



MODELADO E IMPRESIÓN 3D DE ENGRANAJES DE TRANSMISIÓN ROTACIÓN-HELICOIDAL

J. MENESES, J.C. GARCÍA-PRADA, C. CASTEJÓN, H. RUBIO, E. CORRAL, O. PRECIADO

Universidad Carlos III de Madrid
Departamento de Ingeniería Mecánica
Avda. de la Universidad, 30 - 28911 Leganés, Madrid, España

(Recibido 30 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)

Resumen – En este trabajo se presenta una macro desarrollada en “Visual Studio” mediante la cual se modela virtualmente en “Solid Edge” una pareja de engranajes de transmisión rotación-helicoidal; es decir, cuyo elemento conductor, al girar uniformemente, produce un determinado movimiento helicoidal (combinación de rotación y traslación uniformes) del elemento conducido. Se ha desarrollado también una interfaz cuyas entradas son los parámetros cinemáticos de dicho par de transmisión, a saber, la velocidad angular de la rotación conductora, las velocidades lineal y angular del movimiento helicoidal conducido, y la distancia (o ángulo) entre los correspondientes ejes. Esta macro ha resultado de gran ayuda para generar diferentes parejas de transmisión rotación-helicoidal y posibilita posteriores análisis paramétricos de sensibilidad.

Palabras clave – Transmisión rotación-helicoidal, engranajes, CAD macro.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente el movimiento helicoidal se ha conseguido por la acción conjunta de un actuador rotativo y otro actuador lineal, o bien mediante un par cinemático helicoidal de orden inferior, en el que la fricción no es nada despreciable, como el descrito en la patente de fonógrafo de Thomas A. Edison [1]. En la patente “Dispositivo automático para biopsias cutáneas” [2] se describe un mecanismo para generar un movimiento helicoidal con un único actuador, pero el par cinemático en el que se basa no es totalmente desmodrómico, existiendo cierto deslizamiento entre los eslabones involucrados. Otro mecanismo para generar un movimiento helicoidal es el que se propone en la patente “Adjustable angle helix generator for edge and radial relief sharpening” [3]. En opinión de los autores, esta transmisión tiene la desventaja de estar limitada a pares relativamente bajos, ya que la proporciona el contacto puntual de rodadura por fricción entre dos cilindros no paralelos.

Como alternativa a estos métodos de transmisión, en las publicaciones [4] y [5], J. Meneses *et al.* han presentado el par cinemático superior de rodadura para transmitir un movimiento de rotación en otro helicoidal, demostrando la existencia del correspondiente par de superficies conjugadas primitivas de rodadura: un hiperboloide reglado, como elemento en movimiento de rotación pura; y un helicoide reglado, como elemento en movimiento helicoidal. Así, el movimiento rotatorio del hiperboloide induce, por rodadura pura, un movimiento de rotación-traslación del helicoide. En las publicaciones citadas se han calculado los parámetros geométricos de ambas superficies a partir de los parámetros cinemáticos del par, a saber, las dos velocidades de rotación (del hiperboloide, ω_1 , y del helicoide, ω_2), la velocidad lineal del helicoide, v , y el ángulo entre los correspondientes ejes, β (o alternativamente, la distancia entre ellos, d). También se ha desarrollado el código “R-H Pitch Surface Generator” en MatLab para obtener la pareja de superficies primitivas, para valores cualesquiera de los citados parámetros cinemáticos.

En la Fig. 1, se muestran las superficies primitivas para una transmisión rotación-helicoidal por rodadura, así como los parámetros cinemáticos y las posiciones del eje de rotación, del eje helicoidal y de la generatriz de contacto.

