

## Conference Paper

# Diseño y Simulación Mecánica de un Actuador Hidráulico Rotativo Sumergible Para Aplicación en Hidroterapia

## Design and Mechanical Simulation of a Submersible Rotary Hydraulic Actuator for Hydrotherapy Application

M. Pérez Bayas, S. Coba, E. Pozo, and M. Ordoñez

Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Panamericana Sur km 1 ½, Riobamba, Ecuador

### Resumen

El presente trabajo demuestra el proceso en la investigación inicial para el desarrollo de un actuador giratorio hidráulico para fines terapéuticos. El dispositivo se basa en la necesidad de un aparato motor aplicable a la rehabilitación de lesiones de rodilla, con la capacidad de ser usado en la hidroterapia, para lo cual se realiza una revisión bibliográfica y se define el comportamiento del actuador en función a los fenómenos de presión y flujo, definiendo así las funciones para el par y la velocidad del actuador. En una primera etapa, se presenta un modelo simplificado del actuador, para luego simular el comportamiento mecánico de los componentes con la ayuda de un software de análisis de elementos finitos. Concluyendo con la validación de los elementos principales del actuador, llamados eje y aleta, sometidos a los parámetros delimitados para la aplicación, dejando la base de un modelo del mecanismo útil para el cálculo de la dinámica del sistema como siguiente paso de la investigación.

**Abstract:** The present work demonstrates the process in the research and development of a hydraulic rotary actuator for therapeutic purposes. The device is based on the need for a motor apparatus applicable to the rehabilitation of knee injuries, with the ability to be used in hydrotherapy, for which a literature review is performed and the behavior of the actuator is defined depending on the pressure and flow phenomena, thus defining the functions for the torque and speed of the actuator. In the first stage, a simplified model of the actuator is presented, to proceed to simulate the mechanical behavior of the components with the help of finite element analysis software. Concluding with the validation of the main elements of the actuator, called axis and fin, subject to the parameters defined for the application, leaving the basis of a model of the mechanism useful for calculating the dynamics of the system as the next step of the investigation.

**Palabras claves:** Actuador rotatorio, Simulación, Diseño, Mecánica hidráulica.

**Keywords:** Rotary actuator, Simulation, Design, Hydraulic Mechanics.

Corresponding Author:

M. Pérez Bayas

miguel.perez@esPOCH.edu.ec

Received: 10 January 2020

Accepted: 17 January 2020

Published: 26 January 2020

Publishing services provided by  
Knowledge E

© M. Pérez Bayas et al. This article is distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use and redistribution provided that the original author and source are credited.

Selection and Peer-review under the responsibility of the VI Congreso Internacional Sectei 2019 Conference Committee.

### OPEN ACCESS

## 1. Introducción

La terapia acuática asocia los conocimientos fisioterapéuticos en el proceso de rehabilitación neurológica y los beneficios que el entorno acuático puede aportar para la recuperación de procesos patológicos a cualquier edad, las mismas que combinan técnicas específicas que utilizan las propiedades del agua para producir efectos de facilitación y resistencia, para llevar a cabo patrones específicos de movimientos, con objetivos exclusivamente terapéuticos de rehabilitación. [1], [2, 3]

El desarrollo de nuevos dispositivos para uso en la rehabilitación no tradicional, amplía la posibilidad de recuperación de un gran grupo de pacientes de diferentes edades y condiciones. Esta solución dinamiza la rehabilitación auto asistida, aportando una solución más económica que beneficia a los habitantes de la región central del país, donde no se acostumbra practicar este tipo de asistencias, dándoles la posibilidad de una mejor calidad de vida.[4]

Actualmente existen múltiples ejemplos de sistemas robóticos que hacen uso de actuadores hidráulicos, con el fin de lograr el máximo rendimiento de trabajo y evitar los inconvenientes de los sistemas clásicos, varios autores han contribuido a la investigación y el desarrollo de unidades motrices robóticas combinadas.

En el trabajo de Karanovic, et all [5], El desarrollo de sistemas robóticos siempre prioriza la realización de tareas asignadas con una máxima eficiencia, las cuales deben cumplir básicamente las siguientes características: un diseño funcional, una unidad de control optimizada y una unidad motriz, tomando en cuenta la dinámica del sistema.

Además, estos sistemas, se ven limitados en gran medida por el sistema motor, es decir, el sistema hidráulico y sus actuadores, que suelen ser muy grandes para aplicaciones específicas.

Esto presenta un limitante importante a la hora del diseño y construcción de sistemas reducidos que requieran una alta relación Potencia/Tamaño, especialmente para dispositivos de rehabilitación, como es el caso de sistemas de soporte y aumento como exoesqueletos, robots caminantes y demás aplicaciones que ya son una realidad hoy en día.

En Amundson [6], se da a conocer un sistema Híbrido eléctrico-hidráulico, que ayuda a definir la unidad central de energía hidráulica sobre un sistema para robots de servicio.

Tsagarakis [7], presenta los resultados de una unidad compacta hidráulica para pequeños robots.

