

Diseño de Transmisión Armónica para brazo robótico impreso en 3D

Yolanda Eugenia Márquez Gardea, Rafael Sandoval Rodríguez,
Nallely Chávez Payán

Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua
Ave. Tecnológico #2909 Col. 10 de mayo
C.P. 31310, Chihuahua, Chih.
yolanda.mg, rafael.sr@chihuahua.tecnm.mx

Resumen. En este trabajo se describe el procedimiento seguido para diseñar una Transmisión Armónica adecuada para usar en un brazo robótico impreso en 3D. Se revisa el correcto acoplamiento mecánico de sus componentes mediante un ensamble virtual usando Solidworks®. Y se realizan pruebas de torque para determinar su eficiencia.

Índice de Términos - Transmisión Armónica, impresión 3D, brazo robótico.

I. INTRODUCCIÓN

En aplicaciones de control de movimiento es muy común el uso de motores eléctricos y cajas de engranes con el propósito de disminuir la velocidad de giro del eje conducido (eje de la pieza) respecto a la velocidad de giro del eje conductor (eje del motor), y a su vez se eleva en la misma proporción el torque que aplica el motor. En la figura 1 se ilustra un sistema tradicional de dos engranes. Como se puede apreciar la relación entre los diámetros de los engranes determina el aumento o disminución de la velocidad de la entrada hacia la salida. Para el caso de disminuir la velocidad y aumentar el torque, el diámetro del engrane de entrada debe ser menor que el diámetro del engrane de salida, en la proporción que se desee disminuir la velocidad y aumentar el torque. Por ejemplo, si se desea una relación de Transmisión de 1:49, se necesitaría un engrane de entrada de 1cm de diámetro, y un engrane de salida de 49 cm de diámetro.

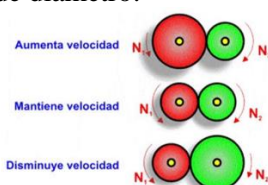


Fig. 1. Relaciones básicas de transmisión.

Usar un sistema tradicional de dos engranes para aumentar el torque del motor de una articulación de un brazo robótico, implicaría usar engranes de diámetros muy grandes para lograr un torque funcional, ya que normalmente las velocidades de los motores de CD se encuentran en el orden de los miles de revoluciones por minuto, o realizar la transmisión en varias etapas, lo que conlleva un aumento en el “backlash” por las múltiples etapas de engranes.

Los brazos de robot modernos se basan en el principio de engranaje de onda de deformación para lograr una relación de reducción extremadamente alta en un espacio muy compacto y liviano.

La Transmisión Armónica, utiliza un principio operativo único que se basa en la mecánica elástica de los metales. Sus mayores beneficios son las características de cero “backlash” o holgura, distancia entre la parte posterior de un diente y la parte frontal del siguiente diente en contacto, y el ahorro de peso y espacio en comparación con otros engranajes, ya que esta transmisión consta de solo tres partes básicas [2,3,6]. Además, entre sus beneficios se encuentran también un alto par, excelente precisión posicional y repetibilidad. Entonces, la pregunta de investigación o hipótesis es la siguiente ¿Puede una Transmisión Armónica impresa en 3D funcionar correcta y satisfactoriamente aplicada en un brazo robótico con propósitos didácticos, cuyas partes también están impresas en 3D?

En el presente trabajo se describe el desarrollo de una Transmisión Armónica, consta de la impresión de partes mecánicas modeladas en Solidworks® y generadas por una impresora 3D, aprovechando la elasticidad que tienen los materiales de impresión 3D para lograr el efecto de deformación en los engranajes, tal como sucede en una

transmisión metálica. Las piezas se ensamblan virtual y físicamente para después ser actuadas con un motor eléctrico a pasos, para probar su funcionamiento y determinar la eficiencia de la transmisión.

II. DESARROLLO

A. Componentes básicos de un accionamiento armónico.

Un accionamiento armónico o transmisión de ondas se compone de tres elementos básicos: un generador de ondas, una rueda elástica con dientes exteriores y un anillo circular con dientes interiores [4].

