

Torque sensor geometry study on 3D simulated conditions for a Hollow robotic joint

Mauricio Rodriguez Calvo *. Federico Ruiz Ugalde**

*Universidad Técnica Nacional (Tel: +506 83049439; e-mail: mrodriguez@utn.ac.cr).

** Universidad de Costa Rica (Tel: +506 8309 6020; e-mail: fruiz@eie.ucr.ac.cr).

Resumen: El sensor de torque es el componente que le brinda a una articulación robótica la capacidad de ser amigable con su entorno, ya que posibilita a un brazo robótico a tomar acciones al captar disturbios externos mientras realiza cualquier labor de manipulación en cualquier tipo de entorno. Esta cualidad es indispensable en robots colaborativos que se desempeñan en espacios de trabajo poco controlados. En este trabajo se presenta el diseño de un sensor de torque para el prototipo de una articulación robótica hueca que integra refrigeración líquida en un actuador BLDC con devanado concentrado. Se muestra el tipo de simulación realizada para identificar la geometría que mejor se adapta a las necesidades del modelo propuesto en función de los esfuerzos que se necesitan captar al realizar tareas de manipulación en un brazo robótico humanoide. Seguidamente, se muestra el resultado de las simulaciones y como se definen las condiciones de borde y la estrategia de modificación geométrica para refinar los puntos máximos de esfuerzo.

Palabras clave: Sensor de torque, articulación robótica hueca, brazo robótico, simulación estática y dinámica, galgas extensiométricas;

Abstract: The torque sensor is the component that gives a robotic joint the ability to be friendly to its surroundings, since it allows a robotic arm to take action when capturing external disturbances while performing any manipulation work in any type of environment. This quality is indispensable in collaborative robots that work in poorly controlled work spaces. This paper presents the design of a torque sensor for a hollow robot joint prototype that integrates liquid cooling in a BLDC actuator with concentrated winding. It shows the type of simulation performed to identify the geometry that best suits the needs of the proposed model based on the efforts that need to be captured when performing manipulation tasks on a humanoid robotic arm. Next, the result of the simulations is shown and how the boundary conditions and the geometric modification strategy are defined to refine the maximum stress points.

Keywords: Torque sensor, hollow robotic joint, robotic arm, static and dynamic simulation, strain gauges;

1. INTRODUCCIÓN

Una de las características más importantes en un robot colaborativo es la capacidad de interactuar físicamente con personas en un entorno de trabajo mutuo. Lograr una coexistencia mutua en un ambiente seguro para el sistema robótico y para las personas compartiendo el mismo espacio de trabajo al realizar tareas colaborativas representa un problema considerable. Aun si el robot está programado correctamente para llevar a cabo una tarea, el que este se mueva por el espacio libremente representa un potencial peligro para las personas, dado que el robot está equipado con extremidades que pueden generar movimientos bruscos, así como un comportamiento impredecible en algunos casos.

Lograr que el robot esté preparado para actuar con respecto a disturbios externos espontáneos o situaciones poco predecibles representa un gran desafío, ya que su espacio de trabajo muestra un entorno no estructurado con objetos que pueden variar de pose y orientación en el espacio con el tiempo. Varios robots humanoides han sido diseñados y equipados con sistemas de visión, de

posicionamiento y audio (Jamali, Maggiali, Giovannini, Metta y Natale, 2015), sin embargo, solo el sensor de torque le permite a un sistema robótico desplazarse por el espacio y actuar en función de disturbios externos.

Una característica deseable en un robot humanoide es que este pueda actuar en función de su entorno, y a su vez que pueda levantar objetos pesados siendo pequeño y liviano. Rodríguez y Ruiz, (2018), muestran una articulación robótica que usa líquido refrigerante para incrementar el rendimiento de la articulación durante momentos de exigencia altos, esta viene preparada para integrar el sensor de torque definido en este trabajo.

