Análisis por elementos finitos del comportamiento estructural de un dosificador helicoidal para agricultura de precisión

Jorge Fernando Carmona Espinoza[1], Jorge Corona Castuera[2], Nivia Escalante-García [3,4] y Ernesto Olvera-Gonzalez[3]

[1] Posgrado CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, Circuito Aguascalientes Norte 135, C.P.20358 San Francisco de los Romo, Aguascalientes, México. fermecatronica@gmail.com

[2] Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ, A.C., Investigador Querétaro Arteaga, C.P. 76246, Querétaro, Querétaro. México, jcorona@ciateq.mx

[3] Laboratorio de Iluminación Artificial/Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Carretera a la Estación de Rincón km 1 C.P.20670, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, Aguascalientes, México. nivia.eg@pabellon.tecnm.mx, jose.og@pabellon.tecnm.mx

[4] EPM SECIHTI-Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., Unidad Aguascalientes, Aguascalientes 20200, Aguascalientes, México.

Resumen

En el contexto de la agricultura de precisión, los sistemas de dosificación variable requieren componentes capaces de operar bajo diferentes condiciones de carga durante la distribución de fertilizantes granulados. Este trabajo evalúa, mediante análisis por elementos finitos (FEA), el comportamiento estructural de un tornillo helicoidal dosificador proyectado para fabricarse en ácido poliláctico (PLA) mediante manufactura aditiva. El análisis estático se realizó en SolidWorks Simulation considerando tres condiciones de operación: 25, 90 y 210 rpm, asociadas con torques resistentes equivalentes de 0.8, 1.5 y 2.6 N·m, respectivamente. La respuesta estructural se analizó a partir de los esfuerzos equivalentes de Von Mises, los desplazamientos resultantes y el factor de seguridad. En la condición nominal de 90 rpm, se obtuvo un esfuerzo máximo de Von Mises de 21.42 MPa, un desplazamiento máximo de 0.16 mm y un factor de seguridad mínimo de 2.10. Para la condición de mayor carga analizada, a 210 rpm, el esfuerzo máximo alcanzó 37.15 MPa y el factor de seguridad disminuyó a 1.21, con las mayores concentraciones de esfuerzo localizadas en la raíz del primer paso y en la zona de unión entre el álabe helicoidal y el núcleo del eje. Los desplazamientos máximos calculados permanecieron por debajo de la holgura radial de diseño de 0.5 mm entre el tornillo helicoidal y la camisa. Los resultados permiten identificar las regiones de mayor demanda mecánica y proporcionan una base para continuar con el desarrollo y la posterior evaluación experimental del concepto de dosificador helicoidal. Esta investigación destaca el potencial de la ingeniería asistida por computadora (CAE) como herramienta predictiva para identificar zonas de mayor demanda mecánica y orientar el desarrollo de geometrías complejas impresas en 3D antes de su manufactura física y evaluación experimental.

***Palabras clave*— Agricultura de precisión, Análisis de elementos finitos, Dosificador helicoidal, Esfuerzos de Von Mises, Manufactura aditiva, Simulación numérica.**

Finite Element Analysis of the Structural Behavior of a Helical Dosing Device for Precision Agriculture

Abstract

In the context of precision agriculture, variable-rate dosing systems require components capable of operating under different loading conditions during the distribution of granular fertilizers. This study evaluates the structural behavior of a helical dosing screw intended to be manufactured from polylactic acid (PLA) by additive manufacturing using finite element analysis (FEA). The static analysis was performed in SolidWorks Simulation considering three operating conditions: 25, 90, and 210 rpm, associated with equivalent resisting torques of 0.8, 1.5, and 2.6 N·m, respectively. The structural response was assessed in terms of equivalent Von Mises stress, resultant displacement, and safety factor. Under the nominal operating condition of 90 rpm, the maximum Von Mises stress was 21.42 MPa, the maximum displacement was 0.16 mm, and the minimum safety factor was 2.10. For the highest load condition analyzed, at 210 rpm, the maximum stress reached 37.15 MPa and the safety factor decreased to 1.21, with the highest stress concentrations located at the root of the first helical turn and at the junction between the helical flight and the shaft core. The calculated maximum displacements remained below the 0.5 mm radial design clearance between the helical screw and the surrounding sleeve. These results identify the regions subjected to the highest mechanical demands and provide a basis for further development and subsequent experimental evaluation of the helical dosing concept. This research highlights the potential of computer-aided engineering (CAE) as a predictive tool for identifying regions of higher mechanical demand and guiding the development of complex geometries intended for 3D printing prior to physical manufacturing and experimental evaluation.