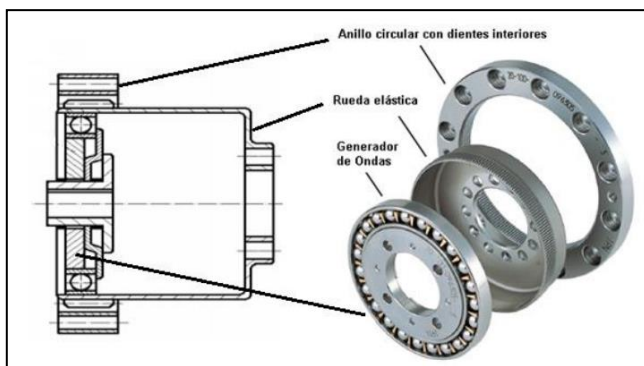


Fig. 2. Componentes de una Transmisión Armónica.

1. Generador de Ondas

El generador de ondas es el elemento de entrada de la transmisión, se acopla a un servomotor. El generador de ondas es un montaje de un rodamiento y un disco de acero. La superficie externa del generador de ondas tiene una forma elíptica y se elabora con maquinado de alta precisión para determinadas especificaciones. Alrededor de este disco de acero se coloca mediante prensado un rodamiento de bolas especialmente diseñado, haciendo que el cojinete se ajuste a la misma forma elíptica que tiene el disco generador de la onda. En otras palabras, el generador de ondas es un componente que tiene pequeños balines incorporados a la circunferencia externa de la leva elíptica. La pista interior de los cojinetes se fija a la leva mientras que la pista externa provoca la deformación en la rueda elástica a través de los rodamientos de balines.

2. Rueda Elástica

La rueda elástica es un anillo de metal en forma cilíndrica con paredes finas y dentado exterior, lo que le permite deformarse por la acción del generador de ondas en su interior. A la parte superior del cilindro se le denomina diafragma, el cual se acopla al eje de salida. El pequeño

espesor de la pared con relación al gran diámetro del cilindro permite que este se deforme radialmente, manteniendo su rigidez torsional. Aunque la rueda elástica se flexiona durante la operación normal, no existen riesgos de fatiga de esta. Las tensiones que surgen están muy por debajo del límite de resistencia del material. Así, la rueda flexible alcanzará vida infinita cuando se usen los materiales que garanticen las propiedades deseadas según los catálogos.

3. Anillo Circular con dientes interiores

Como su nombre lo indica es un anillo de acero con dientes interiores. Generalmente este anillo tiene dos dientes más que la rueda elástica y se fija a una carcasa.

B. Diseño del Sistema de Engranaje de la Transmisión Armónica.

Con el diseño de la Transmisión Armónica se busca obtener una relación de transmisión de 1:49, esto significa que teóricamente podremos aumentar 49 veces el torque del motor que se utilice.

Mediante la siguiente fórmula podemos calcular:

$$r = \frac{\text{dientes del engrane flexible} - \text{dientes del engrane circular externo}}{\text{dientes del engrane flexible}} \quad (1)$$

Normalmente para este tipo de transmisiones siempre se usa una diferencia de dos dientes entre el engrane flexible y el engrane circular externo.

Entonces, de acuerdo con la fórmula para calcular la relación de transmisión tenemos que:

$$r = \frac{100 - 98}{98} = \frac{2}{98} = \frac{1}{49} \quad (2)$$

Por lo que el engrane circular se debe diseñar con 100 dientes (Fig. 3) y el flexible con 98 dientes (Fig. 4) para aumentar la relación de transmisión de 1 a 49.

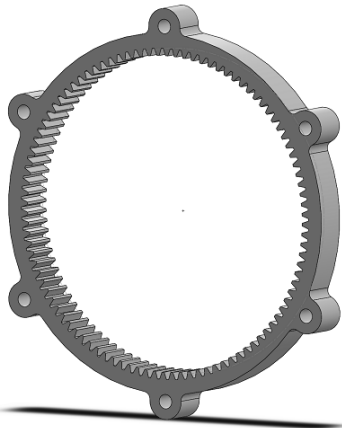


Fig. 3. Engrane circular externo.

