

Diseño mecánico, manufactura y puesta en marcha de un sistema electromecánico para el embobinado de filamento de polietileno tereftalato

Mechanical design, manufacturing and commissioning of an electromechanical system for obtaining polyethylene terephthalate filament

Aldo Aguilar Gallegos ^a, Carlos E. Borja Soto ^b, Rodrigo Cruz Trejo ^c, Justo F. Montiel Hernández ^d, Yordi E. Rodríguez Domínguez ^e

Abstract:

A prototype of an electromechanical transmission system for winding polymeric filament was designed and manufactured. The prototype was developed to meet the requirements of a machine that extrudes 1.75 mm diameter recycled polyethylene terephthalate (PET) filament, which is used as a low-cost raw material for 3D printing. The system was designed using SolidWorks 2022 software. The design incorporated a DC motor with a shaft rotation speed of 97.2 rpm and a gear train output speed of 3.3 rpm. The system's operation was tested by powering the DC motor with a 12 V voltage. The output speed of the mechanical transmission was measured using a Shimpo DT-107-A digital tachometer. The gears for the mechanical transmission were manufactured using 3D printing. Calculations estimated the transmission output speed to be 3.344 rpm. Compared to the experimental results, there was a deviation of 0.144 rpm, representing a 4.3% difference. The design, manufacturing, and testing of the prototype were successfully completed, demonstrating that the proposed mechanical system met the requirements of this project. The mechanical transmission achieved the required angular speed for winding PET filament, as reported in the literature.

Keywords:

3D printing, polymer filament, mechanical design, gears, transmission

Resumen:

Fue diseñado y manufacturado un prototipo de un sistema de transmisión electromecánica para el embobinado de filamento polimérico. El prototipo se realizó para satisfacer las necesidades de una máquina generadora de filamento de polietileno tereftalato reciclado de 1.75 mm de diámetro; El cual es utilizado como materia prima de menor costo en la impresión de tres dimensiones. El sistema fue diseñado en el programa SolidWorks 2022, en el diseño fue considerada una velocidad de rotación del eje de un motor de corriente directa a 97.2 rpm y una velocidad de rotación a la salida de un tren de engranes a 3.3 rpm. El funcionamiento del sistema fue probado al alimentar el motor de corriente directa con un voltaje de 12 V. Las revoluciones de salida de la transmisión mecánica fueron medida con un tacómetro de la marca Shimpo modelo DT- 107-A. Los engranajes de la transmisión mecánica fueron obtenidos mediante impresión 3D. Fue estimado en los cálculos que la velocidad a la salida de la transmisión correspondería a 3.344 rpm; En comparación con los resultados experimentales, se obtuvo una variación de 0.144 rpm que equivale a 4.3%. El diseño, manufactura y puesta en marcha del prototipo fueron realizados de manera satisfactoria de acuerdo con el trabajo experimental para la obtención del sistema mecánico planteado en este proyecto. La transmisión mecánica cumplió con los parámetros de velocidad angular para el embobinado de filamento de PET de acuerdo con lo reportado en la literatura.

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0006-3668-7248>, Email: aldo8473aguilar@gmail.com

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0001-2907-7605>, Email: rodrigo_cruz@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México <https://orcid.org/0000-0001-6890-6069>, Email: justo_montiel@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0003-0268-2615>, Email: ronaldo.345fer.com@gmail.com

Palabras Clave:*Impresión 3D, filamento polimérico, diseño mecánico, engranes, transmisión***Introducción**

La impresión en tres dimensiones (3D) es una de las técnicas de manufactura aditiva, las cuales han sido empleadas en la industria para la obtención de piezas a partir de modelos digitales. Algunas de estas técnicas son el Modelado por Deposición Fundida (FDM), Estereolitografía (SLA) y Sinterizado Selectivo por Láser (SLS), entre otras. En la técnica FMD son usados filamentos termoplásticos para la obtención de piezas. En el caso de la técnica SLA, son usadas resinas fotosensibles que son curadas mediante láser ultravioleta. Por otra parte, la técnica FMD está basada en la sinterización de polvos mediante el calentamiento selectivo por láser. De acuerdo con las características del proceso o técnica, es el tipo y forma del material usado para consolidar piezas de alta precisión dimensional (Das, A., Gilmer, E. L., Biria, S., Bortner, M. J., 2021).

