

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Máquina trituradora de neumáticos:  
Módulo de potencia y corte**

Trabajo de graduación presentado por Pedro Josué García Aguilar para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

Guatemala,  
2022







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Máquina trituradora de neumáticos:  
Módulo de potencia y corte**

Trabajo de graduación presentado por Pedro Josué García Aguilar para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

Guatemala,  
2022



Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Cesar Alberto Rosales Gómez

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Cesar Alberto Rosales Gómez

(f)   
Ing. Andrés Rodrigo Vian Najarro

(f)   
Ing. Rony José Herrarte Estévez

Fecha de aprobación: Guatemala, 7 de diciembre de 2022.



Este proyecto nació del interés de la Municipalidad de Mixco, Guatemala en realizar un trabajo en pro del medio ambiente en conjunto con estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala, el cual buscaba fabricar una máquina trituradora de neumáticos de desecho para poder reutilizar el material obtenido en la elaboración de asfalto para rellenar baches en las carreteras de dicho lugar.

Sin embargo, luego de unos meses ya no se tuvo contacto con la municipalidad, pero el departamento de ingeniería mecánica en conjunto con los estudiantes decidieron seguir trabajando en este proyecto que ya estaba en fase de investigación. Con optimismo se pensaba en buscar un nuevo patrocinador que estuviera interesado en dar el aprovisionamiento económico necesario para poder llevar a cabo el proceso de manufactura de la máquina, pero esto ya no se logró.

Aun así, se continuó con el proyecto trabajando las fases de cálculos, diseño, simulaciones y cotizaciones para la máquina trituradora de neumáticos; en este trabajo específicamente el módulo de potencia y corte. Este trabajo profesional es la base para que, si en un futuro se encuentra un patrocinador o empresa interesada en el proyecto, otros estudiantes puedan ejecutar la fase de manufactura y pruebas de funcionamiento.

A pesar de los contratiempos y cambios que el proyecto sufrió, se pudieron obtener muy buenos resultados al consolidar finalmente el módulo de potencia y corte con el módulo de estructura de la máquina. Para que esto fuera posible es importante reconocer el apoyo del asesor Cesar Rosales y de los catedráticos Edgar Castillo y Gustavo Pineda quienes estuvieron dando seguimiento durante las fases del proyecto.

Después de estos 6 años de estudios quedo sumamente agradecido con mis padres por el apoyo incondicional que me han brindado, mis compañeros y catedráticos los cuales me apoyaron y contribuyeron con su tiempo, consejos y conocimientos en el desarrollo de este proyecto, y finalmente agradecido con Dios por la vida, la salud y el respaldo que siempre he visto de su parte en todo este camino.



<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>xii</b>
<b>Resumen</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>5</b>
3.1. Objetivo general . . . . .	5
3.2. Objetivos específicos . . . . .	5
<b>4. Marco teórico</b>	<b>7</b>
4.1. Neumáticos . . . . .	7
4.1.1. Propiedades de los neumáticos . . . . .	8
4.1.2. Tipos de neumáticos . . . . .	8
4.1.3. Dimensiones de los neumáticos . . . . .	10
4.1.4. Descripción y clasificación de los neumáticos . . . . .	11
4.2. Reutilización de los neumáticos . . . . .	12
4.2.1. Aplicaciones de reutilización de neumáticos . . . . .	12
4.3. Máquinas trituradoras . . . . .	14
4.4. Tipos de cuchillas de corte . . . . .	21
4.4.1. Cuchillas de dos filos . . . . .	21
4.4.2. Cuchillas con más de dos filos : . . . . .	21
4.4.3. Cuchilla-amoladora: . . . . .	22
4.5. Materiales comunes de las cuchillas de corte : . . . . .	22

<b>5. Metodología y resultados</b>	<b>25</b>
5.1. Selección de trituradora - Diseño preliminar . . . . .	25
5.2. Requisitos . . . . .	26
5.3. Cálculos y resultados . . . . .	30
5.3.1. Selección del motor . . . . .	30
5.3.2. Cálculo capacidad de trituración de la máquina . . . . .	32
5.3.3. Transmisión de potencia por medio de bandas y poleas . . . . .	33
5.3.4. Dimensionamiento diámetro de los ejes . . . . .	39
5.3.5. Selección de chumaceras . . . . .	45
5.3.6. Transmisión de potencia final por medio de engranajes . . . . .	49
5.3.7. Dimensionamiento de cuñas . . . . .	53
5.4. Selección de materiales y cotizaciones . . . . .	54
5.4.1. Cotización cuchillas de corte . . . . .	54
5.4.2. Cotización ejes de transmisión . . . . .	55
5.4.3. Cotización engranajes transmisión de potencia . . . . .	56
5.4.4. Cotización total módulo de potencia y corte . . . . .	56
5.5. Plan de simulación . . . . .	58
5.6. Ejecución de la simulación . . . . .	59
5.6.1. Objetivos de la simulación . . . . .	59
5.6.2. Propiedades de los materiales . . . . .	60
5.6.3. Soportes, contactos y cargas . . . . .	60
5.6.4. Mallado . . . . .	61
5.6.5. Resultados de la simulación . . . . .	63
5.6.6. Discusión de la simulación . . . . .	67
5.6.7. Conclusiones de la simulación . . . . .	67
5.7. Diseño . . . . .	68
<b>6. Conclusiones</b>	<b>79</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>81</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>83</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>87</b>
9.1. Planos de construcción . . . . .	87

---

## Lista de figuras

---

1.	Neumático de verano . . . . .	9
2.	Neumático de invierno . . . . .	9
3.	Neumático para todas las estaciones . . . . .	9
4.	Neumático de alto rendimiento . . . . .	10
5.	Neumático para camiones . . . . .	10
6.	Descripción de un neumático . . . . .	10
7.	Pista de atletismo de caucho reutilizado . . . . .	12
8.	Parque infantil con caucho reutilizado . . . . .	13
9.	Caucho como combustible . . . . .	13
10.	Caucho para asfalto de carreteras . . . . .	14
11.	Trituradora-amoladora de un eje . . . . .	15
12.	Trituradora de dos ejes . . . . .	15
13.	Trituradora de cuatro ejes . . . . .	16
14.	Cuchillas de dos filos . . . . .	21
15.	Cuchillas con más de dos filos . . . . .	22
16.	Cuchilla-amoladora . . . . .	22
17.	DCL módulo de corte . . . . .	31
18.	Selección del tipo de sección de banda . . . . .	34
19.	Diámetro mínimo recomendable según tipo de sección de banda . . . . .	35
20.	DCL análisis de fuerzas en los ejes . . . . .	37
21.	DCL tensiones en los ejes por componentes . . . . .	38
22.	DCL eje intermedio 3D . . . . .	41
23.	DCL plano xy eje de salida motriz . . . . .	41
24.	DCL Plano xz eje de salida motriz . . . . .	42
25.	Análisis plano xy momento flector máximo eje intermedio . . . . .	42
26.	Análisis plano xz momento flector máximo eje intermedio . . . . .	43
27.	Análisis plano xy momento flector máximo eje de salida motriz . . . . .	43
28.	Análisis plano xz momento flector máximo eje de salida motriz . . . . .	44
29.	Análisis selección chumacera eje de salida . . . . .	46
30.	Análisis de esfuerzos extremo empotrado eje de salida motriz plano xy . . . . .	46
31.	Momento flector máximo extremo empotrado eje motriz plano xy . . . . .	47
32.	Momento flector máximo extremo empotrado eje motriz plano xz . . . . .	47

33.	Esfuerzo de flexión y de contacto en engranajes . . . . .	51
34.	DCL cuña . . . . .	53
35.	Dimensionamiento cuchillas en acero Hardox 450 . . . . .	55
36.	Dimensionamiento cuchillas en acero AISI 1045 plancha . . . . .	55
37.	Cotización ADEK cuchillas de corte . . . . .	58
38.	Cuchilla de corte diseño básico . . . . .	59
39.	Soporte de la cuchilla en la simulación . . . . .	60
40.	Fuerza de corte cizalla aplicada en la cuchilla . . . . .	61
41.	Mallado con Sizing de 10 mm para la cuchilla . . . . .	62
42.	Histograma Skewness cuchilla de corte AISI 1045 . . . . .	62
43.	Histograma Skewness cuchilla de corte Hardox 450 . . . . .	62
44.	Deformación total mm - Acero AISI 1045 . . . . .	63
45.	Deformación total mm - Acero Hardox 450 . . . . .	64
46.	Deformación elástica equivalente - AISI 1045 . . . . .	64
47.	Deformación elástica equivalente - Acero Hardox 450 . . . . .	64
48.	Esfuerzo equivalente Von Mises (MPa) - AISI 1045 . . . . .	65
49.	Esfuerzo equivalente Von Mises (MPa) - Acero Hardox 450 . . . . .	65
50.	Esfuerzo de corte máximo (MPa) - Acero AISI 1045 . . . . .	65
51.	Esfuerzo de corte máximo (MPa) - Acero Hardox 450 . . . . .	66
52.	Factor de seguridad - Acero AISI 1045 . . . . .	66
53.	Factor de seguridad - Acero Hardox 450 . . . . .	66
54.	Explosión máquina trituradora de neumáticos . . . . .	68
55.	Máquina trituradora de neumáticos . . . . .	69
56.	Listado de los componentes de la máquina . . . . .	69
57.	Listado de materiales y componentes a manufacturar o comprar . . . . .	70
58.	Dimensiones - Vista frontal de la máquina . . . . .	71
59.	Dimensiones - Vista lateral de la máquina . . . . .	71
60.	Dimensiones - Vista de planta de la máquina . . . . .	72
61.	Módulo de transmisión de potencia . . . . .	72
62.	Módulo de potencia – Vista lateral . . . . .	73
63.	Módulo de potencia – Vista de planta . . . . .	73
64.	Análisis distancia entre centros - Módulo de corte . . . . .	74
65.	Diseño de cuchillas con ángulo de cizalla 15° . . . . .	75
66.	Diseño de cuchilla de corte . . . . .	75
67.	Módulo de corte . . . . .	76
68.	Módulo de corte – Vista lateral . . . . .	76
69.	Módulo de corte – Vista de planta . . . . .	76
70.	Diseño de engranajes . . . . .	77
71.	Par de engranajes transmisión de potencia . . . . .	77
72.	Eje intermedio . . . . .	78
73.	Eje de salida motriz . . . . .	78
74.	Eje de salida conducido . . . . .	78
75.	Módulo de potencia y corte . . . . .	78

---

## Lista de cuadros

---

1.	Propiedades y dimensiones del neumático de camión . . . . .	8
2.	Comparativo motores DC vs AC . . . . .	19
3.	Tabla comparativa tipo de sistemas de transmisión de potencia . . . . .	20
4.	Matriz de decisión trituradora de neumáticos a diseñar . . . . .	26
5.	Requisitos de dimensiones . . . . .	26
6.	Requisitos de apariencia . . . . .	26
7.	Requisitos de seguridad . . . . .	27
8.	Requisitos de estándares . . . . .	27
9.	Requisitos de usuario . . . . .	27
10.	Requisitos de potencia . . . . .	28
11.	Requisitos de costos . . . . .	28
12.	Requisitos de interfaz de módulos . . . . .	28
13.	Requisitos de funcionamiento . . . . .	29
14.	Cálculo fuerza de corte . . . . .	30
15.	Características del neumático de camión y área de la cuchilla . . . . .	31
16.	Capacidad de corte por revolución de la máquina . . . . .	33
17.	Producción total de trituración de la máquina . . . . .	33
18.	Datos iniciales transmisión de potencia - Poleas y bandas . . . . .	34
19.	Cálculos para número de bandas primera etapa de reducción . . . . .	35
20.	Cálculos para número de bandas segunda etapa de reducción . . . . .	36
21.	Tensiones y torques para cada etapa . . . . .	37
22.	Poleas y bandas seleccionadas para la máquina . . . . .	38
23.	Tensión resultante por componentes en cada polea . . . . .	39
24.	Factores de modificación y algunas propiedades acero 1045 cold rolled . . . . .	39
25.	Cálculo del factor de seguridad para los ejes según regla de Thumb . . . . .	40
26.	Diámetro menor requerido para cada eje . . . . .	44
27.	Factores de seguridad eje intermedio y salida motriz . . . . .	45
28.	Factor de seguridad para el extremo empotrado eje de salida motriz . . . . .	48
29.	Factor de seguridad extremo empotrado según criterio de Ullman . . . . .	48
30.	Factor de seguridad ED-Goodman y fluencia extremo empotrado . . . . .	48
31.	Chumaceras seleccionadas módulo de potencia y corte . . . . .	49
32.	Datos generales del par de engranes . . . . .	50

33.	Datos de diseño de los engranes . . . . .	50
34.	Propiedades mecánicas del acero AISI 1045 . . . . .	50
35.	Análisis inicial par de engranajes . . . . .	51
36.	Factores de esfuerzo de flexión . . . . .	51
37.	Factores para esfuerzo de contacto . . . . .	52
38.	Resultados esfuerzos de flexión y contacto en el par de engranajes . . . . .	52
39.	Cálculos de la sección de las cuñas . . . . .	53
40.	Cotización materiales cuchillas de corte . . . . .	54
41.	Cotización materiales ejes de transmisión . . . . .	56
42.	Cotización material para engranajes motriz y conducido . . . . .	56
43.	Cotización total módulo de potencia y corte máquina trituradora de neumáticos	57
44.	Propiedades de los aceros a simular . . . . .	60
45.	Resultados de la simulación de las cuchillas . . . . .	63

Se diseñó el módulo de potencia y corte de una máquina trituradora de neumáticos de desecho con capacidad para triturar neumáticos con un peso máximo de 70 kilogramos, lo cual abarca neumáticos de vehículos livianos y camiones pequeños. Con base en una matriz de decisión se seleccionó una máquina trituradora de dos ejes con cuchillas de doble filo, con el objetivo de obtener residuos en forma de fibras rectangulares cuyas áreas se encuentren entre 150 a 350  $cm^2$ . El módulo de potencia está conformado por un motor trifásico y dos etapas de reducción de velocidad, las cuales se han diseñado utilizando bandas y poleas. Por otra parte, el módulo de corte está conformado por los ejes intermedio, motriz y conducido, cuñas, chumaceras, así como las principales herramientas encargadas de triturar, es decir las cuchillas de corte.

El objetivo principal de este trabajo fue calcular y diseñar los módulos de potencia y corte de la trituradora, también se realizó la cotización de ambos módulos obteniendo un costo total de Q114,529.54, importante mencionar que son solo costos de materiales ya que no se tomó en cuenta el costo de manufactura, pero se espera que este presupuesto sea de gran valor para otros estudiantes que busquen realizar la etapa de fabricación.

Las cuchillas de corte han sido los componentes con el costo más elevado, aun habiéndose seleccionado la opción más económicamente viable (acero AISI 1045), pues representan aproximadamente un 42 % del monto total de la cotización del módulo de potencia y corte. El mejor material para fabricar las cuchillas es un acero antidesgaste como el Hardox 450, con el inconveniente de que éste aumentaba en un factor de 4 el costo de las cuchillas; sin embargo, se consideró enriquecedor realizar un análisis costo beneficio comparando la misma geometría y diseño de cuchillas de corte con las propiedades de los aceros mencionados en una simulación de elementos finitos, para determinar, en base al comportamiento ante los mismos esfuerzos, si en realidad valdría la pena ese aumento de costo de utilizar un acero antidesgaste o no.

Por último, se muestra la sección de diseño de cada componente con una descripción de la metodología en base a los cálculos realizados, se diseñó utilizando el software Autodesk Inventor®. El diseño del módulo de potencia y corte se ensambló finalmente con el módulo de la estructura, el cual no es parte de este trabajo, pero se puede encontrar en la tesis “Máquina trituradora de neumáticos – módulo estructura” del estudiante Juan Martínez.



The power and cutting module of a waste tire shredding machine was designed, which is capable of shredding truck tires weighing up to 70 kilograms as a maximum. Based on a decision matrix, it was decided to make a two-shaft shredding machine with double-edged blades, with the aim of obtaining waste in the form of rectangular fibers whose areas are between 150 and 350  $cm^2$ . The power module is made up of a three-phase motor and two speed reduction stages, which have been designed using belts and pulleys. On the other hand, the cutting module is made up of the intermediate, driving and driven shafts, as well as the main tools in charge of grinding, that is, the cutting blades. The wedges for the assembly of each component dependent on each other were also dimensioned and the required bearings of both modules were selected.

The main objective of this work was to calculate and design the power and cutting modules of the shredder, however, the price of both modules was also made, obtaining a total cost of Q106,296.82, it is important to mention that it is only material costs since The cost of manufacturing was not taken into account, but it is expected that this budget will be of great value to other students who seek to carry out the manufacturing stage.

The cutting blades have been the components with the highest cost, even though the most economically viable option (AISI 1045 steel) was selected, as they represent approximately 42 % of the total price of the power and cutting module. The best material to make the blades is an anti-wear steel such as Hardox 450, with the drawback that it increased the cost of the blades by a factor of 4; however, it was considered enriching to carry out a cost-benefit analysis comparing the same geometry and design of cutting blades with the properties of the steels mentioned in a simulation of finite elements, to determine, based on the behavior under the same stresses, if it would actually be worth increased cost of using an anti-wear steel or not.

Finally, the design section of each component is shown with a description of the design methodology based on the calculations made using the Autodesk Inventor® software. The design of the power and cutting module was finally assembled with the structure module, which is not part of this work, but can be found in the thesis "Tire shredding machine - structure module" by student Juan Martínez.



La vida útil de los neumáticos depende de muchos factores, como lo puede ser el modo de manejo del conductor, la condición de las carreteras, tiempos de frenado, pero principalmente depende del kilometraje al cual se han expuesto, un valor promedio es de 50,000 millas para luego ser cambiados (Bob Moore, 2020). Los neumáticos después de haber alcanzado su vida útil pueden durar hasta 60 años en un vertedero, si en caso son llevado a esos lugares, de no llevarse a un vertedero o un lugar de reciclaje adecuado casi un 30% de los neumáticos de desecho se eliminan con malas prácticas, como lo es quemándolos, lo cual genera serios problemas a la salud de las personas y al medio ambiente (Vulcana, 2021).

En Guatemala se estima que anualmente se produce 100,000 toneladas de desecho de neumáticos de automóviles (ProVerde, 2013). Por ello, los vertederos ya no son una solución práctica para la gran cantidad de neumáticos en desuso, debido a que el volumen que ocupan en su estado original es muy grande, es por esto que existe una gran necesidad de generar ideas de reutilización de neumáticos de desecho, las cuales puedan ser rentables o incentivadoras a las comunidades.

Para una reutilización innovadora en donde se busque llevar el neumático de desecho hacia una forma o geometría de menores tamaños, es necesario la utilización de una máquina trituradora, la cual está conformada por dos módulos: potencia y corte, el primero de ellos es el encargado de accionar la máquina para su funcionamiento, el segundo tiene la tarea de triturar y de esta manera llevar el material a un tamaño específico, para lo cual utiliza cuchillas o ejes de corte.

El objetivo de este trabajo consiste en calcular y diseñar el módulo de potencia y corte de una máquina trituradora de neumáticos capaz de triturar y obtener del residuo, fibras rectangulares que pueden ser material para la producción de asfalto de carreteras, pisos de parques infantiles o para pistas de atletismo, y con esto, se presenta una máquina para reutilizar los compuestos de los neumáticos en aplicaciones útiles en pro del medio ambiente.



La historia de la reutilización de neumáticos inició con el uso de estas para columpios y sentaderos. Luego se empezó a utilizar en parachoques de muelles, jardines improvisados, esculturas u otros usos creativos; sin embargo, estas aplicaciones no han sido suficientes para consumir la gran cantidad de neumáticos de desecho que hay hoy en día en todo el mundo (Vulcana, 2021).

En la actualidad han surgido nuevas ideas de reutilización de neumáticos, especialmente del caucho que contienen estas, del cual por medio de procesos de trituración y licuefacción química se puede obtener relleno de asfalto modificado y construir carreteras más seguras (Commendatore, 2018). Pero para ello, es necesario la utilización de una máquina trituradora, la cual está conformada por dos módulos: potencia y corte, el primero de ellos es el encargado de accionar la máquina para su funcionamiento, el segundo tiene el objetivo de triturar y de esta manera llevar el material a un tamaño o geometría específica, para lo cual utiliza cuchillas o ejes de corte.

En los últimos años las herramientas de corte o trituración han tenido una amplia área de aplicaciones, desde triturar diferentes tipos de polímeros hasta componentes como vidrio, y con ello se ha logrado la reutilización de estos materiales en aplicaciones útiles. Los residuos de los materiales se pueden obtener de diferentes maneras, gracias a que las herramientas de corte son versátiles y se pueden diseñar para obtener un residuo con las geometrías más adecuadas para su posterior procesamiento. Además, con el sistema de potencia las herramientas de corte o trituración son multifuncionales ya que permiten variar valores como la velocidad o la potencia de trabajo.

Conscientes de que la gran cantidad de neumáticos de desecho es un problema mundial, Guatemala no es la excepción ya que se estima que anualmente en el país se produce 100,000 toneladas de desecho de neumáticos de automóviles (ProVerde, 2013).

El resultado que se pretende alcanzar es reutilizar los neumáticos de desecho para transformarlas en relleno de asfalto, para ello se calculará y diseñará el módulo de potencia y corte de una máquina trituradora, la cual sea capaz de triturar neumáticos de diferentes tipos de automóviles, y obtener residuos con geometrías adecuadas para su posterior transformación. Con el diseño de la máquina trituradora y sus respectivos módulos, diferentes instituciones o municipalidades podrán construirla en un futuro y ser capaces de obtener por medio de los neumáticos de desecho su propio material para relleno de asfaltos en las comunidades, reutilizando de manera inteligente en pro del medio ambiente y reduciendo gastos de infraestructura.

### 3.1. Objetivo general

Diseñar el módulo de potencia y corte de una máquina trituradora de neumáticos de desecho.

### 3.2. Objetivos específicos

- Determinar los requisitos que debe cumplir el módulo de potencia y corte.
- Seleccionar el motor que se debe comprar para la trituradora según los requerimientos de potencia.
- Diseñar y seleccionar componentes y materiales que integrarán el módulo de corte en la trituradora.
- Ensamblar el diseño del módulo de potencia y corte con el módulo de estructura de la máquina.
- Realizar una simulación sobre la resistencia y capacidades mecánicas de las cuchillas de corte a las fuerzas sometidas, asumiendo su fabricación de acero AISI 1045 y acero Hardox 450.



### 4.1. Neumáticos

La historia de los neumáticos inició con el uso del caucho macizo, el cual estaba formado únicamente por caucho sin el uso de aire, utilizado para los vehículos de baja velocidad debido a su poca capacidad de absorción de los impactos. En 1888, *Benz* inventó el primer automóvil de gasolina, equipado con ruedas de metal cubiertas con caucho y llenas de aire, esto dio como resultado al neumático.

En 1931, la empresa estadounidense *Du Pont* industrializó con éxito el caucho sintético, con esto se permitió que la industria de los neumáticos, que dependían del caucho natural, aumentara significativamente en cantidad y calidad, se considera que este hecho marcó el comienzo del punto de inflexión en la producción de neumáticos (Hankook, 2019).

En la década de 1940, debido a los altos precios del petróleo, se hizo popular el reducir tamaño y peso los automóviles existentes, además, se creó el neumático sin cámara, con lo cual se vio reflejado el ahorro de combustible. De 1970 en adelante, se considera la etapa marcada por la segunda popularización y seguridad del automóvil, en donde las industrias desarrollaron nuevos neumáticos como el *Run-Flat*, el cual permitió poder seguir circulando hasta 80 km/h sin ser reemplazado en caso se rayara o pinchara, por lo que eran capaces de mantener una velocidad de conducción constante, protegiendo al conductor.

Otro gran desarrollo, fue el neumático UHP (*Ultra High Performance*), lanzado a finales de la década de 1990, el cual contó con curvas de manejabilidad y frenado, con un diámetro igual o superior a las 16 pulgadas, proporcionando un gran rendimiento en curvas a alta velocidad y frenado superior.

Con el creciente interés en la conservación del medio ambiente, se han desarrollado gran variedad de vehículos ecológicos, tales como eléctricos o de hidrógeno, y la industria de los neumáticos no se ha quedado atrás, ya que han desarrollado neumáticos que aumentan el ahorro de combustible, por lo tanto, ayudan a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> (Hankook, 2019).

### 4.1.1. Propiedades de los neumáticos

Entre las principales funciones de un neumático está soportar el peso del vehículo, amortiguar sobre irregularidades de la carretera y eliminar el ruido, proporcionar suficiente tracción al acelerar, conducir y frenar, así como, proporcionar un control de dirección adecuado a altas velocidades.

Un neumático es un elemento compuesto de diversos materiales entre los cuales generalmente se encuentran: caucho, el cual puede ser natural o sintético; carbono negro, acero, componentes textiles, minerales, entre los cuales destacan óxido de zinc, azufre, silicio o cadmio, y compuestos químicos, como, por ejemplo, aceleradores del vulcanizado y antioxidantes (Álvarez, 2019).

La mayor composición del neumático es de caucho, como se mencionó anteriormente este se dividen en dos grandes grupos, caucho natural el cual procede del látex, lo cual lo hace más caro y costoso de obtener, y el caucho sintético que se fabrica de diferentes tipos de polímeros que son derivados del petróleo, lo cual los hace más económicos, aunque conllevan procesos posteriores a la extracción del oro negro para su fabricación (Álvarez, 2019).

Algunas de las principales propiedades y dimensiones de los neumáticos investigadas preliminarmente han sido la densidad, masa, volumen, diámetro y ancho para el caso máximo, que es un neumático de camión liviano.

Cuadro 1: Propiedades y dimensiones del neumático de camión

Densidad	950	$kg/m^3$
Masa	70	kg
Volumen	0.0737	$m^3$
Diámetro	0.559	m
Ancho	0.391	m

### 4.1.2. Tipos de neumáticos

Hoy en día existe una gran variedad de neumáticos para todo tipo de vehículo, sin embargo, todos los neumáticos se pueden dividir en 5 grandes grupos, los cuales son neumáticos de verano, invierno, para todas las estaciones, alto rendimiento y de camiones. Ahora bien, la forma de seleccionar el neumático correcto se basa en 3 criterios, el primero y más importante es el tipo de vehículo, luego el clima en el que se conduce por lo general, y de último la manera en que se conduce o se quiere conducir (TireAmerica, 2020).

