



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

Maestría en Tecnología Avanzada de Manufactura

Tesis:

“Diseño de cuchillas y árbol de transmisión para un molino triturador de neumáticos usados”

Presenta:

Ing. Víctor Martínez Hernández

Directores:

Dr. Juan Manuel Espinoza Cuadra

Dra. Patricia Magaly Gallegos Acevedo

Heroica ciudad de Huajuapán de León, Oax., Enero de 2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca y a la División de Estudios de Posgrado por la oportunidad formativa en el programa de posgrado a la Maestría en Tecnología Avanzada de Manufactura.

A los revisores de tesis, Dr. Mario Márquez Miranda, M.T.A.M. Armando Rosas González, M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez y el M.I.A Carlos Vázquez Cid de León, por sus revisiones, observaciones y retroalimentación para el mejoramiento del proyecto realizado.

Al Dr. Juan Manuel Espinoza Cuadra y la Dra. Patricia Magaly Gallegos Acevedo, por su dirección y codirección en el desarrollo de la tesis y por su apoyo, atención y colaboración.

A mi familia por el apoyo, compañía y motivación en el tiempo de estancia en la maestría hasta la culminación del proyecto realizado.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivos del proyecto.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.3.3 Metas	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Neumáticos.....	8
2.1.1 Tipos de neumáticos	11
2.2 Métodos de tratamiento para neumáticos como residuos sólidos.....	13
2.2.1 Manejo de neumáticos usados.....	16
2.3 Trituradoras	16
2.3.1 Trituradoras de mandíbulas.....	18
2.3.1.1 Trituradora de mandíbulas tipo Blake.....	19
2.3.1.2 Trituradora de mandíbulas de pivote elevado.....	20
2.3.1.3 Trituradora de mandíbulas de excéntrica elevada.....	20
2.3.1.4 Trituradora de mandíbulas tipo Dodge.....	21
2.3.2 Trituradoras giratorias	22
2.3.3 Trituradora de rodillos.....	23
2.3.4 Trituradora de impacto.....	24
2.4 Tipos de trituradores mecánicos con aplicación en neumáticos.....	25
2.4.1 Triturador de 1 eje.....	26
2.4.2 Triturador de 2 ejes	27
2.4.3 Triturador de 4 ejes.....	27
2.5 Metodología	29
CAPITULO 3. DISEÑO Y RESULTADOS	31
3.1 Recopilación de información	31
3.1.1 Aplicación del Despliegue de la Función de la Calidad (QFD).....	33
3.2 Diseño de componentes del sistema de corte de una trituradora de neumáticos y aspectos principales	45
3.2.1 Diseño y simulación de cuchillas de corte	49

3.2.1.1 Selección del material	50
3.2.1.2 Peso de las cuchillas	55
3.2.1.3 Simulación del sistema de corte	55
3.2.2 Árbol de transmisión.....	65
3.2.2.1 Selección del material	65
3.2.2.2 Selección del material	66
3.2.2.3 Dimensiones del árbol de transmisión	80
3.2.3 Cálculo y resultados del árbol de transmisión	81
3.2.3.1 Resultados de simulación estática generado por el software Solidworks®	85
CAPÍTULO 4. PLAN DE PROCESOS	93
4.1 Manufactura y material utilizado.....	93
4.2 Operaciones y secuencias para la manufactura.....	94
4.2.1 Fresadora.....	95
4.2.2 Taladrado.....	97
4.2.3 Centro de maquinado CNC vertical	98
4.2.4 Aserrado	99
4.2.5 Torno.....	100
4.3 Operaciones y secuencias para la manufactura de los componentes	101
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	111
BIBLIOGRAFÍA.....	113
ANEXOS.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de un neumático de automóvil.	11
Figura 2. Tipos de llantas: Diagonal y radial.	12
Figura 3. Neumático autoportante.....	13
Figura 4. Trituradora de mandíbulas tipo Blake.....	19
Figura 5. Trituradora de mandíbulas de pivote elevado	20
Figura 6. Trituradora de mandíbulas de excéntrica elevada.....	21
Figura 7. Esquema trituradora de mandíbulas de tipo Dodge.	22
Figura 8. Triturador Giratorio	23
Figura 9. Triturador de rodillos	24
Figura 10. Esquema trituradora de martillos.	25
Figura 11. Metodología propuesta	30
Figura 12. Fotografía del CITRESO, Huajuapán de León, Oax.....	31
Figura 13. Medidas generales de un neumático con rin de 16 pulgadas.....	32
Figura 14. Relación entre las características técnicas.....	43
Figura 15. Forma de probeta tipo halterio.	46
Figura 16. Propuesta de geometría y dimensiones de las cuchillas de corte.	50
Figura 17. Corte ortogonal a dos dimensiones en vista lateral.	51
Figura 18. Distribución de fuerzas de corte, empuje y peso de la cuchilla.....	55
Figura 19. Esfuerzos triaxiales=Componente hidrostático + Componente distorsión.	59
Figura 20. Disposición en vista superior del sistema de corte.	64
Figura 21. Diagrama de distribución de las fuerzas presentes en el eje.....	68
Figura 22. Diagrama de cortantes y momento flector en componente “x”.	70
Figura 23. Diagrama de cortantes y momento flector en componente “y”	71
Figura 24. Diagrama de distribución de las fuerzas en el eje con dos cuchillas.	74
Figura 25. Diagrama de cortantes y momento flector en componente “X” para el segundo análisis.....	76
Figura 26. Diagrama de cortantes y momento flector en componente “Y” para el segundo análisis.....	77
Figura 27. Dimensiones de árbol de transmisión.	81
Figura 28. Simulación estática del árbol de transmisión.....	83
Figura 29. Carga distribuida tomando en cuenta cuchillas más espaciadores.....	84
Figura 30. Fuerza de corte tomando en cuenta el torque en cada cuchilla.....	85
Figura 31. Secuencia de procesos para fabricación de piezas.....	93

Figura 32. Fresado periferico (a) y fresado frontal (b).	95
Figura 33. Fresadora disponible en el LABTAM.....	96
Figura 34. Taladro de Banco disponible en el LABTAM.	97
Figura 35. CNC FAGOR disponible en el LABTAM.....	98
Figura 36. Tipos de operaciones de aserrado.	99
Figura 37. Sierra de cinta horizontal disponible en el LABTAM.....	99
Figura 38. Operación de torneado.	100
Figura 39. Torno disponible en el LABTAM.....	100
Figura 40. Diagrama de proceso de operación.	106
Figura 41. Diagrama de recorrido de la manufactura de los dos componentes.	107
Figura 42. Representación de la colocación de los aditamentos vertical y angular para su maquinado.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elementos de un neumático.....	9
Tabla 2. Tabla de requerimientos del cliente.....	35
Tabla 3. Evaluación entre competencia y requerimientos del cliente.	38
Tabla 4. Características técnicas asociadas a los requerimientos.....	40
Tabla 5. Prioridad resultante de la asociación entre las necesidades y las características técnicas	41
Tabla 6. Propiedades del material de la cuchilla de corte	56
Tabla 7. Detalle de cargas aplicadas por arista y por cara.....	57
Tabla 8. Análisis estático de la cuchilla de corte con el criterio de Von Mises.	60
Tabla 9. Desplazamiento máximo y punto crítico de la cuchilla.....	61
Tabla 10. Segundo análisis estático de la cuchilla de corte con el criterio de Von Mises .	62
Tabla 11. Desplazamiento máximo en el filo de corte de la cuchilla.....	63
Tabla 12. Parámetros utilizados en la simulación	82
Tabla 13. Disposición de las cargas y apoyos en el eje.	86
Tabla 14. Análisis estático según criterio de Von Mises.....	87
Tabla 15. Deformación y desplazamiento máximo del eje.	88
Tabla 16. Detalles de sujeción y cargas.....	89
Tabla 17. Resultados en cuanto a deformación	90
Tabla 18. Resultados en cuanto a desplazamiento máximo del eje	91
Tabla 19. Análisis estático según criterio de Von Mises para el caso de aplicación del torque	93
Tabla 20. Lista de materiales utilizados para la manufactura de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión.....	94
Tabla 21. Parámetros de corte para cada operación	101
Tabla 22. Orden de operaciones de procesos por cada pieza	102
Tabla 23. Diagrama de flujo de proceso.....	104
Tabla 24. Tabla de componentes a fabricar	105
Tabla 25. Descripción general del proceso de manufactura por cada componente.....	108

Resumen

El objetivo de este proyecto fue diseñar los componentes principales de una máquina trituradora de neumáticos usados: las cuchillas de corte y el árbol de transmisión. La construcción del molino triturador tiene como fin, utilizarlo para triturar estos neumáticos y así, reducir el volumen almacenado en el Centro Integral de Tratamiento de Residuos Sólidos (CITRESO) de Huajuapán y, contribuir a disminuir el impacto ambiental que este tipo de desechos automotrices provoca. Las estadísticas de la acumulación de los residuos sólidos urbanos (RSU) son alarmantes en la República Mexicana [1] y, particularmente, el incremento acelerado de los neumáticos usados.

Este trabajo sigue una metodología que investigó tópicos referentes a los neumáticos usados y máquinas trituradoras, para definir los valores a utilizar en el proceso de simulación para el diseño de los componentes del molino. Se empleó el software SOLIDWORKS® para diseñar, dimensionar y ensamblar las cuchillas y el árbol de transmisión. Además, se valoró si los elementos diseñados y los materiales empleados cumplían o no con el criterio de la máxima energía de distorsión o de Von Mises. Se realizaron análisis estáticos aplicando CAE (*Computer Aided Engineering, Ingeniería Asistida por Computadora*) a los elementos simulados.

CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto está enfocado en la solución de la problemática actual, destacando el desarrollo sostenible y sustentable del planeta, siendo parte fundamental el reciclaje y la reutilización de desechos [2].

La Región Mixteca, así como el estado de Oaxaca y la mayor parte de la República Mexicana tienen serios problemas de contaminación de residuos sólidos; uno de los principales es el de los neumáticos usados. La Ley para la Prevención y Gestión de los Residuos Sólidos del Estado de Oaxaca [3], toma en cuenta el tratamiento de este tipo de contaminantes, puestos a disposición de empresas para la incineración de neumáticos usados.

La trituración de neumáticos, en el ámbito del procesamiento y tratamiento de residuos, es un tema aún no abordado localmente; este proyecto puede ser el primer paso para el aprovechamiento de los componentes, como el acero y caucho para la fabricación de diferentes productos.

El residuo de neumáticos ha sido utilizado en la fabricación de elementos como: zapatos, suela para calzado rudo, bolsos con cámaras de llanta, tapetes personalizados para el mouse de la computadora, elaboración de tapetes tejidos con tiras de neumáticos, elaboración de macetas, mangueras, juegos infantiles, camas en los establos, también se utilizan para anclar lonas que sirven para proteger el alimento de los animales. El caucho de los neumáticos puede convertirse

en loseta para pisos, bloques para formar muros de contención, construcción de muros sólidos, pavimentación de avenidas y carreteras, ya que la arena plástica obtenida de la trituración de la llanta mezclada con pavimentos, da como resultado un concreto de alta resistencia [4].

De acuerdo a algunos estudios [2], la adición de caucho de llanta con madera aumenta las propiedades mecánicas y la resistencia al agua en la fabricación de tableros, ya que transforma la mezcla en un hidrófobo, según la proporción de material de los componentes.

Otro estudio realizado por el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) [5] para Poligras y Applus, hace uso de las cualidades que ofrece el caucho estireno-butadieno (SBR por sus siglas en inglés Styrene Butadiene Rubber) para su aplicación en instalaciones deportivas de césped artificial, mediante la trituración de los neumáticos usados fungiendo como relleno de instalaciones de césped falso. Es importante tomar en cuenta que el material es inerte, no dañino a la salud ni al medio ambiente, bajo estas condiciones.

Actualmente en la ciudad de Huajuapán de León se encuentra el CITRESO donde se depositan, almacenan y reciclan los residuos sólidos de toda la ciudad; en el caso de los neumáticos usados, el tratamiento está limitado a la quema o almacenamiento. En este sitio se realizó la investigación de campo con el fin de conocer la cantidad de neumáticos de desecho.

Este trabajo de investigación está enfocado en contribuir con el proceso para el tratamiento de neumáticos usados, el cual consiste en la trituración de este material para posteriormente fabricar productos como trabajo a futuro. Esto con el fin de contribuir al tratamiento de estos residuos y al cuidado del medio ambiente.

Finalmente se tuvo como objetivo el diseño de dos de los componentes principales de un molino triturador de neumáticos, siendo las cuchillas de corte y el árbol de transmisión, para que con base en esto puedan dar uso a los residuos para diversos fines.

1.2 Justificación

Los neumáticos están hechos de materiales aptos para el aprovechamiento de sus componentes, ya que están formados por elementos como el caucho, alambres de acero, hierro y fibra textil, los cuales pueden ser transformados e incorporados a procesos de reciclaje para la generación de nuevos productos.

Los neumáticos se someten a un proceso con temperatura para transformar el caucho en caucho vulcanizado, adquiriendo características como: insolubilidad e indeformabilidad, resistente al roce y al desgaste, lo que lo hace casi imposible desaparecerlo, convirtiéndolo en uno de los residuos más contaminante de la época.

El principal proceso de eliminación de neumáticos en México es la quema directa, la cual se lleva a cabo mediante grandes hornos disponibles en algunas empresas,

como es el caso de las cementeras principalmente. Este proceso genera graves problemas ambientales debido a los gases producidos.

Este proyecto de investigación propone una alternativa, inicialmente por el diseño de las cuchillas y el árbol de transmisión para la construcción de un molino triturador y, dejar de acopiar neumáticos usados, mediante la trituración mecánica y reutilización del material triturado, tomando en cuenta particularidades de éste como que es antideslizante, aislante, impermeable, amortigua golpes, es resistente y durable.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

Diseñar las cuchillas y el árbol de transmisión para un molino triturador de neumáticos usados y, con esto se pueda contribuir a la reducción del volumen residual de estos desechos y al impacto ambiental provocado.

