

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



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

Trabajo de graduación presentado por Adrián Calvo Quezada para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,
2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



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

Trabajo de graduación presentado por Adrián Calvo Quezada para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,
2023

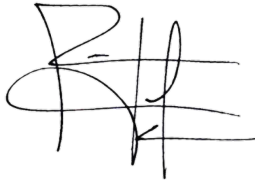
Vo.Bo.:



(f)

Rony José Herrarte Estevez

Tribunal Examinador:



(f)

Ing. Rony José Herrarte Estevez

(f)



Ing. Andrés Rodrigo Viau

(f)



Ing. Laura Maria Roldan

Fecha de aprobación: Guatemala, 05 de diciembre de 2023.

Agradezco a mis padres y abuelos; María Martha Quezada, Luis Fernando Calvo, Argentina Mejía, y Ricardo Quezada, por su apoyo incondicional durante toda mi carrera. Agradezco a Isabel McColaugh por su apoyo incondicional en toda mi carrera universitaria. A mis cuatro hermanos Andres Calvo, Maria Sofia Calvo, Jose Ignacio Calvo, y Jacobo Calvo por todo el apoyo que me dan. Agradezco al Ingeniero, profesor, y asesor de proyecto de graduación, Rony Jose Herrarte. Agradezco a mis compañeros y amigos, por el apoyo durante toda la carrera. Finalmente, agradezco a Dios y a la Virgen Maria por acompañarme por este camino y ayudarme a lograr esta meta.

Prefacio	v
Lista de figuras	XII
Lista de cuadros	XIV
Resumen	XVI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Marco teórico	11
5.1. PET (Polietileno Tereftalato)	11
5.1.1. Tipos de reciclajes de PET	12
5.2. Máquinas de una línea de reciclaje PET	13
5.3. Trituradora PET	14
5.3.1. Tipos de trituradoras	14
5.4. Proveedores de trituradoras	15
5.5. Componentes de una trituradora	16
5.5.1. Tolva	17
5.5.2. Rodamientos	17
5.5.3. Coples	17
5.5.4. Rotor	18
5.5.5. Cuchillas de la trituradora	18
5.5.6. Criba	20
5.5.7. Eje de una trituradora	20

5.5.8. Volante de inercia	20
5.5.9. Peines distanciadores	21
5.5.10. Carcasa	21
5.5.11. Rodamiento de soporte	21
5.5.12. Pernos	21
6. Metodología	23
6.1. Requisitos de diseño	24
6.2. Selección del tipo de trituradora	24
6.2.1. Trituradora de un eje	24
6.2.2. Trituradora de dos ejes	25
6.2.3. Trituradora de un eje con cuchillas desfasadas	25
6.2.4. Evaluación de selección de trituradora	26
6.3. Botella PET (600 ml)	26
6.4. Diseño: Elementos de la trituradora	27
6.5. cálculos	34
6.5.1. Factor de seguridad	34
6.5.2. Cálculo de fuerza de corte de cuchillas	35
6.5.3. Volante de inercia	40
6.5.4. Diseño de volante de inercia	42
6.5.5. Variador de frecuencia	43
6.5.6. Poleas	45
6.5.7. Diseño de engranajes rectos	49
6.5.8. Diseño de ejes	58
6.5.9. Evaluación de selección de diámetro	73
6.5.10. Cojinetes	76
6.5.11. Cuñas	80
6.5.12. Pernos	83
6.6. Simulación de ANSYS	87
6.6.1. Cuchilla	87
6.6.2. Unión de soldadura	91
7. Resultados	97
7.1. Requisitos de diseño	97
7.2. Selección de diseño	98
7.3. Cálculos	99
7.3.1. Cálculo de corte de cuchillas	100
7.3.2. Poleas	100
7.3.3. Engranajes rectos	101
7.3.4. Volante de inercia	101
7.3.5. Ejes	101
7.3.6. Cojinetes	102
7.3.7. Cuñas	103
7.3.8. Cuchillas	103
7.3.9. Soldadura de la carcasa	103
7.3.10. Botón de emergencia	104
7.3.11. Presupuesto	104

8. Análisis de resultados	109
9. Conclusiones	115
10.Recomendaciones	117
11.Bibliografía	119
12.Anexos	123
1. Manual de mantenimiento	125
1.1. Objetivos	2
1.2. Etapas	2
1.2.1. Transmisión de potencia	2
1.2.2. Ejes y componentes	7
1.2.3. Tolva de entrada, tolva de salida, carcasa y base	9
1. Manual de uso	13
1.1. Procedimiento	2
1. Planos de construcción	5
1.1. Objetivos	2
1.2. Equipo personal	2
1.3. Materiales	2
1.4. Proveedores	3

Lista de figuras

1. Trituradora PET	17
2. Botella de 600 ml	27
3. Trituradora	28
4. Trituradora	28
5. Tolva de entrada	30
6. Tolva de salida	30
7. Base	31
8. Peines distanciadores	33
9. Diagrama DCL de cuchilla	36
10. Belt Selection Chart, Bando	46
11. Diagrama de eje	58
12. Diagrama de eje XY	59
13. Diagrama de eje XZ	60
14. Diagrama de eje XY	65
15. Diagrama de eje XZ	66
16. Diagrama de fuerzas en el eje XY	67
17. Diagrama de fuerzas en el eje XZ	67
18. Diagrama de momento en el eje XY	71
19. Diagrama de momento en el eje XZ	71
20. Diagrama de deflexión	75
21. Diagrama de deflexión angular	79
22. Diagrama de deflexión angular plano XY	79
23. Diagrama de deflexión angular plano XZ	80
24. Simulación de fuerzas en las cuchillas	88
25. Simulación de la cuchilla (von Mises)	89
26. Simulación de la cuchilla en el tornillo (von Mises)	90
27. Simulación de la cuchilla (factor de seguridad) en el tornillo	90
28. DCL carcasa	91
29. Aplicación de fuerza sobre la carcasa	92
30. Esfuerzo de von Mises	93
31. Esfuerzo de von Mises soldadura	94
32. Esfuerzo de corte máximo	94

33. Imagen de triturador de dos ejes	98
34. Imagen de triturador de dos ejes	99
35. Cuchilla	103
I. Flipón principal	2
II. Botón de emergencia	2
III. Interruptor principal	3
IV. Interruptor de arranque	3
V. Variador de frecuencia	3
VI. Trituradora final	4

Lista de cuadros

1. Requerimientos de diseño	24
2. Evaluación de diseño	26
3. Standart Sheave Outer Diameters, Bando	47
4. Coef. of ARC of Contact, Bando	48
5. Evaluación de engranajes	55
6. Factores de piñón-engranaje	56
7. Evaluación de esfuerzos	56
8. Factor superficial	69
9. Factor de tamaño	69
10. Factor de temperatura	70
11. Factor de confiabilidad	70
12. Evaluación de momento resultante	72
13. Factor de concentración de esfuerzos	72
14. Evaluación de diámetro	73
15. Aplicación de cojinetes	76
16. Aplicación de cojinetes	78
17. Deflexiones	80
18. Propiedades de los materiales	88
19. Propiedades de A36	92
20. Requerimientos de diseño	97
21. Requerimientos de diseño	98
22. Factor de seguridad	99
23. Cálculo de fuerzas	100
24. Poleas	100
25. Engranajes rectos	101
26. Volante de inercia	101
27. Fuerzas	102
28. Cojinetes	102
29. Presupuesto	104
30. Presupuesto	105
31. Presupuesto	106
32. Presupuesto	107

33. Presupuesto final	107
34. Presupuesto	108
I. Motor	4
II. Poleas y fajas	5
III. Engranajes	6
IV. Ejes	8
V. Ejes	9
VI. Procedimiento de tolva de entrada, tolva de salida, carcasa y base	11
VII. Procedimiento de tolva de entrada, tolva de salida, carcasa y base	12

Se diseñó una trituradora para Tereftalato de Polietileno (PET) que será parte del diseño de una línea de reciclaje, la cual debe cumplir con los requerimientos de la línea de reciclaje para garantizar un correcto acople con el resto de las maquinarias. La línea de reciclaje consta de una separadora de etiquetas, una peletizadora, 2 lavadoras, una extrusora y una trituradora. Se investigó recicladoras de PET, las cuales ayudaron a comprender el mercado en Guatemala y la manera en que funcionan las líneas de reciclaje PET. Se realizó el diseño de la línea de reciclaje debido a la gran cantidad de contaminación que se tienen en los ríos, lagos y basureros en Guatemala, por lo que presenta una solución para las comunidades de manera que se pueda disminuir la contaminación.

El proyecto presentado aborda el proceso de diseño y análisis de una trituradora de PET. Se detallan los procesos, aspectos técnicos y consideraciones tomados en cuenta para diseñar cada uno de los componentes de la trituradora, con el objetivo de satisfacer una necesidad de flujo másico de 150 kg/h. El proceso de diseño comenzó con la consideración de la necesidad de triturar 2 botellas de 600 mL por segundo, a partir de esto, se llevaron a cabo análisis detallados de todos los elementos de diseño, incluyendo las dimensiones de la carcasa, la fuerza requerida para el corte de las botellas, velocidad de rotación y potencia del motor eléctrico. Se llevó a cabo un análisis de esfuerzos en varias piezas con el objetivo de cumplir con el requisito de un factor de seguridad igual o superior a 2. El enfoque principal fue garantizar un funcionamiento seguro y eficiente de la línea de reciclaje. Para realizar estos cálculos, se aplicaron diversos teoremas y se abordaron sistemas a través del análisis del comportamiento de las piezas mediante simulación estática en ANSYS. El enfoque principal del proyecto fue presentar un diseño que utilice materiales fácilmente disponibles en Guatemala, manteniendo un presupuesto adecuado para la fabricación. se incluyen los planos de fabricación, generados con la herramienta Autodesk Inventor, y el ensamblaje completo de la maquinaria utilizando la misma herramienta mencionada con anterioridad.

Se presentó la lista de materiales necesarios para su fabricación, así como el costo total de materiales con el objetivo de encontrar una solución óptima que sea competitiva en términos de costos en comparación con las maquinarias disponibles en el mercado. El propósito final es presentar un diseño de línea de reciclaje de PET, lo cual permitirá iniciar el proceso de reciclaje de PET en zonas donde aún no se realice. Un factor importante que no se

puede esconder es que el PET, a pesar de sus múltiples usos y beneficios representa un gran problema para el medio ambiente. La producción y eliminación inadecuada de productos de PET ha provocado la contaminación en los océanos, ríos y suelos. La acumulación de botellas, envases y productos desechados de plástico ha alcanzado niveles alarmantes de contaminación. Es importante que se sigan tomando medidas prácticas para reducir, reciclar y reutilizar PET. Con un proyecto como el presentado se podrá disminuir la contaminación generada por el PET y se presentan posibles alternativas para un futuro sostenible y limpio para las generaciones futuras. Este proyecto representa un paso significativo hacia la gestión sostenible de residuos plásticos, ofreciendo una solución efectiva y adaptable a las demandas cambiantes de la industria del reciclaje. Además, se busca fomentar la conciencia ambiental en las comunidades de Guatemala, para que el reciclaje se convierta en parte de su vida diaria y así lograr un impacto positivo en el medio ambiente.

El Polietileno Tereftalato es un polímero que se obtiene a través del proceso de polimerización del monoetilenglicol y el ácido tereftálico. Se trata de un material termoplástico altamente cristalino que puede ser moldeado en diversas formas, como botellas, envases, vasos y más. Este material ha encontrado una amplia aplicación en la vida cotidiana de los seres humanos. Sin embargo, en las últimas tres décadas, ha ocurrido un aumento exponencial en la producción global de plástico, con un incremento del 500 por ciento. Este crecimiento ha tenido un impacto significativo en el medio ambiente y sus ecosistemas. Las proyecciones indican que esta tendencia no se detendrá, y se estima que la producción anual de plástico podría alcanzar las 850 toneladas para el año 2025. Este aumento en la producción de plástico plantea desafíos importantes en términos de gestión de residuos y conservación ambiental. (Hunt et al., [2015](#))

En Guatemala y en diversas partes del mundo, se han presenciado los impactos de la contaminación global, estos efectos se han manifestado a través de cambios climáticos que han ocasionado aumento de temperaturas y deshielo de polos norte y Antártida. Un estudio realizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) reveló datos significativos en relación con la contaminación. Cada año, millones de toneladas de agua, principalmente en los mares, se contaminan con desechos, y sorprendentemente, entre el 60 y el 80 por ciento de estos desechos son plásticos. Varios estudios presentaron al Polietileno Tereftalato (PET) como el plástico de poliéster más abundante, con casi 70 millones de toneladas fabricadas anualmente en todo el mundo para su uso en textiles y envases. Esto planteó una problemática, debido a la lenta desintegración de aproximadamente 500 años. Esto ha generado problemas en suelos y cuerpos de agua, afectando a su vez la vida cotidiana de los seres humanos. Se han desarrollado varias tecnologías para el reciclaje de PET.

Un sistema de reciclaje involucra la recolección de cantidades significativas de desechos, que luego son sometidos a una serie de procesos, como limpieza, trituración y fundición. El objetivo principal de estos procesos es gestionar los residuos y transformarlos en nuevos productos. En el caso del reciclaje de PET, se han desarrollado y aplicado varios métodos,

incluyendo el reciclaje mecánico, químico y energético. Estos métodos permiten tratar el Polietileno Tereftalato de diversas maneras para obtener un material completamente nuevo que puede utilizarse en una variedad de aplicaciones.

En el trabajo presentado por Gómez, se aborda el uso de fibras PET en la construcción de viviendas económicas como una solución potencial para la reducción de la contaminación derivada de la producción masiva de plástico. Se describen las propiedades del PET y la metodología empleada para la investigación de su impacto en las propiedades mecánicas del concreto, específicamente en la resistencia a la compresión y flexión. Se llevaron a cabo pruebas con distintos porcentajes de PET en la mezcla de concreto y se compararon los resultados con muestras sin PET. Se evaluó cómo estos porcentajes afectaban las propiedades mecánicas del concreto. Los resultados ayudaron a determinar que el uso de PET es viable en el diseño de viviendas de un solo nivel, contribuyendo así a la reducción de la contaminación. (Gómez Jimbo & Pulluquitin Benavides, 2021)

En el proyecto titulado *Diseño de una trituradora de PET como herramienta de apoyo para las asignaturas de Ingeniería de UNICATÓLICA*, se presenta preocupación en cuanto al exceso de los desechos de PET, que está teniendo un impacto negativo en el medio ambiente. Presentaron como objetivo principal el diseño de una trituradora de PET. Para ello, realizaron un análisis detallado del espacio disponible en el laboratorio de la Universidad UNICATOLICA, donde se prevé su utilización. En este, se exploraron las tecnologías de trituración de PET disponibles en la actualidad y se evaluaron diversas alternativas para seleccionar un subsistema de corte que cumpliera con los criterios iniciales. Se tenía como iniciativa fundamental la formación de los estudiantes de ingeniería industrial y, al mismo tiempo, contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental al abordar la problemática de los desechos de PET. (Clevel Angulo et al., 2020)

En el proyecto presentado por Aguirre, se describe que en Ecuador, se generan aproximadamente cuatro millones de toneladas de desechos, de las cuales un millón corresponde a materiales reciclables, de las cuáles solo se reciclan entre un 15 a un 25 por ciento. La falta de reciclaje ha generado acumulación de desechos, especialmente plástico y metal, que tienen un tiempo de descomposición extremadamente largo, lo que provoca consecuencias ambientales. En Ecuador, se han establecido diversas empresas dedicadas al manejo de residuos y reciclaje, utilizando maquinaria especializada para procesar estos materiales. Este proyecto

se centró en la etapa crucial de trituración. Se propuso la construcción de un prototipo de trituradora para el reciclaje de plástico y aluminio, además de la evaluación de fabricar placas de material compuesto con los materiales triturados. Presentaron una solución a un problema de alta contaminación en el país para promover la gestión sostenible de los residuos. (Aguirre et al., 2018)

En el trabajo de graduación titulado *Estudio de alternativa al proceso de reciclaje del plástico PET en la Universidad Católica de Colombia*, se resaltó la creciente inquietud a nivel mundial acerca de la problemática de la contaminación plástica en los océanos. El estudio del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) revela que cada año se contaminan millones de toneladas de agua, principalmente mares, con desechos, de los cuales entre el 60 y 80 por ciento son plásticos. Estudios como el Sustainable Cities Index incentivan tanto a ciudades como a industrias a balancear su crecimiento económico con enfoques ambientales. Prestigiosas organizaciones como Green Peace y WWF dedican sus esfuerzos a la conservación medioambiental. De manera paralela, la Universidad Católica de Colombia lideró la promoción de prácticas como el transporte sostenible y la gestión inteligente de recursos mediante campañas. Perilla presenta una estrategia concreta para abordar esta problemática, la implementación de una máquina trituradora, junto con la creación de un prototipo con un enfoque en sensibilización. El objetivo que presentó fue mejorar la gestión de los residuos plásticos y así contribuir al resguardo del medio ambiente. Se buscaba crear conciencia y sensibilizar a la comunidad universitaria sobre la importancia de una gestión adecuada de los residuos plásticos. La cantidad significativa de botellas PET generadas en la universidad de Colombia hace que la implementación de esta máquina sea viable y valiosa para reducir el volumen de PET. (Perilla-Tabares, 2017)

En el trabajo de reciclado de plástico de PET, comentaba que la tecnología ha experimentado avances significativos en la creación de envases más eficientes para almacenar alimentos y bebidas. Entre los materiales ampliamente utilizados, se destaca el PET (Tereftalato de Polietileno), el cual se emplea en la producción de botellas y otros tipos de envases. Es esencial destacar que el PET presenta una descomposición extremadamente lenta, con un proceso que puede extenderse hasta 500 años. Además de esta larga degradación, su descomposición genera residuos tóxicos, y si el material termina enterrado, su desgaste se torna aún más prolongado. Esta situación puede repercutir negativamente en la productividad agrícola de los suelos, lo que a su vez afecta directamente la economía y el estilo de vida de la población local. (Bolaños Zea, 2019)

En el trabajo del reciclado de plástico de PET, se desarrolló el diseño de una trituradora de PET que emplea un sistema de cuchillas rotatorias para su funcionamiento. Este enfoque permitió la fragmentación del material reciclado mediante cuchillas en movimiento (vinculadas a un eje) y fijas (fijadas en la cámara de trituración). En la parte inferior de esta cámara se incluyó una malla para separar el material triturado de acuerdo a su tamaño correspondiente. Realizaron un cálculo de la fuerza al medir el grosor del material PET, basado en el esfuerzo de fractura del PET, establecido de 9.5MPa. (Bolaños Zea, 2019)

Pérez, Ruiz destacaron la importancia del reciclaje de las botellas PET en la producción de diversos productos. Analizaron el mercado del sector en Lima y su evolución reciente. Describieron el proceso de reciclaje de PET, que implica la transformación de botellas en hojuelas de PET y luego en fibras de poliéster. Estas fibras se utilizaron en la fabricación de ropa, cojines, alfombras y más. Además, se destaca la contribución del reciclaje de PET a la

protección del medio ambiente. El PET está compuesto principalmente por petróleo y gas natural, y su proceso de producción implica la obtención de ácido tereftálico y etilenglicol a partir de estos recursos. Se utiliza ampliamente en la fabricación de botellas para bebidas, cosméticos, medicinas y otros productos, representando alrededor del 65 por ciento de todos los envases en la industria de bebidas.(Mansilla-Pérez & Ruiz-Ruiz, 2009)

En los estudios de factibilidad para la creación de una empresa recicladora de plástico PET elaborada por Montoya, se afirma que el plástico desempeña un papel esencial en la cadena de valor de numerosos productos y representa una industria global altamente competitiva, fundamental para el crecimiento económico. Sin embargo, su uso excesivo generó una preocupante contaminación ambiental, por lo que plantearon desafíos significativos tanto para las industrias manufactureras como para las organizaciones y políticas centradas en la protección del medio ambiente. Así mismo, exploraron diversos enfoques para la recolección y clasificación de estos residuos, resaltando la importancia de la capacitación de individuos en esta causa. En particular, consideran la posibilidad de diseñar y desarrollar sistemas o tecnologías que faciliten la recolección, clasificación y reciclaje de plásticos, contribuyendo así a la reducción de su impacto ambiental y promoviendo prácticas más responsables en el uso de este material. (Giraldo Montoya, 2011)

En el trabajo titulado *Diseño de una máquina trituradora de plástico para la comunidad de Limoncocha, provincia de Sucumbios-Ecuador*, se desarrolló el diseño de una trituradora de PET con el propósito de brindar apoyo a la comunidad de Limoncocha. El trabajo incluyó antecedentes sobre esta comunidad y detalles del diseño de la trituradora, que abarcaron cálculos para ejes, cojinetes, cuchillas y esfuerzos. Estos cálculos fueron presentados con el objetivo de facilitar la comprensión del proceso de fabricación y resaltar los factores clave considerados para adaptar el proyecto a otras comunidades, promoviendo así la enseñanza del reciclaje y sus beneficios económicos. (Hidalgo Sánchez, 2020)

El trabajo presentado por Mendoza en el 2019, se centró en la concepción de un prototipo de máquina trituradora diseñada específicamente para botellas PET. El objetivo principal fue desarrollar un prototipo, para lograrlo, se establecieron objetivos específicos que abarcaron la definición de parámetros de velocidad, fuerza, así como determinar las dimensiones de los componentes de la máquina. La metodología utilizada fue involucrar la selección del mecanismo de trituración más adecuado para sus necesidades. Se presenta que el estudio abarcó con aspectos clave como la potencia necesaria, el diseño de las cuchillas de corte y el eje, lo que resultó en un conjunto completo de elementos esenciales para la construcción de la trituradora.(Mendoza, 2019)

En el trabajo presentado por Gonzales en el 2021, se emprendió el diseño de cada componente junto con su correspondiente factor de seguridad, aseguraron una operación eficiente en la máquina. Diseñaron el eje de la trituradora acorde al factor de seguridad, con la potencia necesaria de 2.5 hp y las reacciones que los cojinetes debían soportar dentro del diseño. Asimismo, diseñaron la cuchilla con la fuerza adecuada para el corte del material, presentando sus resultados mediante el sistema ANSYS para simular su funcionamiento. Estos aspectos fueron esenciales para garantizar el diseño preciso de la trituradora de PET. La trituración del plástico PET con las cuchillas del diseño se llevaron a cabo en un tiempo promedio de 14.6 segundos, lo que resultó en una mejora sustancial en la producción de hojuelas. Durante un período de 24 horas, lograron reflejar que el prototipo podía procesar un total de 5,918 botellas, y según los resultados, el prototipo llegaría a tener una producción anual de 19

toneladas de hojuelas de plástico PET.(Taco et al., 2021)

En el trabajo titulado *estudio de factibilidad para la creación de una empresa recicladora de plástico PET post-consumo en el municipio de La Virginia, Risaralda*, se evaluó la viabilidad de establecer una línea de reciclaje, enfrentando limitaciones. Se reconoció la falta de recursos económicos para implementar la línea sin financiamiento, lo que impulsó al diseño y evaluación de costos para futuros inversores. El proyecto presentado impactó en el eje cafetero, por lo que buscaron implementar una planta de reciclaje de plástico PET en La Virginia, Risaralda, Colombia. (Giraldo Montoya, 2011). Se presentó por el autor, que el almacenamiento del plástico molido y empacado debe ser en una bodega fresca, seca y eléctricamente segura debido a su inflamabilidad. El estudio abarcó diversos aspectos del mercado del PET molido, incluyendo su situación actual, competencia en Colombia, satisfacción del mercado, proyecciones y costos. Se presentaron cifras relacionadas con inversión, ganancias, costos fijos y variables, destacando que obtuvieron un TIR del 33.3 por ciento, lo que indica rentabilidad superior a la tasa de oportunidad del mercado, posicionando su proyecto como preferible frente a otras inversiones. (Giraldo Montoya, 2011)

El enfoque del proyecto titulado *Diseño de una máquina trituradora de neumáticos, constaba en el desarrollo del diseño de una máquina trituradora de neumáticos con cuatro árboles*, destinada a convertir neumáticos en granulados de 20 mm para su posterior reciclaje en una planta. El propósito fue mitigar la contaminación derivada de neumáticos desechados al término de su vida útil, mediante una construcción de bajo costo. Se diseñaron los componentes mecánicos, fundamentándose en conceptos de diseño, análisis de máquinas trituradoras ya existentes en el mercado. (Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017)

Durante los últimos años, el ser humano se ha dado cuenta de la necesidad de tener una conciencia hacia el medio ambiente, debido a que el ambiente se ha visto afectado por la contaminación. “El uso desmedido de los recursos naturales y el aumento de la contaminación ambiental están dañando nuestro ecosistema, originando que muchos de estos no se regeneren. [...] Actualmente de los desechos que generamos diariamente el 3 por ciento se vierte en un río, laguna o al mar, 12 por ciento se quema al aire libre, contaminando el medio ambiente, 61 por ciento se deja en un botadero a cielo abierto, el 21 por ciento es destinado a los rellenos sanitarios mientras que sólo un 2 por ciento se recicla y 1 por ciento que no se precisa.” (Bardales, 2016). A lo largo de los años la contaminación global ha ido aumentando, causando cambios climáticos drásticos, en los cuales se ha visto afectado con temperaturas extremas de calor. “España está viviendo una de las peores olas de calor de la historia. Hasta 15 provincias superan los 40 grados y en zonas como Sevilla o Toledo, se pueden llegar a los 42 o 43. Una situación que se complica cada vez más, y que hace que los termómetros rompan registros casi cada día en la Península Ibérica.” (AS, 2022).

A lo largo de los años varias personas y empresas han observado este factor de la contaminación global, han desarrollado varias formas de reciclar los residuos que se desechan todos los días. Una solución a la contaminación es reciclando el PET, mediante una línea de reciclaje que puede convertir el PET ya utilizado, en otro elemento que permitirá no seguir desechando el residuo y no seguir fabricando uno completamente nuevo que a largo plazo sólo afectará más de lo que ya se ha visto afectado el planeta. Por ello se diseñó un elemento que es fundamental en una línea de reciclaje PET, la cual es la trituradora del material. Este proyecto es una investigación de maquinarias ya fabricadas en la industria, para poder comprender su funcionamiento y diseñar una opción competitiva y viable para el entorno guatemalteco. Se evaluó el eje, las cuchillas de corte, los esfuerzos de dichos elementos y su factor de seguridad para poder brindar el mejor diseño para toda la línea de reciclaje.

Se propone el diseño de una línea de reciclaje PET que permita a las comunidades poder reciclar y poder crear conciencia a las personas para que empiecen a reciclar. En este proyecto se diseñó la trituradora de la línea de reciclaje, que permita entregar en particular PET en

un tamaño apropiado para el siguiente proceso, considerando que todas las maquinarias deben de tener similar flujo volumétrico.

4.1. Objetivo general

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

4.2. Objetivos específicos

- Definir los componentes de una trituradora para una línea de reciclaje PET.
- Diseñar la trituradora con materiales que se encuentren localmente en Guatemala.
- Calcular el factor de seguridad de cada uno de los elementos de la trituradora para que sea mayor o igual a 2.
- Presentar el presupuesto necesario para la fabricación del equipo
- Crear los manuales de fabricación, uso y mantenimiento de la trituradora.

A medida que la producción de residuos aumenta en todo el mundo, se han desarrollado diversas soluciones para permitir a las personas reciclar y otorgar una segunda oportunidad a los materiales usados. En este contexto, se ha puesto énfasis en la implementación de un sistema eficiente de reciclaje para el material PET, el cual consta de una línea de procesamiento compuesta por múltiples máquinas diseñadas para limpiar, triturar, fundir y transformar dicho material en una nueva forma utilizable, adaptada a las necesidades del cliente.

5.1. PET (Polietileno Tereftalato)

El material PET (Polietileno Tereftalato) es un polímero obtenido mediante el proceso de polimerización de monoetilenglicol y ácido tereftálico. (Aguirre et al., 2018) Es un material termoplástico altamente cristalino que puede ser moldeado de varias formas, tales como procesos de extrusión, inyección, inyección-seco, y otros procesos que permiten la fabricación de diversos utensilios que son de uso cotidiano para los seres humanos. Los polímeros se han convertido en uno de los materiales más importantes para el desarrollo de la tecnología y la ciencia, y son esenciales para el mantenimiento de nuestro actual estilo de vida. (Moreno, 2019). En los últimos 30 años, la producción global de plástico ha aumentado en un 500 por ciento, lo que ha generado un impacto significativo en el ambiente. Se espera que la tendencia continúe, y se proyecta que la producción alcanzara las 850 toneladas por año para el año 2025. (Hunt et al., 2015). El polietileno Tereftalato es el material más reciclado alrededor del mundo. Es un material que a base de varios procesos se puede reutilizar. (Mendoza, 2019). El PET se utiliza comúnmente para fabricar botellas. Para reciclarlas, primero se llevan a una línea especializada de reciclaje PET, donde se realiza un lavado del plástico para eliminar etiquetas y otras partes que no sean de material PET. Seguido de esto, se separan las botellas por colores para poder triturar, secar y esterilizar el material. Una vez que el material está preparado, se funde y se inyecta en moldes para producir diferentes formas según las necesidades o requerimientos del cliente. (Doulache et al., 2010) (A. P. Rodriguez

et al., 2006)

Un sistema de reciclaje consiste en la recolección de grandes cantidades de residuos de diversos materiales en diferentes áreas. Luego, se someten a procesos de limpieza, triturado y fundición para tratar los residuos y crear productos nuevos. Este proceso permite darle un segundo uso a los materiales ya utilizados. Este proceso solo es posible gracias a la aplicación de máquinas especializadas que son diseñadas específicamente para trabajar con los diferentes tipos de residuos. La nueva producción resultante puede ser utilizada por la misma empresa para fabricar el mismo producto, para fabricar otro producto o para ser innovadores. Este proceso no solo contribuye a la preservación del medio ambiente, sino que también ayuda a la economía de la industria al evitar la acumulación innecesaria de residuos. (Aguirre et al., 2018)

Mediante varios estudios se ha encontrado que el material PET es uno de los más utilizados alrededor del mundo y así mismo uno de los que más se desecha. Las estimaciones actuales comentan que de las 359 millones de toneladas de plásticos que se producen anualmente en todo el mundo, entre 150 y 200 millones de toneladas se acumulan alrededor del mundo. El Polietileno tereftalato (PET) es el plástico de poliéster más abundante, con casi 70 millones de toneladas fabricadas anualmente en todo el mundo para su uso en textiles y envases. El principal proceso de reciclado del PET, por medios termomecánicos, da como resultado una pérdida de propiedades mecánicas. (Tournier et al., 2020)

5.1.1. Tipos de reciclajes de PET

Dentro de la industria del reciclaje, existen tres métodos principales para reciclar el Polietileno Tereftalato: el reciclado mecánico, el reciclado químico y el reciclado energético (Gómez Jimbo & Pulluquitin Benavides, 2021)

Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico es una manera física con la cual se puede volver a dar una segunda vida al Polietileno Tereftalato mediante un proceso de limpieza, selección, triturado y con inyección convertirlo a otro material. Este proceso se ampliará más adelante. (Gómez Jimbo & Pulluquitin Benavides, 2021)

Es la conversión de los desechos plásticos post consumo en gránulos que pueden ser reutilizados en la producción de otros materiales. Este proceso mediante las siguientes maquinarias:

- Trituradora: el PET es fragmentado en pequeñas partes con cuchillas.
- Remoción de contaminantes: en este proceso se remueven los contaminantes como las etiquetas, papeles, entre otros.
- Lavado: esta etapa después de remover los contaminantes, el pet pasa por el lavado para eliminar toda suciedad.

- Secado: en esta etapa se retira el agua que en exceso de los procesos anteriores por medio de centrifugado.
- Extrusora: la extrusora funde y vuelve la masa plástica homogénea. Al salir de la extrusora se encuentra el cabezal, al salir, sale en un tipo espagueti enfriando el material con agua. Luego de ser enfriado es picado en un granulador para formar pallets. (Freire Cárdenas & González Mosquera, 2014)

Reciclaje químico

El reciclado químico es un proceso que implica la descomposición del polímero para obtener sus componentes de partida. Este proceso es posible, a través de un proceso de polimerización posterior, se pueden crear nuevos materiales poliméricos a partir de estos componentes. El fin del reciclado químico es contribuir a la preservación del medio ambiente mediante la reutilización de los residuos y la reducción de la contaminación asociada con la fabricación de nuevos materiales de PET. (Gómez Jimbo & Pulluquitin Benavides, 2021)

El método de despolimerización térmica es cuando se utilizan tecnologías que permiten la transformación de los polímeros en monómeros u oligómeros mediante aporte de calor, sin la intervención de un reactivo químico en las reacciones de ruptura de las cadenas del polímero. (Clevel Angulo et al., 2020)

El método de disolución de los plásticos permite recuperar los polímeros purificados, mediante la eliminación de todo contaminante en los desechos. El método de reacciones de despolimerización, el proceso de reciclado químico rescata todos los monómeros de partida, los cuales son destinados nuevamente a la adquisición de polímero. Se le aplican ciertas reacciones químicas para dicho proceso como metaanálisis, glicólisis, e hidrólisis. (Gómez Jimbo & Pulluquitin Benavides, 2021)

Reciclaje energético

El reciclaje energético se basa en aprovechar las propiedades de combustión que tiene el PET. El residuo plástico se coloca en una incineradora para ser quemado, produciendo energía calorífica la cual puede ser utilizada de diferentes formas como en las casas, fábricas o también para producir energía eléctrica. Este proceso tampoco es muy eficiente. Ya que, si se está intentando disminuir la contaminación, esta combustión puede dispersar gases tóxicos que afectan al ambiente. (Gómez Jimbo & Pulluquitin Benavides, 2021)

5.2. Máquinas de una línea de reciclaje PET

Una de las etapas de la línea de reciclaje es la separadora la cual cumple con la tarea de separar los diferentes residuos. Posterior a separar los residuos y colocarlos en orden, se ingresa el material a una trituradora, esta convierte el residuo en un tamaño en específico que se coloca según sea la capacidad de la máquina y sus cuchillas o discos. Luego la trituradora entrega el material desgarrado a una tina, llamada tina prelavado, esta etapa se encarga de

prelavar el material y remover los impropios adheridos al plástico y luego pasa a la lavadora para eliminar parte del agua del material, posterior a esto se ingresa a otra trituradora y vuelve a hacer los mismo proceso de lavado y secado para entregar el material. (Quintana & Rodriguez Mejia, 2010)

5.3. Trituradora PET

Una trituradora de Polietileno Tereftalato tiene como objetivo desmenuzar el material en pequeños pedazos sin convertirlo en polvo. El proceso se lleva a cabo mediante el giro de cuchillas impulsadas por un motor con torque suficiente para generar el corte necesario. La capacidad de corte de estas trituradoras varía según la cantidad de botellas que se manejan por hora.

Las trituradoras de PET constan de una boca de entrada cuyas dimensiones se ajustan a la capacidad de la línea de reciclaje, y un sistema de transmisión de potencia que conecta el motor a los ejes que sostienen las cuchillas. Estas últimas son las encargadas de desmenuzar los residuos en tamaños que van desde los 15 cm hasta los 3 cm. Si se requiere una reducción adicional del tamaño, se utiliza un molino para cortar los residuos en dimensiones más pequeñas. La trituradora de PET es una herramienta fundamental en el proceso de reciclaje, ya que permite el corte del material en pedazos útiles para la fabricación de nuevos productos. (F. A. Rodriguez, 2015)

5.3.1. Tipos de trituradoras

Para las líneas de reciclaje PET (polietileno tereftalato) se pueden encontrar en la industria varios tipos de trituradoras que se acoplan según sea el fin de la línea, es decir que tan pequeño se desea el residuo y que tan eficiente se desea que sea la trituradora (Hidalgo Sánchez, 2020). Las trituradoras se clasifican según los procesos mecánicos y la función de su utilización. Los procesos pueden ser cortar, martillar, entre otros. Con este proceso se calcula cuánta velocidad y fuerza se debe de ingresar en el sistema para cortar el material. («Westcare», 2011) La trituradora de martillos permite moler una gran cantidad de materiales, su funcionamiento es mediante un eje que contiene varios martillos los cuales provocan golpes que pueden destruir y desintegrar el material. (Mayer, 2022)

Las trituradoras de cuchillas es un diseño de trituradora que contiene dos ejes, los cuales a lo largo de su eje tiene cuchillas en el cual giran en sentidos opuestos causando un momento. Al ingresar el residuo golpea el eje y por el filo y torque de las cuchillas causan demolición del material. (Mendoza, 2019)

Las trituradoras de cuchillas desfasadas, su mecanismo es un eje con cuchillas, las cuales están pegadas y con una diferencia de ángulo que al momento de ver el eje se le ven las cuchillas completamente pegadas, pero con un pequeño ángulo de diferencia que las desfasa, su funcionamiento es exactamente el mismo que el descrito anteriormente. Al ingresar el residuo golpea con el cuchillo y las cuchillas y por el momento y filo es demolido el material. (Mendoza, 2019)

El diseño de una trituradora de cuchillas de cortadoras rotativas es acoplando unas cuchillas fijas y una cuchilla rotatoria. La cuchilla rotatoria es mediante un eje que tiene acopladas unas cuchillas. Ese eje gira y mediante el impacto del material o residuo contra las cuchillas fijas, se genera el corte del material. (Mendoza, 2019)

La trituradora giratoria está formada por una mandíbula cónica la cual rota de manera excéntrica haciendo un quiebre en el material, es utilizada para materiales pesados y fuertes como la roca. (Aguirre et al., 2018)

Trituradora moledora es un tipo que funciona mediante la compresión, las cuales cortan el material a pequeños pedazos. Dependiendo del material, se puede cortar y dar distintas dimensiones.

5.4. Proveedores de trituradoras

Molinos para plásticos es una empresa mexicana conocida como MACCAD, que se dedica a la fabricación de varios modelos de trituradoras para adaptarse al uso y capacidad de la industria. Sus diseños permiten moler plásticos, llantas, residuos peligrosos, madera, entre otros materiales. Además de fabricar trituradoras, también proveen repuestos de cuchillas para el mantenimiento de los equipos. Ofrecen diferentes materiales de cuchillas que se adaptan a los materiales que se cortarán para lograr una mayor eficiencia al procesar los residuos. (MACCAD, 2022).

MACCAD ofrece trituradoras de diferentes capacidades y con distintas potencias. El diseño presentado son molinos trituradores de un eje, con diferentes capacidades de residuo, se puede seleccionar un molino triturador de 5 hp con capacidad de triturar 50 kg/hr, un molino triturador de 10 hp que puede triturar 130 kg/hr (comentado por el proveedor es el más solicitado en la industria) y por último ofrecen un molino de 20 hp que puede triturar 350 kg/hr. El proveedor indica que para todos los molinos trituradores se utilizan cuchillas de acero D2, las cuales ellos mismo proveen para el momento que se le deba dar mantenimiento al equipo. La capacidad del molino triturador se deberá considerar al momento de saber cuánta capacidad se tendrá en la línea de reciclaje. Estos molinos trituradores ofrecen poder triturar mediante cuchillas materiales como PET (Polietileno tereftalato), HDPE (Polietileno de alta densidad), PVC (Cloruro de polivinilo), LDPE (Polietileno de baja densidad), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno), entre otros. (MACCAD, 2022)

MACCAD ofrece una potente trituradora de doble eje con una capacidad superior, que cuenta con una potencia de 30 hp. Esta máquina utiliza discos desfasados fabricados con acero D2 para lograr triturar el material. Su versatilidad es una de sus principales ventajas, ya que puede ser utilizada para procesar varios tipos de materiales reciclables, tales como hule, tarimas de madera o plástico, botellas, PET (Polietileno tereftalato), HDPE (Polietileno de alta densidad), PVC (Cloruro de polivinilo), LDPE (Polietileno de baja densidad), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno) y otros más. (MACCAD, 2022)

Mayper es otra empresa que se dedica a diseñar, fabricar e instalar sistemas de reciclaje alrededor del mundo. Es una empresa española que se ha dedicado a este tema durante 30 años. Es una empresa que a lo largo de sus años fabrica molinos para reciclar varios

materiales y entre esos materiales se encuentra el PET. Tienen varios tipos según sea el fin de la línea de reciclaje. (Mayper, 2022)

Un molino triturador convencional de alta velocidad está construido de acero inoxidable. Tienen una caja dividida en dos partes para que de esta manera sea más sencillo el desmontaje para poder brindar mantenimiento al equipo y cambiar piezas como las cuchillas. El funcionamiento es mediante un eje con cuchillas desfasadas. La potencia del motor se puede seleccionar al determinar la capacidad de la línea de reciclaje. (Mayper, 2022)

Un destrozador de 1 eje, es un triturador económico industrial en el cual se va acoplando la capacidad de la maquinaria según sea la capacidad de la planta en procesar plástico. Pueden cortar plásticos como PP, PE, PET, PC, entre otros. Pueden cortar madera, tubos plásticos como pvc, entre otros materiales. (Mayper, 2022) Esta maquinaria es mediante el giro de 1 eje, que tiene cuchillas de acero AISI D2, el cual cumple con las mismas propiedades que la trituradora de MACCAD. El proveedor de Mayper vende trituradoras de dos ejes y con funcionamiento de martillo, lo cual como se mencionó, buscan acoplarse lo más posible al diseño de la línea de reciclaje. (Mayper, 2022)

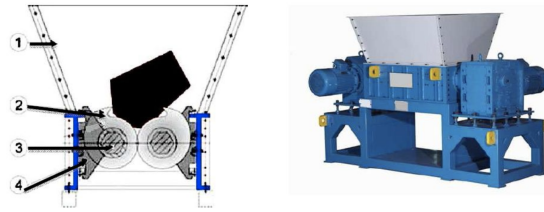
Cumplen con trituradoras de dos ejes y con funcionamiento de martillo, lo cual como se mencionó, buscan acoplarse lo más posible al diseño de la línea de reciclaje. (Mayper, 2022)

En México, existen diversas empresas que se enfocan en el diseño, fabricación y mantenimiento de trituradoras para líneas de reciclaje. Una de ellas es Manahuia, la cual ofrece trituradoras de dos ejes con una capacidad de entre 80 y 150 kg/hr, equipadas con un motor de 10 hp y una conexión trifásica. Por otro lado, Solimaq también es una empresa mexicana que se dedica a lo mismo y cuenta con trituradoras de dos ejes con una capacidad de entre 100 y 300 kg/hr, utilizando una potencia de 10 hp y una conexión trifásica para asegurar la eficiencia de sus equipos. (Manahuia, 2022) (Solimaq, s.f.)

5.5. Componentes de una trituradora

Las trituradoras están compuestas por varios componentes que deben ser seleccionados cuidadosamente en función del proceso que se desea llevar a cabo. A continuación, se describirán los componentes y su funcionamiento en general. El rotor es un elemento que se une directamente a las cuchillas y es la parte móvil que cuenta con el motor de arranque, este consta de tres partes: el bobinado, el tambor y el conector. El eje del rotor soporta un conjunto de bobinas que se mueven gracias al núcleo magnético que gira alrededor del imán. Las cuchillas son los elementos encargados de realizar el corte del material y su diseño dependerá del tipo de material a cortar. El motor, por su parte, proporciona la potencia necesaria para el funcionamiento de la máquina, operando a bajas velocidades para generar mayor torque y permitir el corte eficiente. La carcasa es el área donde se almacena el material a cortar. El sistema de accionamiento es capaz de convertir la energía eléctrica en mecánica, mientras que la almacenadora recibe la materia prima de la máquina anterior y la dirige hacia los ejes. Los ejes cumplen la función de transmitir la potencia mediante un momento y hacer que giren el rotor y las cuchillas. La caja reductora puede utilizarse para aumentar el torque en el sistema, mientras que el sistema de control se encarga de supervisar y controlar todo el equipo de manera remota. («Industrial Quick Search», 2022)

Figura 1: Trituradora PET



5.5.1. Tolva

La forma de las tolvas normalmente es cónica con paredes inclinadas, la carga se efectúa por la parte superior y la descarga es por la parte inferior. Normalmente se fabrican de materiales como AISI 1018 o AISI 1020, por las propiedades que presenta este material. De la misma manera evita que el plástico salga proyectado hacia el exterior cuando la máquina esté en movimiento. (Sandoval, 2013)

5.5.2. Rodamientos

La trituradora tiene rodamientos con el fin de proporcionar una posición relativa y libertad de rotación sobre el eje. Además de transmitir una carga entre dos estructuras, donde se coloca el eje y la chumacera. Si se van a transmitir cargas entre superficies en movimiento relativo en una máquina, la acción se facilita más efectivamente si se interponen elementos rodantes entre los miembros en deslizamiento. De esta forma la resistencia de fricción que se opone al deslizamiento se reemplaza en gran medida por la resistencia a un valor de resistencia menor. La manera de calcular que tipo de rodamiento es necesario, según comenta SKF, uno debe encontrar el punto crítico en el eje donde se colocarán los rodamientos, evaluar todo el proceso del diámetro y seguir los pasos del proveedor para encontrar cuáles son y el tamaño requerido. (Beswick et al., 1993) (Sandoval, 2013)

5.5.3. Coples

Existen diferentes tipos de coples que se utilizan como conexiones semipermanentes entre dos ejes. Estos tipos incluyen coples flexibles, rígidos e hidráulicos, (Sandoval, 2013). Los coples rígidos son apropiados para ejes que están perfectamente alineados. (Sandoval, 2013). Por otro lado, los coples flexibles se utilizan para unir ejes que están desalineados debido a desplazamientos laterales o angulares. Estos coples presentan la ventaja de absorber los impactos causados por fluctuaciones en el momento torsor o en la velocidad de giro. (Sandoval, 2013)

En cuanto a los coples hidráulicos, constan de miembros de entrada y salida, como impulsor y rotor. A diferencia de los otros tipos de coples, no establecen una conexión directa entre los ejes. En cambio, transmiten energía mediante el uso de energía cinética generada por el fluido (Sandoval, 2013).

5.5.4. Rotor

El rotor es la pieza conectada hacia el motor que incorpora las cuchillas, las cuales mediante el filo corta el material por parte de la potencia, la velocidad de giro que brinda el motor. Su función es triturar las botellas de PET para convertirlas en granulado. (Clevel Angulo et al., 2020)

5.5.5. Cuchillas de la trituradora

Con respecto a las maquinarias, ya en la industria que se dedican a la venta de trituradoras industriales, el proveedor MACCAD y Mayper, utilizan el material acero AISI D2 para las cuchillas y discos que generan el corte en el material. El acero AISI D2 tiene las propiedades de alto contenido de carbono y alto contenido de cromo, por lo que cumple con la característica de alta resistencia al desgaste y una alta resistencia a la compresión. El acero AISI D2 tiene un módulo de elasticidad de 180 GPA a una temperatura de 399 grados Celsius. Una resistencia a la fluencia de 1650 MPA a 2200 MPA. (Matweb, 2022) El proveedor Wanrooetech recomienda que las cuchillas sean intercambiables para facilitar el mantenimiento, reducir costos y mejorar el diseño de la máquina. Para lograr esto, sugiere unir las cuchillas mediante pernos a un disco, de manera que la parte afilada pueda ser suministrada por un proveedor que utilice cuchillas de acero D2.

Según este proveedor, el grosor de la cuchilla para cortar plástico debe estar entre 40 mm y 50 mm, mientras que el diámetro de soporte de las cuchillas debe estar entre 50 mm y 150 mm para lograr un corte de material de entre 3 mm y 8 mm. Estas especificaciones pueden ayudar a mejorar la eficiencia de la máquina y a optimizar el proceso de corte de plástico. (Wanrooetech, 2022)

Para el cálculo del motor, se debe de conocer ciertos factores fundamentales de las cuchillas para poder tener la potencia y otros elementos. Primero para el cálculo de motor se debe conocer la fuerza mínima requerida por las cuchillas. Esta fuerza puede ser encontrada mediante las propiedades del PET, se busca la resistencia a la tracción que tiene entre 55-75 Mpa. Conociendo la resistencia a la tracción, según lo comentado (Geyer et al., 2017) para determinar la resistencia al corte de las cuchillas debe ser multiplicada la resistencia a la tracción por 0.8. (Monteza Leiva, 2019)

Evaluación de la fuerza sobre el área de resistencia: (Monteza Leiva, 2019)

$$F = S_{des} \times A_{reis}$$

F = Fuerza de desgarramiento

S_{des} = Tensión de desgarramiento

A : Área de resistencia

Área de corte de la cuchilla:

$$A = w \times l$$

w : Ancho de filo de la cuchilla

l : longitud del filo de la cuchilla

Se proporciona la fórmula que calcula la fuerza ejercida sobre las cuchillas. revelan que, para lograr un corte eficiente, se requiere un ángulo de 3 grados entre las hojas de las cuchillas, que deben estar sesgadas. (Monteza Leiva, 2019)

Encontrando el torque requerido para las cuchillas es:

$$T = F * r * N$$

F : Fuerza de desgarramiento

r : Radio de las cuchillas

N : Número de cuchillas

para encontrar la potencia requerida:

$$P = \frac{T * Rpm}{5252}$$

Según lo encontrado en el trabajo de (Geyer et al., 2017). Presenta medidas de cuchillas que pueden ser utilizadas para una trituradora de 100 kg/hr. Así mismo, la unión entre el eje y las cuchillas se considera como una soldadura. Para el diseño del eje se debe contemplar que las cuchillas generan flexión y tracción sobre el eje.