***Keywords*— Precision agriculture, Finite element analysis, Helical dosing system, Von Mises stresses, Additive manufacturing, Numerical simulation**

Recibido: 22 de julio de 2026
Aceptado: 4 de noviembre de 2026
Publicado: 18 de noviembre de 2026

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la agricultura de precisión, la aplicación eficiente de insumos sólidos como los fertilizantes granulados requiere de sistemas de dosificación variable altamente confiables [1]–[3]. Entre los mecanismos más utilizados para este propósito se encuentran los dosificadores de tornillo helicoidal, debido a su capacidad para desplazar volúmenes controlados de material mediante la modificación de su velocidad angular [4]. Sin embargo, el diseño mecánico de estos componentes enfrenta diferentes cargas mecánicas durante la operación. Durante la descarga de material, el tornillo está sujeto a fuerzas de fricción continuas, resistencia al corte del fertilizante y fenómenos de compactación dentro de la camisa del dosificador [4], [5]**.** Estas condiciones generan un estado combinado de esfuerzos de torsión y flexión que puede incrementar las demandas mecánicas y reducir el margen estructural del componente [6]–[8].

El surgimiento de la manufactura aditiva, particularmente el modelado por deposición fundida (FDM), ha facilitado la creación de prototipos funcionales de bajo costo utilizando polímeros como el ácido poliláctico (PLA) [9]. El comportamiento ortotrópico asociado al proceso FDM introduce variaciones en la respuesta mecánica de las piezas impresas en 3D [10], [11]. Estudios previos se han centrado principalmente en el diseño y desempeño de mecanismos de dosificación para mejorar la uniformidad del flujo [4], [5]; sin embargo, la evaluación estructural de estos componentes ha recibido menor atención**,** particularmente cuando operan a diferentes velocidades de rotación y bajo distintas condiciones de carga. Factores como la velocidad de rotación se asocian con diferentes requerimientos de torque y condiciones de carga [4], lo que modifica la distribución de esfuerzos de Von Mises, los desplazamientos elásticos y los factores de seguridad de la geometría.

Por lo tanto, antes de su implementación física en campo, resulta conveniente evaluar el comportamiento estructural de estos dosificadores mediante herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAE). El Análisis de Elemento Finito (FEA) se presenta como una herramienta de análisis para estimar las zonas de concentración de esfuerzos y evaluar la respuesta estructural de materiales poliméricos [12]–[14]. El objetivo general de este trabajo es evaluar numéricamente, mediante simulación estática en SolidWorks, el comportamiento estructural, esfuerzos de Von Mises, desplazamientos resultantes y factores de seguridad, de un tornillo helicoidal dosificador fabricado en PLA bajo tres condiciones de operación: bajo (25 rpm), nominal (90 rpm) y alto (210 rpm). Con esto se busca estimar el comportamiento y el margen estructural del concepto de tornillo helicoidal como base para etapas posteriores de desarrollo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Modelado Geométrico Avanzado y Cinemática del Helicoides

El diseño tridimensional del dosificador se basa en la geometría de un tornillo helicoidal de eje concéntrico y paso constante, diseñado específicamente para optimizar el transporte de sólidos granulares y minimizar las pulsaciones cíclicas en regímenes de baja velocidad angular [1]. La ecuación (1) se expresa mediante el volumen teórico de descarga por revolución (V_r, en m^3/rev) y se rige por la cinemática de transporte de sólidos de Arquímedes.

$$V_r = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot P \cdot \eta_v \cdot cos\ cos\ (\alpha), \tag{1}$$

donde D es el diámetro exterior del helicoide ($45\ mm$), d es el diámetro del núcleo o eje interno ($16\ mm$), P es el paso constante del tornillo ($35\ mm$), η_v es la eficiencia volumétrica del llenado y α es el ángulo de inclinación de la hélice respecto al plano perpendicular del eje, calculado mediante la relación trigonométrica de acuerdo con (2),

$$\alpha = arctan\ arctan\ \left(\frac{P}{\pi \cdot D}\right). \tag{2}$$

Sustituyendo los parámetros geométricos**, se** determinó un ángulo de hélice $\alpha = 15.54^{\circ}$. Esta configuración angular es crítica ya que influye directamente en las fuerzas normales y tangenciales ejercidas por el fertilizante sobre la superficie del álabe durante la rotación. El modelado paramétrico tridimensional (CAD) se consolidó en la plataforma SolidWorks (v2024, Dassault Systèmes), aplicando redondeos con un radio de filamento de $2\ mm$ en las uniones entre el álabe y el núcleo para mitigar los fenómenos de concentración de esfuerzos por flexotorsión [14].

B. Caracterización Estructural y Comportamiento del Material

El dosificador analizado se proyectó para fabricarse mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM), proceso que condiciona la respuesta mecánica del PLA debido a la orientación de los filamentos y a la unión entre capas. Este comportamiento ortotrópico ha sido ampliamente documentado [10], [11]. Para el presente análisis, el PLA se representó en el modelo de elementos finitos mediante una formulación isotrópica elástica lineal equivalente [13], restringida a la estimación de esfuerzos y desplazamientos dentro del régimen elástico. Esta simplificación ha mostrado una adecuada correspondencia con resultados experimentales de PLA-FDM; Mercado-Colmenero et al. [14] reportaron un error del 4.27 % al utilizar un modelo isotrópico con módulo de Young

constante. Con base en estos antecedentes, la formulación adoptada se consideró adecuada para el alcance del análisis estático desarrollado. Las propiedades mecánicas utilizadas en el modelo se resumen en la Tabla I.

