

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA PRÓTESIS BIOMECÁNICA DE TOBILLO – PIE

David Estrella*; David Ojeda**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

*mdestrellaf@utn.edu.ec; **daojeda@utn.edu.ec

Resumen

Este proyecto presenta el diseño y construcción de un mecanismo para recuperación de energía en una prótesis biomecánica de tobillo – pie, conformado por un mecanismo freno – embrague que actúa en conjunto con un resorte helicoidal a extensión el cual realizará una recuperación de energía mediante su deformación elástica en el proceso de la marcha humana.

La ejecución del proyecto empieza con la búsqueda y recopilación de información en entorno a la recuperación de energía durante la marcha humana, lo cual regirá de base para la determinación de parámetros y requerimientos para la realización del mecanismo recuperador de energía para prótesis biomecánicas de tobillo – pie.

El mecanismo freno – embrague se desarrolló mediante cálculos matemáticos, se obtuvo la resistencia del diseño y se comprobó su fiabilidad mediante simulaciones por computador, con lo cual se procede a la selección correcta del material de fabricación de cada uno de los subconjuntos que conforman este mecanismo.

Una vez validado el diseño del mecanismo freno – embrague se procede a elaborar los planos mecánicos del mismo, desarrollados bajo la norma INEN de dibujo mecánico, siguiendo con el mecanizado, ensamblaje y seleccionamiento por catálogo para compra de los elementos que lo conforman.

La funcionalidad del diseño se comprueba mediante el ensamble completo de cada uno

de los subconjuntos que conforman el mecanismo de recuperación de energía, observando su correcto funcionamiento y verificando que cumpla los requerimientos del proyecto.

Palabras Claves

Mecanismo, recuperación, energía, marcha humana.

Abstract

This project presents the design and construction of a mechanism for energy recovery in a biomechanical ankle - foot prosthesis, formed by a brake - clutch mechanism that acts in conjunction with an extension helical spring which will make an energy recovery by its deformation elastic in the process of human walking.

The execution of the project begins with the search and collection of information about the recovery of energy during human walking, which will be the basis for the determination of parameters and requirements for the realization of the energy recovery mechanism for ankle-foot biomechanical prostheses.

The brake - clutch mechanism was developed by mathematical calculations, the design resistance was obtained and its reliability was verified by computer simulations, which proceeds to the correct selection of the manufacturing material of each of the subsets that make up this mechanism.

Once the design of the brake - clutch mechanism has been validated, the

mechanical drawings of it are developed, developed under the INEN standard of mechanical drawing, continuing with the machining, assembly and selection by catalog for the purchase of the elements that comprise it.

The functionality of the design is verified by the complete assembly of each of the subsets that make up the energy recovery mechanism, observing its correct functioning and verifying that it meets the requirements of the project.

Keywords

Mechanism, recovery, energy, human march.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las amputaciones son reconocidas como un problema significativo de salud pública, las cuales pueden presentarse por diferentes causas y a cualquier edad. [1] Las causas de las amputaciones varían por diferentes factores, como lo son los traumas (causa principal de las amputaciones), enfermedades vasculares, tumores, diabetes y en un porcentaje mínimo por malformaciones congénitas. Debido a estos factores, las amputaciones físicas realizadas con más frecuencia son la transtibial (por debajo de la rodilla) y la transfemoral (por encima de la rodilla). [2]

Las prótesis pasivas de tobillo-pie sin recuperación de energía son las más accesibles (en función monetaria) dentro del mercado, dichas prótesis presentan muchas dificultades para el usuario en el proceso de realizar la marcha, entre los principales se muestra patrones de asimetría reflejados en una disminución de la velocidad, disminución de la zancada, disminución del tiempo de apoyo, lo cual da como

consecuencia un excesivo consumo de energía metabólica, causando así muchos problemas clínicos para los usuarios de este tipo de prótesis con amputación transtibial. [3]

Las prótesis de tobillo-pie con recuperación de energía tienen un costo significativamente alto (en función monetaria) debido a sus sistemas de control, sistemas de potencia, material de construcción y principalmente sus mecanismos especializados en recuperación de energía que se encargan de mejorar el rendimiento de la marcha a través de transferencias de energías (función principal) y reducción del desplazamiento del centro de gravedad, lo cual, implica un menor consumo metabólico para el usuario de este tipo de prótesis con amputación transtibial. [3]

La construcción del mecanismo de recuperación de energía tiene la importancia y la necesidad de investigar e innovar el proceso de la marcha dentro de una superficie plana para personas con amputación transtibial, es decir, implicando llegar a una mejora en la fase de apoyo de la marcha para reducir así el consumo metabólico y permitiendo de esta manera a las personas que utilizan prótesis biomecánicas tobillo-pie puedan realizar sus actividades cotidianas sin ningún tipo de inconveniente. [4]

II. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto empieza con la búsqueda y recopilación de información en entorno a la recuperación de energía durante la marcha humana, ya sea por medio de artículos científicos, papers, patentes, revistas especializadas, sitios web, avances tecnológicos, libros, y entre otros materiales bibliográficos.