1.3.2 Objetivos específicos

- Conocer el volumen de neumáticos usados depositados en el CITRESO y establecer las dimensiones promedio para utilizarse como datos en el diseño de las cuchillas y árbol de transmisión.
- Diseñar los componentes de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión en el software SolidWorks®.
- Evaluar el criterio de Von Mises para las cuchillas de corte y el árbol de transmisión para estudiar si el material utilizado no rebasa la resistencia a la fluencia (YS) y pueda provocar la aparición de fallas.

1.3.3 Metas

- Conocer los componentes de trituradoras existentes para esbozar el diseño de las cuchillas y el árbol de transmisión.
- Realizar el modelado, las simulaciones en software 3D y elaborar los planos constructivos de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión para establecer formas, dimensiones y establecer los materiales adecuados.
- Definir el proceso de manufactura, así como los diagramas de proceso de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

El creciente número de vehículos en las carreteras de los países industrializados y en desarrollo genera millones de neumáticos usados cada año. Alrededor de 1400 millones de neumáticos se venden en todo el mundo cada año y, posteriormente, muchos caen en la categoría de neumáticos de fin de vida (ELT por sus siglas en inglés, *End Life Tire*) o llantas de desecho. Estos neumáticos se encuentran entre las mayores y más problemáticas fuentes de residuos, debido al gran volumen producido y su durabilidad debido a su lenta degradación [6]. Las malas prácticas en cuanto al tratamiento de neumáticos usados representan una amenaza potencial para la salud humana, como es el riesgo de incendio y foco de plagas.

Los neumáticos son fabricados a partir de diversos materiales que varían según el uso que se le dará al producto, de forma general los materiales utilizados son [7]:

- a. Compuestos de hule o caucho, los cuales varían según el diseño utilizado para la función que va a cumplir, por su resistencia al calor, desgaste, flexión, adherencia, etc.
- b. Textiles, los cuales forman diversas capas que se recubren de caucho. Entre los textiles utilizados están las telas hechas de nylon y poliéster, siendo estos polímeros.
- c. Acero en forma de alambre, el cual sirve de sostén para las capas que conforman la llanta.
- d. Otros compuestos como pigmentos, antioxidantes y rellenos.

Es importante encontrar soluciones útiles para éstos residuos sólidos. Los índices de reciclaje de los neumáticos están aumentando, pero no lo suficiente para evitar que éstas aparezcan abandonadas en cualquier sitio o depositadas en los vertederos [4].

2.1 Neumáticos

Los neumáticos representan productos de suma importancia para el sector automotriz, principalmente por la seguridad que estos proveen a los vehículos y a los usuarios. Dependiendo del material, un neumático está compuesto por tres componentes principales: compuesto elastomérico, tejido y acero. También están hechos a partir de goma sintética (elastómeros sintéticos: 60-65% en peso), negro de humo (25-35% en peso) junto con aceleradores y cargas que son añadidas durante la fabricación de los materiales de caucho y con algunos materiales fibrosos, considerados como elástomeros termoplásticos. En el caso de los neumáticos para vehículos, son una mezcla principalmente de caucho natural y caucho sintético, como son el butilo y copolímero de estireno-butadeino. Se puede decir que es posible añadir más de cien compuestos diferentes a la cubierta de un neumático en función de la marca y uso específico del neumático. Los aceleradores (sulfenamidas, tiazoles, heterocíclicos, tiuramios, etc.) son añadidos al final del proceso de mezclado cuando la temperatura va disminuyendo [8].

La fabricación de un neumático implica un proceso de vulcanización, donde la reacción entre el elastómero, azufre y más químicos produce reticulaciones entre

las cadenas moleculares y forma una red química tridimensional; estos termoplásticos son sólidos e insolubles [8].

Este proceso ingenieril es necesario para garantizar el rendimiento, durabilidad y seguridad al transformar el caucho natural en un producto útil ya que el caucho natural es pegajoso por naturaleza, se deforma fácilmente cuando se calienta y es quebradizo cuando se enfría, siendo no apto para la fabricación de productos por el bajo nivel de elasticidad. La razón de la deformación inelástica del caucho no vulcanizado se puede encontrar en su naturaleza química, ya que el caucho está hecho de cadenas largas de polímero [6].

En la Tabla 1 se presentan los materiales que contiene un neumático de acuerdo a su uso, que puede ser empleado en un automóvil o bien en un camión.

Tabla 1. Elementos de un neumático [9].

Material	Automóvil (%peso)	Camión (%peso)	Función
Hidrocarburo	48,0	45,0	Estructural
Negro de humo	22,0	22,0	Mejora oxidación
Acero	15,0	25,0	Esqueleto estructura
Textil	5,0	0,0	Esqueleto estructura
Óxido de Zinc	1,2	2,1	Catalizador
Azufre	1,0	1,0	Vulcanización
Otros	12,0		Juventud

Es importante tener conocimiento acerca de los componentes de un neumático, ya que, dependiendo de este, se obtienen las diferentes características y propiedades para cada caso. En la Figura 1 se presentan las partes que conforman un neumático y a continuación se describen [10]:

1. Banda de rodadura: Es la parte generalmente de hule, la cual proporciona la interfase entre el neumático y el camino, además que proporciona tracción y freno.
2. Lonas de cima: Son especialmente de acero, proporcionan resistencia al neumático estabilizando la banda de rodamiento y además se encarga de proteger al mismo de elementos punzo cortantes.
3. Capa radial: Trabaja en conjunto con los cinturones conteniendo la presión del aire. Ésta es la encargada de transmitir todas las fuerzas originadas por la carga, el frenado y el cambio de dirección de la rueda y la banda de rodamiento.
4. Costado (flanco): Está especialmente compuesto para resistir la flexión y la intemperie proporcionando protección a la capa radial.
5. Revestimiento de goma interior o sellante: Compuesto por una o dos capas de hule especial para resistir la presión y difusión del aire. Éste es el elemento que reemplaza las cámaras utilizadas en viejos neumáticos.
6. Relleno: Conformado por piezas de hule para rellenar el área de la ceja (talón) y la parte inferior del costado proporcionando una transición suave del área rígida de la ceja.
7. Refuerzo de la ceja: Es una capa colocada sobre el exterior de la capa radial, la cual refuerza y estabiliza la zona de transición de la ceja al costado.

8. Ribete: Utilizado para el asentamiento correcto sobre el rin de la ceja.
9. Talón: Conformado por alambres de acero de alta resistencia el cual unifica y mantiene el diámetro requerido de la llanta en el rin.



Figura 1. Partes de un neumático de automóvil [11].

2.1.1 Tipos de neumáticos

Los neumáticos se dividen en dos grupos, de acuerdo a su construcción y por el uso de cámaras [2].

a) *Por construcción:* Cada neumático es fabricado con un proceso distinto de acuerdo a la necesidad que debe cumplir y del método que cada empresa desee aplicar. Se clasifican en diagonales, radiales y autoportantes (Figura 2 y Figura 3). En los diagonales los componentes internos se colocan entrelazados en forma diagonal para incrementar la rigidez; los radiales son aquellos que sus componentes son colocados en línea recta sin inclinación y los autoportantes son aquellos que los componentes se colocan en línea recta incluyendo los flancos.

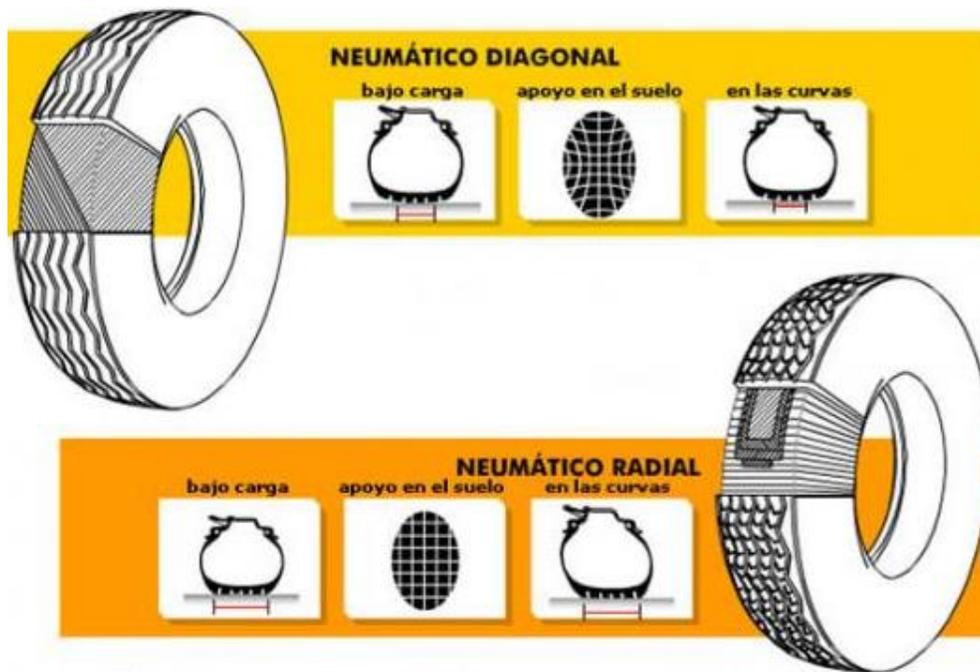


Figura 2. Tipos de neumáticos: Diagonal y radial [12].

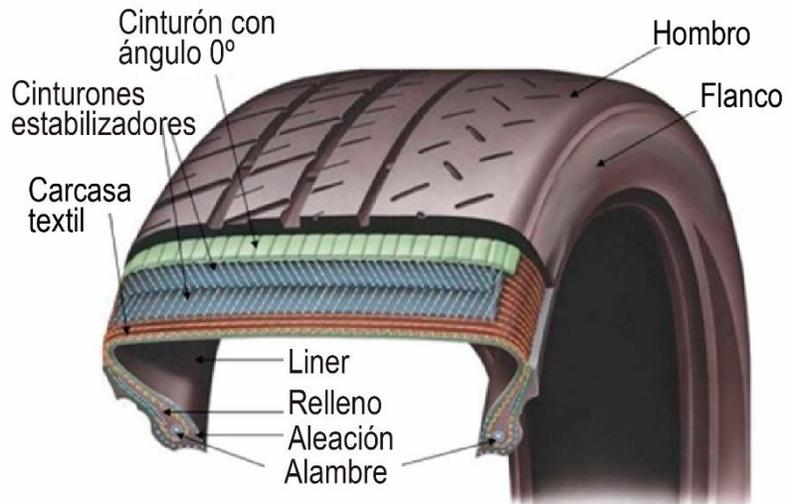


Figura 3. Neumático autoportante [13].

b) *Uso de la cámara:* Existen neumáticos que contienen o no cámara y también algunos en los que no es necesario un fluido (aire, agua o espuma) para mantener sus propiedades, si no que se valen de la geometría que poseen y las propiedades de los materiales que las componen.

2.2 Métodos de tratamiento para neumáticos como residuos sólidos

Para tratar estos residuos sólidos, se pueden emplear diversos métodos de reciclaje, entre los que se encuentran: trituración mecánica, regeneración, desvulcanización, termólisis, incineración, trituración criogénica, pirólisis y la producción de energía eléctrica [14], los cuales se describen a continuación:

-Trituración mecánica

Es un proceso mecánico en donde se obtiene un producto resultante que es de alta calidad y puro, lo que facilita la re-utilización de éstos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración con sistemas mecánicos es casi siempre, el paso previo en los diferentes métodos de recuperación y reutilización de residuos de neumáticos [14].

-Regeneración

Es un proceso químico que consiste en romper las cadenas que forman el material para obtener una materia prima. Aunque ésta sea diferente a la original, aún se podría vulcanizar y conseguir caucho de nuevo [15].

-Desvulcanización:

La desvulcanización es un proceso muy costoso y con capacidad de producción reducida, la cual consiste en eliminar los enlaces de azufre existente entre cadenas de hidrocarburos del polímero, consiguiendo de nuevo caucho virgen capaz de ser reprocesado [15].

-Termólisis

Es un sistema en el que los materiales de residuos de neumáticos son sometidos a un calentamiento dentro de un medio que carece de oxígeno, lo que ocasiona la destrucción de los enlaces químicos. Así, se obtiene la recuperación total de los componentes originales del neumático, como son los metales, negro de humo e hidrocarburos gaseosos que pueden reutilizarse en cadenas industriales [4].

-Incineración

Es un proceso costoso y difícil de controlar debido a la diferencia de velocidades de combustión de los componentes y la necesidad de depuración de los residuos. Genera calor que puede ser usado como energía, ya que se trata de un procedimiento exotérmico. Con este método, los productos obtenidos, además de ser contaminantes en el proceso, son dañinos para la salud [16].

-Trituración criogénica

Para este método son necesarias instalaciones complejas, ya que los neumáticos se someten a baja temperatura correspondiente al nitrógeno líquido. Además, se requiere un mantenimiento constante en la maquinaria utilizada, aparte de ser costoso, lo que resulta ser poco rentable [4].

-Pirólisis

La pirólisis permite la separación del negro de carbono de los neumáticos y la materia volátil liberada (compuestos condensables y no condensables), tiene el potencial de recuperación de energía renovable dada la proporción significativa de caucho natural presente en el neumático [8].

-Producción de energía eléctrica

En este método se introducen los residuos en una caldera donde se realiza una combustión. Al liberar calor provoca que el agua contenida se convierta en vapor de alta temperatura y presión, que por medio de un generador produce electricidad [17].

2.2.1 Manejo de neumáticos usados

Los neumáticos presentan una estructura compleja ya que están formados por diversos materiales como caucho, acero y tejido de poliamida o poliéster. La separación de estos materiales resulta en un proceso difícil, por lo que el reciclaje de los neumáticos usados se ha orientado mayormente a su aprovechamiento en conjunto, procesándolos para convertirlos en materia prima para asfalto, pistas atléticas, tapetes, entre otros [18].

Entre las diferentes formas de manejo de los neumáticos usados se encuentran: el apilamiento teniendo aplicación de orden y manejo de volumen y con principal componente en muros de contención, entierro en el caso de relleno espacios como barrancas y propiedades para el uso y acceso público, reciclaje, regeneración del caucho, generación de energía, producción de asfalto o fabricación de nuevos materiales [18].

