

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



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

Trabajo de graduación presentado por Edgar Ricardo Echeverría Girón
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica
Industrial

Guatemala,
2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



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

Trabajo de graduación presentado por Edgar Ricardo Echeverría Girón
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica
Industrial

Guatemala,
2024

Vo.Bo.:

(f) 

Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

(f) 

Ing. Rony José Herrarte Estevez

(f) 

Ing. Gustavo Adolfo Barrera Noriega

Fecha de aprobación: Guatemala, 06 de diciembre de 2024.

Agradezco a mis padres, Hilda Marina Girón Pinales y Héctor Ricardo Echeverría Méndez, por su apoyo, consejos y motivación durante toda mi carrera universitaria. Agradezco a Jeimi Estrada por su apoyo incondicional y motivación en cada día. Agradezco al Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro por su asesoramiento y orientación en la realización de este proyecto. Agradezco al Ing. Gustavo Pineda por su ayuda y colaboración en el proyecto. Por último, agradezco a Dios, por brindarme la oportunidad de estudiar, acompañarme en cada paso del camino y permitirme alcanzar una meta más en mi desarrollo académico.

Prefacio	v
Lista de figuras	XII
Lista de cuadros	XIII
Resumen	XV
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivos	9
4.1.1. Objetivo general	9
4.1.2. Objetivos específicos	9
5. Marco teórico	11
5.1. Botellas de plástico polietileno tereftalato	11
5.1.1. Polietileno tereftalato	11
5.1.2. Etiquetas de botellas PET	11
5.2. Reciclaje del polietileno tereftalato	12
5.2.1. Plantas de reciclaje plástico PET	13
5.2.2. Funcionamiento de una planta de reciclaje de plástico	14
5.3. Máquina desetiquetadora	14
5.3.1. Proveedores de desetiquetadoras	15
5.3.2. Funcionamiento de una máquina desetiquetadora	16
5.3.3. Componentes de una máquina desetiquetadora	17
5.3.4. Módulo de transporte y lavado	25

6. Metodología	27
6.1. Descripción de la metodología	27
6.1.1. Planificación	27
6.1.2. Desarrollo	28
6.1.3. Evaluación	28
6.2. Requisitos	29
6.3. Diseño de componentes	30
6.3.1. Tolva de entrada	31
6.3.2. Tolva de salida	31
6.3.3. Tolva del ventilador	32
6.3.4. Rotor de cuchillas	32
6.3.5. Cuchillas fijas	35
6.3.6. Carcasa	35
6.3.7. Rodamientos	36
6.3.8. Estructura base	36
6.4. Cálculos	36
6.4.1. Factor de seguridad	36
6.4.2. Fuerza requerida por las cuchillas	37
6.4.3. Potencia requerida	39
6.4.4. Guarda motor y flipón principal	44
6.4.5. Poleas	45
6.4.6. Rotor de cuchillas	49
6.4.7. Cojinetes	69
6.4.8. Cuña	71
6.4.9. Pernos	73
6.4.10. Ventilador	79
6.5. Simulación en ANSYS	86
6.5.1. Tambor del rotor de cuchillas	86
6.5.2. Cuchillas	89
6.5.3. Carcasa	91
6.5.4. Estructura de la carcasa	93
7. Resultados	97
7.1. Requisitos	97
7.2. Diseño final	97
7.3. Cálculos	99
7.3.1. Factores de seguridad	99
7.3.2. Fuerza de corte de cuchillas	99
7.3.3. Potencia requerida	100
7.3.4. Poleas y fajas	100
7.3.5. Eje	100
7.3.6. Cojinetes	101
7.3.7. Cuña	101
7.3.8. Soldadura	102
7.3.9. Cuchillas	102
7.3.10. Ventilador	102
7.4. Presupuesto	102

8. Análisis de resultados o discusión	107
9. Conclusiones	113
10.Recomendaciones	115
11.Bibliografía	117
12.Anexos	121
12.1. Manual de uso	121
12.1.1. Equipo de protección personal	121
12.1.2. Procedimiento	121
12.2. Planos de construcción	122
12.2.1. Equipo de protección personal	123
12.2.2. Planos de construcción	123

Lista de figuras

1. Máquina desetiquetadora de la empresa Zhangjiagang Lianda Machinery Co.,LTD	15
2. Carcasa de una máquina desetiquetadora	19
3. Estructura interna de la carcasa de una máquina desetiquetadora	19
4. Rotor con cuchillas ensambladas por medio de pernos y tuercas	20
5. Ventilador axial	22
6. Ventilador centrífugo	23
7. Disposición general de un ventilador centrífugo	23
8. Tipos de álabes de un ventilador centrífugo	24
9. Banda transportadora	25
10. Máquina desetiquetadora	30
11. Tolva de entrada	31
12. Tolva de salida	31
13. Tolva del ventilador	32
14. Rotor de cuchillas	32
15. Tambor	33
16. Hélice helicoidal	33
17. Soporte de cuchilla	34
18. Cuchilla	34
19. Cuchilla fija	35
20. Carcasa	35
21. Estructura base	36
22. Sección cizallada triangular	37
23. Radio de corte de las cuchillas del rotor	40
24. Eje X del rotor	41
25. Diagrama de fuerzas	43
26. Factores de servicio típicos	45
27. Gráfica para seleccionar tipo de faja	46
28. Diagrama esquemático de un transportador de tornillo	49
29. Diagrama de cuerpo libre del eje	52
30. Cargas equivalentes	60
31. Diagrama de cuerpo libre del eje	60
32. Diagrama de momento del eje	65

33. Diagrama de deflexión del eje	67
34. Deflexión angular del eje	71
35. Posicionamiento de pernos en la chumacera	73
36. Fuerza ejercida sobre los pernos	73
37. Diagrama de fuerzas del eje	74
38. Coeficientes de rozamientos para esferas	80
39. Características de sopladores	83
40. Ventilador centrífugo	84
41. Especificaciones de ventiladores de accionamiento directo a 3450 RPM	85
42. Configuración del tambor	87
43. Esfuerzos de von Mises en el tambor	87
44. Deflexión del tambor	87
45. Factor de seguridad del tambor	88
46. Esfuerzo de von Mises en la soldadura del tambor	88
47. Esfuerzo de corte máximo en la soldadura del tambor	89
48. Configuración del análisis de la cuchilla	90
49. Esfuerzos de von Mises en la cuchilla	90
50. Deflexión de la cuchilla	90
51. Factor de seguridad de la cuchilla	91
52. Configuración del análisis de la carcasa	92
53. Esfuerzo de von Mises en la soldadura de la carcasa	92
54. Esfuerzo de corte máximo en la soldadura de la carcasa	93
55. Configuración del análisis de la estructura	94
56. Deflexión de la estructura	94
57. Factor de seguridad de la estructura	95
58. Esfuerzo de von Mises en la soldadura de la estructura base	95
59. Esfuerzo de corte máximo en la soldadura de la estructura base	96
60. Máquina desetiquetadora	98
61. Rotor de cuchillas	98
62. Ensamble de cuchillas fijas	98
63. Ensamble cuchilla	102

Lista de cuadros

1. Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora	15
2. Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora	15
3. Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora	16
4. Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora	16
5. Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora	16
6. Designación de códigos	29
7. Requisitos de la máquina desetiquetadora	30
8. Factores de seguridad	37
9. Parámetros en el factor de la condición superficial	62
10. Factores de confiabilidad	63
11. Parámetros de diseño de la sección analizada	65
12. Criterios K	80
13. Datos técnicos de modelos de ventiladores	82
14. Modelos y especificaciones de ventiladores evaluados	83
15. Propiedades del acero A36	86
16. Propiedades de materiales	90
17. Propiedades del acero A36	91
18. Propiedades del acero A500	94
19. Requisitos de la máquina desetiquetadora	97
20. Factores de seguridad de los elementos	99
21. Fuerza de corte	99
22. Potencia requerida	100
23. Poleas y faja	100
24. Fuerzas en el eje	101
25. Especificaciones del cojinete	101
26. Dimensiones de cuña	101
27. Presupuesto de los componentes y materia prima	103
28. Costo de manufactura	105
29. Presupuesto final	105

El presente trabajo aborda la problemática de los desechos de botellas PET en Guatemala. Se estima que cada habitante guatemalteco consume alrededor de 200 botellas PET al año, lo que genera un total de 69,440 toneladas de botellas PET al año, considerando una población de 17.53 millones de habitantes y un peso de 20 gramos por botella. El reciclaje de botellas PET se presenta como una potencial solución para el tratamiento de estos desechos. Sin embargo, uno de los principales problemas en el proceso de reciclaje son las etiquetas de las botellas, ya que intervienen en el proceso por ser un material distinto que afecta la calidad del producto final. Para mitigar este problema, se propone el diseño de una máquina desetiquetadora. La máquina estará compuesta por dos módulos principales: el módulo de potencia, que incluye el sistema de transmisión de potencia, y el módulo mecánico, que comprende el diseño de los componentes mecánicos junto con la estructura mecánica de la máquina. Ambos módulos están diseñados para operar con un flujo estimado de 150 kg/h, manteniendo como objetivo que los costos de manufactura, componentes y materiales no superen los Q200,000.00.

El presente trabajo se centra en el diseño de una máquina desetiquetadora de botellas de polietileno tereftalato (PET) para su integración en una línea de reciclaje. Dado el impacto ambiental generado por los residuos plásticos en Guatemala, este proyecto busca ofrecer una solución eficaz para mejorar el reciclaje de PET mediante la remoción eficiente de etiquetas, las cuales suelen interferir en la calidad del material reciclado. El proyecto se presenta como una respuesta a los problemas ambientales asociados con la acumulación de desechos plásticos en ríos, lagos y basureros, ofreciendo una alternativa para mitigar la contaminación en las comunidades locales.

La máquina desetiquetadora diseñada en este trabajo se integra dentro de una línea de reciclaje que incluye, además, una peletizadora, dos lavadoras, una extrusora y una trituradora. El diseño de la máquina se ha basado en la necesidad de procesar un flujo de 150 kg/h, garantizando un correcto acoplamiento con las demás maquinarias de la línea de reciclaje. Se investigaron plantas recicladoras de PET a nivel local para comprender sus líneas de producción y ajustar el diseño a las necesidades específicas del mercado guatemalteco.

El proceso de diseño incluyó un análisis detallado de cada componente de la máquina desetiquetadora. Entre los elementos más importantes, se evaluaron las dimensiones de la carcasa, la fuerza necesaria para separar las etiquetas, la velocidad de rotación y la potencia requerida para el motor eléctrico. Con el fin de garantizar un diseño robusto y seguro, se realizaron simulaciones de esfuerzo utilizando el software ANSYS, verificando que todos los componentes cumplieran con un factor de seguridad mínimo de 1.9.

El diseño se llevó a cabo utilizando materiales de fácil acceso en Guatemala, con el objetivo de mantener los costos de fabricación por debajo de Q200,000. Se generaron planos de fabricación detallados mediante Autodesk Inventor, que incluyen todas las piezas necesarias para la construcción de la máquina, así como una lista de materiales y el costo total de fabricación. La propuesta final ofrece una solución competitiva en términos de costo y rendimiento en comparación con las máquinas disponibles en el mercado, facilitando su implementación en comunidades que actualmente carecen de infraestructura para el reciclaje de PET.

Este proyecto tiene como propósito no solo reducir la contaminación generada por los productos de PET, sino también fomentar la conciencia ambiental en las comunidades guatemaltecas, promoviendo el reciclaje como una práctica cotidiana. El reciclaje de PET no solo contribuye a disminuir el impacto ambiental de los plásticos, sino que también representa una alternativa sostenible y viable para la gestión de residuos. En resumen, el diseño de esta máquina desetiquetadora representa un avance significativo en la gestión de residuos plásticos en Guatemala, proporcionando una herramienta efectiva para abordar uno de los problemas más críticos relacionados con el reciclaje de PET.

En el mundo, el reciclaje del plástico es cada vez más importante, siendo la contaminación por residuos plásticos con el paso del tiempo más evidente. La problemática con el plástico es que a medida que es reciclado, su calidad va disminuyendo lo que limita el uso del mismo en aplicaciones con mayor valor. Otra problemática evidente con el plástico es la falta de infraestructura adecuada para el reciclaje del plástico en varios países a nivel mundial, lo que dificulta su implementación a una mayor escala. En el año de 2023 a nivel mundial, alrededor del 9 % del plástico producido se recicló de manera efectiva, lo que evidencia la necesidad de incrementar las tasas de reciclaje a nivel global y de implementar políticas y tecnologías más eficaces para optimizar la gestión de residuos plásticos (Renovables, 2023).

En el año 2018, se reportó que el vertedero de la zona 3 en la Ciudad de Guatemala recibió un total de 940,140 toneladas de desechos sólidos. De esa cantidad, el 13 % correspondía a desechos plásticos, lo que equivale a 121,818 toneladas. Entre estos desechos, el 58 % era Tereftalato de polietileno (PET), representando un total de 70,886 toneladas (Lewin, 2020).

Ante este volumen de desechos plásticos, la empresa guatemalteca Ingrup ha desempeñado un papel fundamental en la transformación de estos residuos. Ingrup se dedica al reciclaje de plásticos generados tanto por las industrias como por los consumidores de la región. Además, es reconocida como la primera planta industrial de reciclaje de plástico en Centroamérica. Hasta el año 2017, la empresa había recolectado más de 14 mil contenedores de material reciclable (Herrera, 2017).

El reciclaje del plástico PET enfrenta desafíos importantes debido a la presencia de las etiquetas y otros contaminantes. Tradicionalmente, las botellas se procesan directamente en paletizadoras, lo cual resulta en un producto contaminado con los restos de etiquetas y tapas trituradas. Dicha combinación de materiales reduce la pureza y la calidad de las escamas de PET obtenidas, complicando su reutilización eficientemente (Fangtai, s.f.).

La incorporación de una máquina desetiquetadora especializada en la eliminación de las etiquetas de las botellas representa un avance en la industria de reciclaje, ya que permite retirar más del 95 % de las etiquetas antes de que las botellas sean procesadas. Este proceso

mejorado genera un flujo más limpio de escamas de PET, incrementando la eficiencia y la calidad del material reciclado. La implementación de esta máquina en las líneas de reciclaje optimizaría los resultados al reducir la contaminación desde las primeras etapas del proceso (Shuliy, 2021).

Un trabajo relevante en este campo es el de Cabarcas Iglesias, Nieto Ochoa y Torres Puello (2021), quienes se centraron en el diseño de una máquina desetiquetadora de envases plásticos con etiquetas de PVC, mejorando la capacidad de reciclaje de botellas PET. El diseño se enfocó en un mecanismo de eliminación de etiquetas termoencogibles de PVC para optimizar la capacidad de reciclaje en la empresa Ekored. El objetivo era solucionar el problema que enfrentaba la empresa con botellas como las de Vive100, Gatorade y Speed-Max. El diseño final consistió en una máquina que recibe los envases plásticos a través de una banda transportadora. El cuerpo de la máquina es cilíndrico y permite el movimiento angular de un eje que contiene bloques, cada uno equipado con tres puntas Pozidiv. Estas puntas aplican fuerza sobre las botellas, logrando así la separación de las etiquetas. Para el diseño del eje, se realizó un análisis de la dirección de la fuerza aplicada sobre la botella y la deformación de un anillo circular, determinando las fuerzas normales y axiales con el objetivo de diseñar a fatiga y evaluar su comportamiento ante la flexión (Cabarcas et al., 2021).

Un estudio realizado por Lau se centró en el desarrollo de un sistema eléctrico y de desetiquetado para botellas de vidrio. En su trabajo, se diseñó un sistema que aborda tanto los aspectos eléctricos como mecánicos para mejorar la eficiencia del proceso de reciclaje de botellas de vidrio. Esta tesis proporciona una base técnica que respalda la viabilidad del diseño y construcción de una máquina desetiquetadora para botellas de vidrio. El sistema eléctrico propuesto incluye la implementación de un controlador programable para regular las operaciones de la máquina. Además, se detallan los cálculos de potencia, el diseño del circuito eléctrico y la selección de los componentes necesarios para soportar la carga del motor. La investigación también analiza diferentes métodos de eliminación de etiquetas sin dañar la superficie del vidrio, explorando mecanismos de fricción y despegue, así como el uso de herramientas especializadas para aplicar la presión adecuada. El diseño final es capaz de eliminar las etiquetas de manera consistente y a una velocidad adecuada para aplicaciones industriales de bajo y mediano volumen (Lau, 2021).

Por otro lado, Estevez, Ortego y López realizaron un estudio sobre la implementación de un sistema de contabilidad de gestión ambiental aplicado a una empresa de transformación de PET reciclado. Su propuesta menciona la utilidad de una máquina desetiquetadora en la fase de pretratamiento del PET, siendo un paso esencial para mejorar la eficiencia en el proceso de triturado y reducción de material reciclado. Dicho estudio destaca la importancia de tener maquinaria que se encuentre especializada para garantizar que el PET se encuentre libre de contaminantes como etiquetas y residuo de los adhesivos en las botellas, mejorando la calidad del producto final y reduciendo los costos de operación a largo plazo (Estevez et al., 2015).

Además, un estudio de Santos analiza la infraestructura y la maquinaria necesaria para la instalación de una planta de reciclaje de plástico PET. En esta investigación, se menciona que la eliminación de etiquetas mediante procesos mecánicos o térmicos es uno de los factores determinantes para el éxito de una planta de reciclaje, destacando que el uso de máquinas desetiquetadoras especializadas es clave para garantizar que el material se en-

cuentre en condiciones óptimas para su reprocesamiento y conversión en nuevos productos. Además, el estudio proporciona un diseño detallado de una planta de reciclaje, subrayando la importancia de seleccionar la tecnología adecuada para la automatización del proceso (Santos, 2019).

Por último, Prada y Castillo llevaron a cabo un estudio de pre-factibilidad para la instalación de una planta de reciclaje de PET como agregado para materiales de construcción en la ciudad de Arequipa. En su investigación, describen el uso de una máquina desetiquetadora como parte fundamental del proceso de reciclaje, asegurando que el PET esté libre de etiquetas antes de su incorporación en la producción de materiales de construcción. El estudio enfatiza la importancia de contar con maquinaria que elimine eficazmente cualquier residuo de etiquetas, lo cual resulta esencial para la calidad del producto final y para cumplir con las normativas de calidad (Prada, 2022).

El polietileno tereftalato (PET) es un poliéster termoplástico semicristalino, considerado el plástico más reciclable del mundo. Se caracteriza por ser un material inerte, lo que significa que no reacciona con los productos alimenticios y es resistente al ataque de microorganismos. Estas propiedades lo convierten en la opción preferida del sector médico, farmacéutico y alimenticio para envasar sus productos (Mazariegos, 2014).

El vertedero de la zona 3 en la ciudad de Guatemala recibió 940,140 toneladas de desechos sólidos en 2018. De esta cantidad, el 13 %, equivalente a 121,818 toneladas, correspondía a desechos plásticos. Un análisis comparativo con un informe de sostenibilidad de una empresa que trabaja con material reciclado reveló que el 58 % de los desechos plásticos en el vertedero eran de PET, lo que representa un total de 70,886 toneladas (Lewin, 2020).

Para la gestión y tratamiento de los desechos plásticos PET, se realiza un proceso de reciclaje. Este proceso consiste en una línea de reciclaje que incluye módulo de lavado en frío, desetiquetado, lavado en caliente, triturado, extrusado y peletizado. En el presente trabajo, se propone el diseño de un módulo de desetiquetado, el cual tiene un aporte muy importante en la calidad del producto final (México, 2019).

La influencia que tiene la etiqueta en el proceso de reciclaje constituye un problema debido a que las etiquetas suelen ser de un color y polímero distinto al de las botellas PET, esto representa alteraciones específicas en la calidad del producto en el proceso de reciclaje (Plastics Technology México, 2019). La etiqueta se convierte en un contaminante, ya que la estructura de esta es diferente a la botella de plástico PET. Esto tiene consecuencias en el valor del material reciclado (Alexander, 2021).

Debido a la influencia de la etiqueta, se propone el diseño de una máquina desetiquetadora. La máquina desetiquetadora procesa 150 kg/h y consta de dos módulos principales: uno mecánico y otro de potencia. El objetivo del proyecto es desarrollar un diseño replicable con planos detallados, a un costo inferior a Q200,000. De esta manera, se busca incentivar el proceso de iteración y mejora continua del diseño. Se espera que el diseño plasmado en esta propuesta sea atractivo para municipalidades, organizaciones no gubernamentales u

otras instituciones que estén interesadas en el desarrollo e iteración de esta máquina. Esto sembraría las bases para su eventual construcción y prototipado.

4.1. Objetivos

4.1.1. Objetivo general

Diseñar el sistema de remoción de etiquetas de botellas de polietileno tereftalato (PET) para una línea de reciclaje.

4.1.2. Objetivos específicos

1. Determinar los componentes mecánicos del proceso de desetiquetado.
2. Diseñar una máquina desetiquetadora con un costo total inferior a Q200,000.
3. Diseñar una máquina que pueda procesar 150 kg de botellas por hora.
4. Realizar un manual de usuario para la utilización correcta de la desetiquetadora.
5. Realizar planos mecánicos del diseño de la máquina.

5.1. Botellas de plástico polietileno tereftalato

5.1.1. Polietileno tereftalato

El polietileno tereftalato (PET) es un poliéster termoplástico semicristalino que se caracteriza por ser el plástico más reciclable mundialmente. Entre las principales propiedades del PET se destacan su transparencia, resistencia y seguridad. El PET se utiliza en la fabricación de productos plásticos, como botellas y contenedores, así como en la elaboración de textiles. Por lo tanto, se considera una opción idónea para el transporte y la conservación de alimentos y bebidas, debido a sus características higiénicas, su ligereza y su resistencia a fracturas (Recycletheone, [2023](#)).

Para la fabricación del polímero, se requiere ácido tereftálico puro y etilenglicol, ambos derivados del petróleo crudo. Estos compuestos se combinan para formar gránulos de PET, los cuales se funden posteriormente hasta obtener un líquido que facilita su extrusión y moldeo en diversas formas (Pudack, [2020](#)).

El PET es un material inerte que no reacciona con productos alimenticios y presenta una alta resistencia al ataque de microorganismos. Por esta razón, su uso es preferido en los sectores farmacéutico y alimenticio para el envasado de diversos productos Eurolab, [2022](#). Tanto la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) como la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) han aprobado su utilización en aplicaciones relacionadas con alimentos (Pelaez, [2024](#)).

5.1.2. Etiquetas de botellas PET

Las etiquetas envolventes constituyen un método común utilizado en los envases de las bebidas. Dichas etiquetas son comúnmente fabricadas de la película de poliolefina, como

polietileno (PE) o polipropileno (PP). Estas se envuelven alrededor de la botella y se fijan en su lugar mediante una línea de adhesivo en caliente. En muchos casos, la impresión se realiza en una superficie de película, la cual posteriormente se lamina con una segunda capa para proteger la tinta entre ambas películas (todoenpolimeros, [2018](#)). Las etiquetas de polipropileno, polietileno y polietileno tereftalato son tres tipos de etiquetas utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones debido a sus características de resistencia, durabilidad y bajo costo (Cuauro, [2023](#)).

El polipropileno es un tipo de plástico termoestable que se usa con frecuencia en la fabricación de etiquetas debido a su alta resistencia a la humedad y a la abrasión. Este es un material ligero y económico, por lo cual lo convierte en una opción ideal para su uso como etiquetas de productos alimenticios y de productos de limpieza (Cuauro, [2023](#)). Dentro de la industria de etiquetas, el polipropileno es uno de los materiales más utilizados, debido a que ofrece una excelente calidad de impresión y una presentación visual superior Orcajada, [2022](#).

El polietileno es un tipo de plástico termoestable que se emplea comúnmente en la fabricación de etiquetas debido a su resistencia a la humedad y a la abrasión. Además, se caracteriza por ser un material ligero y económico. Este material se utiliza en la producción de etiquetas para productos alimenticios, de limpieza, así como en etiquetas de identificación para productos industriales y de la industria textil (Cuauro, [2023](#)).

El polietileno tereftalato (PET) es un material termoestable que se utiliza en la producción de etiquetas para productos alimenticios y bebidas, gracias a su resistencia, transparencia y capacidad para soportar la humedad. Además, debido a sus propiedades, es un material reciclable y biodegradable, lo que lo convierte en una opción sostenible para la industria (Cuauro, [2023](#)).

5.2. Reciclaje del polietileno tereftalato

El principal reto de la sostenibilidad es que se tiene una economía lineal, en la cual los recursos se procesan para desarrollar productos y materiales que se desechan una vez finalizado su periodo de uso. Esta situación ha generado una problemática a nivel mundial. Por lo tanto, se plantea una solución a través de la implementación de una economía circular basada en el reciclaje. El reciclaje se define como el reprocesamiento de los materiales rescatados al final de la vida útil de un producto, los cuales se reintegran a la cadena de suministro. En el mundo actual, el reciclaje no se considera una meta, se considera como una herramienta para un mejor manejo de recursos. Existe una diversidad de materiales que se pueden reciclar como el aluminio, el metal, el papel, el plástico, entre otros (Vollmer, [2020](#)).

A nivel mundial, el reciclaje del plástico se ha convertido en una práctica cada vez más importante, dado a que la problemática de la contaminación plástica es cada vez más evidente. No obstante, uno de los principales problemas asociados al reciclaje de plástico es la degradación de la calidad del material, ya que con cada ciclo de reciclaje, las propiedades disminuyen, lo que limita su aplicación en productos de mayor valor. Además, la falta de infraestructura representa un obstáculo significativo en numerosos países para su implementación a gran escala (Renovables, [2023](#)).

Algunas estimaciones sugieren que, en el año 2023, solo alrededor del 9% del plástico producido a nivel mundial fue reciclado efectivamente. Esta cifra revela la necesidad de incrementar las tasas de reciclaje a nivel global, así como de implementar políticas y tecnologías más eficientes para la gestión de residuos plásticos (Renovables, 2023).

En la ciudad de Guatemala, específicamente en el vertedero de zona 3, se reportó que, en el año 2018, este vertedero recibió un total de 940,140 toneladas de desechos sólidos, de las cuales el 13%, equivalente a 121,818 toneladas, correspondía a desechos plásticos. Un análisis comparativo con un informe de sostenibilidad elaborado por una empresa que trabaja con material reciclado reveló que el 58% de los desechos plásticos encontrados en el vertedero correspondían a PET, lo que representa un total de 70,886 toneladas (Lewin, 2020).

La empresa Ingrup, ubicada en Guatemala, se dedica a la transformación de desechos plásticos generados por las industrias y los consumidores de la región en materia prima reutilizable. Es la primera planta industrial de reciclaje de plástico en Centroamérica y, hasta el año 2017, se reportó que había recolectado más de 14,000 contenedores (Herrera, 2017). En el año 2017, Ingrup reportó que reciclaba aproximadamente 1.6 millones de botellas plásticas por día, lo que equivale a un total aproximado de 300 millones de botellas al año. Este proceso se lleva a cabo por medio de un modelo de producción orientado en las estrategias de sostenibilidad de las 4R (reducir, reutilizar, reciclar y recuperar) (Herrera, 2017).

5.2.1. Plantas de reciclaje plástico PET

Una planta de reciclaje es una instalación dedicada al procesamiento de materiales desechados para la producción de materia prima a través de un proceso específico, que varía según el tipo de material tratado. Las plantas de reciclaje PET pueden estar ubicadas cerca de los vertederos para agilizar el proceso de gestión de residuos u operar como instalaciones independientes. La cantidad de botellas que se recolectan y se transportan a estas plantas varía considerablemente, dependiendo de los centros de acopio aliados, de los proveedores de plástico y de la capacidad de procesamiento que la planta pueda manejar por hora (Schyns, 2021).

En Guatemala se encuentra la empresa de reciclaje Complast, la cual se dedica a la producción de textiles y prendas a partir de botellas de plástico PET. El proceso de reciclaje comienza con la recolección de las botellas, obtenidas a través de donaciones y compras. Estas botellas se colocan en una banda transportadora para un proceso de selección manual, en el que se verifica que todas sean del mismo color para garantizar la pureza y calidad del material. Posteriormente, las botellas se transportan hacia un sistema de separación magnética, que permite eliminar aquellas que contienen elementos metálicos. Este paso es fundamental, ya que algunos vendedores añaden componentes metálicos con el fin de incrementar el peso de las botellas y obtener un mayor beneficio económico. Luego de la separación magnética, las botellas se someten a un proceso de lavado que elimina impurezas y residuos. A continuación, se procede con el desetiquetado de la botella y se continúa al triturado de las botellas hasta obtener copos de un tamaño específico. Estos copos son trasladados a una extrusora, donde se someten a altas presiones y temperaturas, logrando así la plastificación

del PET. Posteriormente, el material plastificado se transfiere a una peletizadora, la cual lo transforma en pellets, pequeñas piezas uniformes que se emplean como materia prima para la producción de textiles. Este proceso no solo permite la reutilización de residuos plásticos, sino que también contribuye a la creación de un ciclo productivo sostenible y ambientalmente responsable.

5.2.2. Funcionamiento de una planta de reciclaje de plástico

El proceso de reciclaje de plásticos se lleva a cabo a través de una serie de etapas que incluyen recolección, clasificación y reprocesamiento para su uso. En la primera etapa, los usuarios depositan los desechos plásticos en contenedores de reciclaje. Posteriormente, en las instalaciones de reciclaje, el plástico se clasifica según su tipo. A continuación, se lleva a cabo el reprocesamiento, en el cual el plástico se somete a un proceso de lavado, molienda en escamas, calentamiento y extrusión para producir nuevos gránulos (Shen, 2014).

En el caso específico del reciclaje de botellas de PET, el proceso consta de etapas más detalladas. Inicialmente, se pesa el bloque de botellas recibido en la planta y se verifica que no contenga piedras, tornillos u otros elementos que puedan aumentar el peso. Luego, se inspecciona que las botellas cumplan con los requisitos necesarios para ser apiladas en bloques, considerando aspectos como color y estado de las mismas. Una vez seleccionadas, los bloques se trasladan a una etapa de lavado y eliminación de etiquetas, seguida de una clasificación por color, ya que esta variable influye en la calidad del material reciclado (Shen, 2014).

Posteriormente, las botellas se trituran y se someten a un lavado adicional para eliminar cualquier residuo ajeno al polímero. Luego, el material se somete a un proceso de secado para obtener hojuelas de plástico PET. Estas hojuelas se calientan a una temperatura controlada que permite su extrusión, obteniendo filamentos con un diámetro ajustable según las especificaciones de cada planta. Finalmente, los filamentos extruidos se cortan en gránulos de PET, los cuales se emplean como materia prima en la producción de nuevos productos (Shen, 2014).

5.3. Máquina desetiquetadora

La máquina desetiquetadora se utiliza para separar las etiquetas adheridas a las botellas de PET mediante un rotor equipado con cuchillas. Esta máquina también puede emplearse para retirar etiquetas de PVC y otros tipos de plásticos. Las etiquetas desprendidas de las botellas de PET se expulsan mediante un soplador de etiquetas (Iswa, 2019). En la Figura 1 se observa la máquina desetiquetadora de la empresa Zhangjiagang Lianda Machinery Co.,LTD.

Figura 1: Máquina desetiquetadora de la empresa Zhangjiagang Lianda Machinery Co.,LTD



Fuente: Empresa Zhangjiagang Lianda Machinery Co.,LTD

5.3.1. Proveedores de desetiquetadoras

En la industria del reciclaje existen diferentes proveedores que tienen disponibles distintos modelos de máquinas desetiquetadoras. Dentro de ellos están: Zhangjiagang Polestar Machinery Co., Ltd., Baoding Haorui Machinery Manufacturing Co., Ltd., WEDO MACHINERY Co., Ltd y Jiangsu MOOGE Machine Co., Ltd.

En los Cuadros 1, 2, 3, 4 y 5 se observa cómo las especificaciones de las máquinas desetiquetadoras varían, aunque presentan capacidades de flujo similares.

Cuadro 1: Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora

Modelo	TPJ-I	TPJ-II	TBJ-III	TBJ-IV
Potencia (kW)	7.5	11	22	22
Potencia del ventilador (kW)	3	5.5	7.5	-
Ancho (m)	2.5	3	3.25	1.1
Largo (m)	4.5	5.5	6.5	3.48
Altura (m)	3.5	3.95	3.95	3.18
Capacidad máxima (kg/h)	500	1000	1500	2000
Tipo	Sin agua	Sin agua	Sin agua	Con agua

Fuente: Zhangjiagang Polestar Machinery Co., Ltd.

Cuadro 2: Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora

Modelo	LMD-7.5	LMD-11	LMD-15	LMD-22	LMD-30
Potencia de motor principal (kW)	7.5	11	15	22	30
Potencia del ventilador (kW)	4	4	4	4	4

Modelo	LMD-7.5	LMD-11	LMD-15	LMD-22	LMD-30
Capacidad (kg/h)	300 - 500	1000	1500	2000	3000
Diámetro del rotor (m)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.71
Largo del rotor (m)	3.5	4.5	4.5	4.5	6

Fuente: Jiangsu MOOGE Machine Co., Ltd.

Cuadro 3: Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora

Modelo	600	800	900	1000
Capacidad (kg/h)	1000	1500	2500	3000
Largo (m)	4	6	6	6.5
Ancho (m)	1.1	1.2	1.2	1.25
Altura (m)	2.2	3.45	3.45	3.8
Potencia (kW)	15	37	37	55

Fuente: Baoding Haorui Machinery Manufacturing Co., Ltd.

Cuadro 4: Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora

Modelo	TB5	TB10	TB15
Potencia (kW)	22	30	37
Capacidad máxima (kg/h)	500	1000	1500

Fuente: WEDO MACHINERY Co., Ltd.

Cuadro 5: Especificaciones de los modelos de máquina desetiquetadora

Modelo	RC-80	RC-100
Motor principal (hp)	20	30
Motor del soplador (hp)	3	5
Capacidad (kg/hr)	600	1000
Peso (kg)	1200	1500
Dimensiones (LxAxH)	4.50 x 1.20 x 1.60 m	5.00 x 1.30 x 1.80 m

Fuente: Solimaq

En la industria del reciclaje, existen diversos proveedores internacionales que ofrecen distintos modelos de máquinas desetiquetadoras. La mayoría de las empresas proveedoras de este tipo de equipos son de origen chino. Por otro lado, la empresa STADLER, de procedencia alemana, se especializa en la clasificación de residuos para la industria del reciclaje. En México, se encuentran varios proveedores locales, entre los cuales destacan Manahuia y Solimaq.

5.3.2. Funcionamiento de una máquina desetiquetadora

El proceso de desetiquetado de botellas de PET es una etapa fundamental en las líneas de reciclaje, ya que permite la eliminación de etiquetas antes de proceder con la molienda y posterior transformación del material en escamas o pellets. Este proceso tiene como objetivo

principal separar las etiquetas del cuerpo de las botellas para evitar que contaminen el material reciclado y mejorar la calidad del producto final. Las máquinas desetiquetadoras están diseñadas para remover etiquetas de envases de inyección y soplado, como las botellas de PET y HDPE, utilizando cuchillas de piedra de esmeril que cortan las etiquetas con alta precisión y mínima fricción (Crista, s.f.).

El primer paso en el proceso consiste en la alimentación de las botellas hacia la cámara de trabajo de la máquina. Aquí, las botellas son empujadas por un sistema de alimentación que las orienta hacia el interior de la máquina desetiquetadora. Durante esta etapa, la interacción de las botellas con las cuchillas del rotor y estator permite que las etiquetas sean removidas. Las cuchillas, que están fabricadas con materiales altamente resistentes, aseguran un corte eficiente y una larga vida útil de la maquinaria (Crista, s.f.).

Los equipos utilizan cuchillas dentadas y afiladas, que cortan y pelan las etiquetas a medida que las botellas son transportadas hacia adelante en la máquina. La acción de las cuchillas en forma de garra empuja las botellas hacia adelante y, una vez que las etiquetas han sido separadas, son dirigidas hacia una bandeja de recolección por medio de aire (Fangtai, s.f.).

Una vez que las etiquetas se separan de las botellas, se procede a la fase de separación de etiquetas. En este paso, se utiliza un flujo de aire ajustable que dirige las etiquetas hacia una bandeja de recolección, dejando las botellas listas para la siguiente fase de reciclaje (Crista, s.f.). Fangtai destaca que, además del uso de aire, algunas máquinas también permiten la inyección de agua para un proceso de recolección en húmedo, incrementando la efectividad de la separación. La eficiencia de estas máquinas es notable, logrando un ratio de eliminación de etiquetas de entre el 90% y el 98%, dependiendo del tipo y condición de las botellas (Fangtai, s.f.).

Además, es importante la personalización de las máquinas desetiquetadoras para trabajar con diferentes tamaños y formas de botellas. Por ejemplo, la distancia entre las cuchillas se puede ajustar para adecuarse a botellas redondas y comprimidas. Esta capacidad de ajuste, junto con el uso de materiales duraderos y el diseño orientado a un fácil mantenimiento, asegura que la maquinaria tenga una larga vida útil y sea altamente eficiente (Crista, s.f.; Fangtai, s.f.).

Este enfoque garantiza una mayor pureza del PET reciclado y facilita la posterior transformación del material en productos de alta calidad. La implementación de tecnologías avanzadas en máquinas desetiquetadoras constituye un paso clave en la optimización de las líneas de reciclaje de plásticos (Crista, s.f.).

5.3.3. Componentes de una máquina desetiquetadora

En la fabricación de los componentes de una máquina desetiquetadora, se consideran materiales que aumenten su periodo de vida y por ende se reduzcan los costos operativos. Para estos componentes, los materiales seleccionados aportan mejores propiedades mecánicas y garantizan un uso con un periodo extenso, condicionado a que se realice el mantenimiento pertinente (Mooge, 2022a). Entre los componentes de una máquina desetiquetadora se encuentran los siguientes:

- Poleas
- Fajas
- Rotor de cuchillas
- Carcasa
- Motores eléctricos
- Ventiladores
- Chumaceras
- Tolva de entrada
- Tolva de ventilador
- Tolva de salida
- Estructura de soporte
- Cuchillas internas
- Hélice

Carcasa

Este componente es de uso fundamental en el proceso de remoción de etiquetas, ya que en su interior se lleva a cabo dicho procedimiento. La carcasa de una máquina desetiquetadora contiene aspiradores para retirar las etiquetas desprendidas de la parte interna, así como las cuchillas en su interior que permiten el contacto entre las botellas y las cuchillas del rotor. Además, la carcasa cuenta con puertas en ambos lados de la máquina, lo que facilita el acceso para el mantenimiento y la limpieza de las partes internas, optimizando así el tiempo de operación y reduciendo los costos de utilización (Mooge, 2024).

La carcasa de estas máquinas debe proveer seguridad a los usuarios alrededor de ella. Las máquinas desetiquetadoras de la empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd. utilizan acero inoxidable, ya que este material posee propiedades beneficiosas para esta aplicación como su durabilidad, resistencia a la corrosión y resistencia al impacto (Mooge, 2024). Para el diseño de este componente, se encontró láminas de acero A36 de la empresa guatemalteca MultiGroup. Este material es adecuado para la fabricación de la carcasa, ya que ofrece un equilibrio ideal entre resistencia y conductividad. Esto implica que el material puede soportar cargas elevadas y esfuerzos sin fracturarse, permitiendo deformaciones significativas antes de llegar a su punto de ruptura (Álvarez, 2023). En la Figura 3, se observa la carcasa de una máquina desetiquetadora de la empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd.

Para obtener las dimensiones de la carcasa, se estima el largo y el diámetro del rotor con cuchillas. El largo de la carcasa tiene el mismo largo del rotor, sin embargo, debido a la complejidad de su geometría, se puede emplear un proceso iterativo para determinar la altura y el ancho de la carcasa, considerando factores como la forma de la entrada y salida,

la posición de las cuchillas, los aspiradores de etiquetas y el espacio requerido para el paso de las botellas.

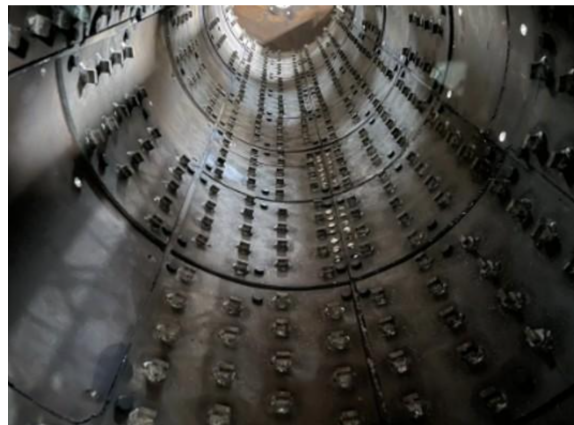
Las cuchillas en la parte interna de la carcasa están fijadas a una lámina que cuenta con pernos en cada sección y se unen a la estructura de la carcasa por medio de soldadura (Mooge, 2024). En la Figura 2 se observa el posicionamiento de las cuchillas internas en la carcasa de la máquina desetiquetadora de la empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd.

Figura 2: Carcasa de una máquina desetiquetadora



Fuente: Empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd

Figura 3: Estructura interna de la carcasa de una máquina desetiquetadora



Fuente: Empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd

Cuchillas

Las cuchillas que se encuentran en la máquina son dentadas. Estas se encuentran hechas de acero aleado de tungsteno para cumplir su función de durabilidad y resistente de remoción de etiquetas. Las cuchillas estarían perñadas a soportes del rotor para ser ajustables a los tamaños de las botellas que ingresen (Mooge, 2022a).

Durante el proceso de desetiquetado, las etiquetas se desprenden de las botellas por medio

de fricción, esto provoca calor en la superficie de las cuchillas y por lo tanto se considera un material que deba soportar el calor que genera la interacción dicha. El acero aleado de tungsteno es un material que poseen las cuchillas en las removedoras. En la industria se utiliza dicho material porque tiene propiedades que soportan altas temperaturas. Además, cumple su función de durabilidad y resistente de remoción de etiquetas. En Guatemala, se puede encontrar el acero AISI D2. El acero AISI D2 es utilizado en aplicaciones de corte. Por lo tanto es considerado un material apropiado para está aplicación.