TABLA I.
PROPIEDADES MECÁNICAS Y CONSTITUTIVAS DEL PLA ALIMENTADAS EN EL MOTOR DE CÁLCULO FEA.

Parámetro Mecánico	Símbolo	Valor Numérico	Unidades (SI)
Módulo de Elasticidad (Young)	E	3.5×10^9	N/m^2
Coeficiente de Poisson	ν	0.36	Adimensional
Módulo de Cortante	G	1.28×10^9	N/m^2
Límite de Fluencia (Yield)	σ_y	4.5×10^7	N/m^2
Resistencia Última a la Tracción	σ_u	5.5×10^7	N/m^2
Densidad de Masa	ρ	1,240	kg/m^3

La literatura sobre la respuesta elástica del PLA-FDM muestra diferencias reducidas entre las direcciones principales del plano de deposición. Li et al. [11] reportaron módulos de elasticidad de E_1 = 2669 MPa y E_2 = 2583 MPa, con una diferencia aproximada del 3.2 %, mientras que para otra condición de fabricación obtuvieron E_1 = 2785 MPa y E_2 = 2649 MPa, con una diferencia cercana al 4.9 %. Morettini et al. [15] también observaron variaciones limitadas del módulo de Young entre diferentes direcciones de fabricación dentro del régimen elástico lineal. De manera complementaria, Algarni [16] reportó que el ángulo de deposición ejerce una menor influencia sobre el módulo elástico que sobre otras propiedades mecánicas. Estos resultados aportan sustento a la aproximación isotrópica equivalente adoptada para el análisis estático.

El comportamiento del material bajo carga se evalúa mediante el criterio de falla de la energía de distorsión de Von Mises. El esfuerzo equivalente de Von Mises (σ_e) se calcula a partir de los componentes del tensor de esfuerzos principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) obteniéndose con (3):

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

La condición de seguridad estructural exige que en ningún nodo del dominio discretizado el esfuerzo equivalente supere el límite de fluencia del material ($\sigma_e < \sigma_y$).

C. *Discretización y Configuración del Análisis de Elemento Finito (FEA)*

La simulación numérica se desarrolló en el módulo avanzado SolidWorks Simulation. El dominio continuo del tornillo helicoidal se discretizó mediante un mallado sólido de alta orden basado en curvatura, empleando elementos tetraédricos parabólicos de 10 nodos. Este tipo de elemento cuenta con tres grados de libertad por nodo (traslaciones en X, Y, Z) e incorpora funciones de forma cuadráticas que capturan con mayor precisión los gradientes del campo de deformaciones en las geometrías curvas del paso helicoidal.

Para garantizar la independencia, de la malla y la convergencia de los resultados numéricos, se aplicó un control de malla local en los filetes y caras del álabe expuestas a la carga torsional, reduciendo el tamaño del elemento en esas regiones a $1.0\,mm$ con una tasa de crecimiento de 1.1. El mallado global final quedó constituido por 185,432 nodos y 122,815 elementos, manteniendo un sesgo jacobiano del 99.8% con una relación de aspecto inferior a 3: 1 en las zonas críticas de análisis.

D. *Condiciones de Frontera y Regímenes Operativos*

Las condiciones de frontera se establecieron para representar las restricciones mecánicas y las condiciones de carga consideradas en el modelo del tornillo helicoidal [4]:

1. **Restricción de sujeción (soporte fijo):** Se aplicó una condición de empotramiento rígido ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0; \theta x = \theta y = \theta z = 0$) en la cara cilíndrica posterior del eje, correspondiente a la zona de unión en con el cople del motoreductor. Esta condición restringe los desplazamientos en las direcciones *X, Y,* y *Z,* así como establece la referencia mecánica para el análisis estructural.

2. **Torque resistente equivalente:** La interacción mecánica entre el fertilizante y el álabe heicoidal se representó mediante un torque resistente equivalente, correspondiente a la resultante de las fuerzas tangenciales generadas sobre la superficie activa del alábe durante el desplazamiento del material granualr. Esta idealización permite representar la resistencia mecánica ejercida por el fertilizante sin modelar individualmente el contacto entre partículas. La Fig. 1 muestra la interacción fertilizante-álabe y su representación en el modelo de elementos finitos.