- **Neumático de verano:** son aquellos neumáticos diseñados para vehículos de tamaño estándar, como un sedán, SUV o una miniván, los cuales se conduzcan en un clima que normalmente no cae por debajo de los 7.2 °C durante la mayor parte del año.

Figura 1: Neumático de verano



Fuente: Discounttiredirect, 2021

- **Neumático de invierno:** estos por su parte son para aquellos vehículos de tamaño estándar, que se conducen en climas que sí caen por debajo de los 7.2 °C, en áreas donde la nieve y el hielo permanecen durante meses.

Figura 2: Neumático de invierno



Fuente: Discounttiredirect, 2021

- **Neumático para todas las estaciones:** fabricados para todo tipo de vehículo de tamaño estándar, y para regiones en donde los inviernos son relativamente suaves, ya que están diseñados para manejar carreteras mojadas y secas durante todo el año, incluyendo nieve ligera.

Figura 3: Neumático para todas las estaciones



Fuente: Discounttiredirect, 2021

- **Neumático de alto rendimiento:** fabricados para todo tipo de vehículo, desde un sedán hasta una miniván, estos neumáticos brindan la sensación de más velocidad, con un mejor manejo en la carretera y principalmente en curvas.

Figura 4: Neumático de alto rendimiento



Fuente: Discounttiredirect, 2021

- **Neumático para camiones:** en esta familia de neumáticos existe una amplia subdivisión, la cual depende del tipo de carretera en la que se conduzca, el clima y el rendimiento, pero básicamente son aquellos neumáticos para vehículo pesados, buses, camiones o tractores.

Figura 5: Neumático para camiones



Fuente: Discounttiredirect, 2021

#### 4.1.3. Dimensiones de los neumáticos

Las dimensiones y características de los neumáticos las podemos encontrar en la parte lateral, como se muestra en la siguiente imagen, estos valores dan información como el propósito del vehículo, las dimensiones, capacidad de la carga y durabilidad a alta velocidad del neumático (Lesschwab, 2019).

Figura 6: Descripción de un neumático



Fuente: Discounttiredirect, 2021

#### 4.1.4. Descripción y clasificación de los neumáticos

- **Tipo de servicio:** la mayoría de los neumáticos inician con una letra la cual indica el tipo de vehículo para el cual fueron diseñadas. Entre las letras más comunes se encuentran:
  - P: neumático para vehículos de pasajeros, el cual incluye automóviles, SUV, minivanes, camionetas pequeñas.
  - LT: neumático de camión liviano, diseñada para aquellos vehículos capaces de transportar cargas pesadas o remolques.
  - ST: neumático para tráileres especiales, destinadas a remolques, incluidas quintas ruedas, remolques de viaje, de botes o utilitarios.
  - C: neumático para vehículo comercial, destinada a ser utilizada en camionetas o camiones de reparto, capaces de transportar cargas pesadas.
  
- **Ancho de la sección:** los neumáticos después de la letra (s) que establece el tipo de servicio, contienen una parte numérica de 3 dígitos la cual identifica el ancho de la sección transversal en milímetros.
  
- **Relación de aspecto de la pared lateral:** después de los 3 dígitos, hay un número de 2 dígitos el cual identifica el perfil lateral o la relación de aspecto del neumático. Se le conoce también como la altura de la pared lateral, está expresada como un porcentaje del ancho de la sección.
  
- **Construcción interna:** en la cuarta sección retomamos las letras, las cuales nos expresan en esta ocasión el tipo de fabricación con la que cuenta el neumático, entre las construcciones más comunes de neumáticos están:
  - R: neumático con construcción radial.
  - D: neumático con construcción de capa diagonal.
  - RF: neumático con construcción *Run Flat* autoportante.
  
- **Diámetro del neumático y rueda:** después de la letra se identifica la construcción interna, precede un número el cual establece el diámetro del neumático y este debe de ser el mismo que el diámetro de la rueda o aro, generalmente está dado en pulgadas.
  
- **Índice de carga:** se utiliza para indicar cuánto peso puede soportar un neumático, según su tabla estándar, este generalmente va acompañado de la velocidad, para lo cual existen diferentes tablas según los fabricantes de relación carga-velocidad.
  
- **Clasificación de velocidad:** está dado por una letra y se usa para indicar la velocidad máxima a la que es seguro conducir durante un período prolongado de tiempo, al igual que la descripción del servicio estas pueden variar según diferentes fabricantes

## 4.2. Reutilización de los neumáticos

Las preocupaciones ambientales son un problema principal para los fabricantes de neumáticos, los cuales generan hasta 242 millones de neumáticos de desecho cada año (Williams, 2018). Por ello, los neumáticos de desecho se han convertido en un enfoque primordial de reutilización, creándose diferentes programas que incentivan a garantizar su eliminación segura o reutilización.

Además, los neumáticos de desecho no es solamente un tema que perjudique el medio ambiente, sino que también, son materiales que después de su vida útil, tienen un gran potencial tanto económico, como energético. Por ello, múltiples industrias alrededor del mundo han invertido en investigación y pruebas para determinar diferentes aplicaciones rentables para la reutilización de neumáticos, algunas de ellas se mencionan a continuación.

### 4.2.1. Aplicaciones de reutilización de neumáticos

- **Pistas deportivas con caucho:** Los gránulos neumáticos reciclados en tamaños específicos se pueden usar en pavimentos de pistas de atletismo y otros tipos de canchas deportivas. Además, la propiedad elástica del caucho genera una amortiguación ideal para pistas artificiales en el que las personas pueden protegerse de lesiones (Eco Green, 2018).

Figura 7: Pista de atletismo de caucho reutilizado



Fuente: Eco Green, 2018

- **Suelo de parques infantiles y césped artificial:** En los últimos años, también se ha utilizado para pavimentar patios de recreo con diseños y figuras realizadas mediante la técnica de vaciado in situ, la cual ofrece una amplia libertad recreativa para diseñar espacios amigables y seguros para los niños (Eco Green, 2018).

Además, en canchas de césped artificial de fútbol, tenis, entre otros deportes, ofrece un efecto de amortiguación que reduce significativamente las lesiones de los jugadores, permitiendo que jueguen de manera más efectiva (Eco Green, 2018).

Figura 8: Parque infantil con caucho reutilizado



Fuente: Eco Green, 2018

- **Caucho como combustible en producción de energía:** También conocido como TDF (*Tire-derived fuel*), se originó como un combustible alternativo, el cual se descubrió que en términos de eficiencia energética es más eficiente que el carbón. El detalle es que no se quema por sí solo, sino que se usa como un aditivo, el cual con frecuencia se quema con carbón, ya que el combustible de carbón con TDF como aditivo produce más energía en volumen que utilizando sólo carbón (Eco Green, 2018).

El TDF presentó una mejora notable para el carbón tradicional y los combustibles fósiles, dándole uso productivo al desecho de los neumáticos que en manos equivocadas pueden ocasionar graves problemas en el medio ambiente. Debido a que los neumáticos de desecho cuestan mucho menos que los combustibles fósiles, el TDF también tiene grandes beneficios económicos para las industrias, plantas de energía que lo utilizan (Eco Green, 2018).

Figura 9: Caucho como combustible



Fuente: Eco Green, 2018

- **Caucho combinado para pavimentación de carreteras:** Este es uno de los usos más extendidos del reciclaje de neumáticos. El pavimento o asfalto que se obtiene del compuesto granulado de caucho asegura que las carreteras permanezcan sin baches, grietas o deformaciones durante mucho tiempo, brindando un recorrido más seguro y cómodo para los conductores. Es importante mencionar que este tipo de pavimento puede llegar a alcanzar mejores propiedades y mayor durabilidad que otros tipos de asfaltos (Eco Green, 2018).

Figura 10: Caucho para asfalto de carreteras



Fuente: Eco Green, 2018

Sin embargo, para lograr la reutilización de los neumáticos de desecho en las aplicaciones antes mencionadas, necesitamos llevar el neumático a un residuo con tamaños y geometrías específicas para lograr su transformación, y para ello es de vital importancia el uso de máquinas trituradoras, de las cuales se habla a continuación.

### 4.3. Máquinas trituradoras

En búsqueda de un tipo de reutilización de neumáticos que ofrezca una atractiva rentabilidad, en los últimos años múltiples empresas han sido parte de la fabricación de máquinas trituradoras. Básicamente, estas máquinas ayudan a obtener residuos específicos de los neumáticos de desecho, por medio de un sistema de corte, conformado por cuchillas de materiales resistentes capaces de triturar todo tipo de neumático. Y la gran característica es que los residuos obtenidos de las máquinas trituradoras se han vuelto sustitutos que satisfacen necesidades de diversas aplicaciones, como, por ejemplo, caucho para asfaltado de carreteras.

Las máquinas trituradoras modernas cuentan con muchas ventajas, entre ellas se encuentran, que tienen costos de funcionamiento particularmente bajos, ya que muchas de ellas son diseñadas para funcionar con una sola etapa, y al utilizar un accionamiento electromecánico se puede lograr un ahorro de hasta 75 por ciento en comparación de máquinas que funcionan con diesel (UNTHA, 2021).

#### Tipos de máquinas trituradoras

En cuanto a máquinas trituradoras se refiere, es importante mencionar que existen para diversos tipos de residuos de materiales como madera, metales, papel y cartón, residuos domésticos, plásticos, colchones y neumáticos. Sin embargo, los materiales con los que son fabricadas las máquinas son muy similares, sin importar el material que se vaya a triturar.

Por esto, la división más común de tipos de máquinas trituradoras radica principalmente en la forma y geometría del residuo que se desea obtener, ya que en esto sí difieren, según su potencia, desempeño, tecnología y principalmente el número de ejes, que es donde se montan las cuchillas de corte (SSI, 2018). Por lo tanto, podemos resumir los principales tipos de máquinas trituradoras en:

- **Trituradora-amoladora de un eje:** Estas máquinas son ideales para la reducción de tamaño de materiales consistentes como papel, plástico, aluminio, espuma, textiles y neumáticos. Pueden funcionar como máquinas independientes o como secundarias para reducir aún más la producción de una trituradora primaria una vez se haya eliminado los metales. Es un opción económica si se desea obtener partículas de tamaño pequeño, cuyos residuos por lo general pueden ser de 1/2 a 3 pulgadas. El desempeño de estas trituradoras es un valor promedio, encontrándose en 0.5 a 15 toneladas por hora de trituración dependiendo del material (SSI, 2018).

Figura 11: Trituradora-amoladora de un eje



Fuente: SSI, 2018

- **Trituradora de dos ejes:** Empleadas comúnmente en aplicaciones de reducción de volumen o trituración primaria. En cuanto a sus características principales son que funcionan con baja velocidad y alto par, lo que las hace ideales para procesar materiales comprimibles como caucho, metales y muchos plásticos que necesitan ser cortados para reducir su tamaño. La versatilidad de esta máquina ayuda a obtener residuos en formas de tiras, la longitud de estos depende del ancho de las cuchillas. Por último, el desempeño de este tipo de máquinas se encuentra entre 0.5 a 70 toneladas por hora de funcionamiento, dependiendo del tipo de material (SSI, 2018).

Figura 12: Trituradora de dos ejes



Fuente: SSI, 2018

- **Trituradora de cuatro ejes:** Este tipo de trituradoras están especializadas para trabajos pesados. Cuenta con 4 ejes los cuales permiten procesar materiales grandes y voluminosos. Este tipo de máquina se considera multifuncional ya que puede trabajar como trituradora de 2 ejes o utilizando los 4 ejes en su totalidad. Los residuos que se obtienen al utilizar los cuatros ejes salen en forma de retazos del material, su tamaño puede ser normalmente de  $\frac{3}{4}$  a 8 pulgadas. Debido a que es una máquina para aplicaciones más pesadas, estas trituradoras cuentan con un desempeño menor al utilizar los 4 ejes, el cual se encuentra entre 0.5 a 20 toneladas por hora de trituración dependiendo el material.

Figura 13: Trituradora de cuatro ejes



Fuente: SSI, 2018

### Partes de una máquina trituradora

Como se mostró anteriormente las máquinas trituradoras coinciden en mucho según sus estilos, ya que las diferencias que podemos encontrar en ellas radican en cuanto que material se triturará, y en qué forma se desea obtener. Los componentes se pueden observar que se repiten sin importar el tipo de máquina, por ello, podemos resumir las partes de una máquina trituradora en: estructura, sistema de potencia y sistema de corte.

Estas partes pueden variar de componentes internos, materiales, tamaños, dependiendo el uso específico para el cual se diseñará la máquina, sin embargo, la teoría detrás es la misma.

- **Estructura:** La estructura de una máquina la podemos definir como el conjunto de elementos que la conforman. De esta manera, la estructura de una máquina trituradora básicamente está conformada por el cuerpo metálico y la tolva que es donde ingresan los neumáticos para ser trituradas. Las características mecánicas de una estructura de una trituradora, es que debe de ser capaz de soportar el peso de los materiales a triturar y la cantidad que estos ingresen durante un tiempo específico, para ello, es importante manufacturarlas con materiales rígidos y tenaces, tales como el acero.

- **Sistema de potencia:** El sistema de potencia está totalmente relacionado con máquinas eléctricas rotativas, mejor conocidos como motores eléctricos, los cuales son máquinas eléctricas que transforman en energía mecánica la energía eléctrica que absorben por sus bornes. El funcionamiento de los motores eléctricos es por medio de la utilización de corriente eléctrica para producir campos magnéticos giratorios, los cuales generan fuerza mecánica de rotación en el inductor, ubicado en el rotor o estator del motor, alrededor del eje (Bradley, 2020).

Si bien, los motores eléctricos pueden diferir en sus diseños según las empresas que los fabrican, las principales partes que la mayoría de estos tienen son:

- Eje motor central
- Bobinados
- Cojinetes
- Armadura (ubicada en el rotor)
- Cepillos (en motores DC)
- Terminales
- Escudos de marco y de extremo

Utilizando un accionamiento electromecánico se puede lograr un ahorro de hasta 75 por ciento en comparación de máquinas que funcionan con diesel u otro combustible (UNTSHA, 2021). La gran división de motores eléctricos en máquinas mecánicas se divide según la corriente con la que trabajan, la cual puede ser corriente alterna (AC) o continua (DC).

- Motores de corriente continua

Este tipo de motores obtiene energía eléctrica que proviene de baterías u otras fuentes de energía generadas las cuales ofrecen voltaje constante. Entre las principales características de este tipo de motores se encuentra una mejor variación y control de velocidad, ya que cuentan con una caja de cambios o engranajes. Además, con los motores de corriente continua se puede obtener mayor torque que los de corriente alterna (Power Electric, 2021).

Los motores de corriente continua tienen utilización y aplicaciones muy específicas, y entre los tipos de motores DC se encuentran: de excitación independiente, de excitación en serie, de excitación shunt o en paralelo y de excitación compuesta (compound). Básicamente, se puede resumir que en lo que difieren estos es en cómo está ensamblado u organizado el inductor y el inducido dentro del motor.

- Motores de corriente alterna

En este tipo de motores la energía proviene de campos magnéticos generados a través de bobinas envueltas alrededor del eje de salida. Entre las principales características de este tipo de motores está que son eficientes, duraderos, silenciosos y flexibles. A diferencia de los motores DC, los motores AC tienen aplicaciones más generalizadas gracias a su facilidad de utilización, poco mantenimiento y bajo costo de fabricación.

Los motores AC pueden dividirse en 2 grandes grupos: motores síncronos y asíncronos, estos últimos tienen una subdivisión muy importante según su fase pueden ser monofásicos, donde encontramos de bobinado auxiliar, de espira en cortocircuito y universales; o trifásicos, los cuales pueden ser de rotor bobinado o de rotor en cortocircuito, mejor conocidos como jaula de ardilla (Power Electric, 2021).

- Motores síncronos

Este tipo de motores giran a la misma velocidad que la frecuencia de la corriente de alimentación. Están contruidos con un estator y un rotor, y se utilizan diversas aplicaciones (Power Electric, 2021).

- Motores asíncronos

También conocidos como motores de inducción, y estos son considerados los motores eléctricos más simples y resistentes disponibles en el mercado. Constan de dos conjuntos eléctricos, los cuales son: el estator bobinado y el rotor. El funcionamiento de estos es por medio de la inducción magnética, la cual se crea por medio de la corriente eléctrica necesaria para hacer girar el rotor y el devanado del estator. Este tipo de motores se consideran los más utilizados en todo el mundo. Como se mencionó anteriormente los motores asíncronos se subdividen en dos grandes grupos según su fase, los cuales son motores monofásicos y trifásicos (Power Electric, 2021).

- Motores monofásicos

Este tipo de motores eléctricos tienen una gran aplicación en ámbitos domésticos y comerciales, debido a que funcionan con una sola fase de corriente alterna y un neutro. El inconveniente con el que cuentan es que su rendimiento y factor de potencia son inferiores a los trifásicos, además, a igual potencia los monofásicos siempre serán también más voluminosos que los trifásicos (Castillo y Marrufo, 2018). Entre los motores monofásicos más utilizados se encuentran:

- Motor monofásico con bobinado auxiliar de arranque.
- Motor de espira en cortocircuito.
- Motor universal.

- Motores trifásicos

Son motores en los que el bobinado inductor colocado en el estator está formado por tres bobinados independientes desplazados  $120^\circ$  eléctricos entre sí, alimentados por un sistema trifásico de corriente alterna. La utilización de motores trifásicos es muy común en aplicaciones industriales, ya que cuentan con factores de potencia y rendimiento más altos que los motores monofásicos (Castillo y Marrufo, 2018). Existen dos tipos de motores trifásicos muy reconocidos los cuales son:

- Rotor en cortocircuito o motor de jaula de ardilla.
- Rotor bobinado.

Cuadro 2: Comparativo motores DC vs AC

Motores de corriente continua DC	Motores de corriente alterna AC
Instalación sencilla y fácil mantenimiento.	Bajas demandas de energía de arranque que también protegen los componentes en el extremo receptor.
Alta potencia y par de arranque.	Niveles de corriente de arranque controlables y aceleración.
Tiempo de respuesta rápido para arrancar, parar y acelerar.	Complementos de VFD o VSD que pueden controlar la velocidad y el par en diferentes etapas de uso.
Disponibilidad en varios voltajes estándar.	Alta durabilidad y vida útil más prolongada.
	Capacidades para configuraciones multifase.

- Transmisión de potencia:** Como bien se ha mencionado anteriormente los motores permiten su variación de velocidad, ya sea para reducir o aumentar, sin embargo, estas reducciones o aumentos tienen límites según las especificaciones del motor. En el caso de la trituración se busca que el movimiento giratorio de las cuchillas tenga baja velocidad, con la finalidad de aumentar el torque. En su mayoría, las máquinas trituradoras no tienen más de 100 revoluciones por minuto en los ejes de sus trituradoras (Nasr y Yehia, 2019). Para ello, es indispensable el uso de un sistema de transmisión, en este caso, que sea capaz de reducir la velocidad de salida del eje, a una velocidad de funcionamiento adecuada en los ejes de la trituradora.

Los sistemas de transmisión de potencia los podemos dividir en tres grandes grupos los cuales son: transmisión de potencia por cadenas, por fajas y por cajas de cambios (reductoras o multiplicadoras).

- Transmisión de potencia por cadenas

Este tipo de transmisión utiliza una serie de eslabones de cadena conectados con una red de piñones dentados. Son ideales para distancias entre centros pequeños, normalmente de 3 hasta 8 metros. Esta tecnología se utiliza para realizar tres funciones básicas las cuales son, transmisión de potencia, transporte de materiales y fines de sincronización (Warner, 2017).

- Transmisión de potencia por bandas

Utilizadas para transmitir el movimiento de un eje a otro con la ayuda de una banda delgada e inextensible que pasa por medio de dos poleas. Básicamente, la banda es una tira en bucle de material flexible que une mecánicamente los ejes giratorios.

En el mercado nacional e internacional existe una amplia variedad de bandas o correas disponibles, entre las cuales se encuentran las bandas planas, trapezoidales, transmisión por cable y correa de distribución. Los principales datos para tomar en cuenta para la selección de una correcta banda son conocer la potencia a transmitir, dirección del movimiento de la correa, velocidad del eje y relación de velocidad, condiciones de servicio y distancia entre ejes, así como el espacio disponible en la máquina (Warner, 2017).

- Transmisión de potencia por caja de cambios

Este tipo de transmisiones ocupan un lugar muy especial y destacado en la industria a nivel mundial, ya que posee una gran característica que es el tamaño que ocupan el cual puede ser relativamente pequeño a diferencia de las bandas o cadenas, sin embargo, tienen una gran desventaja que es el alto costo de manufactura (Warner, 2017).

Es la tecnología preferida cuando se necesita transmitir una potencia considerable en una distancia corta con una relación de velocidad constante. El mecanismo de transmisión funciona por medio de los engranajes, los cuales se engranan entre sí para transmitir la potencia. Una gran cualidad es que la transmisión en las cajas de cambios no solo puede ser entre ejes paralelos, sino también en ejes no paralelos, coplanarios, inter secantes, entre otros (Warner, 2017). Por último, la caja de cambios la podemos dividir según el sentido u objetivo de operación en cajas reductores de velocidad o multiplicadoras.

Cuadro 3: Tabla comparativa tipo de sistemas de transmisión de potencia

Bandas	Cadenas	Caja de cambios
Poleas y bandas.	Piñones y cadenas.	Engranajes y ejes.
Sí puede haber deslizamiento	Sin deslizamiento	Sin deslizamiento
Ideal para grandes distancias entre centros.	Ideal para distancias medianas entre centros.	Ideal para distancias cortas entre centros.
Requiere espacio grande.	Requiere espacio moderado.	Requiere poco espacio.
Complejidad media en su diseño y fabricación.	Complejidad media en su diseño y fabricación.	Alta complejidad en su diseño y fabricación.
El fallo de la banda no causa daño a la máquina.	La falla de una cadena puede no dañar seriamente la máquina.	La falla de la caja de engranajes puede ocasionar graves problemas en la máquina.
Durabilidad media.	Durabilidad media-alta.	Durabilidad alta.
No se requiere lubricación.	Sí requiere lubricación.	Sí requiere lubricación.
Menor costo de instalación.	Moderado costo de instalación.	Alto costo de instalación.
Utilizado para relación de baja velocidad.	Utilizado para relación de velocidad moderada.	Utilizado para una relación de alta velocidad.

Fuente: Elaboración propia

- **Sistema de corte:** Básicamente, lo que es capaz de hacer una máquina trituradora está determinado por el tipo y cantidad de cuchillas que tiene. Por ello, el sistema de corte juega un papel principal en la máquina, este, está conformado por los ejes que contenga la máquina sobre los cuales se montan las cuchillas de corte, las cuales pueden tener diferentes tamaños y geometrías, dependiendo del material con el que se desee trabajar.

Entre las principales características de las cuchillas de corte encontramos sus geometrías, aquí una de las variables más importantes es el ángulo de corte y filo de las hojas; el material con el se diseñarán, en su mayoría debe ser un material de alta dureza, rigidez y tenaz, muy común la utilización de aceros con alto contenido de carbono; y el número de cuchillas que se montarán en cada eje, generalmente este se determina por medio de un software capaz de realizar análisis de elementos finitos, donde se puede determinar según los requisitos la cantidad óptima de cuchillas que deben de montarse en cada eje para el funcionamiento correcto de la máquina (Nasr y Yehia, 2019).

El método para validar el sistema de corte de una máquina trituradora es que el esfuerzo de fluencia del material de las cuchillas sea mayor al esfuerzo que se generará en el momento de trituración. Previamente, se debe calcular la fuerza de corte, la cual se calcula con la resistencia al corte del material multiplicado por la sección transversal del material a triturar (Nasr y Yehia, 2019), en este caso los neumáticos.

## 4.4. Tipos de cuchillas de corte

Los tipos de cuchillas de corte dependen del material que se triturará, sin embargo, están mayormente relacionadas con la forma del residuo que se desea obtener, es así como podemos mencionar algunos tipos, tales como:

### 4.4.1. Cuchillas de dos filos

Son las cuchillas específicas para poder trabajar procesos de trituración con tan solo una etapa, y poder obtener residuos relativamente pequeños o medianos en forma de tiras, las cuales tienen el ancho de los cortadores, pero es importante mencionar que la longitud de los residuos es variante. Las cuchillas de dos filos se pueden utilizar también en trituradoras de 4 ejes, con lo cual se logra obtener residuos en forma de trozos muy pequeños, cuyos tamaños se encuentran entre  $\frac{3}{4}$  a 8 pulgadas, con un dimensionamiento constante (SSI, 2018).

Figura 14: Cuchillas de dos filos

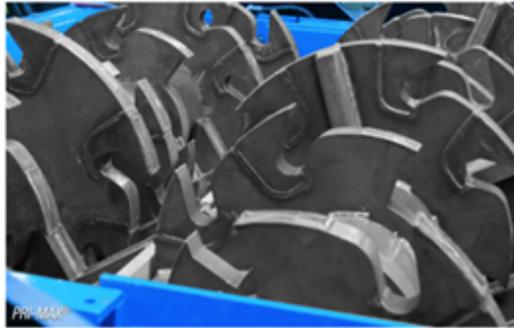


Fuente: SSI, 2018

### 4.4.2. Cuchillas con más de dos filos :

Este tipo de cuchillas tiene como objetivo principal llevar el material triturado a un tipo de trozo o pedazo, cuyo tamaño se puede encontrar entre 6 y 24 pulgadas. Por lo que, al aumentar el número de filos el tamaño del residuo aumenta de igual forma, y si lo que deseamos es un residuo relativamente pequeño, se necesitará una etapa adicional a la hora de utilizar cuchillas con más de dos filos (SSI, 2018).

Figura 15: Cuchillas con más de dos filos



Fuente: SSI, 2018

#### 4.4.3. Cuchilla-amoladora:

Este es un tipo específico de cuchillas el cual integra dos funciones, trituración y molienda. Con este tipo de cuchillas se puede llegar a obtener los residuos más pequeños posibles, en forma de trozos cuyos tamaños se pueden encontrar entre  $\frac{1}{2}$  a 3 pulgadas, con un dimensionamiento constante. Este tipo de cuchillas son una de las más complejas, en cuanto a diseño y fabricación se refiere (SSI, 2018).