Rotor de cuchillas

El rotor con las cuchillas es un eje que tiene soldados soportes para las cuchillas. Según la empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd, las dimensiones del rotor varían dependiendo de la capacidad de la máquina. Según se muestra en el Cuadro 2, estas dimensiones, se pueden tomar como base para diseñar un rotor para una máquina que tiene como capacidad 150 kg/h. El rotor principal debe llevar una velocidad de 400 revoluciones por minuto. A lo largo del rotor se encontraría 60 soportes de cuchillas (Mooge, 2022a).

Figura 4: Rotor con cuchillas ensambladas por medio de pernos y tuercas



Fuente: Empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd

El material utilizado en los rotores de la línea de desetiquetado LMD de la empresa Mooge Technology es acero (Mooge, 2024). Este material presenta propiedades como resistencia, elasticidad y durabilidad, las cuales son fundamentales en aplicaciones industriales donde se requiere que los componentes soporten cargas y tensiones significativas (Huitong, 2023). El rotor puede fabricarse con aceros de lámina A36, el cual está disponible en Guatemala y ofrece beneficios como facilidad de soldadura y un costo accesible. Dado que el rotor requiere soldadura para fijar los soportes de las cuchillas, se sugiere utilizar material de soldadura a base de cobre. La soldadura aplicada en el rotor es de tipo filete, una técnica comúnmente empleada en estructuras metálicas debido a su efectividad y simplicidad (Elizalde, 2021).

Cojinetes

Para que el rotor tenga un movimiento rotacional, se deben instalar cojinetes en la máquina. Estos serían posicionados en el exterior de la máquina para evitar la contaminación

con los materiales que están siendo procesados en el interior. Los cojinetes serían seleccionados con base en la carga que se obtenga en los análisis de fuerza que está sometida el rotor y se escogería la fuerza máxima que posea el eje y se utilizará esa fuerza para tomar la decisión de los cojinetes en la máquina (Mooge, [2022a](#)).

Potencia requerida por la máquina desetiquetadora

Para el cálculo de la potencia de la máquina, se necesita tomar en cuenta distintos factores:

- Capacidad de la máquina por hora. Este es un factor muy importante, ya que un flujo mayor de material representa una mayor cantidad de energía utilizada.
- Número de aspiradores de etiquetas. El número de aspiradores se considera otro factor porque cada aspirador posee su propio motor eléctrico, el cual tiene una potencia requerida de 1.5 kW.
- Diámetro y longitud del rotor. Dependiendo de la capacidad establecida para la máquina, se obtiene un rotor directamente proporcional a ella. Por consiguiente, las dimensiones del rotor varían provocando un peso que requiere una potencia específica para funcionar de una manera correcta.

Generalmente se utilizan motores eléctricos en estas máquinas debido a que su eficiencia es mayor a 90 %. Además, el tamaño y peso permite posicionarlos en la carcasa y los aspiradores necesitan un sistema de transmisión porque están directamente conectados a ellos. El motor eléctrico que alimenta al rotor se encuentra posicionado en la parte inferior de la plataforma sobre la cual está la carcasa de la máquina (Emadi, [2018](#)).

Sistema de transmisión de potencia de una desetiquetadora

El sistema de transmisión de potencia en estas máquinas utiliza un motor eléctrico conectado a poleas. En el proceso de selección de un motor eléctrico se debe determinar la potencia y la velocidad del rotor requerida para decidir la reducción que tendrán las poleas en la transmisión. Las revoluciones por minuto del rotor están entre 300 a 500 (Mooge, [2022b](#)).

Poleas y bandas

El objetivo de utilizar un sistema de transmisión de poleas es transmitir la potencia que brinda el motor eléctrico al rotor con cuchillas. Estos sistemas se seleccionan en la industria debido a que tienen distintos beneficios en diferentes áreas. Entre sus ventajas se encuentra que su instalación es fácil, es menos costoso a comparación de engranes y proveen mayor distancia para transmitir la potencia. Las poleas se ayudan con las fajas para interconectar el sistema. Las fajas ayudan a que el sistema trabaje de una manera continua, por lo tanto, es importante mantener un control constante del estado de la faja y que su recorrido este

alineado, ya que de lo contrario podría provocar un desgaste asimétrico de la banda (Mooge, 2022b).

Ventilador

Un ventilador es un equipo que tiende a crear una diferencia en la presión para mover el aire a través del sistema. Cuando es más grande la diferencia de la presión creada por el ventilador, más grande tiende a ser el volumen del aire transportado a través del sistema (Uloa, 2018). Existen dos tipos principales de ventiladores, los axiales y los centrífugos.

Tipos de ventiladores

Ventiladores axiales

Los ventiladores axiales se encuentran compuestos básicamente por un rotor y dos o más paletas solidarios a un eje propulsor movido por un motor que tiende a impulsar aire en una trayectoria de manera recta con una salida helicoidal (Uloa, 2018).

Figura 5: Ventilador axial



Fuente: (Uloa, 2018)

Dentro de esta categoría de ventiladores, se pueden identificar distintos tipos, entre los cuales se incluyen:

- Ventilador helicoidal. El ventilador helicoidal son aquellos donde el aire se desplaza en el sentido del eje de rotación de la hélice. Este tiende a tener una composición simple, lo cual lo convierte en un aparato económico en comparación con su caudal, se lo aplica donde la resistencia al flujo de aire es baja (Uloa, 2018).
- Ventilador tubular. El ventilador tubular es aquel que dispone de una hélice de alabes estrechos de sección constante. Dichos ventiladores tienen la capacidad de mover el aire venciendo las resistencias moderadas menos de 50 mm H₂O adecuados para ser conectados a ductos y para la operación en serie (Uloa, 2018).
- Ventilador turbo axiales. Los ventiladores turbo axiales tienen una hélice de álabes con perfil aerodinámico, en comparación con los otros, este tipo tiene un rendimiento

mayor y tienen la capacidad de desarrollar presiones mayores hasta 600 mm H₂O (Uloa, 2018).

Ventiladores centrífugos

Los ventiladores centrífugos tienen un número de aletas montadas alrededor de la manzana, donde el flujo desde el lado de la turbina gira a 90° acelera y pasa hacia las aletas del ventilados. Este tipo de ventiladores tienen la capacidad de alcanzar presiones altas en el flujo de gas, por lo tanto son los más eficientes a nivel industrial (Uloa, 2018).

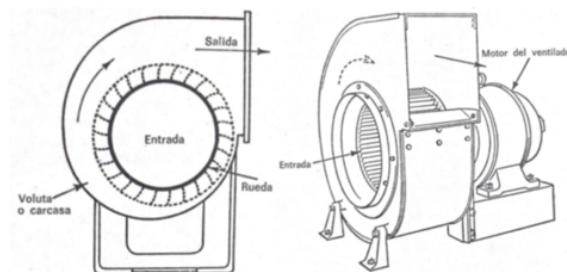
Figura 6: Ventilador centrífugo



Fuente: (Uloa, 2018)

Este tipo de ventilador se encuentra conformado por un impulsor que gira dentro de una carcasa en forma de voluta, donde el impulsor tiene un número determinado de hojas o placas alrededor de su periferia similar a una rueda hidráulica o ruedas de paletas. La carcasa del ventilador tiene una entrada en el eje de la rueda y una salida perpendicular a este (Ver Figura 7) (ALG, 2020).

Figura 7: Disposición general de un ventilador centrífugo



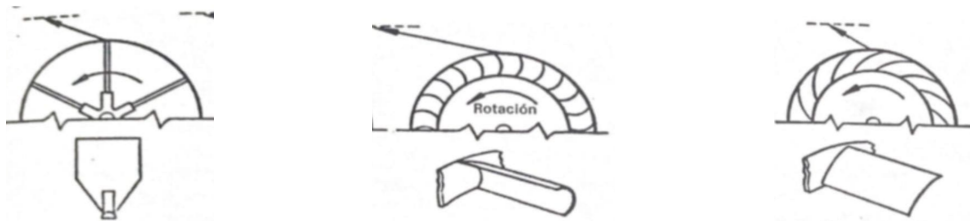
Fuente: (ALG, 2020)

A medida que el impulsor gira, las hélices desde su periferia despiden el aire por medio de la centrifugación, donde este entra en la voluta y es forzado hacia la salida cuando abandona la hélice y, al mismo tiempo, el aire es aspirado a la entrada para reemplazar al que ya ha salido. Dicho aire entra de forma axial, girando en un ángulo recto a través de los álabes y es despedido de forma radial. La carcasa permite la conversión de la presión estática en presión dinámica desarrollada en la extremidad de los álabes (ALG, 2020).

Los tipos de álabes de un ventilador centrífugo son los siguientes:

- Hélices radiales rectas. Este tipo de álabes son voluminosos comparados con su capacidad, su rendimiento no es muy elevado y son destinados a presiones moderadas, donde una de sus ventajas es que son capaces de auto limpiarse, lo cual es una ventaja en caso de que el aire estuviese cargado de polvo (ALG, 2020). Los ventiladores de transporte de material o transporte de sólidos se utilizan en una aplicación donde existen partículas o materiales que necesiten pasar a través del ventilador y no solamente se realiza por medio de una cinta transportadora, se emplean los ventiladores centrífugos radiales de álabes rectos. Este tipo son más robustos y el diseño de sus álabes permite que las partículas o materiales pasen a través de ellas sin quedarse adheridas (Casals, 2024).
- Hélices curvadas hacia delante. Estos ventiladores también son conocidos como Multípalas, debido a que generalmente tienen una cantidad grande de álabes con baja altura radial (poco ancho). Los álabes de estas tienen una curvatura cóncava en sentido de la rotación, lo cual genera un efecto de cuchara en el aire, de tal manera que, la velocidad del aire saliendo de esta manera es más grande, moviendo más aire que otros tipos de diseño para un diámetro y velocidad dada. Este tipo de diseño es utilizado en ventiladores pequeños y medios (ALG, 2020).
- Hélices curvadas hacia atrás. Este tipo de diseño tiene los mejores rendimientos en ventiladores de este tipo. Este diseño poseen el lado convexo en el sentido de la rotación, lo cual favorece el flujo del aire por medio de los álabes, reduciendo el choque y las pérdidas por remolinos, siendo los álabes más largos radialmente y pesados (ALG, 2020).

Figura 8: Tipos de álabes de un ventilador centrífugo



(a) Hélices radiales rectas

(b) Hélices curvadas hacia delante

(c) Hélices curvadas hacia atrás

Fuente: (ALG, 2020)

Variaciones en el diseño

Los tres tipos de álabes en los ventiladores centrífugos pueden variar con el fin de mejorar sus características. Dos distintos diseños de álabes se pueden combinar formándolo en un diseño (ALG, 2020).

Una de estas variaciones son los ventiladores MTD de la empresa KongsKilde, los cuales son ventiladores creados con accionamiento directo, los cuales son diseñados para el transporte de material. Dichos ventiladores contienen álabes rectos ligeramente curvados hacia

atrás con un rodete autolimpiante. Esta variación con álabes rectos ligeramente curvados hacia atrás, permite que la materia a transportar no se adhiera a los álabes gracias a su diseño de álabes rectos. Asimismo, este diseño debido a su diseño ligeramente curvados hacia atrás permite que los álabes tengan una mejor aerodinámica (Kongskilde, 2022).

5.3.4. Módulo de transporte y lavado

La máquina desetiquetadora es la fase intermedia del proceso de lavado. El proceso de lavado consiste en un lavado en frío y un lavado en caliente. El lavado en frío se realiza antes del ingreso de las botellas PET a la removedora de etiquetas. Este proceso prepara al material y convierte el procedimiento de desetiquetado en una tarea más fácil. Luego de realizarse el proceso de remoción de etiquetas, las botellas PET se dirigen a un lavado en caliente, donde este se encarga de quitar los últimos residuos que puedan disminuir la calidad del proceso (Boxin, 2024).

Para el transporte del material, se necesitan dos bandas transportadoras. La primera banda debe estar inclinada, ya que la entrada a la máquina está a 1.8 metros de altura. Esta banda posee gradas durante su recorrido para facilitar el transporte de las botellas. La segunda banda está situada en la parte final de la máquina, la cual proporciona el transporte a la siguiente estación (Mooge, 2022b). En la Figura 9 se observa la banda transportadora que utiliza la empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd para instalaciones de líneas de reciclaje.

Figura 9: Banda transportadora



Fuente: Empresa Jiangsu Mooge Machine Co., Ltd

6.1. Descripción de la metodología

En esta sección, se explicó el proceso por el cual se determinó la construcción de la máquina desetiquetadora. De primero se realizó una fase de planificación, donde se recabó información pertinente para establecer las dimensiones de la máquina los componentes necesarios y los materiales disponibles en Guatemala. Después se contempló una fase de desarrollo donde se realizó los cálculos necesarios para diseñar el prototipo de la máquina. Por último, se designó una fase de evaluación para determinar los puntos de mejora.

6.1.1. Planificación

Para definir el problema a resolver, se busca determinar el contexto actual del reciclaje de botellas PET en Guatemala. Se realizará una recopilación de información sobre la cantidad de plantas de reciclaje de plástico PET existentes en el país, así como el número de ellas que poseen un proceso de desetiquetado. Con esta información, se podrá realizar una investigación más profunda sobre los componentes de una desetiquetadora. Para ello, se realizarán las siguientes acciones:

1. Investigar qué plantas de reciclaje de la Ciudad de Guatemala utilizan máquinas desetiquetadoras.
2. Visitar la planta de reciclaje Complast para ampliar el conocimiento sobre las plantas de reciclaje y conocer cómo funcionan las máquinas desetiquetadoras para botellas de plástico PET.

3. Investigar el funcionamiento de los siguientes componentes de la máquina desetiquetadora: rotor de cuchillos, estator, rotor con brazos rotativos, bandas para las poleas de tensión, motor eléctrico con su reducción de trenes de engranaje, puertas de mantenimiento con su llave de seguridad y el ajustador de velocidad del rotor.
4. Investigar las dimensiones de una desetiquetadora de acuerdo con el flujo de volumen de botellas que se maneje en la planta de reciclaje donde se encuentre.
5. Investigar cómo es el proceso de desetiquetado y cómo influye el plástico de la etiqueta de las botellas en el proceso de reciclaje PET.
6. Investigar precios de las máquinas desetiquetadoras en el mercado.

6.1.2. Desarrollo

En esta sección, se establece el diseño de la máquina desetiquetadora. En esta etapa se considera que habrá un proceso iterativo, ya que el diseño se tiene que acoplar al flujo de botellas por una cantidad de tiempo. Además, se debe tomar en cuenta el diseño de las máquinas anterior y posterior a la desetiquetadora. Por ejemplo, la máquina anterior (módulo de lavado en caliente) y la máquina posterior (módulo de lavado en frío) impondrán restricciones para el diseño de la desetiquetadora. Para ello, se realizarán las siguientes acciones:

1. Establecer los requerimientos de diseño para la máquina.
2. Establecer dimensiones basadas en las máquinas desetiquetadoras del mercado con un flujo aproximado a 150 kg de botella por hora.
3. Seleccionar materiales de los componentes mecánicos.
4. Diseñar componentes mecánicos.
5. Diseñar el sistema eléctrico.
6. Diseñar el sistema de transmisión de potencia.
7. Diseñar una máquina desetiquetadora con un costo total inferior a Q200,000.
8. Realizar un diseño CAD.

6.1.3. Evaluación

En esta fase, se evaluará el diseño tanto del módulo mecánico como el del módulo de potencia desde el punto de vista de esfuerzos. En esta instancia, se considera encontrar puntos de mejora o afinar algunos aspectos sobre el diseño, pero con pruebas que sustenten los cambios por hacer. En la evaluación es donde se realizan distintas iteraciones para examinar la máquina en distintas circunstancias de carga. Para ello, se realizarán las siguientes acciones:

1. Evaluación de resistencia de componentes haciendo uso de cálculos de esfuerzos y simulaciones en ANSYS.
2. Iterar el diseño, si es necesario, para encontrar los puntos de mejora.
3. Al obtener el diseño final, se tabulan los resultados en el trabajo escrito.

Este proyecto tiene como objetivo ser parte de una planta de reciclaje que se construirá con el fin de reducir el plástico PET. Por lo tanto, se cotizan los aspectos considerados para entregar un presupuesto de la máquina desetiqtadora.

1. Analizar posible compra de componentes mecánicos con distintos proveedores.
2. Analizar posible manufactura de distintos componentes mecánicos.
3. Definir si es mejor manufacturar el componente o comprarlo con su proveedor autorizado basado en las cotizaciones anteriores.
4. Realizar un presupuesto con base en las cotizaciones y compararlo con máquinas desetiqtadoras en el mercado.
5. Presentar diseño CAD final de la desetiqtadora.
6. Desarrollar los manuales de fabricación, uso y mantenimiento.

6.2. Requisitos

Para el desarrollo de una máquina, es fundamental recopilar los requisitos pertinentes en diversos ámbitos que abarcan su diseño y funcionamiento. En el caso de la máquina desetiqtadora, se han identificado requisitos en las áreas de diseño, seguridad, costos, potencia, usabilidad, funcionamiento e interfaz entre módulos. En el Cuadro 6 se presenta la designación de un código específico para cada uno de estos campos, lo que facilita su identificación y seguimiento a lo largo del proceso del diseño.

Cuadro 6: Designación de códigos

Designación	Significado
MD	Máquina desetiqtadora
S	Requisito de seguridad
F	Requisito de funcionamiento
C	Requisito de costos
P	Requisito de potencia
IM	Requisito de interfase entre módulos
D	Requisito de diseño
U	Requisito de usuario

En el Cuadro 7 se muestran los requisitos para el diseño de la máquina desetiqtadora.

Cuadro 7: Requisitos de la máquina desetiquetadora

Código	Requisito
MD-D01	La longitud de la máquina debe estar entre 2.2 metros a 3 metros.
MD-D02	El ancho de la máquina debe estar entre 0.5 metros a 1 metro.
MD-D03	La altura de la máquina está entre 1.2 metros a 3 metros.
MD-D04	La máquina desetiquetadora maneja como mínimo de 150 kg/h.
MD-D05	Las cuchillas deben ser intercambiables.
MD-C01	El costo de la máquina no excederá de Q200,000.00.
MD-U01	El usuario debe utilizar el equipo de protección personal especificado en el manual de uso de la máquina.
MD-S01	La máquina será accionada por un panel de control.
MD-S02	El rotor de cuchillas está cubierto por puertas.

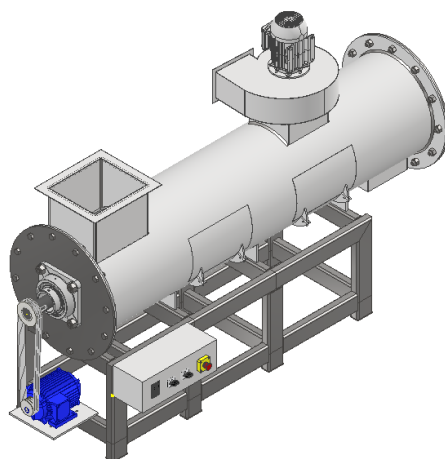
Fuente: Elaboración propia

6.3. Diseño de componentes

Para el diseño de la máquina desetiquetadora, se investigó distintas desetiquetadoras en el mercado y se logró determinar las características y componentes base para el diseño de la máquina. Para iniciar el diseño, se estableció las dimensiones de la máquina, las cuales son directamente proporcionales con el flujo de 150 kg/h. Las dimensiones de la máquina son 1.6 metros de altura, 0.7 metros de ancho y 2.6 metros de largo. Se consideró que el espacio disponible para la desetiquetadora contiene las siguientes dimensiones: 2.5 metros de altura, 1.5 metros de ancho y 3 metros de largo.

Los componentes que están incluidos en el ensamble de la desetiquetadora son los siguientes: motor eléctrico para el rotor de cuchillas, motor eléctrico para el ventilador, ventilador, poleas, bandas, tolva de entrada, tolva de salida, tolva para ventilador, chumaceras, rotor de cuchillas, cuña y pernos.

Figura 10: Máquina desetiquetadora

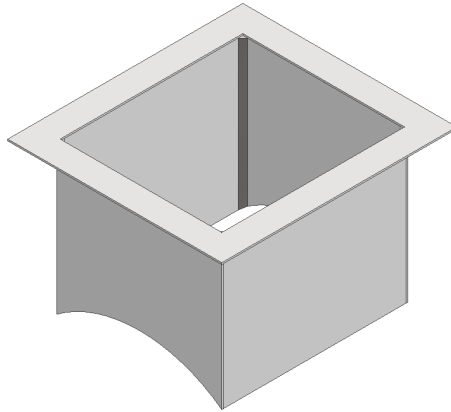


Captura de pantalla de Autodesk
reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

6.3.1. Tolva de entrada

La tolva de entrada se considera el medio por el cual las botellas ingresan a la máquina. Esta tolva fue diseñada en función de proveer una capacidad de entrada de 150 kg/h y para garantizar la seguridad de los operadores.

Figura 11: Tolva de entrada

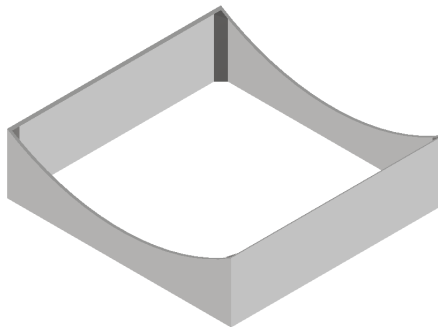


Captura de pantalla de Autodesk reimprimada por cortesía de Autodesk, Inc.

6.3.2. Tolva de salida

La tolva de salida se diseñó considerando la gravedad. La tolva de salida se ubicó en la parte inferior de la carcasa, por lo tanto, se aprovechó la gravedad para que las botellas caigan directamente a una banda transportadora. Además, se aprovechó este diseño debido a que el objetivo es tener la menor cantidad de fuerzas provocadas por el peso de los componentes en el eje de la máquina. Por lo tanto, se evitó colocar paletas que conduzcan a la botellas a una tolva de salida lateral de la carcasa.

Figura 12: Tolva de salida

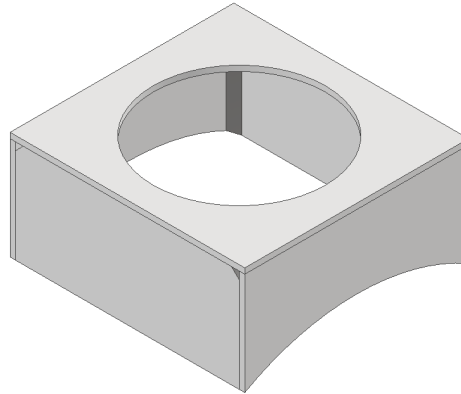


Captura de pantalla de Autodesk reimprimada por cortesía de Autodesk, Inc.

6.3.3. Tolva del ventilador

La tolva del ventilador se diseño con el objetivo de que soporte el peso del ventilador. El ventilador tiene un ducto por el cual entrarán las etiquetas. Por lo tanto, se consideró una apertura del diámetro correspondiente al del ventilador para la tolva del ventilador.

Figura 13: Tolva del ventilador

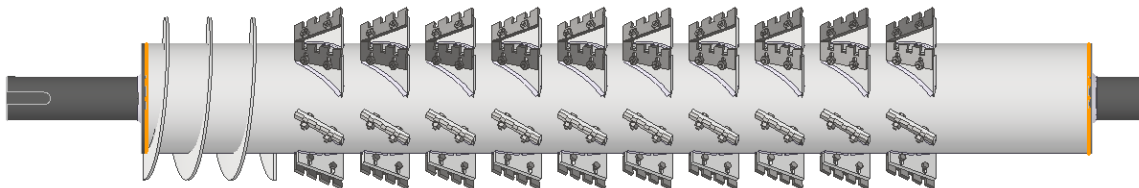


Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

6.3.4. Rotor de cuchillas

El rotor de cuchillas es el componente principal de la máquina, ya que este es el encargado de desgarrar las etiquetas de las botellas. El diseño de este componente toma en consideración un eje, un tambor, una hélice helicoidal, 60 soportes de cuchilla y 60 cuchillas.

Figura 14: Rotor de cuchillas



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

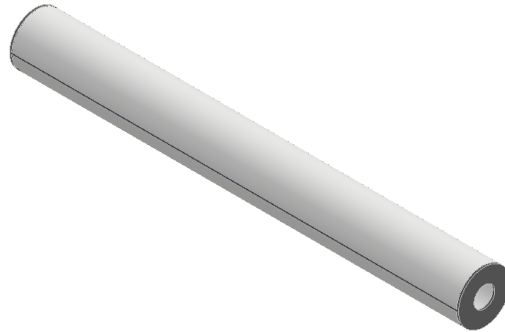
Eje

El eje es el componente crucial en la máquina debido a que este debe soportar el peso y momentos generados por los componentes sobre el y fuerzas a las que estará sometido. Según el proveedor Fangtai, el eje debe considerar una longitud de 2.6 metros. Para la fabricación del eje, se considera acero AISI 1018 gracias a su facilidad de maquinado, su resistencia mecánica y la disponibilidad en el mercado guatemalteco.

Tambor

En el diseño del tambor se optó utilizar láminas de acero A36 para su fabricación. Estas estarían sometidas a un rolado y se soldaría para crear la geometría cilíndrica que requiere el tambor. Además, el cilindro tiene dos discos a sus extremos, los cuales proveen el soporte y la unión entre el eje y el tambor.

Figura 15: Tambor

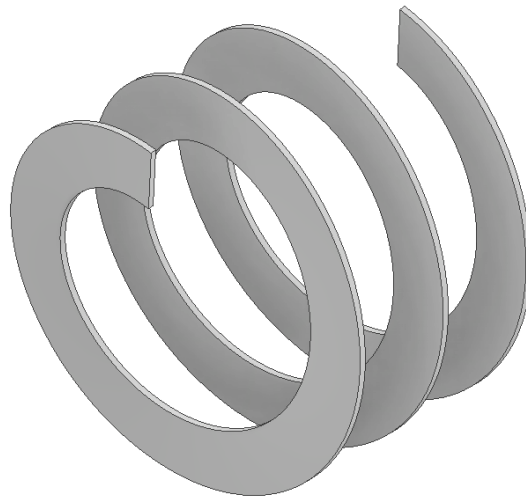


Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Hélice helicoidal

Para el diseño de la hélice helicoidal, se consideró la capacidad de la máquina a la que opera. Este dato es crucial, debido a que esto puede influir en las dimensiones del diámetro del tambor, diámetro de exterior de la hélice y el paso de la hélice (Zareiforoush et al., 2010).

Figura 16: Hélice helicoidal

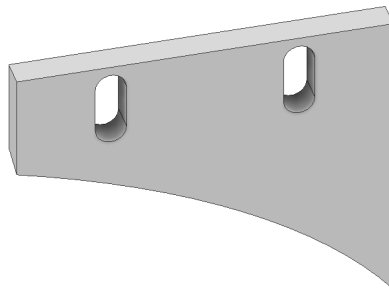


Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Soporte de cuchilla

En el diseño de los soportes de cuchillas, se realizó distintas iteraciones para encontrar sus dimensiones. Los soportes de cuchillas están posicionados a un ángulo de 30° , esto es debido a que a un ángulo grande, entre 60° a 90° , disminuye la durabilidad de la cuchilla, por lo que se recomienda que el soporte de la cuchilla este entre 30° a 40° para prolongar la vida útil de la cuchilla (Erazo, 2015). El material del cual serán fabricados los soportes es acero A36.

Figura 17: Soporte de cuchilla

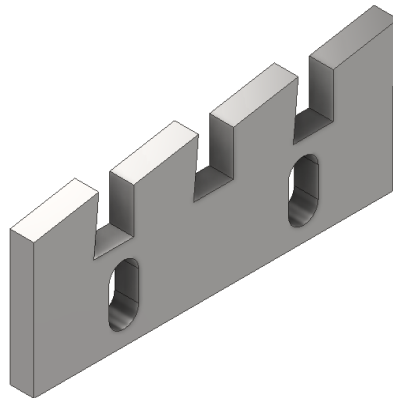


Captura de pantalla de Autodesk
reimpresas por cortesía de Autodesk,
Inc.

Cuchillas

Para el diseño de las cuchillas se realizó un proceso iterativo para encontrar las dimensiones de estas. El proceso tomó en consideración el espacio entre las cuchillas móviles y las cuchillas fijas para el paso de las botellas. Las cuchillas serán fabricadas con acero D2. Se tomó la decisión de este material debido a su disponibilidad en Guatemala y por su aplicaciones de corte en la industria.

Figura 18: Cuchilla

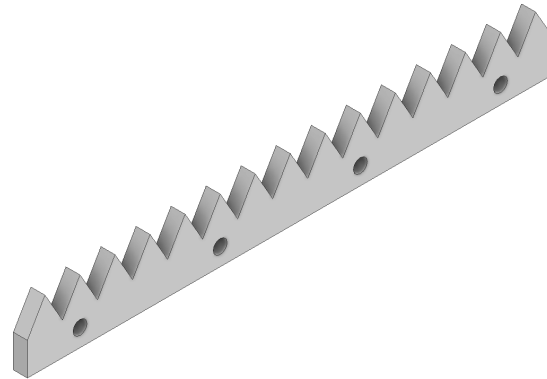


Captura de pantalla de Autodesk
reimpresas por cortesía de Autodesk,
Inc.

6.3.5. Cuchillas fijas

Para el diseño de las cuchillas fijas se realizó un procedimiento iterativo al igual que en las cuchillas del rotor para encontrar las dimensiones. Estas cuchillas estarán fabricadas con acero D2. Las cuchillas fijas se encuentran perñadas a un soporte que está soldado a la carcasa.

Figura 19: Cuchilla fija

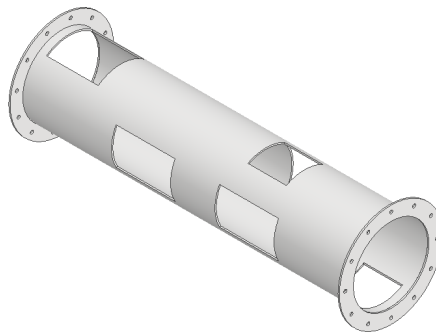


Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

6.3.6. Carcasa

En el diseño de la carcasa se optó por utilizar láminas de acero A36 para su fabricación. Estas estarían sometidas a un rolado y se soldaría para crear la geometría cilíndrica que requiere la carcasa.

Figura 20: Carcasa



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

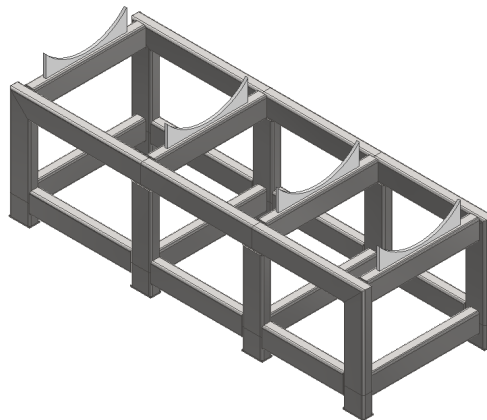
6.3.7. Rodamientos

Para el diseño de una máquina desetiquetadora, se debe considerar la selección de cojinetes como un paso fundamental. Por la aplicación de la desetiquetadora los cojinetes están sometidos a cargas radiales, por lo tanto se utilizan rodamiento de bolas o rodamiento de rodillos cilíndricos.

6.3.8. Estructura base

El diseño de la estructura de la base es importante debido a que la desetiquetadora estará colocada sobre ella, lo cual quiere decir que tiene que soportar el peso de toda la máquina. Es crucial que el factor de seguridad de la estructura sea mayor a 1.9 para garantizar que se cumplió el requisito. Para el diseño se utilizó tubo estructural rectangular de 4"x 2" con chapa de 3/16".

Figura 21: Estructura base



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

6.4. Cálculos

6.4.1. Factor de seguridad

Para el diseño de los componentes de la máquina, es fundamental determinar un factor de seguridad mínimo que debe cumplirse. El diseño de la máquina desetiquetadora forma parte de una línea de reciclaje de botellas de plástico PET de 600 mililitros. En este proyecto, se ha designado a un ingeniero en sistemas responsable de establecer el factor de seguridad mínimo necesario para el funcionamiento de la maquinaria en el proceso operativo. El ingeniero determinó que dicho factor debe ser mayor o igual a 1.9. Para la realización de este cálculo, se basó en el criterio de Ullman, el cual considera cinco puntos clave: las propiedades del material utilizado, los esfuerzos involucrados, la geometría de las piezas, el análisis de fallas

y la confiabilidad de la máquina. El ingeniero en sistemas estableció el factor de seguridad utilizando la siguiente fórmula:

$$n = n_{\text{material}} \times n_{\text{esfuerzo}} \times n_{\text{geometría}} \times n_{\text{análisis de fallas}} \times n_{\text{confiabilidad}}$$

Donde:

n_{material} : Factor de seguridad del material

n_{esfuerzo} : Factor de seguridad del esfuerzo

$n_{\text{geometría}}$: Factor de seguridad de la geometría

$n_{\text{análisis de fallas}}$: Factor de seguridad de la teoría de fallo

$n_{\text{confiabilidad}}$: Factor de seguridad de confiabilidad

Se consideró los siguientes valores en el Cuadro 8 y se obtiene el factor de seguridad de la maquinaria para la línea de reciclaje.

Cuadro 8: Factores de seguridad

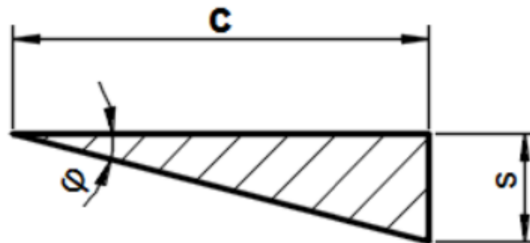
Factores de seguridad	Valor
n_material	1.1
n_esfuerzo	1.2
n_geometría	1.0
n_análisis de fallas	1.2
n_confiabilidad	1.2
n	1.9

Fuente: Ingeniero en sistemas del proyecto

6.4.2. Fuerza requerida por las cuchillas

Las cuchillas tendrían una acción de corte equivalente a cizallar la etiqueta. Por consiguiente, la fuerza de corte se debe encontrar estableciendo una sección triangular de corte en la etiqueta. Esta sección tendría un ángulo de inclinación de la cuchilla (Gutiérrez et al., 2015). En la Figura 22 se observa la sección cizallada triangular de la etiqueta.

Figura 22: Sección cizallada triangular



Fuente: Gutiérrez et al., 2015

Utilizando la ecuación de resistencia al corte

$$\tau_B = \frac{F_c}{A} \quad (1)$$

Se despeja la fuerza de corte

$$F_c = \tau_B * A_s \quad (2)$$

El área de la sección triangular cortada se puede definir como:

$$A_{\Delta} = \frac{c * s}{2} \quad (3)$$

Se debe encontrar el ángulo de inclinación

$$tg(\varphi) = \frac{s}{c} \quad (4)$$

Se despeja para c

$$c = \frac{s}{tg(\varphi)} \quad (5)$$

Se sustituye en la ecuación

$$A_{\Delta} = A_s = \frac{s^2}{2 * tg(\varphi)} \quad (6)$$

Se sustituye A_s en la ecuación de fuerza de corte

$$F_c = \frac{\tau_B * s^2}{2 * tg(\varphi)} \quad (7)$$

Donde:

F_c : Fuerza de corte

τ_B : Resistencia a la cizalladura

s : Espesor de la etiqueta a cortar

φ : Ángulo de inclinación de la cuchilla

Se recomienda que el ángulo de inclinación sea entre 1.5° a 10° (Gutiérrez et al., 2015).

Dado los valores:

$$\tau_B = 3 \text{ MPa}$$

$$s = 0.07 \text{ mm}$$

$$\varphi = 10^\circ$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula:

$$F_c = \frac{3 \text{ MPa} * (0.07 \text{ mm})^2}{2 * \tan(10^\circ)}$$

Se obtiene el valor de la fuerza de corte:

$$F_c \approx 0.0417 \text{ N}$$

Al realizar la sustitución de valores, mientras el ángulo de inclinación aumenta, la fuerza de corte disminuye (Gutiérrez et al., 2015). El diseño de los soportes de cuchillas, hace que la cuchilla sea intercambiable y que se pueda posicionar la cuchilla en cierta altura y ángulo para realizar el corte.

6.4.3. Potencia requerida

Para el cálculo de la potencia requerida, se debe considerar los componentes que están en el eje de rotación, el torque generado por la fricción y la fuerza requerida para cortar las etiquetas.

A continuación, se calcula potencia necesaria para fuerza de corte de las cuchillas.

$$P_{\text{corte}} = F_c V \quad (8)$$

Donde:

P_{corte} : Potencia de corte para una cuchilla

F_c : Fuerza de corte

V : Velocidad tangencial

Para encontrar la velocidad tangencial se considera las revoluciones por minuto a las que estará girando el rotor. Según el proveedor Fangtai, las revoluciones por minuto de las máquinas desetiquetadoras con un flujo entre 100 a 200 kg/h son 400 rpm (Fangtai, s.f.).

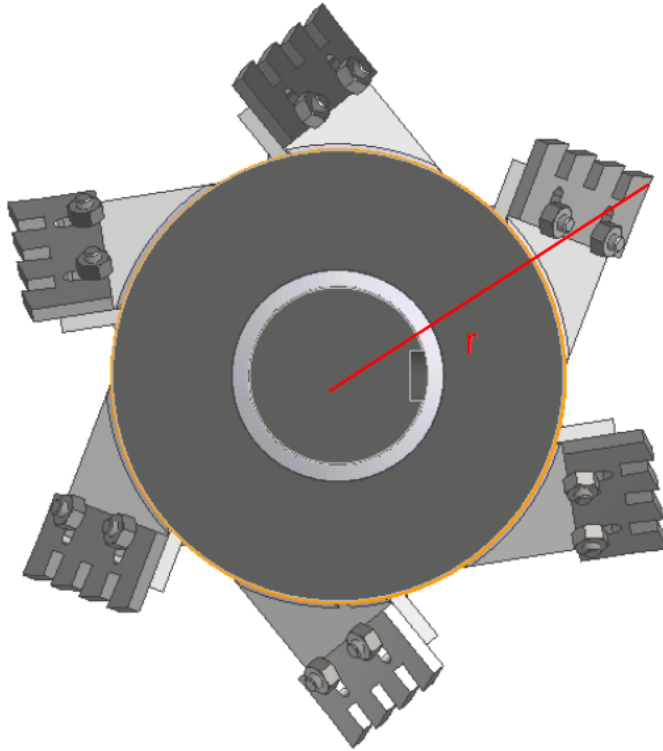
Se determina la velocidad angular.

$$\omega = \frac{2\pi * n}{60} \quad (9)$$

$$\omega = 41.89 \text{ rad/s}$$

Se determina la velocidad tangencial. Para este cálculo se considera el radio de corte al cual estará la fuerza.

Figura 23: Radio de corte de las cuchillas del rotor



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

El radio de corte es 0.20 metros.

$$V = \omega * r \quad (10)$$

$$V = 8.53m/s$$

Se sustituye valores para P_{corte} .

$$P_{\text{corte}} = 0.36W$$

A continuación, se encuentra la potencia de corte para el número de cuchillas situadas en el rotor, el cual posee 60 cuchillas.

$$P_{\text{corte, total}} = \text{Número de cuchillas} \times (P_{\text{corte}}) \quad (11)$$

$$P_{\text{corte, total}} = 21W$$

Para establecer la potencia necesaria para hacer girar el rotor de cuchillas, se considera el momento de inercia del rotor de cuchillas, la velocidad angular y el tiempo al cual se alcanza la velocidad angular considerada. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_{\text{aceleración}} = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \frac{I_{\text{rotor}} \omega^2}{t} \quad (12)$$

Donde:

E_k : Energía cinética de rotación de un cuerpo rígido

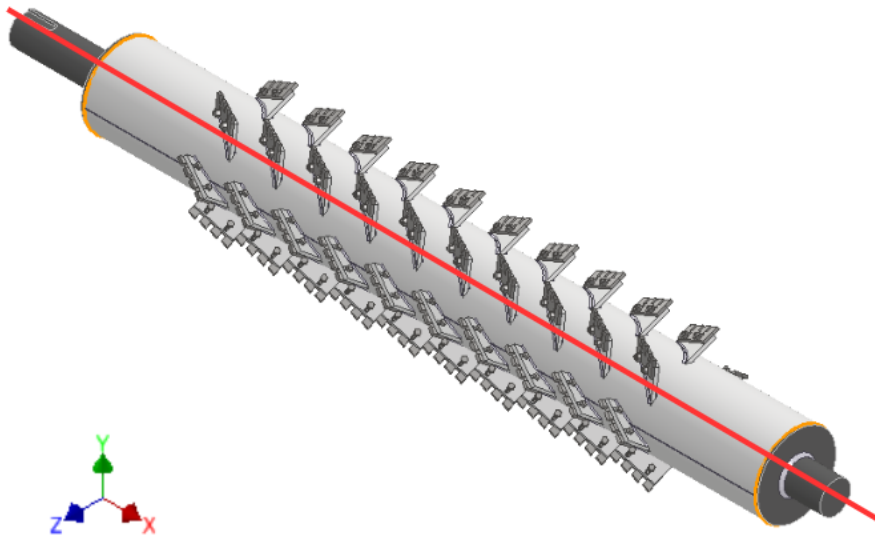
t : Tiempo

I_{rotor} : Momento de inercia del rotor

ω : Velocidad angular

Para determinar el momento de inercia del rotor se utilizó el software Autodesk Inventor[®]. Este programa calcula los momentos de un ensamble directamente a través de los ejes principales, considerando el material asignado a los componentes. Por lo tanto, se tomó el valor de momento de inercia respecto al eje en el cual estaría girando la pieza. Para obtener un momento de inercia realista, se ingresó las propiedades de los materiales considerados para los componentes del rotor.

Figura 24: Eje X del rotor



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

$$I_{\text{rotor}} = 114.36 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Se establece un tiempo de 30 segundos para que el motor alcance la velocidad angular requerida.

$$P_{\text{aceleración}} = \frac{1}{2} \frac{(114.36 \text{kg} * m^2)(41.89 \text{rad/s})^2}{30 \text{s}} \quad (13)$$

$$P_{\text{aceleración}} = 3.34 \text{kW}$$

A continuación se calcula la potencia para mantener la velocidad angular constante. Esta fórmula toma en cuenta la velocidad angular y el momento de fricción. El proveedor JTEKT brinda la ecuación para calcular el momento de fricción, considerando los diferentes coeficientes de fricción entre los distintos tipos de rodamientos (JTEKT, [s.f.](#)).

$$M = \mu R \frac{d}{2} \quad (14)$$

Donde:

M : Momento de fricción

R : Carga radial situada en el cojinete.