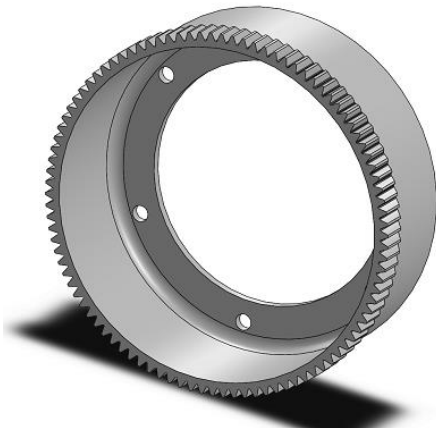


Fig. 4. Engrane flexible.

C. Cálculo de parámetros para el diseño de los engranes del Sistema Armónico.

Para calcular los parámetros para el diseño de los engranes del sistema se analizaron los siguientes conceptos [5]:

Circunferencia primitiva:

Es aquella circunferencia según la cual se realiza la tangencia teórica del engranaje (Fig. 5).



Fig. 5. Circunferencia primitiva.

Diámetro primitivo (D_p):

Es el diámetro correspondiente a la circunferencia primitiva (Fig.6).

$$D_p = m * z \quad (3)$$

Número de dientes (z):

Cantidad de dientes alrededor de la circunferencia del engrane.

$$z = D_p / m \quad (4)$$

Módulo (m):

Es el cociente que resulta de dividir el diámetro primitivo, expresado en milímetros, entre el número de dientes de la rueda.

$$m = D_p / z = P / \pi = D_e / z + 2 \quad (5)$$

Diámetro exterior (D_e):

También denominado diámetro total, es el correspondiente a la circunferencia en la cual está inscrita la rueda dentada.

$$D_e = D_p + 2hc = D_p + 2m \quad (6)$$

Diámetro interior (D_i):

Conocido también como diámetro de fondo, es el correspondiente a la circunferencia que limita interiormente a los dientes.

$$D_i = D_p - 2hp = D_p - 2.5m \quad (7)$$

Paso circular (P):

Es la distancia entre dos puntos homólogos de dos dientes consecutivos, medida sobre la circunferencia primitiva. Para que dos ruedas engranen ambas tienen que tener el mismo paso circular.

$$P = \pi * D_p / z = \pi * m \quad (8)$$

Altura del diente (h):
Medida desde el fondo del diente a la cresta.

$$h = 2.25 * m \tag{9}$$

Altura de la cabeza del diente (hc):
Medida desde la circunferencia primitiva a la cresta del diente.

$$hc = m \tag{10}$$

Altura del pie del diente (hp):
Medida desde el fondo del diente a la circunferencia primitiva.

$$hp = 1.25 * m \tag{11}$$

Espesor del diente (e):
Medido sobre la circunferencia primitiva. En la mayoría de los casos se utiliza la siguiente formula:

$$e = 0.5 * P \tag{12}$$

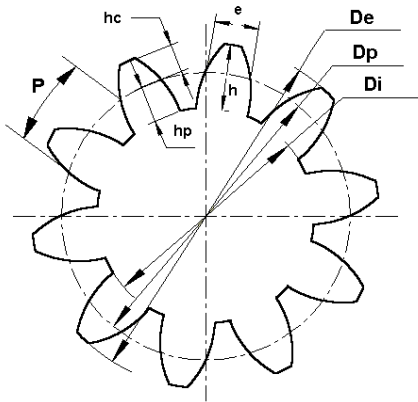


Fig. 6. Construcción de un engrane.

De acuerdo con las fórmulas anteriores podemos calcular:

Tabla. 1. Cálculo de parámetros para diseño de engrane flexible de 98 dientes.

Engrane recto.			
Número de Dientes	98	=	Diámetro Primitivo / Módulo
Módulo	0,9	=	Diámetro Primitivo / Número de Dientes.
Diámetro Externo		=	Diámetro Primitivo + 2*(Módulo)
Diámetro Primitivo	88,2	=	Número de Dientes * Módulo.
Diámetro Interno		=	Diámetro Primitivo - (2,5 * Módulo)
Espesor del Diente		=	19/40 * (Pi * Módulo)
Ancho del Hueco		=	21/40 * (Pi * Módulo)
Paso circular		=	Pi * Módulo
Radio de entalle		=	(Pi * Módulo) / 12
Ángulo entre Dientes		=	360 / Número de Dientes
Ángulo de presión	20°		

Tabla. 2. Cálculo de parámetros para diseño de engrane externo de 100 dientes.