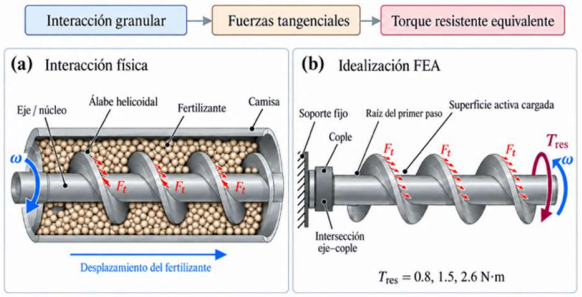


Fig. 1. Esquema de la interacción fertilizante–dosificador y de la condición de carga empleada en el FEA: (a) interacción física del material granular con el tornillo helicoidal; (b) idealización numérica con identificación del cople, la intersección eje–cople, la raíz del primer paso, la superficie activa cargada y el torque resistente equivalente T_{res}.

Se analizaron tres condiciones de operación:

- Caso de estudio I (régimen bajo - 25 rpm): torque resistente equivalente de 0.8 $N \cdot m$.
- Caso de estudio II (régimen medio - 90 rpm): torque resistente equivalente de 1.5 $N \cdot m$.
- Caso de estudio III (régimen alto - 210 rpm): torque resistente equivalente de 2.6 $N \cdot m$, correspondiente a la condición de mayor carga considerada en el análisis.

Los valores de 0.8, 1.5 y 2.6 N·m corresponden a los torques resistentes equivalentes definidos para los tres regímenes de operación. Estas cargas no incorporan factores adicionales de amplificación ni representan picos transitorios. El análisis es de carácter estático y, por tanto, no contempla los efectos acumulativos asociados con cargas cíclicas ni permite estimar la vida a fatiga.

Finalmente, el factor de seguridad estático (FS) se determinó a partir de la relación entre el límite de fluencia del material y el esfuerzo equivalente de Von Mises, como se muestra en (4):

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_e}, \tag{4}$$

donde $\sigma_y$corresponde al límite de fluencia del PLA y σ_e al esfuerzo equivalente de Von Mises obtenido en el análisis. En estudios estructurales de maquinaria agrícola, el factor de seguridad se ha empleado como criterio para estimar el margen existente respecto al límite de fluencia [6]–[8], [17], [18]. En este estudio, se adoptó un valor de referencia de FS = 1.5 para la evaluación estática, sin considerarlo como un requisito normativo universal. Los valores inferiores a esta referencia se interpretaron como condiciones con menor margen estructural dentro del modelo analizado, sin establecer conclusiones relacionadas con falla o vida a fatiga.

III. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica por elemento finito del tornillo helicoidal de PLA. El análisis se divide en la evaluación de los campos de esfuerzo equivalente de Von Mises (σvM), los desplazamientos resultantes y la distribución de los factores de seguridad locales bajo los tres regímenes operativos preestablecidos.

A. Análisis de Esfuerzos Equivalentes de Von Mises

Las Fig. 2-4, representan la distribución tridimensional de los esfuerzos de Von Mises (σvM) a lo largo de la geometría del dosificador para las tres velocidades angulares evaluadas.

- En el Caso I (25 rpm, 0.8 N·m): Se observa que los esfuerzos máximos localizados alcanzan apenas los 11.43 MPa, ubicándose principalmente en la zona de transición e inserción del eje con el cople. La mayor parte del cuerpo del álabe permanece en un rango de esfuerzos despreciables ($< 3.5\ MPa$).
- En el Caso II (90 rpm, 1.5 N·m), el esfuerzo máximo se elevó a 21.42 MPa. Las mayores concentraciones de esfuerzo comenzaron a distribuirse en la raíz del primer paso de la hélice, es decir, en la zona de unión entre el inicio del álabe helicoidal y el núcleo del eje, donde la interacción resistente del fertilizante genera, además, un momento flector.
- Las tensiones comienzan a distribuirse de manera concéntrica a lo largo de la raíz del primer paso de la hélice, donde la fricción teórica con el fertilizante genera un momento flector secundario.
- En el Caso III (210 rpm, 2.6 N·m): Bajo la condición de mayor carga analizada, el esfuerzo de Von Mises alcanza un valor máximo de 37.15 MPa. Este valor se concentra severamente en los filetes de unión (redondeos de 2 mm) entre la base del álabe y el núcleo central. Aunque el esfuerzo incrementa un 225% respecto al régimen bajo, el valor máximo absoluto se mantiene por debajo del límite de fluencia elástica del PLA ($\sigma_y = 45\ MPa$).

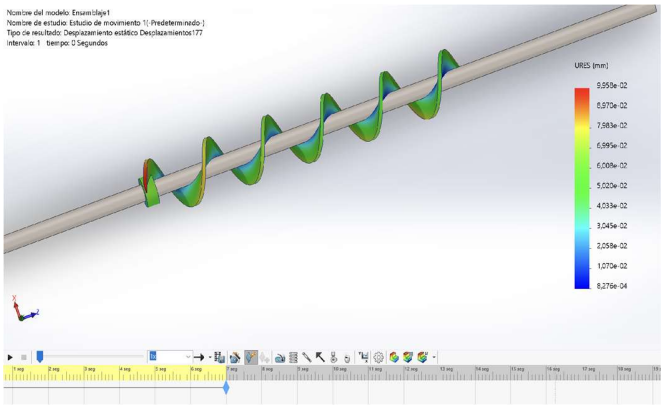


Fig 2. Distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises en el tornillo helicoidal: Régimen Bajo a 25 rpm.