La distribución de las cuchillas debe ser desfasada para poder procesar el material PET (Hidalgo Sánchez, 2020). Se puede considerar un ángulo de cortado entre 70 a 80 grados, y el ángulo de ataque mencionado de 3 grados. El ángulo de incidencia recomendado es de 10 grados. (Hidalgo Sánchez, 2020).

Se puede evaluar la fuerza de corte mediante:

$$F_c = \frac{s^2 * S_{des}}{2 * \tan(\alpha)}$$

F_c : Fuerza de corte

s : Espesor del material

S_{des} : Esfuerzo de desgarramiento

5.5.6. Criba

Es un tipo de rejilla que permite la filtración de los gránulos hacia la tolva de salida, el tamaño de los agujeros dependen de la dimensión que tendrán los gránulos. La criba genera que se queden los pedazos hasta que las cuchillas corten el plástico hasta al tamaño deseado. (Clevel Angulo et al., 2020)

5.5.7. Eje de una trituradora

Para el diseño de un eje en una trituradora, se deben considerar varios factores que permitirán el diseño correcto de un eje, como por ejemplo, resistencia a la fatiga, teoría de falla, selección de diámetro, las velocidades críticas a las que estará sometido el elemento, evaluar varios factores en la sección crítica que se diseñó, estos son factores que como diseñador se deben considerar para una correcta toma de decisiones en el diseño. (Mott, 1995)

Los esfuerzos en los ejes se evalúan en los puntos críticos, donde se concentran los mayores esfuerzos. Estos puntos críticos suelen ubicarse en las superficies exteriores de la pieza, en el momento flector más grande, en la torsión, entre otros factores. Es necesario analizar los esfuerzos alternantes, tanto por torsión como por flexión. En casos de esfuerzos combinados, donde se produce torsión y flexión simultáneamente, se puede aplicar la teoría de von Mises para determinar el esfuerzo alternante y medio. Con esta implementación, es posible encontrar el diámetro ideal del eje mediante iteraciones, utilizando ecuaciones como la de falla de Goodman, ED-Gerber, ED-ASME Elíptica o ED-Soderberg. La elección de la ecuación a utilizar dependerá del grado de conservadurismo que desee aplicar el diseñador. Por ejemplo, el criterio de ED-Soderbergh es el más conservador de todos, ya que contempla la fluencia a la carga estática (Mott, 1995)(Alfaro Aguire et al., 2020).

El esfuerzo de von Mises ayudará a verificar la resistencia a la fluencia. que posterior a este cálculo nos permitirá seleccionar el material y poder encontrar el factor de seguridad o mediante una selección de factor de seguridad encontrar un material que cumpla con los requerimientos que brindara el diseño. Debido a que el factor de seguridad es S_y/σ máximo. (Mott, 1995)

El último factor a considerar para el diseño de ejes es las velocidades críticas, esta es importante ya que a causa del movimiento, el eje puede presentar una deflexión, la cual puede incrementar sin límite, causando inestabilidad en el eje. El cálculo para determinar la velocidad crítica puede calcularse mediante la ecuación de Dunkerley. (Mott, 1995)

5.5.8. Volante de inercia

El volante de inercia desempeña un papel fundamental en el diseño de una trituradora, ya que es el componente mecánico encargado de almacenar energía cinética al acumular inercia y regular el movimiento del eje. Su diseño se basa en considerar la posición angular de entrada y salida, así como el torque de entrada y salida. Además, al diseñarlo es necesario tener en cuenta el desfase de corte. (Hernández Moyano, Fonseca La Rotta et al., 2017)

5.5.9. Peines distanciadores

Este componente, de aparente simplicidad, desempeña una función crucial al evitar el atasco del material triturado entre los ejes. Además, su diseño estratégico impulsa las botellas de PET hacia el centro, justo en la ubicación donde se encuentran las cuchillas. (Sandoval, 2013)

5.5.10. Carcasa

La carcasa cumple un importante papel al actuar como una cubierta externa que protege los componentes internos de la trituradora, tales como los ejes, cuchillas, espaciadores, entre otros. Su función principal es salvaguardar tanto los elementos internos como al usuario, evitando cualquier problema que pueda surgir dentro de la trituradora. (Clevel Angulo et al., 2020)

5.5.11. Rodamiento de soporte

Los rodamientos de soporte son componentes mecánicos que se emplean para respaldar y permitir la rotación de un eje en máquinas y dispositivos. También conocidas como rodamientos de apoyo. Su función principal es brindar un soporte estable y facilitar un movimiento fluido del eje, disminuyendo la fricción y el desgaste. Un rodamiento de soporte está compuesto por una carcasa o soporte que alberga un rodamiento o cojinete. El rodamiento consta de una estructura que contiene elementos rodantes, como bolas o rodillos, los cuales posibilitan el desplazamiento del eje. La chumacera se sitúa en el extremo del eje y se fija a la estructura de la máquina, ofreciendo apoyo y permitiendo la rotación del eje con mínima resistencia. (Sandoval, 2013)

5.5.12. Pernos

El propósito de un perno es unir y sujetar dos o más partes. Al apretar la tuerca, el perno se estira, lo que genera una fuerza de sujeción conocida como pretensión o precarga del perno. Esta precarga se mantiene en la conexión incluso después de que la tuerca se haya apretado adecuadamente, independientemente de si se aplica o no una fuerza externa de tensión P . La rigidez de la sección de un perno o tornillo dentro de la zona de sujeción se puede dividir en dos partes: la rigidez de la parte no roscada del cuerpo y la rigidez de la parte roscada. Por lo tanto, la rigidez total del perno puede considerarse equivalente a la rigidez combinada de dos o más resortes en serie.

La metodología busca aplicar el proceso de selección y evaluación de las distintas opciones de trituradoras de polietileno de tereftalato disponibles en el mercado, con el fin de identificar la alternativa más adecuada para las necesidades de la línea de reciclaje. Se realizó una evaluación considerando los criterios específicos como eficiencia, capacidad de procesamiento, mantenimiento y durabilidad. Estos criterios serán esenciales para la determinación de la opción más adecuada para satisfacer los requisitos de diseño.

Para el proceso de selección de trituradora, se detalla cada uno de los componentes relevantes de la trituradora, resaltando su función e importancia en el proceso de la trituración. Se analizaron los elementos claves como las cuchillas, el eje, los rodamientos, entre otros, con el fin de asegurar un diseño funcional y satisfactorio para cumplir con los requisitos de diseño. Se realizaron cálculos significativos para evaluar la viabilidad y la eficiencia del diseño. Estos cálculos tomaron en cuenta aspectos como la capacidad de procesamiento, la resistencia estructural y el cumplimiento de los requerimientos de diseño establecidos.

6.1. Requisitos de diseño

Cuadro 1: Requerimientos de diseño

	Código	Descripción
Diseño	D01	El dimensionamiento de la tolva de entrada debe tener un máximo de 1200 mm x 1100 mm.
	D02	Las cuchillas deben ser intercambiables.
	D03	La trituradora debe tener una capacidad mínima de 150 kg/h.
	D04	Debe cumplir con un mínimo factor de seguridad de 2.
	D05	La altura de la trituradora tendrá como mínimo de 3 metros, medida desde la tolva de entrada hasta el suelo.
	D06	La medida de la carcasa tendrá un ancho y largo como mínimo de 1000 mm x 550 mm.
Mecanismo	M01	El motor debe tener una potencia mínima de 10 hp.
	M02	La velocidad ajustable del rotor es entre 200 a 1760 mm.
	M03	El motor debe tener conexión 208 voltios trifásico.
Mantenimiento	MN01	Los materiales para la fabricación de la trituradora deben de ser adquiridos localmente en Guatemala.
Seguridad	S01	Todos los protectores deben estar en condiciones de funcionamiento.
	S02	El diseño un botón de emergencia para parar la maquinaria por completo.
	S03	Manual de funcionamiento correcto de la maquinaria.

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 1 se presentan los requerimientos específicos para el diseño de la trituradora de Tereftalato de Polietileno para la línea de reciclaje.

6.2. Selección del tipo de trituradora

6.2.1. Trituradora de un eje

Las trituradora de un eje para PET tienen los siguientes beneficios:

- Reducción de tamaño: son capaces de reducir el tamaño de las botellas de pet y otros

productos de manera eficiente

- Reciclaje: facilitan el reciclaje de los productos plásticos, ayudando al medio ambiente reduciendo así la contaminación global.
- Reducción de costos: al reducir el tamaño de los plásticos también se reducen los costos de transporte y almacenamiento.
- Mejora de la producción: la trituración de los productos de plásticos aumenta la eficiencia en la producción y reduce los costos.
- Menos residuos: al triturar los plásticos se generan menos residuos.

Fuente: (Sandoval, 2013),(Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017),(Aguirre et al., 2018)

6.2.2. Trituradora de dos ejes

Una trituradora de PET de doble eje tiene las siguientes ventajas, al evaluarla con una de un eje.

- Mayor eficiencia: dos ejes permiten tener una mayor eficiencia en la trituración del material. Permitiendo así una producción más rápida y una reducción de costos en la línea de reciclaje.
- Versatilidad: una trituradora de doble eje puede triturar una amplia variedad de materiales y tamaños de partículas, lo que convierte el proceso más versátil que las trituradoras de 1 eje.
- Mejor calidad de trituración: con dos ejes la trituración es más uniforme y la calidad del producto triturado es mejor.
- Durabilidad: en una trituradora de dos ejes se tiene una distribución más equilibrada de la carga, lo que aumenta la durabilidad y vida útil de la trituradora.
- Menor desgaste: la distribución equilibrada de la carga reduce el desgaste y el reemplazo de piezas.

Fuente: (Sandoval, 2013),(Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017),(Aguirre et al., 2018)

6.2.3. Trituradora de un eje con cuchillas desfasadas

Una trituradora de cuchillas desfasadas de un eje tienen las siguientes características.

- Costo efectivo: comparada con las trituradoras de doble eje, es más económica.
- Fácil mantenimiento: como tiene menos partes, una trituradora de cuchillas desfasadas de un eje requiere menor mantenimiento y es más sencillo arreglar.

- Eficiencia de la trituración: la trituradora de cuchillas desfasadas ofrece una trituración eficiente y uniforme de los materiales.
- Espacios reducidos: el espacio que toma la trituradora es más reducida que una de doble eje.
- Este tipo de trituradora es fácil la instalación.

Fuente: (Sandoval, 2013),(Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017),(Aguirre et al., 2018)

6.2.4. Evaluación de selección de trituradora

Cuadro 2: Evaluación de diseño

Criterio	Peso	Dos ejes	Ejes desfasados	Trituradora de un eje
Eficiencia de la trituración	20 %	3	3	3
Costo de mantenimiento	10 %	2	3	3
Calidad del material	20 %	2.8	3	3
Construcción	5 %	2	2.8	3
Espacio de ubicación	5 %	2	3	3
Vida útil	20 %	3	2	2
Costo de repuestos	20 %	3	1.5	2
Total	100 %	2.76	2.49	2.6

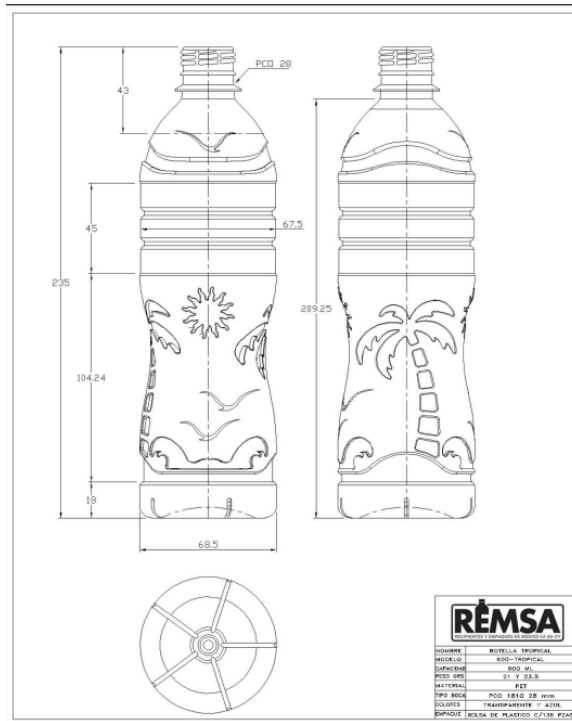
Fuente: Elaboración propia

Con los criterios evaluados, se puede observar que mediante los puntajes de criterio se selecciona una trituradora de dos ejes para la línea de reciclaje.

6.3. Botella PET (600 ml)

Se realizó una evaluación de la trituradora utilizando botellas de 600 ml para determinar el tamaño del eje y la fuerza necesaria para cortar el material. Cada botella tiene un peso de 30 gramos (número sobredimensionado) y una altura de 235 mm.(Remsa, 2022)

Figura 2: Botella de 600 ml



6.4. Diseño: Elementos de la trituradora

Mecanismo de la trituradora:

Al abordar las dimensiones de la trituradora, se consideró el requisito total de la línea de reciclaje, que establece una capacidad mínima de 150 kg/hr. Esto se debe a que la trituradora forma parte de una línea de reciclaje que incluye otros equipos, como 2 lavadoras de PET, una separadora de etiquetas, una peletizadora y una extrusora. Por lo tanto, el dimensionamiento de la trituradora se enfoca en cumplir con el requisito general de diseño de tener una capacidad de 150 kg/h, al mismo tiempo que se asegura una relación adecuada con el resto de las maquinarias en términos de sus dimensiones.

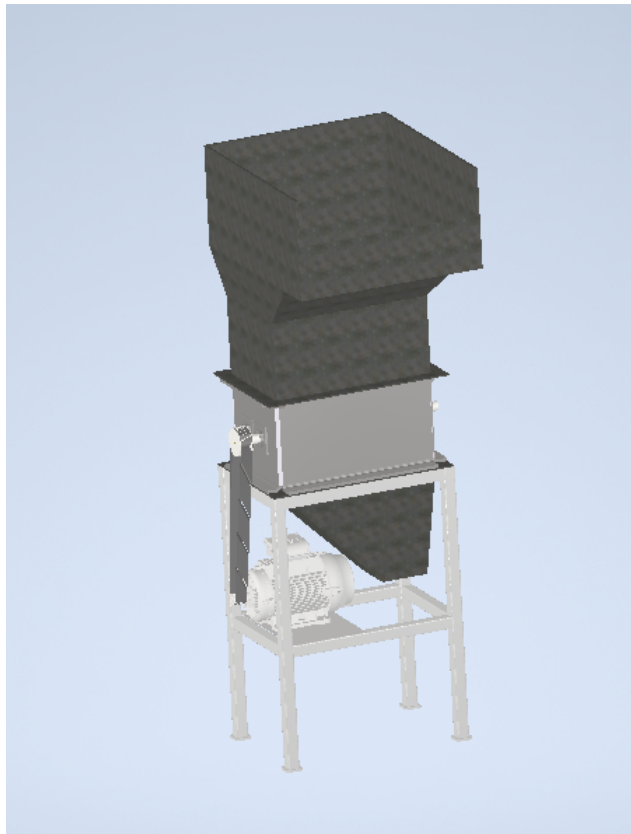
Funcionamiento de la trituradora:

Geometría:

El ensamblaje completo de la trituradora consta de las siguientes partes: motor, una tolva de entrada, una tolva de salida, dos ejes, engranajes rectos, cojinetes, chumaceras, bandas, poleas, cuñas, anillos de retención y tornillos. Cada uno de los elementos serán evaluado y seleccionado para tener la mejor resistencia hacia los esfuerzos que serán sometidos.

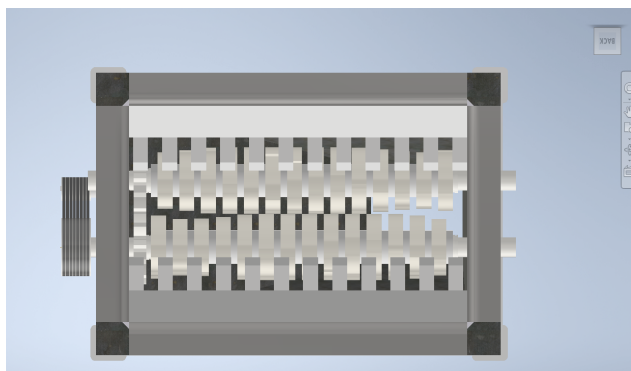
La trituradora funciona mediante un motor eléctrico con conexión trifásica. Se transmitió la potencia mediante poleas. Se instalaron engranajes con relación 1:1 que permiten que los dos ejes giren a la misma velocidad en direcciones opuestas.

Figura 3: Trituradora



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

Figura 4: Trituradora



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

El mecanismo cuenta con dos ejes equipados con cuchillas de acero D2 para cortar el material, las cuales estarán desfasadas para un corte más efectivo. Además, en la carcasa donde se encuentran los ejes y engranajes, se colocaron espaciadores en los costados de

la caja de acero para dirigir las botellas PET hacia las cuchillas. Estos espaciadores son esenciales para el correcto funcionamiento de la trituradora.

Ejes

El diseño de los ejes está compuesto por dos piezas idénticas que giran en sentido contrario a la misma velocidad. Esto será posible gracias al uso de los engranajes rectos, que transmiten la potencia desde un eje al otro.

En relación a los ejes, se empleó acero AISI 1018 debido a su notable resistencia mecánica, su facilidad de maquinado que simplifica el proceso de fabricación del eje, y su excepcional tenacidad que le permite soportar cargas e impactos sin riesgo de fractura. Además, este material se encuentra disponible en el mercado guatemalteco.

Engranajes rectos:

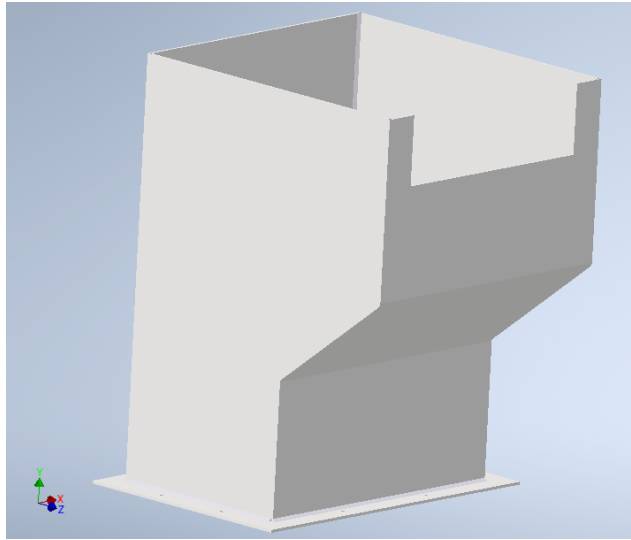
Se optó por utilizar engranajes rectos debido a su alta eficiencia en la transmisión de potencia, gracias a su superficie en paralelo que minimiza las pérdidas por fricción y deslizamiento, mejorando así la eficiencia general del sistema.

Los engranajes serán fabricados de acero AISI 4340, un material ampliamente utilizado en aplicaciones mecánicas. Se estableció una relación de engranaje 1 a 1, ya que el objetivo principal es que los ejes giren en sentido contrario, en lugar de buscar una relación de transmisión de potencia específica. (Budynas et al., 2012)

Tolva de entrada:

La tolva de entrada es la pieza clave en la parte superior de la trituradora que recoge el material para ser procesado. Con una capacidad mínima de almacenamiento de 150 kg/h, esta tolva protege las botellas hasta su procesamiento por las cuchillas. Además, será diseñada de manera que esté completamente cerrada en los costados y en la parte superior parcialmente donde solo quedara el espacio para el ingreso de las botellas PET para garantizar la seguridad y evitar la introducción de las manos humanas durante el funcionamiento, lo que podría causar problemas en el proceso.

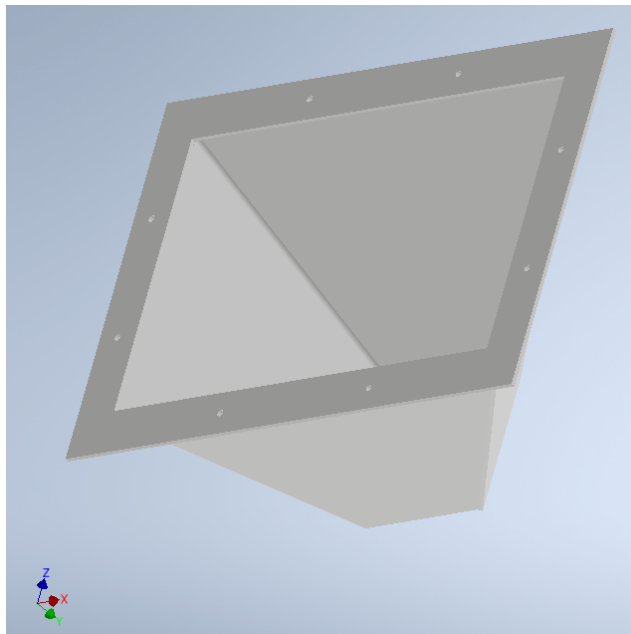
Figura 5: Tolva de entrada



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

Tolva de salida:

Figura 6: Tolva de salida



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

La tolva de salida de la trituradora de PET es el punto de salida donde los materiales triturados se descargan de la máquina. Esta pieza será diseñada para depositar los materiales de plástico PET triturados en un contenedor o una banda transportadora, con el fin de que sean entregados a la siguiente etapa del proceso. La tolva de salida debe tener un tamaño adecuado para manejar la cantidad de material triturado que se genera, aproximadamente 150 kg/h. Además, es importante que esté ubicada en un lugar accesible para permitir una extracción segura y eficiente de los materiales triturados.

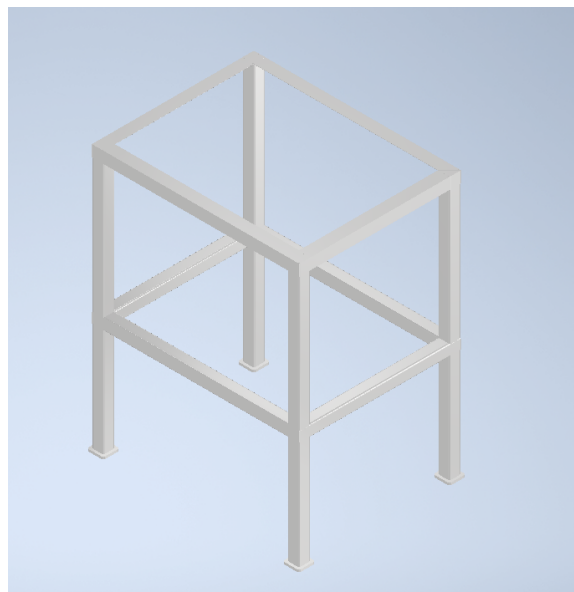
Además de su tamaño y ubicación, es crucial que la tolva de salida esté diseñada de manera que los materiales triturados puedan fluir libremente, sin obstrucciones ni acumulaciones que puedan afectar el proceso de reciclaje. Esto garantiza un funcionamiento óptimo y eficiente de la máquina, evitando interrupciones o bloqueos indeseados.

Cuchillas:

Las cuchillas de la trituradora se fabricaron en acero D2, y el grosor específico se determinó siguiendo la recomendación del proveedor WanrooeTech. De acuerdo con este proveedor, se sugiere utilizar cuchillas con un grosor que oscile entre 40 mm y 50 mm para cortar una amplia gama de materiales, incluyendo llantas, plásticos, madera, pallets y otros. WanrooeTech se especializa en el diseño de cuchillas personalizadas según las necesidades del cliente. Se llevó a cabo una evaluación siguiendo las recomendaciones del proveedor para la fabricación local de las cuchillas en Guatemala. (Wanrooetech, [2022](#))

Base:

Figura 7: Base



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

La base de la trituradora se instaló el motor y el sistema completo de la trituradora. El diseño de la base se realizó en el sistema de Inventor. Es fundamental que la base sea

capaz de soportar todo el peso de la trituradora, por lo tanto, se requerirá un factor de seguridad mínimo de 2 para su aceptación. Esto se debe a que la trituradora está asegurada a la base mediante tornillos. El objetivo es garantizar la seguridad completa del usuario y evitar cualquier posible falla o ruptura de la base.

Separador:

En cuanto al diseño de los separadores, se realizó un análisis en el que se consideró únicamente la funcionalidad de separar las cuchillas, así como una medida aproximada para su tamaño. Se decidió utilizar para su fabricación el material AISI 1045. Con un ancho aproximado del separador de 20 mm.

Criba:

La selección y clasificación del tamaño de grano es fundamental para la reutilización del material en diversos procesos, ya sea en la producción de nuevas botellas u otras aplicaciones. En este sentido, la pieza clave es la criba con agujeros de 19.05 mm, que garantiza una alimentación constante del material. No obstante, es posible reemplazarla por otra con ranuras de tamaño y forma distinta (Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017).

Poleas:

Para transmitir la potencia del motor al eje de las cuchillas, se utilizaron poleas. Para este propósito, se optó por el uso de bandas debido a su alta eficiencia para la transmisión de potencia y su costo más económico en comparación con otros tipos de transmisores de potencia. (Budynas et al., 2012)

Rodamientos:

La trituradora está equipada con rodamientos que desempeñan un papel crucial al permitir una posición relativa y libertad de rotación en el eje. Estos rodamientos también se encargan de transmitir la carga entre dos estructuras y sirven como ubicación para el eje y la chumacera. Cuando se requiere transmitir cargas entre superficies en movimiento relativo dentro de una máquina, es más eficiente facilitar esta acción mediante la inclusión de elementos rodantes entre las piezas deslizantes. Esto contribuye a un funcionamiento más suave y eficiente de la máquina al reducir la fricción y el desgaste. («SKF», s.f.)

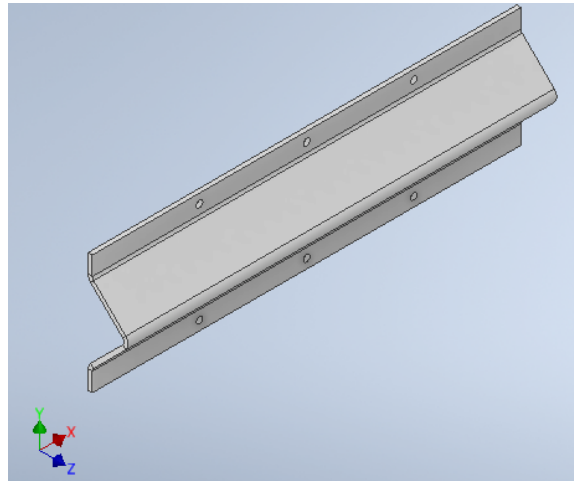
Es importante señalar que se llevó a cabo una evaluación de los rodamientos de las marcas SKF y NTN. Esto asegura la selección de los rodamientos más adecuados para el diseño de la trituradora. La colaboración con SKF y NTN permitirá tener en cuenta todos los aspectos de la máquina, garantizando un rendimiento óptimo y duradero, y al mismo tiempo considerando los costos para determinar cuál de las dos marcas se elegirá. (Budynas et al., 2012).

Por decisión de diseño, se incorporaron rodamientos de soporte en el proyecto. Los rodamientos de soporte son componentes mecánicos utilizados para respaldar y permitir la rotación de un eje en máquinas y dispositivos. A veces, también se les conoce como rodamientos de apoyo. Su principal función es proporcionar un soporte estable y permitir un movimiento suave del eje, lo que resulta en una reducción significativa de la fricción y el desgaste.

Peines distanciadores:

Este componente, a pesar de su aparente simplicidad, desempeña una función crucial al prevenir el bloqueo del material triturado entre los ejes. Su diseño estratégico también impulsa las botellas de PET hacia el centro, justo en el lugar donde se encuentran las cuchillas. Esto garantiza un flujo eficiente del material y evita obstrucciones que podrían interferir con el proceso de trituración.

Figura 8: Peines distanciadores



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

Los peines distanciadores se diseñaron con un largo de 1,020 mm, correspondiente al largo de la carcasa de la trituradora. Se fabricarán con material acero A36, que ofrece una excelente resistencia y durabilidad para enfrentar las demandas del proceso de trituración. (Sandoval, [2013](#))

Variador de frecuencia:

Con el fin de lograr un control preciso y eficiente sobre la velocidad y potencia entregada por el motor de la trituradora, se procedió a implementar un variador de frecuencia. Estos dispositivos electrónicos desempeñan un papel fundamental en el control de motores eléctricos, permitiendo una regulación precisa de su velocidad y potencia. Su funcionamiento radica en la capacidad de variar tanto la frecuencia como el voltaje suministrado al motor, lo que a su vez incide directamente en la velocidad de rotación del mismo, medida en revoluciones por minuto (RPM).

Para llevar a cabo esta instalación de manera efectiva, es necesario obtener la ficha técnica del motor de la trituradora. Esta información es crucial para que el proveedor de los variadores de frecuencia pueda realizar un acoplamiento adecuado y personalizado, permitiendo así que la función de ajuste de RPM sea implementada de manera óptima.

Botón de emergencia:

Por razones de seguridad, se procedió a la instalación de un botón de emergencia en un lugar claramente visible. Este botón permitió detener la máquina por completo en caso de cualquier eventualidad. Este botón se instaló en el variador de frecuencia, el cual permite un paro inmediato de la fuente de alimentación. En cuanto a la elección de la marca del botón de emergencia, esto dependerá de la disponibilidad en el mercado de Guatemala y del costo de la trituradora. Las opciones a considerar podrían incluir marcas como Schneider Electric, WEG, Siemens, Omron, entre otros. La selección final se basa en las condiciones del mercado local y las especificaciones de la trituradora, pero la instalación seguirá un procedimiento similar, siguiendo las instrucciones proporcionadas por el proveedor seleccionado. Esto garantiza un nivel óptimo de seguridad en la operación de la máquina.

Interruptor de arranque:

Se requiere la instalación de un interruptor de encendido y apagado para la maquinaria. La instalación de este interruptor se realizó directamente al variador de frecuencia, lo que proporciona la capacidad de habilitar o deshabilitar el flujo de energía eléctrica hacia el motor mediante la opción de encendido o apagado. En lo que respecta a la elección de la marca del interruptor, esta decisión depende de la disponibilidad en el mercado guatemalteco y del costo asociado a la trituradora.

6.5. cálculos

6.5.1. Factor de seguridad

Para llevar a cabo el cálculo de las distintas piezas, el supervisor del proyecto ha determinado el factor de seguridad aplicable a toda la planta. Se ha establecido por el ingeniero en sistemas encargado del diseño completo de la planta de reciclaje que estableció que dicho factor debe ser mayor o igual a 2. En el caso específico de la trituradora de PET, cada una de sus piezas debe cumplir con un factor de seguridad igual o superior a 2 en todos los cálculos realizados.

Con el objetivo de garantizar la seguridad y confiabilidad de las piezas, se busca un material disponible en Guatemala, que cumpla con los requisitos establecidos.

Antes de evaluar los componentes, se va a establecer un factor de seguridad adecuado, se ha empleado el enfoque de Ullman, el cual considera múltiples parámetros clave. Estos factores abarcan características como el material utilizado, los esfuerzos involucrados, la geometría de los componentes, análisis de posibles fallas y la confiabilidad del sistema en su conjunto. El factor de seguridad determinado a través de este enfoque proporciona un punto de referencia fundamental. Este valor de referencia se compara posteriormente con los factores de seguridad obtenidos durante la fase de análisis teórico. Ayuda a evaluar si los valores calculados cumplen con las expectativas y los criterios de diseño establecidos inicialmente. (Ullman, 2010)

$$n = n_{material} \times n_{esfuerzo} \times n_{geometrico} \times n_{analisis\ falla} \times n_{confiabilidad}$$

Se describen las determinaciones de los factores:

Para $n_{material}$ el valor será igual a 1.1, debido a que los datos son obtenidos por un proveedor. Para $n_{esfuerzo}$ se determina como 1.20 debido a que la carga en la estructura puede variar según el flujo másico. Para $n_{geometria}$ se determina de 1.10 debido a que las dimensiones no se ajustan a su tolerancia. Para $n_{analisis\ falla}$ se determina igual a 1.10 debido a que la máquina se encuentra sobre estado de esfuerzos estáticos. Para $n_{confiabilidad}$ se determina de 1.20 debido a que la confiabilidad del equipo promedio es de 92 al 98 por ciento. (Ullman, 2010)

$$n = 1.1 \times 1.25 \times 1.10 \times 1.10 \times 1.25 = 2.077$$

Teniendo en cuenta un factor de seguridad de 2.07 basado en el criterio de Ullman, se utilizara como punto de referencia para el diseño de la trituradora, garantizando así un diseño seguro y eficiente.

6.5.2. Cálculo de fuerza de corte de cuchillas

Para calcular la fuerza necesaria para cortar o fracturar el material, las cuchillas se han colocado de manera que los planos inclinados generen los filos de corte. Es importante que el ángulo de corte del material se encuentre entre 70 y 80 grados y que el ángulo de ataque de las cuchillas sea de 4 a 6 grados. Con estos ángulos determinados, se puede observar que los dos filos cortantes generan un ángulo de apertura entre 8 y 10 grados. (Aguirre et al., 2018)

Se calculó el peso que se cortará por segundo, ya que la trituradora ha sido diseñada para tener una capacidad de corte mínima de 150 kg/h.

$$150 \text{ kg/h} \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ s}} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0.0416667 \text{ kg/s} = 0.042 \text{ kg/s}$$

Evaluación de la cantidad de botellas por segundo:

Peso de las botellas 30 gramos (0.030 kg).

Se calculó cuántas botellas se deben de cortar por segundo para cumplir con una capacidad de trituración de 150 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$. Por lo que mediante el peso de la botella y convertir la capacidad de la maquinaria a $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$, se puede determinar cantidad de botellas mínimas para cumplir con lo requerido.

$$\text{Número de botellas por segundo} = \frac{\text{Botella}}{\text{Peso de botella de } 600 \text{ mL} \times \text{Flujo masico}}$$

$$\frac{1 \text{ botella}}{(0.030 \text{ kg})(0.042 \text{ kg/s})} = 1.4 \text{ Botellas/s}$$

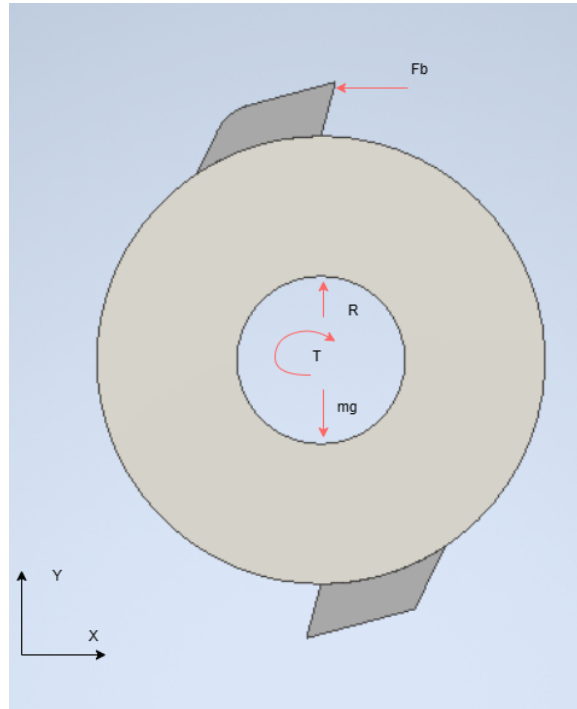
Equivale a 2 botellas por segundo.

El grosor de la tapa es la parte más fuerte que resistirá el material, por lo que se considerara como un grosor de 2.75 mm.

Fórmula de fuerza de corte:

Se determina la fuerza de corte de la cuchilla.

Figura 9: Diagrama DCL de cuchilla



Fuente: Elaboración propia

Donde:

F_b = Fuerza del material

R = Reacción del eje

mg = Peso por gravedad del material

T = Torque

Se presenta un DCL para la representación de las fuerzas en las cuales la cuchilla estará sometida.

$$F_c = \frac{s^2 * \tau_B}{2 * \tan(\varphi)}$$

F_c : Fuerza de corte

s : Espesor del material

F_b : Fuerza de botella de PET

τ_B : Resistencia al corte

φ : Ángulo de apertura

Según Wanrooetech, se ha determinado que el ángulo estándar de apertura de la cuchilla debe ser de aproximadamente 10 grados. Además, se ha determinado que el PET tiene una resistencia a la fluencia de 108 MPa. Por lo que la resistencia al corte se puede determinar con base en la ecuación de la teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles.(Wanrooetech, 2022)(Matweb, 2022) Se Calcula la resistencia al corte. (Budynas et al., 2012)

$$\tau_B = 0.577\sigma$$

$$\tau_B = 0.577(108 \text{ Mpa}) = 62.32 \text{ Mpa}$$

$$F_c = \frac{(2.75 \text{ mm})^2 * (62.32 \text{ mpa})}{2 \tan(10)} = 1,336.45 \text{ N}$$

De acuerdo con las recomendaciones de Wanrooe Tech, se determinó que el grosor óptimo de la cuchilla para cortar plástico debería estar en el rango de 40 mm a 50 mm. Como criterio de selección, se decidió utilizar un promedio de estas medidas proporcionadas por el proveedor, por lo que se ha establecido un grosor de 45 mm para la cuchilla.(Wanrooetech, 2022)

Potencia del motor:

Para determinar la potencia adecuada del motor, se llevó a cabo una búsqueda de diversas opciones disponibles en el mercado. Se priorizó la durabilidad, el respaldo por una empresa en Guatemala y un precio accesible para la fabricación de la trituradora. Como resultado, se identificó a la empresa Agencias Hamburguesas como proveedor de motores WEG en Guatemala. Una vez seleccionado el motor apropiado, se procede a calcular el número de cortes necesarios para dividir una botella de PET de 600 mL, la cual tiene una altura de 235 mm. Con el objetivo de cumplir con las especificaciones de diseño, se ha decidido que los cortes realizados por las cuchillas tengan una medida de 19.05 mm.

$$\text{Número de cortes} = \frac{\text{Alto de botella}}{\text{Ancho deseado}}$$

$$\text{Número de cortes} = \frac{235 \text{ mm}}{19.05 \text{ mm}} = 12.31 \text{ cortes}$$

Dado que se tienen el número de cortes para la botella, se tiene que se deben cortar 2 botellas por segundo.

$$Botellas = \frac{cortes\ por\ segundo}{cortes\ por\ botella}$$

Donde:

Botellas = 2 botellas/s

Número de cortes por botella = 12.3 cortes

$$2\ botellas/s \times 12.3\ cortes = 24.62\ cortes/s$$

Se determina que cada revolución del eje generará 4 cortes debido a las dos cuchillas de doble filo en la misma posición.

$$Velocidad\ de\ giro = \frac{Cortes\ por\ segundo}{Cortes\ por\ rps}$$

$$Velocidad\ de\ giro = \frac{24.62}{4\ cortes\ rps} = 6.154\ rps$$

Se debe tener una velocidad de giro mayor a 6.154 revoluciones por segundo (369.27 revoluciones por minuto).

Evalutando la potencia requerida,

$$T = F * r$$

donde:

F : Fuerza de corte las cuchillas

r : Radio de las cuchillas

Se seleccionó un diámetro de 200 mm, para las cuchillas. este debe estar entre 100 mm - 500 mm, dependiendo de la capacidad de la trituradora. (Wanrooetech, 2022). La fuerza para generar el corte es de 1,336.45 N.

$$T = 1,336.45\ N \frac{0.2\ m}{2} = 133.65\ N - m$$

Para determinar la potencia del motor se puede utilizar la siguiente ecuación,

$$P = T \times w$$

donde

P : Potencia del motor

T : Torque

w : Velocidad angular

$$P = \frac{133.65 \text{ N} - m \times 369.27 \text{ rpm}}{7,127} = 6.95 \text{ hp}$$

Validando la potencia que utilizan las trituradoras en el mercado, se utilizan motores de 10 hp. Por lo que se calculara la velocidad angular necesaria para dicha potencia. Se puede utilizar la misma potencia que se utiliza actualmente en el mercado para trituradoras con capacidades similares a la que se esta diseñando. Por ejemplo, el proveedor Solimaq en México utiliza un motor de 10 hp para su trituradora de 100 kg/h y 200 kg/h, mientras que el proveedor Manahuia utiliza el mismo motor para su trituradora de 80-150 kg/h. Por lo tanto, se puede concluir que la potencia necesaria para la trituradora es de 10 hp.

$$P = 10 \text{ hp}$$

Cálculo del torque:

Por recomendación de WEG los estos motores utilizan una velocidad nominal de 1,760 rpm y se hará el diseño de una manera conservadora por lo que la velocidad del motor se contempla como de 1,760 rpm. Recalculando el torque con una potencia de 10 hp y la velocidad angular de 369.27 rpm.

$$T = \frac{7,127P}{w}$$

$$T = \frac{7,127(10hp)}{369.27 \text{ rpm}} = 193.00 \text{ N} - m$$

Se utilizó una velocidad angular del eje de 369.27 rpm y un torque de 193.00 N-m. Calculando la fuerza:

$$F = \frac{T}{r}$$

donde

F : Fuerza de las cuchillas

r : Radio de cuchillas

$$F_c = \frac{193 \text{ N} - m}{0.2 \text{ m}/2} = 1,930.00N$$

Al evaluar la fuerza necesaria para cortar dos botellas por segundo, se determinó que se requieren 1,930 N. Esta fuerza es mayor a la fuerza requerida para cortar las botellas de PET, que es de 1,336.45 N.

6.5.3. Volante de inercia

Para el cálculo del volante de inercia se debe calcular el torque promedio.

Torque promedio:

$$T_m = \frac{\frac{T}{2} \times rad}{2\pi}$$

donde:

T_m : Torque promedio

T : Torque de corte

rad : Radianes de corte

Para calcular los radianes de corte, se contempla el momento más crítico en el que dos cuchillas corten al mismo tiempo. Por lo que se calcula como la longitud de la cuchilla de dos cuchillas de 45 mm. Con un ángulo de 10 grados.

$$L_{corte} = L_{cuchillas} \times \sin(\theta)$$

$$L_{corte} = 0.09 \times \sin(10) = 0.0156m = 15.6mm$$

Por revolución se generan 4 cortes como se comento anteriormente.

$$Radianesdecorte = \frac{4 \text{ cortes} \times L_{corte}}{r}$$

$$Radianesdecorte = \frac{4 \text{ cortes} \times 0.0156}{\frac{0.2}{2}}$$

$$Radianesdecorte = 0.624 \text{ rad}$$

Con estos datos, se puede calcular el torque promedio.

$$T_m = \frac{\frac{T}{2} \times rad}{2\pi}$$

$$T_m = \frac{\frac{193}{2} \times 0.624}{2\pi} = 9.58N - m$$

Luego se puede calcular la máxima variación de energía:

$$E_m = \int_{2\pi}^0 (T\varnothing - T_m)d\varnothing$$

$$E_m = (T - T_m) \times \text{radianes}$$

$$E_m = (193 N - m - 9.58N - m) \times 0.624 = 114.45j$$

Se define el coeficiente de variación de velocidad.

Coeficiente de variación de velocidad:

$$C_s = \frac{w_1 - w_2}{w}$$

$$w = \frac{w_1 + w_2}{2}$$

La universidad de UPTC de Colombia presenta los coeficientes de fluctuación recomendados para varias maquinarias. Presentan que para las trituradoras el coeficiente varía entre 0.1-0.2. Por lo que se determina un valor de 0.15.

$$c_s = 0.1-0.2$$

Se determina como velocidad mínima de 369 rpm, debido a que son los rpm mínimos para el corte del material. Se debe encontrar la velocidad nominal y la velocidad máxima.

$$w_{min} = 369$$

sistema de ecuaciones

$$w \times C_f = w_1 - w_2$$

$$w \times 0.15 = w_1 - 369rpm$$

$$2w = w_1 + 369rpm$$

Despejando:

$$w = 398.92rpm(41.78rad/s)$$

$$w_{max} = 428.84rpm$$

El cálculo del volante requiere de datos previamente calculados, como la energía máxima, el coeficiente de fluctuación y la velocidad angular media.

calculando el volante de inercia:

$$E1 - E2 = Em$$

$$Em = CsIw^2$$

$$I = \frac{Em}{Cs w^2} = \frac{114.45}{0.15x(41.78)^2} = 0.44kg * m^2$$

6.5.4. Diseño de volante de inercia

Con la medida del diámetro del eje, se puede diseñar el volante de inercia. Se evalúa la inercia en un cilindro con un hueco, la cual su fórmula es:

$$I_{volante} = \left(\frac{2\pi * h * \rho}{4}\right)(R_{max}^4 - R_{min}^4)$$

donde:

$I_{volante}$: Inercia del volante

h : Espesor del volante

R_{max} : Radio externo

R_{min} : Radio mínimo

Se ha determinado que el radio mínimo será de 70 mm y el radio máximo de 145 mm, con un espesor de 85 mm. Además, se ha seleccionado el material AISI 1018 enfriado en frío, el cual tiene una densidad de $7.780 kg/m^3$.

$$I_{volante} = \left(\frac{2\pi * 0.085 * \rho}{4}\right)((0.145)^4 - (0.07)^4)$$

$$I_{volante} = 0.43927 \text{ kg/m}^2$$

Comparando con el valor teórico de inercia de 0.437 kg/m^2 para el volante de inercia, se concluye que los diámetros seleccionados y el material elegido son adecuados para la fabricación del volante de inercia.

Se encuentra la masa del volante de inercia:

$$I_{volante} = \frac{1}{2}m(R_{max}^2 + R_{min}^2)$$

$$m = \frac{2I_{volante}}{(R_{max}^2 + R_{min}^2)}$$

$$m = \frac{2(0.43927)}{(0.145)^2 + (0.07)^2}$$

Una masa de 33.88 kg.

6.5.5. Variador de frecuencia

En relación con el motor de 10 hp de la marca WEG seleccionado, se realizó una consulta con el proveedor local Pro Electric en Guatemala. Pro Electric es una corporación centro-americana especializada en servicios industriales y distribución, con un enfoque en proyectos eléctricos. Esta empresa es ampliamente reconocida por su experiencia en temas eléctricos, que abarcan desde supresores hasta variadores de frecuencia, breakers y transformadores, entre otros componentes. El proveedor Pro Electric y el manual del motor WEG coinciden en la recomendación de que el variador de frecuencia debe tener una potencia igual o mayor a la del motor, lo que garantiza un rendimiento adecuado. Considerando la potencia requerida de 10 hp y una corriente de voltaje de 200-240 voltios en fase trifásica, se cotizaron varios variadores de frecuencia. Además, se sugiere que la variación de velocidad pueda ajustarse en un rango de más o menos 30 por ciento para una mayor versatilidad en la operación.

Se presentaron dos opciones, Mitsubishi y la marca Good Drive, la marca Good Drive ofrecen un variador de 15 hp con un costo de Q. 10,780.00. Para la marca Mitsubishi ofrece tener un variador de frecuencia de 15 hp con un costo de Q. 13,500.00. Se optó por seleccionar un variador de frecuencia de la marca Mitsubishi debido a que la diferencia entre las marcas es de Q. 2,720.00, comparando con la calidad de las marcas, Pro Electric recomienda más Mitsubishi y es una marca más conocida. El proveedor brinda un variador de frecuencia de 15 hp 208 v 3ph, cumpliendo con un sobredimensionamiento del variador para tener un funcionamiento adecuado. Esta elección fue realizada teniendo en cuenta la relación costo-beneficio y las necesidades específicas del proyecto. La decisión de elegir el variador de frecuencia Mitsubishi se basó en la recomendación del proveedor Pro Electric y en la búsqueda de una solución que cumpla con los requisitos técnicos del motor WEG, al tiempo que sea económicamente viable para el proyecto.

Para una instalación exitosa del variador de frecuencia, es esencial comenzar con la revisión de los manuales proporcionados por los proveedores, Mitsubishi y WEG. Luego, proceder con la conexión de la fuente de alimentación a un interruptor general con un amperaje mayor al que usa en el motor multiplicado por su factor de servicio. Luego, se deben instalar los cables saliendo del interruptor principal hacia el variador de frecuencia. Siguiendo con la conexión entre el variador y el motor se utiliza un guarda motor que se dimensiona de la misma manera con multiplicando el amperaje con el factor de servicio del motor. Se recomienda utilizar cables suministrados por Pro Electric. Asegurarse que la conexión de los cables del motor WEG al guarda motor estén correctamente instalados con las fases de alimentación. Dichos elementos se deben colocar en un panel de control. Por último, se debe configurar los parámetros del variador, incluyendo la potencia nominal, la corriente nominal, la frecuencia de operación y otros ajustes relevantes. Es importante definir los parámetros de control, como los modos de arranque y parada, así como los métodos de control de velocidad. Siguiendo estos pasos y consultando los manuales, se garantiza una instalación precisa y eficiente del variador de frecuencia en el motor WEG, lo que resulta fundamental para el óptimo y seguro funcionamiento del sistema. Pro Electric también ofrece el servicio de instalación del variador de frecuencia. Esto significa que, además de proporcionar el variador y asesoramiento sobre su configuración, Pro Electric está disponible para llevar a cabo la instalación física y la puesta en marcha del variador.