Engrane recto.			
Número de Dientes	100	=	Diámetro Primitivo / Módulo
Módulo	0,9	=	Diámetro Primitivo / Número de Dientes.
Diámetro Externo		=	Diámetro Primitivo + 2*(Módulo)
Diámetro Primitivo	90	=	Número de Dientes * Módulo.
Diámetro Interno		=	Diámetro Primitivo - (2,5 * Módulo)
Espesor del Diente		=	19/40 * (Pi * Módulo)
Ancho del Hueco		=	21/40 * (Pi * Módulo)
Paso circular		=	Pi * Módulo
Radio de entalle		=	(Pi * Módulo) / 12
Ángulo entre Dientes		=	360 / Número de Dientes
Ángulo de presión	20°		

D. Modelado de engranes en Solidworks®.

Una vez calculados los parámetros para el diseño de los engranes de la Transmisión Armónica, se modelaron en Solidworks®. En las siguientes figuras se pueden observar los diámetros correspondientes a cada engrane, así como la matriz de operación para construirlos. Cabe mencionar que el engrane flexible se debe construir sobre la pared delgada de un cilindro, esto permitirá que el generador de onda lo deforme al girar dentro de él (Fig. 7).

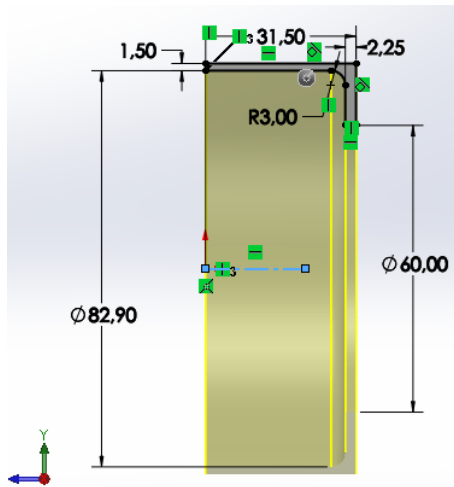


Fig. 7. Operación de revolución para construir el cilindro del engrane flexible de 98 dientes.

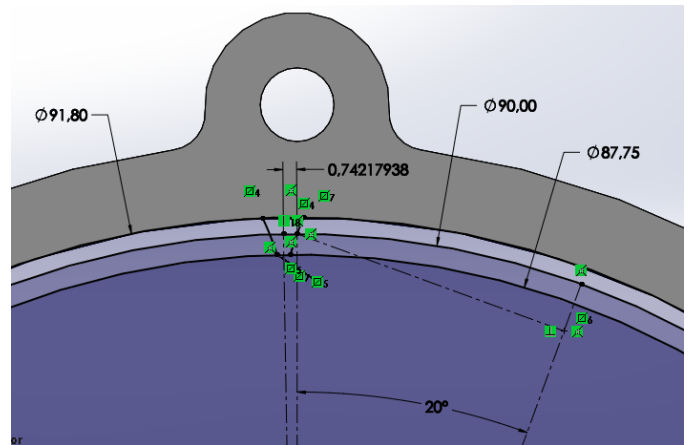


Fig. 10. Croquis de diseño de engrane externo de 100 dientes.

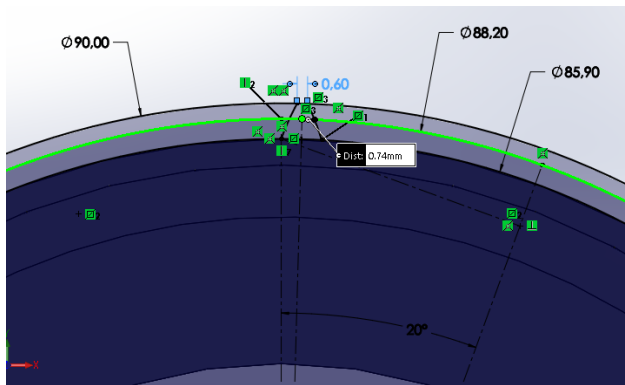


Fig. 8. Croquis de diseño de engrane flexible de 98 dientes.