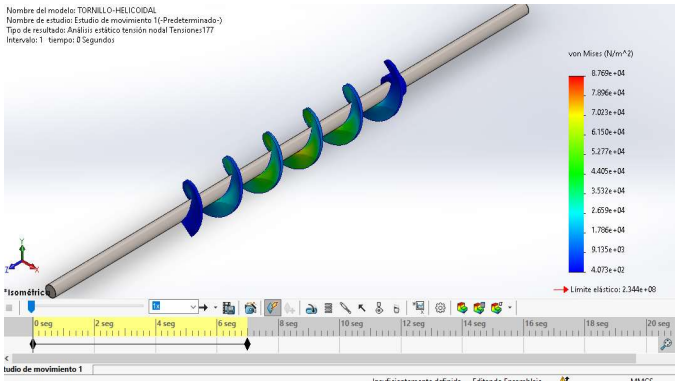


Fig. 3. Distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises en el tornillo helicoidal: Régimen Medio a 90 rpm.

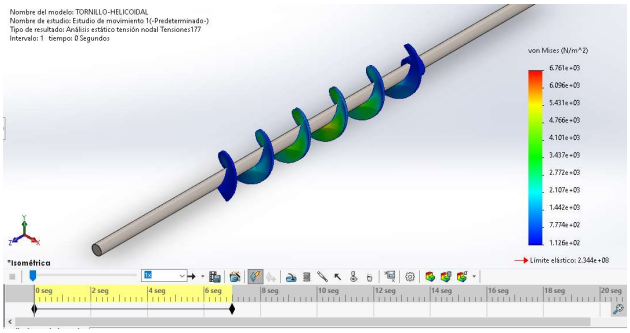


Fig. 4. Distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises en el tornillo helicoidal: condición de mayor carga analizadao a 210 rpm.

B. Análisis de Desplazamientos Estructurales Resultantes

Las Fig. 5-7, ilustran los mapas de contorno correspondientes al desplazamiento elástico lineal acumulado (desplazamiento resultante) sufrido por el componente debido al torque aplicado.

- Al estar sujeto en el extremo posterior del eje, correspondiente a la zona de unión con el cople, el desplazamiento aumenta progresivamente hacia el extremo libre del tornillo helicoidal.
- A 25 rpm y 90 rpm, los desplazamientos máximos en el extremo libre fueron de 0.08 mm y 0.16 mm, respectivamente. Ambos valores se mantuvieron por debajo de la holgura radial de diseño de 0.5 mm entre el tornillo helicoidal y la camisa del dosificador, por lo que permanecen dentro del espacio funcional disponible para las condiciones estáticas analizadas.
- A 210 rpm, el desplazamiento máximo calculado en el extremo libre fue de 0.34 mm. Este valor se mantuvo por debajo de la holgura radial de diseño de 0.5 mm, definida a partir del diámetro exterior del tornillo helicoidal de 45 mm y del diámetro interno de la camisa de 46 mm. Por tanto, bajo la condición estática analizada, el desplazamiento obtenido permanece dentro del espacio radial disponible entre ambos componentes.

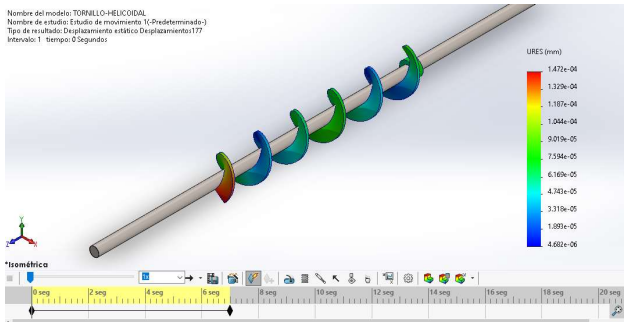


Fig. 5. Distribución de los desplazamientos resultantes (mm) en el dosificador a 25 rpm.

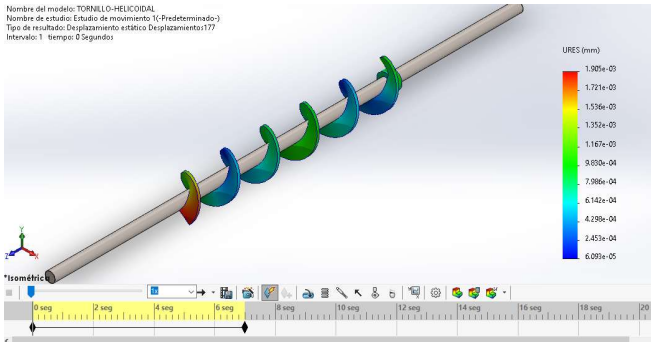


Fig. 6. Distribución de los desplazamientos resultantes (mm) en la estructura del dosificador para la condición de operación de 90 rpm.

