

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño de extrusora para línea de reciclaje de botellas de
tereftalato de polietileno**

Trabajo de graduación presentado por Saúl Eduardo de León Palencia
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala, 2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Diseño de extrusora para línea de reciclaje de botellas de
tereftalato de polietileno**

Trabajo de graduación presentado por Saúl Eduardo de León Palencia
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala, 2025

Vo.Bo. Asesor



Ing. Rony José Herrarte Estévez

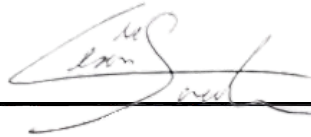
Vo.Bo. Terna Examinadora



Ing. Gustavo Adolfo Barrera Noriega



Ing. Rony José Herrarte Estévez



Ing. César Antonio Saavedra Monterroso

Fecha de aprobación de examen de graduación: Guatemala, 21 de noviembre de 2025.

El presente trabajo de graduación, diseño de extrusora para línea de reciclaje de botellas de tereftalato de polietileno, es el fruto de mi formación en Ingeniería Mecánica en la Universidad del Valle de Guatemala. Este proyecto surge de la inquietud por aplicar la ingeniería a un problema ambiental tangible en Guatemala: la gestión de residuos de PET, proponiendo un diseño técnico para su reciclaje y valorización.

La elaboración de esta trabajo de graduación representó un proceso de investigación, diseño conceptual, cálculos detallados y simulación. Se enfocó en desarrollar una solución de ingeniería viable, considerando la selección de materiales con potencial disponibilidad local y la creación de documentación técnica fundamental. La construcción física y las pruebas experimentales del prototipo quedan fuera de los límites de este estudio, siendo los resultados de rendimiento estimaciones que requerirían validación empírica.

Agradezco a la Universidad del Valle de Guatemala, mi casa de estudios, a la Facultad de Ingeniería y al Departamento de Ingeniería Mecánica, por la sólida formación y el entorno que impulsaron mi desarrollo.

Mi más profundo agradecimiento al Ing. Rony Herrarte, mi asesor, por su invaluable guía, paciencia y acertadas orientaciones que fueron cruciales para el desarrollo y la conclusión de este trabajo.

Extiendo mi gratitud a la Fundación JBG, de manera especial a Mayra Monzón, por su apoyo y confianza en mi formación.

A mi familia, pilar fundamental en mi vida, gracias por su amor incondicional y aliento constante. De forma muy especial, a mi mamá y a mi hermana, por estar siempre presentes. A la Residencia Universitaria Ciudad Vieja, mi hogar durante tantos años de formación, gracias por el ambiente y las vivencias que marcaron esta etapa.

Este trabajo es un reflejo del aprendizaje adquirido, del esfuerzo y un intento por contribuir, desde mi campo, a soluciones sostenibles.

Prefacio	v
Lista de figuras	x
Lista de cuadros	xi
Resumen	xiii
1. Introducción	1
2. Justificación	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. Marco teórico	7
4.1. Tereftalato de polietileno	7
4.1.1. Tereftalato de polietileno en la industria	8
4.2. Línea de reciclaje PET	9
4.2.1. Funcionamiento y máquinas que componen una línea de reciclaje	9
4.3. Máquina extrusora	10
4.3.1. Funcionamiento	10
4.3.2. Componentes de una máquina extrusora	11
4.4. Cañón de extrusión	12
4.4.1. Forma de calentarse	12
4.4.2. Zonas de calentamiento	13
4.4.3. Zona de transición/compresión	13
4.5. Ecuaciones de diseño	14
4.5.1. Diseño del tornillo extrusor	14
4.5.2. Potencia requerida - extrusora	15
4.5.3. Transmisión de potencia - caja reductora	15
4.5.4. Análisis de esfuerzos en engranajes	16

4.5.5. Análisis de esfuerzos en cañón extrusor	16
4.5.6. Análisis y selección de resistencias térmicas	17
5. Metodología	19
5.1. Definición de requisitos	21
5.2. Partes de la máquina	22
5.3. Diseño	23
5.4. Cálculos	26
5.4.1. Diseño de tornillo extrusor	27
5.4.2. Estimación de la potencia requerida	30
5.4.3. Selección del motor eléctrico	31
5.4.4. Análisis de esfuerzos en cañón extrusor	33
5.4.5. Análisis y selección de resistencias térmicas	36
5.4.6. Análisis de elementos de sujeción del cañón	39
5.4.7. Selección y diseño de componentes adicionales	41
5.4.8. Simulación y verificación estructural en Ansys	45
6. Resultados y análisis	65
6.0.1. Diseño geométrico del sistema de extrusión	67
6.0.2. Análisis funcional y de rendimiento	68
6.0.3. Validación estructural y de componentes	69
6.0.4. Sistema de accionamiento y control	70
6.0.5. Sistema de calentamiento	71
6.0.6. Consideraciones de seguridad y usuario	71
7. Conclusiones	73
8. Recomendaciones	75
9. Bibliografía	77
10. Anexos	79
10.1. Manuales	79
10.1.1. Manual de instalación	79
10.1.2. Manual de uso	87
10.1.3. Manual de mantenimiento	94
10.2. Cotizaciones	105
10.2.1. Resistencias térmicas	105
10.3. Construcción	107
10.3.1. Diagrama eléctrico	107
10.3.2. Planos extrusora	110

Lista de figuras

1. Diámetro de 67 mm del tornillo extrusor	24
2. Diámetro de 75 mm del interior del enchaquetado	24
3. Zona de alimentación	25
4. Zona de transición	25
5. Zona de dosificación	26
6. Representación de las secciones del cañón extrusor	28
7. Representación de la dimensión del ancho y profundidad del filete	28
8. Representación gráfica de la transferencia de energía en el sistema	38
9. Representación en un diagrama de <i>Sankey</i> de la transferencia de energía	38
10. Representación de las secciones del cañón extrusor con resistencias térmicas	39
11. Representación gráfica de la transferencia de energía con el aislante	44
12. Diagrama de Sankey de la transferencia de energía con el aislante	44
13. calidad del mallado basado en <i>skewness</i>	46
14. calidad del mallado basado en <i>element quality</i>	47
15. mallado del tornillo extrusor	47
16. cargas y soportes aplicados en la simulación	48
17. esfuerzo total máximo de 31.21 MPa en el tornillo extrusor	49
18. deformación total máxima de 0.0043061 mm. en el tornillo extrusor	49
19. factor de seguridad mínimo obtenido	50
20. calidad del mallado basado en <i>skewness</i> - filetes	51
21. calidad del mallado basado en <i>element quality</i> - filetes	52
22. mallado en tornillo extrusor - filetes	52
23. cargas aplicadas en tornillo extrusor - filetes	53
24. deformación total máxima de 0.064373 mm en el tornillo extrusor - filetes	53
25. esfuerzo total máximo de 222.58 MPa en el tornillo extrusor - filetes	54
26. calidad del mallado basado en <i>skewness</i> tornillo ref 1	55
27. calidad del mallado basado en <i>element quality</i> tornillo ref 1	56
28. calidad del mallado basado en <i>skewness</i> filetes ref 1	56
29. calidad del mallado basado en <i>element quality</i> filetes ref 1	57
30. calidad del mallado basado en <i>skewness</i> tornillo ref 2	57
31. calidad del mallado basado en <i>element quality</i> tornillo ref 2	58
32. calidad del mallado basado en <i>skewness</i> filetes ref 2	58
33. calidad del mallado basado en <i>element quality</i> filetes ref 2	59

34. esfuerzo total máximo de 56.57 MPa en el tornillo extrusor	60
35. deformación máxima de 0.0054 mm en el tornillo extrusor	60
36. factor de seguridad resultante tornillo extrusor refinamiento malla	61
37. esfuerzo total máximo de 626.29 MPa en el tornillo extrusor - filetes	61
38. esfuerzo total máximo de 626.29 MPa en el tornillo extrusor - filetes 2	62
39. deformación máxima de 0.067 mm en el tornillo - filetes	62
40. factor de seguridad resultante tornillo extrusor - filetes refinamiento malla	63
41. esfuerzo total máximo de 174.55 MPa en el tornillo extrusor - raíz filetes	63
42. factor de seguridad resultante tornillo extrusor - raíz filetes refinamiento malla	64

Lista de cuadros

1. Cumplimiento detallado de requisitos del diseño conceptual	65
2. Parámetros geométricos principales del sistema de extrusión.	68
3. Parámetros funcionales y de rendimiento clave del diseño.	69
4. Resumen de validación estructural de componentes críticos.	70
5. Componentes seleccionados del sistema de accionamiento y control.	71
6. Especificaciones del sistema de calentamiento.	71
7. Cumplimiento de requisitos de seguridad y usuario en el diseño conceptual.	72

Se diseñó una extrusora de plástico tereftalato de polietileno (PET) para formar parte de una línea de reciclaje con capacidad de 150 kg/h con la finalidad de darle un segundo uso a este material. Para esto, se dimensionó la entrada de material triturado hacia el cañón de extrusión junto con las resistencias térmicas para calentarlo.

La determinación de la cantidad de material que entraría al ciclo se hizo considerando el volumen de trabajo del resto de las máquinas que se encontraban en la línea de reciclaje, como lo son: la trituradora, desetiquetadora, máquina de lavado y peletizadora. La trituradora es la encargada de preparar el material para el proceso de extrusión. Además de esto, se presentaron los planos junto con el listado de materiales.

El proceso de diseño contempló la creación de un manual de instalación, uso y mantenimiento. Además, se buscó que los materiales para una futura fabricación se encontraran de manera local en Guatemala.

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero ampliamente utilizado en la industria, especialmente en la fabricación de recipientes como botellas debido a sus propiedades únicas como alta resistencia química, térmica y a la corrosión, además de su transparencia y capacidad de reciclaje. Sin embargo, el manejo inadecuado de los residuos de PET ha llevado a problemas ambientales significativos, particularmente en países como Guatemala, donde la acumulación de este material en vertederos clandestinos ha aumentado. Este contexto resalta la necesidad urgente de soluciones eficientes para el reciclaje del PET, convirtiendo el desafío ambiental en una oportunidad para innovar en prácticas sostenibles.

El presente trabajo se enfoca en el diseño y evaluación de la viabilidad de una extrusora de PET que se integre dentro de una línea de reciclaje, con la capacidad de procesar 150 kg/h de material. La extrusora es un componente crucial en el proceso de reciclaje, ya que permite la transformación del PET triturado en nuevos productos mediante la aplicación de calor y presión a lo largo de un cañón especializado. Este proyecto no solo busca reducir la contaminación por plásticos en Guatemala, sino también proporcionar un modelo replicable para otras regiones con desafíos similares.

El desarrollo de este proyecto implica el diseño detallado del cañón de extrusión, la selección de materiales locales y la creación de manuales de instalación, uso y mantenimiento. Además, se espera que el diseño cumpla con un factor de seguridad adecuado y se realicen las pruebas necesarias para garantizar su funcionamiento eficiente y seguro. A través de este trabajo, se pretende contribuir significativamente a la mitigación del impacto ambiental del PET, promoviendo prácticas sostenibles y ofreciendo una solución práctica a uno de los problemas más urgentes en la gestión de residuos.

El plástico PET, ampliamente utilizado en la industria para fabricar recipientes como botellas, representa un desafío ambiental significativo en Guatemala. La inadecuada gestión de este material ha llevado a una acumulación preocupante en vertederos clandestinos tanto en la ciudad capital como en otras regiones del país, ante la falta de métodos efectivos de reutilización (De Paz, 2021; Gómez Serranato, 2016). Esta problemática no solo afecta el entorno natural sino también la salud pública, lo que marca la necesidad urgente de desarrollar soluciones de reciclaje eficientes.

Dada esta situación, se propone la implementación de una línea de reciclaje dedicada exclusivamente al PET, donde la extrusión es un componente crucial. El sistema de extrusión eleva la temperatura del material triturado a lo largo del cañón de la máquina, lo que facilita su transformación en nuevos productos. Esta tecnología no solo pretende mitigar el impacto ambiental del desecho de PET, sino que también ofrece una oportunidad para innovar en las prácticas de gestión de residuos de las municipalidades guatemaltecas (Gómez Serranato, 2016).

El propósito de este trabajo es diseñar y evaluar la viabilidad de una máquina extrusora de PET que se integre dentro de una línea de reciclaje, con el objetivo de proporcionar una solución práctica y sostenible al problema del PET no reciclado. Se espera que este proyecto contribuya significativamente a la reducción de la contaminación por plásticos en Guatemala, ofreciendo además un modelo replicable para otras regiones con desafíos similares.

3.1. Objetivo general

Analizar y diseñar una extrusora de PET dentro del montaje de una línea de reciclaje con capacidad de 150 kg/h.

3.2. Objetivos específicos

- Diseñar el cañón de extrusión para procesar un flujo de 150 kg/h de PET.
- Diseñar los componentes de una extrusora con un factor de seguridad mayor o igual a 2.
- Diseñar la extrusora con materiales que se encuentren localmente en Guatemala.
- Presentar los planos para la manufactura de la extrusora, con la lista de materiales y elementos necesarios.
- Crear manuales de instalación, uso y mantenimiento.

4.1. Tereftalato de polietileno

Es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol; además de esto pertenece al grupo de materiales del tipo poliésteres. Tiene la característica de ser un termoplástico lineal además de tener un alto grado de cristalinidad. Este material tiene la capacidad de ser procesado por diferentes procesos como lo pueden ser: extrusión, inyección, inyección y soplado, soplado de preforma y termoconformado (Santamarina, 2015).

Dentro de sus características más importantes están (Juul y Pet, 2015) :

- Alta transparencia, admite colorantes.
- Alta resistencia a la corrosión y desgaste.
- Alta resistencia química y térmica.
- Buena barrera contra CO_2 , aceptable barrera a O_2 y humedad.
- Reciclable pero baja su viscosidad con el recalentamiento.
- Tiene una densidad de 1370 kg/m^3 .

Entre sus ventajas, se encuentra que cuenta con propiedades únicas como el brillo, la transparencia, la barrera a gases y aromas, la resistencia al impacto y la termoformabilidad; además, su costo se ha reducido con el paso de los años, lo que lo convierte en un material ampliamente utilizado (Santamarina, 2015).

4.1.1. Tereftalato de polietileno en la industria

Empaque

Por su impermeabilidad a los gases, el PET abarca casi el 100 % del mercado de botellas retornables y no retornables para bebidas carbonatadas. Las firmas de maquinaria han contribuido en gran medida a impulsar la evolución rápida de los envases; por ello, hoy se encuentran disponibles recipientes para llenado a temperaturas normales y para llenado en caliente. Los tarros de boca ancha son utilizados en el envasado de conservas alimenticias (Bolaños Zea, 2019).

Entre los múltiples usos dados al PET, debido a su durabilidad, estabilidad dimensional e insensibilidad a la humedad excelentes, sobresale su aplicación en la fabricación de envases de bebidas carbonatadas y de empaques de alimentos, ya que no deteriora ni causa efectos de toxicidad a estos productos (Bolaños Zea, 2019).

La participación del PET dentro de este mercado es en:

- Bebidas Carbonatadas
- Agua purificada
- Aceite
- Conservas
- Cosméticos
- Detergentes y productos químicos
- Productos farmacéuticos

Electromécanica y electrónica

Este segmento abarca diversos tipos de películas y aplicaciones, desde las películas ultradelgadas para capacitores de un micrómetro o menos, hasta de 0.5 mm, utilizadas para el aislamiento de motores (Davies, 1990).

Debido a su alta resistencia dieléctrica y mecánica, el PET se utiliza como aislante de ranuras y fases en motores, condensadores, bobinas y transformadores. Asimismo, se emplea en la fabricación de conectores eléctricos de alta densidad, bloques terminales, circuitos integrados y partes electromecánicas, reemplazando de este modo a los materiales termoestables (Davies, 1990).

Fibras

En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar una gran variedad de telas y prendas de vestir. La ropa fabricada con esta fibra es resistente a las arrugas. Estas

fibras son conocidas comercialmente como Dacron y Fortrel, y son ampliamente usadas en bienes de consumo como prendas de vestir y textiles (Alam et al., 2016).

También se fabrican, con el PET, telas no tejidas. Debido a su resistencia, el PET se emplea en textiles tejidos y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas. Su baja elongación y alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras. Su resistencia química permite aplicarla en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales. El poliéster tiene también una aplicación médica: debido a su fuerza, es utilizado en cirugías de reconstrucción de tejidos dañados (Davies, 1990).

Industria mecánica

El PET se utiliza en la fabricación de repuestos que requieren superficies duras, planas y buena estabilidad dimensional. Por ejemplo, en engranajes, levas, cojinetes, pistones y en bastidores de bombas que soportan elevadas fuerzas de impacto. Los compuestos reforzados de PET (prfv) se emplean para fabricar tapas de distribuidores y componentes de pintura exterior para automóviles (Hachi Quintana y Rodríguez Mejía, 2010).

4.2. Línea de reciclaje PET

Hay tres formas principales de aprovechar el PET al momento en que este llega al final de su vida útil: reciclado mecánico, químico o energético, de forma que este material se utilice como fuente de energía (Hachi Quintana y Rodríguez Mejía, 2010).

Existen diferentes máquinas que componen una línea de reciclaje, es decir, diferentes fases para este tipo de procesos; esto con el objetivo de optimizar el proceso y mejorar la calidad al momento de reciclar y separar todos los elementos (Zabala Celi et al., 2018).

4.2.1. Funcionamiento y máquinas que componen una línea de reciclaje

- Separadora el proceso de separación del material empieza con la alimentación de las balas de plástico a la cizalla, que se encargará de dosificar el material seccionándolo en trozos adaptables a la producción. Después del seccionado, una cinta transportadora llevará el material al tromel donde se realiza una separación mecánica de los elementos impropios. A la salida del tromel se encuentra una segunda cinta que traslada el material a la mesa de selección, donde un conjunto de personas realiza una separación manual, depositando los impropios en contenedores (Quintero Díaz, 2016).
- Trituradora la fase de trituración primaria está constituida por un molino desgarrador, que se encarga de fragmentar el material con el objetivo de reducirlo al tamaño necesario (según el tipo de material y la parrilla que lleve el molino). El material desgarrado cae a una cinta transportadora que alimenta una tolva. A continuación, el material es dosificado y transportado hasta llegar a la tina de prelavado donde comienza la siguiente fase (Quintero Díaz, 2016).

- Tina de prelavado en el prelavado se produce una primera limpieza del material donde los impropios adheridos al plástico son decantados hacia la parte inferior de la tina. Gracias a los inyectores de agua, las partículas de plástico permanecen en la superficie mientras que los impropios se decantan. A la salida de la tina se encuentra la lavadora que elimina parte del agua del material y lo deposita sobre la cinta transportadora que va al molino granulador. El rechazo producido en la tina se dirige a un sinfín donde se produce una ligera separación de agua y el material rechazado (Oviedo, 2014).
- Trituradora secundaria (peletizadora) aquí el molino granulador o peletizadora tritura el material dejándolo mucho más fino. Una vez granulado, el material pasa por un alimentador de sinfín que lo llevará a la fase de lavado (Oviedo, 2014).
- Lavadora en esta fase el material entra a la balsa de lavado, donde se realiza un lavado exhaustivo. Los residuos se decantan al fondo de la balsa y son extraídos por un transportador lineal de placas. El plástico sale de la balsa con bastante humedad, por lo que es transportado por un sinfín a la centrífuga, donde se le quita parte del agua, dejándolo aproximadamente con un 25 % de humedad (Oviedo, 2014).
- Secadora en la última fase, el material mediante transporte neumático es conducido al silo pulmón que extrae el material mediante sinfines y lo dosifica a la estrujadora, donde se produce una compactación y secado del material, reduciendo la humedad hasta un 9 % (Oviedo, 2014).

Además de estas máquinas que componen el sistema principal de reciclaje, se cuenta con máquinas auxiliares que se encargan de transportar y realizar procesos menores para el óptimo funcionamiento de una línea:

- cinta transportadora: orienta la separación de sólido-líquido simultáneamente del material.
- estrujadora: orienta, compacta y separa sólidos-líquidos de forma simultánea.
- transportador por sinfín: orienta la alimentación y dosificación del material.

4.3. Máquina extrusora

La extrusión de plásticos es un proceso importante en la industria para la obtención de plásticos en volumen y producción, este proceso es continuo, en donde la resina PET es sometida a altas temperaturas y fricción para su fundición. Además de esto es forzada a pasar por un molde también conocido como dado que le otorga una forma definida para luego ser enfriada, y este proceso es utilizado para la fabricación de tubos, perfiles, películas, mangueras, láminas y filamentos.

4.3.1. Funcionamiento

El material ingresa a la máquina en forma de *pellet*, generalmente de forma esférica o cilíndrica. Ingresa a través del sistema de alimentación (embudo) hacia el cañón, que se

encuentra previamente caliente, y que cuenta con un tornillo de extrusión el cual empuja al material a lo largo del cañón, además de generar presión y aumentar la temperatura para hacer homogéneo el material que se extruye.

El cañón extrusor se divide en 3 zonas importantes que lo son:

- Zona de alimentación, acá inicia la extrusión y es la sección de mayor profundidad; su función principal es compactar el material y transportar el PET a la siguiente zona.
- Zona de transmisión, su función principal es llevar el material a su punto de funcionamiento y transportarlo a la siguiente zona.
- Zona de dosificación, acá la presión es total y el material se encuentra totalmente fundido para salir por la boquilla.

4.3.2. Componentes de una máquina extrusora

- Tornillo de extrusión, es el componente principal dentro del cañón de extrusión, encargado de transportar, comprimir, fundir y homogeneizar el material plástico a lo largo del proceso de extrusión. Su diseño incluye diferentes zonas: alimentación, compresión y dosificación, las cuales permiten un control preciso del flujo y la temperatura del material. Su geometría y relación de compresión son clave para optimizar la plastificación del PET reciclado.
- Cañón de extrusión, también conocido como cilindro o barril, es la estructura que contiene el tornillo de extrusión y en la que ocurre el proceso de fusión del material plástico. Está fabricado con materiales resistentes al desgaste y la corrosión, debido a las altas temperaturas y presiones a las que se somete el PET reciclado. Su función es proporcionar el soporte mecánico para el tornillo y distribuir el calor de manera uniforme mediante los cilindros de calentadores.
- Cilindro de calentadores, son los dispositivos de calefacción que rodean el cañón de extrusión y generan el calor necesario para fundir el material plástico. Generalmente, consisten en resistencias eléctricas controladas por termopares para mantener temperaturas óptimas y evitar la degradación térmica del PET reciclado. Su distribución en zonas permite un control preciso de la temperatura a lo largo del proceso.
- Tolva, es el depósito donde se colocan los pellets o escamas de PET reciclado antes de ingresar al tornillo de extrusión. Su diseño debe garantizar una alimentación continua y uniforme, evitando atascos o fluctuaciones en el flujo de material. Puede incluir sistemas de deshumidificación para reducir la humedad del PET, previniendo defectos en la extrusión.
- Cabezal y boquilla, es el componente final del proceso de extrusión, donde el material fundido es dirigido hacia la boquilla. Su diseño define la geometría final del producto extruido, garantizando una salida homogénea y con la presión adecuada. La boquilla

puede ser intercambiable para producir distintos perfiles o filamentos según los requerimientos del proceso. En la extrusión de PET reciclado, es crucial evitar turbulencias y asegurar una distribución uniforme del material.

4.4. Cañón de extrusión

El cañón de extrusión es un componente fundamental en el diseño de una extrusora, ya que alberga el tornillo y proporciona el entorno térmico y mecánico necesario para el proceso de plastificación del PET reciclado. Debido a su papel crucial en la transmisión de calor, el control de la presión y la resistencia al desgaste. Además, se explorarán consideraciones clave como la influencia de la relación longitud-diámetro (L/D).

4.4.1. Forma de calentarse

El proceso de calentamiento en el cañón extrusor es fundamental para la fusión y homogeneización del PET reciclado. Si bien el calor conducido desde el cilindro contribuye a la formación inicial de una capa de fusión en el polímero, la mayor parte de la energía utilizada para fundir el material proviene del calor generado por la fricción entre el polímero y la pared del cañón. Esto se debe a que los polímeros son malos conductores de calor, lo que hace que el calentamiento por cizallamiento (generado por la rotación del husillo y la fricción interna del material) sea el principal mecanismo de fusión. Este fenómeno es crucial en el diseño del sistema de calentamiento del cañón, ya que influye en la eficiencia térmica y en la calidad del material extruido.

El control de la temperatura en el cilindro extrusor es un factor crítico en el proceso, ya que un sobrecalentamiento puede afectar negativamente la calidad del material extruido. Si la temperatura supera el punto de fusión del PET, la viscosidad del material fundido disminuye, lo que reduce el esfuerzo de cizallamiento generado entre el tornillo y el polímero. Esto provoca una menor velocidad de fusión y puede afectar la estabilidad del proceso, disminuyendo la eficiencia de producción. Por lo tanto, es fundamental estimar y controlar adecuadamente el calor conducido en el cañón para evitar sobrecalentamientos y mantener un equilibrio térmico que optimice la extrusión del PET reciclado.

Para comprender bien el proceso de calentamiento y extrusión, es importante reconocer que la eficacia de la temperatura del cilindro en la primera zona es fundamental. En la sección de alimentación de la extrusora, los sólidos siempre están muy por debajo de la temperatura de fusión (a menos que se alimente material ya fundido, lo cual no es común en extrusión debido a la dificultad de manejar y dosificar un polímero en estado líquido de manera eficiente). En esta etapa, el husillo transporta el material de manera similar a un taladro helicoidal, ya que su rotación empuja los gránulos o escamas de PET hacia adelante a través de la rosca, generando un movimiento axial y comprimiéndolos progresivamente contra las paredes del cañón. A medida que avanzan, los sólidos comienzan a compactarse debido a las fuerzas de arrastre y fricción: la primera es el resultado de la interacción entre el husillo y el material, que lo obliga a moverse en dirección del flujo, mientras que la segunda proviene del contacto entre las partículas y las paredes del cañón, generando resistencia

y contribuyendo al calentamiento del material por cizallamiento (Hernández Olvera et al., 2010).

4.4.2. Zonas de calentamiento

Una máquina extrusora puede tener cuatro o más zonas de temperatura en el cilindro, pero las zonas básicas son: alimentación, transición o compresión y dosificación (Pedroza Pulgarin, 2008).

- La zona de alimentación. Esta sección suele representar aproximadamente el 25 % al 50 % de la longitud total del husillo y es la primera etapa del proceso de extrusión. Su función principal es recibir y transportar los gránulos de PET desde la garganta de alimentación, compactándolos progresivamente mientras avanzan hacia la siguiente etapa. Los filetes del husillo en esta sección son más profundos para permitir el ingreso del material, lo que genera espacios llenos de aire entre los gránulos. Si este aire no es evacuado adecuadamente a través de un sistema de ventilación en la garganta de alimentación, puede quedar atrapado en el material fundido y causar defectos en la extrusión, como burbujas o manchas en la pieza final.
- La zona de transición/compresión. Esta sección suele representar aproximadamente el 25 % al 50 % de la longitud del husillo y es donde ocurre el cambio más significativo en la morfología del material. A medida que los gránulos avanzan, los filetes del husillo se vuelven más estrechos, reduciendo el volumen disponible y aumentando la presión sobre el material. Este aumento de presión, junto con la fricción y el calor generado tanto por el cizallamiento como por los calentadores externos, provoca la fusión progresiva del PET. En esta zona, el material cambia de estado sólido a fundido y adquiere una consistencia homogénea adecuada para la extrusión.
- La zona de dosificación. Esta sección también representa aproximadamente el 25 % de la longitud del husillo y es donde el material fundido se homogeniza y se prepara para su salida a través del cabezal y la boquilla. Aquí, el husillo genera una contrapresión controlada, que ayuda a eliminar burbujas de aire y mejora la uniformidad del flujo del polímero. La contrapresión es generada por la resistencia del material al paso a través del husillo y puede regularse mediante el diseño del tornillo y la velocidad de extrusión. Esto es crucial para garantizar una extrusión estable y un perfil de viscosidad adecuado.

4.4.3. Zona de transición/compresión

En esta parte específica, la mayor parte de la fusión del polímero tiene lugar. También es aquí donde se produce el cambio de profundidad entre la alimentación y la dosificación del tornillo, y donde se aplica fuerza para lograr la fusión del polímero. Los materiales poliméricos suelen tener un punto de fusión bien definido, y cuando se alcanza este punto, la densidad del material se vuelve una característica crucial a considerar al diseñar un tornillo extrusor. Por lo tanto, la zona de compresión debe ser diseñada no solo para compactar

el material, sino también para adaptarse a los cambios de volumen que ocurren cuando el material pasa de sólido a líquido.

4.5. Ecuaciones de diseño

Este apartado recopila las ecuaciones fundamentales empleadas en el diseño conceptual de la extrusora y sus componentes principales.

4.5.1. Diseño del tornillo extrusor

- **Relación longitud/diámetro (L/D)** define la esbeltez del tornillo.

$$L/D = \frac{L}{D} \quad (1)$$

donde L es la longitud activa del tornillo y D es el diámetro nominal (H. F. Giles et al., 2013).

- **Diámetro de raíz (D_{root})** diámetro del núcleo del tornillo bajo el canal.

$$D_{\text{root}} = D - 2H \quad (2)$$

donde H es la profundidad del canal en la zona considerada (H_f en alimentación, H_m en dosificación).

- **Caudal neto de la extrusora (Q)** flujo másico de salida, resultante del balance entre flujo de arrastre y flujo de presión (Tadmor y Gogos, 2006).

$$Q = Q_d - Q_{p,mass} \quad (3)$$

donde Q_d es el flujo de arrastre másico y $Q_{p,mass}$ es el flujo de presión másico retrógrado.

- **Flujo de arrastre (Q_d)** generado por el giro del tornillo. Depende de la geometría y la velocidad N (rev/s).

$$Q_d = \alpha N = \left(\frac{1}{2} \pi D W H \cos \phi \rho_m F_d \right) N \quad (4)$$

donde W es el ancho del canal, H la profundidad del canal (usualmente H_m en dosificación), ϕ el ángulo de la hélice, ρ_m la densidad del fundido y F_d un factor de forma cercano a 1 (Tadmor y Gogos, 2006).

- **Flujo de presión másico ($Q_{p,mass}$)** flujo retrógrado debido al gradiente de presión ΔP sobre una longitud L_{zone} .

$$Q_{p,mass} = Q_{p,vol} \times \rho_m = \left(\frac{\beta \Delta P}{\mu} \right) \rho_m = \left(\frac{W H^3 \sin^2 \phi F_p \Delta P}{12 \mu L_{zone}} \right) \rho_m \quad (5)$$

donde H y L_{zone} suelen referirse a la zona de dosificación (H_m, L_m), μ es la viscosidad del fundido y F_p es un factor de forma cercano a 1 (Tadmor y Gogos, 2006). β es el factor geométrico del flujo de presión.

4.5.2. Potencia requerida - extrusora

- **Potencia para calentar y fundir polímero** (P_{poly}) energía teórica mínima requerida por el material.

$$P_{poly} = \dot{m}[C_{ps}(T_m - T_{in}) + \Delta H_f + C_{pm}(T_{out} - T_m)] \quad (6)$$

donde \dot{m} es el caudal másico (kg/s), C_{ps}, C_{pm} son calores específicos (sólido, fundido), ΔH_f el calor latente de fusión y T_{in}, T_m, T_{out} las temperaturas de entrada, fusión y salida (Tadmor y Gogos, 2006).

- **Potencia de bombeo** ($P_{pump,fluid}$) potencia teórica para mover el fluido contra la presión.

$$P_{pump,fluid} = Q_{vol}\Delta P = \frac{\dot{m}}{\rho_m}\Delta P \quad (7)$$

donde Q_{vol} es el caudal volumétrico. La potencia real consumida por el motor para bombear será mayor debido a ineficiencias.

- **Potencia del motor desde par** (P_{motor}) relaciona potencia (kW), par (N·m) y velocidad (RPM).

$$P_{motor}(\text{kW}) = \frac{T_{motor}(\text{N}\cdot\text{m}) \times N_{motor}(\text{RPM})}{9550} \quad (8)$$

inversamente, $T_{motor} = (P_{motor} \times 9550)/N_{motor}$.

4.5.3. Transmisión de potencia - caja reductora

- **Relación de reducción total** (i_{total})

$$i_{total} = \frac{N_{entrada}}{N_{salida}} \quad (9)$$

donde $N_{entrada}$ es la velocidad del motor y N_{salida} la velocidad deseada del tornillo.

- **Reducción en múltiples etapas**

$$i_{total} = i_1 \times i_2 \times \dots \times i_n \quad (10)$$

donde i_1, i_2, \dots son los ratios de cada etapa de engranajes.