μ : Coeficiente de fricción

d : Diámetro del eje

El coeficiente de fricción es dado por JTEKT. El coeficiente de fricción se seleccionó en función al tipo de cojinete que está considerado en el diseño. Debido a la aplicación de la máquina desetiquetadora, se utilizan rodamientos de bolas, ya que están expuestos a cargas radiales mayores (JTEKT, [s.f.](#)).

$$\mu = 0.001 - 0.0015$$

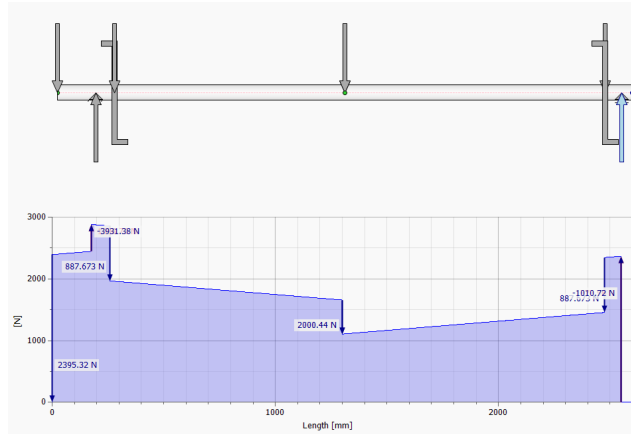
$$\mu = 0.0013$$

La carga radial situada en la posición del cojinete se obtuvo por medio del software Autodesk Inventor [®]. En la Figura [25](#) se observa la fuerza que tiene el eje en la sección donde se sitúa la chumacera.

$$R = 2,840.26 \text{N}$$

El diámetro del eje es 70 mm.

Figura 25: Diagrama de fuerzas



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Se sustituyen valores.

$$M = (0.0013)(2,840.26N) \frac{(70mm)}{2} = 0.13Nm$$

Para encontrar la potencia requerida para mantener la velocidad angular se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{\text{mantenimiento}} = M\omega \quad (15)$$

$$P_{\text{mantenimiento}} = (0.13Nm)(41.89rad/s) = 0.01kW$$

Se realiza la sumatoria de potencias para encontrar la potencia total requerida.

$$P_{\text{total}} = P_{\text{corte, total}} + P_{\text{aceleración}} + P_{\text{mantenimiento}} \quad (16)$$

$$P_{\text{total}} = 3.37kW$$

Se obtiene que la potencia del motor mínima es 3.37 kW. Los motores eléctricos tienen una eficiencia, dado a que contienen pérdidas internas de energía durante su conversión de energía eléctrica a mecánica. Por lo tanto, se considera que la eficiencia de un motor es mayor a 75 % (NIVIHE, [S.F.](#)). Por lo tanto se considero una eficiencia del 80 % para el motor eléctrico. Considerando este factor se recalcula la potencia requerida.

$$P_{\text{total}} = 4.21kW$$

Se concluye que la potencia mínima tomando en cuenta la eficiencia del motor es 4.21 kW. Dentro de los motores eléctricos existen potencias estándares, las cuales no presentan un motor de 4.21 kW. El motor que cumple con los requerimientos de potencia más cercano es de 5.5 kW (7.5 HP). Por ende, se selecciona un motor de 5.5 kW en función al diseño de la máquina. Se selecciona un motor de 7.5 HP 208v trifásico de la empresa WEG.

Variador de frecuencia

Para seleccionar el variador de frecuencia apropiado para esta máquina, se toma de referencia el motor con el que operará. Dado la potencia del motor es de 7.5 HP, se busca un variador de frecuencia que tenga la capacidad de trabajar con esta potencia o superior. Además, el variador de frecuencia debe ser compatible con la potencia requerida del motor, el cual opera con una corriente de voltaje de 200-240 voltios en fase trifásica. La integración del variador de frecuencia en el diseño de esta máquina es ajustar el tiempo que se utiliza para que el motor llegue a su velocidad angular establecida. Por medio del proveedor guatemalteco KetPlus, se ha seleccionado un variador de frecuencia de la empresa Powtran. Powtran provee el modelo PI500-5R5G2, el cual es de 10 HP 208 V 3 ph. El variador de frecuencia tiene un sobredimensionamiento, el cual cumple con los requisitos del motor 7.5 HP 208v trifásico para un funcionamiento adecuado.

6.4.4. Guarda motor y flipón principal

La función principal del guarda motor es monitorear de manera continua la corriente que fluye a través del motor y detectar cualquier pico en los niveles de corriente. En el caso de que se identifiquen sobrecargas o condiciones de sobrecalentamiento, el guarda motor actúa de manera automática desconectando el suministro de energía al motor, protegiendo así los componentes eléctricos de posibles daños. Este mecanismo de protección es esencial para prevenir accidentes que podrían comprometer la seguridad del equipo y de los operadores, garantizando que el proceso operativo se mantenga seguro, prolongando la vida útil del motor y reduciendo la probabilidad de un mantenimiento correctivo no planeado,

$$I = I_{\text{nom}} \times F.S \times F.C \quad (17)$$

Donde:

I : Corriente

I_{nom} : Corriente nominal del motor

$F.S$: Factor de servicio

$F.C$: Factor de sobrecarga

La corriente nominal del motor es de 23.0/11.5 A. El factor de servicio es de 1.25, mientras que el factor de sobrecarga también se considera 1.25. Este valor se aplica dado que, para motores con un factor de servicio de 1.15 o mayor, se utiliza dicho factor para asegurar un

margen adecuado de operación y protección contra sobrecargas.

$$I = (23A)(1.25)(1.25) = 36A$$

Por lo tanto, se requiere un guarda motor que sea mayor a 36 A. La empresa KetPlus brinda un guarda motor de NS2-80 37-50A A y un flipón principal de NM1-125S-050A A.

6.4.5. Poleas

Para la selección de las poleas y las fajas, se utilizó el catálogo V-Belt Design Manual de la empresa Bando. Este catálogo divide en una serie de pasos como seleccionar la faja y las poleas en función de la potencia entregada por el motor y las revoluciones por minuto a las que trabaja (Bando, 2018). La potencia que entrega el motor eléctrico es 5.5 kW (7.5 HP) con una velocidad de 880 rpm y se reduce a 400 rpm.

El primer paso es calcular la potencia de diseño.

$$\text{Potencia de diseño HP} = \text{Transmisión HP} \times \text{Factor de servicio} \quad (18)$$

La potencia de transmisión es la potencia del motor, la cual es 7.5 HP. El factor de servicio se considero para una operación de 8 a 10 horas diarias, para maquinaria industrial. Al considerar las condiciones de trabajo a las que estaría expuesta la máquina, se obtiene un factor de servicio de 1.3 (Bando, 2018). En la Figura 26 se observa los factores de servicio típicos a los que las poleas estarían en operación en función de la maquinaria y las horas de operación.

Figura 26: Factores de servicio típicos

POWER ACE AND POWER KING TYPICAL SERVICE FACTORS						
DriveN Machine	DriveR					
	Intermittent Service 3-5 Hours Daily or Seasonal	Normal Service 8-10 Hours Daily	Continuous Service 16-24 Hours Daily	Intermittent Service 3-5 Hours Daily or Seasonal	Normal Service 8-10 Hours Daily	Continuous Service 16-24 Hours Daily
The machines listed below are representative samples only. Select the group listed below whose load characteristics most closely approximate those of the machine being considered.	AC Motors: Normal Torque, Squirrel Cage, Synchronous, Split Phase DC Motors: Shunt Wound Engines: Multiple Cylinder Internal Combustion			AC Motors: High Torque, High Slip, Repulsion-Induction, Single Phase, Series Wound, Slip Ring DC Motors: Series Wound, Compound Wound Engines: Single Cylinder Internal Combustion Line Shafts: Clutches		
Agitators for Liquids Blowers and Exhausters Centrifugal Pumps & Compressors Fans Up to 10 Horsepower Light Duty Conveyors	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Belt Conveyors for Sand, Grain, Etc. Dough Mixers Fans-Over 10 Horsepower Generators Line Shafts Laundry Machinery Machine Tools Punches-Presses-Shears Printing Machinery Positive Displacement Rotary Pumps Revolving and Vibrating Screens	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Brick Machinery Bucket Elevators Exciters Piston Compressors Pulverizers Saw Mill and Woodworking Machinery Textile Machinery Conveyors (Drag-Pan-Screw)	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6

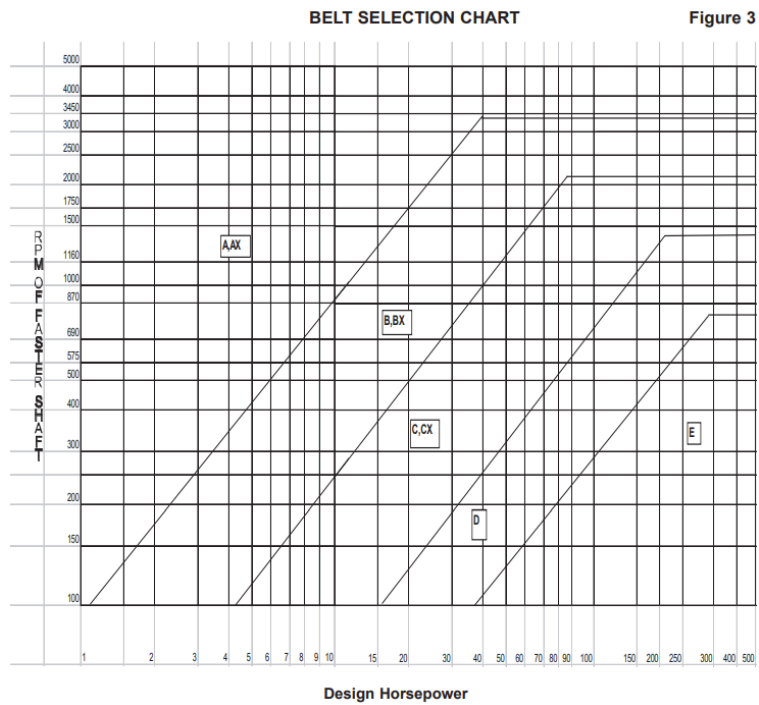
Fuente: (Bando, 2018)

$$\text{Potencia de diseño HP} = (7.5HP)(1.3)$$

$$\text{Potencia de diseño HP} = 9.75HP$$

El segundo paso es seleccionar el tipo de faja a utilizar. Para este paso se utiliza la Figura 27, donde se presenta la gráfica proporcionada por el proveedor, la cual utiliza la potencia del diseñador y las revoluciones por minuto a la que trabaja el motor.

Figura 27: Gráfica para seleccionar tipo de faja



Fuente: (Bando, 2018)

La gráfica indica que se puede utilizar las fajas A y AX. Se selecciona la banda A.

El tercer paso es calcular la relación de velocidades.

$$\text{Relación de velocidades} = \frac{\text{Velocidad alta}}{\text{Velocidad baja}} \quad (19)$$

$$\text{Relación de velocidades} = \frac{880 \text{ rpm}}{400 \text{ rpm}}$$

$$\text{Relación de velocidades} = 2.2$$

El cuarto paso es determinar la combinación de los diámetros externos de las poleas. Esto se realiza con el fin de tener una relación equivalente a la relación de velocidades.

Se seleccionó un diámetro externo de 4.2 pulgadas y 9 pulgadas para la polea pequeña y la polea grande, respectivamente.

$$\text{Relación de velocidades} = \frac{\text{Diámetro externo de polea grande, } D}{\text{Diámetro externo de polea pequeña, } d} \quad (20)$$

$$\text{Relación de velocidades} = \frac{9 \text{ in}}{4.2 \text{ in}}$$

$$\text{Relación de velocidades} = 2.14$$

El quinto paso es seleccionar el tamaño de la faja.

$$\text{Tamaño de la faja} = 2C + 1.57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4C} \quad (21)$$

Donde:

C : Distancia entre centros

D : Diámetro externo de polea grande

d : Diámetro externo de polea pequeña

Dado los valores

$$C = 22in$$

$$\text{Tamaño de la faja} = 65in$$

El proveedor BANDO recomienda que seleccionar la faja más cercana disponible. En este caso se considera un tamaño de faja de 68 pulgadas.

El sexto paso es calcular la capacidad de transmisión de potencia.

$$\text{Transmisión estándar} = \text{Clasificación Base de HP} + \text{Suma del Factor de Relación de Velocidad} \quad (22)$$

Tanto la clasificación base de HP como la suma del factor de relación de velocidad son encontrados por medio de las revoluciones por minuto del motor y el diámetro externo de polea pequeña (Bando, 2018).

Se encuentran los valores.

Clasificación Base de HP = 2.24HP

Suma del Factor de Relación de Velocidad = 0.2HP

Se sustiyeen valores.

Transmisión estándar = 2.44HP

El séptimo paso es determinar el coeficiente de contacto de arco.

$$\text{Coeficiente de arco de contacto} = \frac{D - d}{C} \quad (23)$$

Coeficiente de arco de contacto = 0.2

Con el coeficiente de arco de contacto, se determina el factor de corrección necesario.

Factor de corrección Coeficiente de arco de contacto = 0.97

El octavo paso es establecer el número de fajas requeridas para la aplicación.

$$\text{Número de fajas} = \frac{P_d}{T_s \times C_a \times C_l} \quad (24)$$

Donde:

P_d : Potencia de diseño,

T_s : Transmisión estándar,

C_a : Factor de corrección del coeficiente de arco de contacto,

C_l : Factor de corrección del coeficiente de la longitud de las fajas.

Se selecciona la faja A-68, la cual tiene un factor de corrección del coeficiente de la longitud de las fajas de 1.

Sustituyendo los valores en la ecuación anteriormente calculados

Número de fajas = 4

Se ha determinado que, para el sistema de transmisión de potencia, se emplearán cuatro fajas A68 en combinación con una polea de 4 ranuras. El proveedor INCAPROSA suministra fajas tipo A y B compatibles con las poleas requeridas. Por su parte, el proveedor B&B

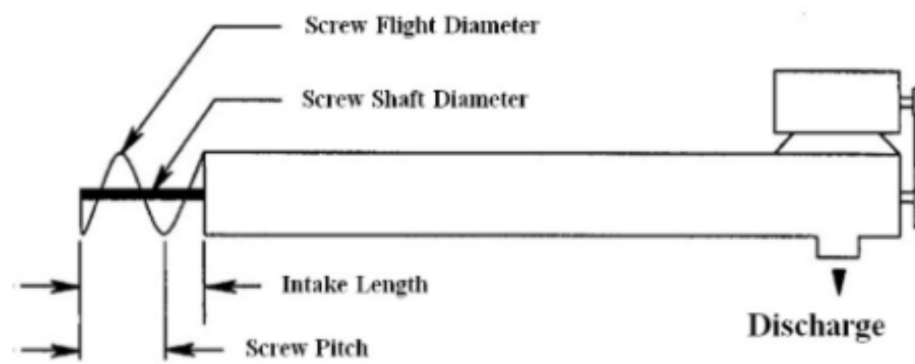
Manufacturing® ofrece poleas con fajas tipo V. De acuerdo con los diámetros especificados para ambas poleas, se han seleccionado los modelos 4B38SD y 4B86SK, con diámetros de 4.2 y 9 pulgadas, respectivamente.

6.4.6. Rotor de cuchillas

Transportador helicoidal

Para validar el flujo de 150 kg/h de la máquina desetiquetadora se toma como referencia la hélice que funciona como transportador helicoidal.

Figura 28: Diagrama esquemático de un transportador de tornillo



Fuente: Zareiforoush et al., [2010](#).

Para realizar el cálculo de la capacidad teórica de la máquina se utiliza la siguiente fórmula:

$$Q_t = \frac{\pi}{4} (d_{sf}^2 - d_{ss}^2) * l_p * n \quad (25)$$

Donde:

Q_t : Capacidad volumétrica teórica, $\frac{m^3}{s}$

d_{sf} : Diámetro de la hélice, m

d_{ss} : Diámetro del rotor, m

l_p : Paso, m

n : rps

$$Q_t = \frac{\pi}{4} (0.31^2 - 0.25^2) * (0.10) * 6.67$$

$$Q_t = 0.02 \frac{m^3}{s}$$

Los transportadores helicoidales se utilizan para trasegar materiales a granel (Bega, s.f.). Según KWS Manufacturing Company, el transportador puede estar a 15 %, 30 % y 45 % de su capacidad, debido a las características del material. La recomendación es influida por medio de la densidad, abrasividad y fluidez de un material (KWS, s.f.). La capacidad real de un transportador disminuye considerablemente a la capacidad teórica, lo que conlleva a una pérdida de eficiencia volumétrica (Zareiforoush et al., 2010).

$$\eta_v = \frac{Q_a}{Q_t} \quad (26)$$

$$Q_a = \eta_v * Q_t \quad (27)$$

Se asume un 15 % de eficiencia debido a que el transportador manejaría botellas, las cuales serían tratadas como un material granular.

$$Q_a = 15 \% * 0.02 \frac{m^3}{s} = 0.0026 \frac{m^3}{s}$$

Se asume que las botellas ingresarán sin daños y abolladuras. Las botellas genéricas de 600 ml, tienen una altura de 239 mm, un ancho de 64 mm y un peso de 18.8 gramos (REMSA, s.f.). Por lo tanto, se calcula el volumen de la botella, para saber la capacidad en términos de botellas por segundo que maneja la máquina. Se asume que la botella actúa como un prisma rectangular, por ende se toma que el ancho y el largo tienen medidas equivalentes.

$$\text{Largo} = 64 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho} = 64 \text{ mm}$$

$$\text{Altura} = 239 \text{ mm}$$

$$\text{Volumen de una botella PET genérica de 600 ml} = \text{Largo} * \text{Ancho} * \text{Altura} \quad (28)$$

$$\text{Volumen de una botella PET genérica de 600 ml} = 978944 \frac{\text{mm}^3}{\text{botella}} = 0.001 \frac{\text{m}^3}{\text{botella}}$$

Por medio del volumen por botella y la capacidad real del transportador helicoidal, se puede determinar las botellas por segundo que procesa la máquina.

$$\text{Capacidad real (Botellas por segundo)} = \frac{0.0026 \frac{m^3}{s}}{0.001 \frac{m^3}{\text{botella}}}$$

$$\text{Capacidad real} = 2.70 \text{ Botellas por segundo}$$

$$\text{Capacidad real} \approx 2 \text{ Botellas por segundo}$$

Se determinó que el diseño de la máquina desetiquetadora debía considerar un flujo mínimo de 150 kg/h.

$$\text{Capacidad de diseño (kg/s)} = \text{Flujo mínimo (kg/h)} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$\text{Capacidad de diseño} = 0.042 \text{ kg/s}$$

$$\text{Masa de una botella PET genérica de 600 ml} = 18.80 \text{ g/botella} = 0.019 \text{ kg/botella}$$

$$\text{Capacidad de diseño (Botellas/segundo)} = \frac{\text{Capacidad de diseño (kg/s)}}{\text{Masa de una botella PET genérica de 600 ml}} \quad (29)$$

$$\text{Capacidad de diseño} = 2.22 \text{ Botellas por segundo}$$

$$\text{Capacidad de diseño} \approx 2 \text{ Botellas por segundo}$$

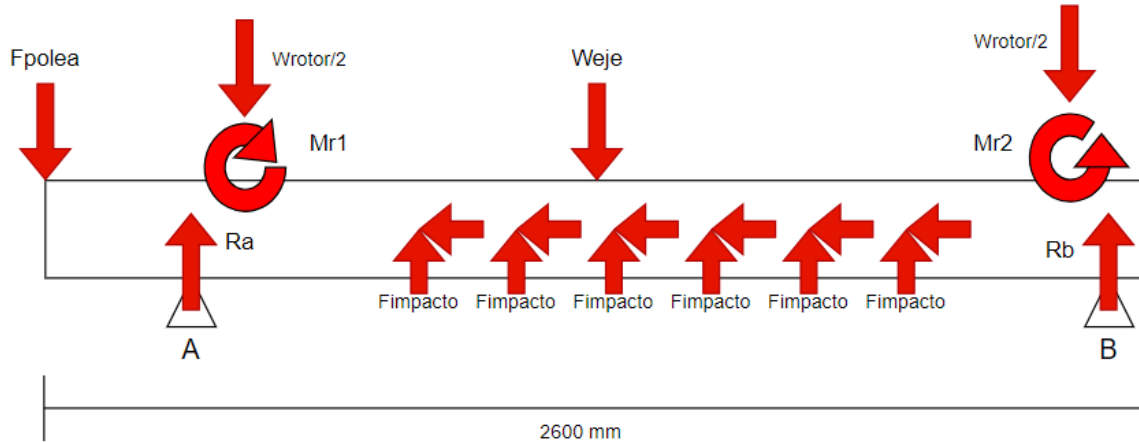
Se concluye que la desetiquetadora tiene la capacidad para manejar un flujo de 150 kg/h.

Diseño de eje central

La desetiquetadora contiene un eje central, el cual es el componente más importante de la máquina. El eje central estará sometido a cargas generadas por los rodamientos, la polea y el tambor que llevará las hélices, los soportes de cuchilla y las cuchillas. Además estará sometido a cargas de impacto por las botellas. El eje tendrá cargas de flexión y torsión.

Diagrama de cuerpo libre

Figura 29: Diagrama de cuerpo libre del eje



Fuente: Elaboración propia

Donde:

F_{polea} : Fuerza ejercida por las poleas

W_{rotor} : Peso de los componentes (tambor, discos, hélice, soportes y cuchillas)

R_a : Reacción en el punto A

R_b : Reacción en el punto B

M_{r1} : Momento resultante por el peso de los componentes (cuchillas, hélice helicoidal y soportes de cuchilla) 1

M_{r2} : Momento resultante por el peso de los componentes (cuchillas, hélice helicoidal y soportes de cuchilla) 2

Fuerzas y momentos

Peso del tambor, discos, hélice, soportes y cuchillas

Para situar la carga del tambor en el eje central, se asume que el peso está distribuido en dos cargas puntuales, ya que el eje central y el tambor están unidos por dos discos soldados a los extremos del tambor. Por lo tanto, el peso total del tambor se divide entre dos. El tambor será fabricado de acero A36, al igual que los soportes de las cuchillas y las hélices. Las cuchillas serán fabricadas de AISI D2. La densidad del acero A36 es $7.8g/cm^3$ y del acero AISI D2 es $7.7g/cm^3$. Se utiliza una gravedad de $9.81 m/s^2$. Las fórmulas para calcular el peso que representa cada componente son las siguientes:

Cuchillas

$$W_{\text{cuchillas}} = V_{\text{cuchilla}} * \rho_{\text{AISI D2}} * g * n \quad (30)$$

Donde:

$W_{\text{cuchillas}}$: Peso de las cuchillas

V_{cuchilla} : Volumen de una cuchilla

$\rho_{\text{AISI D2}}$: Densidad del AISI D2

g : gravedad

n : Número de cuchillas

$$V_{\text{cuchilla}} = 37.16 \text{cm}^3$$

$$n = 60$$

$$W_{\text{cuchillas}} = 168.42 \text{N}$$

Soportes de cuchillas

$$W_{\text{soportes}} = V_{\text{soporte}} * \rho_{\text{AISI 1018}} * g * n \quad (31)$$

Donde:

W_{soportes} : Peso de los soportes de cuchillas

V_{soporte} : Volumen de un soporte

$\rho_{\text{A 36}}$: Densidad del acero A 36

g : gravedad

n : Número de soportes

$$V_{\text{soporte}} = 66.83 \text{cm}^3$$

$$n = 60$$

$$W_{\text{soportes}} = 306.81N$$

Hélice

$$W_{\text{hélice}} = V_{\text{hélice}} * \rho_{A\ 36} * g \quad (32)$$

Donde:

$W_{\text{hélice}}$: Peso de la hélice helicoidal

$V_{\text{hélice}}$: Volumen de una hélice

$\rho_{A\ 36}$: Densidad del acero A 36

g : gravedad

$$V_{\text{hélice}} = 1089.81cm^3$$

$$W_{\text{hélice}} = 83.39N$$

Tambor

$$W_{\text{tambor}} = V_{\text{tambor}} * \rho_{A\ 36} * g \quad (33)$$

Donde:

W_{tambor} : Peso del tambor

V_{tambor} : Volumen del tambor

$\rho_{A\ 36}$: Densidad del acero A 36

g : gravedad

$$V_{\text{tambor}} = 15830.97cm^3$$

$$W_{\text{tambor}} = 1150.78N$$

Discos

$$W_{\text{discos}} = V_{\text{disco}} * \rho_{A\ 36} * g * n \quad (34)$$

Donde:

W_{discos} : Peso de los discos

V_{disco} : Volumen de un disco

$\rho_{A\ 36}$: Densidad del acero A 36

g : Gravedad

n : Número de discos

$$V_{\text{disco}} = 392.75\text{cm}^3$$

$$n = 2$$

$$W_{\text{discos}} = 65.94\text{N}$$

Se realiza una sumatoria de pesos para encontrar el peso total del tambor.

$$W_{\text{rotor}} = W_{\text{cuchillas}} + W_{\text{soportes}} + W_{\text{hélice}} + W_{\text{cilindro}} + W_{\text{discos}} \quad (35)$$

$$W_{\text{rotor}} = 1775.35\text{N}$$

Fuerza de impacto

La fuerza de impacto se genera a causa de la energía suministrada para triturar (Lalama et al.,2016). En el contexto de una máquina desetiquetadora, la función es cortar las etiquetas de las botellas, por lo tanto también se genera una fuerza de impacto al momento de proceder con su función.

Para que existe una rotura o un avance de corte en la etiqueta se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$\delta W \geq \delta U_{el} + \delta U_s \quad (36)$$

Donde:

δW : Trabajo de fuerzas exteriores generada por la energía suministrada.

δU_{el} : Cambio de energía elástica del material.

δU_s : Cambio de energía absorbida por el material en la rotura.

Al basarse en la ecuación anterior, se puede concluir que la rotura del material sucede cuando la energía suministrada por las fuerzas exteriores es mayor o igual a la gastada para la rotura del material. En el proceso de trituración, se considera como despreciable el cambio de energía elástica en comparación al trabajo realizado por las cuchillas porque la rotura es de rápida propagación de la grieta (Ochoa y Mosquera, 2016). En el proceso de desetiquetado, se puede considerar lo mencionado anteriormente, debido a la naturaleza del corte rápido y que el tipo de carga no deforma significativamente la botella o la etiqueta. Por lo tanto, no se acumula energía elástica significativa.

$$\delta W = \delta U_s \quad (37)$$

Para calcular δU_s , está explicado por cómo se forma una nueva superficie cuando ocurre una rotura en el material.

$$\delta U_s = G_c \delta S \quad (38)$$

Donde:

G_c : Energía absorbida por unidad de superficie en J/m²

δS : Diferencial de área superficial de la propagación de la grieta

La energía absorbida es una propiedad del material y el diferencial de área superficial de la propagación de la grieta se puede definir de la siguiente manera:

$$\delta S = 2dc * t \quad (39)$$

Si reemplazamos δW por $F\delta c$, la ecuación sería la siguiente:

$$\delta U_s = G_c * 2dc * t \quad (40)$$

Despejamos para F_i

$$F_{\text{impacto}} = 2G_c t \quad (41)$$

Donde:

F_{impacto} : Fuerza de impacto

t : Espesor de la cuchilla

El valor de G_c se considera entre 0.340 - 55.0 J/cm² (Matweb, 2024). Se utilizó el valor de polipropileno en su grado de película, debido a que las etiquetas están fabricadas con esa

estructura. Este valor se obtiene por medio de la prueba de impacto de Charpy, la cual mide la energía absorbida cuando una muestra estandarizada se rompe bajo un golpe (fracture surfaces from Charpy impact tests, 2024).

Se considera que la energía absorbida por unidad de superficie en J/m^2 es:

$$G_c = 0.002767 \text{ J}/\text{m}^2$$

Con un espesor de cuchilla de 8 mm, la fuerza de impacto es:

$$F_{\text{impacto}} = 0.000044272 \text{ N}$$

La fuerza de impacto aplicada a la cuchilla sucede con un ángulo de 30° , por lo que se descompone la fuerza en su componente axial y radial.

$$F_{\text{radial}} = F_{\text{impacto}} \cdot \cos(\theta)$$

$$F_{\text{axial}} = F_{\text{impacto}} \cdot \sin(\theta)$$

$$F_{\text{radial}} = 0.00003834067668 \text{ N}$$

$$F_{\text{axial}} = 0.000022136 \text{ N}$$

Se coloca la fuerza en las 66 cuchillas del rotor tomando en cuenta que todas las cuchillas están cortando. El objetivo es encontrar la fuerza total del impacto que tiene las etiquetas en las cuchillas y transferirlas al eje.

$$F_{\text{radial,total}} = 0.002530484661 \text{ N}$$

$$F_{\text{axial,total}} = 0.001460976 \text{ N}$$

Se concluye que la fuerza de impacto no es significativa en el análisis del eje.

Peso del eje

Para calcular el peso del eje se presenta la siguiente fórmula:

$$W_{\text{eje}} = V_{\text{eje}} * \rho_{\text{AISI 1018}} * g \tag{42}$$

Donde:

W_{eje} : Peso del eje

V_{eje} : Volumen del eje

$\rho_{\text{AISI 1018}}$: Densidad del AISI 1018

g : gravedad

$$V_{\text{eje}} = 9992.08 \text{ cm}^3$$

$$W_{\text{eje}} = 771.44 \text{ N}$$

Fuerza de polea

Para la velocidad de la correa se utiliza la siguiente ecuación (Bando, 2017):

$$V = \frac{\text{PD (rpm)}}{3.82} = (\text{PD}) (\text{rpm}) (0.262) \quad (43)$$

Donde:

V : velocidad de la correa, pies por minuto

PD: diámetro de paso de la polea

rpm: revoluciones por minuto del mismo tambor o polea

Dado los valores:

$$\text{PD} = 9 \text{ in}$$

$$\text{RPM} = 400 \text{ RPM}$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula para la velocidad de la banda:

$$V = \frac{9 \text{ in} \cdot 400 \text{ RPM}}{3.82}$$

$$V \approx 942 \text{ pies/minuto}$$

Para la tensión en el lado tenso se utiliza la siguiente ecuación (Bando, 2017):

$$T_1 = 41,250 \left(\frac{\text{HP}}{\text{GV}} \right) \quad (44)$$

Donde:

T_1 : tensión en el lado tenso, libras

HP: potencia de diseño, caballos de fuerza

V : velocidad de la correa, pies por minuto

G : factor de corrección del arco de contacto

Dado los valores:

$$HP = 9.75 \text{ HP}$$

$$V = 942 \text{ ft/min}$$

$$G = 0.97$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula para la tensión en el lado tenso (Bando, 2017):

$$T_1 = 41,250 \left(\frac{9.75 \text{ HP}}{0.97 \cdot 942 \text{ ft/min}} \right)$$

$$T_1 \approx 1957 \text{ N}$$

Para la tensión en el lado flojo se utiliza la siguiente ecuación:

$$T_2 = 33,000 (1.25 - G) \left(\frac{\text{HP}}{GV} \right) \quad (45)$$

Donde:

T_2 : tensión en el lado flojo, libras

HP: potencia de diseño, caballos de fuerza

V : velocidad de la correa, pies por minuto

G : factor de corrección del arco de contacto

Dado los valores:

$$HP = 9.75 \text{ HP}$$

$$V = 942 \text{ ft/min}$$

$$G = 0.97$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula para la tensión en el lado flojo:

$$T_2 = 33,000 (1.25 - 0.97) \left(\frac{9.75 \text{ HP}}{0.97 \cdot 942 \text{ ft/min}} \right)$$

$$T_2 \approx 438 \text{ N}$$

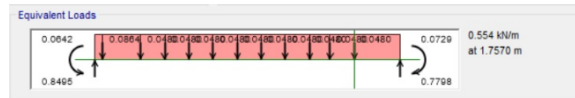
Se realiza la sumatoria de tensiones para obtener la fuerza que realiza la polea sobre el eje.

$$F_{\text{polea}} = T_1 + T_2 = 2395 \text{ N}$$

Momento resultantes

Para analizar los efectos que tienen las fuerzas de los componentes en el tambor en el eje, se utilizó el software ETABS, donde se simuló una viga doblemente empotrada y se distribuyeron las cargas a las distancias correspondientes para encontrar los momentos que se generan en los extremos del tambor.

Figura 30: Cargas equivalentes



Fuente: Imagen del programa ETABS Versión 20

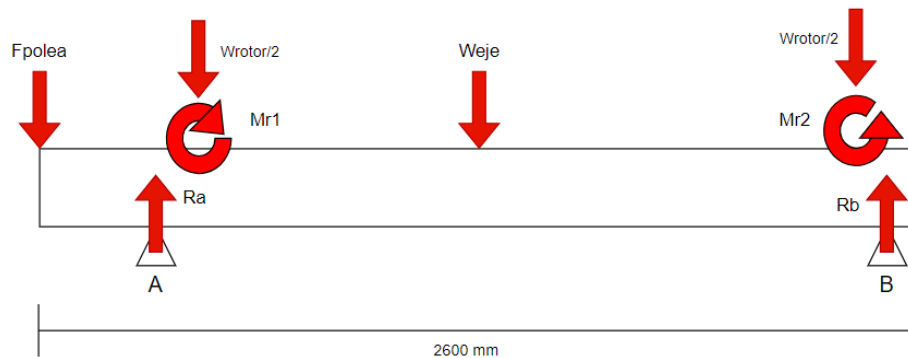
Se encuentran los momentos resultantes en los puntos empotrados.

$$M_{r1} = 64.2 \text{ Nm}$$

$$M_{r2} = 72.9 \text{ Nm}$$

Reacciones

Figura 31: Diagrama de cuerpo libre del eje



Fuente: Elaboración propia

Se realiza la sumatoria de fuerzas en el eje YZ

$$\sum F = 0$$

$$-F_{\text{polea}} - W_{\text{rotor}}/2 - W_{\text{rotor}}/2 + R_a - W_{\text{eje}} + R_b = 0$$

Se realiza la sumatoria de momentos en B.

$$\sum M_B = 0$$

$$-F_{\text{polea}}(2.5508) - W_{\text{eje}}(1.4508) + R_a(2.37565) - W_{\text{rotor}}/2(2.29335) - W_{\text{rotor}}/2(0.0743) + M_{r1} - M_{r2} = 0$$

$$R_a = 3931N$$

$$R_b = 1011N$$

Dimensionamiento del eje

En la fase de dimensionamiento del eje, como primer punto se debe encontrar el límite de la resistencia a la fatiga en la ubicación crítica, debido a que el límite de resistencia a la fatiga de un elemento es influido por su material, manufactura, entorno y diseño. Por consiguiente, se hacen estimaciones utilizando factores que consideran los efectos de la condición superficial, el tamaño, la carga, la temperatura y otros puntos. Se utiliza la ecuación de Marin para encontrar el límite de la resistencia a la fatiga en la ubicación crítica (Budynas et al., 2015).

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e \quad (46)$$

Donde:

K_a : Factor de modificación por condición superficial

K_b : Factor de modificación por el tamaño

K_c : Factor de modificación por la carga

K_d : Factor de modificación por la temperatura

K_e : Factor de confiabilidad

K_f : Factor de modificación por efectos varios

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

S_e : Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica

Factor de superficie K_a

$$K_a = aS_{ut}^b \quad (47)$$

Los valores a y b son constantes que se encuentran en la siguiente tabla:

Cuadro 9: Parámetros en el factor de la condición superficial

Acabado superficial	Factor a S_{ut} , kpsi	Factor a S_{ut} , MPa	Exponente b
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272	-0.995

Fuente: Budynas et al., 2015

Como primer punto, se debe considerar la resistencia última a la tensión del material AISI 1018. A continuación, se debe tomar en cuenta el proceso al que fue sometido el material, el cual es laminado en frío. Con esto se puede encontrar los valores de a y b .

$$a = 4.51$$

$$b = -0.265$$

$$K_a = 0.90$$

Factor de tamaño K_b

Para el factor de tamaño se tomó con valor de 1 para la primera iteración del cálculo del diámetro. A partir de este cálculo, se utilizó la ecuación correspondiente según el diámetro obtenido en la segunda iteración. (Budynas et al., 2015)

$$K_b = \begin{cases} 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (48)$$

Se escoge un diámetro de 70 milímetros, por lo tanto se obtiene:

$$K_b = 1.51d^{-0.157}$$

$$K_b = 0.79$$

Factor de carga K_c

El eje está sometido a flexión y torsión, por lo tanto se utiliza 1 como valor, ya que es una carga combinada (Budynas et al., 2015).

$$K_c = \begin{cases} 1 \text{ flexión} \\ 0.85 \text{ axial} \\ 0.59 \text{ torsión} \end{cases} \quad (49)$$

$$K_c = 1$$

Factor de temperatura K_d

La temperatura a la que estará la operación no supera los 25°C (77°F).

$$K_d = 0.975 + 0.432(10^{-3})T_F - 0.115(10^{-5})T_F^2 + 0.104(10^{-8})T_F^3 - 0.595(10^{-12})T_F^4 \quad (50)$$

Donde: $70^\circ\text{F} \leq T_F \leq 1000^\circ\text{F}$ (Budynas et al., 2015).

$$K_d = 1.01$$

Factor de confiabilidad K_e

$$K_e = 1 - 0.08Z_a \quad (51)$$

Cuadro 10: Factores de confiabilidad

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_0	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fuente: Budynas et al., 2015

Se considera que la confiabilidad del diseño es 95 %.

$$K_e = 0.868$$

Factor de efectos varios K_f

Se considera que el factor de efectos varios es 1 debido a las condiciones de trabajo a la que el eje estará sometido.

$$K_f = 1$$

Al calcular los factores, se determina la resistencia a la fatiga crítica.

$$S_e = 138.16MPa$$

Para establecer el diámetro del eje se debe evaluar los puntos críticos. Los puntos críticos son aquellos donde el eje está sometido a las cargas y momentos flexionantes superiores. Por lo tanto, se utiliza el software Inventor para obtener el valor máximo del momento de flexión alternante, ya que el torque medio es brindado por el torque que brinda el motor. El momento de flexión medio y el torque alternante es 0 en ese punto.

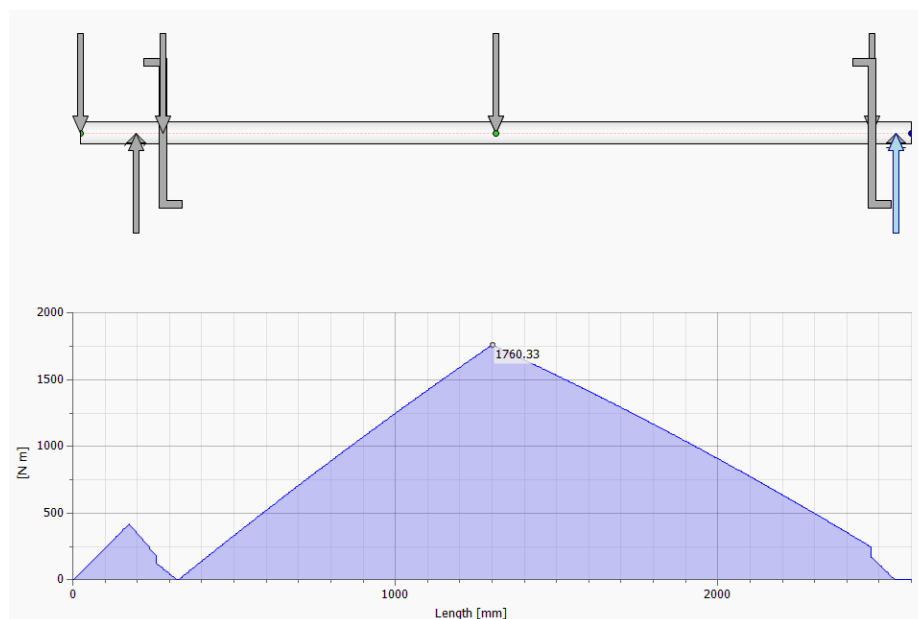
Se utiliza un enfoque conservador para determinar el diámetro, por lo tanto se utiliza la ecuación de Goodman:

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + \left\{ \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (52)$$

En la ecuación [52](#), se observan los factores de concentración de esfuerzos. En el punto crítico, no se presentan factores de concentración, ya que el diseño del eje no requiere colocar cuñas, filetes o ranuras de anillo de retención en esta sección. Por lo tanto, los factores de concentración pueden tomar el valor de 1.

Se considera realizar dos iteraciones para encontrar el diámetro. Este es un enfoque conservador, incluso, el diámetro del eje es mayor al encontrado en la segunda iteración debido a que se debe encontrar cojinetes que tengan la dimensiones apropiadas para el eje. El diagrama de momento extraído del software Autodesk Inventor [®], provee el momento flexionante alternante. En la Figura [32](#) se observa el diagrama de momento del eje en función de las fuerzas y momentos que actúan sobre este.

Figura 32: Diagrama de momento del eje



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Cuadro 11: Parámetros de diseño de la sección analizada

Sección analizada	A	Dimensionales
Factor de seguridad de diseño (n)	2.00	
Factor de concentración de esfuerzos en flexión $K_f(K_t)$	1.00	
Factor de concentración de esfuerzos en cortante ($K_{fs}(K_{ts})$)	1.00	
Factor de concentración de esfuerzos axiales ($K_{fA}(K_{tA})$)	0.00	
Momento flexionante alternante (M_a)	1760.33	N·m
Momento flexionante medio (M_m)	0.00	N·m
Par de torsión alternante (T_a)	0.00	N·m
Par de torsión medio (T_m)	131.30	N·m
Diámetro (Primera iteración) (D)	59.54	mm
Factor de tamaño recalculado (kb)	0.79	
Resistencia a la fatiga real estimada (S_e)	138.49	MPa
Diámetro (Segunda iteración) (D)	64.17	mm
Diámetro seleccionado (D)	70.00	mm
Esfuerzo alternante (σ_a)	52.28	MPa
Esfuerzo medio (σ_m)	3.38	MPa

Fuente: Elaboración propia

El punto crítico es A, la cual es el punto medio de la longitud del eje. Se debe seleccionar el diámetro acorde a este punto. El diámetro obtenido en la segunda iteración es 64.65 milímetros. Por consiguiente se escoge un diámetro de 70 milímetros. Se escoge este diámetro

por la longitud del eje. El eje tiene 2.6 metros de largo, por ende este estará expuesto a flexión causada por su propio peso, debido a que no tiene soportes adicionales además de los rodamientos instalados a sus extremos. Al considerar un diámetro menor, el eje tiene una mayor deflexión tanto transversal como angular, dando como resultado una menor velocidad crítica.