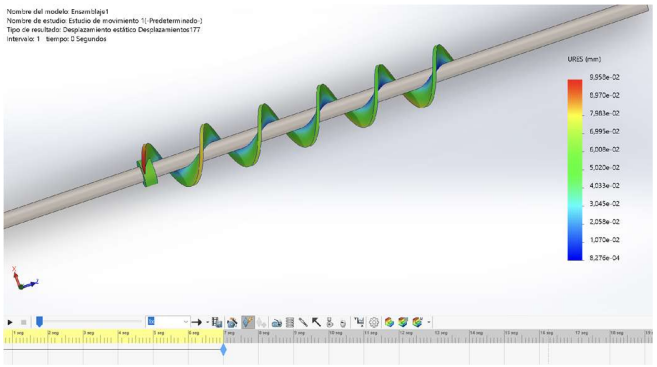


Fig. 7. Distribución de los desplazamientos resultantes (mm) en la estructura del dosificador para la condición de operación de 210 rpm.

C. Evaluación de los Factores de Seguridad (FS)

Las Fig. 8–10 muestran la distribución del factor de seguridad en toda la estructura del dosificador para las condiciones de operación analizadas. Estos mapas permiten identificar las zonas con menor margen estructural y comparar su comportamiento respecto al valor de referencia adoptado para la evaluación estática ($FS < 1.5$).

- A 25 rpm, el factor de seguridad mínimo obtenido fue de 3.93, lo que indica un margen estructural amplio respecto al valor de referencia adoptado para la evaluación estática.
- En el punto de operación nominal de 90 rpm, el factor de seguridad mínimo fue de 2.10, manteniéndose por encima del valor de referencia adoptado para la evaluación estática. La distribución obtenida muestra un margen estructural favorable en la mayor parte del componente.
- En la condición de mayor carga analizada, correspondiente a 210 rpm, el factor de seguridad mínimo fue de 1.21, localizado en la raíz del primer paso del álabe helicoidal. Este valor es inferior al valor de referencia adoptado para la evaluación estática (FS = 1.5), lo que indica una reducción del margen estructural respecto a las condiciones de menor carga. No obstante, el análisis realizado no permite establecer conclusiones sobre el comportamiento ni la vida a fatiga del componente.

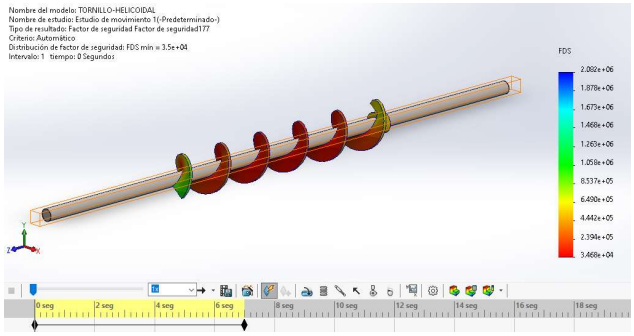


Fig. 8. Distribución local del Factor de Seguridad (FS) en el modelo discretizado: Condición a 25 rpm.

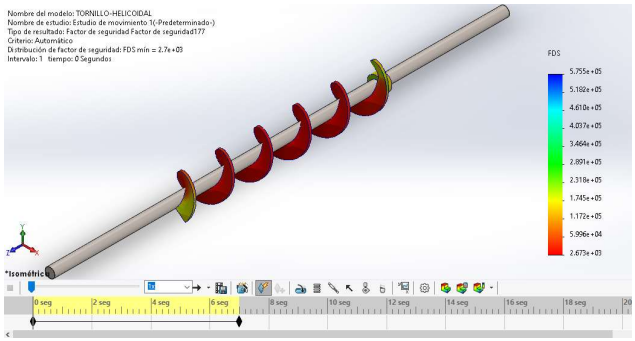


Fig. 9. Distribución local del Factor de Seguridad (FS) en el modelo discretizado: Condición a 90 rpm.

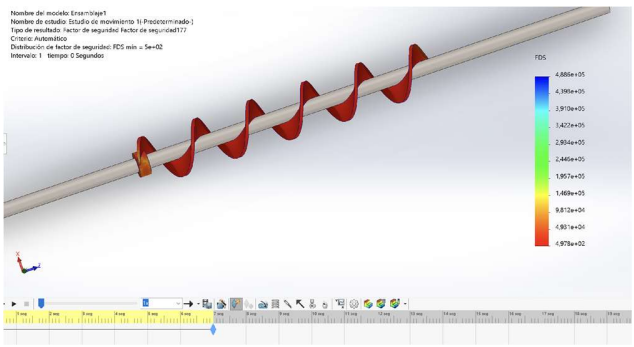


Fig. 10. Distribución local del Factor de Seguridad (FS) en el modelo discretizado: condición de mayor carga analizada a 210 rpm.