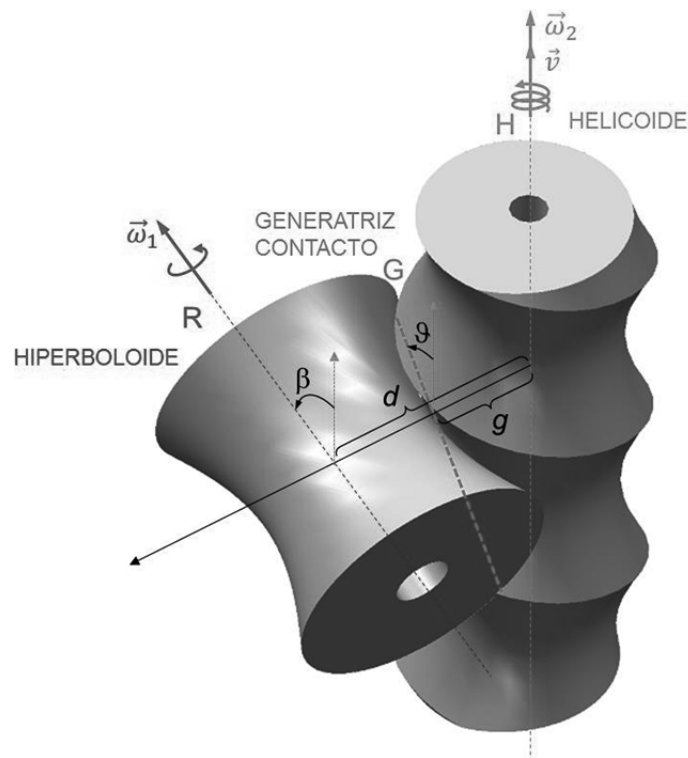


Fig. 1. Superficies primitivas para la transmisión rotación-helicoidal. Posiciones de los ejes de rotación, helicoidal y generatriz de contacto.

Para llevar a la práctica el par de transmisión, se proponen engranajes cuyo dentado conjugado se puede realizar virtualmente con un programa de diseño asistido por computador, mediante el uso de operaciones booleanas, combinadas con los movimientos relativos de los cuerpos involucrados. Pero no se disponía hasta la fecha, de una herramienta automática para llevarlo a cabo.

En este trabajo se presenta la macro “R-H Gear Generator”, programada en Visual Studio para modelar automáticamente los dos engranajes en Solid Edge. Los parámetros cinemáticos del par rotación-helicoidal son introducidos por el usuario, además del número de dientes del hiperboloide. La macro calcula primeramente la geometría y posición relativa de las superficies primitivas. A continuación modela el hiperboloide dentado a partir de dos curvas de dentado de evolvente situadas en planos paralelos, y una recta generatriz con la misma inclinación que la que genera la correspondiente superficie primitiva. Finalmente realiza el dentado conjugado del helicoides (tallado virtual) mediante sucesivas operaciones booleanas, en las que se va sustrayendo de un cilindro inicial, la intersección con el hiperboloide ya dentado; y de forma que entre dos sustracciones consecutivas se aplican los correspondientes incrementos de posición relativa que define la cinemática del par. Con esta herramienta, mediante un número suficientemente grande de iteraciones, se puede alcanzar la precisión necesaria para que la transmisión rotación-helicoidal por engranajes resulte muy suave, sin apenas holguras y con alta reversibilidad. De hecho, estas cualidades quedarían limitadas más bien por la precisión del sistema de impresión que por el proceso de modelado virtual.

2. DESCRIPCIÓN DE LA MACRO

La estructura de la macro “R-H Gear Generator” se esquematiza en la Fig. 2.

La macro calcula primeramente la geometría del *hiperboloide primitivo*, que viene dada por el diámetro de las bases (dos circunferencias iguales en sendos planos paralelos), la altura del hiperboloide o distancia entre dichas bases, y el ángulo de inclinación de la generatriz (una línea recta) respecto al eje del hiperboloide. Para ello se utilizan las expresiones de la tabla 1, deducidas en las referencias [4] y [5].