En general, la técnica FMD es implementada con impresoras 3D en donde el material procesado es un filamento que es fundido por un extrusor caliente y depositado por capas en un sustrato. El depósito del material en el sustrato es dirigido mediante sistemas de control numérico computarizado (CNC) por lo tanto, los movimientos de los mecanismos de este tipo de máquinas dependen del código de programación (código g) que es interpretado por el control digital de la impresora como instrucciones en código binario que hacen funcionar a los actuadores.

Las impresoras 3D basadas en la técnica FMD son ampliamente usadas en la industria. De acuerdo con Ulloa, J. (2025) los materiales usados al implementar la técnica de modelado FDM son del tipo polimérico, tales como el ácido poliláctico (PLA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), tereftalato de polietileno glicol (PETG), nylon, poliuretano termoplástico (TPU), elastómero termoplástico (TPE) y polietileno tereftalato (PET), entre otros.

De acuerdo con Gaibor Rivera et al. (2024), la manufactura de filamento de polietileno tereftalato por medio de trefilado en caliente requiere que el filamento sea embobinado en carretes; para ello es necesario que la velocidad de giro de estos al momento de embobinar el filamento sea de 2.5 a 3.5 revoluciones por minuto (rpm), para carretes con capacidad de contener 1 kg de filamento con dimensiones comerciales. Sin embargo, dicha velocidad de rotación debe ser ajustada en función de la temperatura del PET al ser extraído de la máquina trefiladora.

Por otra parte, en el diseño de maquinaria mecánica son usados programas de diseño asistido por computadora que permiten generar modelos precisos que, entre otras ventajas, permiten la visualización de modelos tridimensionales, optimizando los materiales a utilizar y la exportación de archivos para su posprocesamiento en maquinaria de control numérico.

El presente trabajo tiene como finalidad el diseño, manufactura y puesta en marcha de un prototipo de un sistema electromecánico para el embobinado de filamento polimérico con el uso de un tren de engranes rectos y un motor de corriente directa para uso continuo. Los engranes rectos son engranes que pueden generar ruido a altas velocidades, ya que el área de contacto entre los dientes es limitada al ancho del engrane y su manufactura es de baja complejidad. Por otra parte, los engranes helicoidales presentan bajas vibraciones a altas velocidades, tienen un área de contacto mayor entre sus dientes; la manufactura en estos engranes es sumamente compleja para equipos manuales. De acuerdo con Sotero (2019), el criterio de alta o baja velocidad de rotación para transmisiones mecánicas queda establecido la siguiente clasificación: una baja velocidad de rotación está establecida entre 1500 rpm y 2000 rpm y una alta velocidad de rotación entre 4000 rpm y 6000 rpm. El tren de engranes rectos fue manufacturado mediante impresión tridimensional en ácido poliláctico (PLA), el cual fue diseñado y manufacturado para generar una propuesta que pueda ser considerada para construcción de equipos que puedan ser implementados para el embobinado de filamento polimérico en carretes de 1 kg. Cabe mencionar que dicha propuesta abre la posibilidad de la implementación de mejoras en cuanto al uso de materiales con propiedades mecánicas superiores a las presentadas por el PLA.

Metodología

Fue diseñado un tren de engranes rectos con el programa informático SolidWorks versión 2022. Fue considerada en el diseño la velocidad del eje de un motor de corriente directa de 97.2 rpm y la velocidad de rotación a la salida del tren de engranes de 3.3 rpm. El uso de engranes rectos fue establecido para trabajar a bajas velocidades de rotación debido a que su manufactura tiene menor complejidad en comparación con la manufactura de los engranes helicoidales. En la Figura 1 se logra apreciar la geometría de los dientes y las dimensiones que se

utilizaron para los engranes rectos utilizados en la transmisión.