Se utiliza el criterio de von Mises para los ejes giratorios, redondos y sólidos, cuando no se tienen cargas axiales, los esfuerzos fluctuantes de von Mises (esfuerzos altertantes y esfuerzos medios) son:

$$\sigma'_a = \left(\left(\frac{32K_f M_a}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs} T_a}{\pi d^3} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (53)$$

$$\sigma'_m = \left(\left(\frac{32K_f M_m}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (54)$$

$$\sigma'_a = 52.28 MPa$$

$$\sigma'_m = 3.38 MPa$$

Se utiliza el criterio de falla por fatiga de la línea de Goodman:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \quad (55)$$

$$n = 2.6$$

El criterio de Goodman no considera la fluencia, por consiguiente se calcula por medio del esfuerzo máximo de von Mises equivalente.

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma'_{\text{máx}}} = \frac{S_y}{\sigma'_a + \sigma'_m} \quad (56)$$

$$n_y = 6.65$$

Deflexión del eje

Los ejes pueden ser tratados como vigas, la razón por la cual esto es posible es que las ecuaciones que se utilizan en vigas para evaluar la deflexión también son utilizadas para evaluar ejes. La mayoría de códigos de diseño de ingeniería presentan especificaciones sobre las limitaciones de las deflexiones por tolerancia y como resultado las deflexiones elásticas para la mayoría de las vigas y ejes forman curvas poco pronunciadas (Hibbeler, 2011). Por

consiguiente, se encuentra la deflexión máxima que puede poseer el eje, utilizando la siguiente ecuación (Smith, 2011):

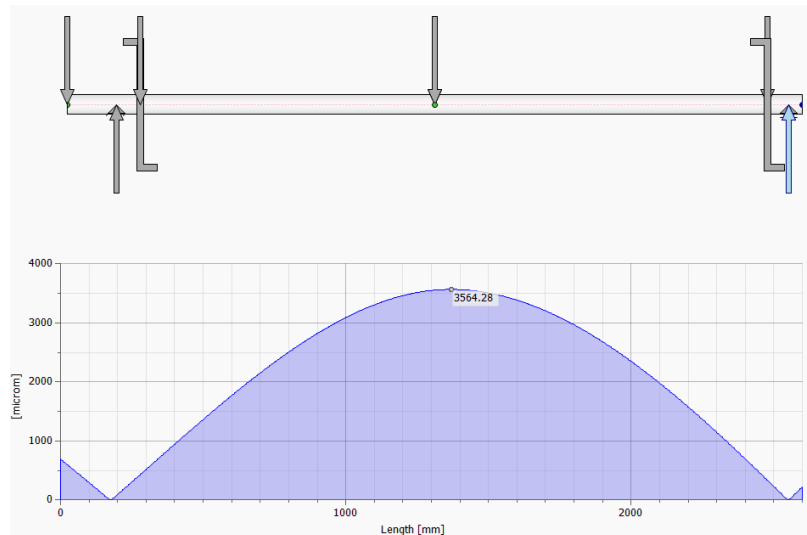
$$\delta_{\text{máx}} = \frac{L}{500} \quad (57)$$

El eje tiene un largo de 2.6 metros. Por lo tanto debido a su aplicación tiende a flexionarse debido a su propio peso. Por esta razón, se encuentra que la deflexión máxima es:

$$\delta_{\text{máx}} = 5.20mm$$

Se encontró que la deflexión máxima que puede tener el eje es 5.2 milímetros.

Figura 33: Diagrama de deflexión del eje



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Se determinó la deflexión del eje por medio del software Autodesk Inventor ®.

$$\delta = 3.56428mm$$

Se concluye que el eje está dentro del parámetro de deflexión máxima aceptado.

Velocidad crítica del eje

Para determinar la velocidad crítica del eje, se debe considerar su geometría. En este caso, al ser un eje de diámetro uniforme, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\omega_1 = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{gEI}{A\gamma}}$$

Donde:

l : Longitud del eje

g : Gravedad

E : Módulo de elasticidad del material

I : Momento de inercia de la sección transversal del eje

A : Área de la sección transversal

γ : Peso específico del material

En este caso, el material del eje es AISI 1018, por lo tanto se obtiene el módulo de elasticidad y la densidad.

$$E = 200GPa$$

$$\rho = 7870kg/m^3$$

Por medio de la densidad y la gravedad, se determina el peso específico.

$$\gamma = \rho g = 77204.7N/m^3$$

Para encontrar el momento de inercia de la sección transversal del eje se utiliza la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

Al tener un diámetro de 70 mm, se procede a calcular el momento de inercia.

$$I = \frac{\pi(0.07m)^4}{64} = 0.000001179m^4$$

Se determinar el área de la sección transversal.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(0.07m)^2}{4} = 0.003848m^2$$

El eje tiene un longitud de 2.6 metros. Se procede a determinar la velocidad crítica.

$$\omega_1 = 128rad/s = 1230rpm$$

Los diseñadores tratan de determinar las velocidades críticas de al menos el doble de la velocidad de operación (Budynas et al., 2015). Ya que se considero que el eje estará girando a 400 rpm, se considera que se cumple con el requisito.

6.4.7. Cojinetes

Para la selección de cojinetes, se utilizó como referencia el proveedor SKF con el objetivo de encontrar el cojinete adecuado con base en las ecuaciones que nos proveen. El rodamiento está sometido a cargas radiales, ya que las cargas axiales encontradas por la fuerza de impacto de las etiquetas, son insignificativas para el análisis. Por lo tanto, se escoge rodamientos de bolas.

La vida útil del rodamiento se selecciona en base a la aplicación a la cual está sujeta la máquina. En este caso, la línea de reciclaje tiene considerado un horario de 8 horas de trabajo, por consiguiente, según SKF, se puede considerar una vida útil entre 10,000 horas a 25,000 horas. Este intervalo es para las máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo, dentro de las aplicaciones se tiene transmisiones por engranajes de uso general o motores eléctricos para uso industrial.

Se considera una vida útil para el rodamiento

$$L_{10h} = 20,000 \text{ horas}$$

Para proveer una operación satisfactoria, se debe encontrar la carga dinámica a la que estará sujeta el rodamiento en su operación. Para encontrar la carga dinámica se usa la ecuación brindada por el catálogo SKF de rodamientos de rodillos (SKF, 2008).

$$P = F_r \quad , \quad \frac{F_a}{F_r} \leq e \quad (58)$$

$$P = X F_r + Y F_a \quad , \quad \frac{F_a}{F_r} > e \quad (59)$$

Donde:

P : Carga dinámica equivalente del rodamiento (kN)

F_r : Componente radial de la carga del rodamiento (kN)

F_a : Componente axial de la carga del rodamiento (kN)

X : Factor de carga radial

Y : Factor de carga axial

e : Valor límite para F_a/F_r

Se encontró que la carga axial generada por el impacto de las botellas con las cuchillas es insignificativa, por lo tanto se utiliza la siguiente ecuación para encontrar la carga dinámica equivalente del rodamiento.

$$P = F_r = 2879.96N$$

Al poseer la carga dinámica, se puede encontrar la capacidad de carga dinámica básica con la siguiente ecuación:

$$L_{10h} = \frac{1\,000\,000}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Donde:

P : Carga dinámica equivalente del rodamiento (kN)

n : Velocidad de giro (RPM)

C : Capacidad de carga dinámica básica (kN)

L_{10h} : Vida nominal básica (horas)

p : Exponente de la ecuación de la vida útil

Se despeja para C .

$$C = P \left(\frac{60nL_{10h}}{10^6} \right)^{\frac{1}{p}}$$

Ya que el rodamiento es de bolas se toma el siguiente valor para p .

$$p = 3$$

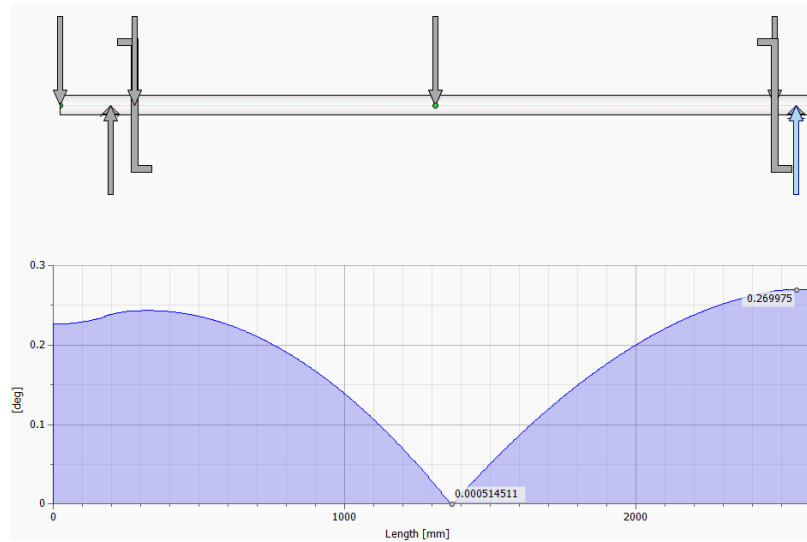
Se encuentra capacidad de carga dinámica básica.

$$C = 23kN$$

Al poseer la capacidad de carga dinámica básica, se puede escoger el rodamiento que debe tener una capacidad de carga dinámica básica igual o mayor a la encontrada. Se escoge el rodamiento FYJ 70 TF, el cual tiene una capacidad de carga dinámica básica de 66.3 kN (SKF, [s.f.](#)), lo que indica que el rodamiento puede soportar la carga a la cual está sometido.

Los cojinetes tienen desalineaciones angulares permisibles, estas dependen del tipo de cojinete. Según el catálogo de SKF, la desalineación permisible es 2° para las unidades que requieren lubricación (SKF, [s.f.](#)). Mediante el software Autodesk Inventor®[®], se puede encontrar la deflexión angular máxima a la que estará sometida el rodamiento.

Figura 34: Deflexión angular del eje



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Se encuentra que los valores de la deflexión angular donde están posicionados los cojinetes son 0.28° y 0.27° , por lo tanto, el rodamiento soporta con la desalineación angular que contiene el eje.

6.4.8. Cuña

Para el diseño de la cuña se debe considerar que soporta la polea que provee la transmisión de potencia al eje. Para el diseño de la cuña se tomó como referencia el catálogo de la empresa Chiavette Unificate, el cual trae la dimensiones para cuñas para ejes de 70 mm de diámetro. Se seleccionó una cuña cuadrada con dimensiones de 20 mm x 12 mm. Se procede a calcular el torque al que estará sometida la cuña:

La relación entre la potencia, el par de torsión y la velocidad angular está dada por:

$$P = T \cdot \omega \quad (60)$$

Donde:

P : Potencia (kW)

T : Par de torsión (Nm)

ω : Velocidad angular (rad/s)

Se despeja para T .

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (61)$$

La velocidad angular es 41.89 rad/s y la potencia es 5.5 kW.

$$T = 131.30Nm$$

Se calculadora fuerza que ejerce la cuchilla sobre la superficie del eje.

$$F = \frac{T}{r} \quad (62)$$

Donde:

r : Radio del eje,

El radio del eje es 70 milímetros.

$$F = 3571N$$

El material del cual se fabricará la cuña es AISI 1018. Este material tiene una resistencia a la fluencia de 370 MPa, por la teoría de la energía de distorsión se puede estimar la resistencia a la fluencia cortante:

$$S_{sy} = 0.577S_y \quad (63)$$

Donde:

S_y : resistencia a la fluencia

S_{sy} : resistencia a la fluencia cortante

$$S_{sy} = 213MPa$$

Se calcula el factor de seguridad de la cuña

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl} \quad (64)$$

Se despeja para n

$$n = \frac{tl}{F} * S_{sy} \quad (65)$$

Donde:

t : espesor de la cuña

l : largo de la cuña

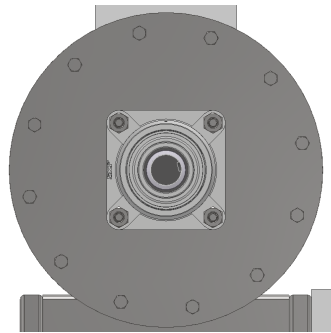
El largo de la cuña es 40 milímetros y el espesor es 12 milímetros.

$$n = 27$$

6.4.9. Pernos

Para la sujeción de los componentes chumacera y lámina de acero, se considera uniones pernadas para garantizar soporte a la estructura. Para realizar el análisis de la selección de pernos, se debe considerar la fuerza que se encuentra en la posición donde se colocan los pernos. En la Figura 35, se puede observar el posicionamiento que tienen los pernos en la chumacera y en la tapadera de la carcasa.

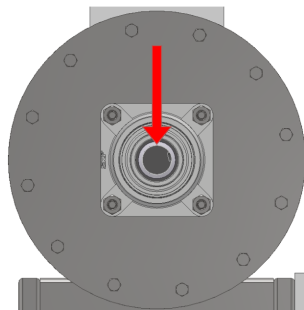
Figura 35: Posicionamiento de pernos en la chumacera



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Se decide colocar una chumacera que distribuye la carga en 4 pernos. Mediante el software Autodesk Inventor® se encuentra la carga máxima en la posición donde se encuentran las chumaceras. Las cargas que se encuentran son cortantes. Por esta razón los pernos están expuestos a fuerza cortante. En la Figura 36, se observa la posición y dirección de la fuerza a la que está sometida los pernos.

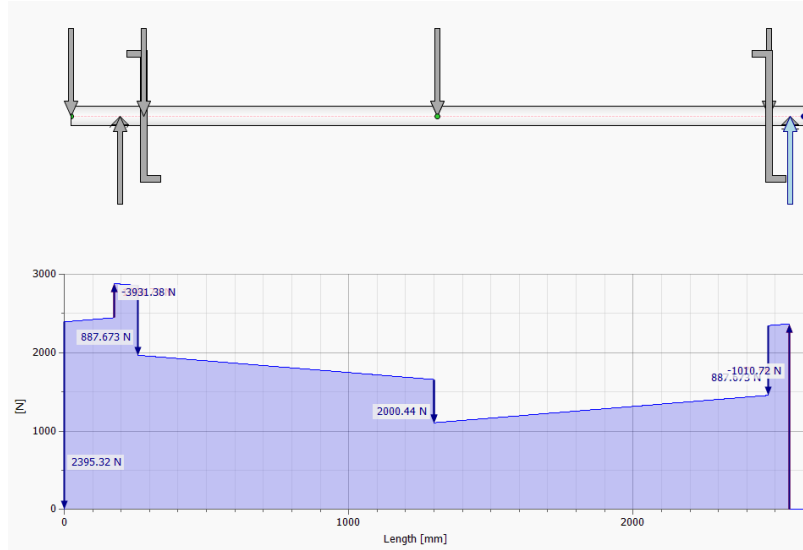
Figura 36: Fuerza ejercida sobre los pernos



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

El perno seleccionado es de 5/8 pulgada grado 5 SAE. En la Figura 37, se observa la fuerza cortante a la que está sometidos los pernos.

Figura 37: Diagrama de fuerzas del eje



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

La fuerza encontrada en ese punto es:

$$F = 2841N = 639lbf$$

Aplastamiento de los pernos considerando todos los pernos cargados

$$\sigma = \frac{F}{td} = \frac{S_p}{n_d} \quad (66)$$

Donde:

t : Espesor del material

d : Diámetro del perno

S_p : Resistencia de prueba mínima

n_d : Factor de seguridad

$$\sigma = \frac{F}{td} = \frac{639lbf}{(3/8in)(5/8in)}$$

$$\sigma = 2.73kpsi$$

Se despeja para n_d .

$$n_d = \frac{S_p}{\sigma} \quad (67)$$

$$n_d = \frac{85kpsi}{2.73kpsi}$$

$$n_d = 31.19$$

Aplastamiento de los elementos considerando todos los pernos activos

$$\sigma = \frac{F}{td} = \frac{(S_y)_{elem}}{n_d} \quad (68)$$

Donde:

$(S_y)_{elem}$: Resistencia a la fluencia del acero A36

$$\sigma = \frac{F}{td} = \frac{639lbf}{(3/8in)(5/8in)}$$

$$\sigma = 2.73kpsi$$

Se despeja para n_d .

$$n_d = \frac{(S_y)_{elem}}{\sigma}$$

$$n_d = \frac{36.3kpsi}{2.73kpsi}$$

$$n_d = 13.32$$

Cortante del perno considerando todos los pernos activos

Caso 1: Si las roscas de los pernos no se extienden en los planos de cortante.

$$\tau = \frac{F}{4\pi \left(\frac{d^2}{4}\right)} = \frac{0.577S_p}{n_d}$$

$$\tau = \frac{F}{4\pi \left(\frac{d^2}{4}\right)} = \frac{639lbf}{4\pi \left(\frac{(5/8in)^2}{4}\right)}$$

$$\tau = 0.52kpsi$$

Se despeja para n_d .

$$n_d = \frac{0.577S_p}{\tau}$$

$$n_d = \frac{0.577(85kpsi)}{0.52kpsi}$$

$$n_d = 94.24$$

Caso 2: Si las roscas de los pernos no se extienden en los planos de cortante.

$$\tau = \frac{F}{4A_r} = \frac{0.577S_p}{n_d} \quad (69)$$

Donde:

A_r : Área del diámetro menor (in^2)

$$\tau = \frac{F}{4A_r} = \frac{639lbf}{4(0.202in^2)}$$

$$\tau = 0.79kpsi$$

Se despeja para n_d .

$$n_d = \frac{0.577S_p}{\tau}$$

$$n_d = \frac{0.577(85kpsi)}{0.79kpsi}$$

$$n_d = 62.05$$

Cortante del borde del elemento en dos pernos del margen

$$\tau = \frac{F}{4at} = \frac{0.577(S_y)_{elem}}{n_d}$$

Donde:

$$a = 27.50mm = 1.08in$$

$$\tau = \frac{F}{4at} = \frac{639lbf}{4(1.08in)(3/8in)}$$

$$\tau = 0.39kpsi$$

Se despeja para n_d .

$$n_d = \frac{0.577(S_y)_{elem}}{\tau}$$

$$n_d = \frac{0.577(36.3kpsi)}{0.39kpsi}$$

$$n_d = 53.26$$

Dentro de la estructura de la maquina, existen más pernos que no están expuestos a cargas significativas. Estos pernos actuan como elementos de sujeción. Por lo tanto, se considera determinar la precarga a la cual estarán colocados. Se determinará la precarga para 3 distintos pernos, ya que se escogieron en función a la unión correspondiente.

$$F_i = \begin{cases} 0.75F_p & \text{para conexiones no permanentes, sujetadores reutilizados} \\ 0.90F_p & \text{para conexiones permanentes} \end{cases}$$

Donde:

F_i : Precarga

F_p : Carga de prueba

En todos los casos a evaluar se selecciona la ecuación para conexiones no permanentes.

Para determinar la carga de prueba se utiliza la siguiente ecuación:

$$F_p = A_t S_p \tag{70}$$

Donde:

A_t : Área de esfuerzo de tensión

S_p : Resistencia de prueba mínima

Se presenta la ecuación con la que se calcula el torque necesario para desarrollar la precarga determinada.

$$T = KF_id \quad (71)$$

Donde:

K : Coeficiente del par de torsión

El coeficiente de torque está determinado por la condición del perno. Se utilizará K con valor de 0.2, debido a que este valor es correspondiente a pernos galvanizados, los cuales son más comunes (Budynas et al., 2015).

Unión carcasa con tapadera de carcasa, y unión carcasa con ventilador

Para esta unión se consideró pernos con diámetro de 3/4 de pulgada.

$$F_p = A_t S_p = (0.334 \text{ in}^2)(85 \text{ kpsi}) = 28390 \text{ lbf}$$

$$F_i = 0.75 * F_p = 21293 \text{ lbf}$$

$$T = KF_id = (0.2)(21293 \text{ lbf})(3/4 \text{ in}) = 266 \text{ lbf} * \text{ft}$$

Unión cuchillas móviles con soporte

Para esta unión se consideró pernos con diámetro de 3/8 de pulgada.

$$F_p = A_t S_p = (0.0775 \text{ in}^2)(85 \text{ kpsi}) = 6588 \text{ lbf}$$

$$F_i = 0.75 * F_p = 4941 \text{ lbf}$$

$$T = KF_id = (0.2)(4941 \text{ lbf})(3/8 \text{ in}) = 31 \text{ lbf} * \text{ft}$$

Unión cuchillas fijas con soporte

Para esta unión se consideró pernos con diámetro de 5/16 de pulgada.

$$F_p = A_t S_p = (0.0524 \text{ in}^2)(85 \text{ kpsi}) = 4453 \text{ lbf}$$

$$F_i = 0.75 * F_p = 3341 \text{ lbf}$$

$$T = KF_id = (0.2)(3341 \text{ lbf})(5/16 \text{ in}) = 17 \text{ lbf} * \text{ft}$$

6.4.10. Ventilador

Para la selección del modelo adecuado de un ventilador se debe tomar que la fuerza de succión del ventilador debe ser mayor a la fuerza de rozamiento de la etiqueta. La fuerza de rozamiento es aquella fuerza que se opone al movimiento de una partícula en un fluido, actuando en dirección opuesta del movimiento de la partícula sobre el fluido (McCabe et al., 2007). Esta se encuentra en relación con la resistencia del flujo de aire que debe vencer la etiqueta de polipropileno para que la misma pueda moverse por medio del flujo de aire.

Para encontrar la fuerza de rozamiento se debe encontrar el coeficiente K:

$$K = D_p \left[\frac{g\rho(\rho_p - \rho)}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (72)$$

Donde:

D_p : diámetro de la partícula

g : gravedad

ρ : densidad del fluido

ρ_p : densidad de la partícula

μ : viscosidad del fluido

Se toma en cuenta que la partícula en este caso es la etiqueta de polipropileno y el fluido es el aire a 25°C.

El diámetro de la partícula se encuentra dado por:

$$S_0 = \left(\frac{\pi}{4} \right) D_p^2 \quad (73)$$

Donde:

S_0 : Área transversal de la etiqueta.

Se despeja para D_p

$$D_p = \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}} \quad (74)$$

Dado el valor:

$$S_0 = 0.00000329 \text{ m}^2$$

Sustituyendo:

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \times 0.00000329 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D_p = 0.00205 \text{ m}$$

Dado los valores :

$$D_p = 0.00204669204 \text{ m}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\rho = 1.20 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_p = 905.0 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 0.000018 \text{ Kg/m} \cdot \text{s}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (72):

$$K = 0.00204669204 \text{ m} \left[\frac{9.81 \text{ m/s}^2 \times 1.20 \text{ kg/m}^3 \times (905 \text{ kg/m}^3 - 1.20 \text{ kg/m}^3)}{(0.000018 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)})^2} \right]^{1/3}$$

$$K = 65.54$$

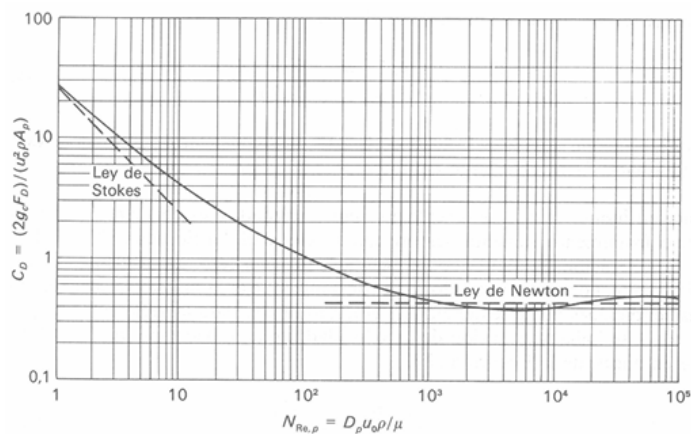
Cuadro 12: Criterios K

$K \leq 2.6$	Ley de Stokes
$2.6 < K \leq 68.9$	Prueba y error
$68.9 \leq K \leq 2,360$	Ley de Newton
$K > 2,360$	Prueba y error

Fuente: (McCabe et al., 2007)

Utilizando prueba y error debido al valor de K determinado, tomando en cuenta los criterios K, se supone un N_{Re} de 924.

Figura 38: Coeficientes de rozamientos para esferas



Fuente: (McCabe et al., 2007)

Tomando en cuenta un N_{Re} de 924, a partir de la ecuación 38 se determina un Coeficiente de Rozamiento(C_D) de 0.44.

La velocidad límite se encuentra dada por la ecuación:

$$u_t = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)D_p}{3C_D\rho}} \quad (75)$$

Dado los valores antes mencionados, se sustituyen en la ecuación:

$$u_t = \sqrt{\frac{4 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times (905 \text{ kg/m}^3 - 1.2 \text{ kg/m}^3) \times 0.002046692 \text{ m}}{3 \times C_D \times 1.2 \text{ kg/m}^3}}$$

$$u_t = 6.77 \text{ m/s}$$

Se determina N_{Re} a partir de los valores antes mencionados, para comprobar el valor supuesto utilizado por medio de la siguiente ecuación:

$$N_{Re} = \frac{D_p u_t \rho}{\mu} \quad (76)$$

$$N_{Re} = \frac{0.002046692 \text{ m} \times 6.77 \text{ m/s} \times 1.2 \text{ kg/m}^3}{1.80 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}}$$

$$N_{Re} = 923.66$$

Teniendo en cuenta un valor supuesto N_{Re} de 924 y teniendo como resultado un N_{Re} de 923.66 se puede confirmar el N_{Re} supuesto fue el correcto y, por lo tanto, la velocidad límite calculada es la correcta.

La fuerza de rozamiento se encuentra dada por la siguiente ecuación:

$$F_D = \frac{C_D u_t^2 \rho A_p}{2g_c} \quad (77)$$

Donde:

A_p = Área proyectada

El área se proyectada se calcula como la suma del área de las dos etiquetas que se van a succionar por segundo. En este caso, el área de una etiqueta se multiplica por 2, ya que la máquina desetiquetadora retirará etiquetas de 2 botellas por segundo. Por lo tanto, se tiene:

$$A_p = 2 \times 0.00000329 \text{ m}^2$$

$$A_p = 0.00000658 \text{ m}^2$$

Sustituyendo:

$$F_D = \frac{0.44 \times (6.769386789 \text{ m/s})^2 \times 1.20 \text{ kg/m}^3 \times 0.00000658 \text{ m}^2}{2 \times 1 \text{ m/s}^2}$$

$$F_D = 0.0000796 \text{ N}$$

Se calcula la fuerza ejercida por el flujo de aire en la etiqueta por medio de la siguiente ecuación:

$$F_{\text{succión}} = P \times A \quad (78)$$

Donde:

P : Presión generada por el ventilador

A : Área de la etiqueta

Cuadro 13: Datos técnicos de modelos de ventiladores

Type	Motor kW	Rpm	Weight (kg)	Noise level 1m dB (A)
MTD 20	1.1	2880	41	74
MTD 22	2.2	2850	54	73
MTD 25	4	2900	76	76

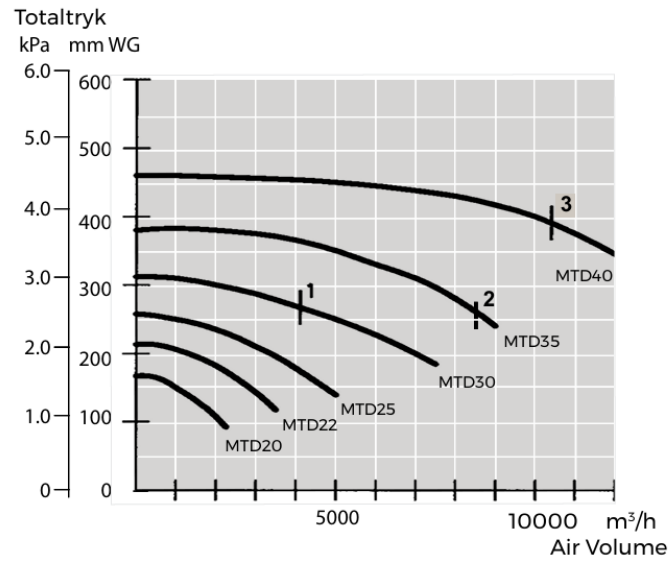
Fuente: (Kongskilde, 2022)

Según el proveedor Hebei Fangtai Plastic Machinery Manufacture CO., LTD, se utiliza un motor de 3kW para el ventilador de succión. Para la selección del ventilador de succión, se consideró el fabricante Kongskilde, el cual brinda un catálogo de modelos para el transporte de sólidos por medio de las aspas del ventilador. Se evalúa tres modelos de la empresa para determinar el ventilador apropiado. Se utiliza como referencia la potencia del ventilador dada por Hebei Fangtai para escoger las opciones a examinar.

Se calcula la fuerza ejercida por el flujo de aire en la etiqueta de los tres modelos seleccionados.

Se toma en cuenta la Figura 39, la cual presenta la gráfica que proporciona la empresa Kongskilde, tomando en cuenta el punto máximo de la curva del modelo correspondiente ubicando el volumen de Aire para cada uno de los modelos seleccionados a evaluar.

Figura 39: Características de sopladores



Fuente: (Kongskilde, 2022)

Al encontrar el punto máximo de la curva, teniendo en cuenta el volumen de aire, se puede determinar los valores de la presión total para cada modelo.

A partir de esto, se obtuvo:

Cuadro 14: Modelos y especificaciones de ventiladores evaluados

Modelo	Motor (kW)	Volumen de aire (m ³ /h)	Presión (kPa)
MTD 20	1.1	2689.37	0.8
MTD 22	2.2	3207.51	1.1
MTD 25	4.0	4055.38	1.6

Fuente: Elaboración propia

Dado el valor:

$$A = 0.00000658 \text{ m}^2$$

Utilizando la ecuación 78 sustituyendo los valores:

Para el ventilador modelo MTD 20 se obtiene:

$$F_{\text{succión}} = (0.8 \text{ kPa} \times 1000 \text{ Pa/kPa}) \times 0.00000658 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{succión}} = 0.00527 \text{ N}$$

Para el ventilador modelo MTD 22 se obtiene:

$$F_{\text{succión}} = (1.1 \text{ kPa} \times 1000 \text{ Pa/kPa}) \times 0.00000658 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{succión}} = 0.00724 \text{ N}$$

Para el ventilador modelo MTD 25 se obtiene:

$$F_{\text{succión}} = (1.1 \text{ kPa} \times 1000 \text{ Pa/kPa}) \times 0.00000658 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{succión}} = 0.0105 \text{ N}$$

Al comparar las fuerzas de succión de calculadas, se observa que para todos los modelos la fuerza de succión es mayor a la fuerza de rozamiento, lo que indica que cualquiera de los modelos asegura que las etiquetas serán succionadas.

El modelo MTD20 es el más cercano a la fuerza de rozamiento de la etiqueta, cumpliendo con la función de la succión de las etiquetas. Este modelo de ventilador MTD centrífugo es de accionamiento directo, diseñado para el transporte de material. Los ventiladores MTD se encuentran equipados con un rodete autolimpiante con álabes rectos ligeramente curvados hacia atrás y con una entrada aerodinámica (Kongskilde, 2022). Este ventilador se observa en la Figura 40.

Figura 40: Ventilador centrífugo



Fuente: (Kongskilde, 2022)

El costo del ventilador Kongskilde MTD-20 es elevado, teniendo un costo de Q27,000.00, por lo que, se evalúa un ventilador marca Cincinatti con características similares para cumplir con el funcionamiento de succión de las etiquetas, con el fin de reducir los costos de la fabricación de la máquina.

Para evaluar los ventiladores Cincinatti, se realiza un cálculo del flujo de aire en CFM que permita succionar las etiquetas de las botellas en la máquina desetiquetadora, por lo que, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = A_{\text{total}} \times V \quad (79)$$

Donde:

Q : Flujo de aire (m^3/s).

A_{total} : Área total de succión por segundo (m^2).

V : Velocidad del aire requerida (m/s).

El área total se calcula como la suma del área de las dos etiquetas que se van a succionar por segundo. En este caso, el área de una etiqueta se multiplica por 2, ya que la máquina desetiquetadora retirará etiquetas de 2 botellas por segundo. Por lo tanto, se tiene:

Dado que la velocidad del aire requerida es $V = 6.769$ m/s, se sustituyen los valores en la ecuación, donde el área total (A_{total}) es 0.00000658 m².

Sustituimos los valores en la ecuación:

$$Q = 0.00000658 \text{ m}^2 \times 6.769 \text{ m/s} = 0.00004454 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para convertir el flujo de aire de m³/s a CFM (*Cubic Feet per Minute*), se utiliza el factor de conversión $1 \text{ m}^3/\text{s} = 2118.88$ CFM:

$$Q = 0.00004454 \text{ m}^3/\text{s} = 0.0944 \text{ CFM}$$

Por lo tanto, el flujo de aire necesario es:

$$Q = 0.0944 \text{ CFM}$$

Este flujo de aire permitirá succionar 2 etiquetas por segundo (una de cada botella) a una velocidad de 6.769 m/s. Esto es clave ya que la máquina desetiquetadora está diseñada para retirar etiquetas de 2 botellas por segundo.

Figura 41: Especificaciones de ventiladores de accionamiento directo a 3450 RPM

Model	Nominal Wheel Diameter and Width	Nominal Inlet Diameter	1" SP		2" SP		3" SP	
			CFM	bhp	CFM	bhp	CFM	bhp
PB-8	7" x 2.4375"	4"	280	0.30	228	0.28	138	0.26
	8" x 2.75"	4"	344	0.36	292	0.33	228	0.28
PB-9	8" x 2.75"	5"	388	0.39	341	0.36	285	0.32
	8.5" x 2.75"	5"	435	0.46	385	0.41	324	0.37
	9" x 2.875"	5"	493	0.52	445	0.48	384	0.42
	10.25" x 3" BC	5"	511	0.56	463	0.50	404	0.45
	9.75" x 2.875"	5"	549	0.81	501	0.76	449	0.71
	10.625" x 2.625"	5"	592	0.84	552	0.78	509	0.72
PB-10A	9" x 2.875"	6"	576	0.70	510	0.65	425	0.58
	10.25" x 3" BC	6"	605	0.79	547	0.72	479	0.66
	9.75" x 2.875"	6"	710	1.02	658	0.96	594	0.89
	11" x 3" BC	6"	729	1.06	687	1.01	638	0.95
	10.625" x 2.625"	6"	826	1.39	763	1.30	699	1.23
	11" x 2.75"	6"	830	1.42	780	1.33	727	1.23
PB-13A	11.5" x 2.875"	6"	884	1.52	836	1.45	780	1.38
	12" x 2.875"	6"	921	1.93	886	1.89	846	1.84
	11" x 3" BC	7"	877	1.10	807	1.04	729	0.96
	10.625" x 2.625"	7"	1062	1.62	989	1.53	899	1.42
	11" x 2.75"	7"	1155	2.00	1068	1.85	974	1.71
	11.5" x 2.875"	7"	1266	2.39	1183	2.28	1092	2.14
	12" x 2.875"	7"	1307	2.61	1225	2.46	1139	2.30
	13" x 3.25" BC	7"	1297	2.61	1233	2.51	1164	2.40
12.25" x 2.875"	7"	1363	2.92	1287	2.76	1202	2.58	
	13" x 3.25"	7"	1464	3.24	1388	3.08	1306	2.92

Fuente: (Cincinnati, [s.f.](#))

El ventilador Cincinnati modelo PB-8 como se muestra en la Figura 41, tiene un CFM de 280 a una presión estática (SP) de 1 inH₂O. Este valor de flujo de aire es mayor al CFM requerido de 0.0944 CFM por las etiquetas, lo que garantiza que el ventilador puede generar suficiente succión para asegurar el correcto transporte de las etiquetas en la máquina desetiquetadora.

El ventilador Cincinnati de accionamiento directo modelo PB-8, fabricado en aluminio, cuenta con álabes radiales rectos y tiene un costo de Q.5,035.53. El diseño de este tipo de álabes es fundamental, ya que permite que las etiquetas pasen a través de ellos sin obstruir el flujo del ventilador. El diseño de los álabes garantiza que los materiales no se adhieran durante el proceso (Casals, 2024).

A partir de la evaluación comparativa entre los ventiladores Kongskilde MTD-20 y Cincinnati PB-8, se seleccionó el ventilador Cincinnati PB-8 debido a su menor costo, lo que contribuye a la reducción de los costos de fabricación de la máquina. Además, el tipo de diseño de los álabes radiales rectos del modelo asegura que las etiquetas no se adhieran a los álabes al pasar a través de ellos, evitando cualquier obstrucción del flujo del ventilador y asegurando un rendimiento constante. Además, el proveedor de ventiladores Cincinnati, recomienda un mantenimiento diario al ventilador. Este mantenimiento contiene la limpieza de residuos en el ventilador con el objetivo de prolongar la vida útil de los álabes.

6.5. Simulación en ANSYS

6.5.1. Tambor del rotor de cuchillas

El tambor representa el cilindro hueco donde se posiciona el tornillo helicoidal y los soportes de las cuchillas con las cuchillas. Este tambor está colocado en el rotor por medio de uniones soldadas. El tambor posee 2 metros de longitud y las uniones soldadas están posicionadas a los extremos, es decir, no tiene soporte en la parte interna de la estructura. Por consiguiente, se utiliza el software ANSYS, para encontrar su deformación, esfuerzos de von Mises y factor de seguridad que tiene con base en la carga que estará sometido. El material por el cual estará fabricado es lámina de acero A36.

Se presentan las propiedades del material acero A36.

Cuadro 15: Propiedades del acero A36

Propiedad	A 36
Densidad	7.8 g/cm ³
Módulo de elasticidad	200 GPa
Relación de Poisson	0.26
Resistencia a la fluencia	250 MPa
Resistencia última a la tensión	475 MPa

Fuente: Matweb, 2024

Se realizó un análisis estructural, donde se colocó dos soportes fijos donde el rotor estará

soldado al eje. Además, se colocó el torque ejercido para el movimiento del motor. Por último, se ingresó la fuerza provocada por la masa de los componentes colocados en la estructura. Con el fin de tener resultados más precisos se configura el tamaño del mallado de los componentes. Para medir la eficiencia del mallado se utiliza el valor de asimetría (*Skewness*), el cual es 0.22481, lo que indica que el mallado es excelente.

Figura 42: Configuración del tambor

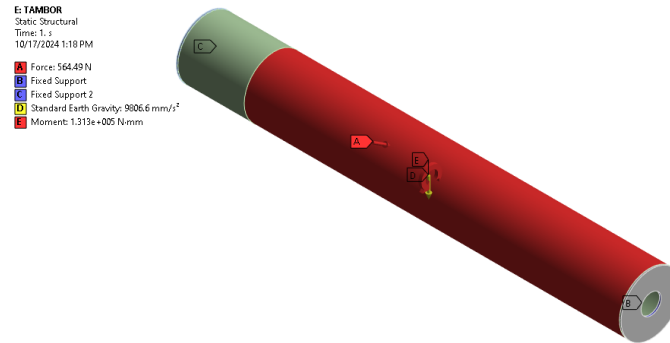


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 43: Esfuerzos de von Mises en el tambor

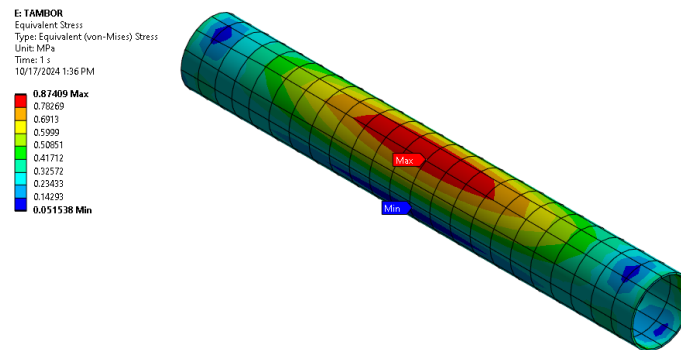


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 44: Deflexión del tambor

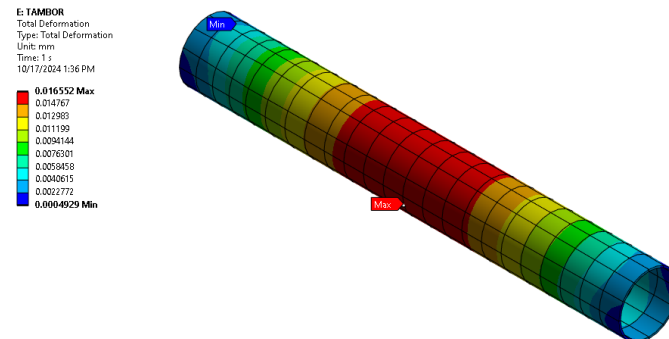


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 45: Factor de seguridad del tambor

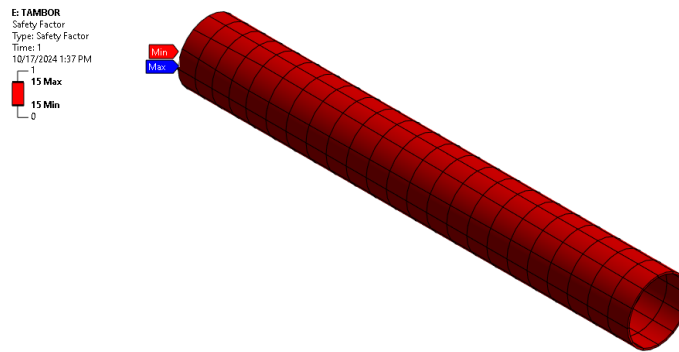


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se ha encontrado que la máxima deformación es de 0.04749 milímetros. Esto indica que la deformación no es significativa, lo cual lo puede sustentar el factor de seguridad encontrado, siendo 15 respectivamente. Cabe resaltar que ANSYS solo calcula hasta un factor de seguridad de 15, no obstante, se puede concluir que el tambor cumple con las especificaciones necesarias en términos de su espesor de lámina para soportar las piezas unidas permanentemente a el.