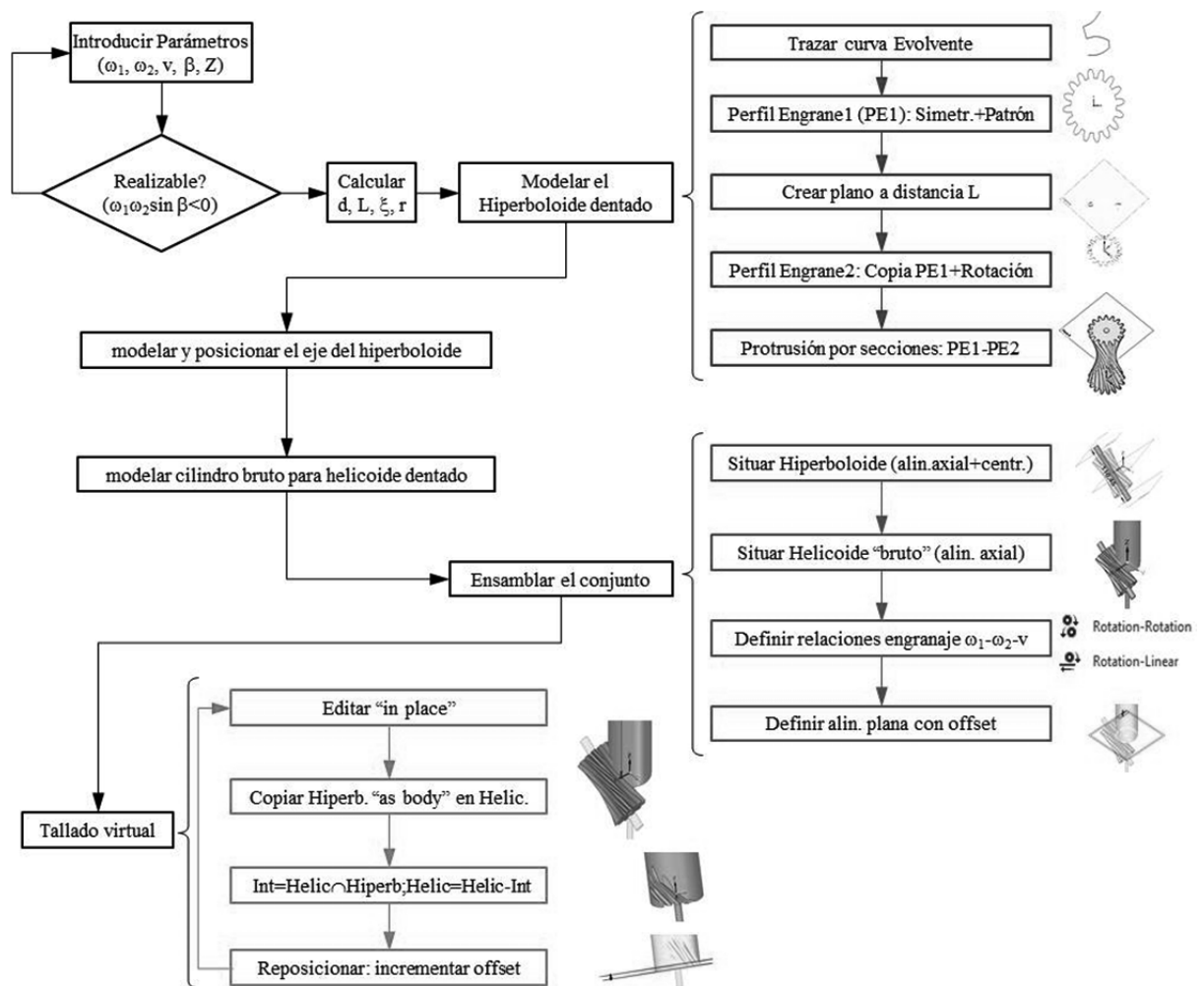


Fig. 2. Esquema de la macro “R-H Gear Generator”.

Tabla 1. Parámetros dependientes (de ω_1 , ω_2 , v y β) y las expresiones para calcularlos.

| Descripción del parámetro | Expresión |
|---|--|
| Distancia ejes Rotación-Helicoidal | $d = \frac{v(\omega_1 \cos \beta - \omega_2)}{\omega_1 \omega_2 \sin \beta}$ |
| Distancia Generatriz contacto-eje Helicoidal | $g = \frac{v}{\omega_2 \tan \beta}$ |
| Inclinación Generatriz de contacto, ϑ | $\tan \vartheta = \frac{v}{d \omega_2}$ |
| Semilongitud Generatriz de contacto, l | $\frac{l \omega_2}{v} \sin \vartheta \tan \beta + \tan \left(\frac{l \omega_2}{v} \cos \vartheta \right) = 0$ |
| Altura Hiperboloide | $L = 2l \cos(\beta - \vartheta)$ |
| Ángulo torsión entre perfiles dentados, ξ | $\tan \frac{\xi}{2} = \frac{l \omega_1}{2v} \sin \beta \tan(\beta - \vartheta)$ |
| Radio primitivo de las bases Hiperboloide | $r = -\frac{2v}{\omega_1 \xi \sin \beta}$ |
| Condición para contacto exterior Hiper-Helic | $\omega_1 \omega_2 \sin \beta < 0$ |