2.3 Trituradoras

Una trituradora es una máquina que procesa un material, de forma que lo convierte en trozos de un tamaño menor al original. Existe una gran cantidad de trituradoras de distintos tipos, las cuales efectúan el trabajo de desintegración de los materiales. Hay cuatro formas de reducir un material [19]: por impacto, por corte, por atrición y por compresión. Las trituradoras emplean alguno de estos mecanismos o la combinación de ellos.

- Por impacto: Se refiere al choque de un objeto contra otro, teniendo la posibilidad de estar ambos en movimiento. Existen dos variaciones, el impacto de gravedad y el impacto dinámico. El impacto por gravedad es usado con mayor frecuencia cuando es necesario separar dos materiales con diferente friabilidad, el material más friable se rompe mientras que el otro se mantiene intacto. Posteriormente la separación se puede realizar mediante un cribado. En el proceso de triturado el material cae delante de un martillo en movimiento que aplasta por el impacto de gravedad, el objeto se detiene momentáneamente y comienza una caída libre. Cuando un material sufre un impacto dinámico, el material no es soportado y la fuerza del impacto acelera el movimiento de las partículas trituradas hacia los demás martillos. El impacto dinámico tiene ventajas definidas como la reducción de material y es específica para los requerimientos necesarios, como son partículas cúbicas, tamaños de granulado, etc.
- Por atrición: Se aplica este término para la reducción de materiales frotándolos entre dos superficies duras. Los molinos de martillo operan con holguras cercanas entre los martillos y las barras de tamiz, reduciendo el desgaste entre la cizalla y la reducción del impacto. Aunque la atrición consume más potencia y desgasta en mayor grado los martillos y rejillas, resulta práctica para triturar materiales poco abrasivos como la piedra caliza pura y el carbón. Este tipo de trituración es útil cuando el material es friable o demasiado abrasivo y cuando no es necesario controlar el tamaño máximo de grano.

- Por corte: Consiste en una acción de recorte o corte en lugar de la acción de fricción asociada con el desgaste. Esta forma de reducir material generalmente es combinado con otros métodos. Normalmente son utilizadas cizallas y se usan en diferentes casos como cuando el material es friable y tiene aplastamiento primario con reducción, cuando se requiere un tamaño de grano relativamente grueso, cuando es requerido un contenido bajo de sílice de 6 a 1.
- Por compresión: El aplastamiento por compresión se realiza entre dos superficies, realizando trabajo en una o ambas superficies. Las trituradoras de mandíbula utilizan este método para reducir rocas extremadamente duras y abrasivas.

Las trituradoras se clasifican como: trituradoras de mandíbulas, giratorias, de rodillos y de impacto.

2.3.1 Trituradoras de mandíbulas

También conocida como trituradora de quijada, es una máquina utilizada en la trituración primaria, basada en una trituración gruesa y media. El motor de ésta trituradora produce un movimiento oscilatorio en la placa de trituración que se encuentra colocada de manera diagonal. El movimiento oscilatorio y la presión que la placa de trituración ejerce sobre el material, hace chocar el material con la pared interna provocando la fragmentación del mismo.

Existen cuatro tipos generales de trituradoras de mandíbulas comerciales [20]:

- Tipo Blake

- De pivote elevado
- De excéntrica elevada
- Dodge

2.3.1.1 Trituradora de mandíbulas tipo Blake.

La trituradora de mandíbulas tipo Blake es una quebrantadora utilizada para la trituración primaria y secundaria para material duro, tenaz y abrasivo; así como para materiales pegajosos, material relativamente grueso con planos de separación o en trozos finos como las lajas. En la Figura 4 se presenta un esquema de una trituradora tipo Blake.

El uso del volante en esta trituradora hace uniforme el consumo de potencia utilizado durante el proceso.

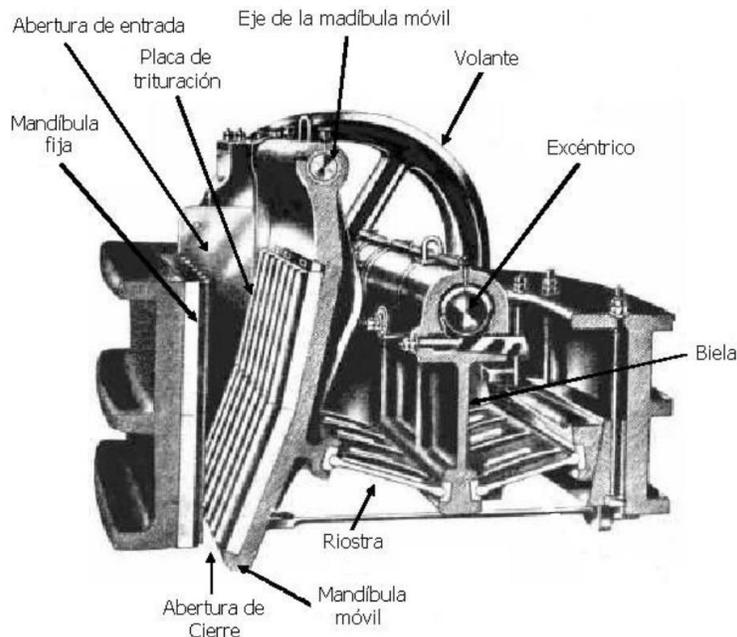


Figura 4. Trituradora de mandíbulas tipo Blake [21].

2.3.1.2 Trituradora de mandíbulas de pivote elevado.

Este tipo de trituradora tiene aplicaciones similares a las de Blake en cuanto al material y especificaciones, el pivote trabaja reduciendo el roce entre las caras de la quebrantadora, así como el atascamiento. De igual forma se logran mayores velocidades y por ende mayores capacidades, elevando la eficacia. En la Figura 5 se presenta un esquema de una trituradora de mandíbulas de pivote elevado.

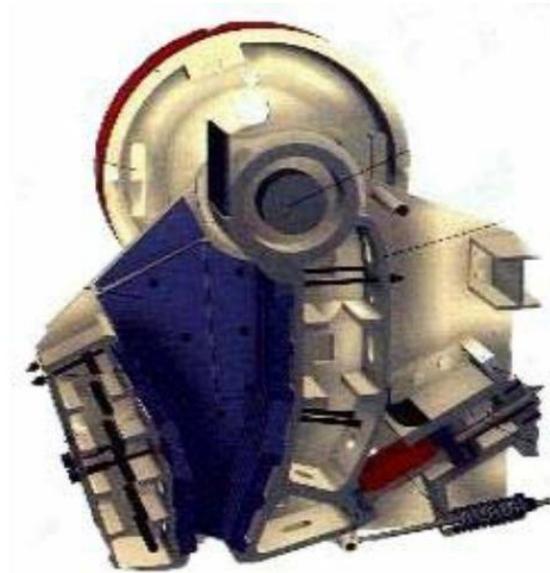


Figura 5. Trituradora de mandíbulas de pivote elevado [20].

2.3.1.3 Trituradora de mandíbulas de excéntrica elevada.

Este tipo de trituradora de mandíbulas está restringida a tamaños pequeños de material, debido a las limitaciones estructurales que posee. Actualmente ha logrado sustituir al tipo Blake, ya que el excéntrico elevado ayuda a la alimentación y a la descarga del material, haciendo más eficiente la velocidad y carga del mismo. Entre las desventajas del uso de este tipo de trituradoras se encuentran el alto desgaste,

aparición de más roturas por fatiga y ligeramente menor eficiencia en el aprovechamiento de energía.

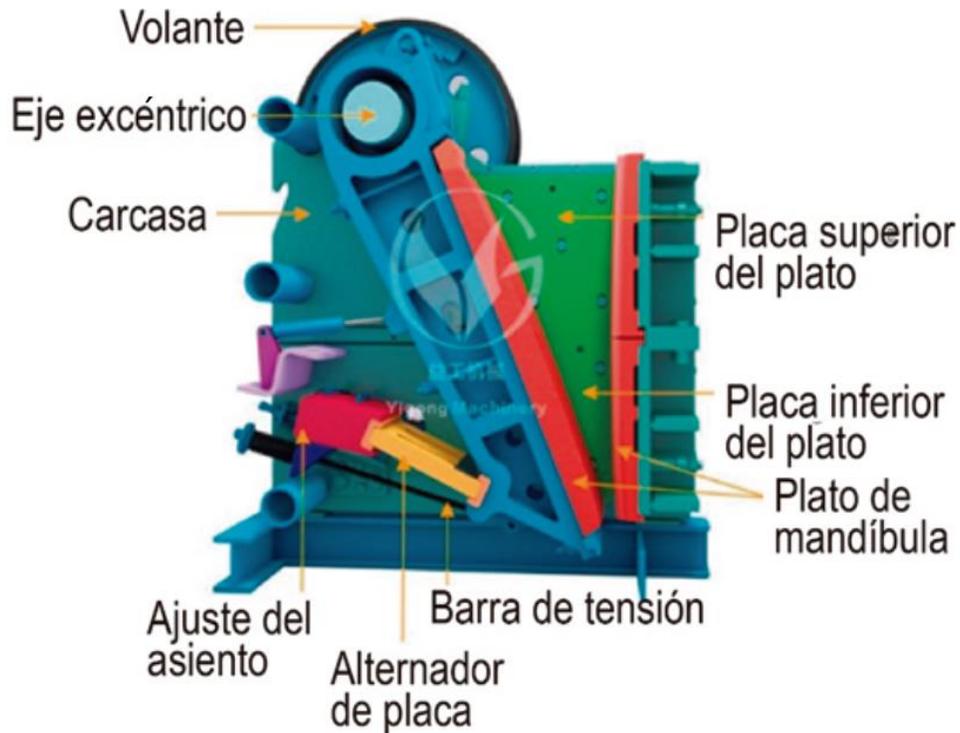


Figura 6. Trituradora de mandíbulas de excéntrica elevada [22].

2.3.1.4 Trituradora de mandíbulas tipo Dodge.

En este tipo de trituradora tipo Dodge el pivote ubicado debajo motiva un producto con mejor control de tamaño, en comparación con la de tipo Blake. Este tipo Dodge es difícil de fabricar en tamaños grandes y tiene tendencia al atascamiento. Es de uso común en laboratorios.

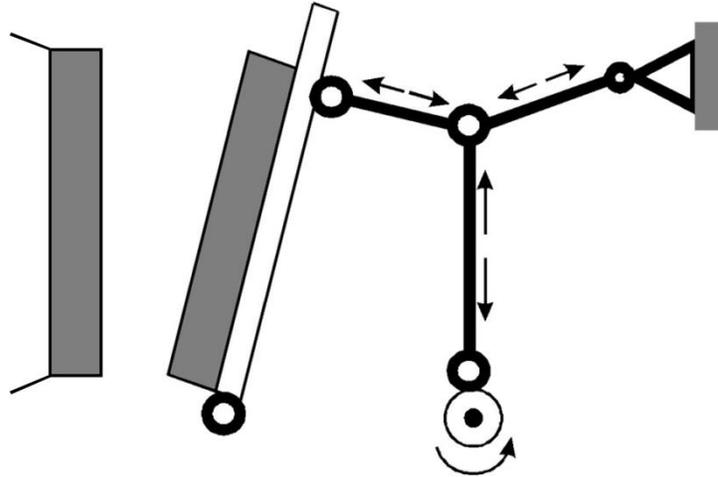


Figura 7. Esquema trituradora de mandíbulas de tipo Dodge [21].

2.3.2 Trituradoras giratorias

Las trituradoras giratorias o cónicas, se consideran las más predominantes en el ámbito de la trituración de materiales duros en trozos de gran tamaño. Consta de una cabeza trituradora móvil con forma de un cono truncado invertido, encontrado en el interior de una coraza, esta cabeza gira excéntricamente quedando atrapado el material entre el cono externo fijo y el interno giratorio.

En cada rotación, cada punto del cono móvil se aproxima y se aleja del punto correspondiente al cono fijo, provocando la trituración de los sólidos. La dimensión del material lo determina la separación entre los conos, llamada reglaje [23].

En la Figura 8 se muestra un esquema de un triturador giratorio, denotando el proceso de alimentación y partes móviles que funcionan como elementos trituradores.

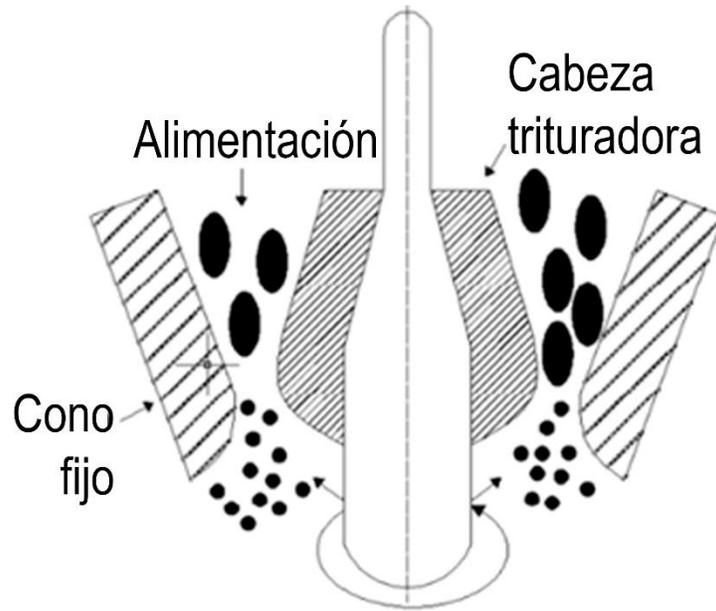


Figura 8. Tritrador Giratorio [23].

2.3.3 Tritradora de rodillos

Consiste en dos cilindros de ejes paralelos que giran en sentido inverso y con una misma velocidad de rotación impidiéndose el rozamiento del material con los rodillos para formar entre éstos una cámara de trituración en forma "V". Este tipo de trituración conlleva ventajas como: tolvas grandes de alimentación, elevada fuerza de trituración, alta capacidad de producción, fácil instalación y costos poco elevados. En la Figura 9 se muestra la ilustración de una trituradora de rodillos.