- **Par tursor de salida** (T_{out}) par disponible en el eje de salida del reductor.

$$T_{out}(\text{N}\cdot\text{m}) = \frac{P_{entrada}(\text{kW}) \times \eta_{total} \times 9550}{N_{salida}(\text{RPM})} \quad (11)$$

donde η_{total} es la eficiencia total del reductor (producto de eficiencias por etapa, ≈ 0.98 por etapa helicoidal).

- **Par nominal requerido** ($T_{nominal}$) capacidad de par que debe tener el reductor según catálogo.

$$T_{nominal} \geq T_{out} \times SF \quad (12)$$

donde SF es el factor de servicio seleccionado según la aplicación (por ejemplo, 1.5-1.75 para extrusora).

4.5.4. Análisis de esfuerzos en engranajes

Se verifican los esfuerzos en los dientes para prevenir fallas (American Gear Manufacturers Association, [2004]; Shigley et al., [2012]).

- **Carga tangencial** (W_t) fuerza que transmite el par (T) en el diámetro de paso (d).

$$W_t = \frac{2T}{d} \quad (13)$$

- **Esfuerzo de flexión** (σ_b) tensión en la raíz del diente (conceptual).

$$\sigma_b = \left(\frac{W_t}{F \cdot m \cdot J} \right) \times K_o K_v K_s K_m K_B \dots \quad (14)$$

donde F es ancho de cara, m módulo, J factor geométrico y K_x son factores agma de corrección.

- **Esfuerzo de contacto** (σ_c) presión superficial en el flanco (conceptual).

$$\sigma_c = C_p \sqrt{\left(\frac{W_t}{F \cdot d_p \cdot I} \right) \times K_o K_v K_s K_m C_f \dots} \quad (15)$$

donde C_p depende del material, d_p diámetro del piñón, I factor geométrico y K_x, C_x son factores agma.

4.5.5. Análisis de esfuerzos en cañón extrusor

Se calculan los esfuerzos en la pared del cañón debidos a la presión interna P_i (Shigley et al., [2012]).

- **Esfuerzo tangencial** (*hoop*) (σ_t) máximo en la pared interna ($r = r_i$). Para $P_o = 0$:

$$\sigma_{t,max} = P_i \frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (16)$$

- **Esfuerzo radial** (σ_r) máximo (en compresión) en la pared interna.

$$\sigma_{r,max} = -P_i \quad (17)$$

- **Esfuerzo longitudinal** (σ_l) para cilindro cerrado equivalente.

$$\sigma_l = P_i \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (18)$$

- **Esfuerzo equivalente de Von Mises** (σ') para evaluar fluencia en estado triaxial.

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_t - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2}{2}} \quad (19)$$

- **Factor de seguridad** (fluencia)

$$FS = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (20)$$

donde S_y es el límite elástico del material del cañón a la temperatura de operación.

4.5.6. Análisis y selección de resistencias térmicas

Se estima la potencia de calefacción requerida (Incropera et al., 2011).

- **Potencia para calentar polímero** (P_{poly}) (ver ecuación 6).
- **Pérdidas por convección** (P_{conv})

$$P_{conv} = hA(T_{barrel} - T_{ambient}) \quad (21)$$

donde h es el coeficiente convectivo y A el área superficial externa.

- **Pérdidas por radiación** (P_{rad})

$$P_{rad} = \epsilon\sigma A(T_{barrel,K}^4 - T_{ambient,K}^4) \quad (22)$$

donde ϵ es emisividad, σ constante de Stefan-Boltzmann, A área y T en Kelvin.

- **Pérdidas totales** (P_{loss}) $P_{loss} = P_{conv} + P_{rad}$.
- **Energía de arranque** ($E_{startup}$) energía para calentar la masa del equipo (m_{equipo})

$$E_{startup} \approx m_{equipo}C_{p,acero}(T_{operacion} - T_{ambient}) \quad (23)$$

- **Potencia media de arranque** ($P_{startup}$)

$$P_{startup} = E_{startup}/t_{startup} \quad (24)$$

donde $t_{startup}$ es el tiempo deseado para arrancar.

Investigación previa a realizar el diseño. Ya conociendo el problema que se desea atacar, se realizará una investigación de los antecedentes en el diseño y fabricación de máquinas extrusoras, con la idea de obtener parámetros y referencias que sirvan de guía. Además, se comparará el procedimiento que se lleva a cabo con la selección de materiales y elementos que componen este tipo de máquinas con el fin de familiarizarse con el tema y conocer posibles proveedores y marcas.

Definir requisitos a cumplir Determinar el volumen de trabajo del resto de las máquinas que se encuentran en la línea, como lo son: la trituradora, desetiquetadora, peletizadora, máquina de lavado y extrusora, junto con las dimensiones que el equipo va a tener, el tipo de resistencias para calentar el cañón de extrusión, el motor y material de los elementos dentro de la extrusora, y la realización de manuales con requisitos de instalación, uso y mantenimiento.

Etapas de diseño

1. Investigación y recopilación de información. Para garantizar un diseño eficaz, se analizaron referencias de extrusoras existentes, normativas aplicables y especificaciones de los equipos relacionados en la línea de reciclaje. También se recopilaron datos sobre materiales y componentes estándar disponibles en el mercado.
2. Definición de componentes. Se definen los subsistemas principales de la extrusora:
 - zona de alimentación
 - sistema de transmisión de potencia
 - sistema de calentamiento

- husillo y cilindro de extrusión
- zona de salida del material

La definición de los componentes sirvió como base para el diseño detallado y permitió visualizar cómo interactuaban los diferentes elementos de la máquina.

3. Diseño preliminar en cad. Utilizando Autodesk Inventor®[®], se modelaron los principales componentes de la extrusora en 3D. En esta etapa, se definieron dimensiones generales, ensamblajes y configuraciones preliminares.
4. Cálculos de resistencias eléctricas. El cálculo de las resistencias eléctricas garantiza que la extrusora alcance y mantenga la temperatura óptima para la fusión del PET. Se determina la potencia necesaria considerando la capacidad térmica del material, pérdidas de calor y eficiencia del aislamiento. Además, se distribuyen estratégicamente las resistencias en el cilindro para evitar gradientes térmicos que afecten la uniformidad del fundido.
5. Cálculo de flujo dentro del cañón. Se analizó el comportamiento del material fundido dentro del cilindro. Se determina la potencia necesaria considerando la capacidad térmica del material, pérdidas de calor y eficiencia del aislamiento (Nota: Saúl, revisa este texto, es igual al del punto anterior).
6. Cálculo de motor. La selección del motor se basa en la potencia y el torque requeridos para impulsar el tornillo extrusor a la velocidad adecuada. Se consideran factores como la resistencia al flujo del material, la eficiencia del sistema de transmisión y las pérdidas mecánicas. A partir del par motor y la velocidad de giro, se determina la potencia necesaria, asegurando que el motor pueda operar de manera continua sin sobrecargas.
7. Selección del sistema de transmisión de potencia. Se evaluaron diferentes opciones de transmisión, como poleas con fajas o cadenas, asegurando que se obtenga la velocidad y el torque adecuados. Se calcularon relaciones de transmisión y eficiencia del sistema.
8. Cálculos de esfuerzos y validación estructural. Se realizaron cálculos mecánicos para determinar las cargas y esfuerzos en los elementos críticos, tales como:
 - **husillo y cilindro** evaluación de torsión y desgaste.
 - **elementos de sujeción y soportes estructurales** cálculo de esfuerzos mecánicos.
 - **transmisión de potencia** verificación de la capacidad del sistema de transmisión para soportar la carga del motor.

Para los elementos más complejos, se utilizó ANSYS para realizar análisis de esfuerzos y asegurar que el diseño resista las condiciones operativas sin fallas.

9. Selección de materiales y componentes. Se investigaron las mejores opciones de materiales para los distintos elementos de la máquina, considerando resistencia, disponibilidad y costo. También se seleccionaron componentes estándar como rodamientos, motores y elementos de sujeción.

10. Solicitud de cotizaciones. Una vez definidos los materiales y componentes necesarios, se procedió a solicitar cotizaciones a proveedores locales e internacionales para evaluar costos y disponibilidad.
11. Diseño final. Tras realizar ajustes basados en simulaciones y retroalimentación, se elaboró el diseño final de la extrusora. En esta etapa, se consolidan los modelos cad definitivos, se optimizan los materiales y se finalizan los cálculos de esfuerzos y transmisión de potencia.
12. Protocolo de pruebas. Dado que el proyecto se enfocó únicamente en el diseño de la extrusora, la validación se realizó a través de simulaciones y análisis teóricos. Se llevaron a cabo estudios de esfuerzos estructurales, transferencia de calor y dinámica de fluidos para evaluar el comportamiento del material dentro del cañón extrusor.
13. Elaboración de manuales. Se desarrollaron manuales de mantenimiento, uso y planos técnicos de la máquina. El manual de uso detalla el procedimiento de operación segura, mientras que el de mantenimiento especifica la frecuencia y métodos de inspección, limpieza y reparación de componentes críticos. Los planos técnicos incluyen vistas detalladas y especificaciones necesarias para la fabricación y el ensamblaje.

5.1. Definición de requisitos

Cuadro 1. Identificación de código

Nomenclatura	Significado
RD	Diseño
RF	Funcionamiento
RU	Usuario
RS	Seguridad

Cuadro 2. Requisitos

Código	Descripción
RD1	La zona de extrusión (enchaquetado de cada zona) debe estar unido por tornillos y tuercas que permita desarmarlo.
RD2	La zona de extrusión debe tener un largo menor a 2 m.
RD3	La zona de alimentación abarcará del 40 % al 60 % del largo del cañón.
RD4	La zona de transición abarcará del 20 % al 30 % del largo del cañón.
RD5	La zona de dosificación abarcará del 20 % al 30 % del largo del cañón.
RD6	El tamaño de la máquina debe estar entre un rango de 2.2 a 2.5 m de largo, 2.5 a 3 m de alto y 1.5 a 2.25 m de ancho .
RD7	El espacio para la máquina debe ser como mínimo de 2.75 m de largo, 2.5 m de alto y 1.5 m de ancho.
RD8	La zona de extrusión debe ser de acero inoxidable que se consiga localmente.
RD9	El molde extrusor debe ser capaz de acoplarse a la entrada de la peletizadora.
RD10	Los tornillos y tuercas debe ser estandarizadas ASTM, ISO o su equivalente en ASME que se encuentren localmente.
RF1	La capacidad de extrusión debe ser de al menos de 150 kg/h.
RF2	Debe contar con un botón de emergencia para interrumpir el proceso de extrusión.
RF3	El panel de control debe contar con un regulador de revoluciones.
RF4	El motor que transmite potencia debe ser de corriente alterna.
RF5	El motor debe entregar una potencia de 0.75 kW como mínimo.
RF6	El motor debe a girar a 445 rpm como mínimo.
RS1	El motor debe tener un sistema de protección contra sobrecarga y corto circuito.
RS2	Las zonas con partes móviles estarán cubiertas para evitar el contacto.
RS3	Debe tener una tapa de acceso el botón de encendido.
RU1	La máquina debe funcionar bajo la supervisión de un operador.
RU2	La máquina deberá contar con un instructivo de uso (manual).
RU3	Debe contar con rótulos en áreas peligrosas o calientes así como el equipo de seguridad necesario para operar la máquina.

5.2. Partes de la máquina

La máquina extrusora está compuesta por cuatro partes principales

1. base está formada por toda la estructura que se encarga de soportar los componentes que conforman la máquina.
2. tornillo o cañón extrusor cuenta con tres partes principales

Zona de alimentación. Es la primera sección del cañón y generalmente tiene una longitud de aproximadamente 1.5 a 2 veces el diámetro del mismo. En esta zona, el material es alimentado a través del husillo o tornillo sinfín y sometido a una fuerza de compresión inicial.

Zona de transición. Es la sección media del cañón, donde se produce la compresión y homogeneización del material. La longitud de esta zona es típicamente de 3 a 4 veces

el diámetro del cañón. En esta sección, el material se somete a una mayor presión y fuerza de corte, lo que ayuda a romper cualquier conglomerado de material que pueda existir y lo mezcla de manera más uniforme.

Zona de dosificación. Es la última sección del cañón, donde se funde completamente el material. La longitud de esta zona es típicamente de 2 a 3 veces el diámetro del cañón. En esta parte, la temperatura se incrementa significativamente y el material se somete a una fuerza de corte aún mayor, lo que ayuda a mezclar el material fundido de manera uniforme.

3. sección de alimentación compuesta por la tolva de alimentación, en donde se introduce el material proveniente de la máquina anterior.
4. sistema de potencia se compone del motorreductor, el cual es responsable de transmitir la potencia.

5.3. Diseño

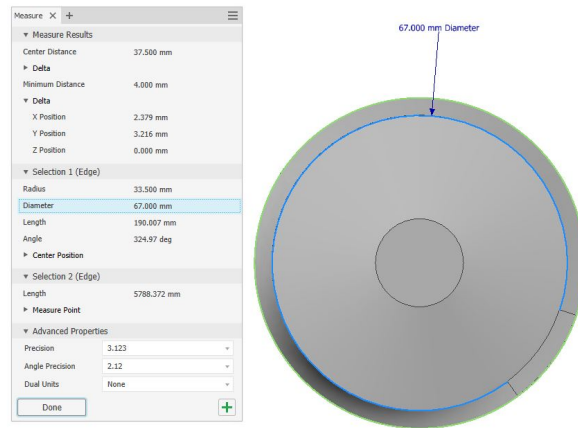
Se presenta el diseño del tornillo extrusor, un componente clave del sistema, ya que en él se inicia el proceso de calentamiento, fusión y transporte del material plástico. El tornillo se divide en tres zonas principales: alimentación, compresión y dosificación. En la zona de alimentación, el material es introducido y comienza a ser transportado; en la zona de compresión, se incrementa la presión y el material empieza a fundirse; y en la zona de dosificación, se homogeniza el polímero fundido antes de su salida. Para definir las dimensiones de cada una de estas zonas, se consideraron los requisitos RD2, RD3, RD4 y RD5 establecidos en el **Cuadro 2**, los cuales aseguran que el diseño cumpla con los criterios geométricos necesarios para un funcionamiento eficiente del sistema.

El diseño considera que la zona de extrusión no debe superar los 2 m de longitud, como se menciona en RD2. A partir de este requisito, se determinó la longitud de cada sección para distribuir correctamente el material sin exceder el límite. Además, se incluyó el diseño del enchaquetado para cada etapa, considerando que el diámetro total del tornillo extrusor es de 2.95 pulgadas (75 mm), como se muestra en la **Figura 2**. Este valor se encuentra dentro del rango típico para tornillos extrusores, que varía entre 2 y 8 pulgadas (Giles et al., 2005).

Para el diseño del tornillo extrusor se consideró la relación l/d , donde L es la longitud total de la zona de calentamiento y D el diámetro del tornillo. Una mayor relación l/d puede mejorar la tasa de producción, lograr un fundido más uniforme y aumentar la calidad del extruido. Sin embargo, tornillos excesivamente largos pueden ser difíciles de fabricar, instalar y alinear correctamente dentro del cilindro, además de aumentar los costos. En este diseño se adoptó una relación $l/d = 24:1$, adecuada para extrusoras con una capacidad de producción moderada de aproximadamente 150 kg/h. Este valor permite cumplir con los requisitos de calentamiento y transporte del material sin comprometer la facilidad de fabricación ni la operatividad del sistema. Además, al no tratarse de una extrusora de alta velocidad ni de procesos especiales, no se requiere una relación más alta como las utilizadas en aplicaciones avanzadas que superan incluso el 40:1.

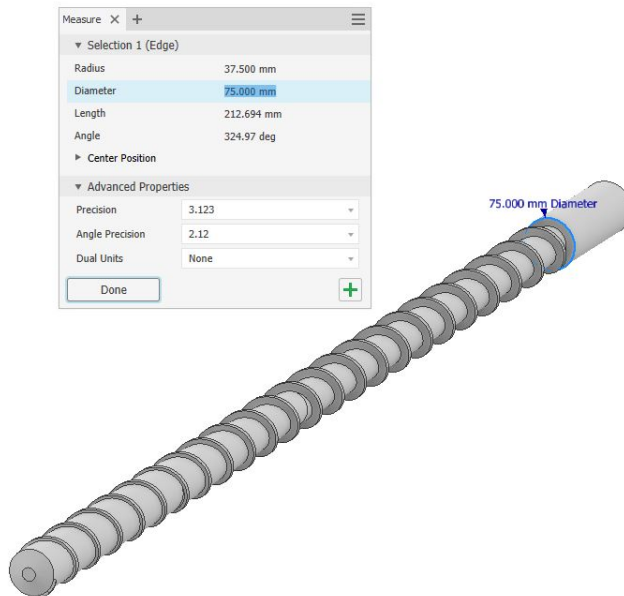
El diseño también contempla que el diámetro interno del enchaquetado sea mayor que el del tornillo extrusor, lo cual permite la formación de un canal anular por donde el material puede avanzar a lo largo del tornillo. Este espacio es esencial para que se produzca el transporte eficiente del polímero, así como para facilitar su compresión, mezclado y calentamiento progresivo en cada etapa del tornillo. La diferencia entre el diámetro del tornillo y el diámetro interno del cilindro se conoce como holgura y suele estar en el orden de 0.1 mm a 0.5 mm.

Figura 1: Diámetro de 67 mm del tornillo extrusor



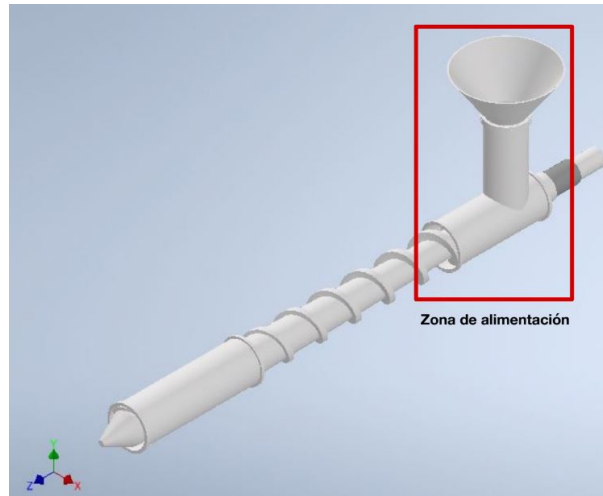
Fuente: Captura de pantalla de *Autodesk Inventor* reimpressa por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Figura 2: Diámetro de 75 mm del interior del enchaquetado



Fuente: Captura de pantalla de *Autodesk Inventor* reimpressa por cortesía de *Autodesk, Inc.*

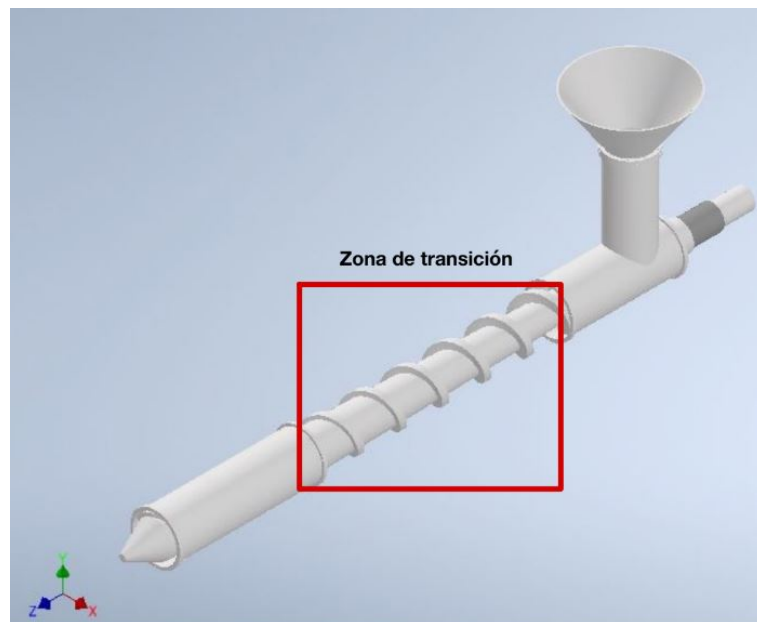
Figura 3: Zona de alimentación



Fuente: Captura de pantalla de *Autodesk Inventor* reimpressa por cortesía de *Autodesk, Inc.*

En la **Figura 3** se muestra la entrada del material ya triturado a través de la tolva de alimentación. Esta zona abarca el 50 % de la longitud de la zona de extrusión, lo que equivale a 0.9 m. El diseño de esta zona se basó en la necesidad de garantizar una alimentación continua y uniforme del material. Para ello, se determinó el diámetro interno del enchaquetado considerando el tamaño de las partículas del material de entrada que son de 2 mm a 3 mm considerando la entrada de juego de la máquina previa. Además, se estableció la geometría de la rosca del tornillo extrusor en esta sección con un paso amplio para facilitar el transporte inicial del material sin generar atascos.

Figura 4: Zona de transición

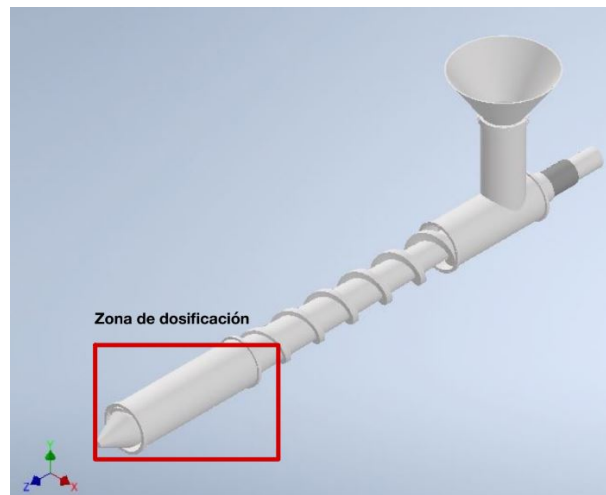


Fuente: Captura de pantalla de *Autodesk Inventor* reimpressa por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Luego de pasar por la zona de alimentación, el material ingresa a la zona de transición, representada en la **Figura 4**. Esta es una de las etapas más críticas del proceso, ya que en ella el material comienza a calentarse mediante resistencias eléctricas ubicadas a lo largo de las paredes del enchaquetado. Esta zona abarca el 25 % de la longitud de la zona de extrusión, lo que equivale a 0.45 m.

Para el diseño de esta zona, se evaluaron diferentes distribuciones de resistencias y potencias térmicas con el fin de lograr un calentamiento gradual y uniforme. La geometría del tornillo en esta sección se diseñó con una reducción progresiva del paso de rosca, lo que genera un incremento en la presión y favorece la compactación del material, eliminando aire atrapado y mejorando la transferencia de calor.

Figura 5: Zona de dosificación



Fuente: Captura de pantalla de *Autodesk Inventor* reimpressa por cortesía de *Autodesk, Inc.*

En la **Figura 5** se ilustra la zona de dosificación, donde el material alcanza la temperatura final del proceso, cercana a su punto de fusión. Esta zona ocupa el 25 % de la longitud de la zona de extrusión, equivalente a 0.45 m. Adicionalmente, se incorpora una sección cónica de 0.10 m, lo que da un total de 0.55 m hasta la salida del tornillo extrusor.

El diseño de esta zona se realizó considerando la necesidad de obtener una salida homogénea del material fundido con la presión y temperatura adecuadas. Para ello, el tornillo presenta una última reducción en el paso de rosca, permitiendo una compresión final del material. Además, se optimizó el perfil térmico de la zona con base en los requerimientos de fusión del PET, asegurando que la temperatura no exceda los límites que puedan degradar el polímero.

5.4. Cálculos

Se selecciona un rango preliminar de 2.95 in para el diámetro del tornillo extrusor, basado en valores típicos utilizados en la industria. Según (Giles et al., 2005), el rango habitual para el diseño de tornillos extrusores varía entre 70 mm (2.76 in) y 220 mm (8.66 in). Este

diámetro fue considerado en la etapa de diseño preliminar para asegurar la compatibilidad con los estándares industriales y optimizar el desempeño del proceso de extrusión.

5.4.1. Diseño de tornillo extrusor

Se presentan los cálculos detallados para estimar la velocidad de operación del tornillo y la potencia requerida, basados en la geometría definida y las propiedades asumidas del PET reciclado.

Parámetros de entrada y suposiciones

Parámetros de diseño y suposiciones

Se definieron los siguientes parámetros y suposiciones clave para el diseño del tornillo de 75 mm:

- **Caudal másico objetivo** (Q_{target}) 150 kg/h = 0.04167 kg/s. Representa el rendimiento deseado de la extrusora.
- **Material** *PET* reciclado.
- **Densidad del fundido** (ρ_m) 1200 kg/m³. Valor típico asumido para *PET* fundido a temperatura de proceso. La densidad del sólido (≈ 1370 kg/m³) es relevante para la alimentación.
- **Diámetro del tornillo** (D) 75 mm = 0.075 m. Diámetro base seleccionado para el diseño.
- **Ángulo de la hélice** (ϕ) 17.66°. Corresponde al paso cuadrado estándar (paso = diámetro), ampliamente utilizado por ofrecer un buen equilibrio entre capacidad de transporte y generación de presión (sin $\phi \approx 0.3034$, cos $\phi \approx 0.9528$) (Tadmor y Gogos, 2006).
- **Ancho del filete** (e) se estima como $e \approx 0.1 \times D = 0.0075$ m (7.5 mm) (H. F. Giles et al., 2013).

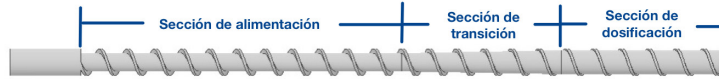
Relación longitud/diámetro (L/D) y longitud total (L) Se seleccionó una relación L/D de 24:1. Esta elección busca proporcionar longitud suficiente para una fusión completa, mezcla adecuada y presurización estable del *PET* reciclado, considerando su variabilidad, sin exceder la longitud total. Ratios entre 20:1 y 30:1 son comunes para estas aplicaciones (Tadmor y Gogos, 2006).

La longitud total activa del tornillo es:

$$L = D \times (L/D) = 0.075 \text{ m} \times 24 = 1.8 \text{ m}$$

Esta longitud cumple la restricción inicial de $L < 2$ m. Las longitudes de las zonas se definen como porcentajes de esta L : zona de alimentación $L_f = 0.9$ m, zona de transición $L_t = 0.45$ m y zona de dosificación $L_m = 0.45$ m.

Figura 6: Representación de las secciones del cañón extrusor



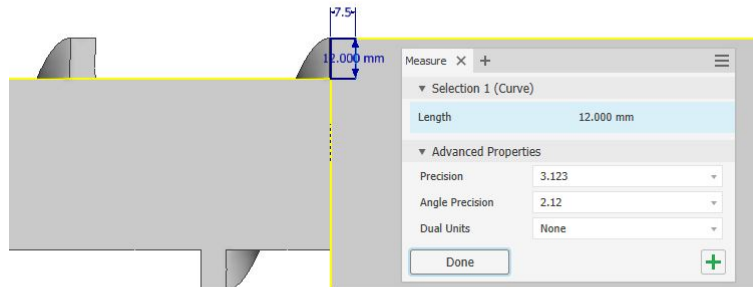
Fuente: Captura de pantalla de *Autodesk* reimpressa por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Profundidades de canal (H_m, H_f) y relación de compresión (CR) La profundidad del canal en la zona de dosificación (H_m) se estima inicialmente en $H_m = 4.0 \text{ mm} = 0.004 \text{ m}$. Este valor es un punto de partida basado en geometrías típicas, buscando un balance entre rendimiento por RPM y generación de cizalla. Se selecciona una relación de compresión (CR) de 3.0:1, valor típico para *PET* que refleja el cambio de densidad de sólido a fundido (H. F. Giles et al., 2013).

La profundidad del canal en la zona de alimentación (H_f) se calcula como:

$$H_f = CR \times H_m = 3.0 \times 4.0 \text{ mm} = 12.0 \text{ mm} = 0.012 \text{ m}$$

Figura 7: Representación de la dimensión del ancho y profundidad del filete



Fuente: Captura de pantalla de *Autodesk* reimpressa por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Ancho del canal (W) El ancho efectivo del canal, perpendicular a la dirección del flujo principal y descontando el espacio del filete, se calcula como:

$$W = \frac{\pi D}{n} \cos \phi - e \quad (25)$$

$$W = \frac{\pi \times 0.075 \text{ m}}{1} \times \cos(17.66^\circ) - 0.0075 \text{ m} \approx \mathbf{0.217 \text{ m}}$$

Presión de cabezal (ΔP) Se asume una presión de cabezal de $\Delta P = 200 \text{ bar} = 20 \times 10^6 \text{ Pa}$. Este valor se considera una estimación conservadora para asegurar que el diseño sea capaz de operar bajo presiones elevadas (H. F. Giles et al., 2013).

Otras suposiciones importantes

- **Viscosidad del fundido (μ)** se asume $\mu = 500 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Dimitrov et al., 2007).
- **Factores de forma (F_d, F_p)** se asumen ≈ 1 , apropiado para canales anchos (Kim y Kim, 2008).
- **Eficiencia mecánica (η_{mech})** 0.85, usada para estimar la potencia del motor.
- **Propiedades térmicas del PET** entrada $T_{in} \approx 25^\circ\text{C}$, salida $T_{out} \approx 280^\circ\text{C}$ y fusión $T_m \approx 255^\circ\text{C}$ (Extrulam, 2024). $C_{ps} \approx 1300 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $C_{pm} \approx 1900 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ y $\Delta H_f \approx 130000 \text{ J}/\text{kg}$.

Factores de flujo y caudal de presión

El caudal másico neto (Q) en la zona de dosificación se describe por la superposición del flujo de arrastre (Q_d) y el flujo de presión (Q_p) (Tadmor y Gogos, 2006):

$$Q = Q_d - Q_{p,mass} = \alpha N - Q_{p,mass} \quad (26)$$

donde N es la velocidad del tornillo en rev/s.

Primero, calculamos el factor de flujo de arrastre (α):

$$\alpha = 0.5 \times \pi \times (0.075) \times (0.217) \times (0.004) \times (\cos 17.66^\circ) \times (1200) \times 1 \approx \mathbf{0.1172 \text{ kg}/\text{rev}}$$

Luego, calculamos el factor geométrico del flujo de presión (β):

$$\beta = \frac{(0.217) \times (0.004)^3 \times (\sin 17.66^\circ)^2}{12 \times 0.45} \times 1 \approx \mathbf{2.37 \times 10^{-10} \text{ m}^4}$$

El caudal másico de presión retrógrado ($Q_{p,mass}$) es:

$$Q_{p,mass} = \left(\frac{\beta \Delta P}{\mu} \right) \times \rho_m = \left(\frac{2.37 \times 10^{-10} \times 20 \times 10^6}{500} \right) \times 1200 \approx \mathbf{0.01138 \text{ kg}/\text{s}}$$

Cálculo de la velocidad del tornillo (N)

Despejando la velocidad N de la ecuación 26:

$$N = \frac{Q_{target} + Q_{p,mass}}{\alpha} = \frac{0.04167 + 0.01138}{0.1172} \approx \mathbf{0.4526 \text{ rev}/\text{s}} \quad (27)$$

Convirtiendo a revoluciones por minuto (RPM):

$$N_{\text{RPM}} = N \times 60 = 0.4526 \times 60 \approx \mathbf{27.2 \text{ RPM}}$$

5.4.2. Estimación de la potencia requerida

Se utilizaron varios métodos para estimar la potencia, reconociendo las limitaciones de los modelos simplificados frente a la complejidad del proceso real (H. F. Giles et al., 2013; Tadmor y Gogos, 2006).

Potencia de fusión (energía térmica)

Se calculó la energía mínima para calentar y fundir el material, sin contar la disipación viscosa ni las pérdidas.

$$P_{melt} = Q_{target}[C_{ps}(T_m - T_{in}) + \Delta H_f + C_{pm}(T_{out} - T_m)] \quad (28)$$

$$P_{melt} = (0.04167)[1300(255 - 25) + 130000 + 1900(280 - 255)]$$

$$P_{melt} = (0.04167)[299000 + 130000 + 47500] = (0.04167)[476500]$$

$$P_{melt} \approx 19855 \text{ W} \approx 19.9 \text{ kW}$$

Potencia de bombeo

Se calculó la potencia teórica mínima para mover el fluido contra la presión ΔP .

$$P_{pump} = \frac{Q_{target}\Delta P}{\rho_m} = Q_{p,vol}\Delta P \quad (29)$$

$$P_{pump} = (9.48 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}) \times (20 \times 10^6 \text{ Pa}) \approx 190 \text{ W} \approx 0.2 \text{ kW}$$

La potencia real del motor asociada a este bombeo será mayor debido a ineficiencias.