Este documento se organiza de la siguiente forma. Los estudios previos que describen algunas tecnologías y teorías relacionadas a este trabajo se muestran en la sección II. Los criterios de diseño y la infraestructura experimental en el ambiente de simulación se describe en el capítulo III. Una descripción de cómo se define el modelo de simulación en ternos lineales y no lineales se desarrolla en la sección IV. Los resultados del experimento en el ambiente de simulación se muestran en la sección V. En la sección VI se muestran las conclusiones finales.

2. ESTUDIOS PREVIOS

El generar movimiento en un sistema robótico en función del par generado por disturbios externos, también es conocido como control por impedancia. En un manipulador robótico se perciben las fuerzas aplicadas a la mano, así como las que se perciban en todo el manipulador con un factor de error muy bajo. Se han realizado inteno para mejorar el control de par en articulaciones robóticas, como lo describen (Wu y Paul, 1980), quienes propusieron un servosistema de torque simple, que utiliza un sensor de torque de unión basado en un extensómetro. Otro ejemplo lo muestran (Hirzinger, 2001), donde cada articulación de un brazo robótico tiene un sensor de torque que usa galgas extensiométricas, sensores de posición y un freno piezoeléctrico, lo que le da una capacidad más amplia para adaptarse a su entorno. Otra aproximación la muestra (Sakaki & Iwakane, 1992) quienes emulan el control por impedancia usando un controlador de motor eléctrico con sensor de par magnetoestrictivo.

Según (Golder , 2001) es posible percibir un par externo en un sistema robótico a través de la elasticidad de la lámina flexible presente en las reducciones mecánicas armónicas sin perder estructura mecánica y la rigidez en un brazo robótico humanoide, sin embargo las galgas extensiométricas deben estar instaladas en este material flexible, lo que complica su instalaciones he implementación.

Existen varias técnicas para incorporar la medición que permite calcular torque en articulaciones robóticas y brazos robóticos en general. Dentro de ellas están las técnicas eléctricas que están asociadas a la incorporación de galgas extensiométricas y sensores capacitivos y piezoeléctricos. Cuando se aplica fuerza, la tensión cambia la resistencia eléctrica de las galgas proporcionalmente a la carga. Estas son usadas mayormente para tener una alta sensibilidad. En el segundo caso se usan fenómenos electromagnéticos producidos por sensores inductivos, magnetostricción y el efecto magneto elástico de algunos sensores para generar los datos del sensor de torque como lo muestra (Vischer & Khatib,1995). Este tipo de sensores ofrece una muy buena resolución 0.1 u/m y una precisión que ronda el 0.2 %. La alta fiabilidad se deriva de su principio de funcionamiento basado en transferencia magnética. Finalmente existen métodos que estudian fenómenos ópticos para captar datos para un sensor de torque. Los fotosensores son los más usados para generar los datos en un sensor de par en función de un objeto móvil, su principal desventaja es la no linealidad y lo susceptibles que son a ciertas temperaturas. La implementación de un sensor óptico como sensor de torque lo muestra (Hirose & Yoneda, 1990).

3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO HE INFRAESTRUCTURA EXPERIMENTAL

En la figura 1 se muestra el primer prototipo diseñado, este tiene un soporte al eslabón que conecta una articulación robótica con otra en uno de sus extremos para mantener el centro de masa de la articulación robótica completa lo más centrado posible a lo largo de todo el brazo. Se esbozaron agujeros con forma de elipse en los puntos donde se integrarían las galgas extensiométricas para direccionar los esfuerzos mayormente en esos puntos y tener una mejor medición. Considerando los factores de diseño establecidos se diseñaron dos prototipos adicionales. En el segundo se trasladó la sección de soporte del link a una posición que facilita mucho más el maquinado de la pieza.

Anteriormente el prototipo tenía un corte cilíndrico a lo largo del eje Y a ambos lados del eje X de las vigas de soporte, lo que direcciona mejor el esfuerzo hacia el elemento elástico; sin embargo, esto dificulta el mecanizado de la pieza, ya que sería necesario cambiar la fresa mientras se taladra el modelo en futuras etapas de implementación; por lo que el diseño se modificó para que sea lo más sencillo posible de mecanizar y se logre taladrar por completo con una mismo freza en una sola etapa de modelado

he incrementar la precisión al evitar trasladar la pieza o girarla de posición. El maquinar la pieza sin cambiarla de posición reduce las pérdidas por asimetría en el modelo.

