

OPTIMIZACIÓN DEL CHASIS DE UNA EXOPRÓTESIS DE RODILLA UTILIZANDO LA INTERACCIÓN DIRECTA ENTRE PROGRAMAS DE DISEÑO EN 3D Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS POR ELEMENTOS FINITOS

Rafael R. Torrealba¹

Lilibeth A. Zambrano^{1,2}

Gabriel Messingher L.¹

rtorrealba@usb.ve

lazambrano@usb.ve, lzambrano@unimet.edu.ve

gabm89@hotmail.com

¹Grupo de Biomecánica, Universidad Simón Bolívar

Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas-Venezuela

²Departamento de Ciencias y Técnicas de la Construcción, Universidad Metropolitana

Terrazas del Ávila, La Urbina, Caracas-Venezuela

Abstract. *En la actualidad es posible combinar programas para realizar diseños basados en estudios por elementos finitos que permiten realizar análisis de esfuerzos confiables, sin necesidad de exportar e importar información de un programa a otro. En el presente trabajo se optimiza el chasis de una prótesis inteligente de rodilla para pacientes con amputación transfemoral, buscando una reducción del peso de la prótesis para disminuir la carga que ésta representa para el paciente al caminar. La prótesis debe cumplir con los requerimientos de la norma ISO 10328, de donde se extrajeron las condiciones de carga crítica durante la fase de apoyo del ciclo de marcha. Se utilizó AnsysWorkbench[®] 12 para el estudio, el cual realiza la optimización a través de la variación de cotas geométricas en un rango específico escogido por el usuario y determina cómo son afectados los parámetros de salida. Además, se implementó una metodología de cálculo que permitió la comunicación entre el programa de diseño ProEngineer[®] y el de elementos finitos, de manera que las variaciones de los parámetros geométricos se hicieron automáticamente a través de la interfaz, evitando la reconstrucción del modelo. El proceso de optimización permitió reducir el peso de la prótesis de 2104 g del prototipo anterior a 1750 g en este nuevo prototipo. El diseño 3D propuesto para este último llevó su peso a 1815 g sin haber sido sometido al proceso de optimización. En este trabajo se estudió y mejoró dicho diseño, al mismo tiempo que se optimizó su peso para los niveles de carga de la norma ISO.*

Keywords: Prótesis externa de rodilla, Optimización, Diseño, Análisis de esfuerzos, ISO 10328.

1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante para que una prótesis sea considerada cómoda es su peso. En este sentido, el presente trabajo muestra el último avance realizado hasta la fecha en el desarrollo de una prótesis inteligente de rodilla en Venezuela, el cual encuentra su motivación principal en la necesidad de reducir el peso del diseño propuesto sin comprometer la resistencia del mecanismo a los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas sobre éste al caminar. Esta prótesis se ha venido desarrollando desde el año 2006 en la Universidad Simón Bolívar (USB), con miras a cubrir el mercado nacional. Actualmente se dispone de dos prototipos que han sido probados en pacientes [1,2]. Para el primero se realizó un análisis de esfuerzos preliminar a través del Método de Elementos Finitos (MEF), en el cual se probó la resistencia del mecanismo ante ciertas fuerzas de reacción del piso durante la fase de apoyo del ciclo de marcha [3]. Ya construida, se demostró que la prótesis era capaz de cumplir las funciones para las cuales fue diseñada, aunque su proceso de construcción no podía ser implementado en una línea de producción y su peso de 2060 g resultó por encima de los 1500 g promedio que ofrecen las prótesis comerciales de este tipo [4,5].

El segundo prototipo se desarrolló utilizando un proceso de fabricación semi-automatizado para el chasis, con la intención de lograr la automatización completa en un futuro. Se propuso un chasis de aluminio con una carcasa de ABS recubierta en fibra de carbono, a diferencia del chasis fabricado completamente en fibra de vidrio y poliuretano del primer prototipo. Más allá de la facilidad del mecanizado de las piezas de metal y la factibilidad de someter la construcción a un proceso de fabricación semi-automatizado, la prótesis terminó siendo igualmente pesada (2104 g) [2,6]. En este trabajo, además de presentar una nueva propuesta de diseño inspirada en los prototipos anteriores para el chasis de la prótesis, se busca reducir el peso a través del uso de algoritmos de optimización basados en el MEF, mejorando el proceso que ha sido utilizado en proyectos anteriores del Grupo de Biomecánica de la USB [7], al combinar programas CAD y de análisis de esfuerzos, tal y como ha sido aplicado en otros proyectos de diseño de componentes mecánicos [8,9].