Para evaluar la soldadura que tiene el tambor con los discos que están unidos al eje, se coloca un contacto *Bonded* entre estos para simular el comportamiento de una unión permanente. Se evaluó el máximo de esfuerzo del corte y el esfuerzo de tensión de von Mises para encontrar el factor de seguridad de corte y de tensión para la soldadura. El número de electrodo que se usará es E60XX, el cual tiene una resistencia a la fluencia de 345 MPa (Budynas et al., 2015). Debido a la geometría del tambor, este tiene soldaduras en ambos extremos, por lo tanto se evalúa el extremo donde se encuentra el mayor esfuerzo de von Mises y esfuerzo máximo cortante.

Figura 46: Esfuerzo de von Mises en la soldadura del tambor

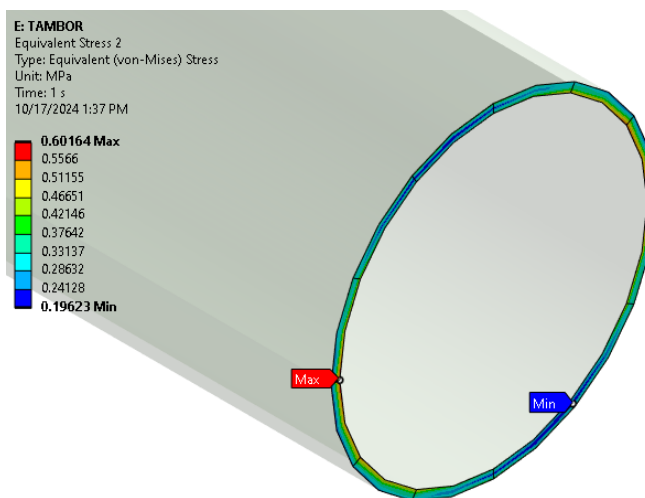


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se determina el factor de seguridad de tensión. Se utiliza la siguiente ecuación, la cual se utiliza cuando el esfuerzo cortante en el metal base no debe exceder de $0.40S_y$ del metal base (Budynas et al., 2015).

$$n = \frac{0.4 * S_y}{\tau}$$

$$n = \frac{0.4(345MPa)}{0.60MPa} = 230$$

Figura 47: Esfuerzo de corte máximo en la soldadura del tambor

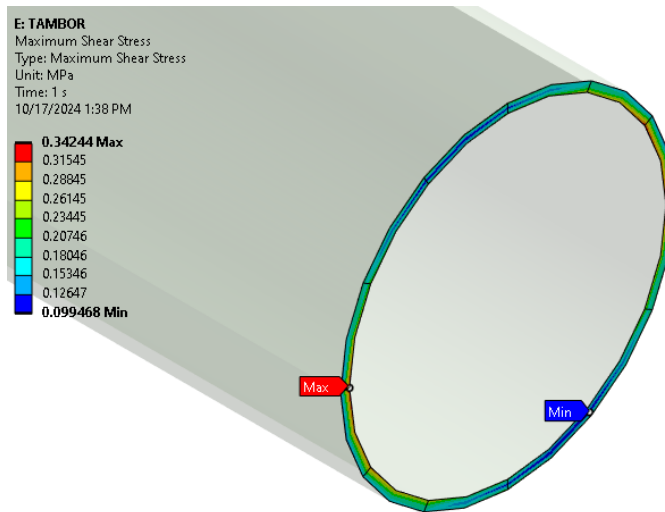


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se determina el factor de seguridad de corte.

$$n = \frac{0.4 * S_y}{\tau}$$

$$n = \frac{0.4(345MPa)}{0.34MPa} = 405$$

6.5.2. Cuchillas

Se realizó un análisis estructural para las cuchillas, con el objetivo de encontrar su deformación total, factor de seguridad y esfuerzos von Mises. Para la configuración del análisis, se colocaron fuerzas en todos los dientes de la cuchilla. La fuerza colocada es en base al torque que entrega el motor. Además se colocó soportes fijos en el soporte de cuchilla, imitando su comportamiento como unión permanente hacia el tambor, y se colocó el torque que provee el motor en la superficie inferior del soporte de cuchilla. Se presentan los materiales utilizados en la simulación.

Cuadro 16: Propiedades de materiales

Propiedad	AISI D2	Acero galvanizado	A36
Densidad	7.77 g/cm^3	7.8 g/cm^3	7.8 g/cm^3
Módulo de elasticidad	190 GPa	200 GPa	200 GPa
Relación de Poisson	0.28	0.29	0.26
Resistencia a la fluencia	470 MPa	379 MPa	250 MPa
Resistencia última a la tensión	760 MPa	475 MPa	475 MPa

Fuente: Matweb, 2024

Figura 48: Configuración del análisis de la cuchilla

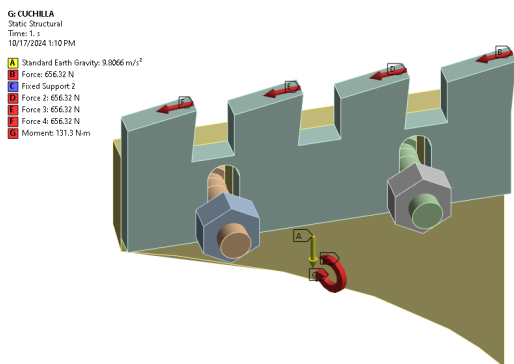


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 49: Esfuerzos de von Mises en la cuchilla

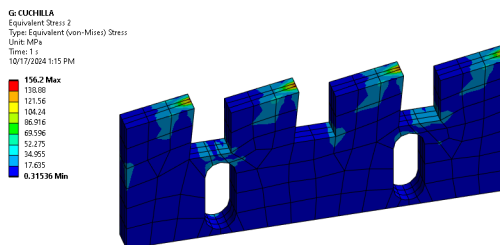


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 50: Deflexión de la cuchilla

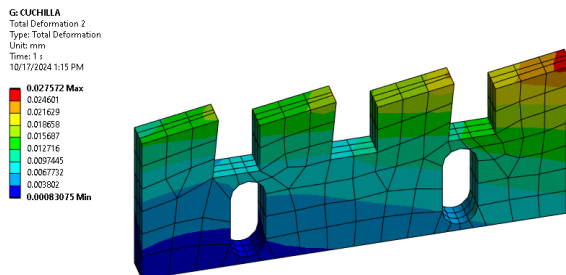


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 51: Factor de seguridad de la cuchilla

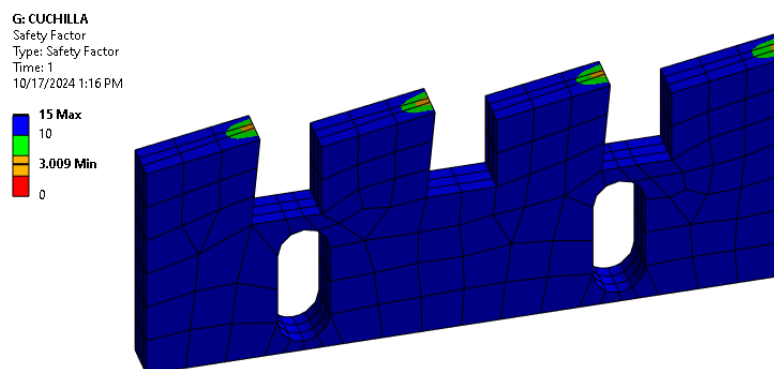


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Los resultados obtenidos muestran que la cuchilla presenta una deformación total máxima de 0.027572 milímetros, lo que indica que la deflexión no es significativa y no afectará su desempeño durante la operación. Por otro lado, el esfuerzo equivalente de von Mises máximo es de 156.2 MPa. Dado que la resistencia a la fluencia del material acero D2 es de 470 MPa, se puede calcular el factor de seguridad de la cuchilla. A través de la simulación, se determinó que este factor es de 3.009, lo que significa que la cuchilla puede soportar hasta tres veces la carga máxima esperada durante su operación, garantizando así su confiabilidad y durabilidad.

6.5.3. Carcasa

La carcasa de la máquina desetiquetadora debe soportar el peso del rotor de cuchillas y del ventilador encargado de la succión de etiquetas, lo cual es un componente de suma importancia para el diseño. La carcasa está fabricada de láminas de acero A36 con un espesor de 3/8 de pulgada. A continuación se presentan las propiedades del material.

Cuadro 17: Propiedades del acero A36

Propiedad	A 36
Densidad	7.8 g/cm^3
Módulo de Elasticidad	200 GPa
Relación de Poisson	0.26
Resistencia a la fluencia	250 MPa
Resistencia última a la tensión	475 MPa

Fuente: Matweb, 2024

Para la evaluación de la carcasa se utilizó un análisis *ANSYS Static Mechanical*. Se consideró 4 soportes fijos en la carcasa, lo cual representa la unión con la base de la estructura. Por último se ingresó las fuerzas a las que estará sometida la estructura.

Figura 52: Configuración del análisis de la carcasa

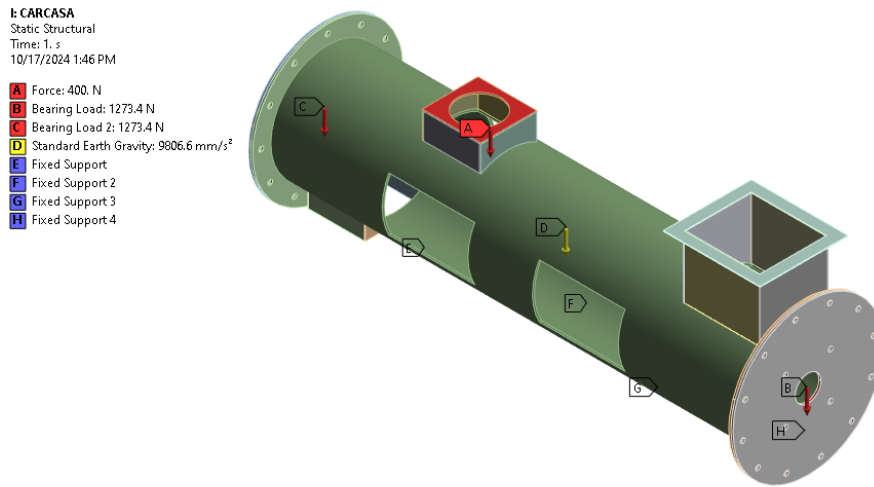


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Para evaluar la soldadura que tiene la carcasa con los aros que están pernados a la tapadera de la carcasa, se determinó el máximo de esfuerzo del corte y el esfuerzo de tensión de von Mises para encontrar el factor de seguridad de corte y de tensión para la soldadura. El número de electrodo que se usará es E60XX, el cual tiene una resistencia a la fluencia de 345 MPa (Budynas et al., 2015). Debido a la geometría de la carcasa, este tiene soldaduras en ambos extremos, por lo tanto se evalúa el extremo donde se encuentra el mayor esfuerzo de von Mises y esfuerzo máximo cortante.

Figura 53: Esfuerzo de von Mises en la soldadura de la carcasa

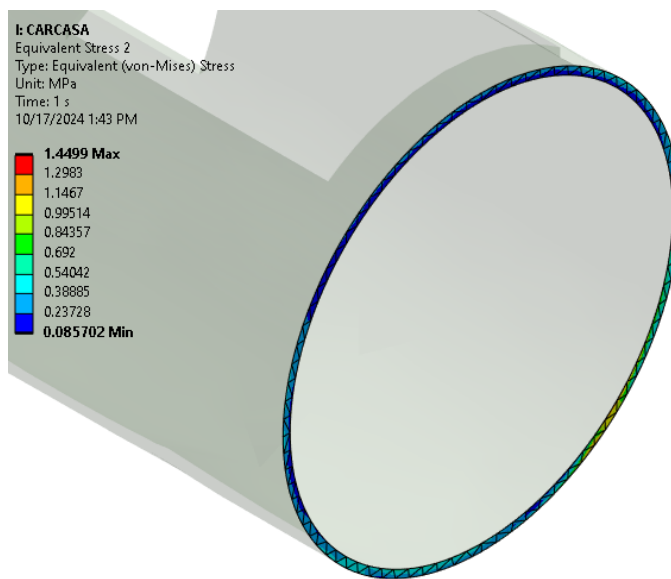


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se determina el factor de seguridad de tensión. Se utiliza la siguiente ecuación, la cual

se utiliza cuando el esfuerzo cortante en el metal base no debe exceder de $0.40S_y$ del metal base (Budynas et al., 2015).

$$n = \frac{0.4 * S_y}{\tau}$$

$$n = \frac{0.4(345MPa)}{1.45MPa} = 95$$

Figura 54: Esfuerzo de corte máximo en la soldadura de la carcasa

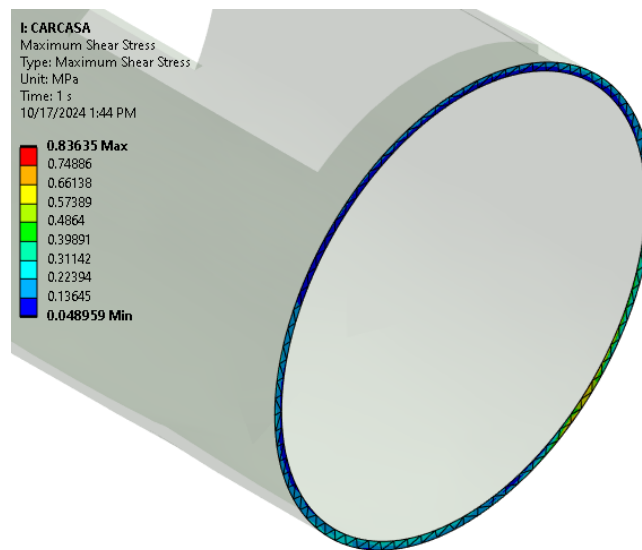


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se determina el factor de seguridad de corte.

$$n = \frac{0.4 * S_y}{\tau}$$

$$n = \frac{0.4(345MPa)}{0.84MPa} = 165$$

6.5.4. Estructura de la carcasa

La estructura donde está colocada la máquina, juega un papel crucial en dar soporte y estabilidad a la máquina. Por consiguiente, su función principal es brindar la capacidad de colocar la máquina sobre ella. La estructura está realizada por perfiles 4"x 2"x 3/16". El material que se utiliza en los perfiles es acero A500 para tubos estructurales. Se presentan las propiedades del material acero A500.

Cuadro 18: Propiedades del acero A500

Propiedad	A 500
Densidad	7.8 g/cm^3
Módulo de elasticidad	200 GPa
Relación de Poisson	0.28
Resistencia a la fluencia	345 MPa
Resistencia última a la tensión	425 MPa

Fuente: Matweb, 2024

Para la evaluación de la estructura, se llevó a cabo un análisis *Static Structural* con el objetivo de determinar el factor de seguridad de la misma. En la configuración del modelo, se emplearon contactos *Bonded* para representar uniones permanentes por soldadura, garantizando así la fidelidad del análisis respecto a las condiciones reales de ensamblaje. El peso total de la estructura se distribuyó entre los cuatro soportes principales, además de considerar el peso específico del motor eléctrico como una carga adicional. Esta configuración permite evaluar las cargas a las que estará sometida la estructura durante la operación. A continuación, se presenta la configuración detallada de la estructura utilizada para el análisis.

Figura 55: Configuración del análisis de la estructura

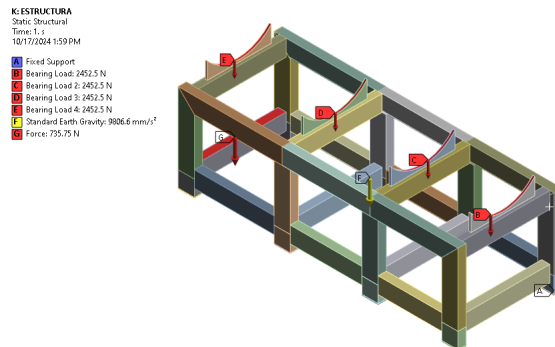


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 56: Deflexión de la estructura

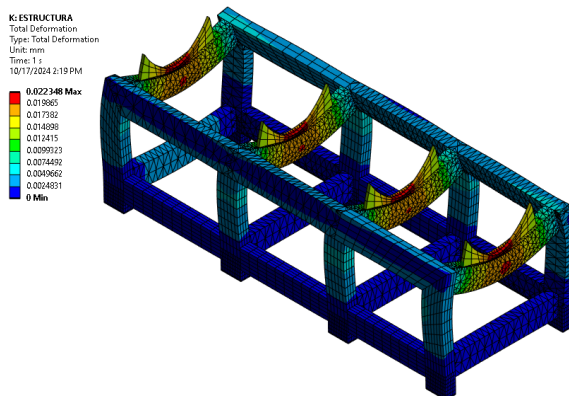


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 57: Factor de seguridad de la estructura

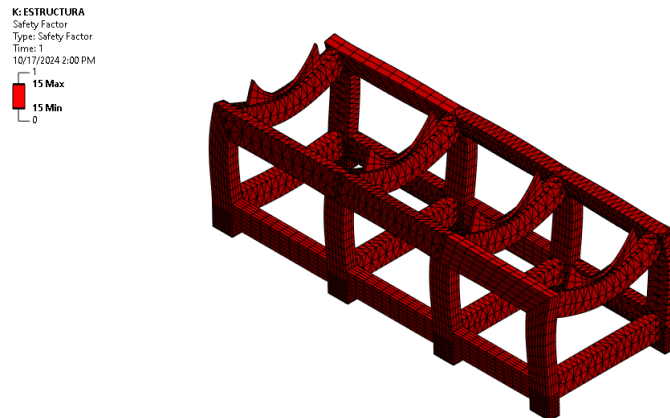


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Para evaluar la soldadura que tiene los tubos de acero estructural de la estructura base, se determinó el máximo de esfuerzo del corte y el esfuerzo de tensión de von Mises para encontrar el factor de seguridad de corte y de tensión para la soldadura. El número de electrodo que se usará es E60XX, el cual tiene una resistencia a la fluencia de 345 MPa (Budynas et al., 2015). Debido a que la unión de los tubos es por medio de soldadura, se toma el mayor valor del esfuerzo de von Mises y esfuerzo máximo cortante encontrado en las uniones soldadas.

Figura 58: Esfuerzo de von Mises en la soldadura de la estructura base

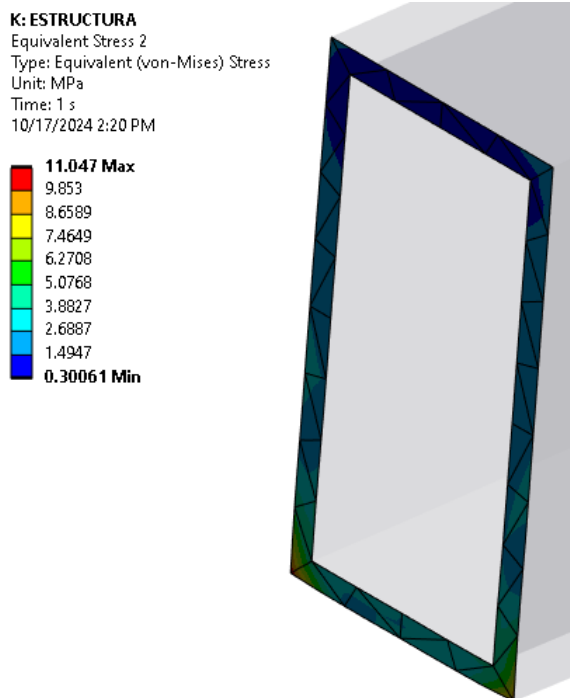


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se determina el factor de seguridad de tensión. Se utiliza la siguiente ecuación, la cual se utiliza cuando el esfuerzo cortante en el metal base no debe exceder de $0.40S_y$ del metal base (Budynas et al., 2015).

$$n = \frac{0.4 * S_y}{\tau}$$

$$n = \frac{0.4(345MPa)}{11.04MPa} = 13$$

Figura 59: Esfuerzo de corte máximo en la soldadura de la estructura base

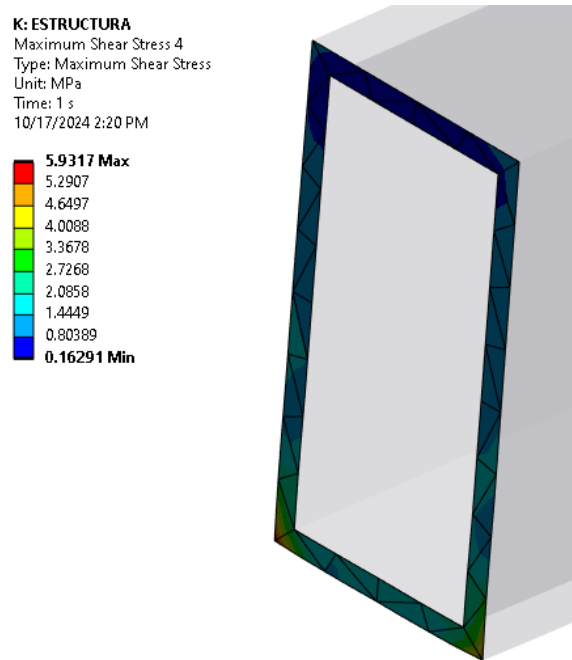


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se determina el factor de seguridad de corte.

$$n = \frac{0.4 * S_y}{\tau}$$

$$n = \frac{0.4(345MPa)}{5.93MPa} = 23.27$$

Los resultados del análisis indican que la estructura base es capaz de soportar adecuadamente la carga generada por el peso total de la máquina. Además, se determinó que la deformación máxima de la estructura es de 0.021 milímetros, lo que confirma su rigidez y estabilidad durante la operación. El factor de seguridad mínimo obtenido es 15 en la estructura y en la soldadura es 13, lo que garantiza un margen amplio de seguridad, asegurando que la estructura pueda operar de manera confiable.

7.1. Requisitos

Cuadro 19: Requisitos de la máquina desetiquetadora

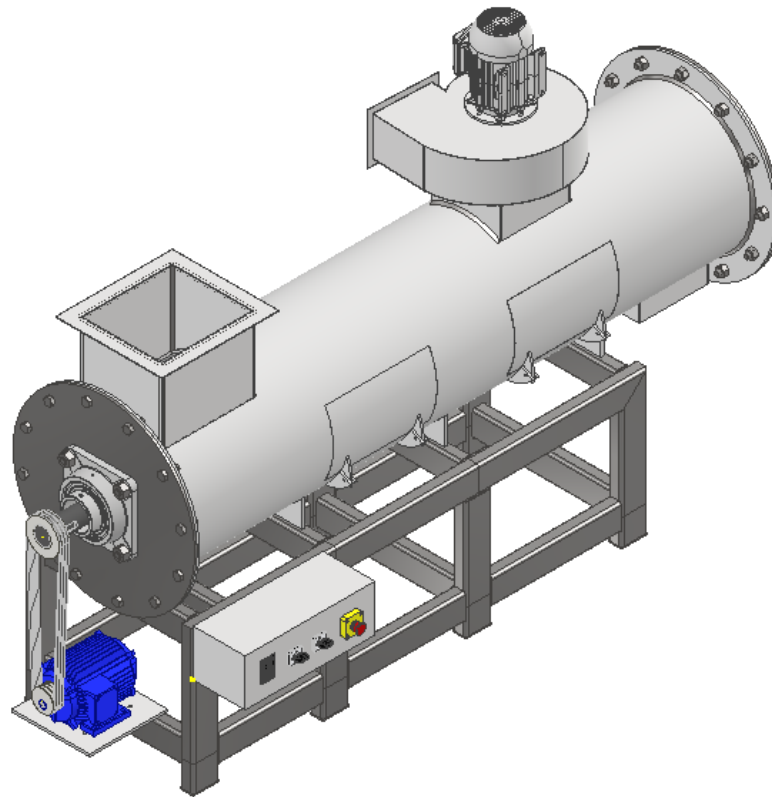
Código	Requisito	Cumple
MD-D01	La longitud de la máquina debe estar entre 2.2 metros a 3 metros.	✓
MD-D02	El ancho de la máquina debe estar entre 0.5 metros a 1 metro.	✓
MD-D03	La altura de la máquina está entre 1.2 metros a 3 metros.	✓
MD-D04	La máquina desetiquetadora maneja como mínimo de 150 kg/h.	✓
MD-D05	Las cuchillas deben ser intercambiables.	✓
MD-C01	El costo de la máquina no excederá de Q200,000.00.	✓
MD-U01	El usuario debe utilizar el equipo de protección personal especificado en el manual de uso de la máquina.	✓
MD-S01	La máquina será accionada por un panel de control.	✓
MD-S02	El rotor de cuchillas está cubierto por puertas.	✓

Fuente: Elaboración propia

7.2. Diseño final

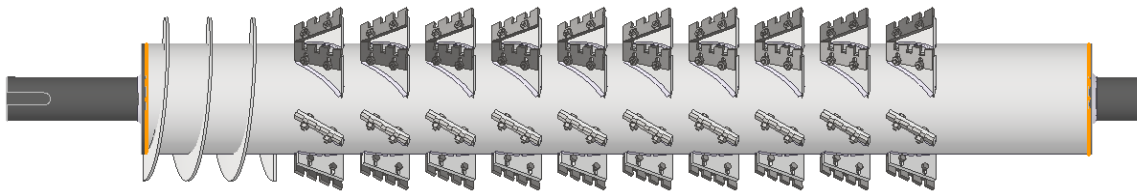
Se consideró un diseño para la desetiquetadora con cuchillas intercambiables, tanto las móviles como las fijas.

Figura 60: Máquina desetiquetadora



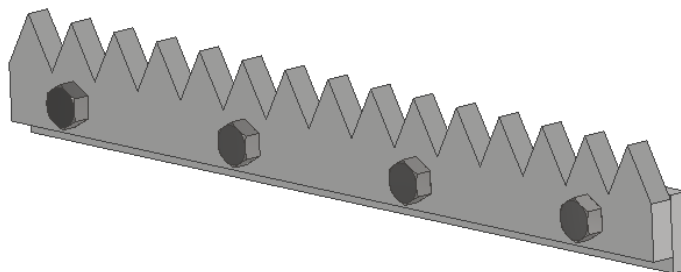
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 61: Rotor de cuchillas



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 62: Ensamble de cuchillas fijas



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

7.3. Cálculos

7.3.1. Factores de seguridad

El factor de seguridad de la máquina desetiquetadora sería mayor o igual a 1.9.

Cuadro 20: Factores de seguridad de los elementos

Elemento	Factor de seguridad	Cumple
Eje	2.56	✓
Cuña	27	✓
Pernos	13.32	✓
Cuchillas	3.009	✓
Soldadura - Carcasa	95.17	✓
Soldadura - Tambor	230	✓
Soldadura - Estructura	13	✓

Fuente: Elaboración propia

7.3.2. Fuerza de corte de cuchillas

Se presentan los resultados de la fuerza de corte necesaria para cortar las etiquetas de botellas PET de 600 ml. Se encontró la fuerza requerida y la fuerza que provee el motor de 7.5 HP.

Cuadro 21: Fuerza de corte

Variable	Valor	Dimensional
Fuerza requerida para cortar las etiquetas	0.04	N
Fuerza de las cuchillas	656.51	N
Fuerza radial de las cuchillas	568.56	N
Fuerza axial de las cuchillas	328.26	N
Torque	131.30	Nm
Revoluciones por minuto	400	rpm

Fuente: Elaboración propia

En relación a la fuerza de las cuchillas, esto se cálculo en base a la potencia que tiene el motor y a las revoluciones que estaría girando el rotor de cuchillas. La razón por la cuál la fuerza requerida para cortar las etiquetas varía mucho a la fuerza que tendrán las cuchillas es debido a que la resistencia al corte de las cuchillas es 3 MPa y su espesor es de 0.07 milímetros. Por lo tanto, no representa una fuerza significativa para cortar este material. Además, la fuerza que las cuchillas poseen es a causa de la potencia que brinda el motor.

7.3.3. Potencia requerida

A continuación se muestra el desglose de la potencia requerida y el motor seleccionado para la aplicación de desetiquetado para una máquina de 150 kg/h.

Cuadro 22: Potencia requerida

Variable	Valor	Dimensional
Potencia requerida para cortar las etiquetas en 60 cuchillas	0.02	kW
Potencia requerida para girar el rotor	3.34	kW
Potencia de mantenimiento	0.01	kW
Potencia total requerida	3.37	kW
Eficiencia del motor	80.00 %	
Potencia real requerida	4.21	kW

Fuente: Elaboración propia

La potencia requerida para la operación establecida es 4.21 kW, sin embargo, debido a la disponibilidad comercial, se escoge un motor de 5.5 kW. Esta decisión se tomó en base a que es la opción más cercana dentro de los motores eléctricos estandarizado, lo cual promete satisfacer las necesidades de la operación.

7.3.4. Poleas y fajas

Se presentan las dimensiones de las poleas seleccionadas y el tipo de faja requerida.

Cuadro 23: Poleas y faja

Componente	Especificación	Dimensional
Faja	A68	
Número de fajas	4	
Polea del motor	4B38SD	
Polea del motor	4.2	in
Polea del eje	4B86SK	
Polea del eje	9	in

Fuente: Elaboración propia

7.3.5. Eje

Para el diseño del eje del rotor de cuchillas, se realizó el análisis de las fuerzas a las cuales estaría sometido el eje. Las fuerzas incluyen la fuerza que ejerce la polea en el eje, el peso del eje, el peso del rotor, y las reacciones de los cojinetes en el eje.

Cuadro 24: Fuerzas en el eje

Fuerza	Valor	Dimensional
W_{eje}	771.44	N
W_{rotor}	1775.35	N
F_{polea}	2395.32	N
R_a	3931.38	N
R_b	1010.72	N

Fuente: Elaboración propia

El análisis para la selección del diámetro del eje fue un factor crucial en el diseño de la máquina desetiquetadora con capacidad de 150 kg/h. Ya que el eje tiene una longitud de 2.6 metros, se identificó el punto crítico de flexión en la mitad de su longitud, siendo esta la zona de máxima deflexión. Mediante del teoría de Goodman, se estableció un diámetro de 70 milímetros, con un factor de seguridad de 2.56.

7.3.6. Cojinetes

Se presenta el cojinete seleccionado para esta aplicación. El cojinete seleccionado es FYJ 70 TF de la empresa SKF.

Cuadro 25: Especificaciones del cojinete

Variable	Valor	Dimensional
Vida útil	20000	horas
Diámetro interno	70	mm
Carga dinámica del cojinete	62.4	kN
Carga dinámica de diseño	23	kN

Fuente: Elaboración propia

7.3.7. Cuña

Se seleccionó la cuña de soporte para la polea. La cuña será fabricadas en acero AISI 1018 maquinado en frío. Las dimensiones de la cuña están basadas en el estándar DIN 6885. El estándar provee medidas de las cuñas acorde al diámetro del eje.

Cuadro 26: Dimensiones de cuña

Variable	Valor	Dimensional
Longitud	40	mm
Alto	20	mm
Ancho	12	mm

Fuente: Elaboración propia

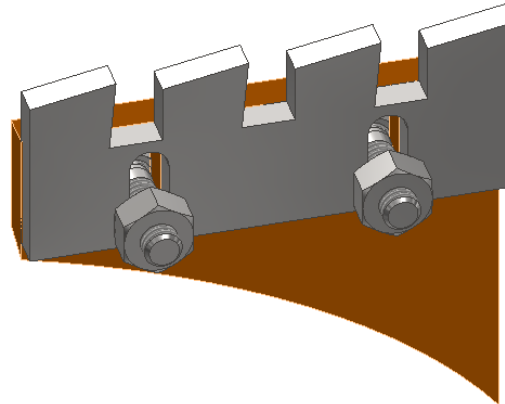
7.3.8. Soldadura

La soldadura requerida para realizar la unión permanente de la tolva de entrada, tolva de salida, tolva del ventilador, aros de la carcasa y carcasa, tiene un espesor de 1/4 de pulgada. Para la soldadura requerida para posicionar las cuchillas móviles, cuchillas fijas y hélice helicoidal se necesita un espesor de 1/8 de pulgada. Esta soldadura se llevaría acabo con un electrodo E6013.

7.3.9. Cuchillas

Para el diseño de cuchillas, se consideró que el material para las cuchillas sería AISI D2, para el soporte sería acero A36 y los pernos serían de acero galvanizado de diámetro de 3/8 de pulgadas.

Figura 63: Ensamble cuchilla



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

7.3.10. Ventilador

Se selecciona el modelo PB8 de la empresa Cincinnati, debido a que la fuerza de succión es mayor a la fuerza de rozamiento de la etiqueta. Se seleccionó este ventilador porque es el modelo que tiene menor masa y este al estar situado sobre la carcasa, se buscó disminuir las cargas sobre la carcasa. Además, el consumo eléctrico es menor y representa una mejora de costos en la operación diaria de la línea de reciclaje.

7.4. Presupuesto

Se consideró la importación de componentes como el motor eléctrico, ventilador, cojinetes y poleas, dado que en Guatemala no se disponía de las especificaciones requeridas para estos elementos. La compra a través de distribuidores locales habría incrementado el costo, ya que se aplicaría un margen de ganancia adicional por parte de los distribuidores. Por esta razón,

se tomó la decisión de cotizar estos componentes directamente del mercado internacional. Los costos de importación incluyen el impuesto al valor agregado (IVA) del 12% y los derechos arancelarios a la importación (DAI), los cuales varían según el tipo de artículo importado. Sin embargo, para los componentes seleccionados, se aplicó 0% de arancel, de acuerdo con su clasificación dentro de las partidas arancelarias establecidas por la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT). El envío se cotizó a través de la empresa de logística Ya Llegó para determinar el valor del flete aéreo hacia Guatemala. En el presupuesto final, se consideró tanto el valor de los artículos como los impuestos correspondientes, garantizando un cálculo preciso del costo total de importación.

Cuadro 27: Presupuesto de los componentes y materia prima

Elemento	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Motor eléctrico	7.5 hp 880 rpm WEG	1	Q11,691.80	Q11,691.80
Banda	BANDO A68	4	Q44.00	Q176.00
Polea	B&B Manufacturing® polea de 4.2 in	1	Q562.73	Q562.73
Polea	B&B Manufacturing® polea de 9 in	1	Q1,029.96	Q1,029.96
Chumacera	FYJ 70 TF	2	Q3,854.00	Q7,708.00
Eje	AISI 1018 70 mm de 2.60 m.	1	Q3,854.00	Q3,854.00
Cuchilla fija	Acero D2	48	Q167.00	Q8,016.00
Perno	Perno hexagonal 5/16 - 0.875	192	Q4.96	Q952.32
Tuerca	Tuerca hexagonal 5/16	192	Q1.62	Q311.04
Cuchilla móvil	Acero D2	60	Q81.44	Q4,886.40
Perno	Perno hexagonal 3/8 - 1.25	120	Q11.20	Q1,344.00
Tuerca	Tuerca hexagonal 3/8	120	Q1.62	Q194.40
Perno	Perno hexagonal 5/8 - 2	8	Q40.97	Q327.76
Tuerca	Tuerca hexagonal 5/8	8	Q12.46	Q99.68
Perno	Perno hexagonal 3/4 - 2	12	Q50.42	Q605.04
Tuerca	Tuerca hexagonal 3/4	12	Q17.18	Q206.16
Lámina	Lámina A36 4x8 pies con 3/8" de espesor	2	Q2,252.50	Q4,505.00
Lámina	Lámina A36 3x6 pies con 1/4" de espesor	2	Q1,954.58	Q3,909.16
Tubo rectangular	Tubo estructural 4x2 con 3/16" de espesor	3	Q888.11	Q2,664.33
Hierro plano	Hierro plano de 1/4 x 1 in AG	2	Q396.00	Q792.00
Variador de frecuencia	PI500-7R5G2 10 HP	1	Q5,611.00	Q5,611.00
Botón de emergencia	Pulsador hongo - NP8- 01ZS/14	1	Q72.00	Q72.00
Flipón principal	Flipón industrial - NM1-125S-050A	2	Q394.00	Q788.00

Elemento	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Cuña	AISI 1018	1	Q180.00	Q180.00
Guarda motor	Guarda motor 37-50 A - NS2-80 37-50A	2	Q689.00	Q1,378.00
Panel de control	Caja metálica 500*400*200	1	Q600.00	Q600.00
Ventilador	Ventilador Cincinnati PB8	1	Q5,035.53	Q5,035.53
Total				Q80,264.62

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la mano de obra de las cuchillas móviles, se tomó en consideración que las cuchillas tendrán un proceso de corte plasma para la geometría externa de la cuchillas y para las correderas se realiza un fresado. La empresa Transmetales CNC, provee el servicio de corte plasma y un taller mecánico brinda el servicio de fresado, el cual por cuchilla es Q150.00 y por corredera es Q20.00. Este proceso se realiza para 60 cuchillas, las cuales tienen dos correderas cada una, por lo tanto el costo de mano de obra de las cuchillas móviles es Q11,400.00.

Para definir el costo de la manufactura de las cuchillas fijas, se tomó en consideración que llevarán un proceso de corte plasma y fresado para colocar agujeros para los pernos. La empresa Transmetales CNC, indica que el corte tendría un costo de Q165.00 y un taller mecánico indica que el fresado de los agujeros tiene un costo de Q5.00. Para este proceso se realizan 48 cuchillas fijas, dando como resultado Q8,880.00 el costo de manufactura.

En relación al costo del soporte de cuchillas móvil, la empresa Transmetales CNC indica que el costo del corte plasma es de Q125.00. Ahora, un taller mecánico, indica que se puede realizar la curvatura por medio de un fresado, este tendría un costo de Q60.00 y el costo por corredera es de Q20.00. Se encuentran 60 soportes de cuchillas alrededor del rotor, por lo tanto el costo es Q13,500.00. En relación al costo del soporte de la cuchilla fija, se estima que este es alrededor de Q1.00 a Q2.00 por soporte de cuchilla fija. La razón por la cual es de esta manera es porque el proveedor Novex vende platinas de 1/4 x 1 de hierro plano. Por lo tanto se considera el costo de corte para dividir la platin. Por lo tanto el costo de la mano de obra para los soportes de cuchilla fija es Q48.00.

Para determinar el costo de manufactura del cilindro de la carcasa y del tambor del rotor, se cotizó un proceso de rolado por medio de MultiGroup. El costo de rolado para el cilindro de la carcasa es Q1,000.00 y el costo de rolado para el tambor del rotor es Q440.00.

Para establecer el costo de 2 tapaderas del cilindro y de los 2 aros del cilindro de la carcasa, se realizó una cotización con Transmetales CNC, donde por medio de corte plasma de las 4 piezas, se tiene un costo de Q1,250.00. Además, se cotizó el costo para los discos que están en el rotor, el cual es Q300.00 y se cotizó los cortes que tiene la hélice, estos tienen un costo de Q425.00. Con relación al costo de la tolva de entrada, tolva de salida y tolva del ventilador, se cotizó con Transmetales CNC, donde el costo por las piezas de las 3 tolvas da un sumatoria de Q2,100.00.

Para la manufactura de la cuña, se considera un taller mecánico y tiene un costo de

Q125.00. Para determinar el costo de mano de obra del eje, se debe considerar un rectificador para que no dañe la integridad de la chumacera al ser instalada y la ranura para la cuña. El costo para estos procedimientos es Q700.00.

La máquina desetiquetadora considera unión permanente soldada, por lo tanto, mediante el uso del software Autodesk Inventor (®), se encontró la longitud de las soldaduras correspondientes, el cual es 2254 pulgadas. El precio por pulgada a soldar es Q2.25. Gustavo Pineda, provee el servicio de soldadura al precio mencionado. El costo total de la soldadura es Q5071.50.

Cuadro 28: Costo de manufactura

Componente	Costo
Cuchillas móviles	Q11,400.00
Cuchillas fijas	Q8,880.00
Soporte cuchilla móvil	Q13,500.00
Soporte cuchilla fija	Q48.00
Carcasa	Q1,000.00
Tambor	Q440.00
Tapadera y aro	Q1,250.00
Tolvas	Q2,100.00
Soporte para carcasa	Q400.00
Cuña	Q125.00
Eje	Q700.00
Discos	Q300.00
Hélice	Q425.00
Soldadura	Q5,071.50
Total	Q45,639.50

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 29: Presupuesto final

Elemento	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Motor eléctrico	7.5 hp 880 rpm WEG	1	Q11,691.80	Q11,691.80
Banda	BANDO A68	4	Q44.00	Q176.00
Polea	B&B Manufacturing® polea de 4.2 in	1	Q562.73	Q562.73
Polea	B&B Manufacturing® polea de 9 in	1	Q1,029.96	Q1,029.96
Chumacera	FYJ 70 TF	2	Q3,854.00	Q7,708.00
Eje	AISI 1018 70 mm de 2.60 m	1	Q3,854.00	Q3,854.00
Cuchilla fija	Acero D2	48	Q167.00	Q8,016.00
Perno	Perno hexagonal 5/16 - 0.875	192	Q4.96	Q952.32
Tuerca	Tuerca hexagonal 5/16	192	Q1.62	Q311.04
Cuchilla móvil	Acero D2	60	Q81.44	Q4,886.40

Elemento	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Perno	Perno hexagonal 3/8 - 1.25	120	Q11.23	Q1,347.60
Tuerca	Tuerca hexagonal 3/8	120	Q1.02	Q122.40
Perno	Perno hexagonal 5/8 - 2	8	Q40.97	Q327.76
Tuerca	Tuerca hexagonal 5/8	8	Q12.46	Q99.68
Perno	Perno hexagonal 3/4 - 2	12	Q50.42	Q605.04
Tuerca	Tuerca hexagonal 3/4	12	Q17.18	Q206.16
Lámina	Lámina A36 4x8 pies con 3/8"de espesor	4	Q2,622.50	Q10,490.00
Lámina	Lámina A36 3x6 pies con 1/4"de espesor	2	Q1,964.58	Q3,929.16
Tubo rectangular	Tubo estructural 4x2 con 3/16"de espesor	3	Q888.11	Q2,664.33
Hierro plano	Hierro plano de 1/4 x 1 in AG	2	Q79.00	Q158.00
Variador de frecuencia	PI500-7R5G2 10 HP	1	Q5,611.00	Q5,611.00
Botón de emergencia	Pulsador hongo - NP8-01ZS/14	1	Q72.00	Q72.00
Flipón principal	Flipón industrial - NM1-125S-050A	2	Q394.00	Q788.00
Cuña	AISI 1018	1	Q180.00	Q180.00
Guarda motor	Guarda motor 37-50 A - NS2-80 37-50A	2	Q689.00	Q1,378.00
Panel de control	Caja metálica 500*400*200	1	Q600.00	Q600.00
Ventilador	Ventilador Cincinnati PB8	1	Q5,035.53	Q5,035.53
Materiales				Q80,264.62
Manufactura				Q45,639.50
Flete aéreo y trámites aduanales				Q3,923.33
Total				Q129,827.44

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados o discusión

El diseño de la máquina desetiquetadora para la línea de reciclaje de botellas de PET fue evaluado en función de los requisitos establecidos. Con respecto al requisito MD-01, se determinó que las dimensiones del eje, las cuales definen la longitud de la máquina, se ajustaron para que esta alcanzara un largo de 2.6 metros, cumpliendo así con la especificación D01, que estipulaba una longitud máxima de entre 2.2 y 3.3 metros. Este ajuste garantiza que la máquina pueda procesar 150 kg/h de botellas de PET de 600 mililitros sin incrementar innecesariamente el tamaño de la estructura, lo que facilita su integración en el entorno de la planta de reciclaje. Además, esta longitud proporcionó el espacio necesario para incluir el posicionamiento de 60 cuchillas alrededor del rotor, lo cual es fundamental para una desetiquetadora con una capacidad de procesamiento de entre 100 y 200 kg/h.