Potencia teórica (basada en par torsor en zona de dosificación)

Se estimó la potencia consumida por efectos viscosos y de presión en la zona de dosificación.

$$P_{theor} = \frac{\pi^2 D^2 W \mu N^2 L_m}{H_m} \cos^2 \phi + Q_{p,vol}\Delta P \quad (30)$$

$$P_{theor} = \frac{\pi^2(0.075)^2(0.217)(500)(0.4526)^2(0.45)}{0.004} (\cos 17.66^\circ)^2 + (9.48 \times 10^{-6})(20 \times 10^6)$$

$$P_{theor} \approx 126 \text{ W} + 190 \text{ W} \approx 316 \text{ W} = 0.32 \text{ kW}$$

Este valor es bajo, lo que indica que la mayor parte del consumo energético ocurre fuera de la zona de dosificación, específicamente durante la fusión del material (Kim y Kim, 2008).

En este caso, se toma el valor mayor de 45 kW considerando una mayor demanda del sistema.

5.4.3. Selección del motor eléctrico

El sistema de accionamiento del tornillo extrusor es un componente crítico que debe proporcionar el par y la velocidad de rotación adecuados. Los cálculos de diseño del tornillo indican una velocidad de operación objetivo de aproximadamente 27.2 RPM para un caudal de 150 kg/h. Adicionalmente, se contempla una velocidad operativa máxima del tornillo de hasta 118 RPM para ofrecer flexibilidad en el proceso.

Análisis por consumo energético específico (sec) El *sec*, medido en kWh/kg, define cuánta energía de motor se requiere para procesar un kilogramo de un polímero específico por hora. La potencia requerida en el eje (P_{eje}) se calcula mediante la siguiente relación:

$$P_{eje}[\text{kW}] = Q_{target}[\text{kg/h}] \times sec[\text{kWh/kg}] \quad (31)$$

Para este diseño, se establecieron los siguientes parámetros:

- **Caudal másico objetivo (Q_{target})** 150 kg/h.
- **Material y consumo (sec)** Para el PET, un polímero de alta viscosidad, se adopta un valor de diseño conservador de $sec_{PET} \approx 0.30$ kWh/kg. Este valor representa una estimación de ingeniería balanceada para una resina de PET reciclado en una extrusora de este tamaño (Rauwendaal, 2014a).

Al sustituir estos valores en la ecuación, se obtiene:

$$P_{eje} = 150 \text{ kg/h} \times 0.30 \text{ kWh/kg} = 45 \text{ kW (60 HP)}$$

Este cálculo empírico establece que se requiere un motor con una potencia nominal de al menos 45 kW (60 HP) para cumplir con el objetivo de producción de 150 kg/h de PET.

Análisis de potencia y par requerido Se utilizó el método del consumo energético específico (*sec*) para dimensionar el motor, fundamentado en la práctica industrial (Rauwendaal, 2014a).

- **Par torsor de diseño** Basado en la potencia requerida de 45 kW y la velocidad máxima de diseño del tornillo $N_{max} \approx 118$ RPM para flexibilidad operativa, se calcula el torque de diseño que el sistema debe ser capaz de entregar:

$$T_{diseo} = \frac{P_{eje} \times 9550}{N_{max}} = \frac{45 \text{ kW} \times 9550}{118 \text{ RPM}} \approx 3650 \text{ Nm} \quad (32)$$

- **Potencia a velocidad objetivo** A la velocidad teórica de 27.2 RPM, asumiendo que el par es constante, el consumo de potencia sería el siguiente:

$$P_{target} = \frac{T_{diseo} \times N_{target}}{9550} = \frac{3650 \text{ Nm} \times 27.2 \text{ RPM}}{9550} \approx 10.4 \text{ kW (13.9 HP)} \quad (33)$$

Es necesario proveer una potencia total requerida a máxima velocidad (43-45 kW) y entregar un alto par de diseño (≈ 3650 Nm) en todo el rango operativo. La operación al caudal objetivo (150 kg/h) requerirá ≈ 10.4 kW, lo cual será eficientemente controlado por el variador de frecuencia (*vfd*).

El sistema de accionamiento del tornillo extrusor es un componente crítico que debe proporcionar el par y la velocidad de rotación adecuados para el procesamiento del PET. Los cálculos indican una velocidad de operación objetivo de aproximadamente 27.2 RPM para un caudal de 150 kg/h, aunque se contempla una velocidad máxima de hasta 118 RPM. Considerando una velocidad de entrada típica de motores industriales de 4 polos (≈ 1770 RPM a 60 Hz), se requiere una relación de reducción total de aproximadamente 15:1. Para satisfacer estos requerimientos, se evaluaron dos enfoques principales:

Opción A: sistema de motor de alta potencia con reductora a medida Este enfoque considera la utilización de un motor eléctrico de alta potencia acoplado a una caja reductora diseñada específicamente para obtener la relación de transmisión deseada.

Motores de alta potencia considerados Se identificaron los siguientes motores Weg como candidatos principales para una configuración de alta potencia:

Motor candidato 1: Weg w22 - montaje con pies (código 14569345) Este motor de la línea industrial estándar w22 de Weg presenta características que se ajustan a los requerimientos de la extrusora para una operación a plena capacidad (WEG, 2025a).

- **Línea de producto** w22 uso general (hierro gris), baja tensión.
- **Potencia** 60 HP (≈ 45 kW).
- **Polos y velocidad nominal** 4 polos / aprox. 1770 RPM @ 60 Hz.
- **Tensión y frecuencia nominal** 230/460 V @ 60 Hz.
- **Eficiencia** *high efficiency*.
- **Armazón (frame) (nema)** 364/5T.
- **Grado de protección** *ip55* / *tefc* (ic411).
- **Forma constructiva** con pies (b3 - montaje horizontal).

Motor candidato 2: Weg w22 - montaje C-face (código 13012407) Este motor ofrece una alternativa de montaje directo a una caja reductora (WEG, 2025b).

- **Armazón (frame) (nema)** 364/5TC (la 'C' indica brida *C-face*).
- **Forma constructiva** con brida *C-face* (montaje frontal directo a la caja reductora).

Diseño conceptual de caja reductora a medida Para acoplar un motor de 45 kW (60 HP) y lograr la reducción de 15:1, se requiere una caja reductora. El análisis preliminar para una caja de dos etapas con engranajes rectos de acero aisi 8620 sugiere los siguientes parámetros:

- **Etapa 1** relación $i_1 = 4 : 1$, módulo $m_1 = 3.5$ mm, ancho de cara $F_1 = 42$ mm.
- **Etapa 2** relación $i_2 = 3.75 : 1$, módulo $m_2 = 5.0$ mm, ancho de cara $F_2 = 60$ mm.

Este diseño permitiría transmitir un par torsor de salida de aproximadamente 3500 Nm. La validación se realizaría mediante la metodología agma, asegurando factores de seguridad adecuados.

Opción B: sistema de motorreductor integrado Este enfoque considera la utilización de una unidad que ya integra el motor eléctrico y el sistema de reducción (Sumitomo Drive Technologies, [2025b](#)).

Motorreductor seleccionado: Sumitomo cyclo drive chhm60-6205yb-15 Se ha seleccionado este motorreductor de la serie Cyclo 6000 como la solución de ingeniería robusta para la aplicación (Sumitomo Drive Technologies, [2025a](#)).

- **Potencia (motor)** 60 HP (≈ 45 kW). Esta potencia supera el requerimiento calculado de 43.2 kW, proporcionando un factor de servicio adecuado.
- **Velocidad nominal** 1750 RPM / 117 RPM. Coincide con la velocidad máxima de diseño (118 RPM).
- **Armazón (*frame*) del reductor** 6205. Es un reductor de alta capacidad diseñado para manejar el par de torsión de ≈ 3650 Nm. Se descartaron opciones con armazones menores para evitar riesgos de falla mecánica.
- **Control** El sistema será controlado por un variador de frecuencia (*vfd*) para operar en todo el rango de velocidades.

Decisión de diseño para el sistema de accionamiento Se selecciona el motorreductor integrado Sumitomo Cyclo, modelo chhm60-6205yb-15. Esta decisión se fundamenta en que satisface simultáneamente los tres criterios críticos: 1) proporciona la potencia requerida (60 HP), 2) entrega la velocidad máxima deseada (117 RPM) y 3) posee un armazón (*frame*) robusto para manejar el par de torsión (3650 Nm) del procesamiento de PET. Además, el sistema será gobernado por un variador de frecuencia (*vfd*), permitiendo operar desde la velocidad objetivo de 27.2 RPM hasta la máxima de 117 RPM.

5.4.4. Análisis de esfuerzos en cañón extrusor

Para la fabricación del cañón extrusor, y con el objetivo de optimizar los costos y la viabilidad de manufactura, se utilizaron materiales comerciales estándar. Se consideró la selección de

una barra hueca de acero aisi 420 qt con dimensiones nominales estándar disponibles en el mercado.

Se identificó la disponibilidad de barras huecas con un diámetro interior nominal de 75 mm y un diámetro exterior nominal de 95 mm, información obtenida de la empresa Tubos y Barras Huecas®. A partir de esta barra, el diámetro interior será maquinado para alcanzar la dimensión final requerida de ≈ 75.15 mm, asegurando así la holgura radial necesaria para el correcto funcionamiento del tornillo extrusor de 75 mm. El diámetro exterior final del cañón para el análisis de esfuerzos será, por lo tanto, de 95 mm.

Método de análisis y parámetros

Se utilizarán las ecuaciones de Lamé para cilindros de pared gruesa, que permiten calcular los esfuerzos tangenciales (*hoop*, σ_t) y radiales (σ_r) inducidos por la presión interna (Shigley et al., 2012).

Los parámetros de diseño y operación considerados son:

- **Presión interna máxima** (P_i) se utiliza la estimación conservadora de la presión de cabezal, $P_d = 20$ MPa. Este valor se encuentra dentro de los rangos operativos típicos (15-35 MPa) reportados para estas aplicaciones, asegurando un diseño robusto (Rauwendaal, 2014b).
- **Presión externa** (P_o) se asume presión atmosférica, $P_o = 0$ MPa.
- **Radio interno** (r_i) determinado por el diámetro del tornillo ($D = 75$ mm) más el doble de la holgura radial ($\delta \approx 0.075$ mm).

$$D_{bore} = D + 2\delta \approx 75 \text{ mm} + 2(0.075 \text{ mm}) = 75.15 \text{ mm}$$

$$r_i = D_{bore}/2 \approx \mathbf{37.58 \text{ mm}}$$

- **Radio externo** (r_o) esta dimensión depende del diseño específico y grosor de pared elegido para el cañón. Se asume un diámetro exterior (OD) de 95 mm.

$$r_o = OD/2 = 95 \text{ mm}/2 = \mathbf{47.50 \text{ mm}}$$

Espesor de pared asumido ($r_o - r_i$)

Se observa una diferencia significativa entre el radio externo e interno ($r_o - r_i = 47.50 - 37.58 = 9.92$ mm), lo que representa un espesor de pared de aproximadamente 1 cm. Las razones fundamentales para requerir esta robustez son:

- **Contención de presión** es la razón principal. El cañón debe resistir la alta presión interna ($P_i = 20$ MPa) sin deformarse plásticamente ni fracturarse. Según las ecuaciones de Lamé, a mayor espesor de pared, menor es el esfuerzo tangencial (σ_t) inducido. Se necesita un espesor suficiente para mantener el esfuerzo de Von Mises por debajo del límite admisible del material.

- **Rigidez estructural y estabilidad dimensional** un espesor considerable proporciona la rigidez necesaria para que el cañón mantenga su forma cilíndrica y su diámetro interior preciso bajo las cargas de presión y temperatura. Esto es vital para mantener la holgura correcta con el tornillo y asegurar el funcionamiento eficiente de la extrusión.
- **Resistencia al desgaste y construcción** aunque se seleccionó el acero aisi 420, muchos cañones incorporan una camisa interior o *liner* muy duro. El cuerpo base debe tener un espesor considerable para aportar la resistencia mecánica general.
- **Durabilidad y vida a fatiga** menores niveles de esfuerzo operativo, gracias a una pared más gruesa, contribuyen a una mayor vida útil del componente, especialmente ante ciclos de presión.

Material seleccionado y propiedades admisibles

Se selecciona el acero inoxidable martensítico aisi 420 para el cañón. Para que este material tenga la resistencia mecánica y al desgaste adecuada, deberá estar en estado templado y revenido.

- **Límite elástico (S_y)** basado en datos típicos para el aisi 420 templado y revenido a una dureza media-alta, se asume $S_y = 1200$ MPa (*ASM Handbook, Volume 1: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 1990).
- **Factor de seguridad (FS)** se selecciona un factor de seguridad contra la fluencia estática de **FS = 2.5**.
- **Esfuerzo admisible (S_{all})**

$$S_{all} = \frac{S_y}{FS} = \frac{1200 \text{ MPa}}{2.5} = \mathbf{480 \text{ MPa}}$$

Cálculo de esfuerzos principales (ecuaciones de Lamé)

Las ecuaciones de Lamé para un cilindro de pared gruesa con radios r_i, r_o y presiones P_i, P_o son (Shigley et al., 2012):

$$\sigma_t(r) = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(P_i - P_o) r_i^2 r_o^2}{r^2 (r_o^2 - r_i^2)}$$

El esfuerzo tangencial (σ_t) es máximo en la superficie interna ($r = r_i$) y, para $P_o = 0$, se simplifica a:

$$\sigma_{t,max} = P_i \frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} = (20) \frac{(47.50^2 + 37.58^2)}{(47.50^2 - 37.58^2)} \approx \mathbf{86.88 \text{ MPa}}$$

El esfuerzo radial (σ_r) y el esfuerzo longitudinal (σ_l) en la pared interna son:

$$\sigma_{r,max} = -20 \text{ MPa} \quad \text{y} \quad \sigma_l = P_i \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \approx \mathbf{33.44 \text{ MPa}}$$

Verificación de resistencia (criterio de Von Mises)

Dado que el acero aisi 420 es un material dúctil, se utiliza el criterio de Von Mises para verificar la seguridad contra la fluencia (Shigley et al., 2012). El esfuerzo equivalente (σ') se calcula como:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_t - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2}{2}} \approx \mathbf{92.6 \text{ MPa}}$$

Se calculó el factor de seguridad real respecto al límite elástico del material:

$$FS_{real} = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{1200 \text{ MPa}}{92.6 \text{ MPa}} \approx \mathbf{12.96}$$

Como $FS_{real} > 2.5$, el diseño del cañón es estructuralmente seguro bajo las condiciones de presión interna definidas.

5.4.5. Análisis y selección de resistencias térmicas

El control preciso de la temperatura a lo largo del cañón extrusor es vital para el procesamiento adecuado del PET. Se requiere un sistema de calefacción, típicamente mediante resistencias eléctricas de banda, capaz de:

- calentar el equipo desde temperatura ambiente hasta la temperatura de operación en un tiempo razonable (*startup*).
- aportar la energía necesaria para calentar y fundir el polímero durante la operación estable.
- compensar las pérdidas de calor hacia el entorno.
- permitir un control preciso de la temperatura en diferentes zonas del cañón.

Parámetros de diseño, proceso y propiedades

Se utilizan los siguientes datos base:

▪ Geometría del cañón

- Diámetro interior (*bore*) $D_{bore} \approx 75.15 \text{ mm}$ ($r_i = 37.58 \text{ mm}$).
- Diámetro exterior (*od*) $OD = \mathbf{95 \text{ mm}}$ ($r_o = 47.50 \text{ mm}$).
- Longitud total activa $L_{total} = 1.8 \text{ m}$.
- Longitudes zonales $L_{feed} = 0.9 \text{ m}$ (50%), $L_{trans} = 0.45 \text{ m}$ (25%), $L_{meter} = 0.45 \text{ m}$ (25%).
- Área superficial externa total $A_{total} = \pi \times OD \times L_{total} \approx 0.537 \text{ m}^2$.

■ **Parámetros de proceso**

- Caudal másico $\dot{m} = 150 \text{ kg/h} = 0.04167 \text{ kg/s}$.
- Temperaturas del PET $T_{in} = 25 \text{ °C}$, $T_m = 255 \text{ °C}$, $T_{out} = 280 \text{ °C}$.
- Temperaturas ambiente y de superficie se asume $T_{ambient} = 25 \text{ °C}$ y una temperatura superficial promedio del cañón $T_{barrel} = 285 \text{ °C}$ durante la operación estable ($T_{barrel,K} \approx 558 \text{ K}$, $T_{ambient,K} \approx 298 \text{ K}$).

■ **Propiedades térmicas del PET**

- Calor específico (sólido) $C_{ps} = 1300 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.
- Calor latente de fusión $\Delta H_f = 130000 \text{ J/kg}$.
- Calor específico (fundido) $C_{pm} = 1900 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

■ **Propiedades del acero (cañón aisi 420)**

- Densidad $\rho_{steel} \approx 7750 \text{ kg/m}^3$.
- Calor específico $C_{p,steel} \approx 460 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

■ **Propiedades de transferencia de calor**

- Coeficiente convectivo $h \approx 10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.
- Emisividad de superficie $\epsilon \approx 0.8$.
- Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$.

Estimación de potencia para calentar el polímero (P_{poly})

Es la energía teórica mínima requerida por el material por unidad de tiempo.

- **Calentamiento sólido** $Q_1 = \dot{m}C_{ps}(T_m - T_{in}) = (0.04167)(1300)(255 - 25) \approx 12476 \text{ W}$.
- **Fusión** $Q_2 = \dot{m}\Delta H_f = (0.04167)(130000) \approx 5417 \text{ W}$.
- **Calentamiento fundido** $Q_3 = \dot{m}C_{pm}(T_{out} - T_m) = (0.04167)(1900)(280 - 255) \approx 1979 \text{ W}$.
- **Potencia total del polímero** $P_{poly} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \approx \mathbf{19.9 \text{ kW}}$.

Estimación de pérdidas de calor estacionarias (P_{loss})

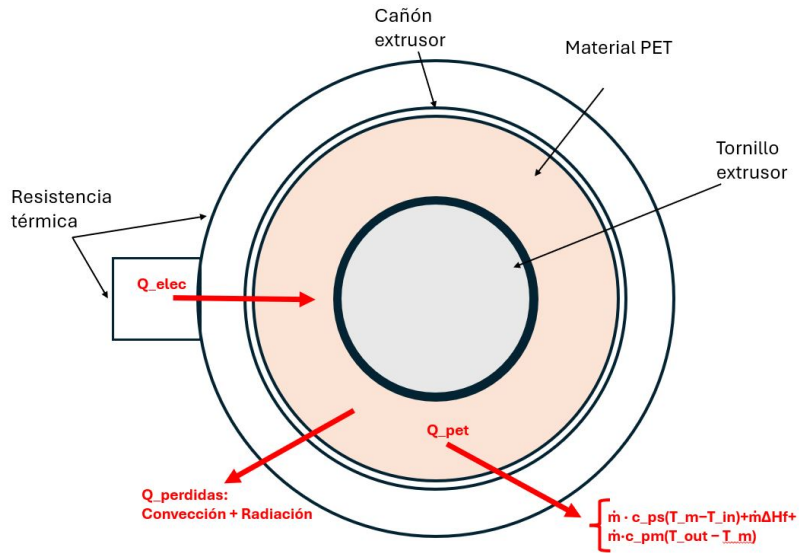
Es el calor perdido por el cañón hacia el ambiente.

- **Pérdidas por convección** $P_{conv} = hA_{total}(T_{barrel} - T_{ambient}) \approx 1369.75 \text{ W}$.
- **Pérdidas por radiación** $P_{rad} = \epsilon\sigma A_{total}(T_{barrel,K}^4 - T_{ambient,K}^4) \approx 2314.82 \text{ W}$.
- **Pérdidas totales** $P_{loss} = P_{conv} + P_{rad} \approx \mathbf{3.7 \text{ kW}}$.

La potencia mínima teórica que las resistencias deben suministrar en estado estacionario es $P_{heater,min} = P_{poly} + P_{loss} \approx 23.6$ kW. Se seleccionó una potencia total instalada de $P_{installed} = 30$ kW para permitir un arranque rápido y autoridad de control.

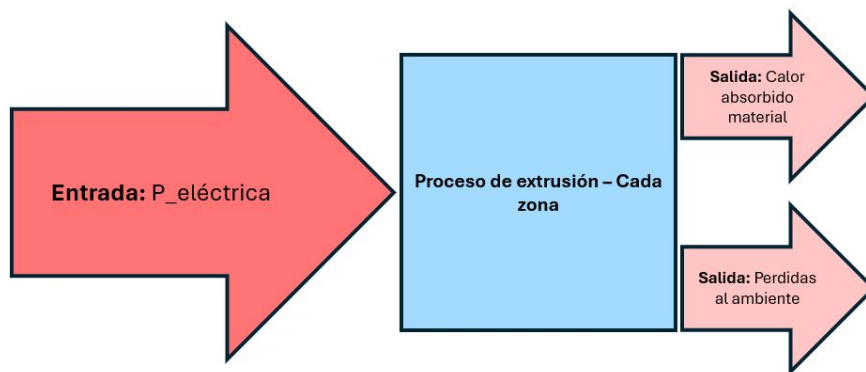
Para visualizar el balance de potencia teórica requerida, la **Figura 7** muestra la distribución, mientras que la **Figura 8** presenta el diagrama de *Sankey*.

Figura 8: Representación gráfica de la transferencia de energía en el sistema



Fuente: elaboración propia.

Figura 9: Representación en un diagrama de *Sankey* de la transferencia de energía



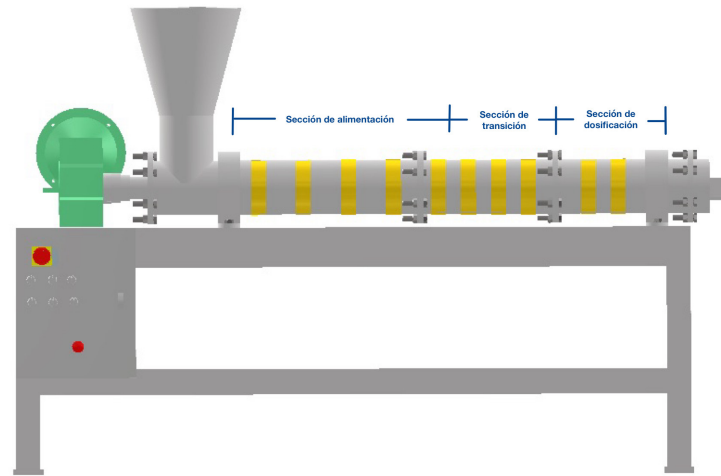
Fuente: elaboración propia.

Distribución de potencia por zonas

Se distribuye la potencia total instalada de 30 kW entre las zonas:

- **Zona de alimentación** ($L_{feed} = 0.9$ m, 50 %): $P_{feed} = 15$ kW. Densidad de potencia: $PD_{feed} \approx 5.58$ W/cm².
- **Zona de transición** ($L_{trans} = 0.45$ m, 25 %): $P_{trans} = 7.5$ kW. Densidad de potencia: $PD_{trans} \approx 5.58$ W/cm².
- **Zona de dosificación** ($L_{meter} = 0.45$ m, 25 %): $P_{meter} = 7.5$ kW. Densidad de potencia: $PD_{meter} \approx 5.58$ W/cm².

Figura 10: Representación de las secciones del cañón extrusor con resistencias térmicas



Fuente: Captura de pantalla de *Autodesk Inventor* reimpressa por cortesía de *Autodesk, Inc.*

Selección de calentadores de banda

Basado en la potencia distribuida por zona, se seleccionarán calentadores de banda eléctricos. Se ha identificado un proveedor local en Guatemala, obteniendo una cotización formal de la empresa GT Electric's (Anexo No. CG-052529, mayo de 2025). Dicha cotización detalla resistencias tipo banda con cierre estándar, salida de cables a 90° y protección de cajita, con especificaciones de 220 V y potencias de 500 W y 1000 W (GT ELECTRIC'S, 2025). El proveedor puede suministrar estas resistencias con el diámetro interior requerido de 95 mm para ajustarse al diseño.

5.4.6. Análisis de elementos de sujeción del cañón

Cargas en la unión de la brida

La carga principal que deben soportar los pernos de esta unión es la fuerza axial (F_{axial}) generada por la presión del polímero fundido (P_d) actuando sobre el área transversal del

tornillo (A_{tornillo}), lo cual tiende a separar el cañón de su soporte.

$$A_{\text{tornillo}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.075 \text{ m})^2}{4} \approx 0.004418 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{axial}} = P_d \times A_{\text{tornillo}} \approx (20 \times 10^6 \text{ Pa}) \times (0.004418 \text{ m}^2) \approx \mathbf{88360 \text{ N}}$$

Esta fuerza total se distribuye entre los pernos que sujetan la unión. Asumiendo un diseño inicial con $N_{\text{pernos}} = 10$, la carga externa por perno (P) sería de 8836 N. No obstante, para optimizar el montaje, se evaluará la configuración con 6 pernos.

Principios de diseño de elementos de sujeción

El diseño de uniones atornilladas cargadas a tensión se basa en asegurar que los pernos estén suficientemente precargados para mantener la unión cerrada y que no fallen bajo la combinación de precarga y carga externa (Shigley et al., 2012; Verein Deutscher Ingenieure, 2015).

- **Precarga (F_i)** tensión inicial aplicada al perno durante el apriete que mantiene las superficies de la brida en compresión.
- **Carga externa por perno (P)** carga que tiende a separar la unión.
- **Carga total en el perno (F_b)** cuando se aplica P , la carga aumenta según $F_b = F_i + CP$.
- **Constante de rigidez de la unión (C)** proporción de la carga externa P absorbida por el perno. Se asumió $C = 0.3$.
- **Prevención de fluencia (*yielding*)** la carga máxima F_b no debe exceder la resistencia del material, comparándola con el límite elástico (S_y) o la resistencia de prueba (S_p).

Se analiza la unión bridada considerando 6 elementos de sujeción. Las condiciones de operación ($\approx 280 \text{ }^\circ\text{C}$) exigen materiales adecuados como el ASTM a193 b7 y ASTM a194 2h.

Cargas que actúan por perno

La fuerza axial total $F_{\text{axial}} \approx 88720 \text{ N}$ se distribuye entre 6 pernos:

$$P = \frac{F_{\text{axial}}}{N_{\text{pernos}}} = \frac{88720 \text{ N}}{6} \approx \mathbf{14787 \text{ N/perno}}$$

Material y esfuerzo admisible

Se mantiene la selección de ASTM a193 grado b7. Considerando la temperatura de operación, se estima un límite elástico $S_{y,T} \approx 650 \text{ MPa}$. Con un factor de seguridad de 2.5, el esfuerzo admisible es:

$$S_{\text{all}} = \frac{S_{y,T}}{FS} \approx \frac{650 \text{ MPa}}{2.5} = \mathbf{260 \text{ MPa}}$$

Estimación del tamaño de perno (N=6)

Se busca el tamaño mínimo de perno tal que el esfuerzo máximo ($\sigma_{max} = F_b/A_t$) no supere S_{all} .

- **Verificación con m20** el área de tensión es $A_t \approx 245 \text{ mm}^2$. El esfuerzo calculado sería $\sigma_b \approx 259.5 \text{ MPa}$, lo cual está justo en el límite de S_{all} (260 MPa).
- **Verificación con m22** el área de tensión es $A_t \approx 303 \text{ mm}^2$. El esfuerzo máximo sería $\sigma_b \approx 210 \text{ MPa}$, lo que proporciona un margen de seguridad real mayor ($FS_{real} \approx 3.1$).

Selección final recomendada para garantizar robustez a alta temperatura, se seleccionan 6 pernos m22 de material ASTM a193 grado b7, con tuercas ASTM a194 grado 2h.

Precarga para m22 b7

Se establece una tensión de precarga inicial (σ_i) equivalente al 35 % del límite elástico a temperatura:

$$\sigma_i \approx 0.35 \times 650 \text{ MPa} = 227.5 \text{ MPa}$$

La precarga inicial tentativa para un perno m22 ($A_t = 303 \text{ mm}^2$) es:

$$F_i = \sigma_i \times A_t \approx \mathbf{68900 \text{ N}}$$

Verificando la carga total (F_b):

$$F_b = F_i + CP = 68900 + (0.3 \times 14787) \approx \mathbf{73336 \text{ N}}$$

El esfuerzo bajo carga total es:

$$\sigma_b = \frac{73336 \text{ N}}{303 \text{ mm}^2} \approx \mathbf{242 \text{ MPa}}$$

Dado que $242 \text{ MPa} \leq 260 \text{ MPa}$, la condición se cumple satisfactoriamente.

5.4.7. Selección y diseño de componentes adicionales

Además de los componentes principales cuyo diseño y cálculo se detallaron en secciones previas, la correcta operación, seguridad y eficiencia de la extrusora de PET dependen de la adecuada selección y dimensionamiento de otros elementos fundamentales.

Chumaceras y rodamientos del husillo

El husillo de extrusión, con un diámetro nominal de 75 mm y operando a velocidades de hasta 118 rpm, está sometido a cargas axiales significativas debido al empuje del polímero, así como a cargas radiales. Fue primordial la selección de un sistema de rodamientos capaz de soportar estas cargas garantizando la vida útil esperada y la precisión en la rotación.

Cargas actuantes sobre el husillo

- **Carga axial máxima** (F_a) proviene de la presión del polímero en el cabezal. Según se calculó anteriormente, esta fuerza es de $F_a \approx 88360$ N (≈ 89 kN). Esta carga es el parámetro principal para la selección del rodamiento de empuje axial.
- **Cargas radiales** (F_r) se originan por el peso propio del husillo y posibles desbalances menores. Para un husillo de $L = 1.8$ m y un diámetro promedio de raíz de 60 mm, el peso se estima en $W_h \approx 390$ N. Se considera esta carga para la selección de los rodamientos radiales, aplicando un factor de seguridad adecuado.

Selección del rodamiento de empuje axial Dada la magnitud de la carga axial (89 kN) y la velocidad de rotación, un rodamiento de empuje de rodillos esféricos es el adecuado. Se busca una vida útil nominal L_{10h} de al menos 20000 h.

La vida nominal en revoluciones para 118 rpm es:

$$L_{10} = 20000 \text{ h} \times 118 \text{ rev/min} \times 60 \text{ min/h} = 141.6 \times 10^6 \text{ revoluciones}$$

La capacidad de carga dinámica axial requerida C_a se calcula como:

$$C_a = P_a \left(\frac{L_{10}}{10^6} \right)^{3/10} = 89 \text{ kN} \times (141.6)^{0.3} \approx \mathbf{403.3 \text{ kN}}$$

Selección de rodamiento de empuje se seleccionó un rodamiento de empuje de rodillos esféricos de la marca SKF, modelo 29317 E ($d = 95$ mm, $D = 140$ mm, $C_a = 560$ kN), suministrado por Rolemans Distribuciones. Este rodamiento cumple con la capacidad de carga dinámica requerida.

Selección de chumaceras y rodamientos radiales

- **Chumaceras** se seleccionaron dos chumaceras de la empresa Rolemans Distribuciones tipo SKF SAF 515.
- **Rodamientos radiales** dentro de las chumaceras, se montaron rodamientos de rodillos a rótula SKF 22215 EK ($d = 75$ mm, $D = 130$ mm, $C_r = 173$ kN).
- **Manguitos de fijación** se utilizaron manguitos SKF H 315 para asegurar los rodamientos al eje del husillo.

Sistema de conexión y acoplamientos

La transmisión eficiente de la potencia desde el motor principal hasta el husillo requiere la selección de acoplamientos mecánicos que compensen desalineaciones y amortigüen vibraciones.

Acoplamiento motor-reductor El motor eléctrico seleccionado es un Sumitomo Cyclo de 60 HP (≈ 45 kW), que opera a una velocidad nominal de 1770 rpm. El torque nominal del motor es:

$$T_{\text{motor}} = \frac{45 \text{ kW} \times 9550}{1770 \text{ rpm}} \approx 242.7 \text{ Nm}$$

Considerando un factor de servicio de 1.75 para aplicaciones de extrusión, el torque de diseño es:

$$T_{d,\text{acople1}} = 242.7 \text{ Nm} \times 1.75 \approx \mathbf{424.7 \text{ Nm}}$$

Selección de acoplamiento motorreductor se optó por un acoplamiento flexible KTR Rotex, suministrado por Componentes Industriales, S.A., con estrella de poliuretano. Su torque nominal y máximo superan los requerimientos del sistema.

Selección y cálculo del aislamiento del cañón extrusor

El aislamiento térmico del cañón es un componente esencial para optimizar la eficiencia energética, mantener la estabilidad térmica del PET y garantizar la seguridad del personal.

Requisitos del aislamiento

- Temperatura máxima de operación del cañón: 280 °C.
- Temperatura superficial externa deseada: ≤ 60 °C.
- Baja conductividad térmica y nula emisión de gases tóxicos.