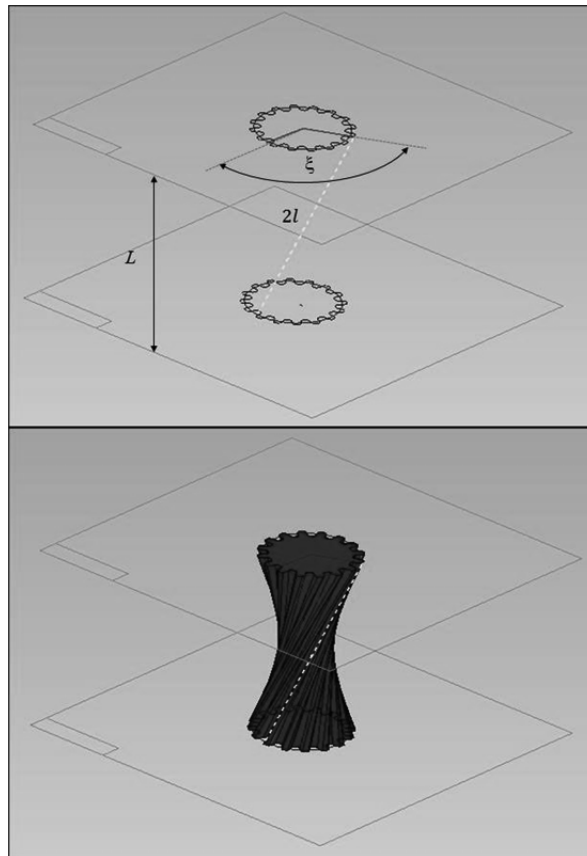


Fig. 3. Parámetros geométricos del hiperboloide dentado y su generación virtual con Solid Edge.

Si se cumple la condición de contacto exterior (de lo contrario la construcción de los engranajes de la transmisión es muy complicada o imposible), la macro procede al modelado del *hiperboloide dentado* en el entorno “pieza” de Solid Edge. Para ello utiliza la operación de protrusión por secciones (lofted protrusion), que genera un sólido limitado por las correspondientes secciones (en nuestro caso, las bases del hiperboloide dentado), y por la superficie reglada de generatriz recta que se apoya sobre ambos perfiles. Concretamente, sobre una de las circunferencias primitivas del hiperboloide se crea un perfil de dientes de evolvente normalizado correspondiente al número de dientes, Z , fijado por el usuario. Sobre la circunferencia de la otra base (situada en un plano paralelo a la distancia L) se traza el mismo perfil de dentado, pero girado respecto al anterior el ángulo de torsión, ξ , necesario para que la generatriz tome la inclinación adecuada. Finalmente se especifican los puntos que definen una generatriz recta entre los dos perfiles y se procede a la generación del sólido (ver Fig. 3)

Seguidamente la macro genera los ejes de revolución del hiperboloide y de revolución-traslación del helicoide, y los sitúa, en el entorno “conjunto” de Solid Edge, junto con el hiperboloide generado en el paso anterior. También genera un cilindro como cuerpo primitivo (sin tallar o “en bruto”) del helicoide.

Finalmente, se procede a realizar el tallado virtual del helicoide mediante sucesivas operaciones booleanas combinadas con pequeños desplazamientos finitos congruentes de los dos cuerpos. La secuencia se ilustra en la Fig. 4a. Consiste en sustraer, del cuerpo que está siendo tallado (futuro helicoide dentado), la interferencia entre éste y el hiperboloide dentado. Entre dos sustracciones consecutivas se aplica los incrementos de posición congruentes con la cinemática de la transmisión: dado un pequeño valor de Δt , el hiperboloide dentado gira el ángulo $\omega_1 \Delta t$, mientras que el helicoide gira el ángulo $\omega_2 \Delta t$ y se traslada la distancia $v \Delta t$. El bucle continua hasta que se ha tallado todo el helicoide. En el ejemplo mostrado, se emplearon unas 200 iteraciones entre las que el incremento de traslación del helicoide fue de $v \Delta t = 1$ mm (el correspondiente incremento de rotación, de $\omega_2 \Delta t = \pi/150$ rad; y el incremento de rotación del hiperboloide, de $\omega_1 \Delta t = \pi/30$ rad)

