

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de prototipo de triturador de desechos
caseros para compost**

Trabajo de graduación presentado por Guillermo Lima De La Cruz para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica
Industrial

Guatemala
2022

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de prototipo de triturador de desechos
caseros para compost**

Trabajo de graduación presentado por Guillermo Lima De La Cruz para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica
Industrial

Guatemala
2022

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Víctor Ayerdi

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Víctor Ayerdi

(f) 
Ing. Laura Roldán

(f) 
Ing. Luis Castañeda

Fecha de aprobación: Guatemala, 08 de diciembre de 2022.

Lista de figuras	VI
Lista de cuadros	VII
Resumen	IX
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Marco teórico	9
5.1. Características principales sobre el compostaje	9
5.2. Situación en Guatemala	10
5.2.1. Desechos en Guatemala	10
5.2.2. Elementos compostables	11
5.3. Generalidades sobre trituradores	12
5.3.1. Transmisión de potencia en trituradores	14
5.4. Sistemas de almacenamiento de desechos orgánicos	23
5.5. Requerimientos de fuerza para el corte de alimentos	23
6. Metodología	25
6.1. Definición de requisitos	25
6.2. Diseño	25
6.2.1. Dimensiones y elección de tipo de triturador	25
6.2.2. Geometría	26
6.2.3. Funcionamiento del triturador	29
6.2.4. Material de fabricación y proceso de manufactura	32

6.3.	Cálculos	33
6.3.1.	Engranés de reducción helicoidales	33
6.3.2.	Engranés de acción helicoidales	41
6.3.3.	Ejes	43
6.4.	Fabricación y ensamble de prototipo	61
6.4.1.	Impresión de componentes	61
6.4.2.	Ensamble de prototipo	65
6.5.	Realización de prueba	68
6.5.1.	Preparación	69
6.5.2.	Realización de prueba	71
6.5.3.	Recopilación de resultados	72
7.	Resultados	75
7.1.	Fabricación de prototipo	75
7.2.	Prueba	77
8.	Discusión de resultados	79
9.	Conclusiones	81
10.	Recomendaciones	83
11.	Bibliografía	85
12.	Anexos	89
12.1.	Protocolo de pruebas	89
12.2.	Planos de construcción	95

Lista de figuras

1.	Estructura acoplada	27
2.	Base de cuchilla de triturador	28
3.	Base de cuchilla de triturador	28
4.	Cuchilla	29
5.	Dimensiones de cuchilla	29
6.	Ensamble triturador y reducción	30
7.	Detalle de distribución en triturador	30
8.	Detalle opuesto de distribución en triturador	31
9.	Espaciador	31
10.	Dimensiones generales en milímetros de espaciador	32
11.	Manivela	33
12.	Dimensiones generales en milímetros de manivela	34
13.	Resistencia a la flexión en condiciones ideales	37
14.	Factor de velocidad	37
15.	Factor de temperatura	38
16.	Factor de servicio	38
17.	Factor de forma de Lewis	39
18.	Esfuerzo de contacto permisible	41
19.	Configuración de ejes en triturador	44
20.	Valores para factor de superficie	45
21.	Distribución eje principal	47
22.	Fuerzas actuando en eje principal	47
23.	DCL plano xz eje principal	49
24.	Diagrama momento plano xz eje principal	49
25.	DCL plano xy eje principal	50
26.	Diagrama momento plano xy eje principal	51
27.	Fuerzas actuando en eje manivela	55
28.	DCL eje manivela	55
29.	Diagrama momento eje manivela	56
30.	Distribución de eje secundario	57
31.	Fuerzas actuando en eje secundario	57
32.	DCL plano xz eje secundario	58
33.	Diagrama momento plano xz eje secundario	58

34.	DCL plano xy eje secundario	59
35.	Diagrama momento plano xy eje secundario	59
36.	Impresión de piñón	62
37.	Impresión de corona	62
38.	Impresión de estructura de triturador	63
39.	Impresión de bases para cuchillas	63
40.	Ensamble manivela y piñón	65
41.	Ensamble manivela y piñón	65
42.	Parte dos de estructura	66
43.	Parte tres de estructura	66
44.	Ensamble eje principal	67
45.	Ensamble eje principal y secundario a estructura	67
46.	Ensamble completo	68
47.	Ensamble completo	68
48.	Muestra para prueba	70
49.	Muestra para prueba	70
50.	Preparación para prueba	71
51.	Triturador en funcionamiento	71
52.	Triturador en funcionamiento	72
53.	Finalización de prueba	72
54.	Desechos con dimensión menor a 1.3 cm	73
55.	Desechos con dimensión entre 1.3 y 5 cm	73
56.	Desechos con dimensión mayor a 5 cm	73
57.	Visualización de proporción	78

Lista de cuadros

1.	Elementos de la CBA	11
2.	Requisitos	26
3.	Dimensiones de engranes de reducción	35
4.	Características de operación de engranes de reducción	36
5.	Características de engranes de reducción	40
6.	Características de engranes de reducción	40
7.	Dimensiones de engranes de acción	42
8.	Características de operación de engranes de acción	42
9.	Características de operación de engranes de acción	43
10.	Características de esfuerzo de contacto de engranes de acción	43
11.	Características acero inoxidable 304	44
12.	Características de la resistencia a la fatiga	46
13.	Combinación de esfuerzos eje principal	52
14.	Resultados obtenidos para el eje principal	54
15.	Resultados obtenidos para el eje manivela	56
16.	Combinación de esfuerzos eje secundario	60
17.	Resultados obtenidos para el secundario	61
18.	Características de impresión	64
19.	Costo asociado de impresión	64
20.	Equipo necesario para prueba	69
21.	Contenido de la muestra a procesar	69
22.	Listado de piezas de prototipo	76
23.	Listado de piezas de prototipo y costo asociado	77
24.	Resultados de peso por clasificación	78
25.	Resultados de funcionamiento	78

El tratamiento de desechos es una actividad que ha cobrado relevancia dada la producción incrementada de los mismos y el manejo inadecuado principalmente en Guatemala. Por lo que, con el fin de aportar hacia el tratamiento adecuado de desechos orgánicos, se realizó el diseño y fabricación de un prototipo de triturador de desechos caseros con el objetivo de prepararlos para su uso posterior como materia prima para la producción de compost. El diseño constó de un triturador de doble eje, fabricado en su mayor parte por medio de tecnología aditiva. El mismo es accionado manualmente y permite reducir los desechos orgánicos no putrefactos de la canasta básica guatemalteca para darles una dimensión adecuada para el compostaje. Se logró que el prototipo procesara una muestra variada de desechos orgánicos del cual un 65 por ciento tiene dimensiones entre 1.3 y 5 cm, las cuales son adecuadas para la correcta producción de compost. Asimismo el triturador permite realizar el procesamiento los desechos producidos en un hogar en un día en un marco de tiempo menor a 10 minutos. Se concluye que el prototipo es funcional incluso tomando en consideración que fue fabricado por impresión 3D, permitiendo reducir los desechos a una dimensión adecuada en un marco de tiempo razonable dadas las condiciones de operación.

El manejo de desechos sólidos incide directamente en la producción de gases de efecto invernadero, afectando el espacio de almacenaje y sus alrededores. Los desechos orgánicos requieren un cuidado especial, debido a que existe un proceso de descomposición cuando el nivel de humedad es elevado. Esto conlleva a la emisión de gases de efecto invernadero. En la Ciudad de Guatemala, la mayoría de los desechos sólidos se vierten en un relleno sanitario. (Kaza y col., 2018) Según el *Waste-Atlas*, a este vertedero llegan un aproximado de 3,200 toneladas diarias de desechos sólidos; siendo considerado, como uno de los 50 más grandes del mundo. (WasteAtlasPartnership, 2014) El estudio demostró también que 65 por ciento de los desechos en este vertedero son desechos orgánicos, 30 por ciento reciclables y 5 por ciento inertes. De los desechos orgánicos, se estima que únicamente un 4.5 por ciento se convierte en compost, según datos recopilados por el Centro de Estudios Urbanos y Regionales. (Martínez, 1996)

Utilizando los parámetros adecuados, el compostaje es una manera de transformar los desechos sólidos orgánicos de manera higiénica, evitando el riesgo de contaminación por su mal uso y aprovechándolos como herramienta para mejorar el crecimiento de las plantas. (Oliveira y col., 2017; Roman y col., 2015) Por esta razón, este trabajo de investigación busca contribuir al proceso de tratamiento de desechos sólidos mediante el diseño y fabricación de un prototipo de triturador para desechos caseros. El objetivo es buscar una solución para que las familias guatemaltecas puedan aportar al proceso mediante la preparación de los desechos orgánicos como materia prima para la producción de compost.

Un prototipo a cargo de estudiantes de la India, pretendió ayudar a las municipalidades con el tratamiento de desechos sólidos. Se desarrolló un prototipo básico cuyo objetivo fue humedecer los desechos sólidos de manera que se iniciara el proceso de compostaje. Este prototipo se diseñó asumiendo que se tienen los desechos triturados. El prototipo fue fabricado con componentes de aluminio y fue aplicado para la producción de desechos típica de las familias en India. (Thakur, 2019)

Hannon en 2003 realizó un estudio de correlación entre la calidad del proceso de compostaje y la herramienta utilizada para triturar. Se comparó un rodillo con cuchillas contra un sistema de aspas giratorias. Se concluyó que la forma en la que se trituran desechos sólidos no tiene relevancia en el producto final del compostaje. Las diferencias residen en la durabilidad de cada tipo de sistema. (Hannon & Mason, 2003)

En 2008, se realizó un experimento en donde se produce compost con base a alimentos de ganadería y elementos generales de nutrición en animales. Esta investigación encontró que añadir trozos de papel a los desechos sólidos mejora la calidad del producto final del compostaje. (Mason, 2008)

En 2014, se realizó un estudio acerca de la viabilidad económica de la producción de compost por parte de las municipalidades en pueblos de Sri Lanka, Indonesia y China. El objetivo de la investigación fue analizar el costo beneficio de las distintas escalas de producción de compost. Se encontró que las productoras medianas y grandes de compost son las que son las que tienen mejor posibilidad de ser económicamente viables. (Pandyaswargo & Premakumara, 2014)

En 2014 se realizó una investigación en donde se comparó la calidad del compost realizado de manera industrial y casera. La investigación tuvo como objetivo dar un paso hacia la estabilidad del producto del compostaje, así como la persecución por la calidad. Se concluyó que se puede llegar a un producto de calidad siempre y cuando se realice bajo el procedimiento adecuado, respetando las proporciones de los distintos desechos. (Barrena y col., 2014)

Johansson en 2017 estudió la viabilidad de reutilizar los desperdicios sólidos encontrados en vertederos municipales una vez han sido destruidos. Se encontró que, para Inglaterra, solo un 8 por ciento de los desechos se pueden utilizar de manera inmediata. Para el resto de los desechos, se debe considerar un proceso previo a la reutilización. (Johansson y col., 2017)

En 2009 se realizó un estudio sobre el proceso de tratamiento de desechos orgánicos como combustible o fuente de energía por parte de investigadores del Diario Internacional de Energía con Hidrógeno. Se encontró que al compactar y triturar con una prensa hidráulica los distintos desechos, la energía específica se reduce. Otro factor importante encontrado que reduce la energía específica es la velocidad del rotor de trituración. (Luo y col., 2009)

El Diario Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública realizó una investigación en 2019 sobre el tratamiento de desechos orgánicos. Se encontró que la mala administración de residuos orgánicos tiene un impacto directo en la producción de gases de efecto invernadero. Se concluye que implementar un sistema puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso de transporte reducido y mejora en el proceso de tratamiento de agua de desecho. (Cecchi & Cavinato, 2019)

Justificación

Los desechos sólidos surgen a partir del hecho que la actividad humana consume recursos y en consecuencia una parte de estos no puede ser aprovechada. A través de los años, se ha concientizado sobre el manejo de los desechos sólidos; ya que inciden directamente en la producción de gases de efecto invernadero, así como la contaminación del espacio que rodea su almacenamiento. Globalmente se han fijado metas de reducción de desechos, así como su manejo adecuado. Guatemala no es la excepción y se ha comprometido mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenibles; en específico el 12.5, a reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

Los desechos orgánicos, los cuales representan un porcentaje importante dentro de los desechos sólidos; requieren un cuidado especial, debido que pueden presentar un proceso de descomposición si el nivel de humedad es elevado. La descomposición es la principal causa que los desechos orgánicos produzcan gases de efecto invernadero; por lo que, es deseable minimizar este efecto. Según el informe del Banco Mundial *What a Waste*, en promedio una persona produce 1 kg de desechos al día. En la Ciudad de Guatemala, la mayoría de los desechos sólidos se vierten en un relleno sanitario. (Kaza y col., 2018) Según el *Waste-Atlas*, a este vertedero llegan un aproximado de 3,200 toneladas diarias de desechos sólidos; siendo considerado, como uno de los 50 más grandes del mundo. (WasteAtlasPartnership, 2014) El estudio demostró también que 65 por ciento de los desechos en este vertedero son desechos orgánicos, 30 por ciento reciclables y 5 por ciento inertes. De los desechos orgánicos, se estima que únicamente un 4.5 por ciento se convierte en compost, según datos recopilados por el Centro de Estudios Urbanos y Regionales. (Martínez, 1996) La correcta producción de compost abre una oportunidad de aprovechamiento de los desechos orgánicos, atacando el problema de contaminación y teniendo un producto final como resultado.

El problema de investigación busca contribuir al proceso de tratamiento de los desechos orgánicos, específicamente ayudando a la producción de compost. La intención es que las familias guatemaltecas puedan aportar a su entorno mediante la preparación de sus desechos orgánicos como materia prima para la producción de compost. Esta investigación no pretende solventar el manejo de los desechos sólidos, sino que aportar de manera implícita con la

separación, así como el primer paso para el tratamiento de los desechos orgánicos.

4.1. Objetivo general

Diseñar un triturador del menor costo posible, que permita triturar y almacenar los desechos orgánicos producidos en un hogar en Guatemala, para su uso como materia para compost.

4.2. Objetivos específicos

- Determinar las características físicas y requisitos de fuerza para triturar los desechos orgánicos presentes en la canasta básica guatemalteca.
- Establecer los materiales adecuados para triturar desechos orgánicos que cumplan los requerimientos de fuerza al menor costo posible.
- Diseñar el sistema de trituración con base en el requerimiento de fuerza para triturar y los materiales establecidos para triturar.
- Especificar el costo de manufactura del triturador según los materiales y el diseño elegidos.
- Elaborar un prototipo para evaluar la calidad del producto final con base en la reducción de tamaño del desecho orgánico.

5.1. Características principales sobre el compostaje

"El compostaje es una solución favorable para el depósito de desechos orgánicos en el manejo de desechos urbanos" (Hettiarachchi y col., 2019, párr. 1)

El compostaje es una técnica por la cual se puede obtener un producto estable resultado de la oxidación biológica de elementos orgánicos, similar al proceso que ocurre en la tierra. (Jakubus, 2020) En esencia, es un conjunto de procesos metabólicos en donde mediante la presencia de oxígeno, los distintos microorganismos utilizan carbono y nitrógeno para producir su propia biomasa. (Roman y col., 2015)

La relación de nitrógeno y carbono es un parámetro comúnmente utilizado para evaluar la madurez del compost, ya que el proceso de descomposición avanza a medida que se pierde carbono, y con el tiempo, el contenido de nitrógeno se incrementa. Esto resulta en una relación de carbono y nitrógeno menor que al inicio del proceso. (Jakubus, 2020)

Utilizando los parámetros adecuados, el compostaje es una manera de transformar los desechos sólidos orgánicos de manera higiénica, evitando el riesgo de contaminación por su mal uso y aprovechándolos como herramienta para mejorar el crecimiento de las plantas. (Oliveira y col., 2017; Roman y col., 2015) Como parámetro general, el compost necesita 3 ingredientes: elementos que aporten carbono, elementos que aporten nitrógeno y humedad. (US EPA, 2013)

Los elementos caseros que se pueden utilizar para el compostaje son los siguientes:

- Frutas y verduras
- Cáscaras de huevo
- Filtros de café y café molido, bolsas de té

- Cascaras de nueces
- Papel periódico, cartón, papel
- Restos de jardinería, grama, plantas pequeñas
- Heno y paja
- Hojas de árboles
- Aserrín
- Trozos de madera
- Algodón y lana
- Cabello y pelo animal
- Cenizas de madera, no carbón

Fuente:(US EPA, 2013)

Las intenciones de este trabajo de investigación son tener un impacto sobre la característica física del tamaño de partícula de la materia prima para la producción de compost. El tamaño de partícula inicial juega un papel muy importante. "*La distribución de tamaño de partícula es un factor que afecta el desempeño de procesos biológicos como la digestión aeróbica o el compostaje.*"(Zhang y col., 2019)

Para el proceso de descomposición, el mismo ocurre principalmente en la superficie de las distintas partículas, donde el metabolismo aeróbico se beneficia de la difusión del oxígeno a través de la capa húmeda que cubre las partículas. Esto convierte a las partículas en un ambiente idóneo para el acceso de microorganismos y sus enzimas extracelulares. Las partículas pequeñas tienen más área superficial por unidad de masa o volumen, lo cual permite que la degradación ocurra más rápido. (Zhang y col., 2019)

En cuanto al rango adecuado del tamaño de partícula inicial para la producción correcta de compost se destaca lo siguiente:

"Se recomienda un tamaño de partícula de 1,3 a 5 cm, con el extremo inferior de esta escala adecuado para sistemas de aireación forzada, y el extremo superior para hileras y otros sistemas de aireación pasiva" (Zhang y col., 2019)

5.2. Situación en Guatemala

5.2.1. Desechos en Guatemala

En promedio una persona produce 1 kg de desechos al día. En la Ciudad de Guatemala, la mayoría de los desechos sólidos se vierten en un relleno sanitario, que se encuentra ubicado en la zona 3. (Kaza y col., 2018)

A este vertedero llegan un aproximado de 300,000 toneladas anuales de desechos sólidos; siendo considerado, como uno de los 50 vertederos más grandes del mundo. El estudio demostró también que 65 por ciento de los desechos en este vertedero son desechos orgánicos, 30 por ciento reciclables y 5 por ciento inertes. De los desechos orgánicos, se estima que únicamente un 4.5 por ciento se convierte en compost. (WasteAtlasPartnership, 2014)

5.2.2. Elementos compostables

En cuanto a los posibles desechos que pueden ser materia prima para el compostaje, se considerarán los que se encuentran en la canasta básica alimentaria, la cual se define como: "*... conjunto de alimentos que constituyen un mínimo necesario para satisfacer por lo menos las necesidades energéticas y proteínicas de una familia y que se ajustan, en la medida de lo posible, al patrón cultural, capacidad adquisitiva, así como la disponibilidad y precios de los alimentos a nivel local.*"(Instituto Nacional de Estadística, 2021, Pág.3, párr.1)

Los elementos de la canasta básica alimentaria (CBA) se muestran a continuación:

Cuadro 1: Elementos de la CBA

No.	Producto	No.	Producto
1	Arroz	18	Aguacates
2	Avena	19	Bananos
3	Pan Francés	20	Plátanos
4	Pan Dulce	21	Piñas
5	Pasta	22	Sandías
6	Tortilla de maíz	23	Tomate
7	Carne de res sin hueso	24	Güisquil
8	Carne de res con hueso	25	Cebolla Blanca
9	Carne de cerdo sin hueso	26	Papas
10	Carne de pollo	27	Hierbas
11	Embutidos	28	Frijol
12	Leche en Polvo	29	Azúcar
13	Leche Líquida	30	Preparación nutricional a base de maíz y soya
14	Queso Fresco	31	Sal
15	Crema Fresca	32	Sopas instantáneas
16	Huevos de Gallina	33	Café en grano o molido
17	Aceite Comestible	34	Aguas Gaseosas

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística, 2021)

5.3. Generalidades sobre trituradores

Los sistemas de trituración tienen un objetivo, el cual es "*Moler o desmenuzar una materia sólida, sin reducirla enteramente a polvo.*" («Real Academia Española», 2021)

Los trituradores se clasifican según su función y según los procesos mecánicos internos. Los procesos pueden incluir cortar, triturar, martillar y comprimir. En algunos casos, se incluyen sistemas de vibración o agitación para contribuir al proceso. Dependiendo del material a procesar, así también deberá variar la velocidad de funcionamiento. («WasteCare Corporation», 2013)

Dentro de los trituradores industriales, la clasificación más común es la siguiente:

- **Triturador de eje simple:** Utilizados comúnmente para reciclaje, triturando materiales en piezas de una a dos pulgadas, ideal para aplicaciones donde se requiere un tamaño final específico.
- **Triturador de doble eje:** Se utilizan para volúmenes altos y piezas finales de una a cinco pulgadas.
- **Triturador de molino de martillos horizontal o vertical:** Funcionan aplastando el material y fragmentándolo en piezas más pequeñas.
- **Amoladora:** Funcionan mediante abrasión o compresión, entregando piezas menores a media pulgada. Se asemejan a los trituradores de eje doble.
- **Granulador:** Convierten el material a granos, con el uso de un eje rotatorio con cuchillas encerrado en una cámara cerrada.
- **Cortadora:** Su objetivo es disminuir el tamaño de la materia. Existen las cortadoras de rodillos y las cortadoras rebobinadas.
- **Picadores:** Funcionan con un tambor rotatorio con múltiples cuchillas, capaz de convertir la materia en fragmentos muy pequeños. Una aplicación importante es la del reciclaje.

Fuente: («Industrial Quick Search», 2021)

Los componentes básicos de los trituradores industriales incluyen:

- **Rotor:** El rotor es a lo que están unidas las cuchillas.
- **Cuchillas:** Elementos que hacen el corte, su elección depende del elemento con el que estarán en contacto.
- **Carcasa:** La carcasa almacena el sistema de trituración y está hecha de metal por lo general.
- **Motor:** Operan a velocidades bajas para no esforzar en exceso el sistema, por lo que permite que trituren una gran variedad de materiales.

- **Sistema de accionamiento:** El sistema puede ser hidráulico o eléctrico.

- **Alimentadora:** Es la parte encargada de almacenar e ingresar la materia prima a la trituradora.

- **Proceso de agarre:** Es el encargado de agarrar la materia y hacer que pase por el triturador.

- **Sistemas de control:** Permite variar los parámetros de funcionamiento sin tener que abrir el mecanismo y modificarlo.

Fuente:(«Industrial Quick Search», 2021)

En cuanto a la utilización de los trituradores industriales para el tratamiento de desechos sólidos, muchas veces se requiere de más de un proceso para reducir toda la materia a un tamaño deseado. En plantas municipales, se utilizan por lo general trituradoras hidráulicas o molinos de bolas, en donde no se hace una separación de materiales previa. (Zhang y col., 2019)

Cuando se hace una separación de desechos entre orgánicos e inorgánicos, el uso de maquinaria puede variar cuando se busca reducir su tamaño. Para los desechos inorgánicos, la maquinaria depende del material a reducir, ya sea si es plástico, metal, llantas. En cuanto a los materiales orgánicos, la maquinaria a elegir depende del contenido de humedad que presenten.