Esser. [8], desarrolla una nueva fuente de alimentación hidráulica para robots.

Tomando una de las alternativas, y sabiendo que los requerimientos de la unidad motriz para trabajos submarinos (altas presiones, autonomía, grandes esfuerzos y cargas), se analiza el uso de los accionamientos hidráulicos para aplicaciones robóticas robustas que realizan tareas bajo cargas de trabajo pesadas. Sin embargo, gracias a las mejoras en la tecnología de fabricación avanzada, el uso de accionamientos hidráulicos en sistemas robóticos en miniatura está aumentando. Estas nuevas soluciones miniaturizadas se desarrollan con el propósito de lograr la máxima eficiencia y una mejor explotación de los recursos disponibles (materiales, tamaño, energía, etc.).

El objetivo de la presente investigación, se centra en la etapa inicial de diseño y simulación del mecanismo de un sistema servo hidráulico compacto para uso acuático, que responda a los requerimientos planteados para su aplicación como elemento motor de un dispositivo de rehabilitación para lesiones de rodilla aplicado a la hidroterapia.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Definición del modelo del actuador

El objetivo final del actuador rotatorio es generar un movimiento giratorio. El movimiento angular suele estar limitado a un ángulo máximo de rotación.[9]--[12].

Como tal, actualmente, se distinguen 3 tipos de actuadores rotativos:

- a. **Actuadores rotativos con aleta giratoria.** - que se accionan por la presión del fluido sobre una cara de su aleta. Esta aleta gira sobre un eje, dentro de un recinto cerrado que mantiene la presión en una de las dos cámaras del actuador. Presentan rangos de rotación hasta de  $270^\circ$  y toleran torques pequeños.[13], [14].

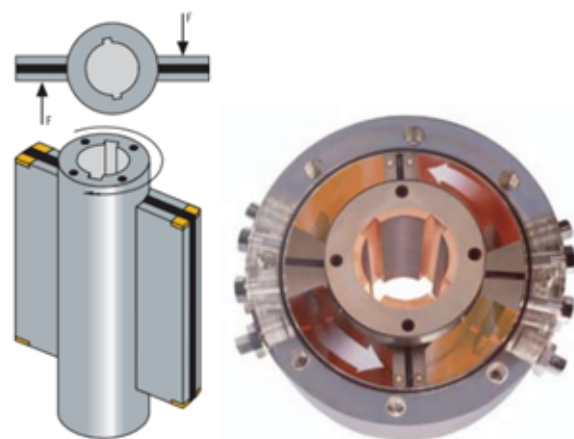


Figure 1: Actuador rotario de veleta rotatoria doble [28].

- b. **Actuadores rotativos con piñón y cremallera.** - Son actuadores rotativos que hacen uso de 1 o 2 cilindros internos de desplazamiento lineal para producir la rotación de un eje a través de un mecanismo piñón cremallera.[13].

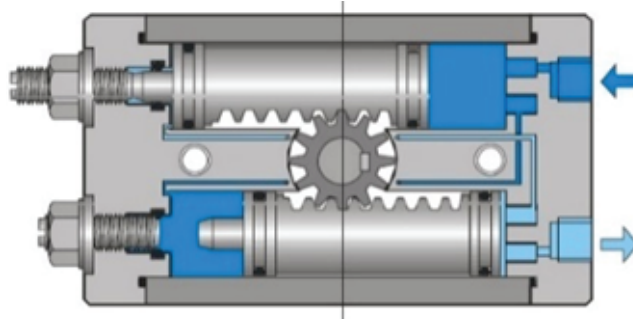


Figure 2: Actuador de piñón y cremallera [28].

- c. **Actuadores giratorios y lineales.** - Estos actuadores rotativos utilizan el principio de los pistones hidráulicos, para producir el desplazamiento de un embolo dentro de otro. Ambos émbolos se encuentran relacionados entre sí y con la carcasa a través de un engranaje helicoidal, que transforma el movimiento lineal del primer embolo en un movimiento rotacional del segundo. Este tipo de actuadores opera con altísimas presiones y entrega altos torque, a cambio de tener un recorrido angular de 90° máximo.[15], [16]



Figure 3: Actuador giratorio lineal [28].

Después de analizar los distintos tipos de actuadores rotativos, se escoge un desarrollo del modelo en base al tipo de aleta rotatorio, que presenta una relación favorable entre funcionalidad y complejidad para el tipo de aplicación planteada.

Siguiendo esta base, los modelos existentes de este tipo de actuador rotativo neumático, con características similares a las buscadas por el modelo, permiten delimitar algunas variables requeridas, como relaciones dimensionales, formas de sellado y demás.[17]--[20]

## 2.2. Física del actuador

Como tal, un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o "actuar" otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: Presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). En el caso de los actuadores hidráulicos rotativos, estos son alimentados con fluido a presión y se obtiene velocidad angular y momento a partir de la pérdida de presión del fluido. (11).

$$P_e = P \cdot Q \quad (1)$$

Donde:  $P_e$  = Potencia de entrada [Wattios];  $P$ =presión[Pa] y  $Q$ = Caudal[m<sup>3</sup>/s]

La variación de presión puede determinarse por la diferencia de presión entre la entrada y la salida del actuador. En estas expresiones no se considera las pérdidas por rozamiento que existen y no se debe dejar de tenerlas en cuenta para las realizaciones prácticas.