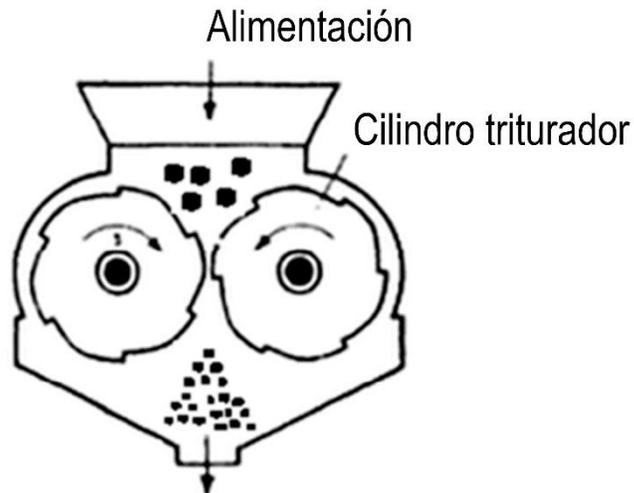


Figura 9. Triturador de rodillos [23].

2.3.4 Trituradora de impacto

Este equipo se basa en el mecanismo de compresión del material entre dos cuerpos. Consiste de un rotor horizontal o vertical unido con martillos fijos o pivotantes encajados en una carcasa. En la parte inferior puede tener un tamiz fijo o intercambiable y opera a más de 1000 RPM. De esta manera logra que casi todos los materiales se comporten como frágiles. Las ventajas de esta trituradora son, la generación de un rango amplio de tamaño de partículas, bajo costo de compra inicial y bajo costo de mantenimiento. A continuación, se muestra el esquema de una trituradora de martillos (Figura 10).

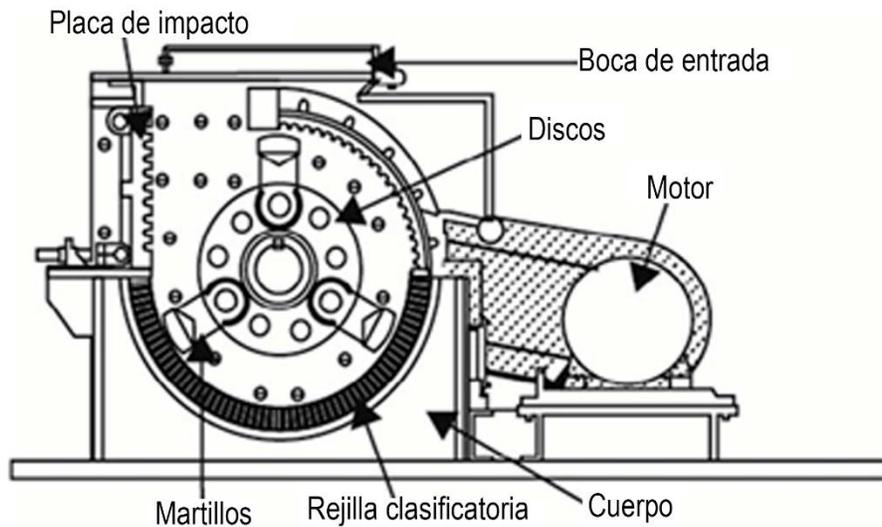


Figura 10. Esquema trituradora de martillos [23].

2.4 Tipos de trituradores mecánicos con aplicación en neumáticos

Fue importante el conocimiento acerca del tipo de trituradores utilizados en este campo, ya que ayudó a la toma de decisión acerca de cuál fue más conveniente para el proyecto en cuanto a la factibilidad, costo y eficiencia. Fue necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tipo de material a triturar.
- Volumen a triturar.
- Potencia del motor requerida según el material a triturar.
- Tamaño de alimentación y salida del material.

Los tipos de trituradores mecánicos existentes y producidos por fabricantes extranjeros pueden clasificarse de acuerdo a los sistemas de corte que poseen, siendo:

- Trituradores de 1 eje
- Trituradores de 2 ejes
- Trituradores de 4 ejes

2.4.1 Triturador de 1 eje

Este tipo de triturador puede ser de eje horizontal o vertical y está compuesto en su parte interior por placas de desgaste y cubierto por una carcasa. En el interior se encuentra un eje que gira a gran velocidad y al cual son sujetados los elementos de precisión, generalmente martillos.

El material a ser procesado ingresa por la parte superior, desplazándose por gravedad a una cámara de trituración, en donde en su camino es golpeado por los martillos que origina golpes entre partículas, contra la carcasa y el motor, lo que desintegra el material y reduce su tamaño. A continuación, se presenta un listado de características, componentes y especificaciones principales:

- Sistema de empuje hidráulico automático.
- Sistema turbo hidráulico en el exterior de la máquina.
- Motor hidráulico.
- Elevación de la parrilla y sistema de control para cambio de cuchillas y limpieza.
- Rotor sólido de acero perfilado, con espacio mínimo entre cuchillas.
- Separación de corte regulable a través de la contracuchilla integrada.

- Sistema hidráulico de corredera que empuja el material a triturar, en función de la carga, contra el rotor dotado de placas cortadoras reversibles.
- La máquina funciona como un principio de guillotina mediante bloques giratorios rotativos de cizallas a una distancia de 0,1 mm.
- El tamaño de granulado y rendimiento de paso son determinados por la dimensión de la criba de granulado.

2.4.2 Triturador de 2 ejes

Un triturador con cuchillas rotativas, con los filos de corte alternados a lo largo del eje, la acción de corte se produce mediante una serie de elementos cortantes que trituran el producto al cruzarse. Este tipo de trituradores constan de 2 motores eléctricos independientes sincronizados con movimiento de giro opuestos, conectados a motoreductores. Éstos poseen las siguientes características:

- Nivel acústico de trabajo inferior a los 80 db.
- Fácil acceso a los discos de trituración y de arrastre para facilitar el mantenimiento.
- Baja velocidad de rotación de discos.

2.4.3 Triturador de 4 ejes

El mecanismo utilizado por este tipo de trituradores es el agarre y la introducción del material a triturar autónomamente mediante los cortadores secundarios o el cortador principal.

Algunas de sus características principales son las siguientes:

- Corte triple.
- Introducción del material automáticamente.
- No es necesario un dispositivo de empuje.
- Mayor duración de la herramienta debido a las velocidades periféricas reducidas.
- Gran rigidez y amortiguación interior.
- Forma constructiva compacta y flexible debido a su sistema modular.
- Accionamiento de los ejes de corte por motores eléctricos.
- El tamaño del granulado puede adaptarse a las necesidades dependiendo de los orificios para la criba.
- Mantenimiento eficaz y sencillo.
- Gran estabilidad de marcha gracias al dentado helicoidal de la primera etapa.
- Cuenta con un dispositivo hidráulico de lubricación.

2.5 Metodología

La metodología se basa en la Metodología Analítica en la Ingeniería [24], la cual consta de 7 etapas principales que a su vez son subdivididas en 9 como se muestra en la Figura 11. Como primera etapa, se definió el problema, el cual se situó en la Cd. de Huajuapán de León, Oaxaca, donde se evaluó el impacto ambiental de los neumáticos usados y el volumen residual que ocasionan.

De igual forma, se tomó en cuenta el estado del arte como una subetapa. Esto definió las pautas para identificar tratamientos similares con respecto a neumáticos usados, trituradoras y diferentes aplicaciones del material. Después, se encuentra la revisión bibliográfica, que sentó las bases para determinar parámetros, requerimientos y especificaciones necesarios para la manufactura. En la segunda etapa se estructuró el modelo, se formularon las hipótesis en función del objetivo, identificando los parámetros y especificaciones que se manejarán. La tercera etapa, implicó la obtención y aplicación de principios físicos según la necesidad. La cuarta etapa, de la metodología, se enfocó al cálculo de los dos elementos estudiados, así como parámetros y especificaciones, aunado a la selección de materiales que se propone utilizar. La quinta etapa, tomó en cuenta el diseño de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión mediante simulaciones para los componentes principales del dispositivo. En la sexta etapa se verificaron los resultados en cuanto al criterio de Von Mises (tomando en cuenta medidas, especificaciones, etc.) del dispositivo. Por último, la séptima etapa correspondió a la manufactura de las partes, para la cual se planteó un plan de procesos mediante el método de la ruta crítica, que indica

el flujo de trabajo para la fabricación de los componentes, haciendo uso de la maquinaria del Laboratorio de Tecnología Avanzada de Manufactura de la UTM.

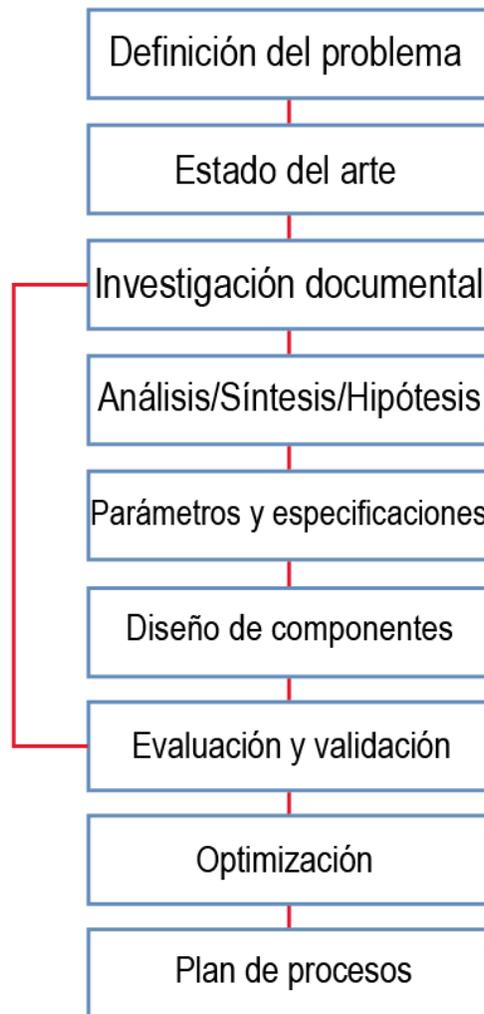


Figura 11. Metodología propuesta [24].

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y RESULTADOS

3.1 Recopilación de información

Para el desarrollo de este proyecto se visitó el Centro Integral de Tratamiento de Residuos Sólidos (CITRESO), ubicado en la ciudad de Huajuapán de León, Oax., para la realización de la investigación de campo. Ésta consistió en observar, medir y recolectar datos que se emplearon en el diseño de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión. Se llevó a cabo una entrevista con la encargada, Ing. Susana Cruz Alberto. Se obtuvieron los primeros datos para el diseño de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

- El Centro Integral de Tratamiento de Residuos Sólidos contiene aproximadamente 10,000 neumáticos esparcidos de forma aleatoria en el predio de este centro sin ningún tipo de clasificación, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Fotografía del CITRESO, Huajuapán de León, Oax.

- Se estima que semanalmente llegan al CITRESO alrededor de 100 neumáticos de desecho. Los cuales no reciben ningún tipo de tratamiento. Por ello se considera que al año se acumularán alrededor de 5000 piezas.

- Los neumáticos desechados y almacenados en este centro tienen un rango de tamaños de rin que va desde 13 a 18 pulgadas.
- El uso y el tratamiento que se le da a estos desechos es nulo, únicamente son almacenados, según información del encargado del centro, lo que resulta contraproducente ya que es un foco de infección, ocupa gran espacio en el CITRESO y es una fuente potencial de incendios, como ya ha sucedido.

Una vez organizada la información obtenida se trataron los datos, para determinar el tamaño de neumático promedio. Fue necesario realizar un muestreo de promedio, este se llevó a cabo haciendo pilas de 8 neumáticos tomados de forma aleatoria en una longitud de 10 metros. Se compararon y se obtuvo el tamaño promedio del neumático. El tamaño de rin de neumático con mayor frecuencia correspondió al de 16 pulgadas, como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Medidas generales de un neumático con rin de 16 pulgadas [25].

El resultado obtenido sirvió como base para el diseño de los componentes principales del triturador de neumáticos, como lo son el tamaño de la tolva de alimentación como una base para la dimensión del claro de carga del árbol de transmisión y espesor de las cuchillas de corte. De manera paralela se realizó la revisión del estado del arte sobre las trituradoras de neumáticos existentes en el mercado, tomando en cuenta tipos, geometría y especificaciones según recomendaciones de los fabricantes de este tipo de dispositivos consultados.

A continuación, se presenta la aplicación del Despliegue de la Función de Calidad en relación a las cuchillas de corte.

3.1.1 Aplicación del Despliegue de la Función de Calidad (QFD)

El método de diseño de producto denominado Despliegue de la Función de la Calidad o QFD (*Quality Function Deployment*) [26], se basa en recabar los requerimientos del cliente y traducirlos en términos del ingeniero a través de pasos sucesivos, características de diseño y operaciones para satisfacer la demanda. A continuación, se presentan las dos primeras fases que fueron aplicadas para desarrollo de las cuchillas para este método.

-Fase 0: Identificación del cliente

El QFD consiste en convertir los requerimientos del cliente en especificaciones técnicas del objeto a diseñarse. Se entiende por cliente no sólo el consumidor final o usuario final del producto, si no a aquellas personas que se ven influenciadas durante el proceso de diseño.

Los siguientes “clientes” que se consideraron es este análisis son:

-Profesor-Investigador del Instituto de Minería de la UTM. Es el cliente principal, ya que será el usuario final de las cuchillas de corte.

-Laboratorio de Tecnología Avanzada de Manufactura de la UTM. Es el lugar en donde se utilizarán sus instalaciones para fabricar las cuchillas de corte.

-Universidad Tecnológica de la Mixteca. Institución en la cual se realizará todo el proceso.

Fase 1: Matriz de planificación del producto

En este apartado, se describen los requerimientos demandados por el cliente, estos son: funcionales, de costes, de fabricación y el impacto al medio ambiente:

-Requerimientos funcionales. Describen el comportamiento de la pieza, su interacción con el medio de trabajo, sus posibilidades de fallo y reparación.

- Maquinar/fabricar la cuchilla de corte
- Obtener un rendimiento de 1000 kg/h
- Obtener características del material en cuanto a resistencia para el trabajo de trituración de neumáticos
- Número de veces que la cuchilla hace contacto con el neumático

-Requerimientos de costes. Relacionados con el coste asociado con la mano de obra, materiales, equipos e instalaciones.