Para poder analizar la efectividad del procesamiento de los desechos sólidos, es válido basarse en la distribución de tamaño de partícula (PSD), por sus siglas en inglés. Para determinar la distribución de tamaño de partícula de una muestra después de procesarla, se utiliza un agitador de tamiz. Este dispositivo separa una muestra con base a los tamaños de partículas por medio de tamices de distintos tamaños. La distribución de tamaño de partícula se puede expresar en términos de la distribución de peso presente en cada clase de tamaño definido. (Zhang y col., 2019)

Seguidamente, en el tratamiento de desechos a nivel municipal se utiliza distinta maquinaria dependiendo de la materia a procesar. En un estudio realizado sobre el procesamiento de desechos orgánicos, se determinó qué tipo de triturador es el mas conveniente cuando se desea un tamaño de partícula específico. Se encontró que un procesamiento de desechos con un triturador de eje rotatorio, en específico de doble eje, permite producir un patrón de distribución de partículas aproximadamente cercano al espaciamiento entre cuchillas. El triturador de doble eje, parece tener un espaciamiento óptimo en el rango de 12.5 a 25mm, produciendo una materia procesada con una distribución de tamaño entre 10 y 37.5mm. (Zhang y col., 2019)

Cabe resaltar que la materia procesada presentará una cantidad significativa de partículas más grandes y pequeñas que el espaciamiento entre cuchillas. (Zhang y col., 2019)

5.3.1. Transmisión de potencia en trituradores

Diseño de engranes plásticos

Los engranes plásticos han incrementado su uso debido al hecho que se pueden usar en una cantidad significativa de aplicaciones. Así mismo, su uso ha sido impulsado por nuevos desarrollos de tecnología de procesamiento y de materiales. De las características más llamativas de los engranes plásticos se puede destacar que son significativamente más baratos que los engranes de metal. También poseen ventaja en el proceso de fabricación, dado que se pueden maquinar o se pueden obtener mediante moldes. Los engranes plásticos por ser de materiales elásticos, son capaces de absorber y soportar de mejor manera los fenómenos de vibración. Así mismo, las tolerancias de los engranes plásticos son menos estrictas que las de los engranes metálicos. (SDP/SI, 2022)

Así como los engranes plásticos presentan ventajas sobre los metálicos, se tienen limitaciones que deben considerarse. La más importante es que por la naturaleza del material, los engranes plásticos no son capaces de soportar cargas excesivas. Tampoco son capaces de operar a temperaturas muy altas, ya que se presentan deformaciones, o a temperaturas muy bajas, que se puede llegar a presentar la fractura del material. (SDP/SI, 2022)

En cuanto a los engranes rectos y helicoidales, es común encontrar que el ángulo de presión es de 20 grados, el cual es el preferido por presentar la forma de dientes más resistente. Sin embargo, el valor del ángulo de presión siempre dependerá de la aplicación. (SDP/SI, 2022)

Para el proceso de diseño, es vital hacer una elección de módulo o diámetro de paso adecuado. Un módulo con un valor alto por lo general se asocia a dientes más grandes y resistentes. Si se considera un mismo paso diametral, entonces un módulo alto representa una cantidad baja de dientes. Si se reduce el módulo, entonces se presenta una cantidad de dientes mayor, con lo que el engrane presenta una mejor distribución de carga. Sin embargo, esto también se traduce en que es más probable que exista interferencia. (SDP/SI, 2022)

En cuanto a las dimensiones de los engranes, es suficiente contar con algunos parámetros iniciales, los cuales permiten hacer el cálculo de las propiedades más importantes de dichos engranes. Para el caso en donde se cuente con la relación de velocidades, módulo y distancia entre centros, las siguientes fórmulas se pueden utilizar para determinar las características de los engranes. (SDP/SI, 2022)

$$Z_1 + Z_2 = \frac{2a}{m}, Z_1 = \frac{i(Z_1 + Z_2)}{(i + 1)}, Z_2 = \frac{(Z_1 + Z_2)}{(i + 1)} \quad (1)$$

Donde,

Z_1, Z_2 : Cantidad de dientes de cada engrane.

a : Distancia entre centros (mm).

m : Módulo (mm).

i : Relación de velocidades.

$$x_n = \frac{(z_1 + z_2)(\operatorname{inv}\alpha_{wt} - \operatorname{inv}\alpha_t)}{(2\tan\alpha_n)} \quad , \quad y = \frac{a_x}{m_n} - \frac{(z_1 + z_2)}{2\cos\beta} \quad (2)$$

$$\alpha_t = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\alpha_n}{\cos\beta}\right) \quad , \quad \alpha_{wt} = \cos^{-1}\left(\frac{(z_1 + z_2)\cos\alpha_t}{(z_1 + z_2) + 2y\cos\beta}\right) \quad (3)$$

Donde,

α_t : Ángulo de presión radial.

α_{wt} : Ángulo de presión radial de trabajo.

y : Factor de incremento de distancia entre centros.

a_x : Distancia entre centros (mm).

m_n : Módulo normal (mm).

α_n : Ángulo de presión normal.

β : Ángulo de hélice.

$z_1 + z_2$: Suma de cantidad de dientes.

x_n : Coeficiente normal de cambio de perfil.

$$d = \frac{zm_n}{\cos\beta} \quad , \quad d_b = d\cos\alpha_t \quad , \quad h_{a1} = \frac{d_b}{\cos\alpha_{wt}} \quad , \quad h_{a2} = (1 + y - x_n)m_n \quad (4)$$

$$h = [2.25 + y - (x_{n1} + x_{n2})m_n] \quad , \quad d_a = d + 2h_{a2} \quad , \quad d_f = d_a - 2h \quad (5)$$

Donde,

d : Diámetro de paso (mm).

d_b : Diámetro base (mm).

h_{a1} : Diámetro de paso de trabajo (mm).

h_{a2} : Addendum (mm).

h : Profundidad total (mm).

d_a : Diámetro exterior (mm).

d_f : Diámetro raíz (mm).

Si se parte del torque aplicado en el piñón, junto con la relación de velocidades y el diámetro de paso correspondiente, entonces las condiciones de operación se pueden obtener mediante las siguientes fórmulas. (Company, 2022)

$$F_t = \frac{2000T}{d_w} \quad , \quad P = \frac{F_t v}{102} \quad , \quad v = \frac{d_w n}{19100} \quad (6)$$

Donde,

F_t : Fuerza tangencial en el círculo de paso (kgf).

T : Torque (kgf · m).

d_w : Diámetro de paso (mm).

v : Velocidad de operación del círculo de paso (m/s).

P : Potencia (kW).

n : Revoluciones por minuto.

Esfuerzo de flexión

La parte más importante de un engrane son sus dientes. La medida básica de la habilidad de un engrane de soportar carga es estimar su fuerza en los dientes. El esfuerzo de flexión para los engranes se puede calcular por medio de la guía de engranes plásticos de la GE (General Electric) por sus siglas en inglés. Para el esfuerzo de flexión, se asume que la carga se encuentra en la línea de paso. Para determinar que las dimensiones de los engranes son correctas, se comparará la fuerza tangencial permisible con la fuerza tangencial real en el círculo de paso. La fórmula para obtener la fuerza tangencial permisible se puede calcular con la ecuación de Lewis. La misma se muestra a continuación. (Company, 2022)

$$F = myb\sigma_b \quad (7)$$

Donde:

m : Módulo (mm)

y : Factor de forma en el punto de paso

b : Ancho de diente (mm)

σ_b : Esfuerzo de flexión permisible

El esfuerzo de flexión permisible debe tomar en cuenta los distintos factores que pudieran afectar el desempeño de los engranes, por lo que se puede estimar con la siguiente ecuación. (Company, 2022)

$$\sigma_b = \sigma'_b \frac{K_v K_t K_l K_m}{C_s} \quad (8)$$

Donde:

σ'_b : Esfuerzo de flexión máximo en operaciones ideales (kgf/mm^2)

K_v : Factor de velocidad

K_t : Factor de temperatura

K_l : Factor de lubricación

K_m : Factor de material

C_s : Factor de servicio

Esfuerzo de contacto

El siguiente aspecto por tomar en consideración para determinar si los engranes están adecuadamente diseñados, es comprobar el esfuerzo por contacto en la superficie. Este esfuerzo es resultado del movimiento relativo de cada uno de los engranes. Este esfuerzo puede resultar en fallas en la superficie incluso al desgaste y rompimiento. Para asegurar una vida satisfactoria, el engrane se debe diseñar de tal manera que el esfuerzo de contacto esté en el área permisible del límite de resistencia superficial del material. Para determinar el esfuerzo de contacto, el mismo se calcula mediante la siguiente ecuación. (Company, 2022)

$$S_c = \sqrt{\frac{F}{bd_1} \frac{u+1}{u}} \sqrt{\frac{1.4}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right) \sin 2\alpha}} \quad \left(\frac{kgf}{mm^2}\right) \quad (9)$$

Donde:

F : Fuerza tangencial en la superficie (kgf)

b : Ancho de diente (mm)

d_1 : Diámetro de paso del piñón

u : Relación de velocidades

E : Módulo de elasticidad del material (kgf/mm²)

La mejor manera de determinar un valor acertado del esfuerzo de contacto permisible es a través de pruebas a pares de engranes con las mismas dimensiones y funcionando bajo las condiciones de servicio. Sin embargo, este cálculo puede darle una idea al diseñador sobre qué tan esforzado estará en relación a la resistencia a la compresión pura del material, característica disponible para la mayoría de los casos. (Company, 2022)

Fuerzas resultantes en engranes helicoidales

Dada la presencia de un ángulo de hélice en los engranes helicoidales, su aplicación para la transmisión de potencia en ejes tiene como resultante una fuerza axial. Las distintas

fuerzas y sus magnitudes resultantes del uso de engranes se pueden calcular mediante las siguientes formulas. (SDP/SI, 2022)

$$F_u = F_1 \cos \beta, F_a = F_u \tan \beta, F_r = F_u \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (10)$$

Donde:

F_1 : Fuerza tangencial en la superficie del diente.

F_u : Subcomponente circular.

F_a : Fuerza axial.

F_r : Fuerza radial.

α_n : Ángulo de presión normal.

β : Ángulo de hélice.

Fabricación de engranes plásticos

En cuanto a la manufactura y tipo de material para los elementos que se imprimirán en 3D, se debe tomar en cuenta que la tecnología aditiva puede presentar distintas propiedades mecánicas en comparación a otros métodos de manufactura, dado el proceso por capas.

En cuanto a los engranes plásticos, los mismos se pueden fabricar por remoción de material, por medio de inyección o ya bien por impresión 3D. Los métodos más utilizados son los de remoción de material y el proceso de inyección. En cuanto a la remoción de material, la ventaja del método es el hecho que es relativamente sencillo cambiar las dimensiones de los productos fabricados. En caso contrario, la inyección está sujeta a la forma del molde. Ambos procesos se caracterizan por sus costos elevados asociados. La producción en masa hace uso del método de inyección. La impresión 3D se caracteriza por ser una manera barata y sencilla de formar elementos plásticos. Su mayor desventaja es el hecho que se puede utilizar un rango limitado de materiales. (Zortrax, 2017)

Dentro de los engranes impresos, se han hecho pruebas y se ha comprobado que la durabilidad y desempeño de los engranes se puede ver afectada por la temperatura de operación. (Kalin & Kupec, 2017) Otro aspecto que se ha estudiado es la rigidez de las piezas impresas en 3D, la cual se puede incrementar dramáticamente al agregar fibra de carbono al filamento. (Zhang y col., 2020)

Muchas de las pruebas que se han realizado sobre polímeros han sido pruebas estáticas, las cuales otorgan ciertas características mecánicas. Sin embargo, hace falta la utilización de nuevos métodos para determinar las propiedades de los materiales en situaciones dinámicas complejas tal y como el caso de los engranes plásticos impresos en 3D.

Recientemente se realizó un estudio en donde se estudia el desempeño de engranes plásticos de nylon, comparando los métodos de manufactura de inyección e impresión 3D. Se

evaluó el desempeño comparando el nylon 618, nylon 645, Onyx y el nylon Markforged. Se concluyó que la temperatura del engrane depende de la velocidad angular de operación así como la carga. Para cargas menores a 12Nm y 1000 rpm, el nylon 618 impreso presenta mejor desempeño que un engrane de nylon 6 inyectado por molde. En cuanto a las temperaturas de operación, la misma se incrementa hasta cierto punto en dependencia de las condiciones de operación y se mantiene aproximadamente constante. (Zhang y col., 2020)

Con base a la experimentación encontrada, se puede decir que, bajo ciertas condiciones, los engranes impresos pueden llegar a presentar iguales o hasta mejores desempeños en comparación a engranes inyectados, por lo que el uso del nylon 618 es una buena opción cuando se aplican torques medios a bajos. (Zhang y col., 2020)

Materiales utilizados para impresión 3D

La tecnología de impresión 3D y su importancia dentro del mundo de la manufactura ha evolucionado de manera significativa desde que fue inventada a principios de los años ochenta. La tecnología ha logrado posicionarse en los últimos años como una parte importante en la fabricación de prototipos y recientemente como una solución viable para su utilización como partes funcionales y su uso en producciones en serie. (HUBS, 2022)

Dentro de las razones principales para el uso de la tecnología de impresión 3D, se puede resaltar al tiempo de entrega, precio bajo, propiedades de los materiales, capacidad de producir geometrías complejas entre otras. (HUBS, 2022)

Dentro de las aplicaciones más comunes de la impresión 3D, la aplicación principal con el sesenta por ciento de las veces es la de fabricar prototipos. La siguiente aplicación con el diecisiete por ciento es la de fabricación de piezas específicas como piezas funcionales. Cabe resaltar que las principales industrias adoptando a la impresión 3D como método de fabricación de piezas funcionales son la industria de salud, industria aeroespacial, industria automotriz, industria de energía y la industria de bienes deportivos. Un once por ciento pertenece a la fabricación de piezas en serie como piezas funcionales. El resto pertenece a aplicaciones de fabricación de piezas artísticas y plantillas o accesorios. (HUBS, 2022)

En aplicaciones de bajo volumen de producción, la impresión 3D se ha caracterizado por ser la mejor opción. Si se considera el rango de producción menor a mil unidades, muchas industrias están adoptando esta forma de manufactura dadas sus características de personalización, bajo precio y manufactura rápida. Como ejemplo, en la industria de carreras de motocicletas, la impresión 3D ha sido vital para los ingenieros, permitiéndoles fabricar estructuras complejas que son ambas ligeras y robustas. (HUBS, 2022)

Ahora bien, dentro de los materiales utilizados para la impresión 3D, la elección es directamente dependiente de la aplicación para la cual se desea la manufactura de piezas. Según la encuesta realizada por el fabricante Protolabs, los materiales más utilizados sin tomar en cuenta la aplicación son: PLA, ABS, Resinas, Nylon, PETG entre otros. (HUBS, 2022) Cada material tiene distintas propiedades, las cuales se analizarán seguidamente.

El PLA es el material más popular para la impresión 3D. Esto se debe a su facilidad de impresión, la calidad superficial de las piezas y su rigidez. En comparación a materiales

como PETG y ABS, el PLA no es un material que presente una resistencia mecánica elevada. Esto hace que el PLA sea un material muy adecuado para la fabricación rápida de prototipos en donde se busque calidad de acabados. Dado que presenta una rigidez moderada y baja resistencia mecánica, el PLA se puede considerar como un material frágil al compararlo con otros materiales. El PLA es resistente a químicos, y para su fabricación despiden poco olor. Una desventaja fundamental del PLA es su baja resistencia a la temperatura ya que éste presenta deformaciones al llegar aproximadamente a los sesenta grados centígrados. (Redwood y col., 2017)

La amplia utilización del ABS reside principalmente en razones históricas. Este termoplástico ya se utilizaba antes de la iniciación de la tecnología aditiva. Por esta razón fue de los primeros materiales para la impresión 3D. Dado que se han desarrollado muchos otros materiales para impresión a lo largo de los años, la utilización del ABS se reduce a piezas pequeñas, piezas que se van a lijar después del proceso de fabricación y piezas con una resistencia a la temperatura ligeramente mayor que el PLA (80 grados centígrados aproximadamente). Actualmente, para la tecnología aditiva, el ABS resulta una opción complicada por las siguientes razones. Solo dentro del proceso de fabricación, el ABS emite olores y vapores fuertes, haciendo peligroso el estar presente al momento de la impresión. El ABS también tiende a encogerse una vez se enfría, haciendo muy complicada la fabricación de piezas medianas a grandes. Por otro lado, el ABS tiende a rajarse y a delaminarse, fenómeno que se da cuando las capas de la impresión se separan a causa de tensión interna al momento que la pieza se enfría. Para la fabricación de piezas que están sometidas a esfuerzos, el ABS es una opción totalmente errónea, y las alternativas pueden ser el uso de Nylon o PETG. El PETG es un termoplástico que presenta alta resistencia a la tracción y resistencia al impacto, aunado a esto el PETG no sufre delaminación, por lo que resulta en piezas más resistentes que las fabricadas con ABS. (Redwood y col., 2017)

En cuanto a la utilización del Nylon en la tecnología 3D, el Nylon se caracteriza por ser un material utilizado ampliamente en muchos ámbitos de manufactura. La flexibilidad y durabilidad del Nylon permite que se pueda usar para piezas impresas tal y como engranajes. Como característica particular, el Nylon es especialmente resistente a la fatiga y al desgaste, sobretodo en comparación a materiales de propiedades mecánicas resistentes tal y como el ABS. Tiene una resistencia al impacto alta y es útil para piezas que están en constante choque o posibles golpes. Asimismo, presenta una resistencia alta a la abrasión, en donde piezas móviles resisten el desgaste dado el bajo coeficiente de fricción. En términos de facilidad de impresión, el único problema con el Nylon es el hecho que absorbe humedad fácilmente cuando se forma una pieza, por lo que es importante cuidar las condiciones bajo las cuales se imprime. Otro aspecto a considerar es que el precio del Nylon en comparación a otros materiales de impresión tiende a ser más elevado. (Redwood y col., 2017)

Finalmente en cuanto al PETG, se puede decir que se ha convertido en uno de los materiales de impresión más versátiles, dado que es fácil de imprimir y presenta características de resistencia altas. El PETG es una modificación del termoplástico PET que se encuentra en una variedad amplia de aplicaciones. Este material ha sido modificado con Glycol, y permite que el PET presente menos fragilidad, más transparencia y una facilidad de procesamiento. El PETG es menos frágil que el PLA y se considera similar en rigidez al compararlo al ABS. Se considera también que dada la adhesión superior del PETG en comparación a otros materiales populares, este presenta una resistencia superior. Si se compara con el Nylon, el

PETG resiste en menor magnitud las aplicaciones de desgaste y de impacto, pero resulta un material ideal para estructuras resistentes y de acabados de calidad. Sus principales ventajas contra el Nylon son la facilidad de impresión y el precio del material. El PETG tiene el precio similar al PLA, ofreciendo características superiores. (Redwood y col., 2017)

Diseño de ejes

Para poder determinar un valor de resistencia a la fatiga que considere condiciones distintas a las encontradas en un laboratorio, se hace uso de la ecuación de Marin, la cual permite tomar en cuenta factores como la condición superficial, el tamaño, la carga, temperatura y otras condiciones pertinentes. La ecuación se muestra a continuación. (Budynas y col., 2012)

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (11)$$

Donde:

k_a : Factor de modificación por la condición superficial.

k_b : Factor de modificación por el tamaño.

k_c : Factor de modificación por la carga.

k_d : Factor de modificación por la temperatura.

k_e : Factor de confiabilidad.

k_f : Factor de modificación por efectos varios.

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

"Por lo general, el acero estirado en frío se usa para diámetros menores de 3 pulgadas" (Budynas y col., 2012, párr. 4, pág 345)

Para la determinación del diámetro necesario de un eje para condiciones específicas, es necesario el uso de una teoría de falla, así como el uso de un criterio de fallo. Una combinación conservadora de determinar el diámetro de un eje es el uso de la teoría de distorsión el criterio de falla de Goodman. La ecuación se resume a continuación. (Budynas y col., 2012)

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (12)$$

Donde,

n = Factor de seguridad.

Se = Resistencia a la fatiga.

Sut = Resistencia última a la tensión.

Kf = Factor de concentración de esfuerzo por flexión.

Kfs = Factor de concentración de esfuerzo por corte.

Ta = Torque alternante.

Tm = Torque medio.

Otra consideración importante para el diseño de ejes es la velocidad crítica. Esta es importante ya que a causa del movimiento, el eje puede presentar una deflexión, la cual puede incrementar sin limite, causando inestabilidad. Por esta razón se debe calcular la velocidad fundamental o velocidad crítica. (Budynas y col., 2012)

Para determinar la velocidad crítica, se puede utilizar la ecuación de Dunkerley, la cual es una manera conservadora de determinar la velocidad fundamental ya que la estimación resulta ser menor que lo que en realidad sucede. La ecuación se describe a continuación. (Budynas y col., 2012)

$$\frac{1}{w_1^2} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(w_{ii})^2} \quad (13)$$

Donde: w_1 = Velocidad Crítica w_{ii} = Velocidad Crítica del elemento ii.

La velocidad crítica de un elemento presente en un eje se puede describir de la siguiente manera:

$$\frac{1}{w_1^2} = m_1 \delta_{11} \quad (14)$$

Donde: w_1 = Velocidad Crítica. δ_{11} = Coeficiente de influencia. m = Masa.

El uso de coeficientes de influencia surge del hecho que el eje se puede considerar como un cuerpo elástico, y los coeficientes de influencia son las deflexiones transversales en la ubicación i de un eje, debida a una carga unitaria ubicada en j. El cálculo se muestra a continuación: (Budynas y col., 2012)

$$\delta_{ij} = \frac{b_j x_i}{6EI} (l^2 - b_j^2 - x_i^2) \quad x_i \leq a_i \quad (15)$$

$$\delta_{ij} = \frac{a_j (l - x_i)}{6EI} (2lx_i - a_j^2 - x_i^2) \quad x_i > a_i \quad (16)$$

5.4. Sistemas de almacenamiento de desechos orgánicos

En ciudades donde es posible desechar restos orgánicos en botes municipales, se utilizan botes del mismo material y dimensión que los destinados a desechos generales. La única diferencia es el color de la tapa con el objetivo de diferenciar a uno del otro. Sin embargo, por la naturaleza de los desechos orgánicos, y por la presencia de humedad en la intemperie, los desechos orgánicos inician con el proceso de degradación. Este proceso causa un olor considerablemente molesto y atrae una buena cantidad de insectos. El hecho de la humedad presente dentro de los contenedores de materia orgánica, hace necesario que el sistema de recolección no permita que los desechos permanezcan por más de una semana en el contenedor. Esto por la razón que los contaminantes producidos pueden ser dañinos para la salud. Se logró demostrar que el uso de un Bio Filtro para la ventilación de los contenedores permite que no se atraigan insectos y que se evite el escape de los gases con el exterior, por lo que el intervalo de recolección puede extenderse hasta dos semanas. (Mathys & Oeynhausen, 2008)

5.5. Requerimientos de fuerza para el corte de alimentos

El corte de los materiales agrícolas es una de las operaciones mas comunes que se llevan a cabo en procesos tecnológicos de agricultura, siendo aplicado durante la siembra, separación y los procesos subsecuentes del procesamiento de cultivos. Dentro de la operación del corte, se pueden distinguir dos etapas principales: la primera es el punto donde hay suficiente presión entre el material y el borde de la cuchilla, lo cual se traduce en que el material falla y existe el corte. La segunda etapa involucra el movimiento del elemento que corta el material. La energía necesaria para fracturar la comida está determinada por la estructura particular de cada alimento, dado que alimentos con más dureza absorben más energía. (Uche y col., 2018)

Para los estudios realizados sobre la resistencia mecánica de los alimentos, se trató en específico con verduras crudas, las cuales presentaban distintos niveles de humedad así como distintas dimensiones de diámetro. Se logró determinar que entre más grande es el diámetro del elemento a cortar, entonces más grande será la fuerza necesaria para su corte. Asimismo, la orientación del alimento a triturar determina si se necesita una fuerza mayor. Para el caso de los chiles pimientos, se encontró que si la estructura externa era la primera en recibir la fuerza en vez de la estructura interna, la fuerza para realizar el corte debe ser mayor. (Uche y col., 2018)

Para los alimentos triturados, se encontró que la mayor cantidad de fuerza necesaria se dio en el caso de cortar zanahoria. Se encontró que en dependencia del diámetro, así varía la cantidad de fuerza necesaria. Para el caso específico de la zanahoria, se encontró una relación que se comporta como una función de grado dos. Para la realización de este experimento, se tomaron muestras de la parte superior, media e inferior de las zanahorias. Se encontró que las fuerzas de corte más altas se encontraron en la parte media de las zanahorias, y las fuerzas mas bajas en los cortes realizados en la parte inferior de las zanahorias. Para un diámetro de 20 mm, se requirió como fuerza máxima 90.98 N. Para un diámetro de 26 mm, se requirió 137.55 N. Para un diámetro de 40 mm, se requirió 240 N. Con los datos obtenidos en esta prueba también se determinó la energía específica aproximada para cortar

los distintos alimentos. La energía más alta la presentó la zanahoria con 4.55 J, seguido del melón amargo 4.53 J y la cebolla 2.36 J. (Uche y col., 2018)

6.1. Definición de requisitos

Ver Cuadro 2.

6.2. Diseño

6.2.1. Dimensiones y elección de tipo de triturador

En cuanto a las dimensiones, se tomó como base el requerimiento de la capacidad volumétrica mínima. Por esta razón, y el hecho que el objetivo del triturador es ser utilizado en hogares, se decidió acoplar el triturador a un basurero de cocina. El basurero elegido tiene una capacidad volumétrica de 37 litros. Las dimensiones son de 260 milímetros de ancho, 360 milímetros de largo y 406 milímetros de alto. Si se convierte la cantidad de milímetros cúbicos a litros se obtiene una cantidad de 37 litros como capacidad volumétrica. Este tipo de basurero es estándar para basureros que se desean ubicar en oficinas o ya bien en gavetas de cocinas.