La potencia mecánica proporcionada por el actuador, estará dada en los actuadores rotacionales en función del torque y la velocidad angular, expresado como:

$$P_s = T \cdot \omega \quad (2)$$

- a. **Definición De Torque.** - El torque que proporciona el actuador, se puede definir por como la presión actúa sobre un lado de la aleta del eje, y por lo tanto puede ser definida para una configuración simplificada del actuador de la siguiente manera:

$$T = P * a * b * \left( \frac{D + a}{2} \right) \quad (3)$$

Donde:  $a$ =altura expuesta de la aleta [m];  $b$ =ancho total de aleta [m];  $D$ =diámetro eje en la sección de la aleta [m].

Considerando que las expresiones  $a$ ,  $b$  y  $D$  son magnitudes dimensionales que no variarán, se determina que el torque generado por el actuador es directamente proporcional a la presión del fluido que ingresa a éste.

- b. **Definición de velocidad.** - De manera similar que con el torque, la velocidad de giro del actuador puede definirse por la variación del volumen de una de las cámaras del actuador (similar a una corteza cilíndrica), así obtenemos la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{1}{\left[ \frac{(R^2 - r^2) * \pi * b}{360} \right]} Q \quad (4)$$

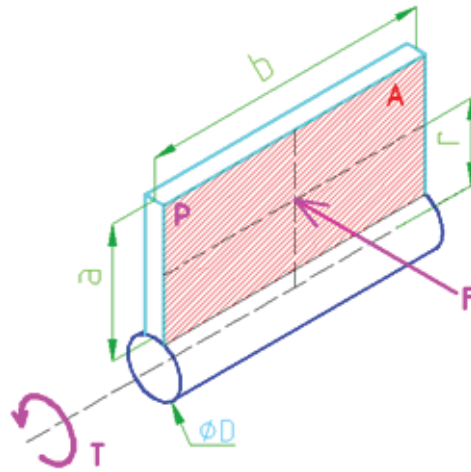


Figure 4: Diagrama del eje y paleta.

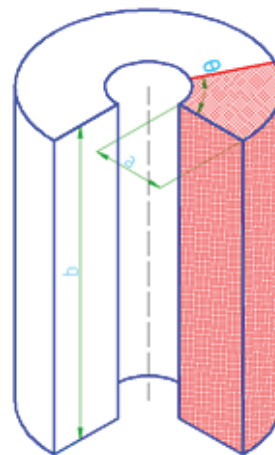


Figure 5: Diagrama de corteza cilíndrica que simula una cámara del actuador.

Donde:  $\omega$  = velocidad angular del eje en el actuador [rad/s];  $R$  = radio exterior de la corteza cilíndrica;  $r_1$  = radio interior de la corteza cilíndrica y  $b_1$  = altura de la corteza cilíndrica.

### 2.3. Modelo

Considerando una primera fase de diseño, se desarrolló un modelo computarizado del prototipo con la ayuda del software Solidworks presentando una simplificación en cada una de sus partes. [21]--[23]

La carcasa está configurada en 3 partes, con un cuerpo central que conforma el bloque central del actuador sobre el que se montaran 2 tapas, una delantera y otra posterior; que servirán como puntos de apoyo para el eje y la aleta, y también confinarán el volumen del actuador a través de su sellado. [17]

El modelo presentado y sus características, se presentan en la tabla 1:

TABLE 1: Características del prototipo del actuador.

CARACTERÍSTICAS	DIMENSIONES
Tamaño (axbxH)	60x60x45 mm
Peso	1.5 kg
Caudal nominal	9 L/min
Presión del sistema	$2.9 \times 10^{-3}$ Mpa (0.43 psi)
Consumo máximo de potencia	500 W

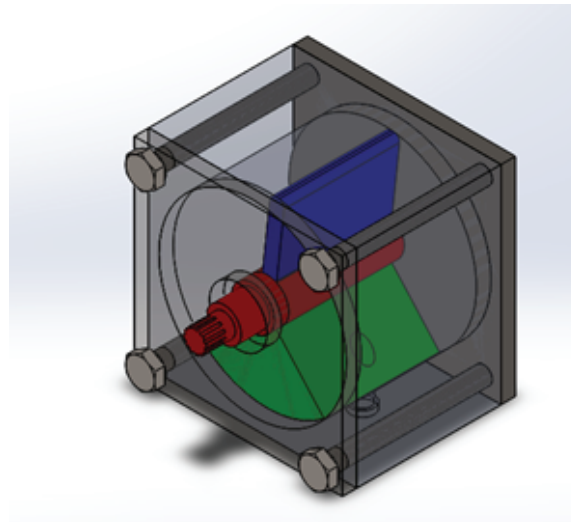


Figure 6: Modelo del actuador hidráulico rotativo.

