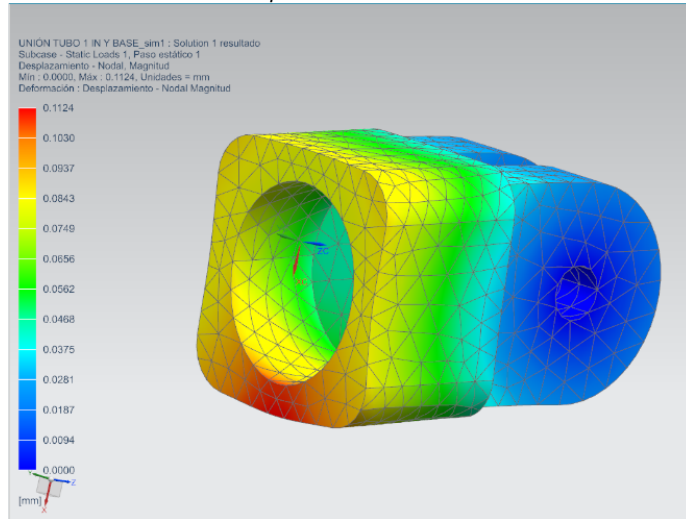


Figura 9.
Análisis de deformación de articulación tibia-rodilla.

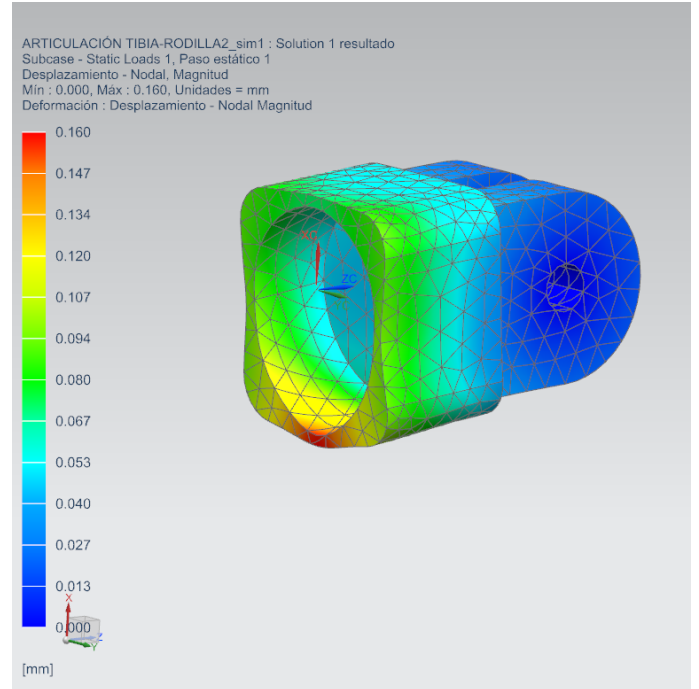
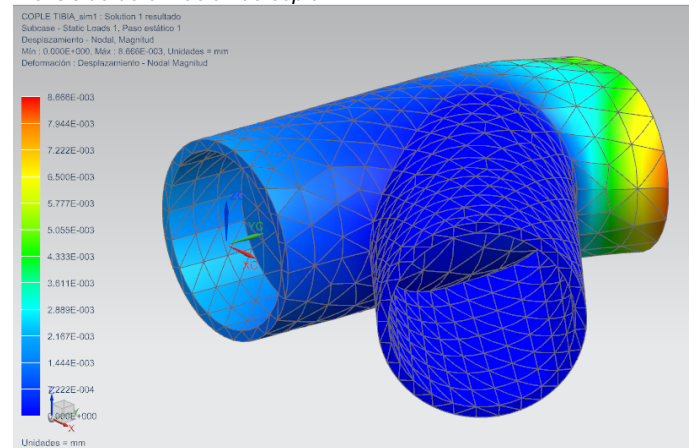


Figura 10.
Análisis de deformación de cople.



Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la deformación que causan las fuerzas aplicadas en las piezas es mínima, por lo tanto, se puede concluir que la selección del material es correcta y que soportará el peso aplicado a la hora de poner en marcha el dispositivo. En algunas piezas se observa más deformación debido a que su diámetro es menor comparada con las otras piezas.