- Grosor del acero de 1"
- Bajo coste de fabricación
- Bajo coste de operación
- Bajo coste de mantenimiento

-Requerimientos durante el proceso de fabricación. Referente a la facilidad en el montaje

- Diseño sencillo, práctico y eficiente
- Facilidad de replicar

-Requerimientos medioambientales

- Sin contaminación para el medio ambiente, ni existir impacto negativo al medio ambiente.
- Capacidad de reúso.

A continuación, como se muestra en la Tabla 2, se priorizaron los requerimientos del cliente por medio de una ponderación de prioridad, se utilizó una escala de 5 a 1, siendo el valor más alto el de mayor importancia.

Tabla 2. Tabla de requerimientos del cliente.

TABLA DE REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	
	Prioridad
FUNCIONAMIENTO	
Maquinar/fabricar la cuchilla de corte en el LABTAM	5
Obtener un rendimiento de 1000 kg/h	3
Obtener características del material en cuanto a resistencia para el trabajo	4
Número de veces que la cuchilla hace contacto con el neumático	3
Adaptación a geometría de ejes convencionales	5
COSTE	
Grosor del acero de 1"	5
Bajo coste de fabricación	5
Bajo coste de operación	3
Bajo coste de mantenimiento	3
FABRICACIÓN	
Diseño sencillo, práctico y eficiente	4

Facilidad de replicar	4
Capacidad de producción en el LABTAM	5
MEDIOAMBIENTALES	
Sin contaminación para el medio ambiente, ni existir impacto negativo al medio ambiente.	4
Capacidad de reúso del material	3

-Identificación/Análisis de los competidores/Competidores principales (CP)

Se consideraron como competidores principales a los fabricantes de trituradores de neumáticos, obteniendo las propuestas de geometrías de cuchillas de corte con base en la capacidad de trabajo del LABTAM. A continuación, se presentan las siguientes ventajas y desventajas que fueron evaluadas en la Tabla 3 así como las características principales en rubros de funcionamiento, coste, fabricación y aspectos medioambientales:

-Funcionamiento

- Funcionamiento de las cuchillas en conjunto con el sistema de corte con la capacidad de trituración de neumáticos de 1000 kg/h a 2000 kg/h.
- La geometría de las cuchillas son circulares y basadas principalmente en la implementación de un solo filo de corte por cada cuchilla.
- Por material propuesto es viable la obtención de características del material y cumpla con el trabajo requerido que es la trituración de neumáticos.
- La maquinabilidad/fabricación de las piezas por el espesor mínimo de 1 ½” se ve afectada por la falta de capacidad para procesar este calibre por la maquinaria con la que se cuenta actualmente, ya que el espesor máximo que

puede ser procesado es de 1" en el caso del corte por plasma, siendo esta la operación más viable y factible dado número de piezas requeridas para cada eje.

-Coste

- Las propuestas de espesores presentados por fabricantes de trituradores de neumáticos al ser mínimo de 1 ½" representa un aumento en el coste.
- Al no contar actualmente con la maquinaria necesaria para este tipo de espesores, es necesario realizar adecuaciones y ejecutar largos procesos de maquinado como en el caso de realizarlo en una fresadora CNC, lo que perjudica negativamente en el coste de fabricación, operación y mantenimiento.

-Fabricación

- Las geometrías presentadas son sencillas y prácticas al tener únicamente una punta de corte.
- La réplica de estas piezas por su geometría es sencilla, lamentablemente el LABTAM carece de capacidad de procesar este tipo de tareas debido al tema antes mencionado en relación al espesor utilizado de 1 ½" ya que en el caso del corte por plasma el máximo espesor admitido por la maquinaria es de 1 ½" y realizar el proceso de todas las cuchillas mediante un fresado CNC conlleva muchas desventajas.

-Medioambientales

- La manufactura de las cuchillas por los procesos utilizados no recurre negativamente en el medio ambiente ya que son operaciones de corte por control numérico.
- Las piezas, al término de su vida útil o por desecho por falla, el material puede ser reciclado y reutilizado en aplicaciones convenientes.

Tabla 3. Evaluación entre competencia y requerimientos del cliente.

TABLA DE REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE		Evaluación de la competencia				
	Prioridad	1	2	3	4	5
FUNCIONAMIENTO						
Maquinar/fabricar la cuchilla de corte en el LABTAM	5	CP				
Obtener un rendimiento de 1000 kg/h	3				CP	
Obtener características del material en cuanto a resistencia para el trabajo	4				CP	
Número de veces que la cuchilla hace contacto con el neumático	3	CP				
Adaptación a geometría de ejes convencionales	5					CP
Aptas para trituración de tamaño de neumático de rin de 16"	5					CP
COSTE						
Grosor del acero de 1"	5	CP				
Bajo coste de fabricación	5		CP			
Bajo coste de operación	3			CP		
Bajo coste de mantenimiento	3			CP		
FABRICACIÓN						
Diseño sencillo, práctico y eficiente	4				CP	
Facilidad de replicar	4			CP		
Capacidad de producción en el LABTAM	5	CP				

MEDIOAMBIENTALES						
Sin contaminación para el medio ambiente, ni existir impacto negativo al medio ambiente.	4				CP	
Capacidad de reúso del material	3			CP		

En la etapa anterior, se identificaron los aspectos generales de los competidores principales, a continuación, se presentan las características técnicas en cuanto al funcionamiento según necesidades específicas asociados con la operación, fabricación y coste.

-Características técnicas asociadas a los requerimientos

Se especificaron las características técnicas de acuerdo a los requerimientos del cliente. Se identificaron para cada una de las necesidades del cliente (“qué”) una o más características de calidad (“como”). Las características se agruparon como se muestra a continuación y en la Tabla 4 se ponderan “+”, “-“ o “=” según mayor, menor o igual mejora:

-Características operativas:

- Geometría de la cuchilla de corte
- Capacidad de trituración de 1000kg/h
- Propiedades del material
- Viabilidad de fabricación por maquinaria existente
- Espesor resultante en conjunto de las cuchillas para el ingreso de neumáticos de 16”

-Características sobre fabricación:

- Tiempo de preparación de maquinaria de control numérico
- Tiempo de réplica de las piezas a fabricar

-Características sobre costes:

- Precio de acero de espesor de 1”
- Precio de corte de placas para preparación pre-maquinado
- Coste de mano de obra baja

Tabla 4. Características técnicas asociadas a los requerimientos.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS ASOCIADAS A LOS REQUERIMIENTOS									
+	+	=	-	-	=	+	+	=	-
OPERACION					FABRICACION		COSTES		
Geometría de la cuchilla de corte	Capacidad de trituración de 1000kg/h	Propiedad del material	Viabilidad de fabricación por maquinaria existente	Espesor resultante en conjunto de las cuchillas para el ingreso de neumáticos de 16”	Tiempo de preparación de maquinaria de control numérico	Tiempo de réplica de las piezas a fabricar	Precio de acero de espesor de 1”	Precio de corte de placas para preparación pre-maquinado	Coste de mano de obra baja

Se definió el grado de satisfacción, a través de las relaciones entre las necesidades del cliente y las características técnicas asociadas a estas. Se emplearon valores de 5,3,1, asociando el mayor valor a las relaciones más fuertes.

A continuación, se muestran las características técnicas utilizadas en la Tabla 5.

1. Geometría de la cuchilla de corte
2. Capacidad de trituración de 1000kg/h
3. Propiedades del material

4. Viabilidad de fabricación por maquinaria existente
5. Espesor resultante en conjunto de las cuchillas para el ingreso de neumáticos de 16”
6. Tiempo de preparación de maquinaria de control numérico
7. Tiempo de réplica de las piezas a fabricar
8. Precio de acero de espesor de 1”
9. Precio de corte de placas para preparación pre-maquinado
10. Coste de mano de obra baja

Tabla 5. Prioridad resultante de la asociación entre necesidades y características técnicas.

TABLA DE REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		CARACTERISTICAS TÉCNICAS										
FUNCIONAMIENTO		Prioridad										
Maquinar/fabricar la cuchilla de corte en el LABTAM	5	5	1	3	5		1	1				
Obtener un rendimiento de 1000 kg/h	3	5	5	1								
Obtener características del material en cuanto a resistencia para el trabajo	4	1	1	5	3			1				
Número de veces que la cuchilla hace contacto con el neumático	3	5	5	5	5	5	1				1	
Adaptación a geometría de ejes convencionales	5	5	3		5	5		5				
COSTE												
Grosor del acero de 1”	5	5	3	3	5	5		5	5	1	3	
Bajo coste de fabricación	5	3	3	5	5	3		3	5		5	
Bajo coste de operación	3	5	3	3	5	1	3	3	3	1	5	

Bajo coste de mantenimiento	3	3	3	3	3	5		1	3		3
FABRICACIÓN											
Diseño sencillo, práctico y eficiente	4	5	5	1	5	3	1	3	1	1	1
Facilidad de replicar	4	5	3	3	5	5	1	5	1	3	3
Capacidad de producción en el LABTAM	5	3	5	3	5	3	3	5	3	3	3
MEDIOAMBIENTALES											
Sin contaminación para el medio ambiente, ni existir impacto negativo al medio ambiente.	4	3	3		1	1	1	3	1	1	
Capacidad de reúso	3	5	3		3	1	3	3	1	1	

A continuación, se presentan las relaciones con respecto a las características técnicas, las cuales son:

1. Geometría de la cuchilla de corte
2. Capacidad de trituración de 1000kg/h
3. Propiedades del material
4. Viabilidad de fabricación por maquinaria existente
5. Espesor resultante en conjunto de las cuchillas para el ingreso de neumáticos de 16"
6. Tiempo de preparación de maquinaria de control numérico
7. Tiempo de réplica de las piezas a fabricar
8. Precio de acero de espesor de 1"
9. Precio de corte de placas para preparación pre-maquinado
10. Coste de mano de obra baja

Las características anteriores se relacionan entre sí como se muestra en la Figura 14. Estas se consideran para tomar en cuenta en el sentido de la mejora para cada una de las características. En ella se observan las diez características tanto en el eje “x” como en el “y”, donde las relaciones positivas (determinadas por su ubicación en la parte superior del número de característica del eje “y”) y negativas (determinadas por su ubicación en la parte inferior del número de característica del eje “y”) otorgan un sentido de mejora para cada una.

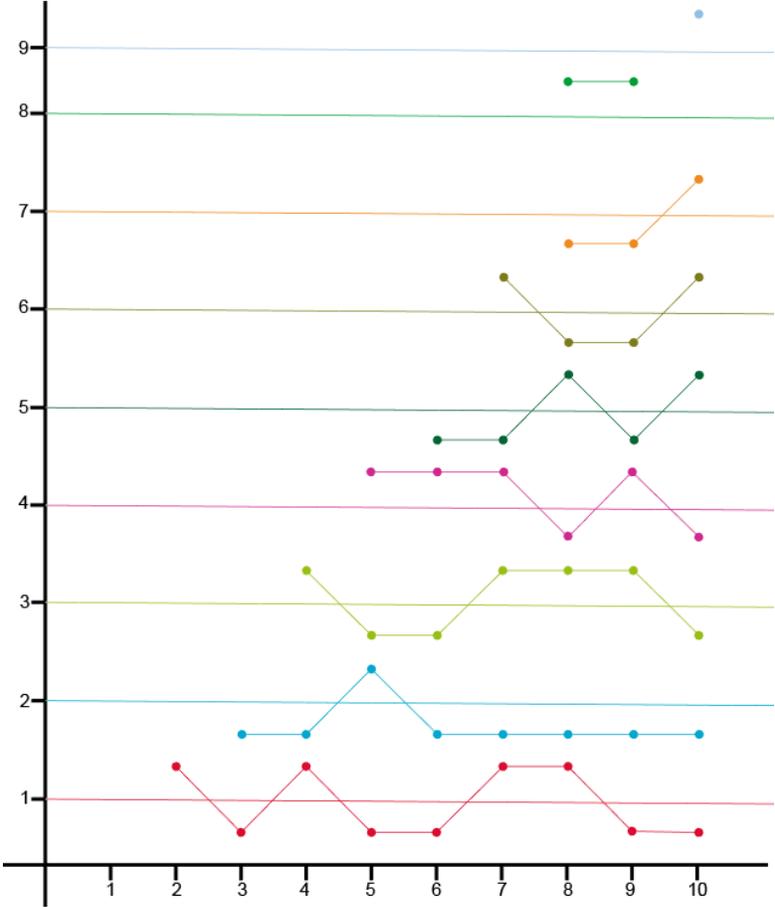


Figura 14. Relación entre las características técnicas.

De acuerdo a los datos presentados y tomando en cuenta el sentido de mejora en cada rubro, se determinaron las características principales de la cuchilla de corte

propuesta dadas por su correlación y los aspectos considerados en tema de fabricación, coste, funcionamiento, e impacto ambiental en comparación con los competidores principales (CP) otorgados por una ponderación, lo que la hace viable y cumple con los requerimientos del cliente. Siendo los siguientes:

- Geometría de corte de la cuchilla y la capacidad de trituración de 1000 kg/h, dado que el elemento propuesto posee 4 filos en comparación de 1, lo cual eficiente el proceso de corte al existir un corte en espacios de longitud y tiempo mínimos.
- Los competidores principales, utilizan espesores para este elemento de 1 ½” lo que en comparación de la propuesta de 1” resulta más tiempo de manufactura y por lo tanto más costoso.
- Dadas las dimensiones en cuanto a área el LABTAM es capaz de realizar el maquinado dentro del área de trabajo del centro de maquinado CNC, y en cuanto al espesor es también viable realizar la fabricación por medio de corte con plasma, teniendo este como corte máximo a 1” de profundidad.
- Al optar por la fabricación de las cuchillas mediante corte con plasma resulta viable la réplica de la pieza de manera rápida y eficiente.

3.2 Diseño de componentes del sistema de corte de una trituradora de neumáticos y aspectos principales

El diseño de los componentes fundamentales de un triturador de neumáticos, se enfocó para este proyecto en el sistema de corte, siendo específicamente las cuchillas de corte y los ejes de transmisión se utilizó la metodología antes planteada y la implementación del QFD.