Cálculo de guardamotor y flipón principal

El guardamotor es un dispositivo en sistemas eléctricos y motores eléctricos. Su principal función es monitorear la corriente eléctrica que fluye a través del motor y desconectar automáticamente la energía en caso de detectar un pico de corriente. Esto protege el motor de daños que podrían ser causados por sobrecargas o sobrecalentamiento. Los guarda motores son importantes para la seguridad y la eficiencia de sistemas eléctricos industriales. Un flipón principal es un dispositivo de desconexión que se utiliza para cortar la corriente eléctrica en un sistema.

$$I = I_{nom} \times F.S \times C$$

donde

I_{nom} = Corriente nominal del motor

$F.S$ = Factor de servicio

C = Factor de sobrecarga

La corriente nominal del motor varía entre 28.8-26.0 Amperaje. Y un factor de servicio de 1.15. Para un factor de servicio de 1.15 o mayor se debe considerar un factor de sobrecarga de 1.25. La corriente de las barras del tablero que aloja el motor debe ser igual a la suma de todas las cargas conectadas al tablero, por un 1.25 adicional de la corriente nominal del motor más grande que esté conectado. De igual manera, al proteger motores eléctricos con un factor de servicio de 1.15 o superior, es necesario multiplicar la corriente nominal por 1.25 para su consideración adecuada.

$$I = 28.8 \times 1.15 \times 1.25 = 41.4 \text{ A}$$

Se requiere un guardamotor que sea mayor a 41.4 amperios. En la empresa Ket Plus, se consigue un guardamotor de 40 - 63 amperios. En Ket Plus ofrecen un flipón principal de 63 amperios, que cumple con el requerimiento del sistema.

En cuanto al interruptor de arranque y el botón de emergencia, como se mencionó anteriormente, se conectan directamente al variador de frecuencia y se instala en el panel de control. Esta disposición se elige para garantizar un manejo eficiente y aprovechar al máximo el espacio disponible en el panel de control.

6.5.6. Poleas

Para la selección de las poleas y las bandas, se llevó a cabo una investigación en colaboración con el proveedor Bando. Se utilizó el V-Belt Design Manual que proporciona este proveedor, el cual permitió diseñar las poleas de acuerdo con los requerimientos específicos del proyecto y solicitar al proveedor las bandas necesarias, entre otros factores relevantes. Así, se logró seleccionar las poleas y las bandas adecuadas para garantizar una transmisión de potencia eficiente y segura en el proyecto en cuestión. (Bando USA, s.f.)

Como primer paso, se debe calcular la potencia de diseño del sistema,

$$\text{Potencia del diseñador de HP} = \text{Transmisión de HP} \times \text{Factor de servicio}$$

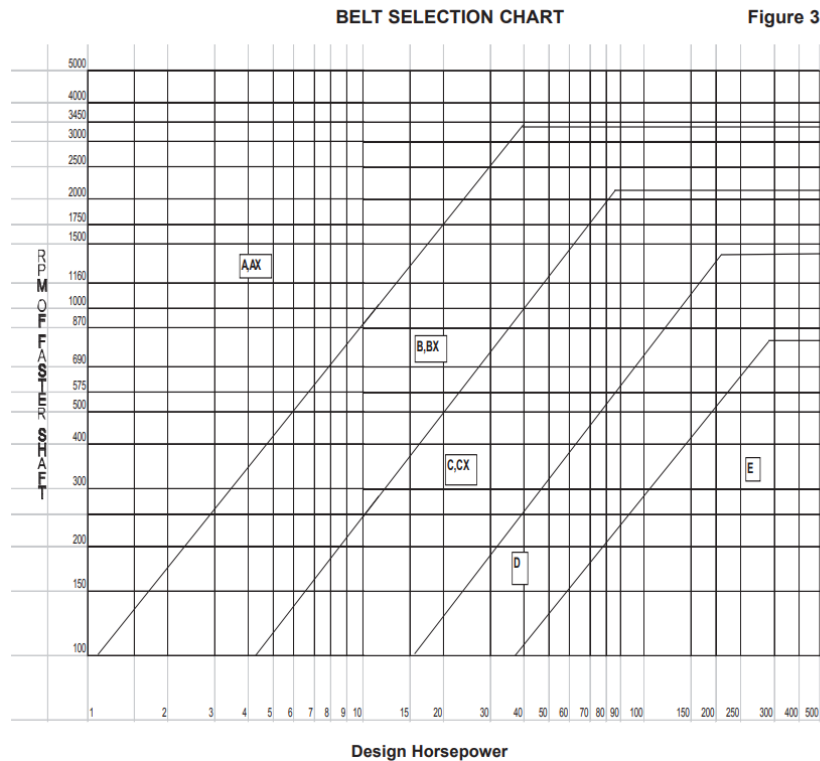
Transmisión HP es la potencia brindada por el proveedor de 10 hp, luego el factor de servicio es seleccionado por la figura, debido a que es una trituradora que se utiliza de 16-24 hr diarias, este es de 1.5. (Bando USA, s.f.)

$$\text{Potencia del diseñador de HP} = 10 \text{ hp} \times 1.5$$

$$\text{Potencia del diseñador de HP} = 15 \text{ hp}$$

Paso dos. se solicita seleccionar el tipo de faja que se utilizará, se selecciona mediante la gráfica presentada por el proveedor. Relacionando la velocidad del motor (1760 rpm) y la potencia de diseño. Por la figura se selecciona una faja tipo BX. Esto se debe a lo platicado con el proveedor local (INCAPROSA). (Bando USA, s.f.)

Figura 10: Belt Selection Chart, Bando



Fuente: (Bando USA, s.f.)

Paso tres, se selecciona la relación de velocidades,

$$\text{Relación de velocidades} = \frac{\text{Velocidad alta}}{\text{Velocidad baja}}$$

En este caso, la velocidad alta lo proporciona el motor de WEG, que alcanza las 1,760 revoluciones por minuto (rpm), mientras que la velocidad baja es necesaria para que las cuchillas puedan generar el corte en el material, a una velocidad de 369.27 rpm.

$$\text{Relación de velocidades} = \frac{1760}{369.27}$$

La relación de velocidades es de 4.76.

Paso cuatro, utilizando la tabla a continuación y la relación de velocidad, se determine la combinación de poleas. Eligiendo una de las poleas, preferiblemente la más rápida, del Cuadro 3 y se calcula el diámetro externo de la otra polea utilizando la relación de velocidad.

Cuadro 3: Standart Sheave Outer Diameters, Bando

<u>B/BX COMBO</u>
4.00
4.15
4.20
4.40
4.60
4.80
5.00
5.20
5.40
5.60
5.80
6.00
6.40
6.80
7.00
7.40
8.60
9.40
11.00
12.40
13.60
15.40
16.00
18.40
19.50
20.00
25.00
30.00
38.00

Fuente: (Bando USA, [s.f.](#))

Se seleccionó mediante la relación de velocidades, la comparación de diámetros,

$$\text{Relación} = \frac{D}{d}$$

Se seleccionó un diámetro D de 19.50 pulgadas y un diámetro d de 4.15 pulgadas. Para tener una relación de 4.70 Cumpliendo con el requerimiento de la relación de velocidades de 4.76. (Bando USA, [s.f.](#))

Paso número cinco, se calcula el tamaño de la faja,

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

C : Distancia de centro

D : Diámetro de la polea del motor (4.15 pulgadas)

d : Diámetro de la polea del eje (19.5 pulgadas)

Se consideró una distancia entre centros de 32 in. El tamaño de la faja quedó de 102.94 in, por lo que se utilizó una faja tipo BX105. (Bando USA, s.f.)

Recalcular la distancia de centros,

$$C_i = C + \frac{(L_{estandar} - L)}{2}$$

$$C = 32 + \frac{105 - 102.94}{2} = 33.03$$

Paso número seis, se busca la capacidad de transmisión de potencia por banda para obtener la transmisión de potencia se utiliza la siguiente fórmula,

Transmisión estándar = Clasificación de HP base + Incremento de la relación de velocidad

Para encontrar la clasificación de HP base, la velocidad máxima sería de 1,760 rpm y se busca el diámetro más pequeño de la polea (4.15 in) se encuentra una base HP de 4.97 hp. Luego se debe sumar el incremento de la relación de velocidad, que se busca con la tabla mediante los rpm y el diámetro más pequeño con la tabla se obtiene una potencia de 1.74 hp. hp.(Bando USA, s.f.)

$$\text{Transmisión estándar} = 4.97 \text{ hp} + 1.74 \text{ hp}$$

$$\text{Transmisión estándar} = 6.71 \text{ hp}$$

Paso número siete, determinar el coeficiente ARC,

$$ARC = \frac{D - d}{C}$$

El coeficiente de contacto del ángulo ARC mediante la fórmula es de 0.72, el coeficiente de corrección está ubicado en 0.80 con un ángulo de 133 grados y el factor de 0.87. Encontrado en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Coef. of ARC of Contact, Bando

(D-d)/C	Arc of contact on small shave (degrees)	Correction factor
0.70	139	0.89
0.80	133	0.87
0.90	127	0.85

Fuente: (Bando USA, s.f.)

Paso número ocho, es evaluar el número de fajas necesarias para la transmisión de potencia.

$$\text{Número de fajas} = \frac{\text{Potencia de diseo}}{\text{pot. de transmisin estndar} \times \text{Coef. ARC} \times \text{Coef long. de fajas}}$$

Para el cálculo de la potencia de diseño, se sigue considerando un valor de 15 caballos de fuerza (hp). La potencia de transmisión estándar es de 6.71 hp. Además, se ha encontrado un coeficiente ARC de 0.87 y un coeficiente de longitud de correa de 1.04 en el catálogo de Bando. (Bando USA, [s.f.](#))

$$\text{Número de fajas} = \frac{15 \text{ hp}}{6.71 \text{ hp} * 0.87 * 1.04} = 2.47 \text{ fajas}$$

Mediante el cálculo, se deben tener un total de 3 fajas para la transmisión de potencial hacia el eje de las cuchillas. (Bando USA, [s.f.](#))

6.5.7. Diseño de engranajes rectos

Se busca que los engranajes funcionen de manera sincronizada, transmitiendo el mismo torque y potencia a ambos ejes. Para lograr esto, se ha calculado la interferencia, que representa el contacto entre los perfiles de dientes no conjugados. La interferencia se produce cuando la punta del diente impulsado entra en contacto con el flanco del diente impulsor. En este caso, el flanco del diente impulsor primero hace contacto con el diente impulsado en el punto A, antes de que la parte involuta del diente impulsor entre en acción. Como resultado, la punta o cara involuta del engrane impulsado tiende a penetrar en el flanco no involuta del engrane impulsor.

$$N_p = \frac{2k}{3\text{sen}(\phi)^2} (1 + \sqrt{1 + 3\text{sin}(\phi)^2})$$

Donde:

k : Factor de dientes de profundidad completa es de 1

ϕ : Ángulo de presión de 20 grados

$$N_p = \frac{2(1)}{3\text{sen}(20)^2} (1 + \sqrt{1 + 3\text{sin}(20)^2}) = 12.3 \text{ dientes}$$

Se han diseñado con la misma cantidad de dientes para el engrane y el piñón, un total de 24 dientes, se ha determinado debido a la distancia entre ejes en el diseño de la carcasa. (Budynas et al., [2012](#)). Se ha decidido utilizar un ángulo de presión de 20 grados, también considerado estándar en este tipo de aplicaciones. Además, se ha establecido un paso diametral de 8.0 in (204 mm) para ambos engranajes, el cual se ha seleccionado como medida estándar basándose en consultas de mercad. Para asegurar un buen rendimiento, se

ha seleccionado un ancho de cara de 1.5 pulgadas (38.1 mm). Con esta información y teniendo en cuenta que la potencia a transmitir es de 10 hp y la velocidad angular del eje es de 369.27 rpm, se procederá a realizar los cálculos necesarios para garantizar un funcionamiento óptimo de los engranajes. (Budynas et al., 2012)

Se calculó el diámetro de paso,

$$D_p = \frac{N}{P_d}$$

donde D_p : Diámetro de paso

N : Número de dientes

P_d : Paso diametral

$$D_p = \frac{N}{P_d}$$

Como se debe tener una relación de 1 a 1, la relación de carga distribuida y la relación entre dientes debe de ser una unidad. Se hará el cálculo en sistema inglés, debido a que existen más proveedores con sistema inglés para los engranajes. Se calcula la velocidad de la línea de paso entre el engranaje y el piñón, que representa la velocidad lineal de un punto en el radio del círculo de paso del engranaje. (Budynas et al., 2012)

$$V = \frac{\pi d n}{12}$$

donde V : Velocidad de línea de paso, $\frac{pie}{min}$

d : Diámetro del engrane

n : Velocidad de engrane, rpm

Como se tiene la potencia lo que se debe de calcular es la carga transmitida,

$$W_t = 33,000 \frac{H}{V}$$

donde

W_t : Carga transmitida, lbf

H : Potencia, Hp

V : Velocidad de línea de paso, pie/min

Se utiliza la ecuación del esfuerzo AGMA, la cual emplea dos ecuaciones del esfuerzo, una del esfuerzo a la flexión y otra a la resistencia a la picadura (esfuerzo al contacto) (Budynas et al., 2012)

Esfuerzo a la flexión:

$$\sigma = W_t k_o k_v k_s \frac{P_d k_m k_B}{F J}$$

donde:

σ Esfuerzo a la flexión

W_t : Carga transmitida

k_o : Factor de sobrecarga

k_v : Factor dinámico

k_s : Factor de tamaño

P_d : Paso diametral

F : Ancho de la cara

k_m : Factor de distribución de carga

k_B : Factor del espesor del aro

J : Factor geométrico de resistencia a la flexión

Esfuerzo a la picadura:

$$\sigma_c = C_p \sqrt{W_t k_o k_v k_s \frac{k_m C_f}{d_p F I}}$$

Donde W_t, K_o, K, K_s, K_m, F y b son los mismos términos que los que se definieron en la ecuación de esfuerzo a la flexión.

σ_c : Esfuerzo a la picadura

C_p : Coeficiente elástico

C_f : Factor de la condición superficial

d_p : Diámetro de paso

I : Factor geométrico de resistencia a la picadura

En lugar de utilizar el término resistencia, AGMA (Asociación de Fabricantes de Engranajes de América) emplea datos denominados, el esfuerzo permisible y los designa mediante los símbolos s_t y s_c . Se calculan estos valores, (Budynas et al., 2012)

$$S_t = \frac{\sigma S_f K_t K_r}{Y_n}$$

donde:

S_t : Esfuerzo de flexión permisible

σ : Esfuerzo a la flexión

S_f : Factor de seguridad AGMA

k_t : Factor de temperatura

k_r : Factor de confiabilidad

Y_n : Factor de ciclos de esfuerzo del esfuerzo de flexión

La ecuación de esfuerzo de contacto permisible:

$$S_c = \frac{\sigma C S_H k_t k_r}{Z_N C_H}$$

donde:

S_c : Esfuerzo de contacto permisible

σ_c : Esfuerzo contacto permisible

Z_N : Factor de vida de ciclos de esfuerzo

C_H : Factores de relación de durezas de resistencia a la picadura

k_t : Factor de temperatura

k_r : Factor de confiabilidad

S_H : Factor de seguridad AGMA

En cuanto al factor dinámico, como se mencionó previamente, se emplea para considerar las imprecisiones en la fabricación y el acoplamiento de los dientes de los engranajes en movimiento. En las normas AGMA anteriores, este factor era menor que 1.0. Por lo tanto, como diseñador, se determinó un valor de 1.30. (Budynas et al., 2012)

$$K_v = \frac{(A + \sqrt{V})^B}{A}$$

donde:

$$A = 50 + 56(1 - B)$$

$$B = 0.25(12 - Q_v)\left(\frac{2}{3}\right)$$

donde Q_v es el número de calidad AGMA determinado 7. El valor del factor dinámico es de 1.30.

$$K_v = 1.30$$

En lo que respecta al factor de sobrecarga, su propósito es considerar todas las cargas externas que se aplican en exceso de la carga tangencial nominal W^t en una aplicación específica. Como la máquina impulsa la potencia uniforme.

$$K_o = 1$$

Respecto al factor de tamaño representa la falta de uniformidad de las propiedades del material dado al tamaño de la pieza. Como comenta la norma AGMA determinan el valor como 1.

$$K_s = 1$$

El factor de distribución de la carga, se modifican las ecuaciones de esfuerzo para reflejar la distribución no uniforme de la carga a lo largo de la línea de contacto. El factor de distribución de la carga se calcula de la siguiente manera.

$$K_m = 1 + (C_{mc}(C_{pf}C_{pm} + C_{ma}C_e))$$

Se calcula el factor de distribución de la cara en la cara C_{mc} donde para dientes no coronados es igual a 1.

$$C_{mc} = 1$$

Para C_{pf} como el ancho de la cara del engranaje es de 1.5 pulgadas. Se calcula,

$$C_{pf} = \frac{F}{10d} - 0.0375 + 0.0125F$$

donde d es el paso diametral de 8.67.

$$C_{pf} = 0$$

$$C_{pm} = 1$$

$$C_{ma} = A + BF + CF^2$$

donde A es 0.127, B es 0.0158 y C es $-0.930(10^{-4})$. Estos datos se encuentran en (Budynas et al., 2012), dado a que serán engranajes en unidades comerciales, cerradas.

$$C_{ma} = 0.1507$$

$$C_e = 1$$

Por lo que con los factores encontrados en factor de distribución de la carga es:

$$K_m = 1.15$$

El factor de la relación de la dureza C_H se determina como valor a 1, dado que

$$\frac{H_{BP}}{H_{BG}} < 1.2$$

$$C_H = 1$$

El factor de confiabilidad tiene en cuenta el impacto de las distribuciones estadísticas de las fallas por fatiga del material, sin abordar las variaciones de carga. Las resistencias AGMA St y Sc se basan en una confiabilidad del 99 por ciento. Por lo que se considera el 99 por ciento de confiabilidad para los engranajes.

$$K_R = 0.50 - 0.109 \ln(1 - R)$$

donde R es el 99 por ciento.

$$K_R = 1.00$$

Para el factor de temperatura, se determina que la temperatura del aceite se emplea de 120 grados Celsius por lo que el valor del factor es de 1.

$$K_F = 1$$

Para el factor de espesor del aro, Cuando el espesor del aro no es adecuado para proporcionar un soporte completo a la raíz del diente, la falla por fatiga por flexión puede ocurrir a través del aro del engrane en lugar del entalle de la raíz. En tales casos, se recomienda utilizar un factor de modificación de esfuerzo. (Budynas et al., 2012)

$$K_B = 1$$

En el caso del factor de seguridad del engranaje, se busca garantizar que el factor de seguridad sea mayor o igual a 2.0, ya que es un requisito para cumplir con los estándares de la maquinaria completa. Por lo tanto, se recomienda utilizar un factor de seguridad de 2.

Se presentan los datos de evaluación de los engranajes rectos en el cuadro 5, (Budynas et al., 2012)

Cuadro 5: Evaluación de engranajes

Característica	Símbolo	Piñón	Engranaje	Dimensional
Paso diametral	P_d	3	3	/pulg
Número de dientes	N	24	24	
Ángulo de presión	ϕ	20	20	
Ancho de cara	F	1.5	1.5	pulg
Diámetro de paso - piñón	D_p	8.00	8.00	pulg
Relación entre dientes	m	1	1	
Relación de carga distribuida	m	1	1	
Potencia	H	10	10	Hp
Velocidad angular	n	369.27	369.27	RPM
Velocidad línea de paso	V	773.40	773.40	pie/min
Carga transmitida	W_t	426.69	426.69	lbf

Fuente: Elaboración propia

Con la carga transmitida se puede encontrar la fuerza radial y tangencial que se genera en los engranajes.

Fuerza radial:

$$F_r = W_t \tan(\phi)$$

donde:

F_r : Fuerza radial

W_t : Carga transmitida

ϕ : Ángulo de presión

Considerando los datos anteriores, la fuerza radial es de 155.30 lbf (690.30 N).

Fuerza tangencial:

$$F_t = W_t$$

donde:

F_t : Fuerza tangencial

Considerando los datos anteriores, la fuerza tangencial es de 426.69 lbf (1,897.99 N)

Se presentan los factores calculados para el piñón y el engranaje en el Cuadro 6 y en el Cuadro 7 se presentan los esfuerzos calculados para el diseño del engranaje y el piñón. (Budynas et al., 2012)

Cuadro 6: Factores de piñón-engranaje

Característica	Símbolo	Piñón	Engranaje	Dimensional
Número de ciclos	N_c	2.66×10^8	2.66×10^8	RPM
Factor de ciclos de esfuerzos	Y_N	0.90	0.90	
Factor de ciclos de esfuerzos	Z_N	0.93	0.93	
Factor de sobrecarga	K_o	1	1	
Factor dinámico	K_v	1.30	1.30	
Factor de distribución de carga	k_m	1.15	1.15	
Factor de confiabilidad	K_R	1	1	
Factor de espesor de aro	K_B	1	1	
Factor de tamaño	K_s	1	1	
Factor de condición superficial	C_f	1	1	
Coefficiente elástico	C_p	2,300	2,300	$Psi^{\frac{1}{2}}$
Factor de relación de dureza	C_H	1	1	
Factor geométrico	J	0.21	0.21	
Factor geométrico	I	0.0803	0.0803	
Factor de temperatura	K_t	1	1	
Factor de seguridad	S_F	2	2	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7: Evaluación de esfuerzos

Característica	Símbolo	Piñón	Engranaje	Dimensional
Esfuerzo de flexión AGMA	σ	6,065.46	6,065.46	Psi
Esfuerzo de flexión permisible	S_t	13,513.03	13,513.03	Psi
Esfuerzo de la picadura AGMA	σ_c	59,111.90	59,111.90	Psi
Esfuerzo permisible de la picadura AGMA	S_c	127,736.8	127,736.8	Psi

Fuente: Elaboración propia

Tras evaluar cuidadosamente los esfuerzos permisibles disponibles, se ha seleccionado el material ideal para la fabricación de los engranajes. Se ha optado por utilizar acero AISI 4340 con un tratamiento térmico con un templeado en aceite, que cuenta con una dureza de Brinell entre 275-290. Este tratamiento térmico debe tratarse a una temperatura de 800 grados Celsius. El templeado se obtiene cuando el endurecimiento del acero es hasta su temperatura de austentuzación y luego se enfría en aceite. Datos obtenidos por el proveedor Aceros Suecos.

Esfuerzo a la flexión permisible:

$$S_t = 102H_B + 16,400 \text{ psi}$$

$$S_t = 44,450 \text{ psi}$$

Esfuerzo al contacto permisible:

$$S_c = 349H_B + 34,300 \text{ psi}$$

$$S_c = 130,275 \text{ psi}$$

Resistencia a la flexión permisible de 44,450 psi y un esfuerzo de contacto permisible de 130,275 psi. Cumple con una resistencia a la flexión permisible mayor de 13,513.03 psi y un esfuerzo permisible de la picadura de 127,736.80 psi. Este material posee las características necesarias para resistir las fuerzas involucradas y garantizar un factor de seguridad superior a 2.

Se está evaluando un acero AISI 3215 para la fabricación de engranajes. Este acero permite la utilización de una broca estándar de acero de alta velocidad (HSS) en el proceso de maquinado, lo cual no implicaría un aumento significativo en el costo de mano de obra. Posteriormente, se planea someter los engranajes a un tratamiento térmico con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas. Según Austenit, el tratamiento térmico puede aumentar la dureza de Rockwell del acero de 20 HRC a aproximadamente 59 HRC (613 HB). El proceso incluirá una cementación a 925 grados Celsius, un templado a 830 grados Celsius, seguido de un revenido a 180 grados Celsius. Después de completar estos pasos, se permitirá que los engranajes se enfríen durante una hora, logrando así la dureza deseada.

Esfuerzo a la flexión permisible:

$$S_t = 77.3H_B + 12,800 \text{ psi}$$

$$S_t = 60,184.90 \text{ psi}$$

Esfuerzo al contacto permisible:

$$S_c = 322H_B + 29,100 \text{ psi}$$

$$S_c = 226,466 \text{ psi}$$

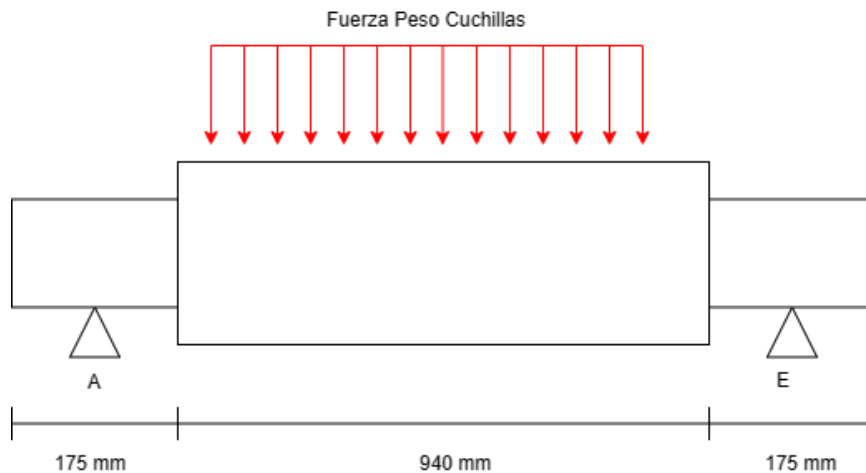
Se evaluaron los costos de manufactura del engranaje para determinar el tipo de material que estarán fabricados. Debido a que ambos cumplen con los esfuerzos mínimos y son encontrados localmente.

6.5.8. Diseño de ejes

La trituradora consta de dos ejes que experimentan diferentes cargas de flexión y torsión debido a la transmisión del movimiento del motor al eje. Estas cargas son generadas por el peso de las cuchillas en el eje, el torque generado por las cuchillas durante la trituración y la fuerza de impacto generada al triturar las botellas de PET. Además, es necesario tener en cuenta las cargas que pueden ser generadas por otros elementos mecánicos acoplados al eje, como los rodamientos y la polea.

Aunque cada cuchilla produce un torque y una fuerza de impacto, para simplificar el análisis, estas fuerzas se reemplazan por un sistema de fuerzas equivalentes compuesto por una fuerza y un torque. Bajo estas consideraciones, se presenta un esquema de los elementos que se agregan al eje y que deben tenerse en cuenta para el diseño. (Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017), (Budynas et al., 2012)

Figura 11: Diagrama de eje



Fuente: Elaboración propia

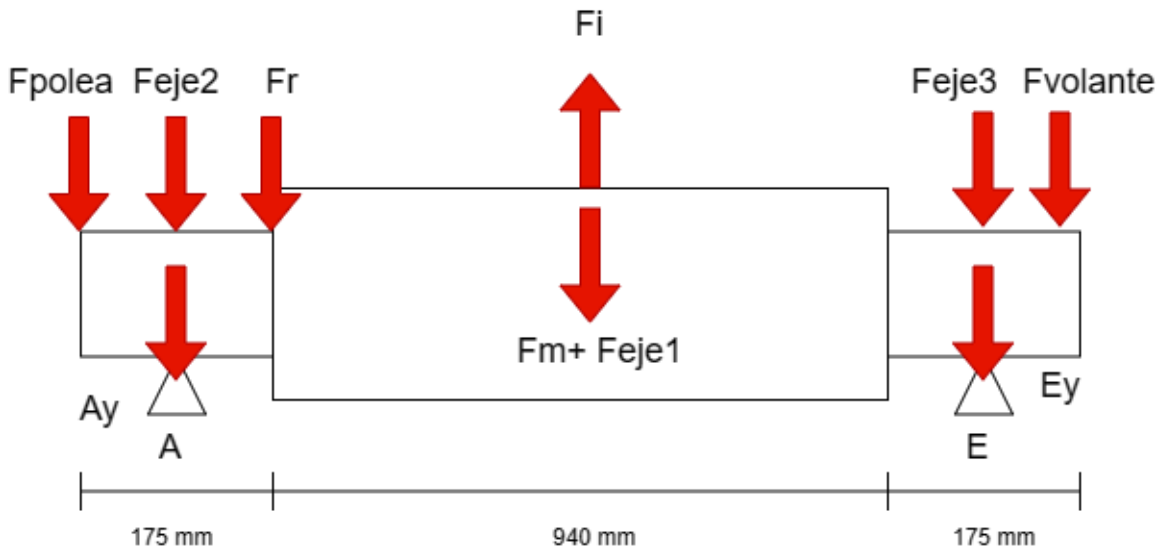
Diseño de forma del eje

Considerando que F_m representa el peso distribuido a lo largo de los 940 mm del eje, generado por las cuchillas y los separadores, se identifican los puntos A y E como las ubicaciones de los rodamientos. En uno de los ejes, se encuentra la fuerza ejercida por la polea en uno de sus extremos, la fuerza ejercida por los engranajes. Debido a que ambos ejes serán iguales, se evaluará con el que tiene más cargas. En este caso el que tiene la polea instalada.

Diagrama de cuerpo libre

Se llevó a cabo el diagrama de cuerpo libre, el cual muestra las fuerzas que actúan sobre el eje en un momento específico, permitiendo así determinar los momentos generados en el eje. Se presentan dos diagramas: uno para el eje XY, que representa las fuerzas que actúan en el plano horizontal, y otro para el eje XZ, que muestra las fuerzas que actúan en el plano vertical. Estos diagramas son fundamentales para las etapas de diseño, ya que brindan información crucial sobre las cargas que actúan sobre el eje.

Figura 12: Diagrama de eje XY



Fuente: Elaboración propia

F_{polea} : Fuerza ejercida por las poleas

$F_{eje 1}$: Fuerza ejercida por el peso del eje

$F_{eje 2}$: Fuerza ejercida por el peso del eje

$F_{eje 3}$: Fuerza ejercida por el peso del eje

F_i : Fuerza de impacto en un tiempo específico

F_r : Fuerza radial del engranaje

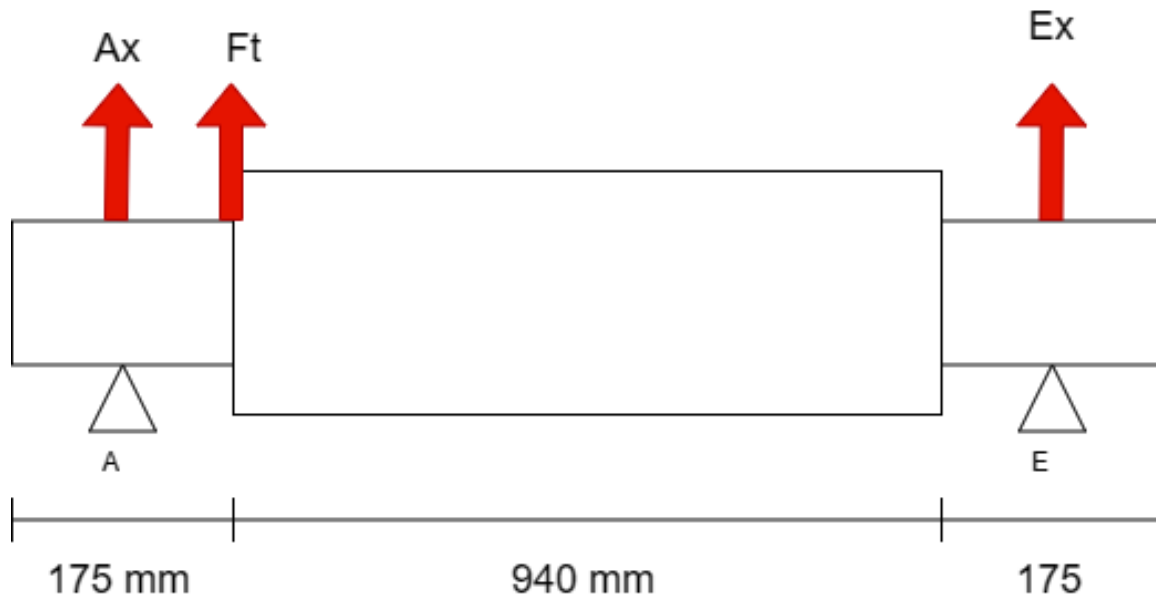
F_m : Fuerza ejercida por el peso de las cuchillas y separadores

$F_{volantedeinercia}$: Fuerza ejercida por el volante de inercia

A_y : Reacción en el punto A

E_y : Reacción en el punto E

Figura 13: Diagrama de eje XZ



Fuente: Elaboración propia

F_t : Fuerza tangencial del engranaje

A_x : Reacción en el punto A

E_x : Reacción en el punto E

Determinación de fuerzas

Fuerza F_m :

Se asume una carga distribuida a lo largo del eje, en forma rectangular, que es la resultante de la suma de las cargas de la cuchilla y los separadores. Las cuchillas como se mencionó, serán fabricadas de AISI D2 con un eje de AISI 1018 y los separadores de AISI 1045.

Para el cálculo de la fuerza distribuida se utiliza la siguiente fórmula:

$$F_m = \frac{(V_{Cuchillas} * \rho + V_{Separador} * \rho) * g}{L}$$

donde

$V_{cuchillas}$: Volumen de las cuchillas

$V_{Separador}$: Volumen de los separadores

ρ : Densidad de los materiales

g : gravedad

L : Largo del eje

Se encuentra la densidad del material. (Matweb, 2022)

AISI 1018:

$$\rho = 7,870 \text{ kg/m}^3$$

AISI 1045:

$$\rho = 7,845 \text{ kg/m}^3$$

Para el cálculo de la carga se requiere el volumen de las piezas. Primero se encuentra el área:

$$A_{cuchillas} = 332,038 \text{ mm}^2$$

$$A_{separadores} = 48,104 \text{ mm}^2$$

Mediante el grosor de las cuchillas de 45 mm y el grosor de los separadores de 20 mm. Se encuentra el volumen:

$$V_{cuchillas} = 14,941,710 \text{ mm}^3 = 0.0149 \text{ m}^3$$

$$V_{separador} = 962,080 \text{ mm}^3 = 0.000962080 \text{ m}^3$$

Utilizando una gravedad de 9.81 m/s^2 , se encuentra la fuerza distribuida,

$$F_m = 1,302.54 \text{ N/m}$$

Fuerza de impacto en un tiempo:

Las cuchillas generan una fuerza de impacto al triturar las botellas de PET, debido a la energía suministrada. Se calcula analizando una parte de las botellas que se someten a esta carga de impacto. Para que se cumpla la rotura o el avance de corte del material

en la trituración se debe cumplir los siguientes requerimientos (Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017):

$$\delta_W \geq \delta_{U_{el}} + \delta_{U_s}$$

Donde:

δ_W : Trabajo de fuerzas externas generada por la energía suministrada

δ_{uel} : Cambio de energía elástica del material

δ_{U_s} : Cambio de energía absorbida por el material en la rotura

La rotura del material ocurre cuando la energía suministrada por las fuerzas exteriores es igual o mayor a la energía requerida para la rotura. En el proceso de trituración, el cambio de energía elástica es insignificante en comparación con el trabajo realizado por las cuchillas al cortar. La ecuación se simplifica a esta relación (Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017).

$$\delta_W = \delta_{U_s}$$

El cálculo de δ_{U_s} , lo describen como una nueva superficie al ocasionar una rotura al material, se puede describir la ecuación como (Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017):

$$\delta_{U_s} = G_c \delta S$$

donde:

G_s : Energía absorbida por unidad de superficie en J/m^2

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

El diferencial del área superficial de la propagación de la grieta, se puede definir como:

$$\delta S = 2dc * t$$

Si δW se reemplaza por Fdc , se reemplaza la ecuación inicial,

$$F_i = 2Gct$$

donde:

F_i : Fuerza de impacto

t : espesor de la cuchilla

Se encuentra el valor de energía absorbida por unidad de superficie del PET, está entre $1 - 2.5 \text{ Kj/m}^2$. Se considera un valor de:

$$G_c = 1,750 \text{ J/m}^2$$

Se evalúa la fuerza de impacto con el espesor de 45 mm, la fuerza de impacto es:

$$F_i = 157.5 \text{ N}$$

Fuerza polea:

$$T = 193.00 \text{ N} - m$$

$$P_1 = P_2 e^{\frac{f}{\beta}}$$

donde:

$$\beta = 180 + (60(D - d))/C$$

$$\beta = 180 + (60(19.5 - 4.15)in)/33.03in = 207.88 = 3.63 \text{ rad}$$

$$f = 0.25$$

reemplazando ecuación:

$$P_1 = P_2 e^{0.25 * 3.63} = 2.48 P_2$$

$$M_x = 0$$

$$(P_1 - P_2)R_c = T$$

Donde R_c es el diámetro de la polea

$$(2.48 P_2 - P_2) * 0.17526 \text{ m} = 193.00 \text{ N} - m$$

$$P_2 = 744.06 \text{ N}$$

$$P_1 = 1,845.30 \text{ N}$$

Se calcula con el radio de 0.17526 m y el torque es el encontrado de 193.00008 Nm. La fuerza generada por la polea es de 2,589.33 Newton,

$$F_{polea} = 2,589.33 N$$

Torque:

$$T_{polea} = T_{cuchillas}$$

Fuerza del eje:

Se hace la evaluación de la fuerza por tramos, como se diseñó con dos diámetros distintos se separaran las fuerzas.

Se calcula la fuerza que genera el eje por partes.

$$F_{eje} = Vg\rho$$

donde:

F_{eje} : Fuerza del eje

V : Volumen del eje

g : Gravedad

ρ : Densidad de AISI 1018 ($7,870 \frac{kg}{m^3}$)

$$F = Atg\rho$$

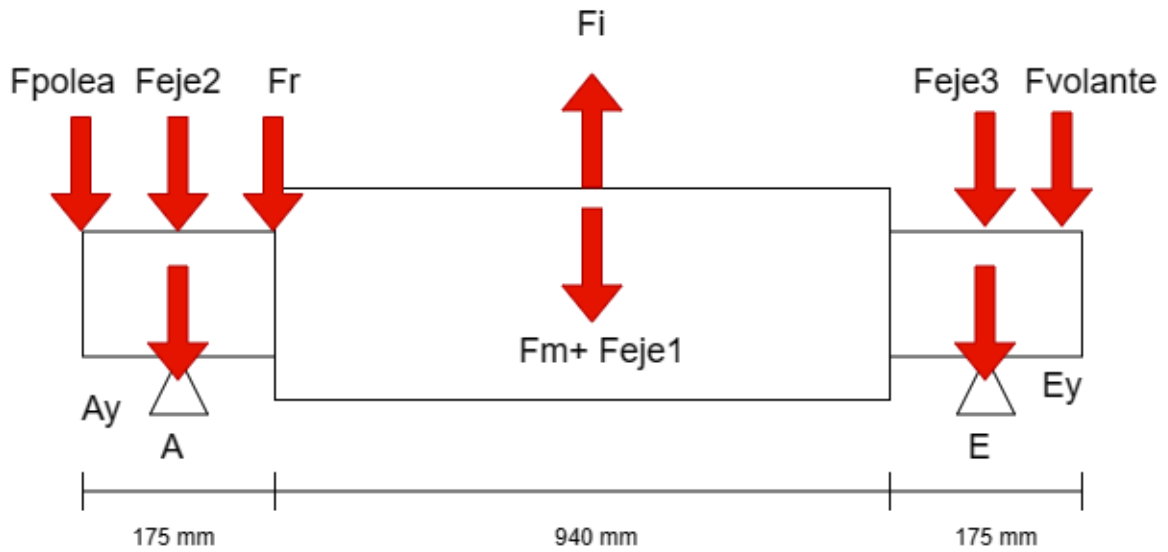
Se calculó el área del eje, como diseño se coloca un eje con un diámetro de 80 mm. Con un largo de 940 mm. Se tiene una fuerza de 364.8 Newtons.

Calculando para el eje de 175 mm y un diámetro de 60 mm. se tienen una fuerza de 38.2 Newtons.

Determinación de reacciones

Con los valores de las fuerzas, ya se pueden hacer sumatoria de fuerzas y momentos para encontrar las reacciones en el punto A y E.

Figura 14: Diagrama de eje XY



Fuente: Elaboración propia

Sumatoria en el eje XY

$$\sum F = 0$$

$$-F_{polea} - F_m + F_i - A_y - E_y - F_r - F_{eje1} - F_{eje2} - F_{eje3} - F_{volante} = 0$$

$$\sum M_E = 0$$

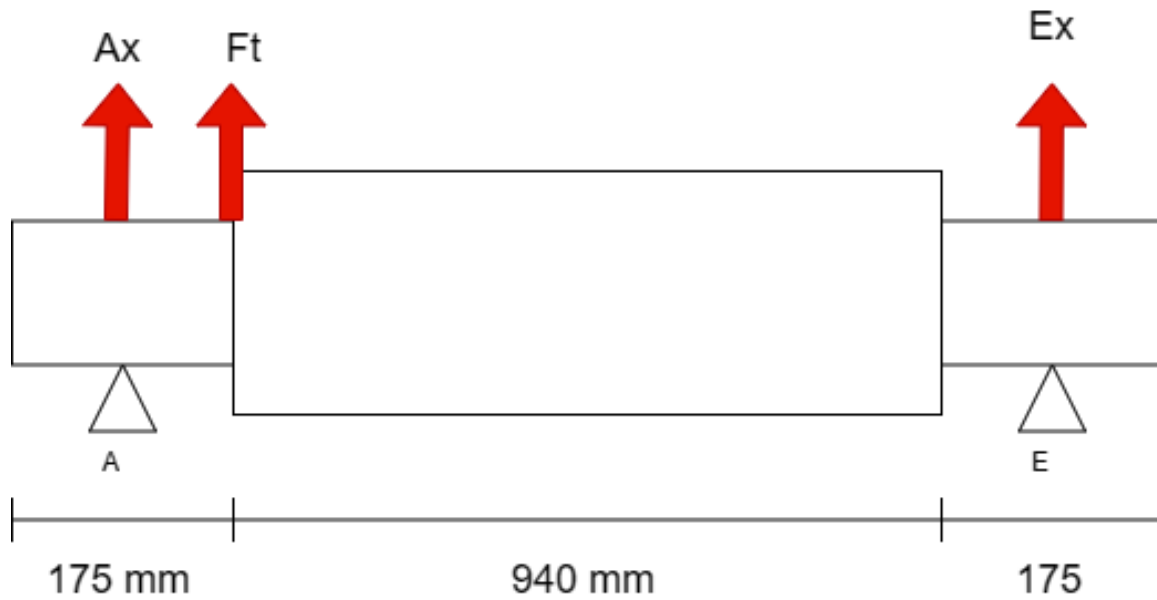
$$F_i(0.5575) - F_m(0.5575) - A_y(1.115) - F_{polea}(1.2025) - F_r(1.0275) - F_{eje1}(0.5575)$$

$$-F_{eje2}(1.115) + F_{volante}(0.045) = 0$$

$$A_y = -4196.72 \text{ N}$$

$$E_y = -926.98 \text{ N}$$

Figura 15: Diagrama de eje XZ



Fuente: Elaboración propia

Sumatoria en el eje XZ

$$\sum F = 0$$

$$A_x + E_x + F_t = 0$$

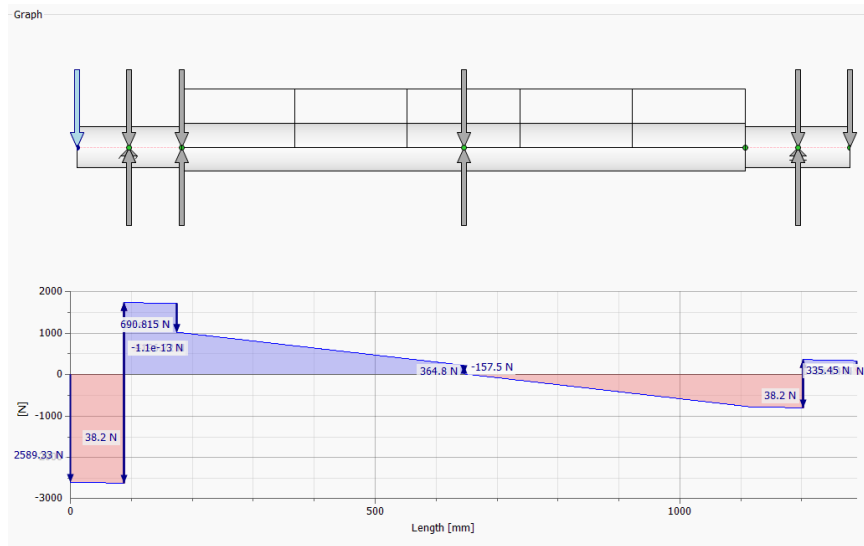
$$\sum M_E = 0$$

$$A_x(1.115) + F_t(1.0275) = 0$$

$$A_x = -1,749.05 \text{ N}$$

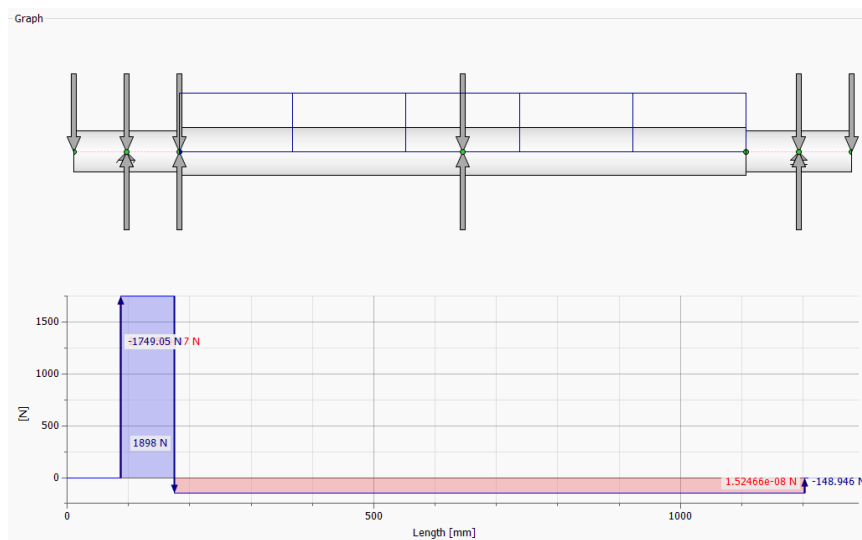
$$E_x = -148.95 \text{ N}$$

Figura 16: Diagrama de fuerzas en el eje XY



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

Figura 17: Diagrama de fuerzas en el eje XZ.