Figura 16: Cuchilla-amoladora



Fuente: SSI, 2018

#### 4.5. Materiales comunes de las cuchillas de corte :

Como se ha mencionado anteriormente entre las principales propiedades que se buscan para el material de las cuchillas de corte son la dureza, rigidez y tenacidad, sin embargo, sí se pueden tomar en cuenta más propiedades según el material a triturar. A continuación, se muestra algunos materiales y sus tratamientos térmicos, con los cuales generalmente se fabrican cuchillas de corte:

- **Acero cementado:** Originalmente es acero con bajo contenido de carbono, pero por medio del proceso de la cementación, se difunde carbono en su superficie para aumentar el contenido de este. Luego de ser tratado térmicamente, se obtiene un acero más duro con una capa resistente al desgaste (Capital Shredder, 2021).

- **Acero para herramientas:** Este tipo de aceros se componen de elementos formadores de carburo, pero según las combinaciones se pueden obtener características distintas. El uso de este material ofrece dureza, la cual permanece constante a elevadas temperaturas; tenacidad y resistencia al desgaste (Capital Shredder, 2021).
- **Acero endurecido:** Básicamente, este es un acero cementado pero el cual se expone también a un proceso de endurecimiento superficial, el cual aumenta aún más la dureza de la superficie exterior del metal (Capital Shredder, 2021).
- **Acero de baja aleación y cromo:** Resistencia a la fluencia, lo que significa que está diseñado para soportar altas temperaturas, manteniendo constantes la mayoría de sus propiedades mecánicas. Lo que lo hace un acero muy atractivo son sus elevadas propiedades y resistencia a la corrosión (Capital Shredder, 2021).



### 5.1. Selección de trituradora - Diseño preliminar

Como se pudo observar en el marco teórico en la sección de tipos de máquinas trituradoras, hemos investigado las cuatro principales en el mercado internacional, las cuales son: trituradoras primarias, trituradora amoladora de un eje, trituradora de dos ejes y trituradora de cuatro ejes. Con base en nuestros objetivos y datos iniciales se ha definido cuatro requerimientos o necesidades primordiales que la máquina debe suplir las cuales son:

- La máquina debe ser capaz de triturar los neumáticos y obtener de ellos los residuos en formas de tiras.
- La máquina debe ser capaz de triturar hasta neumáticos de camiones.
- Tomar en cuenta que contamos con un presupuesto limitado.
- Tomar en cuenta que se cuenta con un volumen limitado para el funcionamiento de la máquina.

Teniendo presente lo anterior, se decidió realizar una matriz de decisión en donde se definieron diez criterios que están directamente relacionados para cumplir con las necesidades anteriores, según la investigación realizada de cada tipo de trituradora se otorgaron valores a cada una de ellas, habiendo tres valores: -1 significa que el diseño no cumple con el criterio, 0 el diseño sí cumple con el criterio, y 1 el diseño cumple con el criterio y supera las expectativas. Luego se realizó la suma general de valores en cada diseño de trituradora y se obtuvieron los resultados que nos dicen que la mejor decisión en base a nuestras necesidades es diseñar una trituradora de dos ejes, con una suma general de ocho positivo (diseño 2).

Cuadro 4: Matriz de decisión trituradora de neumáticos a diseñar

	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Criterios	Trituradora - amoladora de un eje	Trituradora de dos ejes	Trituradora de cuatro ejes
Espacio ocupado	-1	1	-1
Costo	-1	1	0
Vida útil	1	1	1
Seguridad	1	1	1
Mantenimiento	-1	0	-1
Estabilidad	1	0	1
Capacidad de carga	0	1	1
¿Residuos en tiras?	-1	1	0
Simplicidad	-1	1	0
Espacio disponible	-1	1	0
<b>SUMA GENERAL</b>	<b>-3</b>	<b>8</b>	<b>2</b>

Para esta trituradora de doble eje se ha investigado que lo más viable es diseñarla también para cuchillas de dos filos ya que con estas podemos asegurar la obtención de residuos en forma de tiras, y se recomienda utilizar para el módulo de potencia un motor trifásico jaula de ardilla con un sistema de etapas de reducción de velocidades.

## 5.2. Requisitos

Cuadro 5: Requisitos de dimensiones

Código	Requisitos
<i>Dimensiones</i>	
JPM-D01	Las medidas de la máquina no deben superar los 2.5 m de altura, 3 m de largo y 2 m de ancho.
JPM-D02	La máquina deberá contar con un espacio designado al equipo de control eléctrico.
JPM-D03	El ancho y largo del módulo de corte de la máquina debe estar entre los rangos de 1 m a 1.75 m.

Cuadro 6: Requisitos de apariencia

<i>Apariencia</i>	
JPM-A01	La máquina deberá de estar recubierta por una capa de pintura o barniz contra la corrosión para que la máquina pueda operar en condiciones al aire libre.

Cuadro 7: Requisitos de seguridad

	<i>Seguridad</i>
JPM-S01	Todas las partes móviles dentro de la máquina (exceptuando el área donde ingresan los neumáticos) deberá estar cubierta por guardas para que ningún elemento de corte ni de potencia pueda causar lesiones.
JPM-S02	La máquina debe de contar con un botón de apagado de emergencia, así como un cable de desconectado rápido, en caso se necesite que este deje de operar de manera inmediata.
JPM-S03	La estructura externa de la máquina no debe tener bordes filosos ni cortantes que puedan causar lesiones.
JPM-S04	No debe de existir puntos de atrapamiento en los cuales el operador pueda quedar atorado y que puedan causar lesiones.

Cuadro 8: Requisitos de estándares

	<i>Estándares y normas</i>
JPM-EN01	La trituradora debe contar con rotulaciones de funcionamiento y advertencia.

Cuadro 9: Requisitos de usuario

	<i>Usuario</i>
JPM-U01	El usuario deberá ser mayor de edad.
JPM-U02	El usuario debe portar el equipo de seguridad especificado dentro del manual de operación.
JPM-U03	El usuario debe recibir una capacitación previa antes de ser autorizado a operar la máquina. Capacitación previa de no más de 2 semanas.

Cuadro 10: Requisitos de potencia

	<i>Potencia</i>
JPM-P01	La trituradora de neumáticos debe de contar con un motor eléctrico trifásico que no exceda los 30 hp.
JPM-P02	El módulo de potencia de la máquina debe contar con un sistema de reducción de velocidad, utilizando poleas y bandas o cadenas y piñones.
JPM-P03	La máquina debe de contar con un circuito eléctrico el cual tenga un botón de encendido, uno de apagado normal y apagado de emergencia
JPM - P04	Debe de diseñarse cuñas para la transmisión de potencia entre los ejes y las cuchillas de corte, las cuales deben de ser de algún acero anti desgastes.

Cuadro 11: Requisitos de costos

	<i>Costos</i>
JPM-C01	El costo de los elementos a fabricar no debe exceder de Q 80,000.00
JPM-C02	El costo de los elementos fabricados no debe exceder Q 50,000.00
JPM-C03	El costo de los componentes eléctricos no debe exceder Q 30,000.00
JPM-C04	El costo total de la máquina no debe exceder de Q 160,000.00 (Valor seleccionado en base a investigación preliminar de precios de trituradoras de neumáticos de vehículos livianos, sin tomar en cuenta costos de envío)

Cuadro 12: Requisitos de interfaz de módulos

	<i>Interfaz de módulos</i>
JPM-IM01	La estructura de la trituradora deberá contar con un espacio de 50 centímetros por lado, disponibles para ajustar los módulos de potencia y corte en su interior
JPM-IM02	Todos los componentes dentro de la trituradora deben de ser accesibles para poder realizar mantenimiento, es decir, se debe poder tener acceso a cualquier componente dentro de la estructura en un máximo de 15 min, para facilitar las revisiones y reparaciones al equipo.
JPM-IM03	Todas las piezas que conforman la estructura deben ser capaces de ser desensambladas unas de otras.
JPM-IM04	La máquina debe contar con un sistema que permita acoplar una máquina de aire comprimido para limpiar polvos y residuos en su interior.

Cuadro 13: Requisitos de funcionamiento

	<i>Funcionamiento</i>
JPM-F01	La máquina debe tener una tolva de salida de fibras trituradas, para verificar que estas sean del tamaño esperado.
JPM-F02	El sistema de recolección de material triturado debe de ser capaz de obtener teóricamente al menos 40,000 kg de material triturado por hora.
JPM-F03	Ningún elemento mecánico dentro de la trituradora debe moverse, cuando esta se encuentre apagada.
JPM-F04	La máquina debe tener chumaceras en los extremos de los ejes, las cuales deben ir perñadas a la estructura, donde el operario sea capaz de desmontarlas con solo quitar los pernos en caso de mantenimiento.
JPM-F05	La estructura de la trituradora debe de soportar una carga máxima de 3,000 kg.
JPM-F06	La estructura y cada uno de los componentes de la máquina trituradora de neumáticos, no deben sobrepasar una temperatura de 80° C.
JPM-F07	La máquina deberá ser capaz de ser instalada sobre cualquier superficie plana con medias mínimas de 2 m de ancho por 3 m de largo.
JPM-F08	La máquina no deberá generar un ruido que supere los 65 dB.
JPM-F09	La máquina debe trabajar a 50 revoluciones por minuto como máximo en el módulo de corte, es decir esta debe ser la velocidad de los ejes de las cuchillas de corte.
JPM-F10	Las cuchillas de corte y ejes deben ser diseñadas de acero AISI 1045, acero resistente al desgaste, posee alta dureza, y pueda alargar el tiempo de vida en aplicaciones de alto impacto.
JPM-F11	Las cuchillas de corte deben ser capaces de triturar hasta neumáticos de camiones con diámetro no mayor a 1 m.
JPM-F12	El módulo de corte debe ser capaz de devolver el material triturado en fibras rectangulares cuyas áreas se encuentren entre 150 a 350 cm <sup>2</sup>
JPM-F13	La máquina debe contar con un mecanismo para poder alimentar de neumáticos al sistema de trituración, de manera que el operario pueda hacerlo sin ayuda de otras personas.
JPM-F14	Las cuchillas de corte deben pasar por un proceso de temple para mejorar las propiedades mecánicas de la pieza.

## 5.3. Cálculos y resultados

### 5.3.1. Selección del motor

El análisis base para el módulo de potencia y corte de la trituradora de neumáticos fue la selección del motor a utilizar. Para esto, era necesario determinar el torque requerido por el módulo de corte para ser capaz de triturar un neumático de camión, la cual es el tamaño máximo requerido. Obteniendo el torque, este se multiplicó por la velocidad angular del eje de salida para obtener así la potencia.

$$P = T * \omega \quad (1)$$

Para calcular el torque se determinó la fuerza de corte de cizalla que se necesita para desgarrar o triturar el neumático, el cual sabemos que es un material compuesto, sin embargo, se utilizó el caucho vulcanizado, ya que posee propiedades mecánicas muy similares (Xinhai, 2021). Se definió que el árbol de cuchillas contara con una longitud de los ejes de 0.8 m (metros), 8 cuchillas por eje, con un diámetro de 0.45 m y un espesor de 0.05 m. Se diseñaron las cuchillas de la manera más práctica y eficiente, siendo cuchillas inclinadas de 2 filos, con un ángulo de abertura entre los filos o ángulo de cizalla de 15°, ya que este valor comúnmente se encuentra entre 10 a 20° (Caviedes, 2020).

$$F_c = (s^2 * \tau) / (2 * \tan \theta) \quad (2)$$

Donde:

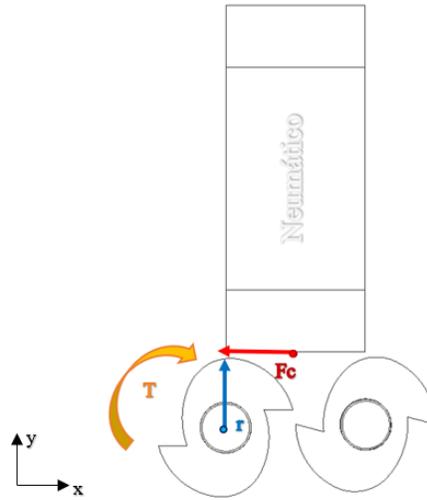
- $F_c$  - Fuerza de corte de cizalla
- $s$  - Espesor del neumático
- $\tau$  - Esfuerzo de resistencia al desgarre del caucho vulcanizado
- $\theta$  - Ángulo de cizalla

Cuadro 14: Cálculo fuerza de corte

$\tau$	26.52	$N/mm^2$
$s$	10	mm
$\theta$	15	°
<b>Fc</b>	<b>4,948.70</b>	N

Como se puede observar en el cuadro 14, se ha obtenido la fuerza de corte de cizalla que es la fuerza necesaria para desgarrar el neumático, sin embargo, dado que la máquina es de doble eje debemos considerar el corte de dos cuchillas, ya que en la mayoría de las ocasiones la máquina puede estar cortando todo un segmento y estar llena, por lo cual es recomendable diseñar para una fuerza de corte que sea equivalente al doble eje del árbol de corte, por ello se ha multiplicado por 2 la fuerza de corte cizalla, para tener 9,897.40 N como fuerza de corte total (Caviedes, 2020).

Figura 17: DCL módulo de corte



Fuente: Elaboración propia

Teniendo la fuerza de corte total se calculó el torque requerido para triturar los neumáticos, como se observa en la figura 17, este básicamente se puede calcular multiplicando la fuerza de corte de la cuchilla por su vector radio, pero también existe otra forma de calcularlo en donde se puede tomar en cuenta el área de la sección transversal de la cuchilla y el volumen del neumático.

$$T = (F_{ct} * r) = (F_{ct} * V_{neumatico})/A_{ct} \quad (3)$$

Cuadro 15: Características del neumático de camión y área de la cuchilla

$p_{neumatico}$	950	$kg/m^3$
$m_{neumatico}$	70	kg
$V_{neumatico}$	0.0737	$m^3$
$D_{neumatico_{max}}$	0.559	m
$Ancho_{neumatico}$	0.391	m
$A_{cuchilla}$	0.308	$m^2$

Tanto para el eje como para las cuchillas se decidió utilizar acero AISI 1045 cold rolled, por sus buenas propiedades mecánicas, tales como su tenacidad, resistencia media al desgaste, buena maquinabilidad y alta forjabilidad a bajo costo, para aumentar las propiedades mecánicas de las cuchillas principalmente la resistencia al desgaste y dureza se sugiere tomar en cuenta que pasen por un proceso de templado. En Guatemala el acero 1045 es accesible de encontrar y a un precio muy competitivo, comparado contra otros aceros como por ejemplo aceros anti-desgastes 12 M al manganeso el cual su precio puede llegar a ser hasta cuatro veces más alto. Conociendo el material, se obtuvo el área de la cuchilla en Autodesk Inventor® con el valor de  $0.308 m^2$ .

$$T = (9,897.40N)/(0.308m^2) * 0.0737m^3 = 2,365.58N * m$$

Finalmente se obtuvo el valor del torque requerido de la máquina de 2,365.58 Nm, y con este se procedió a determinar la potencia para la selección del motor. En los requisitos del proyecto antes elaborados, se estableció que las revoluciones por minuto del eje del árbol de cuchillas no debían exceder las 50 rpm (JPM-F09) equivalente a 5.236 rad/s , y se utilizó este valor como velocidad angular de diseño. Ingresando estos valores en la ecuación de la potencia se realizó el cálculo:

$$P = 2,365.58Nm * 5.236rad/s = 12,386.14W = 16.61hp$$

Con base a este resultado se seleccionó la capacidad comercial superior al cálculo, el cual es un motor de 20 hp. Se ha seleccionado el motor WEG W22 NEMA *Premium Efficiency* 20 hp el cual funciona a 1,800 rpm. El torque nominal de este motor es de 79.121 Nm, con esto aún estamos lejos del torque requerido para la trituración de los neumáticos, por lo que se procedió a analizar el sistema de transmisión de potencia para poder suplir el torque requerido de la máquina.

### 5.3.2. Cálculo capacidad de trituración de la máquina

Luego de determinar las dimensiones de las cuchillas de corte y seleccionar el diseño de la trituradora se prosiguió a determinar la capacidad productiva teórica que la máquina tiene para triturar neumáticos. Para ello, se utilizaron los datos del área de corte de las cuchillas, número de ejes de la máquina, espesor de la cuchilla y la densidad del neumático (Hernández y Fonseca, 2017), que es para el cual se diseñó toda la máquina. De esta manera la capacidad de trituración teórica se calculó con la siguiente fórmula:

$$C_t = 2 * A_{cuchilla} * N_{ejes} * t_c * p_{neumatico} \quad (4)$$

Donde:

- $C_t$  - capacidad de corte por revolución de la máquina
- $A_{cuchilla}$  - área de corte de la cuchilla
- $N_{ejes}$  - número de ejes
- $t_c$  - espesor de la cuchilla
- $p_{neumatico}$  - densidad del neumático
- 2 - número de filos cuchilla

Cuadro 16: Capacidad de corte por revolución de la máquina

$A_{cuchilla}$	0.308	$m^2$
$N_{ejes}$	2	
$t_c$	0.05	m
$p_{neumatico}$	950	$kg/m^3$
<b>Ct</b>	29.287	kg/rev

Como se puede observar la capacidad de trituración se ha obtenido en kg dividido revoluciones, para tener un dato más común en el ámbito de producción se determinó capacidad de trituración general de la máquina que es el total de kilogramos de trituración dividido hora, así también se llevó este dato a un término de los neumáticos del caso máximo que equivalen a ese total de trituración en una hora.

$$Cap = 60 * Ct * e * n_{salida} \quad (5)$$

Donde:

- Cap - capacidad de trituración general de la máquina
- e - eficiencia del motor trifásico
- $n_{salida}$  - rpm del eje de salida

Cuadro 17: Producción total de trituración de la máquina

e	0.8	
$n_{salida}$	50	rpm
<b>Cap</b>	70,290	kg/h
Masa neumático	70	kg
<b>Producción teórica</b>	<b>1,004</b>	neumático/hora

Finalmente se ha obtenido una capacidad de trituración general de la máquina de 70,290 kg/h lo que equivale a la trituración de 1,004 neumáticos por hora. Importante mencionar que esta es la producción teórica capaz de la máquina, y hay que notar que la única pérdida de energía tomada en cuenta es en la eficiencia del motor, sin embargo, en los procesos reales habrá mucha fricción, el neumático podría atorarse en las cuchillas, por lo que fácilmente esa capacidad teórica de trituración se podría ver reducida en la realidad.

### 5.3.3. Transmisión de potencia por medio de bandas y poleas

Inicialmente había una interrogante con el sistema de transmisión, hacerlo por medio de poleas y bandas/fajas o por medio de piñones y cadenas. Para resolver esta duda se analizaron ambas opciones, y al llegar a determinar el número de bandas para la primera opción y el número de hileras para la segunda, se determinó que lo más conveniente ha sido la transmisión por medio de poleas y bandas, las cuales son una opción más económica y accesible en el mercado nacional.

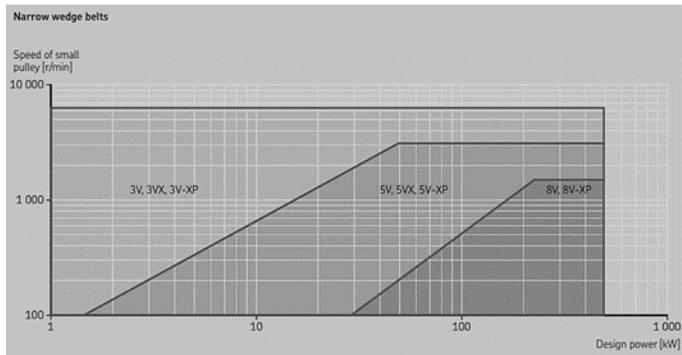
Sabemos que las revoluciones por minuto del motor son de 1,800 y las del eje de salida deben de ser de 50 rpm, por lo cual no se podía utilizar una sola etapa de reducción ya que de esta se obtenían diámetros para la polea impulsada demasiado grandes, por ello se utilizó 2 etapas de reducción. En el eje intermedio se haría la primera etapa, reduciendo de 1,800 a 300 rpm y luego de 300 a 50 rpm, con lo cual se logró obtener una relación de reducción de velocidades de 6 para ambas etapas. Sabiendo que la trituración generará un impacto pesado y par de torsión alto, se utilizó un factor de servicio 1.6 el cual se multiplicó a la potencia del motor para obtener la potencia de diseño con un valor de 24 kW.

Cuadro 18: Datos iniciales transmisión de potencia - Poleas y bandas

Factor de servicio (C2)	1.6	
Potencia de diseño (Pd)	24	KW
rpm_eje entrada	1800	rpm
rpm_eje intermedio	300	rpm
rpm_eje salida	50	rpm
Relación de velocidad (Ir)	6	

Para los siguientes cálculos se ha utilizado el manual SKF para bandas de transmisión de potencia tipo V (SKF, 2008), este tipo de bandas son las más comunes por la alta durabilidad de funcionamiento que poseen y accesibilidad de encontrarlas en el mercado (tomando en consideración el tema del mantenimiento de la máquina). Conociendo la potencia de diseño y las rpm de cada etapa a analizar se seleccionó por medio de la figura inferior el tipo de sección de la banda V a utilizar.

Figura 18: Selección del tipo de sección de banda



Fuente: SKF, 2008

Se puede observar que para la primera etapa de reducción que es a 1,800 rpm con una potencia de diseño de 24 kW nos encontramos en el tipo de sección 5V, al igual que en la segunda etapa con la misma potencia de diseño y 300 rpm, pero para esta última debido a que requiere mayor torque se ha seleccionado el tipo de sección 5VX ya que posee mejores capacidades mecánicas que la 5V normal.

Luego se prosiguió determinando el diámetro de la polea pequeña y grande para cada etapa de transmisión, en base a los requerimientos del tamaño mínimo de polea admisibles para los tipos de sección de banda seleccionados y a la relación de reducción “Ir” que para ambas etapas ha sido 6.

Figura 19: Diámetro mínimo recomendable según tipo de sección de banda

Pulley outside diameter	2.65	2.8	3	3.15	3.35	3.65	4.12	4.5	4.75	5	5.3	5.6	6	6.5	6.9	7.1	7.5	8	8.5	9	9.25	9.75	10.3	10.6	10.9	
3V/3V-XP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5V/5V-XP																										
8V/8V-XP																										
3VX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5VX																										

Fuente: SKF, 2008

Como se puede observar en la figura superior para el tipo de sección 5V y 5VX el mínimo recomendable de diámetro para la polea pequeña o motriz es 7.1 pulgadas, sin embargo, al seleccionar este la vida útil de la banda podría verse afectada, es por ello por lo que se ha seleccionado la medida superior de 7.5 pulgadas. Conociendo este dato y la relación de reducción se seleccionó el diámetro de la polea grande o conducida según las tablas del manual, el cual se ha determinado con el valor de 44.5 pulgadas para cada etapa.

Los siguiente cálculos fueron la distancia entre centros preliminar, longitud de la banda, longitud comercial, designación de la banda, distancia entre centros, potencia básica de la banda y factores de corrección, todos los procedimientos de estos cálculos se pueden encontrar en el manual de SKF, pero la finalidad de todo esto ha sido determinar el número de bandas requeridas para cada etapa de reducción, en donde para la primera etapa se determinó el valor de 2 bandas mientras que para la segunda etapa el valor de 7 bandas, lo cual hace mucho sentido pues la última etapa es la que tiene que transmitir el mayor torque de la trituradora.

Cuadro 19: Cálculos para número de bandas primera etapa de reducción

<b>Primera Etapa</b>		
Sección transversal de la banda		5V
Relación de velocidad (Ir)		6
Wedge Narrow Pulleys RMA		
Polea motriz (d)	7.5	in
Polea conducida (D)	44.5	in
Distancia preliminar entre centros (CCp)	36.4	in
Longitud de la banda (Ld)	163.84	in
Longitud de la banda comercial	170	in
Designación	PHG 5V1700	
Distancia entre centros (CC)	52.69	in
a	223.76	in
Potencia básica de la banda (Pb)	14.89	KW
Factor de corrección longitud de la banda (C1)	1.03	
Factor de corrección arco de contacto (C3)	0.89	
Clasificación potencia de la banda (Pr)	13.65	KW
<b>Número de bandas (N)</b>	<b>2</b>	

Cuadro 20: Cálculos para número de bandas segunda etapa de reducción

<b>Segunda Etapa</b>		
Sección transversal de la banda	5VX	
Relación de velocidad (Ir)	6	
Wedge Narrow Pulleys RMA		
Polea motriz (d)	7.5	in
Polea conducida (D)	44.5	in
Distancia preliminar entre centros (CCp)	36.4	in
Longitud de la banda (Ld)	163.84	in
Longitud de la banda comercial	170	in
Designación	PHG 5V1700	
Distancia entre centros (CC)	52.69	in
a	223.76	in
Potencia básica de la banda (Pb)	3.87	KW
Factor de corrección longitud de la banda (C1)	1.03	
Factor de corrección arco de contacto (C3)	0.89	
Clasificación potencia de la banda (Pr)	3.55	KW
<b>Número de bandas (N)</b>	<b>7</b>	

Luego se realizó el análisis de esfuerzos en cada etapa de transmisión para poder obtener las tensiones ejercidas sobre el eje intermedio y el eje motriz de salida. Se inició realizando un DCL de las fuerzas externas sobre el eje, éstas básicamente son las tensiones en la polea, las cuales por medio de un sistema fuerza-par se han trasladado al eje, como se observa en el diagrama de cuerpo libre inferior.