A continuación, se plantea la determinación de datos principales que se utilizarán posteriormente en las cuchillas de corte y el árbol de transmisión, como son el torque producido por cada neumático y la fuerza de cizallamiento necesaria obtenida, a partir de información rescatada basada en un ensayo de desgarro de probeta tipo pantalón.

Para comenzar, es necesario tomar en cuenta el torque producido por cada neumático, se calculó partiendo de la siguiente fórmula la cual se aplicó más adelante:

$$T = F \times d \text{ [Nm]}$$

$$T = \frac{F_{\text{cizalla}}}{A_{\text{cuchilla}}} \times V_{\text{neumático}}$$

Donde:

- F=Fuerza de cizalla (N)
- d= distancia al eje de giro (m)
- V= volumen del neumático (m³)
- A= Área de la cuchilla (m²)

-Ensayo de desgarro

El ensayo de desgarro para el caucho vulcanizado consiste en la aplicación de un esfuerzo de tracción, para esto es necesario usar una probeta de tipo halterio o de anillo [27], estas probetas estandarizadas son estiradas mediante una máquina para ensayos de tensión, con una velocidad constante de la mordaza sujetadora; en este tipo de ensayos se registran valores con relación a la fuerza y la elongación en una prueba ininterrumpida y a la rotura de la misma. En esta probeta tipo halterio la zona central se encuentra curvada, otorgando la posibilidad que en su lado cóncavo se realice una hendidura con una profundidad conocida y se coloque posteriormente esta probeta en un dinamómetro. El área de aplicación de la carga, en centímetros cuadrados, en la que tiene lugar la rotura se toma como índice de la resistencia al desgarro de la mezcla ensayada. Para este tipo de ensayo, es importante la forma, profundidad y dirección en que se realiza el corte, ya que estos factores influyen de forma decisiva en los valores en que se propaga en la probeta. A continuación, en la Figura 15 se muestra la forma de la probeta tipo halterio.

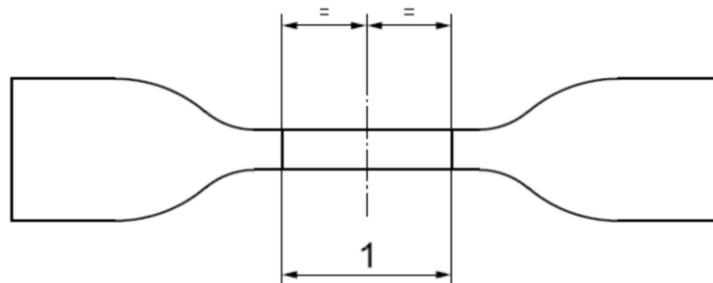


Figura 15. Forma de probeta tipo halterio [27].

-Probeta tipo pantalón

La norma ISO 34-1 (ISO 34-1-Caucho vulcanizado o termoplástico - Determinación de la resistencia al desgarro) [28] es aplicada para investigar las propiedades mecánicas del caucho vulcanizado o termoplástico. Se especifican tres métodos alternativos que permiten el uso de probetas de ensayo de tipo pantalón, ángulo o medialuna. En todos los casos, la fuerza se aplica al material en una dirección de tracción y se calcula un valor para el esfuerzo de desgarramiento.

Las probetas se preparan a partir de láminas, por lo general de 2 mm de grosor, utilizando una prensa de corte y troquelado. El perfil del troquelado debe coincidir con las dimensiones de la probeta identificadas en la norma para la probeta de ensayo relevante. En el caso de las probetas de ensayo de tipo pantalón y medialuna, y opcionalmente para las probetas de ensayo tipo ángulo, también es necesario producir un corte o una ranura en la probeta de ensayo antes del inicio del ensayo. Además, se requiere un método para comprobar las dimensiones de la ranura, por ejemplo, un microscopio óptico.

Según el ensayo de desgarro [29] de la probeta tipo pantalón, la fuerza interna que desarrolla el cuerpo como respuesta a la fuerza cortante y tangencial a la superficie sobre la que actúa, es decir, la fuerza de cizallamiento es igual a 558.91 N, que dividida entre el área de aplicación da el esfuerzo cortante (τ). Posteriormente se procede a calcular el área de la cuchilla tomando como referencia límites, siendo el

valor mínimo del diámetro interior 100 mm y como máximo el diámetro exterior de 300 mm, por lo tanto:

Tomando en cuenta los diámetros según la cuchilla propuesta, se tiene:

$$\text{Diámetro}_{\text{exterior}} = 286 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro}_{\text{interior}} = 155 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el área de la cuchilla tomada por el software Solidworks® es:

$$A = 0.028692 \text{ m}^2$$

Ahora, para calcular el volumen (V) del neumático se partió de lo siguiente [15]:

$$\rho_{\text{neumático}} = 930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{\text{neumático}} = 45.4 \text{ kg}$$

Entonces:

$$V = \frac{m_{\text{neumático}}}{\rho_{\text{neumático}}}$$

$$V = \frac{45.4 \text{ kg}}{930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 0.048817204 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, el torque (T) se calculó:

$$T = \left[\frac{\text{Fuerza de cizalla}}{\text{Área de cuchilla}} \right] \times V_{\text{neumático}}$$

$$T = \left[\frac{558.91 \text{ N}}{0.028692 \text{ m}^2} \right] \times [0.048817204 \text{ m}^3]$$

Obteniéndose

$$T = 950.94184 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, el torque máximo generado en los dos ejes y tomando en cuenta las 36 (incluido los dos ejes de transmisión) cuchillas que soporta el sistema de transmisión se tiene:

$$T_{\max} = (950.94184 \text{ Nm} \times 36)$$

$$T_{\max} = 34233.90 \text{ Nm}$$

3.2.1 Diseño y simulación de cuchillas de corte

Por el tipo de material que ingresará a la trituradora, se propone que el mecanismo de trituración sea de dos ejes horizontales accionados por un motor, recomendación de los fabricantes de este tipo de dispositivos [30]. Se empleó el software SolidWorks®, con el que se diseñaron los componentes del sistema de corte de una trituradora con las especificaciones dimensionales adecuadas al neumático de rin de 16 pulgadas.

Una de las partes fundamentales de la trituradora es el sistema de corte, en donde toma en cuenta las cuchillas.

En la Figura 16 se presenta el modelo de las cuchillas para el corte, dimensiones y detalles. Estos elementos tienen un diámetro máximo de 286 mm, un diámetro interior de 155 mm, el cual tendrá una inclinación de 20° en 20° para cada cuchilla y un espesor de 25.4 mm. (ANEXO 1).

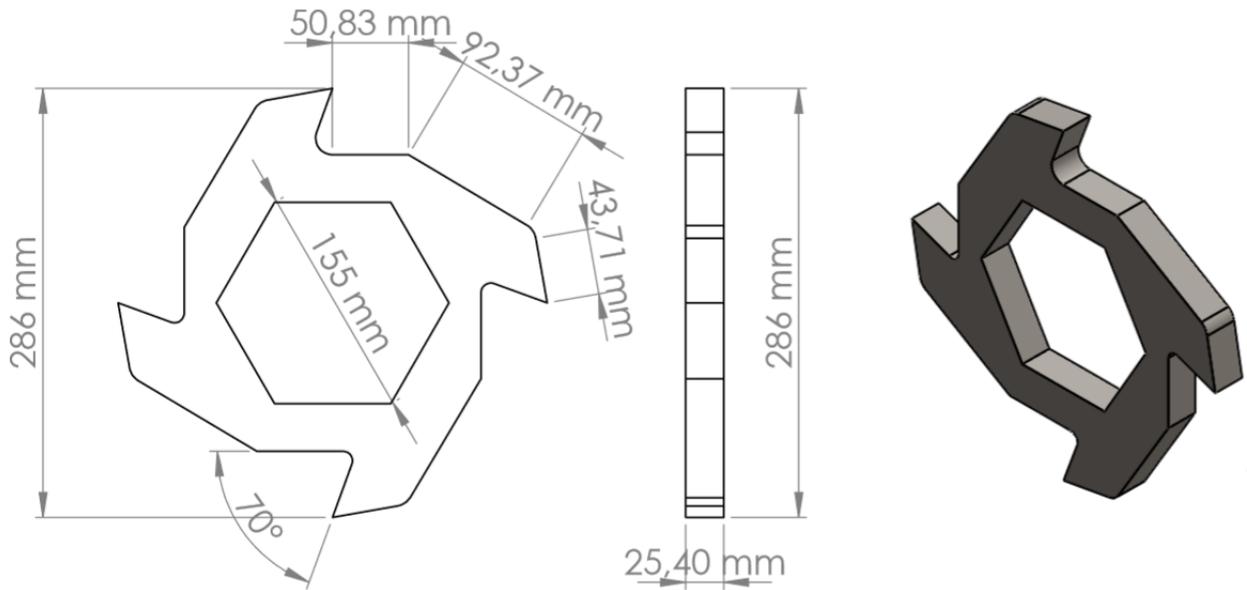


Figura 16. Propuesta de geometría y dimensiones de las cuchillas de corte.

3.2.1.1 Selección del material

Se seleccionó un acero SAE 1045 [31]. Este presenta una ventaja con respecto a los aceros de baja aleación: su bajo costo. Éste es un acero grado ingeniería de aplicación universal, el cual proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad. A continuación, se presentan algunas de sus características principales:

- Es un acero de baja templabilidad el cual puede ser endurecido dependiendo el espesor deseado; para los espesores delgados el temple es al agua y para espesores más gruesos el endurecimiento es por secciones, en donde el incremento de la resistencia es proporcional a la capa o espesor endurecido. Al ser enfriado e incrementar la dureza y la resistencia mecánica, resulta un material adecuado para el trabajo de trituración.

- Éste acero puede ser mecanizado en estado recocido, normalizado o templado, presentando los siguientes porcentajes de maquinabilidad: 55% en estado calibrado y 68 – 70% en estado recocido.
- El acero SAE 1045 está cerca al límite superior de aceros con porcentaje de carbono que pueden ser soldados satisfactoriamente por todos los métodos comunes. Sin embargo, el precalentamiento y post calentamiento pueden ser necesarios en función del espesor.

Para el diseño de las cuchillas, fue importante tomar en cuenta el modelo de corte ortogonal, mostrado gráficamente en la Figura 17 y la ecuación de Merchant para obtener los valores de la fuerza de empuje y la fuerza de corte que intervienen en el proceso de trituración.

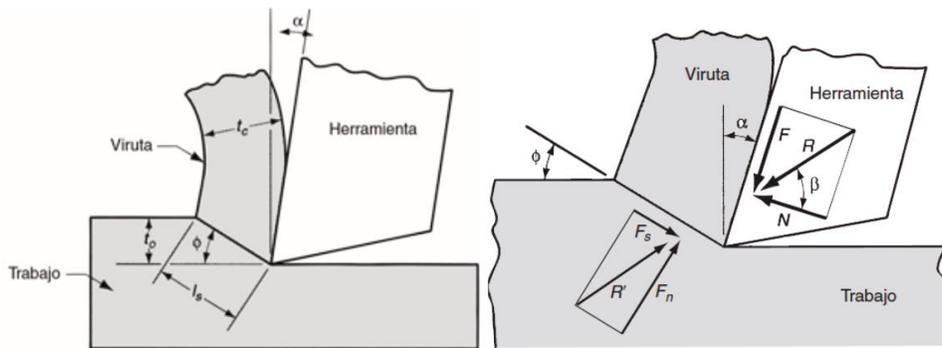


Figura 17. Corte ortogonal a dos dimensiones en vista lateral [32].

Donde:

- α = Dirección en la que fluye la viruta formada por la pieza de trabajo
- l_s = Longitud del plano de corte
- t_o = Espesor de la viruta antes de la deformación

- t_c = Espesor aumentado de la viruta después del corte

Después, se calculó la relación del grueso de la viruta (r) tomando en cuenta el grosor de viruta esperado mediante:

$$r = \frac{t_o}{t_c}; \text{ suponiendo que } t_o= 15 \text{ mm y } t_c= 20 \text{ mm:}$$

$$r = \frac{15}{20}; \quad r = 0.75$$

Con el modelo de corte ortogonal se estableció una relación entre espesor de viruta, ángulo de inclinación y ángulo del plano del corte; sustituyendo $t_o=l_s \text{Sen} \emptyset$ y $t_c= L_s \text{Cos}(\emptyset-\alpha)$. Agrupándolo se determinó el valor del plano de corte \emptyset mediante:

$$\tan \emptyset = \frac{r \text{Cos } \alpha}{1-r \text{Sen } \alpha}; \text{ Suponiendo el ángulo de inclinación de } 20^\circ$$

$$\tan \emptyset = 0.947927; \text{ por lo tanto: } \emptyset= 43.46^\circ$$

Con base en la fuerza cortante (F_s) se definió el esfuerzo cortante, el cuál actúa a lo largo del plano de corte, el trabajo y la viruta:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s}$$

Posteriormente se definió el área de plano de corte, donde A_s es el área del plano de corte, ésta se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$A_s = \frac{t_o W}{\text{Sen } \emptyset}; \text{ donde } W \text{ es el espesor de la cuchilla}$$

$$A_s = \frac{(15\text{mm})(25.4\text{mm})}{\text{Sen } 43.46^\circ} \text{ por lo tanto; } A_s= 553.9014 \text{ mm}^2$$

Este esfuerzo [15] es igual a la resistencia cortante del material de trabajo ($T = S$) en las condiciones en las que ocurre el corte. Partiendo de los datos de la resistencia a la tensión podemos definir una aproximación de la resistencia del material a la cortante S:

$$S=0.7(T S)$$

$$S=17.5 \text{ MPa}; S=17.5 \text{ N/mm}^2$$

Entonces, partiendo de lo anterior que $T = S$, se halló que a F_s :

$$F_s= T \times A_s$$

$$F_s=553.9014 \text{ mm}^2 \times 17.5 \text{ N/mm}^2$$

$$F_s= 9693.2745 \text{ N}$$

Con la ecuación de Merchant, se calculan los ángulos presentes en el corte ortogonal, esto mediante la siguiente ecuación:

$$\phi = 45^\circ + \alpha/2 - \beta/2$$

Entonces despejando, se calculó a β , el ángulo de fricción el cuál interviene en las ecuaciones posteriores para el cálculo de la fuerza de corte y de empuje:

$$\beta = 2(45 + \alpha/2 - \phi)$$

$$\beta = 2(45 + 20/2 - 43.46^\circ)$$

$$\beta = 23.08^\circ$$

Es importante tomar en cuenta la fuerza de corte (F_c) que va en la dirección del corte siendo la misma dirección de la velocidad del corte y la de empuje (F_t) que es perpendicular a la fuerza de corte y se encuentra asociada con el espesor de la viruta; las cuales estarán presentes en las cuchillas, relacionándose con la resistencia al corte del material como se muestra a continuación. Partiendo de la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{F_s \cos(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)}$$

$$F_c = \frac{9693.2745 \text{ N} \cos(23.08 - 20)}{\cos(43.46 + 23.08 - 20)}$$

$$F_c = 14071.818801 \text{ N}$$

De igual forma se encontró el valor de la fuerza de empuje F_t :

$$F_t = \frac{F_s \sin(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)}$$

$$F_t = \frac{9693.2745 \text{ N} \sin(23.08 - 20)}{\cos(43.46 + 23.08 - 20)}$$

$$F_t = 757.176158 \text{ N}$$

A continuación, en la Figura 18 se muestran las fuerzas de corte (F_c), fuerza de empuje (F_t) y el peso de la misma (g). Éstos valores fueron introducidos en el software Solidworks® para su simulación estática.