Para sintetizar los resultados obtenidos en las Figuras 8–10, la Tabla II presenta los valores de esfuerzo máximo de Von Mises, desplazamiento máximo y factor de seguridad mínimo correspondientes a cada condición de operación analizada.

TABLA II.
RESUMEN CUANTITATIVO DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA OBTENIDAS MEDIANTE FEA.

Régimen de Operación (rpm)	Torque Aplicado (N·m)	σvM máx. (MPa)	Despl. máx. (mm)	FS mín.	Estado estr.
25	0.8	11.43	0.08	3.93	Margen estructural amplio
90	1.5	21.42	0.16	2.10	Margen estructural superior al valor de referencia
210	2.6	37.15	0.34	1.21	Menor margen estructural

Los resultados obtenidos muestran que el incremento del torque resistente equivalente modifica de forma importante la respuesta estructural del tornillo helicoidal. Al pasar de 0.8 N·m a 2.6 N·m, el esfuerzo máximo de Von Mises aumentó de 11.43 MPa a 37.15 MPa, mientras que el factor de seguridad mínimo disminuyó de 3.93 a 1.21. Además, las mayores concentraciones de esfuerzo se localizaron en la raíz del primer paso del álabe, lo que permite identificar esta región como la de menor margen estructural dentro de las condiciones analizadas. Este comportamiento complementa los estudios orientados al desempeño de los sistemas de dosificación de fertilizantes. Zhang et al. [4] analizaron, mediante el método de elementos discretos, la relación entre la velocidad de rotación, la evolución de las cadenas de fuerza y las fluctuaciones del flujo en un dosificador de tornillo, mientras que Sun et al. [5] demostraron que la geometría del mecanismo y el movimiento de las partículas influyen directamente en la uniformidad de descarga y en las condiciones mecánicas desarrolladas durante el transporte del fertilizante. Ambos trabajos se concentran principalmente en la dinámica del material granular y en el desempeño de la descarga; el presente estudio amplía este enfoque al analizar la respuesta estructural del componente helicoidal a partir de los esfuerzos de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad.

La incorporación de manufactura aditiva en componentes agrícolas también requiere considerar la respuesta mecánica asociada al material y al proceso de fabricación. Lu et al. [9] destacan la flexibilidad geométrica y la capacidad de la manufactura aditiva para producir componentes agrícolas con

configuraciones adaptadas a aplicaciones específicas. Sin embargo, en componentes fabricados con PLA-FDM, la orientación de deposición y la anisotropía del material influyen en sus propiedades mecánicas [11], [15], [16]. Por esta razón, los resultados del presente análisis deben interpretarse como una evaluación estructural estática del concepto de tornillo helicoidal y no como una validación definitiva del componente. Este enfoque es consistente con estudios de maquinaria agrícola que utilizan esfuerzos equivalentes y factores de seguridad para identificar regiones de mayor demanda mecánica y orientar etapas posteriores del desarrollo estructural [6]–[8], [17], [18].

El concepto analizado presenta potencial de aplicación en sistemas de dosificación de tasa variable, equipos automatizados para la distribución localizada de fertilizantes y plataformas de agricultura de precisión. La manufactura aditiva facilita, además, la adaptación de parámetros geométricos del tornillo helicoidal a diferentes configuraciones de dosificación y condiciones de operación. En este contexto, los resultados obtenidos proporcionan una base para el desarrollo posterior de componentes de dosificación integrables en sistemas agrícolas automatizados, cuya evaluación experimental deberá abordarse en etapas posteriores.

IV. CONCLUSIONES

El análisis por elementos finitos permitió realizar una evaluación preliminar del comportamiento estructural del concepto de tornillo helicoidal bajo las condiciones de operación consideradas. Los principales hallazgos fueron los siguientes:

- El tornillo helicoidal mostró un comportamiento estructural favorable en las condiciones de baja y operación nominal, manteniendo esfuerzos y desplazamientos dentro del régimen elástico considerado.
- El incremento de la carga produjo una reducción progresiva del margen estructural. Las mayores concentraciones de esfuerzo se localizaron principalmente en la raíz del primer paso y en la zona de unión entre el álabe helicoidal y el núcleo del eje.
- Los desplazamientos calculados permanecieron dentro de la holgura radial disponible entre el tornillo helicoidal y la camisa del dosificador para las condiciones estáticas analizadas.
- La distribución de esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad permitió identificar las regiones que requieren mayor atención en etapas posteriores de desarrollo, particularmente las zonas de transición geométrica del álabe.
- Los valores de esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad obtenidos permiten identificar las regiones de mayor demanda mecánica y establecer una base para continuar con el desarrollo del concepto de tornillo helicoidal.
- El alcance del análisis es estático; por tanto, los resultados no permiten establecer conclusiones sobre el desgaste, la respuesta ante cargas cíclicas ni la vida a fatiga del componente.