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

Dimensión del eje

Se utilizaron dos ejes idénticos en el triturador. El primer eje está conectado a la polea y al piñón de la parte del engranaje. El segundo eje acciona el extremo lateral opuesto. La determinación de las dimensiones de los ejes debe tener en cuenta las restricciones de

longitud y posicionamiento de los elementos. Los ejes estarán montados sobre rodamientos, colocados de acuerdo con la geometría de la estructura. (Budynas et al., 2012)

El material seleccionado para el eje es el AISI 1018 laminado en frío, reconocido por su alta resistencia mecánica. Este material también presenta una excelente ductilidad, lo que significa que puede deformarse sin fracturarse en una amplia gama de condiciones. (Budynas et al., 2012)

En cuanto a las propiedades específicas del AISI 1018 laminado en frío, su resistencia a la tensión alcanza los 53,700 psi, lo que indica su capacidad para soportar cargas y tensiones significativas antes de sufrir deformaciones permanentes. Además, presenta una resistencia a la fluencia de 29,000 psi, lo que indica su capacidad para resistir deformaciones plásticas bajo cargas constantes durante un período prolongado. (Budynas et al., 2012) (Matweb, 2022)

Para dimensionar de manera adecuada el eje, es fundamental tener en cuenta la resistencia a la fatiga del material y las condiciones de operación a las que estará expuesto. En este caso, se emplea la mitad de la resistencia última a la tensión como un valor preliminar de resistencia a la fatiga para una viga en rotación, con el propósito de realizar un cálculo conservador. Se realiza el cálculo correspondiente para obtener un valor de resistencia a la fatiga. (Budynas et al., 2012)

El eje está sometido a esfuerzos fluctuantes, se utiliza la ecuación de Marín para determinar S_e

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

donde:

K_a : Factor de la superficie

K_b : Factor del tamaño

k_c : Factor de carga

K_d : Factor de temperatura

K_e : Factor de confiabilidad

K_f : Factor de efectos varios

S'_e = Limite resistencia a la fatiga

Evaluación de factores:

El cálculo del factor de superficie se basa en el valor de resistencia última a la tensión del material utilizado en la fabricación del eje, y está determinado por el proceso al que fue sometido, en este caso, el laminado en frío. El cálculo se realiza de la siguiente manera: (Budynas et al., 2012)

$$K_a = a S_{ut}^{-b}$$

Donde

S_{ut} : resistencia mínima a la tensión

a, b : valores para factor de superficie

Cuadro 8: Factor superficial

Acabado superficial	Factor a: S_{ut} Kpsi	Factor a: S_{ut} MPa	Exponente b
Laminado en frío	2.7	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718

Fuente: (Budynas et al., 2012)

El valor de $a = 2.7$ y el valor de $b = -0.265$.

$$K_a = 0.93955$$

El factor del tamaño para flexión y torsión puede ser calculado:

$$K_b = 0.91d^{-0.157}$$

Cuadro 9: Factor de tamaño

K_b	$(\frac{d}{0.3})^{-0.107} = 0.879d^{-0.107}$	$0.11 < d < 2$ pulg
K_b	$0.91d^{-0.157}$	$2 < d < 10$ pulg
K_b	$(\frac{d}{7.62})^{0.107}$	$2.79 < d < 51$ mm
K_b	$(1.51d)^{0.157}$	$51 < d < 254$ mm

Fuente: (Budynas et al., 2012)

Se seleccionó un diámetro de 2.5 pulgadas, lo que da un valor de

$$k_b = 0.78807$$

El factor de modificación por carga se establece en 1 cuando la torsión se combina con otros esfuerzos, siempre y cuando la carga combinada se exprese utilizando el esfuerzo de von Mises efectivo. Esto implica que se puede considerar la carga combinada de manera simplificada, teniendo en cuenta la influencia conjunta de los diferentes esfuerzos en lugar de analizar cada componente por separado. (Budynas et al., 2012)

$$k_c = 1$$

El factor de temperatura se determinó que debería estar en lo 20 grados Celsius,

Cuadro 10: Factor de temperatura

Temperatura ° C	S_t/S_{rt}	Temperatura °F	S_t/S_{rt}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024

Fuente: (Budynas et al., 2012)

$$k_d = 1$$

Para un trabajo de diseño es aceptable determinar una confiabilidad del 95 por ciento, según el Cuadro 11, (Budynas et al., 2012)

$$k_e = 0.868$$

Cuadro 11: Factor de confiabilidad

Confiabilidad	Variación de transformación Z_a	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., 2012)

Dado el tipo de operación y tomando en cuenta que la aplicación de los ejes no se considera de alto impacto, se establece un valor de 1 para el factor de efectos varios. Esto significa que no se espera que existan efectos significativos adicionales que deban ser tomados en cuenta en el diseño de los ejes. (Budynas et al., 2012)

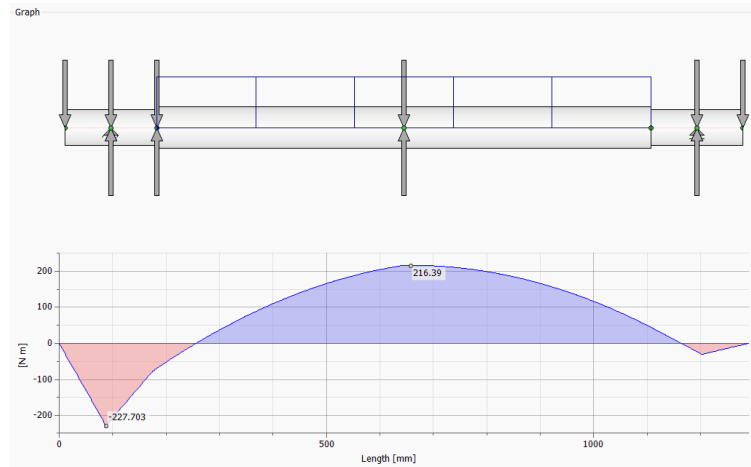
$$k_f = 1$$

Con los factores encontrados se determina el valor de la resistencia a la fatiga crítica,

$$S_e = 17,256.40 \text{ Psi}$$

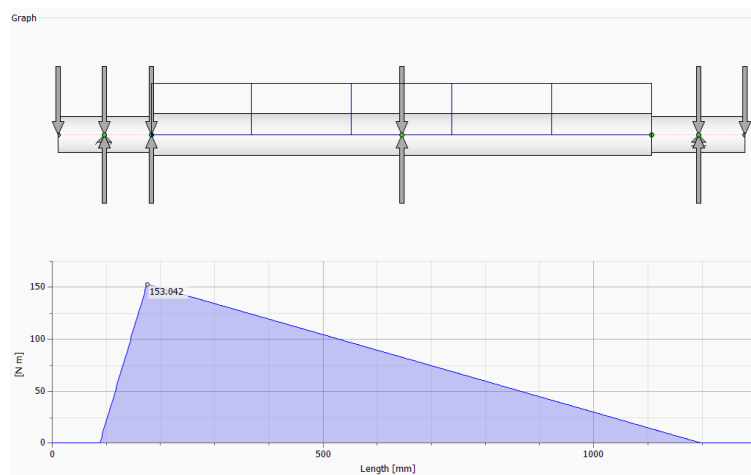
En relación al diseño del eje, es crucial tener en cuenta los puntos críticos de concentración de esfuerzos que impactan en su rendimiento. En particular, se realizará un análisis detallado de los concentradores de esfuerzos situados entre los puntos C, D y E, ya que son los puntos donde se encuentran las mayores fuerzas y momentos de flexión. Mediante el uso del software Inventor, se determinarán los valores máximos de momento de flexión alternante y el torque medio en estos puntos. El momento medio y el torque alternante en este punto son cero. (Budynas et al., 2012)

Figura 18: Diagrama de momento en el eje XY



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

Figura 19: Diagrama de momento en el eje XZ



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

Se ha observado que el eje está sometido a cargas en diferentes planos. Por ello, es necesario identificar la sección crítica del eje, que coincide con la coordenada longitudinal

donde se superponen los esfuerzos de flexión de ambos planos. Para lograr esto, se debe determinar el valor del esfuerzo de flexión resultante. La combinación de los momentos en los planos ortogonales se realiza mediante una suma vectorial. (Budynas et al., 2012)

$$M = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2}$$

Este valor sera evaluado en cada uno de los puntos críticos.

Cuadro 12: Evaluación de momento resultante

Momento	A	B	C	D
M_{xy}	-2,015.31	-424.84	1,915.30	451.388
M_{xz}	282.339	1,354.54	719.566	126.566
M_r	2,035	1,419.6	2,046.01	468.80

Fuente: Elaboración propia

Se utilizara el criterio de Goodman para el calculo del diámetro para ser conservador,

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

Para los factores K_f , K_{fs} , y K_{fa} se determinan como los factores de concentración de esfuerzos.

Cuadro 13: Factor de concentración de esfuerzos

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.01$)	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado	2.14	3.0	0
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	0	0
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Fuente: (Budynas et al., 2012)

Para la evaluación de la primera sección, que corresponde al punto donde se encuentran los cojinetes y se dispone de una ranura para un anillo de retención, se han considerado los siguientes factores de concentración de esfuerzos por flexión, cortante y axial:

- Factor de concentración de esfuerzos por flexión: $K_f = 5$
- Factor de concentración de esfuerzos cortantes: $K_{fs} = 3$
- Factor de concentración de esfuerzos axiales: $K_{fa} = 5$

En cuanto a la segunda sección evaluada, que comprende la ubicación del engranaje y se considera como un filete agudo, se han determinado los siguientes factores de concentración de esfuerzos:

- Factor de concentración de esfuerzos por flexión: $K_f = 2.7$
- Factor de concentración de esfuerzos cortantes: $K_{fs} = 2.2$
- Factor de concentración de esfuerzos axiales: $K_{fa} = 3.0$

Por último, en la tercera sección evaluada, que incluye la ubicación de las cuchillas y se considera un cunero fresado, se han calculado los siguientes factores de concentración de esfuerzos:

- Factor de concentración de esfuerzos por flexión: $K_f = 2.14$
- Factor de concentración de esfuerzos cortantes: $K_{fs} = 3.0$
- Factor de concentración de esfuerzos axiales: $K_{fa} = 0$

Estos factores de concentración de esfuerzos son fundamentales para el análisis y diseño adecuado de las secciones mencionadas, garantizando así la integridad y confiabilidad de la trituradora. (Budynas et al., 2012)

Para determinar el diámetro correcto del eje, se consideró tener dos iteraciones para ser conservadores. Con dicha explicación se presentan los siguientes valores:

6.5.9. Evaluación de selección de diámetro

Cuadro 14: Evaluación de diámetro

Sección	A	B	C
Factor de concentración de esfuerzos en flexión (K_f)	5	2.7	2.14
Factor de concentración de esfuerzos cortantes (K_{fs})	3	2.2	3
Factor de concentración de esfuerzos axial (K_{fa})	5	3	0
Momento flexionante alternante (M_a)	2,035	1,419.60	2,046.01
Momento flexionante medio (M_m)	0	0	0
Par de torsión alternante (T_a)	0	0	0
Par de torsión medio (T_m)	1,706.73	1,706.73	1,703.73
Diámetro (primera iteración)	2.4731	1.8954	2.02
Factor de tamaño recalculado (k_b)	0.78941	0.82087	0.81468
Resistencia a la fatiga recalculado (S_e)	17,285.70	17,974.60	17,839.10
Diámetro de la sección analizada (segunda iteración)	2.47	1.87	2.00

Fuente: (Budynas et al., 2012)

El punto crítico es el A donde el diámetro debe ser de 2.47 pulgadas (62.738 mm), por lo que se diseñará el eje con un diámetro de 70 mm. Con el diámetro de 70 mm, se evaluará el factor de seguridad para cumplir con el requisito D04.

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

Con un diámetro de 70 mm, se tiene un factor de seguridad de 2.77. Por lo que cumple con ese requisito. Respecto al criterio de von Mises para los ejes giratorios, redondos y sólido, cuando no se tienen fuerzas axiales, se pueden calcular los esfuerzos alternantes y medios de la siguiente manera: (Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017)

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

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

Remplazando:

$$\sigma'_a = 4,951.54 \text{ psi}$$

$$\sigma'_m = 2,157.86 \text{ psi}$$

Utilizando Goodman:

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}$$

(Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017) (Budynas et al., 2012)

El resultado del factor de seguridad en el punto B es de 3.0615.

Se calcula el factor de seguridad de la fluencia debido a que el criterio de Goodman no lo considera:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{max}}$$

donde:

n : Factor de seguridad de fluencia

S_y : Resistencia a la fluencia del material

σ_{max} : Esfuerzo máximo

Se utiliza el esfuerzo a la fluencia del material AISI 1018. Para el cálculo del esfuerzo máximo se evalúa siendo conservados:

$$\sigma_{max} = \sigma_a + \sigma_m$$

$$\sigma_{max} = 4,951.54 + 2,157.86psi = 7,109.40psi$$

$$n = 4.08$$

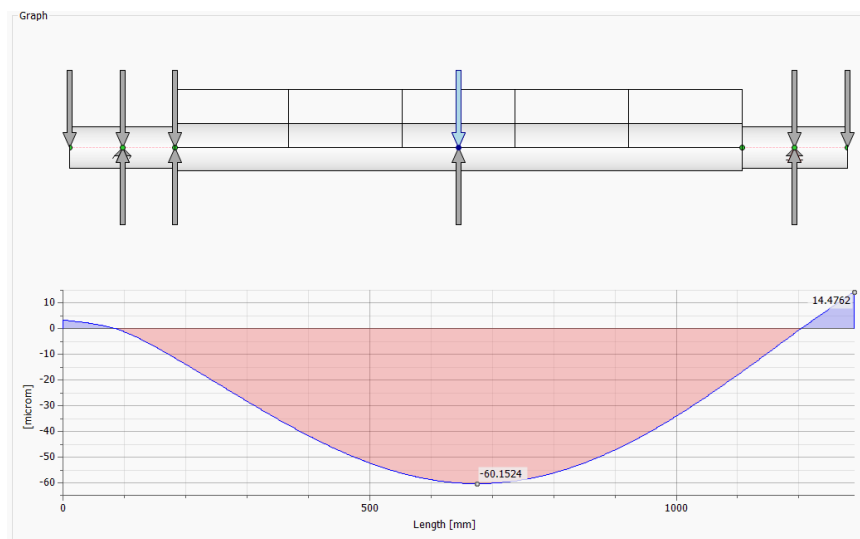
Velocidad crítica:

Para determinar la velocidad crítica en el eje, se realizó una evaluación en los puntos donde se experimentan fuerzas y deformaciones. En este análisis, se aplicó el método de Rayleigh que implica una sobreestimación de la velocidad crítica. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$w = \sqrt{\frac{g \sum W_i y_i}{\sum w_i y_i^2}}$$

Donde w representa la velocidad crítica, g es la aceleración debida a la gravedad, w_i es el peso de la selección crítica y y_i es la deflexión en el punto crítico. Este enfoque permite calcular de manera efectiva la velocidad crítica en el eje y es fundamental para el análisis de la estructura en cuestión.

Figura 20: Diagrama de deflexión



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

Donde g es de $9.81m/s^2$, W_i es la fuerza en cada punto donde se tiene componentes, y Y_i es la deflexión en cada punto donde se tiene componentes. Se hace la sumatoria a lo largo del eje con las reacciones encontradas anteriormente. Cada una de las deflexiones en la cargas son evaluadas mediante el uso del software Autodesk Inventor®.

$$w = 463.30 \text{ rpm}$$

6.5.10. Cojinetes

Se consultó al proveedor SKF para la evaluación de los cojinetes, específicamente en relación a los rodamientos rígidos de bola. Después de considerar diversas opciones, se decidió utilizar rodamientos rígidos de bola debido a su versatilidad, capacidad para funcionar a altas velocidades y su capacidad para soportar cargas axiales y radiales. Además, su bajo requerimiento de mantenimiento fue un factor determinante en la elección. El proveedor SKF ofrece una amplia gama de diseños y tamaños de rodamientos que se pueden adaptar al diseño de la aplicación en cuestión. Para establecer la vida útil esperada de los cojinetes, se tuvo en cuenta la información proporcionada por Shigley, quien señala que la vida útil de las máquinas que operan las 24 horas del día generalmente se encuentra entre 50,000 y 60,000 horas. Con base en estos valores, se calculó un promedio y se seleccionó una vida útil de 55,000 horas para el presente caso. («SKF», s.f.)

Cuadro 15: Aplicación de cojinetes

Tipo de aplicación	Vida, Kh
Máquinas para servicio de 8 hr, que no siempre se usan completamente	14-20
Maquinas para servicios de 8 hr. que se utilizan plenamente	20-30
Máquinas para servicios continuos 24 hr	50-60

Fuente: («SKF», s.f.)

El proveedor comenta que para el diseño de los cojinetes es necesario colocar la velocidad del eje

$$n = 369.2730 \text{ rpm}$$

con base en el diagrama de fuerzas en el plano XY, se pueden evaluar dos puntos en los cuales deben de estar ubicados los rodamientos para soportar las fuerzas. Por decisión del diseñador se considerarán dos rodamientos iguales, valorando la sección más crítica del eje. («SKF», s.f.)

Evaluando la fuerza debido a que la fuerza que ejerce sobre el eje es una fuerza tangencial y radial.

$$F = \sqrt{F_r^2 + F_t^2}$$

En dicha sección se tiene una reacción de 4,521.60 N, por lo que se seleccionó el cojinete solo para la fuerza radial debido a que en este caso no tiene fuerza axial. («SKF», s.f.)

Se calcula carga dinámica equivalente del rodamiento (P). Ecuación brindada por el proveedor:

$$P = F_r$$

No se aplica ningún factor de cálculo radial, y axial. Debido a que no se tiene una combinación de fuerzas, es una aplicación de fuerza radial pura. («SKF», s.f.)

Luego, se calcula la capacidad de carga del cojinete (C),

$$C = P \left(\frac{60nL10h}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

La capacidad de carga dinámica encontrada fue de 48.3 kN. Por lo que se buscó con el proveedor SKF, cojinetes que soportaran esa capacidad de carga. Se encontró el cojinete de diámetro interno de 70 mm (el cual es el diámetro del eje) y diámetro externo de 125 mm con una capacidad de carga dinámica de 60.5 kN, por lo que sí cumple con lo que se requiere para las reacciones que se van a generar por el ascensor. El nombre del cojinete brindado por el proveedor SKF es 6214M. («SKF», s.f.)

El montaje del rodamiento 6214 requiere una correcta instalación para garantizar su fiabilidad y prolongar su vida útil. Para lograr un montaje adecuado, se necesitan precisión, experiencia, un área de trabajo limpia y las herramientas adecuadas. Para este proceso, se recomienda trabajar en colaboración con SKF, el proveedor, para adquirir las herramientas necesarias que aseguren una instalación de calidad. Es fundamental evitar cualquier impacto en los elementos del rodamiento. Para ello, se recomienda aplicar una capa de aceite ligero antes del montaje. En el caso del montaje en frío, se pueden utilizar golpes suaves con el martillo de SKF. Si es necesario presionar el rodamiento dentro del eje y el agujero del soporte simultáneamente, la fuerza de montaje debe aplicarse uniformemente en ambos aros, y las superficies de resalte de la herramienta de montaje deben estar alineadas en el mismo plano. («SKF», s.f.)

Con el objetivo de optimizar los costos, se procederá a evaluar los cojinetes más adecuados para la trituradora. En esta búsqueda, llama la atención la marca NTN. Realizara un análisis para determinar la vida útil del rodamiento que NTN recomienda específicamente para su aplicación en la trituradora. («NTN», s.f.)

Cuadro 16: Aplicación de cojinetes

Tipo de aplicación	Vida, Kh
Maquinas que no se usan constantemente	
Trituradoras	12-30
Maquinas en constante uso durante las 8 hr del día: Ejes de vehículos	12-30

Fuente: («SKF», s.f.)

Para esta aplicación, se ha optado por utilizar un período de funcionamiento que abarca desde 12 hasta 30 hrs. Luego de un análisis detallado, se ha establecido que la vida útil óptima para el cojinete será de 21,000 horas. En este contexto, la velocidad de rotación del eje se fija en 369.27 rpm, y la fuerza radial aplicada alcanza los 4,521.60 N. Es relevante mencionar que no se considera una fuerza axial en esta situación. («NTN», s.f.)

$$P = XF_r + YF_a$$

P :Carga dinámica equivalente, N

F_r : Fuerza radial. N

F_a :Fuerza axial, N

Como no se aplica una fuerza axial:

$$P = F_r$$

Con la vida nominal L10h de 21,000 hrs, se puede calcular la capacidad básica de carga dinámica;

$$C = P \left(\frac{60nL_{10h}}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

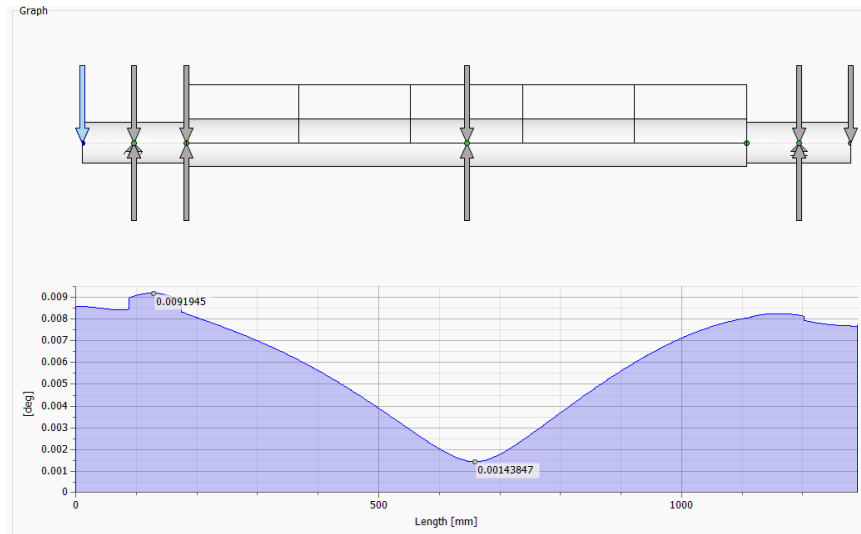
$$C = (4,521.60N) \left(\frac{60(369.27 \text{ RPM})(21,000hrs)}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C = 35,037.50N = 35kN$$

Se está llevando a cabo una evaluación del cojinete de bolas con chumacera, empleando un diámetro de eje de 70 mm. En este caso, el cojinete modelo 6214 es el seleccionado, el cual presenta un diámetro externo de 125 mm y un diámetro interno de 70 mm. Su capacidad de carga asciende a 62.0 kN. Aunque su vida útil es menor en comparación con el cojinete SKF, este modelo cumple satisfactoriamente con los requisitos de capacidad de carga necesarios para su correcto funcionamiento. («NTN», s.f.)

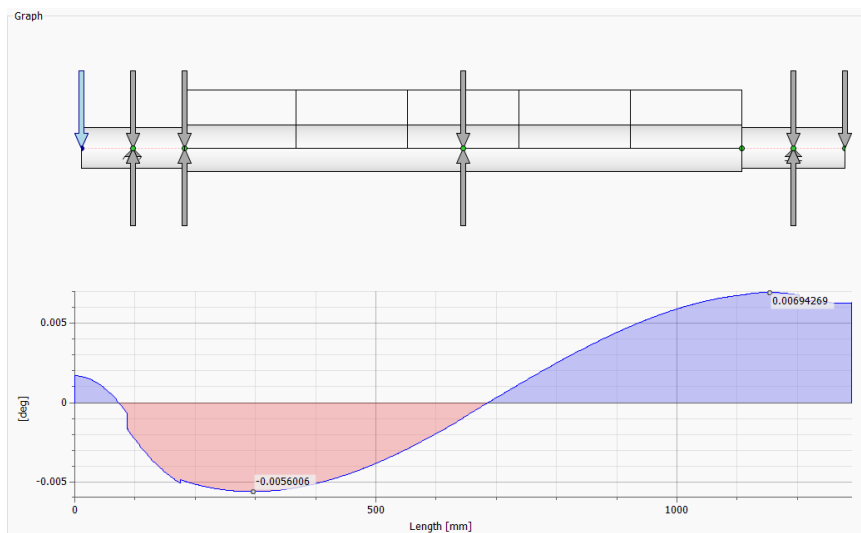
Para evaluar que el cojinete seleccionado pueda soportar la deflexión angular máxima en la cual las fuerzas del eje va a ejercer, Mediante el uso del software Autodesk Inventor® se evaluó la deflexión angular que esta ejerciendo el ángulo en cada uno de los puntos donde se colocarán los cojinetes.

Figura 21: Diagrama de deflexión angular



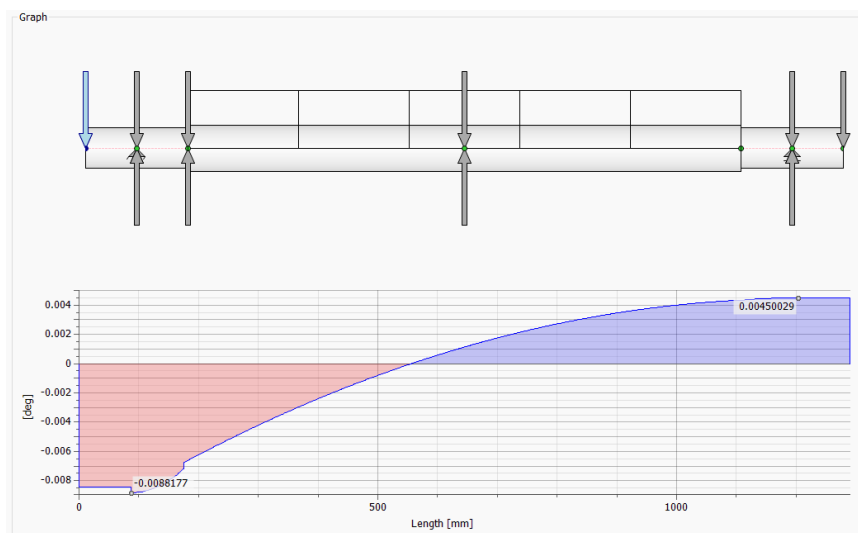
Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 22: Diagrama de deflexión angular plano XY



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

Figura 23: Diagrama de deflexión angular plano XZ



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

Con los valores presentados en las figuras 21, 22 y 23. Se puede analizar la deflexión angular que se va a tener en el eje en los puntos de los cojinetes, el cual tiene para el punto A con una deflexión de 0.01040 grados (0.0001815 rad) y para el punto E de 0.011 grados (0.00019 rad). Evaluando con el proveedor de NTN el grado máximo que soporta es 1/15 (0.066 grados) como ángulo de alineación permitido, lo cual cumple con los ángulos de deflexión que se tienen de 0.011 para el eje.

Luego evaluando el valor de deflexión para el punto del engranaje recto de 24 dientes, se tiene un valor de 21.14 micrómetros (0.0008322 in). Evaluando con el libro de Shigley y los intervalos máximos típicos para engranajes rectos;

Cuadro 17: Deflexiones

Tipo	medida
Engranajes rectos $P < 10$ dientes/pulgada	0.010 pulg
Engranajes rectos $11 < P < 19$	0.005 pulg
Engranajes rectos $20 < P < 50$	50

Fuente: (Budynas et al., 2012)

Por lo visto en la tabla y considerando el diseño de mi engranaje cumpla con valor más pequeño al intervalo máximo de flexión. Con una flexión de 0.0008322 in.

6.5.11. Cuñas

Para el diseño de la cuña se ha determinado que debe soportar la polea, el timón de inercia y os engranajes del eje, esta dimensión es de 940 mm. Se determinó una cuña rectangular

de dimensión de ancho 1/8 pulgadas y largo de 5/8 pulgadas. El material que se colocará a evaluación del soporte será un AISI 1018 estirado en frío con una resistencia a la fluencia de 63.8 kpsi. (Lalama Ochoa, Navarrete Mosquera et al., 2017) (Matweb, 2022)

Evaluando la torsión a la que se someterán las cuñas.

$$T = \frac{63,025H}{n}$$

donde

H : Potencia que transmite el eje

n : RPM del eje

$$T = \frac{63,025(10 \text{ hp})}{369.27 \text{ rpm}} = 1,706.75 \text{ lb in}$$

como se calculó para los engranajes rectos, el torque será de 1,706.75 lb in

Calculando la fuerza ejercida de la cuña sobre el eje.

$$F = \frac{T}{r}$$

donde r es el radio del eje,

$$F = \frac{1706.75 \text{ lb in}}{\frac{2.75 \text{ in}}{2}} = 1,241.27 \text{ lb}$$

La fuerza ejercida es de 1241.27 lb f. Con la teoría de energía de distorsión, la resistencia cortante es evaluada,

$$S_{sy} = 0.577 S_y$$

Donde S_y es la resistencia a la fluencia, se tiene una resistencia cortante de 36.82 kpsi.

Calculando el factor de seguridad de la cuña,

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl}$$

donde t es el espesor de la cuña y l es la longitud de la cuña.

$$n = \frac{tl}{F} * S_{sy}$$

$$n = \frac{(\frac{1}{8} \text{ in})(\frac{5}{8} \text{ in})}{1,241.27 \text{ lbf}} * 36.82 \text{ kpsi}$$

$$n = 2.31$$

Con un ancho 1/8 pulgada y longitud de 5/8 pulgada, se tiene un factor de seguridad de 2.31.

Se calcula para las cuchillas, el torque será de 1,706.75 lb in. Calculando la fuerza ejercida de la cuña sobre el eje.

$$F = \frac{T}{r}$$

donde r es el radio del eje,

$$F = \frac{1706.75 \text{ lb in}}{\frac{3.15 \text{ in}}{2}} = 1,083.65 \text{ lb}$$

La fuerza ejercida es de 1,083.65 lb f. Con la teoría de energía de distorsión, la resistencia cortante es evaluada,

$$S_{sy} = 0.577 S_y$$

Donde Sy es la resistencia a la fluencia, se tiene una resistencia cortante de 36.82 kpsi.

Calculando el factor de seguridad de la cuña,

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl}$$

donde t es el espesor de la cuña y l es la longitud de la cuña.

$$n = \frac{tl}{F} * S_{sy}$$

$$n = \frac{(\frac{1}{8} \text{ pulgadas})(\frac{1}{2} \text{ pulgadas})}{1,083.65 \text{ lbf}} * 36.82 \text{ kpsi}$$

$$n = 2.12$$

Con un ancho de 1/8 pulgada y una longitud de 1/2 pulgada, se ha logrado obtener un factor de seguridad de 2.12. En función del diseño requerido, se utilizarán abrazaderas en

el eje para sujetar tanto los separadores como las 14 cuchillas en el eje. Estas abrazaderas serán colocadas en los extremos del diámetro del eje, justo donde se instalarán las cuchillas. Las abrazaderas mecánicas son dispositivos diseñados para unir o sujetar dos o más piezas tubulares de manera segura y confiable. En este proyecto, desempeñan un papel esencial al asegurar la unión de los componentes cilíndricos mencionados anteriormente. Estas abrazaderas proporcionan una solución común y efectiva para garantizar la estabilidad y resistencia de la conexión entre los elementos cilíndricos, lo que facilita la instalación, mantenimiento y reparación de los sistemas y equipos involucrados en el proyecto.

6.5.12. Pernos

Durante la evaluación de la instalación de la trituradora, se identificó la necesidad de utilizar múltiples pernos con el propósito de proporcionar rigidez y soporte en las uniones entre las piezas. Con el objetivo de asegurar la resistencia en el punto más crítico, se optó por realizar un análisis del perno más importante. Al asegurar este punto crítico, se garantiza la integridad del conjunto completo de pernos, lo cual resulta en un factor de seguridad elevado, evitando cualquier posible fallo en el funcionamiento de la trituradora (Budynas et al., 2012)

En la chumacera de la trituradora, se ha determinado la necesidad de instalar 4 pernos para soportar la fuerza generada por los rodamientos que ayudan al eje. Estos pernos desempeñan un papel crucial al proporcionar una mayor protección a la trituradora. Para identificar el lado más crítico del eje, se utilizó el Design Accelerator de Inventor, el cual reveló una fuerza de 4,196.72 N en el eje x y 1,749.05 N en el eje y para uno de los rodamientos. Esta fuerza se caracteriza por ser de naturaleza radial. Por lo tanto, se concentrará en evaluar detalladamente este punto crítico, ya que al asegurar esta área de manera efectiva, los pernos utilizados en las demás piezas ofrecerán un factor de seguridad aún mayor, evitando cualquier posible fallo en la trituradora.

En cuanto a los pernos, se ha seleccionado un tornillo de 5/8 de pulgada, grado 5 SAE. Esta elección se basa en el hecho de que es una medida estándar que cumple con los requisitos del diseño sin necesidad de recurrir a casos especiales para los tornillos. (Budynas et al., 2012)

El ingeniero Nivish George de la Universidad RSET presenta la evaluación del corte primario debido a la precarga. La fuerza resultante se calcula dividiendo la fuerza total (F) entre el número de pernos (n). Esto se expresa como: (Budynas et al., 2012)

$$F' = F/n$$

Calculando la fuerza debido a que la fuerza que ejerce sobre los pernos es una fuerza tangencial y radial.

$$F = \sqrt{F_r^2 + F_t^2}$$

La resultante de la fuerza es 1,022.12 lbf.

Se evalúa el aplastamiento sobre los pernos.

$$\sigma = \frac{F}{td}$$

Donde

F : Fuerza

t : Grosor del material

d : Diámetro del perno.

Se tiene un esfuerzo de aplastamiento sobre los pernos.

$$\sigma = \frac{1,022.12}{(0.39)\left(\frac{5}{8}\right)}$$

$$\sigma = 4,193.32 \text{ psi}$$

Calculando el factor de seguridad

$$n_d = \frac{S_p}{\sigma}$$

$$n_d = \frac{85000}{4,193.32}$$

$$n_d = 20.27$$

Evaluando el aplastamiento de los elementos, con todos los pernos activos.

$$n_d = \frac{S_{y\text{elemento}}}{\sigma}$$

$$n_d = \frac{54,000}{4,193.32}$$

$$n_d = 12.88$$

Evaluando cortante del perno, todos los pernos activos, en el caso que las roscas de los pernos no se extiendan en los planos del cortante.

$$\tau = \frac{F}{4\pi \frac{d^2}{4}}$$

$$\tau = 832.90 \text{ psi}$$

Factor de seguridad:

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

$$n_d = 58.88$$

Cortante del borde del elemento en 4 pernos del margen.

$$\tau = \frac{F}{4at}$$

Esfuerzo en el caso una de la rosca de los pernos se extiende en uno de los planos:

$$\tau = \frac{F}{4At}$$

$$\tau = \frac{1,022.12 \text{ N}}{4(0.8)(2.12)}$$

$$\tau = 150.66 \text{ psi}$$

Factor de seguridad:

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

el factor de seguridad es de 325.53

Cortante del borde del elemento en dos pernos del margen.

$$\tau = \frac{F}{4at}$$

donde

$$a = 5.789 \text{ in}(147.0625 \text{ mm})$$

$$t = 1.125$$

$$\tau = 39.23 \text{ psi}$$

Calculando el factor de seguridad,

$$n_d = \frac{0.577S_{yelem}}{\tau}$$

Factor de seguridad de 794.24

Calculó de la fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos.

$$\sigma = \frac{F}{(4 - 2(d))t}$$

$$\sigma = 394.1psi$$

Calculando factor de seguridad

$$n_d = \frac{S_{yelem}}{\sigma}$$

dando un factor de seguridad de 137

Calculando el factor de seguridad mediante la fluencia del elemento:

$$n_d = \frac{w_t S_{yelem}}{F}$$

Donde

$$w = 0.1875 \text{ in}(4.7625 \text{ mm})$$

$$n_d = 10.84$$

En la instalación de la chumacera, se observó que el proveedor de NTN suministra agujeros de 0.75 pulgadas. Sin embargo, el equipo estaría sobredimensionado si se usaran estos agujeros tal como están. Por lo tanto, se ha decidido utilizar un buje roscado para poder acoplar el perno de 0.625 pulgadas, el cual cumple con los factores de seguridad requeridos. Para el resto de los pernos, que desempeñan un papel puramente de sujeción y no como uniones permanentes, se calcula la precarga necesaria. Para determinar esta precarga, primero es esencial establecer la carga de prueba utilizando la siguiente ecuación.

$$F_i = 0.75 * A_t S_p$$

$$F_i = 0.75(0.226)(85000) = 14.4075 \text{ kibs}$$

Con la fuerza de precarga determinada, ya se puede calcular el par de torsión necesario para la instalación de la precarga:

$$T = KF_i d$$

En esta ecuación, se emplean el diámetro nominal, la magnitud de la precarga y el factor K o coeficiente de torque. Es relevante mencionar que este coeficiente puede variar en función de los distintos tipos de acabado del perno. Sin embargo, dado que en la mayoría de los casos esta información es limitada, se optó por utilizar un coeficiente estándar de 0.2, el cual es aplicable a la mayoría de los pernos.

$$T = 0.2(14.4075 \text{ kibs})(5/8) = 1.80 \text{ lbf pulg}$$

Considerando que se encontró ante una situación similar con los pernos utilizados en la tolva de salida, se considera la decisión de aplicar la misma precarga en este contexto. Asimismo, extender esta misma consideración a los pernos que desempeñan la función de conectar la carcasa con el separador.

6.6. Simulación de ANSYS

6.6.1. Cuchilla

Para realizar la simulación del comportamiento de la cuchilla, se empleará el software ANSYS. Se utilizó la fuerza de corte previamente calculada, que asciende a 1.930.00 N, con el propósito de determinar si los esfuerzos ejercidos sobre la cuchilla son seguros y no superan el límite de fluencia del acero D2. Durante la simulación, se ingresaron tanto la fuerza de corte como el momento de 193 Nm, los cuales son aplicados para llevar a cabo el corte del material y cortar 150 kg/h. Los valores presentados fueron calculados en la sección 6.5.2. Para el cilindro de la cuchilla, se ha decidido utilizar acero AISI 1018, una opción que contribuirá a disminuir los costos de fabricación de la cuchilla sin comprometer su rendimiento. Además, se evaluará minuciosamente la resistencia de los tornillos que se emplearán para unir la cuchilla de acero D2 al eje de AISI 1018. El material que brinda la casa del tornillo es de Acero Galvanizado. Estos tornillos, serán sometidos a rigurosas pruebas para asegurarse de que puedan soportar las condiciones de funcionamiento sin presentar fallos o debilidades.

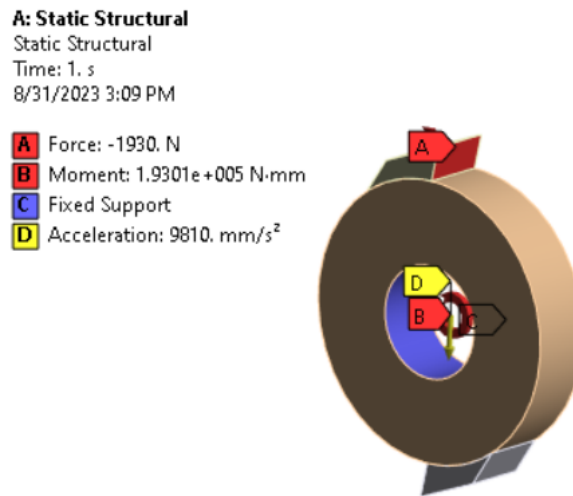
Las propiedades ingresadas en ANSYS de los materiales.

Cuadro 18: Propiedades de los materiales

Propiedad	AISI D2	Acero galvanizado	AISI 1018
Densidad	7,770 kgm^3	7,800 kgm^3	7,780 kgm^3
Modulo de elasticidad	190 Gpa	200 Gpa	200 Gpa
Relación de Poisson	0.28	0.29	0.29
Resistencia a la fluencia	470 Mpa	379 Mpa	370 Mpa
Resistencia último a la tensión	760 Mpa	475 Mpa	440 Mpa

Fuente: (Matweb, 2022)

Figura 24: Simulación de fuerzas en las cuchillas

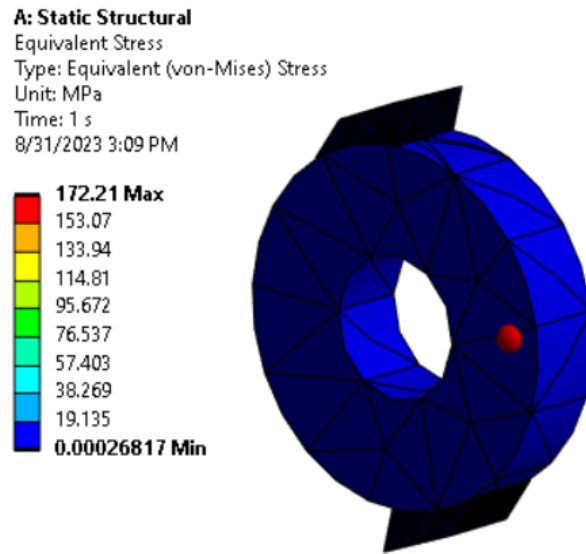


Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se instaló un soporte fijo en la zona de la cuña y en la unión con el eje. Se realizó una configuración de tamaño de malla (Mesh sizing) para lograr un valor de 0.23208 de asimetría (Skewness). Como se mencionó previamente, se aplicó un momento de 193 Nm y una fuerza de 1.930 kN en dirección hacia el filo.

Se realizó una evaluación *ANSYS Static Mechanical* y se calcularon los esfuerzos von Mises, que proporciona una simulación de un esfuerzo máximo en el tornillo de 172.21 MPa. Al evaluar este valor con el esfuerzo máximo de fluencia del acero AISI D2, que es de 440 MPa, se encuentra que:

Figura 25: Simulación de la cuchilla (von Mises)



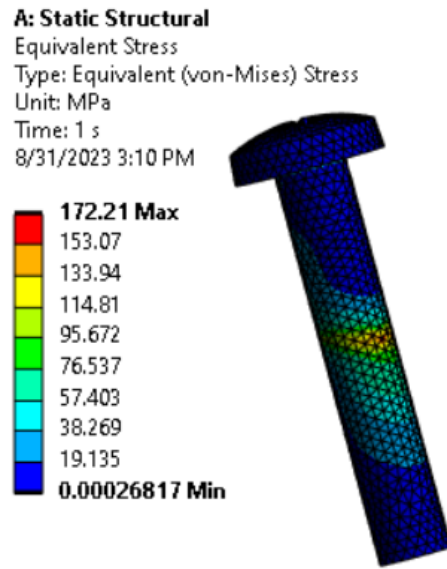
Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Para evaluar el factor de seguridad de las piezas, se ha utilizado ANSYS, una herramienta que permite realizar análisis de esfuerzos. Específicamente, se ha empleado el Stress Tool para evaluar el factor de seguridad en toda la pieza y determinar los puntos críticos. Se utilizó el teorema en ANSYS *Static Structural* de *Max Equivalent Stress* es la máxima tensión equivalente o máximo esfuerzo equivalente en un material. Es una medida de la máxima tensión que experimenta un material en un punto específico bajo carga, ANSYS se basa en el principio de resistencia del material y la teoría de falla. Es útil para evaluar si una estructura cumple con los criterios de resistencia y seguridad, ya que proporciona una estimación de la máxima tensión a la que está sometido el material. Si esta tensión equivalente supera la resistencia del material, podría producirse una falla. Por lo tanto, es una herramienta importante en el análisis de tensiones.

En la figura presentada, se puede apreciar un factor de seguridad de 15 para la cuchilla. Es relevante destacar que ANSYS realiza cálculos únicamente hasta un límite máximo de 15 en términos de factor de seguridad. No obstante, esta información brinda la confianza necesaria para afirmar que la cuchilla cumple de manera satisfactoria con los requisitos para cortar las botellas PET, dado que su factor de seguridad supera ampliamente el umbral mínimo de 2.

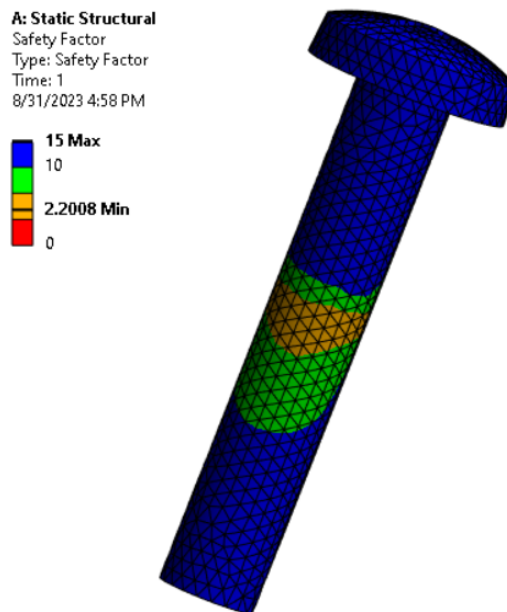
Además, al analizar el tornillo que une la cuchilla con su base, con el propósito de asegurar la posibilidad del intercambio de las cuchillas, se ha obtenido un factor de seguridad de 2.20. Esta cifra se considera adecuada y suficiente en términos de seguridad, permitiendo así afirmar que dicho tornillo cumple con los estándares necesarios.

Figura 26: Simulación de la cuchilla en el tornillo (von Mises)



Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 27: Simulación de la cuchilla (factor de seguridad) en el tornillo



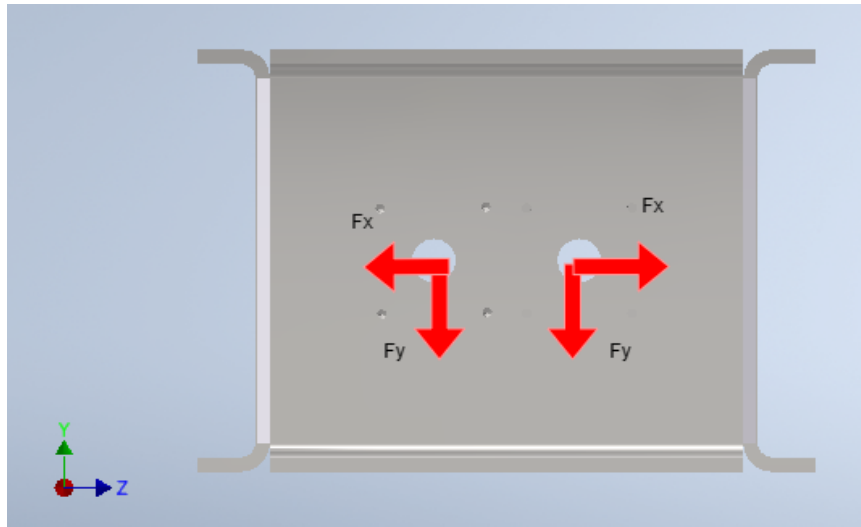
Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

6.6.2. Unión de soldadura

La evaluación de la soldadura y la selección del tipo de electrodo se llevo a cabo en la unión entre las dos piezas de la carcasa. Se considera que este punto de soldadura es el más crítico para la trituradora, ya que es donde se enfrenta a la fuerza ejercida por el eje. Por lo tanto, es fundamental realizar una soldadura adecuada en esta zona para garantizar la resistencia necesaria.

La fuerza que debe resistir la soldadura es la misma que tiene que soportar los rodamientos; los cuales son la reacción del eje al tener todo el peso de las cuchillas, separadores, engranajes, entre otros. Esta será una fuerza para el eje X de 4,721.84 N y para el eje Y de 3,229.02 N.

Figura 28: DCL carcasa



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, la distancia entre la esquina de la carcasa y el rodamiento será de 225 mm. Como es un proceso más complicado encontrar cual es el esfuerzo que generan las fuerzas sobre las uniones. Se utilizó el software de ANSYS para la simulación de los esfuerzo de von Mises en el punto de la soldadura de la carcasa.

El material seleccionado para la carcasa y la tolva de entrada es acero A36 por su bajo nivel de carbono lo que permite una buena maquinabilidad y buena soldabilidad. Así mismo como las fuerzas aplicadas sobre el material no se categorizan como altas, si presenta alta durabilidad y resistencia. Así mismo es un material encontrado en Guatemala, lo que ayuda a disminuir el costo de la fabricación.

Las propiedades ingresadas en ANSYS:

Cuadro 19: Propiedades de A36

Propiedad	Dimensión
Densidad	7,800 kgm^3
Módulo de elasticidad	200 Gpa
Relación de Poisson	0.26
Resistencia a la fluencia	250 Mpa
Resistencia última a la tensión	550 Mpa

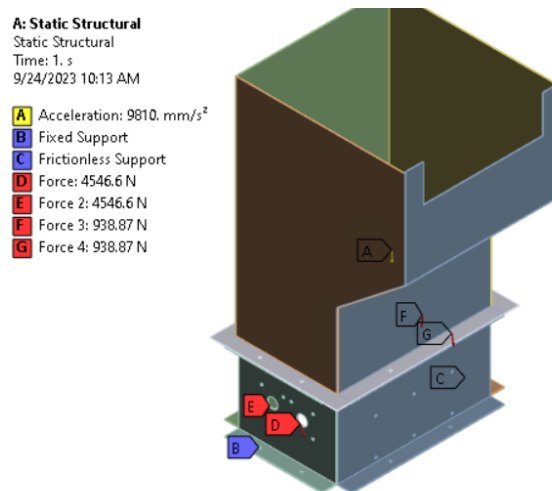
Fuente: (Matweb, 2022)

Para representar la unión soldada, se aplicó un contacto tipo *Bonded* en las superficies donde se encuentra el cordón de soldadura, es decir, entre las placas de acero A36.

Dado que la carcasa, sera atornillada hacia la base de soporte de la trituradora, se utilizó un contacto tipo *Frictionless* y solamente en los agujeros de los tornillos se utilizó un soporte tipo *Fixed Support*, dado a que los tornillos son los que sostienen la carcasa a la base de la máquina. La tolva de entrada, se unió a la carcasa por medio de contactos tipo *Bonded* dado que de esta sólo interesa el peso que genera sobre la carcasa ya que es esta última la que está siendo evaluada y de esta manera se simplifica la simulación. Para que ANSYS tome en cuenta el peso de los materiales mencionados anteriormente, es necesario agregar la aceleración de la gravedad, que es de $9.81m/s^2$, asegurándose de que esté dirigida hacia abajo en el eje Y. Se le ingresa el material A36.

Se le aplican las fuerzas a la carcasa, contemplando las dos fuerzas, radial y tangencial transmitidas por el eje.

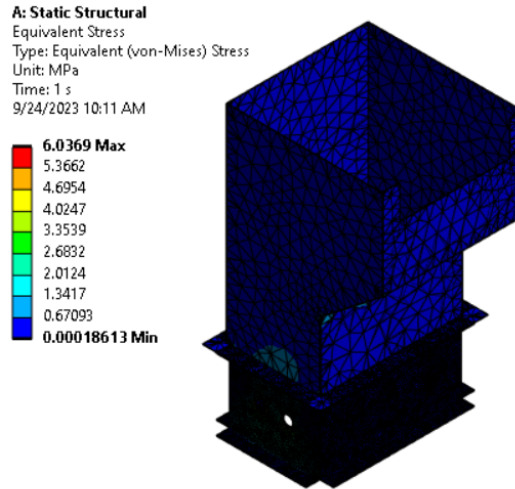
Figura 29: Aplicación de fuerza sobre la carcass



Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Se aplica en evaluación de esfuerzo de corte y esfuerzo de tensión, en cada una de las uniones donde se hará la soldadura, para el cálculo del factor de seguridad en el más crítico.

Figura 30: Esfuerzo de von Mises



Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Al evaluar los tres puntos más altos obtenidos por ANSYS, se determina que el valor máximo de esfuerzo del corte ejercido sobre una de las uniones a soldar es de 1.22 Mpa. Y el esfuerzo de tensión de von Mises en el área sobre una de las uniones a soldar es de 2.42 Mpa. Por lo que determina el factor de seguridad de corte y de la tensión y comparar los resultados.