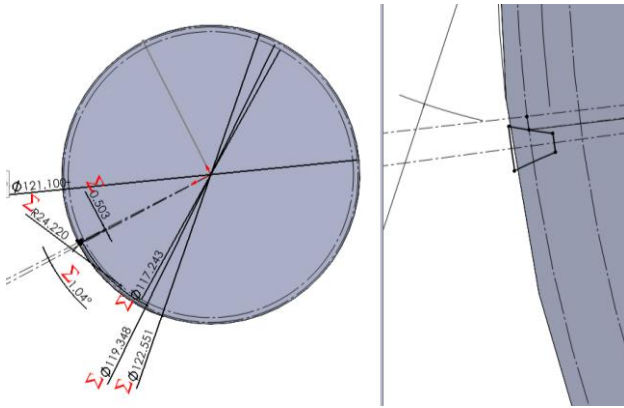


Figura 1. Dimensiones y geometría del tipo de diente utilizados para los engranes rectos del modelo según el sistema internacional de unidades (mm). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1 se muestra la geometría utilizada para los dientes de los engranes, los cuales fueron definidos con un módulo de 0.7 mm y un ángulo de presión definido por la AGMA (American Gear Manufacturers Association) de 14.5°. Con las dimensiones establecidas para los engranes, se continuó con la selección del mecanismo para generar la rotación, para el cual se utilizó un motor de corriente directa los cuales tiene la ventaja de poder controlar su velocidad mediante el uso de una fuente de corriente directa variable para hacer ajustes más precisos en la velocidad de rotación a la salida del tren de engranes en caso de ser requeridos en trabajos futuros. El diseño del tren de engranes rectos, así como su posicionamiento, fue generado al considerar las ecuaciones Ec. 1–3; las cuales han sido reportadas en la literatura por Benavides, C. F. (2020). El ancho de los engranes fue establecido en 5 mm.

Velocidad angular

$$\frac{\omega_1}{N_1} = \frac{\omega_2}{N_2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

ω , es la velocidad angular, rpm/min.

N , es el número de dientes.

Módulo

$$M = \frac{D_p}{N} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

N , es número de dientes.

D_p , es diámetro de paso, mm

Distancia entre centros

$$C = \frac{N_1 + N_2}{2P_d} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

C , es la distancia entre centros, Pulgadas.

N_1 , es el número de dientes del engrane 1.

N_2 , es el número de dientes del engrane 2.

P_d , es el paso diametral, número de dientes /pulgada.

Fue realizada una simulación numérica de la velocidad angular a partir de un estudio de movimiento de la transmisión mecánica para predecir su funcionamiento mediante el programa informático SolidWorks.

Con la finalidad de manufacturar los engranes rectos, el programa SolidWorks fue usado para generar archivos con extensión STL, los cuales fueron procesados en el programa informático Ultimaker Cura versión 5.2.2. Este último permitió obtener códigos tipo g para ser introducidos al control de una impresora Ender 3 modelo S1. Los engranes rectos fueron obtenidos mediante el procesamiento de filamento de PLA. La temperatura de trabajo para la impresión fue de 210°C en la boquilla y la temperatura de la cama a 60 °C. La boquilla utilizada para el depósito de material fue de 0.4 mm. Además, fue establecida una velocidad de impresión de 50 mm/s y un porcentaje de densificación de las piezas de 20%.

Con la finalidad de ensamblar los engranes rectos para dar lugar a la transmisión mecánica, fue obtenido un soporte a partir de una placa de aluminio de 78 mm x 100 mm y 15 mm de espesor.

El sistema de transmisión mecánico fue ensamblado mediante el uso de tornillos de 6.35 mm de diámetro por 63.5 mm de largo con tuercas hexagonales, arandelas planas y arandelas de presión.

El funcionamiento del sistema fue probado al alimentar el motor de corriente directa con un voltaje de 12 V. Las revoluciones de salida de la transmisión mecánica fueron medida con un tacómetro de la marca Shimp modelo DT-107-A.