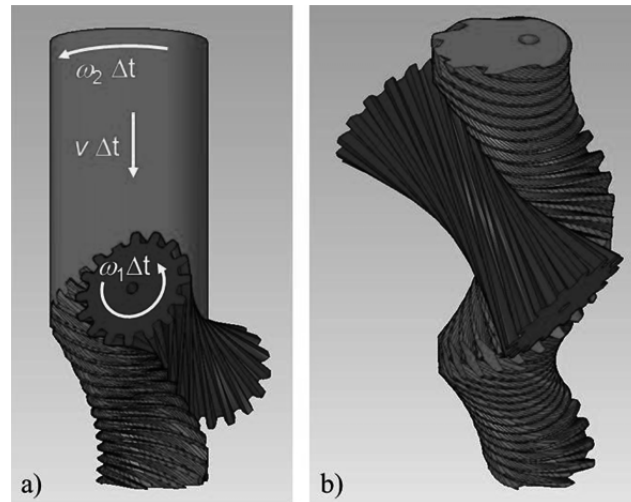


Fig. 4. Tallado virtual del helicoido.

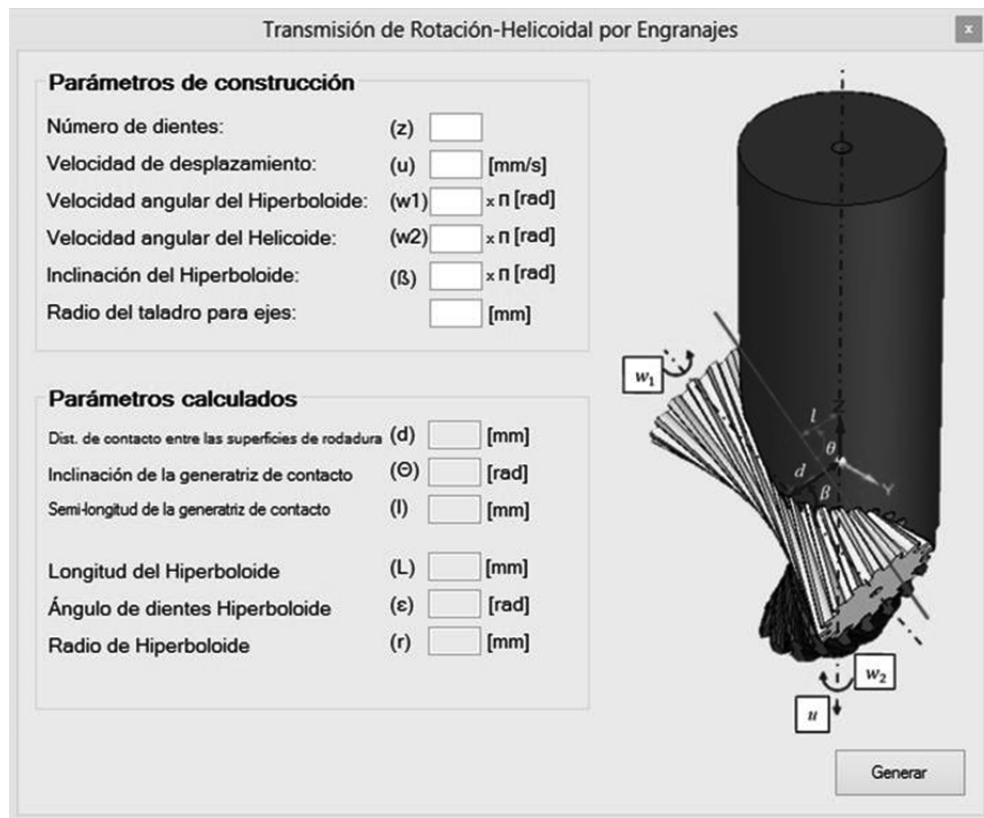


Fig. 5. Interfaz para introducir los parámetros de la transmisión y mostrar como salida los parámetros dependientes.