En las figuras mencionadas anteriormente se muestra un texto en la parte superior izquierda, el cual contiene datos generales sobre la pieza analizada, como el nombre de la misma, el tipo de análisis estructural que se aplicó y el mínimo y máximo en unidades de mega pascales (MPa).

2.4 Análisis de modelo cinemático por método geométrico.

El análisis de un modelo cinemático por método geométrico es de suma importancia para el desarrollo y optimización de un prototipo artromotor. Este enfoque permite comprender y predecir el comportamiento del sistema mecánico involucrado, lo que resulta fundamental para garantizar su eficacia y seguridad. (Barrientos, 2007).

El análisis del modelo cinemático se realizó en la aplicación de Geogebra, en la cual se implementó el método geométrico.

Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

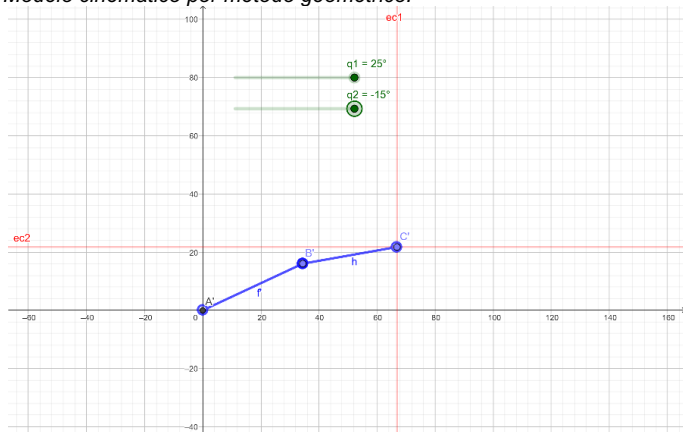
$$x = l_1 \cdot \cos(q1) + l_2 \cdot \cos(q1 + q2) \quad (1)$$

$$y = l_1 \cdot \sin(q1) + l_2 \cdot \sin(q1 + q2) \quad (2)$$

En esta ocasión se optó por realizar un modelo cinemático de 2 g.d.l. (excluyendo únicamente a la articulación del tobillo) para analizarlo mediante el método geométrico.

A través de las ecuaciones (1) y (2), se obtiene como resultado las coordenadas en x y y del extremo de la segunda articulación. En Geogebra, se hizo uso de segmentos, rotaciones, rectas y deslizadoras, éstos últimos para definir el rango de grados de movilidad de cada una de las articulaciones, en las cuales se dio un rango de 20° y 35°, respectivamente.

Figura 11.
Modelo cinemático por método geométrico.



El modelo cinemático se refiere a la descripción geométrica del movimiento de los elementos que conforman el prototipo artromotor. Al aplicar el método geométrico, se estudian las relaciones espaciales entre estos elementos, así como los ángulos y distancias involucrados en su movimiento (Baturone, 2005). Esto proporciona una base sólida para comprender cómo se desplazan las diferentes partes del prototipo y cómo interactúan entre sí.

La importancia del análisis cinemático radica en que permite identificar posibles problemas o limitaciones en el diseño del prototipo artromotor antes de su construcción. Al estudiar las trayectorias y las restricciones de movimiento, es posible detectar interferencias, áreas de conflicto o movimientos no deseados que podrían comprometer el funcionamiento del dispositivo. Estos hallazgos tempranos son esenciales para corregir errores de diseño.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo principal de este estudio fue diseñar y simular un prototipo artromecánico para la aplicación de cinesiterapia en lesiones. A continuación, se presentan los resultados obtenidos: En primer lugar, se diseñó un sistema artromecánico con base en los principios de la cinemática y la dinámica articulares. El prototipo consiste en un dispositivo robótico que simula los movimientos fisiológicos de la rodilla y el tobillo, permitiendo una amplia gama de ejercicios terapéuticos. Los movimientos de flexión y extensión se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 12.
Movimiento de extensión de prototipo.