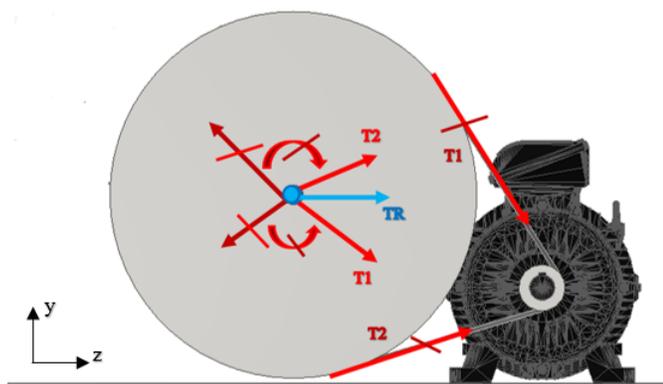
Los pares formados de la traslación se eliminan entre sí, debido a su sentido opuesto. Por lo que nos quedamos con “ T1 ” y “ T2 ”, y estas forman una carga resultante radial sobre el eje “ Tr ”, la cual se calcula en función a la velocidad de la banda “ V ” y a la potencia de la máquina (SKF, 2008).

$$V = (\pi * d_{motriz} * rpm_{in})/12 \quad (6)$$

$$T_r = (33,000 * P_{motor})/V \quad (7)$$

$$T_1 = (41,250 * P_{motor})/V \quad (8)$$

Figura 20: DCL análisis de fuerzas en los ejes



Fuente: Elaboración propia

Obteniendo el valor de la carga radial resultante fue posible determinar la tensión 1 de igual forma en función de la potencia del motor de la máquina y de la velocidad de la banda, la tensión 2 solo se tuvo que despejar de la ecuación, es decir carga resultante menos tensión 1 para obtener la tensión 2. Se puede observar que en ambas transmisiones la tensión dos es menor y esto es debido a que es el lado flojo o menos tenso de cada etapa de transmisión. Por último, el torque de cada polea se calculó multiplicando la carga radial por el diámetro de la polea dividido dos, es decir su respectivo radio.

Cuadro 21: Tensiones y torques para cada etapa

	1ra etapa	2da etapa
V (ft/min)	3,534.29	589.05
Carga radial Tr (lb) T1-T2	186.74	1,120.45
T1 (lb)	212.21	1,273.24
T2 (lb)	25.46	152.79
Torque_d (lb-in)	700.28	4,201.7
Torque_D (lb-in)	4,201.7	24,930.03
<b>Torque_D (N*m)</b>	474.73	<b>2,816.72</b>

Recordemos que el torque requerido de la máquina calculado anteriormente fue de 2,365.58 Nm y podemos observar que el torque que se podría obtener de la transmisión conformada por las dos etapas de reducción diseñadas nos daría un torque de 2,816.72 Nm por lo que estamos asegurando el funcionamiento correcto de la trituradora.

En base a estos cálculos se seleccionaron los componentes del catálogo SKF (SKF, 2016), dichos componentes fueron las bandas y poleas para la primera y segunda etapa de reducción, al seleccionarlos es importante mencionar que se aproximaron a las medidas comerciales sugeridas en el catálogo.

Cuadro 22: Poleas y bandas seleccionadas para la máquina

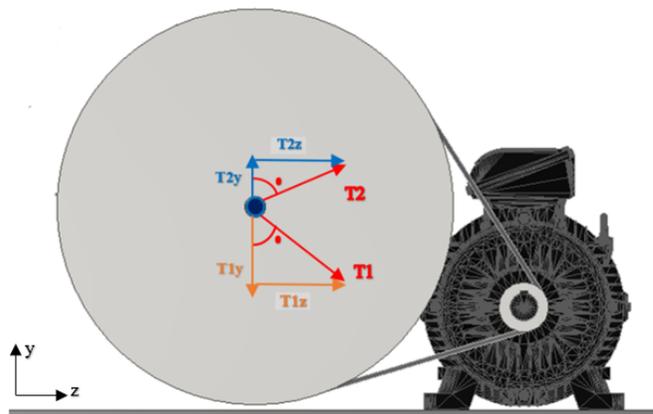
Elementos SKF		
Polea - Etapa de reducción	Código polea	Código banda
Polea menor - 1ra etapa (d1)	PHP 2-5V750TB	PHG 5V1700
Polea mayor - 1ra etapa (D2)	PHP 3-5V4500TB	
Polea menor - 2da etapa (d3)	PHP 8-5V750TB	PHG 5V1700
Polea mayor - 2da etapa (D4)	PHP 8-5V5000TB	

Para el diseño de los ejes fue importante primero calcular el ángulo del sistema polea-banda para descomponer las tensiones 1 y 2 en sus componentes x y y, estas se obtienen de la ecuación del ángulo de contacto de las poleas con las bandas, es decir el ángulo entre los puntos donde aún existe contacto entre estos dos componentes. Este básicamente se calcula con el seno inverso de la diferencia de los diámetros externos de las poleas dividido dos veces la distancia entre centros. Estos cálculos se han determinado para la polea 2, 3 en el análisis del eje intermedio y en la polea 4 para el análisis del eje de salida.

$$\theta_{contacto} = \arcsin((D - d)/2C) \quad (9)$$

De esta manera se determinaron las componentes en el eje x y y de la tensión 1 y 2 para las poleas 2, 3 y 4, utilizando su respectiva tensión por el coseno del ángulo de contacto para las coordenadas en y ya que era adyacente al ángulo, y la tensión por el seno del ángulo de contacto para las coordenadas en x por ser opuesto al ángulo, y así obtener la tensión resultante en cada polea que es la sumatoria de sus componentes, como se puede ver en el DCL inferior. Estas tensiones resultantes eran necesarias para poder realizar el dimensionamiento de los ejes, ya que son las cargas a las cuales estará sometido cada eje en los planos XY y XZ.

Figura 21: DCL tensiones en los ejes por componentes



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 23: Tensión resultante por componentes en cada polea

	<b>Carga polea 2 eje intermedio</b>	<b>Carga polea 3 eje intermedio</b>	<b>Carga polea 4 eje salida</b>
$\theta_{contacto}$	20.55	20.55	20.55
T1z (lb)	198.70	1,192.19	1,192.19
T2z (lb)	23.84	143.06	143.06
<b>TRz (lb)</b>	222.54	1,335.25	1,335.25
T1y (lb)	74.50	447.02	447.02
T2y (lb)	8.94	53.64	53.64
<b>TRy (lb)</b>	65.56	393.38	393.38

#### 5.3.4. Dimensionamiento diámetro de los ejes

Conociendo el valor de las tensiones resultantes de las coordenadas y y z que actúan sobre los ejes, se prosiguió a realizar el análisis para determinar el diámetro “d” para el eje intermedio y para el eje de salida. Para ello también se utilizaron los respectivos torques del cuadro “Tensiones y torques para cada etapa”. Se decidió utilizar para ambos ejes acero AISI 1045 cold rolled por poseer alta resistencia y tenacidad a bajo costo.

La relación de diámetros (D/d) y la del radio de entalle con el diámetro menor (r/d) se tomaron en sus medidas estándar 1.2 y 0.1 respectivamente, así como el resto de los factores de modificación (Mott, 2004). Ya que no se cuenta con ensayos de la resistencia a la fatiga de los componentes, se determinó el límite de la resistencia a la fatiga de la pieza “Se” con la ecuación de Marin:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \quad (10)$$

Donde:

- Se - Límite de resistencia a la fatiga de la pieza
- S'e - Límite de resistencia a la fatiga del material
- ka - factor de modificación por la condición superficial
- kb - factor de modificación por el tamaño
- kc - factor de modificación por la carga
- kd - factor de modificación por la temperatura
- ke - factor de confiabilidad
- kf - factor de modificación efectos varios

Cuadro 24: Factores de modificación y algunas propiedades acero 1045 cold rolled

<b>D/d</b>	1.2	<b>ke</b>	0.59
<b>r/d</b>	0.1	<b>kfs</b>	1.3
<b>ka</b>	0.817	<b>Se' (psi)</b>	45,500
<b>kb</b>	0.9	<b>Sut (psi)</b>	91,000
<b>kc</b>	1	<b>Se (psi)</b>	33,455.82
<b>kd = kf</b>	1	<b>Sy (psi)</b>	77,000

Después de esto, se calculó el factor de seguridad para el que se utilizó el criterio de Ullman según el texto *The mechanical Design Process* (Ullman, 2010) la cual toma en cuenta las contribuciones con las propiedades del material, el tipo de esfuerzos a los que estará sometidos, la geometría de diseño, el análisis de fallas a emplear y la confiabilidad deseada.

$$n = n_{material} * n_{esfuerzo} * n_{geometra} * n_{anlisis-fallas} * n_{confiabilidad} \quad (11)$$

Donde:

- $n_{material}$  - contribución del material
- $n_{esfuerzo}$  - contribución del esfuerzo
- $n_{geometra}$  - contribución de la geometría
- $n_{anlisis-fallas}$  - contribución del análisis de fallas
- $n_{confiabilidad}$  - contribución por confiabilidad

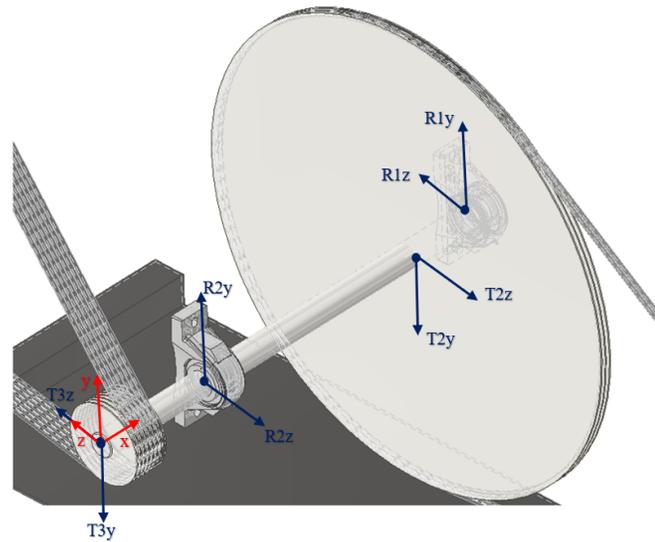
Cuadro 25: Cálculo del factor de seguridad para los ejes según regla de Thumb

$n_{material}$	$n_{esfuerzo}$	$n_{geometra}$	$n_{anlisis-fallas}$	$n_{confiabilidad}$	<b>n</b>
1.4	1.5	1.2	1.3	1.3	<b>4.26</b>

Inicialmente para la contribución del material se utilizó un factor de seguridad de 1.4 ya que las propiedades del material no se conocen a exactitud debido a los proveedores nacionales, para la contribución del esfuerzo se utilizó 1.5 debido a la imprecisión que se pueda dar en el cálculo de las cargas, para la contribución de geometría 1.2 ya que la manufactura del eje no puede contar con tolerancias demasiado pequeñas o estrictas, ya que esto eleva los costos de manufactura. Para la contribución del análisis de fallas se utilizó 1.3 ya que el esfuerzo soportado por los ejes será repetitivo, y para la contribución del material se utilizó 1.3 para tener una confiabilidad de los ejes que se encuentre entre 92 a 98 por ciento, con esto se obtuvo un factor de seguridad de 4.26 el cual lo hemos considerado coherente para un análisis conservador y confiable.

Luego se tomó en cuenta las cargas resultantes en sus respectivas componentes del cuadro “Tensión resultante por componentes en cada polea” y los torques del cuadro “Tensiones y torques para cada etapa”. Sobre el eje intermedio se aplicaron 2 cargas en el eje y, las cuales son las tensiones de las poleas en dicha componente más el peso de las poleas, así también se aplicaron 2 cargas opuestas en el eje z que son de igual forma las componentes de las tensiones de las poleas 2 y 3 en ese respectivo eje, como se muestra en la figura 22.

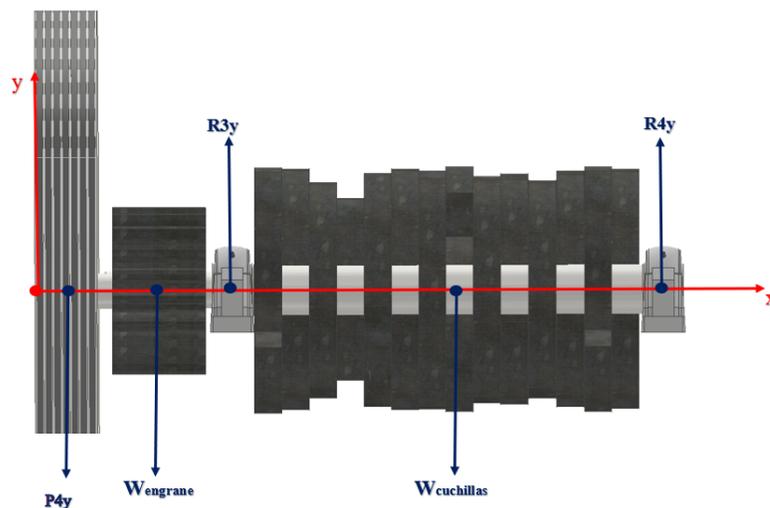
Figura 22: DCL eje intermedio 3D



Fuente: Elaboración propia

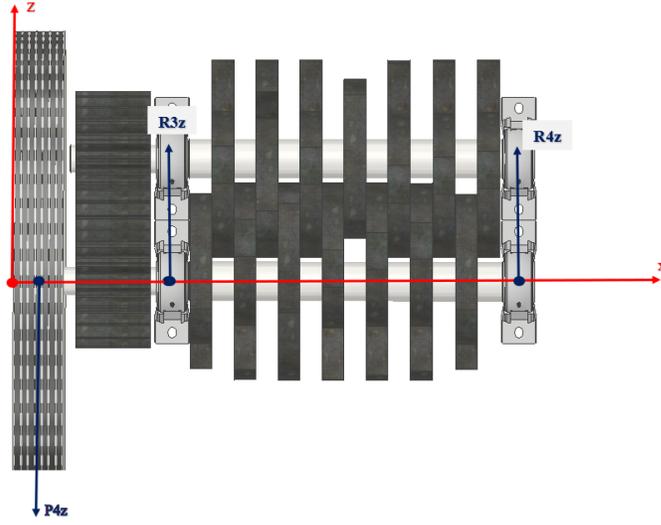
Por otro lado, en el eje de salida se aplicaron 3 cargas en el eje y las cuales eran la componente en y de la tensión de la polea 4, el peso del engranaje motriz (encargado de transmitir potencia al eje y al engranaje de salida conducido) y el peso de las 8 cuchillas. Luego en el plano XZ se tenía únicamente la componente en z de la tensión de la polea 4.

Figura 23: DCL plano xy eje de salida motriz



Fuente: Elaboración propia

Figura 24: DCL Plano xz eje de salida motriz

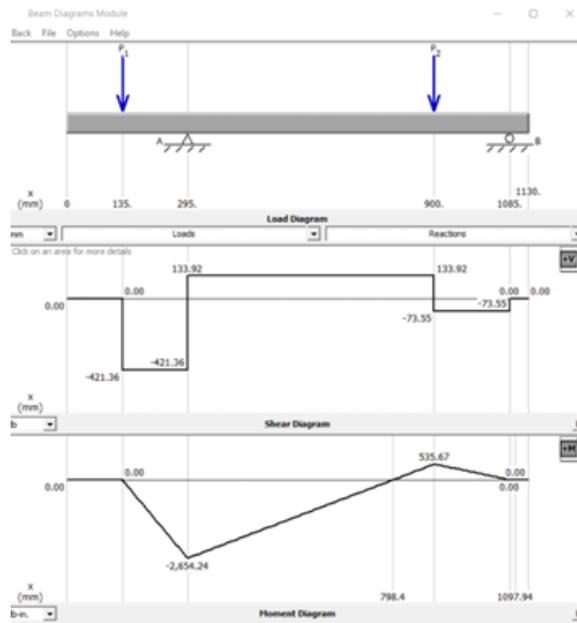


Fuente: Elaboración propia

A continuación, se determinó el momento flector máximo producido por las cargas en cada eje, este se calculó utilizando el software MD Solids, debido a que se debía analizar los planos XY y XZ, por lo que se determinó el momento flector máximo con la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los momentos flectores máximos en cada plano.

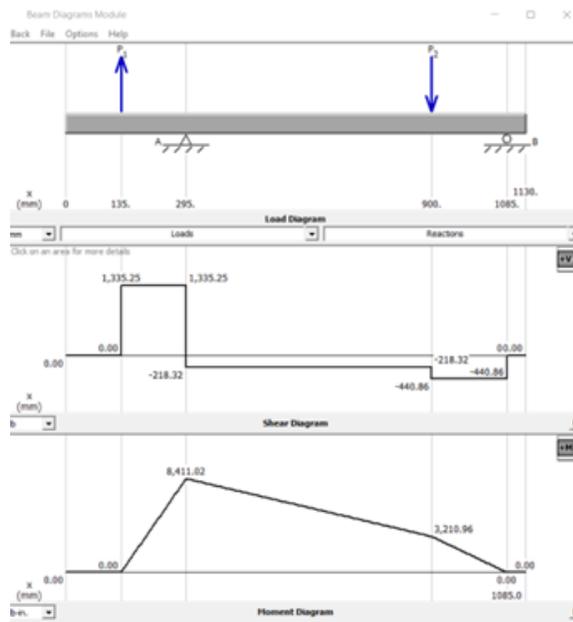
$$M_{max} = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2} \quad (12)$$

Figura 25: Análisis plano xy momento flector máximo eje intermedio



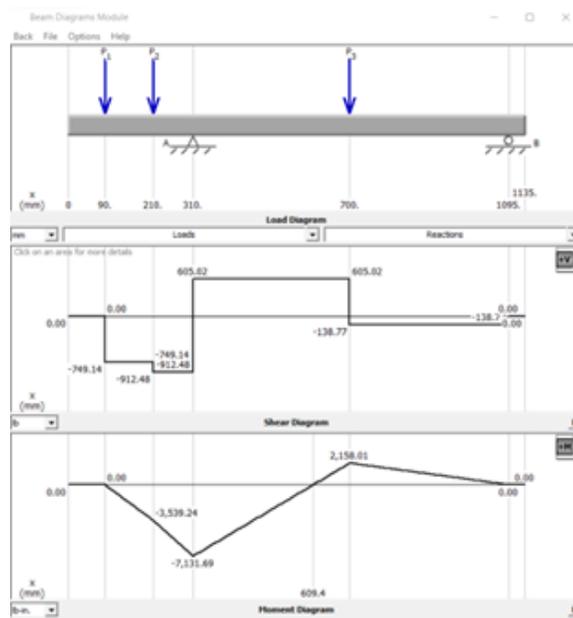
Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Análisis plano xz momento flector máximo eje intermedio



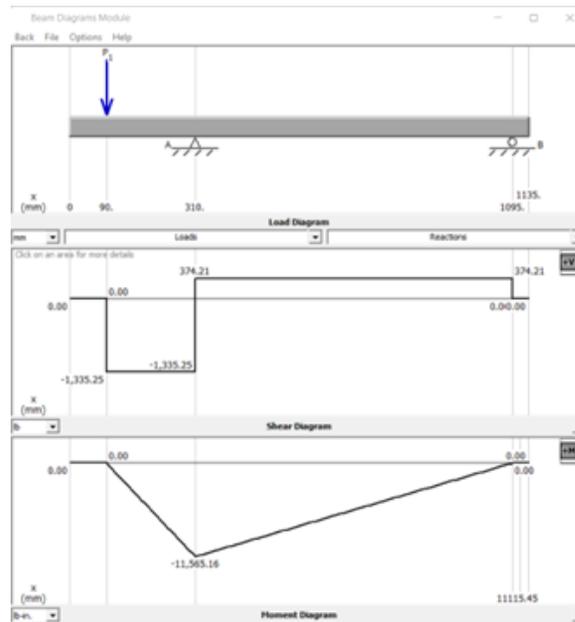
Fuente: Elaboración propia

Figura 27: Análisis plano xy momento flector máximo eje de salida matriz



Fuente: Elaboración propia

Figura 28: Análisis plano xz momento flector máximo eje de salida motriz



Fuente: Elaboración propia

Contando con todos estos valores se pudo determinar el diámetro menor requerido para el eje intermedio y para el eje de salida empleando el criterio ED-Goodman o ecuación de energía de la distorsión de Goodman (Mott, 2004), como se observa en la parte inferior. Se utilizó este criterio ya que es recomendable para un diseño inicial por ser simple y conservador.

$$d = \sqrt[3]{\frac{16n}{\pi} \left( \frac{2(k_f M_{max})}{S_e} + \frac{(3(k_{fs} T)^2)^{\frac{1}{2}}}{S_{ut}} \right)}$$

Cuadro 26: Diámetro menor requerido para cada eje

		Cargas aplicadas (lb)		M <sub>máx</sub> (lb*in)	T (lb*in)	n	d (mm)
		En y	En z				
Eje intermedio	T3	421.36	1,335.25	8,819.88	4,201.69	4.26	57.31
	T2	207.47	222.54				
Eje de salida motriz	T4	749.14	1,335.25	13,587.27	24,930.03	4.26	81.36
	W <sub>Engrane</sub>	163.34	—				
	W <sub>Cuchillas</sub>	743.79	—				

Es importante mencionar que el factor de seguridad “n” empleando la clásica regla de Thomb fue un cálculo preliminar, pero para hacer un análisis de los ejes más robusto se prosiguió a calcular el factor de seguridad según el criterio ED-Goodman “nf” el cual emplea los esfuerzos alternantes y medios de los ejes, así como el límite de resistencia de fatiga de la pieza y la resistencia última. También se determinó el factor de seguridad a la fluencia “ny” utilizando la resistencia a la fluencia del material dividido el esfuerzo máximo, que es la suma del esfuerzo alternante y el medio.

$$\begin{aligned} \cdot \sigma'_a &= \frac{32K_f M_{max}}{\pi d^3} & \cdot \sigma'_m &= \left[ 3 \left( \frac{16K_{fs} T}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2} \\ \cdot \frac{1}{n_f} &= \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} & \cdot n_y &= \frac{S_y}{\sigma'_{max}} = \frac{S_y}{\sigma'_a + \sigma'_m} \end{aligned}$$

Cuadro 27: Factores de seguridad eje intermedio y salida motriz

	Eje intermedio	Eje de salida
$\sigma'_a$	7,819.56	4211.51
$\sigma'_m$	4,193.89	10,038.07
Se	33,455.82	33,455.82
Sut	91,000.00	91,000.00
Sy	77,000.00	77,000.00
<b>nf</b>	3.57	4.23
<b>ny</b>	6.41	5.40

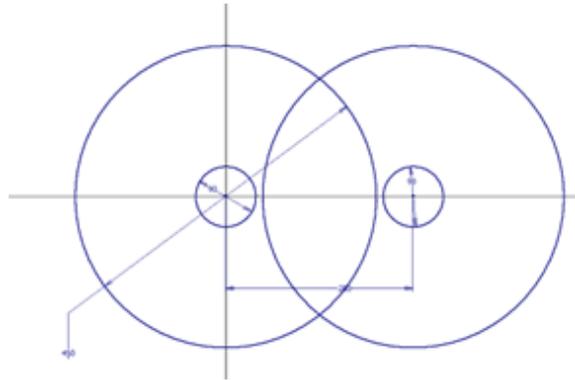
Podemos observar que en los resultados los factores de seguridad con el criterio ED-Goodman fueron cercanos al factor de seguridad estimado preliminarmente de 4.26, tomando en cuenta los criterios de los materiales, su manufactura y funcionamiento de la máquina antes mencionados, por lo que son factores de seguridad aceptables asegurando una alta durabilidad de las piezas, pues también vemos los factores de seguridad a la fluencia del material con valores aún más altos que los factores de seguridad de distorsión y del criterio de Ullman para ambos ejes.

### 5.3.5. Selección de chumaceras

Obtenidos los resultados anteriores se inició el análisis para la selección de las chumaceras a utilizar, donde las variables fundamentales a tomar en cuenta han sido los diámetros de los ejes calculados y las reacciones que en estos se generan. Para el eje intermedio tenemos un diámetro de 57.31 mm el cual debía aproximarse a una medida comercial de chumacera la cual fue de la marca SKF modelo SYNT60F es decir de un diámetro nominal de 60 mm.

Para el diámetro del eje motriz, debido a que es el encargado de transmitir el torque requerido para el corte de los neumáticos, se obtuvo un diámetro de 81.36 mm, sin embargo en este caso se decidió realizar un análisis iterativo para reducir el diámetro en los extremos de este eje para así utilizar una chumacera de menor tamaño, ya que el principal inconveniente era que una chumacera por ejemplo de 80 mm de diámetro contaba con un largo de 345 mm, el cual se determinó que estaba relacionado directamente proporcional con el diámetro de las cuchillas, ya que dicho largo o longitud de la chumacera es la medida equivalente a la distancia entre centros de los ejes de salida motriz y conducido, como se observa en el bosquejo inferior. Por lo que al disminuir el tamaño de la chumacera a una medida más adecuada se lograría reducir el diámetro de las cuchillas, lo que también implicaba una reducción directa de costos en los materiales.

Figura 29: Análisis selección chumacera eje de salida

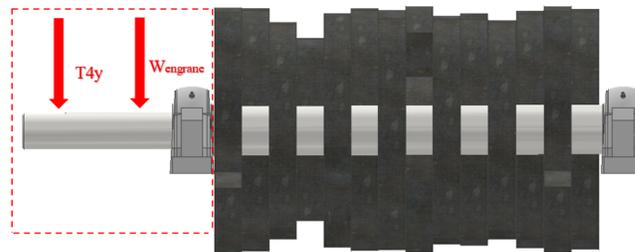


Fuente: Elaboración propia

El análisis iterativo inició disminuyendo los diámetros de las chumaceras desde 80 mm hasta 65 mm, esta última medida es equivalente a una chumacera SKF SYNT65F con un largo de 280 mm que finalmente fue la seleccionada y óptima para poder tener un diámetro nominal de las cuchillas de 450 mm. Pero para haber podido validar esta decisión se realizó un DCL del extremo izquierdo empotrado del eje de salida con las cargas que sobre él actúan, que son la tensión de la polea 4 en sus componentes y y z, en donde la componente y fue acompañada del peso de la polea, la otra carga aplicada fue el peso del engrane, para así determinar qué factores de seguridad se tendrían con un diámetro de chumaceras de 65 mm.