Dado que los elementos triturados deben poder ser utilizados para la fabricación de compost, entonces el triturador a elegir debe poder otorgar las dimensiones de desecho adecuadas para su objetivo. El requerimiento MT02 define un rango adecuado de tamaño de partícula. Como se observó en el marco teórico, al procesar distintos tipos de desecho, el triturador de doble eje permitió entregar desechos procesados en un rango de 1 a 3.7 cm. Este triturador entregó el rango de partículas descritas con una separación entre cuchilla y pared de 1.2 a 2.5 cm. Dado que esta configuración permite entregar tamaños de partícula dentro del rango deseado, entonces se tomó la decisión de diseñar un triturador de doble eje

Cuadro 2: Requisitos

División	Código	Descripción
Diseño	D01	El mecanismo de trituración se debe poder acoplar al sistema de almacenamiento.
	D02	El sistema de almacenamiento debe tener una capacidad volumétrica de al menos 30 litros.
Mecanismo de trituración	MT01	El mecanismo debe ser capaz de procesar los elementos compostables y que no se puedan podrir de la canasta básica guatemalteca (CBA) así como restos de jardinería, papel, trozos de madera pequeños, filtros de café, bolsas de té y cascaras de nueces.
	MT02	El producto final debe tener una distribución de tamaño de partícula entre 1.3 cm y 5 cm.
	MT03	La capacidad del triturador debe ser de 200 gramos por minuto en su rango mínimo.
	MT04	Las cuchillas del triturador deben de contar con una vida útil de 1 año, considerando un uso diario de 10 minutos.
	MT05	El triturador debe funcionar mediante el uso de una manivela accionada por el usuario.
Mantenimiento	M01	Las cuchillas del triturador deben ser intercambiables para cuando pierdan filo.
	M02	El acceso a los componentes se debe lograr con el uso de un desarmador.

Fuente: Elaboración propia.

con características similares a las presentadas anteriormente.

En cuanto a la dimensión de grosor de las cuchillas, se decidió manejar el mismo rango que el espaciamiento con el objetivo que la materia procesada sea de aproximadamente un tamaño similar en ancho y largo. El diámetro de las cuchillas para aplicaciones industriales varía entre 200 y 500 mm, sin embargo, se puede utilizar el tamaño que se desee dependiendo de la aplicación específica. (Wanrooe, 2018)

6.2.2. Geometría

El ensamble completo constará de tres partes principales: el basurero o contenedor, el triturador y el embudo.

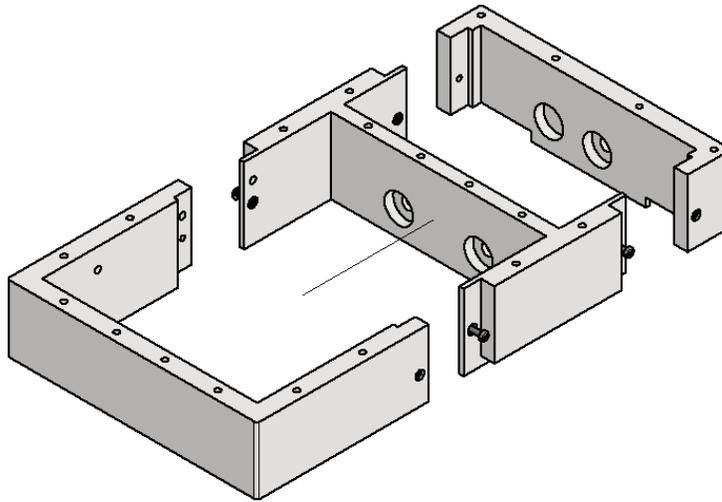
Para el triturador, se quiere que éste sea accionado por una manivela. Sin embargo, para cumplir con certeza la fuerza necesaria para triturar los distintos desechos, se realizará una reducción de una etapa. Por esta razón el triturador debe almacenar el mecanismo de

trituration, así como el mecanismo de reducción.

En cuanto al embudo, éste debe tener la funcionalidad de tapadera, así como de embudo. Se desea que el usuario no tenga acceso al sistema de trituración, por lo que la forma del embudo debe garantizar que una persona no pueda meter su mano al triturador.

En la Figura 1, se puede apreciar que la estructura del triturador irá acoplada al contenedor, la misma cuenta con dos secciones para almacenar distintos elementos del triturador. La parte con mayor tamaño alberga el triturador, la sección menor alberga la reducción.

Figura 1: Estructura acoplada

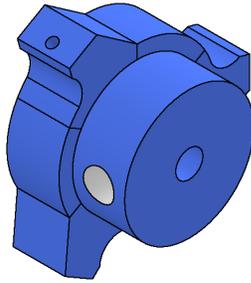


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al mecanismo de trituración, se determinó la geometría de las cuchillas. En la Figura 3 se puede observar que se partió de un esbozo general de una cuchilla, al cual se adhieren 3 cuchillas de metal. La intención es poder intercambiar las cuchillas y darles mantenimiento (como apretar la sujeción) sin la necesidad de desensamblar todo el mecanismo de trituración. El diámetro de giro de esta cuchilla es de 114.3 milímetros.

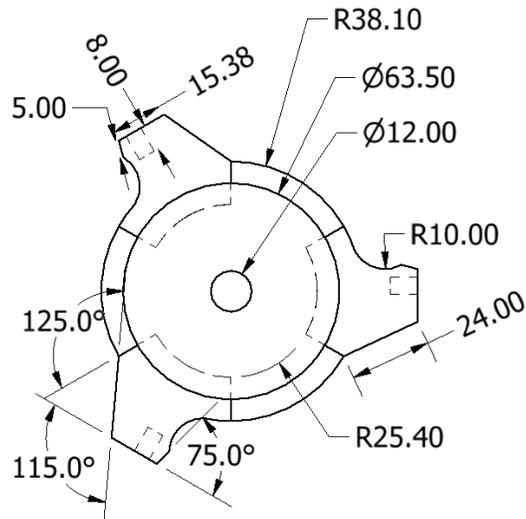
La razón detrás del diámetro de giro de 114.3 milímetros es permitir que las mismas puedan ser acopladas de manera correcta dada la restricción de tamaño dentro del acople del contenedor. La configuración presentada permite tener un espaciamiento entre cuchilla y pared de 18 mm, el cual está dentro del rango que se considera como aceptable como para que la operación del triturador procese los desechos y los reduzca a un tamaño adecuado. La sección de color azul, a la cual irán acopladas las cuchillas de metal se desea imprimir también en 3D. La sujeción de las piezas metálicas se desea realizar mediante tornillos de sujeción, los cuales serán introducidos en insertos redondos específicos para el uso en impresión 3D.

Figura 2: Base de cuchilla de triturador



Fuente: Elaboración propia.

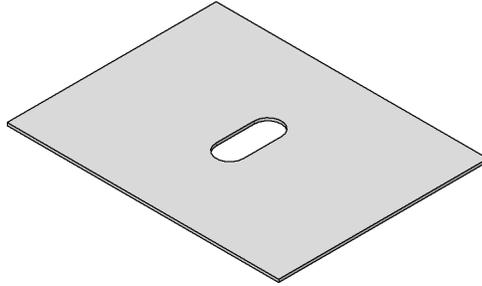
Figura 3: Base de cuchilla de triturador



Fuente: Elaboración propia.

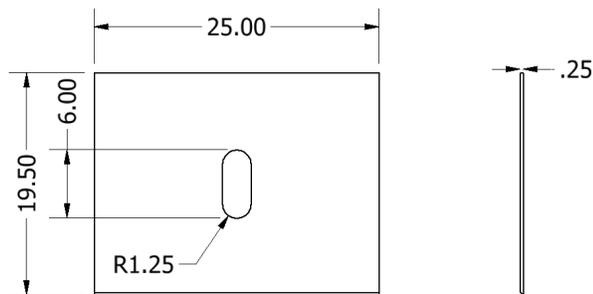
Las cuchillas a utilizar son repuestos de cuchillas encontrados en portacuchillas. Estos porta cuchillas son herramientas características para hacer cortes manuales a cartón, madera no gruesa e incluso tablayeso. El repuesto de cuchillas se encuentra en ferreterías y tienen un costo bajo. Las dimensiones generales de las cuchillas a utilizar se muestran a continuación.

Figura 4: Cuchilla



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5: Dimensiones de cuchilla



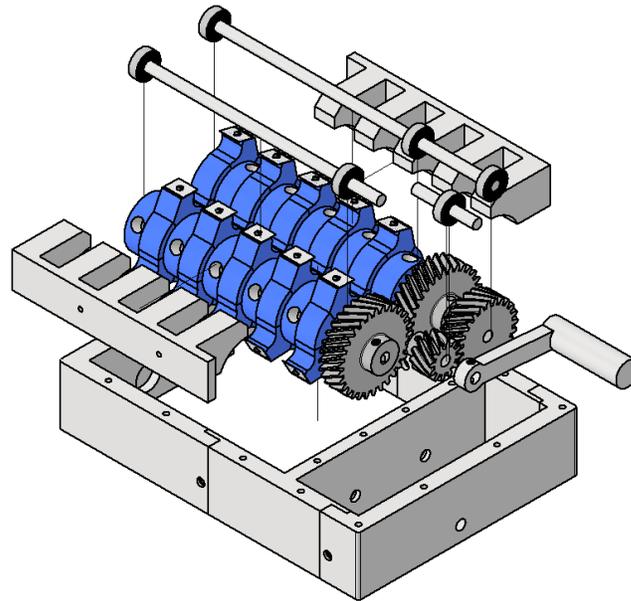
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la sujeción de la cuchilla al eje, se busca fabricar la pieza de la cuchilla con un complemento que cumplirá dos funciones, como se puede apreciar en la Figura 2. La primera función, es la de ser un separador entre cuchillas. La segunda función, es la de permitir sujetar la cuchilla al eje. De manera similar a la sujeción de las cuchillas, se desea utilizar insertos dentados en el orificio pequeño del separador. La sujeción estará a cargo de un tornillo de fijación.

6.2.3. Funcionamiento del triturador

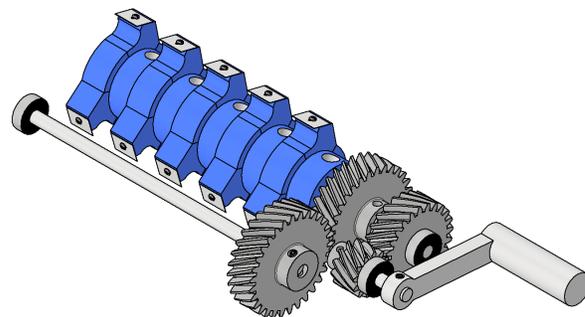
En cuanto al funcionamiento, se desea que el mecanismo sea accionado por medio de una manivela, la cual sujetará el usuario. La manivela accionará a los engranes de reducción de una etapa, accionando seguidamente a los engranes que permiten un movimiento de revoluciones idénticas en sentidos opuestos. El mecanismo de trituración consta de cinco cuchillas por cada lado. Las siguientes figuras ayudan a ilustrar el diseño.

Figura 6: Ensamble triturador y reducción



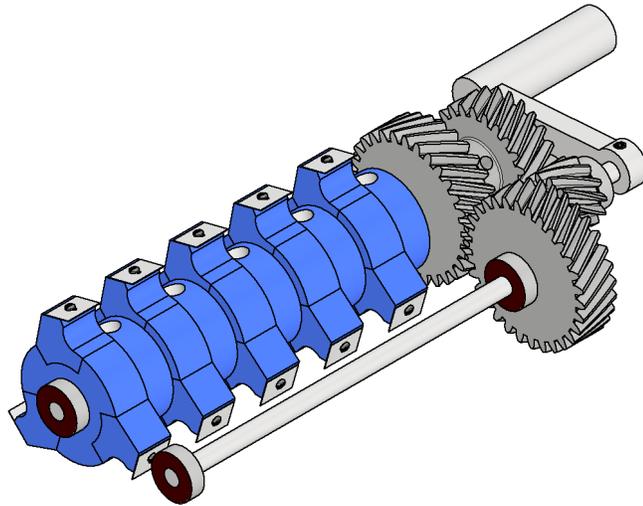
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7: Detalle de distribución en triturador



Fuente: Elaboración propia.

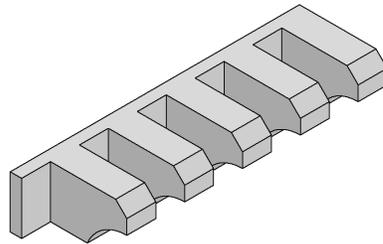
Figura 8: Detalle opuesto de distribución en triturador



Fuente: Elaboración propia.

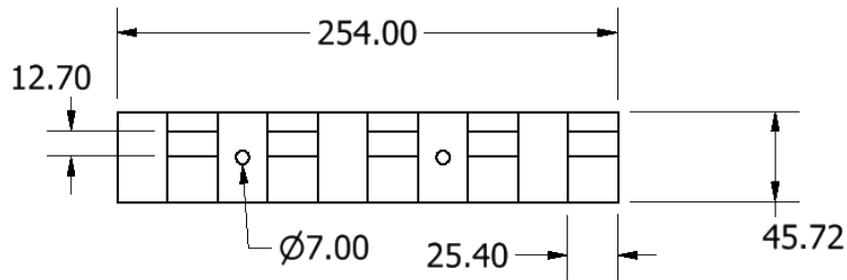
Como se puede apreciar en las figuras 7 y 8, el ensamble del triturador también cuenta con espaciadores. Estos tienen la forma que se muestra en la Figura 9.

Figura 9: Espaciador



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10: Dimensiones generales en milímetros de espaciador



Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de estos espaciadores es direccionar los desechos que ingresen al triturador hacia las cuchillas. Por esta razón, los mismos no estarán sujetos a cargas, por lo que su sujeción se hará mediante tornillos junto con el acople del triturador. La forma semi circular que se presenta tiene el propósito de acoplarse a los separadores, de manera que los desechos no puedan tener otra dirección que no sea la de las cuchillas. Para la fabricación de estas piezas, se desea hacerlo mediante la impresión 3D de las mismas.

6.2.4. Material de fabricación y proceso de manufactura

En cuanto al proceso general de fabricación, se determinó en las secciones anteriores que la impresión en 3D es la mejor opción para este proyecto en específico. Las razones que fundamentan esta decisión son que este proceso de manufactura permite fabricar piezas funcionales en un marco de tiempo reducido y que a la vez permiten cumplir los requerimientos bajo los cuales se están fabricando. Dado que es una fabricación que se puede considerar personalizada, el costo de imprimir una pieza en 3D es bastante menor si se compara al proceso de fabricación de otros plásticos. Si se hace por medio de moldes, el costo incluiría el diseño y fabricación de un molde, así como el uso de una extrusora de plástico. Esto resultaría óptimo para la fabricación masiva de piezas. Sin embargo, dado que el proyecto se trata de fabricación de piezas en un volumen bajo de producción, la impresión 3D resalta como mejor opción. La razón final es el hecho que los materiales que se pueden utilizar hoy en día para la impresión 3D pueden entregar piezas muy resistentes siempre y cuando se haga la elección correcta de material dadas las condiciones de operación y la cantidad de uso que se desea dar.

Dentro de las piezas que se deben fabricar para este proyecto, se puede hacer una clasificación de piezas que deben estar en movimiento y piezas que no. Las piezas que deben estar en movimiento son: manivela, engranes y bases de cuchillas. Dentro de esta clasificación de movimiento, únicamente los pares de engranes son los que deben soportar el desgaste como resultado de la fricción entre piezas. Por esta razón, los pares de engranes deberán ser de Nylon, dada su gran resistencia al desgaste por el coeficiente bajo de fricción. Aunado a esto, el Nylon permite fabricar piezas de altas propiedades mecánicas, haciéndolo el material idóneo para la impresión de engranes.

Ahora bien, en cuanto al resto de piezas en movimiento y las piezas que funcionan como estructura, es deseable que sean fabricadas de un material que entregue piezas resistentes. El problema principal de utilizar Nylon para las demás piezas es el costo. A la fecha de realización de este proyecto, un rollo de Nylon para impresión 3D tiene un costo de cuatrocientos ochenta quetzales. (Co., 2022) Si se considera el parámetro de propiedades mecánicas resistentes y el costo bajo, se puede considerar el ABS o el PETG como alternativas viables al Nylon. Ahora bien, en cuanto al ABS, se debe tomar en cuenta que algunas de las piezas estructurales que se deben imprimir tienen dimensiones que se puede considerar de tamaño mediano. El ABS tiene la limitación de ser un material con un proceso de impresión complicado y que no se puede garantizar que la adhesión entre capas sea la correcta. Por esta razón, se utilizará como material de fabricación para las otras piezas al PETG, dado que ofrece un proceso de impresión simple, propiedades mecánicas resistentes, acabados superficiales de calidad y un precio bajo. A la fecha de realización de este proyecto, un rollo de PETG tiene un valor de ciento setenta quetzales, lo cual es una fracción del precio de un rollo de peso idéntico de Nylon. (Co., 2022)

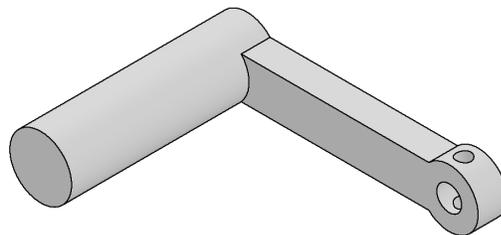
6.3. Cálculos

6.3.1. Engranajes de reducción helicoidales

Los engranes de reducción en este proyecto juegan el papel de transmitir la potencia desde la manivela que se mueve gracias al usuario, hasta el eje que realiza la acción de triturar. Como se estableció en la sección de diseño, el triturador a realizar es un triturador de doble eje. Como característica de este tipo de eje, el mismo funciona a revoluciones entre 12 y 15 por minuto. Por esta razón, las revoluciones de la reducción deben tener una salida en el rango descrito.

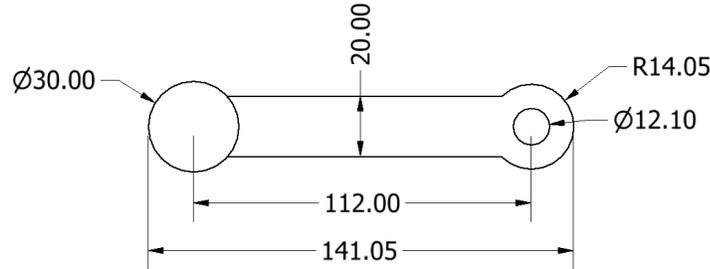
En cuanto a las características de la entrada de la reducción, se pretende que una persona mediante una manivela sea capaz de accionar todo el mecanismo. Las dimensiones generales de la manivela a utilizar se muestran en la siguiente figura.

Figura 11: Manivela



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12: Dimensiones generales en milímetros de manivela



Fuente: Elaboración propia.

Como punto de partida, es necesario determinar la fuerza que una persona puede ejercer sobre la manivela tomando en cuenta las posibles condiciones en las que se encontrará al realizar el movimiento. Con base al Centro Canadiense de Seguridad y Salud Ocupacional, el límite de fuerza vertical que se puede ejercer a un objeto desde una altura de aproximadamente el codo es de 290 N. Sin embargo, no se puede demandar que la persona realice esta fuerza, por lo que se determinó que se utilizará solo el 45 por ciento de esta fuerza para accionar el triturador. (Government of Canada, 2017)

El objetivo es que los ejes del triturador se muevan a una velocidad angular de aproximadamente 15 rpm. Por esta razón se determinó que el usuario debe mover la manivela a aproximadamente 30 rpm, lo cual representa una vuelta cada 2 segundos. Esto con motivo que la utilización del triturador resulte como una tarea no agotante y que la trituración de desechos no requiera una cantidad elevada de tiempo.

Dentro de los distintos tipos de engranes utilizados para la transmisión de potencia entre ejes paralelos, se puede mencionar el uso de engranes rectos y engranes helicoidales. Para esta ocasión, los engranes helicoidales son la opción por elegir, ya que presentan las siguientes ventajas sobre los engranes rectos: la resistencia de los dientes es mayor ya que presentan una base del diente elongada, la razón de contacto se incrementa debido a la superposición axial de los dientes. Por estas razones, tienden a tener una mayor capacidad de carga que los engranes rectos del mismo tamaño. Para el cálculo de las dimensiones de los engranes de la parte de reducción, se determinó que los mismos se fabricarán por medio de impresión 3D. Esto representa una ventaja sobre los engranes de metal principalmente al analizar los costos asociados. Como se dijo con anterioridad, la relación de este par de engranes debe ser de 2, asumiendo que el usuario logra entregar una velocidad angular de aproximadamente 30 rpm.

Para iniciar con el diseño de los engranes se utilizó la distancia entre centros, la cual se definió con base a las dimensiones de la estructura que albergará el triturador y para el caso de los engranes de reducción, se tomó en cuenta la ubicación deseada para el acople de la manivela. El valor de esta distancia entre centros es de 50.8 milímetros.

Seguidamente, se utilizará un ángulo de presión de 20 grados, ya que presenta una forma de diente que es más resistente en comparación a los distintos ángulos de presión utilizados

en engranes plásticos. También se determinó que se debe hacer uso de un ángulo de hélice de 30 grados. La variación del ángulo de hélice permite corregir errores en la distancia entre centros sin cambiar la relación de velocidad entre ejes paralelos.

En cuanto al módulo de los engranes, entre más pequeño es el módulo, entonces la carga entre los engranes se distribuye de mejor forma. Sin embargo, entre más pequeños los dientes del engrane, se está sujeto a más riesgo por error en la fabricación y puede resultar en que los engranes tengan un mayor esfuerzo.

De manera arbitraria, se utilizará un módulo de 3, y como se dijo anteriormente se desea una relación de velocidades de 2 a 1. Tomando en cuenta el módulo elegido, la relación de velocidades y la distancia entre centros se determina que el número de dientes para el piñón y la corona deben ser de 12 y 24 respectivamente con las formulas en (3).

Para obtener las distintas características de los engranes que se muestran en la siguiente tabla, se partió de las características de módulo, relación de velocidades y distancia entre centros. Las fórmulas utilizadas para determinar las demás características son (4), (5), (6) y (7).

Con base en las características encontradas las dimensiones de los engranes se muestran a continuación.

Cuadro 3: Dimensiones de engranes de reducción

No.	Característica	Símbolo	Piñón	Corona	Dimensional
1	Módulo normal	m_n		3	
2	Ángulo de presión normal	α_n		20	grados
3	Ángulo de hélice	β		30	grados
4	# Dientes	z	12	24	
5	Ángulo de presión radial	α_t		22.80	grados
6	Coef. Normal de cambio de perfil	x_{n1}, x_{n2}	0	0	
7	Ángulo de presión radial de trabajo	α_{wt}		22.796	
8	Factor de incremento de distancia	y		0	
9	Distancia entre centros	a_x		50.8	mm
10	Diámetro estándar de paso	d	41.569	83.138	mm
11	Diámetro de base	d_b	38.322	76.645	mm
12	Diámetro de paso de trabajo	h_{a1}	41.569	83.138	mm
13	Addendum	h_{a2}	3.000	3.000	mm
14	Profundidad total	h		6.750	mm
15	Diámetro exterior	d_a	47.569	89.138	mm
16	Diámetro de la base	d_f	34.069	75.638	mm
17	Razón de contacto radial	ϵ_a		1.9755	
18	Ancho	b		25.4	mm

Fuente : Elaboración propia.

Para obtener las características de operación se tomó como base la velocidad angular, el torque y las dimensiones encontradas para los engranes. Se partió del torque aplicado en el eje del piñón, ya que ese eje está accionado por la manivela. Con base a la fuerza tangencial

en el círculo de paso y las dimensiones preliminares de los engranes se puede determinar el torque en la corona, obteniendo así las características descritas en la tabla anterior. Los datos se obtuvieron con base en las fórmulas en (8).

Las características obtenidas se muestran a continuación.

Cuadro 4: Características de operación de engranes de reducción

Característica	Símbolo	Piñón	Corona	Dimensional
Velocidad de operación del círculo de paso	v	0.065	0.065	m/s
Diámetro de paso	dw	41.569	83.138	mm
RPM	n	30.000	15.000	rpm
Fuerza tangencial en el círculo de paso	Ft	39.880	39.880	kgf
Potencia	P	0.026	0.026	kw
Torque	T	0.829	1.658	kgf m

Fuente : Elaboración propia.