Es necesario decidir qué tipo de electrodo utilizar, considerando que su resistencia a la fluencia debe ser mayor al esfuerzo calculado en las uniones y que este debe ser compatible con el material a soldar. Por lo tanto, se ha determinado utilizar un electrodo E60xx, el cual posee una resistencia a la fluencia de 345 Mpa. Se brinda que la garganta de la soldadura (h) es del espesor del material de 1/2 in. Se brinda una longitud de 500 mm.

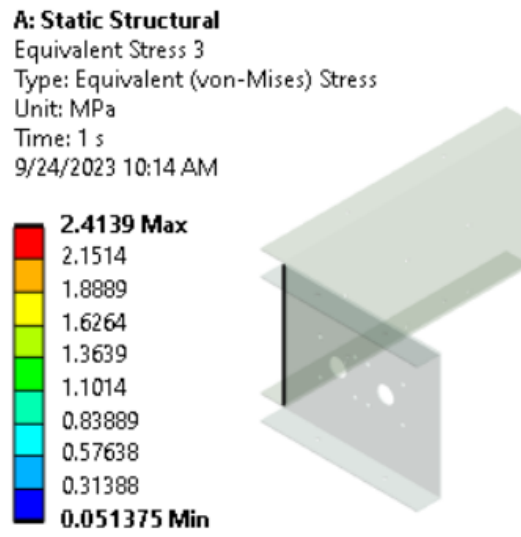
Al evaluar el factor de seguridad basado en la resistencia mínima y el criterio de energía de distorsión, se determina que el factor de seguridad,

$$n = \frac{S_{sy}}{\tau}$$

Factor de seguridad de la tensión:

$$n = \frac{0.4(345Mpa)}{2.42Mpa} = 57.02$$

Figura 31: Esfuerzo de von Mises soldadura

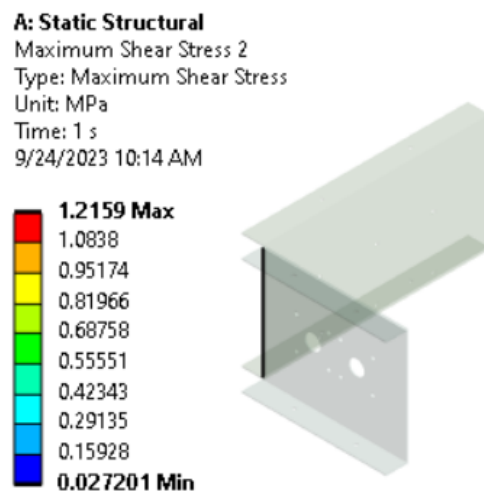


Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Factor de seguridad de corte:

$$n = \frac{0.4(345\text{Mpa})}{1.22\text{Mpa}} = 113.12$$

Figura 32: Esfuerzo de corte máximo



Fuente: Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Esto proporciona un factor de seguridad basado en el criterio de energía de distorsión de 57.02 y se encuentra un factor de seguridad máximo de corte de 113.12. Sin embargo, al evaluar el valor mínimo del factor de seguridad, este se ve influenciado por las tensiones generadas por las fuerzas sobre la carcasa.

La soldadura de las piezas de la trituradora, como la unión de las láminas de la tolva de entrada, la tolva de salida y la carcasa, se ha decidido implementar un electrodo E6013 debido a su versatilidad en términos de posiciones de soldadura, ya que es adecuado tanto para posiciones verticales como horizontales. Este electrodo es ampliamente reconocido por su capacidad para lograr una alta calidad de soldadura en aceros al carbono. El electrodo E6013 permite obtener una soldadura de alta calidad, caracterizada por buenas propiedades mecánicas y una apariencia estética que es fundamental para la trituradora. Este electrodo ha demostrado ser especialmente eficaz en la instalación de elevadores de las marcas Mitsubishi y Hosting en Guatemala debido a su consistente calidad y su capacidad para mantener las propiedades mecánicas requeridas.

Además, se realizará una soldadura con una profundidad de 1/4 in para garantizar una fuerza unitaria de 6.37 kip/in de soldadura. Esta medida asegura la resistencia necesaria en las uniones soldadas para garantizar un rendimiento óptimo de la trituradora.

7.1. Requisitos de diseño

Se llevará a cabo una evaluación para verificar si se han cumplido los requisitos detallados previamente. Los requisitos de diseño desempeñaron un papel fundamental en la selección de materiales, la definición de las dimensiones de las piezas y en garantizar el éxito del diseño para cumplir con la satisfacción deseada.

Cuadro 20: Requerimientos de diseño

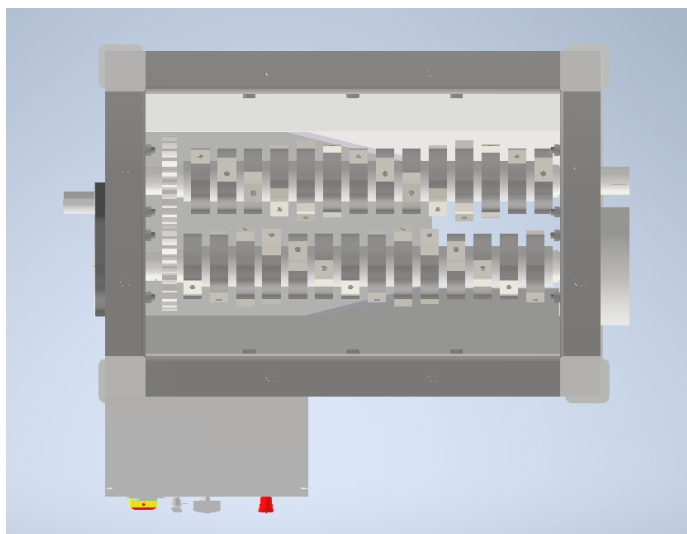
Código	Descripción	Cumple
D01	El dimensionamiento de la tolva de entrada debe tener un máximo de 1200 mm x 1100 mm.	✓
D02	Las cuchillas deben ser intercambiables.	✓
D03	La trituradora debe tener una capacidad mínima de 150 kg/h.	✓
D04	Debe cumplir con un mínimo factor de seguridad de 2.	✓
D05	La altura de la trituradora tendrá como mínimo de 3 metros, medida desde la tolva de entrada hasta el suelo.	✓
D06	La medida de la carcasa tendrá un ancho y largo como mínimo de 1000 mm x 550 mm.	✓

Cuadro 21: Requerimientos de diseño

Código	Descripción	Cumple
M01	El motor debe tener una potencia mínima de 10 hp.	✓
M02	La velocidad ajustable del rotor es entre 200 a 1760 rpm.	✓
M03	El motor debe tener conexión 208 voltios trifásico.	✓
MN01	Los materiales para la fabricación de la trituradora deben de ser adquiridos localmente en Guatemala.	✓
S01	Todos los protectores deben estar en condiciones de funcionamiento.	✓
S02	El diseño un botón de emergencia para parar la maquinaria por completo.	✓
S03	Manual de mantenimiento correcto de la maquinaria.	✓

7.2. Selección de diseño

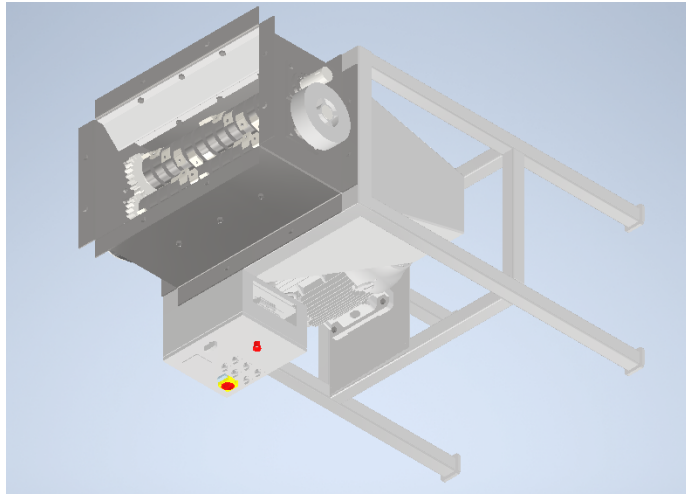
Figura 33: Imagen de triturador de dos ejes



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

Para la evaluación de la selección del tipo de trituradora, se optó por un diseño que consideraba a largo plazo. Se decidió seleccionar una trituradora de dos ejes con cuchillas intercambiables, ya que esta opción prometía reducir la necesidad de repuestos, minimizar los requerimientos de mantenimiento y prolongar la vida útil de los componentes.

Figura 34: Imagen de triturador de dos ejes



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

7.3. Cálculos

Se estableció que el factor de seguridad de la trituradora sería igual o mayor a 2.

Cuadro 22: Factor de seguridad

Pieza	Factor de seguridad
Engranaje	2
Eje	2.77
Cuña	2.12
Pernos	37.2
Cuchilla	15
Tornillo cuchilla	2.20
Soldadura	57.02

Fuente: Elaboración propia

7.3.1. Cálculo de corte de cuchillas

Se cálculo la fuerza, torque y velocidad necesarioa para cortar las botellas de PET. Se presentan los resultados,

Cuadro 23: Cálculo de fuerzas

Componente	Medida
Fuerza mínima de cuchillas	1.336 kN
Fuerza de cuchillas	1.93 kN
Torque	193 N-M
Velocidad angular	369.27 rpm

Fuente: Elaboración propia

Al evaluar la cantidad de botellas de PET que deben cortarse por segundo, se determinó que se necesitan procesar 2 botellas de 600 mL por segundo. Como resultado de este análisis, se determinó que se requiere una potencia de 10 hp, se utilizará un motor de la marca WEG. con una velocidad nominal de 1,760 RPM y una conexión trifásica de 208 voltios. Es importante destacar que este motor está disponible localmente en Guatemala a través de la empresa Agencias Hamburguesas.

La elección del motor de 10 hp de la marca WEG condujo a la selección del variador de frecuencia de 15 hp de la marca Mitsubishi, que cumple con los requisitos necesarios para controlar la velocidad angular del motor de manera efectiva.

7.3.2. Poleas

Para la transmisión de potencia desde el motor hasta el eje, se optó por utilizar una polea de la marca Bando USA. Se presentan las medidas:

Cuadro 24: Poleas

Elementos	Medida
Polea motor	4.15 in
Polea eje	19.5 in
Faja	BX105

Fuente: Elaboración propia

Considerando las medidas que el proveedor local ICCAPROSA.

7.3.3. Engranajes rectos

Se diseñaron dos engranajes rectos para la transmisión de potencia.

Cuadro 25: Engranajes rectos

Propiedades	Medida
Ancho de cara	1.5
Paso diametral	3
Numero de dientes	24
Ángulo de presión	20
Diámetro de paso	8.00"

Fuente: Elaboración propia

A partir de las fuerzas radiales y tangenciales detalladas en la sección 7.5.5, y tomando en consideración los factores determinados en esa misma sección, se ha seleccionado el material adecuado para la fabricación de los engranajes rectos, serán de acero AISI 4340 con un tratamiento térmico con un templado en aceite a 800 grados Celsius o un AISI 3215 con una cementación a 950 grados Celsius. Esta elección se basa en la necesidad de cumplir con una resistencia a la flexión que supere los 13,513.03 psi, así como una resistencia al esfuerzo de picadura superior a 127,736.80 psi y el costo del material junto a la mano de obra.

7.3.4. Volante de inercia

Se presentan las medidas del volante de inercia:

Cuadro 26: Volante de inercia

Propiedades	Medida
Inercia teórico	0.44 $kg * m^2$
Inercia diseño	0.439 $kg * m^2$
Diámetro externo	140 mm
Diámetro interno	290 mm
Masa	33.88 kg

Fuente: Elaboración propia

7.3.5. Ejes

Para el diseño del eje, se realizaron los cálculos de las fuerzas que actuarán sobre esta pieza, como se detalla en las figuras 13 y 14, donde se muestran cada una de estas fuerzas en los diagramas de cuerpo libre. Las fuerzas que actúan sobre el eje incluyen la fuerza generada por la polea, las fuerzas radiales y tangenciales ejercidas por los engranajes, la fuerza ocasionada por el peso de las cuchillas y los separadores, la fuerza que la cuchilla

ejerce en el momento del corte y el peso propio del eje. Estas fuerzas se describen en detalle en la sección 7.5.6.

Con el cálculo de las fuerzas determinadas que generan cada componente, se determinaron las reacciones en los cojinetes:

Cuadro 27: Fuerzas

Fuerzas	Magnitud
A_y	-4,196.72 N
A_x	-1,749.05 N
E_y	-926.98 N
E_x	-148.95 N

Fuente: Elaboración propia

Se determinó una longitud de eje de 1,290 mm y, mediante el cálculo del teorema de Goodman, se determinó el diámetro del eje. En la sección de anexos (Planos de construcción y uso de la trituradora de Tereftalato de polietileno) se puede observar el diseño detallado del eje. Se estableció un diámetro de 70 mm para la primera longitud de 175 mm, donde se instalan los engranajes y la polea. Para la longitud de 940 mm, donde van las cuchillas y los separadores, se estableció un diámetro de 80 mm, y para los últimos 175 mm, se determinó un diámetro de 70 mm. El eje será fabricado de AISI 1018 maquinado en frío, y se ha calculado un factor de seguridad de 2.77.

7.3.6. Cojinetes

El cojinete seleccionado para su uso es de la marca NTN, se trata de un cojinete con soporte a pared, tipo rígido de bolas. El modelo del cojinete es el 6214 y se encuentra disponible en Agencias Hamburguesas bajo la referencia Chumaserá 214 70 mm NTN.

Cuadro 28: Cojinetes

Elementos	Dimensión
Vida útil	21,000 hrs
Diámetro interno	70 mm
Carga dinámica del cojinete	62.00 kN
Carga dinámica del diseño	35.03 kN

Fuente: Elaboración propia

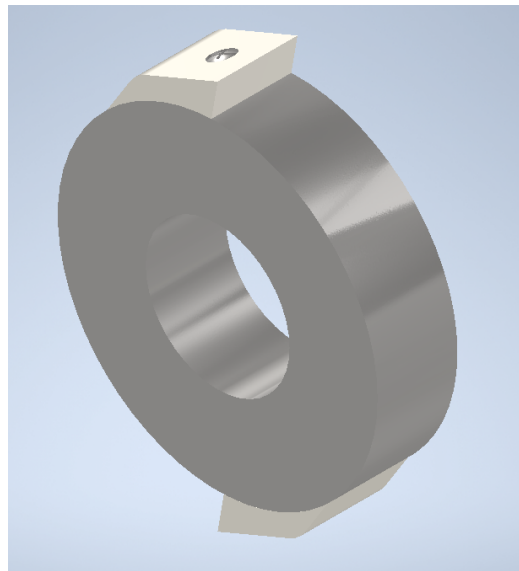
7.3.7. Cuñas

Se han seleccionado cuñas de soporte para las cuchillas, las cuales tienen un ancho de 1/8 de pulgada, un alto de 0.203 pulgadas y una longitud de 1/2 pulgadas. Para los engranajes rectos, polea y timón de inercia, las cuñas tienen un ancho de 1/8 de pulgada, un alto de 0.250 de pulgada y una longitud de 5/8 de pulgada. Estas cuñas están fabricadas en acero AISI 1018 maquinado en frío.

7.3.8. Cuchillas

La cuchilla será fabricada de dos materiales, el eje de unión será fabricado de AISI 1018 maquinado en frío y para la cuchilla intercambiable sera fabricada de acero D2. El diámetro del eje principal de la trituradora a la cuchilla sera de un diámetro de 200 mm. Para la cuchilla es con un alto de 20 mm como se observa en el plano, y el soporte de la cuchilla tendrá un diámetro de 180 mm. Para ambas piezas se tendrá un espesor de 45 mm. Se pueden observar los planos de manufactura en anexo (Planos de construcción y uso de la trituradora de Tereftalato de polietileno.)

Figura 35: Cuchilla



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

7.3.9. Soldadura de la carcasa

La soldadura necesaria para unir la carcasa y el resto de los componentes fue identificada como la más crítica debido a que la carcasa soporta las fuerzas de los ejes. Para esta soldadura, un espesor de 1/4 pulgada para la unión de la carcasa. Para el resto de elementos como la tolva de salida, tolva de entrada, estructura y la base del motor, el espesor de 3/16

de pulgada. Para la longitud, sera de tope a tope como se representa en el plano en anexo (Planos de construcción y uso de la trituradora de Tereftalato de polietileno). La soldadura se llevará a cabo utilizando un electrodo E6013.

7.3.10. Botón de emergencia

Para la selección del botón de emergencia, se seleccionó un tipo hongo. La función del botón tipo hongo esta diseñado para detener de manera inmediata una máquina, como funciona es que está normalmente cerrado y cuando se presiona se coloca en abierto para no permitir pasar la corriente hacia el motor. Para reactivarlo se debe girar y ya se coloca en normalmente cerrado. Este botón establece una conexión directa con el variador de frecuencia para poder controlar el mando de encendido o apagado. Su función principal es permitir que, en situaciones de emergencia, se pueda presionar el botón para detener por completo la maquinaria. Para la conexión el proveedor Ket Plus recomienda tener un cable calibre 12.

7.3.11. Presupuesto

Cuadro 29: Presupuesto

Elemento	Descripción	Cant	Precio C/U	Precio total
Motor eléctrico	10 hp 60 hz 1760 rpm WEG	1	Q.7,450.00	Q.7,450.00
Banda	Bando USA BX105	3	Q.145.00	Q.435.00
Polea	Bando USA polea de 19.5"Tipo B	1	Q.1,750.00	Q.1,750.00
Engranaje	AISI 4340 230 mm,largo de 80 mm	1	Q.1,543.00	Q.1,543.00
Polea	Bando USA polea de 4.15"Tipo B	1	Q.400.00	Q.400.00
Acople motor	Acople motor polea Masterdrive	1	Q.460.00	Q.460.00
Separadores	AISI 1045 4"600 mm	1	Q.2,755.00	Q.2,755.00
Eje	AISI 1018 3 1/4"de 2.60 mts	1	Q.3,854.00	Q.3,854.00
Eje de cuchillas	AISI 1018 185 mm de 1.90 mts	1	Q.13,482.00	Q.13,482.00
Cuchillas	Acero D2 40 mm x 45 mm x 80 mm	56	Q.128.54	Q.7,198.24
Abrazadera	Abrazadera de 80 mm de acero inoxidable	2	Q.20.00	Q.40.00
Cuñas	Cuña rectangular de 1/8"x 1/2 5/8"	32	Q.69.91	Q.2,237.12
Perno	Perno Hexagonal - 5/8 2"	12	Q.37.67	Q.452.04
Perno	Perno Hexagonal - 5/8 1 3/4"	24	Q.36.52	Q.876.48
Perno	Perno Hexagonal - 5/8 1 1/2"	12	Q.35.62	Q.427.44

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 30: Presupuesto

Elemento	Descripción	Cant	Precio C/U	Precio total
Tornillos	Estufa cabeza redonda 1/4 1"	56	Q.2.89	Q.161.84
Tuercas	Tuerca Hexagonal 5/8"Grado 5	48	Q.8.96	Q.430.08
Tubo	Tubo cuadrado 3"x 3"x 3/16" de 6 metros.	2	Q.771.86	Q.1,543.72
Perfil	Perfil angular 3"x 3"x 3/16" de 6 metros.	1	Q.453.00	Q.453.00
Chumacera	Chumacera 6214 NTN	4	Q.950.00	Q.3,800.00
Láminas	Láminas A36 de 6'x20'x3/16"	3	Q.4,588.00	Q.13,764.00
Láminas	Láminas A36 de 4'x10'x1/4"	2	Q.2,023.63	Q.4,047.26
Criba	Criba de 3/4.espesor de 1/4"de 1.778 m x 1.219 m.	1	Q.2,362.50	Q.2,362.50
Timón de inercia	AISI 1018 290 mm	1	Q.971.00	Q.971.00
Variador de frecuencia	Mitsubishi 15 HP 208 V 3PH	1	Q.13,500.00	Q.13,500.00
Botón de emergencia		1	Q. 72.00	Q.72.00
Interruptor de encendido	Arrancador manual 63A	1	Q. 283.00	Q.283.00
Flipón automático	NXB-63 3 polos 63 Amperios	1	Q. 84.00	Q.84.00
Guarda motor	40-63 amperios CHINT	1	Q. 667.00	Q.667.00
Panel de control	Caja metálica de 600x400x250	1	Q. 711.00	Q.711.00
TOTAL				Q86,210.22

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del presupuesto de mano de obra, proporcionamos una estimación basada en la práctica común de los talleres en Guatemala. Por lo general, los talleres realizan una ponderación de cada máquina para aproximar el tiempo de manufactura y ofrecen un presupuesto una vez que se les entrega el material. Es importante destacar que esta estimación es aproximada y puede variar según los diferentes talleres. El cálculo se realizó con la colaboración Gustavo Pineda del taller de manufactura de la Universidad del Valle.

Para la fabricación de los ejes, se consideró el tiempo necesario para el torneado (reducción de diámetros), el fresado de las cuñas y las ranuras de los anillos de retención, el rectificado de los ejes, y el tiempo muerto durante la preparación del equipo, proyectado en 60 minutos. Este servicio tiene un costo que oscila entre Q. 1,800.00 y Q. 2,000.00 por cada unidad, y al maquinar 4 ejes, el costo total sería de Q. 8,000.00. Agregando el timón

de inercia que se le debe hacer un torneado y cada una de sus partes se estima un valor de Q. 3,500.00.

En cuanto a los separadores, el costo aproximado para cada unidad de separación es de Q. 45.00 a Q. 60.00, y al tener 28 separadores, el costo total asciende a Q. 1,680.00. Para la separación de cada soporte de la cuchilla, que implica el taladrado para los tornillos, se estima un costo unitario entre Q. 90.00 y Q. 125.00, con un costo total aproximado de Q. 3,360.00 para los 28 soportes de cuchilla.

Para los materiales más delicados y duros, los talleres comúnmente aplican esta fórmula para calcular un presupuesto:

$$\text{Precio final} = \text{Precio del material} \times 2 \times 30\% (\text{de ganancia})$$

En cuanto a las cuchillas D2, se cotizaron las plaquetas del material (40 mm x 45 mm x 80 mm) utilizando un cálculo que considera el precio del material, un margen de ganancia del 30 %, y un 50 % adicional del costo de la herramienta de corte. Este cálculo se aplicará tanto a las cuchillas como a los engranajes. El costo estimado para las 56 cuchillas es de Q. 28,073.15, y para los 2 engranajes es de Q. 6,017.70.

Para la tolva de entrada, tolva de salida y carcasa, el taller de Gustavo Pineda indicó un costo aproximado de Q. 10,000.00 por cada unidad para el corte de las láminas, soldadura y fresado. Considerando que se necesitan tres unidades, el costo total de fabricación sería de Q. 30,000.00, y se estima un tiempo de aproximadamente 15 días para completar el trabajo. Además, por cada doble se tiene un costo unitario entre Q. 20.00 y Q. 40.00, sumando un total de Q. 720.00 para los 18 dobles. Finalmente, la base de la trituradora tiene un costo aproximado de Q. 650.00.

Cuadro 31: Presupuesto

Elemento	Cantidad	Precio
Mano de obra (ejes)	4	8,000.00
Separadores	28	1,680.00
Timón de inercia	1	3,500.00
Soportes de cuchilla	28	3,360.00
Cuchillas D2	56	28,073.15
Engranajes	2	6,017.70
Tolvas y carcasa (3 unidades)	3	30,000.00
Dobles (18 unidades)	18	720.00
Base de la trituradora	1	650.00
Total		82,000.85

Fuente: Elaboración propia

Evaluando el material del engranaje, se puede observar que con un acero AISI 4340 el costo de mano de obra aumenta hasta Q. 6,017.70 más el material que cuesta Q.1,543.00. Por lo cual se hace el análisis del AISI 3215 con tratamiento térmico templado luego de

manufacturarlo. El precio del eje de 230 mm y un largo de 80 mm tiene un costo de Q 870.00, para el maquinado ya que es una herramienta de corte estándar se contemplan los Q. 1,800.00 del maquinado y el templado que varía entre los Q. 1,000-1,500.00. Esto daría un total de Q. 4,170.00. Por decisión se utilizará un acero AISI 3215 con un tratamiento térmico por Austenit.

Cuadro 32: Presupuesto

Elemento	cantidad	Precio
Mano de obra (ejes)	4	8,000.00
Separadores	28	1,680.00
Timón de inercia	1	3,500.00
Soportes de cuchilla	28	3,360.00
Cuchillas D2	56	28,073.15
Engranajes	2	3,300.00
Tolvas y carcasa (3 unidades)	3	30,000.00
Dobles (18 unidades)	18	720.00
Base de la trituradora	1	650.00
Total		79,283.15

Fuente: Elaboración propia

Presupuesto final

Cuadro 33: Presupuesto final

Elemento	Descripción	Cant	Precio C/U	Precio total
Motor eléctrico	10 hp 60 hz 1760 rpm WEG	1	Q.7,450.00	Q.7,450.00
Banda	Bando USA BX105	3	Q.145.00	Q.435.00
Polea	Bando USA polea de 19.5"Tipo B	1	Q.1,750.00	Q.1,750.00
Engranaje	AISI 3215 230 mm,largo de 80 mm	1	Q. 870.00	Q.870.00
Polea	Bando USA polea de 4.15"Tipo B	1	Q.400.00	Q.400.00
Acople motor	Acople motor polea Masterdrive	1	Q.460.00	Q.460.00
Separadores	AISI 1045 4"600 mm	1	Q.2,755.00	Q.2,755.00
Eje	AISI 1018 3 1/4"de 2.60 mts	1	Q.3,854.00	Q.3,854.00
Eje de cuchillas	AISI 1018 185 mm de 1.90 mts	1	Q.13,482.00	Q.13,482.00
Cuchillas	Acero D2 40 mm x 45 mm x 80 mm	56	Q.128.54	Q.7,198.24

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 34: Presupuesto

Elemento	Descripción	Cant	Precio C/U	Precio total
Abrazadera	Abrazadera de 80 mm de acero inoxidable	2	Q.20.00	Q.40.00
Cuñas	Cuña rectangular de 1/8"x 1/2"5/8"	32	Q.69.91	Q.2,237.12
Perno	Perno Hexagonal - 5/8 2"	12	Q.37.67	Q.452.04
Perno	Perno Hexagonal - 5/8 1 3/4"	24	Q.36.52	Q.876.48
Perno	Perno Hexagonal - 5/8 1 1/2"	12	Q.35.62	Q.427.44
Tornillos	Estufa cabeza redonda 1/4 1"	56	Q.2.89	Q.161.84
Tuercas	Tuerca Hexagonal 5/8"Grado 5	48	Q.8.96	Q.430.08
Tubo	Tubo cuadrado 3"x 3"x 3/16" de 6 metros.	2	Q.771.86	Q.1,543.72
Perfil	Perfil angular 3"x 3"x 3/16" de 6 metros.	1	Q.453.00	Q.453.00
Chumacera	Chumacera 6214 NTN	4	Q.950.00	Q.3,800.00
Láminas	Láminas A36 de 6'x20'x3/16"	3	Q.4,588.00	Q.13,764.00
Laminas	Láminas A36 de 4'x10'x1/4"	2	Q.2,023.63	Q.4,047.26
Criba	Criba de 3/4. ^{es} pesor de 1/4"de 1.778 m x 1.219 m.	1	Q.2,362.50	Q.2,362.50
Timón de inercia	AISI 1018 290 mm	1	Q.971.00	Q.971.00
Variador de frecuencia	Mitsubishi 15 HP 208 V 3PH	1	Q.13,500.00	Q.13,500.00
Botón de emergencia		1	Q.72.00	Q.72.00
Interruptor de encendido	Arrancador manual 63A	1	Q.283.00	Q.283.00
Flipón automático	NXB-63 3 polos 63 Amperios	1	Q.84.00	Q.84.00
Guardamotor	40-63 amperios CHINT	1	Q.667.00	Q.667.00
Panel de control	Caja metálica de 600x400x250	1	Q.711.00	Q.711.00
Materiales				Q85,537.22
Mano de obra				Q79,283.15
Total				Q164,820.37

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Al evaluar los requisitos de diseño en la sección correspondiente, se ha examinado detenidamente el requisito D01, el cual establece que la tolva de entrada debe tener un tamaño máximo de 1,200 mm x 1,100 mm para acomodar las botellas de PET de 600 mL. En concordancia con este requisito, el diseño final de la tolva se dimensionó en 1,130 mm x 1,020 mm. Esta medida asegura la conformidad con la necesidad de evitar un tamaño excesivo y, al mismo tiempo, garantizar que el diseño sea funcional.

En relación al requisito D02, que establece que las cuchillas deben ser intercambiables, se ha diseñado el mecanismo de manera que reduzca los costos de manufactura. Por ello, el eje se fabricó utilizando el acero AISI 1018, mientras que las cuchillas fueron elaboradas con acero D2. Las partes intercambiables, que son las fabricadas en acero D2, se acompañan de planos de manufactura y se fijan con tornillos allen para permitir su intercambiabilidad.

Respecto al requisito D03, el diseño se ha desarrollado de acuerdo con la capacidad establecida de 150 kg/h para la línea de reciclaje. Asimismo, para el requisito D04, todas las piezas han sido diseñadas con un factor de seguridad superior a 2, en consonancia con lo determinado en la metodología inicial.

En relación al requisito D05, la altura de la trituradora se ha estipulado en aproximadamente 3.86 m, superando así la altura mínima de 3 m que se definió. Por último, el requisito D06 se ha satisfecho con éxito mediante la adopción de una medida interna en la carcasa de 1,020 mm x 650 mm. Esta medida se ajusta adecuadamente a los requerimientos de tener dos ejes, 14 cuchillas, 14 separadores, engranajes, y las dos botellas que deben ser cortadas por segundo, dispuestas verticalmente.

Al analizar los requisitos de diseño para el mecanismo, es importante considerar el requisito M01, que establece que el motor debe tener una capacidad mínima de 10 hp. Se ha calculado que esta potencia es necesaria para garantizar que la trituradora pueda cortar 150

kg/h de manera efectiva. Se reconoce la posibilidad de utilizar motores de potencia superior si es necesario, sin embargo, por razones de costo, se ha seleccionado una potencia de 10 hp como mínimo en este proyecto. Se ha seleccionado el motor WEG 208 v 3ph, con una potencia de 10 hp y una velocidad nominal de 1,760 rpm. En relación al requisito M02, que se refiere a la velocidad del motor, se ha planificado la instalación de un variador de frecuencia en el sistema. Se recomienda que este variador tenga una potencia de 15 hp para garantizar un nivel de potencia adecuado, siguiendo las recomendaciones del proveedor de WEQ y Proelectric. El variador permitirá variar las revoluciones por minuto (rpm) entre un 30 por ciento menos y un 30 por ciento más, de acuerdo con lo programado para la trituradora. Esto significa que, al evaluar los valores del motor, se podrá ajustar la velocidad entre 1,225 rpm y 2,275 rpm.

Es importante destacar que al analizar el requisito de velocidad, que establece un rango de 200 RPM a 1,760 RPM, se identifica una desviación de este rango. Sin embargo, esta desviación se justifica por varias razones. Reducir las RPM a 200 resultaría en un aumento significativo del torque, lo que sería beneficioso para realizar cortes eficientes en materiales, pero también ralentizaría el proceso de trituración en caso se aumente el flujo masivo de la línea de reciclaje, lo que haría que la trituradora sea menos efectiva en términos de velocidad de procesamiento. Lo que se busca con la línea de reciclaje es aumentar el flujo másico, no disminuirlo. Además, en términos de costos, no se ha optado por la instalación de un reductor de velocidad que permitiría una mayor variación de frecuencia, a pesar de que esto habría aumentado el costo total del proyecto. Por último, en relación con el requisito M03, confirmamos que se dispone de un motor trifásico con una conexión de 208 voltios.

Al evaluar los requisitos de mantenimiento establecidos en MN01, es importante destacar que todos los materiales utilizados en el diseño y presentados en la propuesta están disponibles para su adquisición en Guatemala. Además, los componentes mecánicos, como el motor, los cojinetes y los tornillos, también pueden ser obtenidos localmente. Por lo tanto, se cumple satisfactoriamente con el requisito MN01 en relación a la disponibilidad y acceso a los materiales y componentes necesarios para el mantenimiento y manufactura del proyecto.

Al analizar los requisitos de seguridad, es fundamental atender al requisito S01, el cual estipula que todos los protectores deben encontrarse en óptimas condiciones de funcionamiento. Para asegurar el cumplimiento de este requisito, el diseño debe mantenerse en perfecto estado durante la manufactura y a lo largo del ciclo de mantenimiento, garantizando así la operatividad de los protectores en todo momento. En referencia al requisito S02, se ha incorporado un botón de emergencia en la trituradora, destinado a detener por completo la maquinaria en situaciones de emergencia. Para satisfacer el requisito S03, se han desarrollado tanto un manual de funcionamiento de la maquinaria como un manual de fabricación. Estos manuales han sido elaborados con el propósito de cumplir con los estándares de seguridad y proporcionar una guía exhaustiva sobre cómo operar y fabricar la maquinaria de manera segura y adecuada.

En el proceso de diseño del eje, se han evaluado diversos factores con el objetivo de determinar el valor crítico de fatiga, conocido como S_e , que se detalla exhaustivamente en la metodología. La selección de estos factores y la razón detrás de su elección se explican en profundidad para respaldar el valor resultante de 17,256 psi. Continuando con el proceso de diseño, se realizó un análisis de los puntos de concentración de esfuerzos ubicados en las posiciones C, D y E, ya que son los puntos donde se generan las mayores fuerzas y momentos

de flexión. En dichos puntos se encuentran cuñas, anillos de retención. Mediante el uso del software Autodesk Inventor®[®], se determinaron los valores máximos de momento de flexión alternante y torque medio en estos puntos. Cabe señalar que el momento medio y el torque alternante en estos puntos son nulos debido a la configuración del sistema. Dado que se aplican fuerzas en dos planos distintos, se calculó el momento resultante en cada uno de los puntos al considerar los momentos alternantes, el torque y el momento de flexión. En este contexto, se optó por utilizar el teorema de Goodman como un enfoque conservador en el diseño del eje. El motivo detrás de esta elección radica en que, al aplicar el teorema de Goodman, se garantiza que la vida útil del componente no se vea comprometida incluso bajo condiciones de carga variables. Este enfoque conservador se traduce en una mayor seguridad y durabilidad del diseño. El uso del teorema de Goodman ha influido en la selección de un eje con un diámetro de 70 mm en la parte más crítica del diseño, lo que resulta en un factor de seguridad de 2.77. Esta elección se basa en la consideración de un enfoque conservador que prioriza la seguridad y la fiabilidad del componente.

Para el diseño de las poleas, se llevó a cabo una revisión de proveedores locales en Guatemala con el objetivo de encontrar una solución de transmisión eficiente y económicamente viable. Se consideraron diversas marcas, entre las cuales se destacan Bando, Martin y Optibelt. Se realizó un análisis del dimensionamiento de las poleas y fajas con cada una de estas marcas para obtener una estimación presupuestaria precisa. En el caso de las marcas Martin y Optibelt, se encontró que las dimensiones de las poleas disponibles localmente no se ajustaban a los requisitos específicos del equipo, lo que requería la importación de dichos componentes. Sin embargo, al explorar la opción de Bando, se identificó una solución viable utilizando una correa modelo 3VX. Aunque inicialmente se consideraron poleas compatibles con este modelo no se encuentran muchos elementos en Guatemala, el proveedor local sugirió el uso de poleas tipo BX de la misma marca Bando. La principal diferencia radica en que las poleas BX están diseñadas para aplicaciones industriales que demandan mayor potencia y velocidad respecto a las 3VX. En el diseño, se contempló la posibilidad de utilizar un variador de frecuencia, lo que resultó funcional y cumplió con los requisitos, incluyendo una relación de poleas de 4.70. Esto se acercó significativamente a la relación de velocidad deseada, que iba desde 1,760 rpm hasta 369.27 rpm con una relación de 4.76. En base a estas consideraciones, el proveedor suministró dos poleas de 19.5 pulgadas y 4.15 pulgadas, junto con tres correas modelo BX105.

En lo que respecta al acople entre el motor y la polea, el motor tiene un diámetro de eje de 38 mm, y la polea de 4.15 pulgadas, que tiene una capacidad máxima de 30 mm, se cotizó un acople de la marca Master Drive. Este acople tiene la ventaja de poder ser maquinado para adaptarse a ejes de hasta 45 mm. Como parte de esta adaptación, se diseñó un eje para el acople al motor con un diámetro de 20 mm.

Para evaluar el factor de seguridad, se realiza una comparación con el criterio propuesto por Ullman. El factor de seguridad determinado por este enfoque se convierte en un punto de referencia crucial que se utiliza para contrastar los factores de seguridad calculados durante la fase de análisis teórico. Esta comparación permite evaluar si los valores calculados cumplen con las expectativas y criterios de diseño establecidos inicialmente. El factor de seguridad establecido por el teorema de Ullman es de 2.07. Al evaluar este factor de seguridad y verificar que es igual o mayor a 2, podemos concluir que el enfoque de Ullman proporciona una referencia precisa y confiable que se puede utilizar como guía en el diseño.

En cuanto al diseño de los engranajes, se determinó un factor de seguridad de 2, lo que cumple con los requisitos del proyecto en su conjunto. Sin embargo, no se aumentó más el factor de seguridad en relación con Ullman, ya que no era necesario, dado que el material seleccionado para el diseño, un acero carburizado, seguía cumpliendo con un factor mayor que el 2.07 establecido por Ullman. En el cálculo del eje, también se cumplió con el factor de seguridad establecido, que se fijó en 2.77. Para las cuñas, el factor de seguridad se presenta como 2.12. En el diseño de la cuchilla, se identificó que el tornillo sería la pieza que experimentaría la mayor deformación, pero aún así cumplió con un factor de seguridad de 2.20. En cuanto a la soldadura utilizada en el punto más crítico de la carcasa, se estableció un factor de seguridad de 57.02. El uso de un factor de seguridad como criterio de diseño y la capacidad de basarse en el valor establecido por Ullman permiten cumplir satisfactoriamente con las variables determinadas a lo largo del proceso de diseño, asegurando un diseño seguro y confiable.

En cuanto al diseño de los engranajes rectos, se evaluó la interferencia, que se refiere al contacto entre los perfiles de los dientes que no están conjugados. La interferencia ocurre cuando la punta del diente impulsor entra en contacto con el flanco del diente impulsado antes de que la parte involuta del diente impulsor entre en acción. Según lo presentado en la sección 7.5.5, se puede analizar que el número mínimo de dientes para evitar la interferencia entre el piñón y el engrane debe ser mayor a 12.3, por lo que se diseñaron los engranajes con 24 dientes. Se seleccionó un paso diametral de 3 pulgadas por diente como un valor de uso general, que se encuentra en literatura de referencia como Shigley y que varía entre 2 pulgadas por diente y 16 pulgadas por diente (Budynas et al., 2012). Con este paso diametral, se pudo calcular el diámetro de paso de 8.00 pulgadas. En cuanto al ángulo de presión, en el mercado se utilizan ángulos de presión de 20, 22.5 y 25 grados. Para este diseño, se optó por el estándar de 20 grados. Con estas determinaciones, se diseñaron los engranajes con una relación de 1 a 1, ya que se busca que tengan la misma velocidad angular entre el engrane y el piñón. Esto es esencial para lograr una eficiencia en el corte del material, así como para el funcionamiento adecuado de las 14 cuchillas por eje.

Tras tener en cuenta todas estas consideraciones de diseño y evaluando el presupuesto del material y mano de obra, se pudo determinar el material capaz de resistir los esfuerzos generados en los engranajes y tener un costo-beneficio. El material elegido para satisfacer los requisitos de diseño es el acero AISI 3215, sometido a un tratamiento térmico de cementación a 925 grados Celsius, un templado a 830 grados Celsius, seguido de un revenido a 180 grados Celsius. Para aumentar la dureza del material. Esta elección se ha realizado con el propósito de asegurar la durabilidad y resistencia necesaria para soportar las cargas y fuerzas que actuarán sobre los engranajes durante su funcionamiento. Aunque el material puede considerarse como sobredimensionado en términos del esfuerzo al contacto permisible, se ajusta perfectamente a las necesidades de diseño. No se trata de un sobredimensionamiento innecesario, sino de una elección que satisface plenamente los requisitos de diseño.

Para seleccionar al proveedor de los cojinetes, se llevó a cabo un análisis detallado que involucró la comparación de dos marcas destacadas: NTN y SKF. Se evaluaron varios factores, como el costo unitario de los cojinetes en el mercado guatemalteco. A pesar de la calidad reconocida de la marca SKF, se observó que sus costos eran significativamente más elevados en comparación con NTN. Una consideración adicional fue que el proveedor Agencias Hamburguesas en Guatemala suministraba ambas marcas, lo que permitió realizar una evaluación

de ambas opciones. Finalmente, se optó por la marca NTN debido a su mayor accesibilidad económica, lo que aseguraba una buena funcionalidad a un costo más razonable.

Para el diseño de las cuchillas, se llevó a cabo un proceso de consulta con el proveedor de trituradoras en China, WanrooTech. Durante esta consulta, se solicitó información sobre el costo unitario de las cuchillas. Se identificó que las cuchillas ofrecidas por este proveedor eran completamente fabricadas de acero D2 y se presentó una oferta de 520 dólares por paquete. Cada paquete contenía 4 cuchillas, por lo que se requerían 7 paquetes adicionales, además de los costos de importación y aduanas. Este proceso de consulta proporcionó una referencia de costo y permitió cumplir con el objetivo específico de utilizar materiales locales siempre que fuera posible. Para optimizar aún más el costo, se decidió dividir las cuchillas en dos piezas, utilizando acero AISI 1018 para el eje de soporte y acero D2 para la parte cortante. Esto aseguró que las cuchillas fueran intercambiables y permitió diseñarlas con un ángulo de corte de 10 grados y un espesor de 45 mm, según las especificaciones proporcionadas por el proveedor WanrooTech. Además, se realizaron cálculos para determinar la fuerza necesaria para cortar las botellas de PET, el torque requerido y la potencia necesaria del motor, todo con el objetivo de cumplir con la capacidad de corte de 150 kg/h de botellas de PET de 600 mL. (Wanrootech, 2022). Se llevó a cabo un análisis en ANSYS para garantizar que el diseño cumpliera con los requisitos de factor de seguridad y para evaluar si el tornillo que une las dos piezas podría soportar las fuerzas y el torque a los que estaría sometido. Análizando los resultados, se determinó que tanto la cuchilla como el eje de soporte tenían un factor de seguridad mayor a 15, lo que indicaba una gran margen de seguridad en su capacidad para resistir las cargas esperadas. ANSYS brinda que el tornillo que conecta las dos piezas, tenía un factor de seguridad de 2.20, como se mencionó anteriormente en la sección 8.3. Esto confirmó que el elemento era capaz de soportar las cargas a las que estaría sometido y cumpliendo con el requisito de tener cuchillas intercambiables.

Comparando con una trituradora de dos ejes fabricada en China por Wanrooetech que tiene una capacidad de 150 kg/h, se recibió una cotización con un precio FOB de 6,750 dólares. Al revisar los costos de importación desde China, se identificaron gastos que incluyen flete marítimo, gastos aduanales y transporte en Guatemala, que ascienden a 4,000 dólares. Sumando el Impuesto al Valor Agregado (IVA) a todos estos gastos, el precio total de la trituradora Wanrooetech sería de 11,480 dólares (equivalentes a 96,320 quetzales). Al examinar el costo de la materia prima en Guatemala para este diseño de trituradora se estimó un costo de 85,537.22 quetzales. Mas el costo aproximado de mano de obra que se considera como una referencia un aumento de 79,283.15 quetzales, lo cual da un total de 164,820.37 quetzales.

1. Se presenta el diseño de una trituradora de PET para procesar un flujo másico de 150 kg/h. Se puede aumentar el flujo másico, gracias a la incorporación de un variador de frecuencia que facilita el control y aumento de la velocidad de giro del equipo.
2. Se han presentado todos los componentes esenciales necesarios para lograr el funcionamiento de la trituradora de PET. Se ha presentado el diseño de los engranajes rectos, la cuchilla, los ejes, timon de inercia, los separadores, peines distanciadores, así como las tolvas de entrada y salida, junto con la carcasa de la trituradora. Se ha realizado la selección de cuñas, pernos, abrazaderas, cojinetes, criba, poleas y fajas. Cada uno de estos elementos se presenta con una descripción de su función y su contribución al proceso de trituración.
3. Se investigaron proveedores de materia prima localmente en Guatemala para la fabricación de la trituradora, buscando respaldo y calidad. Se diseñó cada componente y se hicieron los cálculos precisos para garantizar que la trituradora funcione de manera eficiente, y que este proyecto pueda contribuir a generar conciencia con el medio ambiente. Se presenta cada uno de los proveedores en el manual de planos de construcción de trituradora de Tereftalato de Polietileno en anexos.
4. Se presenta un funcionamiento seguro y eficiente para cada elemento diseñado con un factor de seguridad mayor o igual a 2 como se puede observar en la sección 7.3, en el cuadro 20: Factor de seguridad.
5. En el presupuesto que se presenta para la fabricación de la trituradora, se han detallado los costos estimados de cada uno de los materiales necesarios. Es importante tener en cuenta que estos precios son una referencia y pueden variar según el proveedor y las condiciones económicas, incluyendo la inflación en diferentes partes del mundo. Dicho presupuesto se puede observar en la sección 7.3.10, cuadro 26: Presupuesto.
6. Se incluyen los planos de fabricación y ensamblaje que respaldan el diseño propuesto para la trituradora de PET. Además, se ha desarrollado un manual de mantenimiento detallado que abarca los procedimientos de limpieza, revisión y sustitución de todos

los componentes esenciales de la trituradora. Se pueden observar los manuales y los planos en Anexos.

1. La implementación y diseño de pronósticos digitales son importantes para garantizar operaciones eficientes en el mantenimiento de la trituradora. A este sistema se le pueden implementar herramientas como software especializado, aplicaciones móviles o plataformas como excel o SAP para mantener registros detallados de las actividades de mantenimiento, planificar inspecciones periódicas e informar posibles fallas antes de que surjan. Esto no sólo aumentará la eficiencia operativa, sino que también proporcionará datos valiosos para la toma de decisiones y la gestión de recursos dentro de la línea de reciclaje.
2. Con el análisis de presupuesto es importante mantenerse actualizado con los proveedores locales y las tendencias de precios para garantizar una gestión eficiente del presupuesto y la adquisición oportuna de los materiales necesarios para la construcción de la trituradora. En caso se vea alterado el precio de los materiales, se recomienda hacer un análisis detallado de proveedores en el extranjero para comparar con proveedores locales.(Importante tomar en cuenta el costo de importación).
3. Diseñar y construir un circuito para conectar los elementos que se desean activar como: botones de emergencia, sistemas de automatización para toda la línea de reciclaje, sistemas de control de alimentación, sistema de almacenamiento de datos contemplando mantenimiento, alarmas, entre otros elementos eléctricos. Esto considerando las dimensiones de un panel de control y sus componentes.
4. En caso la línea de reciclaje sea utilizada como una máquina a nivel industrial, se aconseja la incorporación de un PLC (Controlador Lógico Programable) junto con sensores industriales, lo cual no solo optimizará el rendimiento, sino que también contribuirá a una mayor durabilidad de los componentes electrónicos.

- Aguirre, P. A., et al. (2018). *Diseño y construcción de un prototipo de trituradora de polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), y aluminio para la elaboración de material compuesto dentro de un proceso de supra-reciclaje* (B.S. thesis). Quito.
- Alfaro Aguire, R. D., Duque Lozano, J. J., & valdredama Badillo, J. J. (2020). Diseño de una transmisión de potencia por engranaje a través de la metodología de goodman para la identificación de secciones críticas en los componentes mecánicos.
- AS. (2022). El récord histórico de temperatura por provincia en España: ¿Dónde hace más calor?
- Bando USA, W. D. b. D. H. M. (s.f.). Home. Consultado el 1 de junio de 2023, desde <https://www.bandousa.com/>
- Bardales, P. (2016). El reciclaje en el Perú y el desarrollo sostenible.
- Beswick, J., Voskamp, A., vd Sanden, J., Verburgh, M., & Horton, S. (1993). Bearing material/treatment developments at the SKF engineering and research centre. En *Creative use of bearing steels*. ASTM International.
- Bolaños Zea, J. J. G. (2019). Reciclado de plástico PET.
- Budynas, R. G., Murrieta Murrieta, J. E., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, novena edición* (9a ed) [OCLC: 827776142]. McGraw-Hill Interamericana.
- Clevel Angulo, J. A., et al. (2020). Diseño de una trituradora de PET como herramienta de apoyo para las asignaturas de Ingeniería de UNICATÓLICA.
- Doulache, N., Khemici, M., Gourari, A., & Bendaoud, M. (2010). DSC study of polyethylene terephthalate's physical ageing. *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, 1-4.
- Freire Cárdenas, L. M., & González Mosquera, C. J. (2014). *Diseño y construcción de un equipo triturador de botellas plásticas tipo pet* (B.S. thesis). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
- Giraldo Montoya, J. R. (2011). Estudio de factibilidad para la creación de una empresa recicladora de plástico PET post-consumo en el municipio de La Virginia, Risaralda.