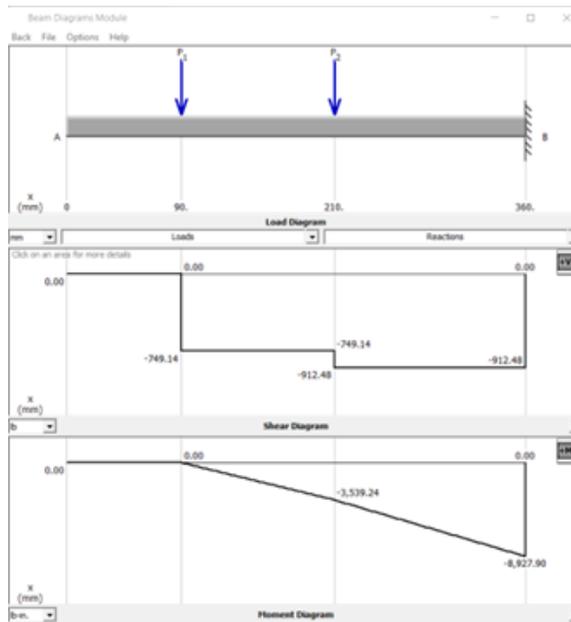
$$n = \frac{\pi \cdot d^3}{16 \left( \frac{2(k_f M)}{S_e} + \frac{(3(k_{fs} T)^2)^{\frac{1}{2}}}{S_{ut}} \right)}$$

Figura 30: Análisis de esfuerzos extremo empotrado eje de salida motriz plano xy



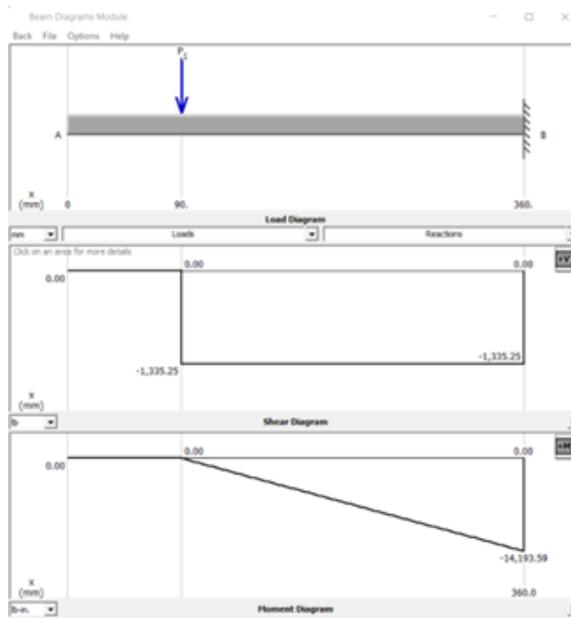
Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Momento flector máximo extremo empotrado eje motriz plano xy



Fuente: Elaboración propia

Figura 32: Momento flector máximo extremo empotrado eje motriz plano xz



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 28: Factor de seguridad para el extremo empotrado eje de salida motriz

	Cargas aplicadas (lb)		M <sub>máx</sub> (lb*in)	T (lb*in)	n	d (mm)
	En y	En z				
<b>T4</b>	749.14	1,335.25	16,767.99	24,930.03	<b>1.93</b>	65.0
<b>W_Engrane</b>	163.34	—				

Cuadro 29: Factor de seguridad extremo empotrado según criterio de Ullman

$n_{material}$	$n_{esfuerzo}$	$n_{geometra}$	$n_{anlisisfallas}$	$n_{confiabilidad}$	<b>n</b>
1.0	1.1	1.15	1.2	1.25	1.90

Cuadro 30: Factor de seguridad ED-Goodman y fluencia extremo empotrado

$\sigma a'$	10,180.31
$\sigma m'$	19,661.87
Se	33,455.82
Sut	91,000.00
Sy	77,000.00
<b>nf</b>	1.92
<b>ny</b>	2.58

Después de realizar el proceso iterativo, se finalizó el cálculo con un diámetro de 2.56 pulgadas equivalente a 65 milímetros, con un factor de seguridad de 1.93, la pregunta puede ser si este es aceptable o no, para ello se comparó con el factor de seguridad calculado con el criterio de Ullman, tomando nuevas consideraciones, como por ejemplo que para este análisis del extremo empotrado conocemos claramente las cargas a las cuales estará sometido así como las propiedades del material a utilizar, por lo que se obtuvo de 1.90 cercano al 1.93, lo cual nos da una conclusión robusta en el análisis de la reducción del diámetro de las chumaceras.

Al igual que en el cálculo anterior de los ejes intermedio y de salida, también se calculó el esfuerzo alternante y medio en el extremo empotrado del eje de salida para determinar el factor de seguridad con el criterio de Goodman con el valor de 1.92 y el de fluencia de 2.58, con este último utilizando un diámetro de 65 mm tendremos una considerable durabilidad en el eje, pero es importante mencionar que el diámetro del árbol de cuchillas será de 80 mm, es decir únicamente se hará la reducción a 65 mm en los extremos del eje para ensamblarse con las chumaceras.

Conociendo el diámetro a utilizar para las chumaceras aún se debía comparar si dichas chumaceras seleccionadas eran capaces de soportar las reacciones ejercidas por cada eje, estas se obtuvieron por medio de MD Solids mientras que las reacciones máximas de las chumaceras por medio del catálogo de chumaceras SKF (SKF, 2016).

Cuadro 31: Chumaceras seleccionadas módulo de potencia y corte

Número	Código chumaceras	Diámetro (mm)	Reacciones chumaceras (KN)	Reacciones en los ejes (KN)
1 - Eje intermedio	SKF SYNT 60F	60	108	7.34
2 - Eje intermedio	SKF SYNT 60F	60	108	1.99
3 - Eje motriz salida	SKF SYNT 65F	65	216	10.17
4 - Eje motriz salida	SKF SYNT 65F	65	216	1.78
5 - Eje conducido salida	SKF SYNT 65F	65	216	10.17
6 - Eje conducido salida	SKF SYNT 65F	65	216	1.78

Como podemos observar en el cuadro superior en el análisis de comparación entre las reacciones capaces de soportar por parte de las chumaceras contra las que se generarán en los ejes según los diámetros seleccionados podemos tener mucha tranquilidad ya que las chumaceras son totalmente capaces de soportar las reacciones en los ejes, teniendo límites de carga estática mucho más altos que las reacciones a generarse. En cuanto al análisis de límites de velocidad en este caso no aplica, pues las velocidades son relativamente bajas de 300 y 50 rpm, para el eje intermedio y para los ejes motrices respectivamente.

### 5.3.6. Transmisión de potencia final por medio de engranajes

Para la transmisión de potencia de la parte final de la máquina, es decir, entre los ejes de salida motriz y conducido, debido a la limitada distancia entre centros de cada eje la única manera que había para generar la transmisión de potencia entre estos fue por medio de un par de engranajes. Los cuales no fueron multiplicadores ni reductores, ya que debían de tener un valor de tren “e” igual a 1, este nos indica la relación entre la velocidad de salida y la velocidad de entrada, que en este caso se buscaba que fuera 50 rpm para ambos ejes. Por ello, el número de dientes “N” en ambos engranes fue el mismo el cual por medio de un proceso iterativo se estableció de 22 dientes.

La base del cálculo fue la distancia entre centros de los ejes, la cual estaba dada por las chumaceras de 65 mm de diámetro y 280 mm de largo, y esta última medida era igual a la distancia entre centros “C”. Luego se calcularon los diámetros de paso con la siguiente ecuación, sabiendo que ambos engranes contarían con el mismo diámetro de paso.

$$d = (dp + dg)/2 \quad (13)$$

Luego se calculó el paso diametral “Pd” que es la relación entre el número de dientes por pulgada con los que cuenta los engranes, este debe ser siempre el mismo para que el par de engranajes engranen correctamente.

$$P_d = N/d \quad (14)$$

También se determinó el ancho de cara del piñón y del engrane “F”, sabiendo la relación para maquinaria en general:  $8 / Pd < F < 16 / Pd$ , en este análisis se seleccionó un valor más cercano al extremo superior:  $F=14/Pd$ .

Cuadro 32: Datos generales del par de engranes

	Piñón , p	Corona , g
N	22	22
rpm	50	50
<b>d (in)</b>	11.02	11.02
m (mm)	12.73	12.73
Pd (dientes/in)	<b>1.996</b>	<b>1.996</b>
<b>Pd normalizado</b>	2	2
Ancho cara (in)	7.0	7.0
e	1.00	
<b>C (mm)</b>	<b>280.00</b>	
Ángulo de presión ( $\phi_t$ )	20	

Cuadro 33: Datos de diseño de los engranes

<b>DP</b>	Diámetro primitivo	280.00	mm
<b>PC</b>	Paso circular	39.98	mm
<b>A</b>	Cabeza del diente	12.73	mm
<b>S</b>	Espesor del diente	19.0	mm
<b>PD</b>	Pie del diente	15.91	mm
<b>R</b>	Radio de entalle	3.33	mm
<b>AS</b>	Ángulo del espesor	7.77	°

Con estos datos ya se contaba con toda la información requerida para lo siguiente, el análisis de esfuerzos en los engranajes, para lo cual se utilizó la norma AGMA 2001 D04 (AGMA STANDARD, 2005), donde el objetivo principal es determinar la resistencia a la flexión “St” y el número de esfuerzos de contacto de los engranes “Sc”, para así compararlos con los valores teóricos del material seleccionado para fabricar los engranajes, el cual ha sido el acero AISI 1045 por sus buenas propiedades mecánicas, precio y factibilidad de obtenerlo en el mercado nacional.

Cuadro 34: Propiedades mecánicas del acero AISI 1045

E - Módulo de elasticidad	200	Gpa
Dureza	190	HB
St,acero	27,487	psi
Sc,acero	110,610	psi

Conociendo la potencia del sistema "H" de 17.74 hp, se determinó la velocidad de la línea de paso “V” para luego calcular la carga transmitida “Wt” en cada engranaje.

$$V = (\pi * d * n)/12 \quad (15)$$

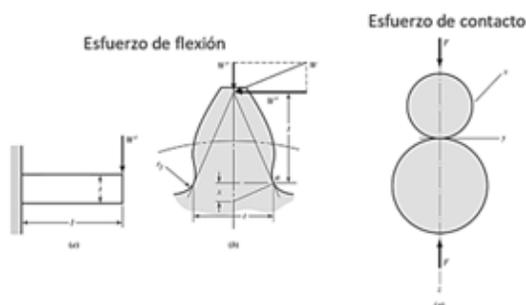
$$W_t = (33,000 * H)/V \quad (16)$$

Cuadro 35: Análisis inicial par de engranajes

		Piñón	Engrane	
Paso diametral	Pd	2.0	2.0	dientes/plg
Número de dientes	N	22	22	
Diámetro de paso	d	11.0	11.0	plg
Revoluciones por minuto	n	50	50	rpm
Carga transmitida	Wt	4,573.84	4,573.84	lb
Ancho de cara	F	7.0	7.0	plg
Velocidad línea de paso	V	144.30	144.30	ft/min

Al aplicar la Norma AGMA 2001 D04, se toman en cuenta muchos factores para el cálculo del esfuerzo de flexión y factores para el número de esfuerzos de contacto, los cuales dependen del material, geometría, condiciones de funcionamiento, cargas aplicadas, entre otras variables, algunos de estos factores se han calculado y otros valores se han tomado de las tablas que proporciona la norma.

Figura 33: Esfuerzo de flexión y de contacto en engranajes



Fuente: Mott, 2004

Cuadro 36: Factores de esfuerzo de flexión

Factor de sobrecarga	$K_o$	1.5	1.5
Factor dinámico	$K_v$	1.15	1.15
Factor de tamaño	$K_s$	1.20	1.20
Factor de distribución carga	$K_m$	1.27	1.27
Factor de espesor del aro	$K_B$	1	1
Factor de geometría flexión	$J$	0.25	0.25
Factor de temperatura	$K_T$	1	1
Factor de confiabilidad	$K_R$	1	1
F. de ciclos esfuerzo flexión	$Y_n$	0.90	0.90

Cuadro 37: Factores para esfuerzo de contacto

Coefficiente elástico	Cp	2300	2300
Factor geométrico a la picadura	I	0.080	0.080
F. de ciclos esfuerzo a picadura	Zn	1.01	1.01
Factor de relación durezas	Ch	1	1
Factor de forma Lewis	Y	0.105	0.105
Número de ciclos de esfuerzo	Nc	7.50E+07	7.50E+07
Factor de condición superficial	Cf	1	1

Con los factores ya determinados, se calcularon los esfuerzos de flexión y de contacto para el par de engranajes. Se observa, que las ecuaciones de las resistencias a la flexión y contacto de los engranes dependen también de los factores de seguridad, por lo que tenemos dos incógnitas y surge una pregunta importante ¿qué variable de estas dos estimar para poder calcular la otra?

En este análisis se decidió estimar el factor de seguridad para el par de engranajes, y con este calcular la resistencia a la flexión y al contacto, con lo cual se podía determinar si la resistencia del material seleccionado era adecuada, es decir, si era mayor a la obtenida en los cálculos.

$$\sigma_{flexion} = (W_t * K_o * K_v * K_s) * (P_d/F) * ((K_m * K_B)/J) \quad (17)$$

$$\sigma_{contacto} = C_p * \sqrt{(W_t * K_o * K_v * K_s) * (K_m/(d_p * F)) * (C_f/I)} \quad (18)$$

$$S_F = ((S_t * Y_N)/(K_T * K_R))/\sigma_{flexion} \quad (19)$$

$$S_H = ((S_C * Z_N * C_H)/(K_T * K_R))/\sigma_{contacto} \quad (20)$$

Los factores de seguridad de flexión como de contacto en los engranajes para cálculos conservadores pueden ser estimados con los valores de 1 hasta 1.70 (AGMA STANDAR, 2005). En este caso decidimos utilizar el valor de 1.10 para ambos factores de seguridad en el par de engranajes, debido a que se conocían con certeza las cargas aplicadas ya calculadas en base a todos los análisis anteriores.

Cuadro 38: Resultados esfuerzos de flexión y contacto en el par de engranajes

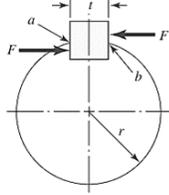
Esfuerzo de flexión	$\sigma_{flexion}$	13,648.93	13,648.93	psi
Factor de seguridad flexión	SF	1.10	1.10	
Resistencia a la flexión de engrane	<b>St</b>	<b>16,635.86</b>	<b>16,635.86</b>	psi
Esfuerzo de contacto	$\sigma_{contacto}$	101,052.48	101,052.48	psi
Factor de seguridad contacto	SH	1.10	1.10	
Número de esfuerzos de contacto	<b>Sc</b>	<b>93,048.33</b>	<b>93,048.33</b>	psi

En los resultados obtenidos podemos concluir que el acero 1045 es un material adecuado para la manufactura de los engranajes ya que será capaz de soportar los esfuerzos a flexión y de contacto a los que estará sometido, ya que  $S_{t,engrane} < S_{t,acero}$  y  $S_{c,engrane} < S_{c,acero}$ .

### 5.3.7. Dimensionamiento de cuñas

Por último, se analizaron las cuñas que son las encargadas de transmitir el torque de las poleas hacia los ejes, y de los ejes de salida hacia los engranajes y hacia las cuchillas de corte. Para iniciar, se decidió utilizar en las cuñas el mismo acero de los ejes, el cual es acero AISI 1045, se podía buscar un acero con menor resistencia ya que es el elemento de sacrificio, pero debido a la viabilidad económica de este se decidió estandarizar.

Figura 34: DCL cuña



Fuente: Mott, 2004

Los esfuerzos presentes en una cuña son el esfuerzo cortante, el cual se analiza con el método de energía de distorsión de Von Mises “E.D”, pero también se debe analizar la resistencia al aplastamiento de la cuña. Se definió la longitud requerida de cada cuña, esto en base al elemento con el cual deba conectarse en su respectiva etapa, es decir, ya sea que conecte el eje con la polea, el engranaje o cuchillas, despejando de esta manera la sección de la cuña de la ecuación. Se sabe que las cuñas generalmente se diseñan como la herramienta o pieza de sacrificio en un ensamble, por ello, se utilizó un factor de seguridad menor que el de los ejes (4.26), se seleccionó uno de 3.5 ya que se conocen las propiedades del acero y los esfuerzos a los que se someterá. Los torques utilizados son los del cuadro “Tensiones y torques para cada etapa”, y los radios son la mitad de los diámetros de los ejes previamente calculados. La resistencia a la fluencia “ $S_y$ ” del acero 1045 es de 77,000 psi, por lo que mediante E.D la resistencia al cortante “ $S_{sy}$ ” es de 44,429 psi.

$$F_c = T/r \quad (21)$$

$$S_{sy} = 0.577 * S_y \quad (22)$$

$$t_{ED} = (F_c * n)/(S_{sy} * l) \quad (23)$$

$$t_{aplast} = (2 * F_c * n)/(S_y * l) \quad (24)$$

Cuadro 39: Cálculos de la sección de las cuñas

	Polea motriz 1ra etapa	Polea conducida 1ra etapa	Polea motriz 2da etapa	Polea conducida 2da etapa	Engrane motriz	Engrane conducido	Cuchilla de corte
T (lb*in)	700.28	4,201.69	4,201.69	25,210.14	25,210.14	25,210.14	25,210.14
r (in)	1.00	1.13	1.13	1.28	1.28	1.28	1.60
Fc (lb)	700.28	3,724.18	3,724.18	19,695.42	19,695.42	19,695.42	15,741.30
<b>l definido (in)</b>	1.2	1.8	4.8	4.8	6.5	6.5	2
t_cortante (in)	0.04	0.15	0.06	0.30	0.22	0.22	0.57
t_aplastamiento (in)	0.05	0.17	0.06	0.34	0.25	0.25	0.67
<b>t estándar (in)</b>	0.25	0.25	0.25	0.50	0.50	0.50	1.0

Como se observa, en el cálculo para la resistencia al aplastamiento tenemos la sección mayor requerida para las cuñas, debido a que se usa el área de la mitad de la cara de la cuña. Sin embargo, no se ha obtenido una gran diferencia según ambos análisis, pero se ha decidido usar de referencia el análisis de aplastamiento para aproximar cada respectiva sección a una medida más comercial, como se puede observar tenemos finalmente secciones de cuña de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y 1 pulgada, esto por estandarización de la máquina y también pensando en una mayor facilidad en un posterior proceso de manufactura.

## 5.4. Selección de materiales y cotizaciones

El objetivo de esta sección es dar una explicación sobre la toma de decisiones y criterios aplicados para la selección de los materiales, principalmente para aquellos componentes que deben ser manufacturados pues no se pueden comprar por las condiciones de diseño establecidas. La mayoría de las cotizaciones se han hecho con una de las empresas distribuidoras de aceros más grandes en Guatemala Tecni Aceros (Tecniaceros, 2022). Importante hay que mencionar que el criterio con mayor ponderación para la selección de los materiales ha sido el factor económico, es decir los materiales finales son aquellos cuyos costos han sido la opción más económicamente viable.

### 5.4.1. Cotización cuchillas de corte

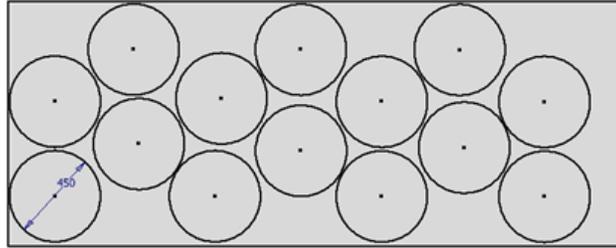
Iniciamos con la cotización de las cuchillas en donde había dos opciones para la manufactura de estas, la primera era por medio de planchas en donde se analizaron planchas de diferentes dimensiones buscando que en una plancha pudieran manufacturarse las 14 cuchillas, la segunda opción era un eje redondo de 450 mm de diámetro con 830 mm de largo en donde sí podían obtenerse 14 cuchillas de 50 mm cada una, y tomando en cuenta 10 mm de merma por cada corte realizado.

Se analizaron dos diferentes tipos de acero el primero de ellos el Hardox 450 un acero ideal para la aplicación por su alta dureza y sus capacidades anti desgaste, pero con un precio elevado en el mercado, mientras que la segunda opción fue acero AISI 1045 que posee mediano contenido de carbono, alta tenacidad y dureza, con facilidades de ser tratado térmicamente, este se analizó tanto en plancha como en perfil redondo como se muestra inferior.

Cuadro 40: Cotización materiales cuchillas de corte

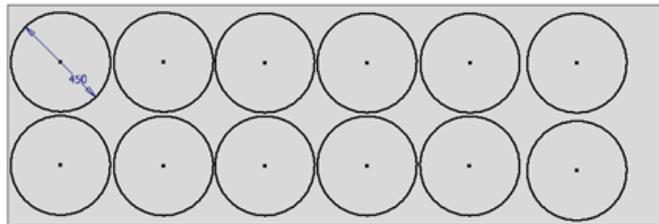
Material	Plancha	Espesor (mm)	Ancho (metros)	Largo (metros)	Costo (Q)	Unidades	Costo unitario (Q)
Hardox 450	Sí	50.8	1.21	3.04	76,300.00	14	5,450.00
AISI 1045 Redondo	No		<i>Diámetro</i> 0.45	0.830	52,562.71	14	<b>3,754.48</b>
AISI 1045	Sí	50	1	3	64,500.00	12	5,375.00

Figura 35: Dimensionamiento cuchillas en acero Hardox 450



Fuente: Elaboración propia

Figura 36: Dimensionamiento cuchillas en acero AISI 1045 plancha



Fuente: Elaboración propia

Con la plancha de acero AISI 1045 se tuvo un problema pues la plancha disponible en el mercado estaba limitada en su tamaño, por lo que solo se podían obtener 12 cuchillas de ella, utilizar dos planchas de este material no era económicamente viable. Por lo que nos quedamos con la plancha de acero Hardox 450 y el acero AISI 1045 en el perfil redondo, donde podemos observar en el cuadro de la cotización, que tal como se esperaba la opción más económica es el acero 1045 con el cual se obtiene un costo por cuchilla de Q3,754.48 comparado contra Q5,450.00 del Hardox. Es importante mencionar que estos costos son solo del material pues no se ha estimado el costo de manufactura, el cual conllevaría un costo adicional a cada cuchilla.

Como mencionamos anteriormente en este análisis se buscó seleccionar la opción más económica, sin embargo, nos podemos preguntar si valdrá la pena hacer las cuchillas de acero Hardox 450, para responder a esta pregunta se hará una simulación y análisis de elementos finitos para comparar el comportamiento, factor de seguridad y concentración de esfuerzos de las cuchillas fabricadas por medio de acero 1045 o por Hardox 450.

#### 5.4.2. Cotización ejes de transmisión

Para el eje intermedio, eje de salida motriz y conducido se tenían dos opciones iniciales utilizar acero 4140 QT recomendable para aplicaciones de transmisión de potencia por su excelente tenacidad, versatilidad y altas propiedades mecánicas o la segunda opción que siguió siendo acero 1045 el cual también se adecuaba a la aplicación.

Como se sospechaba al inicio al realizar la cotización se determinó que el acero 4140 QT tiene el doble del precio que el acero 1045 para todas las medidas cotizadas, ya que el total de costos de material para los ejes usando acero AISI 1045 ha sido de Q 4,006.00 mientras que utilizando acero 4140 QT fue de aproximadamente Q12,916.00. Por ello, anteriormente se había dimensionado en base al supuesto que fue confirmado, acero AISI 1045 la opción económicamente más viable.

Cuadro 41: Cotización materiales ejes de transmisión

Material	Perfil redondo	Diámetro (in)	Largo (in)	Costo (Q)
AISI 1045	Sí	2.5	35	689.50
AISI 1045	Sí	3.5	45	1,735.00
AISI 1045	Sí	3.5	41	1,581.50
<b>Total</b>				<b>4,006.00</b>

#### 5.4.3. Cotización engranajes transmisión de potencia

Los componente más grande a manufacturar serían los engranajes y sabiendo que el acero AISI 1045 es uno de los materiales económicamente más viables y que mejor se adecúa a cada componente a manufacturar, se cotizó este mismo material para los engranajes, donde se necesita un eje con un diámetro de 12 pulgadas con un espesor de 13.4 pulgadas, donde cada engrane tiene un espesor de 6.7 pulgadas.

Cuadro 42: Cotización material para engranajes motriz y conducido

Material	Perfil redondo	Diámetro (in)	Largo (in)	Costo (Q)
AISI 1045	Sí	12	13.5	8,520.90

#### 5.4.4. Cotización total módulo de potencia y corte

Por último, se realizó también la cotización de los componentes que no se deben manufacturar, es decir aquellos que se deben de comprar los cuales ya se seleccionaron en base a los cálculos mostrados, estos componentes son las bandas, poleas, chumaceras y el motor. Con lo cual se obtuvo la cotización total del módulo de potencia y corte con la cantidad de Q 114,529.54, nuevamente es importante mencionar que estos costos son sin considerar el costo de mano de obra de los componentes manufacturados, y no se entró en ese detalle por el hecho que si estos componentes se manufacturaran en el taller de metal mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala este costo no tendría ningún valor pues el proceso sería labor de los estudiantes encargados del proyecto junto con la valiosa ayuda de los catedráticos del taller.

Cuadro 43: Cotización total módulo de potencia y corte máquina trituradora de neumáticos

Componente o material	Descripción	Precio (Q)	Cantidad	Total (Q)
Acero AISI 1045 2.5" redondo	Eje intermedio	689.50	1	689.50
Acero AISI 1045 3.5" redondo	Eje de salida motriz	1,735.00	1	1,735.00
Acero AISI 1045 3.5" redondo	Eje de salida conducido	1,581.50	1	1,581.50
Acero AISI 1045 18" redondo	Cuchillas de corte	52,562.71	1	52,562.71
Motor WEG NEMA 20 Hp	Motor eléctrico trifásico	17,682.60	1	17,682.60
Chumacera SKF SYNT60F	Chumacera eje intermedio	2,433.00	2	4,866.00
Chumacera SKF SYNT65F	Chumacera ejes de salida	3,909.02	4	15,636.08
Banda SKF PHG 5V1700	Bandas etapas de reducción	462.92	9	4,166.27
Polea SKF PHP 2-5V750TB	Polea etapa 1 motriz	1,087.63	1	1,087.63
Polea SKF PHP 3-5V4500TB	Polea etapa 1 conducida	1,413.92	1	1,413.92
Polea SKF PHP 8-5V750TB	Polea etapa 2 motriz	1,834.97	1	1,834.97
Polea SKF PHP 8-5V5000TB	Polea etapa 2 conducida	2,752.45	1	2,752.45
Acero AISI 1045 12" redondo	Engranajes motriz y conducido	8,520.90	1	8,520.90
<b>Total costos módulo de potencia y corte (Q)</b>				<b>114,529.54</b>

Como podemos ver en la cotización el componente de mayor valor es el acero para las cuchillas de corte, como ya se mencionó el costo de este se minimizó seleccionando la opción más económica en el mercado nacional según la cotización realizada, pero para estar un poco en contexto del valor de las cuchillas de corte en el mercado se realizó una cotización con la empresa mexicana ADEK especialista en fabricación y afiliado de cuchillas de corte y sierras industriales. (ADEK, 2022).