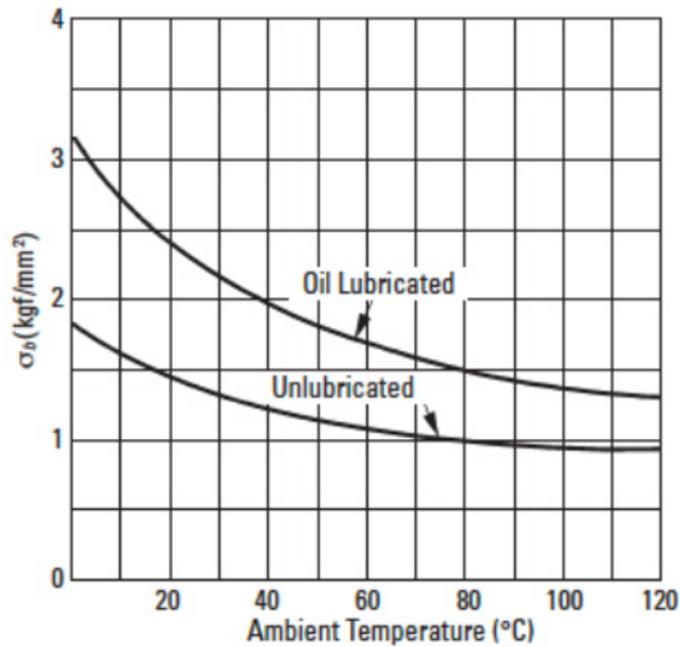
Esfuerzo de flexión

Para la determinación adecuada del esfuerzo de flexión se utilizará el método descrito en el marco teórico. Se desea aclarar que las ecuaciones descritas son utilizadas para engranes plásticos que se fabrican por medio de moldes. Sin embargo, para este proyecto se fabricarán los engranes por medio de la tecnología aditiva en impresión 3D. Dado que los procesos de fabricación son diferentes y a falta de un estándar internacional para el diseño de engranes impresos en 3D, se propone agregar un factor que incluya el proceso de manufactura. Este factor debe tomar en consideración el hecho que los engranes impresos se fabrican por capas, afectando en su desempeño. El factor por agregar se le añadirá el subíndice F. La ecuación modificada se muestra a continuación.

$$\sigma_b = \sigma'_b \frac{K_v K_t K_l K_m K_F}{C_s} \quad (17)$$

Como primer punto, se debe determinar el valor de la resistencia a la flexión en condiciones ideales para el material elegido. Como se determinó en la etapa de diseño, se hará uso de nylon 618 para impresión 3D. A falta de un valor definido para este material, se tomará como referencia el uso de Nylon MC901, el cual se utiliza para la manufactura de engranes plásticos por medio de moldeo. La siguiente figura expresa el esfuerzo de flexión permisible, el cual se puede utilizar directamente para el cálculo de la ecuación de Lewis. Sin embargo, para tomar en cuenta el cambio de material se utilizará como el esfuerzo permisible en condiciones ideales.

Figura 13: Resistencia a la flexión en condiciones ideales



Fuente: (SDP/SI, 2022)

Dado que se espera que la temperatura ambiente se encuentre alrededor de los 20 grados centígrados, y que los engranes no contarán con lubricación, el valor del esfuerzo de flexión en condiciones normales es de 1.5 kg/mm².

Siguiendo con el factor de velocidad, dado que se considera el par de engranes sin lubricación y que la velocidad en la línea de paso es de 0.065 m/s entonces se puede considerar el factor como la unidad según la siguiente figura.

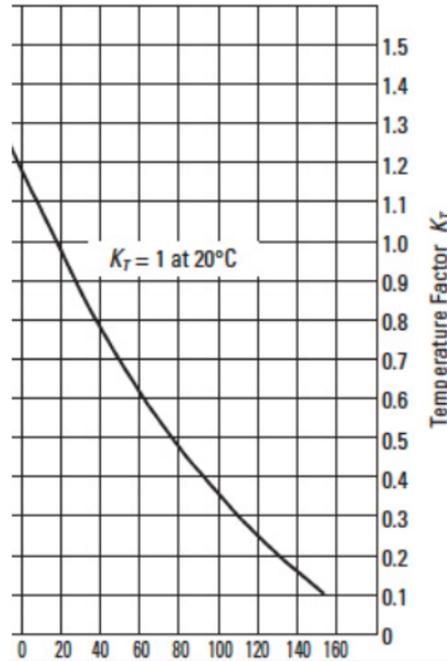
Figura 14: Factor de velocidad

Lubrication	Tangential Speed (m/sec)	Factor K_v
Lubricated	Under 12	1.0
	Over 12	0.85
Unlubricated	Under 5	1.0
	Over 5	0.7

Fuente: (SDP/SI, 2022)

Seguidamente, en cuanto al factor de temperatura, dadas las cargas y el tiempo definido para la operación del triturador, se espera que los engranes incrementen su temperatura en un máximo de 5 grados. Si se asume que la temperatura ambiente es de 20 grados, entonces según la siguiente figura el factor de temperatura debe tener un valor de 0.9.

Figura 15: Factor de temperatura



Fuente: (SDP/SI, 2022)

En cuanto al factor de lubricación, se tomará como la unidad, dado que no se espera que se aplique lubricante de manera constante.

Seguidamente con el factor del material, éste considera el efecto de conjugar dos engranes de distintos materiales. Dado que se espera que se trabaje con el mismo material para ambos engranes, el valor de este factor debe ser de 0.75, ya que se espera que los engranes sufran más por la elevación de temperatura entre ellos. En cuanto al factor introducido por efectos del proceso de manufactura, se determinó un valor arbitrario de 0.85, dado que el proceso de manufactura por adición de material se realiza por medio de capas.

Finalmente, en cuanto al factor de servicio, dado que se espera que se utilice el triturador por aproximadamente 10 minutos al día y con una operación de bajo impacto, el valor del factor de servicio se considera como 0.8 según la siguiente tabla.

Figura 16: Factor de servicio

Types of Load	Daily Operating Hours			
	24 hrs. / day	8-10 hrs. / day	3 hrs. / day	0.5 hrs. / day
Uniform Load	1.25	1.00	0.80	0.50
Light Impact	1.50	1.25	1.00	0.80
Medium impact	1.75	1.50	1.25	1.00
Heavy Impact	2.00	1.75	1.50	1.25

Fuente: (SDP/SI, 2022)

Ahora bien, para determinar la fuerza tangencial permisible únicamente se requiere el factor de forma de Lewis. Dado que se está trabajando con engranes helicoidales, se debe determinar el valor equivalente de cantidad de dientes de un engrane recto, el cual se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$z_v = \frac{z}{\cos^3 \beta} \quad (18)$$

Donde:

z_v : Cantidad de dientes equivalente

z : Cantidad de dientes del engrane helicoidal

β : Ángulo de hélice

Para el caso de este par de engranes, los valores equivalentes serían de 18 y 36 engranes respectivamente. Con base en la siguiente figura, el factor de forma de Lewis se obtiene con base en el número de dientes.

Figura 17: Factor de forma de Lewis

Number of Teeth	Form Factor		
	14.5°	20° Standard Tooth	20° Stub Tooth
12	0.355	0.415	0.496
14	0.399	0.468	0.540
16	0.430	0.503	0.578
18	0.458	0.522	0.603
20	0.480	0.544	0.628
22	0.496	0.559	0.648
24	0.509	0.572	0.664
26	0.522	0.588	0.678
28	0.535	0.597	0.688
30	0.540	0.606	0.698
34	0.553	0.628	0.714
38	0.565	0.651	0.729
40	0.569	0.657	0.733
50	0.588	0.694	0.757
60	0.604	0.713	0.774
75	0.613	0.735	0.792
100	0.622	0.757	0.808
150	0.635	0.779	0.830
300	0.650	0.801	0.855
Rack	0.660	0.823	0.881

Fuente: (SDP/SI, 2022)

Con base en lo presentado anteriormente, en el siguiente cuadro se puede observar los distintos parámetros obtenidos para ambos engranes.

Cuadro 5: Características de engranes de reducción

Característica	Símbolo	Piñon	Corona	Dimensional
Módulo	m	3	3	mm
Factor de forma de Lewis	y	0.522	0.628	
Ancho de Diente	b	25.4	25.4	mm
Esfuerzo de flexión permisible	σ_b	1.076	1.076	kg/mm ²
Fuerza tangencial permisible	Ft lim	42.791	51.480	kgf

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la fuerza tangencial en la línea de paso es de 39 kgf. Esta es menor que la fuerza permisible dadas las características de los engranes. Por esta razón, se puede decir que las dimensiones de los engranes son satisfactorias.

Esfuerzo de contacto

Tal y como se describió en la sección del marco teórico, el siguiente paso es determinar el esfuerzo de contacto al que se están sometiendo los engranes. El módulo de elasticidad para el nylon es de 149.9 kgf/mm². (Matweb, 2022) Con base a la fuerza tangencial que ocurre en la línea de paso de los engranes y las características de dimensión y operación, el valor del esfuerzo por contacto se muestra a continuación.

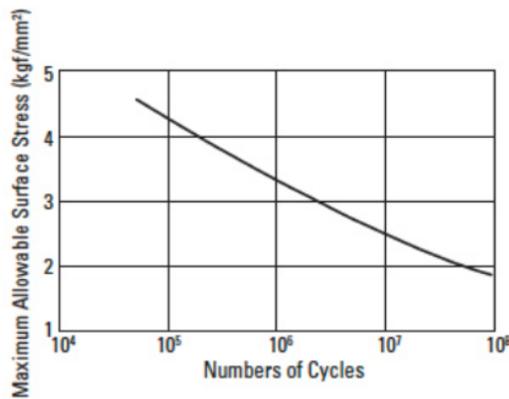
Cuadro 6: Características de engranes de reducción

Característica	Símbolo	Valor	Dimensional
Esfuerzo de contacto	Sc	3.041	kgf/mm ²
Fuerza tangencial	F	39.880	kgf
Ancho de diente	b	25.4	mm
Diámetro de paso del piñón	d1	41.569	mm
Relación de velocidades	u	2	
Módulo de elasticidad	E	149.9	kgf/mm ²
Ángulo de presión	α	20	grados

Fuente: Elaboración propia.

A manera de comparación, se puede observar mediante la siguiente figura que el esfuerzo permisible de contacto para engranes plásticos manufacturados por medio de moldeo y de material Nylon MC901, depende de la cantidad de ciclos a someter al par de engranes. La siguiente figura se basa en un par de engranes de módulo 2, funcionando a una velocidad tangencial de 2 m/s.

Figura 18: Esfuerzo de contacto permisible



Fuente: (SDP/SI, 2022)

Tomando en consideración que la capacidad de soportar el esfuerzo por contacto proviene del bajo coeficiente de fricción del material, entonces se puede hacer una referencia cercana a la capacidad de esfuerzo de contacto de los engranes diseñados. Como se puede ver en la figura 18, un esfuerzo de 3 kgf/mm² permite una vida de los engranes de un valor por encima del millón de ciclos. Tomando en consideración que el uso del triturador se asume como bajo y que el costo de reemplazar los engranes representaría un costo bajo también, entonces se puede asumir que el valor del esfuerzo de contacto es aceptable para las condiciones de diseño.

6.3.2. Engranes de acción helicoidales

En cuanto a los engranes de accionamiento, se desea que funcionen de manera conjunta, con tal de transmitir el torque de salida de los engranes de reducción hacia los ejes del triturador. Por esta razón, se utilizó la misma cantidad de dientes para ambos engranes y se determinó utilizar un módulo de 3, con el objetivo de utilizar dientes lo suficientemente gruesos como para resistir las cargas. Para este par de engranes existe la restricción de una distancia entre centros. Esta distancia proviene de la distancia necesaria entre los ejes de trituración, tomando en consideración el diámetro de las cuchillas así como las dimensiones de los espaciadores. Para los engranes de accionamiento, la distancia entre centros debe ser de 88.9 milímetros.

Con base al módulo elegido de 3, una distancia entre centros de 88.9 milímetros y una relación de velocidades de 1, la cantidad de dientes para ambos engranes es de 30. El siguiente procedimiento es el mismo procedimiento utilizado para el cálculo de las dimensiones de los engranes de reducción. Las dimensiones encontradas para los engranes de accionamiento se muestran a continuación.

Cuadro 7: Dimensiones de engranes de acción

No.	Característica	Símbolo	Piñón	Corona	Dimensional
1	Módulo normal	mn	3		
2	Ángulo de presión normal	α_n	20		
3	Ángulo de hélice	β	30		
4	# Dientes	z	30	30	
5	Ángulo de presión radial	α_t	22.80		grados
6	Coef. Normal de cambio de perfil	xn1,xn2	0.00000	0	
7	Ángulo de presión radial de trabajo	α_{wt}	22.796		grados
8	Factor de incremento de distancia	y	0.000		
9	Distancia entre centros	ax	88.9		mm
10	Diámetro estándar de paso	d	103.923	103.923	mm
11	Diámetro de base	db	95.806	95.806	mm
12	Diámetro de paso de trabajo	ha1	103.923	103.923	mm
13	Addendum	ha2	3.000	3.000	mm
14	Profundidad total	h	6.750		mm
15	Diámetro exterior	da	109.923	109.923	mm
16	Diámetro de la base	df	96.423	96.423	mm
17	Razón de contacto radial	ϵ_a	2.2383		
18	Ancho	b	25.4		mm

Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones de operación siguen el mismo procedimiento que los engranes de reducción. Las condiciones se muestran a continuación.

Cuadro 8: Características de operación de engranes de acción

Característica	Símbolo	Piñón	Corona	Dimensional
Velocidad de operación del círculo de paso	v	0.082	0.082	m/s
Diámetro de paso	dw	103.923	103.923	mm
RPM	n	15.000	15.000	rpm
Fuerza tangencial en el círculo de paso	Ft	31.908	31.908	kgf
Potencia	P	0.026	0.026	kw
Torque	T	1.658	1.658	kgf m

Fuente: Elaboración propia.

Esfuerzo de flexión

En cuanto al esfuerzo de flexión, el cambio necesario en comparación a los engranes de reducción se debe a el cambio en la cantidad equivalente de dientes para determinar el factor de forma de Lewis. Los resultados obtenidos en cuanto al esfuerzo de flexión se muestran a continuación.

Cuadro 9: Características de operación de engranes de acción

Característica	Símbolo	Piñón	Corona	Dimensional
Módulo	m	3	3	mm
Factor de forma de Lewis	y	0.6792	0.6792	
Ancho de Diente	b	25.4	25.4	mm
Esfuerzo de flexión permisible	σ_b	1.076	1.076	kg/mm ²
Fuerza tangencial permisible	Ft lim	55.677	55.677	kgf

Fuente: Elaboración propia.

Dado que la fuerza tangencial permisible en los engranes es bastante superior a la fuerza tangencial de operación, se puede decir que los engranes tienen las dimensionales adecuadas para soportar los esfuerzos por flexión en los dientes.

Esfuerzo de contacto

El cambio necesario para la determinación del esfuerzo de contacto en los engranes de acción fue el de ajustar la relación de velocidades; la cual para este caso es de 1. El resultado obtenido del esfuerzo de contacto se muestra a continuación.

Cuadro 10: Características de esfuerzo de contacto de engranes de acción

Característica	Símbolo	Valor	Dimensional
Esfuerzo de contacto	Sc	1.987	kgf/mm ²
Fuerza tangencial	F	31.908	kgf
Ancho de diente	b	25.4	mm
Diámetro de paso del piñón	d1	103.923	mm
Relación de velocidades	u	1	
Módulo de elasticidad	E	149.9	kgf/mm ²
Ángulo de presión	α	20	grados

Fuente: Elaboración propia.

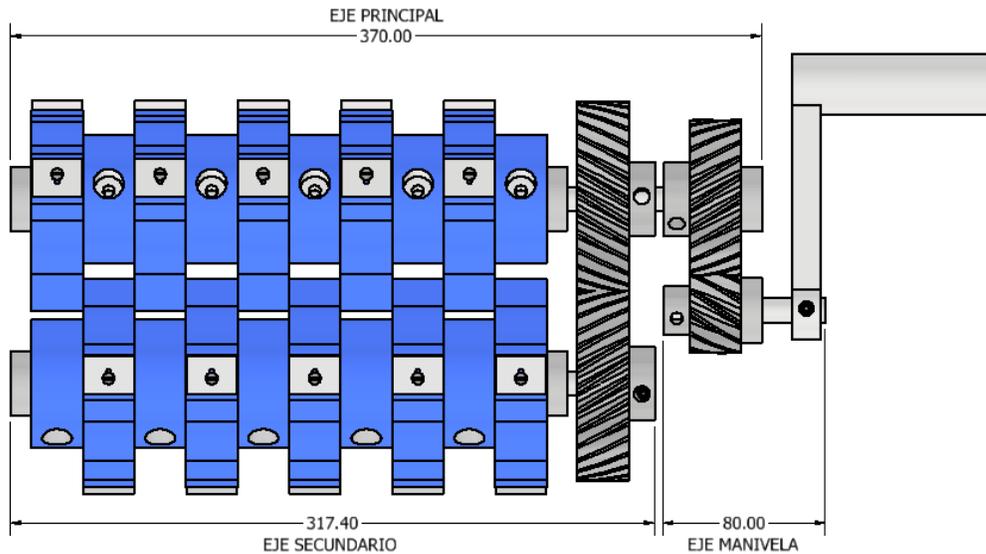
De manera similar al análisis realizado para los engranes de reducción en cuanto al esfuerzo de contacto, se puede observar que para el caso de los engranes de acción, el valor es de 1.98 kgf/mm². Esto se puede traducir a que la vida de los engranes de acción será mayor a los engranes de reducción, ya que sufren un esfuerzo menor por cada ciclo. Por esta razón, se puede concluir que las dimensiones de los engranes son adecuadas para las condiciones de diseño propuestas.

6.3.3. Ejes

En cuanto a la dimensión de los ejes, se hará uso de 3 ejes distintos. El primer eje es el eje al cual está unido la manivela y el piñón de la parte de reducción. El segundo eje

es el eje más largo del triturador, al cual está unido la corona de la reducción, un engrane de accionamiento conjugado y un extremo lateral del sistema de trituración. Finalmente, el tercer eje es el eje que acciona el extremo lateral opuesto. Para la determinación adecuada de las dimensiones de los ejes, se debe tomar en cuenta primero a las restricciones. Las únicas restricciones para los distintos ejes son los largos, así como el posicionamiento de los distintos elementos. Asimismo, los ejes estarán montados sobre rodamientos, los cuales se posicionaron con base a la restricción de geometría de la estructura. La siguiente figura pretende ilustrar sobre los distintos ejes, sus componentes y el largo al cual están restringidos.

Figura 19: Configuración de ejes en triturador



Fuente: Elaboración propia.

El proceso de diseño a seguir es el de partir de ejes de acero de un diámetro de 12 mm, para determinar si su dimensión es adecuada tomando en cuenta las distintas fuerzas que actuarán sobre cada eje. Para iniciar, se describirán las propiedades del material a utilizar, el cual es acero inoxidable 304, el cual se caracteriza por su aplicación en ámbitos de mueblería, componentes arquitectónicos, adornos etc. La elección de este material radica en el hecho que presenta características de resistencia adecuadas para la aplicación. Aunado a esto, la razón por la cual se eligió un acero inoxidable es que se procesarán desechos con presencia de humedad, las cuales con el uso periódico del triturador pueden representar fuentes de óxido, reduciendo la vida útil del eje. Sus características se muestran a continuación.

Cuadro 11: Características acero inoxidable 304

Característica	Valor (MPa)
Resistencia a la fluencia	310.28
Resistencia última	517.12

Fuente: (Matweb, 2022)

Para efectos del dimensionamiento adecuado del eje, es necesario determinar la resistencia a la fatiga del material, tomando en cuenta las condiciones de operación a las cuales estarán sujetas los ejes. Partiendo de la resistencia última a la tensión, el valor preliminar de la resistencia a la fatiga para una viga rotatoria se considera como la mitad de la resistencia última a la tensión con el objetivo de realizar un cálculo conservador. Se iniciara con el cálculo de un valor de resistencia a la fatiga que considere condiciones distintas a las encontradas en un laboratorio, tal y como se describe en la sección del marco teórico. A continuación se presentan los distintos valores encontrados para los factores.

En cuanto al factor de superficie, este se determina mediante el uso de la resistencia última a la tensión y valores dados dependiendo del maquinado al cual fue expuesto el material en su fabricación. Para el eje a utilizar, su proceso de fabricación involucró un laminado en frío. El factor se determina mediante la siguiente ecuación. (Budynas y col., 2012)

$$k_a = aS_{ut}^{-b} \quad (19)$$

Donde:

S_{ut} : Resistencia mínima a la tensión.(MPa)

a, b : Valores de la siguiente tabla.

Figura 20: Valores para factor de superficie

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

Fuente: (Budynas y col., 2012)

En cuanto al factor de tamaño para flexión y torsión se puede calcular mediante la siguiente fórmula. (Budynas y col., 2012)

$$k_b = 1.24d^{-0.107} \quad (20)$$

Donde:

d : Diámetro entre 2.79 y 51 mm.

El factor de modificación por la carga puede tomar el valor de la unidad cuando la torsión está combinada con otros esfuerzos, siempre y cuando la carga combinada se exprese mediante el uso del esfuerzo de von Mises efectivo.

Cuando se trabaja con acero, si la temperatura de operación difiere de la temperatura ambiente, así diferirán las características del material. Sin embargo, para la aplicación del triturador, no se espera que la temperatura de los ejes varíe en un rango mayor a 2 grados, por lo que se asume el valor de la unidad para el factor de temperatura.

Para la aplicación del trabajo de investigación, un valor de confiabilidad de 0.95 es suficientemente aceptable, por lo que el valor de este factor se considera como 0.868. Se toma como base el factor de confiabilidad correspondiente a ocho desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga. (Haugen, 1975)

En cuanto al factor de efectos varios, por la naturaleza de la operación y tomando en cuenta que la aplicación a la que estarán sometidas los ejes no se considera como de alto impacto, se asumirá el valor de la unidad para este factor.

Con base en las características encontradas y aplicando los factores adecuados, el valor de la resistencia a la fatiga de la pieza se muestra a continuación.

Cuadro 12: Características de la resistencia a la fatiga

Característica	Valor	Dimensión
Se´	282	MPa
ka	0.86	
kb	0.95	
kc	1.00	
kd	1.00	
ke	0.86	
kf	1.00	
Se	200.34	MPa

Fuente: Elaboración propia.

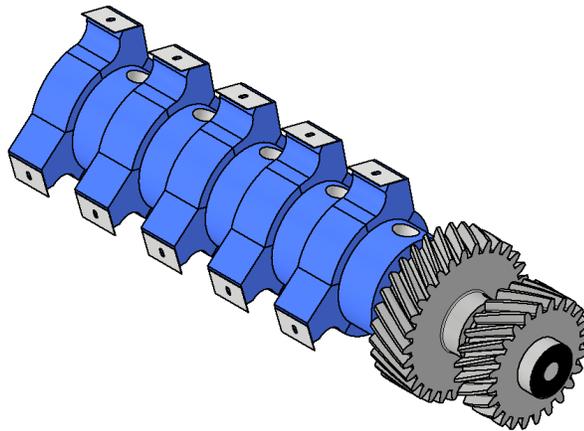
Fuerzas en los ejes

Como se hizo análisis en la sección de engranes, se hará uso de engranes helicoidales para la transmisión de potencia. Por esta razón los ejes tendrán una carga axial. Para iniciar el análisis, se determinarán las fuerzas que afectan a los distintos ejes mediante el uso de las ecuaciones descritas en la sección del marco teórico. Las fórmulas permiten determinar los valores de las fuerzas radiales y axiales.

Eje principal

Como se mencionó con anterioridad, el eje principal está constituido desde la reducción, los engranes de acción conjugada y un extremo del mecanismo de trituración. La manera que se desea montar el eje es por medio de rodamientos. Para el caso específico del eje principal, el mismo cuenta con 3 rodamientos. La siguiente figura ilustra de mejor manera su distribución.

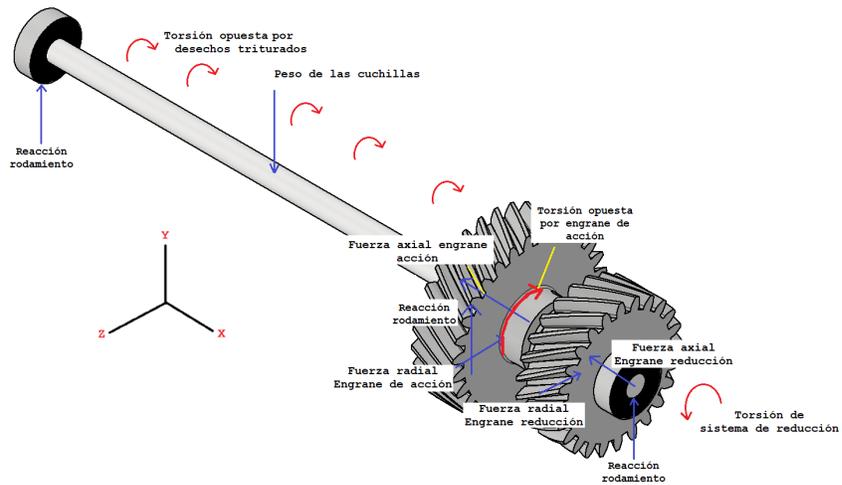
Figura 21: Distribución eje principal



Fuente: Elaboración propia.

Continuando, la siguiente figura permite identificar las distintas cargas a las cuales está sometido el eje.