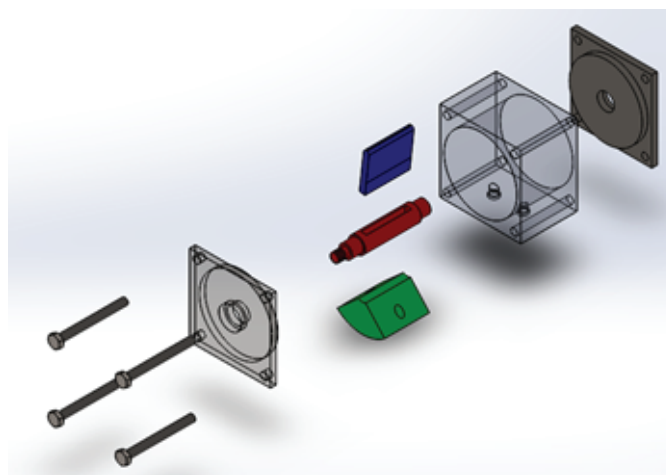


Figure 7: Despiece del modelo.

Se evidencia entonces en el diseño del actuador, una decisión basada en la simplicidad, forma y tamaño para la construcción del actuador, el mismo que funcionará en base a la posición de una aleta impulsada por presión de aceite hidráulico.

Además de lo expuesto, la presión máxima de funcionamiento del actuador, será tomada como la presión máxima del sistema hidráulico, e inicialmente se la debe

calcular, en función de los movimientos críticos (más singulares) en los escenarios de trabajo.

Para ello, considerando que el servomecanismo será instalado en un sistema reha-bilitador de rodilla, un exoesqueleto por ejemplo, las proporciones antropométricas se pueden definir como las longitudes de las posiciones máximas (cadera al tobillo).

En el trabajo de Maldonado [24], se muestran las medidas antropométricas de un exoesqueleto y específicamente, la de la cadera al tobillo extendidos, como 850 mm (0.85m).

Dichas dimensiones pueden definir los valores máximos de torque requeridos, prin-cipalmente en la articulación de la cadera, que será la de requerimientos más grandes de presión, ya que, al momento de realizar un ciclo de marcha, y teniendo tres puntos de apoyo (pie, mano izquierda, y mano derecha), la otra pierna deberá moverse en base al torque desarrollado en esa articulación.

Para una simulación del ciclo de marcha debajo del agua, *Veras-Duarte* [25], indican que el torque máximo requerido para la articulación de la cadera a poca profundidad, es de 9 N.m..

Se puede calcular entonces que la fuerza requerida para mover la pierna desde la cadera es de 10.6 N.

A su vez, para un área de  $A=3600\text{mm}^2$  ( $3.6 \times 10^{-3}\text{m}^2$ ) correspondiente a una aleta, según el diseño propuesto para el actuador, se tiene una presión aproximada de  $P=2.944 \times 10^{-3}$  Mpa (0.43 psi) que es la presión mínima a la cual se debería realizar el diseño y cálculo hidráulico del actuador.

El valor de la presión, es muy bajo, pero no puede ser reemplazado por un actuador neumático, debido a las exigencias de precisión en el posicionamiento angular que requiere el servomecanismo, ya que debido a la compresión existente en el fluido (aire), éste variaría ampliamente la respuesta angular del actuador.

### 3. Resultados y discusión

Para simular el efecto de la presión sobre las partes móviles del actuador, se simulo el comportamiento del conjunto Eje-Aleta en el propio entorno de Solidworks [26], considerando los siguientes parámetros de simulación:

- Presión aplicada: 40 PSI
- Material: AISI 1045 Acero Estirado en Frio



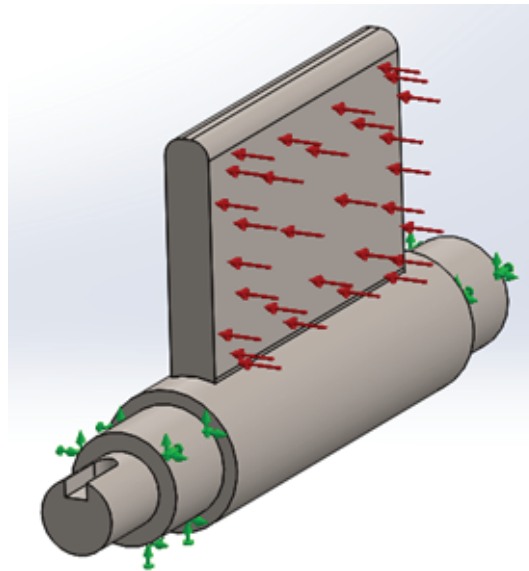


Figure 8: Aplicación de cargas y apoyos para simulación en Solidworks.