Selección del material aislante Se seleccionó manta de fibra cerámica con una densidad de 96 kg/m³ a 128 kg/m³. La conductividad térmica promedio estimada es $\lambda_{\text{aisl}} \approx 0.07$ W/(m·K).

Cálculo estimado del espesor del aislamiento Se realizó un cálculo de transferencia de calor radial para un cilindro compuesto. Para un espesor de aislamiento $e_{\text{aisl}} = 40$ mm, el radio exterior total es $r_3 = 87.5$ mm.

Flujo de calor por unidad de longitud (q/L):

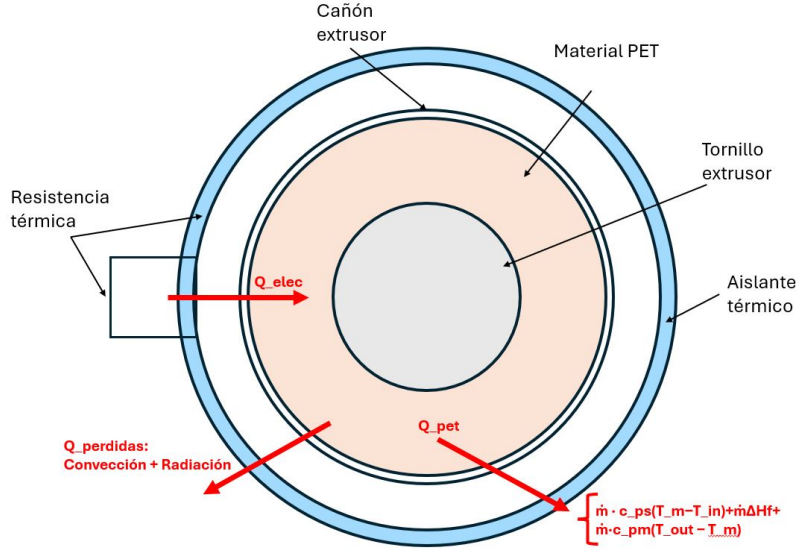
$$\frac{q}{L} = \frac{280 \text{ °C} - 25 \text{ °C}}{R'_{\text{total}}} \approx \mathbf{168.53 \text{ W/m}}$$

Temperatura superficial externa estimada ($T_{\text{sup,ext}}$):

$$T_{\text{sup,ext}} = 25 \text{ °C} + (168.53 \times 0.1224) \approx \mathbf{45.62 \text{ °C}}$$

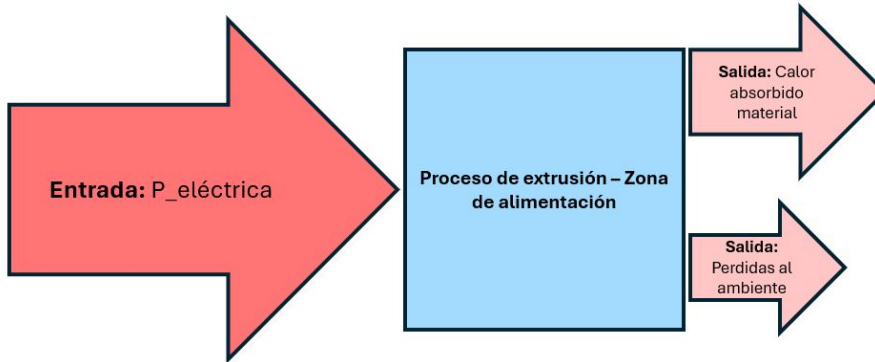
Con un espesor de 40 mm de fibra cerámica, la temperatura externa es de aproximadamente 45.6 °C, cumpliendo satisfactoriamente el límite de seguridad.

Figura 11: Representación gráfica de la transferencia de energía con el aislante



Fuente: elaboración propia.

Figura 12: Diagrama de Sankey de la transferencia de energía con el aislante



Fuente: elaboración propia.

Considerando el tipo de aislamiento térmico requerido para el cañón extrusor, siendo este una opción de manta de fibra cerámica con un espesor de aproximadamente 40 mm, capaz de soportar temperaturas de hasta 280 °C y limitar la temperatura superficial externa, la adquisición de este material en Guatemala implicaría un proceso de importación. Se identificaron dos opciones de proveedores internacionales que podrían satisfacer estos requerimientos.

Una alternativa es la empresa Soluciones Plásticas (Soluciones Plasticas, [2025](#)), la cual, si bien es un distribuidor que atiende a la región incluyendo Guatemala, no cuenta con fabricación local de estas mantas especializadas, por lo que su obtención seguiría un proceso de importación. Ofrecen mantas de aislamiento térmico construidas con fibra cerámica y

cubiertas protectoras de alta resistencia, adecuadas para las temperaturas de operación de extrusoras. Aunque su oferta estándar es de un espesor de aproximadamente 1 pulgada (25.4 mm), se consultaría sobre la disponibilidad de espesores mayores o la viabilidad de utilizar múltiples capas para alcanzar los 40 mm calculados, asegurando así la eficiencia térmica y la seguridad superficial deseadas.

Otra opción a considerar proviene de proveedores europeos especializados como T-Solution (T-Solution, 2025), quienes se enfocan en la confección individual y a medida de mantas aislantes térmicas para maquinaria industrial, incluyendo extrusoras. Esta empresa destaca la posibilidad de fabricar aislamientos con diversos materiales y espesores según los requisitos específicos del cliente, lo que permitiría obtener mantas de fibra cerámica con los 40 mm de espesor precisados en el diseño. Si bien esta alternativa asegura un producto ajustado a las especificaciones exactas, implicaría gestionar la importación desde Polonia, con las consideraciones logísticas y de costos que esto conlleva. La existencia de estos proveedores internacionales subraya la disponibilidad de soluciones de aislamiento adecuadas, aunque su adquisición para el proyecto en Guatemala deba realizarse mediante importación.

5.4.8. Simulación y verificación estructural en Ansys

Para validar la integridad estructural del diseño del tornillo extrusor $D = 75$ mm, $L = 1.8$ m bajo cargas operativas representativas, se realizó un análisis por Elementos Finitos (FEA) utilizando el módulo *Static Structural* de *Ansys Workbench*.

Geometría y material: se utilizó el modelo CAD 3D del tornillo incluyendo la variación del diámetro de raíz a lo largo de las zonas funcionales y los detalles geométricos de los filetes. El material asignado fue acero aleado AISI 8620, utilizando propiedades obtenidas de bases de datos técnicas MatWeb, 2025:

- Módulo de Young (E): 205 GPa
- Coeficiente de Poisson (ν): 0.29
- Densidad (ρ): 7850 kg/m³
- Límite elástico (S_y): **1035** MPa

Mallado: se generó una malla de elementos finitos tridimensional para discretizar la geometría del tornillo. Se implementaron controles de *sizing* y refinamientos locales con el objetivo de obtener una malla de calidad adecuada para la precisión de los resultados, prestando especial atención a las zonas consideradas críticas, como la raíz de los filetes y las transiciones de diámetro del núcleo.

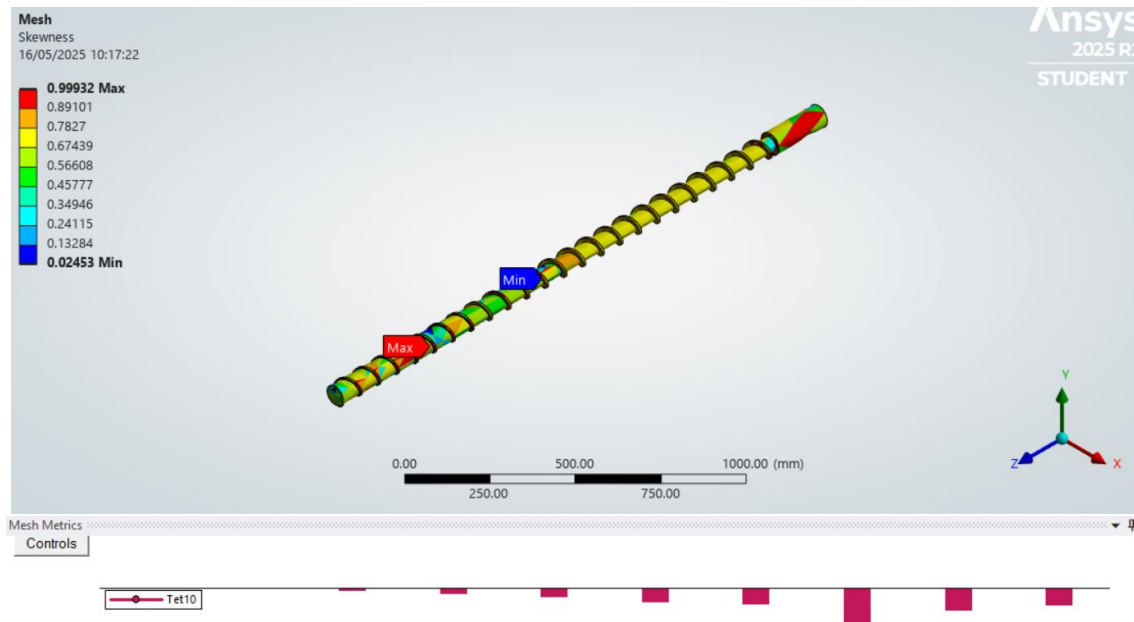
La calidad de la malla se evaluó cuantitativamente mediante diversas métricas disponibles en Ansys Workbench. Para la métrica de (*skewness*) presentada en la figura 9, donde un valor de 0 es ideal y 1 es degenerado, se obtuvieron los siguientes valores estadísticos: un mínimo de 0.0245, un máximo de 0.9993, un valor promedio de 0.6898 y una desviación

estándar de 0.1966. Según los criterios de calidad referenciados, el valor mínimo de *skewness* se considera excelente. El valor promedio se encuentra en el rango aceptable. No obstante, el valor máximo de 0.9993 es inaceptable, indicando la presencia de elementos con una distorsión extremadamente alta.

Adicionalmente, se evaluó la métrica de *element quality*, donde un valor de 1 es ideal y 0 es degenerado. Para esta métrica, se registró un mínimo de 0.0662, un máximo de 0.9947, un valor promedio de 0.4823 y una desviación estándar de 0.2131. El valor máximo de *element quality* es excelente. El promedio de 0.4823 se considera bueno. Sin embargo, el valor mínimo de 0.0662 es indicativo de elementos de calidad pobre.

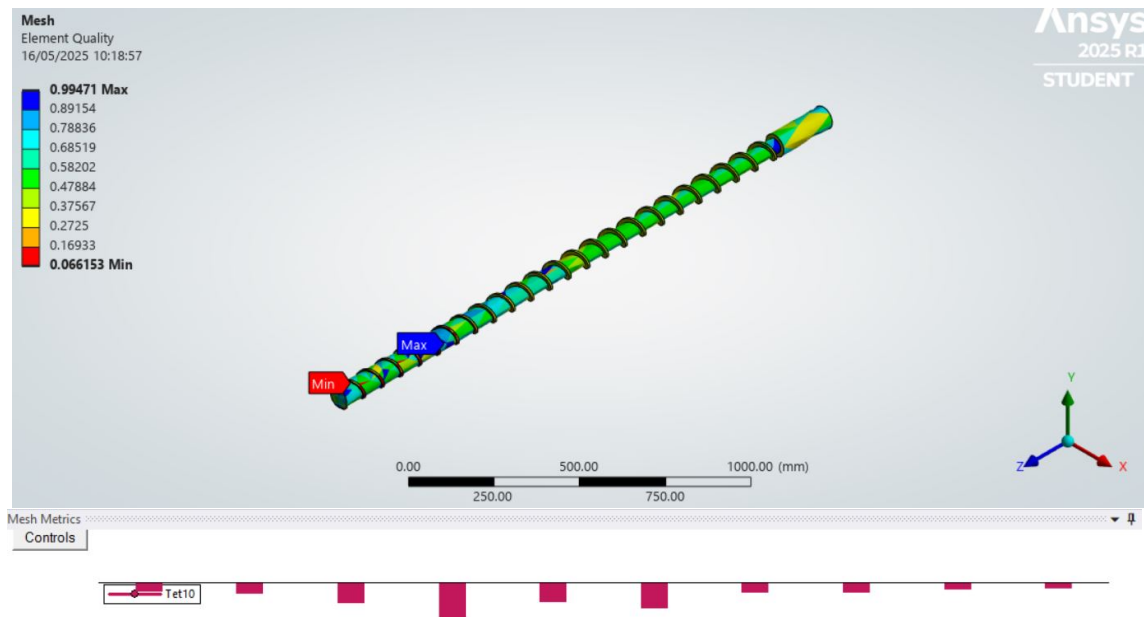
El análisis conjunto de estas métricas revela una calidad de malla heterogénea. Una inspección visual de la distribución de calidad en el modelo (ver Figura 9 y 10) mostró que los elementos con los valores más críticos, particularmente aquellos con *skewness* cercano a 0.9993 y *element quality* cercano a 0.0662, se concentran predominantemente en las regiones de alta complejidad geométrica correspondientes a las raíces y crestas de los filetes del tornillo, así como en las transiciones de diámetro de su núcleo.

Figura 13: calidad del mallado basado en skewness



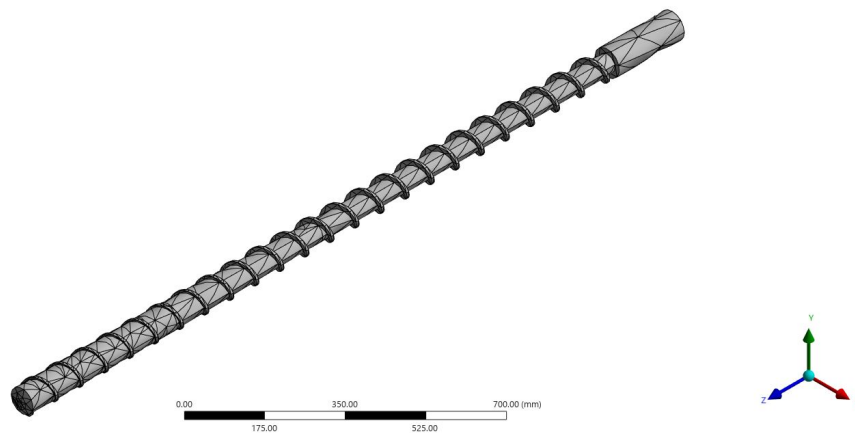
Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc..

Figura 14: calidad del mallado basado en elemento quality



Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc..

Figura 15: mallado del tornillo extrusor



Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc..

Condiciones de contorno y cargas: se aplicaron las siguientes condiciones para simular el comportamiento estático bajo carga operativa:

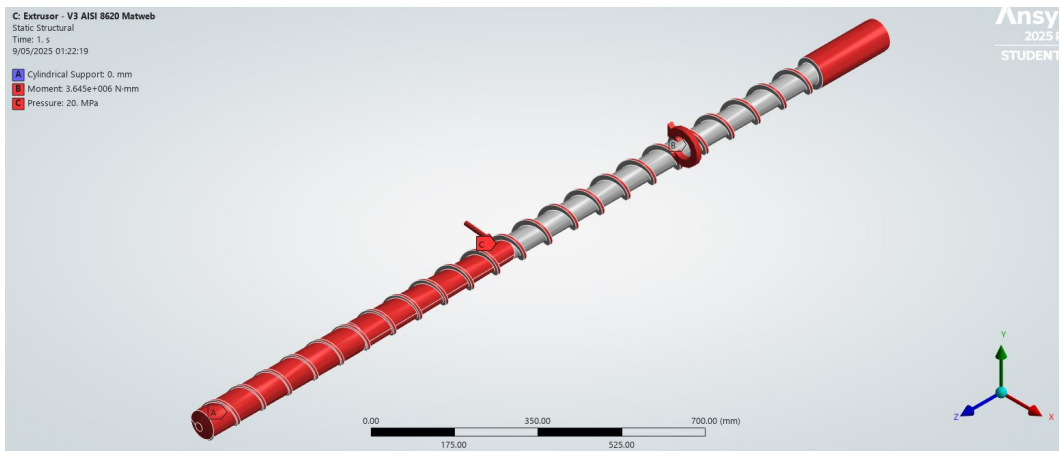
- **Soportes (boundary conditions):** siguiendo las recomendaciones para evitar sub-restricciones:
 - Se restringió el desplazamiento axial ($U_Z=0$) en la cara del extremo de accionamiento que interactúa con el cojinete de empuje.

- Se restringió el desplazamiento radial ($UX=0$, $UY=0$) en las superficies cilíndricas correspondientes a los asientos de los rodamientos radiales cerca del accionamiento, permitiendo la rotación.
- Se utilizó un *cylindrical support* en la superficie exterior de los filetes ($D=75\text{mm}$) restringiendo únicamente el desplazamiento radial para simular la guía del cañón, permitiendo el movimiento axial y la rotación.

■ **Cargas:**

- **Par torsor - torque:** se aplicó un momento de **3650 N·m** alrededor del eje del tornillo en el extremo de accionamiento, representando el par transmitido por la caja reductora a máxima potencia y velocidad.
- **Presión:** se aplicó una presión distribuida desde la zona de transición hasta la zona de dosificación de $P_{axial} = 20\text{ MPa}$ como una presión compresiva.

Figura 16: cargas y soportes aplicados en la simulación

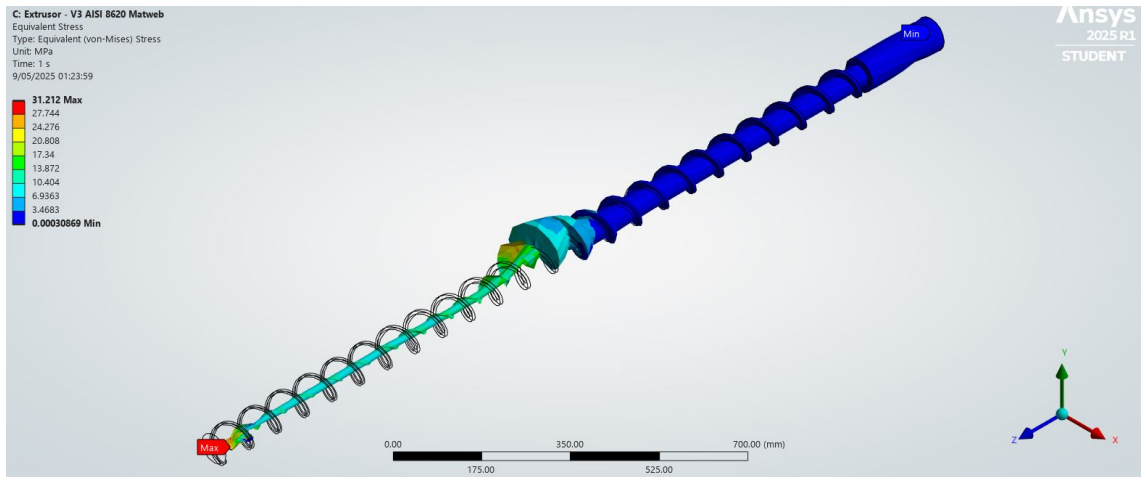


Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Resultados e interpretación: la simulación estructural estática arrojó los siguientes resultados máximos:

- **Esfuerzo equivalente (Von Mises) máximo (σ'_{max}): 31.21 MPa.** Este valor es extremadamente bajo comparado con el límite elástico del material ($S_y = 1035\text{ MPa}$). Indica que el tornillo está muy lejos de sufrir deformación plástica bajo estas cargas estáticas.

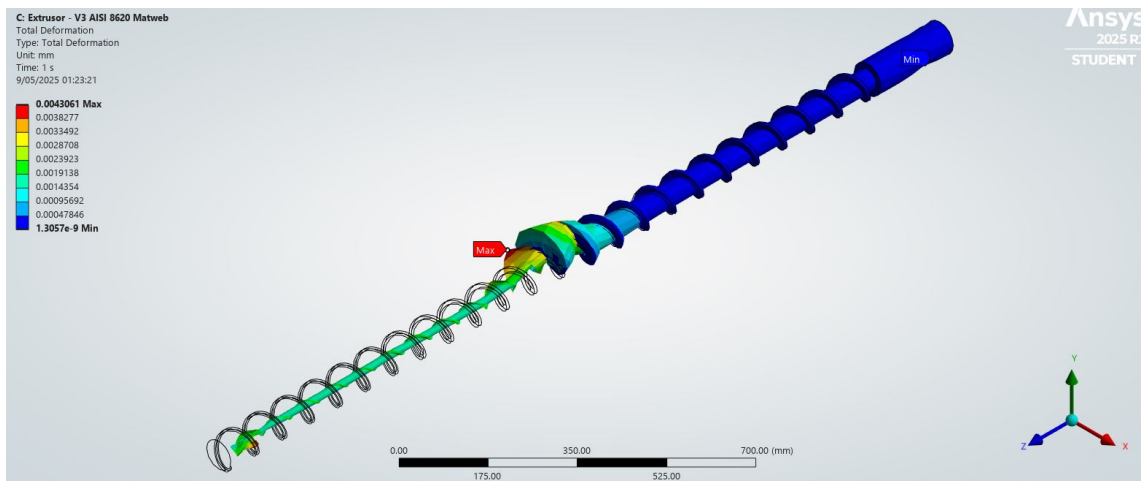
Figura 17: esfuerzo total máximo de 31.21 MPa en el tornillo extrusor



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

- Deformación total máxima (Def_{max}): 0.0043061 mm.** Esta deformación es mínima (aproximadamente 4.3 micrones) y muy inferior a la holgura radial entre tornillo y cañón ($\delta \approx 0.075$ mm), confirmando la alta rigidez del tornillo y descartando problemas de contacto por deflexión.

Figura 18: deformación total máxima de 0.0043061 mm. en el tornillo extrusor

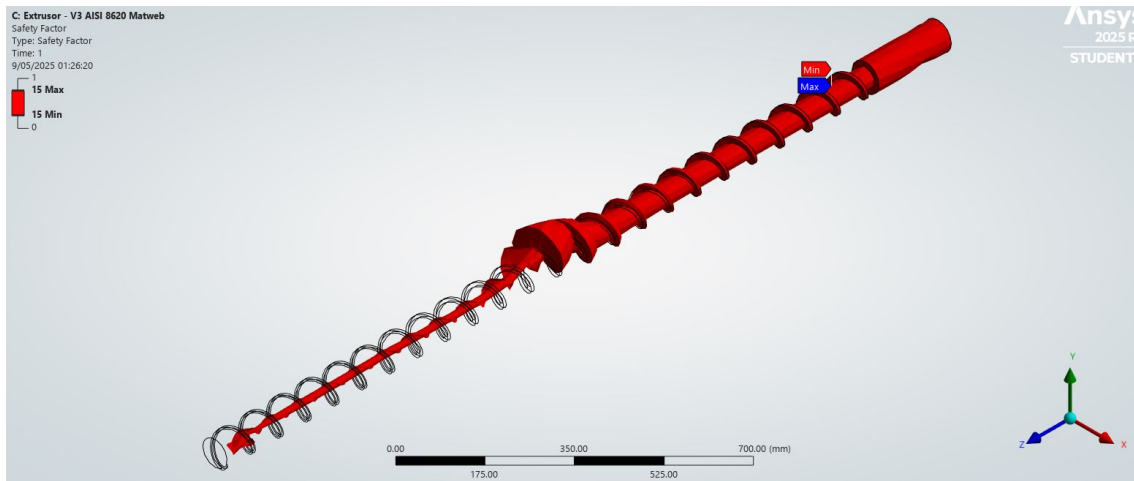


Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

- Factor de seguridad (FS):** se reportó un FS mínimo > 15 . Calculando el FS contra la fluencia usando el S_y proporcionado:

$$FS = \frac{S_y}{\sigma'_{max}} = \frac{1035 \text{ MPa}}{31.21 \text{ MPa}} \approx 33.2$$

Figura 19: factor de seguridad mínimo obtenido



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Conclusión de la simulación estática: el análisis estructural estático indica que el diseño geométrico del tornillo extrusor de 75 mm, fabricado en AISI 8620 tratado (con $S_y = 1035$ MPa), es muy robusto y seguro frente a las cargas estáticas operativas simuladas. Los esfuerzos y deformaciones son mínimos.

Simulación en filetes

Adicionalmente al análisis estructural del tornillo completo, se realizó una simulación con un enfoque específico en los filetes del tornillo. El propósito de este análisis más detallado fue evaluar con mayor precisión las concentraciones de esfuerzo en la geometría compleja de los filetes, donde se anticipan las cargas más críticas, y validar la integridad estructural bajo una combinación de presión del polímero y las fuerzas transmitidas debido al torque.

Para esta simulación, se utilizó un submodelo donde se aisló una sección representativa de los filetes, aplicando las condiciones de contorno derivadas del análisis global del tornillo en las caras de corte del submodelo. El material asignado a los filetes continuó siendo Acero Aleado AISI 8620, con un límite elástico de 1035 MPa.

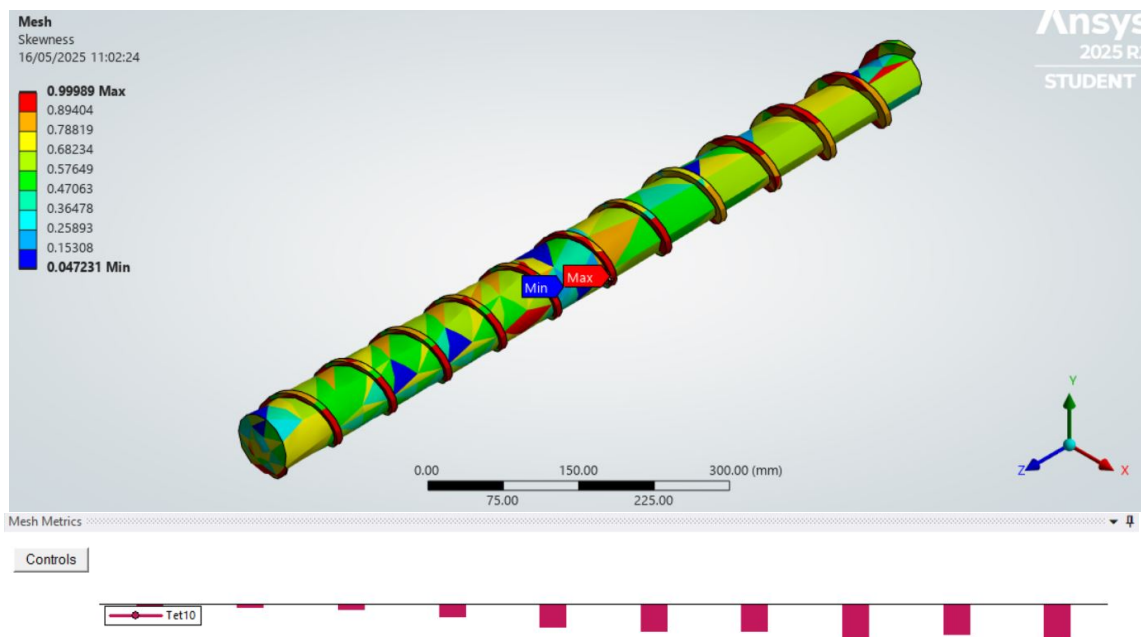
Para la simulación detallada de los filetes, se generó una malla que se evaluó su calidad mediante las métricas de *skewness* y *element quality*. En cuanto al *skewness*, donde un valor de 0 representa un elemento ideal y 1 un elemento degenerado, se registraron los siguientes estadísticos, ver figura 16: un valor mínimo de 0.0472, un valor máximo de 0.9999, un promedio de 0.6752 y una desviación estándar de 0.2101. El valor mínimo es indicativo de elementos de excelente calidad. El promedio se sitúa en un rango aceptable 0.5-0.8. Sin embargo, el valor máximo de *skewness* de 0.9999 es inaceptable 0.95-1, señalando la presencia de elementos con una distorsión extrema.

Respecto a la métrica de *element quality*, donde 1 es ideal y 0 es degenerado, los valores obtenidos fueron, ver figura 17: un mínimo de 0.0658, un máximo de 0.9989, un promedio de

0.4900 y una desviación estándar de 0.2283. El valor máximo de esta métrica se considera excelente ya que se encuentra en el rango 0.95-1, y el promedio se clasifica como bueno en un rango de 0.2-0.69. No obstante, el valor mínimo de *element quality* de 0.0658 es indicativo de elementos de calidad pobre en un rango de 0.01-0.149.

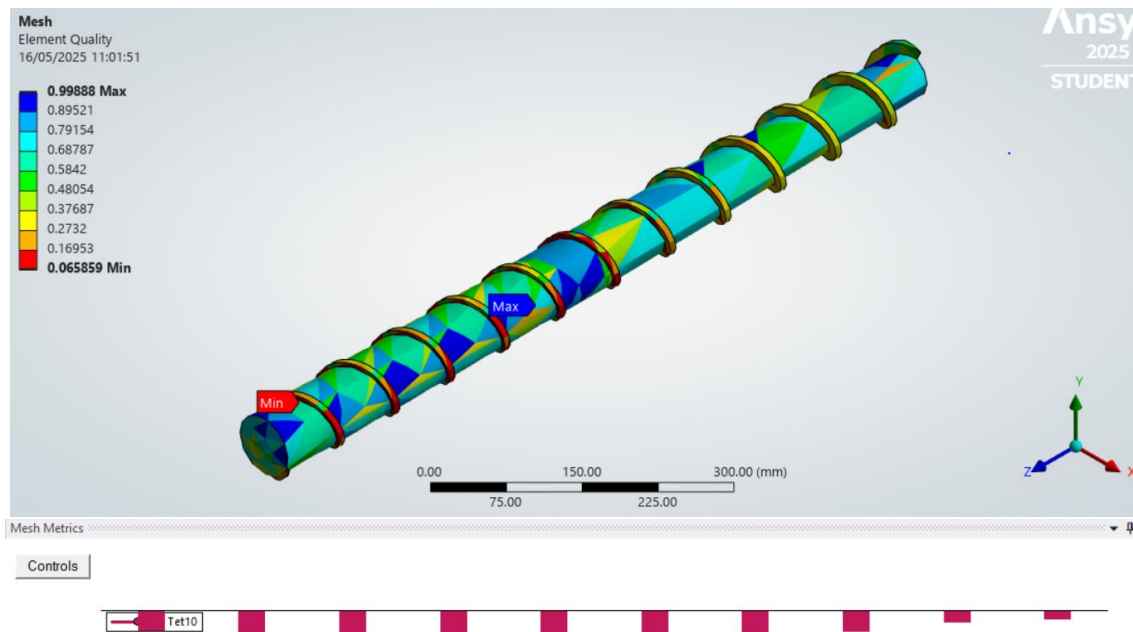
Una inspección visual de la distribución de calidad en el modelo de los filetes confirmó que los elementos con los valores más críticos de *skewness* (cerca de 0.9999) y *element quality* (cerca de 0.0658) se concentran predominantemente en las regiones de alta complejidad geométrica, como son las raíces y las crestas de los filetes del tornillo. Se reconoce que la presencia de estos pocos elementos con calidad numérica muy baja, especialmente en áreas susceptibles a concentración de esfuerzos, podría influir en la precisión de los valores puntuales de esfuerzo y deformación obtenidos en sus inmediaciones. Por ello, los resultados en estas localizaciones específicas se interpretarán considerando esta limitación del mallado.