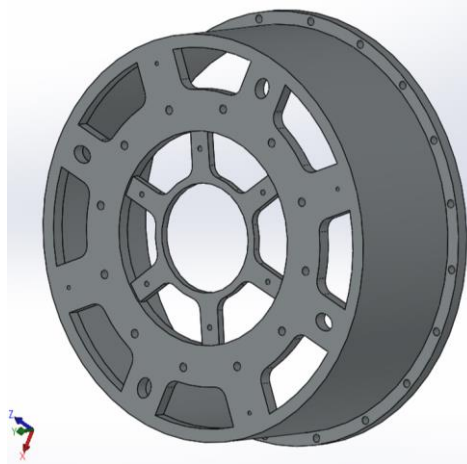


Figura 1: Primer prototipo de sensor de torque para una articulación robótica hueca.

Considerando el proceso de mecanizado mencionado anteriormente, se cambió la geometría elíptica por una cilíndrica en las vigas de tensión pensada para funcionar como centros de concentración de esfuerzos. Al realizar estos cambios en el diseño, se logra bajar el peso completo del sensor de torque de 447 gramos a 98 gramos, lo cual es esencial en la articulación propuesta. Como se muestra en la figura 2.

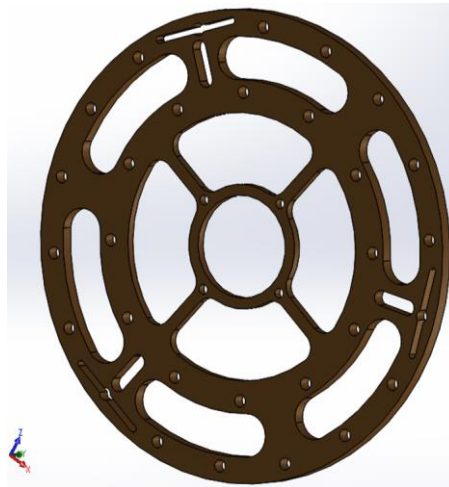


Figura 2: Segundo prototipo de sensor de torque para una la articulación de brazo robótico humanoide.

El tercer prototipo diseñado se muestra en la figura 3. En este caso se cambia la configuración de 4 vigas a 3 vigas; lo que deja una en el eje Z y dos a 45° con respecto al eje X. Además de contar con unos cortes cilíndricos en los tres elementos elásticos para lograr una mayor sensibilidad en los puntos críticos de esfuerzos, lo que concentra el esfuerzo de una forma más centralizada. Para facilitar el mecanizado de ambos diseños cada redondo es mayor a 3mm de radio en los puntos de soporte con respecto a las vigas.

Con el segundo diseño, se considera un brazo robótico que integre eslabones tubulares a lo largo del brazo, ya que la sujeción de la pieza obliga a que se tenga un soporte de diámetro considerable, lo cual permitiría conducir cables y tuberías dentro de los eslabones para tener una solución final de brazo más estructurada y visualmente más limpia. Al tener un diámetro menor, el tercer diseño está ligado a un diseño de eslabón mucho más reducido, sin embargo, este debe ofrece un soporte más estructurado, por lo cual debe ser más denso en su distribución. El tercer prototipo al igual que el segundo, permite conducir cables y tuberías a través del eslabón, ya que integra un agujero diseñado para la reducción armónica seleccionada. Ambos modelos ofrecen dos posibilidades de diseño de brazo.