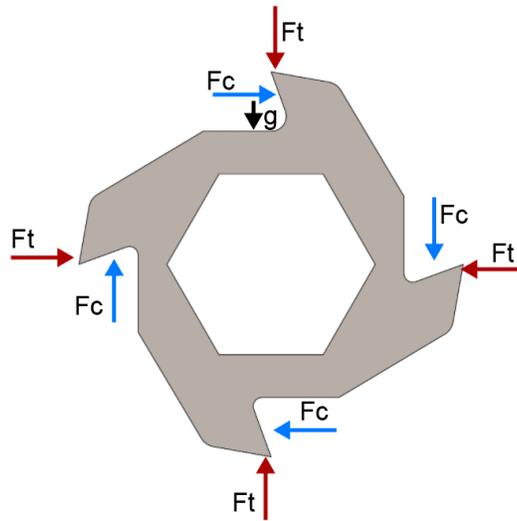


Figura 18. Distribución de fuerzas de corte, empuje y peso en la cuchilla.

3.2.1.2 *Peso de las cuchillas*

Ya que el árbol de transmisión está compuesto de 18 cuchillas por cada eje, se obtuvo la masa total de los 18 elementos. Lo que resultó en 102.9744 kg como la masa total correspondiente a las cuchillas. Éste valor se obtuvo mediante la aplicación de dimensiones y material en el software Solidworks.

3.2.1.3 *Simulación del sistema de corte*

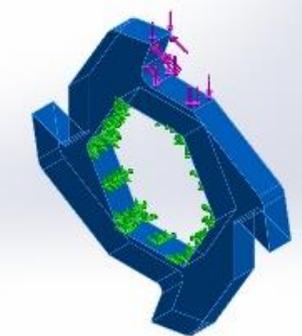
El material que fue empleado para la simulación es el acero AISI-SAE 1045, añadiéndose fuerzas de corte, de empuje y peso respectivamente.

A continuación, se muestra el estudio estático aplicado a una cuchilla del sistema de corte, en donde se simulan la fuerza de corte, fuerza de empuje y la fuerza de cizalla definidos anteriormente.

Se realizaron dos simulaciones tomando en cuenta las propiedades del material como se muestra en la Tabla 6, para poder observar el comportamiento de tensión y desplazamiento de la cuchilla.

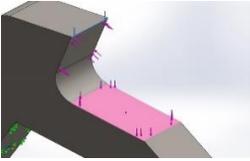
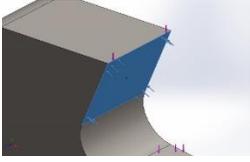
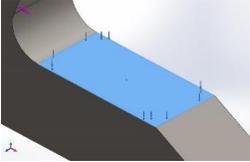
Para la primer simulación del análisis estático se aplicaron las fuerzas de corte y de empuje calculadas, siendo $F_c = 14071.818801 \text{ N}$ y $F_t = 757.176158 \text{ N}$, de igual forma agregando el peso propio de la cuchilla, siendo de 56.1219132 N , como se muestra a continuación.

Tabla 6. Propiedades del material de la cuchilla de corte.

Referencia de modelo	Propiedades
	<p>Nombre: AISI 1045 Acero estirado en frío</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Límite elástico: 5.3e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 6.25e+008 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2.05e+011 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.29</p> <p>Densidad: 7850 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 8e+010 N/m²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1.2e-005 /Kelvin</p>

En la Tabla 7, se muestran los detalles de las cargas aplicadas en dos diferentes caras de la pieza, tomando en cuenta el material aplicado, un acero AISI 1045 mediante el software Solidworks®.

Tabla 7. Detalle de cargas aplicadas por arista y por cara.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 arista(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: 757.176 N
Fuerza-2		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 14071.8 N
Fuerza-3		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 56.1219 N

A continuación, se muestra el informe del estudio de estático, obteniendo resultados del Criterio de la distorsión de Energía o de Von Mises y de desplazamientos debido a las cargas aplicadas.

El problema para deducir las relaciones matemáticas para predecir las condiciones a las cuáles la cedencia plástica inicia cuando un material es sometido a cualquier combinación posible de esfuerzos es una consideración importante en el campo de la plasticidad. En tensión uniaxial, el flujo plástico macroscópico inicia en el Y_S (yielding strength). Se espera que la cedencia bajo una situación de esfuerzos combinados pueda ser relacionada a alguna combinación particular de esfuerzos principales. Actualmente no existe una forma teórica de calcular la relación entre los componentes del esfuerzo para correlacionar la cedencia para un estado tridimensional de esfuerzos con la cedencia en tensión uniaxial. Los criterios de

cedencia son esencialmente relaciones empíricas. Sin embargo, un criterio de cedencia debe ser consistente con un número de observaciones experimentales, la principal de las cuales es que la presión hidrostática pura no causa cedencia en un sólido continuo. Como resultado de esto, el componente hidrostático de un estado complejo de esfuerzos no influye en el esfuerzo en el que la cedencia ocurre. Por lo tanto, se plantea el “desviador de esfuerzo” para involucrarlo en la cedencia. Además, para un material isotrópico, el criterio de cedencia debe ser independiente de la elección de los ejes, por ejemplo, debe ser una función invariante. Estas consideraciones conducen a la conclusión que el criterio de cedencia debe ser alguna función de los invariantes del desviador de esfuerzo. Actualmente hay dos criterios generalmente aceptados para predecir el inicio de la cedencia en los materiales dúctiles: 1) Criterio de la Distorsión de Energía o de Von Mises y 2) Criterio de Tresca o del esfuerzo cortante máximo.

-Teoría de Distorsión de energía o de Von Mises

La teoría establece [33] que “la falla se producirá cuando la energía de distorsión por unidad de volumen debida a los esfuerzos máximos absolutos en el punto crítico sea igual o mayor a la energía de la distorsión por unidad de volumen en una probeta de ensayo de tensión en el momento de producirse la fluencia”.

La teoría de la energía de la distorsión o de Von Mises se origina debido a que se comprobó que los materiales dúctiles que son sometidos a esfuerzos hidrostáticos presentan resistencia a la fluencia y que se encuentran por encima de los valores resultantes de ensayos de tensión simple, entonces la fluencia no era un fenómeno

relacionado con la tensión y compresión simples, si no que estaba relacionado con la distorsión angular del elemento esforzado.

La teoría de Von Mises dice que la distorsión de un elemento se debe a esfuerzos principales restándoles los esfuerzos hidrostáticos, entonces la energía de distorsión resulta de la diferencia entre la energía total de deformación por unidad de volumen y la energía de deformación por unidad de volumen debida a los esfuerzos hidrostáticos como se muestra en la Figura 19.

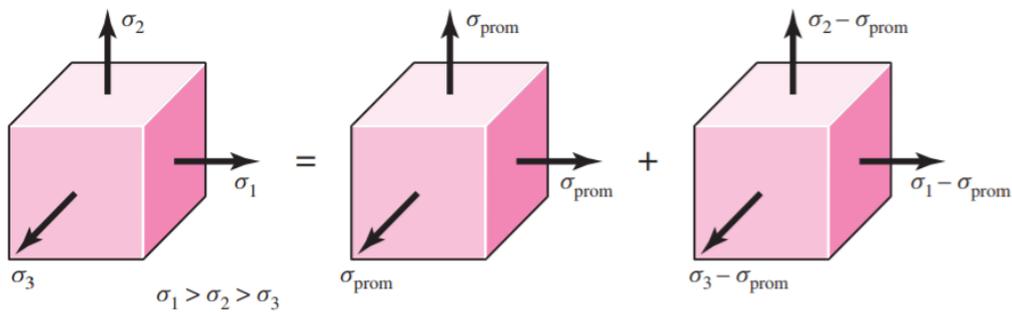


Figura 19. Esfuerzos triaxiales = Componente hidrostático + Componente de distorsión [33].

Finalmente, el esfuerzo de Von Mises se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

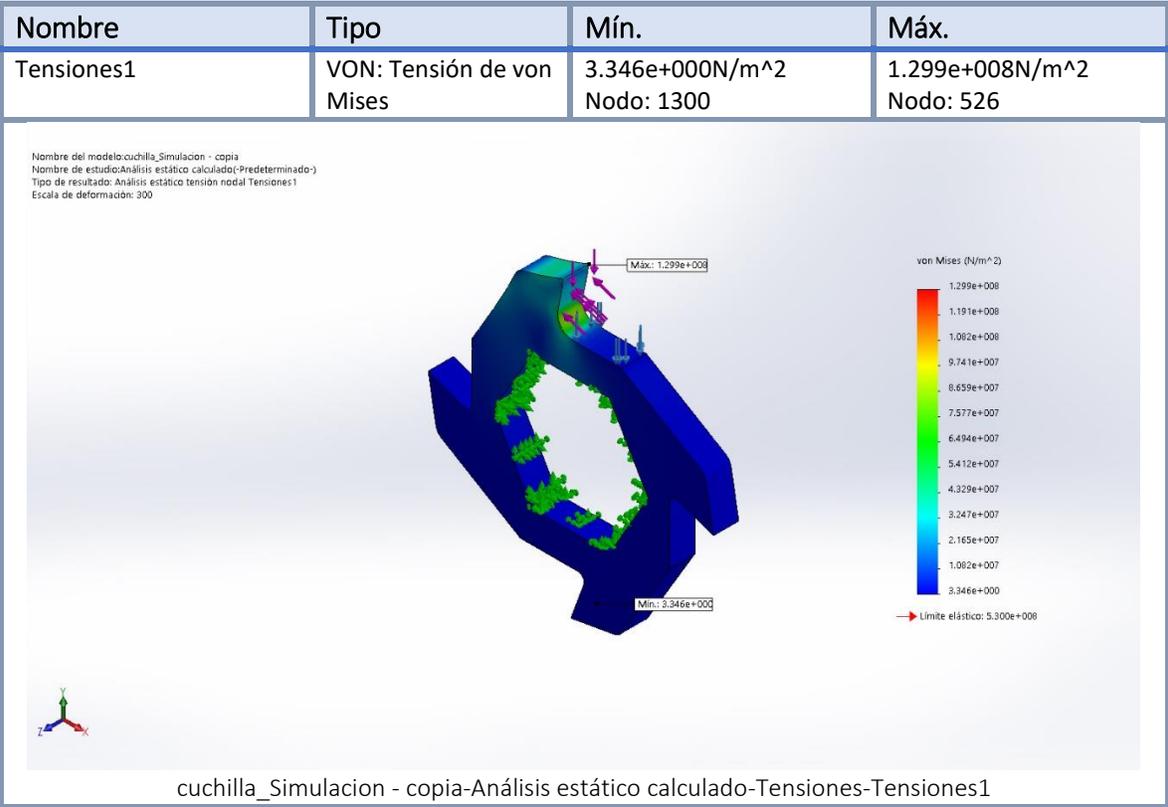
$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

En donde, si este valor resultante de Von Mises supera el límite elástico del material, se puede asegurar que este ha llegado a la zona de plástica y por lo tanto resultará la falla ocurriendo una deformación irreversible en el punto crítico de la pieza.

En la Tabla 8, se presenta el valor del criterio para la cedencia de Von Mises como resultado de las cargas aplicadas, cuyo valor máximo de $1.299 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ y el mínimo de 3.346 N/m^2 . Tomando en cuenta el límite elástico del material que es de $5.30 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, se puede considerar que la pieza, después de ser aplicadas las cargas, no mostrará deformaciones plásticas ya que se encuentra muy por debajo de dicho límite, y por lo tanto se asegura el funcionamiento de ésta.

A continuación, en la Tabla 9 se muestra el desplazamiento máximo que tiene la cuchilla y en qué área es más crítico, siendo en el filo de corte de la cuchilla y se observa etiquetado.

Tabla 8. Análisis estático de la cuchilla de corte con el criterio de Von Mises.