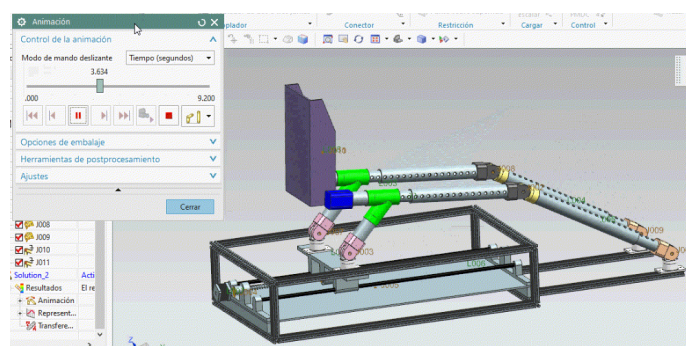
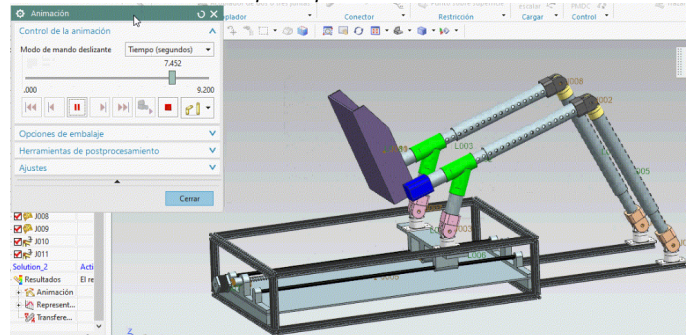


Figura 13.
Movimiento de flexión del prototipo.



Los resultados de la simulación demostraron que el prototipo era capaz de reproducir con precisión los movimientos articulares deseados, proporcionando una adecuada resistencia y soporte durante la cinesiterapia.

La discusión de los resultados se centra en la importancia de contar con un dispositivo artromecánico para la cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo. La capacidad de simular movimientos articulares específicos y proporcionar resistencia controlada es fundamental para lograr una rehabilitación efectiva.

IV. CONCLUSIONES

En conclusión, el diseño y la simulación de un prototipo artromecánico para la aplicación de cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo representan un avance significativo en el campo de la rehabilitación física. Mediante la integración de tecnología robótica y sistemas de simulación, se ha logrado desarrollar un

dispositivo versátil y efectivo para el tratamiento de lesiones articulares. Los resultados obtenidos de esta investigación demuestran el potencial del prototipo artromecánico para mejorar la eficacia y eficiencia de la cinesiterapia, permitiendo una recuperación más rápida y completa de los pacientes. Además, este tipo de enfoque innovador sienta las bases para futuros avances en el campo de la medicina y la rehabilitación, brindando nuevas oportunidades para la mejora de la calidad de vida de las personas con lesiones articulares.

El seguimiento a este estudio será la construcción del prototipo sugerido en esta investigación, el cual será evaluado y se compararán los resultados con las estrategias usadas en la actualidad.

En resumen, el diseño y la simulación de este prototipo artromecánico son un paso adelante hacia la aplicación de tecnología de vanguardia en el campo de la rehabilitación, abriendo nuevas posibilidades para el tratamiento de lesiones de rodilla y tobillo.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo. En especial a la división de Posgrado.

VI. REFERENCIAS

- Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de Robótica*. McGraw-Hill.
- Baturone, A. O. (2005). *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Marcombo.
- Castillón Ramírez, G. A. (2021). *Diseño y desarrollo de un dispositivo de asistencia para la rehabilitación motriz de extremidades inferiores de pacientes con secuela de accidente cerebrovascular (Moveleg)*. Ensenada, Baja California: Instituto Tecnológico de Ensenada.
- Cuéllar, S. Q., & Obregón Sánchez, M. G. (2021). Propuesta de rediseño ergonómico del modelo de utilidad: Órtesis de rodilla para personas con discapacidad motriz. *Revista UPIICSA Investigación Interdisciplinaria*.
- Fernández de las Peñas, C., & Melián Ortiz, A. (2019). *Cinesiterapia: bases fisiológicas y aplicación práctica*. Barcelona, España: Elsevier.
- Gutiérrez, R., Venegas, F., Duque, J., & Avilés, O. (2017). Diseño y Control de un Exoesqueleto para Rehabilitación Motora en Miembro Superior. *Universidad Militar Nueva Granada*.
- Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica de Materiales*. Pearson.
- Hüter-Becker, A., Schewe, H., & Heipertz, W. (2005). *La rehabilitación en el deporte*. Badalona, España: Editorial Paidotribo.
- SIEMENS. (22 de Mayo de 2023). *NX CAD for product engineering*. Obtenido de <https://plm.sw.siemens.com/es-ES/nx/cad-online/>
- Walker, B. (2017). *La Anatomía de las lesiones deportivas*. Editorial Paidotribo.