Figura 22: Fuerzas actuando en eje principal



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, el eje presentará distintas cargas, las cuales son cargas axiales por los engranes helicoidales, cargas radiales por los engranes helicoidales, esfuerzos de flexión por el peso de los componentes a lo largo del eje y finalmente deberá soportar la torsión que proviene de la acción de los engranes, así como la torsión opuesta que generarían los elementos triturados y la torsión opuesta que proviene del par de engranes de acción.

Analizando las cargas que se aplican al eje, como se dijo con anterioridad, el mismo está sometido a distintos pares de torsión. Sin embargo, los mismos no son de la misma naturaleza. Analizando la torsión que proviene del par de engranes de reducción, se puede asumir que la torsión tendrá un valor constante, si se toma el supuesto que se mantienen las condiciones y que el eje gira a velocidad constante. Este mismo escenario se puede aplicar a la torsión aplicada al eje por parte del par de engranes de acción. Sin embargo, para el caso de la torsión que se genera por cada una de las cuchillas al cortar los desechos no se puede asumir que sea constante. Esto ya que sería erróneo asumir que cada cuchilla presenta la misma carga al mismo tiempo. Dado que cada una de las cuchillas en un momento dado presentará una carga máxima y una mínima, el comportamiento en relación al tiempo tiene una forma sinusoidal. Por esta razón, se puede decir que se trata de un esfuerzo fluctuante.

Para caracterizar el valor del esfuerzo fluctuante, se debe partir de los valores del esfuerzo máximo y mínimo. El esfuerzo máximo tendrá lugar cuando cualquiera de las cuchillas realice el corte al desecho que requiera más fuerza para su corte. Este esfuerzo depende del radio de giro de las cuchillas y la fuerza necesaria. El radio de giro está determinado por las dimensiones de diseño. Ahora bien, para la fuerza necesaria para el corte de alimentos, se tomará como referencia la fuerza necesaria para cortar el desecho con propiedades mecánicas más altas. Dado que se procesarán únicamente los componentes compostables de la canasta básica, entonces la fuerza máxima se puede asumir como la fuerza necesaria para cortar una zanahoria madura de un diámetro establecido. Como se presentó en el marco teórico, la fuerza máxima registrada para una zanahoria de diámetro de 40 mm fue de 290 N. Sin embargo, dado que se triturarán desechos caseros, se puede asumir que el diámetro máximo estará por debajo de los 40 mm. Por esta razón se utilizará la fuerza necesaria para cortar una zanahoria de 26 mm de diámetro, la cual es de 137.55 N. El radio de giro de la cuchilla es de 56.45 mm, como se presenta en el plano con número de dibujo 7 en la sección de anexo. Con base en estos datos la torsión por causa de los elementos a triturar se calcula a continuación.

$$T = Fd \quad (21)$$

Donde:

T = Torsión (N m)

F = Fuerza (Newtons)

d = Distancia (Metros)

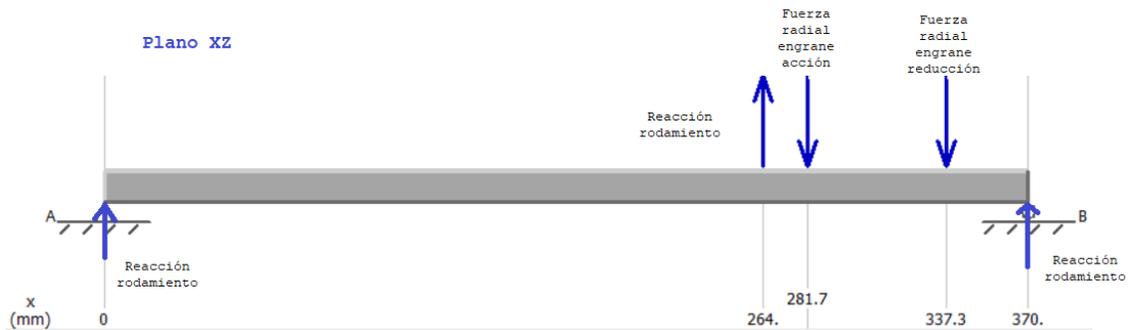
$$T = 137.55N * 0.056m = 7.76Nm \quad (22)$$

Para simplificar el análisis de las cargas, el peso de los componentes a lo largo del eje se considerarán como una carga puntual, ya que resulta poco significativo en comparación a las cargas de los engranes.

Las cargas a analizar se muestran en la Figura 22, como se puede observar, el sentido de giro y la orientación de los engranes permite que la fuerza axial sea opuesta, minimizando el efecto de la misma. Dado que existen fuerzas actuando en más de un plano, el procedimiento debe ser analizar el efecto de las fuerzas aplicadas en cada uno de los planos.

Siguiendo con el análisis, a continuación se muestra el DCL y el diagrama de cortante para el plano xz.

Figura 23: DCL plano xz eje principal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: Diagrama momento plano xz eje principal



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al plano xz, las cargas que se aplican al eje son las de las cargas radiales resultantes del movimiento de los engranes. El DCL y el diagrama de momento se muestra a continuación. Para la determinación de las fuerzas radiales aplicadas en el eje, se partió de los valores obtenidos en la sección de engranes. Específicamente haciendo uso de los valores encontrados para la fuerza tangencial en los cuadros 6 y 8. Con base en estos valores y haciendo uso de las ecuaciones presentadas del marco teórico sobre fuerzas resultantes de engranes en la ecuación (10), se realizó el siguiente cálculo.

Para la carga radial de los engranes de reducción se partió del valor de 39.88 kgf de fuerza tangencial del Cuadro 6. El cálculo de la fuerza radial resultante se muestra a continuación con base a las formulas presentadas en (10).

$$F_u = F_1 \cos \beta, F_r = F_u \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (23)$$

$$F_u = 39.88 \cos(30) = 34.54 \text{kgf} \quad (24)$$

$$F_r = 34.54 \frac{\tan(20)}{\cos(30)} = 14.15 \text{kgf} = 14.15(9.8) = 142.25 \text{N} \quad (25)$$

Para la carga radial de los engranes de accionamiento se partió del valor de 31.91 kgf de fuerza tangencial del Cuadro 8. El cálculo de la fuerza radial resultante se muestra a continuación con base a las formulas presentadas en (10).

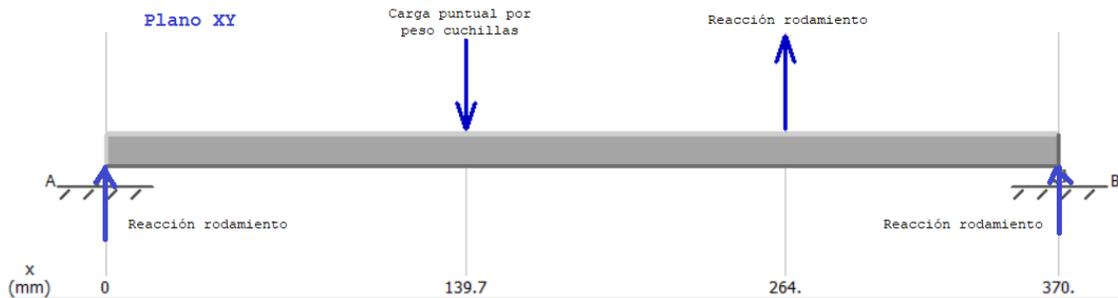
$$F_u = F_1 \cos \beta, F_r = F_u \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (26)$$

$$F_u = 31.91 \cos(30) = 27.63 \text{kgf} \quad (27)$$

$$F_r = 27.63 \frac{\tan(20)}{\cos(30)} = 11.61 \text{kgf} = 11.61(9.8) = 113.8 \text{N} \quad (28)$$

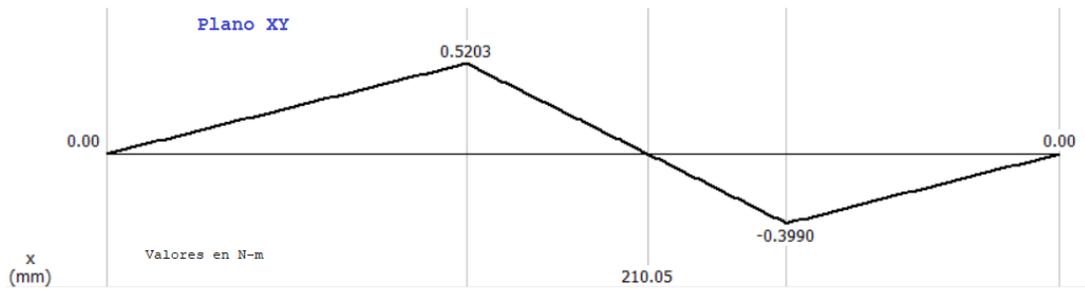
Siguiendo con el plano xy, se encuentra la carga puntual que representa el peso de los componentes que llevará el eje. Con base en los materiales elegidos para los componentes, se encuentra que la carga debe ser de 2.5 lbs, lo cual es equivalente a 11.12 N. El DCL y el diagrama de cortante se muestra a continuación.

Figura 25: DCL plano xy eje principal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: Diagrama momento plano xy eje principal



Fuente: Elaboración propia.

Como se observó desde un inicio, el eje está sometido a cargas en distintos planos. Por esta razón, es necesario determinar la sección crítica del eje, la cual coincide con la coordenada longitudinal en donde se superponen los esfuerzos de flexión de ambos planos. Por lo tanto, es necesario determinar el valor de este esfuerzo de flexión resultante. Para determinar el momento resultante se debe combinar los momentos en los planos ortogonales, lo cual se hace por medio de una suma vectorial. La siguiente fórmula se emplea para determinar el momento resultante.

$$M_r = \sqrt{(M_{xy})^2 + (M_{xz})^2} \quad (29)$$

Donde:

M_r : Momento resultante.

M_{xy} : Momento máximo en el plano xy.

M_{xz} : Momento máximo en el plano xz.

Ahora bien, la razón por la cual es válido utilizar el método de combinación de planos ortogonales es el hecho que más adelante se utilizará el esfuerzo equivalente de von Mises para determinar el factor de seguridad del eje. El esfuerzo equivalente de von Mises representa una situación combinada de esfuerzos, por lo que su uso resulta en un cálculo conservador.

Para determinar el valor del esfuerzo resultante máximo, se realizó una evaluación en distintas coordenadas longitudinales del eje con el objetivo de determinar el valor máximo y la coordenada correspondiente. Los resultados se pueden observar en la siguiente tabla.

Cuadro 13: Combinación de esfuerzos eje principal

Coordenada en x (mm)	Momento xz (N m)	Momento xy (N m)	M Resultante (N m)
0	0.00	0.00	0.00
30	-0.12	0.11	0.16
60	-0.24	0.22	0.33
90	-0.36	0.34	0.49
120	-0.47	0.45	0.65
150	-0.59	0.44	0.74
180	-0.71	0.22	0.75
210	-0.83	0.00	0.83
240	-0.95	-0.22	0.97
270	-0.15	-0.38	0.41
300	2.22	-0.26	2.24
330	3.26	-0.15	3.26
337.3	3.52	-0.12	3.52
360	1.08	-0.04	1.08
370	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, el momento flexionante máximo resultante para el eje principal es de 3.52 N m, el cual se encuentra en la coordenada 337.3 mm. Para caracterizar el momento flexionante fluctuante, el mismo se obtiene como la diferencia entre el momento máximo y mínimo dividido dos. Dado que el momento mínimo es de cero, entonces el valor del momento alternante para la estimación del factor de seguridad en el eje es de 1.76 N m.

Para efectos de simplificación de los cálculos, se asume que la operación del triturador será constante, lo cual permite asumir que el esfuerzo flexionante es completamente reversible y que la torsión es constante. Con estos supuestos, es posible asumir el valor de cero para el momento medio. Dado que el eje a utilizar no presenta cambios de geometría, los valores para los factores de concentración de esfuerzo se asumirán al mínimo, asumiendo que es una barra circular con esfuerzos de flexión y cortante entonces se puede asumir que los valores de los factores sean de 1.2. (Budynas y col., 2012)

En cuanto a la estimación de la torsión media, éste se puede definir como la media aritmética entre la torsión máxima y la torsión mínima.

Para determinar la torsión producida por el movimiento de los engranes de reducción, se hizo uso de la fuerza tangencial en el círculo de paso y el diámetro de paso, ambos obtenidos en el Cuadro 4. Estos valores se utilizan junto con la ecuación de torsión presentada en (6). El cálculo se muestra a continuación.

$$F_t = \frac{2000T}{d_w} \quad (30)$$

$$T = \frac{F_t d_w}{2000} \quad (31)$$

$$T = \frac{(39.88)(83.138)}{2000} = 1.66 \text{kgfm}(9.81) = 16.246 \text{Nm} \quad (32)$$

Ahora bien para el cálculo de la torsión producida por el movimiento de los engranes de acción, los valores utilizados provienen del Cuadro 8. El procedimiento es el siguiente.

$$F_t = \frac{2000T}{d_w} \quad (33)$$

$$T = \frac{F_t d_w}{2000} \quad (34)$$

$$T = \frac{(31.91)(103.92)}{2000} = 1.65 \text{kgfm}(9.81) = 16.248 \text{Nm} \quad (35)$$

Como se puede apreciar en el cálculo anterior, para el caso del eje principal, la torsión máxima proviene de la transmisión de potencia por parte de los engranes de acción. Esta torsión tiene un valor de 16.248 N m. Como se determinó con anterioridad, la torsión mínima esta dada por la reacción que se presenta al tratar de cortar los desechos. Esta torsión tiene un valor de 7.76 N m. Con base en estos datos, el valor de la torsión media se calcula como la suma de la torsión mínima y máxima partido dos. El cálculo se muestra a continuación.

$$T = \frac{(16.248) + (7.76)}{2} = 12.00 \text{Nm} \quad (36)$$

Para el caso de la torsión fluctuante, ésta se caracteriza como la diferencia entre la torsión máxima y mínima, dividida por dos. Con base en los datos analizados, el cálculo es el siguiente.

$$T = \frac{(16.248) - (7.76)}{2} = 4.24 \text{Nm} \quad (37)$$

Para determinar si el diámetro del eje es suficientemente grande como para soportar las cargas, entonces se utilizará la ecuación presentada en la sección del marco teórico correspondiente al diseño de ejes, en particular la presentada en (12). Es requerido hacer la evaluación del diámetro en la sección crítica, la cual está determinada por la coordenada del momento de flexión máximo, el cual se encuentra en la coordenada 337.3 mm. Con base en los valores encontrados, los resultados para el eje principal se muestran a continuación.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (38)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0.012)^3} \left\{ \frac{1}{200E06} [4((1.2)(1.76))^2 + 3((1.2)(4.24))^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{517.12E06} [3((1.2)(12))^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (39)$$

Cuadro 14: Resultados obtenidos para el eje principal

Característica	Valor	Dimensional
Ma	1.76	N m
Tm	12.00	N m
Ta	4.24	N m
Kf	1.20	
Kfs	1.20	
Se	200.34	MPa
Sut	517.12	MPa
d	0.012	m
n	3.49	

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, el eje de 12 mm de diámetro otorga un factor de seguridad de 3.49. Este es un esfuerzo por fatiga. Analizando este valor de factor de seguridad, es pertinente para el proceso de diseño el determinar su significado. Para esto es necesario tomar en cuenta las condiciones de operación y la criticidad de la pieza, así como los distintos riesgos que puede presentar el triturador en caso falle la pieza. Como bien se sabe, este eje permite que se dé el fenómeno de corte, ya que a través de él se transmite la potencia desde los engranes hasta cada una de las cuchillas. Si se llega a presentar una falla, lo más probable es que el conjunto de componentes dentro del triturador caiga hacia el basurero debido a la gravedad. Esto representa un riesgo bajo para la persona que está operando el triturador por lo que un factor de seguridad bajo no representa riesgos más allá del daño a los componentes. El valor de 3.49 indica que las dimensiones que se determinaron serían capaces de soportar casi tres veces y media las condiciones a las que se esta sometiendo el eje. Por estas razones se puede concluir que el eje tienen dimensiones adecuadas y un factor de seguridad aceptable.

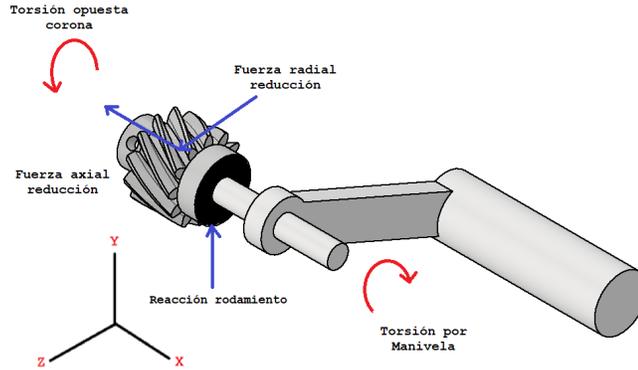
Eje manivela

El procedimiento por utilizar sigue el mismo proceso que se utilizó para el eje principal, por lo que la distribución del eje de la manivela se muestra a continuación.

Como se puede apreciar, la presencia de fuerzas se encuentra únicamente en el plano xz, por lo que el DCL y el diagrama de momentos se muestra a continuación. El valor de la fuerza radial se toma como el encontrado en la ecuación (23).

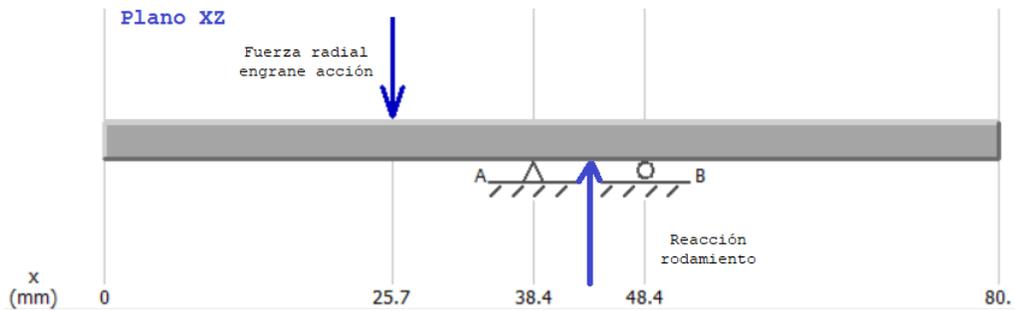
Ahora bien, para el caso de este eje, se puede apreciar que a diferencia del eje principal, éste no presenta torsiones fluctuantes. Por esta razón en éste cálculo el valor de la torsión alternante tiene un valor de cero. Ahora bien para el cálculo de la torsión media, se realizó el mismo procedimiento utilizado en las ecuaciones para el eje principal, en concreto (30) y (33). Para este caso en particular, se hizo uso de los valores encontrados en el Cuadro 6. El cálculo de la torsión máxima se muestra a continuación.

Figura 27: Fuerzas actuando en eje manivela



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28: DCL eje manivela



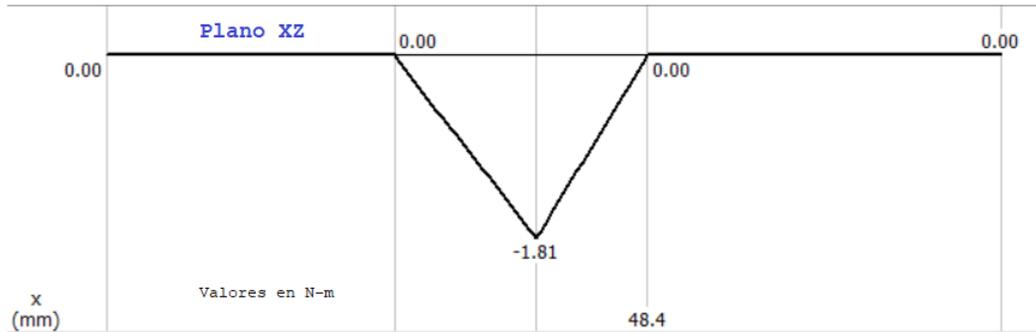
Fuente: Elaboración propia.

$$T = \frac{F_t d_w}{2000} \quad (40)$$

$$T = \frac{(39.88)(41.57)}{2000} = 0.83 \text{ kgfm}(9.81) = 8.13 \text{ Nm} \quad (41)$$

Dado que la torsión mínima para el caso de este eje es de cero, entonces la torsión media se considera como la mitad de la torsión máxima. Por lo tanto, el valor de la torsión media es de 4.06 N m. Con base en las características presentadas y mediante el uso de la ecuación utilizada para determinar el factor de seguridad en el eje principal, la sección crítica a evaluar se encuentra justo a la mitad del eje, dado que allí es donde se encuentra el valor máximo del momento de flexión. Los resultados se muestran a continuación.

Figura 29: Diagrama momento eje manivela



Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (42)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0.012)^3} \left\{ \frac{1}{200E06} [4((1.2)(0.91))^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{517.12E06} [3((1.2)(8.13))^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (43)$$

Cuadro 15: Resultados obtenidos para el eje manivela

Característica	Valor	Dimensional
Ma	0.91	N m
Tm	4.06	N m
Kf	1.200	
Kfs	1.200	
Se	200.34	MPa
Sut	517.12	MPa
d	0.012	m
n	12.49	

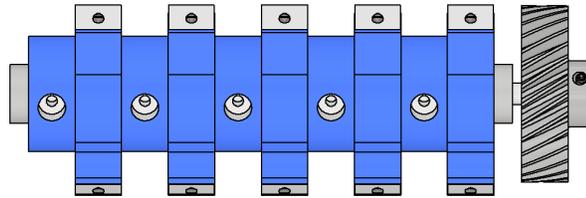
Fuente: Elaboración propia.

El proceso lógico para evaluar si el valor obtenido del factor de seguridad es satisfactorio es el mismo utilizado para el eje principal. Para este caso en particular, se puede observar que el factor de seguridad tiene un valor de 12.49. Dada su magnitud superior en comparación a la obtenida en el eje principal, se puede concluir que las dimensiones son las suficientes como para operar en las condiciones bajo las cuales se diseñaron de manera satisfactoria.

Eje secundario

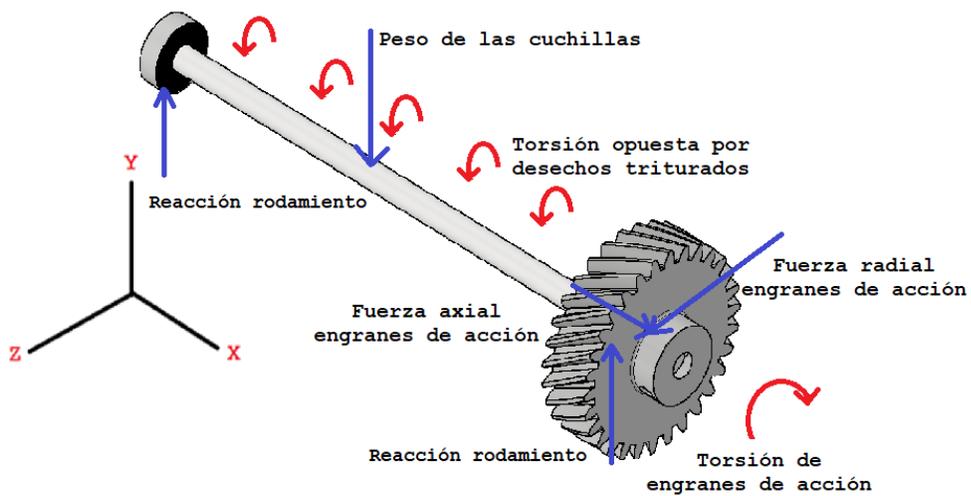
Para la determinación del factor de seguridad para el eje secundario se empleó la misma metodología que se utilizó para los ejes anteriores. La distribución del eje secundario se muestra a continuación.

Figura 30: Distribución de eje secundario



Fuente: Elaboración propia.

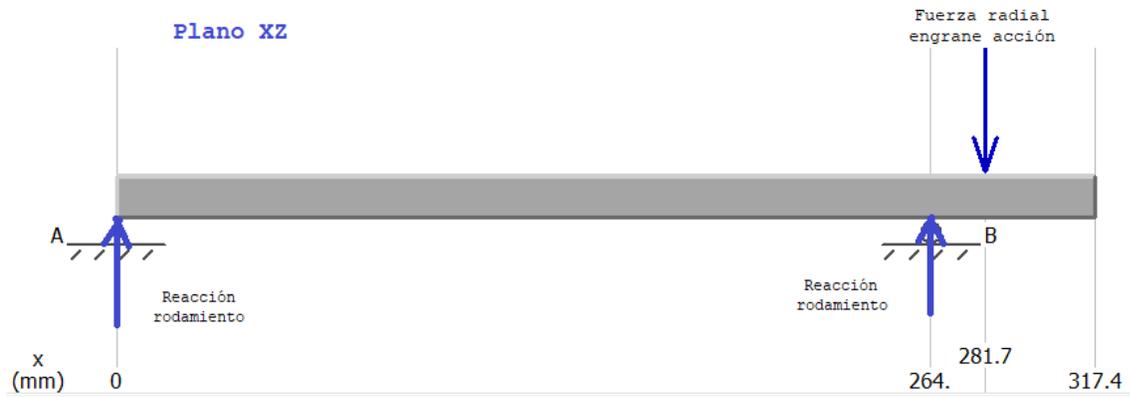
Figura 31: Fuerzas actuando en eje secundario



Fuente: Elaboración propia.