Figura 20: calidad del mallado basado en *skewness* - filetes



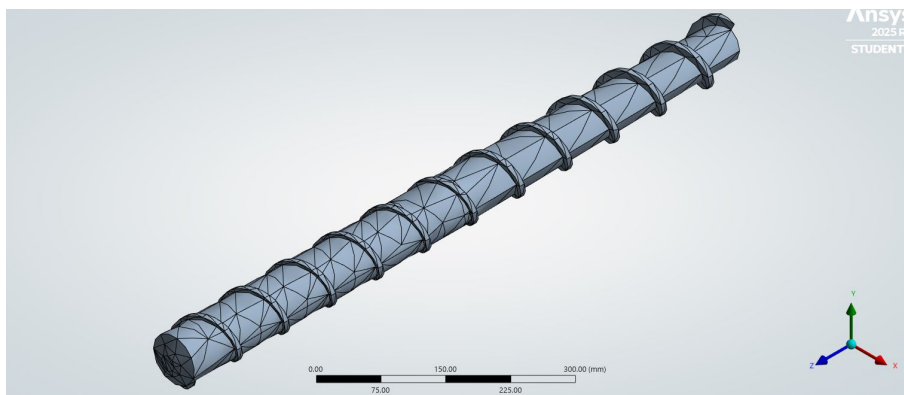
Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Figura 21: calidad del mallado basado en *element quality* - filetes



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

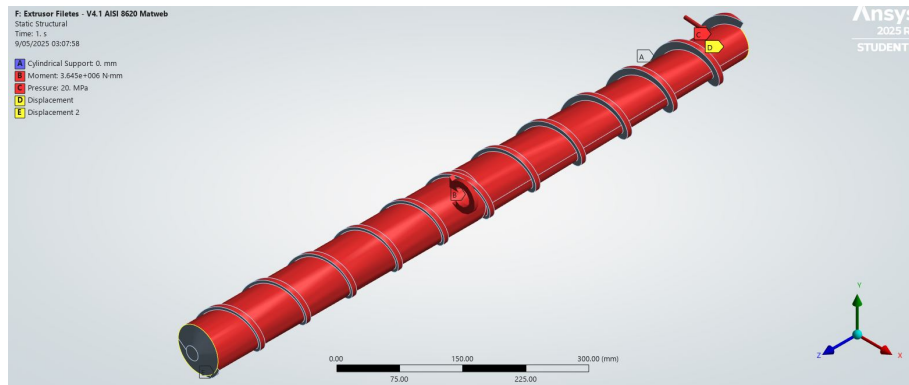
Figura 22: mallado en tornillo extrusor - filetes



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Para el análisis estructural detallado de los filetes mediante un submodelo independiente, las condiciones de contorno incluyeron un soporte cilíndrico (*cylindrical support*) en el diámetro exterior de los filetes (75 mm), con restricción radial fija y libertad axial y tangencial, simulando la guía del cañón. Para estabilizar el submodelo, se aplicaron Desplazamientos Fijos (*fixed displacement*) (movimiento cero en todos los ejes) en sus extremos axiales. Las cargas aplicadas consistieron en un Momento Torsor de 3.645×10^6 Nmm (3645 Nm) sobre el eje del submodelo, representando el par de accionamiento, y una presión tabulada de 20 MPa distribuida sobre el diámetro de raíz y las caras traseras (de empuje) de los filetes, simulando la acción del polímero.

Figura 23: cargas aplicadas en tornillo extrusor - filetes



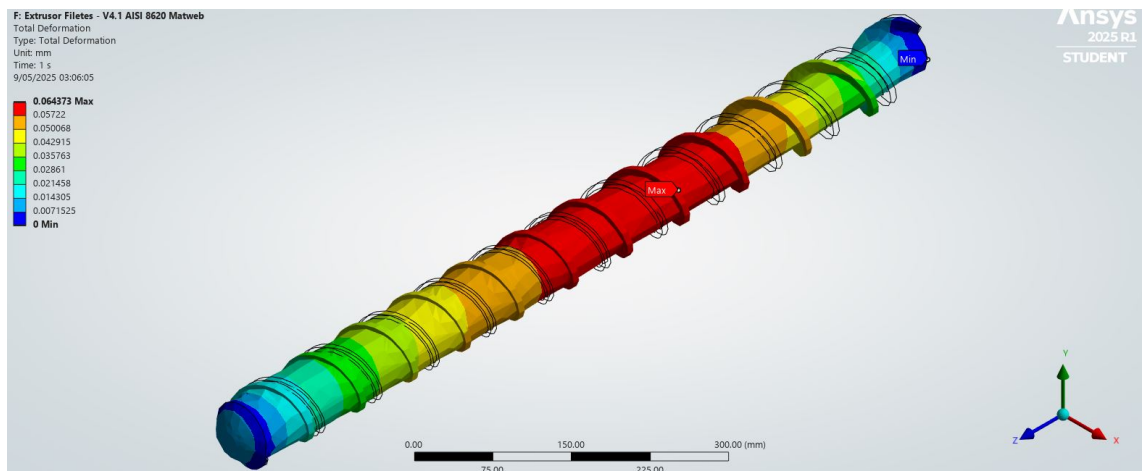
Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Los valores máximos reportados en la simulación del usuario son:

- **Deformación total máxima (Def_{max}): 0.064373 mm**
- **Esfuerzo equivalente máximo (Von Mises) (σ'_{max}): 222.58 MPa**

Análisis de la deformación total máxima: la deformación obtenida 0.064373 mm es superior en la simulación de todo el tornillo extrusor (0.0042688 mm). No obstante, el valor de 0.064373 mm se mantiene por debajo de la holgura radial típica estimada entre el tornillo y el cañón ($\delta \approx 0.075$ mm), lo que sugiere que, bajo las condiciones de carga de esta simulación, no necesariamente se produciría un contacto directo por flexión, aunque el margen es menor.

Figura 24: deformación total máxima de 0.064373 mm en el tornillo extrusor - filetes

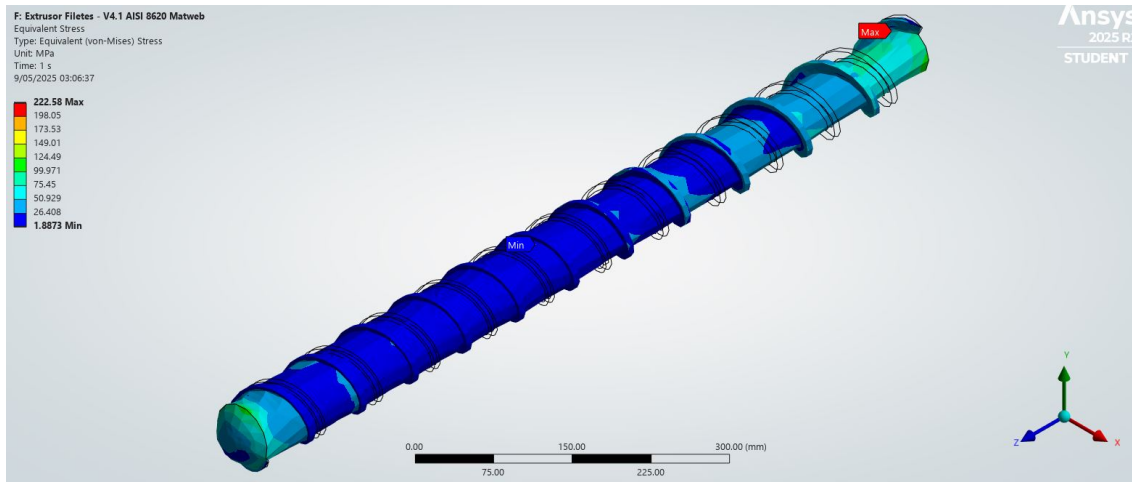


Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Análisis del esfuerzo equivalente máximo (von Mises): el esfuerzo máximo 222.58 MPa es considerablemente mayor que el valor de 30 MPa, es posible que el esfuerzo máximo de

222.58 MPa se haya localizado en un punto específico de un filete.

Figura 25: esfuerzo total máximo de 222.58 MPa en el tornillo extrusor - filetes



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Cálculo e interpretación del factor de seguridad (FS) Utilizando el límite elástico del material AISI 8620, el factor de seguridad para los resultados de la simulación es:

$$FS = \frac{S_y}{\sigma'_{max,filete}} = \frac{1035 \text{ MPa}}{222.58 \text{ MPa}} \approx 4.65$$

Este factor de seguridad de 4.65 es robusto, cumple y supera el objetivo de diseño especificado de diseñar los componentes de una extrusora con un factor de seguridad mayor o igual a 2, un FS de 4.65 indica una buena seguridad contra la falla por fluencia estática bajo las cargas consideradas.

Los resultados de la simulación con un esfuerzo máximo de von Mises de 222.58 MPa y un factor de seguridad calculado de ≈ 4.65 , sugiere que el diseño del tornillo extrusor mantiene una integridad estructural adecuada y cumple con los criterios de seguridad establecidos en el proyecto de referencia. La deformación total, aunque mayor que en la simulación de todo el sistema, se mantiene dentro de límites que podrían considerarse aceptables en relación con la holgura operacional entre el tornillo y el cañón.

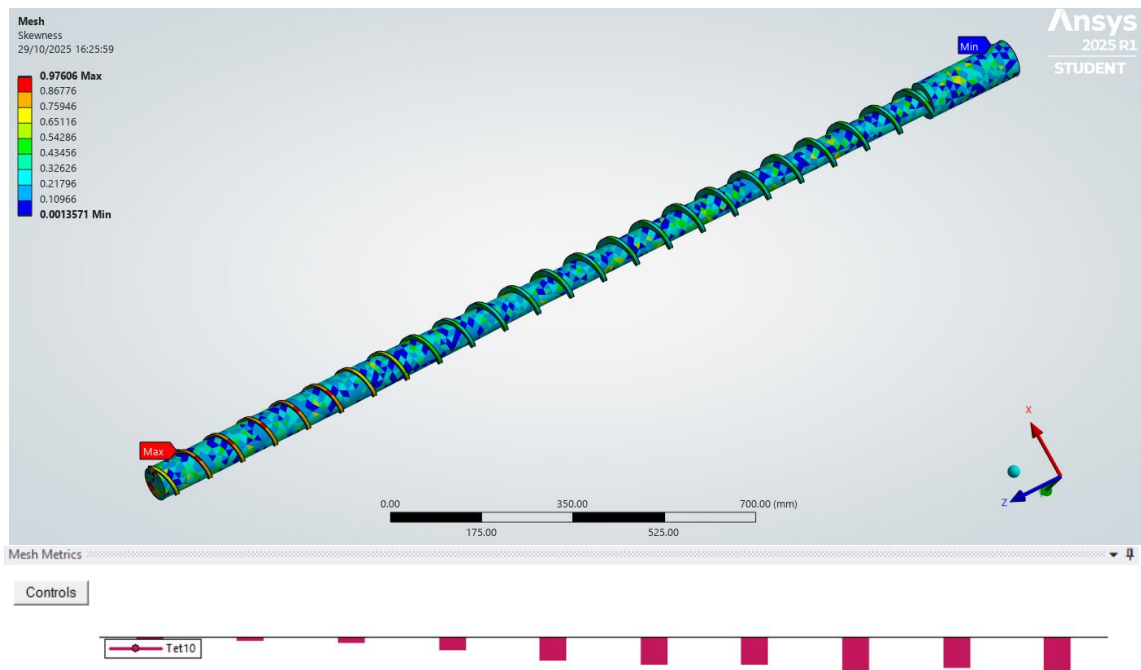
Refinamiento de malla

Tras realizar las primeras simulaciones y analizar sus resultados, decidí realizar una nuevas de simulaciones para mejorar los resultados y la mallada, esto para tener una mayor certeza y veracidad de los resultados obtenidos Ya que se realizó un mallado inicial que arrojó métricas de calidad inaceptables *skewness* máx 0.999, (ver Figuras 13 y 20), concentradas en la raíz de los filetes.

Estudio de convergencia y selección de malla: dada la complejidad geométrica, la calidad de la malla es crítica para la precisión de los resultados.

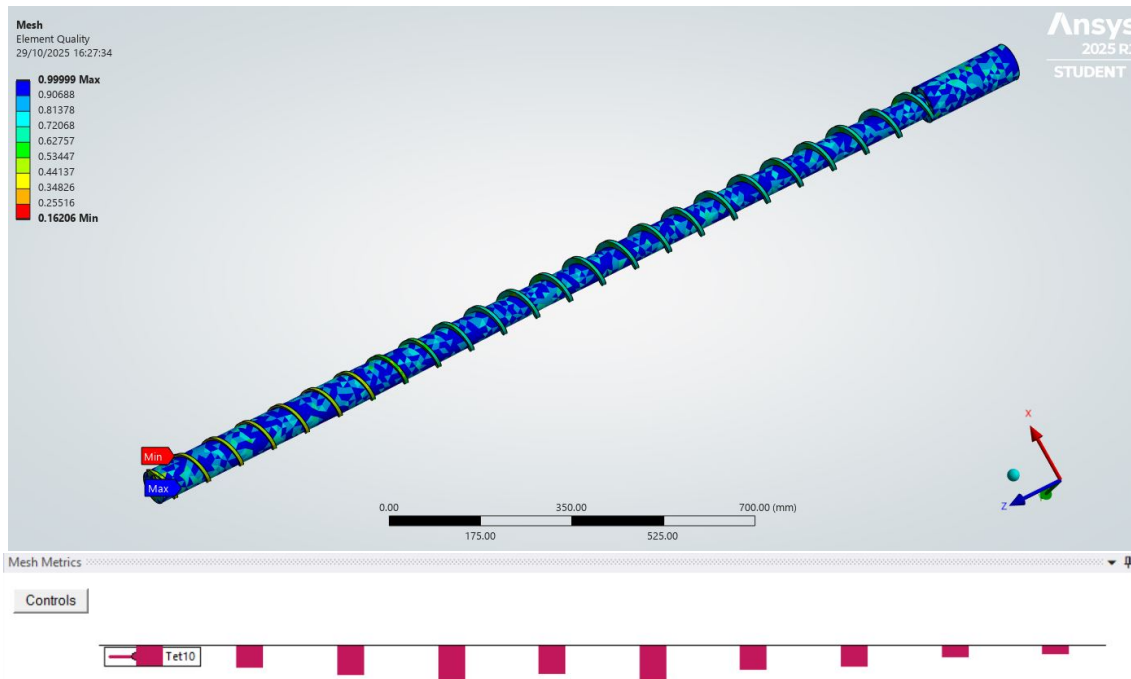
1. **Malla inicial:** un mallado automático inicial (similar al de las Figuras 9 y 10) presentó métricas de calidad subóptimas (ej. *skewness* máx > 0.99, *elem. quality* mín \approx 0.066), concentradas en las raíces de los filetes.
2. **Refinamiento:** se aplicó un control *body sizing* de 15 mm. Esto mejoró significativamente la malla, alcanzando un *skewness* promedio de \approx 0.30 y un *element quality* promedio > 0.85.

Figura 26: calidad del mallado basado en *skewness* tornillo ref 1



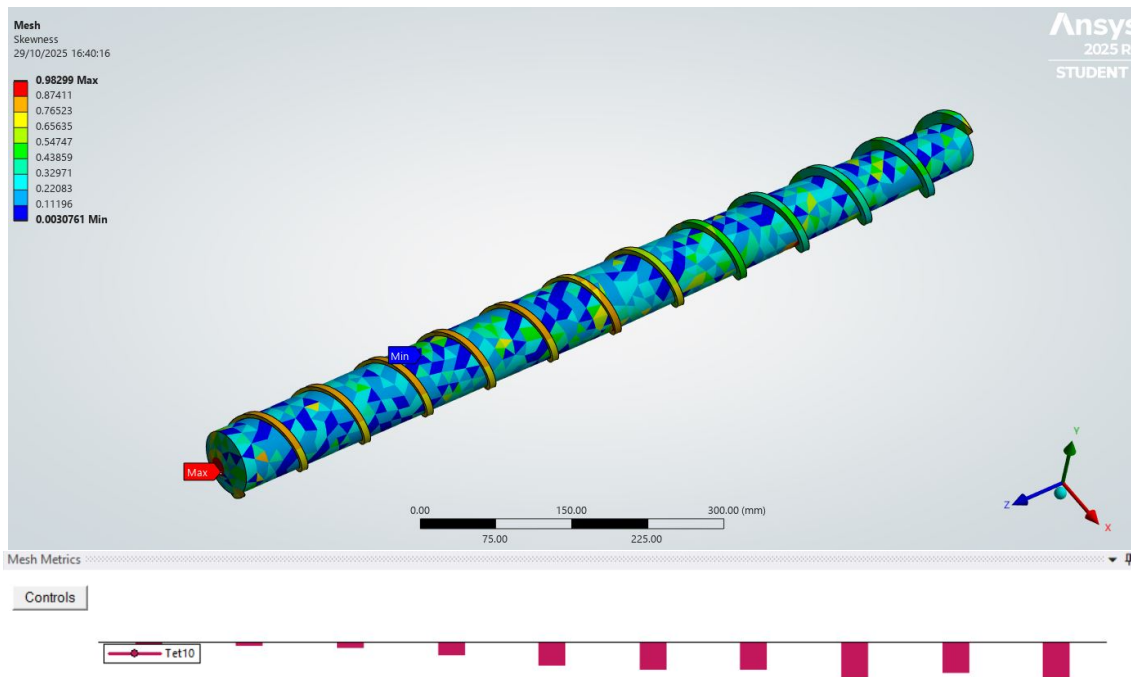
Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Figura 27: calidad del mallado basado en *element quality* tornillo ref 1



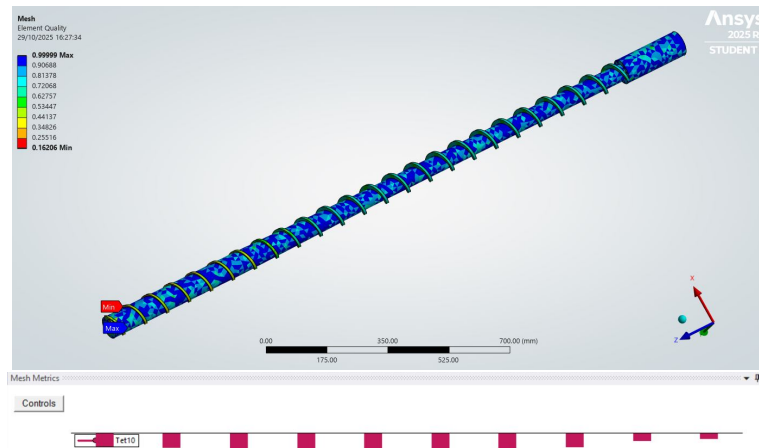
Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Figura 28: calidad del mallado basado en *skewness* filetes fef 1



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

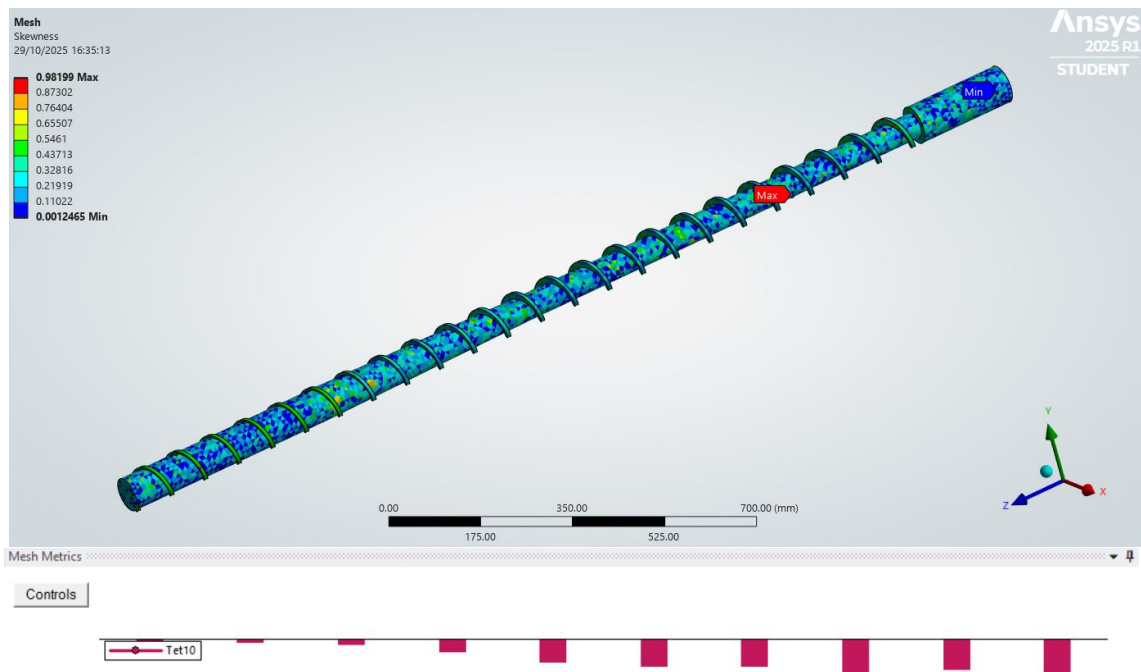
Figura 29: calidad del mallado basado en *element quality* filetes fef 1



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

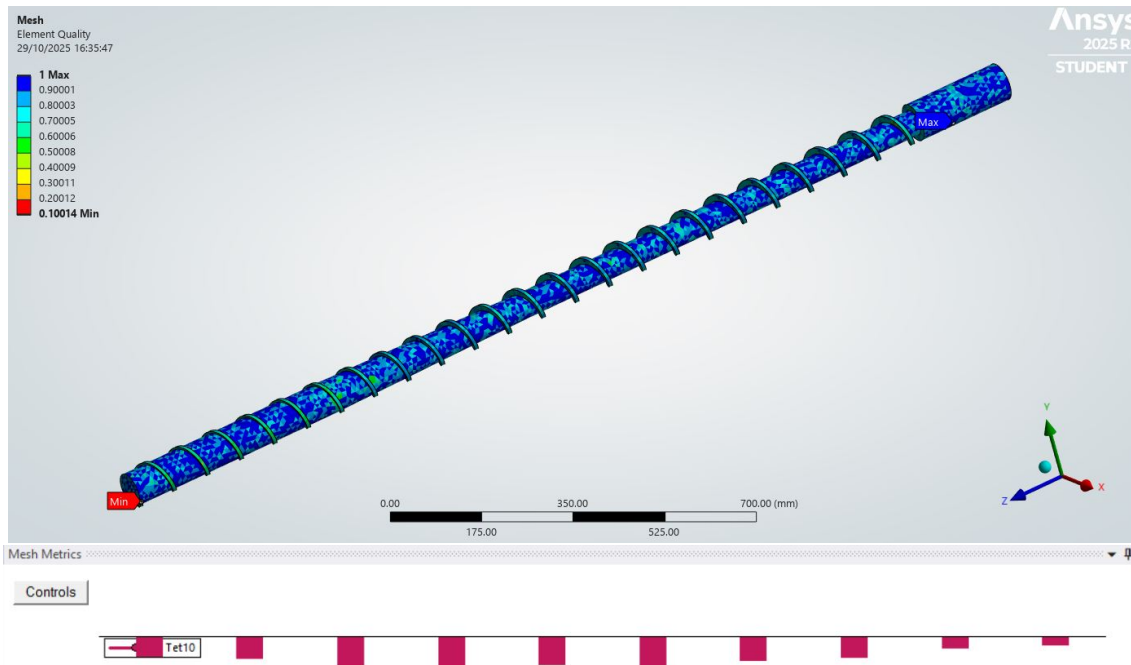
3. **Refinamiento final:** se realizó un segundo refinamiento con *body Sizing* de 10 mm. Esto resultó en una malla de alta calidad, con un *skewness* promedio de ≈ 0.25 y un *element quality* promedio > 0.90 .

Figura 30: calidad del mallado basado en *skewness* tornillo ref 2



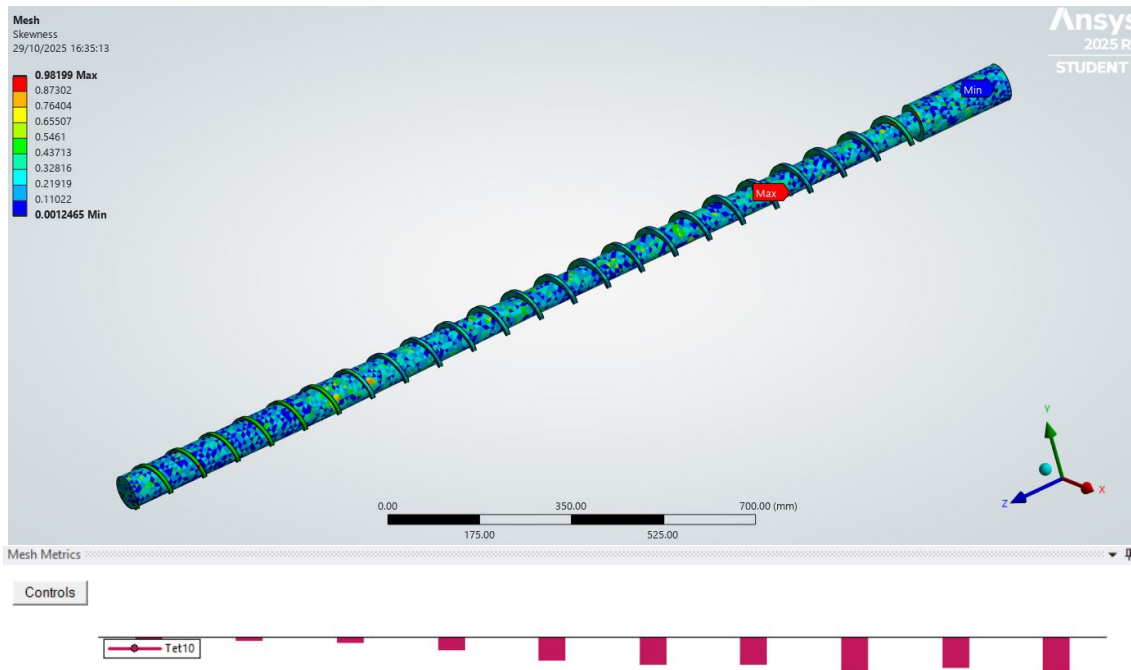
Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Figura 31: calidad del mallado basado en *element quality* tornillo ref 2



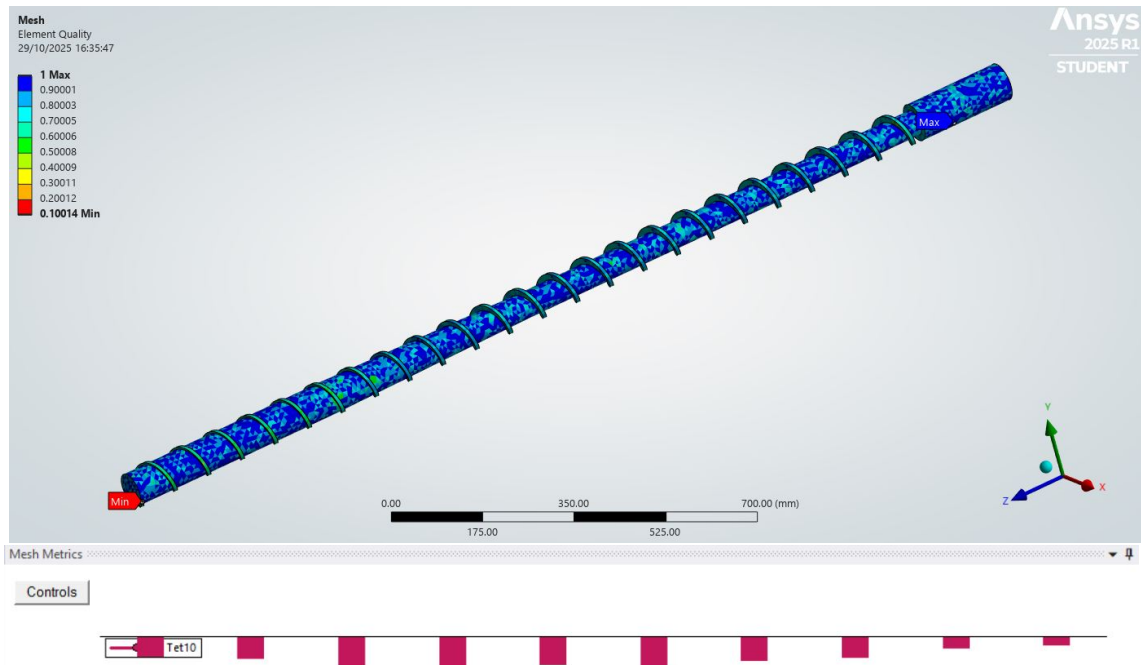
Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Figura 32: calidad del mallado basado en *skewness* filetes ref 2



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Figura 33: calidad del mallado basado en *element quality* filetes ref 2



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

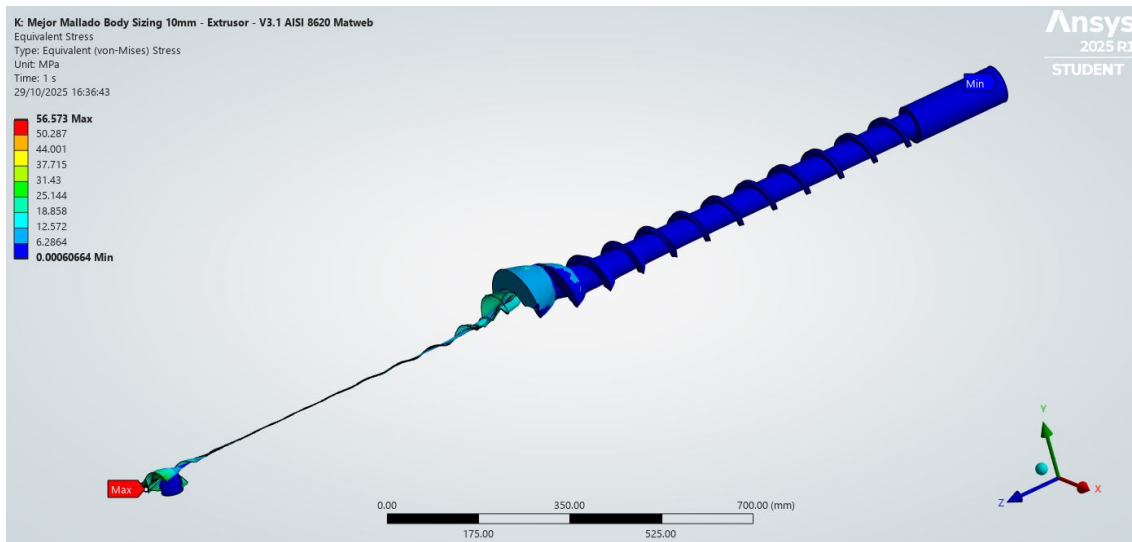
Este proceso de refinamiento es esencial. Como se observará, los esfuerzos máximos calculados aumentaron a medida que la malla mejoró, indicando que las mallas más gruesas subestimaban la concentración de esfuerzo. Se seleccionaron los resultados de la malla de 10 mm por ser los más precisos y conservadores.

Resultados de la simulación (malla refinada 10 mm):

■ **Análisis del tornillo completo:**

- Esfuerzo Von Mises máximo: $\sigma'_{max,global} \approx 56.57$ MPa.

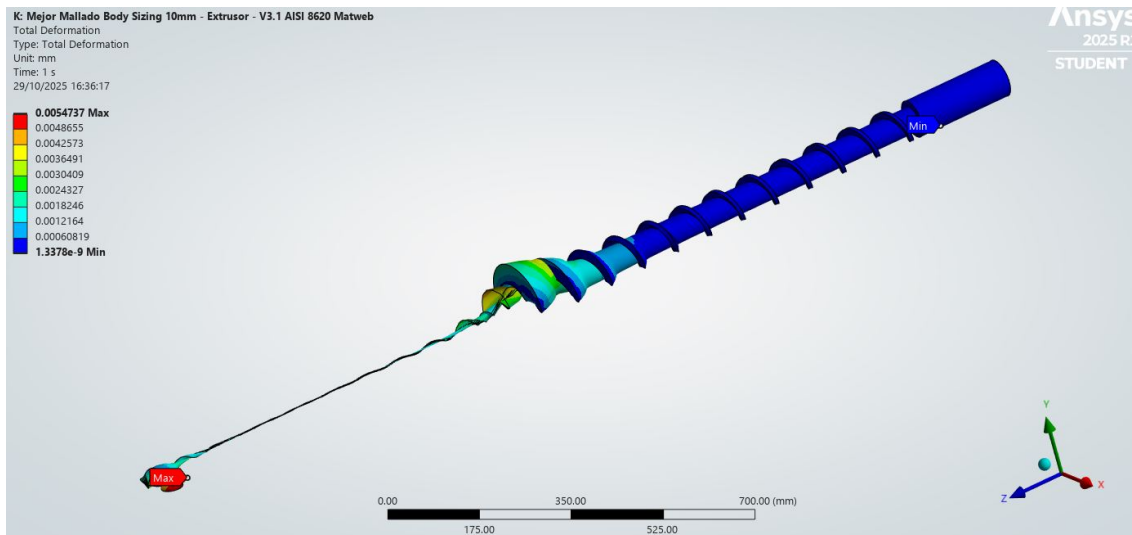
Figura 34: esfuerzo total máximo de 56.57 MPa en el tornillo extrusor



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

- Deformación total máxima: $Def_{max,global} \approx 0.0054$ mm.