Resultado

La Figura 2 muestra la configuración del sistema de transmisión mecánica que fue diseñado. El engrane a) que se encuentra ensamblado al eje del motor m) el cual transmite el movimiento a los engranes b), c) y d); para que finalmente se obtuviera una relación en revoluciones por minuto de 29.5. El engrane a) queda ensamblado al eje del motor y transmite el movimiento a los engranes b), c) y d). En la parte frontal del engrane d) queda ensamblado un adaptador e) para la sujeción del carrete. Los componentes h) y g) corresponden al soporte y adaptador para carrete. Los adaptadores tienen cuatro cuñas que permiten sujetar al carrete para que pueda transmitirse el movimiento rotacional del sistema de transmisión; por lo tanto, actúan como elementos de sujeción. En la Figura 2, también es posible observar el soporte f) que permite el ensamblaje del motor y los demás componentes del sistema.

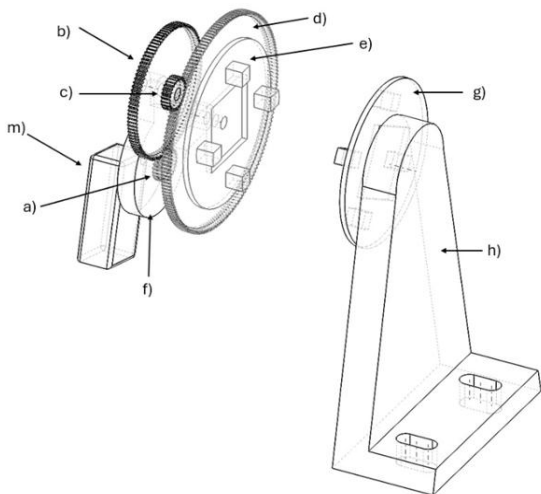


Figura 2. Configuración de un sistema de transmisión mecánica para embobinado de filamento polimérico. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 1 contiene los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones Ec. 1–3 para la estimación de velocidad angular, módulo y número de dientes para cada uno de los engranes indicados en la Figura 2. Los diámetros de paso de los engranes a) y c) corresponden a 18.75 mm; mientras que los engranes b) y d) tienen diámetros de 73.5 mm en el engrane b) y 121.1 mm para el engrane d) respectivamente. El número de dientes cambia debido a que es determinado para cada uno de los engranes de acuerdo con su diámetro. La velocidad angular para los engranes b) y c) es la misma, debido a que se encuentran en el mismo eje de rotación. El módulo 0.7 mm debe ser el mismo en todos los engranes calculados para que puedan tener un contacto epicíclico adecuado para la transmisión de movimiento.

Las distancias entre centros de los ejes correspondientes a los engranes a) - b) y c) - d) fueron estimadas en 45.6 mm y 69.4 mm, respectivamente.

Tabla 1. Resultados obtenidos para cada componente del sistema de engranajes. Fuente: Elaboración propia.

Engrane	Diámetro de paso mm	No. de dientes, n	V. angular, rpm	Módulo mm
a)	18.75	25	97.2	0.7
b)	73.5	105	23.14	0.7
c)	18.75	25	23.14	0.7
d)	121.1	173	3.3	0.7

Subsecuentemente, se realizó el estudio de movimiento de cada uno de los engranes propuestos con el programa SolidWorks 2022, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos de las velocidades angulares obtenidos por las ecuaciones.