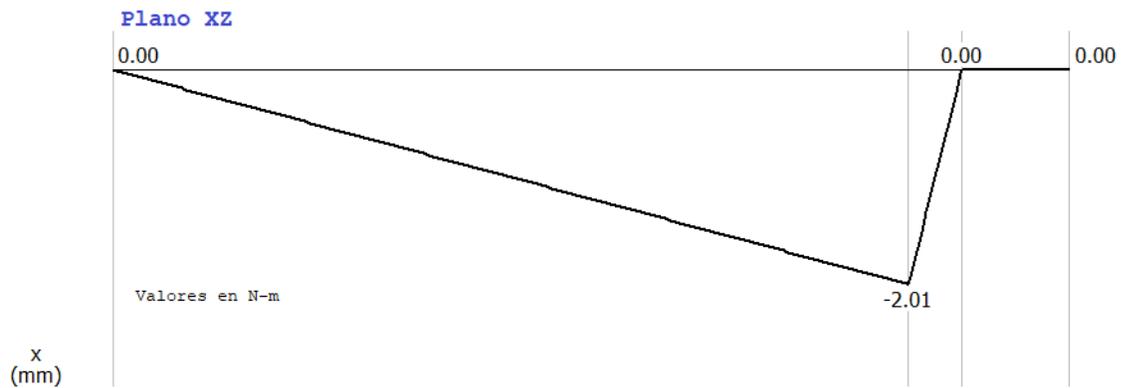
Para el plano xz, el DCL y diagrama de momentos se muestra a continuación. El valor de fuerza radial utilizado es el hallado en la ecuación (26).

Figura 32: DCL plano xz eje secundario



Fuente: Elaboración propia.

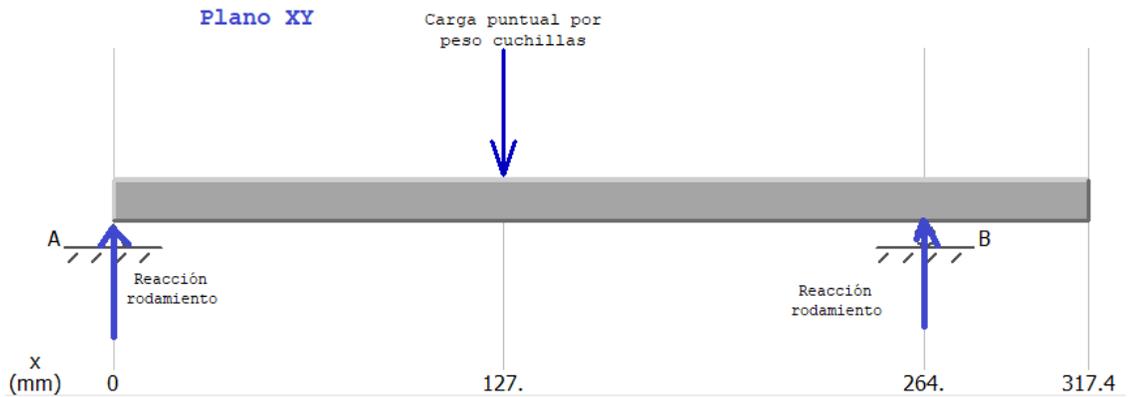
Figura 33: Diagrama momento plano xz eje secundario



Fuente: Elaboración propia.

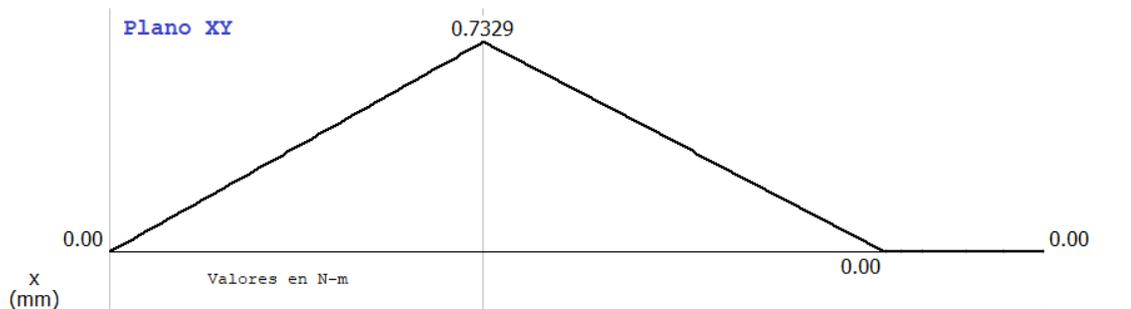
Ahora bien, en cuanto al plano xy, los diagramas se muestran a continuación.

Figura 34: DCL plano xy eje secundario



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35: Diagrama momento plano xy eje secundario



Fuente: Elaboración propia.

De manera similar en el caso del eje principal, es necesario determinar la sección crítica del eje por medio de la determinación de la coordenada del momento resultante máximo. Para lograr lo mismo se debe evaluar el momento de flexión a lo largo de las coordenadas longitudinales del eje para cada plano. Los datos obtenidos se muestran a continuación.

Al combinar los esfuerzos de flexión en los planos ortogonales, se determinó que el momento resultante máximo de los mismos es de 2.01 N m, el cual se encuentra en la coordenada 264 mm. Para la estimación del momento flexionante alternante se utilizó el mismo método descrito para el eje principal. Dado que el momento flexionante mínimo es cero, entonces el momento alternante para el eje es de 1.005 N m.

Ahora bien, analizando la torsión en este eje, se puede observar un fenómeno similar al encontrado en el eje principal. Para este eje también existirán torsiones fluctuantes o alternantes por efecto de la fuerza aplicada a los desechos para su corte. Por esta razón, se utilizará el mismo valor de la torsión calculada para el eje principal, diferenciándose

Cuadro 16: Combinación de esfuerzos eje secundario

Coordenada en x (mm)	Momento xz (N m)	Momento xy (N m)	M Resultante (N m)
0	0	0	0.00
30	-0.23	0.17	0.29
60	-0.46	0.35	0.58
90	-0.69	0.52	0.86
120	-0.92	0.69	1.15
127	-0.97	0.73	1.21
150	-1.14	0.61	1.29
180	-1.37	0.45	1.44
210	-1.6	0.29	1.63
240	-1.83	0.13	1.83
264	-2.01	0	2.01
270	-1.33	0	1.33
300	0	0	0.00
317	0	0	0.00

Fuente: Elaboración propia.

únicamente el sentido de giro de la torsión. Dado que la torsión máxima en el eje principal proviene de los engranes de acción, el valor de la torsión media y alternante para éste eje es la misma que el eje principal. Para determinar el factor de seguridad se debe evaluar la sección crítica. Para el caso del eje secundario, al igual que para el eje principal, la sección crítica se encuentra en la ubicación de la cuchilla mas cercana al sistema de engranes. Esto dado que al combinar esfuerzos flexionantes y tomando en cuenta la presencia de torsiones alternantes a lo largo del eje, es allí donde interseca la mayoría. Los resultados se muestran a continuación.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (44)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0.012)^3} \left\{ \frac{1}{200E06} [4((1.2)(1.005))^2 + 3((1.2)(4.24))^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{517.12E06} [3((1.2)(12))^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (45)$$

En cuanto al factor de seguridad obtenido para este eje, se puede apreciar que tiene un valor de 3.61. Este valor es muy similar al del eje principal dado que las condiciones a las cuales están sometidos son muy parecidas. Este valor al igual que el eje principal, refleja que el eje está diseñado para soportar de manera satisfactoria las condiciones de diseño, por lo que las dimensiones son las adecuadas.

Cuadro 17: Resultados obtenidos para el secundario

Característica	Valor	Dimensional
Ma	1.005	N m
Tm	12	N m
Ta	4.24	N m
Kf	1.200	
Kfs	1.200	
Se	200.34	MPa
Sut	517.12	MPa
d	0.012	m
n	3.61	

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Fabricación y ensamble de prototipo

Como fue establecido en las secciones anteriores, la fabricación del prototipo se planeó para que fuese realizado por medio de impresión 3D. Se utilizó una impresora de marca Artillery, en específico el modelo Sidewinder X1.

En cuanto a los materiales de impresión, tal y como se definió en secciones anteriores, se utilizó Nylon para la fabricación de los dos pares de engranes. En cuanto a la estructura, manivela y bases de cuchillas, el material utilizado para su impresión fue PETG. En cuanto al resto de componentes necesarios para la fabricación del prototipo, los mismos fueron adquiridos en dependencia de las dimensiones que se eligieron en secciones anteriores. Los componentes adquiridos fueron los siguientes: rodamientos de diámetro interno de 12 mm, tornillos milimétricos, insertos dentados para impresión 3D, eje de acero inoxidable 304 de 12 mm de diámetro y tornillos de cabeza hueca.

6.4.1. Impresión de componentes

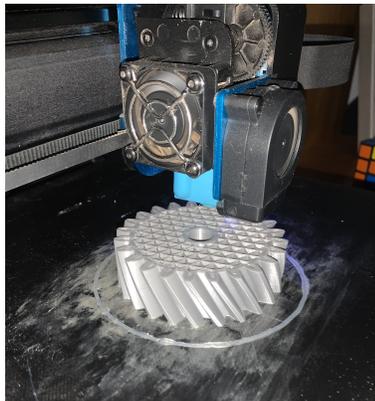
A continuación se muestra parte del proceso de fabricación del algunos de los elementos del triturador.

Figura 36: Impresión de piñón



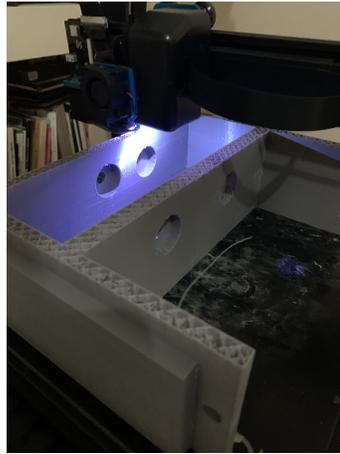
Fuente: Elaboración propia.

Figura 37: Impresión de corona



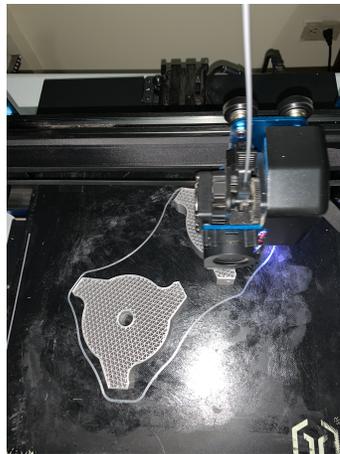
Fuente: Elaboración propia

Figura 38: Impresión de estructura de triturador



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39: Impresión de bases para cuchillas



Fuente: Elaboración propia.

Con la intención de poder desglosar el costo relacionado de la impresión de los distintos componentes tomando en cuenta únicamente el gasto de material, el siguiente cuadro expresa la cantidad en metros utilizada para la impresión de cada uno. El software utilizado para el cálculo del gasto de material fue Ultimaker Cura.

Cuadro 18: Características de impresión

Código	Cantidad	Material	Relleno (%)	Patrón	Capas
PT-02-ESTRUCTURA	1	PETG	8	Lineas	1
PT-03-ESPACIADOR	2	PETG	15	TriHexagono	2
PT-04-MANIVELA	1	PETG	25	TriHexagono	4
PT-05-PIÑÓN	1	Nylon	40	TriHexagono	5
PT-06-CORONA	1	Nylon	30	TriHexagono	5
PT-07-ACCIÓN	1	Nylon	25	TriHexagono	5
PT-08-ACCIÓN	1	Nylon	25	TriHexagono	5
PT-09-BASE	10	PETG	20	TriHexagono	2

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, el costo asociado a la impresión fue estimado con base al precio de un rollo de material y la cantidad de metros que ofrece el rollo. Es importante recalcar que el costo depende del material, dado que presentar valores monetarios distintos. Para el caso de el rollo de PETG, el mismo tuvo un costo de 169 quetzales con un rendimiento de 320 metros lineales. Para el caso del Nylon, el costo del rollo fue de 300 quetzales con un rendimiento de 320 metros lineales. Los datos fueron obtenidos mediante la cotización y compra de los materiales con un distribuidor local de la marca ESun. Los costos desglosados se muestran a continuación.

Cuadro 19: Costo asociado de impresión

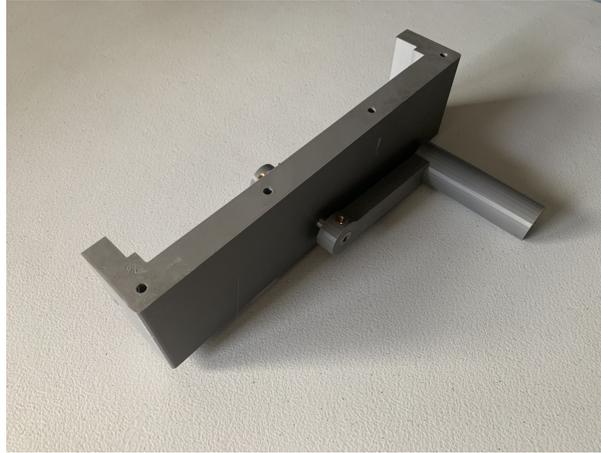
Código	Cantidad	Metros de material	Costo (Q)
PT-02-ESTRUCTURA	1	140.5	74.1
PT-03-ESPACIADOR	2	94.5	49.95
PT-04-MANIVELA	1	18.75	9.9
PT-05-PIÑÓN	1	9.12	8.55
PT-06-CORONA	1	24.75	23.2
PT-07-ACCIÓN	1	32.30	30.25
PT-08-ACCIÓN	1	32.30	30.25
PT-09-BASE	10	257.5	136

Fuente: Elaboración propia.

6.4.2. Ensamble de prototipo

En cuanto al ensamble del prototipo, se inició con el piñón, el eje de la manivela, la manivela, el rodamiento y la estructura sobre la cual se encontraban estas piezas. Como se definió en las secciones anteriores, la manivela y piñón cuentan con sujeciones de tornillos de cabeza hueca, colocados en insertos dentados específicos para piezas impresas en 3D.

Figura 40: Ensamble manivela y piñón



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41: Ensamble manivela y piñón



Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se realizó el ensamble de la parte dos y tres de la estructura junto con los distintos componentes presentes en esta sección del triturador. El proceso fue el siguiente: como primer punto, se hizo el ensamble del eje principal y eje secundario con las bases de las cuchillas correspondientes a cada eje. Se hizo la revisión que las cuchillas tuvieran el

sentido adecuado. Una vez ensamblados los ejes, se hizo la unión entre las dos partes de la estructura mencionados. De esta manera es posible ensamblar el conjunto de engranes que están posicionados en el eje principal y secundario. Seguidamente se hizo la unión completa de las tres partes de la estructura, permitiendo así como paso final la adición de los espaciadores.

Figura 42: Parte dos de estructura



Fuente: Elaboración propia.

Figura 43: Parte tres de estructura



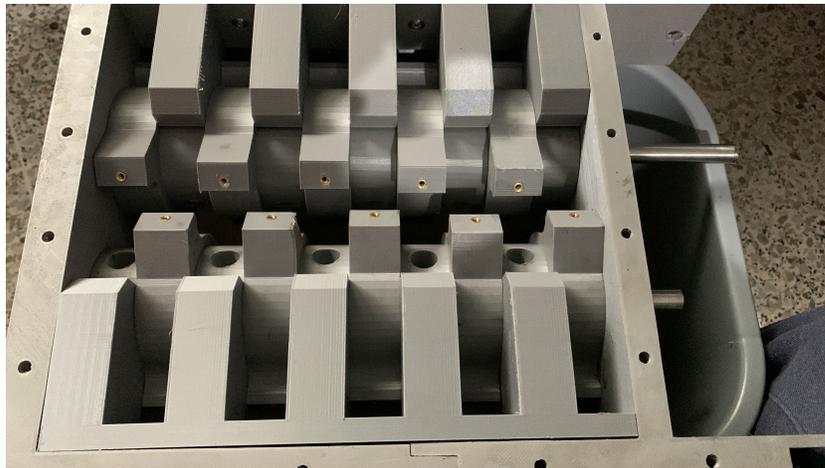
Fuente: Elaboración propia.

Figura 44: Ensamble eje principal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45: Ensamble eje principal y secundario a estructura



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente para poder realizar las pruebas y completar el ensamblaje del prototipo, se hizo la adición de las cuchillas metálicas a las bases para las cuchillas. Las siguientes figuras ilustran el mecanismo de trituración y las distintas fases de su ensamblaje.

Figura 46: Ensamble completo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47: Ensamble completo



Fuente: Elaboración propia.

6.5. Realización de prueba

Para determinar el funcionamiento adecuado del prototipo fabricado, se decidió realizar una prueba estándar. Los lineamientos de la prueba estándar se presentan en el Anexo 1. El procedimiento llevado a cabo se muestra en las siguientes secciones.

6.5.1. Preparación

Tomando en consideración el documento de protocolo de prueba presentado en el Anexo 1, dentro del equipo requerido para la realización de prueba se encuentra el conjunto de requerimientos. A continuación se presenta el cuadro con los elementos requeridos.

Cuadro 20: Equipo necesario para prueba

No.	Equipo	Casilla de verificación
1	Triturador de desechos caseros para compost	Sí
2	Instrumento Vernier	Sí
3	Recipiente plástico 20x20x10 cm	Sí
3	Muestra de 1000 gramos de desechos	Sí
4	Recipiente plástico de 10x10x5 cm	Sí
5	Pesa	Sí
6	Cronómetro	Sí

Fuente: Elaboración propia.

En particular, en cuanto a la muestra de 1,000 gramos, ésta se recolectó por medio de la separación de desechos orgánicos producidos en un hogar. El criterio de separación constaba de la intención de cumplir con una muestra que cumpliera las características requeridas que se presentan en el protocolo de pruebas. Para un desglose en específico de los distintos materiales a procesar, en la siguiente tabla se expresa el contenido de la muestra.

Cuadro 21: Contenido de la muestra a procesar

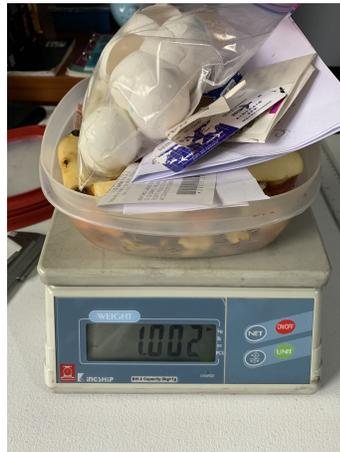
No.	Descripción	Cantidad
1	Cáscara de huevo	9
2	Cáscara de naranja	3
3	Cáscara de banano	5
4	Cáscara de cebolla	3
5	Cáscara de papa	3
6	Cáscara de zanahoria	1
7	Cáscara de pepino	1
8	Trozo de pepino	4
9	Trozo de cebolla	5
10	Trozo de pera	2
11	Trozo de papa	2
12	Manzana completa con centro	2
13	Caja de cartón	1
14	Hoja de papel carta	4
15	Tarjeta de cartón	1

Fuente: Elaboración propia.

Después de tarar la pesa electrónica con base al recipiente utilizado, la siguiente figura

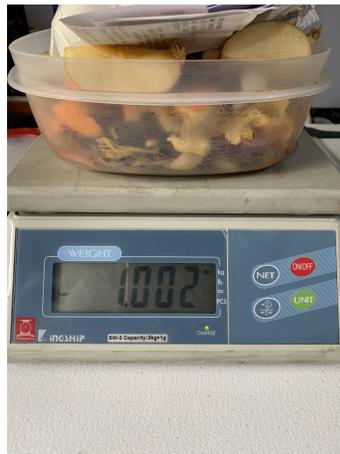
ilustra el peso de la muestra antes de procesar.

Figura 48: Muestra para prueba



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49: Muestra para prueba



Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, para poder medir el tiempo necesario para el procesamiento de la muestra, se hizo uso de un computador y una cámara web. Asimismo, se realizó una medición de tiempo con la ayuda de un cronómetro en línea. La preparación previa antes de iniciar la prueba se muestra a continuación.

Figura 50: Preparación para prueba



Fuente: Elaboración propia.

6.5.2. Realización de prueba

En cuanto al procesamiento de la muestra con el uso del triturador, tal y como se muestra el procedimiento en el protocolo de pruebas, inició con la activación del cronómetro. Con el uso de un recipiente más pequeño, se vertió la muestra por partes similares mientras que al mismo tiempo se accionaba el triturador. Al haber terminado de procesar la muestra en su totalidad, se detuvo el cronómetro. Las siguientes imágenes ilustran el proceso mientras se realizaba y el proceso terminado.

Figura 51: Triturador en funcionamiento



Fuente: Elaboración propia.

Figura 52: Triturador en funcionamiento



Fuente: Elaboración propia.

Figura 53: Finalización de prueba



Fuente: Elaboración propia.

6.5.3. Recopilación de resultados

Con base en el proceso presentado en el protocolo de pruebas, se realizó la separación de los distintos desechos mediante su medición con un instrumento vernier. Seguidamente se documentó el peso que presentaba cada una de estas clasificaciones. Las siguientes imágenes ilustran los pesos que se obtuvieron. Cabe resaltar que estos pesos incluyen el peso de su recipiente.

Para determinar la proporción de la muestra que se encuentra por cada clasificación, se pesó cada uno de los recipientes que almacenaron los desechos clasificados y se documentó el valor obtenido. Seguidamente se realizó un gráfico que permite visualizar la distribución proporcional de las clasificaciones. Lo obtenido se muestra en la sección de resultados.

Como se puede observar en la figura 53, el tiempo total que se requirió para procesar la muestra fue de 3 minutos y 6 segundos. Para determinar la velocidad de procesamiento, se tomó el peso de la muestra sin procesar y se dividió en la cantidad de tiempo en minutos que llevó procesarla. Lo obtenido se encuentra en la sección de resultados.

Figura 54: Desechos con dimensión menor a 1.3 cm



Fuente: Elaboración propia.

Figura 55: Desechos con dimensión entre 1.3 y 5 cm



Fuente: Elaboración propia.

Figura 56: Desechos con dimensión mayor a 5 cm



Fuente: Elaboración propia.

7.1. Fabricación de prototipo

Se diseñó y realizó un prototipo de un triturador de desechos caseros con el objetivo de producir partículas de salida de un rango de dimensión de 1.3 a 5 cm. El listado de piezas se muestra a continuación.

Cuadro 22: Listado de piezas de prototipo

No.	Código	Cantidad	Descripción
1	PT-01-CONTENEDOR	1	Contenedor plástico de 38x27x50 cm
2	PT-02-ESTRUCTURA	1	Estructura de triturador
3	PT-03-ESPACIADOR	2	Espaciador
4	PT-04-MANIVELA	1	Manivela
5	PT-05-PIÑÓN	1	Piñón
6	PT-06-CORONA	1	Corona
7	PT-07-ACCIÓN	1	Engrane helicoidal de acción I
8	PT-08-ACCIÓN	1	Engrane helicoidal de acción II
9	PT-09-BASE	10	Base para cuchilla
10	PT-10-CUCHILLA	30	Cuchilla metálica
11	PT-11-PRINCIPAL	1	Eje de acero inox 304 de 12 mm de diámetro y 370 mm de largo
12	PT-12-SECUNDARIO	1	Eje de acero inox 304 de 12 mm de diámetro y 318 mm de largo
13	PT-12-MANIVELA	1	Eje de acero inox 304 de 12 mm de diámetro y 115 mm de largo
14	PT-13-RODAMIENTO	6	Rodamiento de diámetro interno de 12 mm
15	SUJ-INS-01-MANIVELA	2	Inserto dentado M5*8*7
16	SUJ-INS-02-PIÑÓN	3	Inserto dentado M4*6*6
17	SUJ-INS-03-ENGRANES	6	Inserto dentado M6*12*7
18	SUJ-INS-04-BASECUCHILLA	20	Inserto dentado M4*10*6
19	SUJ-INS-05-CUCHILLA	30	Inserto dentado M3*6*5
20	SUJ-INS-06-ESPACIADOR	4	Inserto dentado M5*10*7
21	SUJ-TOR-01-MANIVELA	2	Tornillo hexagonal de ajuste M5*8
22	SUJ-TOR-02-PIÑÓN	3	Tornillo hexagonal de ajuste M4*6
23	SUJ-TOR-03-ENGRANES	6	Tornillo hexagonal de ajuste M6*10
24	SUJ-TOR-04-BASECUCHILLA	20	Tornillo hexagonal cabeza de botón M4*10
25	SUJ-TOR-05-CUCHILLA	30	Tornillo hexagonal cabeza de botón M3*6
26	SUJ-TOR-06-ESPACIADOR	4	Tornillo hexagonal cabeza de botón M5*10

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el costo asociado a la elaboración del prototipo se puede apreciar en el siguiente cuadro.