En esta primera simulación se consideran dos casos en los que se varían los apoyos:

1. En uno de ellos se considera a los apoyos del eje como puntos fijos, lo que determina la deformación de la aleta en su parte superior, que es de gran interés para determinar una posible interferencia entre esta y la carcasa del actuador.

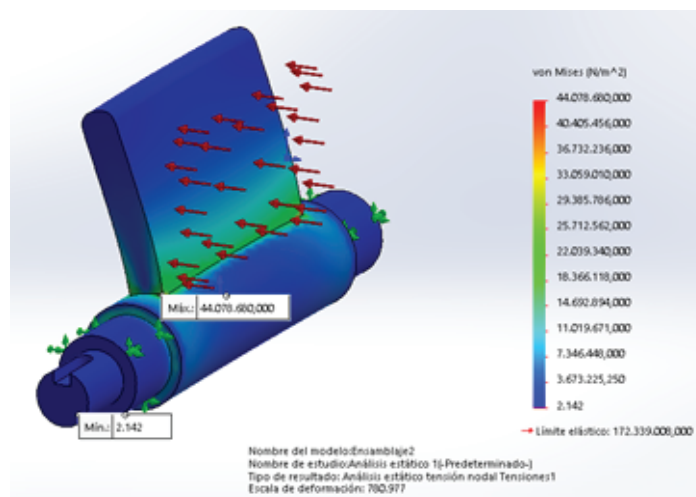
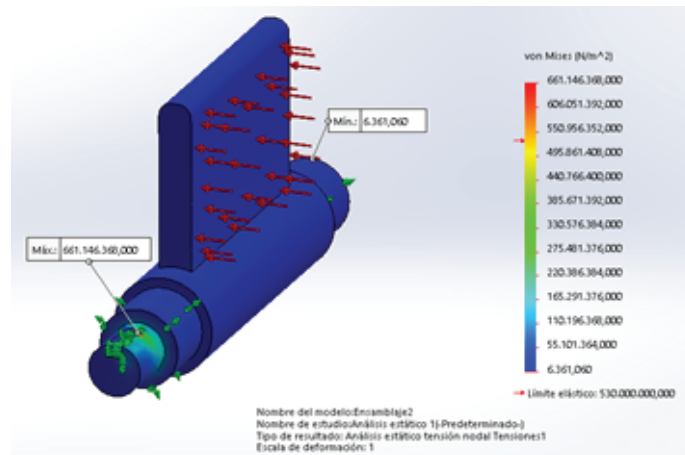


Figure 9: Simulación de la esfuerzos de la aleta con los apoyos del eje como puntos fijos.

2. En un segundo caso, se considera el efecto de una carga resistiva al movimiento del actuador, proporcionando un punto fijo en una cara de la chaveta del eje, y usando los puntos de apoyo del eje como rodamientos. Esta simulación nos presenta que el eje falla en la zona de la chaveta.

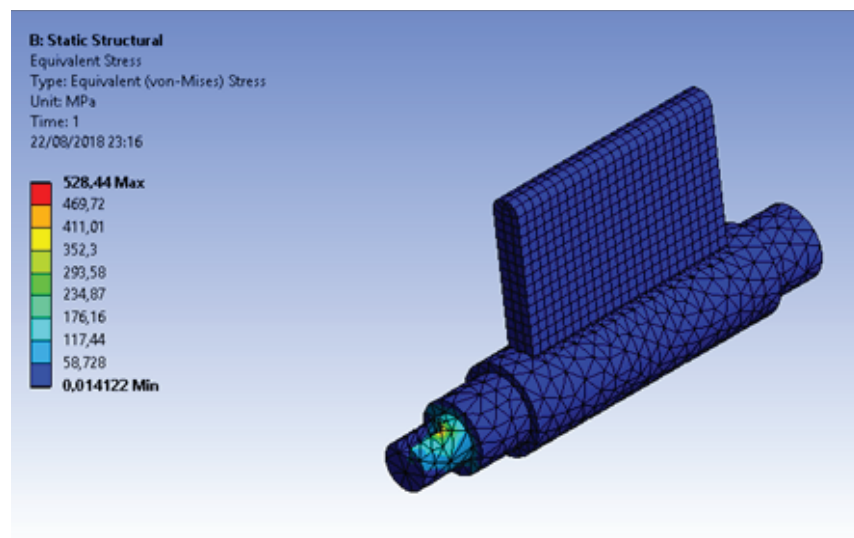


**Figure 10:** Simulación de esfuerzos considerando una carga resistiva en un punto fijo y los puntos de apoyo del eje.

Una definición más exacta de los resultados, se puede obtener empleando un programa más especializado. Para ello, se realiza una simulación en el software ANSYS (13) con el mismo ensamblaje que se realizó la previa simulación en Solidworks, de manera que la geometría de los sólidos analizados sea la misma.[27]

Se importa un archivo.STEP al modelador de ANSYS haciendo énfasis en la opción que permite "no compartir topografía" de los sólidos, de manera que se realiza un mallado para cada elemento, coincidentes únicamente en nodos.