Se realiza una investigación cinética y cinemática de la articulación del tobillo, verificando en que fases del ciclo de apoyo se realiza la acumulación y recuperación de energía mediante el proceso de la marcha humana.

Se realiza la determinación de parámetros y requerimientos para la realización del mecanismo recuperador de energía para prótesis biomecánicas de tobillo – pie.

Para la fabricación del mecanismo recuperador de energía se propone varios bosquejos, los cuales ayudan al seleccionamiento de la mejor opción para realizar una recuperación de energía en la marcha por medio de un resorte helicoidal a extensión y un mecanismo tipo freno – embrague como diseño final, buscando así llegar a cumplir con todas las exigencias en referente a los requerimientos del proyecto.

Con la información recopilada y parámetros ya establecidos, se procede a realizar los diseños del resorte helicoidal a extensión y del modelo 3D del mecanismo tipo freno - embrague por medio de software computacional; con la finalidad de dimensionar y asegurar un funcionamiento óptimo del mecanismo en conjunto.

La selección de los materiales para la fabricación del mecanismo permite conocer de forma aproximada el peso y tamaño que el mecanismo recuperador de energía tendrá, como también obtener cálculos más precisos y de una forma detallada en el diseño del modelo.

Una vez realizada la verificación el diseño se procede a la adquisición de los materiales, manufactura y compra de los componentes que conforman el mecanismo recuperador de energía.

Posterior a la fabricación y compra de todos los subconjuntos que conforman el

mecanismo de recuperación de energía, se procede a realizar el ensamblaje de todo el mecanismo verificando que no se tenga inconvenientes.

Se realiza pruebas de funcionamiento para verificar que cada uno de los subconjuntos del mecanismo de recuperación de energía trabajen correctamente.

III. RESULTADOS

Diseño del mecanismo freno – embrague.

Para destacar el diseño mecánico se considera algunos elementos anatómicos y cosiméticos, ya que el diseño en sí se basa en brindar una ayuda al ser humano usuario de una prótesis biomecánica de tobillo-pie y más no una molestia o incomodidad en el desarrollo de su vida cotidiana.

El mecanismo de freno – embrague está comprendido por cinco subconjuntos: el marco del mecanismo, la rueda freno, la polea embrague, el eje y los pasadores juntas; los cuales interactúan entre sí durante un ciclo correspondiente a la marcha humana.

Se utiliza la ayuda de un software computacional para el diseño de cada subconjuntos del mecanismo freno - embrague, aprovechando las ventajas de simulación con las que dispone para evaluar la fiabilidad del diseño. [5]

Gracias al análisis de convergencia para la estabilización del método numérico (MEF) realizado a cada una de los subconjuntos que conforman el mecanismo freno – embrague se puede evidenciar que:

En la *figura 1* el esfuerzo mínimo de 0.00 MPa se encuentra en el extremo tipo tope cilíndrico de la cubierta y el esfuerzo

máximo de 45.14 MPa en la parte superior entre la junta del tope freno y la cubierta.

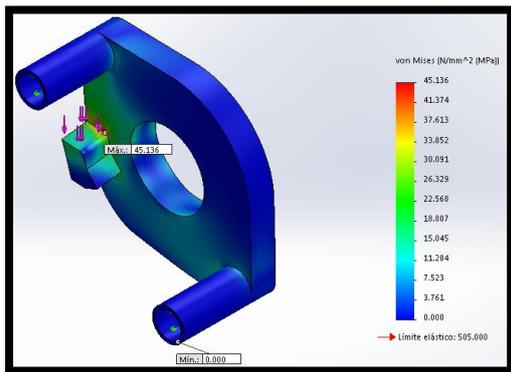


Figura 1 Análisis de von Mises del marco cubierta del mecanismo freno – embrague

En la *figura 2* se puede apreciar que el factor de seguridad mínimo es de 11,19 con el cual esta pieza va interactuar y soportar las diferentes condiciones de entorno.