Se realizó la cotización de las cuchillas con la empresa ADEK para lo cual se le proporcionó el plano de la cuchilla diseñada, dimensiones y geometría de la pieza, así como la especificación que necesitábamos que se fabricaran con acero AISI 1045, aún así, es importante notar que esta cotización es del producto final es decir las cuchillas ya manufacturadas, lo cual no es directamente comparable con el dato que tenemos pues este es solo del material sin considerar costos de mano de obra, aun así esta cotización ayudó a tener una idea y ver que tan lejos o cerca estábamos de los precios del mercado.

Como podemos observar en la figura de la cotización tenemos un precio unitario de cuchilla de \$1,175 (dólares), la cotización se realizó para 16 cuchillas, pero el diseño final es de 14, tomando en cuenta el diseño final tenemos un valor de \$16,450 para las 14 cuchillas, lo cual es equivalente a aproximadamente Q128,300.00, un valor mayor al costo total de todo el módulo de potencia y corte. Estos resultados nos han dejado impresionados pues repetimos son cotizaciones no comparables directamente pues una toma en cuenta los costos de manufactura y la otra no, pero nos dan un buen panorama para el costo total de la máquina, un panorama favorable para la creación de la máquina bajo una ruta de un diseño económicamente viable.

Figura 37: Cotización ADEK cuchillas de corte

http://www.adek.com.mx



**COTIZACION**

Fecha: 11/04/2022

Expira: 30 DIAS



No. 0220517

**TO:** PROYECTO DE TESIS MAQUINA  
11 CALLE 15-79  
ZONA 15  
VISTA HERMOSA 3  
VISTA HERMOSA 3  
GUATEMALA, C.P. 01015  
502-587-563-31

**SHIP TO:** PROYECTO DE TESIS MAQUINA  
11 CALLE 15-79  
ZONA 15  
VISTA HERMOSA 3  
VISTA HERMOSA 3  
GUATEMALA, C.P. 01015  
502-587-563-31

Vendedor: JULIAN CRUZ

ATTN:

Quote No.	Date	Cust No	Terms	Your Referenced Inquiry	Delivery Promise	F.O.B.	Expiration
0220517	11/04/2022	E0166D	CONTADO	RFQ	10-12 SEMANAS	NO INC. ENVIO	30 DIAS

Item	Quantity	UM	Part / Description	Price \$	Extension \$
001	16	PZ	FCCCLL450X90X50 Fabricacion de cuchilla circular corte de llanta con medidas de 450mm Diámetro Exterior x 90mm Diámetro Interior x 50mm de espesor. Tolerancias dimensionales y de acabado a según dibujo.  Due Date: 11/05/2022	1,175.00	18,800.00
<b>Subtotal</b>					18,800.00
<b>Total IVA</b>					
<b>Total for Quote</b>				<b>USD</b>	<b>18,800.00</b>

Fuente: ADEK, 2022

## 5.5. Plan de simulación

1. **Herramienta de simulación:** para la simulación se utilizará el software de análisis de elementos finitos ANSYS Workbench 2022 R1@, del cual se cuenta con la versión estudiantil la cual está limitada, sin embargo, se considera que para este tipo de simulación será suficiente esta versión. En caso ser necesaria la versión profesional se cuenta con esta en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle de Guatemala.
2. **Descripción del análisis:** la simulación principalmente se centrará en el módulo de corte, la idea principal del análisis será determinar el comportamiento de las cuchillas de corte cuando estas están sometidas a las fuerzas de corte de cizalla calculadas con anterioridad. Se utilizará el diseño básico de la cuchilla de corte de dos filos, pero se analizará usando de primero el material seleccionado por viabilidad económica acero AISI 1045, y se comparará el comportamiento de la cuchilla si contara con las propiedades de un acero Hardox 450, que fue la segunda opción, no elegida ya que el costo de las cuchillas con este material era más elevado pero será interesante analizar si ese costo adicional realmente agrega mayor valor a la pieza.

Figura 38: Cuchilla de corte diseño básico



Fuente: Elaboración propia

3. **Mallado:** Inicialmente se utilizará los mallados generados automáticamente por el *software*, pero con base en estos se irá mejorando el mallado para la cuchilla buscando la mejor combinación de las herramientas, con el fin de tener un análisis lo más preciso posible. En esta sección es donde la versión estudiantil puede volverse un poco limitada, sin embargo, por la geometría de la cuchilla se considera que no tendremos problemas.
4. **Resultados:** Como mencionamos anteriormente de este análisis podemos obtener conclusiones aún más robustas en cuanto a la selección de los materiales, por lo que en la obtención de resultados se buscará comparar las deformaciones entre las cuchillas de los diferentes materiales, factor de seguridad, esfuerzos máximos y concentración de esfuerzos.

## 5.6. Ejecución de la simulación

### 5.6.1. Objetivos de la simulación

#### Objetivo principal

- Analizar y comparar el comportamiento mecánico de una cuchilla de corte de acero AISI 1045 contra una cuchilla de acero Hardox 450 del módulo de corte de la trituradora de neumáticos, para poder determinar la relación costo-beneficio del material con un costo más elevado Hardox 450 contra el material más económico acero 1045.

#### Objetivos específicos

- Analizar la deformación total, deformación elástica equivalente, esfuerzo equivalente de Von Mises, esfuerzo de corte máximo y factor de seguridad de una cuchilla de acero AISI 1045 al ser sometida a la fuerza de corte de 4,948.70 Newton
- Analizar la deformación total, deformación elástica equivalente, esfuerzo equivalente de Von Mises, esfuerzo de corte máximo y factor de seguridad de una cuchilla de acero Hardox 450 al ser sometida a la fuerza de corte de 4,948.70 Newton

### 5.6.2. Propiedades de los materiales

Se investigó 4 principales propiedades de los aceros utilizados las cuales son: módulo de elasticidad  $E$ , coeficiente de poisson, límite de resistencia a la fluencia  $\sigma_{sy}$  y resistencia última a la tensión  $\sigma_{ult}$ , datos necesarios para poder estructura inicialmente la simulación.

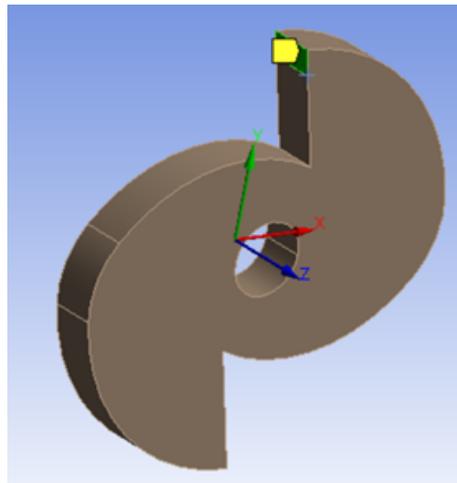
Cuadro 44: Propiedades de los aceros a simular

Propiedades	Acero AISI 1045	Acero Hardox 450
E (MPa)	200,000	210,000
Radio Poisson	0.3	0.33
$\sigma_{ult}(MPa)$	630	1,400
$\sigma_{sy}(MPa)$	530	1,200

### 5.6.3. Soportes, contactos y cargas

Luego de asignar los materiales a utilizar y cargar la geometría a simular, se prosiguió a colocar los soportes de la pieza. Básicamente para saber donde colocar los soportes la pregunta fue, ¿qué es lo que impide el movimiento de la pieza, es decir que impide que la cuchilla esté girando libremente?, y la respuesta es el neumático que entrará en contacto con la cuchilla, eso será lo que se opondrá al movimiento de la cuchilla, por ello se utilizó un único soporte en el extremo superior de la pieza simulando que es la parte donde entra en contacto con el neumático durante la operación de corte.

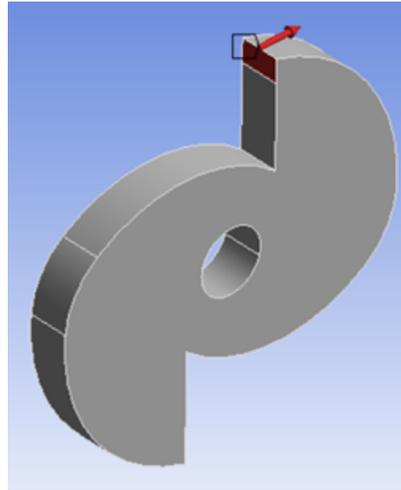
Figura 39: Soporte de la cuchilla en la simulación



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a contactos se refiere en esta simulación no se ha utilizado ninguno pues se ha analizado una única pieza, por lo que no existe ningún contacto con otra pieza o componente. En la sección de fuerzas o cargas también se utilizó una única carga en la simulación la cual ha sido la fuerza de corte de cizalla de 4,948.70 Newton, esta se ha aplicado en la misma cara utilizada para el soporte en dirección de x positivo como se muestra en la figura de abajo.

Figura 40: Fuerza de corte cizalla aplicada en la cuchilla



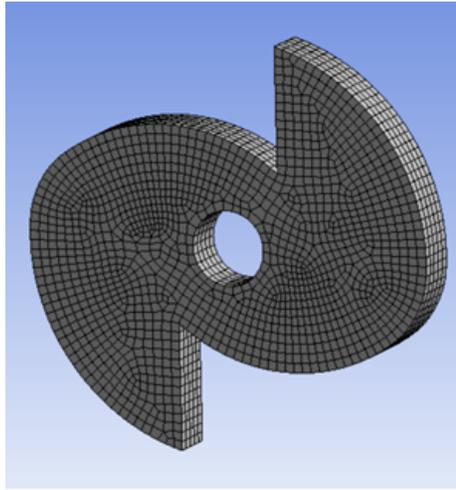
Fuente: Elaboración propia

#### 5.6.4. Mallado

Uno de los pasos que están muy directamente relacionados a los resultados que se pueden obtener en un análisis de elementos finitos es el mallado, ya que este nos ayuda a definir qué tan precisos y exactos van a ser nuestros resultados. Para poder definir esta calidad en los resultados se necesita una variable de referencia, para ello se ha seleccionado *Skewness*, la cual es una herramienta de ANSYS® que puede cuantificar la calidad del mallado con valores de 0 a 1, donde asigna para cada elemento un valor entre ese rango para finalmente devolver sus valores máximos, mínimos y promedio en toda la pieza. Al utilizar esta herramienta el 0 nos indica una excelente calidad de mallado, mientras que 1 un mallado no confiable y para nada preciso. Pero el valor que interesa principalmente del *Skewness* es el promedio el cual se busca que sea lo más cercano posible a 0 para obtener una alta calidad.

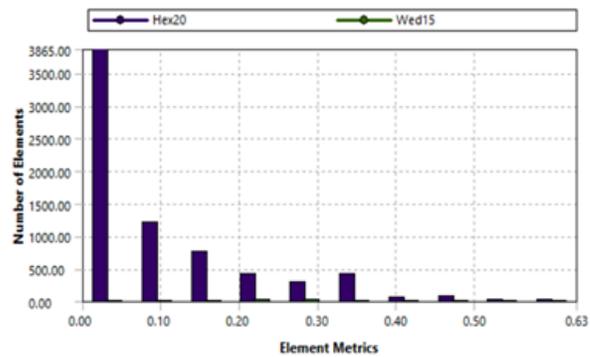
En la primera iteración para ambas cuchillas se utilizó el mallado predeterminado de ANSYS® con el cual se obtuvo un *Skewness* promedio de 0.25 aproximadamente para ambas cuchillas, lo cual se podría considerar como algo equivalente a la obtención de resultados confiables, sin embargo, con la finalidad de mejorar la exactitud del cálculo se aplicó la herramienta de *Sizing* para generar un malla de 10 milímetros en toda la cuchilla, con lo cual el *Skewness* promedio mejoró aún más al llegar al valor de 0.10 para ambas cuchillas. Se intentó utilizar *Sizing* menores a 10 mm, como de 3 o 5 mm sin embargo por la limitación de la licencia estudiantil con estos valores los resultados ya no cargaron correctamente.

Figura 41: Mallado con Sizing de 10 mm para la cuchilla



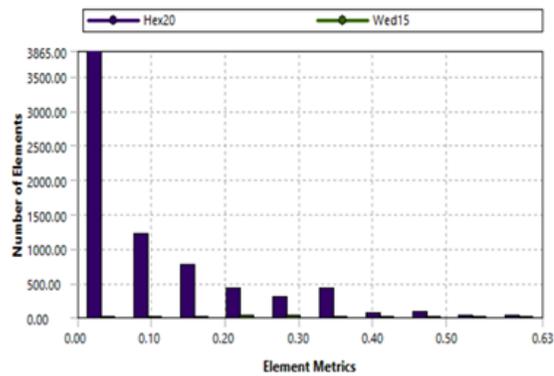
Fuente: Elaboración propia

Figura 42: Histograma Skewness cuchilla de corte AISI 1045



Fuente: Elaboración propia

Figura 43: Histograma Skewness cuchilla de corte Hardox 450



Fuente: Elaboración propia

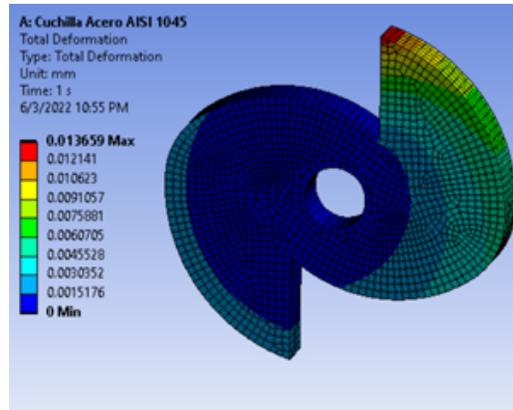
### 5.6.5. Resultados de la simulación

Luego de haber completado toda la estructura de la simulación únicamente se agregaron las variables que deseábamos que ANSYS@ calculara las cuales fueron: la deformación total, deformación elástica equivalente, esfuerzo equivalente de Von Mises, esfuerzo de corte máximo y factor de seguridad de ambas cuchillas para poder analizar el comportamiento ante la misma fuerza en cada una de ellas. A continuación, se muestra el cuadro con los resultados para cada una de las cuchillas, así mismo se puede visualizar las figuras en formas de mapas de calor para observar el comportamiento de la cuchilla en cada resultado, y como estos están concentrados o distribuidos en la pieza.

Cuadro 45: Resultados de la simulación de las cuchillas

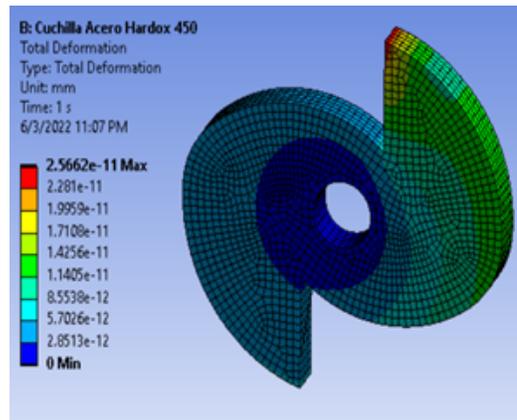
Resultados propiedades aceros	Acero AISI 1045		Acero Hardox 450	
	Máx	Prom	Máx	Prom
Deformación total (mm)	0.013659	0.00219	2.56E-11	6.00E-12
Deformación elástica equivalente	0.0000631	0.00000516	4.25E-13	1.59E-14
Esfuerzo equivalente Von Mises (MPa)	9.21	1.02	8.11E-08	3.31E-09
Esfuerzo de corte máximo (MPa)	5.27	0.56	4.67E-08	1.81E-09
Factor de seguridad	>15	>10	>15	>10

Figura 44: Deformación total mm - Acero AISI 1045



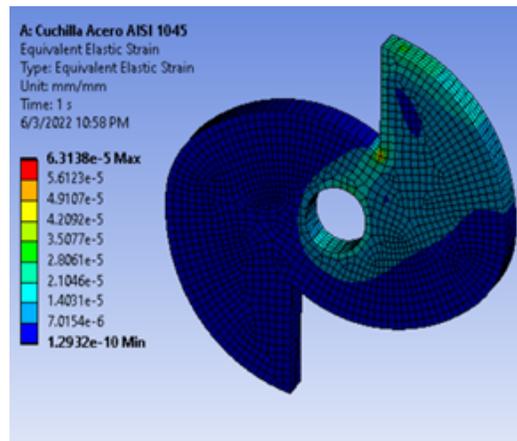
Fuente: Elaboración propia

Figura 45: Deformación total mm - Acero Hardox 450



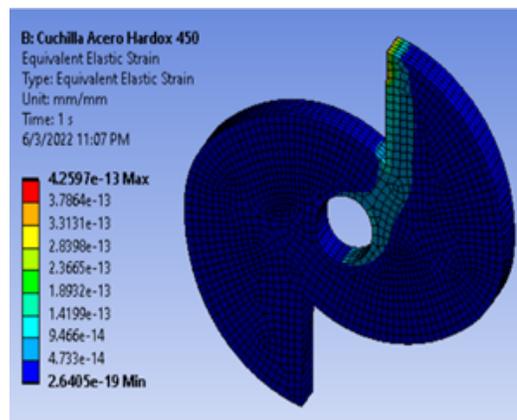
Fuente: Elaboración propia

Figura 46: Deformación elástica equivalente - AISI 1045



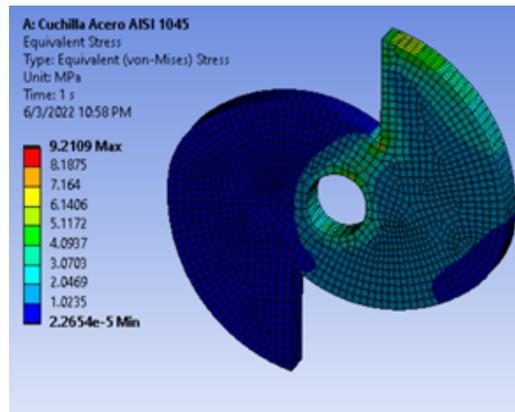
Fuente: Elaboración propia

Figura 47: Deformación elástica equivalente - Acero Hardox 450



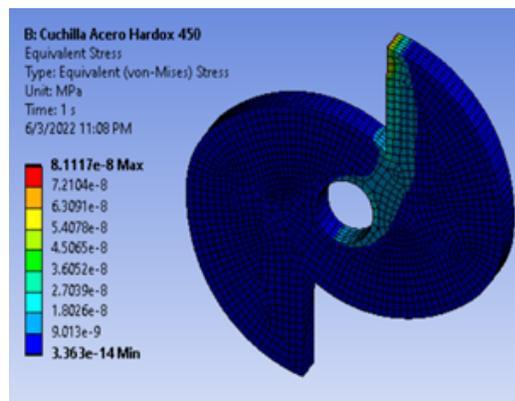
Fuente: Elaboración propia

Figura 48: Esfuerzo equivalente Von Mises (MPa) - AISI 1045



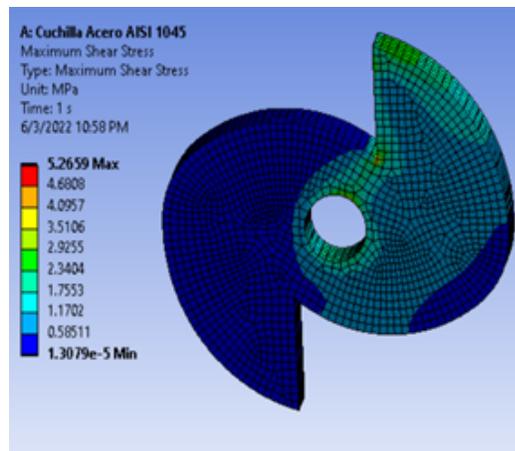
Fuente: Elaboración propia

Figura 49: Esfuerzo equivalente Von Mises (MPa) - Acero Hardox 450



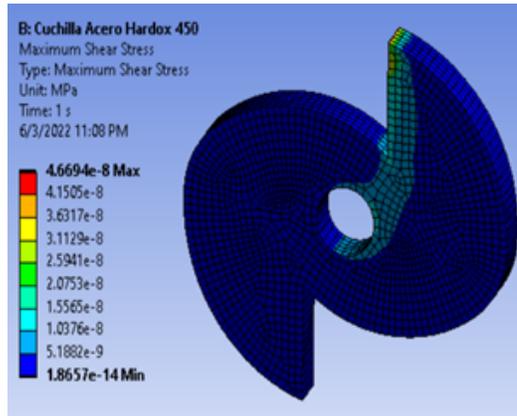
Fuente: Elaboración propia

Figura 50: Esfuerzo de corte máximo (MPa) - Acero AISI 1045



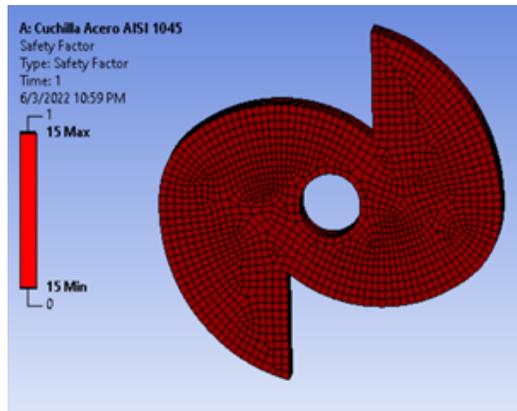
Fuente: Elaboración propia

Figura 51: Esfuerzo de corte máximo (MPa) - Acero Hardox 450



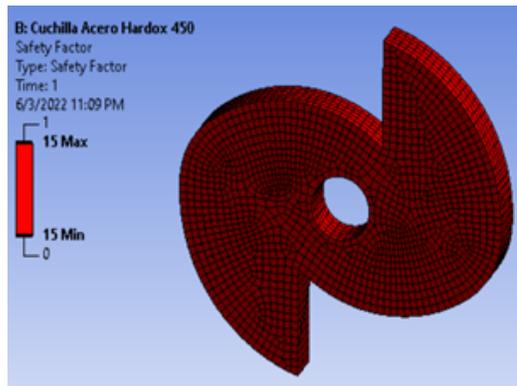
Fuente: Elaboración propia

Figura 52: Factor de seguridad - Acero AISI 1045



Fuente: Elaboración propia

Figura 53: Factor de seguridad - Acero Hardox 450



Fuente: Elaboración propia

### 5.6.6. Discusión de la simulación

Al observar los resultados vemos que notablemente sí existe una diferencia entre el comportamiento de las cuchillas de acero Hardox 450 contra las de AISI 1045, estos resultados se esperaban a priori pues se veía que tanto la resistencia a la fluencia como la resistencia última a la tensión del Hardox eran un 40 por ciento mayor a las del 1045. Sin embargo, los resultados obtenidos con el acero AISI 1045 son muy buenos pues estamos obteniendo deformaciones máximas muy pequeñas que para el tamaño de la pieza podrían considerarse despreciables, así como el esfuerzo de Von Mises y el máximo de corte. Vemos que con los factores de seguridad para ambos materiales tenemos una pieza o cuchilla que al darle un correcto uso podemos estar tranquilos que estará funcionando correctamente por muchos años.

Sin una limitación de recursos obviamente la mejor decisión para manufacturar las cuchillas según la cotización de aceros nacionales sería con Hardox 450, sin embargo, tanto en la vida como en proyectos universitarios siempre se cuenta con la gran desventaja de tener recursos limitados donde debemos de analizar opciones que sean económicamente viables para optimizar los presupuestos, claro sin dejar a un lado la seguridad y confiabilidad de los equipos, la cual podemos observar que para ambas cuchillas tenemos un gran nivel de confiabilidad reflejado en sus muy bajas deformaciones, bajos esfuerzos máximos y muy alto factor de seguridad.

Importante mencionar que no es que se haya olvidado la ranura de la cuña que lleva la cuchilla, sino que está ya no se agregó por falta de actualización al último archivo cargado en ANSYS@ así como la variable tiempo en el transcurso de la simulación con la cual estuvimos limitados, pero es muy recomendable en futuros análisis poder agregarla, aunque se considera que no tendrá un cambio relevante en los resultados ya obtenidos debido a su pequeño volumen en la pieza.

### 5.6.7. Conclusiones de la simulación

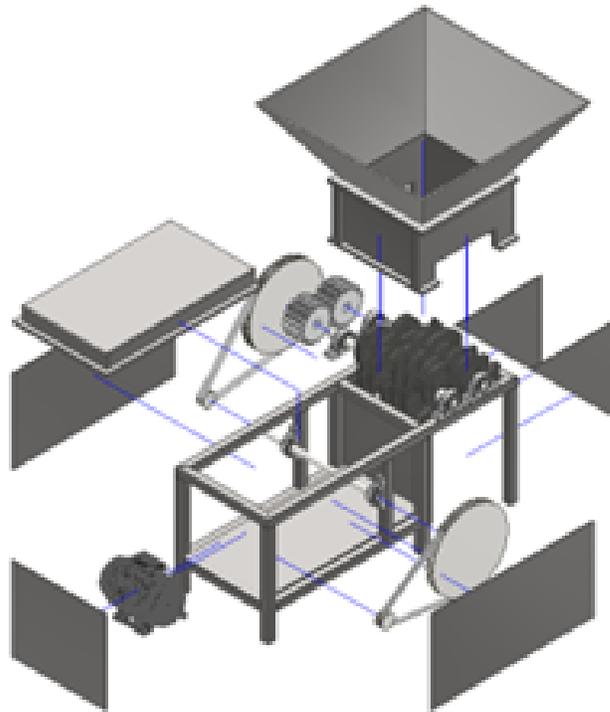
- La cuchilla de acero AISI 1045 de igual forma ha mostrado un muy buen comportamiento representando la mejor opción en cuanto al análisis de costo-beneficio, teniendo un factor de seguridad mínimo que es mayor a 10 lo cual le da alta confiabilidad a la pieza.
- La propiedad anti-desgaste con la que cuenta el acero Hardox 450 es la principal característica que mejora su resistencia a la fluencia y última a la tensión en un 40 por ciento más a las resistencias del acero AISI 1045, y dicha propiedad es la que alarga en gran manera la vida de la pieza.
- Notablemente la cuchilla de acero Hardox 450 ha mostrado un mejor comportamiento ante la fuerza de corte de cizalla de 4,948.70 Newton aplicada.
- Con un presupuesto limitado podemos concluir que manufacturar las cuchillas de corte con acero AISI 1045 es una opción muy inteligente para optimizar el presupuesto y sin dejar aún lado la seguridad y confiabilidad de la máquina.