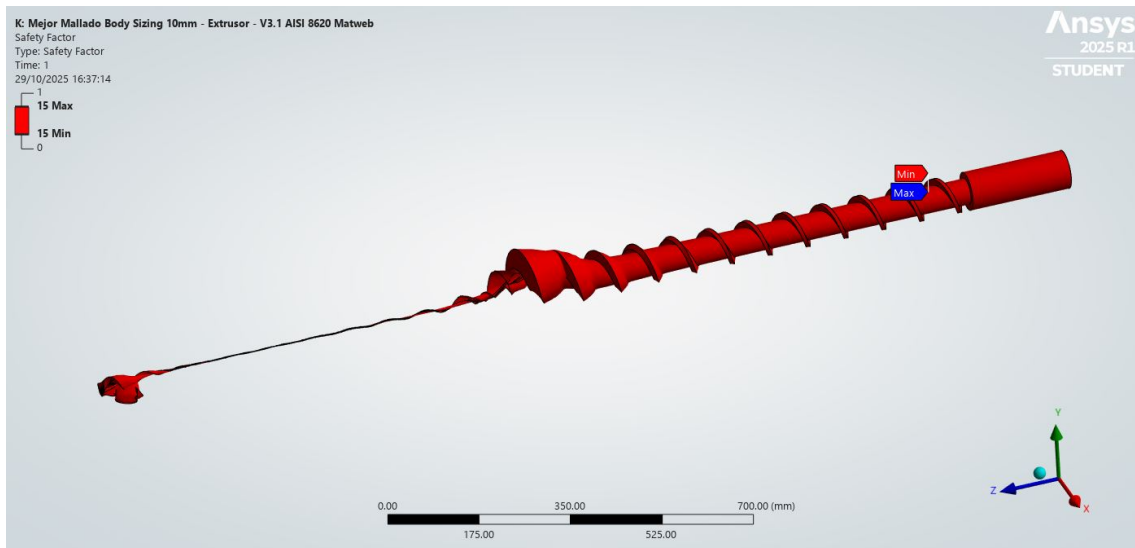
Figura 35: deformación máxima de 0.0054 mm en el tornillo extrusor



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

- Factor de seguridad mínimo: $FS_{global} = 1035/56.6 \approx 18.3$.

Figura 36: factor de seguridad resultante tornillo extrusor refinamiento malla

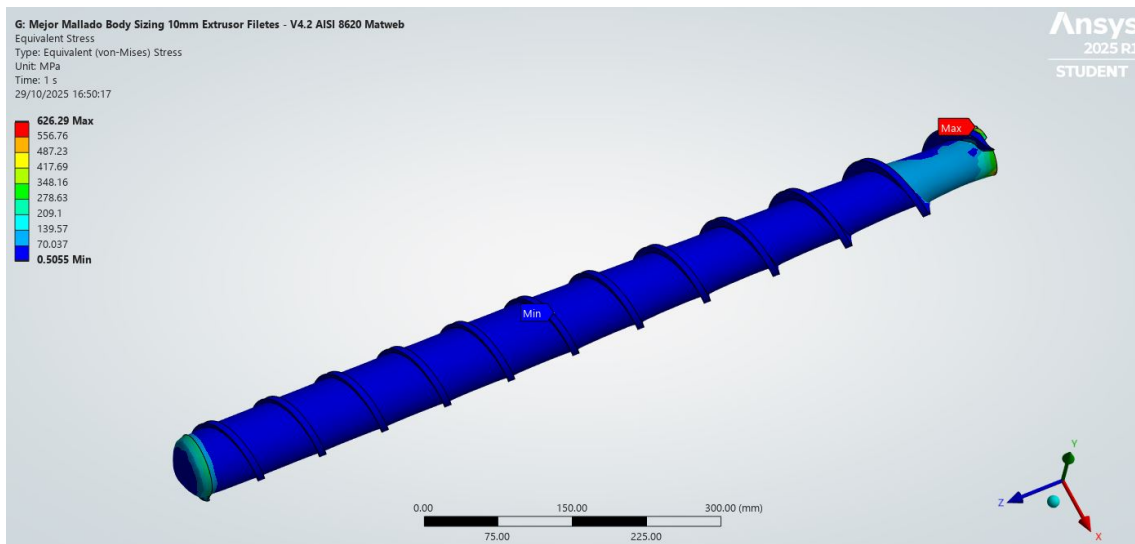


Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

▪ **Análisis detallado de filetes (submodelo):**

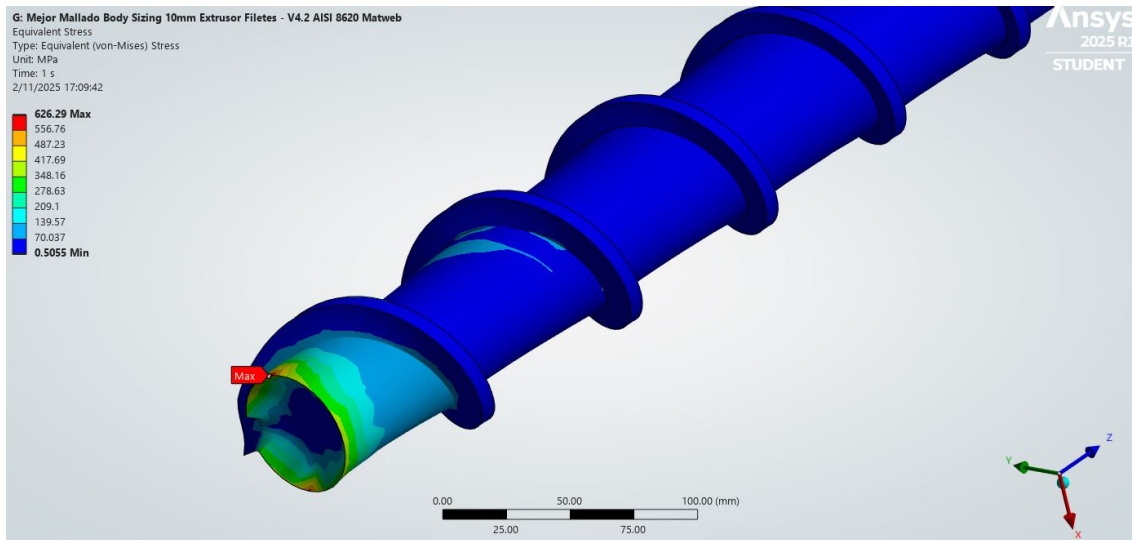
- Esfuerzo Von Mises máximo: $\sigma'_{max,filete} \approx 626.3$ MPa. Localizado al inicio de la sección de transición.

Figura 37: esfuerzo total máximo de 626.29 MPa en el tornillo extrusor - filetes



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

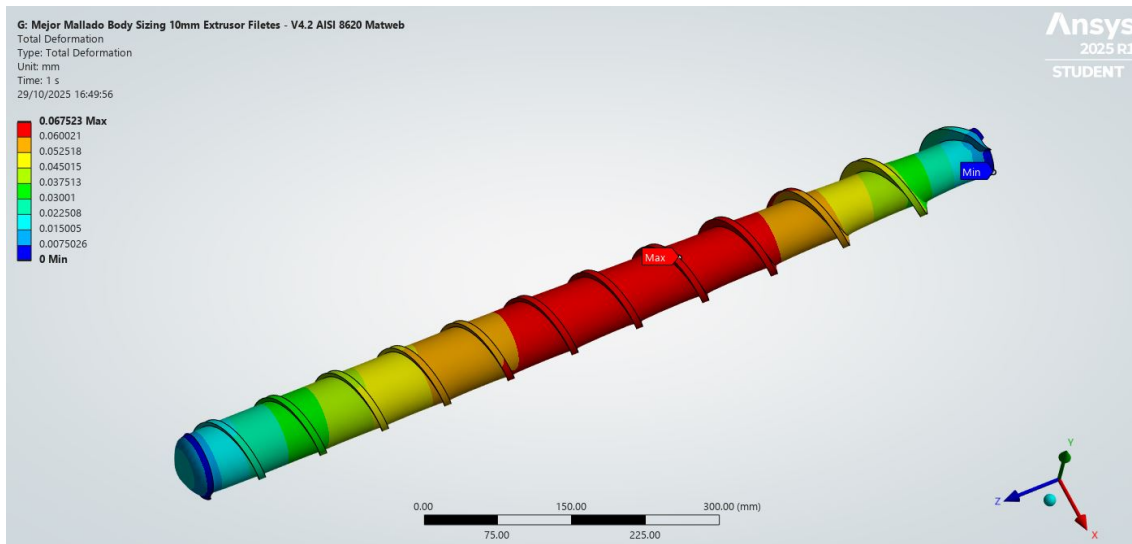
Figura 38: esfuerzo total máximo de 626.29 MPa en el tornillo extrusor - filetes 2



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

- Deformación total máxima: $Def_{max, filete} \approx 0.067$ mm.

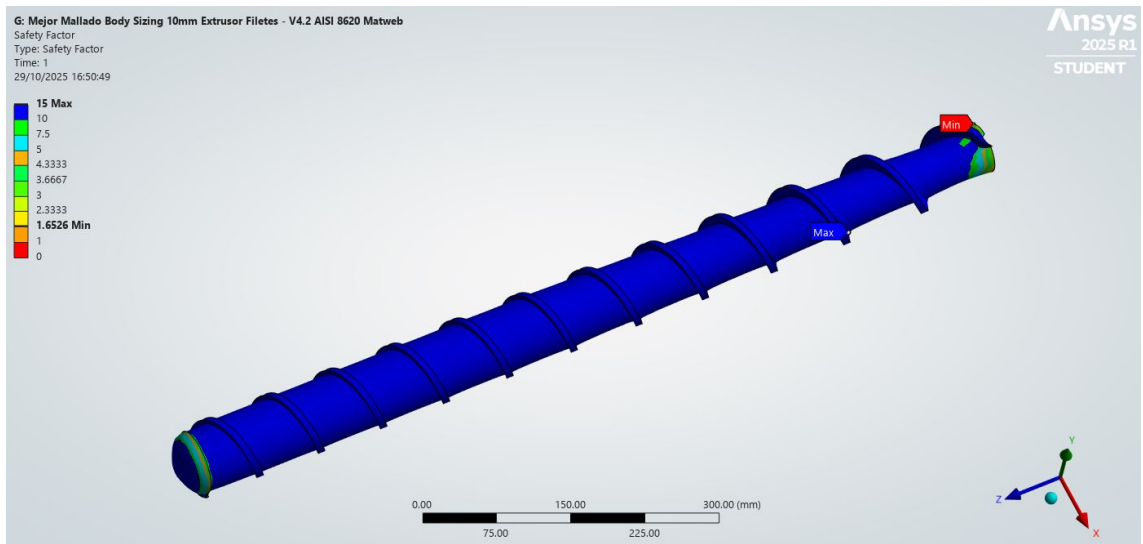
Figura 39: deformación máxima de 0.067 mm en el tornillo - filetes



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

- Factor de seguridad mínimo: $FS_{filete} = 1035/626.3 \approx 1.65$.

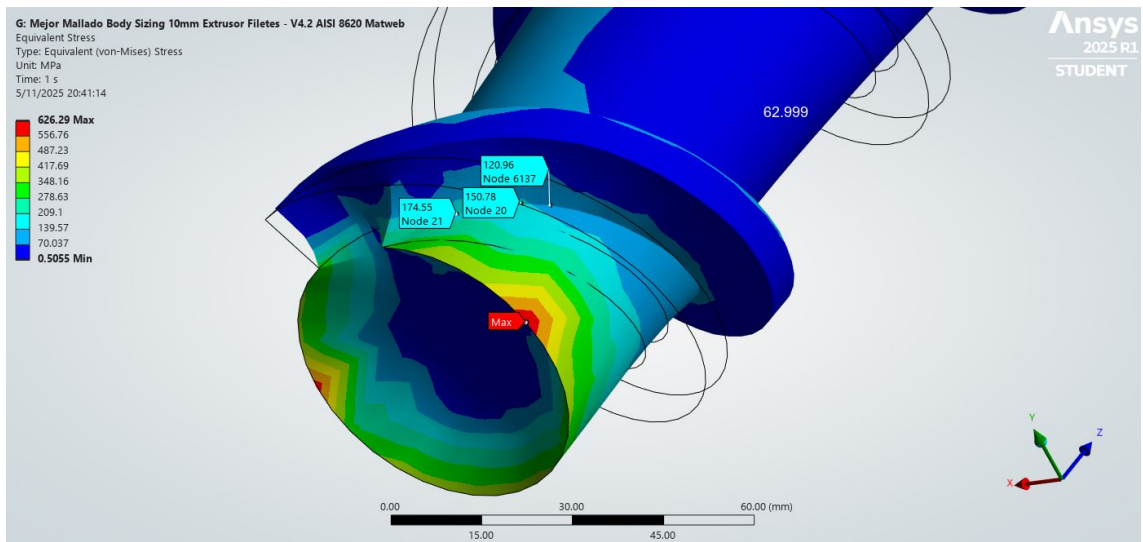
Figura 40: factor de seguridad resultante tornillo extrusor - filetes refinamiento malla



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

- Esfuerzo Von Mises máximo en la raíz de los filetes: $\sigma'_{max,raizfilete} \approx 174.55$ MPa. Localizado en la raíz del filete.

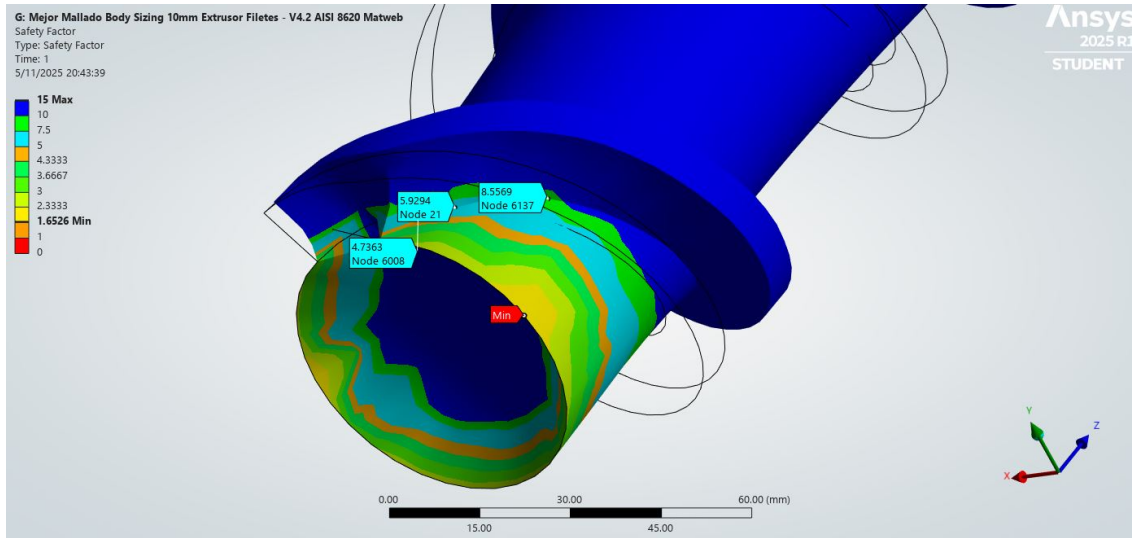
Figura 41: esfuerzo total máximo de 174.55 MPa en el tornillo extrusor - raíz filetes



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

- Factor de seguridad mínimo: $FS_{raizfilete} = 1035/220.21 \approx 4.7$.

Figura 42: factor de seguridad resultante tornillo extrusor - raíz filetes refinamiento malla



Fuente: Elaboración propia con Ansys / Cortesía ANSYS, Inc.

Interpretación y discusión de resultados FEA: el estudio de convergencia fue exitoso. La simulación inicial (malla pobre, FS=33 y FS=4.65) subestimó significativamente los esfuerzos. La malla refinada (10 mm) es mucho más fiable.

El análisis del cuerpo global del tornillo (FS=18.3) demuestra que el núcleo es extremadamente robusto a la torsión y compresión general. La deformación global (0.0054 mm) es insignificante.

El análisis del submodelo con malla refinada (10 mm) arrojó un esfuerzo máximo de 626.3 MPa (FS = 1.65), localizado precisamente en la circunferencia de inicio de la zona de transición (ver Figura 41/42). Se determinó que este valor es una singularidad de esfuerzo artificial, causada por la condición de contorno aplicada en el borde del submodelo, y por lo tanto, no representa un esfuerzo real en el componente. Al analizar los esfuerzos en las zonas críticas reales como lo son la raíz de los filetes, se encontró un esfuerzo máximo en un rango de 220 MPa a 170 Mpa indicado por una probeta en el resultado de la simulación. Esto resulta en un factor de seguridad de diseño real de $FS = 1035 / 220 \approx 4.7$. Este valor cumple y supera el objetivo de diseño de $FS \geq 2.0$, validando la robustez de los filetes. Además de eso la deformación máxima (0.067 mm) sigue siendo menor que la holgura radial ($\delta \approx 0.075$ mm), descartando contacto por deflexión.

Resultados y análisis

Este capítulo muestra el cumplimiento de los requisitos de diseño (RD), funcionamiento (RF), usuario (RU) y seguridad (RS) establecidos previamente, como se detalla en el Cuadro 1. Posteriormente, se presentan los resultados específicos del diseño geométrico, análisis funcional, validación estructural y los sistemas principales. Los resultados se derivan de los cálculos analíticos, selecciones de componentes y simulaciones estructurales realizadas.

Cuadro 1: Cumplimiento detallado de requisitos del diseño conceptual

Código	Descripción del requisito	Estado	Justificación / Referencia
Requisitos de diseño (RD)			
RD1	La zona de extrusión (enchaquetado de cada zona) debe estar unido por tornillos y tuercas que permita desarmarlo.	Cumplido	Se propone unión de secciones de cañón por bridas y tornillos ASTM A193 B7 (Ver Sección 6.0.3).
RD2	La zona de extrusión debe tener un largo menor a 2 m.	Cumplido	Longitud activa $L = 1.8$ m (< 2 m).
RD3	La zona de alimentación abarcará del 40 % al 60 % del largo del cañón.	Cumplido	Zona alimentación $L_f = 900$ mm (50 % de L).
RD4	La zona de transición abarcará del 20 % al 30 % del largo del cañón.	Cumplido	Zona transición $L_t = 450$ mm (25 % de L).

Continúa en la siguiente página...

Cuadro 1 – Continuación

Código	Descripción del requisito	Estado	Justificación / Referencia
RD5	La zona de dosificación abarcará del 20 % al 30 % del largo del cañón.	Cumplido	Zona dosificación $L_m = 450$ mm (25 % de L).
RD6	El tamaño de la máquina debe estar entre un rango de 2.2 a 2.5 m de largo, 2.5 a 3 m de alto y 1.5 a 2.25 m de ancho.	Cumplido	Estimación basada en ensamble: 2.25 m (L) x 1.60 m (H) x 0.70 m (A). (Ver Sección 6.0.1 y planos de ensamble).
RD7	El espacio para la máquina debe ser como mínimo de 2.75 m de largo, 2.5 m de alto y 1.5 m de ancho.	Cumplido	Estimación de dimensiones de máquina (RD6) se ajusta a los mínimos de espacio.
RD8	La zona de extrusión debe ser de acero inoxidable que se consiga localmente.	Cumplido	Se seleccionó acero inoxidable AISI 420 para el cañón.
RD9	El molde extrusor debe ser capaz de acoplarse a la entrada de la peletizadora.	Cumplido	El diseño asegura un acomple con el dado de la peletizadora.
RD10	Los tornillos y tuercas debe ser estandarizadas ASTM, ISO o su equivalente en ASME que se encuentren localmente.	Cumplido	Se seleccionó tornillería estándar ASTM (A193 B7 / A194 2H).
Requisitos de funcionamiento (RF)			
RF1	La capacidad de extrusión debe ser de al menos de 150 kg/h.	Cumplido	Capacidad de proceso > 150 kg/h asegurada por diseño de accionamiento (hasta 118 RPM).
RF2	Debe contar con un botón de emergencia para interrumpir el proceso de extrusión.	Cumplido	Se especifica implementación de botón de parada de emergencia en diseño de control.
RF3	El panel de control debe contar con un regulador de revoluciones.	Cumplido	Seleccionado un motorreductor Sumitomo de la línea Cycle con su regulador.
RF4	El motor que transmite potencia debe ser de corriente alterna.	Cumplido	Seleccionado un motorreductor Sumitomo de la línea Cycle con su regulador.
RF5	El motor debe entregar una potencia de 0.75 kW como mínimo.	Cumplido	Potencia motor (60 HP \approx 45 kW) \gg 0.75 kW mínimo.

Continúa en la siguiente página...

Cuadro 1 – Continuación

Código	Descripción del requisito	Estado	Justificación / Referencia
RF6	El motor debe girar a 445 rpm como mínimo.	Cumplido	Velocidad nominal del motor (\approx 1770 RPM) \gg 445 RPM mínimo.
Requisitos de seguridad (RS)			
RS1	El motor debe tener un sistema protección contra sobrecarga y corto circuito.	Cumplido	VFD incluye protecciones; complementar con protecciones externas en tablero.
RS2	Las zonas con partes móviles estarán cubiertas para evitar el contacto.	Cumplido	Se deben diseñar e instalar guardas para partes móviles en ensamble final (concepto incluido).
RS3	Debe tener una tapa de acceso el botón de encendido.	Cumplido	Se debe implementar protección de acceso a controles en diseño de tablero (concepto incluido).
Requisitos de usuario (RU)			
RU1	La máquina debe funcionar bajo la supervisión de un operador.	Cumplido	El concepto de operación asume supervisión continua.
RU2	La máquina deberá contar con un instructivo de uso (manual).	Cumplido	Se requiere generar manual de operación y mantenimiento (borradores elaborados).
RU3	Debe contar con rótulos en áreas peligrosas o calientes así como el equipo de seguridad necesario para operar la máquina.	Cumplido	Se requiere añadir señalización de seguridad y definir EPP en manual/máquina.

6.0.1. Diseño geométrico del sistema de extrusión

Los parámetros geométricos fundamentales del sistema de extrusión, definidos para cumplir con los requisitos de procesamiento de PET reciclado y las limitaciones espaciales, se resumen en el Cuadro 2.

Se cumplieron los requisitos de diseño geométrico (RD2-RD5), que valida la estructura principal de la máquina. La longitud total que se estableció de 1.8 m, cumplió con la restricción de ser menor a 2 m (RD2). Esta dimensión junto con la relación L/D de 24:1, es fundamental ya que se alinea a las prácticas recomendadas para la extrusión de PET, proporcionando una longitud suficiente para garantizar la fusión del polímero.

Cuadro 2: Parámetros geométricos principales del sistema de extrusión.

Componente	Parámetro	Valor
Tornillo extrusor	Diámetro nominal (D)	75 mm
	Longitud activa total (L)	1.8 m
	Relación L/D	24 : 1
	Long. Zona alimentación (L_f)	900 mm (50 % de L)
	Long. Zona transición (L_t)	450 mm (25 % de L)
	Long. Zona dosificación (L_m)	450 mm (25 % de L)
	Ángulo de hélice (ϕ)	20°
	Ancho de filete (e)	7.5 mm ($\approx 0.1D$)
	Diámetro de raíz (variable)	51 mm a 67 mm
Cañón extrusor	Material del cuerpo	Acero inoxidable AISI 420
	Diámetro exterior (para análisis)	95 mm
	Segmentación	3 zonas
Unión de secciones	Método	bridas y tornillería de alta temp.
Dimensiones generales estimadas (máquina ensamblada)	Longitud total	≈ 2.25 m
	Alto total	≈ 1.60 m
	Ancho total	≈ 0.70 m

La distribución de las longitudes en las diferentes zonas: 50 % alimentación, asegura un transporte de sólidos eficiente y la compactación inicial del material (RD3), así como para en las zonas de transición y dosificación (RD4, RD5) un 25 % garantiza una plastificación y generación de presión adecuada para este tipo de polímero.

Finalmente, la selección de materiales como el acero inoxidable AISI 420 para el cañón (RD8) y tornillería estándar ASTM (RD10) responde a la necesidad de usar componentes con resistencia a la corrosión y al desgaste, cuya disponibilidad local ha sido considerada.

6.0.2. Análisis funcional y de rendimiento

El análisis funcional evalúa la capacidad del diseño para cumplir con los objetivos de producción y operatividad se resume en el Cuadro [3](#).

El requisito funcional más crítico era alcanzar una capacidad de extrusión de al menos 150 kg/h (RF1). Los cálculos de diseño del tornillo y la estimación de potencia requerida se realizaron sobre la base de este objetivo. Sin embargo, durante la fase de selección de componentes, se tomó una decisión de diseño estratégica que impacta directamente este

Cuadro 3: Parámetros funcionales y de rendimiento clave del diseño.

Parámetro	Valor de diseño / selección
Capacidad de extrusión mínima (RF1)	150 kg/h
Velocidad teórica del tornillo para 150 kg/h	≈ 27 RPM
Rango de velocidad operativa del tornillo (RF3)	Hasta 118 RPM
Tipo de motor (RF4)	Inducción trifásico de corriente alterna
Potencia del motor seleccionado (RF5)	60 HP (≈ 45 kW)
Velocidad nominal del motor (RF6)	≈ 1770 RPM

resultado. Se seleccionó un motorreductor integrado Sumitomo de 60 HP (RF5).

La elección del motor de 60 HP es una decisión que prioriza la robustez, simplificación del diseño y del ensamblaje al utilizar una unidad comercial integrada que elimina la necesidad de diseñar una caja reductora a medida. El motor es de corriente alterna (RF4) y su velocidad de salida de hasta 118 RPM (RF3) ofrece un rango de operación flexible.

6.0.3. Validación estructural y de componentes

Los resultados de los análisis de esfuerzos y la selección de materiales para los componentes críticos se presentan en el Cuadro 4, asegurando la integridad estructural bajo cargas operativas. Las visualizaciones de los resultados de simulación por elementos finitos (FEA) se encuentran en la sección de simulación.

El tornillo extrusor de acero AISI 8620 ($S_y = 1035$ MPa MatWeb, [2025]) presenta un $FS \approx 18.3$ en su cuerpo principal y un $FS \approx 1.65$ en el análisis detallado de los filetes. Las deformaciones máximas (≈ 0.0055 mm global, 0.067 mm en filetes). Si bien este valor es superior a 1 (indicando seguridad contra falla estática), es inferior al objetivo de diseño de $FS \geq 2.0$. La deformación máxima (0.067 mm) se mantiene por debajo de la holgura radial ($\delta \approx 0.075$ mm), validando el diseño contra contacto por deflexión, se consideran aceptables (ver Figuras 36 y 40). La calidad de la malla utilizada en la simulación de los filetes se detalla en la Sección 5.4.8.

El cañón extrusor de acero AISI 420 ($S_y \approx 1200$ MPa), bajo una presión interna de 20 MPa, presenta un $FS \approx 12.9$, confirmando la idoneidad del espesor de pared. La tornillería M22 ASTM A193 B7 / A194 2H para las uniones del cañón cumple con un $FS \approx 2.5$ a 280°C.

Los resultados de la validación estructural son excelentes y superan con creces el requisito mínimo.

Tornillo extrusor:

El análisis del submodelo con malla refinada (10 mm) arrojó un esfuerzo máximo de 626.3 MPa ($FS = 1.65$), localizado precisamente en la circunferencia de inicio de la zona de

Cuadro 4: Resumen de validación estructural de componentes críticos.

Componente	Material	Cargas Principales	Princi-	Esfuerzo Máx. (Von Mises)	FS	Ref. / Método
Tornillo Extrusor (Cuerpo)	AISI 8620	Torque ≈ 3650 N·m, Axial ≈ 89 kN		≈ 56.6 MPa	≈ 18.3	FEA (ANSYS)
Tornillo Extrusor (Raiz Filetes)	AISI 8620	Ídem + Presión 20 MPa		220 MPa	≈ 4.7	FEA (Sub-modelo ANSYS)
Cañón Extrusor	AISI 420	Presión Interna 20 MPa		≈ 92.6 MPa	≈ 12.96	Ecs. Lá-mé
Elementos Sujeción (Bridas Cañón)	Pernos M22 ASTM A193 B7, Tuercas A194 2H	Axial/perno ≈ 14.8 kN a 280°C		≈ 242 MPa	≈ 2.5	Cálculo Unión Atornillada

transición (ver Figuras 41 y 42). Se determinó que este valor es una singularidad de esfuerzo artificial, causada por la condición de contorno aplicada en el borde del submodelo, y por lo tanto, no representa un esfuerzo real en el componente. Al analizar los esfuerzos en las zonas críticas reales como lo son la raíz de los filetes, se encontró un esfuerzo máximo en un rango de 220 MPa a 170 Mpa indicado por una probeta en el resultado de la simulación a lo largo de la raíz del filete. Esto resulta en un factor de seguridad de diseño real de $FS = 1035 / 220 \approx 4.7$. Este valor cumple y supera el objetivo de diseño de $FS \geq 2.0$, validando la robustez de los filetes. Además de eso la deformación máxima (0.067 mm) sigue siendo menor que la holgura radial ($\delta \approx 0.075$ mm), descartando contacto por deflexión.

Cañón extrusor y elementos de sujeción: el cañón presenta un FS de aproximadamente 12.9 y la tornillería de unión un FS de 2.5. Estos resultados son muy buenos. Indican que la selección del espesor de pared del cañón y el tamaño/material de los pernos (M22, ASTM A193 B7) no solo son adecuados, sino conservadores, garantizando la contención segura de la presión interna del polímero incluso a altas temperaturas.

6.0.4. Sistema de accionamiento y control

El componente principal seleccionado para el sistema de accionamiento y control se detallan en el Cuadro 5. Esta selección cumple con los requisitos de potencia, velocidad y control (RF3, RF4, RF5, RF6).

La selección del motorreductor Sumitomo fue una decisión clave. Como se discutió en el análisis funcional, esta elección simplifica enormemente el diseño mecánico. El resultado es un sistema de accionamiento compacto y fiable.

Cuadro 5: Componentes seleccionados del sistema de accionamiento y control.

Componente	Especificación / modelo	Código fabricante
Motor eléctrico	Sumitomo Cyclo CHHM60-6205YB-15	CNHM60-6205YB-15

6.0.5. Sistema de calentamiento

Las especificaciones del sistema de calentamiento, basadas en el análisis térmico, se resumen en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Especificaciones del sistema de calentamiento.

Parámetro	Valor especificado
Potencia total instalada (resistencias de banda)	≈ 30 kW
Distribución zonal de potencia:	
Zona de alimentación	≈ 15 kW
Zona de transición	≈ 7.5 kW
Zona de dosificación	≈ 7.5 kW

Esta capacidad de calentamiento permite alcanzar y mantener las temperaturas de proceso requeridas para PET (hasta $\approx 280^\circ\text{C}$), considerando las pérdidas térmicas y el aporte energético al polímero.

Se especificó una potencia total instalada de 30 kW para las resistencias de banda, distribuidas en tres zonas de control. Esta capacidad, superior al mínimo, provee el control necesaria para un calentamiento inicial y permite una rápida respuesta del sistema para mantener la estabilidad térmica durante la operación, compensando las variaciones del proceso. Este es un resultado positivo, ya que el análisis térmico indicó una necesidad mínima continua de 23.6 kW y una potencia de arranque de 3.05 kW. La potencia instalada de 30 kW cubre holgadamente esta demanda, proporcionando un margen adecuado para una rápida respuesta del sistema y la compensación de variaciones en el proceso, sin estar excesivamente sobredimensionado.

6.0.6. Consideraciones de seguridad y usuario

El diseño integró soluciones para cumplir con los requisitos de seguridad y facilidad de uso, como se resume en el Cuadro 7. La implementación detallada de estas características se realizará en la fase final de ingeniería y fabricación.

Cuadro 7: Cumplimiento de requisitos de seguridad y usuario en el diseño conceptual.

Código Req.	Solución de diseño propuesta / consideración
RF2 (Parada emerg.)	El diseño eléctrico incluye un botón de parada de emergencia para interrupción segura del motor principal.
RS2 (Prot. Partes móviles)	El concepto de diseño incluye la provisión de guardas de seguridad físicas para el acoplamiento motor-reductor, eje de salida del reductor y otras partes móviles expuestas. Los detalles se definirán en los planos de ensamble final.
RS3 (Acceso Control)	El diseño del tablero de control debe incorporar medidas para proteger el acceso al interruptor principal y otros controles críticos (e.g., gabinete con llave).
RU1, RU2, RU3 (Operación, documentación)	El diseño y los procedimientos operativos asumen la supervisión por personal capacitado (RU1). Se contempla la generación de manuales de operación, mantenimiento (RU2) y la inclusión de señalización de seguridad y advertencias en la máquina (RU3).

Conclusiones

1. Se completó el análisis y diseño de un sistema de extrusión para PET reciclado, definiendo los parámetros operativos y constructivos para una capacidad objetivo de 150 kg/h,
2. Se diseñó la geometría del tornillo extrusor ($D=75\text{mm}$, $L/D=24$, $L=1.8\text{m}$) y se conceptualizó el cañón segmentado seleccionando el material acero AISI 420, dimensionados para procesar el flujo de PET requerido.
3. Se alcanzó y supero un factor de seguridad mayor a 2 en los elementos importantes como el cañón extrusor.
4. Se especificaron materiales (acero AISI 420, acero AISI 8620, tornillería ASTM A193 B7 / A194 2H) seleccionados con base en su potencial disponibilidad local en Guatemala y su adecuación técnica para la aplicación.
5. Se elaborará la documentación técnica para la manufactura, incluyendo los planos y el listado completo de materiales.
6. Se crearon los manuales de instalación, uso y mantenimiento requeridos para la operación segura y eficiente de la extrusora.