En cuanto a los requisitos MD-D02 y MD-D03, estos se definieron en función de la distancia entre las cuchillas móviles y las cuchillas fijas, con el propósito de proporcionar el espacio necesario para que las botellas se procesen con un flujo continuo. La correcta posición de las cuchillas asegura el encaminamiento adecuado de las botellas hacia la tolva de salida, evitando paros en la producción por obstrucciones o acumulación de botellas. Además, se consideraron parámetros adicionales, como el ángulo de inclinación y las dimensiones de las cuchillas móviles y fijas, los cuales influyen directamente en la calidad del proceso de desetiquetado y en la capacidad de la máquina.

El requisito MD-D04 establece que la máquina desetiquetadora debe tener una capacidad mínima de manejo de 150 kg/h, cumpliendo con el requerimiento establecido por el ingeniero de sistemas encargado de supervisar el diseño de la planta. En el diseño de la máquina se consideraron varios factores clave para garantizar esta capacidad. El primer factor fue la tolva de entrada, cuyo diseño permite colocar hasta cinco botellas simultáneamente, asegurando un flujo constante de dos botellas por segundo. Otro factor importante fue el diseño de una hélice helicoidal, para lo cual se realizó un proceso iterativo que permitió establecer las dimensiones adecuadas, de modo que la hélice pudiera manejar el flujo de dos botellas

por segundo. Además, se tomó en cuenta el número de cuchillas posicionadas alrededor del rotor y su material, así como las revoluciones por minuto (RPM) del rotor y la potencia requerida para alcanzar dichas RPM. El material de las cuchillas es acero D2, conocido por su durabilidad y uso en aplicaciones de corte en la industria.

Con respecto al requisito MD-05, se implementó el diseño de cuchillas intercambiables con el propósito de facilitar el mantenimiento y garantizar la eficiencia operativa. Esta característica permite que las cuchillas sean afiladas o reemplazadas de manera sencilla, optimizando los tiempos de inactividad en caso de desgaste. Además, se consideró la capacidad de ajustar la posición de las cuchillas según el espacio requerido para el procesamiento de las botellas, así como el ángulo de apertura necesario para asegurar un corte preciso. Desde una perspectiva de costos de mantenimiento, el diseño de las cuchillas intercambiables resulta beneficioso, ya que ofrece una solución más económica al permitir el reemplazo individual de las cuchillas, en lugar de tener que sustituir el rotor completo, lo que reduce considerablemente los costos asociados a posibles fallos en el sistema de corte.

En relación con el requisito MD-C01, que establece que el costo de la máquina no debe exceder los Q200,000.00, el análisis del presupuesto revela una inversión total de Q129,827.44, distribuida entre materiales (Q80,264.62), costos de manufactura y mano de obra (Q45,639.50), costos de flete y trámites aduanales (Q3,923.33). Este resultado confirma que se ha cumplido con el requisito, logrando mantener el costo del proyecto dentro del límite establecido. Para alcanzar esta meta, se adoptó un enfoque de reducción de costos que implicó la comparación entre diferentes proveedores, priorizando aquellos productos con la mejor relación costo-beneficio. La selección de componentes se basó no solo en su precio, sino también en su disponibilidad nacional e internacional, y calidad,

El requisito MD-U01 establece que los usuarios de la máquina desetiquetadora deben utilizar el equipo de protección personal (EPP) especificado en el manual de uso. Este equipo es fundamental para garantizar la seguridad del operador durante el funcionamiento de la máquina, dado que esta contiene elementos mecánicos móviles, como cuchillas y el rotor, que presentan riesgos de corte, atrapamiento y contacto con botellas dañadas. Además, el ventilador, que opera a un nivel de ruido de 74 dB, implica riesgos auditivos. El uso adecuado del EPP, que incluye guantes, gafas de seguridad, casco y protección auditiva, reduce significativamente el riesgo de lesiones graves. El cumplimiento estricto de este requisito no solo promueve un ambiente de trabajo seguro, sino que también asegura el respeto a las normativas de salud y seguridad laboral vigentes.

Los requisitos de seguridad MD-S01 y MD-S02 se centran en garantizar un manejo seguro y controlado de la máquina desetiquetadora. El requisito MD-S01 establece que la máquina debe ser operada a través de un panel de control, el cual es fundamental para el correcto funcionamiento del equipo. Este panel está estratégicamente ubicado al lado de la máquina, permitiendo un acceso rápido y sencillo en caso de emergencias. El panel permite a los operadores iniciar y detener el funcionamiento de la máquina de manera segura y eficiente, además de integrar funciones clave, como la activación de los sistemas de seguridad, incluido el botón de emergencia, y la regulación de la velocidad del rotor mediante un variador de frecuencia, otorgando así un control total sobre el proceso. La centralización de estas operaciones minimiza la necesidad de intervención manual directa en las partes móviles de la máquina, reduciendo significativamente el riesgo de accidentes durante su uso. Por otro lado, el requisito MD-S02 establece que el rotor de cuchillas, siendo el componente más crítico

y peligroso de la máquina, debe estar cubierto por puertas protectoras. Estas puertas actúan como una barrera física para evitar el acceso no autorizado o accidental a las cuchillas mientras están en movimiento. Además, están equipadas con un sistema de cerradura de seguridad que solo se permite su apertura cuando la máquina está completamente desconectada, garantizando así un entorno seguro tanto para los operadores como para el personal de mantenimiento. La implementación de estos dos requisitos asegura que la máquina pueda ser operada de manera segura, minimizando los riesgos para todos los involucrados en su operación y mantenimiento.

En el proceso de diseño del eje para la máquina desetiquetadora, se determinaron diversos factores a través de un proceso iterativo para definir las dimensiones óptimas del eje. En primer lugar, se identificaron los factores que influyen en el límite de resistencia a la fatiga, lo cual permitió calcular el límite de resistencia a la fatiga en la sección crítica del eje. En segundo lugar, se realizó un análisis detallado de la sección crítica, ubicada en la mitad del eje. Esta sección fue seleccionada debido a que es donde se experimenta el mayor momento de flexión y deformación. Dado que el eje es uniforme, cualquier variación en su diámetro está directamente relacionada con la potencia requerida, ya que un aumento de diámetro implica mayor masa y, por ende, un mayor momento de inercia.

El proceso de determinación del diámetro del eje también consideró la deflexión del mismo como un parámetro crítico, debido a su longitud de 2.6 metros. Por su propio peso y longitud, el eje tiende a flexionarse, por lo que se determinó un diámetro de 70 milímetros. Este valor fue seleccionado utilizando el criterio de Goodman, el cual ofrece un enfoque conservador que garantiza la seguridad y confiabilidad del diseño del eje. Un aspecto crucial en el diseño fue la deflexión transversal máxima permitida, que estaba influenciada tanto por la sección transversal del eje como por su peso. Después de iterar con diferentes diámetros, se estableció que la deflexión máxima aceptable era de 5.2 milímetros, y el diámetro de 70 milímetros resultó en una deflexión de 3.56 milímetros, asegurando que el eje se mantuviera dentro de los parámetros aceptables.

Finalmente, al aplicar el criterio de Goodman para este diámetro, se determinó que el factor de seguridad en la sección crítica del eje es de 2.6. Es importante señalar que, aunque el factor de seguridad podría reducirse al aumentar la carga, es esencial monitorear la deflexión transversal para evitar la fractura o daño del eje.

En el proceso de selección de las poleas, se consideraron diferentes proveedores, entre ellos Bando y Martin. Finalmente, se optó por Bando debido a su accesibilidad en el mercado guatemalteco. Para la selección de las poleas, se determinó que las poleas tipo V-belt eran las más adecuadas, ya que ofrecen un alto nivel de agarre y tracción durante la operación, además de requerir un bajo mantenimiento, lo cual reduce los costos operativos y minimiza el tiempo de inactividad en la producción. Inicialmente, se contempló el uso de fajas modelo 3VX. Sin embargo, según el proveedor local INCAPROSA, este modelo es escaso en Guatemala. Por lo tanto, el proveedor sugirió el uso de fajas A o B, dado que para un motor de 7.5 HP, estas fajas son más adecuadas. Las fajas modelo VX son recomendadas para motores de 10 HP en adelante, que operan a mayores revoluciones por minuto.

Con esta recomendación, se determinó la necesidad de utilizar cuatro fajas modelo A68. Sin embargo, INCAPROSA no dispone de poleas con 4 ranuras, solo con 2, lo que llevó a considerar la opción de importarlas. El proveedor Bando sugiere adquirir las poleas a través

de B&B Manufacturing®), que ofrece los modelos 4B86SK y 4B38SD, con diámetros de 9 pulgadas y 4.2 pulgadas, respectivamente. Las poleas seleccionadas tienen una relación de 2.14. Para la transmisión de potencia, se consideró una reducción desde una velocidad de motor de 880 rpm hasta 400 rpm, lo que resulta en una relación de reducción de 2.2. Esto demuestra que la relación obtenida con las poleas seleccionadas representa un acercamiento significativo al valor requerido.

En cuanto a los factores de seguridad de las piezas, es fundamental verificar su cumplimiento con el factor de seguridad determinado mediante el criterio de Ullman, el cual se estableció en 1.9. Este valor sirve como un punto de referencia crucial para comparar los factores de seguridad calculados en cada componente. Al realizar esta comparación, se concluyó que todos los factores de seguridad obtenidos superan el valor establecido por el criterio de Ullman. Esto garantiza que los componentes de la máquina desetiquetadora no solo cumplen con el requisito mínimo, sino que también ofrecen un margen adicional de confiabilidad. El diseño de los componentes asegura que el equipo puede soportar las condiciones de operación previstas sin comprometer su integridad estructural, lo que permite replicar el diseño de manera confiable.

Para el diseño de las cuchillas, se tomó como referencia el modelo proporcionado por el proveedor Fangtai en China. Las cuchillas presentan dos modelos: cuchillas no intercambiables y cuchillas intercambiables. Con el objetivo de reducir los costos de mantenimiento y minimizar el tiempo de inactividad durante la operación, se diseñaron soportes de cuchilla con correderas, junto con cuchillas ajustables, para que estas sean intercambiables. Este diseño permite ajustar la altura de las cuchillas según los requerimientos específicos del proceso, en función de las dimensiones y características de las botellas a procesar en la máquina desetiquetadora.

En el proceso de diseño de cuchillas, se determinó la fuerza necesaria para cortar las etiquetas, así como la fuerza y el torque a los que las cuchillas están sometidas debido a la velocidad y potencia del motor. Estos parámetros permitieron realizar simulaciones utilizando el software ANSYS, con el fin de evaluar el factor de seguridad de las cuchillas. Los resultados del análisis en ANSYS indicaron que las cuchillas presentan un factor de seguridad de 3.009, lo que confirma su capacidad para soportar las cargas previstas durante la operación. Este margen de seguridad garantiza que las cuchillas puedan desempeñarse de manera eficiente y segura, asegurando la durabilidad del componente a lo largo del ciclo operativo.

Con el propósito de realizar una comparativa entre una máquina desetiquetadora de 150 kg/h fabricada por Fangtai en China y la máquina desetiquetadora diseñada en este proyecto, se obtuvo una cotización con un precio FOB de 4,700 dólares. No obstante, es necesario considerar los costos adicionales asociados a la importación de esta máquina desde China hacia Guatemala. Entre estos se incluyen los costos de transporte desde la fábrica hasta el puerto de Xingang, China, los gastos de trámites aduanales en dicho puerto, el flete marítimo, los trámites aduanales en Guatemala, el transporte desde el puerto hacia la planta en Guatemala y los impuestos relacionados con la importación del producto. Se estima que los costos de transporte y trámites ascienden a 5,000 dólares.

Además, se deben incluir los impuestos aplicables, que comprenden el impuesto al valor agregado (IVA) del 12% y los derechos arancelarios a la importación (DAI) del 15%, lo que

suma un total de 1,269 dólares en impuestos. En consecuencia, el costo total de la máquina desetiquetadora fabricada por Fangtai asciende a 10,969 dólares, equivalentes a 84,906.54 quetzales. Por otro lado, para la máquina desetiquetadora diseñada en este proyecto, el costo de los componentes y materiales asciende a Q80,264.62 quetzales, mientras que el costo de la mano de obra es de Q45,639.50 quetzales, y el costo del flete aéreo y los trámites aduanales es de Q3,923.33 dando un total de Q129,827.44 quetzales.

1. Se diseñó una máquina desetiquetadora con las siguientes dimensiones: 2.6 metros de longitud, 0.7 metros de ancho y 1.6 metros de altura. La tolva de entrada está a una altura de 1.2 metros y la tolva de salida está a una altura de 0.5 metros. Esta tiene una capacidad mínima de procesamiento de 150 kg/h, cumpliendo con los requerimientos establecidos.
2. Se diseñaron cuchillas móviles intercambiables de acero D2 que tienen 4 dientes con las siguientes dimensiones: 120 milímetros de longitud, 9.525 milímetros de espesor y 50 milímetros de altura. Estas pueden soportar una fuerza de 656 newtons con un factor de seguridad de 3.009. Estas permiten ser ajustadas a la altura requerida de la operación en función de las características de la botella.
3. Se diseñó un tambor en el rotor con cuchillas con un diámetro exterior de 250 milímetros y de 2 metros de longitud, con un factor de seguridad 15, este puede soportar la fuerza ejercida por el peso de los componentes, la cual es 560 newtons, lo que asegura su confiabilidad durante la operación, sin fallo estructural.
4. El diseño de la máquina desetiquetadora se completó con un costo de fabricación de Q129,827.44. el cual cumple con el requerimiento de un costo total de fabricación inferior a Q200,000.00. La selección adecuada de materiales y componentes, junto con la colaboración de proveedores tanto nacionales como internacionales, permitió reducir los costos de fabricación de la máquina.
5. Se desarrolló un manual de usuario que proporciona instrucciones sobre la utilización de la máquina desetiquetadora, garantizando así la seguridad de los operadores y la integridad de la máquina.
6. Se establecieron los planos de fabricación y ensamblaje de la máquina desetiquetadora, asegurando las especificaciones técnicas necesarias para su construcción.

1. En relación con el presupuesto, es fundamental considerar los precios actuales del mercado y consultar con distintos proveedores para optimizar los costos. Es importante destacar que, en el caso de adquirir componentes del extranjero, se debe tener en cuenta la empresa de logística encargada de la importación, ya que los costos de envío e importación pueden verse afectados por las tarifas que cada empresa maneja, lo que puede tener un impacto significativo en el presupuesto total.
2. Con respecto al módulo eléctrico de la máquina, se recomienda el diseño de un circuito que permita la conexión y operación eficiente de todos los elementos que componen el sistema.
3. Se propone la implementación de sensores en la máquina con el fin de recopilar datos históricos que permitan desarrollar planes de mantenimiento predictivo basados en información real. Estos sensores proporcionarán métricas clave sobre el estado de los componentes, facilitando la identificación temprana de posibles fallos. Además, se plantea la integración de sistemas de mantenimiento autónomo, en los que los operarios puedan realizar tareas de pronóstico y monitoreo, informando al equipo de mantenimiento encargado sobre anomalías detectadas.

- Alexander, G. (2021, septiembre). Recycling Quandary: What To Do About Labels on Plastic? <https://earth911.com/home-garden/recycling-quandary-what-about-labels-on-plastic/>
- ALG. (2020, mayo). Tipos de Ventiladores. <https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>
- Álvarez, D. (2023, noviembre). Acero a36: ¿Qué es? Tipos, usos y medidas. <https://acerostorices.com/blog/acero-a36-tipos-y-usos/>
- Bando. (2017). Industrial Power Transmission Products Catalog Vol. 2. https://www.bandousa.com/media/uploads/0/114_BUI-1009_Industrial-Power-Transmission-Products-catalog-Vol-2_9-17.pdf
- Bando. (2018). V-Belt Design Manual. https://bandousa.com/media/uploads/0/1352_bu-143-V-belt-design-manual_updated-2018.pdf
- Bega. (s.f.). Que es y como funciona un Transportador Helicoidal Gusano (Tornillo) [Recuperado el 23 de septiembre de 2024]. <https://www.begahelicoidales.com/que-es-un-transportador-helicoidal>
- Boxin. (2024, mayo). 500kg/H Waste Plastic Pet Rigid Bottles Crushing Washing Plant/Drying Machine/Pet Crushing Washing Drying Recycling Machine Line. <https://boxingroup.en.made-in-china.com/product/TJsRqzedgPWQ/China-500kg-H-Waste-Plastic-Pet-Rigid-Bottles-Crushing-Washing-Plant-Drying-Machine-Pet-Crushing-Washing-Drying-Recycling-Machine-Line.html>
- Budynas, G., R., Nisbett & Keith, J. (2015). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (10.^a ed.) [Traducido de Shigley's Mechanical Engineering Design]. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Cabarcas, J. J., Nieto Ochoa, F. J., Torres Puello, J. A., & Díaz Arciniegas, J. Z. (2021). Diseño de una máquina desetiquetadora de envases plásticos con etiquetas de PVC [Universidad del Norte]. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/9545>
- Casals. (2024). Ventiladores para transporte de material o de sólidos. <https://www.casals.com/es/documentacion/biblioteca-documental/transporte-de-solidos/>
- Cincinnati. (s.f.). PB series centrifugal blower [Recuperado el 16 de octubre de 2024]. <https://www.cincinnati-fan.com/wp-content/uploads/2024/08/CF-PB-TECH-8-24-.pdf>

- Crista. (s.f). Desetiquetadora [Recuperado el 9 de octubre de 2024]. <http://waste-machinery.com.ar/1-2-delabeler.html>
- Cuauro, R. (2023, enero). Etiquetas: Tipos y materiales. <https://smartctl.cl/etiquetas-tipos-y-materiales/>
- Elizalde, E. (2021, diciembre). Conexiones de acero soldadas. <http://consejoincide.com/2021/12/01/conexiones-02/>
- Emadi, A. (2018). *Energy-Efficient Electric Motors, Revised and Expanded*. CRC Press.
- Erazo, C. (2015, enero). Dimensionamiento y construcción de una máquina afiladora de herramientas para torno. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10318/3/CD-6146.pdf>
- Estevez, M., Ortego, P., & López, E. (2015). Sistema de contabilidad de gestión ambiental, aplicable para una empresa de transformación de Tereftalato de polietileno (PET) reciclado [Edu.co].
- Eurolab. (2022). (PET) Análisis de tereftalato de polietileno. <https://www.eurolab.net/es/testler/kimyasal-ve-malzeme-guvenligi-testleri/%28pet%29-polietilen-tereftelat-analizleri/>
- Fangtai. (s.f.). Label remover machine [Recuperado el 9 de octubre de 2024]. <https://www.fangtaiplasticmachine.com/products/pet-bottle-label-scraping-machine.html>
- fracture surfaces from Charpy impact tests, E. (2024, septiembre). Evaluating fracture surfaces from Charpy impact tests. <https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/measurement-solutions/charpy-impact-test.jsp>
- Gutiérrez, R., Antonio, G., Nieto, O., & Augusto, E. (2015). Diseño y construcción de un módulo académico de interacción hombre-máquina para la rehabilitación de la cizalla Edwards Truecut 3.25 mm modelo 600. Edu.ec. <https://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/10817/T-ESPE-049338.pdf>
- Herrera, R. (2017, agosto 30). En Guatemala se reciclan 1.6 millones de botellas de plástico al día ¡Qué orgullo! <https://www.publinews.gt/gt/tendencias/2017/08/30/recicla-jede-botellas-plasticas-ingrup-guatemala.html>
- Hibbeler, R. (2011). *Mecánica de materiales* (8.^a ed.) [Traducido de Mechanics of Materials, 8th edition. Pearson Education, Inc. Impreso en México por RR Donnelley]. Pearson Educación.
- Iswa. (2019, diciembre). Machine to remove labels at start of bottle recycling plants: New Delabeler from STADLER increases output & purity for bottle recyclers. <https://waste-management-world.com/artikel/new-delabeler-from-stadler-increases-output-purity-for-bottle-recyclers/>
- JTEKT. (s.f.). Bearing frictional moment and friction coefficient. <https://koyo.jtekt.co.jp/en/support/bearing-knowledge/8-4000.html>
- Kongskilde. (2022, marzo). Ventiladores MTD. <https://kongskilde-industries.com/industrial/es/producto/mtd-blowers/>
- KWS. (s.f.). Screw Conveyors [Recuperado el 15 de septiembre de 2024]. <https://www.kwsmfg.com/wp-content/themes/va/pdf/Screw-Conveyor-Engineering-Guide.pdf>
- Lau, F. (2021). Sistema eléctrico y sistema de desetiquetado para desetiquetadora de botellas de vidrio. <https://repositorio.uvg.edu.gt/static/flowpaper/template.html?path=/bitstream/handle/123456789/4210/Sistema%20el%c3%a9ctrico%20y%20sistema%20de%20desetiquetado%20para%20botellas%20de%20vidrio%20- Luis%20Jo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lewin, A. (2020). Estudio de factibilidad para la innovación en la producción de la mezcla de asfalto en Guatemala involucrando las botellas de polietileno de tereftala-

- to (PET). <https://repositorio.uvg.edu.gt/static/flowpaper/template.html?path=%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F3828%2FTRABAJO+DE+GRADUACION.pdf%3Fsequence&isAllowed=y>
- Matweb. (2024, septiembre). Overview of materials for Polypropylene, Film Grade. <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=642060cb11204fcb95164a82edc4b5fa&n=1&ckck=1>
- Mazariegos, E. (2014). Estudio de factibilidad para la implementación de un negocio de recolección, logística y desarrollo de un programa de reciclaje para las industrias ubicadas en las zonas 7, 11 y 12 de la Ciudad de Guatemala. <https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/bitstream/handle/123456789/98/Tesis%20final%20Eduardo%20Mazariegos%20corregido.pdf?sequence=1>
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (R. H. Cevallos, Ed.; A. C. P. Herrera, Trad.; 7.^a ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- México, P. T. (2019, diciembre). Desetiquetadora facilita clasificación de botellas de plástico. <https://www.pt-mexico.com/productos/desetiquetadora-facilita-clasificacion-de-botellas-de-plastico>
- Mooge, J. (2022a). Label remover From China - MOOGE TECH. <https://www.moogerecycling.com/pelletizer/label-remover-f3059894.html>
- Mooge, J. (2022b). Plastic double shaft shredder PET washing line metal crusher machine [Recuperado el 10 de octubre de 2024]. <https://www.moogerecycling.com/Plastic-Double-Shaft-Shredder-PET-Washing-Line-Metal-Crusher-Machine-pd523524958.html>
- Mooge, J. (2024). PET flake rigid bottle washing plastic recycling machine - Mooge Tech. <https://moogetech.en.made-in-china.com/product/wnFUPLERvaWg/China-PET-flake-rigid-bottle-washing-plastic-recycling-machine.html>
- NIVIHE. (s.f.). Motores eléctricos trifásicos: Estándares de eficiencia de IE1 a IE5. <https://motores-electricos.com.ar/motores-electricos-trifasicos-estandares-de-eficiencia-de-ie1-a-ie5>
- Ochoa, C. G. L., & Mosquera, A. L. N. (2016). Diseño de una máquina trituradora de neumáticos. <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/36932/D-CD88355.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Orcajada. (2022, enero). Polipropileno: Conoce qué es y cuáles son sus propiedades. <https://www.adhesivos-orcajada.es/polipropileno-que-es-propiedades/>
- Pelaez. (2024, junio). ¿Qué es el PET y cómo se clasifica? <https://pelaezconsultores.es/blog/que-es-el-pet-y-como-se-clasifica/>
- Prada. (2022). Estudio de pre-factibilidad para una planta de PET reciclado como agregado para materiales de construcción en la ciudad de Arequipa [Universidad Antonio Ruiz de Montoya].
- Pudack, C. (2020). PET Recycling—Contributions of crystallization to sustainability. *Chemie Ingenieur Technik*, 1(4), 452-458.
- Recycletheone. (2023, febrero). What is PET? <https://www.recycletheone.com/what-is-pet/>
- REMSA. (s.f.). Botella PET: 600 ml Modelo Generica [Recuperado el 15 de septiembre de 2024]. <http://www.remsaplásticos.com/productos/botellas-pet/botella-pet-600ml>
- Renovables. (2023, agosto 22). Estadísticas del plástico reciclado a nivel mundial: cifras actuales. <https://renovables.blog/reciclaje/plastico/estadisticas-del-plastico-reciclado-a-nivel-mundial-cifras-actuales/>

- Santos. (2019). Proyecto de instalación para planta de reciclado de plásticos PET [Universidad de La Laguna]. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/15478/Proyecto%20de%20instalacion%20para%20planta%20de%20reciclado%20de%20plasticos%20PET.pdf?sequence=1>
- Schyns, Z. O. (2021). Mechanical recycling of packaging plastics. *Macromolecular Rapid Communications*, 1(3), 2000415.
- Shen, L. (2014). Plastic recycling. En *Handbook of recycling*. Elsevier.
- Shuliy. (2021, noviembre). Máquina para quitar etiquetas de botellas de PET | Reciclaje de residuos de botellas de plástico PET. <https://recyclingequipinc.com/es/producto/pet-bottle-label-remover-machine/>
- SKF. (s.f.). Permissible misalignment for flanged units. <https://www.skf.com/us/products/mounted-bearings/roller-bearing-units/flanged-units/permissible-misalignment>
- SKF. (2008). SKF ConCentra roller bearing units. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968007f949/pdf_preview_medium/0901d1968007f949_pdf_preview_medium.pdf#cid-259549
- Smith, R. (2011). Deflection Limits in Tall Buildings – Are they useful? Researchgate.net. https://www.researchgate.net/publication/269083259_Deflection_Limits_in_Tall_Buildings-Are_They_Useful
- todoenpolimeros. (2018, agosto). El impacto de las Etiquetas y Adhesivos en el Reciclaje de Envases de PET. <https://todoenpolimeros.com/2018/08/08/el-impacto-de-las-etiquetas-y-adhesivos-en-el-reciclaje-de-envases-de-pet/>
- Uloa, A. M. J. (2018, junio). Diseño de un sistema de extracción de polvo y viruta de madera para la carpintería de la fundación Salesiana "PACES". <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16106/1/UPS-CT007799.pdf>
- Vollmer. (2020). Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(36), 15402-15423.
- Zareiforouh, H., Komarizadeh, M. H., & Alizadeh, M. R. (2010). A Review on Screw Conveyors Performance Evaluation During Handling Process. Researchgate.net. https://www.researchgate.net/publication/43297181_A_Review_on_Screw_Conveyors_Performance_Evaluation_During_Handling_Process

12.1. Manual de uso

El uso de maquinaria representa una gran responsabilidad para el operario que supervisa la operación de la máquina. Por consiguiente, se considera que al montar la línea de reciclaje, se capacite al personal en la utilización correcta de la maquinaria. Este manual de uso es una recomendación, y se debe considerar diferentes pruebas para establecer el manual de uso correcto al finalizar la fabricación de la máquina.

12.1.1. Equipo de protección personal

Para el uso de la máquina desetiquetadora se proponen los siguientes artículos como requerimiento para garantizar la seguridad del operario asignado a la máquina.

- Botas de punta de acero
- Guantes de protección industrial
- Lentes de seguridad
- Tapones para oídos
- Casco de seguridad

12.1.2. Procedimiento

A continuación, se coloca el manual recomendado de uso para la máquina desetiquetadora.

1. Revisar que la máquina esté desconectada.
2. Revisar si existen residuos dentro de la máquina. Esto se realiza utilizando las puertas a los lados de la carcasa. Si existen residuos, removerlos manualmente.
3. Revisar que los componentes de la máquina estén instalados correctamente.
4. Revisar que los cables estén conectados correctamente en el panel de control.
5. Conectar la máquina en el tomacorrientes (208 voltios trifásico).
6. Activar flipón principal conectado a la máquina en el panel de control.
7. Verificar que el guarda motor esté en encendido.
8. Activar el interruptor de arranque.
9. Verificar la velocidad del variador de frecuencia del motor.
10. Ajustar la velocidad a 400 rpm.
11. Realizar una prueba al vacío.
12. Revisar que tanto las poleas como el eje estén funcionando correctamente.
13. Utilizar el botón de emergencia para apagar la máquina, donde se asegura su funcionamiento.
14. Comenzar con la producción de la línea de reciclaje.
15. Revisar el variador de frecuencia para control de la velocidad.
16. Al finalizar la operación, apagar la desetiquetadora por medio de su interruptor de apagado.
17. Desactivar flipón principal.
18. Revisar si la máquina tiene residuos y removerlos manualmente.
19. Realizar limpieza exterior al equipo.
20. Desconectar la desetiquetadora del la fuente de energía.

12.2. Planos de construcción

Con el propósito de la fabricación de la máquina desetiquetadora, se presentan los planos de construcción, donde se muestran las dimensiones, materiales y la soldadura para asegurar la fabricación de la máquina de forma precisa.

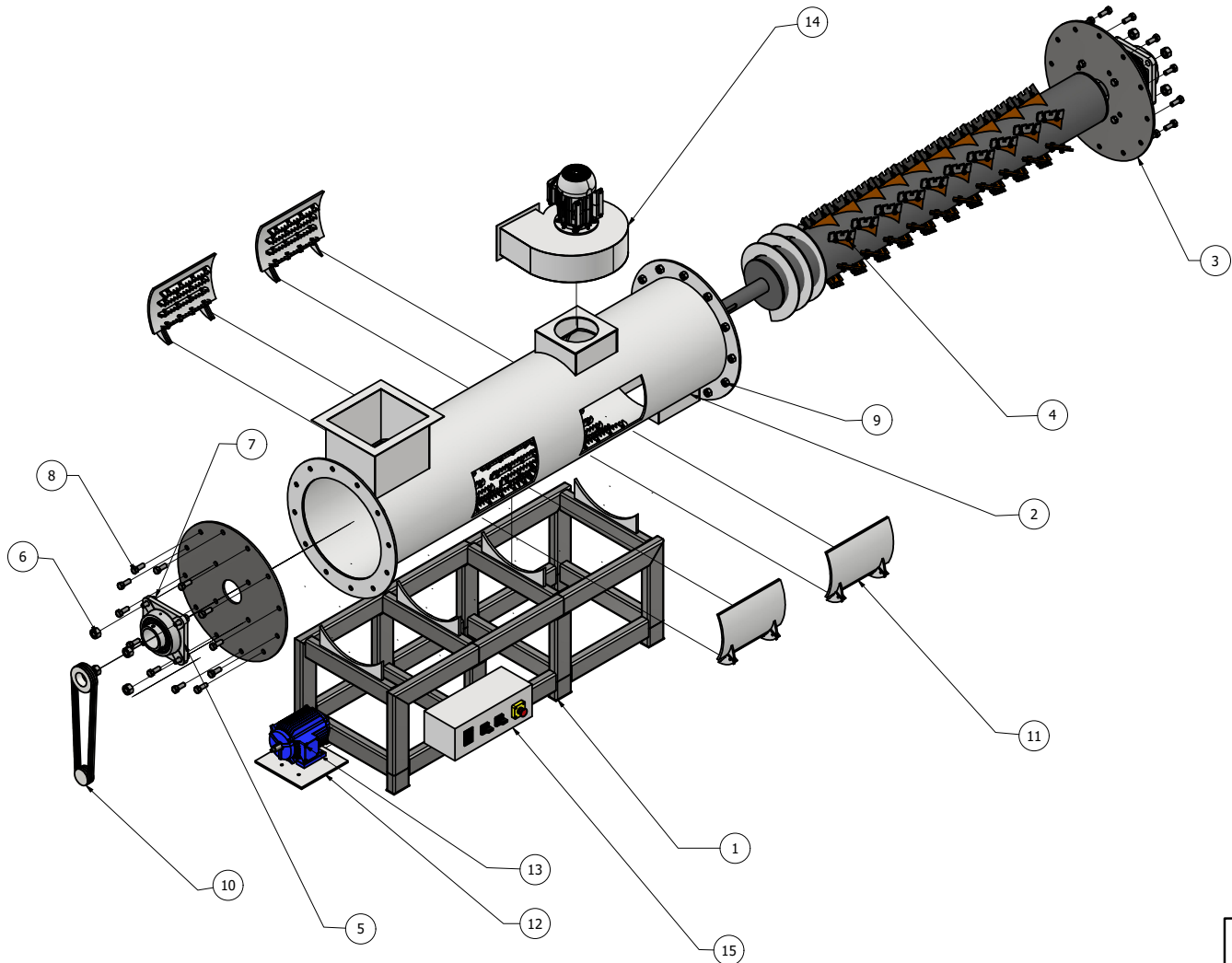
12.2.1. Equipo de protección personal

Para la fabricación de la máquina desetiquetadora, se debe tomar en consideración el equipo de protección personal para garantizar la seguridad y protección del personal de fabricación. Por lo tanto se determina que los siguientes artículos son requisito para participar en la construcción de la máquina.

- Botas de punta de acero
- Guantes de protección industrial
- Lentes de seguridad
- Tapones para oídos
- Guantes de soldadura
- Careta de soldadura
- Bata o uniforme
- Delantal para soldar

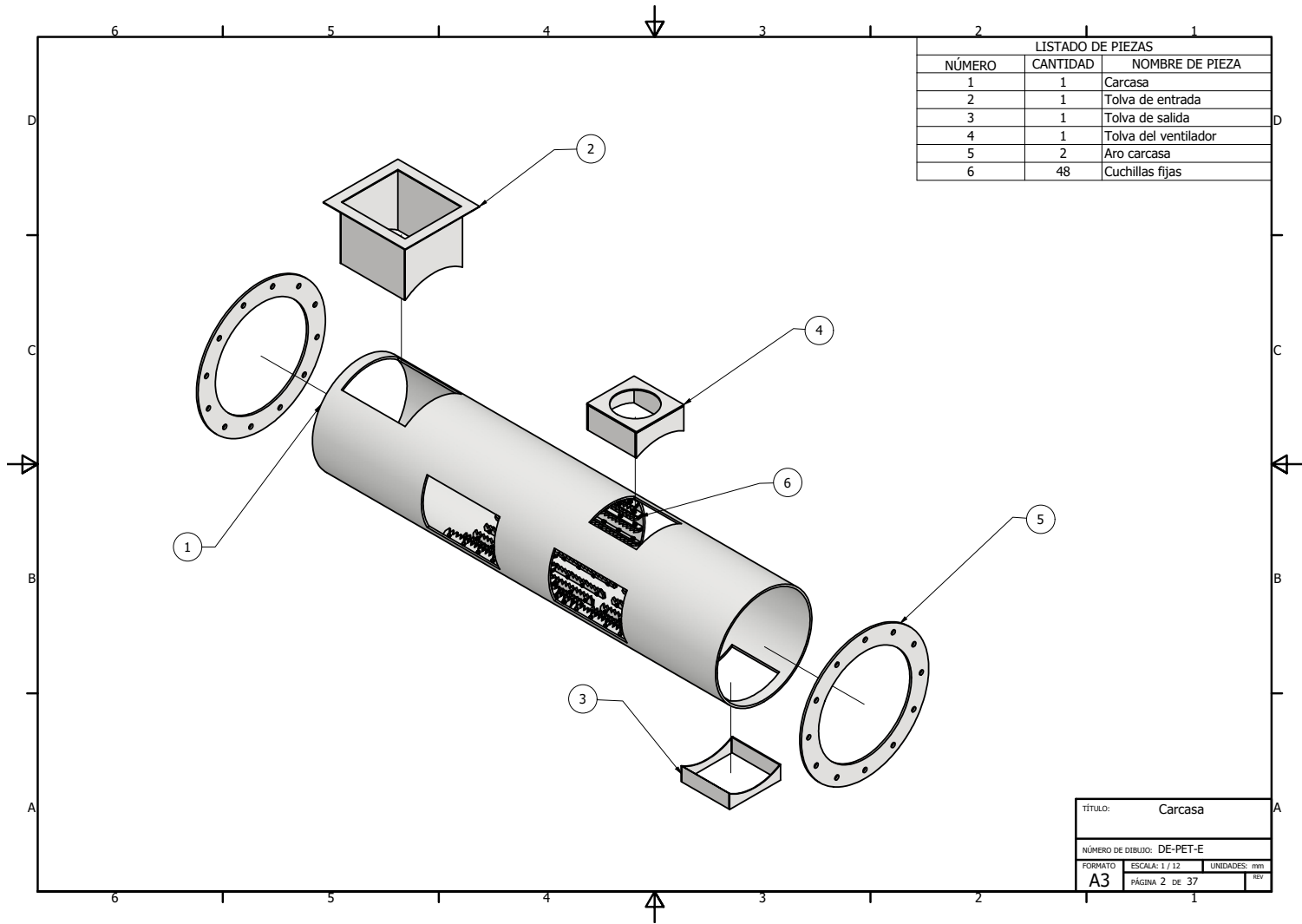
12.2.2. Planos de construcción

LISTADO DE PARTES			
NÚMERO	CANTIDAD	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL
1	1	Estructura	Acero A500
2	1	Carcasa	Acero A36
3	2	Tapadera de carcasa	Acero A36
4	1	Rotor de cuchillas	Acero A36 y acero D2
5	2	Chumacera FYJ 70 TF SKF	
6	8	Tuerca hexagonal 3/4 pulgadas	Acero galvanizado grado 5
7	8	Perno hexagonal 3/4 - 2.5	Acero galvanizado grado 5
8	24	Perno hexagonal 3/4 - 2	Acero galvanizado grado 5
9	24	Tuerca hexagonal 3/4 pulgadas	Acero galvanizado grado 5
10	1	Poleas con diámetro 4.2 in y 9 in	
11	4	Puerta de carcasa con bisagras	Acero A36
12	1	Placa base motor	Acero A36
13	1	Motor 7.5 hp WEG	
14	1	Ventilador Cincinnati PB8	
15	1	Panel de control (Variador de frecuencia, guarda motor, flipón principal)	



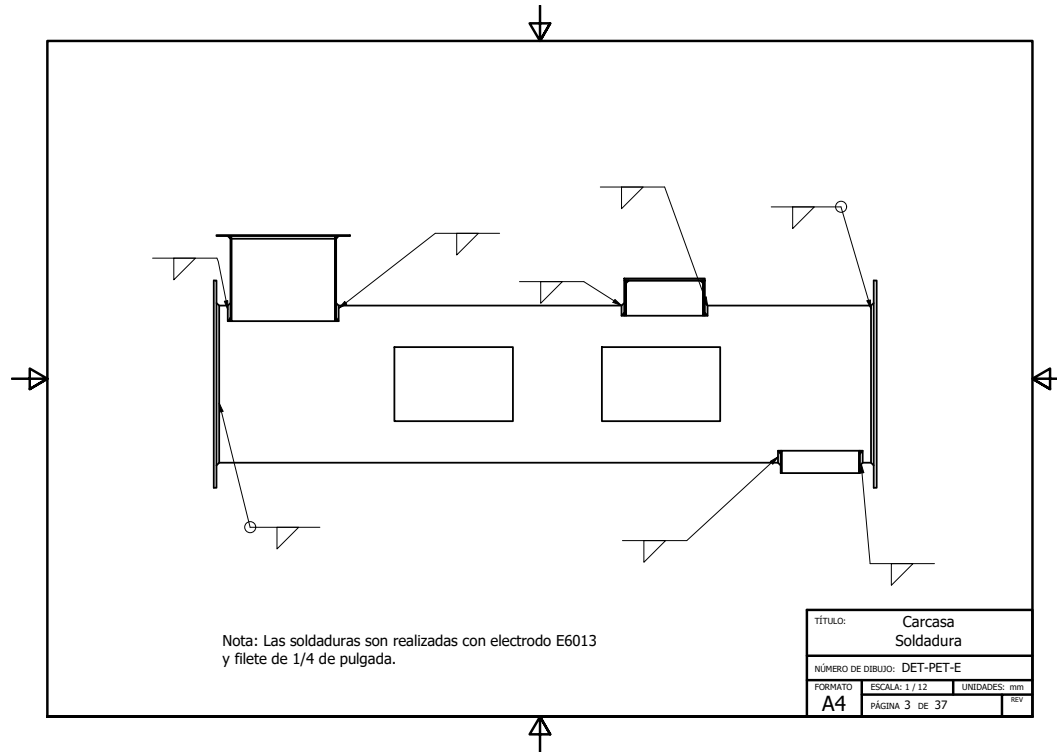
Nota: Eliminar bordes afilados

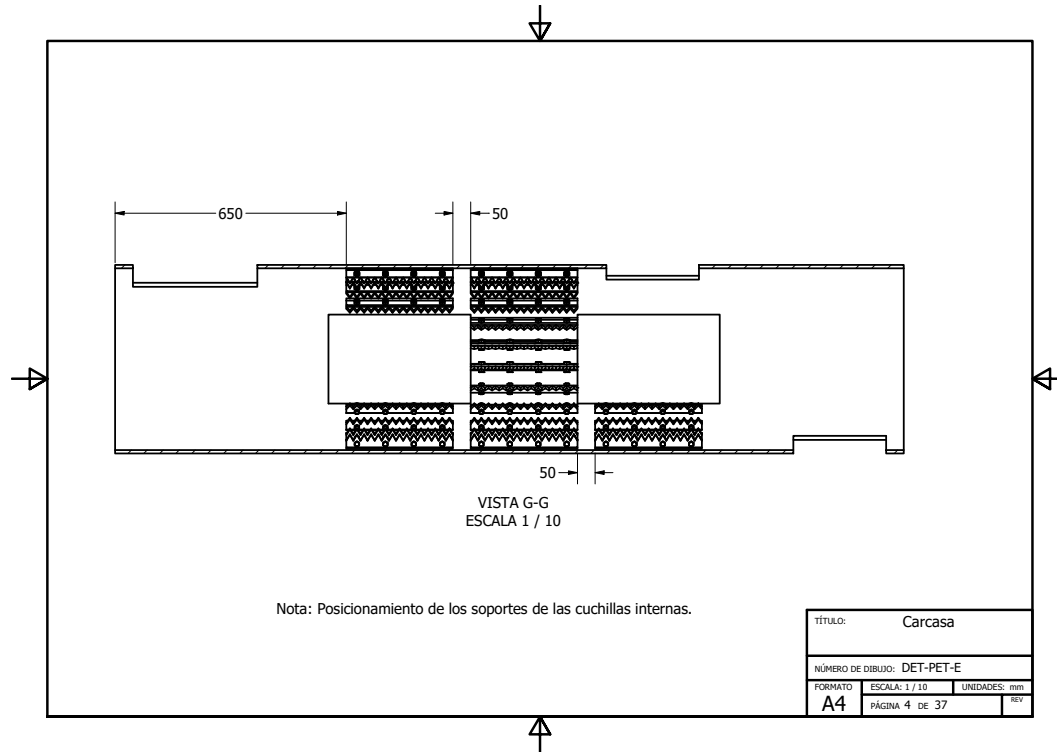
TOLERANCIAS GENERALES LINEAL: X ± 1.0 XX ± 0.5 XXX ± 0.01 ANGULAR: 2 1/2°	DISEÑADO POR E. ECHEVERRÍA	FECHA 16/10/24	UVG UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 20 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III GUATEMALA, GUATEMALA 02015 DEL VALLE PER: (502) 2634-0336 / 40 E: E.CHEVERRIA@uvg.edu.gt
	REVISADO POR E. ECHEVERRÍA	FECHA 16/10/24	
MATERIAL: VER LISTADO TRATAMIENTO: VER LISTADO HAZER: N/A	APROBADO POR ANDRÉS VIAU	FECHA 16/10/24	TÍTULO: ENSAMBLE COMPLETO
	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Desetiquetadora de PET	FECHA 16/10/24	NÚMERO DE DIBUJO: DE-PET-E