A continuación, se procede a incluirlo en un proyecto de Workbench en el que se definió el material, las condiciones de la malla, los apoyos, las cargas, y los objetivos del cálculo como el esfuerzo, la deformación total, y en factor de seguridad, mostrando los siguientes resultados:

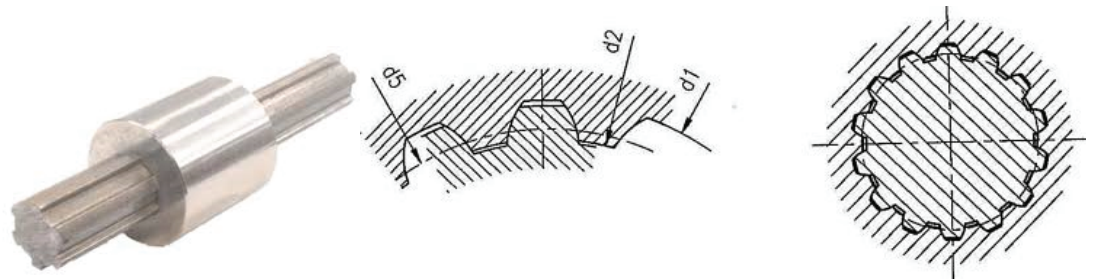


**Figure 11:** Simulación de esfuerzos en ANSYS, para la definición de los esfuerzos máximos en el eje-paleta.

Nuevamente se puede apreciar que el ensamble falla en la región de la chaveta, que es el punto donde se presenta el mayor esfuerzo. Esto indica que la configuración actual no es segura para esta aplicación.

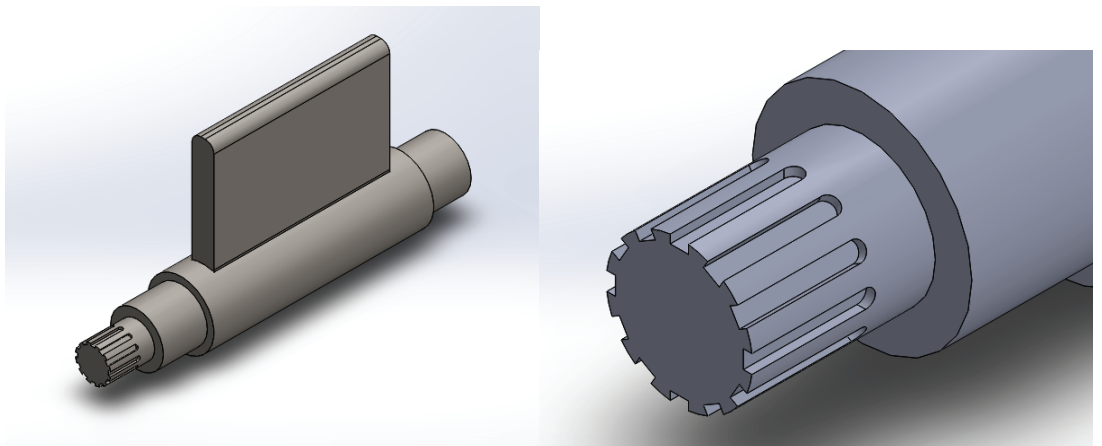
Considerando los resultados de las anteriores simulaciones se decidió por modificar la configuración del chavetero, siendo esta área el punto de fallo determinado anteriormente.

La forma más sencilla de reducir el esfuerzo mecánico al que se encuentra sometido esta región, es aumentar el área de contacto a través del cual se transmite la potencia del actuador. Esto se puede lograr incluyendo múltiples cuñas en el eje, modelo que se denomina como "Eje Estriado" por las múltiples ranuras de baja profundidad que se describen en la zona de acople.



**Figure 12:** Modelo y representación de un Eje Estriado.

Se modificó la geometría del extremo de acople del eje, siguiendo una configuración tipo estriado y se simuló directamente en ANSYS siguiendo los mismos parámetros de la simulación anterior.



**Figure 13:** Detalle de modelo de Eje Estriado.

Para el análisis, en las propiedades de la malla utilizada, ANSYS entrega un valor de calidad a cada elemento de la malla entre 0 y 1.

Entre los parámetros del mallado utilizados, analizados a través del método de calidad de elemento se obtuvo un mínimo de 0.31, un máximo de 1, con un promedio de 0.84 a una desviación estandar de 0.009.

Para el resultado de los esfuerzos, al usar una carga de 210 psi, utilizando la geometría estriada, se obtiene que el eje del actuador soporta una distribución de esfuerzos máximos de 236.8 Mpa, ubicados en la base de la aleta. Los resultados se muestran en la Figura 14.