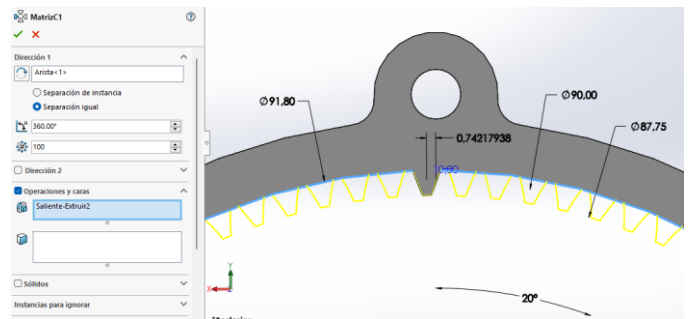


Fig. 11. Matriz de operación de engrane externo de 100 dientes.

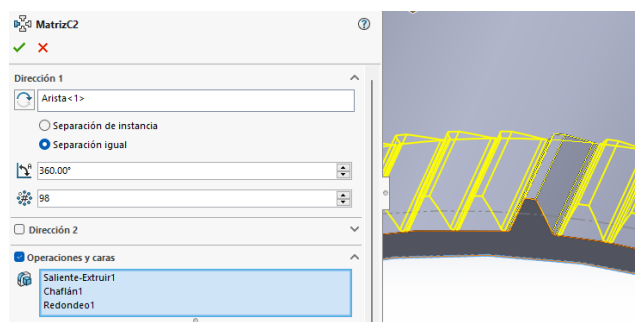


Fig. 9. Matriz de operación de engrane flexible de 98 dientes.

El tercer componente básico de una Transmisión Armónica es el generador de ondas elíptico. En el primer diseño se usaron 10 rodamientos, como se puede apreciar en las Figuras 12 y 15, después se modificó el diseño para dejar solamente dos de ellos en los extremos del diámetro mayor de la elipse, ver Figuras 13 y 14, ya que son los únicos que hacen contacto con el engrane flexible y de esta manera logramos tener un generador más ligero e igual de eficiente.

Al girar la elipse dentro del engrane flexible, los rodamientos le aplican presión y lo deforman, haciendo que sus dientes de engrane avancen lentamente sobre los dientes del engrane circular. En 360° se logra un avance de dos dientes solamente, lo cual es la diferencia entre ambos engranes, consiguiendo de esta manera la reducción de velocidad en la salida y el aumento de torque.

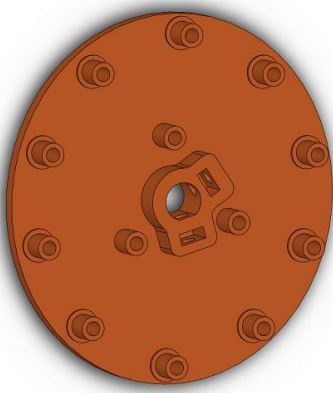


Fig. 12. Base del generador de onda en forma elíptica para 10 rodamientos.

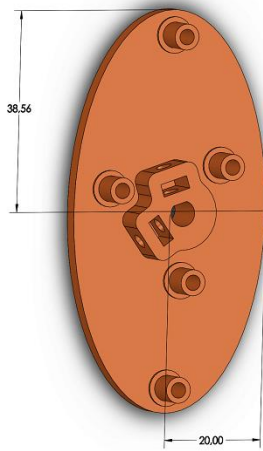


Fig. 13. Base del generador de onda en forma elíptica para dos rodamientos.

Para sostener los rodamientos en la base del generador elíptico, se diseñó una tapa que se une mediante tornillos que atraviesan de lado a lado ambas piezas y son sujetados con tuercas.

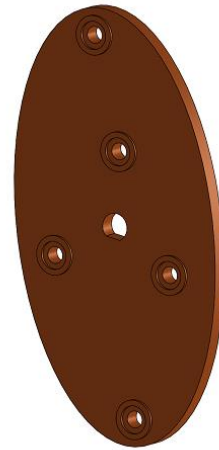


Fig. 14. Tapa del generador de onda en forma elíptica.