Recomendaciones

1. Alineación ensamble: se recomienda el uso de comparadores de carátula o sistemas láser para verificar y ajustar esta alineación, minimizando así el desgaste prematuro del tornillo y del cañón.
2. Instrumentación para monitoreo del proceso: para facilitar la optimización y el control de calidad durante la operación, se recomienda fuertemente la incorporación de sensores para medir y registrar la presión y temperatura del PET fundido en el adaptador, justo antes del cabezal. Integrar estas lecturas, junto con la velocidad y el par/corriente del motor, en el sistema de control o registro.
3. Pruebas piloto con material real: una vez ensamblada, realizar pruebas de funcionamiento exhaustivas utilizando PET reciclado representativo del que se procesará. Estas pruebas deben validar la curva de rendimiento (kg/h vs RPM), ajustar los perfiles de temperatura zonales, evaluar la calidad del extruido y verificar la fiabilidad mecánica del sistema en operación continua.
4. Implementación rigurosa de seguridad: asegurar que la protección para partes móviles, las paradas de emergencia, las protecciones eléctricas y la señalización de advertencia sean implementadas físicamente en la máquina final, cumpliendo con las normativas de seguridad industrial aplicables.
5. Alternativa: como alternativa al motorreductor integrado, se puede considerar el diseño de un sistema de accionamiento a medida para alcanzar la capacidad de 150 kg/h. Este consistiría en acoplar un motor estándar acoplado a una caja reductora de dos etapas diseñada a la medida.
6. Acoplamientos: para ambos acoplamientos, es fundamental asegurar una correcta alineación durante el montaje para maximizar su vida útil y la de los rodamientos conectados. Se seguirán las tolerancias de desalineación especificadas por el fabricante del acoplamiento.

- Alam, M., Kaur, J., Khaira, H., & Gupta, K. (2016). Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(3), 445-473.
- American Gear Manufacturers Association. (2004). *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth* (Standard N.º ANSI/AGMA 2001-D04). American Gear Manufacturers Association (AGMA). Alexandria, VA.
- ASM Handbook, Volume 1: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. (1990). ASM International.
- Davies, J. (1990). La extrusión a bajo coste resuelve el problema de los subproductos húmedos. *Selecciones avícolas*, 32(5), 0142-144.
- De Paz, J. (2021). *Estado actual de la gestión de polímeros post-consumo en vertederos municipales* (inf. téc.). Informe de Investigación Ambiental. Guatemala.
- Dimitrov, N., Gómez, C. M., & Pérez, M. A. (2007). Rheological Properties and Extrusion of Poly(ethylene terephthalate). *Journal of Applied Polymer Science*, 105(3), 997-1004. <https://doi.org/10.1002/app.26158>
- Extrulam. (2024). *Explorando el proceso de extrusión en plásticos PET, HIPS y PP*. <https://extrulam.com.mx/explorando-el-proceso-de-extrusion-en-plasticos-pet-hips-y-pp/>
- Giles, H. F., Jr., Mount III, E. M., & Wagner, J. R., Jr. (2013). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook* (2.ª ed.). William Andrew Publishing / Elsevier.
- Giles, H. F., Wagner, J. R., & Mount, E. M. (2005). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. <https://www.dynacure.nl/download/Extrusion%20The%20Definitive%20Processing%20Guide%20and%20Handbook.pdf>
- Gómez Serranato, P. (2016). *Análisis de la gestión de residuos sólidos y su impacto ambiental en la región central de Guatemala* [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala].

- GT ELECTRIC'S. (2025, mayo). Cotización No. CG-052529: Resistencias Tipo Banda [Documento en Anexos].
- Hachi Quintana, J. G., & Rodríguez Mejía, J. D. (2010). *Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de PET en Guayaquil* [Tesis de maestría].
- Hernández Olvera, M. A., Pérez Díaz, F. J., & Sánchez López, L. L. (2010). *Automatización vía PLC de una máquina extrusora de polietileno* (inf. téc.).
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7.ª ed.). John Wiley & Sons.
- Juul, S. E., & Pet, G. C. (2015). Erythropoietin and neonatal neuroprotection. *Clinics in perinatology*, 42(3), 469-481.
- Kim, S., & Kim, H. H. (2008). *Polymer Processing: Modeling and Simulation*. John Wiley & Sons.
- MatWeb. (2025). *AISI 8620 Alloy Steel Properties*. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1f72023508db4144a8ed56d5a1dea65f>
- Oviedo, T. J. (2014). *Estudio de factibilidad para planta de reciclado de residuos de plástico PET* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba].
- Pedroza Pulgarin, N. H. (2008). Estrategias tendientes a lograr una eficiencia sostenible en el proceso de extrusión.
- Quintero Díaz, L. A. (2016). *Diseño de una planta de reciclado de PET* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].
- Rauwendaal, C. (2014a). *Polymer Extrusion* (5th). Hanser.
- Rauwendaal, C. (2014b). *Polymer Extrusion* (5.ª ed.). Hanser Publishers.
- Santamarina, R. E. (2015). *Caracterización de material compuesto PET-vidrio* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba].
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica* (8.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Soluciones Plásticas. (2025). Insulation Blankets for Extrusion and Injection Molding Machines.
- Sumitomo Drive Technologies. (2025a). *Product Configuration Technical Specification Sheet: Cyclo 6000, Model CHHM60* (inf. téc.) (Incluido en Anexos).
- Sumitomo Drive Technologies. (2025b). *Product Configuration Technical Specification Sheet: Cyclo 6000, Model CNHM5* (inf. téc.) (Incluido en Anexos).
- Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). *Principles of Polymer Processing* (2.ª ed.). John Wiley & Sons.
- T-Solution. (2025). Aislamiento térmico de calentadores y elementos.
- Verein Deutscher Ingenieure. (2015). *VDI 2230 Part 1: Systematic calculation of highly stressed bolted joints* (inf. téc.). VDI Guideline.
- WEG. (2025a). *W22 High Efficiency 60 HP 4P 364/5T*. <https://www.weg.net/catalog/weg/CO/es/Motores-El%C3%A9ctricos/p/14569345>
- WEG. (2025b). *W22 High Efficiency 60 HP 4P 364/5TC*. <https://www.weg.net/catalog/weg/CO/es/Motores-El%C3%A9ctricos/p/13012407>
- Zabala Celi, J. L., et al. (2018). *La industria del reciclaje en la ciudad de Quito* [Tesis de maestría, Universidad Andina Simón Bolívar].

CAPÍTULO 10

Anexos

10.1. Manuales

10.1.1. Manual de instalación

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Manual de instalación

“Diseño de extrusora para línea de reciclaje de botellas de tereftalato de polietileno”

Elaborado por:
Saúl Eduardo de León Palencia
Carné 19408

Departamento de Ingeniería Mecánica

Guatemala 28 mes abril de año 2025

1. Introducción

Este manual proporciona instrucciones técnicas detalladas para el correcto ensamblaje e instalación de la extrusora de plástico PET. Una instalación precisa es un requisito indispensable para garantizar el funcionamiento seguro, la eficiencia del proceso y la máxima vida útil del equipo. Este manual está dirigido a personal técnico cualificado con experiencia en montaje de maquinaria industrial.

2. Seguridad Durante la Instalación

¡La seguridad es la máxima prioridad!

2.1. Advertencias Críticas

- Personal Cualificado: La instalación debe ser realizada exclusivamente por técnicos con experiencia demostrada en mecánica y electricidad industrial.



- Energía Cero: Antes de cualquier intervención, asegúrese de que todas las fuentes de energía (eléctrica principal) estén desconectadas, bloqueadas y etiquetadas (procedimiento de Bloqueo y Etiquetado).



- Manejo de Cargas Pesadas: Componentes como las secciones del cañón y el motorreductor superan los límites de carga manual. Utilice siempre equipos de elevación certificados (grúa puente, polipasto, montacargas) con la capacidad adecuada. Nunca se posicione debajo de una carga suspendida.



- Puntos de Pellizco y Atrapamiento: Tenga precaución durante el ensamblaje de componentes pesados como las bridas del cañón y el montaje del motor.



2.2. Equipo de Protección Personal (EPP) Obligatorio

Casco de seguridad.
Gafas de seguridad con protección lateral.
Guantes de trabajo mecánico anticorte y para manipulación.
Calzado de seguridad con punta de acero.
Ropa de trabajo ajustada y resistente.

3. **Requisitos Previos a la Instalación**

3.1. Verificación de Componentes: Inspeccione todos los componentes al recibirlos contra el Listado de Partes (Anexo 10.5, Plano EXT-001). Verifique que no haya daños de transporte, prestando especial atención a las roscas de los pernos y las superficies maquinadas.

3.2. Requisitos del Sitio:

- Cimentación: El suelo de concreto debe estar nivelado y ser capaz de soportar el peso total de la máquina aprox. 200 - 300 kg.
- Suministro Eléctrico: Se requiere una acometida eléctrica trifásica con interruptor de seguridad y protección termomagnética adecuada para la carga total.
 - Tensión de Alimentación General: 460V, 60Hz, Trifásico.
 - Carga Motorreductor (Parte 15): 5 HP (3.7 kW). Corriente a plena carga aprox. 6.5 A (verificar placa del motor).

- Carga Sistema de Calentamiento (Parte 6): 30 kW. Tensión de resistencias 220V (requiere circuito separado o transformador si la acometida es solo 460V).

3.3. Herramientas y Equipos Necesarios

- Juego completo de llaves mixtas y de estrella
- Torquímetro: Se requiere un torquímetro de click o de carátula con cuadrante de 1/2" o 3/4" y un rango que cubra 50 - 300 N·m. Este rango es necesario para el apriete controlado de la tornillería crítica.
- Juego de Copas (Sockets): Se necesita un juego de copas de impacto o estándar para los siguientes tamaños:
 - Copa hexagonal para tuerca M22: Usualmente de 32 mm o 34 mm (verificar norma de la tuerca A194 2H suministrada).
 - Copa hexagonal para tuerca M6: Llave de 10 mm.
- Multímetro, pinza amperimétrica y megóhmetro.
- Equipo de elevación (polipasto o grúa puente) con eslingas de nylon.
- Instrumentos de nivelación (nivel de precisión) y alineación (comparador de carátula o sistema láser).

4. Procedimiento de Instalación Mecánica

Paso 1: Posicionamiento y Nivelación de la Mesa

1. Utilice el equipo de elevación para posicionar la Mesa en su ubicación final.
2. Nivele la plancha superior de la mesa en ambas direcciones (longitudinal y transversal) con una precisión de ± 0.5 mm por metro. Utilice lanas metálicas bajo las patas si es necesario.
3. Una vez nivelada, fije la mesa al suelo mediante los anclajes especificados en los planos.

Paso 2: Ensamblaje del Cañón Extrusor Este es un paso crítico que requiere precisión.

1. Identifique las tres secciones del cañón: Sección de Alimentación, Sección de Transición y Sección de Dosificación.
2. Limpie las caras de las bridas de las tres secciones para asegurar que estén libres de suciedad, grasa o rebabas.
3. Con cuidado, posicione la Sección de Alimentación sobre sus soportes en la mesa estructural.
4. Inserte los espárragos ASTM A193 B7 M18 en los agujeros roscados de la brida de salida de la Sección de Alimentación.
5. Acople la Sección de Transición alineando sus agujeros con los espárragos. Asegúrese de que las caras de las bridas hagan contacto uniforme.
6. Coloque las tuercas ASTM A194 2H M18 y apriételas manualmente.
7. Repita el proceso para unir la Sección de Dosificación a la Sección de Transición.
8. Apriete Controlado (Torque): Utilizando el torquímetro, apriete las tuercas M18 a un valor de 150 N·m. Es crucial seguir una secuencia de apriete en cruz o en estrella para garantizar una carga uniforme sobre la brida y evitar deformaciones. Apriete en 3 pasos: 50 N·m, 100 N·m y finalmente 150 N·m.

Paso 3: Instalación del Husillo Extrusor

1. Inspeccione el Tornillo Extrusor para asegurarse de que está limpio y sin daños en los filetes.
2. Lubrique ligeramente el husillo con una grasa de montaje de alta temperatura para facilitar la inserción.
3. Con extremo cuidado y preferiblemente entre dos personas, inserte el husillo por el extremo de accionamiento del cañón. Guíelo de forma recta para evitar golpear los filetes contra la pared interior del cañón. Gírelo lentamente a mano a medida que avanza.

Paso 4: Montaje del Sistema de Accionamiento

1. Monte el Motorreductor Sumitomo en su placa base sobre la mesa estructural. No apriete los pernos de fijación completamente aún.
2. Instale el conjunto de Chumacera con rodamientos de empuje en el extremo del husillo, según los planos.
3. Instale las dos mitades del Acople Flexible KTR Rotex, una en el eje de salida del motorreductor y la otra en el eje del husillo. Inserte la estrella de poliuretano.
4. Alineación Crítica: Aproxime el motorreductor al ensamble del husillo. Utilizando un comparador de carátula o un sistema de alineación láser, alinee los ejes. La desalineación paralela y angular debe estar dentro de las tolerancias especificadas por el fabricante del acoplamiento (típicamente < 0.2 mm).
5. Una vez alineado, apriete firmemente los pernos de fijación del motorreductor a la base. Vuelva a verificar la alineación.

5. Instalación de Componentes Eléctricos y de Calentamiento

Esta sección debe ser realizada por un electricista cualificado.

Paso 1: Instalación de Resistencias Térmicas

1. Instale las Termoresistencia D95 en sus respectivas zonas. Asegúrese de que ajusten firmemente contra la superficie del cañón para una buena transferencia de calor.
2. Distribuya las resistencias para alcanzar la potencia requerida por zona:
 - Zona de Alimentación: Total de 15 kW.
 - Zona de Transición: Total de 7.5 kW.
 - Zona de Dosificación: Total de 7.5 kW.
3. Conecte el cableado de las resistencias a las salidas correspondientes en el panel de control.

Paso 2: Conexión del Motorreductor y Panel de Control

1. Conecte el cable de potencia desde el panel de control al motorreductor.

2. Programe los parámetros básicos en el VFD: Potencia: 3.7 kW, Tensión: 460V, Corriente Nominal: Frecuencia: 60 Hz.

3. Conecte todos los termopares, paradas de emergencia e interruptores al Panel de Control según el diagrama eléctrico.

6. Verificaciones Finales y Puesta en Marcha Inicial

1. Revisión General: Realice una inspección completa. Verifique el apriete de toda la tornillería y la correcta instalación de todas las guardas de seguridad.

2. Prueba en Vacío: Con la máquina desenergizada, intente girar el acoplamiento a mano para verificar que el husillo rota sin obstrucciones.

3. Puesta en Marcha: Siga el procedimiento detallado en el Manual de Uso. Comience con un breve arranque del motor a mínima velocidad para verificar el sentido de giro correcto. Escuche por ruidos o vibraciones inusuales antes de proceder a calentar el sistema e introducir material.

10.1.2. Manual de uso

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Manual de uso

“Diseño de extrusora para línea de reciclaje de botellas de tereftalato de polietileno”

Elaborado por:
Saúl Eduardo de León Palencia
Carné 19408

Departamento de Ingeniería Mecánica

Guatemala 28 mes abril de año 2025

1. Introducción

Este manual es el Procedimiento Operativo Estándar para la extrusora de PET. Su seguimiento es obligatorio para garantizar la seguridad del personal, la integridad de la máquina y la calidad del producto. Este equipo está diseñado para el procesamiento de PET triturado y seco.

2. Seguridad Durante la Operación

¡Su seguridad es la máxima prioridad! No opere esta máquina sin haber leído y comprendido esta sección.

2.1. Equipo de Protección Personal (EPP) Obligatorio

Gafas de seguridad: Con protección lateral, resistentes a impactos.
Guantes de protección: Resistentes al calor (tipo Kevlar o similar) al manipular cerca del cabezal o purgar material. Se requieren guantes de trabajo mecánico para otras tareas.
Ropa de trabajo: De manga larga, ajustada, de algodón o material no inflamable.
Calzado de seguridad: Con punta de acero.
Protectores auditivos: Obligatorios si el ruido ambiental supera los 85 dBA.

2.2. Peligros Principales y Controles

- ¡PELIGRO: SUPERFICIES CALIENTES! El cañón, el cabezal y la boquilla alcanzan temperaturas de hasta 280°C. El contacto puede causar quemaduras graves. Nunca toque estas áreas sin el EPP adecuado. Las guardas térmicas deben estar siempre en su lugar.



- ¡PELIGRO: ATRAPAMIENTO! El acoplamiento entre el motor y el husillo es una parte móvil peligrosa. Asegúrese de que todas las guardas de seguridad estén

instaladas y en buen estado antes de operar. No introduzca manos o herramientas en aberturas con la máquina en funcionamiento.



- ¡PELIGRO: PRESIÓN Y MATERIAL FUNDIDO! El PET fundido está bajo alta presión. Nunca se pare directamente frente a la boquilla. Una expulsión inesperada de material puede causar quemaduras graves.



- ¡PELIGRO: RIESGO ELÉCTRICO! Solo personal de mantenimiento cualificado debe abrir el panel de control. Reporte inmediatamente cualquier cable dañado o funcionamiento anómalo.



2.3. Paradas de Emergencia: Familiarícese con la ubicación de todos los botones de parada de emergencia (rojos, tipo hongo). Al ser presionados, detienen inmediatamente toda la operación de la máquina. Úselos solo en caso de una emergencia real.

3. Descripción de la Máquina y Panel de Control

- Tolva de Alimentación: Depósito para el PET triturado.
- Cañón de Extrusión: Cilindro con 3 zonas de calentamiento independientes que procesa el material.
- Sistema de Accionamiento: Compuesto por el Motorreductor Sumitomo Cyclo 5 HP, que impulsa el husillo.

- Cabezal y Boquilla: Dan forma al material fundido a la salida.
- Panel de Control: Cerebro de la operación.
 - Interruptor Principal: Energiza toda la máquina.
 - Controladores de Temperatura (3): Muestran la temperatura actual y la programada para cada zona.
 - Botones de Arranque/Parada del Husillo: Controles para la operación del motor.
 - Botón de Parada de Emergencia.

4. Procedimiento de Puesta en Marcha (Arranque en Frío)

1. Inspección Pre-Operativa:

- Verifique que todas partes mecánicas y térmicas estén en su lugar y firmemente sujetas.
- Asegúrese de que el área alrededor de la máquina esté limpia y despejada.
- Confirme que la tolva de alimentación esté limpia y libre de contaminantes.
- Verifique que el botón de Parada de Emergencia esté desbloqueado (girar para liberar).

2. Encendido y Calentamiento:

- Gire el Interruptor Principal a la posición de "ON". El panel de control se iluminará.
- Active el sistema de calentamiento desde el panel.
- Programe las Temperaturas: Usando los controladores de temperatura, ajuste los valores al siguiente perfil de arranque recomendado para PET:
 - Zona de Alimentación: 240°C
 - Zona de Transición: 270°C
 - Zona de Dosificación: 280°C

- Cabezal/Boquilla: 280°C
 - Espere la Estabilización: Permita que la máquina alcance y estabilice las temperaturas programadas. Las lecturas actuales deben coincidir con las programadas en todas las zonas. Este proceso puede tardar entre 45 y 60 minutos. No proceda hasta que todas las zonas estén estables.
3. Arranque del Husillo e Introducción de Material:
- En la interfaz del VFD, ajuste la velocidad inicial del husillo a un valor bajo: 10 RPM.
 - Asegúrese de que el equipo posterior (ej. tina de enfriamiento, peletizadora) esté listo para recibir material.
 - Presione el botón de ARRANQUE del husillo. Verifique visualmente que el acoplamiento gira en el sentido correcto (el material debe avanzar hacia la boquilla).
 - Comience a alimentar lentamente el PET triturado y seco en la tolva.
 - Observe el indicador de amperaje del motor en el VFD. Debería subir ligeramente a medida que el husillo se carga de material.
 - Una vez que el material fundido comience a salir por la boquilla de forma continua y estable, la máquina está lista para la producción.

5. Operación Normal y Monitoreo

1. Ajuste a Velocidad de Producción: Aumente gradualmente la velocidad del husillo en el VFD hasta alcanzar la velocidad de operación deseada para una operación estable y de calidad.
2. Monitoreo de Parámetros Clave:
 - Temperaturas: Verifique periódicamente que las temperaturas se mantengan en su punto de ajuste.
 - Carga del Motor: Este es su indicador más importante. Establezca una línea base de amperaje durante la operación estable. ¡ADVERTENCIA!

Un aumento súbito o sostenido por encima del 90% del amperaje nominal del motor (aprox. 6.0 A) indica un problema. Reduzca la velocidad inmediatamente y consulte la sección de solución de problemas.

- Calidad del Extruido: Observe la apariencia del material. Un buen producto de PET debe ser transparente (o del color esperado), sin burbujas, puntos negros (degradación) o variaciones de diámetro.

6. Procedimiento de Parada de la Máquina

6.1. Parada Programada (con Purga) Para evitar que el PET se degrade dentro del cañón, es fundamental purgar la máquina antes de apagarla.

1. Detenga la alimentación de PET a la tolva.
2. Permita que el husillo continúe girando a la velocidad de operación hasta que el flujo de material por la boquilla casi se detenga.
3. Reduzca la velocidad del husillo a 15-20 RPM.
4. Introduzca un compuesto de purga comercial de alta temperatura (o PET virgen si no hay otro disponible) en la tolva. Continúe alimentando hasta que el material que sale por la boquilla sea del color y apariencia del compuesto de purga, indicando que el cañón está limpio.
5. Una vez purgado, presione el botón de PARADA del husillo.
6. Apague el sistema de calentamiento.
7. Gire el Interruptor Principal a la posición "OFF" una vez que sea seguro hacerlo.

6.2. Parada de Emergencia

1. Presione el Botón de Parada de Emergencia. El motor se detendrá.
2. Una vez resuelta la emergencia, para reiniciar será necesario desbloquear el botón, evaluar el estado de la máquina y seguir el procedimiento de puesta en marcha desde el principio. ¡ADVERTENCIA! Un reinicio tras una parada de emergencia con el cañón lleno de material puede requerir un procedimiento especial para evitar daños.

10.1.3. Manual de mantenimiento

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Manual de mantenimiento

“Diseño de extrusora para línea de reciclaje de botellas de tereftalato de polietileno”

Elaborado por:
Saúl Eduardo de León Palencia
Carné 19408

Departamento de Ingeniería Mecánica

Guatemala 28 mes abril de año 2025

1. Introducción

Este manual detalla los procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo para la extrusora de plástico PET. Un programa de mantenimiento bien ejecutado es fundamental para asegurar la fiabilidad a largo plazo, el rendimiento óptimo, la seguridad operativa y la vida útil de la máquina. Solo personal técnico cualificado y autorizado debe realizar tareas de mantenimiento.

2. Seguridad Durante el Mantenimiento

2.1. Procedimientos de Bloqueo y Etiquetado:

Antes de realizar cualquier tarea de mantenimiento, la máquina debe de estar completamente desenergizada y asegurada contra un arranque accidental.

1. Apague la máquina según el procedimiento de parada normal.
2. Desconecte la alimentación principal de energía eléctrica en el interruptor general.
3. Bloquee el interruptor principal en la posición de "apagado" con un candado personal y etiquételo con su nombre, fecha y motivo del mantenimiento.
4. Verifique la ausencia de tensión en los circuitos relevantes antes de proceder.
5. Libere cualquier energía almacenada (neumática, hidráulica, mecánica – ej. resortes). Para esta extrusora, principalmente eléctrica y térmica.
6. Permita que los componentes calientes (cañón, cabezal) se enfríen a una temperatura segura antes de tocarlos (puede tomar varias horas).

2.2. Equipo de Protección Personal (EPP) Específico

Además del EPP estándar (gafas, guantes, calzado de seguridad), se puede requerir:

- Guantes resistentes al calor para manipular componentes aún tibios.
- Protección facial completa (careta) al limpiar o raspar residuos de polímero.
- Mascarilla o respirador con filtros adecuados al limpiar polvo de PET o al usar solventes (si aplica).
- Ropa de trabajo resistente que cubra todo el cuerpo.

2.3. Riesgos Específicos del Mantenimiento

- Quemaduras: Componentes calientes incluso después de apagar la máquina.
- Cortes y Abrusiones: Bordes afilados, herramientas, residuos de polímero endurecido.
- Atrapamiento: Al manipular o ajustar partes móviles (incluso con LOTO, tener precaución con energía residual o movimiento inesperado si algo se suelta).
- Eléctricos: Trabajar en paneles o componentes eléctricos (solo personal cualificado).
- Químicos: Uso de solventes de limpieza o compuestos de purga (revisar SDS).
- Caída de Objetos: Herramientas o componentes durante el desmontaje/montaje.

3. Programa de Mantenimiento Preventivo

Implementar un programa regular de mantenimiento preventivo es la mejor manera de evitar fallas inesperadas y costosas reparaciones.

Componente / Sistema	Actividad de Mantenimiento	Diaria	Semanal	Mensual	Semestral	Anual
Inspección General y Seguridad						
Estructura y Periféricos	Inspección visual de fugas (material, aceite), daños generales y estado de limpieza.	X				
	Escuchar por ruidos o vibraciones anómalas durante la operación.	X				
	Limpieza externa de la máquina y área circundante.	X				

	Comprobar el apriete de tornillería externa accesible (guardas, soportes).		X			
Panel de Control y Seguridad	Verificar funcionamiento de luces indicadoras y paradas de emergencia.	X				
	Limpieza de filtros de ventilación del gabinete del panel de control.		X			
	Prueba funcional completa de todos los botones de parada de emergencia.			X		
Sistema de Accionamiento (Motorreductor)						
Motorreductor Sumitomo	Limpieza de filtros del ventilador del motor.		X			
	Inspección visual del acoplamiento flexible (buscar grietas o desgaste).			X		
	Verificar nivel de aceite de la caja reductora.			X		
	Medir resistencia de aislamiento de los bobinados del motor.					X
	Verificar estado de rodamientos del motor (ruido, temperatura).					X

	Cambio de aceite de la caja reductora (o según horas de operación).					X
	Revisar sellos del reductor en busca de fugas.					X
	Verificar alineación motor-husillo con herramientas de precisión.					X
Sistema de Proceso (Cañón, Husillo y Alimentación)						
Cañón y Sistema de Calentamiento	Verificar lecturas de temperatura estables en el panel de control.	X				
	Inspección visual de resistencias de banda y su cableado.		X			
	Comprobar la correcta lectura de los termopares.			X		
	Verificación de la calibración de los controladores de temperatura.					X
Husillo y Cañón	Inspección y limpieza de la tolva y garganta de alimentación.			X		
	Medición de desgaste del diámetro del husillo y del interior del cañón.				X	
	Limpieza profunda del husillo y cañón (requiere extracción).					X

Sistema Eléctrico						
Panel de Control y Cableado	Inspección termográfica para detectar puntos calientes en conexiones.					X
	Reapriete de todas las conexiones eléctricas (contactores, VFD, terminales).					X
	Prueba de protecciones eléctricas (termomagnéticas, diferenciales).					X

3.1. Registro de Mantenimiento

- Mantenga una bitácora detallada de todas las tareas de mantenimiento realizadas, incluyendo fechas, descripción del trabajo, piezas reemplazadas y observaciones. Esto es crucial para el historial de la máquina y para planificar futuras intervenciones.

4. Procedimientos de Mantenimiento Específicos

4.1. Lubricación

4.1.1. Caja Reductora

- Tipo de Aceite: Consulte el manual del fabricante de la caja reductora para el tipo de aceite (viscosidad, sintético/mineral) y la cantidad correcta.
- Nivel: Verifique el nivel de aceite a través del visor o tapón de nivel. Rellene si es bajo.
- Cambio: Siga las recomendaciones del fabricante para la frecuencia de cambio de aceite. Drene el aceite usado mientras está tibio, limpie el tapón de drenaje (magnético si lo tiene) y rellene con aceite nuevo hasta el nivel correcto.

4.1.2. Rodamientos (del motor, reductor, o soportes del husillo si son externos y relubrificables)

- Tipo de Grasa: Use la grasa recomendada por el fabricante del componente.
- Cantidad y Frecuencia: Siga las indicaciones específicas. El exceso de grasa puede ser tan perjudicial como la falta de ella. Limpie las graseras antes de aplicar grasa nueva.

4.2. Sistema de Calentamiento

4.2.1. Inspección y Reemplazo de Resistencias de Banda

- Con la máquina desenergizada y fría, inspeccione visualmente las resistencias buscando signos de quemaduras, hinchazón, roturas o cableado dañado.
- Con un multímetro, verifique la continuidad de cada resistencia. Una resistencia abierta (sin continuidad) está quemada y debe reemplazarse.
- Para reemplazar: Desconecte los cables, afloje los mecanismos de sujeción de la resistencia, retírela e instale una nueva del mismo tamaño, voltaje y potencia. Asegure un buen contacto con el cañón y apriete uniformemente. Reconecte el cableado.

4.2.2. Inspección y Reemplazo de Termopares

- Desenergice la máquina.
- Inspeccione el cableado del termopar por daños.
- Verifique que la punta del termopar esté correctamente insertada y haciendo buen contacto.
- Si se sospecha una lectura incorrecta, puede verificarse con un calibrador de termopares o reemplazarse por uno nuevo del mismo tipo. Asegure la correcta polaridad al conectar.

4.3. Husillo y Cañón

4.3.1. Inspección de Desgaste

- Esta tarea requiere personal experimentado y herramientas de medición precisas.
- Mida el diámetro exterior de los filetes del husillo en varias posiciones a lo largo de cada zona (alimentación, transición, dosificación).
- Mida el diámetro interior del cañón en las mismas zonas.

- Compare las mediciones con las dimensiones originales de diseño. Un desgaste que exceda las tolerancias recomendadas afectará el rendimiento y requerirá reacondicionamiento o reemplazo.

4.3.2. Limpieza del Husillo y Cañón

Esta es una tarea mayor y potencialmente peligrosa. Requiere planificación, herramientas adecuadas y personal experimentado. Asegúrese de que el cañón esté completamente frío.

1. Retire el cabezal y la boquilla.
2. Desacople el husillo del sistema de transmisión.
3. Construya o utilice un dispositivo de extracción de husillo seguro para tirar del husillo hacia afuera del cañón de forma recta y controlada. No use fuerza excesiva que pueda dañar el husillo o el cañón. Si el PET residual lo atasca, puede ser necesario calentar ligeramente el cañón (con mucha precaución) para ablandarlo, pero evite temperaturas de fusión.
4. Una vez extraído, limpie el husillo y el interior del cañón de residuos de PET utilizando herramientas de latón o cobre (para no dañar el acero), cepillos de alambre suave y, si es necesario, calor localizado con pistola de aire caliente (con ventilación adecuada). Evite el uso de llamas directas.
5. Inspeccione las superficies en busca de daños (rayaduras profundas, picaduras).
6. Antes de reinstalar, limpie y lubrique ligeramente el husillo (con un antiadherente si se recomienda). Inserte con cuidado.

4.4. Sistema de Transmisión

4.4.1. Inspección y Alineación de Acoplamientos

- Inspeccione los elementos flexibles de los acoplamientos por desgaste o grietas. Reemplace si es necesario.
- Verifique periódicamente la alineación motor-reductor-husillo usando comparadores de carátula o láser. Reajuste si excede las tolerancias.

4.4.2. Revisión del Motor y Reductor

- Además de la lubricación, escuche por ruidos anómalos (rodamientos), verifique la temperatura de operación de la carcasa (un sobrecalentamiento es signo de problemas).

4.5. Sistema Eléctrico y de Control

4.5.1. Inspección del Panel de Control

- Mantenga el interior del panel limpio y libre de polvo.

4.5.2. Revisión de Conexiones y Cableado

- Busque signos de sobrecalentamiento en terminales, cables o componentes aislamiento descolorido o derretido. Reapriete conexiones.

4.6. Tornillería y Fijaciones

- Periódicamente, inspeccione el apriete de la tornillería estructural importante, fijaciones del motor, reductor y otros componentes. Preste especial atención a la tornillería de alta temperatura del cabezal y bridas del cañón.

5. Diagnóstico de Fallas (Orientado al Mantenimiento)

- Fusibles quemados o protecciones activadas repetidamente: Sobrecarga eléctrica, cortocircuito en resistencias, motor o cableado. Investigar causa antes de rearmar.
- Incapacidad para alcanzar/mantener temperatura: Resistencia quemada, termopar defectuoso, controlador de temperatura fallando, conexión floja.
- Desgaste prematuro del husillo/cañón: Desalineación, material abrasivo, temperaturas de proceso incorrectas, operación prolongada con material corrosivo.
- Fugas de aceite del reductor: Sellos dañados, nivel de aceite excesivo, respiradero obstruido.