Como trabajo futuro, se plantea complementar la evaluación numérica con pruebas experimentales bajo condiciones representativas de operación y profundizar en el comportamiento de las zonas con mayor concentración de esfuerzos.

REFERENCIAS

[1] C. Chen, P. He, J. Zhang, X. Li, Z. Ren, J. Zhao, J. He, Y. Wang, H. Liu, and J. Kang, "A fixed-amount and variable-rate fertilizer applicator based on pulse width modulation," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 148, pp. 330–336, 2018.

[2] P. P. Pawase, S. M. Nalawade, A. A. Walunj, G. B. Bhanage, P. B. Kadam, A. G. Durgude, and M. R. Patil, "Comprehensive study of on-the-go sensing and variable rate application of liquid nitrogenous fertilizer," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 216, Art. no. 108482, 2024, doi: 10.1016/j.compag.2023.108482.

[3] F. M. Silva, C. Queirós, M. Pereira, T. Pinho, T. Barroso, S. Magalhães, J. Boaventura, F. Santos, M. Cunha, and R. C. Martins, "Precision fertilization: A critical review analysis on sensing technologies for nitrogen, phosphorous and potassium quantification," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 224, Art. no. 109220, 2024

[4] M. Zhang, H. Niu, Y. Han, Y. Zhi, T. Yuan, H. Zhang, Y. He, Z. Tang, and H. Lan, "A simulation and experiment of the flow fluctuation characteristics of a fertilizer distribution apparatus with a screw from the perspective of the force chain," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, Art. no. 1122, 2024.

[5] X. Sun, L. Niu, M. Cai, Z. Liu, Z. Wang, and J. Wang, "Particle motion analysis and performance investigation of a fertilizer discharge device with helical staggered groove wheel," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 213, Art. no. 108241, 2023.

[6] S. Markumningsih, S.-J. Hwang, J.-H. Kim, M.-K. Jang, and J.-S. Nam, "Stress simulation on cam-type transplanting device of semiautomatic vegetable transplanter," *Agriculture*, vol. 13, no. 12, Art. no. 2230, 2023.

[7] S. Markumningsih, S.-J. Hwang, J.-H. Kim, M.-K. Jang, and J.-S. Nam, "Stress simulation on four-bar link-type transplanting device of semiautomatic vegetable transplanter," *Agriculture*, vol. 14, no. 1, Art. no. 42, 2024.

[8] J.-H. Kim, D.-H. Gim, and J.-S. Nam, "Experimental structural safety analysis of front-end loader of agricultural tractor," *Agriculture*, vol. 14, no. 6, Art. no. 947, 2024.

[9] Y. Lu, W. Xu, J. Leng, X. Liu, H. Xu, H. Ding, J. Zhou, and L. Cui, "Review and research prospects on additive manufacturing technology foragricultural manufacturing," *Agriculture*, vol. 14, no. 8, Art. no. 1207, 2024.

[10] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco, and C. Pappalettere, "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory," *Materials & Design*, vol. 90, pp. 453–458, 2016.

[11] M. Li, Y. Xu, and J. Fang, "Orthotropic mechanical properties of PLA materials fabricated by fused deposition modeling," *Thin-Walled Structures*, vol. 199, Art. no. 111800, 2024.

[12] M. Alharbi, I. Kong, and V. I. Patel, "Simulation of uniaxial stress–strain response of 3D-printed polylactic acid by nonlinear finite element analysis," *Applied Adhesion Science*, vol. 8, Art. no. 5, 2020.

[13] A. A. Ahmed and L. Susmel, "Static assessment of plain/notched polylactide (PLA) 3D-printed with different infill levels: Equivalent homogenised material concept and Theory of Critical Distances," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 42, no. 4, pp. 883–904, 2019.

[14] J. M. Mercado-Colmenero, M. A. Rubio-Paramio, M. D. La Rubia-García, and D. Lozano-Arjona, "A numerical and experimental study of the compression uniaxial properties of PLA manufactured with FDM technology based on product specifications," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, pp. 1893–1909, 2019.

[15] G. Morettini, M. Palmieri, L. Capponi, and L. Landi, "Comprehensive characterization of mechanical and physical properties of PLA structures printed by FFF-3D-printing process in different directions," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 7, pp. 1111–1122, 2022.

[16] M. Algarni, "The influence of raster angle and moisture content on the mechanical properties of PLA parts produced by fused deposition modeling," *Polymers*, vol. 13, no. 2, Art. no. 237, 2021.

[17] H. Le Trung, P. Cao Hung, Q. Nguyen Thanh, and D. Nguyen Thuan Hai, "Research and analysis on the durability of the chassis of the shallot planting machine," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 16, no. 1, pp. 32704–32711, 2026.
[18] H. Chen, S. Dai, M. Ou, S. Li, C. Wang, Z. Li, G. Wang, Y. Chen, and W. Jia, "Multibody dynamics simulation and vibration test for high clearance orchard sprayer," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 16, Art. no. 8058, 2022.