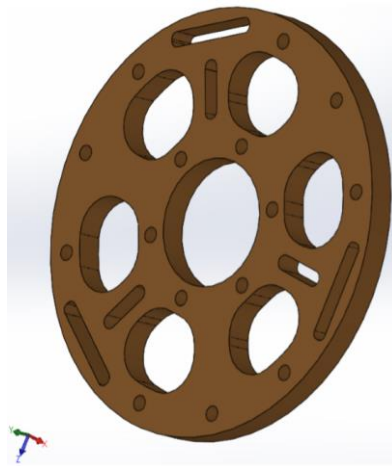


Figura 3: Primer prototipo de sensor de torque para una articulación robótica hueca.

4. DEFINICIÓN DE LINEALIDAD

Es necesario definir primero el tipo de simulación que se realiza para obtener los resultados más cercanos posible s la realidad, par esto, se lleva a cabo un análisis de elementos finitos. Este análisis tiene una componente línea y no lineal, el cual se puede mostrar por medio de la ecuación descrita por (Grossi y Aranda, 1993).

$$F = K * U \quad (1)$$

Donde F es le fuerza K es la rigidez del material y U es el desplazamiento en función de la fuerza. En un análisis lineal la rigidez permanece constante mayormente, pero si este valor cambia considerablemente mientras se carga la simulación entonces una simulación lineal ya no es válida.

Sabiendo que la rigidez varia con respecto al material y la geometría del modelo diseñado, podemos afirmar que estos dos factores representan principalmente componentes determinantes de la linealidad y la no linealidad de un análisis. Analizando el comportamiento del material con respecto al estrés y la tensión, se puede definir el estrés como la fuerza dividida entre el área.

$$\sigma = F * A \quad (2).$$

Los valores del estrés son útiles para representar fuerzas internas independientes del tamaño total de la pieza. Por otro lado, la tensión en ingeniería es el promedio del factor de cambio del tamaño y el tamaño inicial representado por.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

Por consiguiente, un estrés mayor significa una tensión mayor. En muchos materiales la relación de estrés y tensión es lineal y definida por el modelo elástico. Esta relación se mantiene hasta que se alcanza el limite elástico. El limite elástico es la propiedad del material definido como la tensión a la que el material comienza a deformarse plásticamente, mientras que el punto de elasticidad es el punto donde comienza la deformación no lineal. Antes del punto elástico el material puede volver a su forma original, es decir se comporta de forma elástica. Más allá del punto elástico la tendencia del material ya no es lineal y la deformación siguiente resultara en deformación plástica, lo que significa que el material ya no tiene la capacidad de volver a su estado original.

La siguiente fuente de no linealidad está dada por la geometría, figura 4. En un análisis lineal los cálculos están basados en la geometría inicial. Esto es válido cuando cualquier variación en su forma es pequeña. Sin embargo, si hay suficiente deformación para causar un cambio importante en la forma de la rigidez de la geometría, el análisis se convierte en una situación de no linealidad. Es por esta razón que es necesario llevar a cabo un análisis no lineal en los sensores de torque propuestos.

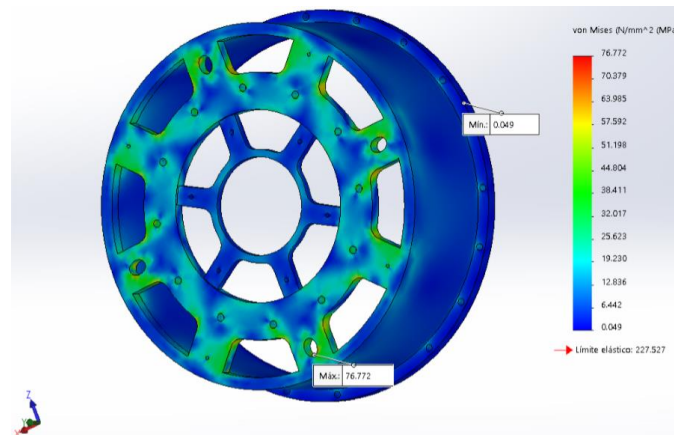


Figura 4: Resultados del análisis del segundo prototipo de sensor de torque.