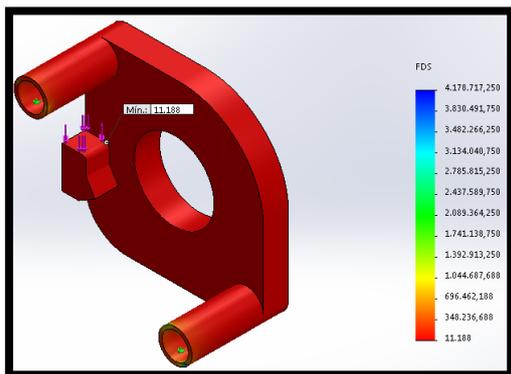


Figura 2 Factor de seguridad del marco cubierta del mecanismo freno – embrague

En la *figura 3* el esfuerzo mínimo de 0.01 MPa se encuentra en el extremo del eje y el esfuerzo máximo de 20.92 MPa en el cambio de diámetro del eje.

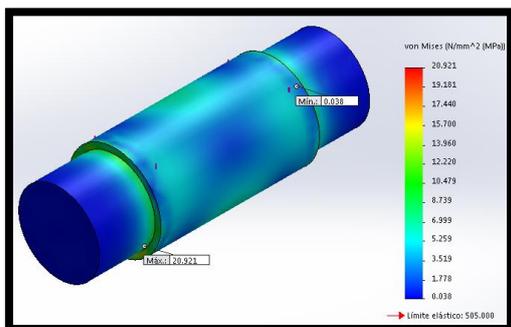


Figura 3 Análisis de Von Mises del eje del mecanismo freno – embrague

En la *figura 4* se puede apreciar que el factor de seguridad mínimo es de 24.14 con el cual esta pieza va interactuar y soportar las diferentes condiciones de entorno.

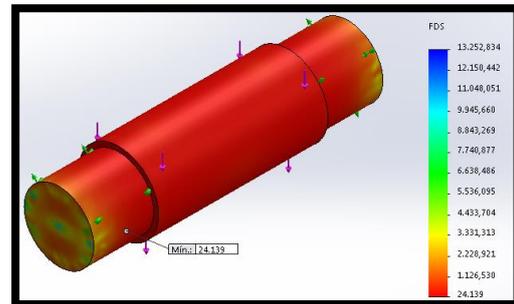


Figura 4 Factor de seguridad del eje del mecanismo freno – embrague

En la *figura 5* el esfuerzo mínimo de 0.00 MPa se encuentra en el extremo de la rueda – freno y el esfuerzo máximo de 39.24 MPa en el tope, parte interior de la rueda – freno.

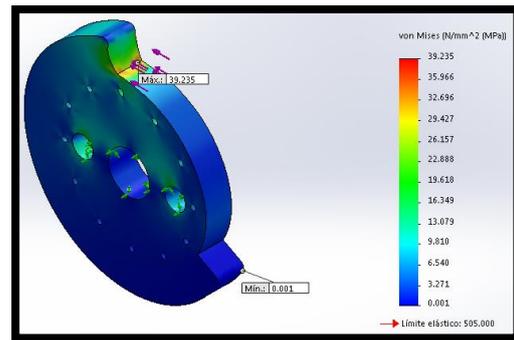


Figura 5 Análisis de Von Mises de la rueda - freno del mecanismo

En la *figura 6* se puede apreciar que el factor de seguridad mínimo es de 12.87 con el cual esta pieza va interactuar y soportar las diferentes condiciones de entorno.

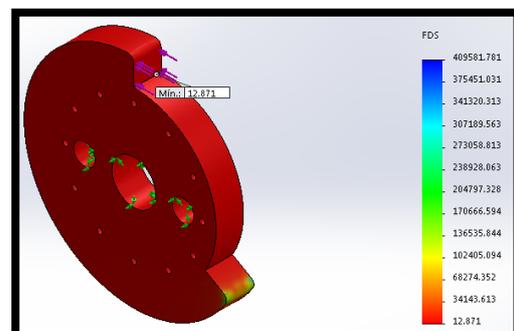


Figura 6 Factor de seguridad de la rueda - freno del mecanismo

En la *figura 7* el esfuerzo mínimo de 1.05 MPa se encuentra en la mayor parte del cuerpo del pasador y el esfuerzo máximo de 66.28 MPa en el extremo del pasador.