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo se enfoca en la optimización de la geometría buscando una reducción de peso en la prótesis. No obstante, previo a la optimización se realizó un análisis preliminar de los esfuerzos que se producen sobre el chasis producto de las fuerzas estipuladas en la norma que rige el diseño de prótesis para miembros inferiores, ISO 10328 [10]. En este trabajo se estudia el mecanismo para el caso de carga I (inicio de contacto), el más crítico para el máximo nivel de carga (P5) de la prueba estructural principal estipulada por dicha norma.

2.1 Optimización del diseño propuesto

La Figura 1 muestra el mecanismo de la prótesis propuesto y sus diferentes componentes. Las propiedades mecánicas de los materiales asociados a cada parte se muestran en la Tabla 1. Las piezas consideradas dentro del estudio fueron: la articulación de rodilla, la pletina superior, el rigidizador y los ejes. No se optimizaron las pletinas laterales por presentar esfuerzos cercanos a los admisibles. La base tampoco es parte del estudio a pesar de presentar zonas en las cuales se podía lograr una reducción importante, pero por la complejidad de la pieza la definición de los parámetros geométricos era limitada.

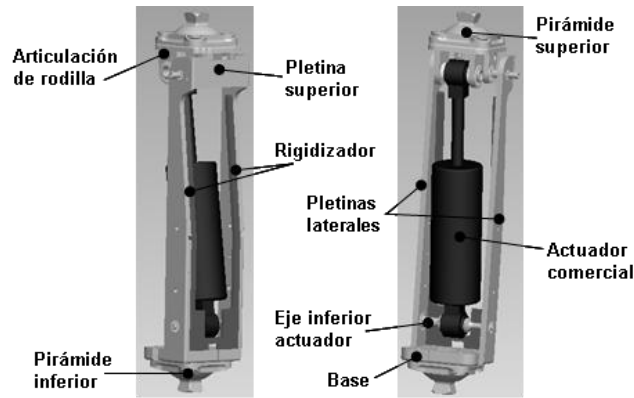


Figura 1- Mecanismo de la prótesis

Para visualizar las zonas más propensas a ser eliminadas, se utilizó la herramienta *ShapeFinder* de Ansys Workbench®, con la cual el programa identifica zonas que podrían ser suprimidas manteniendo la capacidad de soportar las cargas. Esto se hizo para tres porcentajes de masa a eliminar, 20, 40 y 60 %, con lo cual se decidió cuáles parámetros geométricos utilizar para la optimización.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales

Pieza	Material	Densidad [kg/m ³]	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Módulo de Poisson
Articulación, pletina superior, pletinas laterales y base	Aluminio T6061	2,800	276	71,700	0.34
Bocinas	Latón CA270	8,600	100	110,300	0.33
Eje superior, inferior y principal de la rodilla	Acero Inoxidable AISI1304	7,800	1103	189,600	0.28

El proceso de optimización se realizó de manera acumulativa: en un principio se trabajó una pieza en el ensamblaje completo y luego de optimizarla se continuó con la siguiente, manteniendo los cambios anteriores. Finalizado este proceso se hizo un nuevo estudio de *ShapeFinder* para precisar cualquier posible remoción de material en zonas aún detectadas por el programa. Por último, se hizo un análisis de esfuerzos con el diseño optimizado del chasis para verificar que la propuesta definitiva presentara desplazamientos admisibles y soportara los esfuerzos presentes debido a las cargas aplicadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la aplicación del *ShapeFinder* fue posible definir los parámetros geométricos de optimización. Se observó que para el estudio de 20 % de reducción de masa, el programa señala las áreas que menos contribuyen a soportar las cargas y deben ser eliminadas primero, las cuales aumentan en los estudios de 40 y 60 %. Por motivos de espacio, este trabajo presenta sólo el

proceso de optimización realizado a la articulación, donde se tomaron como parámetros la profundidad de la base y el ancho de los brazos delanteros y traseros. Estos parámetros fueron creados en ProEngineer® y reconocidos en AnsysWB® para ser utilizados en el proyecto de optimización. En la Fig. 2 se muestran los resultados del *ShapeFinder* en la articulación con 60 % de reducción de masa.