6. RESULTADOS SIMULADOS

La simulación de esfuerzos se aplica usando un factor de seguridad de un 50 % bajo carga crítica. Teniendo en cuenta el peso completo del prototipo de brazo robótico y el peso máximo del objeto a manipular, se calcula una carga de fuerza axial en el sentido (+Y) y (-Y) de 884 N y un torque de 638,4 Nm a la salida de la reducción mecánica; a su vez, se configura una simulación aplicando el mismo torque, pero cambiando la dirección de la carga radial en dirección al sentido (+Z) y (-Z), esto con el fin de evaluar el desempeño de la articulación cuando el brazo robótico adopta una pose que exige el máximo esfuerzo.

Inicialmente se configura una simulación lineal estática en Solidworks estableciendo los agujeros externos como puntos de sujeción fija y los puntos de giro como los que están conectados a la salida de la reducción mecánica, como se muestra en la figura 5. La concentración de esfuerzos en el primer prototipo de sensor de torque muestra que efectivamente se está teniendo una mayor concentración de fatiga en los puntos más cercanos a las vigas que tiene un hueco elíptico y las cargas están mayormente distribuidas a lo largo de las vigas. Sin embargo, los ángulos rectos afectan la precisión de la simulación, además el efecto de tener componentes elásticos en los ejes (+Z), (-Z) y (+X), (-X) reduce la capacidad de percepción de las fuerzas.

Considerando la capacidad elástica del material usado en los prototipos de articulación robótica (Aluminio 6061 T4), se observa en la figura 4 que la deformación del material está muy por debajo del límite elástico que resiste. Aplicando la carga máxima con el factor de seguridad se tiene una carga de 76.77 Mpa. Sin embargo, este modelo se descartó por su tamaño y peso.

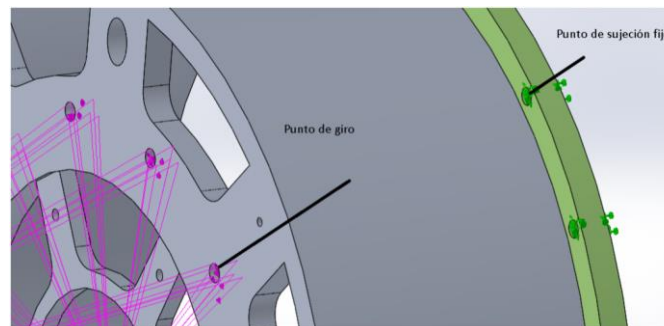


Figura 5: Puntos de sujeción para el análisis de elementos finitos en el primer prototipo de articulación.

Los resultados obtenidos del segundo prototipo en la figura 6, muestran una buena distribución de fatiga en los elementos elásticos al realizar una simulación axial en el eje Y de 884 N junto a una carga radial de 674Nm. La centralización de fatiga muestra el punto de fatiga más cercano al punto de afluencia en el corte cilíndrico que esta perpendicular a las vigas donde van colocadas las galgas extensiométricas. Los agujeros de sujeción fija que están en dirección lineal a cada viga fueron removidos, ya que al realizar las simulaciones estos ofrecían mayor soporte y la lectura de fatiga que se mostraba en los puntos donde estarían situadas las galgas.

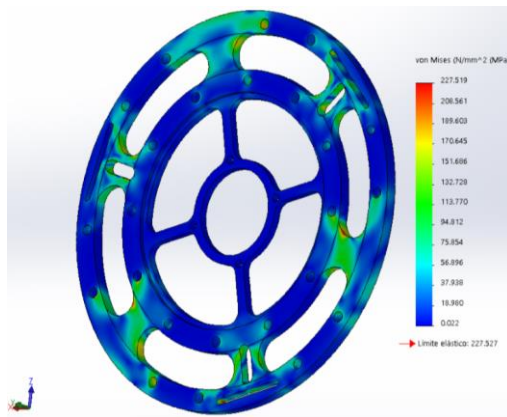


Figura 6: Resultados del análisis del segundo prototipo de sensor de torque.