Cuadro 23: Listado de piezas de prototipo y costo asociado

No.	Código	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	PT-01-CONTENEDOR	1	Q168	Q168
2	PT-02-ESTRUCTURA	1	Q74.1	Q74.1
3	PT-03-ESPACIADOR	2	Q24.9	Q49.95
4	PT-04-MANIVELA	1	Q9.9	Q9.9
5	PT-05-PIÑÓN	1	Q8.55	Q8.55
6	PT-06-CORONA	1	Q23.2	Q23.2
7	PT-07-ACCIÓN	1	Q30.25	Q30.25
8	PT-08-ACCIÓN	1	Q30.25	Q30.25
9	PT-09-BASE	10	Q13.6	Q136
10	PT-10-CUCHILLA	30	Q1.99	Q59.7
11	PT-11-PRINCIPAL	1	Q38.48	Q38.48
12	PT-12-SECUNDARIO	1	Q33.07	33.07
13	PT-12-MANIVELA	1	Q11.96	Q11.96
14	PT-13-RODAMIENTO	6	Q17	Q102
15	SUJ-INS-01-MANIVELA	2	Q0.35	Q0.7
16	SUJ-INS-02-PIÑÓN	3	Q0.35	Q1.05
17	SUJ-INS-03-ENGRANES	6	Q0.35	2.1
18	SUJ-INS-04-BASECUCHILLA	20	Q0.35	Q7
19	SUJ-INS-05-CUCHILLA	30	Q0.35	Q10.5
20	SUJ-INS-06-ESPACIADOR	4	Q0.35	Q1.4
21	SUJ-TOR-01-MANIVELA	2	Q0.45	Q0.9
22	SUJ-TOR-02-PIÑÓN	3	Q0.45	Q1.35
23	SUJ-TOR-03-ENGRANES	6	Q0.45	Q2.7
24	SUJ-TOR-04-BASECUCHILLA	20	Q0.45	Q9
25	SUJ-TOR-05-CUCHILLA	30	Q0.45	Q13.5
26	SUJ-TOR-06-ESPACIADOR	4	Q0.45	Q 1.8
Costo total				Q827.44

Fuente: Elaboración propia.

7.2. Prueba

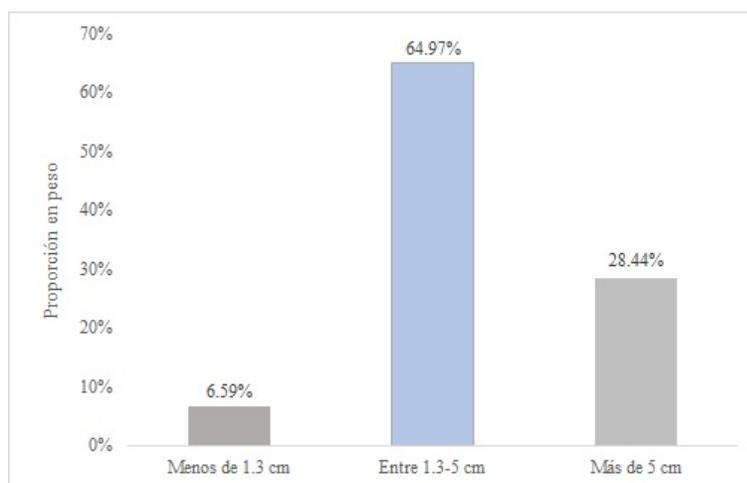
En cuanto a la realización de la prueba para comprobar los parámetros de funcionamiento del triturador, la prueba realizada fue la descrita en la sección de metodología llamada realización de prueba. Los resultados se muestran a continuación.

Cuadro 24: Resultados de peso por clasificación

Clasificación	Peso (g)	Proporción
Menos de 1.3 cm	66	6.59 %
Entre 1.3 y 5 cm	651	64.97 %
Más de 5 cm	285	28.44 %

Fuente: Elaboración propia.

Figura 57: Visualización de proporción



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 25: Resultados de funcionamiento

Ítem	Valor
Peso neto de la muestra (gramos)	1002
Tiempo transcurrido para procesar los desechos (min)	3.1
Capacidad de procesamiento (gramos por minuto)	323.23

Fuente: Elaboración propia.

Discusión de resultados

Los resultados de la prueba realizada apuntan que los parámetros de diseño del triturador logrará permitir que el 65 % de los desechos sean aprovechados para una siguiente etapa en la producción de compost. Asimismo, la velocidad de operación permite que el triturar una muestra de desechos de 1,000 gramos se realice en aproximadamente 3 minutos.

Es importante recalcar que, no se puede asegurar que esto ocurrirá la mayor parte de las veces que se utilice el triturador, dado que la proporción aprovechable es dependiente del estado inicial de los desechos. En la prueba realizada se observó que algunos desechos lograban deslizarse entre la separación de las cuchillas evitando recibir el corte del triturador. Esta puede ser una razón por la cual la proporción de desechos con mayor tamaño tiene un valor de casi 30 %, lo cual indica que no fueron sometidos a corte. Este fenómeno fue observado principalmente en los desechos delgados, tal y como las cáscaras de banano como se muestra en la Figura 51. Los desechos procesados con una dimensión final menor a 1.3 cm se pudo haber debido al hecho que el corte no es uniforme o ya bien, el desecho era lo suficientemente pequeño como para introducirse en la separación entre cuchillas.

Asimismo, en cuanto a la velocidad con la que se logran procesar los desechos, la misma es dependiente de la variedad de desechos que se presente en la muestra. Esto ya que algunos materiales presentan menor resistencia al corte. Otro aspecto a considerar es el hecho que la orientación de los desechos en su ingreso al triturador incide en la capacidad del triturador de procesarlo.

Se logró diseñar y prototipar un triturador que permite dar un tratamiento a los desechos orgánicos caseros producidos en un hogar. Mediante una prueba, se logró procesar una muestra de 1,000 gramos con desechos con dimensión mayor a 5 cm en un tiempo de 3 minutos. Como resultado se obtuvo que el 65 % de los desechos se redujeron a una dimensión entre 1.3 y 5 cm, un 28.44 % con una dimensión mayor a 5 cm y un 7 % a una dimensión menor a 1.3 cm.

La clase de triturador diseñada fue la de doble eje, dado que sus características se pudieron replicar en un sistema similar al de un instrumento de uso casero. El sistema de accionamiento consiste en el movimiento de una manivela, la cual transmite el movimiento a través de dos pares de engranes helicoidales, uno de reducción y uno de accionamiento conjunto.

El costo asociado a los materiales utilizados en la fabricación del prototipo de triturador fue de Q827.44. La mayor parte de los costos están asociados a los componentes impresos en resultado de los materiales utilizados, los cuales fueron PETG y Nylon. El triturador fue diseñado para poder ser adaptado a un contenedor plástico de 28x27x50 cm.

Para seguir con el desarrollo de tecnologías que aporten a una cultura de responsabilidad ambiental es necesario evaluar la viabilidad principalmente económica de los distintos sistemas que se deseen implementar. Para el caso específico del triturador de desechos caseros, es necesario investigar si el costo asociado es rentable como para que las personas estén dispuestas a adquirirlo.

Se recomienda evaluar el impacto que puede significar el añadir a los desechos el conjunto de materiales orgánicos como huesos y desechos con tejidos como las distintas carnes que se consumen en un hogar. Esto conllevaría a una modificación en diseño, la cual puede abrir la oportunidad de reducir el nivel de personalización aplicado en este trabajo de investigación, reduciendo el costo de este sistema. Se recomienda investigar la posibilidad de fabricar este triturador con tecnología por inyección de partes, lo cual reduciría significativamente el costo asociado.

Se recomienda investigar la posibilidad de acoplar el triturador a un sistema que permita iniciar el proceso de compostaje inmediatamente después del proceso de trituración de los distintos desechos. Esto permite que el sistema cumpla múltiples funciones añadiendo valor final al producto.

Dado que el proceso analizado involucra que los desechos sean procesados una única vez, se recomienda evaluar la cantidad de veces óptima para procesar los desechos con la intención de incrementar el porcentaje de desechos con la medida final adecuada.

- Barrena, R., Font, X., Gabarrell, X. & Sánchez, A. (2014). Home composting versus industrial composting: Influence of composting system on compost quality with focus on compost stability. *Waste Management*, 34(7), 1109-1116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.008>
- Budynas, R. G., Elmer, J. & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (9th). McGraw-Hill Interamericana.
- Cecchi, F. & Cavinato, C. (2019). Smart approaches to food waste final disposal. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(16), 2860. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162860>
- Co., S. E. I. (2022). Esun Printing Materials [publisher: Shenzhen Esun Industrial Co.]. Consultado el 1 de enero de 2022, desde <https://www.esun3d.com/products/>
- Company, G. E. (2022). A guide to plastic gearing. geoplastics.com
- Government of Canada, C. C. f. O. H. a. S. (2017). Pushing & pulling - general : osh answers. Consultado el 2 de junio de 2022, desde <https://www.ccohs.ca/oshanswers/ergonomics/push1.html>
- Hannon, J. & Mason, I. (2003). Composting of green waste shredded by a crush/cut roller versus a low speed counter-rotating shear shredder. *Compost Science & Utilization*, 11(1), 61-71. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2003.10702110>
- Haugen, E. (1975). Probabilistic Design. *Machine Design*, 47(12), 10-14.
- Hettiarachchi, L. G., Jayathillake, N., Fernando, S. & Gunawardena, S. (2019). Effects of compost particle size, moisture content and binding agents on co-compost pellet properties. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(4), 184-191. <https://doi.org/10.25165/ijabe.v12i4.4354>
- HUBS. (2022). *3D Printing Trend Report 2022* (Scientific). Protolabs Company.
- Industrial Quick Search. (2021). <https://www.iqsdirectory.com/articles/shredder/industrial-shredder.html>
- Instituto Nacional de Estadística, I. (2021). Canasta Básica Alimentaria. Consultado el 29 de octubre de 2021, desde <https://www.ine.gob.gt/ine/canasta-basica-alimentaria/>

- Jakubus, M. (2020). A comparative study of composts prepared from various organic wastes based on biological and chemical parameters. *Agronomy*, 10(6), 869. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060869>
- Johansson, N., Krook, J. & Frändegård, P. (2017). A new dawn for buried garbage? An investigation of the marketability of previously disposed shredder waste. *Waste Management*, 60, 417-427. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.015>
- Kalin, M. & Kupec, A. (2017). The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears. *Wear*, 376-377, 1339-1346. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.003>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* (Urban Development Series, Vol. 10). World Bank Group.
- Luo, S., Xiao, B., Hu, Z., Liu, S. & Guo, X. (2009). An experimental study on a novel shredder for municipal solid waste (Msw). *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(3), 1270-1274. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.057>
- Martínez, F. (1996). La Situación de la basura en la Ciudad de Guatemala. *Centro de Estudios Urbanos y Regionales, Boletín No. 30*.
- Mason, I. (2008). Design and performance of a simulated feedstock for composting experiments. *Compost Science & Utilization*, 16(3), 207-214. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2008.10702379>
- Mathys, W. & Oeynhausen, I. (2008). Organic Waste Storage without any Problems.
- Matweb. (2022). AISI Type 430F Stainless Steel. Consultado el 29 de junio de 2022, desde <https://www.matweb.com/errorUser.aspx?msgid=2&ckck=nocheck>
- Oliveira, L. S., Oliveira, D. S., Bezerra, B. S., Silva Pereira, B. & Battistelle, R. A. G. (2017). Environmental analysis of organic waste treatment focusing on composting scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 155, 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.093>
- Pandyaswargo, A. H. & Premakumara, D. G. J. (2014). Financial sustainability of modern composting: the economically optimal scale for municipal waste composting plant in developing Asia. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3(3), 4. <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0066-y>
- Real Academia Española. (2021). <https://dle.rae.es/triturar>
- Redwood, B., Garrett, B. & Schöffner, F. (2017). *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. 3D Hubs.
- Roman, P., Martínez, M. & Pantoja, A. (2015). *Farmer´s Compost Handbook*. FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I3388E/>
- SDP/SI. (2022). Gear types and manufacturing [publisher: Designatronics, inc]. Consultado el 1 de enero de 2022, desde <https://sdp-si.com/resources/>
- Thakur, R. (2019). Design & fabrication of portable waste shredder machine for domestic compost. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7(5), 1501-1504. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.5254>
- Uche, A. G., Nwabueze, A. S., Chibuiké, M. J. & Joseph, M. C. (2018). Energy requirements for cutting of selected vegetables: A review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 20(4), 139-148. Consultado el 16 de agosto de 2022, desde <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4949>
- US EPA, O. (2013). Composting at home. Consultado el 28 de octubre de 2021, desde <https://www.epa.gov/recycle/composting-home>

- Wanrooe. (2018). Durable waste plastic double shaft shredder blade knife. <https://www.wanrooetech-pulverizer.com/waste-plastic-double-shaft-shredder-blade-knife/>
- WasteAtlasPartnership. (2014). *Waste Atlas: The World's 50 Biggest Dumpsites*. (inf. téc.). UN Environment Programme. <http://www.atlas.d-waste.com/Documents/WasteAtlas-report-2014-webEdition.pdf>
- WasteCare Corporation. (2013). https://www.wastecare.com/Articles/Shredders_Grinders.htm
- Zhang, Y., Purssell, C., Mao, K. & Leigh, S. (2020). A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears. *Tribology International*, 141, 105953. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105953>
- Zhang, Y., Kusch-Brandt, S., Gu, S. & Heaven, S. (2019). Particle size distribution in municipal solid waste pre-treated for bioprocessing. *Underutilised Resources in Urban Environments*, 8(4), 166. <https://doi.org/10.3390/resources8040166>
- Zortrax. (2017). Injection molding, cnc machining & plastic forming vs 3d printing. <https://zortrax.com/blog/injection-molding-cnc-machining-plastic-forming/>

12.1. Protocolo de pruebas

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Protocolo de prueba para
“Diseño y fabricación de prototipo de triturador de desechos caseros
para compost”

Presentado por:
Guillermo Lima De La Cruz
17458

Del programa de Licenciatura en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, 2022

1. Alcance

El siguiente documento describe el proceso de una prueba que comprueba las condiciones de operación y parámetros de salida de un triturador de desechos para compost. El objetivo de esta prueba es comprobar que el triturador entrega desechos procesados en un rango de tamaño de partícula adecuado según las condiciones de diseño. Asimismo, la prueba debe comprobar que la velocidad de operación del triturador es tal que satisfaga el requerimiento definido por el diseñador.

2. Antecedentes

Para el análisis de muestras en donde se desea comprobar el tamaño de partícula aproximado de una muestra en específico, se utiliza el proceso de tamizado. El tamizado es un proceso que se utiliza para la separación de partículas. La abertura del tamiz puede ser de forma circular o cuadrada. El paso a través del tamiz requiere que las partículas tengan un área seccional menor que la abertura, de manera que sean capaz de atravesarlo. Las partículas separadas se miden con el uso de una balanza, por lo que el proceso de tamizado proporciona una distribución de masa o volumen. Esto se puede expresar en una distribución de diámetros equivalentes, obteniendo como resultado porcentajes o una curva de distribución granulométrica. (Cisa, 2022)

3. Equipo requerido para realización de prueba

Para la realización adecuada de la prueba se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos.

Equipo

No.	Equipo	Descripción	Casilla de verificación
1	Triturador de desechos caseros para compost	Elemento al cual se le realizará la prueba de operación.	
2	Instrumento Vernier	Instrumento que permite verificar el tamaño de las partículas de salida.	
3	Recipiente plástico 20x20x10 cm	Recipiente que permite almacenar la muestra a procesar en el triturador.	
3	Muestra de 1000 gramos de desechos	Desechos que serán procesados dentro del triturador y posteriormente medidos. La muestra contiene una combinación arbitraria de los siguientes desechos: frutas, verduras, granos, pastas, restos de jardinería, papel, trozos de cartón, filtros de café, bolsas de té y cáscaras de nueces.	
4	Recipiente plástico de 10x10x5 cm	Recipiente que permite obtener parte de la muestra para verterla en el triturador.	

5	Pesa	Instrumento que permite determinar la distribución de tamaño de partícula.	
6	Cronómetro	Instrumento que permite tener una referencia sobre el tiempo utilizado para procesar los desechos.	

4. Recomendaciones de seguridad

La recomendación para esta prueba es tener en consideración que se está trabajando con un dispositivo de trituración de desechos, por lo que el introducir cualquier extremidad al triturador está terminantemente prohibida. Asegurarse que no hay piezas sueltas y que el triturador está sobre una superficie que no permita el deslizamiento.

5. Protocolo de prueba

Paso	Condición a cumplir	Fecha de realización
1	Almacenar los desechos a procesar en el recipiente plástico de 20x20x10 cm.	
Desviaciones del proceso:		
2	Comprobar que los desechos cumplan con el requisito en la sección de equipo apartado 3.	
Desviaciones del proceso:		
3	Pesar la muestra de desechos a procesar.	
Desviaciones del proceso:		
4	Preparar recipiente plástico de 10x10x5 cm.	
Desviaciones del proceso:		
5	Iniciar el cronómetro y posicionarlo en una superficie adecuada para su uso posterior.	
Desviaciones del proceso:		
6	Utilizando el recipiente plástico de 10x10x5 cm verter la muestra de desechos desde el recipiente plástico de 20x20x10 cm hasta el triturador. Al mismo tiempo, se debe estar accionando la manivela para procesar los desechos.	
Desviaciones del proceso:		

7	Al verter la muestra en su totalidad, se debe detener el cronómetro y tomar nota de la cantidad de tiempo en minutos que llevó procesar la muestra.	
Desviaciones del proceso:		
8	Anotar dato de tiempo en la tabla de Resultado de Operación.	
Desviaciones del proceso:		
9	Separar el triturador de su contenedor.	
Desviaciones del proceso:		
10	Mediante el uso del instrumento vernier, se debe medir el diámetro de las partículas obtenidas. El objetivo de la medición es separar los desechos. Se deben hacer tres clasificaciones. La primera, para partículas con un diámetro menor a 1.3 cm. La segunda para partículas con diámetro entre 1.3 cm y 5 cm. La última para partículas con diámetro mayor a 5 cm.	
Desviaciones del proceso:		
11	Separar cada partícula según su clasificación.	
Desviaciones del proceso:		
12	Pesar el contenido neto de cada grupo de clasificación.	
Desviaciones del proceso:		
13	Anotar el dato del peso obtenido en la tabla de Resultado de Tamizado.	
Desviaciones del proceso:		

Bitácora de resultados

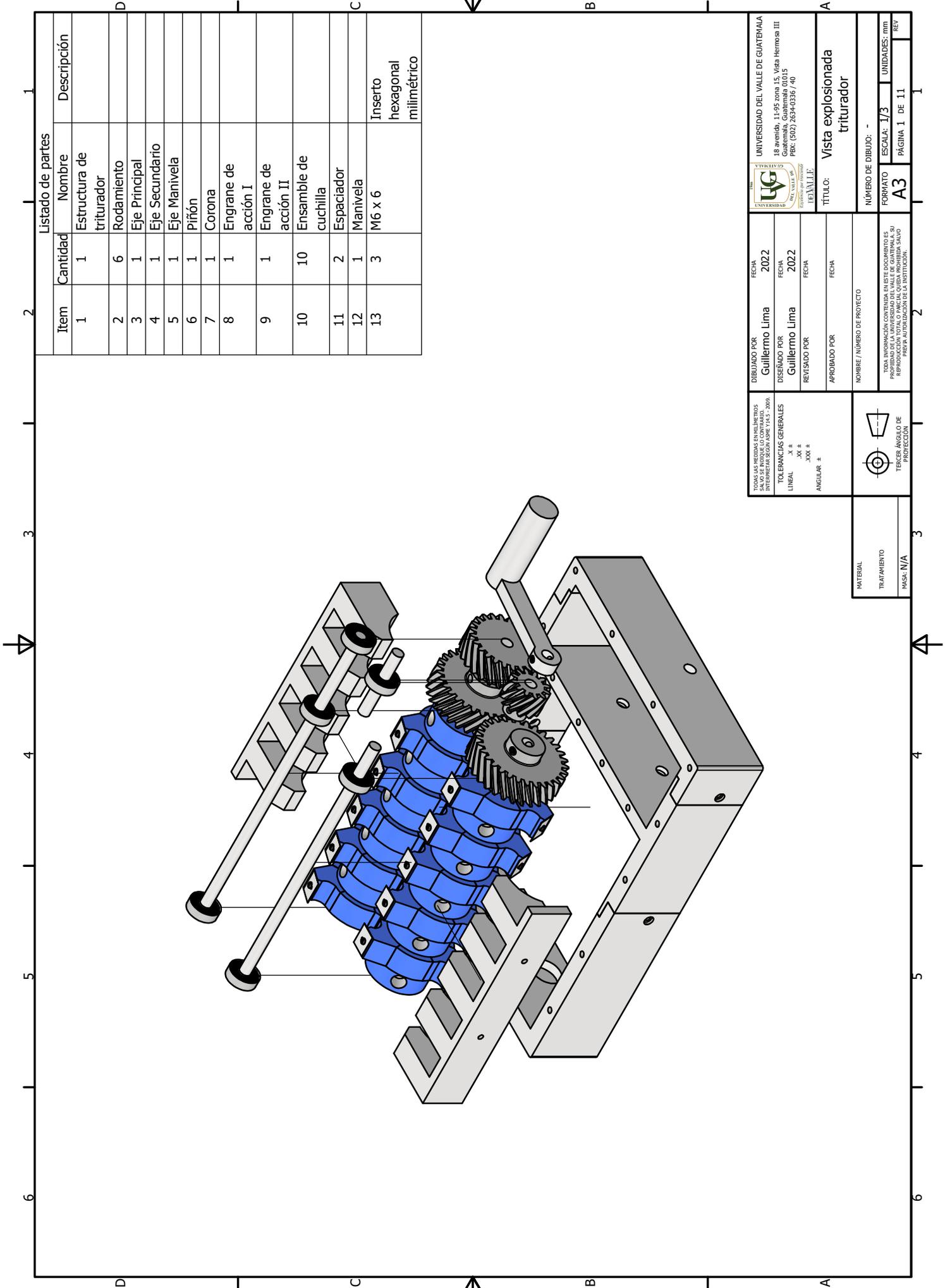
Resultado de tamizado

Tamaño de partícula procesada	Peso neto (g)
Partículas con un diámetro menor a 1.3 cm	
Partículas con diámetro entre 1.3 cm y 5 cm	
Partículas con diámetro mayor a 5 cm	

Resultado de operación

Ítem	Valor
Peso neto de la muestra (gramos)	
Tiempo transcurrido para procesar los desechos (min)	