## 5.7. Diseño

Para toda la parte del diseño se ha utilizado el software Autodesk Inventor 2022®. Es importante mencionar que este proyecto va de la mano con la tesis “Máquina trituradora de neumáticos: Módulo de estructura”, por lo que cada componente dependiente de los dos módulos se ha diseñado pensando en cumplir las necesidades de ambos módulos para no tener problemas en el proceso de ensamble.

En esta sección se observa el diseño completo de la máquina trituradora, de primero encontramos una explosión donde se muestra cada uno de los componentes del módulo de potencia y corte diseñados y seleccionados, así como el ensamble con la estructura. Luego se observará componente por componente con una pequeña descripción de su proceso de diseño.

Figura 54: Explosión máquina trituradora de neumáticos



Fuente: Elaboración propia

Figura 55: Máquina trituradora de neumáticos



Figura 56: Listado de los componentes de la máquina

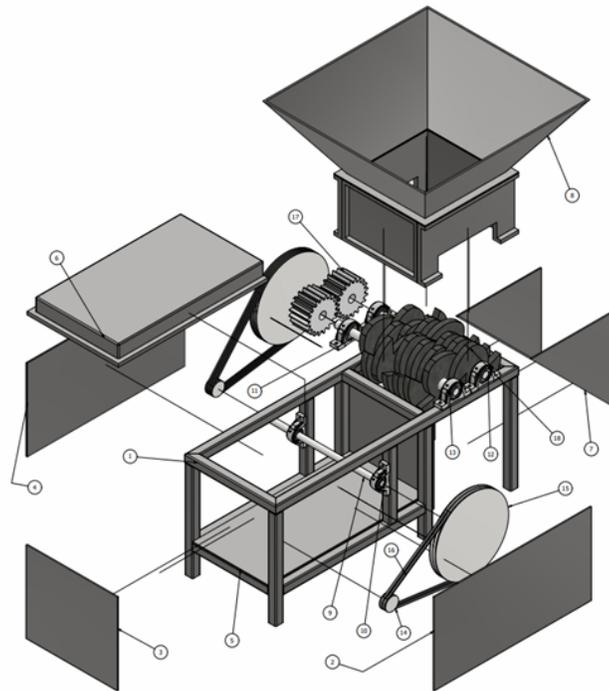


Figura 57: Listado de materiales y componentes a manufacturar o comprar

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	Manufacturado o Comprado
1	1	Estructura	Manufacturado
2	1	Plancha lateral derecha	Manufacturado
3	1	Plancha lateral frontal	Manufacturado
4	1	Plancha lateral izquierda	Manufacturado
5	1	Plancha base de motor	Manufacturado
6	1	Guarda superior	Manufacturado
7	1	Tolva de descarga	Manufacturado
8	1	Tolva de alimentación	Manufacturado
9	1	Eje Intermedio	Manufacturado
10	2	Chumaceras SKF SYNT50F	Comprado
11	1	Eje de salida motriz	Manufacturado
12	1	Eje de salida conducido	Manufacturado
13	4	Chumaceras SKF SYNT65F	Comprado
14	2	Polea motriz BANDO 7.5"	Comprado
15	2	Polea conducida BANDO 44.5"	Comprado
16	6	Faja BANDO 5V1200	Comprado
17	2	Engrane motriz y conducido	Manufacturado
18	14	Cuchillas de corte	Manufacturado

Como se puede observar los únicos componentes que se deberían de comprar para la construcción de la máquina son las chumaceras, poleas y bandas y el motor. Para los demás componentes debido a que se deben manufacturar, se ha desarrollado el análisis requerido para validar que estos funcionarán correctamente, en ambas tesis podemos observar los análisis de esfuerzos, dimensionamientos y el diseño de cada módulo.

Para tener una idea clara de las dimensiones básicas de la máquina a continuación se puede observar algunas de las vistas principales de la máquina completa, donde podemos observar que de altura, largo y ancho no se supera los 2.1, 2.7 y 1.6 metros respectivamente.

Figura 58: Dimensiones - Vista frontal de la máquina

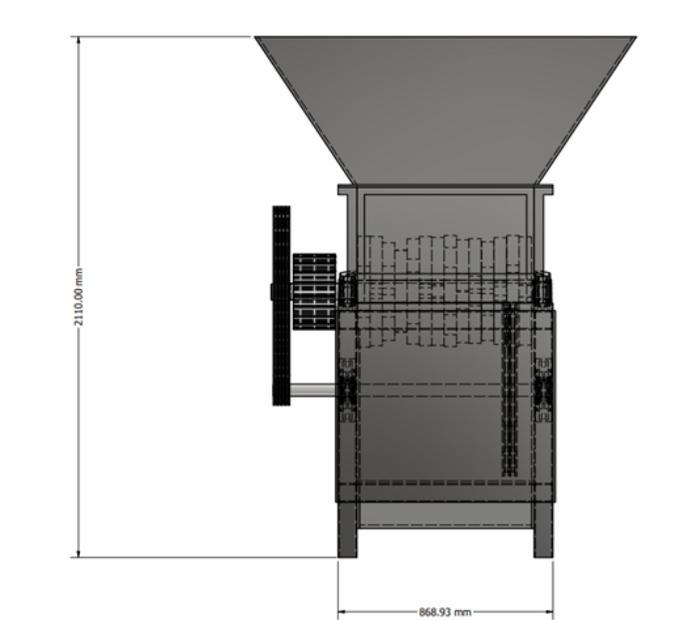


Figura 59: Dimensiones - Vista lateral de la máquina

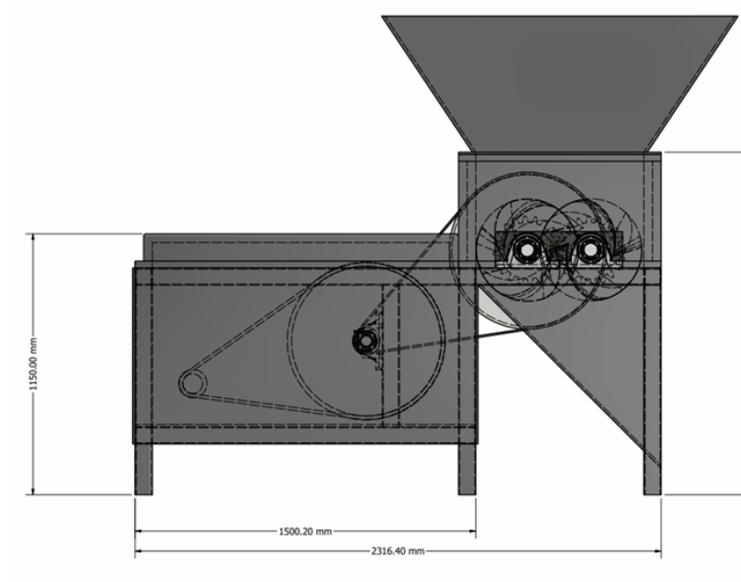
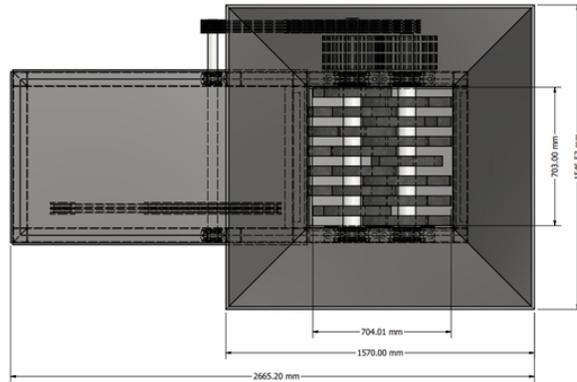


Figura 60: Dimensiones - Vista de planta de la máquina



A continuación, se muestra el módulo de potencia donde se ha utilizado la herramienta *Design Accelerator* de Inventor® para el diseño de las poleas y bandas, así como el diseño de los ejes intermedio, de salida motriz y conducido. Importante mencionar que el *software* se ha utilizado para diseñar, ingresando los valores calculados, ya que, aunque se pueden obtener cálculos del mismo para esta ocasión no se le ha dado ese fin.

Figura 61: Módulo de transmisión de potencia



Figura 62: Módulo de potencia – Vista lateral

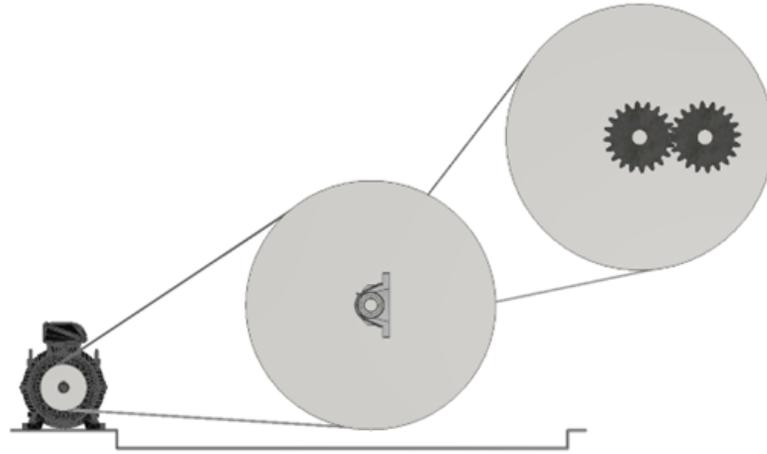
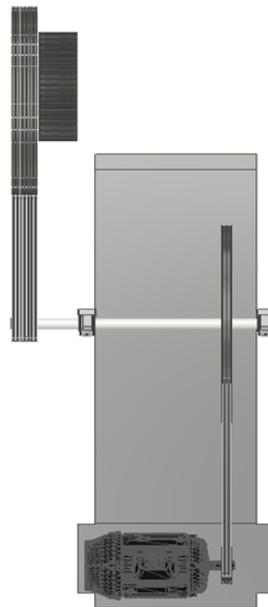
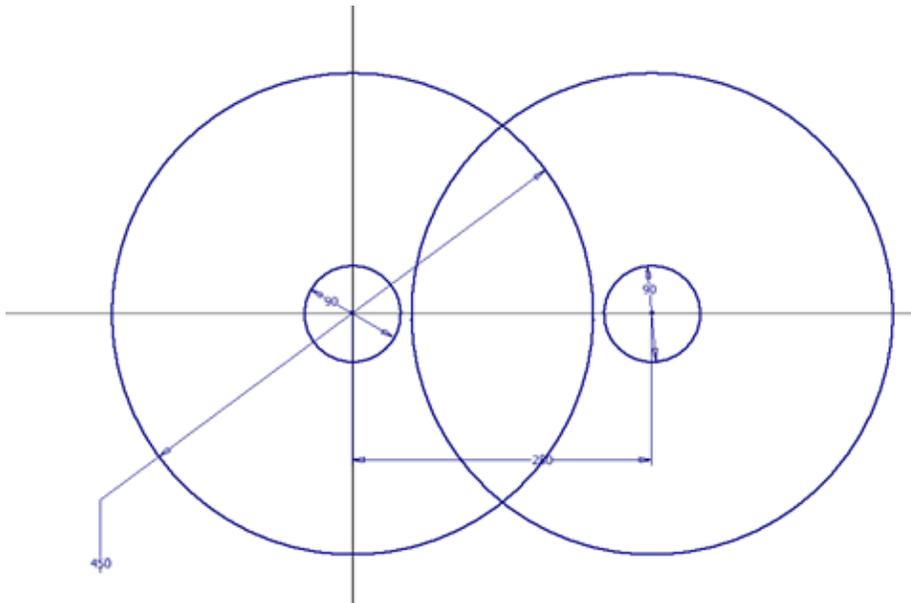


Figura 63: Módulo de potencia – Vista de planta



Una de las partes más difíciles e iterativas ha sido el módulo de corte, el análisis base al que se llegó para reducir la complejidad del mismo, se muestra a continuación, en donde la principal dimensión ha sido la distancia entre centros de los ejes, la cual es dada por medio del largo de la chumacera, es por ello que en la sección de chumaceras se mencionó el proceso que se realizó para reducir esa distancia a un valor lo más viable posible, viable en cuanto a la manufactura, ya que esta distancia es directamente proporcional al diámetro de las cuchillas. Aun así en el cálculo más viable el diámetro nominal de las cuchillas obtuvo finalmente un valor de 45 centímetros.

Figura 64: Análisis distancia entre centros - Módulo de corte



Luego se realizó el diseño de las cuchillas de corte, utilizando los datos calculados en su respectiva sección, donde la dimensión base para este cálculo fue el ángulo de cizalla de  $15^\circ$ . Luego este se dibujó hasta la mitad del círculo por medio de arcos para realizar el corte y obtener las cuchillas como se muestra en la siguiente figura "Diseño de cuchillas con ángulo de cizalla  $15^\circ$ ". Importante hay que mencionar que se podría realizar una tesis solo de dimensiones y geometrías de cuchillas ya que este es todo un tema muy complejo, pero debido a que el contenido de este trabajo abarca tanto potencia como corte, se analizó únicamente el diseño básico de la cuchilla de dos filos.

Figura 65: Diseño de cuchillas con ángulo de cizalla 15°

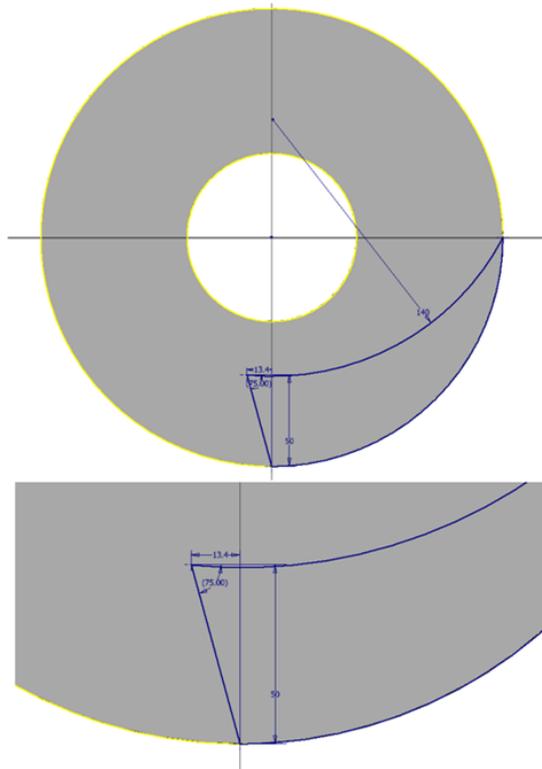


Figura 66: Diseño de cuchilla de corte



Figura 67: Módulo de corte

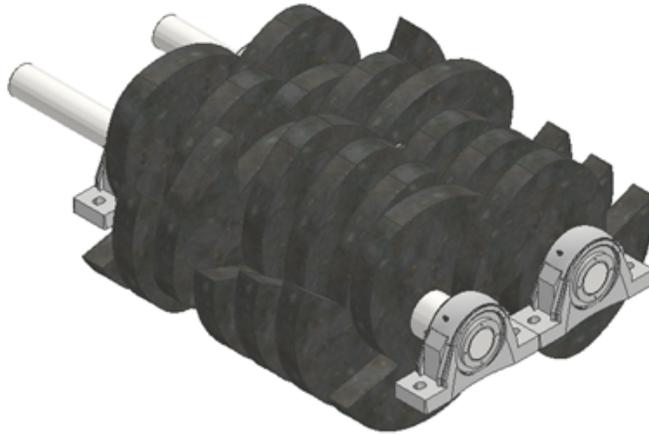


Figura 68: Módulo de corte – Vista lateral

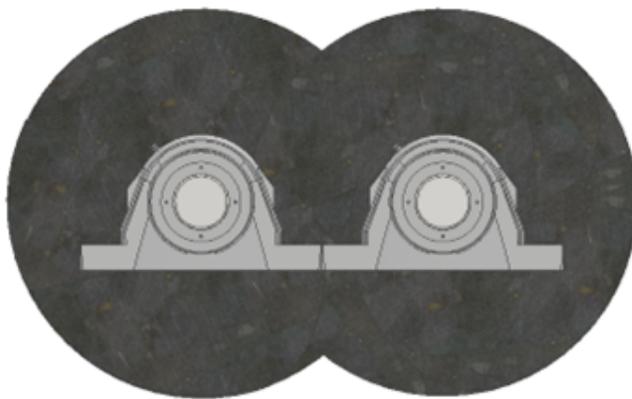


Figura 69: Módulo de corte – Vista de planta



Para el diseño de los engranajes dado que tenían un valor de la relación del tren  $e$  de 1, se tuvieron algunos problemas utilizando Inventor®, por lo que se diseñaron desde cero, en base a los cálculos mostrados en el cuadro “Datos generales del par de engranes”, las herramientas de diseño básicas fueron la creación de arcos para los dientes y patrones circulares.

Figura 70: Diseño de engranajes

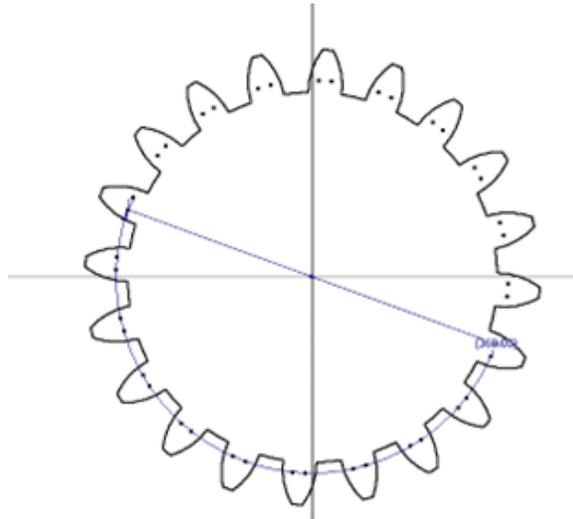
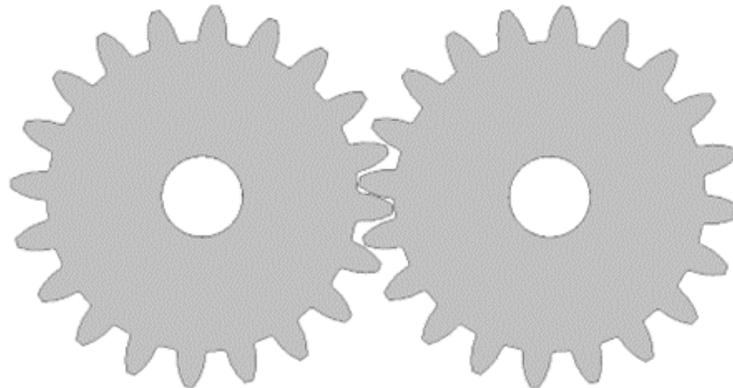


Figura 71: Par de engranajes transmisión de potencia



Finalmente, los ejes se diseñaron con la herramienta de *Design Accelerator*, donde podemos observar ejes que no conllevan mayor complejidad. En los ejes de salida tanto motriz como conducido podemos observar cómo se mencionó en la sección de ejes en sus cálculos, se utilizará un diámetro de 81 mm en el área del árbol de cuchillas mientras que en los extremos con el fin de reducir la distancia entre centros se utilizará 65 mm, y en base a esta medida se seleccionaron las chumaceras SKF SYNT65F. Mientras que el eje intermedio tendrá un diámetro constante de 57.31 mm que se ha aproximado a 60 mm con chumaceras SKF SYNT60F.

Figura 72: Eje intermedio



Figura 73: Eje de salida motriz

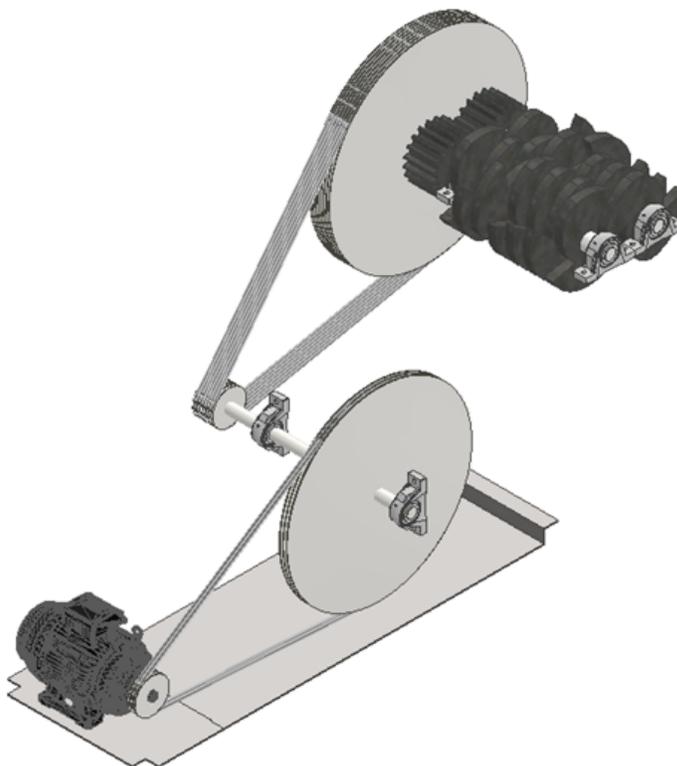


Figura 74: Eje de salida conducido



De esta manera se ha diseñado y calculado el módulo de potencia y corte, el cual luego se ha ensamblado correctamente al módulo de la estructura de la máquina como se ha observado en las figuras iniciales de esta sección. El diseño CAD del motor es de un motor trifásico WEG de 20 hp el cual se obtuvo en línea, este sería de igual forma el que se necesitaría comprar para llevar a cabo la construcción de la máquina trituradora de neumáticos.

Figura 75: Módulo de potencia y corte



- Se diseñó el módulo de potencia y corte de una trituradora de neumáticos de desecho, capaz de triturar hasta neumáticos de camión para obtener residuos en forma de tiras rectangulares a una productividad teórica de alrededor 70,000 kg/h.
- Se determinaron los requisitos planteados del cuadro 5 al 13, de dimensiones, funcionamiento, apariencia, seguridad, potencia, costos, usuario, normas y estándares, interfase de módulos en bases a los objetivos planteados.
- Con base en los cálculos se determinó que se necesita un motor de 20 hp trifásico jaula de ardilla para el funcionamiento correcto de la máquina.
- Las cuchillas de corte se calcularon y diseñaron para que puedan ser de dos filos con un ángulo de cizalla de  $15^\circ$  de acero AISI 1045 con un diámetro nominal de 450 milímetros.
- Se ensambló correctamente el módulo de potencia y corte con el módulo de estructura, obteniendo finalmente la máquina trituradora de neumáticos de desecho como se ha mostrado en la sección de diseño.
- Se comparó el comportamiento de las cuchillas de corte utilizando acero AISI 1045 contra un acero Hardox 450, donde este último mostró mejores propiedades mecánicas, la principal de ellas mayor resistencia al desgaste para un costo que aumenta en un factor de 4 comparado con el 1045.



---

### Recomendaciones

---

- Buscar patrocinadores interesados en el proyecto para que otra promoción de alumnos trabajen la fase de fabricación de la máquina trituradora de neumáticos de desecho, formalizando la relación para garantizar los recursos.
- Realizar dos o tres diseños adicionales de cuchillas de corte con diferentes geometrías, filos, ángulos de cizalla, y poder simular el comportamiento de cada una de ellas, con el fin de obtener más información sobre la geometría que agregue menor peso y mayor capacidad de corte a la máquina.
- Diseñar cuchillas de corte de filos intercambiables, cuyos filos puedan ser de acero antidesgaste como el Hardox 450, pero con un núcleo del acero más económicamente viable.
- Realizar un análisis en los diferentes componentes del módulo de potencia y corte en búsqueda de reducir costos de la máquina, buscando maneras de disminuir dimensiones o geometrías.