Si bien es cierto se diseñó el modelo con cortes cilíndricos en tres de las vigas para direccionar mejor la fatiga en estos puntos, se observa que la diferencia de las lecturas de esfuerzo en estas vigas y las que no tiene ningún corte no varío demasiado. Esto se debe a las propiedades plásticas del material y la dirección del esfuerzo. Si analizamos el comportamiento de los resultados al aplicar una fuerza axial de 884 N en el eje Z en conjunto con un torque de 634 Nm en los agujeros sujetos a la salida de la reducción mecánica, se observa que, aunque el esfuerzo es simétrico, la fatiga en las vigas que tienen cortes cilíndricos efectivamente sufren mayor fatiga. Esta simulación demuestra que la mayor fatiga se produce cuando se ejerce una fuerza axial en el eje Z de la articulación.

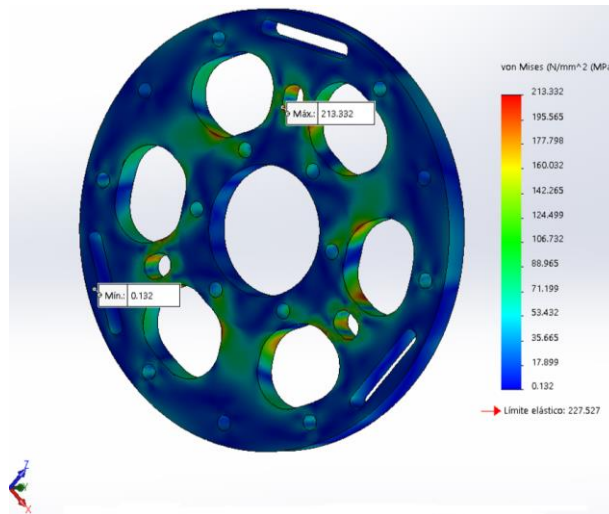


Figura 7: Resultados del análisis del tercer prototipo de sensor de torque.

El segundo prototipo diseñando soporta el caso crítico donde se aplica el factor de seguridad del 50 % y muestra que la lectura está muy cerca del punto de fluencia teniendo un esfuerzo de 227.519 Mpa y un límite elástico de 227.527 Mpa. La cercanía en los datos es conveniente para el propósito de este estudio, ya que entre más cerca se este del límite aplicando un factor de seguridad se tendrá una mayor capacidad de sensibilidad a la hora de realizar las lecturas para aplicar el control suave en la articulación.

El tercer prototipo de sensor de torque tiene una geometría muy similar a la del segundo diseño, sin embargo, este tiene un corte cilíndrico distinto a lo largo de las vigas donde irían colocadas las galgas extensiométricas. Se observó que al aumentar la distancia entre los centros de los círculos de cortes es necesario aumentar su diámetro al doble del diámetro que se usó en el segundo diseño, lo que provocaba que este corte cilíndrico tuviese un radio cada vez menor. Un corte con un radio tan reducido dificulta el proceso de maquinado, por lo que esta geometría se descarta. Al realizar pruebas experimentales se encuentra que el corte debe tener un diámetro de 1mm, aplicado a un cilindro de 7 mm de largo para no superar el límite elástico del material. Esto conlleva a cambiar la

geometría de este corte. Primero se realizan pruebas simuladas donde el corte se sustituyó por un agujero de 4 mm de radio y luego se optó por trazar dos círculos de radio 6 y 2 mm de distancia entre sus centros, trazando líneas tangentes entre sus cuadrantes. Con esta geometría se logra obtener una concentración de esfuerzos directamente donde se requieren concentrar el esfuerzo, como se muestra en la figura 7.