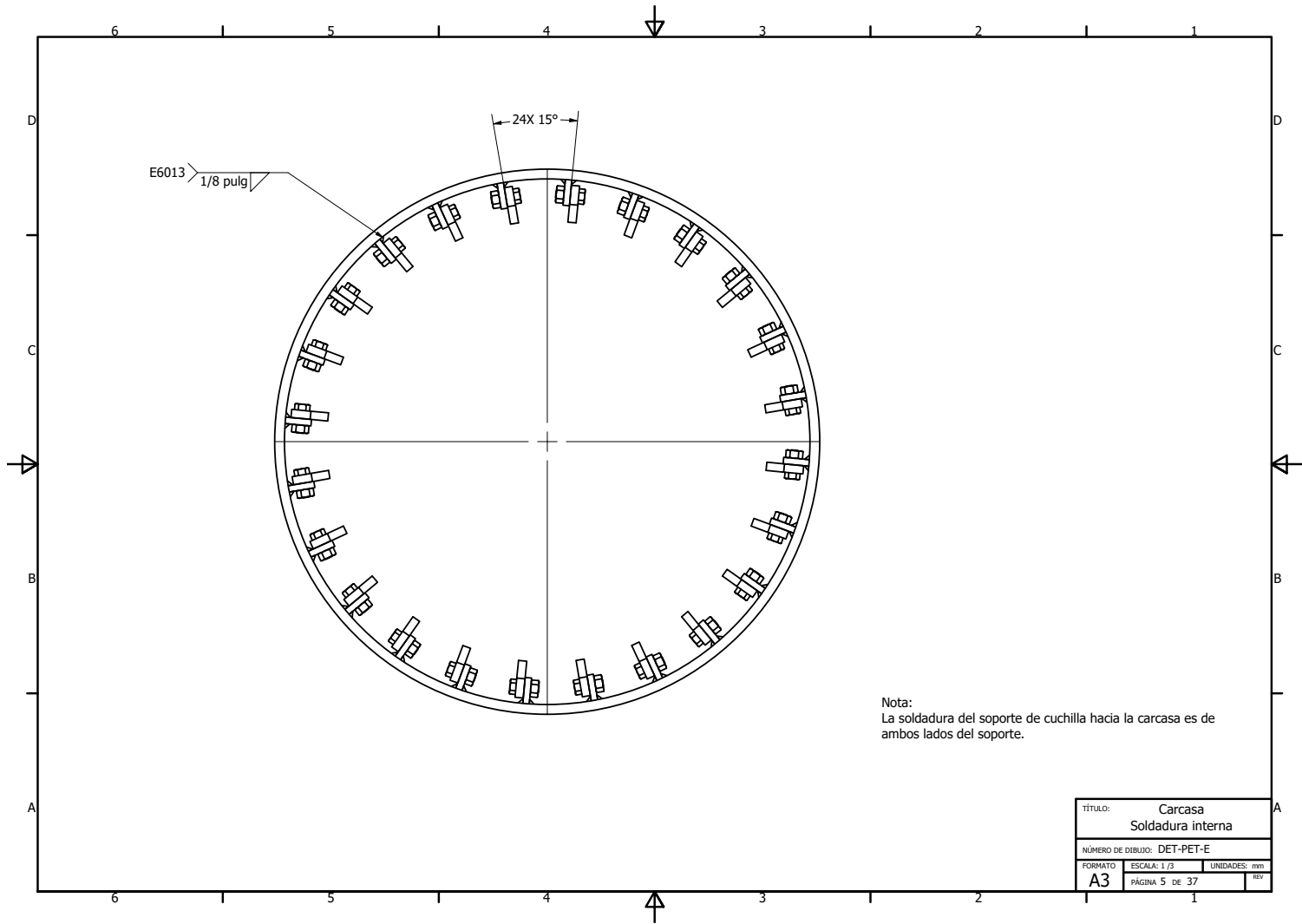


LISTADO DE PIEZAS		
NÚMERO	CANTIDAD	NOMBRE DE PIEZA
1	1	Carcasa
2	1	Tolva de entrada
3	1	Tolva de salida
4	1	Tolva del ventilador
5	2	Aro carcasa
6	48	Cuchillas fijas

TÍTULO: Carcasa		
NÚMERO DE DIBUJO: DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1 / 12	UNIDADES: mm
A3	PÁGINA 2 DE 37	REV



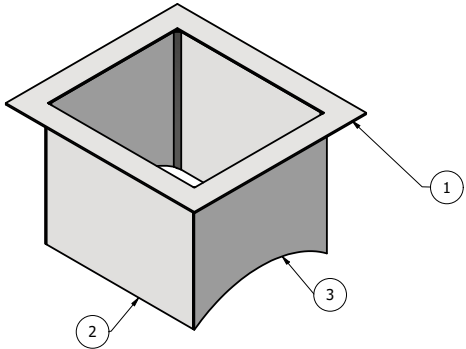




Nota:
La soldadura del soporte de cuchilla hacia la carcasa es de
ambos lados del soporte.

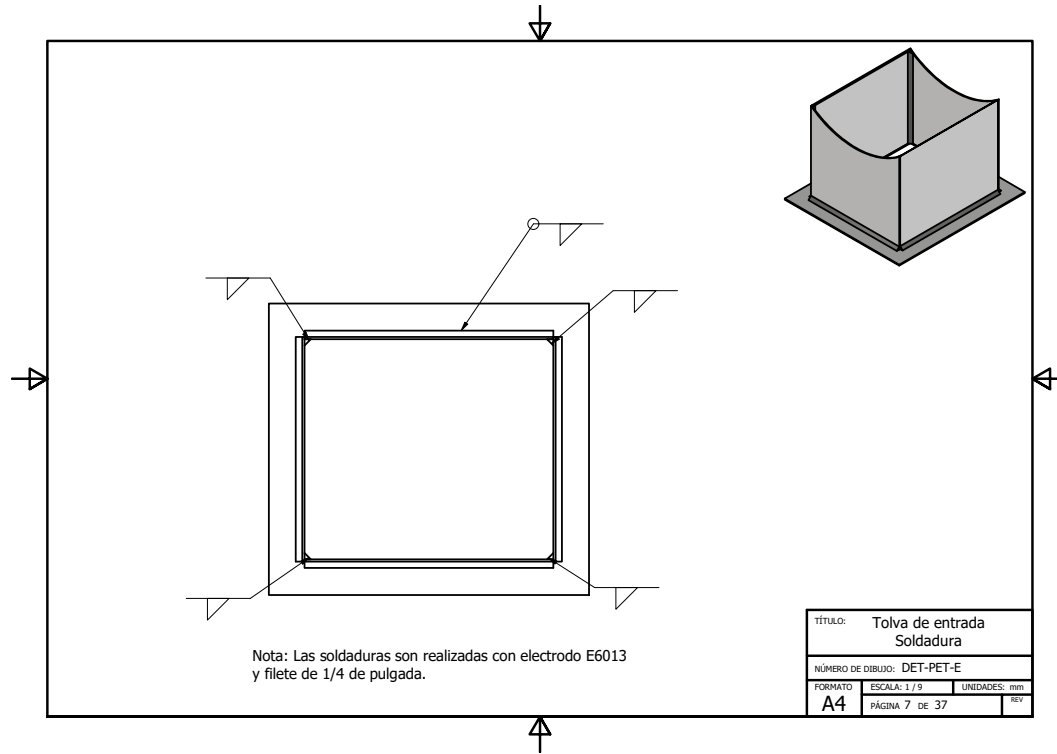
TÍTULO: Carcasa Soldadura interna		
NÚMERO DE DIBUJO: DET-PET-E		
FORMATO: A3	ESCALA: 1/3	UNIDADES: mm
PÁGINA 5 DE 37		REV.

LISTADO DE PIEZAS		
NÚMERO	CANTIDAD	NOMBRE DE PIEZA
1	1	Tolva de entrada - Pieza 1
2	2	Placa lateral - Pieza 2
3	2	Placa delantera y trasera - Pieza 3



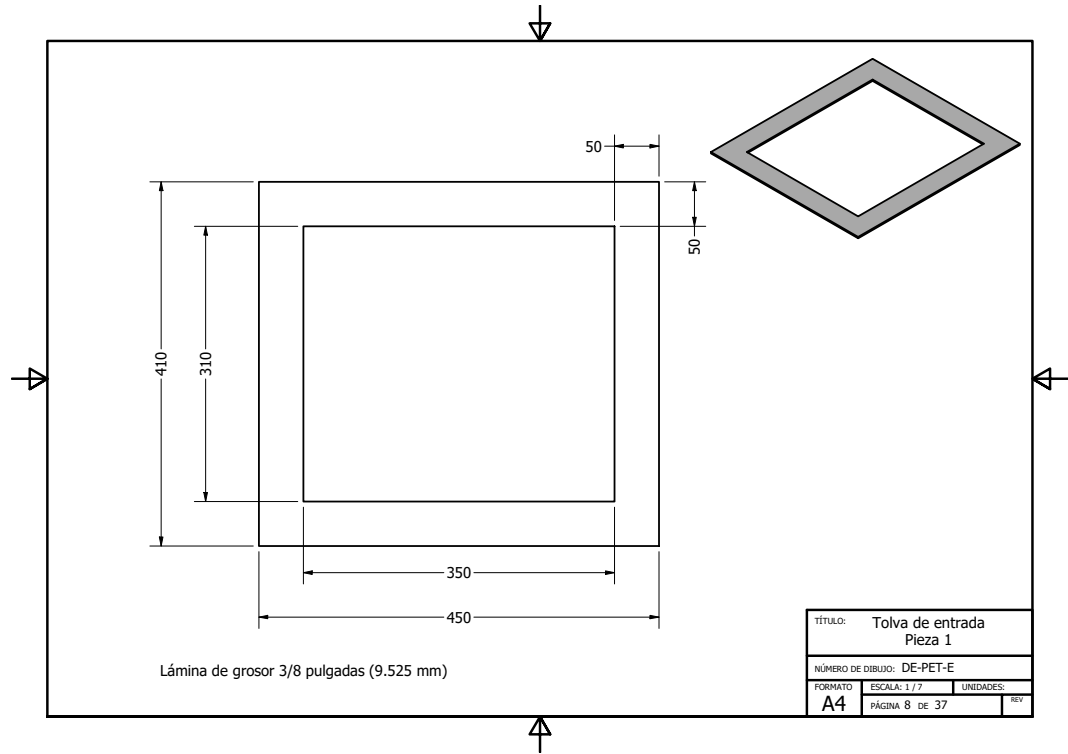
Se realizará soldadura en todas las uniones de las piezas de la tolva de entrada.

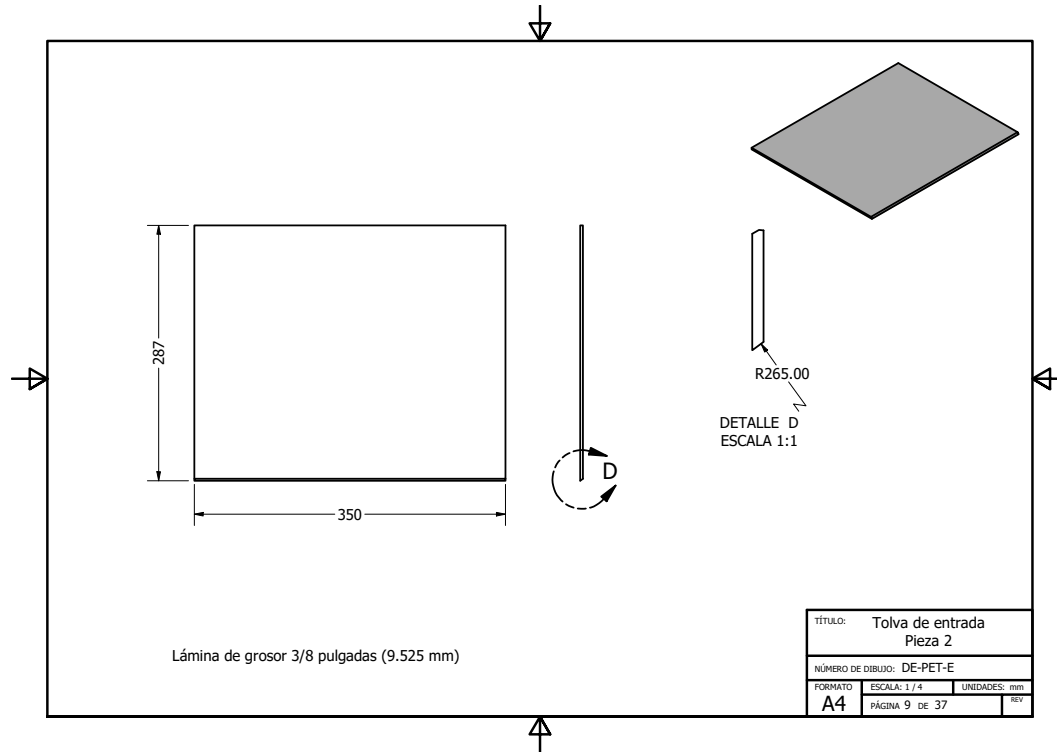
TÍTULO:	Tolva de entrada		
NÚMERO DE DIBUJO:	DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1 / 6	UNIDADES: mm	HOJA
A4	PÁGINA 6 DE 37		A

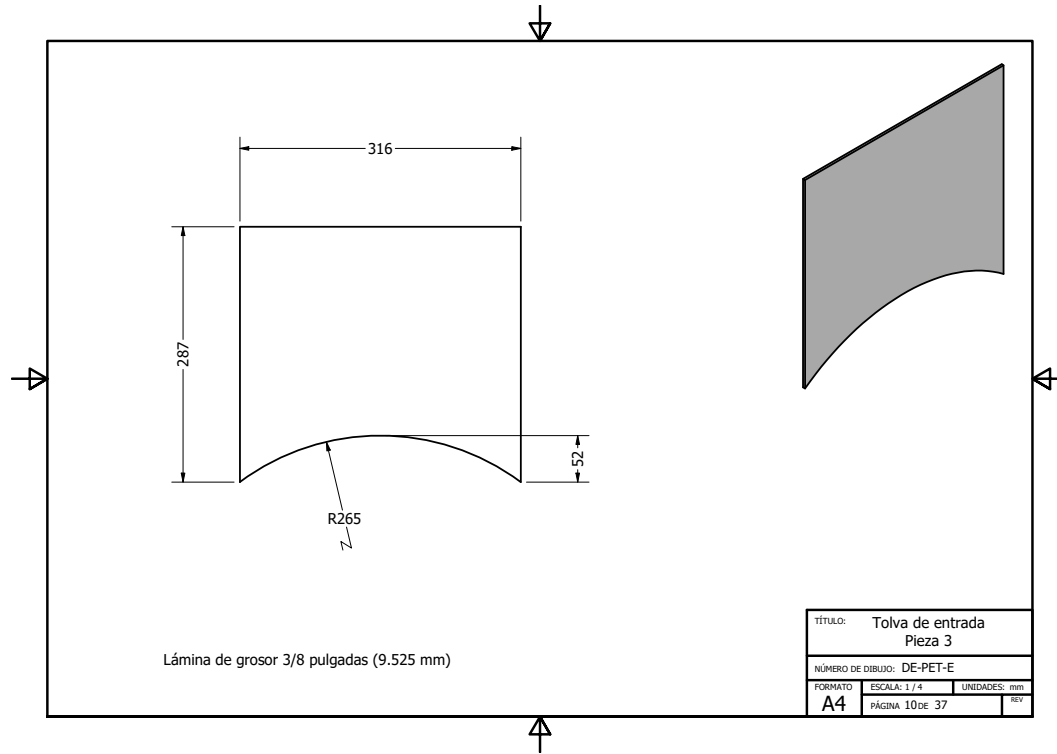


Nota: Las soldaduras son realizadas con electrodo E6013 y filete de 1/4 de pulgada.

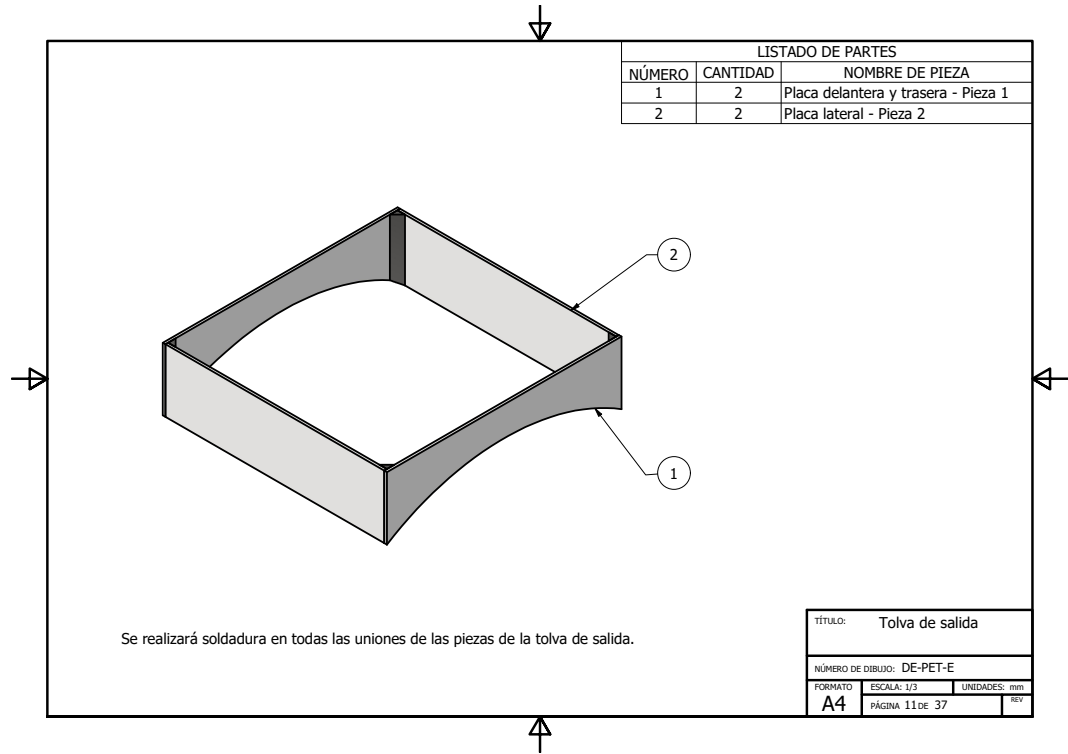
TÍTULO: Tolva de entrada Soldadura		
NÚMERO DE DIBUJO: DET-PET-E		
FORMATO: A4	ESCALA: 1/9	UNIDADES: mm
PÁGINA 7 DE 37		REV







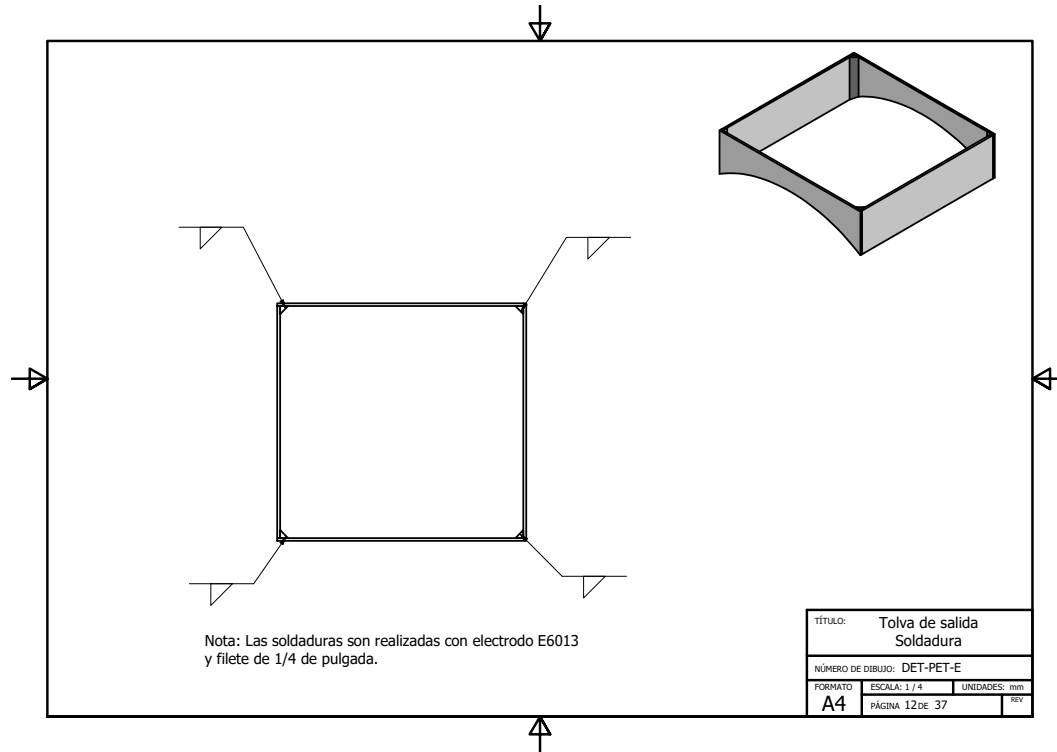
TÍTULO:	Tolva de entrada	
	Pieza 3	
NÚMERO DE DIBUJO:	DE-PET-E	
FORMATO	ESCALA: 1/4	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 10 DE 37	REV



LISTADO DE PARTES		
NÚMERO	CANTIDAD	NOMBRE DE PIEZA
1	2	Placa delantera y trasera - Pieza 1
2	2	Placa lateral - Pieza 2

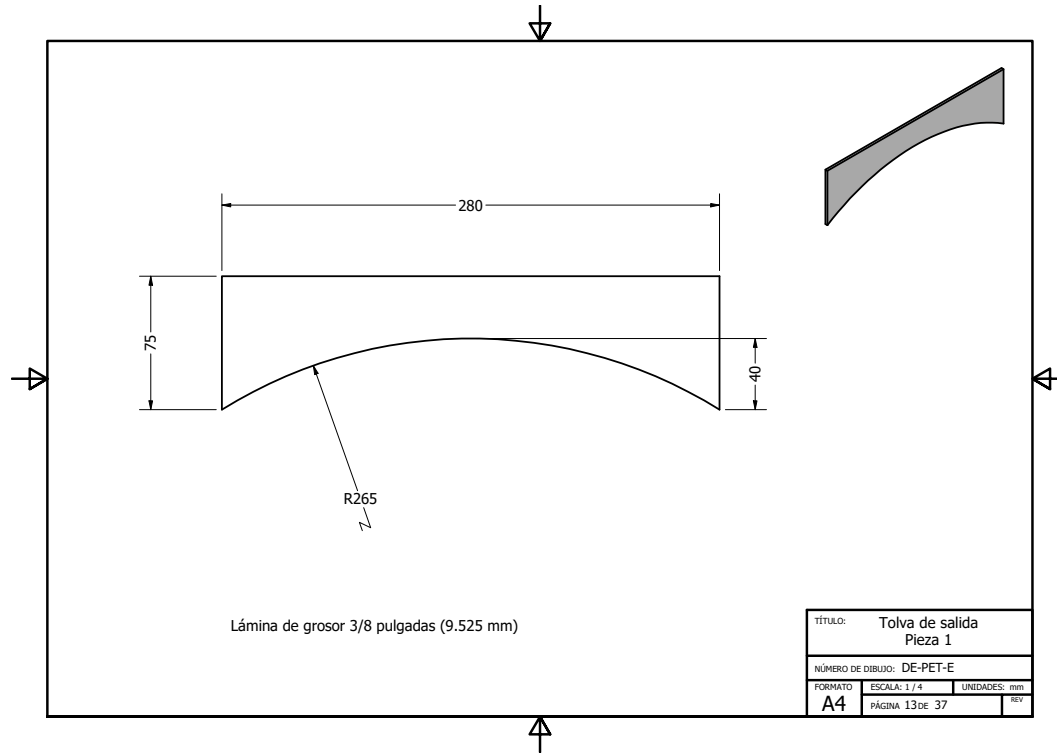
Se realizará soldadura en todas las uniones de las piezas de la tolva de salida.

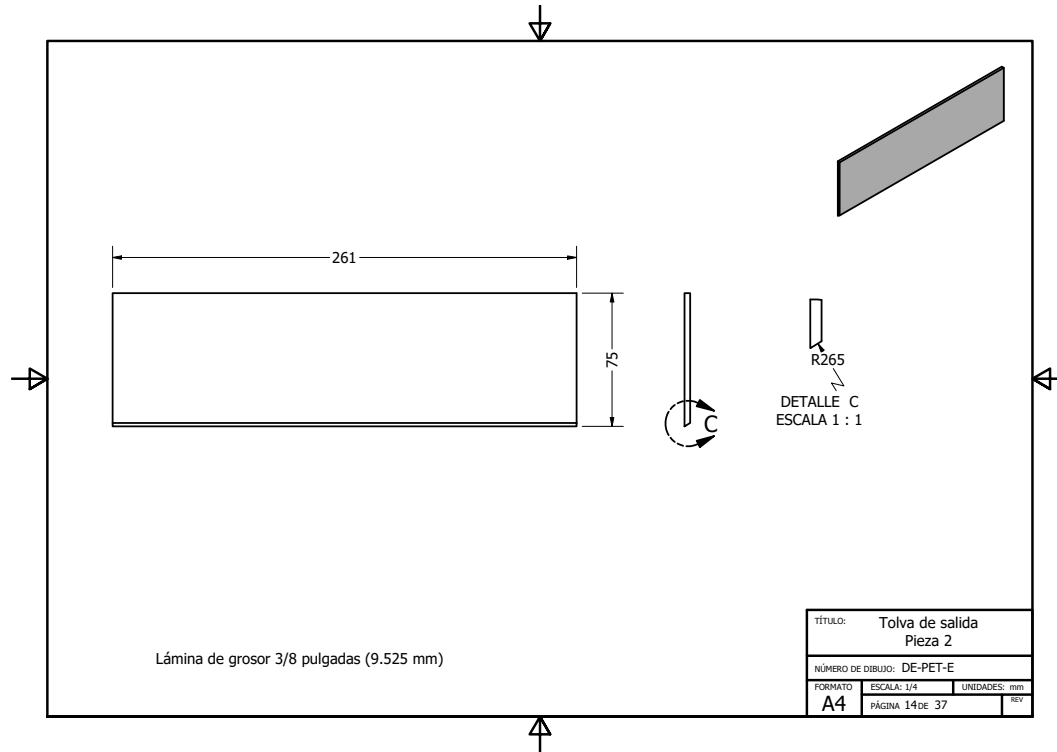
TÍTULO: Tolva de salida		
NÚMERO DE DIBUJO: DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1/3	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 11 DE 37	REV



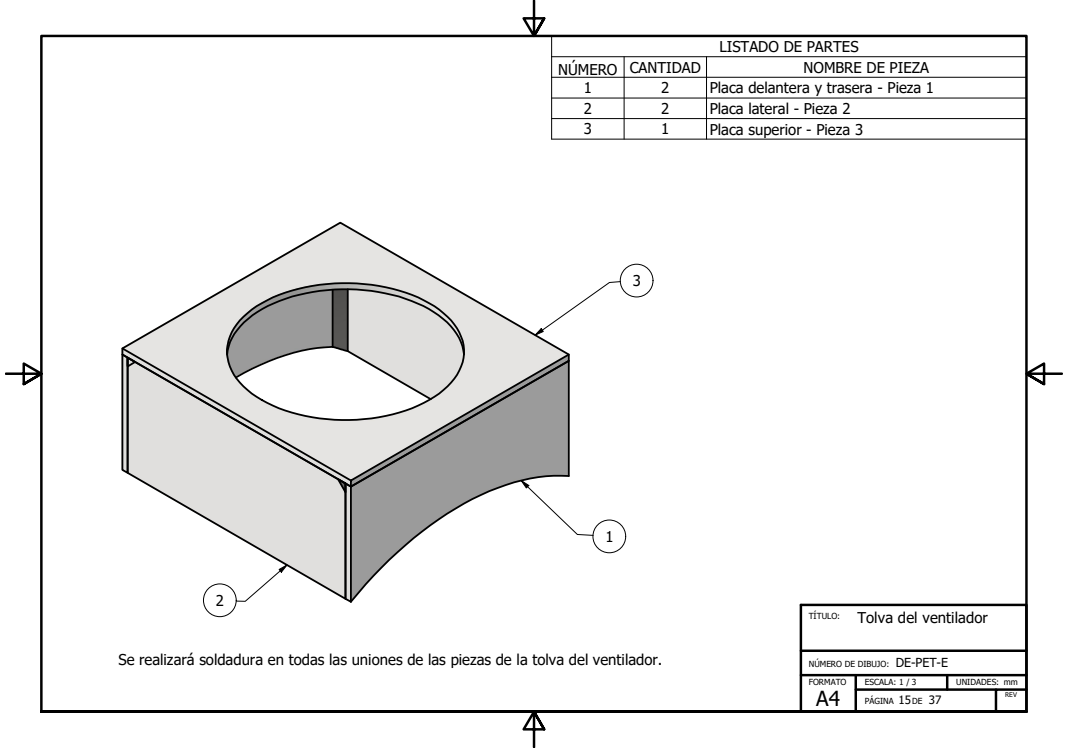
Nota: Las soldaduras son realizadas con electrodo E6013
y filete de 1/4 de pulgada.

TÍTULO:		Tolva de salida Soldadura	
NÚMERO DE DIBUJO: DET-PET-E			
FORMATO	ESCALA: 1/4	UNIDADES: mm	
A4	PÁGINA 12 DE 37		REV



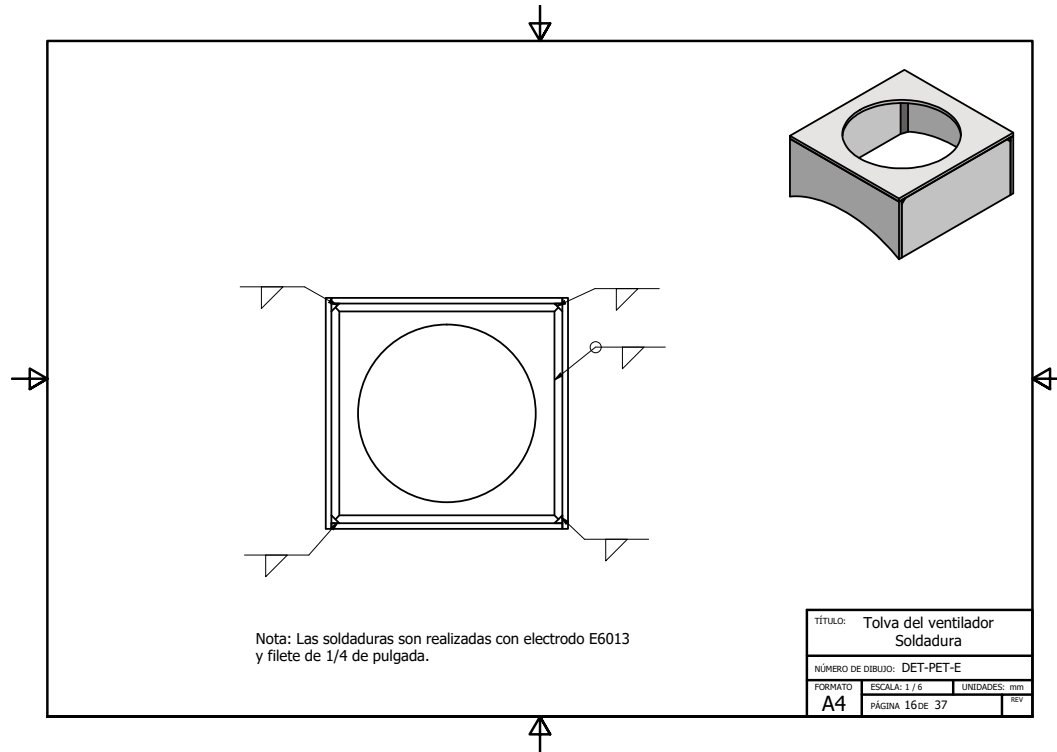


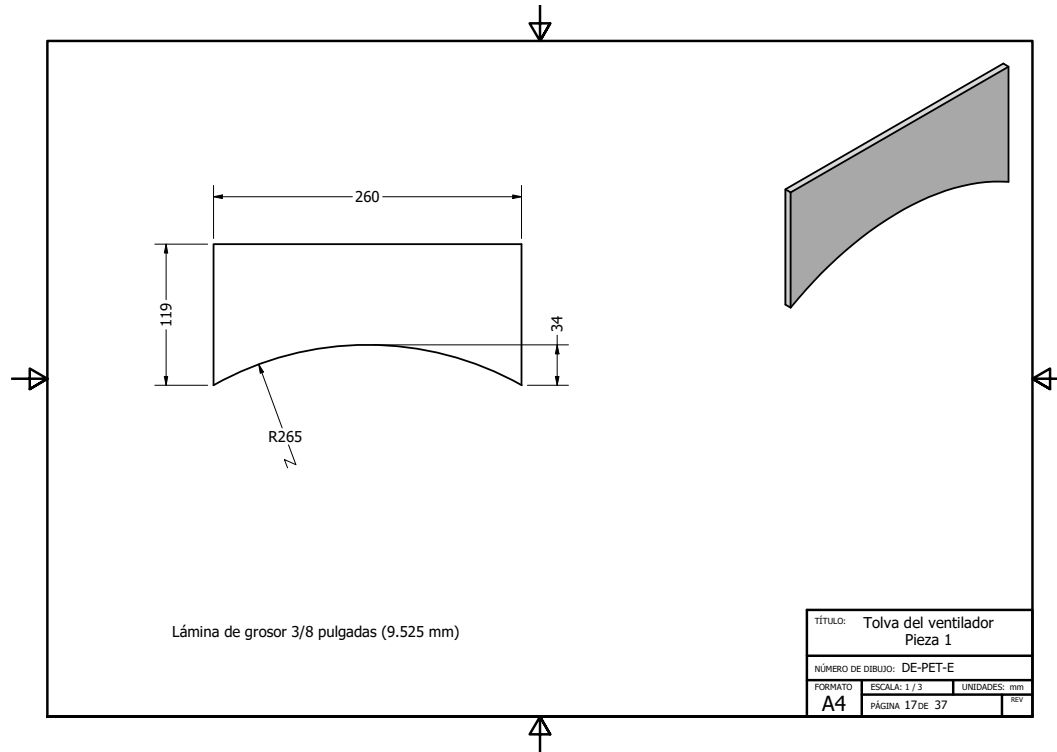
LISTADO DE PARTES		
NÚMERO	CANTIDAD	NOMBRE DE PIEZA
1	2	Placa delantera y trasera - Pieza 1
2	2	Placa lateral - Pieza 2
3	1	Placa superior - Pieza 3

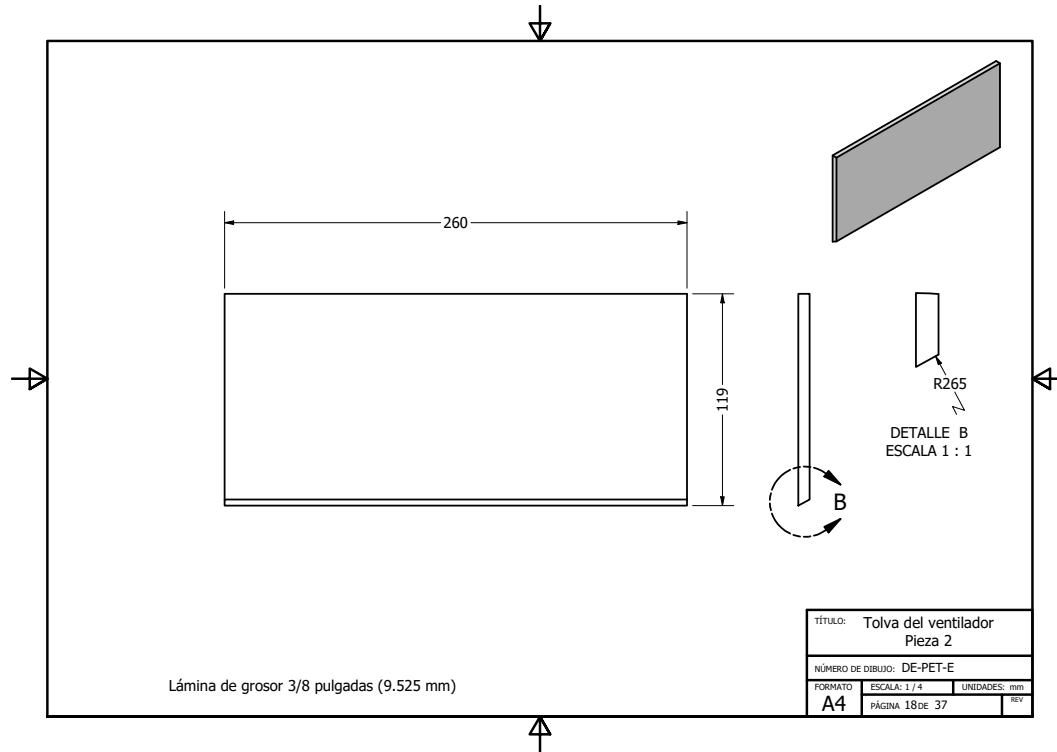


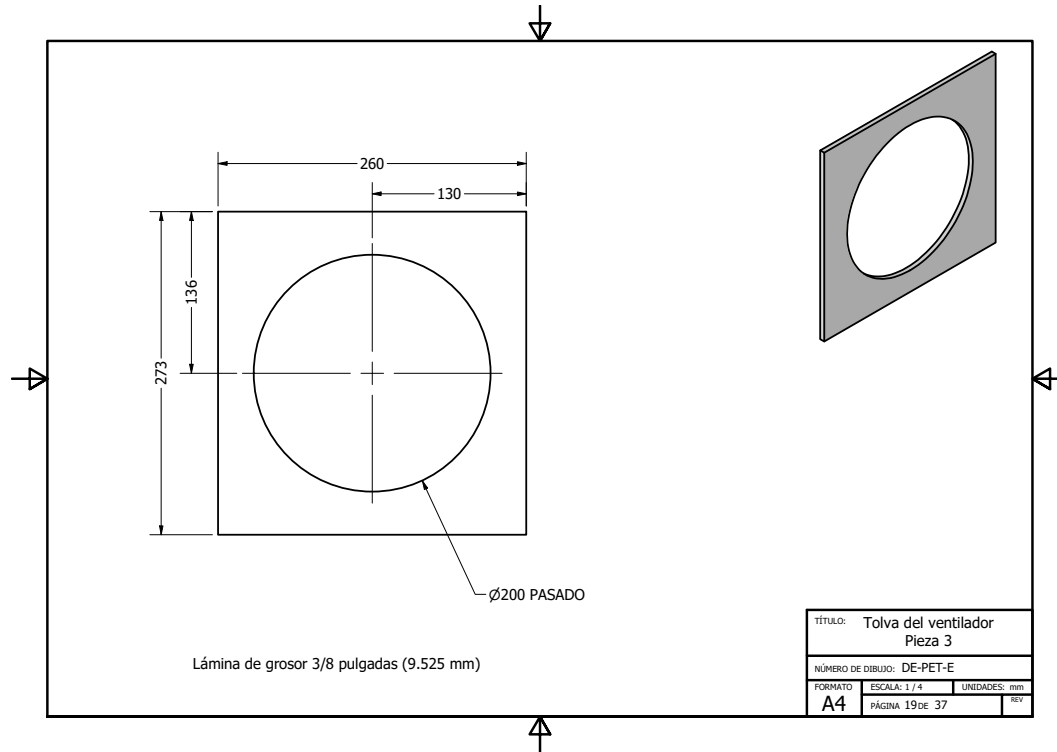
Se realizará soldadura en todas las uniones de las piezas de la tolva del ventilador.