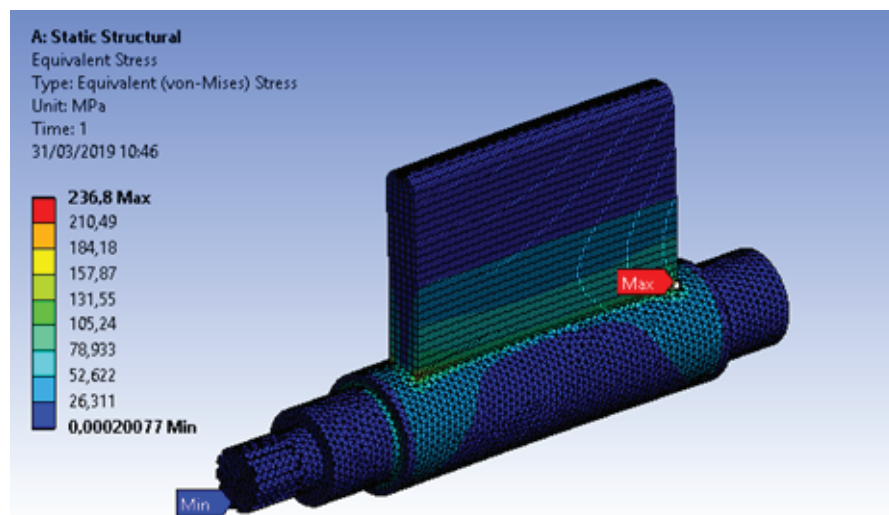


Figure 14: Resultados de los esfuerzos en ANSYS para la geometría estriada.

Los resultados muestran que el cambio de un solo chavetero a una configuración del tipo estriado, reduce considerablemente el esfuerzo al que se sometería el extremo del eje, permitiéndonos un valor aceptable de 7 como factor de seguridad. (Figura 15).

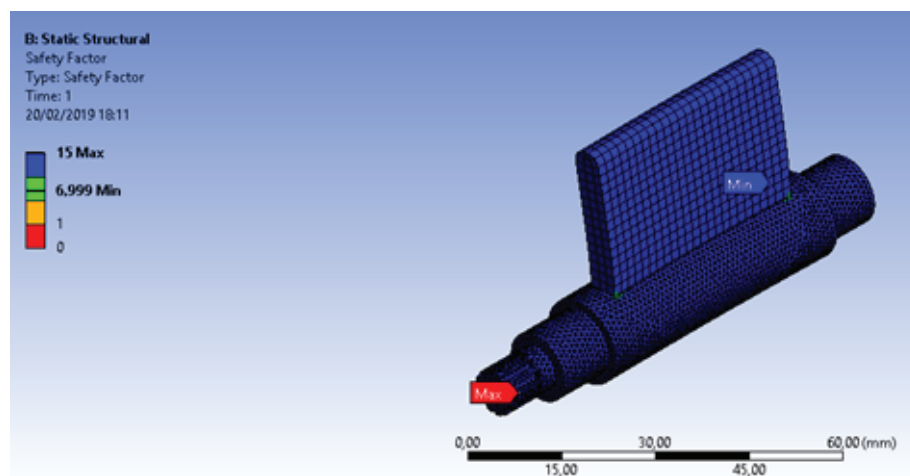


Figure 15: Factor de seguridad definido por ANSYS para el modelo con Eje Estriado.

## 4. Conclusiones

- La rodilla es la articulación que presenta la mayor cantidad de lesiones relacionadas con actividad física de las personas, y presenta el mayor índice de pedidos de rehabilitación Pre y Post Operatoria.
- La selección de un actuador hidráulico se confirma por las prestaciones claves que presenta el fluido de trabajo. Al ser un fluido incompresible obtenemos un mecanismo compacto y robusto, de alta precisión respecto a su posición, y con un retardo entre señal y acción mínimo, adecuado para la aplicación de terapia de articulaciones de rodillas
- La propuesta del actuador hidráulico de tipo aleta basculante se sustenta en la simplicidad, facilidad de fabricación y propiedades de operación (baja presión y límite máximo de giro) ventajosas que presenta frente a los otros tipos de actuadores rotativo estudiados.
- Los valores de torque para un ciclo de marcha humana bajo el agua, definen los valores de la carga que la aleta del actuador debe soportar, los cuales son verificados para una geometría de eje estriado, obteniéndose un valor de 236.8 Mpa, lo que indicado que no existe fallo de material.
- El proceso de diseño iterativo llego a la conclusión de que la transmisión de potencia del actuador a través de un extremo del eje con una sola chaveta resulta en el fallo del eje y por lo tanto del mecanismo del actuador.
- El análisis del modelo con la variación de la chaveta por el eje estriado comprobó una reducción significativa de los esfuerzos en la zona crítica, llegando a un factor de seguridad aceptable cercano a 7.

## Conflicto de intereses

En el presente trabajo, no existen intereses particulares por parte de los autores, ni de la entidad científica o financiadora que puedan afectar directa o indirectamente a los resultados obtenidos.

## References

- [1] M. I. V. Orselli and M. Duarte, "Joint forces and torques when walking in shallow water," *J. Biomech.*, vol. 44, no. 6, pp. 1170--1175, 2011.