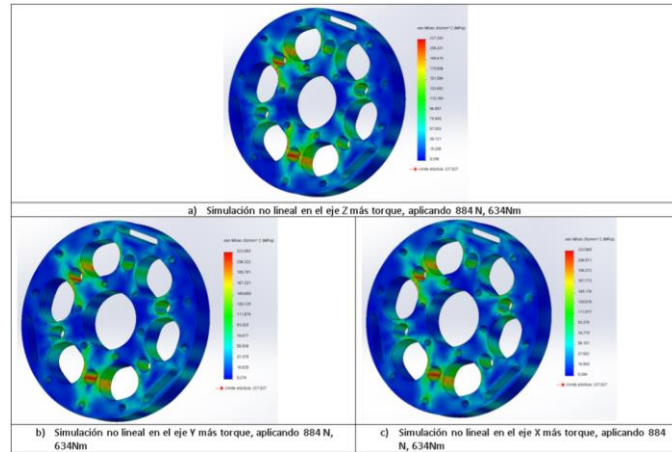


Figura 8: Resultados del análisis del tercer prototipo de sensor de torque.

La fuerza que más debe afectar la deformación de las vigas es el torque aplicado, y las fuerzas en X, Y, Z deben afectar lo menos posible la deformación de las vigas. Lo difícil aquí es identificar cuánto efectivamente deben deformarse las vigas con respecto a las fuerzas aplicadas en los 3 ejes cartesianos para tener una lectura adecuada y aceptable en estos puntos críticos. Para definir esto se trabaja con un factor de error del 6% para esfuerzos provenientes desde Y, Z. Es importante realizar simulaciones de los esfuerzos por separado para obtener una lectura de afectación real en las vigas ya que si en esta etapa se aplican simulaciones en simultáneo el material puede saturarse por el esfuerzo torcionante aplicado al prototipo.

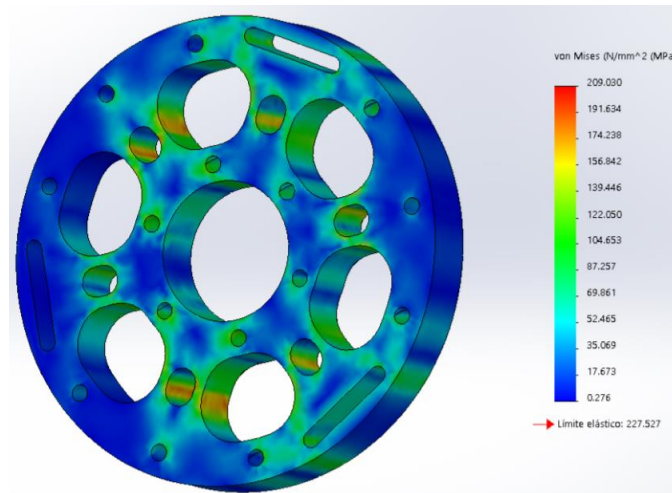


Figura 9: Segunda versión del tercer prototipo de sensor de torque.

Existen momentos en los que el brazo estará en una posición en la que la articulación no este ejerciendo torque y solo este sujetando algún objeto en una pose en particular, esto podría interpretarse como un torque si el sensor no está diseñado para soportar este factor de error. Se realizan modificaciones en la geometría completa del tercer modelo de sensor de torque manteniendo un rango de variación en la deformación en las vigas aplicando fuerzas en los ejes X, Y y Z para que se mantengan por debajo de los 11.376 MPa. La deformación de las vigas debe mantenerse alta cuando se aplica un torque únicamente.

En la figura 8 se aprecia el resultado de las simulaciones al realizar modificaciones al tercer prototipo de sensor de torque. Para modificar el sensor de forma que la deformación de las vigas por esfuerzos en los ejes X, Y y Z sea mínima, se aumentó el ancho de

la pieza completa a 14 mm. Lo que a su vez efectivamente redujo el esfuerzo percibido por los ejes críticos, sin embargo, esto provocó que el esfuerzo percibido al aplicar solamente el torque disminuya, pero esta disminución de esfuerzo es relativamente baja en comparación con los esfuerzos a minimizar.