- [1] Williams, D., 2018. *The History of Tires. TreadWright Tires*. [En línea]: <https://www.treadwright.com/es/blogs/treadwright-blog/the-history-of-tires>
- [2] Hankook, 2019. *Tire Evolution. Hankook Tire Global*. [En línea]: <https://www.hankooktire.com/global/tires-services/tire-guide/history-of-tires.html>
- [3] Álvarez, J., 2019. ¿De qué está hecho un neumático? La casa del neumático. [En línea]: <https://www.lacasadelneumatico.com/blog/de-que-esta-hecho-un-neumatico/>
- [4] TireAmerica, 2020. *Types of Tires. Tire America*. [En línea]: <https://www.tireamerica.com/resource/types-of-tires>
- [5] Discounttiredirect, 2021. *Different Types of Tires*. Discounttiredirect. [En línea]: <https://www.discounttiredirect.com/learn/tire-types>
- [6] Lesschwab, 2019. *Tire size explanation - what the numbers mean*. Lesschwab.com. [En línea]: <https://www.lesschwab.com/article/tire-size-explained-reading-the-sidewall.html>
- [7] Hernández, J. y Fonseca, D. (2017). Diseño de una trituradora de residuos sólidos tipo PET para la fundación Alianza Forestal de Colombia E.S.P. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. [En línea]: [https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2640/1/TGT\\_1254.pdf](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2640/1/TGT_1254.pdf)
- [8] Stones, M., 2018. *Tire Size Guide. Tire Rack*. [En línea]: <https://www.tirerack.com/tires/tiretech/techpage.jsp?techid=46>
- [9] UNTHA, 2021. Trituración de neumáticos y goma. Untha.com. [En línea]: <https://www.untha.com/es/aplicaciones/neumaticos-goma>
- [10] SSI, 2018. *Shredder Technology Overview. SSI WORLD*. [En línea]: <https://www.ssiworld.com/uploads/documents/2018updates/Shredder20Technology20Overview.pdf>
- [11] Nasr, M. F. y Yehia, K. A. 2019. *Stress Analysis of a Shredder Blade for Cut-*

*ting Waste Plastics*. Research Gate. [En línea]: [https://www.researchgate.net/publication/338284770\\_Stress\\_Analysis\\_of\\_a\\_Shredder\\_Blade\\_for\\_Cutting\\_Waste\\_Plastics](https://www.researchgate.net/publication/338284770_Stress_Analysis_of_a_Shredder_Blade_for_Cutting_Waste_Plastics)

[12] Bradley, T., 2020. *AC and DC Motors: Differences and Advantages | Types of Electric Motors*. Gainesville Industrial Electric Co. [En línea]: <https://www.gainesvilleindustrial.com/blog/ac-dc-motors/>

[13] Castillo, J. y Marrufo, E. 2018. Unidad 11 - Motores eléctricos. Instalaciones eléctricas básicas. Mc Graw Hill. [En línea]: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>

[14] Warner, J., 2017. *A Look at Belt, Chain and Gear Drive Technology*. Power Transmission Blog. Powertransmission.com. [En línea]: <https://www.powertransmission.com/blog/a-look-at-belt-chain-and-gear-drivetechnology/>

[15] Eco Green, 2018. *Tire recycling and its different applications*. Eco Green Equipment | Tire Shredders. [En línea]: <https://ecogreenequipment.com/tire-recycling-and-its-different-apps/>

[16] Xinhai, 2021. Xinhai goma anti-abrasiva. [En línea]: <http://www.slurrypumpprice.net/>

[17] Mott, Robert. 2004. Diseño de elementos de máquinas. 4a edición. México. Pearson Educación de México. 872 págs.

[18] Caviedes, J. 2020. Diseño de una máquina trituradora para plástico PET. Fundación Universidad de América. [En línea]: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7904/1/4131632-2020-1-IM.pdf>

[19] SKF, 2008. *SKF Power Transmission Belts. Selection guide for SKF V-belts*. [En línea]: <https://www.skfptp.com/Publications/DownloadFile?document=Downloads%2FCatalogues%2FSKF%20Power%20transmission%20belts.pdf>

[20] SKF, 2016. *SKF Power Transmission products*. [En línea]: <https://www.skfptp.com/Publications/DownloadFile?document=Downloads%2FCatalogues%2FSKF%20Power%20catalogue.pdf>

[21] BANDO, 2020. *Industrial Power Transmission Products*. [En línea]: [https://www.bandousa.com/media/uploads/0/54\\_BUI-1009\\_IPTP\\_catalog\\_Vol\\_2\\_9-17.pdf](https://www.bandousa.com/media/uploads/0/54_BUI-1009_IPTP_catalog_Vol_2_9-17.pdf)

[22] Ullman, G. 2010. *The mechanical Design Process*. [En línea]: <http://160592857366.free.fr/joe/ebooks/Mechanical%20Engineering%20Books%20Collection/MACHINE%20DESIGN/The%20Mechanical%20Design%20Process.pdf>

[23] AGMA STANDARD. 2005. *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth*. Norma AGMA 2001 D04. [En línea]: <https://wp.kntu.ac.ir/asgari/AGMA%202001-D04.pdf>

[24] ADEK, 2021. Empresa líder en fabricación y afilado de cuchillas y sierras industriales. [En línea]: <https://adek.com.mx/>

[25] Tecniaceros, 2022. Aceros anti desgaste. [En línea]: <http://tecniaceros.com/productos/>

acero-antidesgaste/

[26] Lee, H.-H. (2014). *Finite Element Simulation with ANSYS Workbench*. (Primera ed.) SDC Publications. 602 págs.

[27] Moaveni, S. (2015). *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS (Cuarta ed.)*. Essex, Inglaterra: Pearson Education. 928 págs

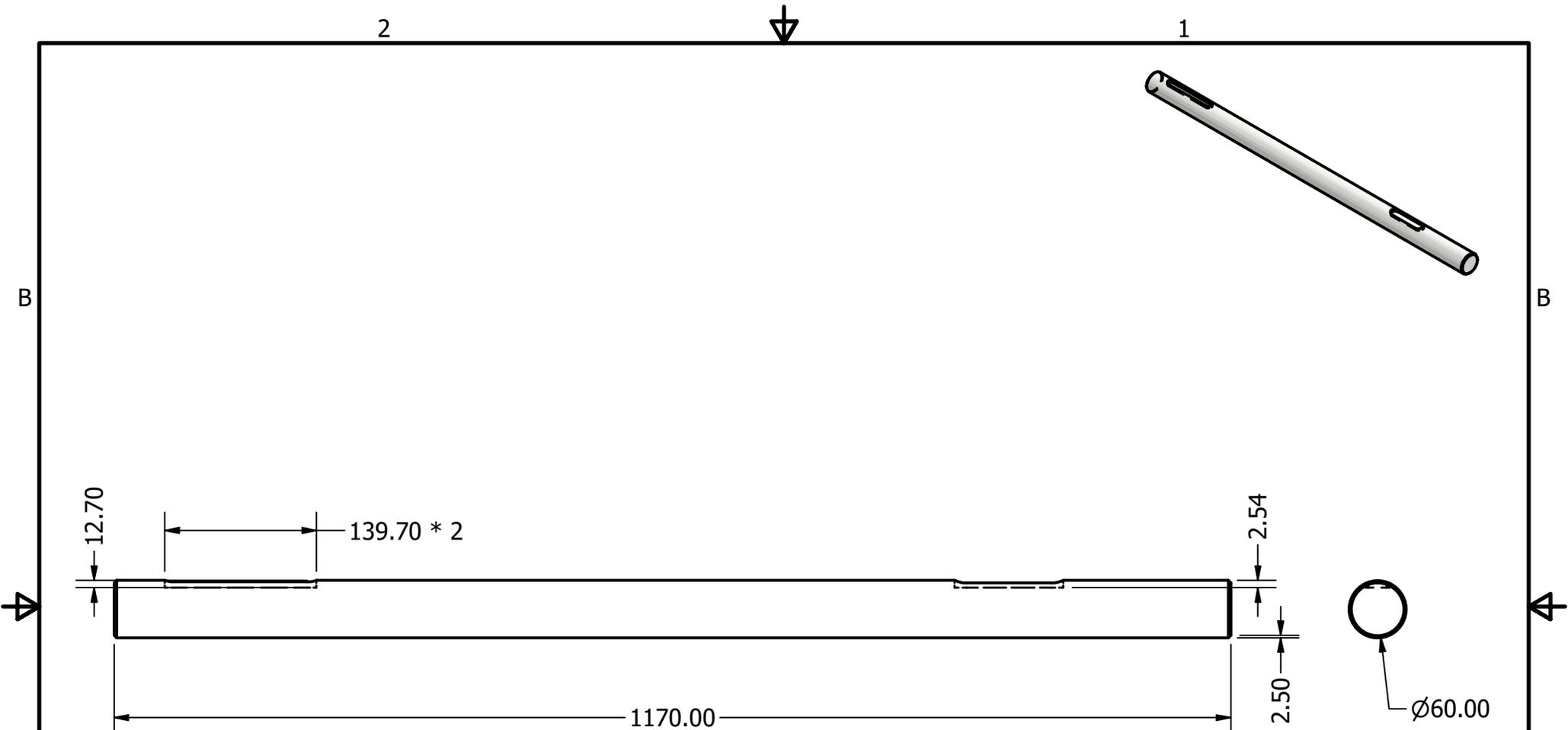
[28] TECNIACEROS, 2022. Hardox Wear Plate. Principales características y ventajas de acero Hardox. [En línea]: <http://tecniaceros.com/productos/hardox/>

[29] MatWeb, 2022. Propiedades acero AISI 1045. [En línea]: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=43364bf60fe843f9bd4daf66f31c2535&ckck=1>



### 9.1. Planos de construcción

En esta sección se muestra el juego de planos mecánicos de los componentes calculados y diseñados, los cuales son el eje intermedio, eje motriz, eje conducido, cuchillas de corte y el par de engranajes. Estos se han diseñado en base al análisis mostrado en metodología y resultados. Para el resto de componentes no se hicieron planos pues son componentes seleccionados, los cuales se sugieren comprar tal cual las especificaciones ya mencionadas para el correcto ensamble y funcionamiento de la máquina.



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

**TOLERANCIAS GENERALES**  
LINEAL .X ± 0.1  
.XX ± 0.12  
.XXX ± 0.121  
ANGULAR ±

DIBUJADO POR **Pedro García** FECHA **Marzo 2022**

DISEÑADO POR **Pedro García** FECHA **Marzo 2022**

REVISADO POR **Cesar Rosales** FECHA **Mayo 2022**

APROBADO POR **Cesar Rosales** FECHA **Mayo 2022**

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
**Eje Intermedio**

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

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
gar17023@uvg.edu.gt

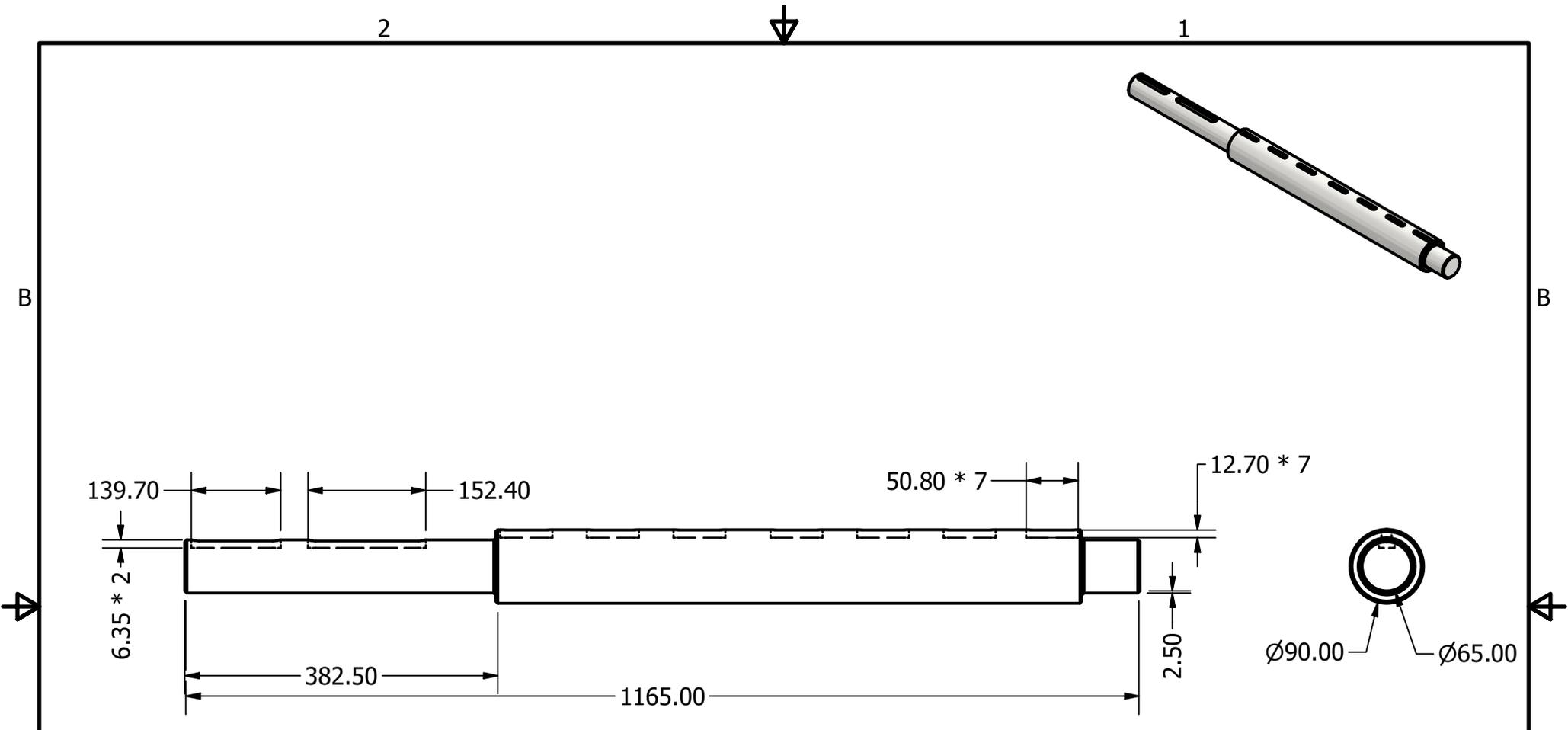
TÍTULO: Máquina trituradora de neumáticos  
**Módulo potencia y corte**

NÚMERO DE DIBUJO: 1

MATERIAL  
**Acero AISI 1045**  
TRATAMIENTO  
**Laminado en frío**  
MASA: N/A



FORMATO <b>A</b>	ESCALA: 1:6	UNIDADES: mm
	PÁGINA 1 DE 5	REV CR1



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

TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ± 0.1
	.XX ± 0.12
	.XXX ± 0.121
ANGULAR	±

MATERIAL	Acero AISI 1045
TRATAMIENTO	Laminado en frío
MASA:	N/A



DIBUJADO POR	Pedro García	FECHA	Marzo 2022
DISEÑADO POR	Pedro García	FECHA	Marzo 2022
REVISADO POR	Cesar Rosales	FECHA	Mayo 2022
APROBADO POR	Cesar Rosales	FECHA	Mayo 2022
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO			
Eje Motriz			

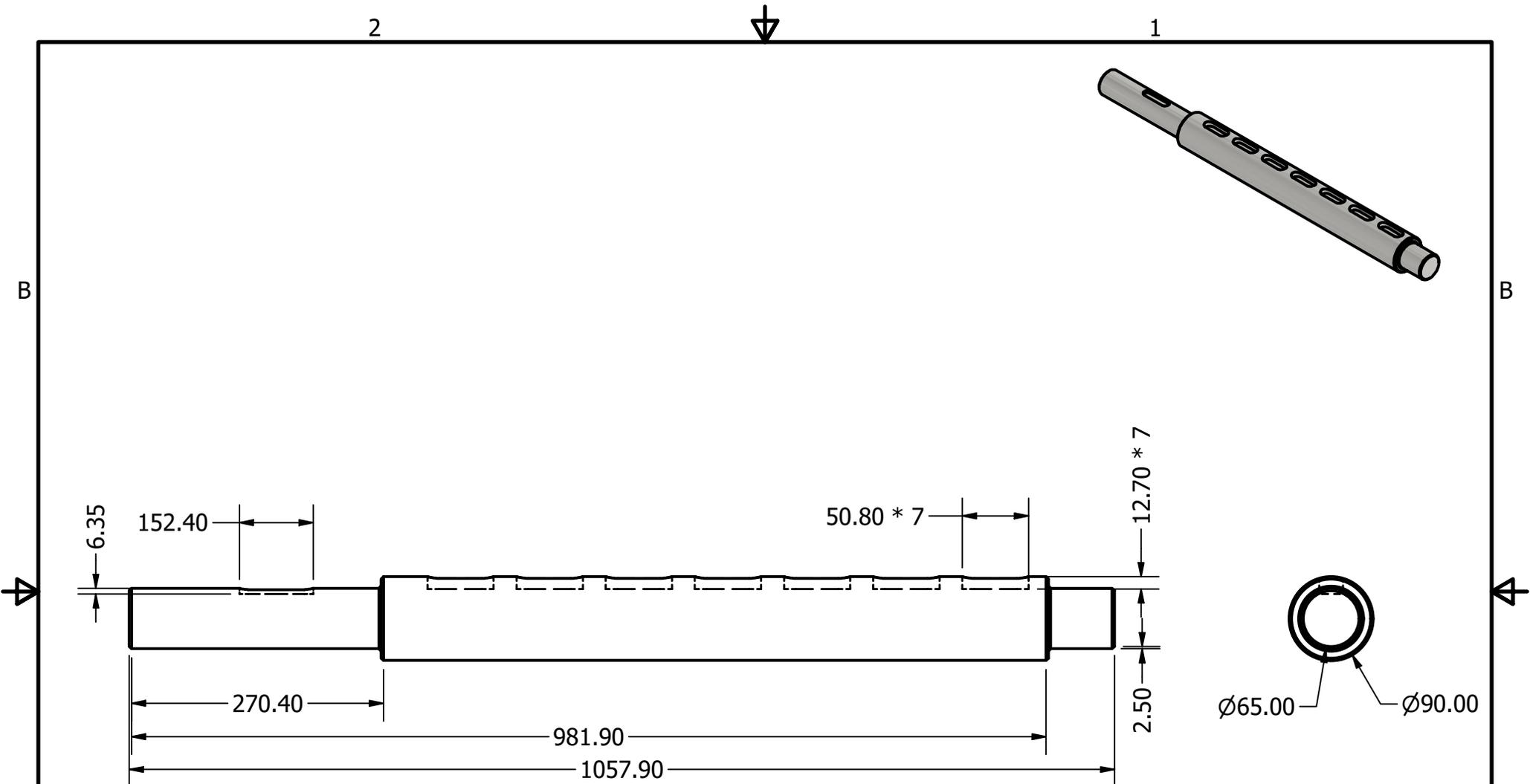
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
gar17023@uvg.edu.gt

TÍTULO: Máquina trituradora de neumáticos  
**Módulo potencia y corte**

NÚMERO DE DIBUJO: 1

FORMATO	ESCALA: 1:7	UNIDADES: mm
	A	PÁGINA 2 DE 5
		REV CR2



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

TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ± 0.1
	.XX ± 0.12
	.XXX ± 0.121
ANGULAR	±

MATERIAL	Acero AISI 1045
TRATAMIENTO	Laminado en frío
MASA:	N/A



DIBUJADO POR	FECHA
Pedro García	Marzo 2022

DISEÑADO POR	FECHA
Pedro García	Marzo 2022

REVISADO POR	FECHA
Cesar Rosales	Mayo 2022

APROBADO POR	FECHA
Cesar Rosales	Mayo 2022

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO
Eje Conducido

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

	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
	18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 gar17023@uvg.edu.gt

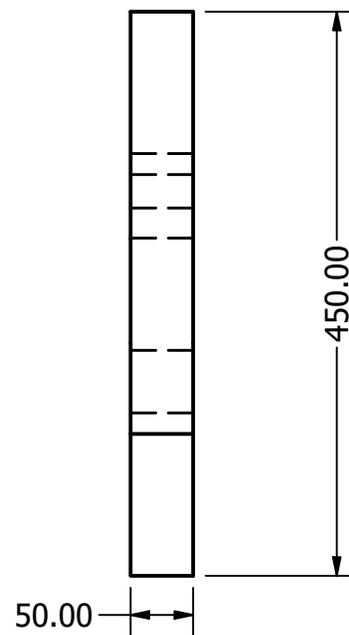
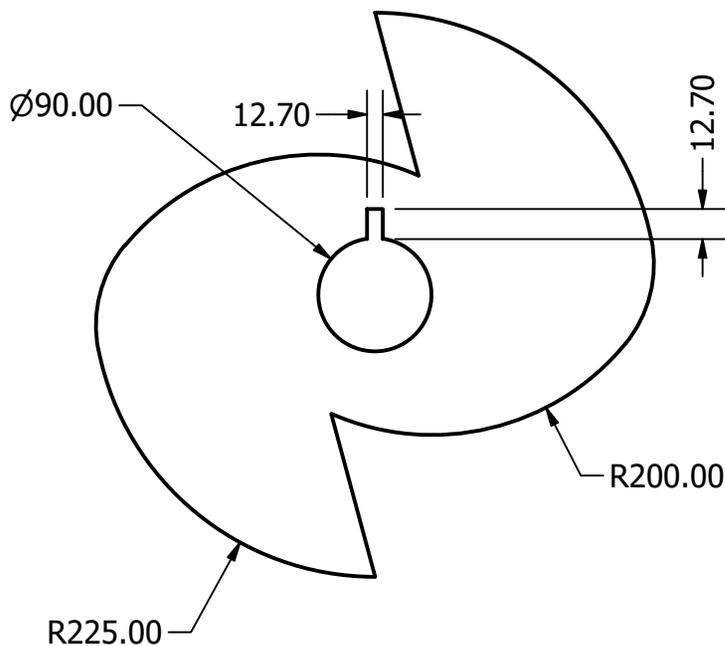
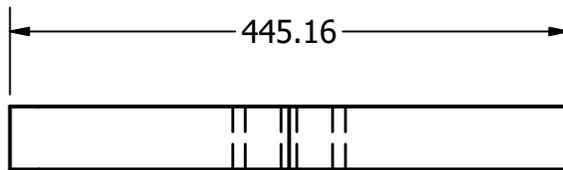
TÍTULO: Máquina trituradora de neumáticos  
**Módulo potencia y corte**

NÚMERO DE DIBUJO: 1

FORMATO <b>A</b>	ESCALA: 1:6	UNIDADES: mm
	PÁGINA 3 DE 5	REV CR3

2

1



<p>TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.</p> <p><b>TOLERANCIAS GENERALES</b></p> <p>LINEAL .X ± 0.1 .XX ± 0.12 .XXX ± 0.121</p> <p>ANGULAR ±</p>	<p>DIBUJADO POR <b>Pedro García</b></p> <p>FECHA <b>Marzo 2022</b></p>	<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 gar17023@uvg.edu.gt</p>		
	<p>DISEÑADO POR <b>Pedro García</b></p> <p>FECHA <b>Marzo 2022</b></p>		<p>REVISADO POR <b>Cesar Rosales</b></p> <p>FECHA <b>Mayo 2022</b></p>	
<p>MATERIAL <b>Acero AISI 1045</b></p> <p>TRATAMIENTO <b>Laminado en frío</b></p> <p>MASA: N/A</p>	<p>APROBADO POR <b>Cesar Rosales</b></p> <p>FECHA <b>Mayo 2022</b></p>	<p>TÍTULO: Máquina trituradora de neumáticos</p> <p><b>Módulo potencia y corte</b></p>		
	<p>NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO <b>Cuchilla de corte</b></p>	<p>NÚMERO DE DIBUJO: 1</p>		
<p>TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN</p>	<p>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</p>	<p>FORMATO <b>A</b></p>	<p>ESCALA: 1:6</p>	<p>UNIDADES: mm</p>
		<p>PÁGINA 4 DE 5</p>	<p>REV <b>CR4</b></p>	

2

1

2



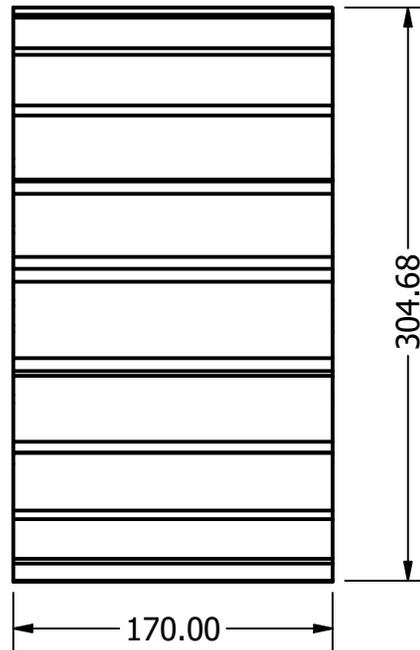
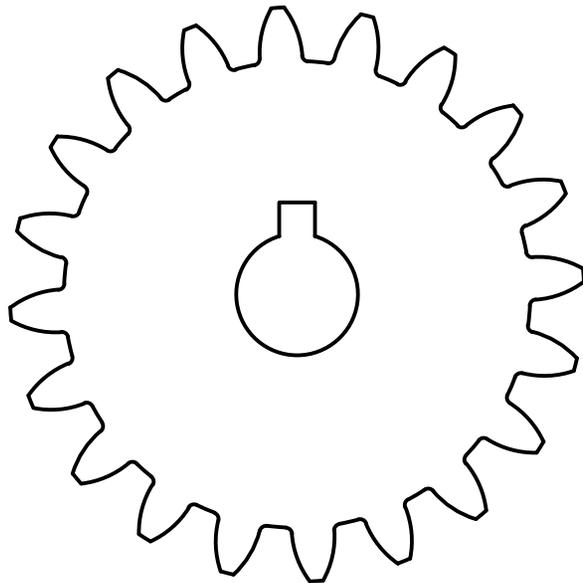
1



Datos de Diseño		
	Piñón, p	Corona, g
N	22	22
rpm	50	50
d (in)	11.02	11.02
m (mm)	12.73	12.73
Pd (dientes/in)	2.0	2.0
Ancho Cara (in)	7.0	7.0
e	1.00	1.00
C (mm)	280.0	280.0
Ángulo de presión	20	20

B

B



Datos Generales		
DP	Diámetro Primitivo	280 mm
PC	Paso Circular	39.98 mm
A	Cabeza del Diente	12.73 mm
S	Espesor del Diente	19.0 mm
PD	Pie del Diente	15.91 mm
R	Radio del Entalle	3.33 mm
AS	Ángulo del espesor	7.77

A

A

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.	DIBUJADO POR <b>Pedro García</b>	FECHA <b>Marzo 2022</b>	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 gar17023@uvg.edu.gt	
	TOLERANCIAS GENERALES LINEAL .X ± 0.1 .XX ± 0.12 .XXX ± 0.121 ANGULAR ±			DISEÑADO POR <b>Pedro García</b>
MATERIAL <b>Acero AISI 1045</b> TRATAMIENTO <b>Laminado en frío</b> MASA: N/A	 TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN	REVISADO POR <b>Cesar Rosales</b>	FECHA <b>Mayo 2022</b>	TÍTULO: Máquina trituradora de neumáticos <b>Módulo potencia y corte</b>
		APROBADO POR <b>Cesar Rosales</b>		
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO <b>Engranaje</b>		NÚMERO DE DIBUJO: 1		FORMATO <b>A</b>
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.		ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm	
				REV <b>CR</b>

2



1