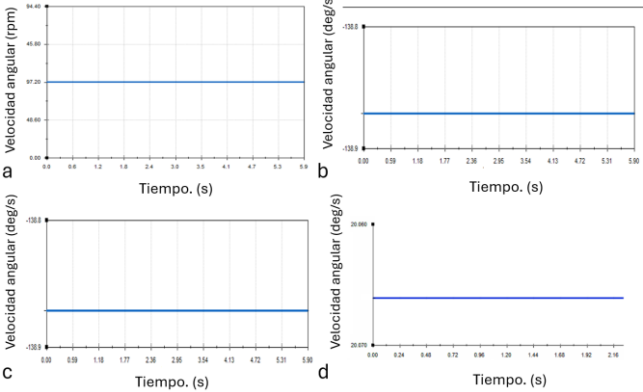


Figura 3. Gráficos de los estudios de movimientos en los engranes a,b,c y d. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de los estudios de movimiento mostrados en la Figura 3 por medio del programa informático SolidWorks indicaron que la velocidad angular en el engrane a) es de 97.2 rpm, el cual fue acoplado al eje de entrada; El engrane b) es de 139.7 deg/s (23.31 rpm), como el engrane d) y c) comparten el mismo eje la velocidad angular es igual para ambos, por último, el engrane d) es -20.065 deg/s (3.344 rpm). De acuerdo con lo anterior, la configuración de la transmisión mecánica es adecuada para cumplir con el requerimiento acerca del rango de velocidad de giro del carrete que de acuerdo con Gaibor Rivera et al. (2024), debe encontrarse entre 2.5 hasta 3.5 rpm.

La Figura 4 muestra la colocación de algunos de los modelos digitales en el área de trabajo del programa informático Ultimaker Cura versión 5.2.2. Para generar el código G, el cual, al ser interpretado por la impresora, permitiera la obtención de los engranes rectos en PLA. Una de las ventajas del programa informático Ultimaker

Cura es que permite el control de los parámetros de impresión y en función de estos, proporciona el tiempo estimado de impresión.

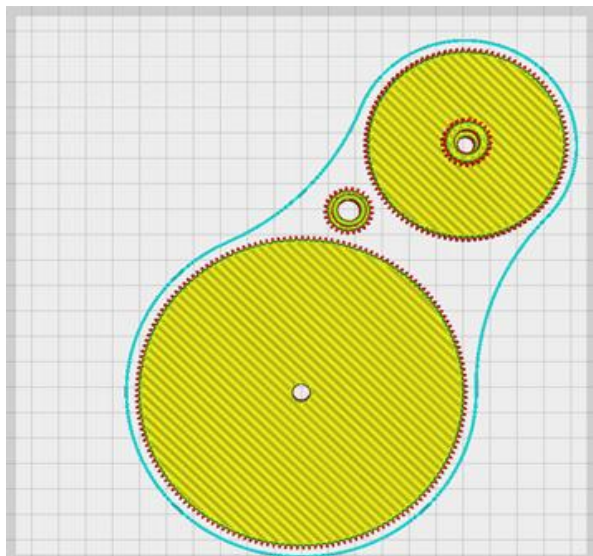


Figura 4. Modelos digitales de los engranes. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 contiene la información relativa a los tiempos de impresión y la cantidad de material necesario para cada una de las piezas que fueron impresas. El diseño mecánico por computadora y la impresión 3D fueron muy útiles para la obtención de los engranes rectos para ser implementados en el prototipo; Tales herramientas permitieron la manufactura de dichas piezas de forma eficaz. El tiempo de impresión y la cantidad de material utilizado en su totalidad correspondieron a 19.95 horas y 0.212 kg, respectivamente.

Tabla 2. Tiempo de impresión y cantidad de material necesario para la impresión 3D para la obtención de engranes y soporte. Fuente: Elaboración propia.

Pieza	Tiempo de impresión, min	Cantidad de material, g
Engrane a)	8	1
Engrane b)	88	13
Engrane c)	8	1
Engrane d)	217	35
Adaptador e)	97	15
Adaptador g)	97	15
Soporte h)	682	132

La Figura 5 muestra la transmisión mecánica obtenida a partir del ensamble de los componentes. El funcionamiento del sistema de transmisión mecánica fue probado al colocar un carrete para PLA y alimentar el motor con una fuente de corriente directa de 12 V a 1 A.