- Gómez Jimbo, E. F., & Pulluquitin Benavides, R. V. (2021). Diseño y construcción de una máquina trituradora automática de plásticos PET con capacidad de 15 KG/H.
- Hernández Moyano, J. L., Fonseca La Rotta, D., et al. (2017). Diseño de una trituradora de residuos sólidos tipo PET para la Fundación Alianza Forestal de Colombia ESP.
- Hidalgo Sánchez, D. A. (2020). Diseño de una maquina trituradora de plástico para la comunidad de Limoncocha, provincia de Sucumbios-Ecuador.
- Hunt, E. J., Zhang, C., Anzalone, N., & Pearce, J. M. (2015). Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 24-30.
- Industrial Quick Search. (2022).
- Lalama Ochoa, C. G., Navarrete Mosquera, A. L., et al. (2017). *Diseño de una máquina trituradora de neumáticos* (B.S. thesis). Espol.
- MACCAD. (2022). MACCAD. *TRITURADORAS DE RECICLAJE*.
- Manahuia. (2022). Molino triturador 80-150 kg/hr.
- Mansilla-Pérez, L., & Ruiz-Ruiz, M. (2009). Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster. *Ingeniería industrial*, (027), 123-137.
- Matweb. (2022). Matweb. *ACERO AISI D2*.
- Mayper. (2022). Mayper. *TRITURADORAS DE RECICLAJE*.
- Mendoza, E. Y. (2019). Diseño de un prototipo de máquina trituradora de botellas PET.
- Monteza Leiva, W. (2019). Diseño de una máquina trituradora de botellas plásticas de 100kg/h para optimizar su transporte y almacenamiento en la empresa recicladora planeta verde EIRL-Chiclayo.
- Moreno, L. A. (2019). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA RECOLECTORA Y TRITURADORA DE POLIETILÉN TEREFALATO (PET)*. (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Mott, L. (1995). Robert. Diseño de elementos de máquinas. México. Ed.
- NTN. (s.f.). Consultado el 27 de julio de 2023, desde <https://www.ntnglobal.com/en/index.html>
- Perilla-Tabares, C. J. (2017). *Estudio de alternativa al proceso de reciclaje del plástico PET en la Universidad Católica de Colombia*. Universidad Católica de Colombia.
- Quintana, J. G., & Rodriguez Mejia, J. D. (2010). *Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de polietileno tereftalato (PET), en la ciudad de Guayaquil* (B.S. thesis).
- Remsa. (2022). Botella de 600 mL plástico PET.
- Rodriguez, A. P., Infante, J. V., Moya, M. S., & Borrás, V. A. (2006). Estudio de las Condiciones Óptimas de Transformación para el Reciclado Mecánico del Polietileno tereftalato (PET). *Revista Cubana de Química*, 18(1), 314.
- Rodriguez, F. A. (2015). *Análisis de factibilidad económica financiera de una planta recicladora de polietileno (PET), en el cantón Santa Elena* (Tesis de maestría). Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Económicas.
- Sandoval, C. (2013). Diseño de los elementos de una trituradora de pet.
- SKF. (s.f.). Consultado el 1 de junio de 2023, desde <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings>
- Solimaq. (s.f.). Trituradoras serie mini - Doble eje.
- Taco, V., Gonzales, O., & Bonifaz, P. (2021). Diseño y construcción de una máquina trituradora y granuladora de plástico de baja densidad como una herramienta de reciclaje. *Ecuadorian Science Journal*, 5(3), 41-58.

Tournier, V., Topham, C., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., Kamionka, E., Desrousseaux, M.-L., Texier, H., Gavalda, S., et al. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216-219.

Ullman, D. G. (2010). The mechanical design process: Part 1.

Wanrooetech. (2022). Durable Waste Plastic Double Shaft Shredder Blade Knife.

Westcare. (2011).

CAPÍTULO 12

Anexos

CAPÍTULO 1

Manual de mantenimiento

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Manual de mantenimiento de trituradora de Tereftalato de
Polietileno**

Trabajo de graduación presentado por Adrián Calvo Quezada para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala, 2023

En este manual, se presenta una guía para llevar a cabo el mantenimiento preventivo de la trituradora de Polietileno Tereftalato (PET). El mantenimiento preventivo involucra la realización de actividades planificadas en equipos, maquinaria o sistemas con el objetivo de evitar fallos o problemas futuros y asegurar un funcionamiento óptimo y duradero de la trituradora. El enfoque principal del mantenimiento preventivo de esta trituradora es garantizar su óptimo rendimiento a lo largo del tiempo. Esto implica anticipar y prevenir posibles inconvenientes que puedan surgir en el futuro. Además de prolongar la vida útil de la máquina, este tipo de mantenimiento reduce significativamente los costos operativos y evita paros no planificados en la producción.

A lo largo de este manual, encontrará instrucciones sobre las actividades específicas que debe llevar a cabo para realizar un mantenimiento preventivo en cada una de las piezas. Estas actividades incluyen inspecciones visuales, lubricación, ajustes, limpieza y reemplazo de componentes desgastados.

1.1. Objetivos

1. Cumplir con un mantenimiento preventivo para la trituradora de Tereftalato de Polietileno.
2. Prolongar la vida útil de la trituradora.
3. Prevenir fallos en la trituradora.

1.2. Etapas

1.2.1. Transmisión de potencia

El mantenimiento de la transmisión de potencia se hará un mantenimiento preventivo y inspección para las partes como el motor, las poleas, las fajas y los engranajes.

Frecuencia: Cada 240 horas de operación

Materiales:

Se presentan los materiales principales para un mantenimiento preventivo:

Equipo de protección personal

- Casco de seguridad
- Gafas de seguridad
- Guantes de trabajo
- Botas de punta de acero.
- Uniformes como overoles

Herramientas

- Llaves fijas
- Martillo de hule
- Calibradores
- Destornilladores Phillips
- Llave de impacto
- Cinta métrica
- Vernier
- Aceite de engranajes mineral
- Lubricante de grafito para fajas de transmisión
- Medidor de vibración
- Trapos
- Cepillos
- Desengrasante

Cuadro I: Motor

Etapa	Descripción
Preparación y seguridad	Para garantizar la seguridad, es importante asegurarse de que el equipo esté apagado y desconectado de la fuente de energía antes de proceder. Además, se recomienda el uso de equipo de protección personal, como guantes, overol y gafas de seguridad.
Inspección visual	Realice una inspección visual del motor verificando si se tienen signos evidentes de desgaste, daño o contaminación, como grietas, mellas, corrosión o acumulación de suciedad.
Limpieza	Utilizar cepillos, paños limpios y un desengrasante suave para eliminar la suciedad y la grasa de las superficie del motor.
Medición de vibraciones	Revisión de las vibraciones del motor con herramientas como Fluke, generar un historial de la vibración y seguir recomendaciones del proveedor WEG.
Montar	Se vuelven a montar el motor, apretando los tornillos y tuercas de su base según las recomendaciones de torque.
Pruebas	Se realizan pruebas para asegurarse de que el motor funcione correctamente después del mantenimiento. Si escucha cualquier ruido anormal o vibración que pueda indicar problemas.
Registro y documentación	Se lleva un registro detallado de todas las actividades de mantenimiento, incluyendo las fechas, las acciones realizadas y cualquier problema detectado.
Puesta en marcha	Se vuelve a conectar el equipo a la fuente de energía y se realizan pruebas finales para confirmar que el motor funcione de manera adecuada y segura.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro II: Poleas y fajas

Etapa	Descripción
Preparación y seguridad	Para garantizar la seguridad, es importante asegurarse de que el equipo esté apagado y desconectado de la fuente de energía antes de proceder. Además, se recomienda el uso de equipo de protección personal, como guantes, overol y gafas de seguridad.
Inspección visual	Realice una inspección visual de las fajas y las poleas verificando si se tienen signos evidentes de desgaste.
Desmontar	Desmontar las fajas y poleas, para revisión más a detalle de desgaste.
Limpieza y lubricación	Utilizar cepillos, paños limpios y un desengrasante suave para eliminar la suciedad y la grasa que este acumulada sobre las fajas y poleas. Se debe colocar nuevamente el lubricante de grafito que recomienda el proveedor Bando.
Montar	Se vuelven a montar el las poleas y fajas luego de montar el motor.
Pruebas	Se realizan pruebas para asegurarse de que las fajas y las poleas funcione correctamente después del mantenimiento. Se escucha cualquier ruido anormal o vibración que pueda indicar problemas.
Registro y documentación	Se lleva un registro detallado de todas las actividades de mantenimiento, incluyendo las fechas, las acciones realizadas y cualquier problema detectado.
Puesta en marcha	Se vuelve a conectar el equipo a la fuente de energía y se realizan pruebas finales para confirmar que este funcionando bien la transmisión de potencia hacia el eje.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro III: Engranajes

Etapa	Descripción
Preparación y seguridad	Para garantizar la seguridad, es importante asegurarse de que el equipo esté apagado y desconectado de la fuente de energía antes de proceder. Además, se recomienda el uso de equipo de protección personal, como guantes, overol y gafas de seguridad.
Inspección visual	Inicie con una inspección visual de los engranajes para detectar signos evidentes de desgaste, daño o contaminación, como astillas, roturas o acumulación de suciedad y residuos. Verifique si hay desgaste anormal, picaduras, mellas o deformaciones..
Limpieza y lubricación	Limpiar los engranajes y la zona circundante para eliminar cualquier suciedad, grasa o contaminantes que puedan afectar su funcionamiento. Utilice herramientas adecuadas como desengrasantes. Posterior a la limpieza volver a lubricar ambos engranajes.
Reemplazo de engranajes desgastados	En el caso, los engranajes están seriamente desgastados o dañados, es necesario reemplazarlos con piezas nuevas. Asegúrese de que los nuevos engranajes sean compatibles con la trituradora.
Montar	Se vuelven a montar los engranajes que se irán a cambiar, este proceso hacerlo cuando se este haciendo el proceso de montaje de los ejes.
Pruebas	Se realizan pruebas para asegurarse de que los engranajes funcionen correctamente después del mantenimiento o montaje de nuevos. Se escuchan cualquier ruido anormal o vibración que pueda indicar problemas.
Registro y documentación	Se lleva un registro detallado de todas las actividades de mantenimiento, incluyendo las fechas, las acciones realizadas y cualquier problema detectado.
Puesta en marcha	Se vuelve a conectar el equipo a la fuente de energía y se realizan pruebas finales para confirmar que este funcionando bien los engranajes.

Fuente: Elaboración propia

1.2.2. Ejes y componentes

El mantenimiento que se debe hacer para los ejes, las cuchillas, abrazaderas, separadores y cojinetes. Se hará un mantenimiento preventivo y inspección adecuada.

Frecuencia: Cada 240 horas de operación

Materiales

Se presentan los materiales principales para un mantenimiento preventivo:

Equipo de protección personal

- Casco de seguridad
- Gafas de seguridad
- Guantes de trabajo
- Botas de punta de acero.
- Uniformes como overoles

Herramientas

- Llaves fijas
- Martillo de hule
- Calibradores
- Destornilladores Phillips
- Llaves allen
- Llave de torsión
- Aceite Lubricante Mobil 1
- Grasa para rodamientos NTN Y Extractor de rodamientos
- Llave de impacto
- Cinta métrica
- Vernier
- Medidor de vibración
- Trapos
- Cepillos
- Desengrasante

Cuadro IV: Ejes

Etapa	Descripción
Preparación y seguridad	Para garantizar la seguridad, es importante asegurarse de que el equipo esté apagado y desconectado de la fuente de energía antes de proceder. Además, se recomienda el uso de equipo de protección personal, como guantes, overol y gafas de seguridad.
Inspección visual	Realicé una inspección visual de los ejes, cojinetes, separadores y cuñas, verificando la presencia de signos evidentes de desgaste, daños o contaminación. Estos signos pueden incluir grietas, muescas, corrosión o acumulación de suciedad. Haga una inspección visual del soporte del cojinete y el cojinete para detectar signos evidentes de desgaste, daño o contaminación. Busque indicios de fugas de lubricante.
Desmontaje	Desmontar las cuchillas con destornillador Phillips. Desmontar los peines distanciadores. Desmontar las abrazaderas . Desmontaje de las chumaceras con las herramientas de NTN.
Inspección cuchillas	Realice una inspección más detallada. Verifique si hay desgaste excesivo, grietas, corrosión o desalineación de los rodillos o bolas. Mida las tolerancias según las especificaciones del fabricante NTN.
Inspección de peines distanciadores	Verificar si hay desgaste excesivo en las superficies de contacto, especialmente en los peines distanciadores. Reemplace cualquier componente que esté seriamente desgastado.
Limpieza	Utilizar cepillos, paños limpios y un desengrasante suave para eliminar la suciedad y la grasa de las superficie en los ejes, separadores, bases de cuchillas. Limpiar los peines distanciadores y las cuchillas revisar el filo. Aplicarle lubricante a las cuchillas y los ejes. Aplique el lubricante adecuado al cojinete según las especificaciones del fabricante. Asegúrese de que el lubricante esté distribuido uniformemente.
Reemplazo	En el caso las cuchillas están seriamente dañadas, desgastadas, se considera el reemplazo con cuchillas nuevas. En el caso, el cojinete está seriamente dañado o desgastado y no puede ser reparado, es necesario reemplazarlo con un cojinete nuevo. En el mismo caso que el cojinete ya tenga 21,000 hrs de uso o sea la inspección número 87.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro V: Ejes

Etapa	Descripción
Montar	Se vuelven a montar las cuchillas y los peines distanciadores luego de la limpieza de cada pieza. Apretar los tornillos y tuercas según las recomendaciones de torque. Montar las chumaceras con las herramientas de NTN y las recomendaciones del proveedor, apretar los tornillos con el torque recomendado.
Alineación del cojinete	Verifique la alineación del soporte del cojinete para garantizar un funcionamiento adecuado.
Puesta en marcha	Se vuelve a conectar el equipo a la fuente de energía y se realizan pruebas.
Medición de vibraciones	Revisión de las vibraciones sobre el eje y cojinetes con herramientas como Fluke, generar un historial de la vibración.
Pruebas	Se realizan pruebas para asegurarse de que las cuchillas funcionen correctamente después del mantenimiento. Se escuchan cualquier ruido anormal o vibración que pueda indicar problemas.
Registro y documentación	Se lleva un registro detallado de todas las actividades de mantenimiento, incluyendo las fechas, las acciones realizadas y cualquier problema detectado.

Fuente: Elaboración propia

1.2.3. Tolva de entrada, tolva de salida, carcasa y base

El mantenimiento de la tolva de entrada, tolva de salida, carcasa y peines distanciadores en una trituradora es crucial para garantizar un rendimiento eficiente y seguro de la máquina.

Frecuencia: Cada 240 horas de operación

Equipo de protección personal

- Casco de seguridad
- Gafas de seguridad
- Guantes de trabajo
- Botas de punta de acero.
- Uniformes como overoles

- Careta de soldadura
- Guantes de soldadura
- Protector de cuero

Herramientas

- Llaves fijas
- Martillo de hule
- Calibradores
- Destornilladores Phillips
- Llaves allen
- Llave de torsión
- Cinta métrica
- Vernier
- Electrodo E6013
- Soldador de arco eléctrico
- Amoladora angular con disco de corte
- Cincel
- Medidor de vibración
- Trapos
- Cepillos
- Desengrasante

Cuadro VI: Procedimiento de tolva de entrada, tolva de salida, carcasa y base

Etapa	Descripción
Preparación y seguridad	Para garantizar la seguridad, es importante asegurarse de que el equipo esté apagado y desconectado de la fuente de energía antes de proceder. Además, se recomienda el uso de equipo de protección personal, como guantes, overol y gafas de seguridad.
Inspección visual	Realicé una inspección visual de las tolvas, carcasa y base, verificando la presencia de signos evidentes de desgaste, daños o contaminación. Estos signos pueden incluir grietas, muescas, corrosión o acumulación de suciedad.
Desmontar	Desmontar los pernos que unen la carcasa, tolva de entrada, tolva de salida y base.
Inspección de tolvas, carcasa y base	Hacer una inspección detallada de la tolva de entrada, tolva de salida, y carcasa para detectar signos evidentes de desgaste, daño o acumulación de material dentro de los elementos ya desmontados.
Limpieza	Limpiar todas las superficies de la tolva de entrada, tolva de salida, y carcasa para eliminar cualquier acumulación de material, suciedad o grasa.
Soldadura	En caso de que se detecten piezas dañadas o la soldadura presente aberturas, se recomienda el uso de un amolador angular equipado con un disco de corte para eliminar la soldadura defectuosa, sustituir la pieza en cuestión y proceder a realizar una nueva soldadura utilizando un electrodo tipo E6013.
Ajustes y alineación	Asegúrese de que todas las partes estén correctamente ajustadas y alineadas. Esto es especialmente importante en las tolvas y peines para garantizar un flujo adecuado de material.
Montar	Para ensamblar la tolva de salida, colocarlas sobre la base y fija la carcasa junto con todos sus componentes. Emplea una llave de torsión para apretar los pernos que conectan estos elementos, aplicando el torque recomendado. Luego, instala la tolva de entrada sobre la carcasa y utiliza una llave de torsión para ajustar los pernos de acuerdo con el torque recomendado.
Puesta en marcha	Se vuelve a conectar el equipo a la fuente de energía y se realizan pruebas.

Fuente: Elaboración propia

Cuadro VII: Procedimiento de tolva de entrada, tolva de salida, carcasa y base

Etapa	Descripción
Medición de vibraciones	Revisión de las vibraciones sobre las tolvas y caracas con herramientas como Fluke, generar un historial de la vibración.
Registro y documentación	Se lleva un registro detallado de todas las actividades de mantenimiento, incluyendo las fechas, las acciones realizadas y cualquier problema detectado.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 1

Manual de uso

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Manual de uso de trituradora de Tereftalato de Polietileno

Trabajo de graduación presentado por Adrián Calvo Quezada para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala, 2023

1.1. Procedimiento

Se presenta una breve descripción de cómo se puede utilizar la trituradora:

1. Verificar que no exista residuos adentro de la trituradora.
2. Conectar el equipo al toma corrientes 208 voltios trifásico.
3. Subir el interruptor principal en el panel de control.

Figura I: Flipón principal



Fuente: Ket plus

4. Revisar que todos los elementos de la trituradora estén correctamente instalados. Este proceso pueden verificar el manual de mantenimiento y el de fabricación.
5. Revisar que el botón de emergencia este desactivado.

Figura II: Botón de emergencia



Fuente: Ket plus

6. Revisar el panel de control que todos los cables este correctamente conectados.
7. Revisar que el guarda motor este activado.

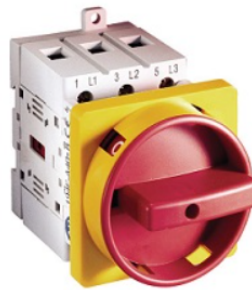
Figura III: Interruptor principal



Fuente: Ket plus

8. Girar el interruptor de arranque a encendido.

Figura IV: Interruptor de arranque



Fuente: Ket plus

9. Revisar la velocidad angular del variador de frecuencia del motor.

Figura V: Variador de frecuencia

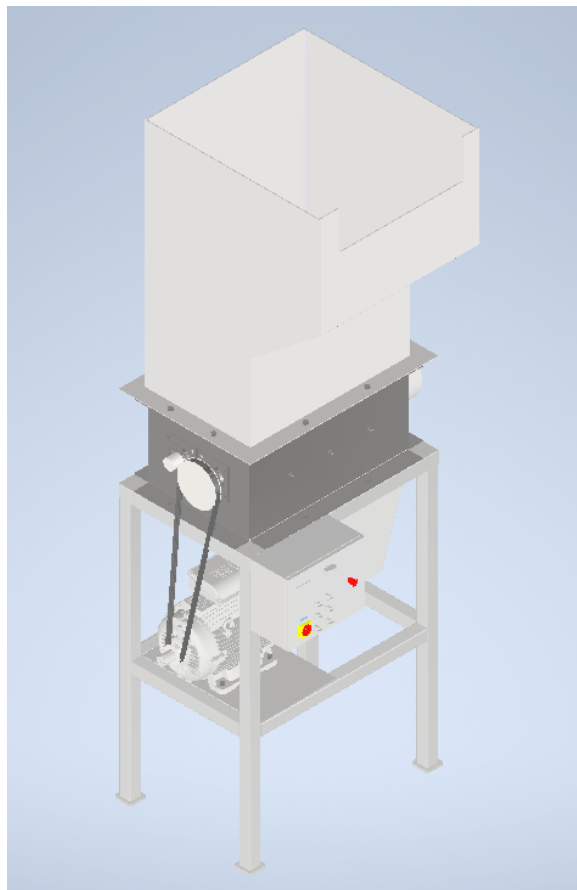


Fuente: Pro Electric

10. Colocar la velocidad angular en 369.27 rpm (6.1545 hz).
11. Revisar que las bandas transportadoras estén encendidas para recibir las botellas PET.
12. Revisar que los ejes estén funcionando correctamente.

13. Se recomienda hacer una prueba de cortar una botella de PET para verificar que todos los elementos estén funcionando correctamente.
14. Dar luz verde para empezar con la línea de reciclaje.
15. Tener un control de variador de frecuencia.
16. Al finalizar la trituración, apagar en el interruptor la trituradora.
17. Abrir el panel de control, bajar el interruptor principal y revisar que si se apague el variador de frecuencia.
18. Revisar dentro de la trituradora que no se quede material triturado o botellas PET.
19. Dar una limpieza superficial al equipo.
20. Desconectar la trituradora de la fuente de energía 208 voltios trifásico.

Figura VI: Trituradora final



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

CAPÍTULO 1

Planos de construcción

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Planos de construcción de trituradora de Tereftalato de
Polietileno**

Trabajo de graduación presentado por Adrián Calvo Quezada para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala, 2023

A continuación, se presenta el manual de fabricación diseñado para garantizar una manufactura precisa de la trituradora de polietileno terftalato. Este documento incluye información detallada sobre las herramientas esenciales y el equipo de seguridad necesario para una correcta manufactura, priorizando la seguridad del personal involucrado. Este manual proporciona planos de fabricación que describen las dimensiones de cada componente. Asimismo, se detallan los dobleces requeridos para ciertas láminas de acero, lo que facilitará la correcta construcción y montaje de la trituradora. Se presentan los materiales necesarios para la manufactura de la trituradora así como la cantidad de piezas que se requieren.

Este manual está diseñado para ser una guía completa que garantice la precisión y eficacia en la manufactura de la trituradora de Terftalato de Polietileno, de esta manera tener un funcionamiento óptimo y seguro del equipo.

1.1. Objetivos

1. Presentar planos de manufactura de la trituradora de Tereftalato de Polietileno.
2. Presentar el equipo personal que se necesita para la seguridad del operario.
3. Presentar las herramientas esenciales para la manufactura.
4. Presentar el manual de uso de la trituradora de Tereftalato de Polietileno.

1.2. Equipo personal

- Casco de seguridad
- Gafas de seguridad
- Guantes de trabajo
- Botas de punta de acero.
- Uniformes como overoles
- Careta de soldadura
- Guantes de soldadura
- Protector de cuero

1.3. Materiales

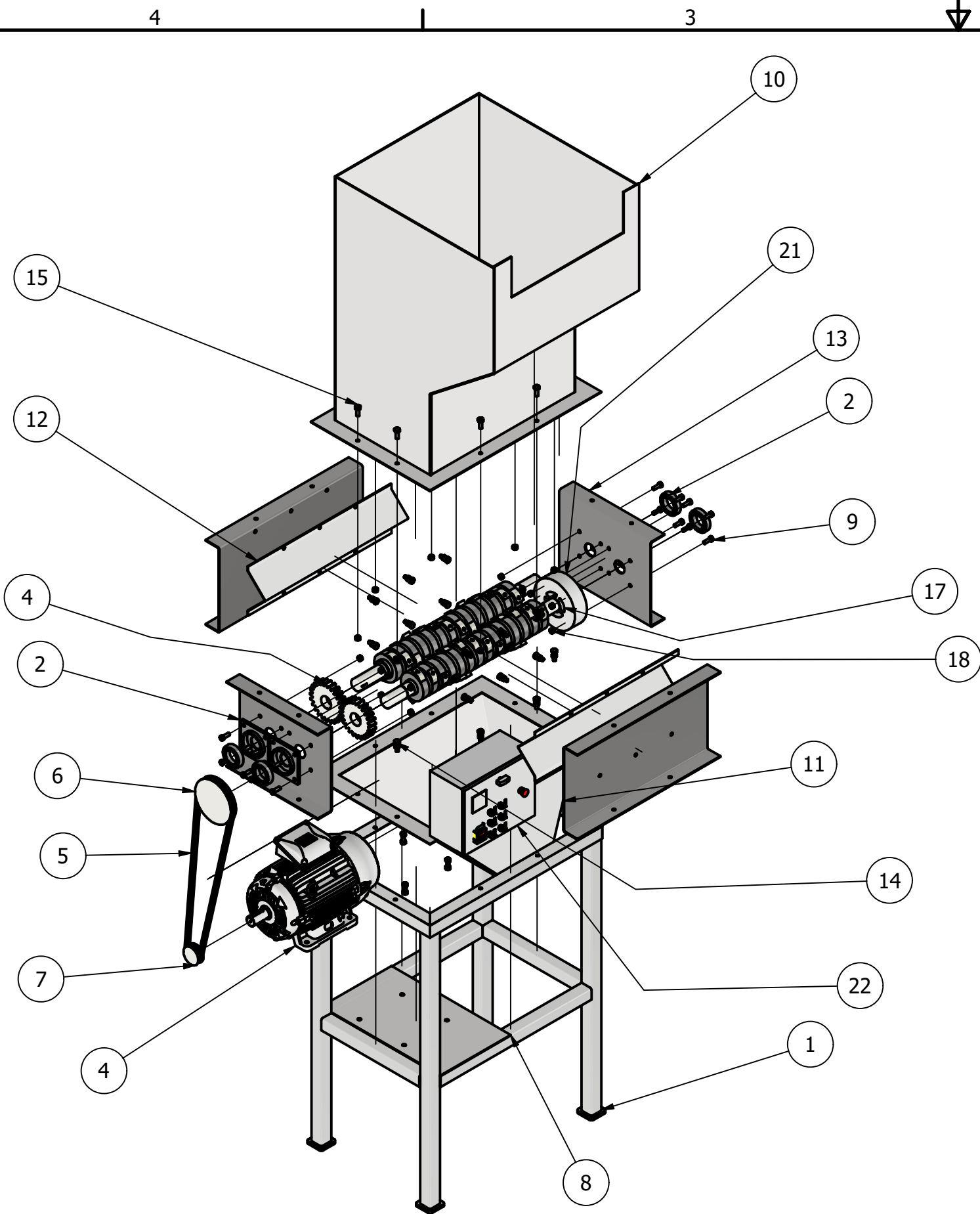
1. Estructura
2. Chumaseras 6214 NTN
3. Engranaje

4. Motor MTD 12.5 HP,1760 RPM WEG
5. V-Faja Bando BX105
6. Poleas diámetro de 4.15z 19.5"
7. Laminas de acero A36
8. Pernos Hexagonales - 5/8 x 1 3/4
9. Pernos Hexagonales - 5/8 x 2
10. Pernos Hexagonales - 5/8 x 1 1/2
11. Ejes de AISI 1018
12. Tuerca Hexagonal - 5/8
13. Cuña cuadrada de 3/8 x 3/8 x 1 1/4
14. Abrazadera de presión 3 1/4
15. Acople de motor Masterdrive
16. Criba
17. Variador de frecuencia 15 hp 3ph
18. Guarda motor CHINT
19. Interruptor principal CHINT
20. Botón de emergencia
21. Interruptor de encendido
22. Volante de inercia

1.4. Proveedores

1. Agencias Hamburguesas (Motor y chumaseras) - 4666-8715
2. INCAPROSA (Poleas, Fajas y Acople) - 2204-4111
3. ProElectric (Variador de frecuencia) - 2508-7918
4. Casa del tornillo (Tornillos, Pernos, Tuercas, y Cuña) - 5417-6008
5. Prosain (Criba, Ejes) - 2229-0707
6. Multi group (Láminas A36, Tubos, Perfiles) - 2320-5555
7. Euro Aceros (Ejes y acero D2) - 2244-3300
8. Novex (Abrazaderas) -2379-5200

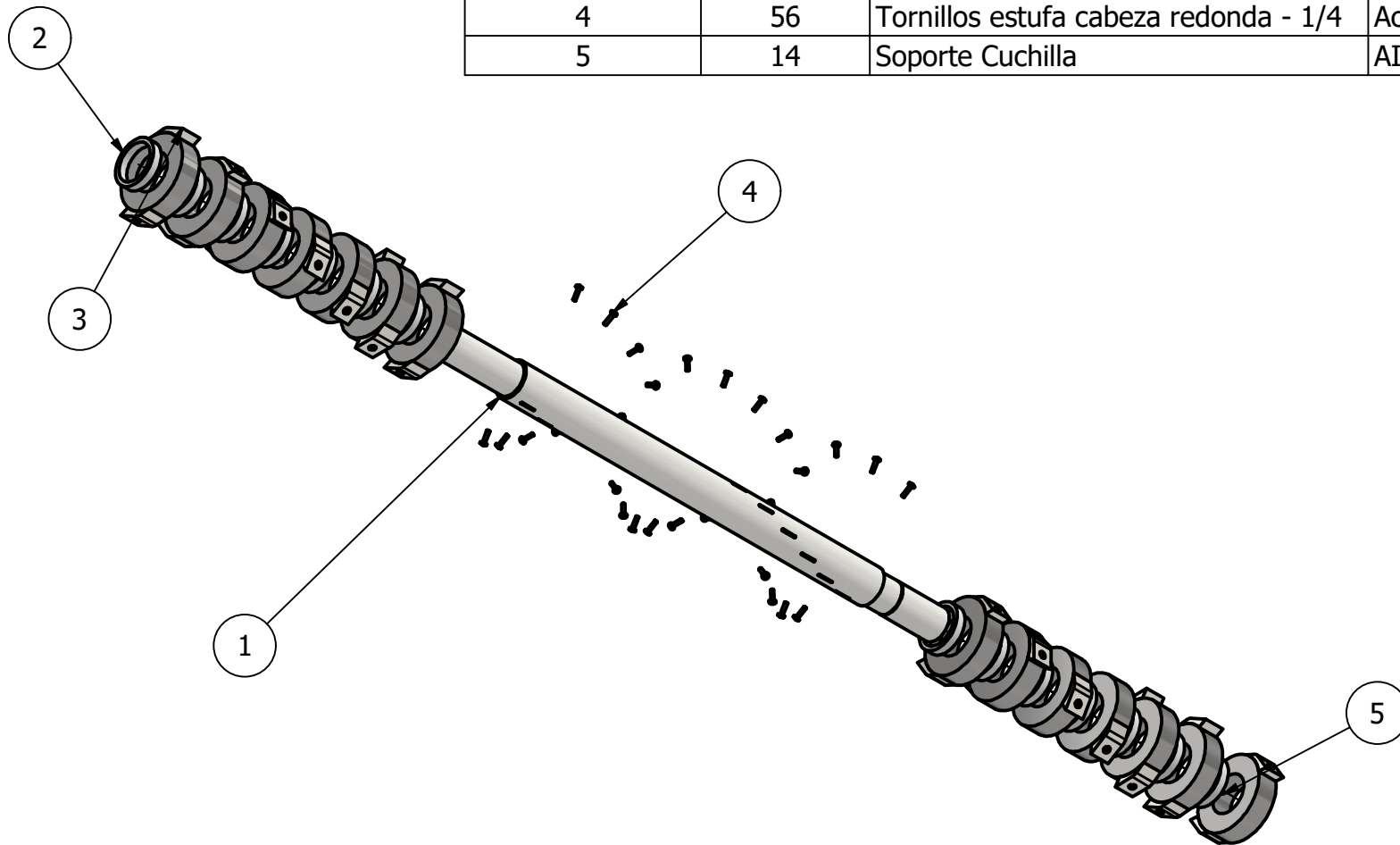
9. Ket plus (guarda motor, botón tipo hongo, botón de emergencia, interruptor principal)
- 4653-3435
10. Metales Industriales (Engranaje) - 2319-0909
11. Austenit (Tratamiento térmico) - 2472-4437



LISTADO DE PIEZAS			
NUMERO	CANTIDAD	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL
1	1	Estructura	Acero 1045
2	4	Chumacera 6214 NTN	
3	2	Engranaje	Acero AISI 3215
4	1	Motor MTD 15 HO, 1760 RPM WEG	
5	3	V-Faja Bando BX105	
6	1	Polea diametro 4.15	
7	1	Polea diametro 19.5	
8	1	Placa de soporte del motor	Acero A36
9	16	Perno Hexagonal - 5/8 x 1 3/4	Grado 5
10	1	Tolva de Entrada	Acero A36
11	1	Tolva de Salida	Acero A36
12	2	Espaciador PET	Acero A36
13	1	Carcasa-Trituradora PET	Acero A36
14	12	Perno Hexagonal - 5/8 - 2	Grado 5
15	20	Perno Hexagonal - 5/8 - 1 3/4	Grado 5
17	2	Eje con Cuchillas y separadores	Acero 1018 y acero D2
18	48	Tuerca Hexagonal- 5/8	Grado 5
19	30	Cuñas cuadradas de 3/8 in x 3/8 in x 1 1/4 in	AISI 1018
22	2	Abrazadera de presion 3 1/4	Acero inoxidable
23	1	Acople Masterdrive	
24	1	Criba de 3/4" espesor de 1/4" de 1.778 m x 1.219 m	Acero A36
21	1	Timon de inercia	AISI 1018
22	1	Panel de control (Variador de frecuencia, guarda motor, flipon principal)	

<p>TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.</p> <p>TOLERANCIAS GENERALES</p> <p>LINEAL .X ± 1.0 .XX ± .5 .XXX ± N/A</p> <p>ANGULAR ± 1°</p>	<p>DIBUJADO POR ADRIAN CALVO</p> <p>FECHA 31/07/23</p>	<p>UVG UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015</p> <p>DEL VALLE PBX: (502) 2634-0336 / 40 DE GUATEMALA Cal19744@uvg.edu.gt</p>
	<p>DISEÑADO POR ADRIAN CALVO</p> <p>FECHA 01/003/23</p>	
	<p>REVISADO POR R. HERRARTE</p> <p>FECHA 25/05/23</p>	
	<p>APROBADO POR R. HERRARTE</p> <p>FECHA 01/12/23</p>	
<p>MATERIAL VER LISTADO</p> <p>TRATAMIENTO VER LISTADO</p> <p>MASA: N/A</p>	<p>NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Trituradora de PET</p>	<p>TÍTULO: ENSAMBLE COMPLETO</p>
<p>TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN</p>	<p>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</p>	<p>NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A</p>
		<p>FORMATO B</p>
		<p>ESCALA: 1 : 2</p>
		<p>UNIDADES: mm</p>
		<p>PÁGINA 1 DE 28</p>
		<p>REV A</p>

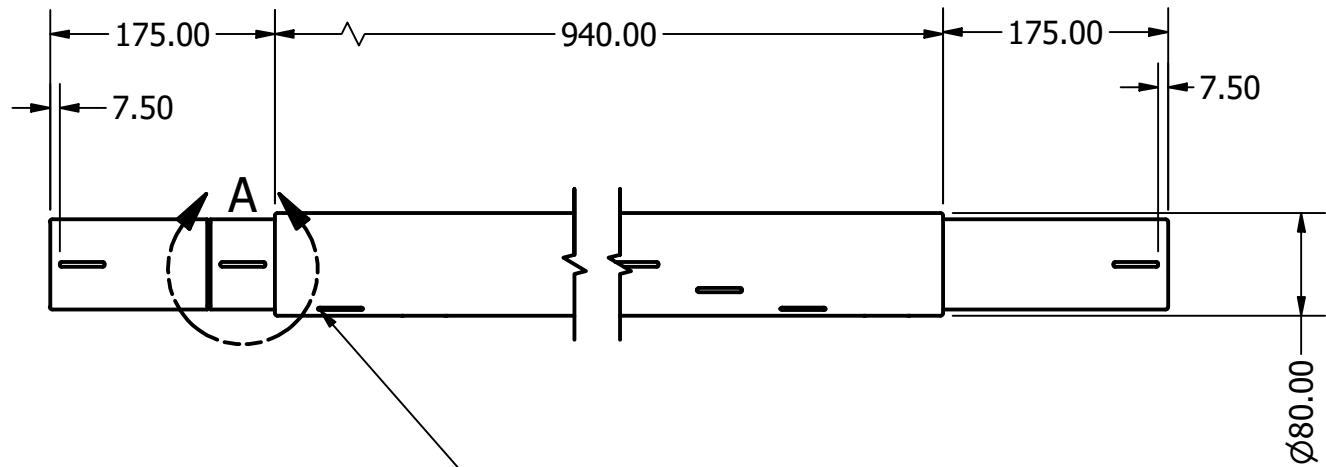
LISTADO DE PIEZAS			
NO.	CANTIDAD	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL
1	1	Eje de las cuchillas	AISI 1018
2	14	Separador	AISI 1018
4	14	Cuchilla	Acero D2
4	56	Tornillos estufa cabeza redonda - 1/4	Acero galvanizado
5	14	Soporte Cuchilla	AISI 1018



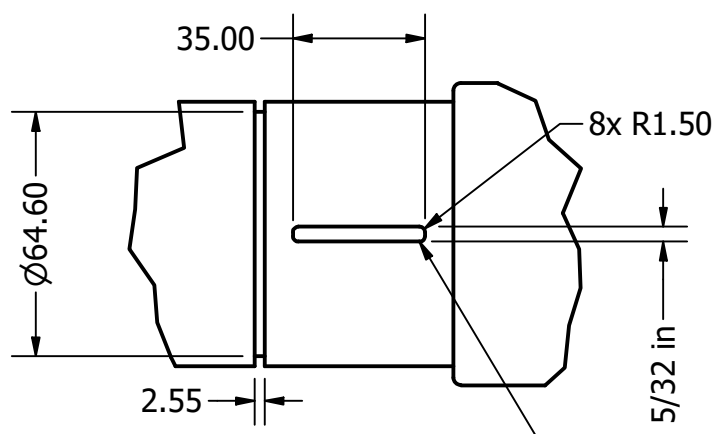
TÍTULO: Eje y cuchillas		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 1:8	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 2 DE 28	REV A

2

1

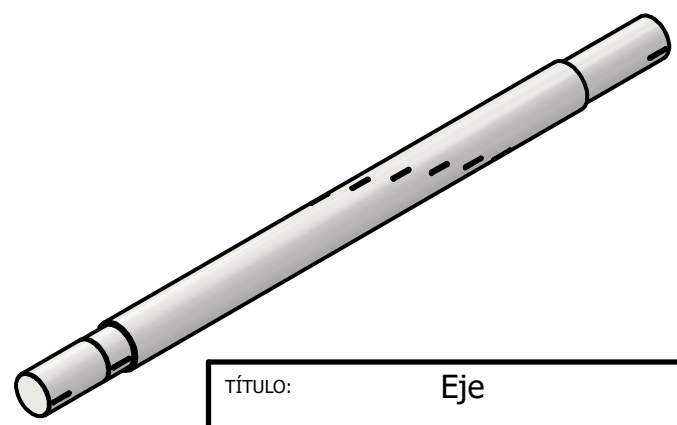


Se deben crear 14 cuñeros a una distancia de 30 mm entre cada uno y girados 20 grados con respecto al cuñero anterior.



DETALLE A
ESCALA 2:1

Profundidad de 0.3205 in, con un redondeo de 1.5 mm en cada esquina

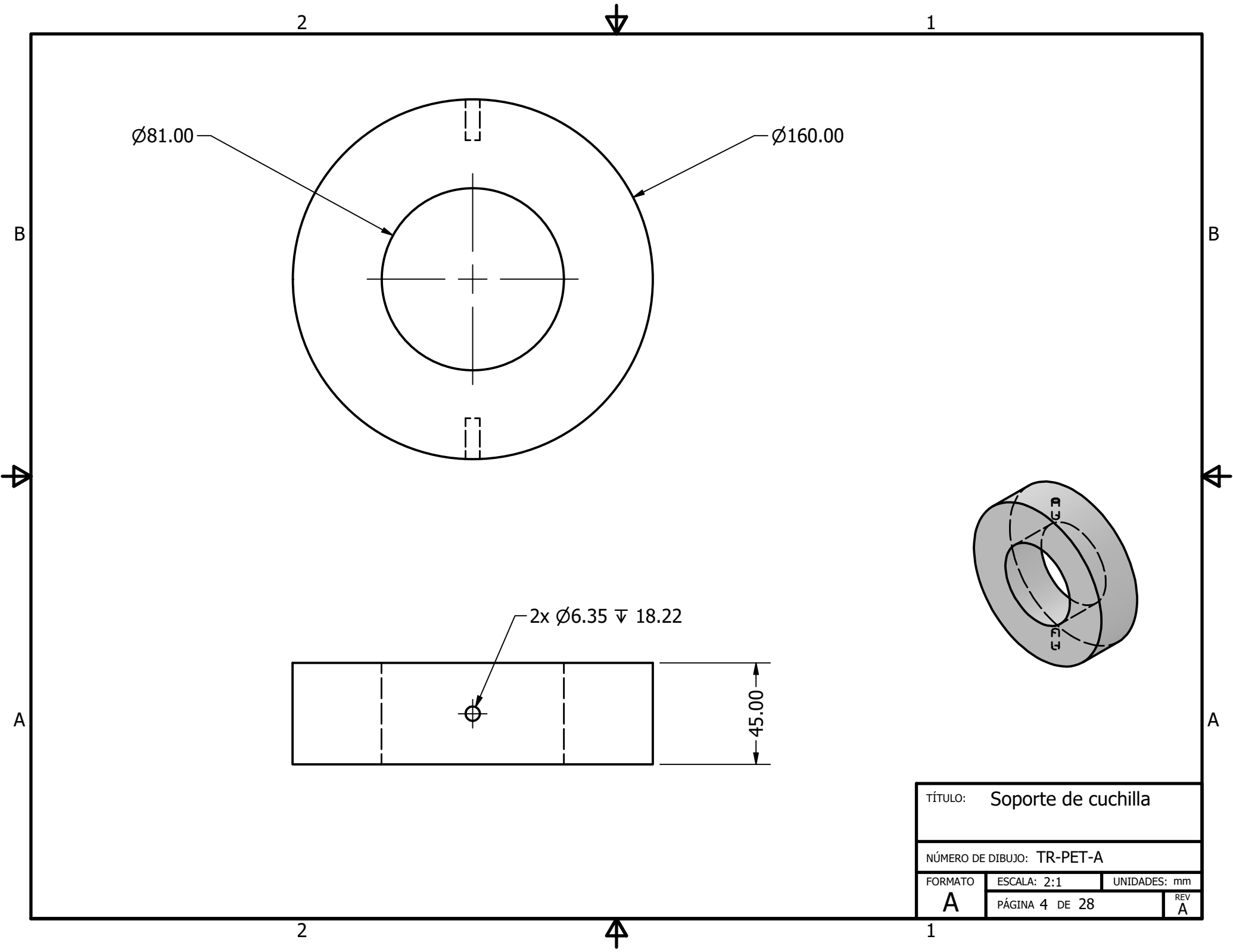


TÍTULO:		Eje	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 3 DE 28	REV A	

2

1





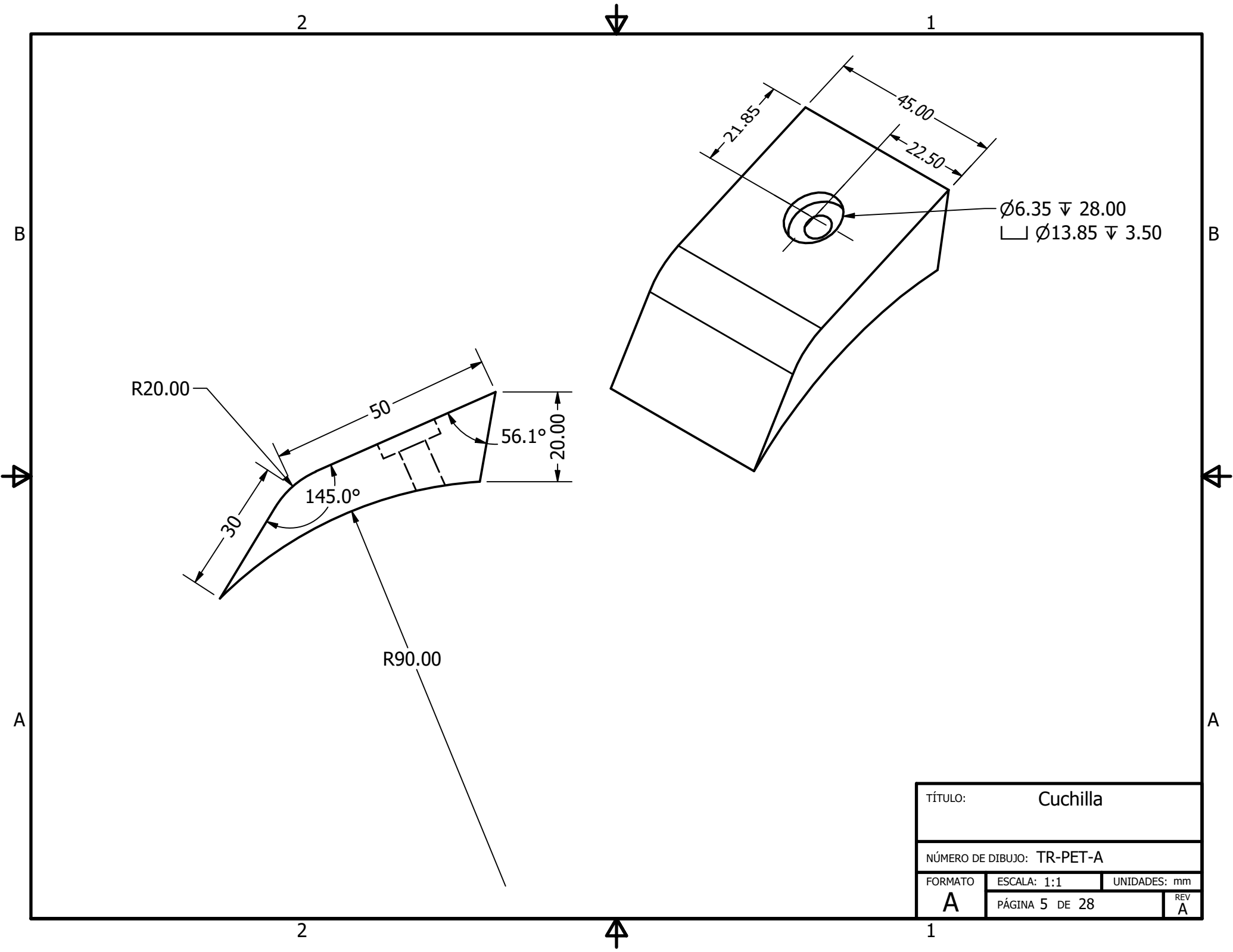
Ø81.00

Ø160.00

2x Ø6.35 ∇ 18.22

45.00

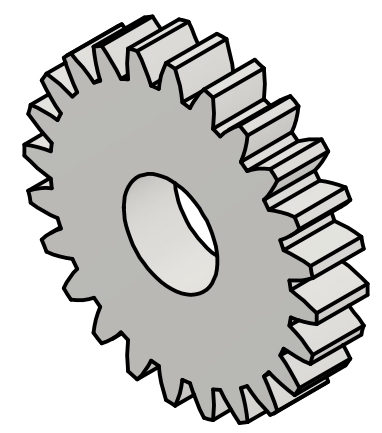
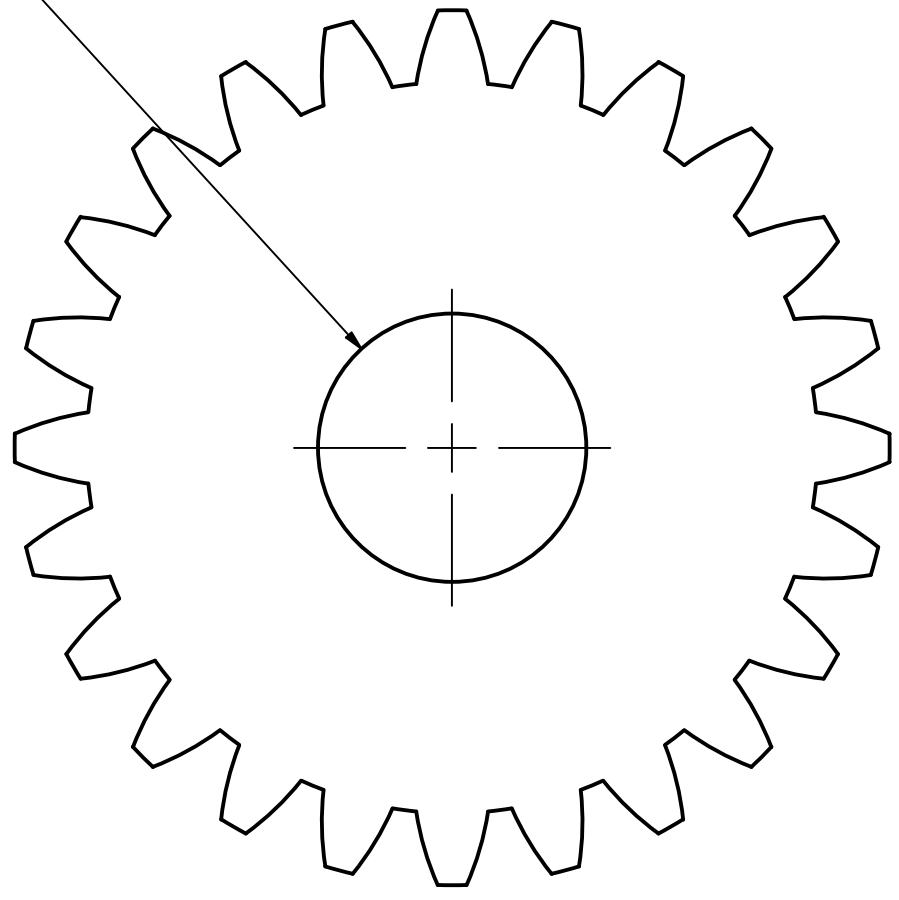
TÍTULO: Soporte de cuchilla			
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 2:1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 4 DE 28		REV A