- [2] J. Watton, "Modelling, Monitoring and Diagnostic Techniques for Fluid Power Systems". Springer-Verlag London Limited 2007.
- [3] W. E. Prentice, *Técnicas de rehabilitación en medicina deportiva*, vol. 44. Editorial Paidotribo, 2001.
- [4] D. Ledia, H. G. García, D. Cruz, M. R. García, D. Isabel, and G. Fuentes, "Laboratorios de Anticuerpos y Biomodelos Experimentales ARTICULACIÓN DE LA RODILLA Y SU MECÁNICA ARTICULAR," vol. 7, no. 2, pp. 100--109, 2003.
- [5] H. Khan, "Development of a lightweight on-board hydraulic system for a quadruped robot. DEVELOPMENT OF A LIGHTWEIGHT ON-BOARD HYDRAULIC SYSTEM," no. May 2015, 2016.
- [6] V. Karanović, M. Jovanović, V. Jovanović, "Review of Development Stages in the Conceptual Design of an Electro-Hydrostatic Actuator for Robotics", *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 11, 2014.
- [7] N. G. Tsagarakis, M. Laffranchi, B. Vanderborght, and D. G. Caldwell, "A Compact Soft Actuator Unit for Small Scale Human Friendly Robots," in *Robotics and Automation, ICRA'09, IEEE International Conference on*, 2009, pp. 4356-4362
- [8] A. Esser and H.-C. Skudelny, "A New Approach to Power Supplies for Robots," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 27, pp. 872-875, 1991
- [9] L. Jose, "MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN ACTUADOR HIDRÁULICO PARA UN SIMULADOR DE MARCHA NORMAL," Pontificia Universidad Católica de Perú, 2012.
- [10] K. Amundson, J. Raade, N. Harding, and H. Kazerooni, "Hybrid Hydraulic-Electric Power Unit for Field and Service Robots," in *Intelligent Robots and Systems, (IROS 2005) 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, 2005, pp. 3453-3458.
- [11] K. Rydberg, "Feedbacks in Hydraulic Servo Systems," no. February, 2016.
- [12] C. J. RENEDO, "Neumática e Hidráulica," *I{\'i}nea*. Available: <http://personales.unican.es/renedoc/Trasparencias%20WEB/Trasp%20Neu>, vol. 12, 2006.
- [13] F. Roca, "Oleohidráulica básica. Diseño de circuitos," *Edicions UPC*, 1997.
- [14] B. Burbidge, "Sistema Hidraulico," *Superando las antinomias la Total. Infin.*, 2016.
- [15] S. R. Majumdar, *Sistemas Neumáticos, Principios y Mantenimiento*. Mc Graw Hill.
- [16] B. Mutton, "Aplicaciones de la Neumatica." pp. 84--86, 2008.
- [17] FESTO, "Actuadores giratorios con aleta basculante DRVS," 2018. [Online]. Available: [https://www.festo.com/cms/es-ve\\_ve/53717.htm](https://www.festo.com/cms/es-ve_ve/53717.htm).
- [18] H. Stewart, "Hydraulic and Pneumatic Power Systems," *Aviat. Maint. Tech. Handb. - Airframe*, p. 600, 1977.
- [19] S. M. Richard, *Hydraulic Handbook*, no. June. 1968.

- [20] D.; B. S. and M. T. Merkle, *Hydraulics, Basic Level*. 2003.
- [21] U. De Limoges and J. A. Perrin, "Modeling, simulation and robust control of an electro-pneumatic actuator for a variable geometry turbocharger," no. Ed 526, 2018.
- [22] S. De Versailles and E. A. U. D. V. Saint-, "Mathematical Modeling of an electro-hydraulic actuator for humanoid," vol. 16, 2017.
- [23] Y. Efe, "Dynamic Model of a Hydraulic Servo System for a Manipulator Robot," 2014.
- [24] G. Maldonado, "*Desarrollo de un prototipo de Andador-Exoesqueleto de 6 Grados de Libertad para la rehabilitación física de miembros inferiores dentro del Grupo de Investigación en Bioingeniería GIEBI*", Trabajo de Titulación, Maestría en sistemas de Control y Automatización, ESPOCH 2019.
- [25] M. Veras, M. Duarte, "Joint forces and torques when walking in shallow water", Institute of Physics and School of Physical Education and Sport, University of São Paulo, São Paulo, Brazil, *Journal of Biomechanics*, Volumen 44, Issue 6, 2011.
- [26] Dassault Systemes, "Análisis FEA." [Online]. Available: [https://www.solidworks.es/sw/education/9624\\_ESN\\_HTML.htm](https://www.solidworks.es/sw/education/9624_ESN_HTML.htm). [Accessed: 28-Mar-2019].
- [27] ANSYS, "CFD." [Online]. Available: <https://www.nysplm.com/ansys/calculo-fluidos-cfd.php>.
- [28] Portal de la Asociación de la Industria Eléctrica-electrónica Chile [Página principal en Internet], [actualizada en 2018]. [aprox. 7 pantallas]. Disponible en: <http://www.aie.cl>