Para ejecutar la macro, se ha diseñado una interfaz en la que el usuario introduce los parámetros que definen la transmisión: el parámetro de dentado (número de dientes sobre el hiperboloide, Z); los ya citados parámetros cinemáticos (velocidad angular del movimiento de rotación pura, ω_1 ; y velocidades angular, ω_2 , y de desplazamiento, v , del movimiento helicoidal) y geométrico (ángulo entre los ejes, β); y adicionalmente el diámetro de los taladros axiales para el hiperboloide y el helicoido.

En la interfaz también se muestran los parámetros geométricos, calculados a partir de los de entrada, y que definen la geometría del hiperboloide (ver Fig. 5).

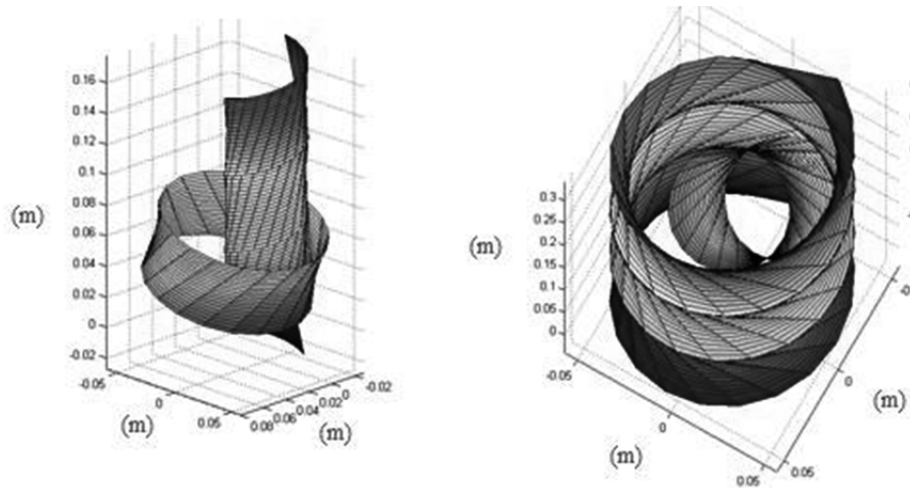


Fig. 6. Contacto interior. Izda.: helicoides interior al hiperboloide. Dcha.: hiperboloide interior al helicoides.

La única restricción que se impone a los parámetros de entrada es la que garantiza un contacto exterior entre las superficies primitivas. En la Fig. 6 se presentan las superficies primitivas correspondientes a dos transmisiones de “contacto interior”. En una de ellas, el helicoides es interior al hiperboloide (izda.); y en la otra, el hiperboloide es interior al helicoides (dcha.)

Una descripción más detallada de la macro, la interfaz y el correspondiente código, se encuentra en [6].

3. IMPRESIÓN 3D DEL HIPERBOLOIDE Y HELICOIDE DENTADOS

Utilizando una impresora 3D de uso personal (MakerBot Replicator 2) se han obtenido el hiperboloide dentado y el helicoides dentado. Estos engranajes han sido modelados mediante la macro desarrollada, tomando los parámetros de la tabla 2 como entradas.

Los dos elementos se imprimieron en material PLA, con sus respectivos ejes en posición vertical y sin necesidad de añadir columnas-soporte, como puede verse en la fotografía de la Fig.7.

Los soportes que fijan los dos engranajes en sus posiciones relativas de funcionamiento, también han sido modelados con Solid Edge y obtenidos con la misma impresora 3D. En la Fig. 8 se muestra una fotografía del conjunto montado.

Tabla 2. Parámetros de entrada para la transmisión rotación-helicoidal.

| Parámetro | Valor |
|---|----------------|
| Velocidad de rotación del hiperboloide ω_1 | 2π rad/s |
| Velocidad de rotación del helicoides ω_2 | $2\pi/5$ rad/s |
| Velocidad de deslizamiento del helicoides, v | 60 mm/s |
| Ángulo entre ejes, β | $-\pi/3$ rad |
| Número de dientes, Z | 16 |