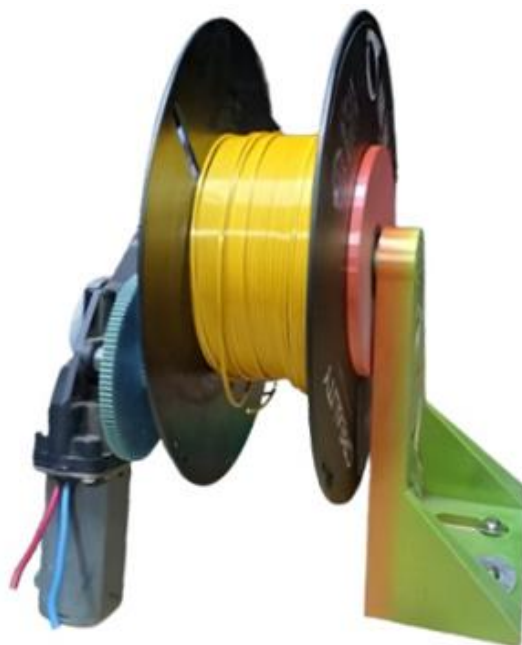


Figura 5. Prototipo del sistema electromecánico para el embobinado de PET para la obtención de carretes. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 muestra la medición de revoluciones por minuto a la salida de la transmisión mecánica que corresponde al engrane d), el cual tuvo una velocidad de rotación de 3.2 rpm. Aunque fue estimado en los cálculos que la velocidad a la salida de la transmisión correspondería a 3.344 rpm, existe una variación de 0.144 rpm que equivale a 4.3%. La variación entre ambas velocidades ocurre posiblemente a una disminución de la velocidad de rotación del motor, ya que la fricción entre los flancos de los dientes y la superficie en contacto con los ejes ofrece resistencia al movimiento. Es posible que dicha variación pudiera disminuirse al usar lubricación en las partes móviles. También mediante el uso de un motor con mayor potencia. Sin embargo, esto podría ser implementado en futuras mejoras al sistema. A partir de los datos experimentales, la velocidad de rotación transmitida al carrete es adecuada para la obtención de embobinados de filamento de PET, ya que se encuentra dentro del rango establecido de 2.5 hasta 3.5 rpm. En caso de requerirse mayor precisión en la velocidad de rotación, es conveniente modificar el tren de engranes para que a la salida se obtenga una velocidad máxima de 3.5 rpm. Otra opción es no modificar el tren de engranes, usar un motor con mayor velocidad de rotación en su eje y variar la velocidad del eje del motor mediante una fuente de poder de corriente directa variable a 12 V.

El prototipo obtenido podría ser mejorado mediante el uso de materiales resistentes al desgaste en las piezas motrices, tales como polímeros de ingeniería, bronce, entre otros. Sin embargo, puede ser usado como punto

de partida en sistemas mejorados que puedan ser usados a nivel industrial. Sin embargo, el prototipo cuenta con ciertas ventajas para su elaboración como lo son los costos de materia prima debido a que la manufactura aditiva en impresiones cartesianas tiene un costo menor al utilizar polímeros comerciales como materia prima según Ulloa, J. (2025) la bobina de filamento PLA de 1 Kilogramo en México tiene un costo de 400 a 1500 \$ Mex dependiendo de los aditivos anexados al filamento, el presente proyecto fue impreso con un carrete de filamento marca Creality el cual tuvo un valor monetario de 600 \$ Mex sin embargo únicamente se utilizaron 212 g teniendo un costo de materia prima para la impresión 3D de 127 \$Mex Considerándolo una opción económica al compararlo con un engrane de Nylamid de 25 dientes de módulo 0.7 con un ancho de cara de 5 mm de la empresa Tuli d.o.o con dirección 71000 Liubliana Eslovenia, Europa. Teniendo un costo de 32 Euros reiterando así una opción más accesible para su implementación en impresión 3D.