- Vibración excesiva: Desbalanceo del motor o husillo, desalineación, rodamientos dañados, fijaciones sueltas.

6. Listado de Repuestos Recomendados (para tener en stock mínimo)

- Resistencias de banda.
- Termopares.
- Fusibles.
- Aceite para caja reductora.
- Contactores o relés de estado sólido para sistema de calentamiento.
- Tornillería crítica.

10.2. Cotizaciones

10.2.1. Resistencias térmicas



13 Av. A 14-23 ZONA 11 COLO
LOMA LINDA, GUATEMALA/
TELS: 22695879 - 35327417



NOMBRE:	DE LEON PALENCIA, SAUL EDUARDO		
FECHA:	8/05/2025	CONTACTO: DE LEON PALENCIA, SAUL EDUARDO	
ORDEN DE COMPRA		COTIZACION: CG-052529	ENTREGA:
DIRECCIÓN:		TELÉFONO:	CRÉDITO:

De acuerdo a lo solicitado tenemos el gusto de atenderle lo que a continuación se describe:

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL
10	RESISTENCIAS TIPO BANDA DE 180MM DIAMETRO X 50MM DE ANCHO CIERRE ESTANDAR SALIDA CON CABLES A 90° CON PROTECCION DE CAJITA 220V 1000W MAXIMO	Q435.00	Q4,350.00
20	RESISTENCIAS TIPO BANDA DE 180MM DIAMETRO X 25MM DE ANCHO CIERRE ESTANDAR SALIDA CON CABLES A 90° CON PROTECCION DE CAJITA 220V 500W MAXIMO	Q415.00	Q8,300.00
			Q0.00
	TIEMPO DE ENTREGA DE 6 A 9 DIAS HABILES		Q0.00
TOTAL:			Q12,650.00

Visítenos en nuestra pagina web:

www.resistenciasgt.com

Síguenos en Facebook:

GT Electric's Guatemala

COTIZADO POR:	NOMBRE: OSCAR ESTRADA
	CELULAR: 3532-7417

10.3. Construcción

10.3.1. Diagrama eléctrico

No.	Componente	Función
Circuito de potencia		
1	Interruptor principal (Flipón)	Es el interruptor general de seguridad. Protege toda la máquina de sobrecargas y es lo primero que recibe la energía de la pared.
2	Variador de frecuencia	Recibe las órdenes de los botones y controla la velocidad a la que gira el tornillo extrusor.
3	Motorreductor	Proporciona la fuerza para girar el tornillo y empujar el plástico.
4	Contactador	Recibe una pequeña orden del controlador de temperatura para encender o apagar las potentes resistencias.
5	Termoresistencia	Se abraza al cañón y lo calienta para derretir el plástico.
Circuito de control		
6	Controlador de temperatura	Mide la temperatura con el termopar y decide si hay que encender o apagar la calefacción para mantener el calor exacto.
7	Termopar	Le dice al controlador qué tan caliente está realmente el metal.
8	Fuente de alimentación	Convierte el voltaje de la red a un voltaje bajo y seguro (24V) para que funcionen los componentes como los controladores y los botones.
9	Pulsadores	El verde para arrancar el motor y el rojo para detenerlo de forma normal.
10	Botón de parada de emergencia	Al presionarlo, corta la energía del control y detiene la máquina inmediatamente en caso de peligro.
11	Transformador de control	Reduce el voltaje a un voltaje más bajo para alimentar de forma segura a otros componentes alimentación.



10.3.2. Planos extrusora

4

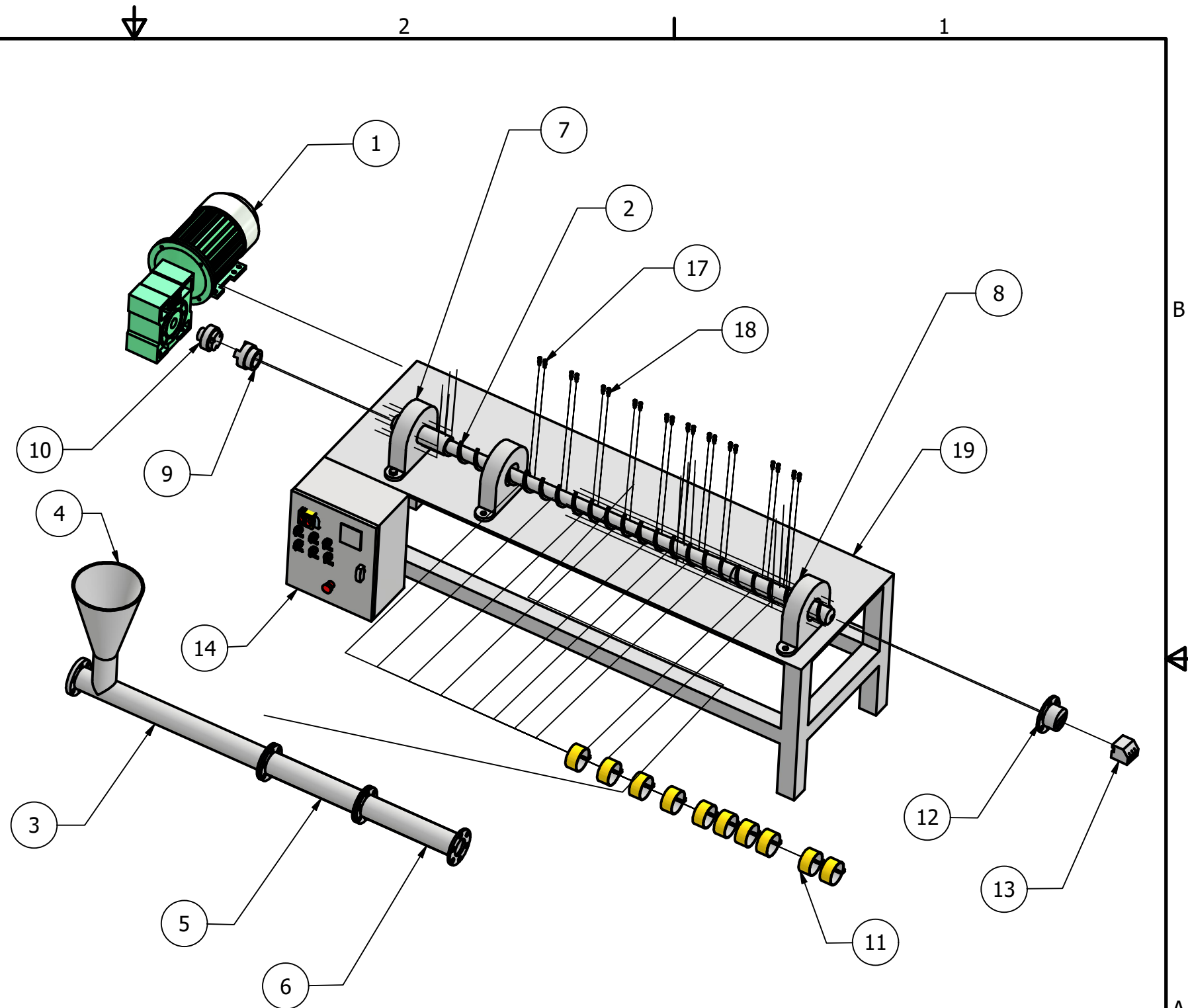
3

2

1

LISTADO DE PARTES

PARTE	CANT.	NÚMERO DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	1	MOTOREDUCTOR 60HP (45kW)	SUMITOMO CYCLO 6205
2	1	TORNILLO EXTRUSOR	ACERO AISI 8620
3	1	SECCIÓN DE ALIMENTACIÓN	ACERO AISI 420
4	1	TOLVA DE ALIMENTACIÓN	ACERO AISI 420
5	1	SECCIÓN DE TRANSICIÓN	ACERO AISI 420
6	1	SECCIÓN DE DOSIFICACIÓN	ACERO AISI 420
7	1	CHUMACERA SKF SAF 515	CHUMACERA CON RODAMIENTOS DE RODILLOS A ROTULA Y MANGUITO SKF
8	2	CARCASA DE CHUMACERA SKF SAF 515	SOPORTE DE PIE SIN RODAMIENTO
9	1	ACOPLE FLEXIBLE KTR ROTEX	KRT ROTEX CON ESTRELLA DE POLIURETANO
10	1	ACOPLE FLEXIBLE KTR ROTEX	KRT ROTEX CON ESTRELLA DE POLIURETANO
11	10	TERMORESISTENCIA D95	TIPO BANDA CIERRE ESTANDAR
12	1	BASE DADO	ACERO AISI 304
13	1	BOQUILLA DADO	ACERO AISI 304
14	1	PANEL DE CONTROL (GUARDA MOTOR, FLIPON PRINCIPAL)	DIMENSIONES DE LA CAJA 60 CM X 40 CM X 25 CM
15	30	TORNILLO CABEZA HEXAGONAL M22 X 70 MM	ACERO ASTM A193 B7 ACABADO NEGRO
16	30	TUERCA HEXAGONAL PESADA M22	ACERO ASTM A194 2H ACABADO NEGRO
17	20	TORNILLO CABEZA HEXAGONAL M6 X 30	ACERO ASTM A193 B7 ACABADO ZINCADO
18	20	TUERCA HEXAGONAL M6	ACERO ASTM A194 2H ACABADO ZINCADO
19	1	MESA	INSTALAR EN UN ESPACIO DE 2.25 M DE LARGO X 0.7 M DE ALTO X 0.7 M DE ANCHO



TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES
LINEAL
.X ± 0.5
.XX ± 0.10
.XXX ± 0.050
ANGULAR ± 1°

DIBUJADO POR	FECHA
SAÚL DE LEÓN	25/04/25
DISEÑADO POR	FECHA
SAÚL DE LEÓN	25/04/25
REVISADO POR	FECHA
R. HERRARTE	22/07/25
APROBADO POR	FECHA
R. HERRARTE	31/07/25

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO
EXTRUSORA PARA LINEA RECICLAJE

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

UVG UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
Guatemala, Guatemala 01015
DEL VALLE PBX: (502) 2634-0336 / 40
DE GUATEMALA dele19408@uvg.edu.gt

TÍTULO: MÁQUINA EXTRUSORA DE PET

NÚMERO DE DIBUJO: EXT-001

FORMATO	ESCALA: 1:20	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 1 DE 9	REV A

MATERIAL
VER LISTADO
TRATAMIENTO
VER LISTADO
MASA: N/A



4

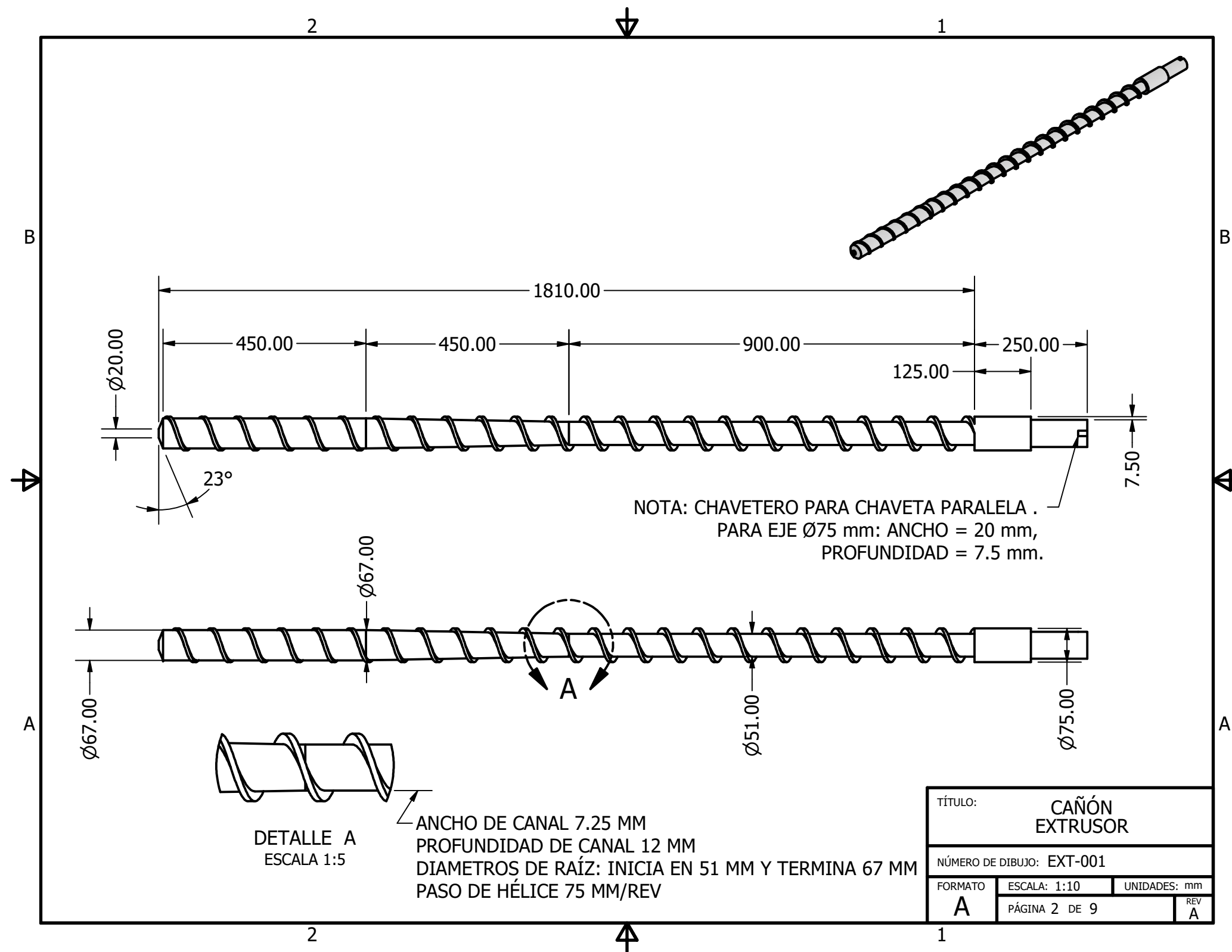
111

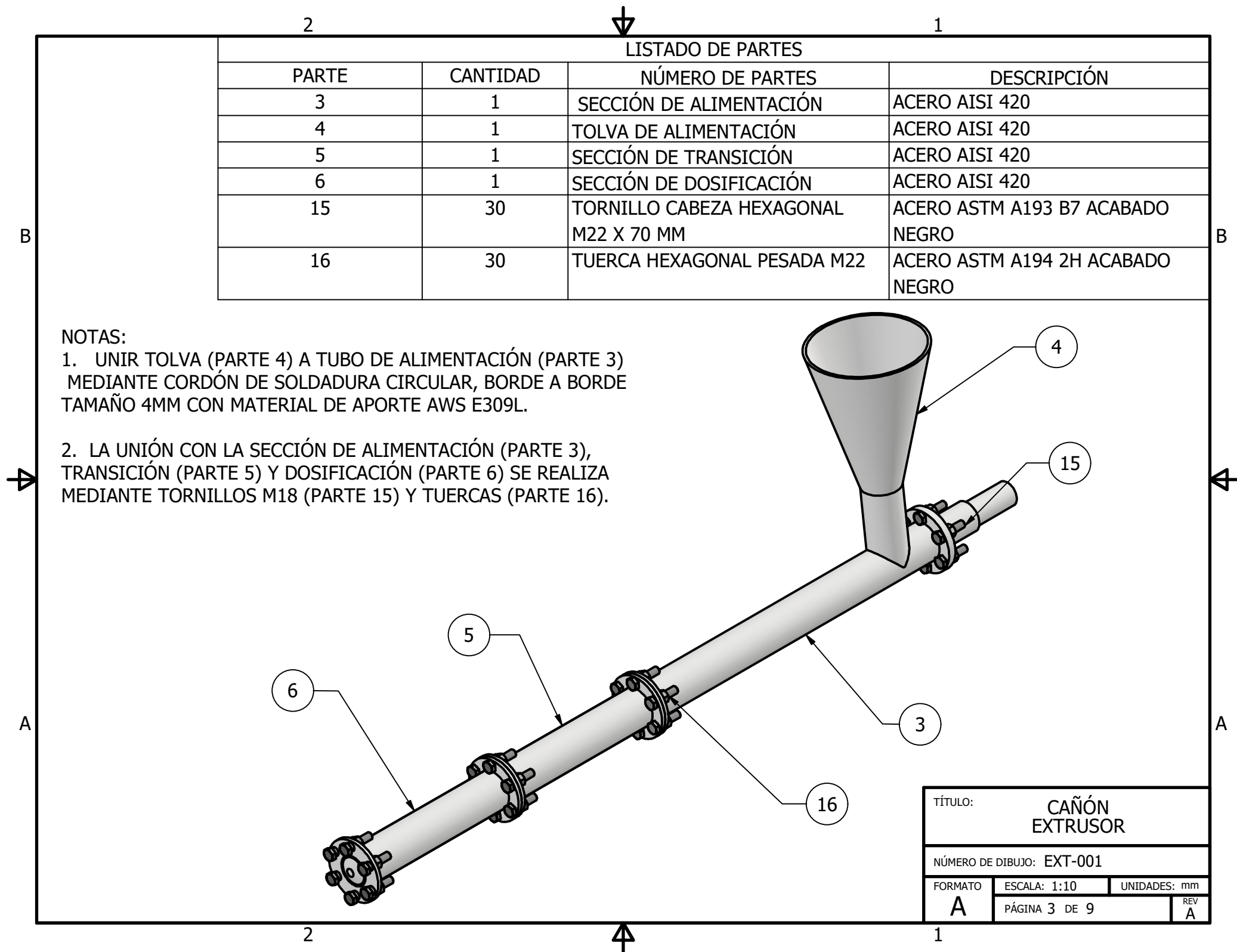
3

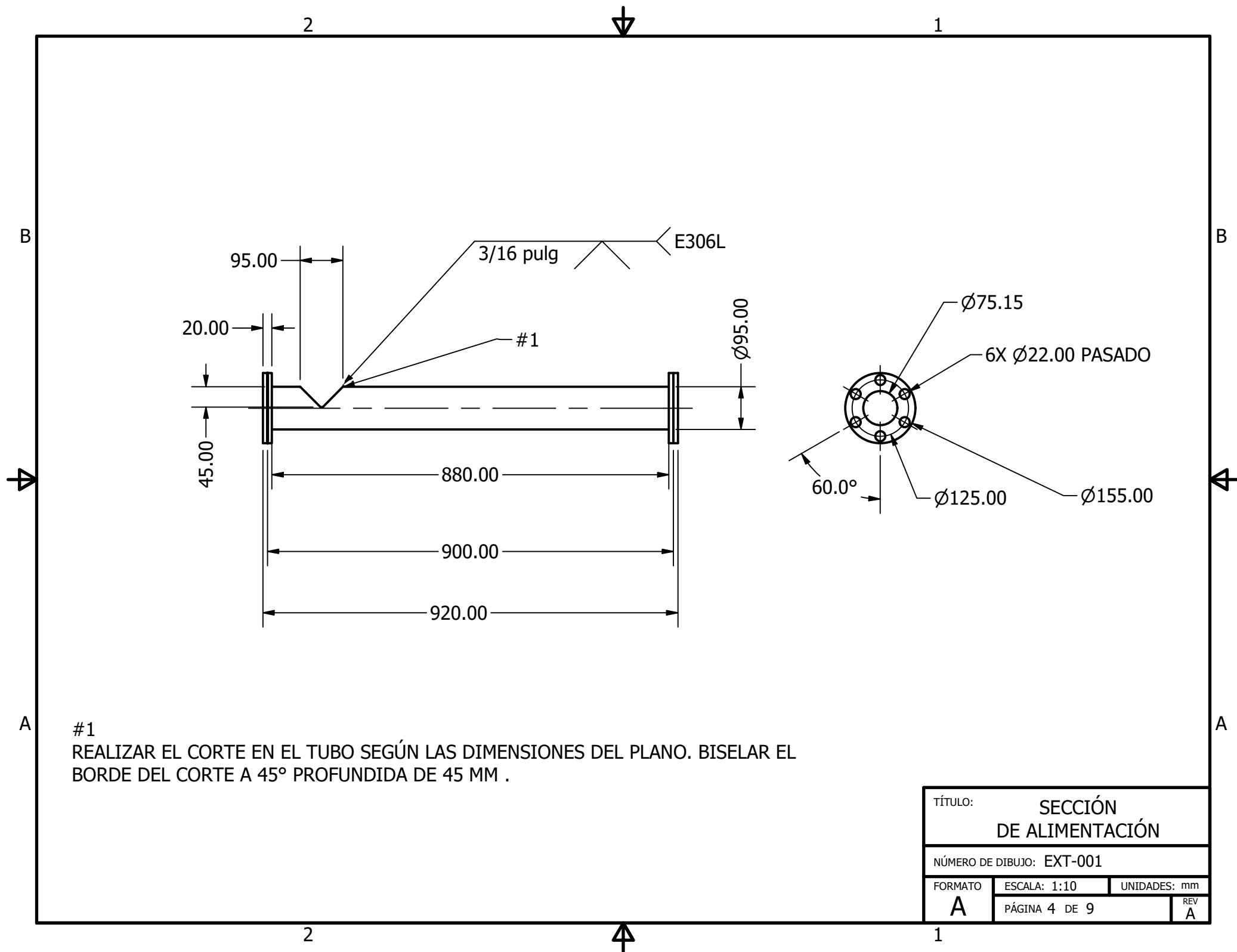
4

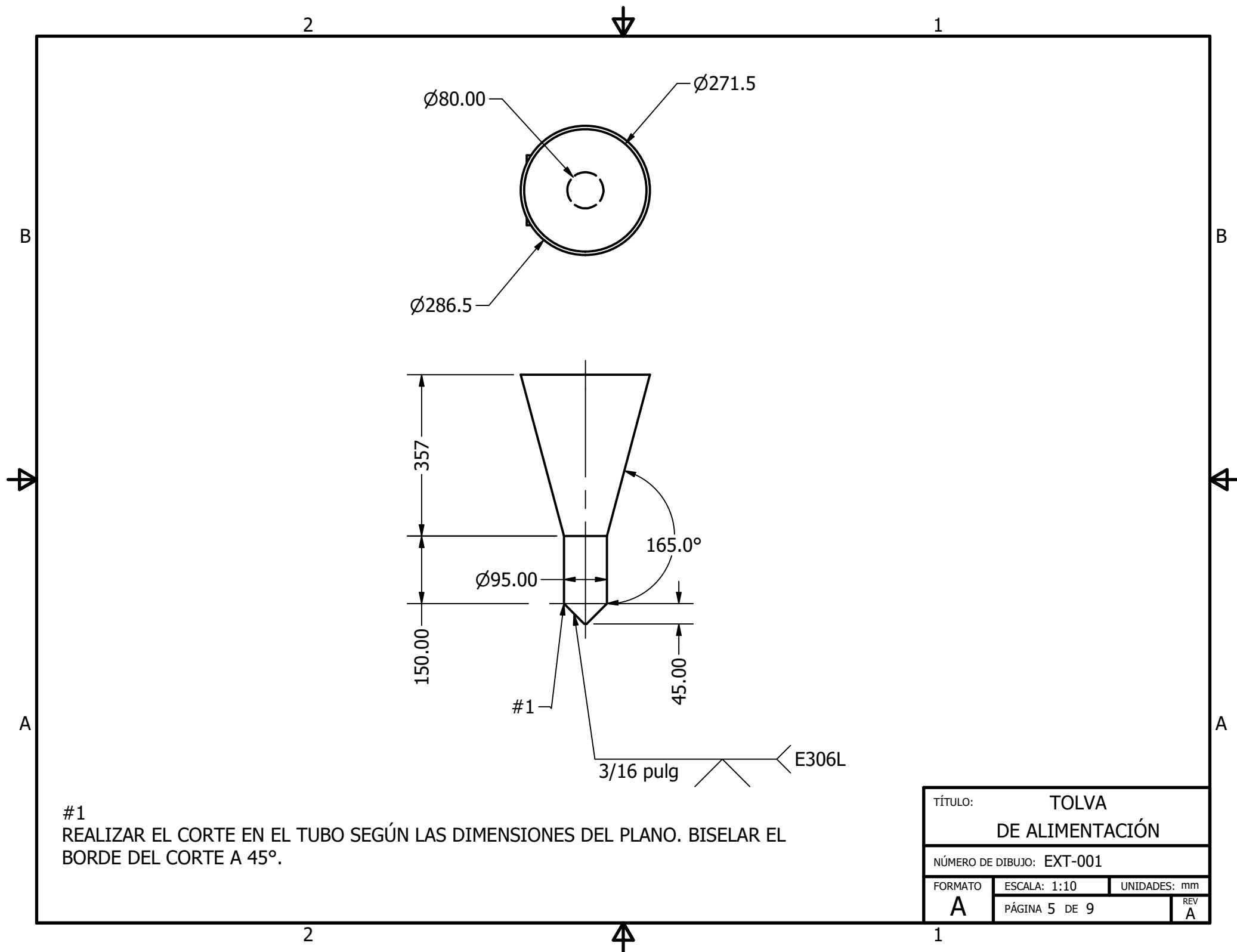
2

1

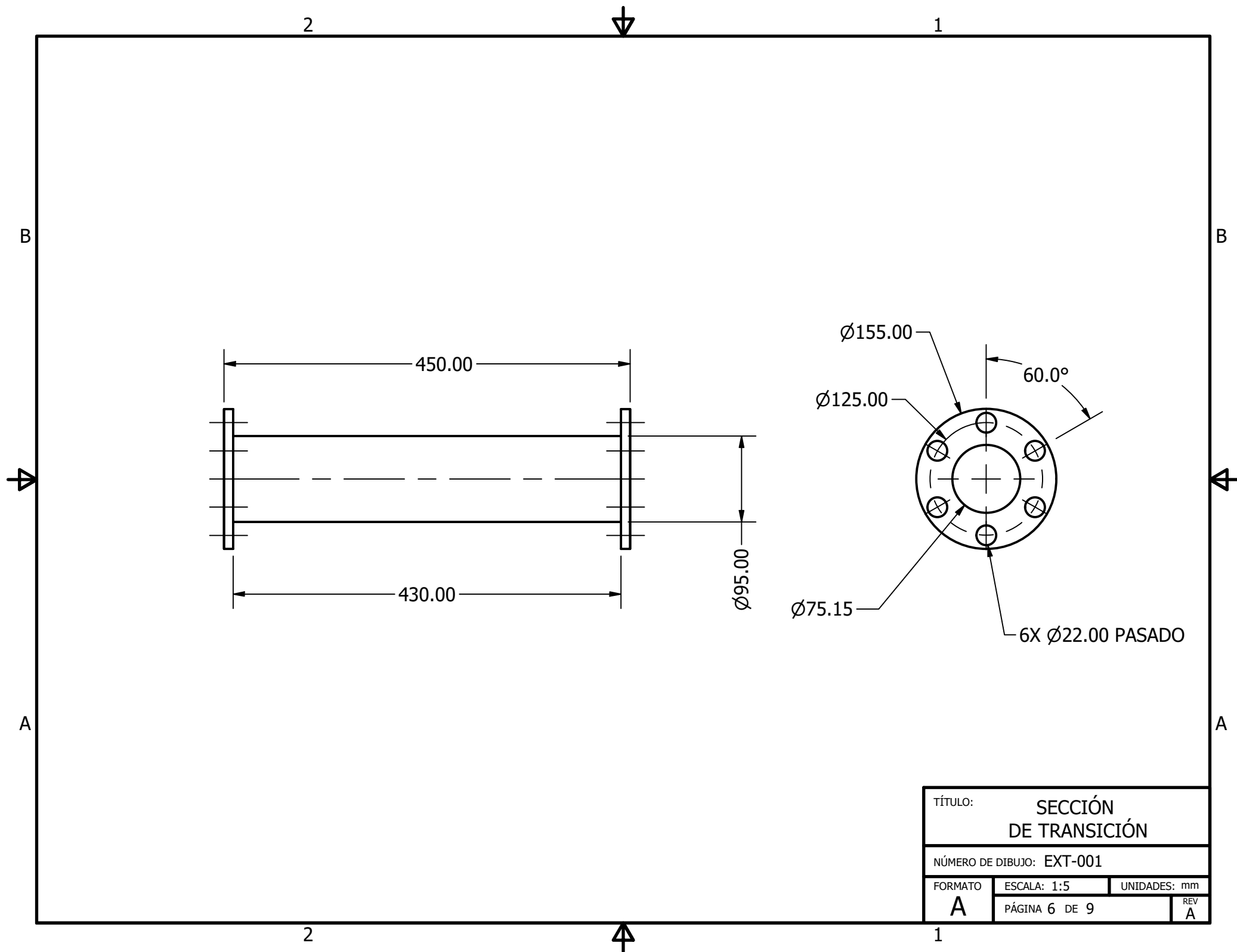


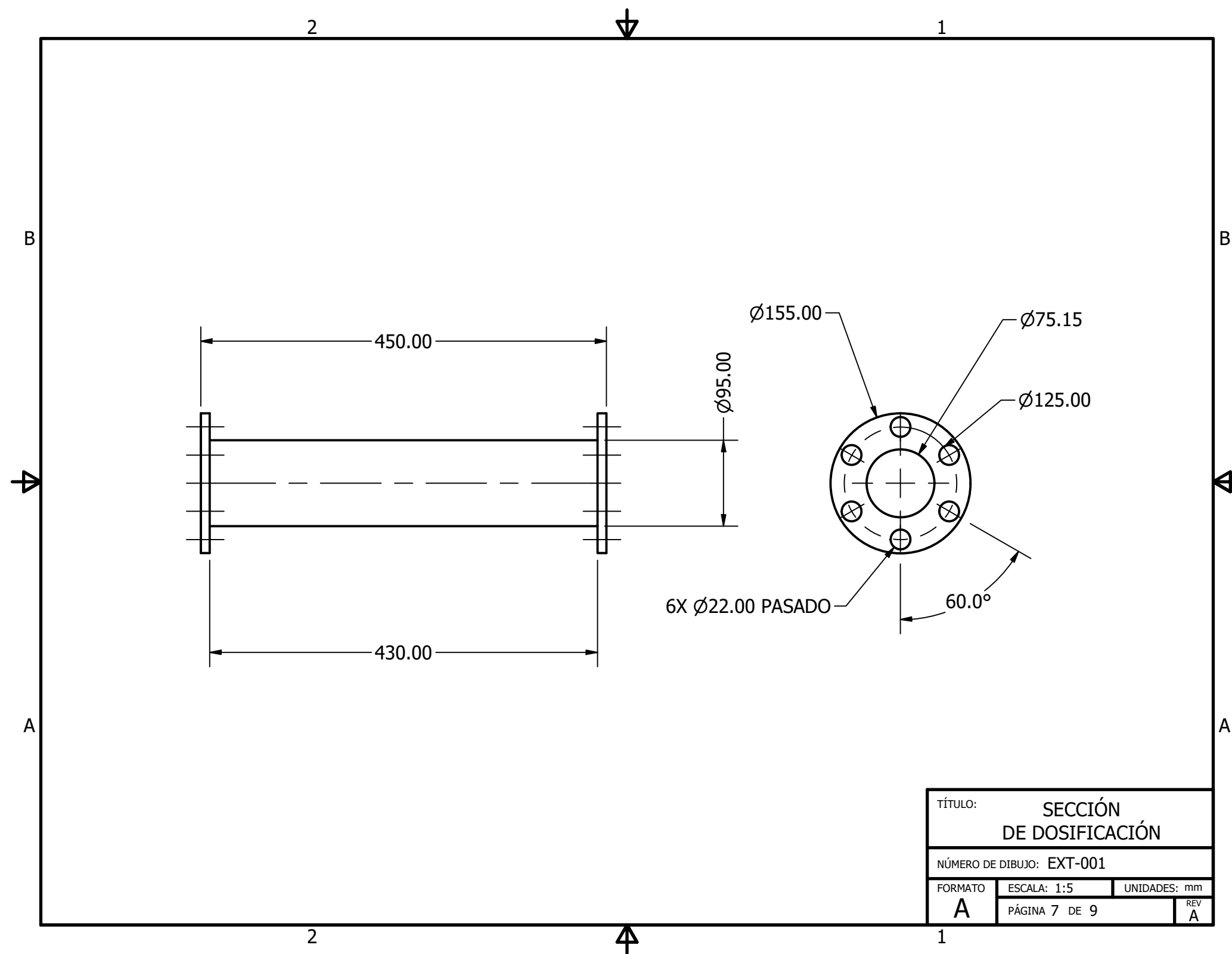






TÍTULO: TOLVA DE ALIMENTACIÓN		
NÚMERO DE DIBUJO: EXT-001		
FORMATO	ESCALA: 1:10	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 9	REV A





TÍTULO: SECCIÓN DE DOSIFICACIÓN		
NÚMERO DE DIBUJO: EXT-001		
FORMATO	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 7 DE 9	REV A