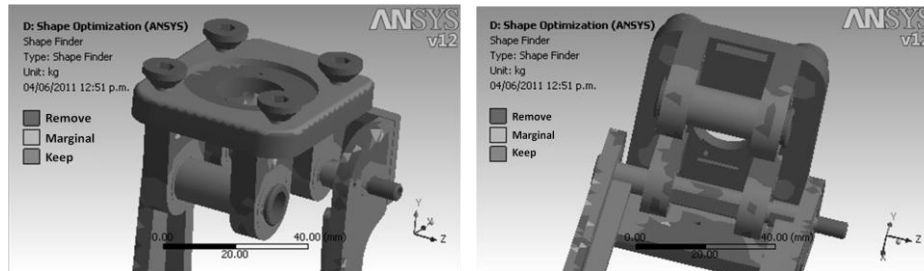


Figura 2- Resultados del *ShapeFinder* para 60 % de reducción de masa en la articulación

Una vez definidos los parámetros de optimización en la articulación, se obtuvo un gráfico de sensibilidad entre los parámetros de entrada y de salida. Dicho gráfico se muestra en la Fig. 3a, donde se puede observar del lado izquierdo la relación con el esfuerzo máximo y en el derecho con la masa. Se ve cómo el esfuerzo máximo es afectado principalmente por la variación del ancho de los brazos delanteros, aunque éstos no tienen tanta influencia en la masa de la pieza, para la cual la profundidad de la base es el parámetro más sensible. Se concluyó que se podían reducir las cotas de la base y de los brazos traseros para minimizar la masa, sin afectar el esfuerzo de forma importante. En la Fig. 3b se observa cómo varía el esfuerzo máximo en función de la profundidad de la base y el ancho de los brazos delanteros para un valor de 5 mm de ancho en los brazos traseros. Como se esperaba debido al análisis de sensibilidad, se encuentra que el esfuerzo depende claramente del ancho de los brazos delanteros y casi no hay variaciones en función de la profundidad de la base. Un aspecto importante es que el esfuerzo crece muy rápidamente entre 25 y 25.6 mm de ancho de los brazos delanteros (parámetro de optimización que representa anchos de 5.3 y 5 mm, respectivamente), ocurriendo que ya para este último los valores de esfuerzo están cerca de los admisibles. Teniendo esto en consideración se decidió mantener el ancho de los brazos delanteros en 5.3 mm, ya que los esfuerzos serían notablemente menores que con un ancho de 5 mm, y la diferencia en masa sería poca.

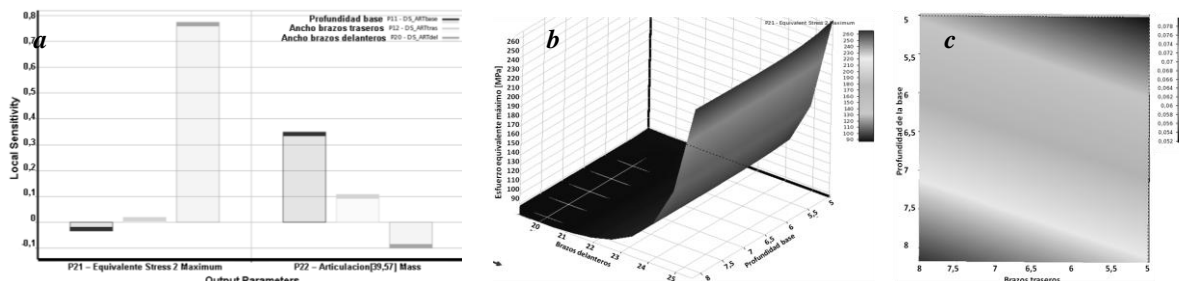


Figura 3- (a) Sensibilidad de parámetros (articulación), (b) Esfuerzos en función de la profundidad de la base y el ancho de los brazos delanteros (articulación), (c) Masa en función de la profundidad de la base y el ancho de los brazos traseros (articulación)

Luego, con el ancho de los brazos delanteros en 5.3 mm, se obtuvo la relación de la masa con la profundidad de la base y el ancho de los brazos traseros, la cual se muestra en la Fig. 3c. En este caso, como es lógico, en la medida que estos parámetros aumentan la masa también lo hace, por lo que se decidió fijar ambos parámetros en 5 mm. Una vez realizada la optimización de las demás piezas, lo cual llevó el peso estimado de la prótesis a 1750 g, se llevó a cabo un nuevo *ShapeFinder* con 60 % de reducción de masa para ver cuáles zonas eran todavía susceptibles de ser eliminadas. El resultado se muestra en la Fig. 4a. En este sentido, se realizaron cambios en el diseño de dichas zonas. Asimismo se modificó el rigidizador, a pesar de no mostrar grandes zonas en color rojo, ya que se consideró posible una reducción adicional en éste. Los cambios definitivos se muestran en la Figura 4b, los cuales arrojan un peso final de la prótesis de 1691 g.