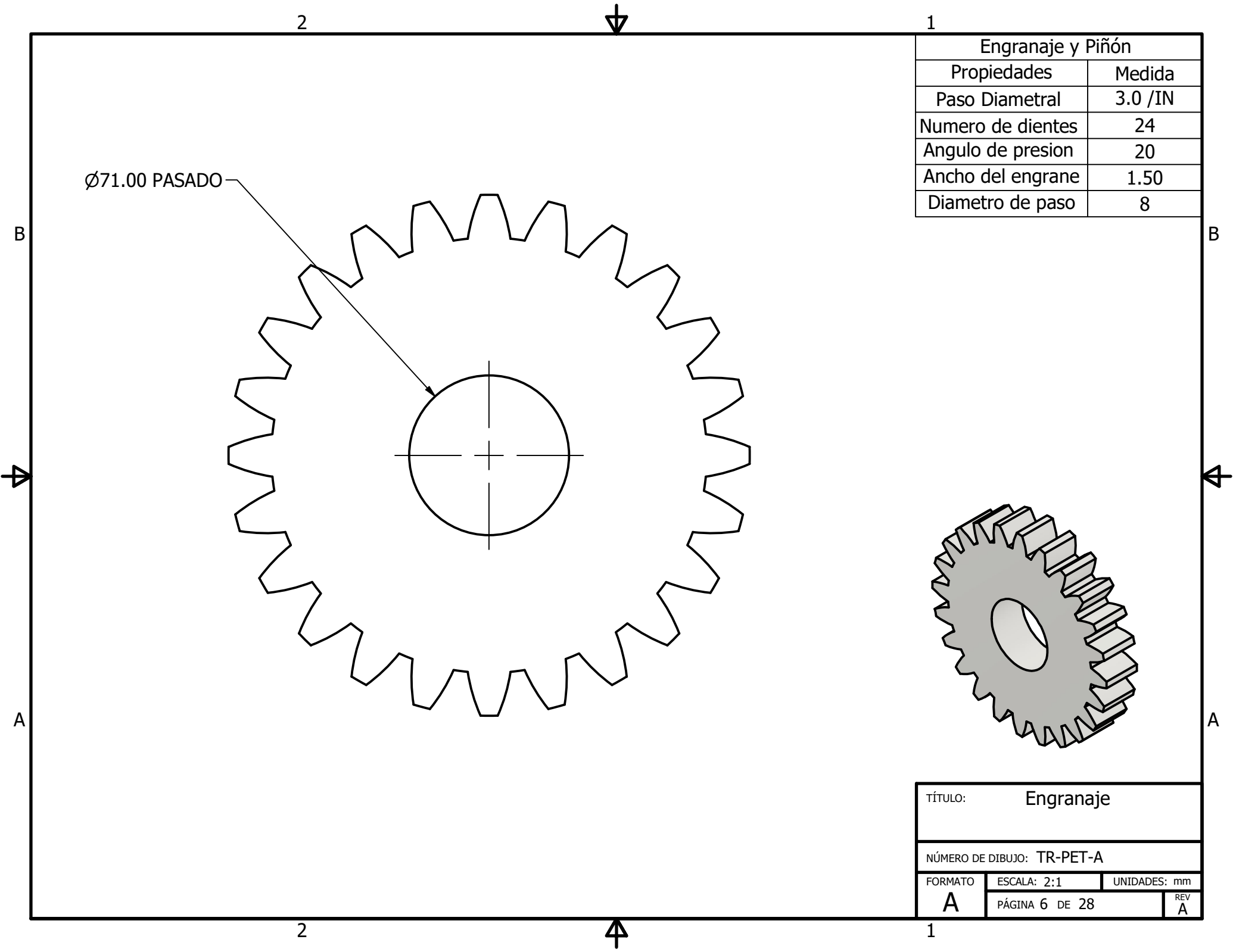
TÍTULO: Cuchilla		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 28	REV A

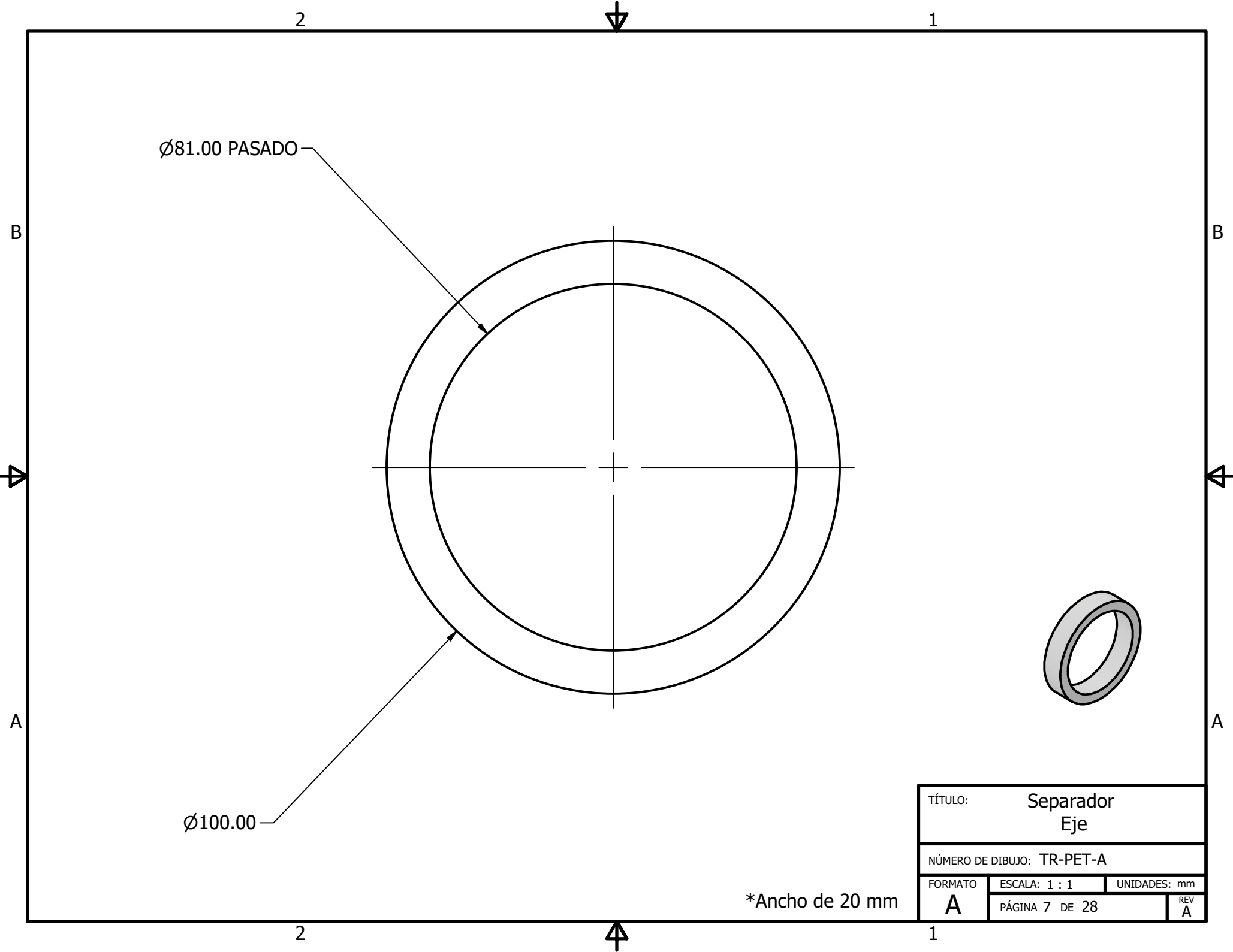
1	
Engranaje y Piñón	
Propiedades	Medida
Paso Diametral	3.0 /IN
Numero de dientes	24
Angulo de presion	20
Ancho del engrane	1.50
Diametro de paso	8

Ø71.00 PASADO



TÍTULO:		Engranaje	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 2:1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 6 DE 28		REV A



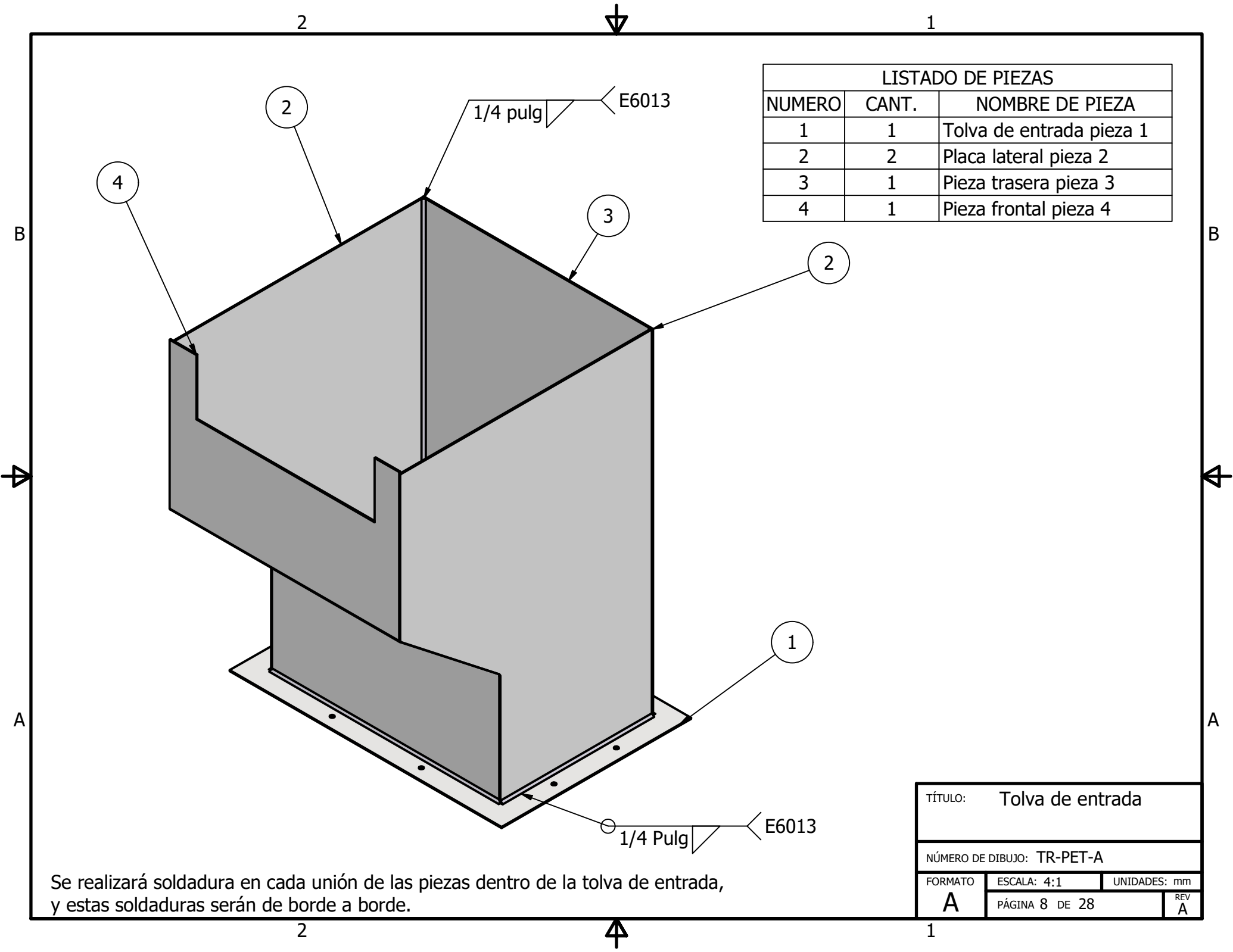


Ø81.00 PASADO

Ø100.00

*Ancho de 20 mm

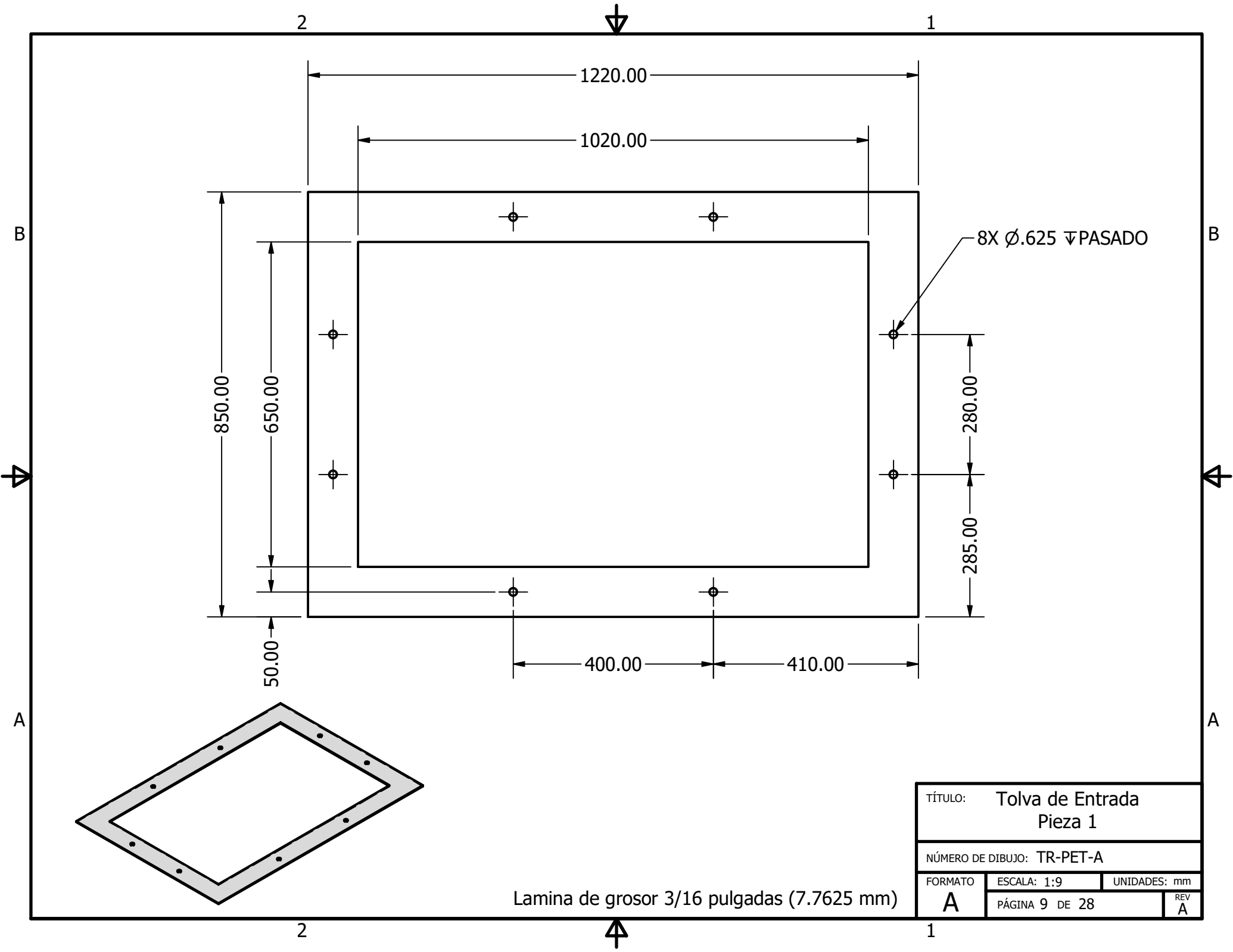
TÍTULO:		Separador Eje	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1 : 1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 7 DE 28		REV A



LISTADO DE PIEZAS		
NUMERO	CANT.	NOMBRE DE PIEZA
1	1	Tolva de entrada pieza 1
2	2	Placa lateral pieza 2
3	1	Pieza trasera pieza 3
4	1	Pieza frontal pieza 4

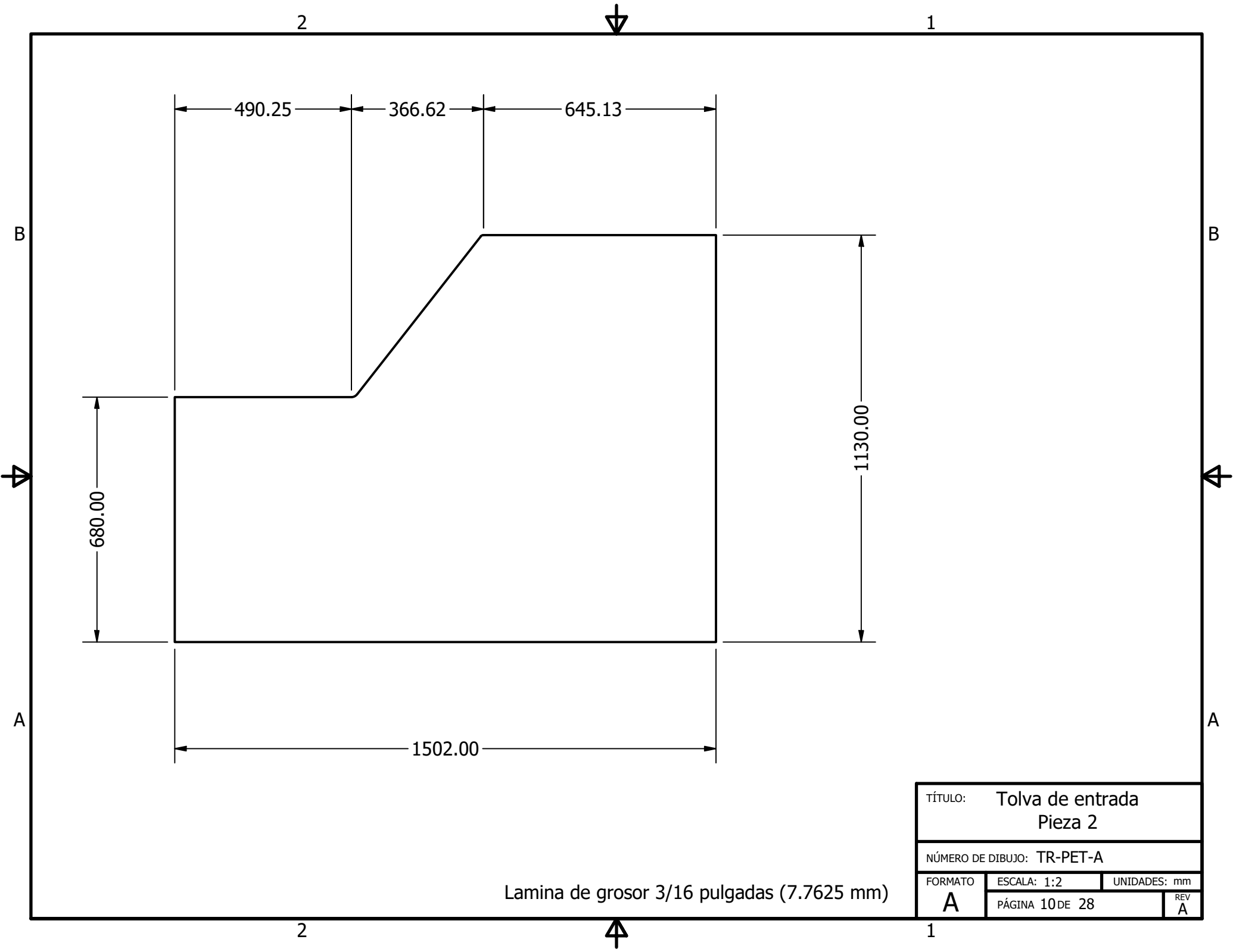
Se realizará soldadura en cada unión de las piezas dentro de la tolva de entrada, y estas soldaduras serán de borde a borde.

TÍTULO: Tolva de entrada		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 4:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 8 DE 28	REV A



TÍTULO: Tolva de Entrada Pieza 1		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 1:9	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 9 DE 28	REV A

Lamina de grosor 3/16 pulgadas (7.7625 mm)



490.25

366.62

645.13

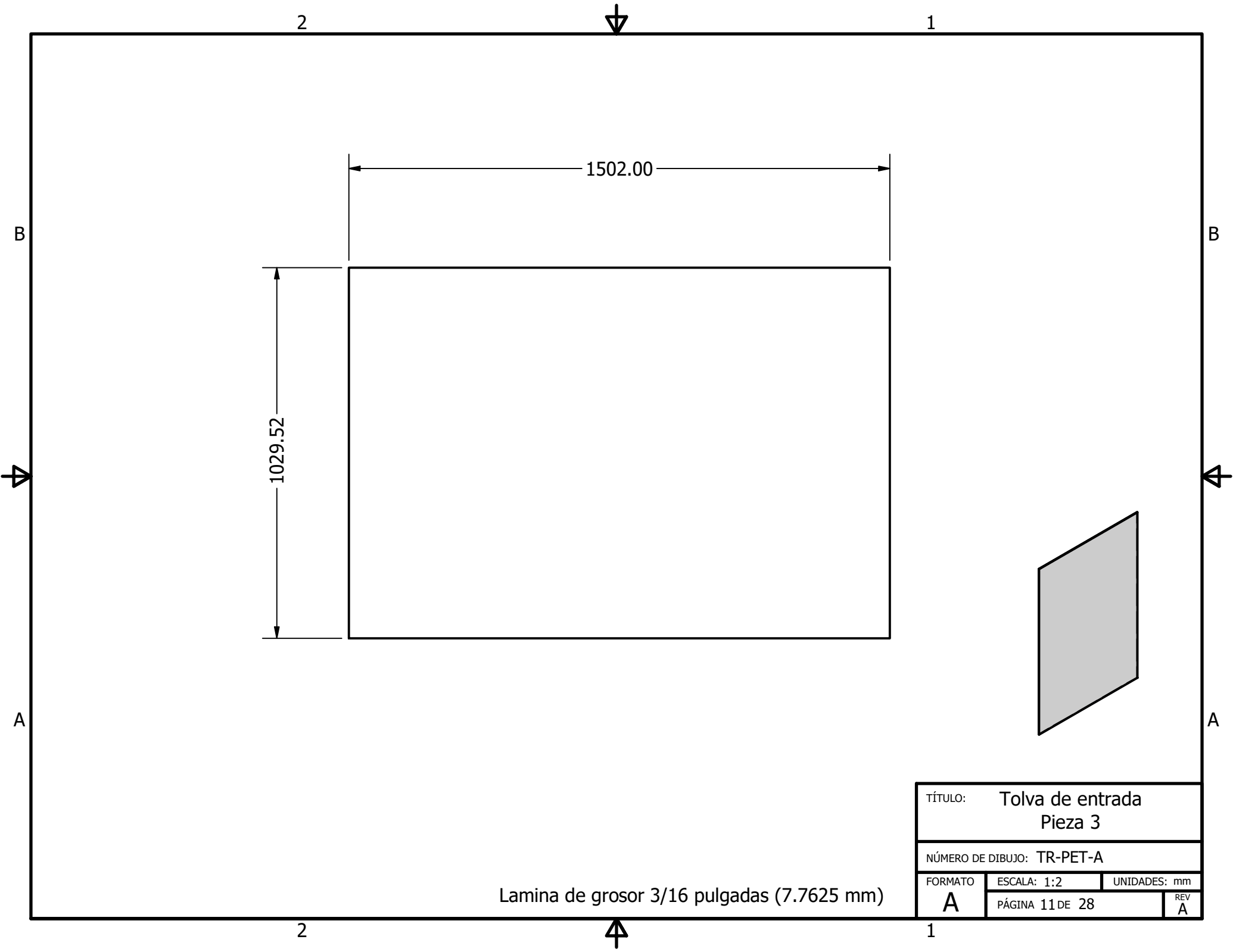
680.00

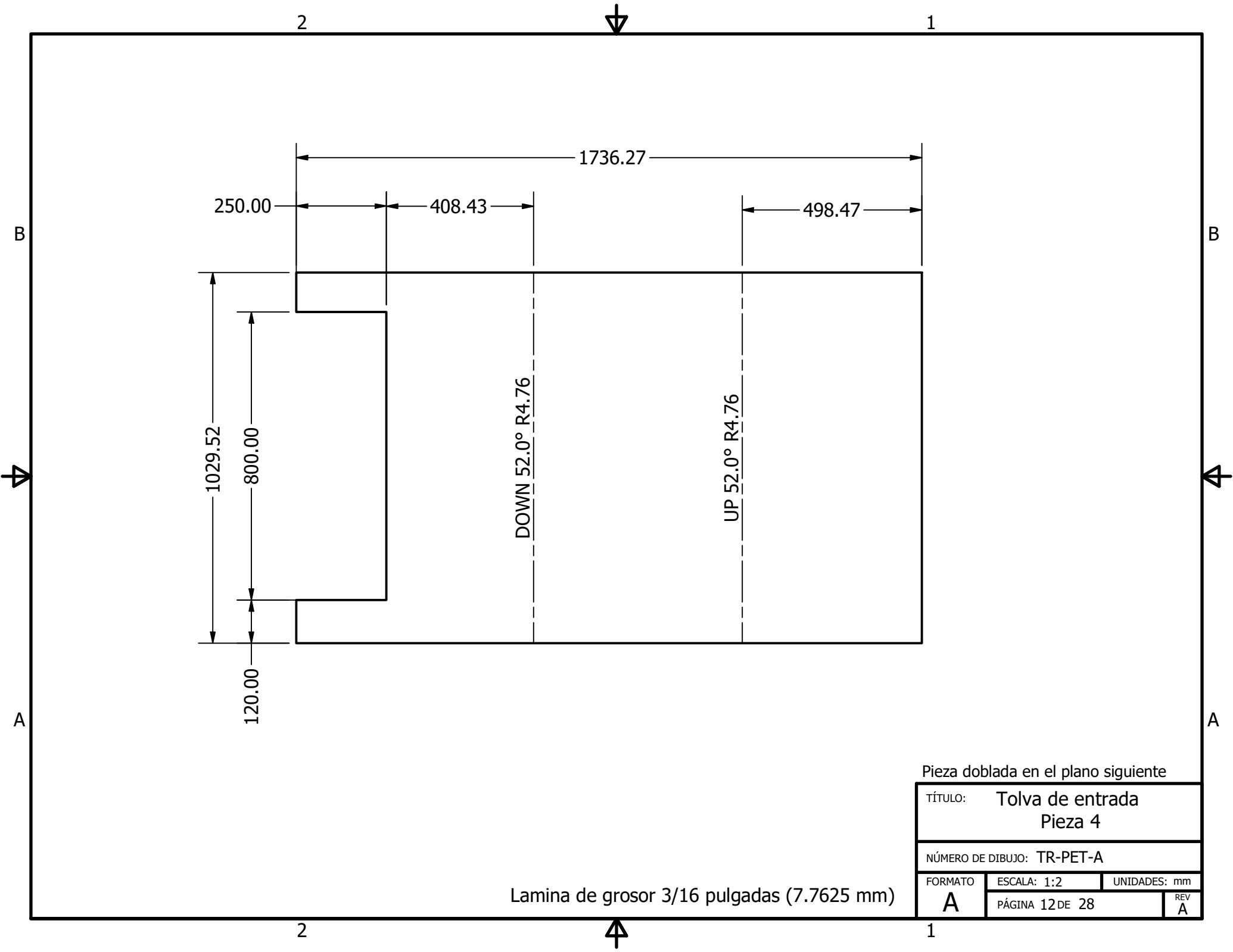
1130.00

1502.00

TÍTULO: Tolva de entrada			
Pieza 2			
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 10 DE 28	REV A	

Lamina de grosor 3/16 pulgadas (7.7625 mm)





1736.27

250.00

408.43

498.47

1029.52

800.00

120.00

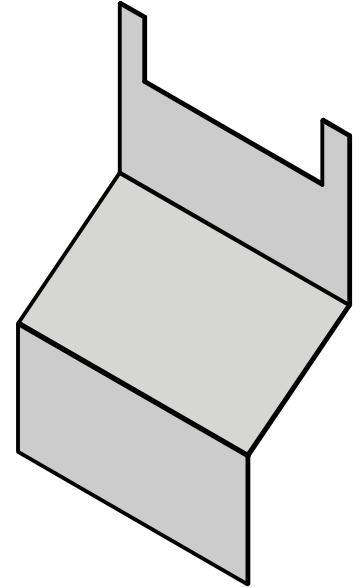
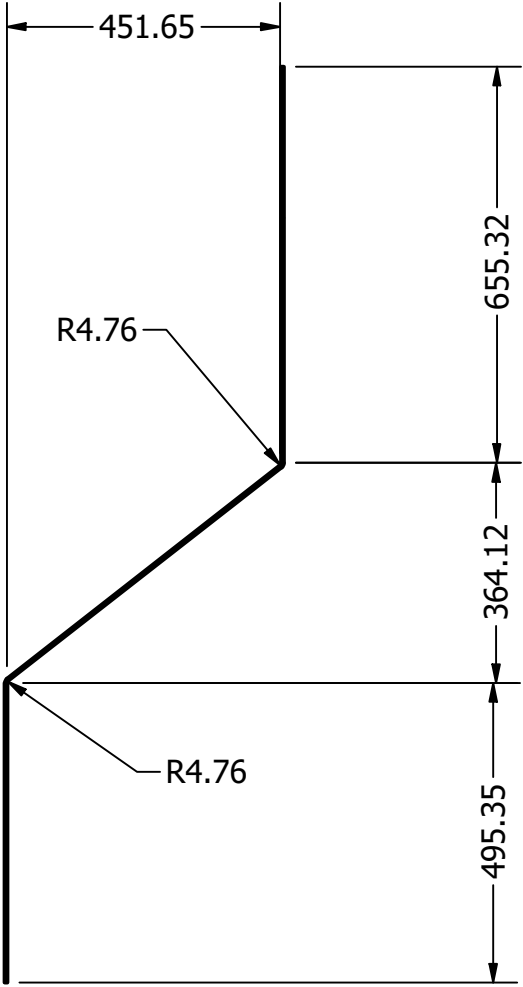
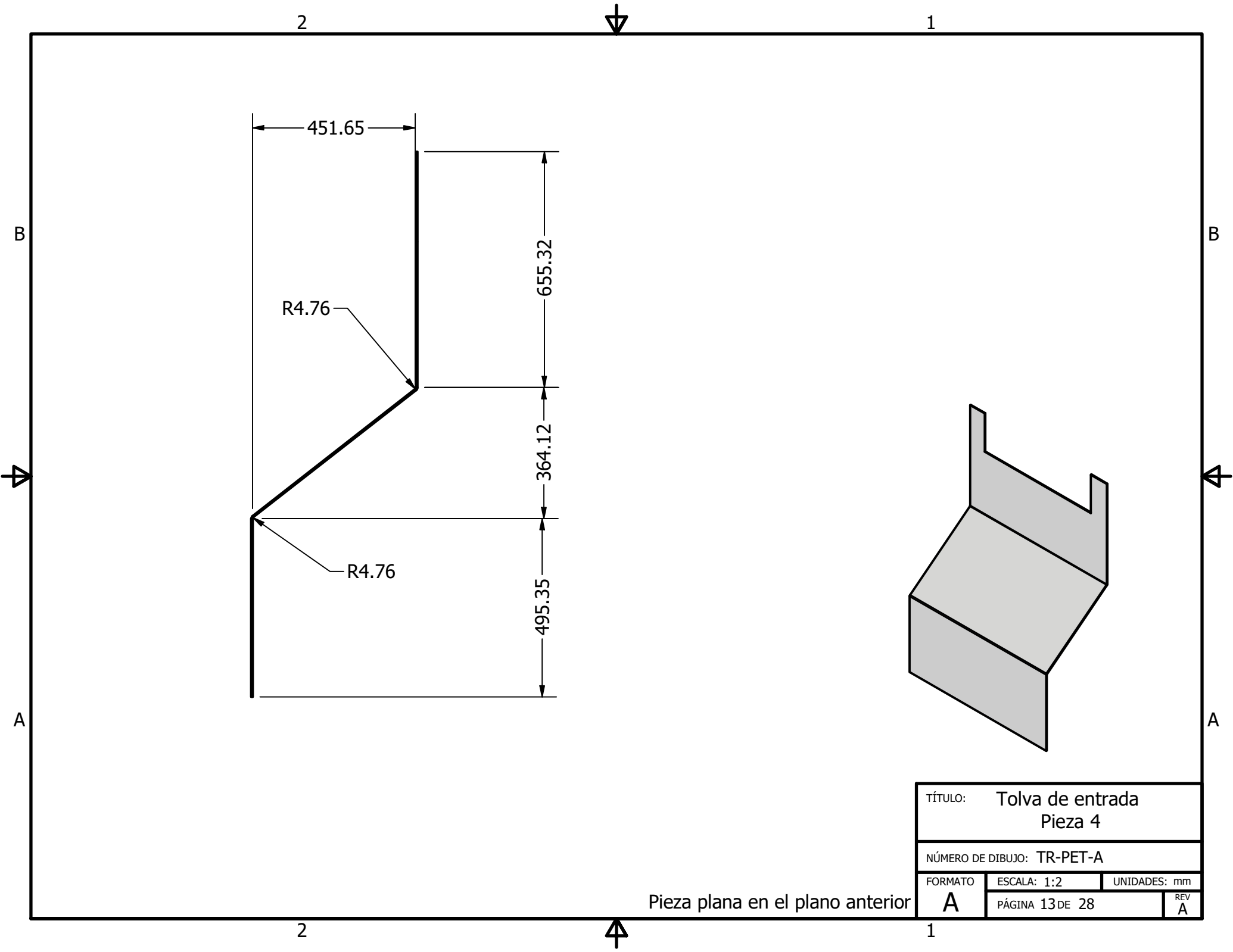
DOWN 52.0° R4.76

UP 52.0° R4.76

Pieza doblada en el plano siguiente

TÍTULO: Tolva de entrada Pieza 4		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 12 DE 28	REV A

Lamina de grosor 3/16 pulgadas (7.7625 mm)



Pieza plana en el plano anterior

TÍTULO: Tolva de entrada Pieza 4			
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 13 DE 28		REV A

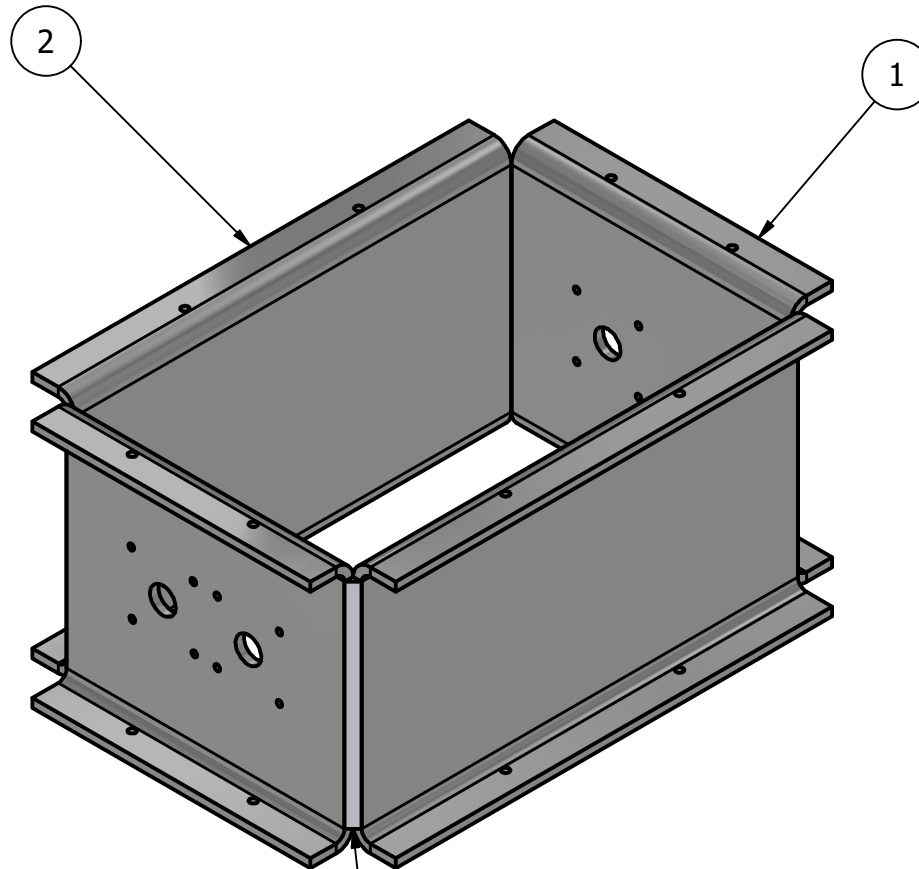
2



1

LISTADO DE PIEZAS		
NUMERO	CANTIDAD	PIEZA
1	2	Placa Carcasa Frontal
2	2	Placa Carcasa Lateral

B



B

A

A

1/2 Pulg E6013

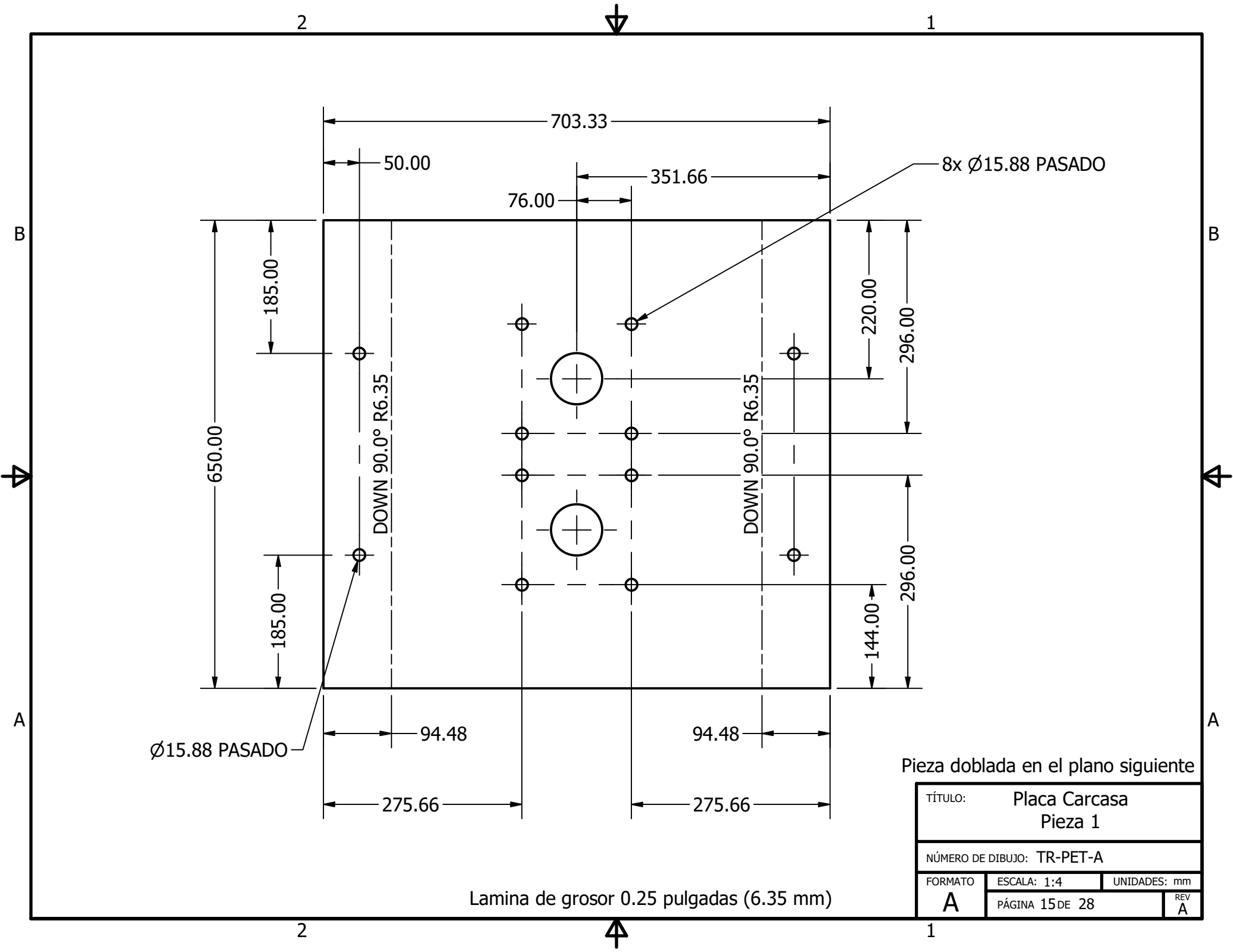
Se realizará soldadura en cada unión de las piezas fuera de la carcasa, y estas soldaduras serán de borde a borde.