Para minimizar la disminución de esfuerzo al aplicar un torque mientras se ensancha la pieza es necesario cambiar de 3 a 6 la matriz circular de los cortes en las vigas, esto provoca que al ejercer un torque en la pieza se sufran más esfuerzo en estos cortes. Las galgas extensiométricas estarían posicionadas en los costados de las 3 vigas que no tiene un corte transversal en la parte superior. También se muestra que el mayor esfuerzo sufrido en este nuevo diseño no supera los 8,45 MPa de deformación del material, lo que representa un 3.7 % del límite elástico.

En la figura 8 se muestran las simulaciones de esfuerzo estático no lineal aplicando una carga torcionante y una fuerza en un solo eje a la vez al prototipo de sensor de torque. Como se observa en el eje Y se tiene una deflexión del material de 222.88 Mpa, en el eje Z 227.24 MPa y en el eje X 223.56 MPa, vemos que para todos los casos no se pasa el límite elástico del material.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia la geométrica más idónea para fungir como sensor de torque de una articulación robótica que es parte de un brazo robótico de 7 grados de libertad. Se describen los criterios de cambio geométricos generados a partir de los resultados de las simulaciones de esfuerzos estáticos no lineales en 3 prototipos de sensor de torque.

En la figura 9 se muestra el sensor de torque seleccionado como resultado del estudio. Esta muestra que el mayor esfuerzo sufrido en este nuevo diseño no supera los 8,45 MPa de deformación del material, lo que representa un 3.7 % del límite elástico. Además, se muestran los resultados de la simulación del sensor aplicando únicamente un torque de 634 Nm. Vemos que si bien es cierto la pieza tiene una buena resistencia a la aplicación de esfuerzos en los ejes X, Y, Z, es posible tener una buena lectura de deflexión en las vigas de soporte llegando a una deflexión de 209MPa, lo cual aún es cercano a límite elástico del material que es de 227Mpa. El comportamiento visto en esta simulación permite afirmar que la pieza diseñada cumple con las necesidades mecánicas requeridas para dotar al prototipo de articulación robótica con la cualidad de ser adaptativo a su entorno al acoplar sensores de deflexión.

6. RECONOCIMIENTOS

El financiamiento y el apoyo para este trabajo son proporcionados por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, el Departamento de Ingeniería Eléctrica y el Instituto de Investigación de Ingeniería. Así como el apoyo de los muchos miembros del Laboratorio ARCOS.

Me gustaría agradecer a la Universidad Técnica Nacional por el apoyo brindado durante todo el desarrollo del proyecto, sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible.

REFERENCIAS

- Calvo, M. R., & Ugalde, F. R. (2018, July). Comparative Efficiency Study of Two Proposed Designs Tested in Water and Air Cooling Conditions for a High Power Humanoid Robot Hollow Joint. In *2018 IEEE International Work Conference on Bioinspired Intelligence (IWOBI)* (pp. 1-9). IEEE.
- Godler, I., Hashimoto, M., Horiuchi, M., & Ninomiya, T. (2001). Performance of gain-tuned harmonic drive torque sensor under load and speed conditions. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 6(2), 155-160.
- Grossi, R. O., & Aranda, A. (1993). Formulación variacional de problemas de contorno para vigas Timoshenko. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 9(3), 313-324.
- Hirose, S., & Yoneda, K. (1990, May). Development of optical six-axial force sensor and its signal calibration considering nonlinear interference. In *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 46-53). IEEE.
- Hirzinger, G., Albu-Schaffer, A., Hahnle, M., Schaefer, I., & Sporer, N. (2001, May). On a new generation of torque controlled light-weight robots. In *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)* (Vol. 4, pp. 3356-3363). IEEE.
- Jamali, N., Maggiali, M., Giovannini, F., Metta, G., & Natale, L. (2015, September). A new design of a fingertip for the iCub hand. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 2705-2710). IEEE.
- Sakaki, T., & Iwakane, T. (1992). Impedance control of a manipulator using torque-controlled lightweight actuators. *IEEE transactions on industry applications*, 28(6), 1399-1405.
- Wu, C. H., & Paul, R. P. (1980, December). Manipulator compliance based on joint torque control. In *1980 19th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes* (pp. 88-94). IEEE.