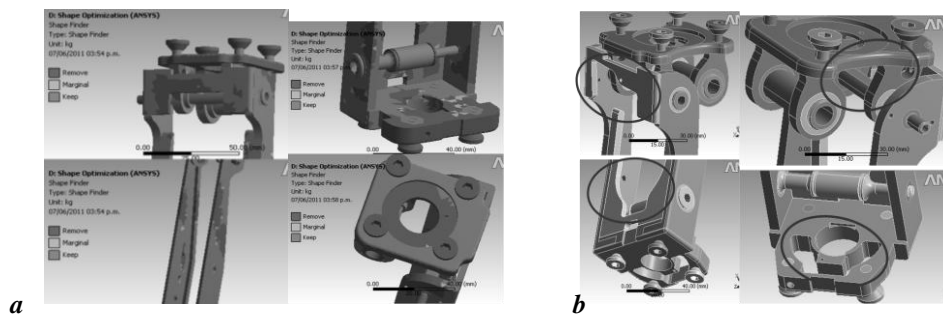


Figura 4- (a) Resultados del *ShapeFinder* posterior a la optimización para 60 % de reducción de masa, (b) Geometría definitiva luego de los cambios finales

Teniendo en cuenta estas últimas modificaciones se realizó un último análisis por MEF en el cual se verificó favorablemente que los esfuerzos presentes en el ensamblaje se encuentran por debajo de los admisibles. Finalmente, en la Tabla 2 se presenta una comparación de los pesos estimados de las piezas optimizadas durante las tres fases del presente trabajo: propuesta de diseño, optimización y cambios finales.

Tabla 2 Comparación de peso de las distintas piezas optimizadas

Pieza	Propuesta (gramos)	Optimización (gramos)	Final (gramos)	Reducción total (%)
Articulación	82.8	50.3	41.7	49.6
Pletina superior	20.2	9.8	7.5	62.9
Pletinas laterales	148.8	148.8	148.7	0.1
Rigidizador	43	32.3	31.6	26.5
Base	65.1	65.1	44.1	32.3
Eje principal	20.2	14.5	14.5	28.2
Eje inferior	31	26.9	26.9	13.2

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado el proceso de optimización del chasis de una exoprótesis de rodilla con la finalidad de reducir su peso, sin comprometer la resistencia estructural del ensamblaje ante las cargas aplicadas de acuerdo a la norma ISO 10328. La optimización se

realizó en el programa de análisis de esfuerzos AnsysWorkbench[®], trabajando de manera interconectada con el programa de diseño en 3D, ProEngineer[®]. En cuanto a los resultados obtenidos a partir de la optimización se encontró que la reducción en el peso de la prótesis fue significativa, pasando de 2104 g en el segundo prototipo a 1691 g estimados para el tercero, lo cual representa una reducción de 19.6 %. En términos del chasis, la reducción asciende a 41 % con relación al segundo prototipo. Estos resultados constituyen un valioso aporte hacia el fin último de construir una prótesis que sea viable comercialmente para atender el mercado nacional.

REFERENCIAS

- [1].Torrealba, R. R., *Prótesis inteligente de rodilla para pacientes con amputación transfemoral*. PhD thesis, Simon Bolivar University, 2009.
- [2].Andara, E., *Diseño y construcción de chasis para una prótesis transfemoral de rodilla*. Undergraduate thesis, Simon Bolivar University, 2008.
- [3].Nordin, M., & Frankel, V. H., *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2001.
- [4].*Bionic Technology by Össur. Rheo-Knee product specification*. Disponible en: <http://www.ossur.com/?PageID=15744>. Visitada: 28 de octubre de 2011.
- [5].*C-Leg Microprocessor Prosthetic Knee. Otto Bock Advanced Prosthetic Knees*. Disponible en: <http://www.ottobockknees.com/knee-family/c-leg-microprocessor-prosthetic-knee/>. Visitada: 28 de octubre de 2011.
- [6].Torrealba, R. R., Zambrano, L. A., Andara, E., Fernández-López, G., & Grieco, J. C., Medium-cost electronic prosthetic knee for transfemoral amputees: a medical solution for developing countries. In IFMBE Proceedings 25/9, Dössel, O. & Schlegel, W. C., eds, *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2009)*, pp. 456-459, 2009.
- [7].Figueroa, R., *Diseño y análisis mecánico de un pie protésico*. MSc thesis, Simon Bolivar University, 2009.
- [8].Pinca, C. B., Tirian, G. O., Socalici, A. V., & Ardelean, E. D. (2009). The optimization of the main beam for the resistance structure of an over-sized rolling bridge. Politechnica University Timisoara, Department of Mechanical Engineering and Management, Romania: The 9th WSEAS international conference on simulation, modelling and optimization.
- [9].Zhang, G. X., & Tian, Y. (2009). Finite element analysis for bike body based on ANSYS workbench. Shanxi University of Science and Technology, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an, China.
- [10]. ISO 10328. Prosthetics - Structural testing of lower-limb prostheses - Requirements and test methods. 2006.