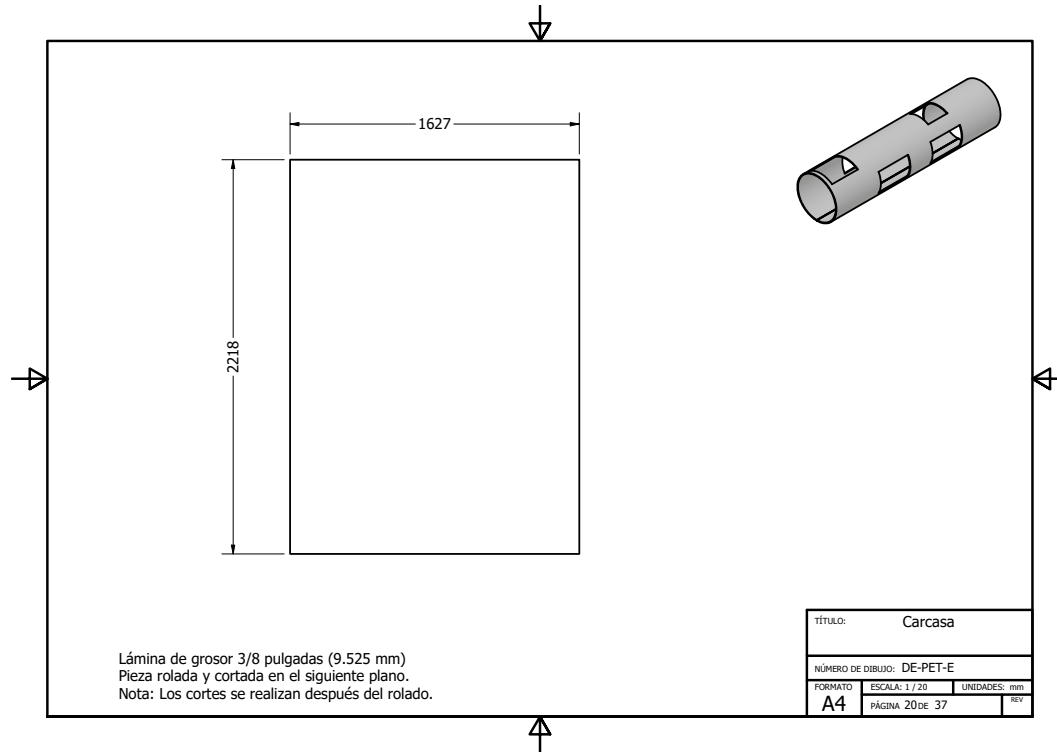
TÍTULO: Tolva del ventilador		
NÚMERO DE DIBUJO: DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1 / 3	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 15 DE 37	REV

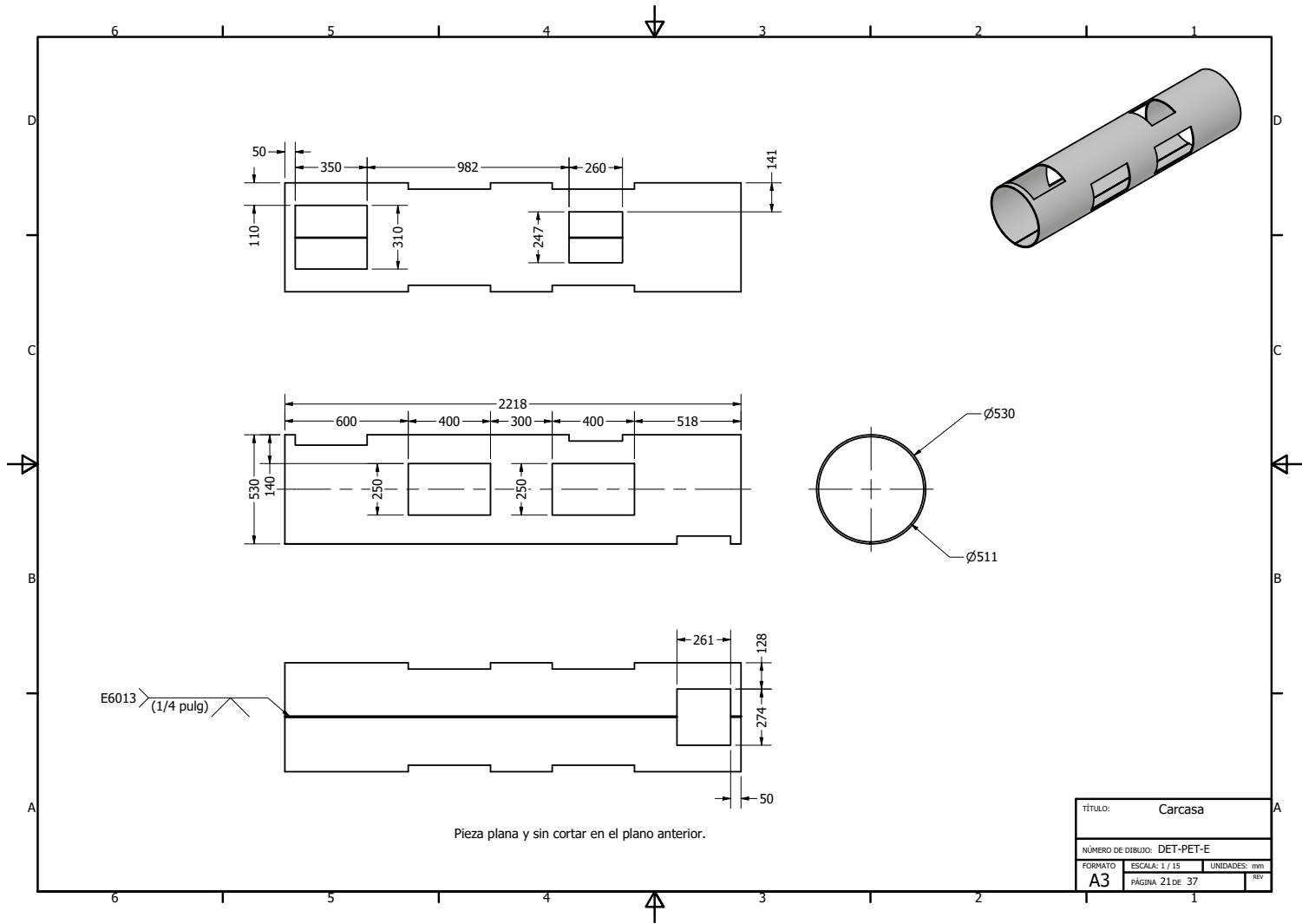


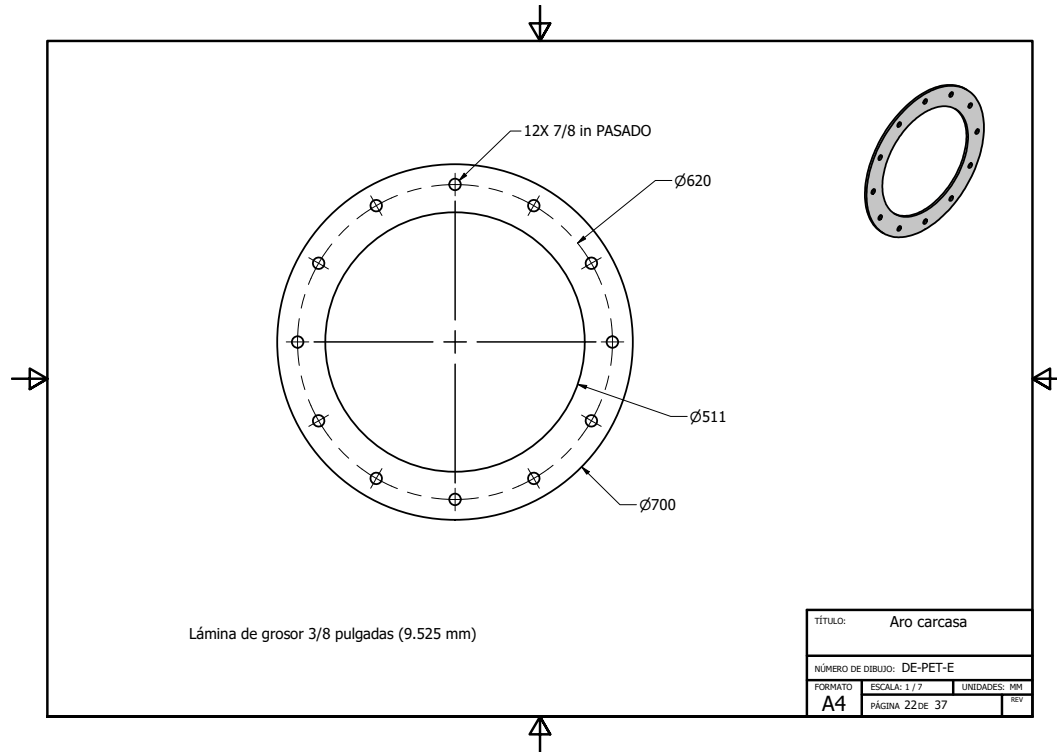


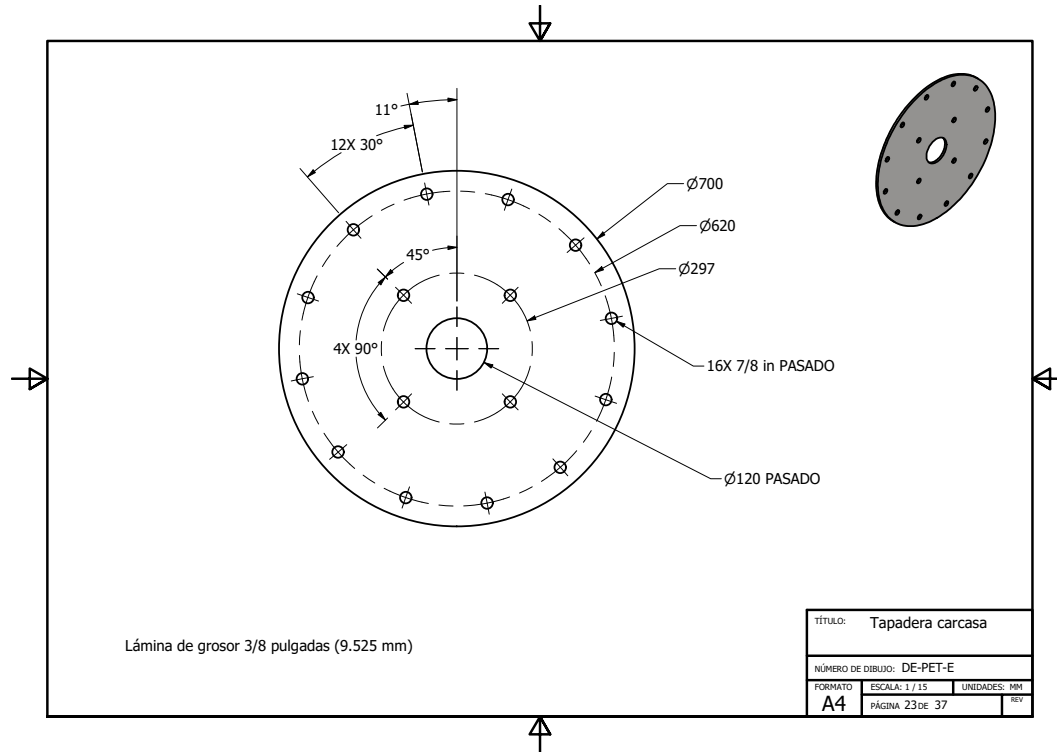




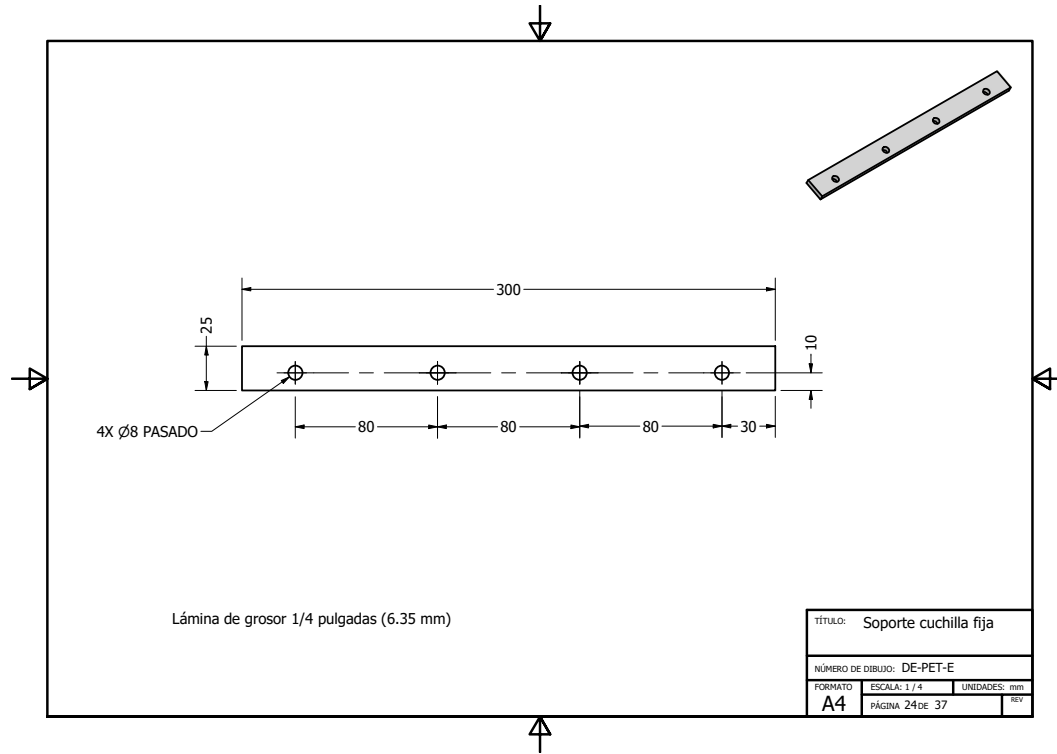


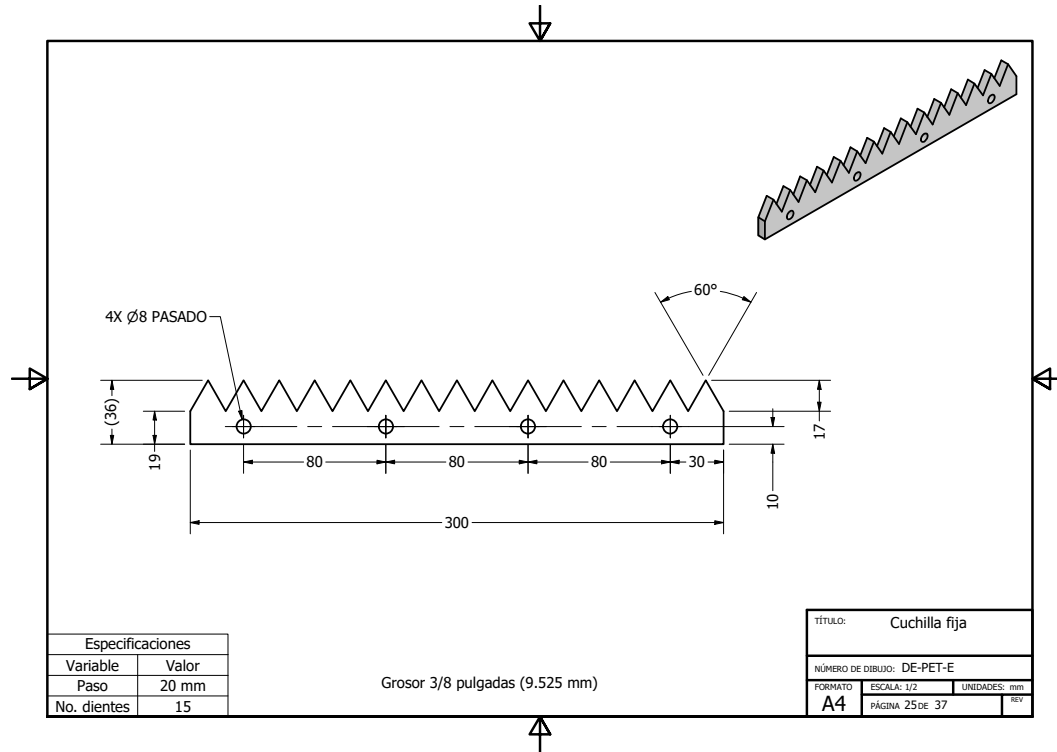


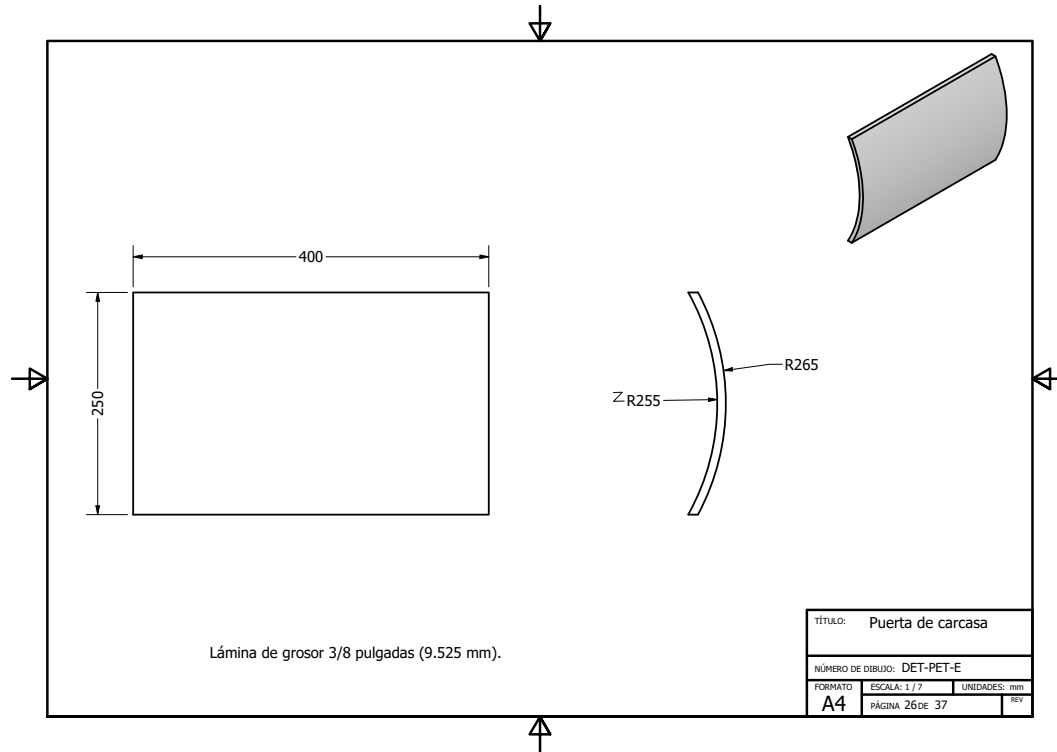




TÍTULO: Tapadera carcasa		
NÚMERO DE DIBUJO: DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1 / 15	UNIDADES: MM
A4	PÁGINA 23 DE 37	REV







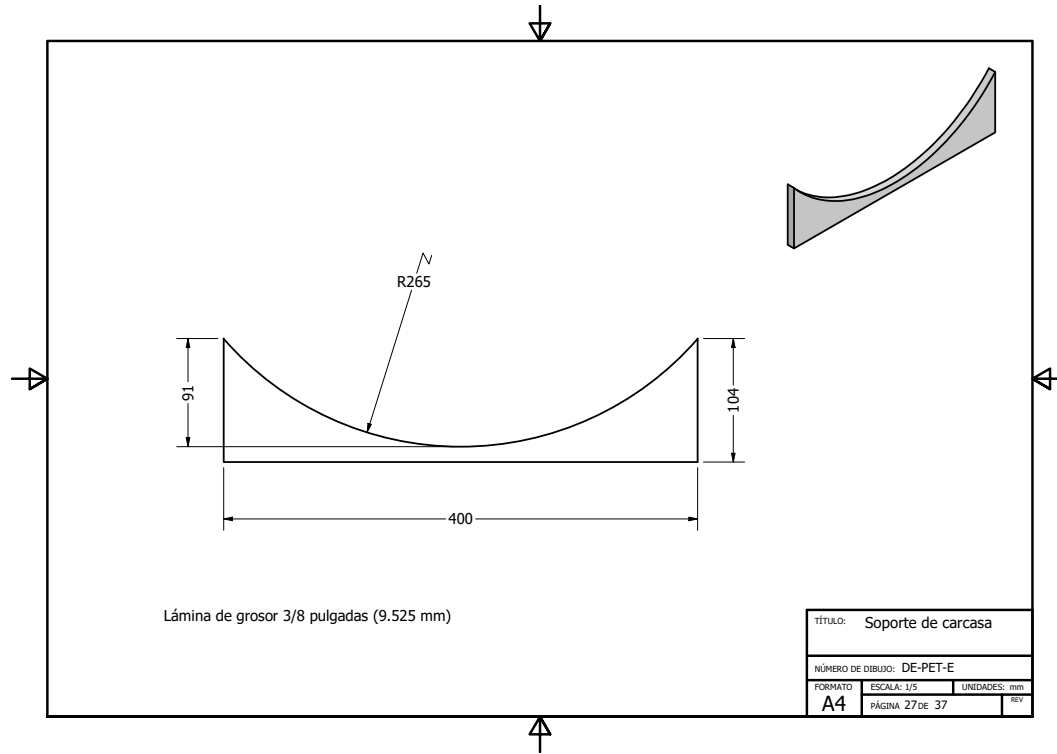
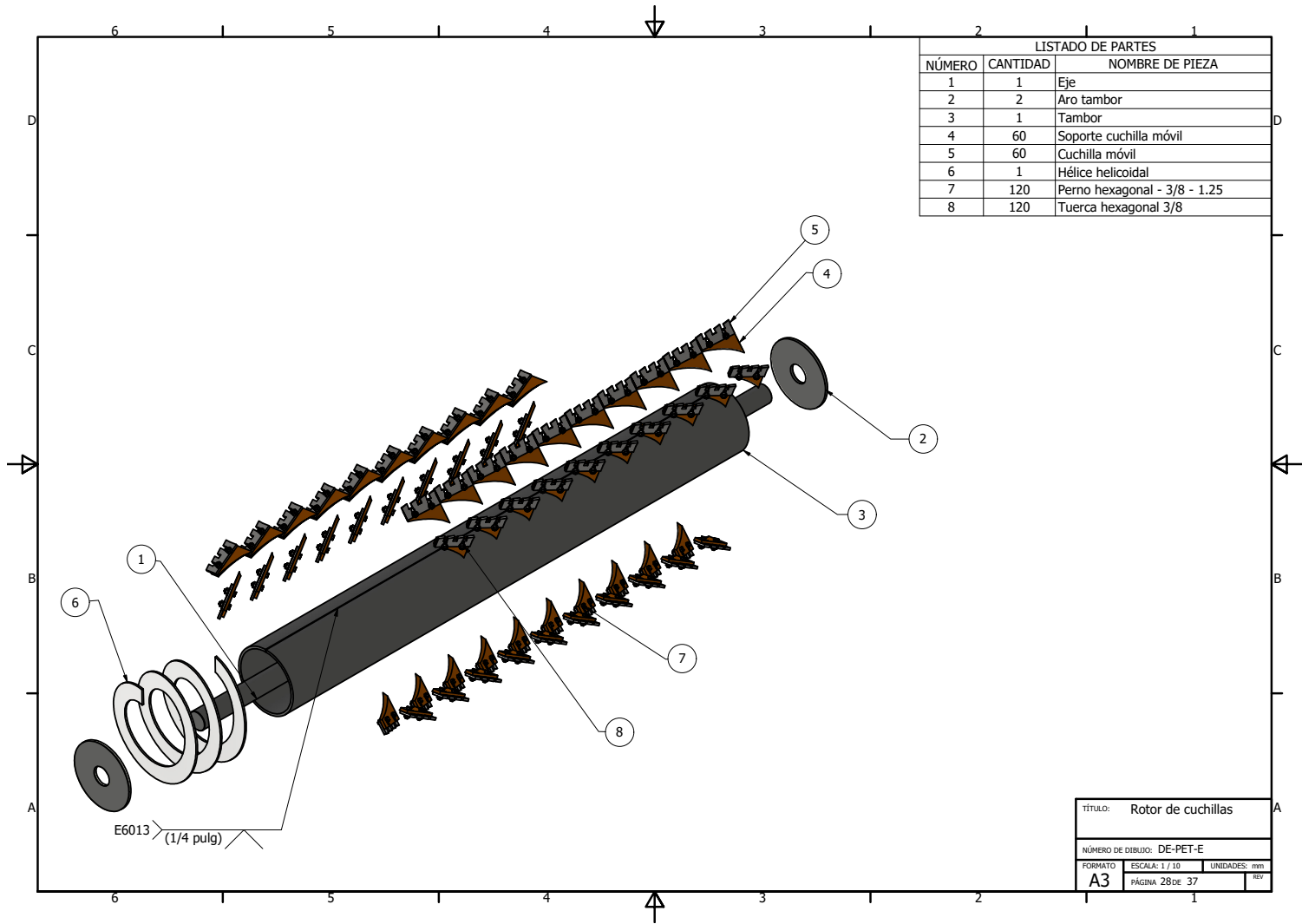


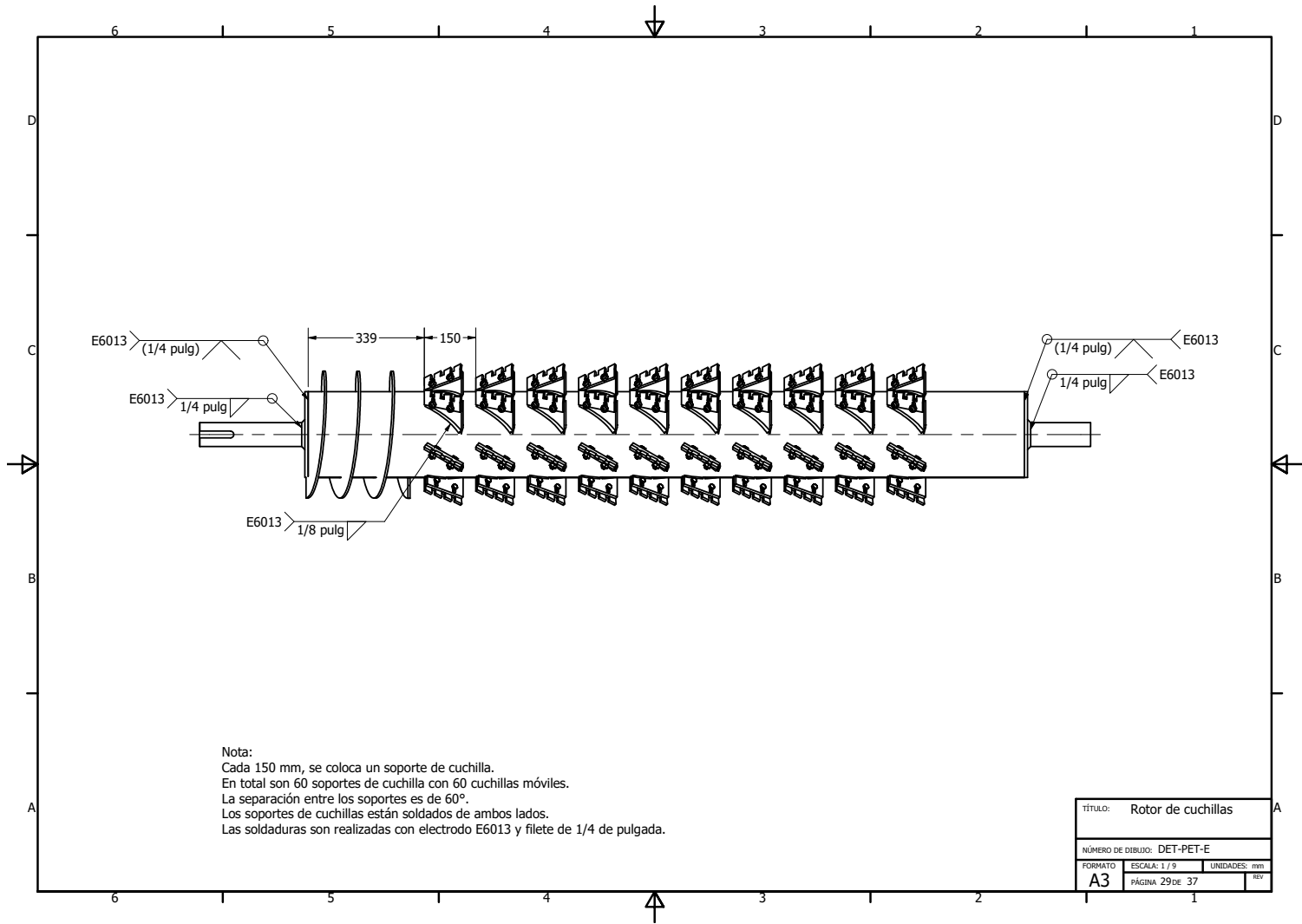
Lámina de grosor 3/8 pulgadas (9.525 mm)

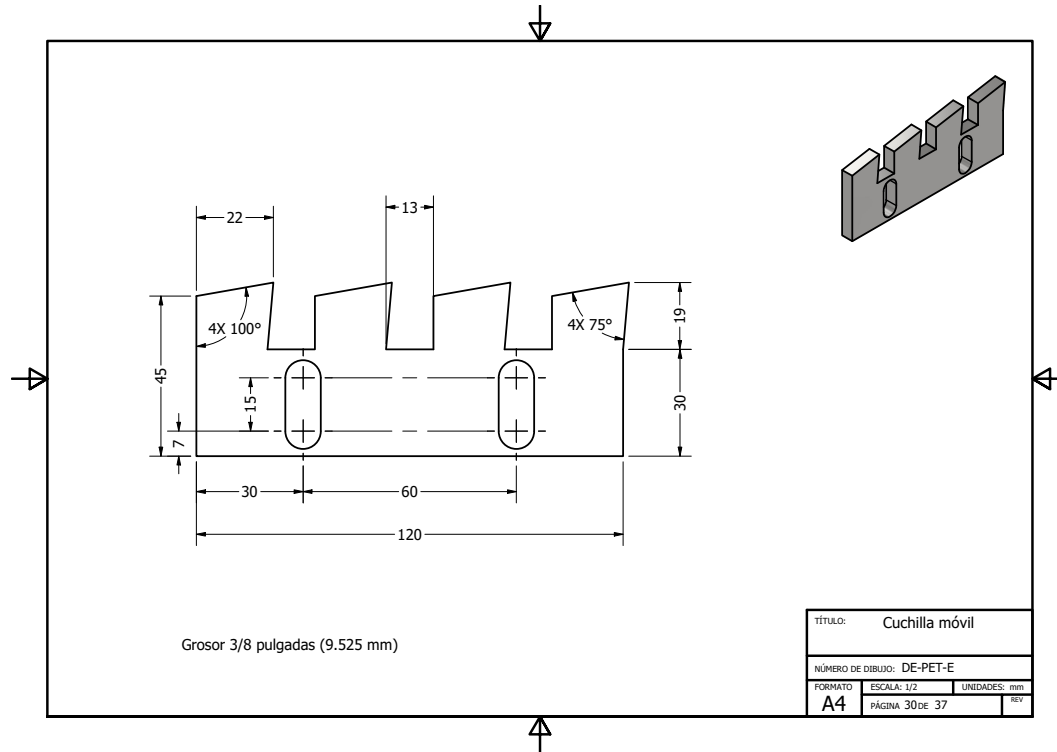
TÍTULO: Soporte de carcasa		
NÚMERO DE DIBUJO: DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1/5	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 27 DE 37	REV



LISTADO DE PARTES		
NÚMERO	CANTIDAD	NOMBRE DE PIEZA
1	1	Eje
2	2	Aro tambor
3	1	Tambor
4	60	Soprote cuchilla móvil
5	60	Cuchilla móvil
6	1	Hélice helicoidal
7	120	Perno hexagonal - 3/8 - 1.25
8	120	Tuerca hexagonal 3/8

TÍTULO: Rotor de cuchillas		
NÚMERO DE DIBUJO: DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1 / 10	UNIDADES: mm
A3	PÁGINA 28 DE 37	REV





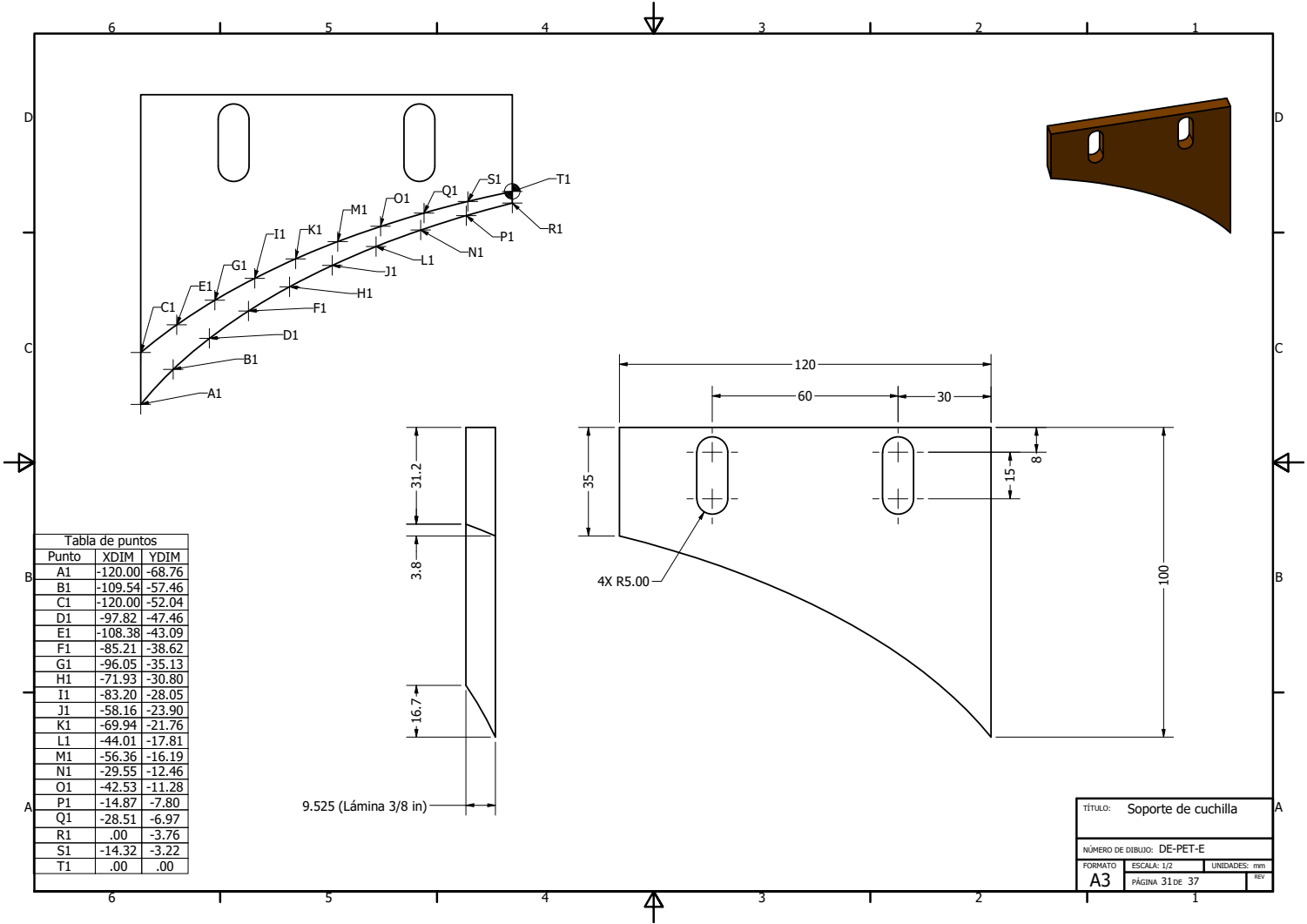
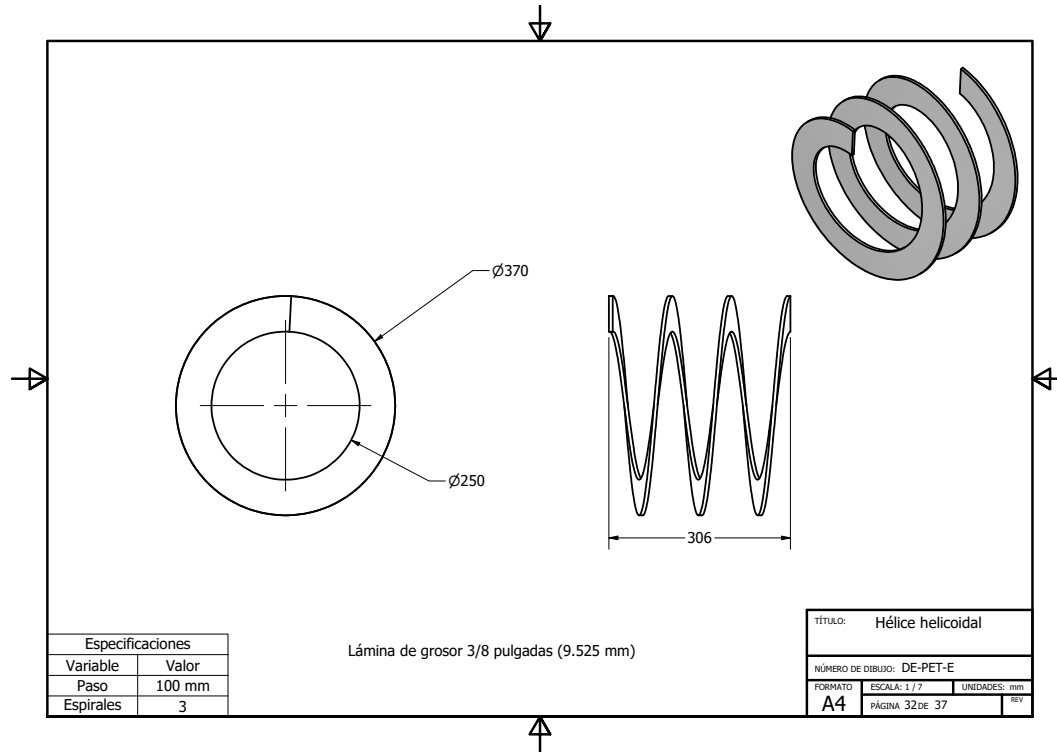


Tabla de puntos		
Punto	XDIM	YDIM
A1	-120.00	-68.76
B1	-109.54	-57.46
C1	-120.00	-52.04
D1	-97.82	-47.46
E1	-108.38	-43.09
F1	-85.21	-38.62
G1	-96.05	-35.13
H1	-71.93	-30.80
I1	-83.20	-28.05
J1	-58.16	-23.90
K1	-69.94	-21.76
L1	-44.01	-17.81
M1	-56.36	-16.19
N1	-29.55	-12.46
O1	-42.53	-11.28
P1	-14.87	-7.80
Q1	-28.51	-6.97
R1	.00	-3.76
S1	-14.32	-3.22
T1	.00	.00

9.525 (Lámina 3/8 in)

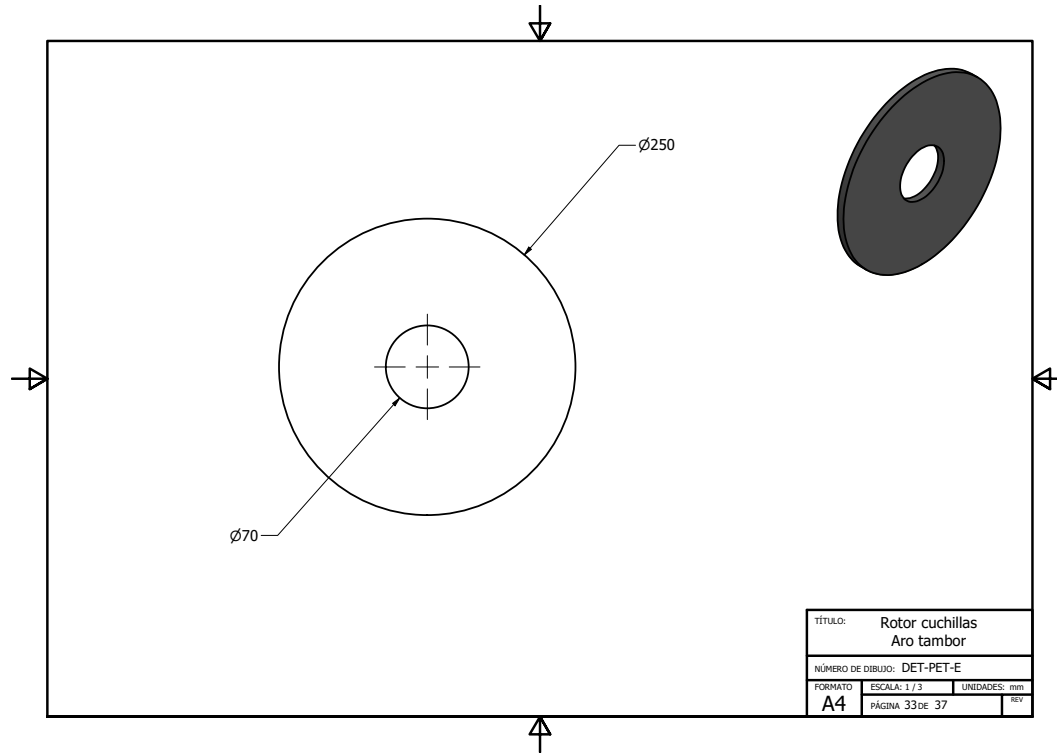
TÍTULO: Soporte de cuchilla		
NÚMERO DE DIBUJO: DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1/2	UNIDADES: mm
A3	PÁGINA 31 DE 37	REV



Especificaciones	
Variable	Valor
Paso	100 mm
Espirales	3

Lámina de grosor 3/8 pulgadas (9.525 mm)

TÍTULO:	Hélice helicoidal		
NÚMERO DE DIBUJO:	DE-PET-E		
FORMATO	ESCALA: 1 / 7	UNIDADES: mm	
A4	PÁGINA 32 DE 37	REV	



TÍTULO:			Rotor cuchillas Aro tambor		
NÚMERO DE DIBUJO: DET-PET-E					
FORMATO	ESCALA: 1 / 3	UNIDADES: mm			
A4	PÁGINA 33 DE 37		REV		