TÍTULO:		Carcasa	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	REV
A	PÁGINA 14 DE 28		A

2



1



Ø15.88 PASADO

8x Ø15.88 PASADO

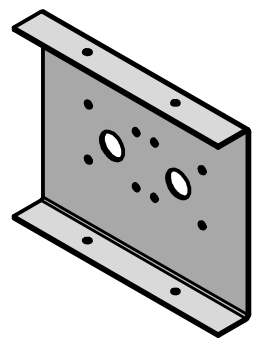
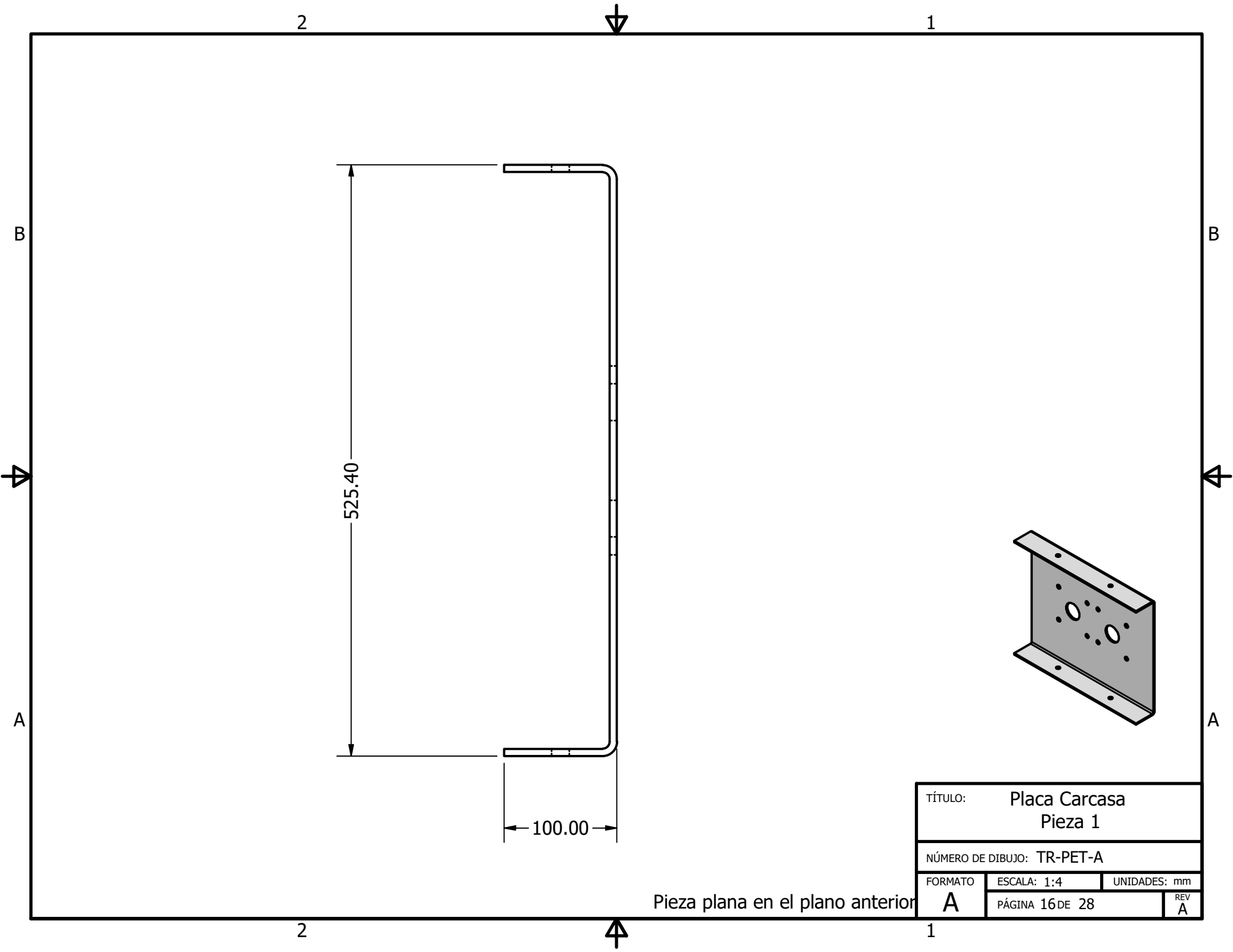
DOWN 90.0° R6.35

DOWN 90.0° R6.35

Lamina de grosor 0.25 pulgadas (6.35 mm)

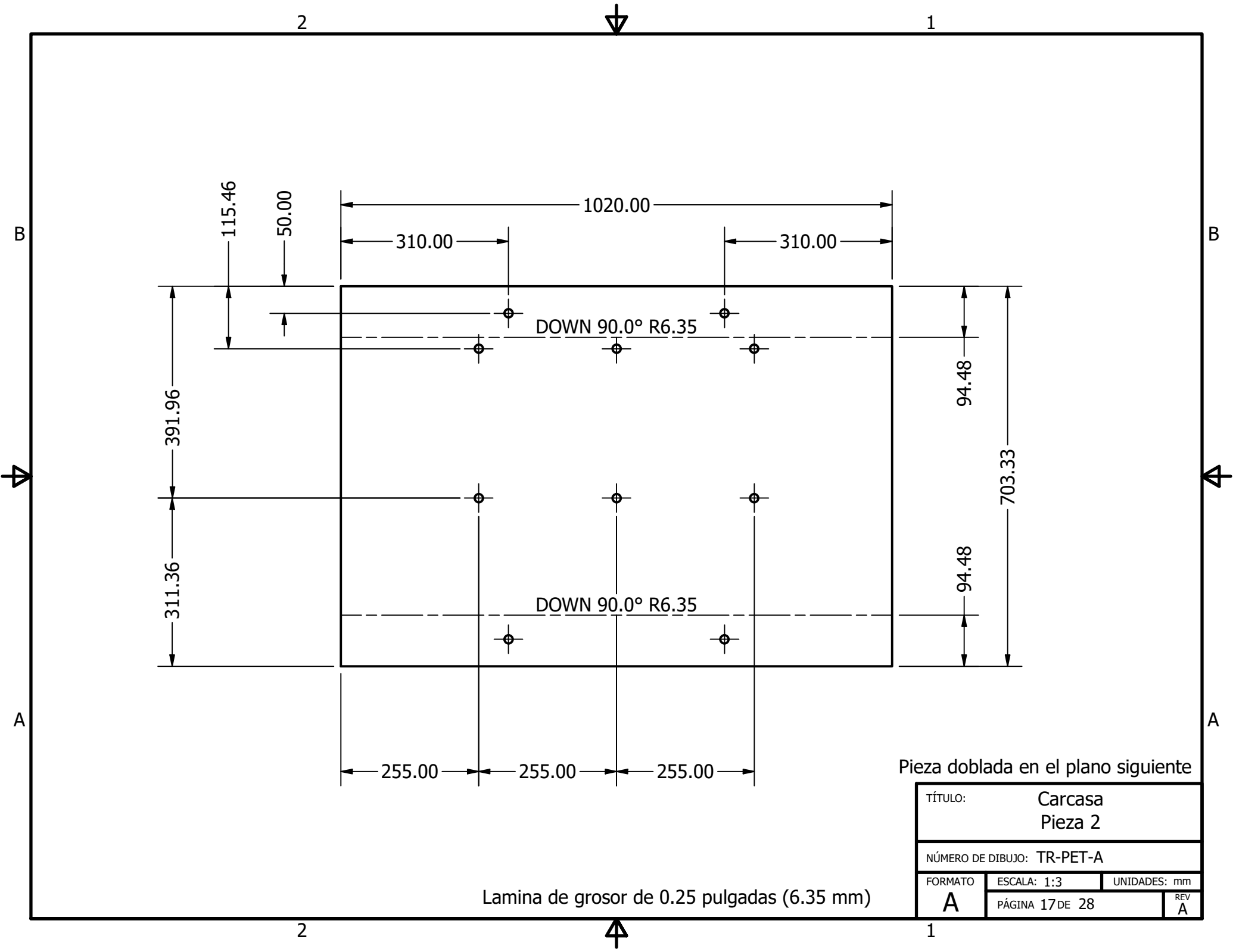
Pieza doblada en el plano siguiente

TÍTULO: Placa Carcasa Pieza 1		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 15 DE 28	REV A



Pieza plana en el plano anterior

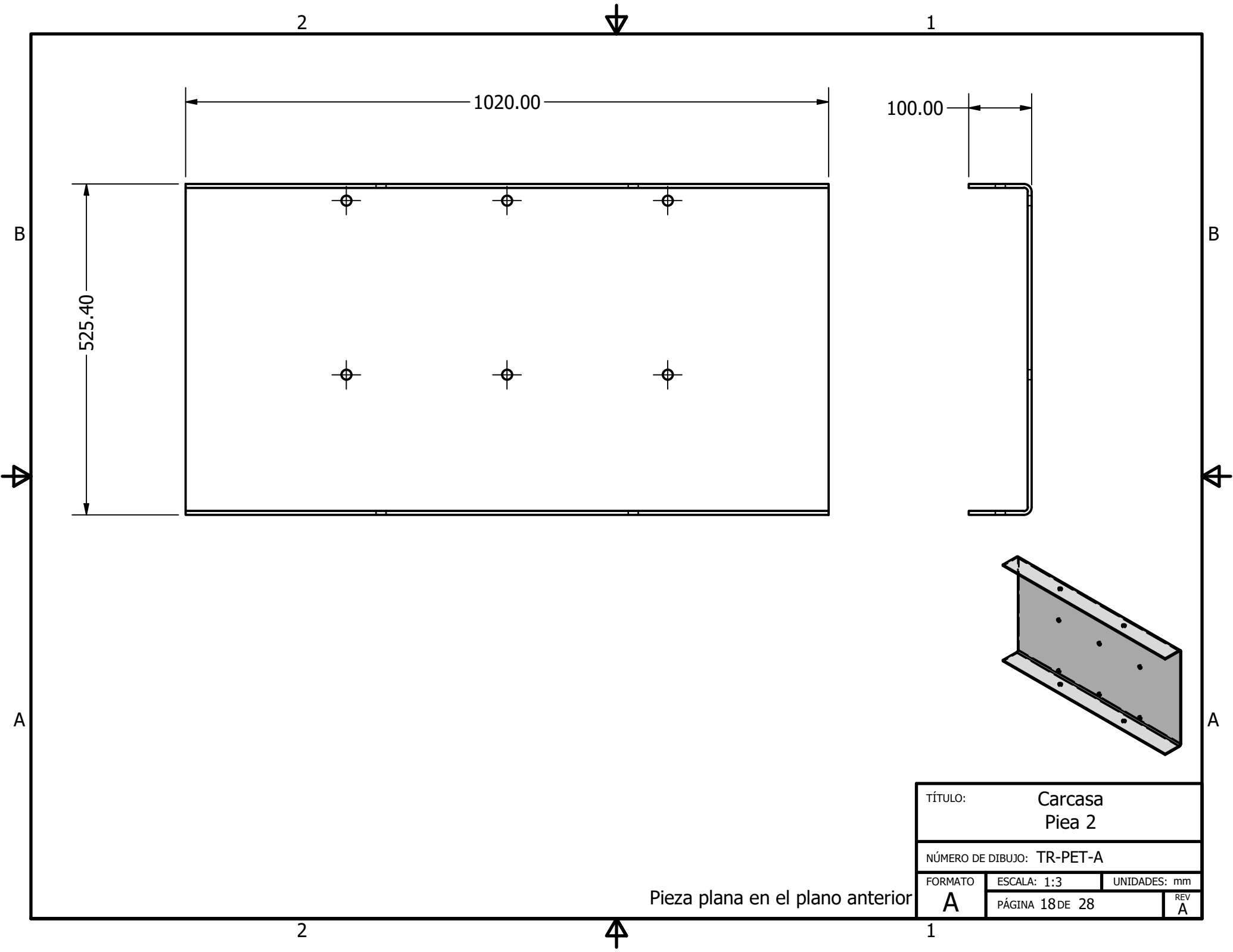
TÍTULO:		Placa Carcasa Pieza 1	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 16 DE 28	REV A	



Pieza doblada en el plano siguiente

TÍTULO:		Carcasa Pieza 2	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 17 DE 28	REV A	

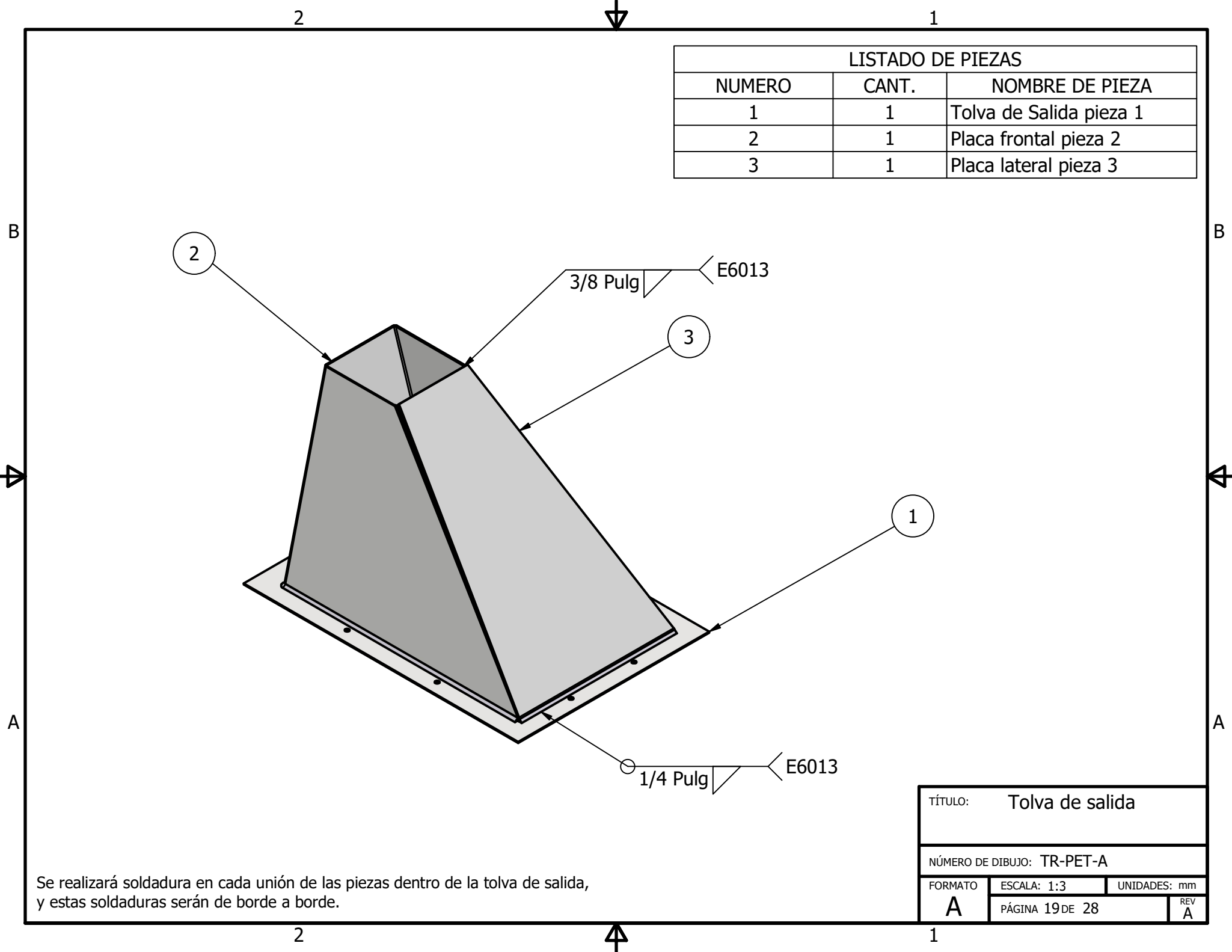
Lamina de grosor de 0.25 pulgadas (6.35 mm)



TÍTULO:		Carcasa Pieza 2	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 18 DE 28	REV A	

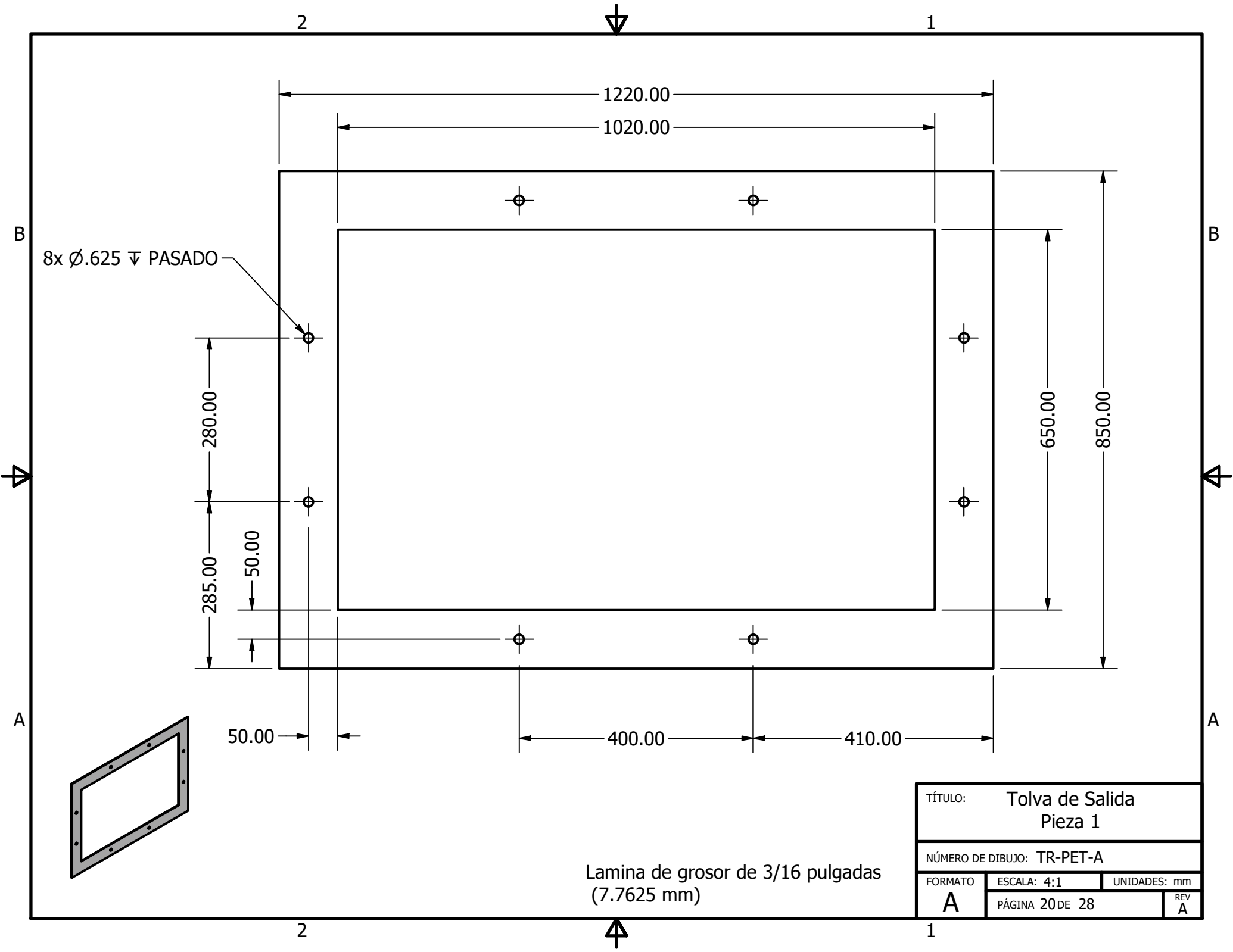
Pieza plana en el plano anterior

LISTADO DE PIEZAS		
NUMERO	CANT.	NOMBRE DE PIEZA
1	1	Tolva de Salida pieza 1
2	1	Placa frontal pieza 2
3	1	Placa lateral pieza 3

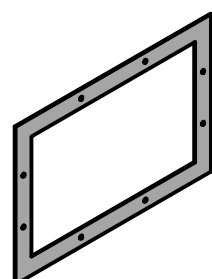
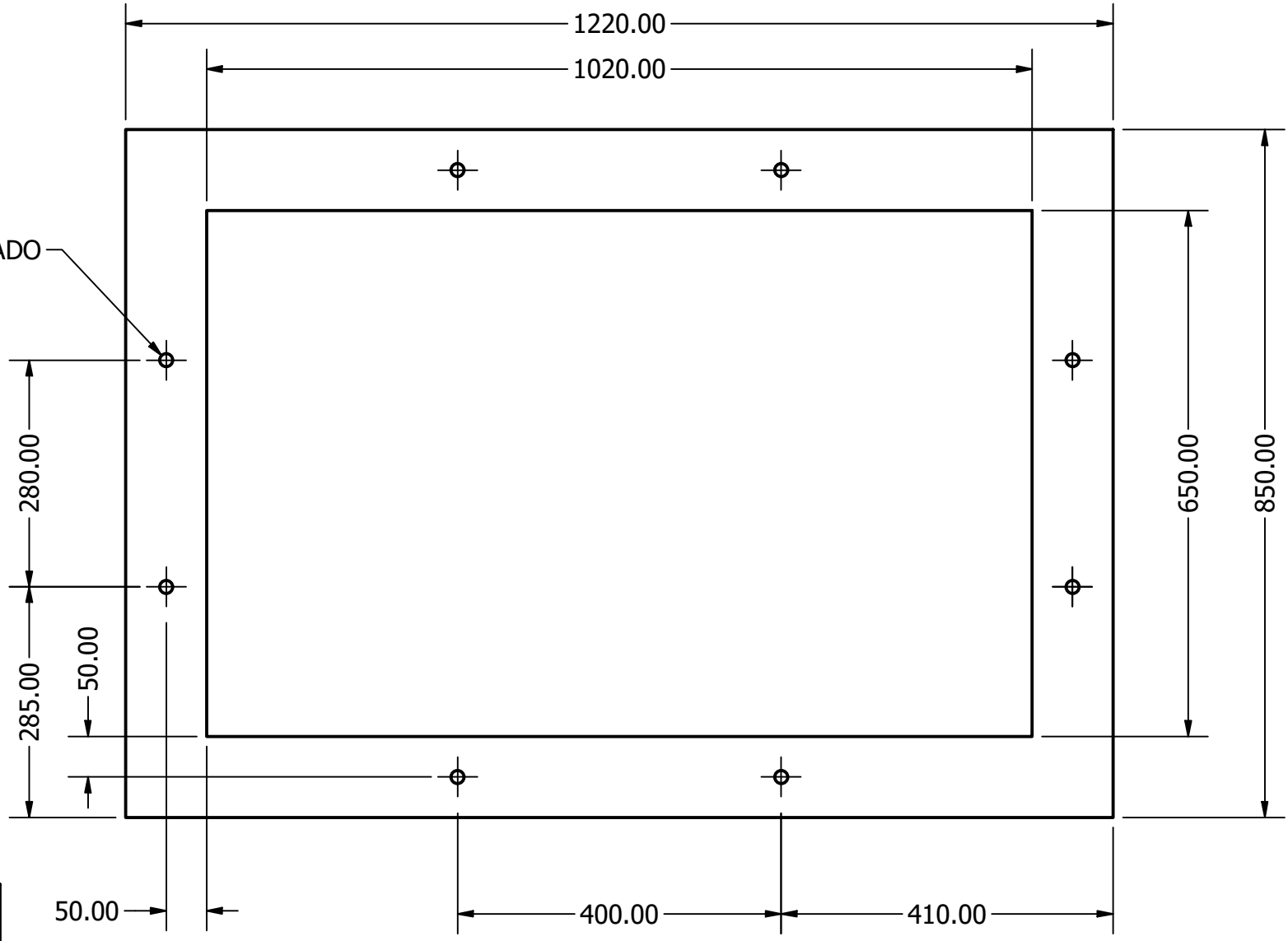


Se realizará soldadura en cada unión de las piezas dentro de la tolva de salida, y estas soldaduras serán de borde a borde.

TÍTULO: Tolva de salida		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 19 DE 28	REV A



8x Ø.625 ▽ PASADO



Lamina de grosor de 3/16 pulgadas
(7.7625 mm)

TÍTULO:		Tolva de Salida Pieza 1	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 4:1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 20 DE 28	REV A	

2

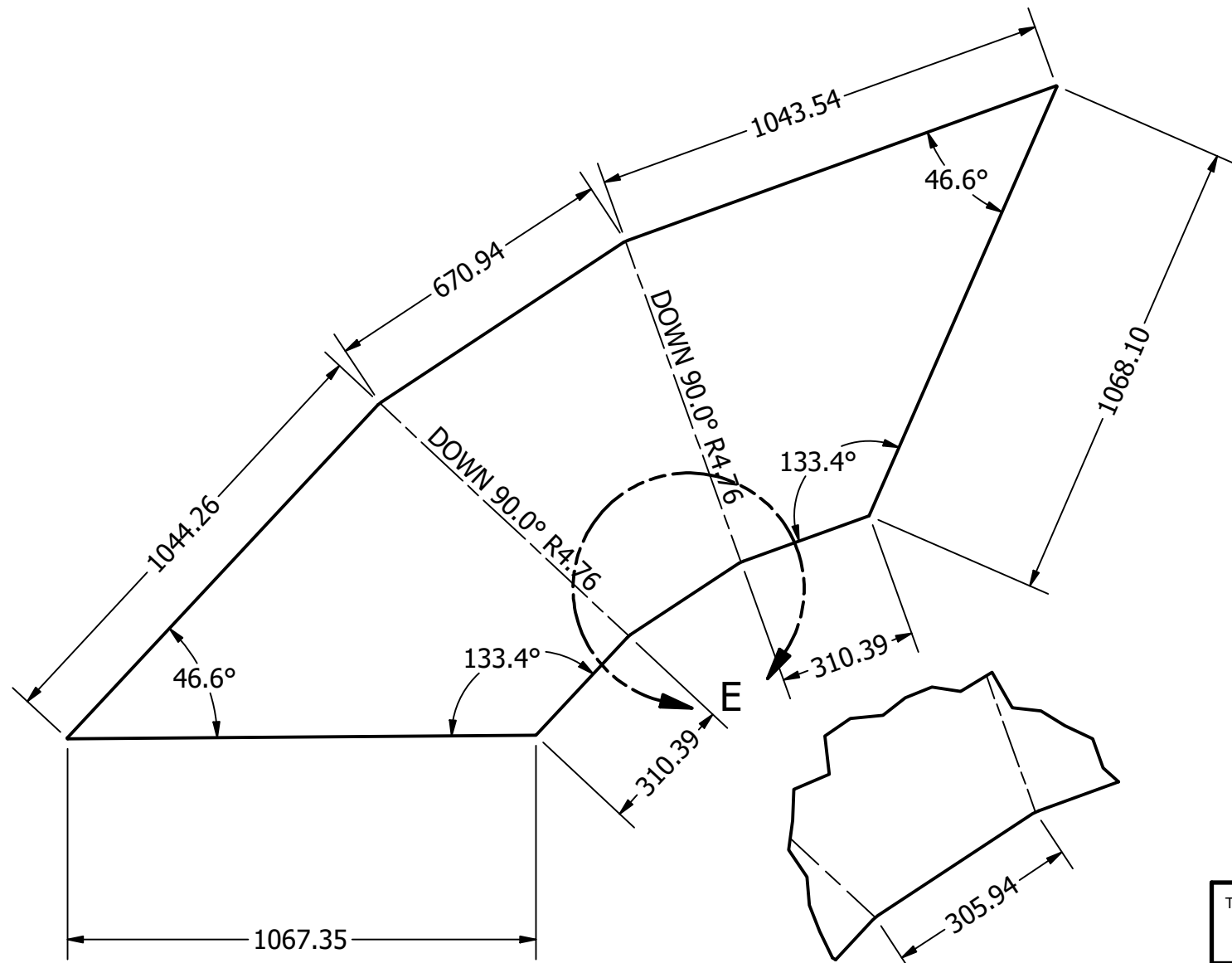
1

Lamina de grosor de 3/16 pulgadas
(7.7625 mm)

2254.38

B

B



A

A

Pieza doblada en el plano siguiente

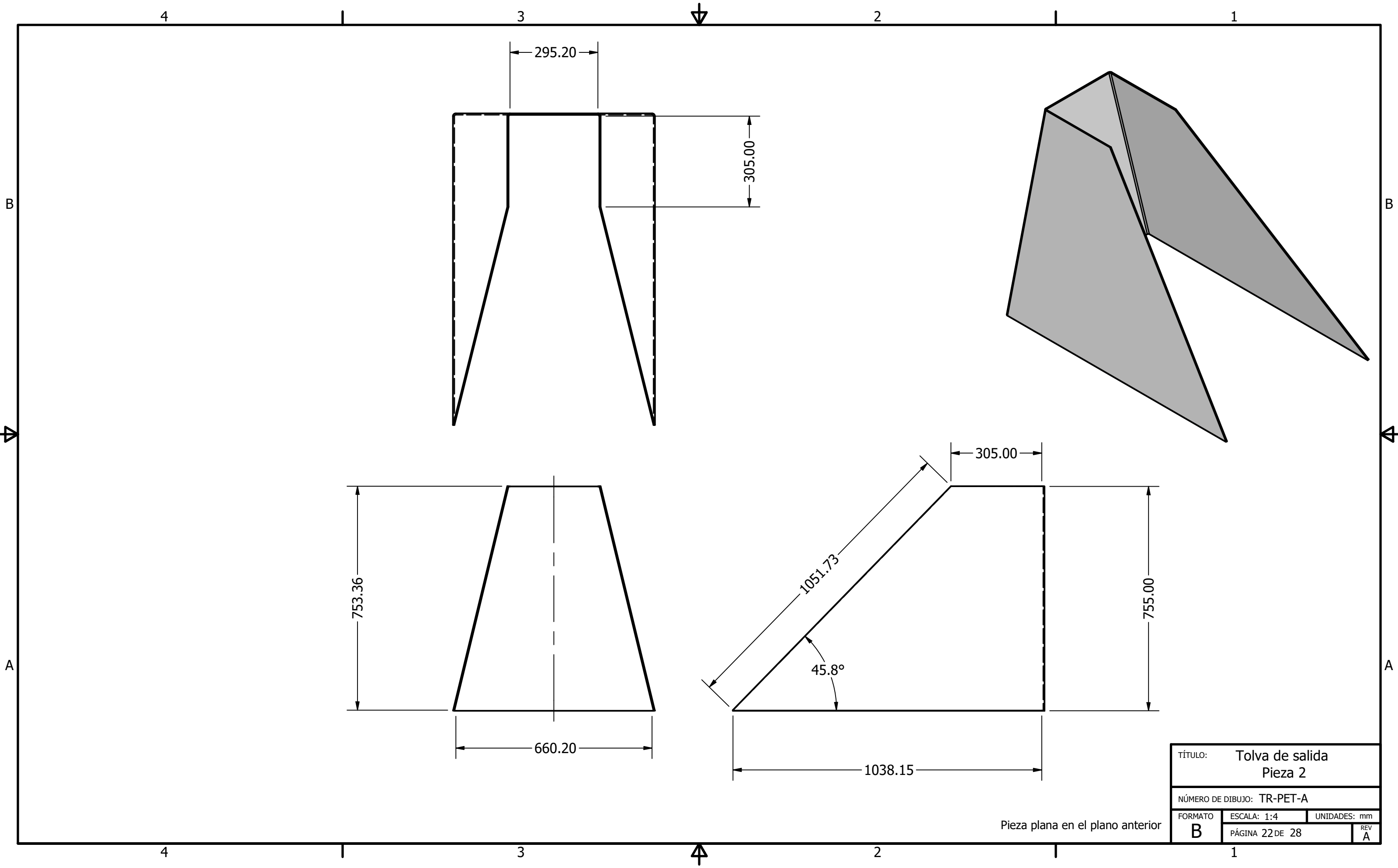
DETALLE E
ESCALA 1:10

TÍTULO:		Tolva de salida Pieza frontal	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	REV
A	PÁGINA 21 DE 28		A

2

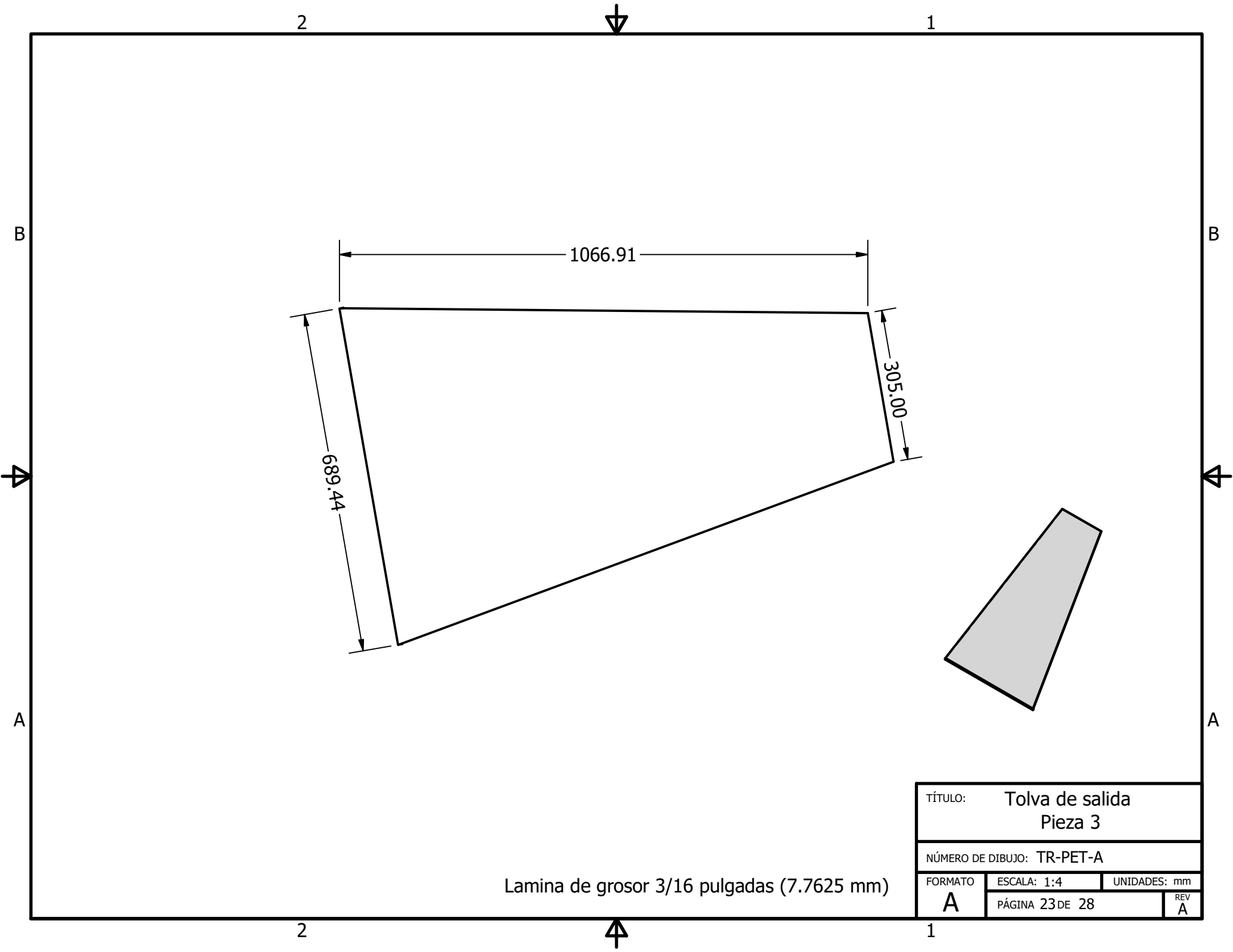
1





TÍTULO: Tolva de salida Pieza 2		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 22 DE 28	REV A

Pieza plana en el plano anterior

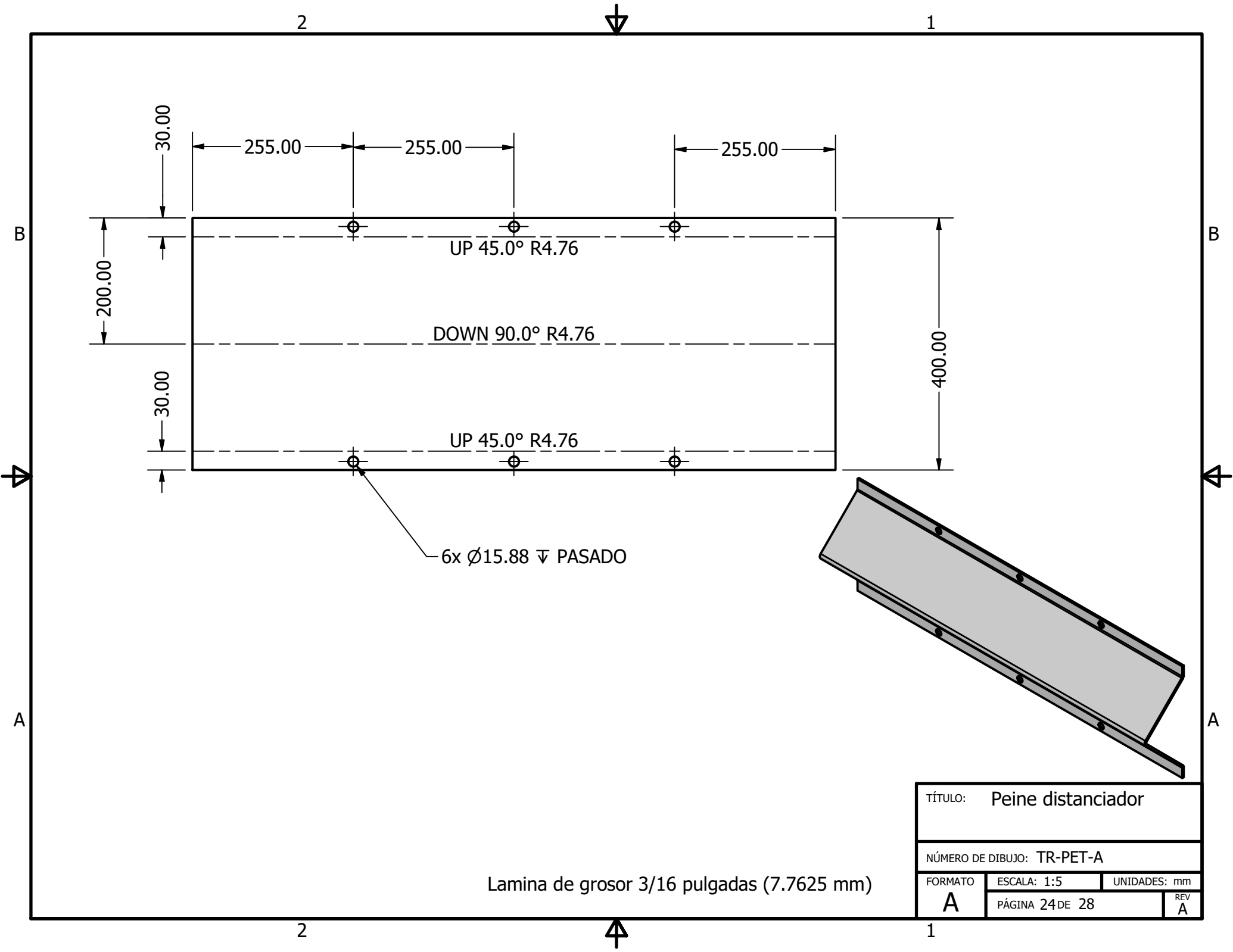


TÍTULO: Tolva de salida
Pieza 3

NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A

FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 23 DE 28	REV A

Lamina de grosor 3/16 pulgadas (7.7625 mm)



2

1

30.00

255.00

255.00

255.00

200.00

400.00

30.00

UP 45.0° R4.76

DOWN 90.0° R4.76

UP 45.0° R4.76

6x Ø15.88 ∇ PASADO

Lamina de grosor 3/16 pulgadas (7.7625 mm)

TÍTULO: Peine distanciador			
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 24 DE 28		REV A

2

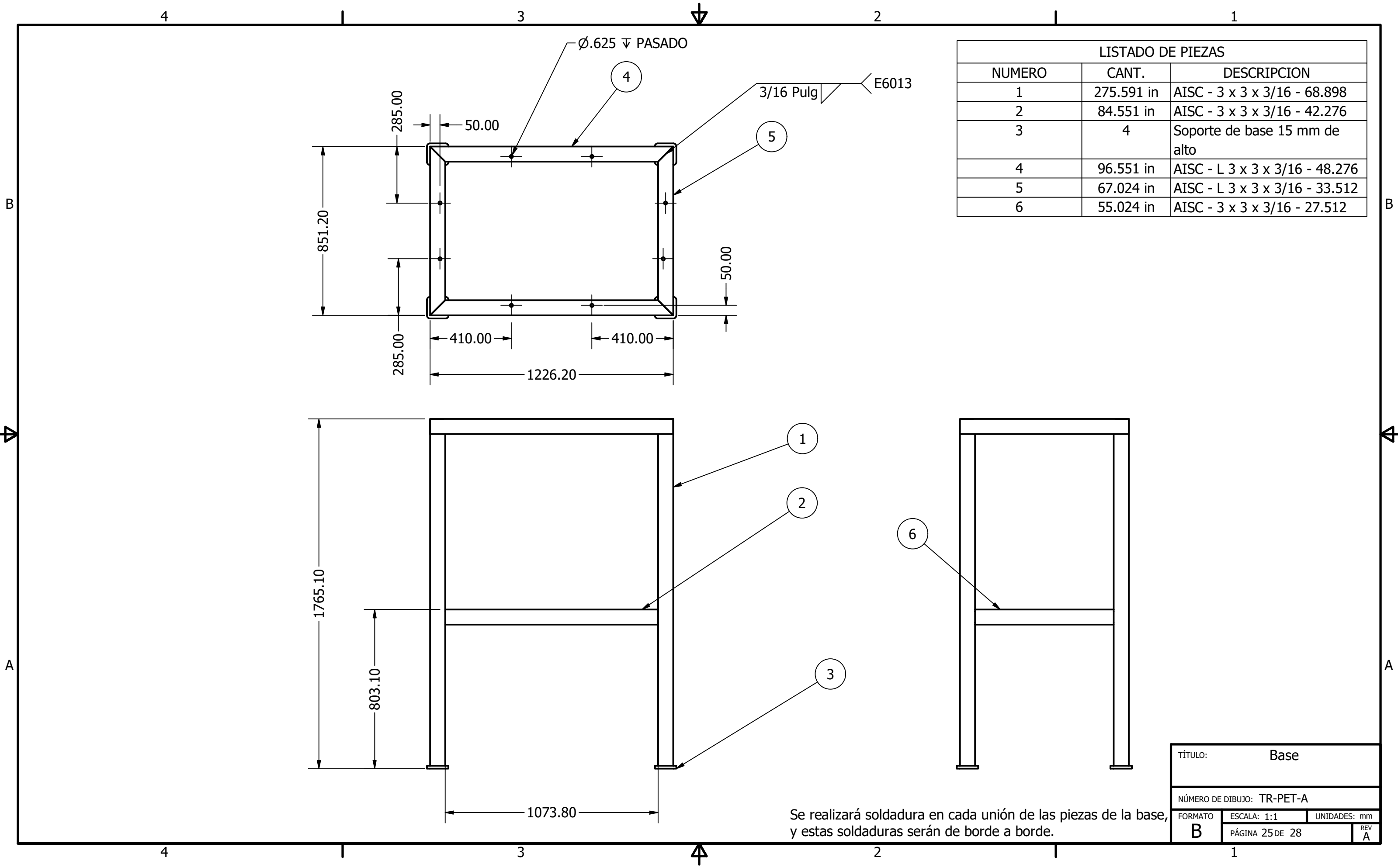
1

B

B

A

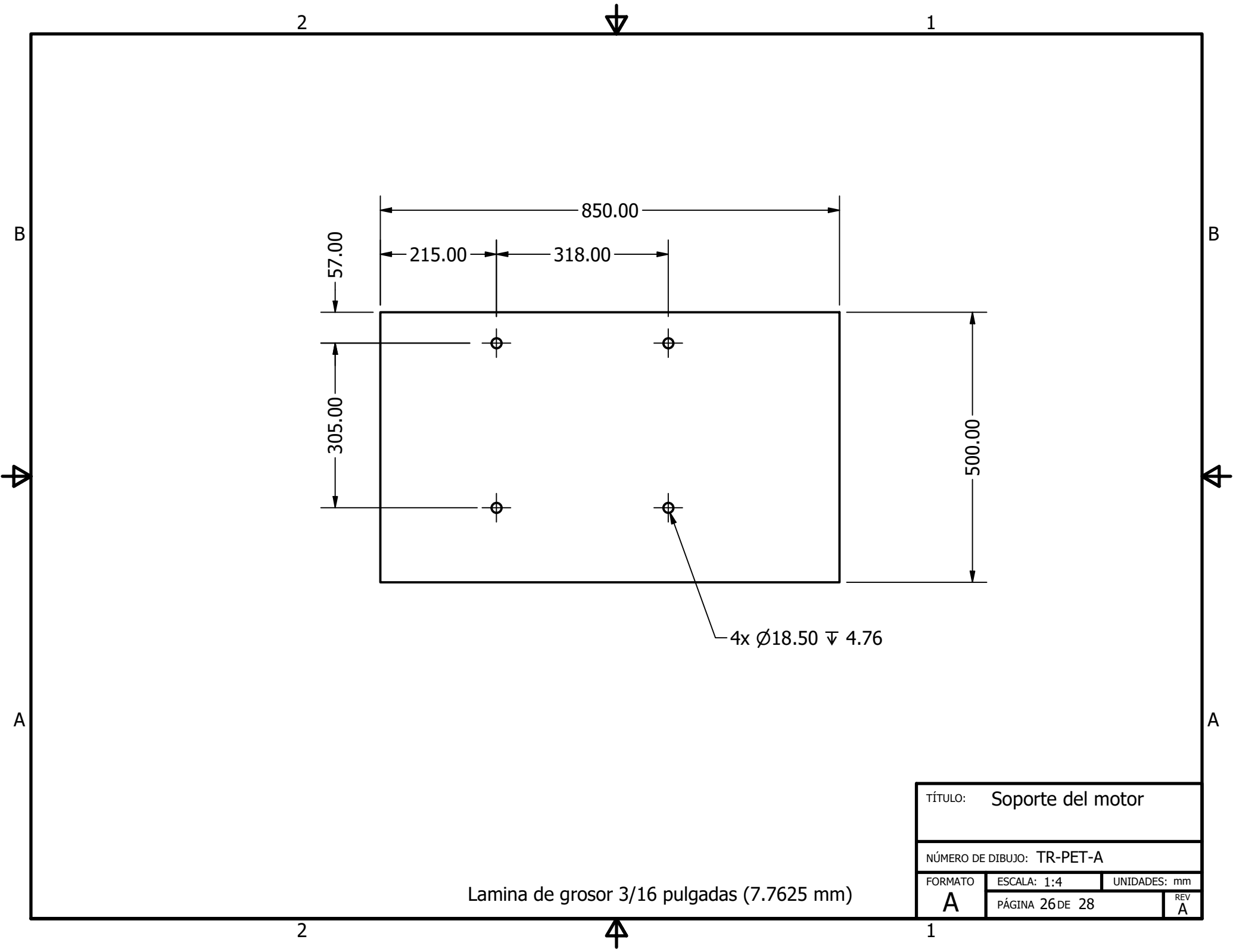
A



LISTADO DE PIEZAS		
NUMERO	CANT.	DESCRIPCION
1	275.591 in	AISC - 3 x 3 x 3/16 - 68.898
2	84.551 in	AISC - 3 x 3 x 3/16 - 42.276
3	4	Soporte de base 15 mm de alto
4	96.551 in	AISC - L 3 x 3 x 3/16 - 48.276
5	67.024 in	AISC - L 3 x 3 x 3/16 - 33.512
6	55.024 in	AISC - 3 x 3 x 3/16 - 27.512

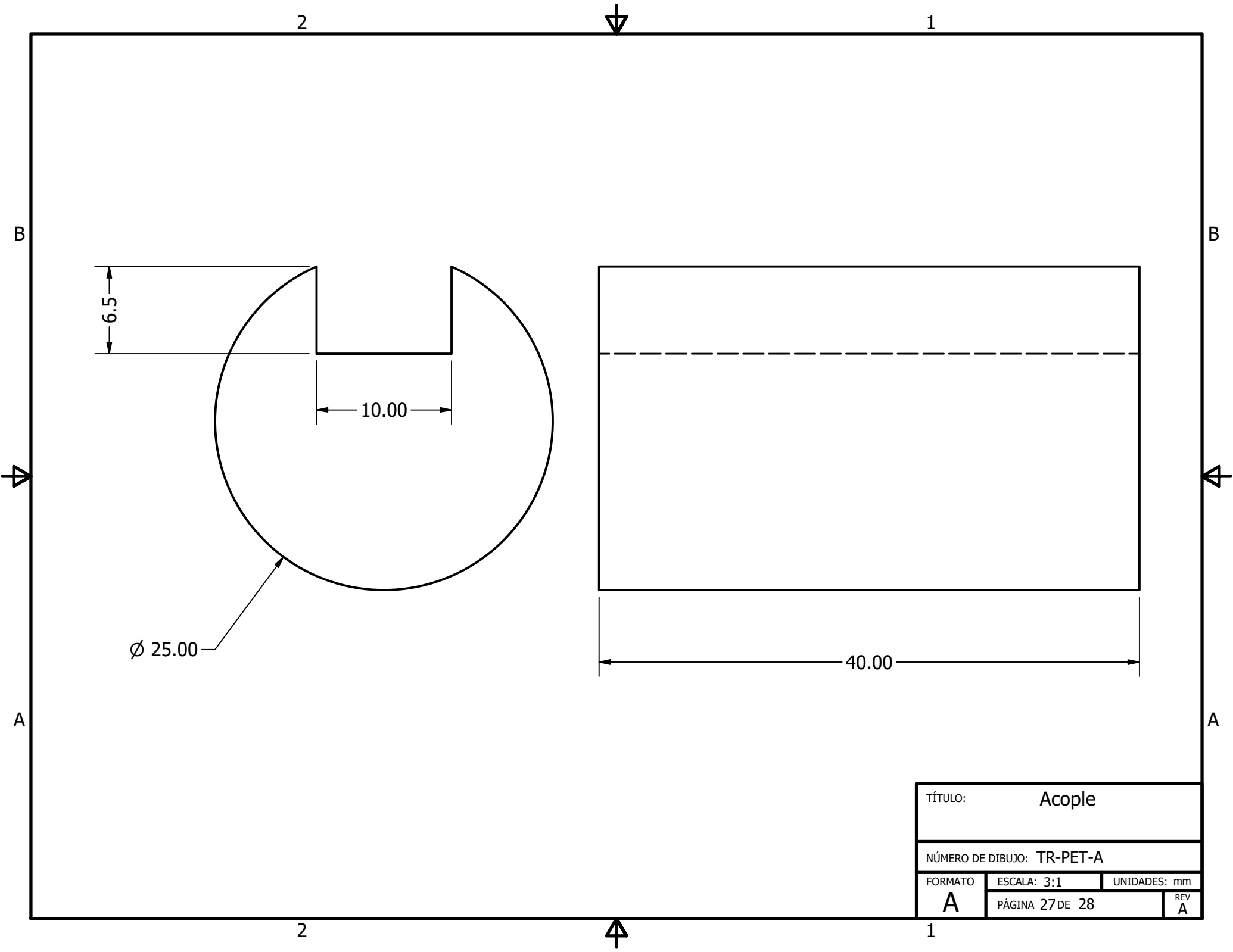
Se realizará soldadura en cada unión de las piezas de la base, y estas soldaduras serán de borde a borde.

TÍTULO: Base		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO B	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
	PÁGINA 25 DE 28	REV A

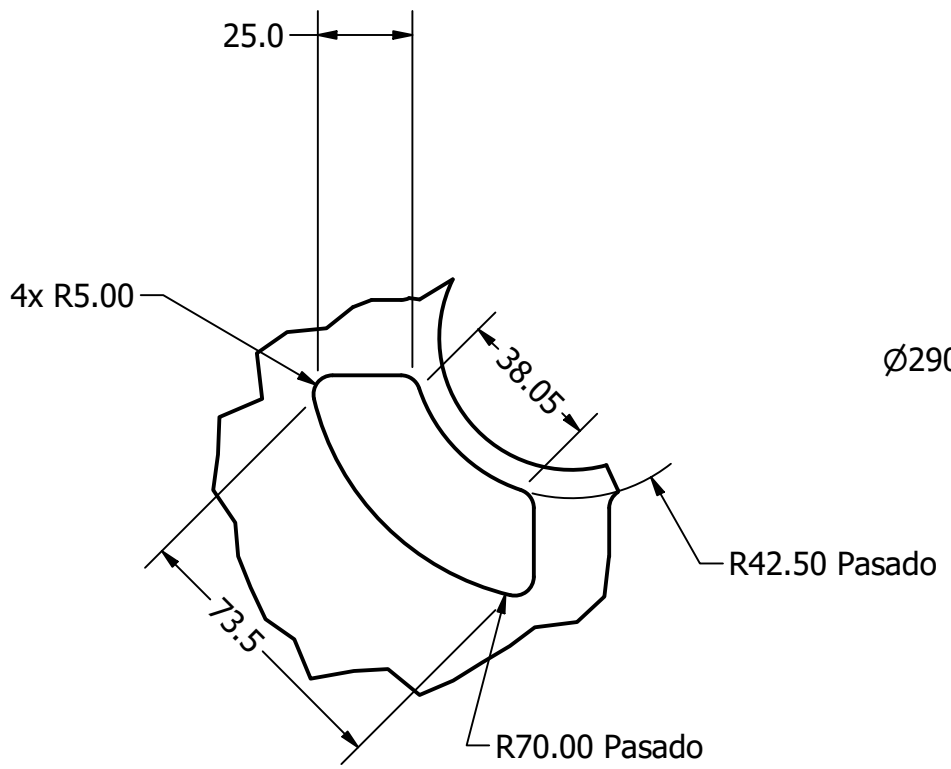
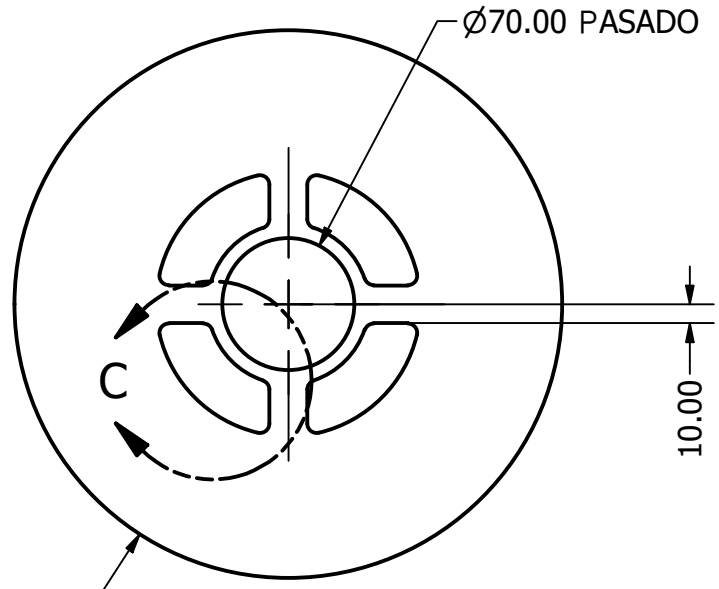
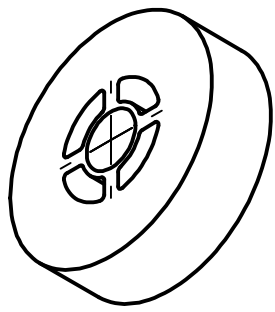


Lamina de grosor 3/16 pulgadas (7.7625 mm)

TÍTULO: Soporte del motor		
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 26 DE 28	REV A



TÍTULO:		Acople	
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA: 3:1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 27 DE 28		REV A



DETALLE C
ESCALA 1:2

Espesor de 85 mm
Todos los redondeos son de 5 mm.

TÍTULO: Volante de inercia			
NÚMERO DE DIBUJO: TR-PET-A			
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES: mm	REV
A	PÁGINA 28 DE 28		A

Se debe dimensionar 4 veces y separarlo cada 20 mm según la pieza anterior.