E. Impresión 3D de los componentes de la Transmisión Armónica.

Además de los 3 componentes básicos de la Transmisión Armónica se imprimieron otras piezas necesarias para realizar el acoplamiento en la salida y una carcasa para montar los engranes (Fig. 15), también se emplearon tornillos y tuercas para ensamblar las piezas.



Fig. 15. Piezas de la Transmisión Armónica.



Fig. 16. Transmisión Armónica ensamblada.

F. Prueba de eficiencia de la Transmisión Armónica.

Para realizar la medición experimental del torque del ensamble de la Transmisión Armónica y el motor a pasos se construyó un soporte para fijar el ensamble, se colocó una barra de madera fijándola en un extremo al ensamble, se colocaron tornillos cada 5cm para colgar el peso de prueba, se utilizó como peso de prueba un disco de 2.5lb o 1.1kg, la Figura 17 ilustra el arreglo experimental para medir el torque que tiene que desarrollar el ensamble para levantar o mover el peso de prueba.

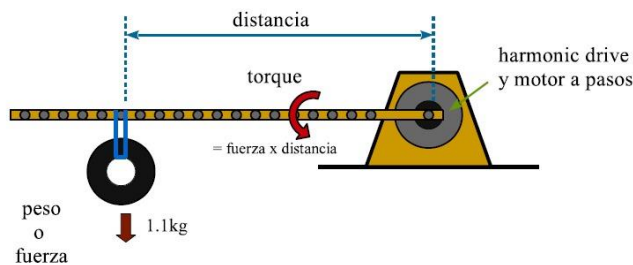


Fig. 17. Soporte experimental para medición de torque.

El ejercicio consistió en ir colocando el peso de prueba a cada 5cm de distancia del ensamble, es decir, ir variando la distancia de 5cm en 5cm. El movimiento se iniciaba con la barra a 45 grados debajo de la horizontal y terminaba 45 grados por encima de la horizontal, como se ilustra en la Figura 18.

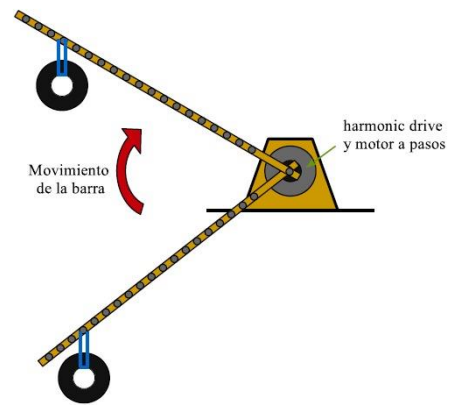


Fig. 18. Movimiento de la barra para medición de torque.

Con la Transmisión Armónica ensamblada se comenzaron a hacer pruebas de torque usando un motor NEMA 17, el cual tiene un torque de 4kg/cm, y conectado a la Transmisión Armónica (Fig. 19) se puede obtener teóricamente un torque de 49×4 kg/cm, es decir 196 kg/cm, o sea que se podrían levantar casi 10 kg a 20cms de distancia.

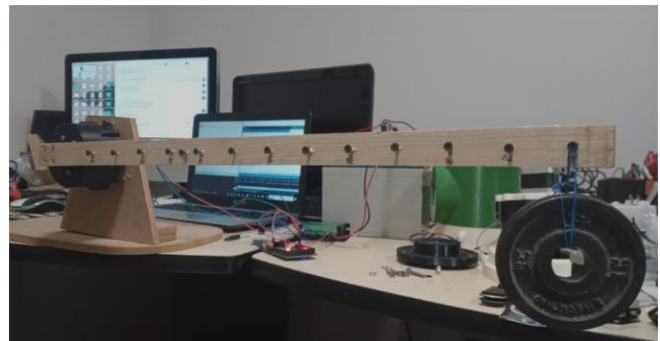


Fig. 19. Prueba de torque.

III. RESULTADOS

Se logró completar el ensamble virtual de todos los componentes de la Transmisión Armónica (Fig. 20), lo que permitió una mejor visualización y comprensión del funcionamiento de este tipo de transmisiones, así como verificar las tolerancias necesarias entre sus componentes.