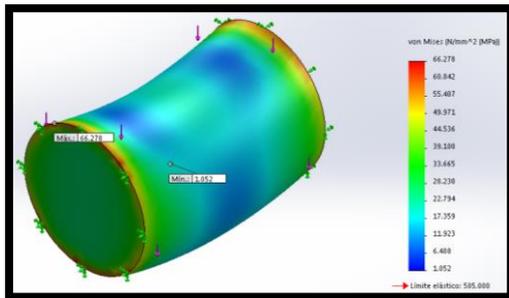


Figura 7 Análisis de Von Mises del pasador – junta del mecanismo freno – embrague

En la *figura 8* se puede apreciar que el factor de seguridad mínimo es de 7,62 con el cual esta pieza va interactuar y soportas las diferentes condiciones de entorno.

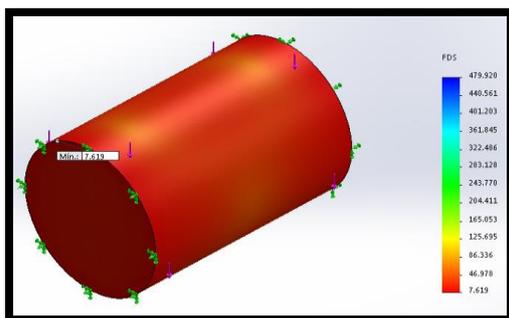


Figura 8 Factor de seguridad del pasador – junta del mecanismo freno – embrague

En la *figura 9* el esfuerzo mínimo de 0.00 MPa se encuentra en la perforación por la cual conecta el eje, y el esfuerzo máximo de 80.17 MPa en el canal de la polea.

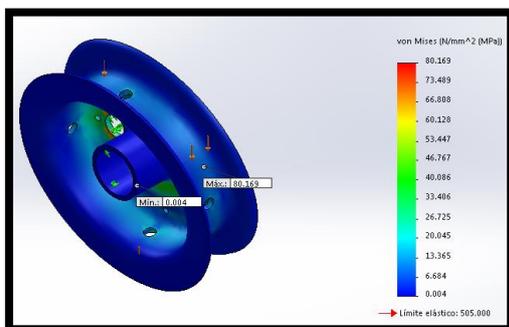


Figura 9 Análisis de Von Mises de la polea - embrague del mecanismo

En la *figura 10* se puede apreciar que el factor de seguridad mínimo es de 6.29 con el cual esta pieza va interactuar y soportas las diferentes condiciones de entorno.

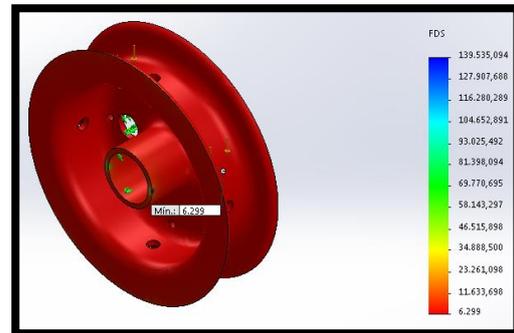


Figura 10 Factor de seguridad de la polea - embrague del mecanismo

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

A continuación en la *tabla 1* se detalla un breve resumen de los resultados obtenidos mediante el análisis de convergencia por medio de elementos finitos gracias a software.

Tabla 1

Resumen del análisis de elementos finitos del mecanismo freno – embrague

Piezas	Von Mises (MPa)	Factor de Seguridad
Marco - Cubierta	45,14	11,18
Eje del Mecanismo	20,92	24,14
Rueda - Freno	39,24	12,87
Pasador - Junta	62,28	7,61
Polea - Embrague	80,17	6,29

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DEL MECANISMO

A continuación, en la *tabla 2* se detallan los resultados de las pruebas realizadas en relación a la recuperación de energía obtenida gracias al mecanismo recuperador de energía.

Tabla 2
Pruebas de funcionamiento del mecanismo recuperador de energía

Personas	Peso (kg)	Estatura (m)	Deflexión (mm)	Energía (J)
P1	86	1,71	18,48	1,60
P2	78	1,67	18,23	1,55
P3	72	1,68	18,00	1,52
P4	65	1,7	17,78	1,48
P5	59	1,69	17,95	1,51
Energía de recuperación promedio				1,53

TABULACIÓN DE PRUEBAS (%ERROR) DE LA CONSTANTE DEL RESORTE HELICOIDAL A EXTENSIÓN

Diámetro del alambre	2,5 mm
# vueltas	22,25
L.C reposo	55,63 mm
Constante	9353,74 N/m