12.2. Planos de construcción



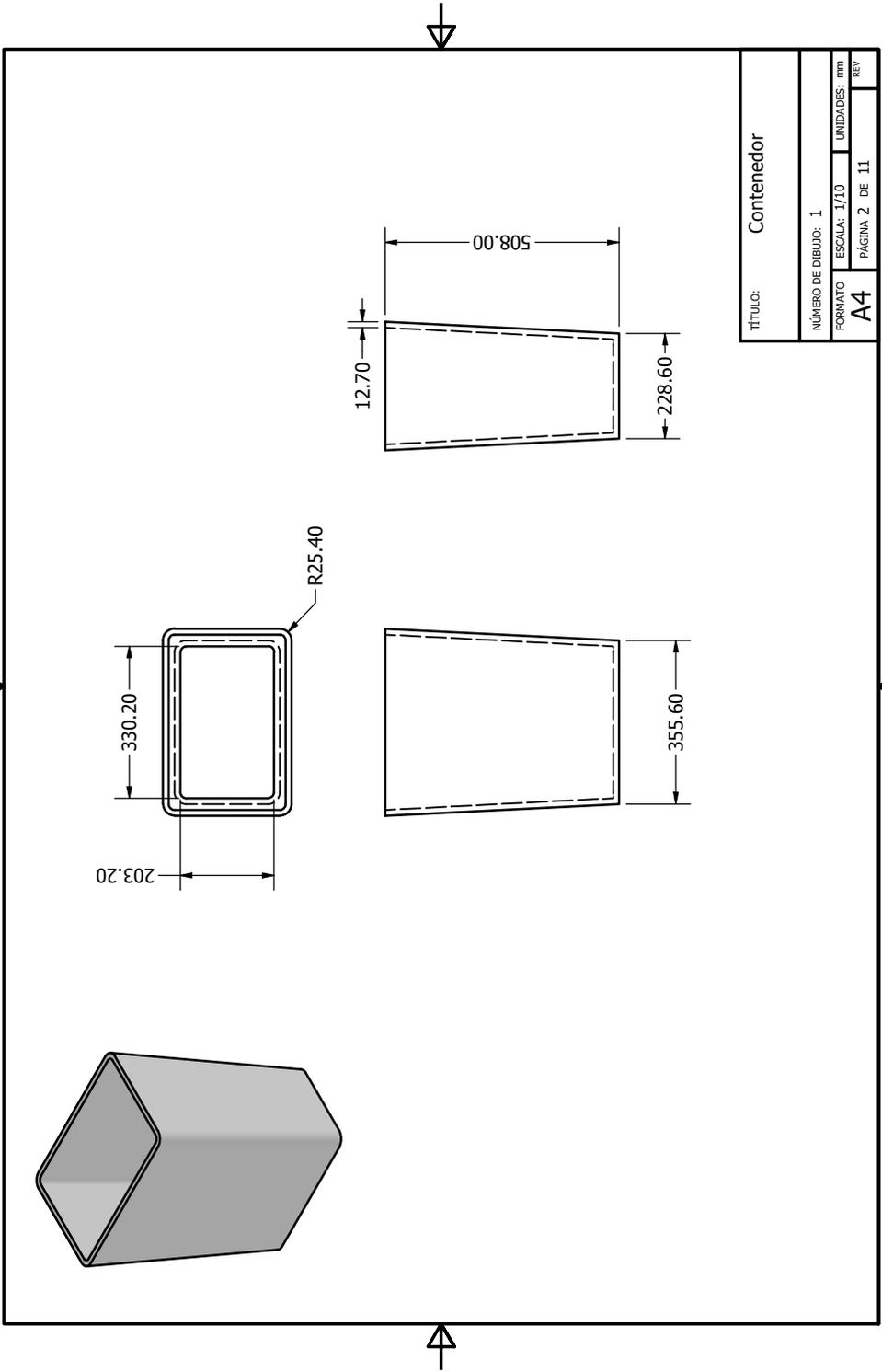
Listado de partes

Item	Cantidad	Nombre	Descripción
1	1	Estructura de triturador	
2	6	Rodamiento	
3	1	Eje Principal	
4	1	Eje Secundario	
5	1	Eje Manivela	
6	1	Piñón	
7	1	Corona	
8	1	Engrane de acción I	
9	1	Engrane de acción II	
10	10	Ensamble de cuchilla	
11	2	Espaciador	
12	1	Manivela	
13	3	M6 x 6	Inserto hexagonal milimétrico

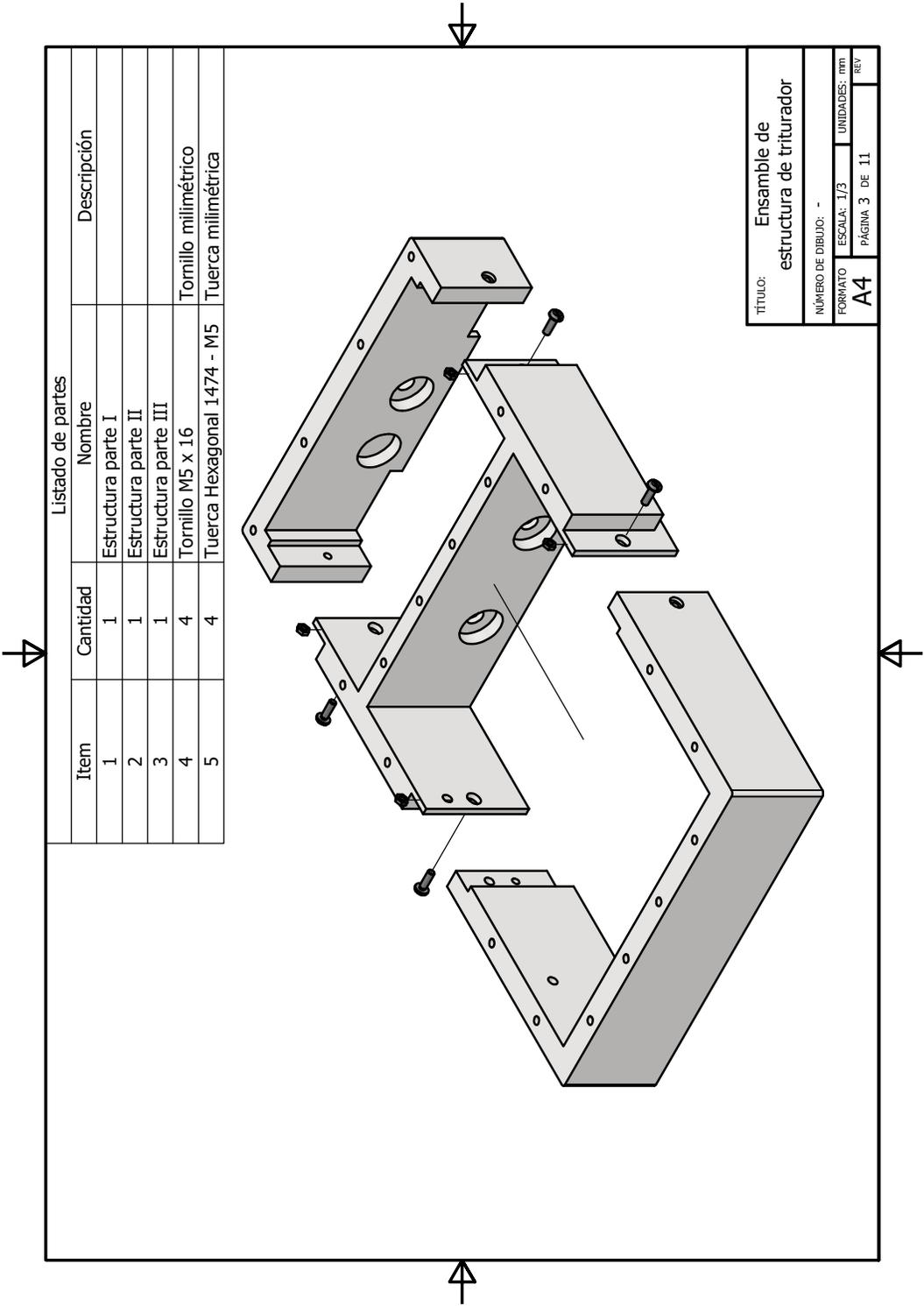
<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III</p> <p>GUATEMALA, GUATEMALA</p> <p>TEL: (502) 2634-0336 / 40</p>	<p>FECHA: 2022</p> <p>DISEÑADO POR: Guillermo Lima</p>	<p>FECHA: 2022</p> <p>DISEÑADO POR: Guillermo Lima</p>
	<p>REVISADO POR:</p> <p>APROBADO POR:</p>	<p>FECHA:</p> <p>FECHA:</p>
	<p>NOMBRE / NÚMERO DE PROTECTOR</p>	
<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p>		
<p>TÍTULO: Vista explosionada triturador</p>		
<p>NÚMERO DE DIBUJO: -</p>		
<p>FORMATO: A3</p> <p>ESCALA: 1/3</p> <p>PÁGINA 1 DE 11</p>		
<p>UNIDADES: mm</p> <p>REP:</p>		

<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p>	<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p>
<p>TOLERANCIAS GENERALES</p> <p>LINEAL .X #</p> <p>ANGULAR .XX #</p>	<p>TERCER ANGLULO DE PROTECCIÓN</p>
<p>MATERIAL</p> <p>TRATAMIENTO</p> <p>MASA: N/A</p>	<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p>

<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p>	<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p>
<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p>	<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p>

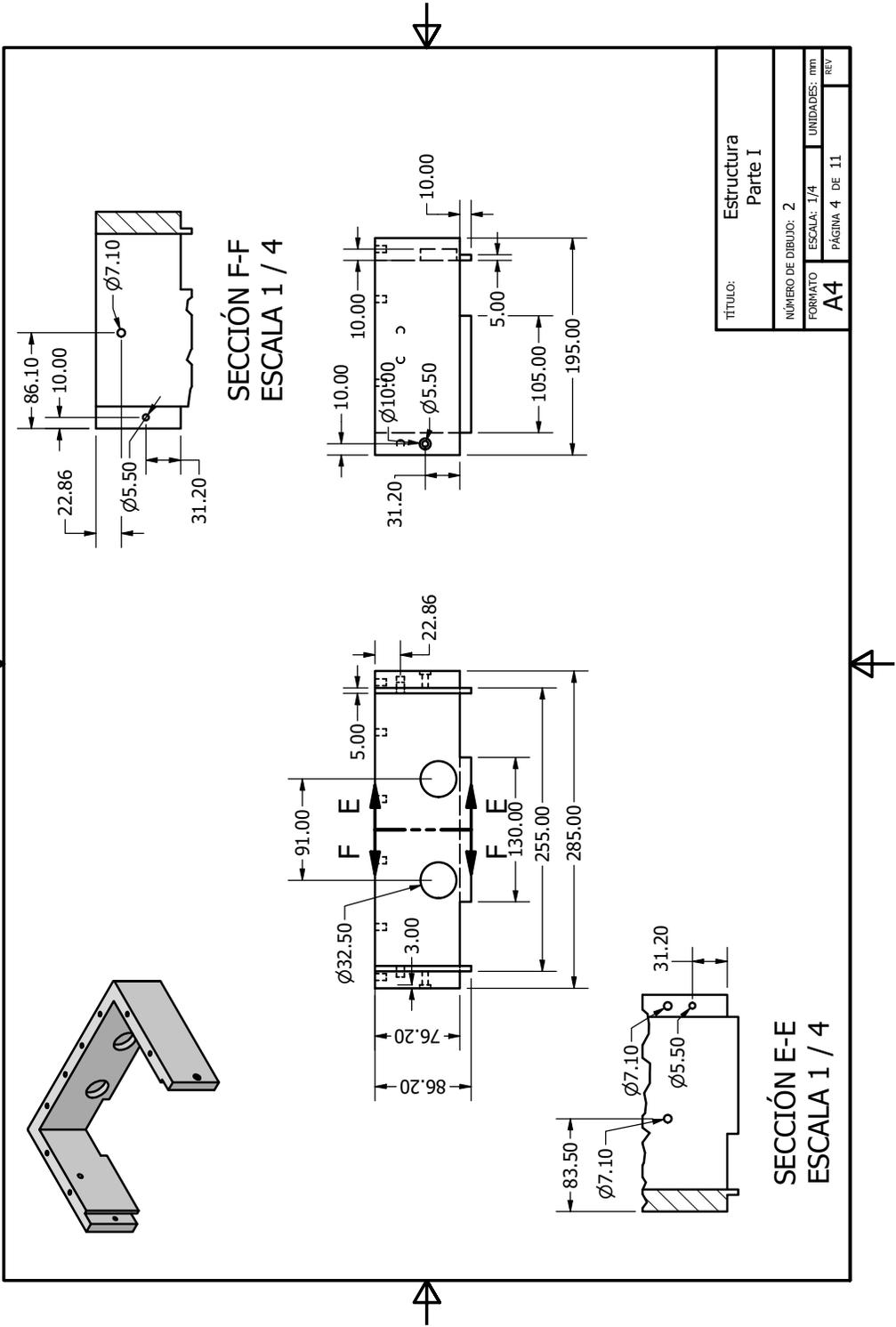


TÍTULO: Contenedor			
NÚMERO DE DIBUJO: 1			
FORMATO	ESCALA: 1/10	UNIDADES: mm	REV
A4	PÁGINA 2 DE 11		



Listado de partes			
Item	Cantidad	Nombre	Descripción
1	1	Estructura parte I	
2	1	Estructura parte II	
3	1	Estructura parte III	
4	4	Tornillo M5 x 16	Tornillo milimétrico
5	4	Tuerca Hexagonal 1474 - M5	Tuerca milimétrica

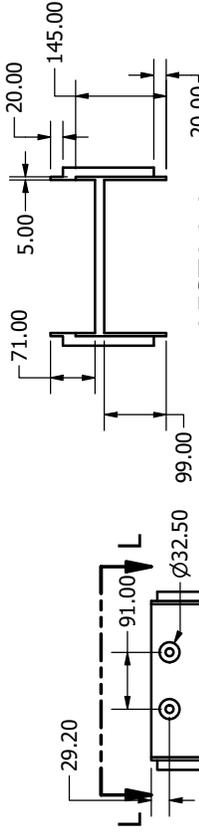
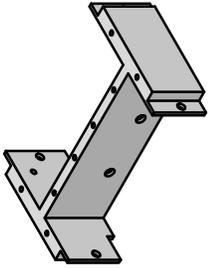
TÍTULO: Ensamble de estructura de triturador	
NÚMERO DE DIBUJO: -	
FORMATO A4	ESCALA: 1/3
UNIDADES: mm	
PÁGINA 3 DE 11	
REV	REV



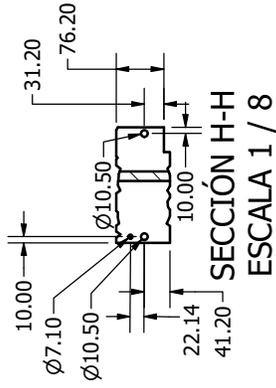
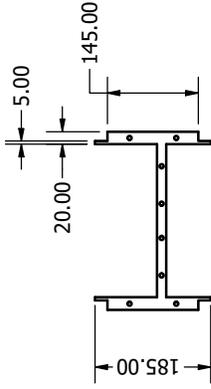
SECCIÓN F-F
ESCALA 1 / 4

SECCIÓN E-E
ESCALA 1 / 4

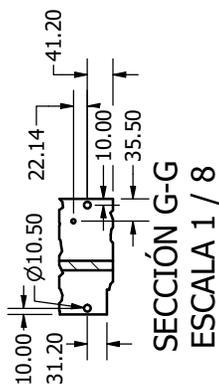
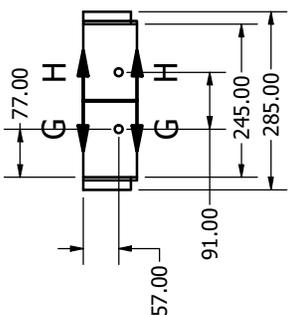
TÍTULO:		Estructura Parte I	
NÚMERO DE DIBUJO:		2	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	REV
A4	1/4	mm	
PÁGINA 4 DE 11			



VISTA L-L
ESCALA 1 / 8

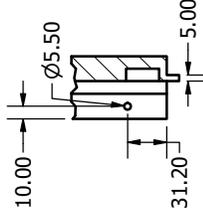
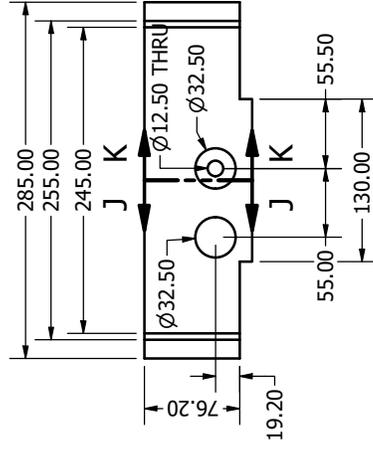
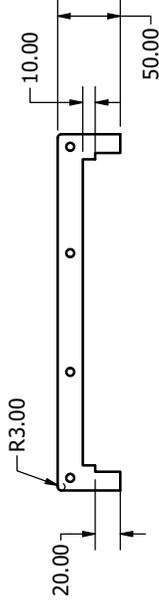
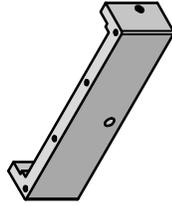


SECCIÓN H-H
ESCALA 1 / 8

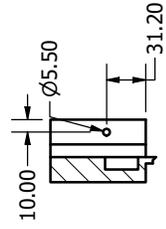


SECCIÓN G-G
ESCALA 1 / 8

TÍTULO:	Estructura Parte II
NÚMERO DE DIBUJO:	3
FORMATO	A4
ESCALA:	1/4
UNIDADES:	mm
PÁGINA	5 DE 11
REV	

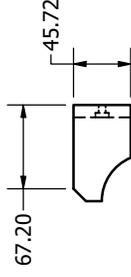
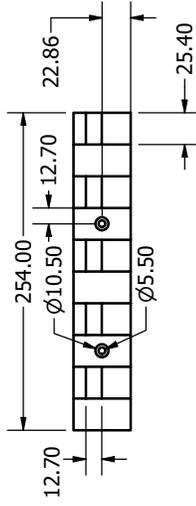
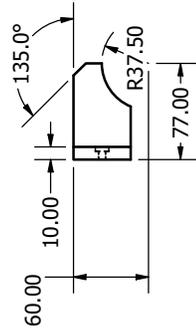
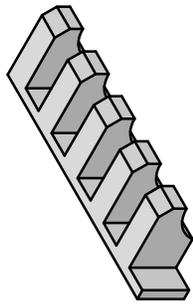


SECCIÓN J-J
ESCALA 1 / 4

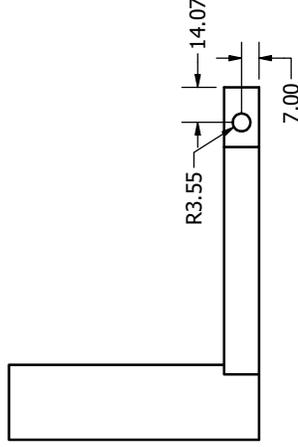
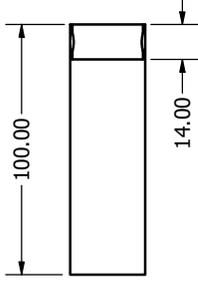
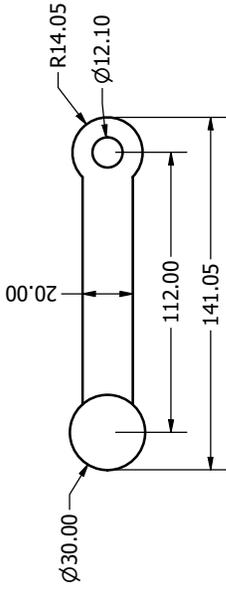
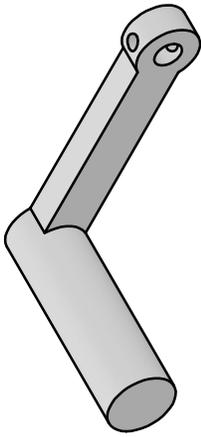


SECCIÓN K-K
ESCALA 1 / 4

TÍTULO:		Estructura Parte III	
NÚMERO DE DIBUJO:		4	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	REV
A4	1/4	mm	
PÁGINA 6 DE 11			



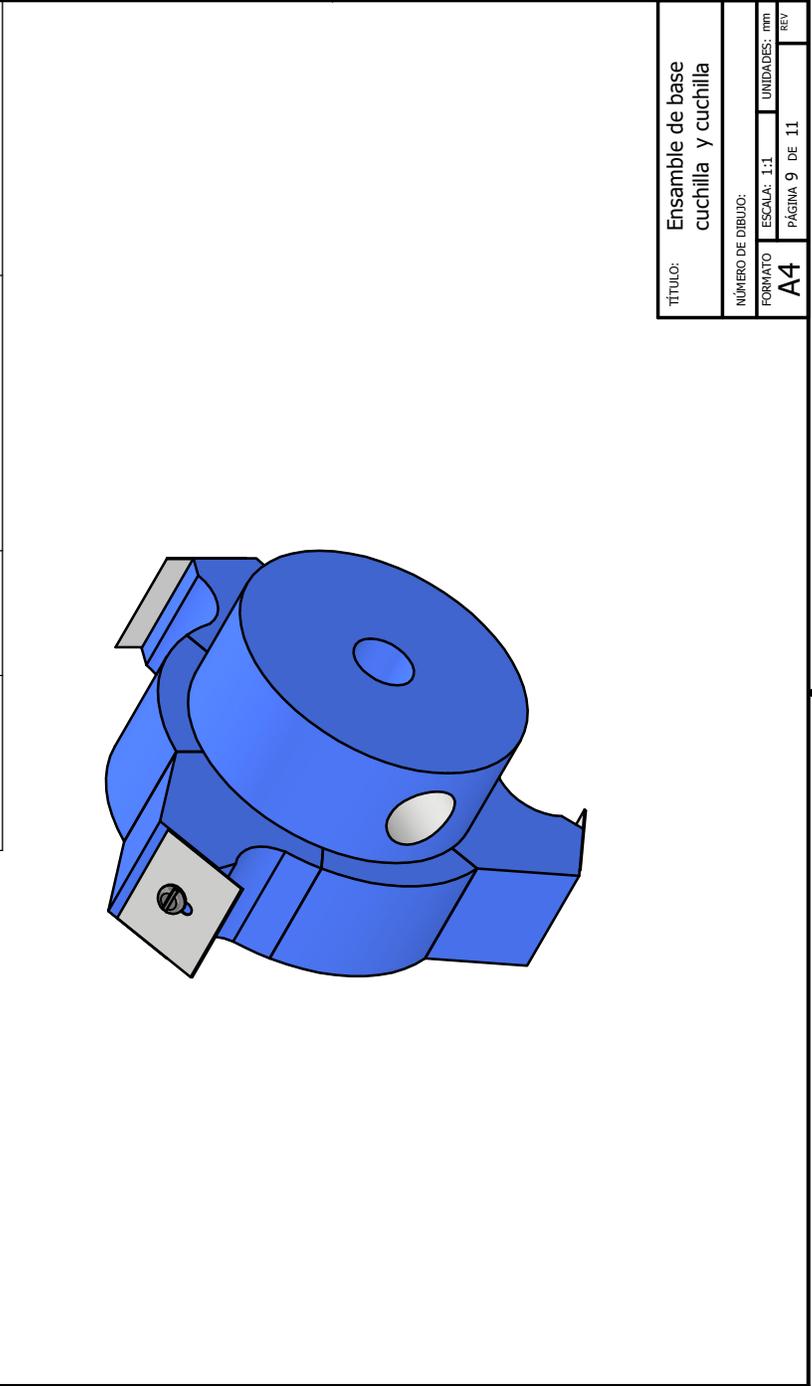
TÍTULO:	Espaciador			
NÚMERO DE DIBUJO:	5			
FORMATO	ESCALA:	I/4	UNIDADES:	mm
A4	PÁGINA 7 DE 11		REV	



TÍTULO:	Manivela		
NÚMERO DE DIBUJO:	6		
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	
A4	1/2	mm	
	PÁGINA 8	DE 11	
		REV	

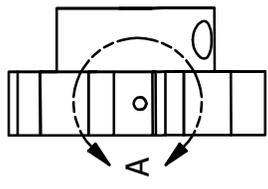
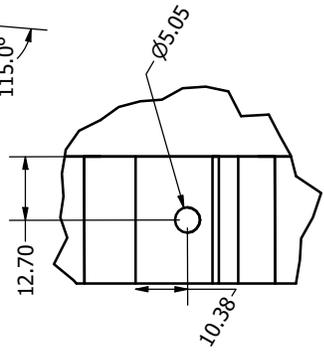
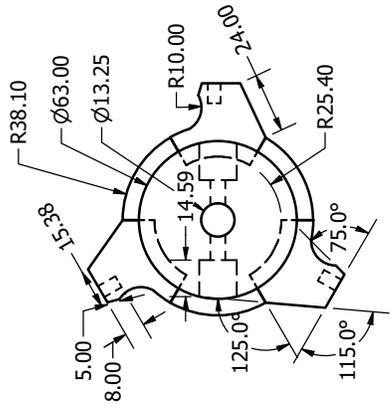
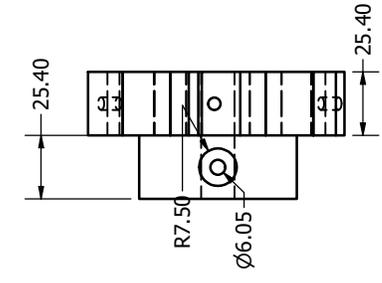
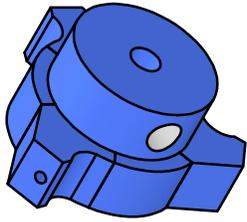


Listado de partes		
Item	Cantidad	Nombre
1	1	Base plástica de cuchilla
2	3	Cuchilla metálica
3	3	Tornillo M3 x 5



TÍTULO:	Ensamble de base cuchilla y cuchilla		
NÚMERO DE DIBUJO:			
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm	REV
A4	PÁGINA 9	DE 11	





DETALLE A
ESCALA 1 : 1

TÍTULO:	Base para cuchilla		
NÚMERO DE DIBUJO:	7		
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	REV
A4	1/2	mm	
	PÁGINA 10	DE 11	