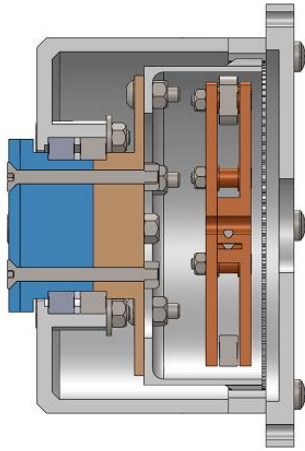


Fig. 20. Ensamble virtual de la Transmisión Armónica.

Con el equipo experimental se pudo levantar el peso de prueba original (1.1kg) a una distancia de 70cm, pero la Transmisión Armónica aún podía desarrollar más torque, por lo que se cambió el peso de prueba a dos discos de 1.1kg (2.2kg). En esta ocasión se pudo levantar el peso de prueba sólo a 45cm, lo que equivale a levantar un peso de 5kg a 20cm de distancia aproximadamente.

Con las pruebas de torque realizadas, se observó que en realidad el sistema de Transmisión Armónica impreso en 3D sólo alcanzó una eficiencia del 50% en el aumento del torque. Se presume que esto es debido a que buena parte del torque del motor se consume por la fricción para mover al generador elíptico que produce la deformación del engrane flexible. No se encontró información referente a la eficiencia en aumento de torque de las transmisiones metálicas. Este tipo de pruebas de torque no se reportan en las referencias revisadas [1-6].

IV. CONCLUSIONES

La eficiencia del 50% lograda representa un aumento de 25 veces el torque del motor para una transmisión de 1:49. Sin embargo, la reducción de velocidad o desplazamiento si es 49 veces menor. Es decir, el paso angular original del motor de 1.8° es ahora de $.0373^\circ$ /paso en la flecha de salida de la transmisión, lo que nos permite tener movimientos con muy buena resolución en la articulación del brazo robótico en donde se coloque esta transmisión. Debido a los resultados obtenidos del diseño de esta transmisión se decidió utilizarla para la construcción de un brazo robótico de 6 grados de libertad con sus piezas impresas en 3D, que puede ser usado como prototipo didáctico en la educación superior. La única recomendación es usar un motor más grande o con mayor

torque en el hombro, que es la articulación que soportaría el peso del brazo en sí, más el peso que se quiera cargar con él, para el hombro un motor Nema 23 sería más adecuado, el resto de las articulaciones pueden usar motores Nema 17.

Gracias a la tecnología de la impresión 3D se pueden crear herramientas complejas a muy bajo costo, empleando diferentes materiales según sean las necesidades en cada prototipo. Lo anterior aunado a las ventajas del modelado en 3D, como lo son la posibilidad de analizar con precisión las dimensiones de las piezas creadas para verificar todos sus detalles y la posibilidad de ensamblar virtualmente las mismas para corroborar la intención del diseño, nos permite personalizar piezas sin necesidad de moldes y reducir el tiempo de desarrollo de cualquier prototipo.

REFERENCIAS

- [1] C. Cardona, "Part Consolidation for Additive Manufacturing Demonstrated in the Design of a 3D-Printed Harmonic Drive", *Indiana University Journal of Undergraduate Research*, Vol.1, 2015, pp. 45-49.
- [2] H. Dong, K.-L. Ting, D. Wang, "Kinematic Fundamentals of Planar Harmonic Drives", *Journal of Mechanical Design*, ASME, Vol. 133, Jan. 2011.
- [3] H. Jia, J. Li, G. Xiang, J. Wang, K. Xiao, Y. Han, "Modeling and analysis of pure kinematic error in harmonic drive", *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, 2020, doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104122
- [4] J. L. Moya, et al., "Geometría y Cinemática de las Transmisiones de Onda o Harmonic Drives", VIII Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica, 2014.
- [5] O. D. Vasquez, Y. E. Márquez, R. Sandoval, "Impresión-3D y control de brazo robótico como proyecto integrador en la Educación Superior", *Revista Científica SIMIYÁ*, 2018, pp. 14-32.
- [6] T. Trang, T. Pham, Q. Yin, Q. Wang, Y. Hu and W. Li, "Design Harmonic Drive for Application in Robot Joint," *2022 International Conference on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE)*, Xi'an, China, 2022, pp. 106-113, doi: 10.1109/ICMEE56406.2022.10093325.