Masa (kg)	LC trabajo	Kp (N/m)	Error (%)
1,25	56,9	9607,84	2,72%
2,5	58,2	9514,56	1,72%
3,75	59,5	9483,87	1,39%
5	60,8	9468,60	1,23%
6,25	62,1	9459,46	1,13%
7,5	63,4	9453,38	1,07%
10	66,2	9267,14	0,93%
12,5	68,6	9441,23	0,94%
14,77	71	9414,37	0,65%
26,1	83,1	9309,55	0,47%
Error promedio			1,22%

IV. CONCLUSIONES.

En base al estudio cinemático y cinético de la articulación del tobillo usada por el hombre en la marcha, se puede afirmar que el almacenamiento de energía se realiza explícitamente en la fase de “Control

Dorsiflexión Plantar”, mientras que la recuperación se la realiza en la fase de “Potencia Flexión Plantar”.

Considerando los análisis aplicados en los subconjuntos que conforman el mecanismo freno – embrague, tales como: Von Mises con un esfuerzo mínimo de 0.00 MPa y un esfuerzo máximo de 80.17 MPa y un factor de seguridad mínimo de 6.29 y un máximo de 24.14; se puede afirmar que la estructura diseñada es buena para los propósitos de funcionamiento freno y embrague que se requerían para la función de recuperación de energía durante la marcha.

Se puede afirmar que el funcionamiento del mecanismo recuperador de energía es eficiente, considerando que en el proceso de la marcha humana se logró obtener una recuperación de energía promedio de 1,53 J a una velocidad de zancada no superior de 1,1 m/s, ejecutándose de una forma adecuada y sin ningún tipo de inconveniente en las pocas pruebas realizadas.

En referencia a la manufactura de sujeciones se podría decir que cumplen con su función, en especial la sujeción superior, a la cual va conectado el mecanismo freno – embrague cumpliendo la función de fijación y alineación para el correcto funcionamiento de este durante la fase de recuperación de energía en la marcha humana.

Los resultados que presentó este mecanismo de recuperación de energía para prótesis biomecánicas de tobillo pie para usuarios con una amputación transtibial permitirán seguir avanzando con la investigación para trabajos de diseños posteriores, en donde se pretende aprovechar al máximo y no desechar hacia el medio la energía producida durante la marcha humana.

V. RECOMENDACIONES.

Analizar el cambio del sistema netamente mecánico por sistemas electromecánicos, magnéticos; con los cuales se podrán realizar un mejor diseño y buscar un funcionamiento para diferentes tipos de marcha y terrenos con el mínimo error posible.

Se recomienda llevar a cabo pruebas de nuevos materiales de mayor resistencia para el marco del mecanismo (cubiertas) que garanticen un mayor rendimiento frente al desgaste por la utilización del dispositivo en distintos ambiente y varios escenarios.

Se recomienda que los pasadores de unión para la rueda freno y polea embrague sean de una manera más accesible para la facilidad al momento de realizar un mantenimiento o cambio por desgaste.

Se recomienda llevar a cabo un estudio pertinente en busca de nuevos materiales que sirvan para reemplazar la cuerda que sirve de unión entre el resorte helicoidal a extensión con la polea embrague.

Profundizar en el análisis estructural de las sujeciones del mecanismo freno – embrague, tomando en cuenta la musculatura de las personas para distintas edades y sexo.

Se recomienda buscar un sustituto para el alambre de piano ASTM 228 que sirve para fabricación de resortes, debido a que su disponibilidad se encuentra solo bajo pedido y a espera de un determinado periodo de tiempo.

Se recomienda analizar y buscar soluciones alternativas de protección para el mecanismo recuperador de energía, tales como: estructuras de recubrimiento, cubiertas tipo férulas, pinturas especializadas, etc.

VI. REFERENCIAS

- [1] S. Desing, «Núcleo Ortopédico,» Junio 1999. [En línea]. Available: <http://nucleo-ortopedico.com.ar/inicio/>.
- [2] L. Martínez, «Salud 180,» [En línea]. Available: <http://www.salud180.com/salud-z/amputacion-de-extremidades-inferiores>. [Último acceso: 15 Noviembre 2017].
- [3] J. Müller, «Prótesis de miembro inferior,» Socializa.me, [En línea]. Available: <http://ortopediadjensmuller.com/servicio-de-fabricacion/protesis-de-miembro-inferior/>. [Último acceso: 5 Diciembre 2017].
- [4] J. Maxwel, V. Naing y O. Li, «Biomechanical Energy Harvesting,» *IEEE*, 2009.
- [5] S. Gómez González, SolidWorks, España: Marcombo, 2008.