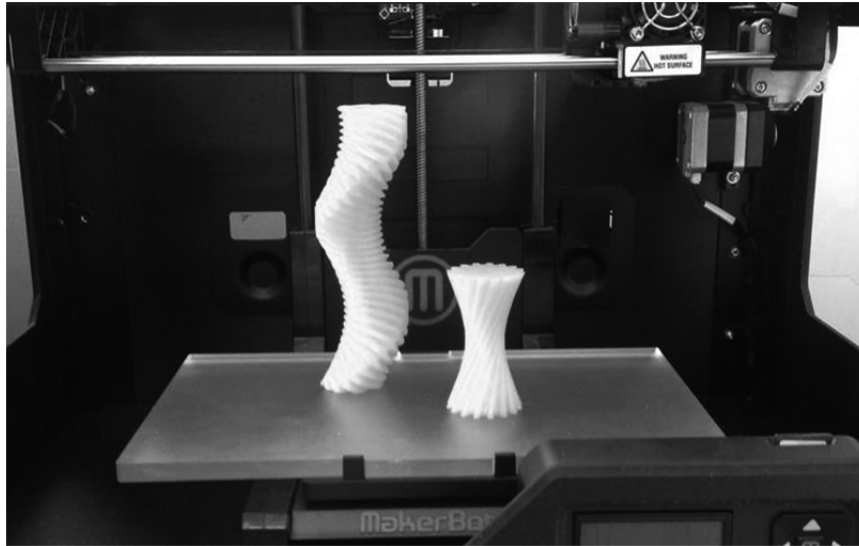


Fig. 7. Fotografía, tras la impresión, de los elementos de la transmisión rotación-helicoidal.



Fig. 8. Mecanismo de transmisión rotación-helicoidal con engranajes obtenidos por impresión 3D.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una macro denominada “R-H Gear Generator” para generar, de forma paramétrica y automáticamente, la pareja de engranajes de una transmisión rotación-helicoidal. La herramienta desarrollada es muy versátil y permitirá reducir el tiempo de diseño, modelado y fabricación aditiva de este tipo de engranajes.

Entre las ventajas de esta transmisión, se puede decir que es simple, compacta y robusta, de un grado de libertad, baja fricción y alta reversibilidad. Y tendría aplicaciones como en actuadores y posicionadores lineales de precisión, o como herramientas específicas de corte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por el Gobierno de España para la financiación de este trabajo a través del proyecto MAQ-STATUS DPI2015-69325-C2-1-R.

REFERENCIAS

- [1] Edison, T.A., "Phonograph or Speaking Machine". US Patent Office, No. 200,521 (1878)
- [2] Grillo, E., Vañó, S., Jaén, P., Castejón, C., Meneses, J., García-Prada, J.C., Rubio, H., Dispositivo Automático para Biopsias Cutáneas. Oficina Española de Patentes y Marcas, No. ES2537831 B1 (12.06.2015). International Class.: A61B10/02 (2006.01) (2015)
- [3] Harding, W., Adjustable Angle Helix Generator for Edge and Radial Relief Sharpening, United States Patent, No. 3,600,860 (1971)
- [4] Meneses, J., García-Prada, J.C., Castejón, C., Rubio, H., Corral, E., "A rolling-joint higher-kinematic pair for rotary-helical motion transformation", *14th World Congress in Mechanism and Machine Science, Taipei, Taiwan* (2015)
- [5] Meneses, J., García-Prada, J.C., Castejón, C., Rubio, H., Corral, E., "The kinematics of the rotary into helical gear transmission" *Mechanism and Machine Theory, No. 108*, Elsevier (2017)
- [6] Preciado, O., "Desarrollo de una macro en Solid Edge para el tallado virtual de un engranaje. Aplicación a los engranajes de transmisión Rotación-Helicoidal", Trabajo Fin de Máster (Máster Universitario en Mecánica Industrial), Universidad Carlos III de Madrid, Madrid (2017)

MODELING AND 3D PRINTING OF ROTARY INTO HELICAL TRANSMISSION GEARS

Abstract – In this work a macro developed in "Visual Studio" for virtually modeling a pair of rotary-helical transmission gears, is presented. In this transmission pair, the rotation of the driving element produces a certain helical movement (combination of rotation and translation) on the driven element. An interface has also been developed where the inputs are the kinematic parameters of the said transmission pair, namely, the angular velocity of the driving rotation, the linear and angular velocities of the driven helical movement, and the distance (or angle) between the corresponding axes. This macro is very helpful in generating the pair of gears for a required rotary-helical transmission, and will allow us to develop future parametric sensitivity analysis.

Keywords – Rotary-Helical transmission, Gears, CAD Macro.