Figura 6. Medición de velocidad angular o revoluciones por minuto con tacómetro. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados del trabajo experimental, el diseño, manufactura y puesta en marcha del prototipo para el embobinado de filamento de PET fueron adecuados, ya que la velocidad de giro del carrete para el embobinado se obtuvo dentro del rango establecido por Gaibor Rivera et al. (2024) el cual comprende un rango de 2.5 - 3.5 rpm

La diferencia entre la velocidad obtenida por la simulación (3.344 rpm) y la velocidad experimental (3.2 rpm) fue del 4.3 %, lo que confirma la precisión del diseño y el buen

desempeño del sistema. Sin embargo, se sugiere la utilización de agentes reductores de fricción como aceites y grasas. Estos resultados muestran la viabilidad de utilizar piezas impresas en 3D en mecanismos de baja velocidad y torque moderado, ofreciendo una alternativa funcional para la fabricación de equipos destinados al reciclaje y producción de filamento para impresión 3D.

En general, el prototipo cumplió con los objetivos propuestos y demostró el potencial de combinar herramientas de diseño digital con tecnologías de manufactura aditiva. Sin embargo, se queda abierto a posibles mejoras para materiales con mayores propiedades mecánicas que el PLA e incorporar sistemas de control electrónico que permitan automatizar y mejorar el proceso de embobinado.

Referencias

- Benavides, C. F. (2020). Engranajes rectos y helicoidales.pdf. Scribd. <https://es.scribd.com/document/478044596/Engranajes-Rectos-y-Helicoidales-pdf>
- Das, A., Gilmer, E. L., Biria, S., & Bortner, M. J. (2021). Importance of polymer rheology on material extrusion additive manufacturing: Correlating process physics to print properties. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(3), 1218–1249. <https://doi.org/10.1021/acsapm.0c01228>
- De La Cruz González, A. J. (2024). Propuesta de producción de filamento PET mediante su estudio de productividad en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2024).
- Gaibor Rivera. Edu.ec. Recuperado el 1 de agosto de 2025, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28059/1/UPS-GT005479.pdf>
- L. C. (2024). Recicla en impresión 3D con botellas de plástico PET. Control 3D - Cursos Online de Diseño 3D E Impresión 3D. <https://control3d.net/impresion-3d-botellas-plastico-pet/>.
- Lazo Lobo, J. R. (2021). Mejoramiento de la procesabilidad del PET reciclado: evaluación de mezclas poliméricas para mitigar degradación y mejorar estabilidad en la extrusión de filamento de impresión 3D con PET posconsumo (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT).
- Limón, A. G., Gómez, P. T., & Aranda, S. B. (2022). Reciclaje de botellas de pet para manufactura aditiva. *Investigación y Ciencia Aplicada a la Ingeniería*, 5(29), 88-96.
- Lopez, i. h., & villamil, j. s. m. (2024). prototipo de una máquina extrusora de filamento para impresión 3d a partir del reciclado de botellas pet.
- López-Flores, L. H., Chávez, A. G., López-García, C., & Valverde-Cedillo, L. M. (2023). Rediseño de una máquina automatizada, extrusora de plástico fundido, utilizando botellas PET para la fabricación de filamentos para impresoras 3D. *Científica*, 27(1), 1-12.
- Ramos Herrero, P. (2023). Diseño de un generador para trefilado asistido por electropulsos (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Ulloa, J. (2025). MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D. Scribd. <https://es.scribd.com/document/548371078/MATERIALES-PARA-IMPRESION-3D>
- Solis Santamarina, I. S. (2023). EVOLUCIÓN y UTILIDAD DEL MECANIZADO CNC EN EL DISEÑO INDUSTRIAL. “INGENIAR”: Ingeniería, Tecnología E Investigación, 6(11), 2737-6249.

Regalado Gonzales J. M. (2015). *Calculo y diseño de engranajes con forma a la norma AISI/AGMA2101-D04*. Universidad Carlos III, Madrid: España.

Ansi/agma 2101-d04. Agma.org. Recuperado el 26 de septiembre de 2025, https://members.agma.org/MyAGMA/MyAGMA/Store/Item_Detail.aspx?iProductCode=2101_D04&Category=STANDARDS