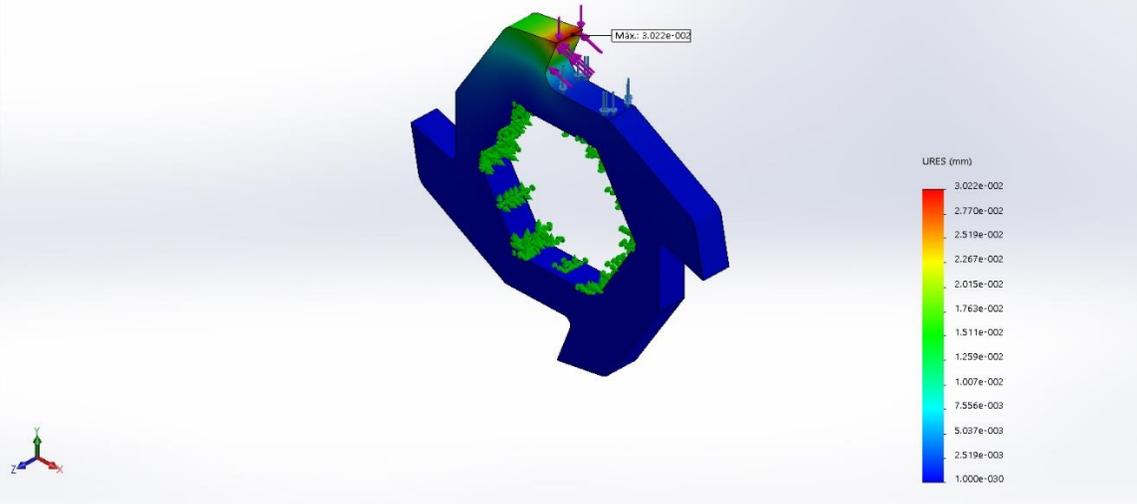


En la tabla 9, se muestra el desplazamiento máximo de la cuchilla de corte, localizado en el filo de la misma y según la escala de colores propuesta por el software, en donde el color rojo representa el desplazamiento máximo con un valor de 0.003 milímetros, lo que resulta despreciable, dado que la deformación como se menciona anteriormente se encuentra dentro de la zona elástica.

Tabla 9. Desplazamiento máximo y punto crítico de la cuchilla.

Nombre	Tipo	Mín.	Máy.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0.000e+000mm Nodo: 1571	3.022e-002mm Nodo: 81607

Nombre del modelo: cuchilla_Simulacion - copia
Nombre de estudio: Análisis estático calculado (Predeterminado)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 1

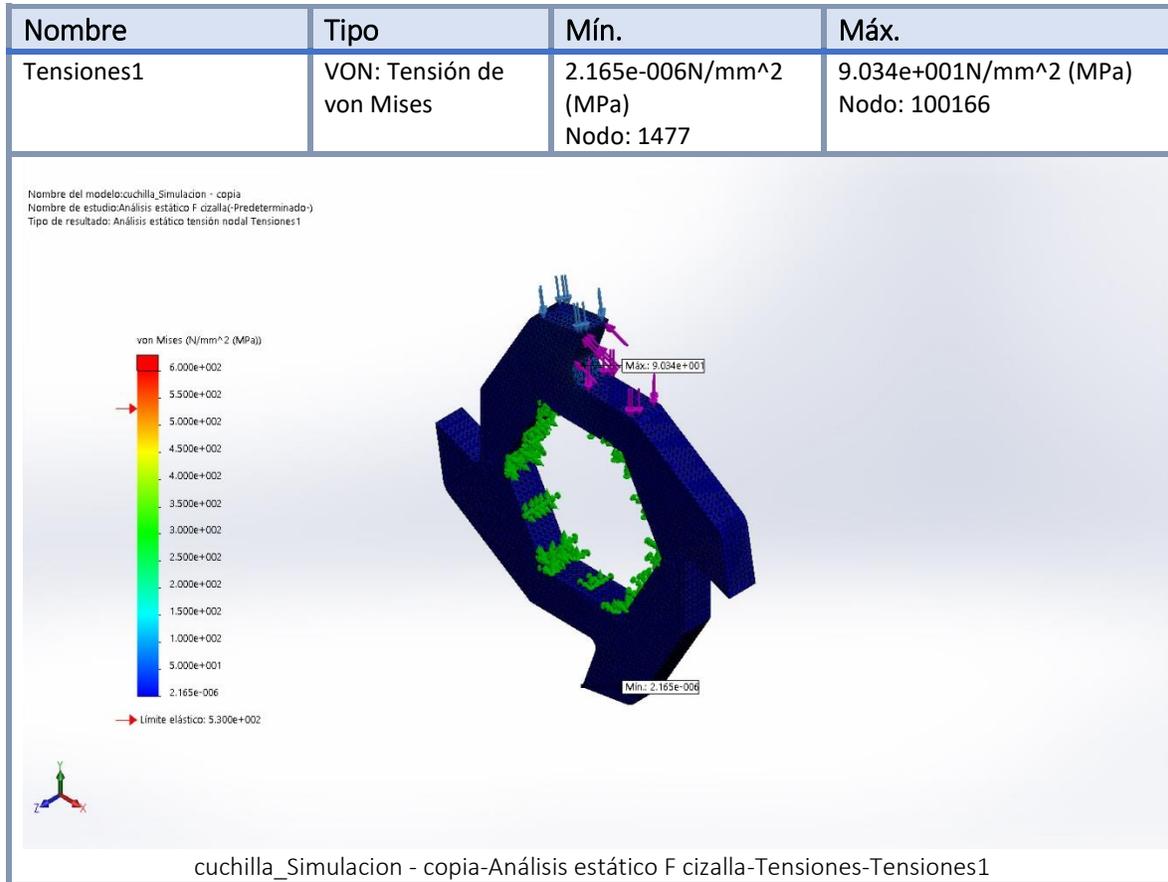


cuchilla_Simulacion - copia-Análisis estático calculado-Desplazamientos-Desplazamientos1

El análisis estático mostrado en la Tabla 10 se realizó siguiendo el mismo método que el anterior, con la diferencia que en este caso la fuerza de empuje es sustituida

por la fuerza de cizallamiento necesaria para el corte del neumático, es decir, simulando la carga en una situación real de triturado y siendo menor a la fuerza de empuje calculada y mostrada en el estudio estático anterior.

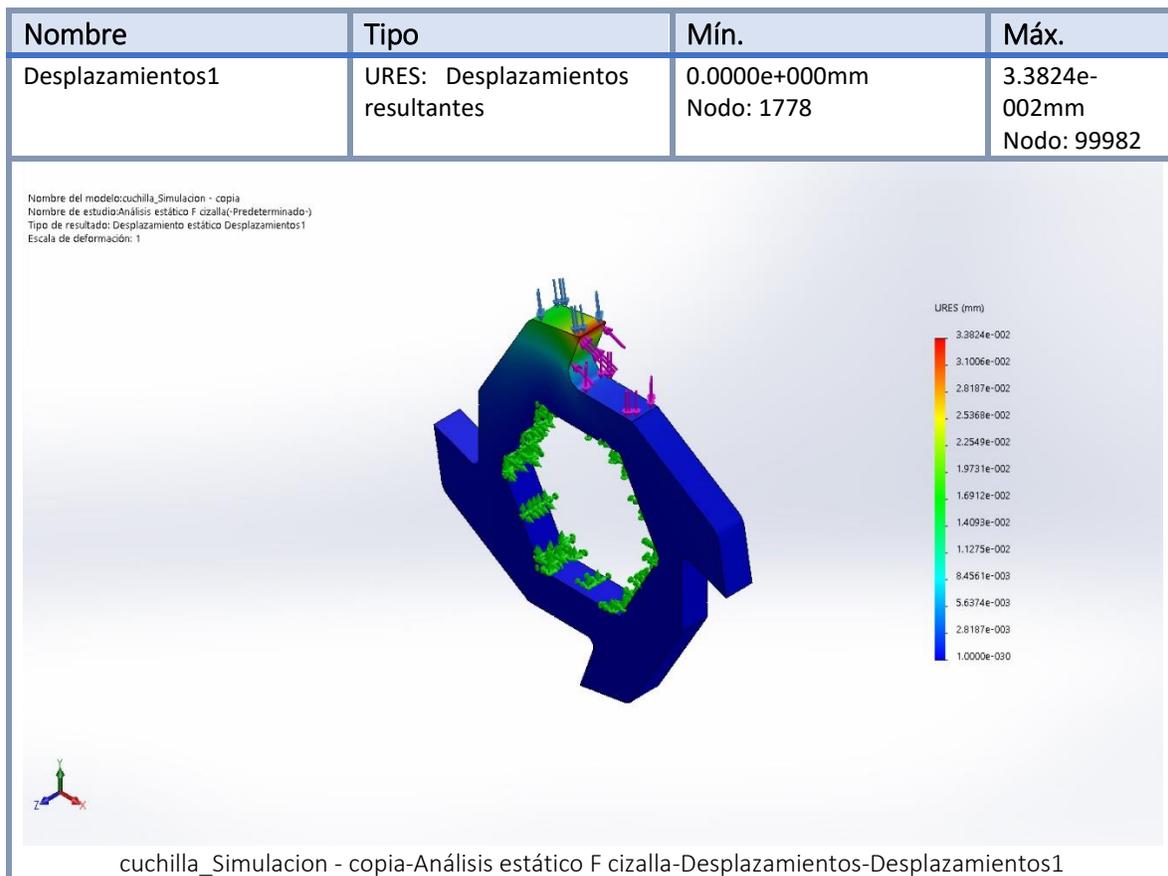
Tabla 10. Segundo análisis estático de la cuchilla de corte con el criterio de Von Mises.



Para este análisis, se obtuvo un valor de Von Mises máximo de 9.034e+001 N/mm² el cual se encuentra por debajo del límite elástico del material y de igual forma es menor al realizado en el estudio anterior lo que anuncia la certeza que no ocurrirá un fallo en la pieza.

En la Tabla 11, se muestra el desplazamiento máximo encontrado en el filo de corte de la cuchilla, el cual tiene un valor máximo de 0.03824 milímetros, lo que resulta también menor en comparación del análisis anterior. Por lo tanto, se puede asegurar el correcto funcionamiento en la aplicación de la trituración de neumáticos.

Tabla 11. Desplazamiento máximo en el filo de corte de la cuchilla.



El factor de seguridad es de suma importancia para el diseño de una pieza como la cuchilla, procurando un valor superior a 1. Para este caso, se obtuvo el factor de seguridad mediante los datos obtenidos en la simulación a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de Seguridad} = \frac{\text{Límite elástico del material}}{\text{Esfuerzo máximo de von Mises}}$$

$$\text{Factor de Seguridad} = \frac{530 \text{ N/mm}^2}{90.34 \text{ N/mm}^2}$$

El factor de seguridad para este caso es de 5.88, que al encontrarse por encima de 1 garantiza la eficiencia de la cuchilla de corte.

A continuación, en la Figura 20, se muestra la disposición de las cuchillas en los dos ejes de transmisión.

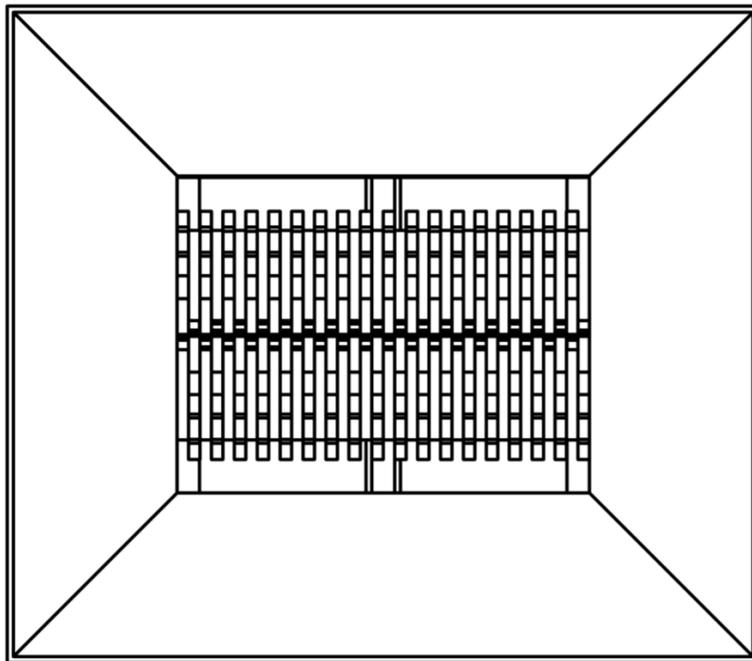


Figura 20. Disposición en vista superior del sistema de corte.

3.2.2 Árbol de transmisión

El árbol de transmisión se diseñó tomando en cuenta la geometría de las cuchillas, principalmente la forma hexagonal interna que es la de mayor uso por fabricantes de este tipo de elementos aunado con base en el QFD presentado se obtiene la geometría de carga de las cuchillas; y el material seleccionado para éstas, para ser verificado mediante simulaciones y posteriormente manufacturado.

3.2.2.1 Selección del material

Se propone utilizar un acero de baja aleación (0.6-0.8%Mn, 1.65-2.0%Ni y 0.7-0.9%Cr) y medio carbono (0.38-0.43%C) como lo es el SAE 4340 [34]. Este acero presenta una alta templabilidad, lo que facilita su forjado sin dificultar la maquinabilidad. La aplicación para este tipo de acero es en la industria automotriz, por ejemplo, para cigüeñales, engranes, ejes, semiejes, flechas de transmisión, etc., lo que resulta conveniente. Es el material recomendado por los fabricantes de trituradores [30].

3.2.2.2 Diseño del árbol de transmisión

En esta parte del documento se analizaron las fuerzas que actúan sobre el eje de transmisión de acuerdo a las fuerzas de corte y empuje calculadas en el diseño de las cuchillas, con el fin de verificar la viabilidad del diseño preliminar. Se propuso la aplicación de una catarina para transmitir la potencia del motor hacia el eje [35], en donde T es el torque al que se somete y D el diámetro de paso de la catarina.

$$F_c = \frac{T}{D/2}$$

Para la aplicación de la fuerza que actúa en la catarina, es necesario descomponer dicha fuerza en componentes paralelas a la línea entre centros y perpendicular a ella mediante las siguientes ecuaciones:

$$F_{cx} = F_c \text{Sen}\theta$$
$$F_{cy} = F_c \text{Cos}\theta$$

Donde la dirección "x" es paralela a la línea entre centros, la dirección "y" es perpendicular a ella y el ángulo θ es la inclinación del lado tenso de la cadena con respecto a la dirección "x".

Para el análisis siguiente, se propuso el eje como un elemento horizontal en el cuál actúan las fuerzas calculadas de una cuchilla, (propuesta para este estudio como un engrane), fuerzas de la catarina y las reacciones de dos apoyos en el eje. Este análisis con el fin de calcular los diámetros necesarios para cada sección del mismo. Se llevó a cabo partiendo de lo siguiente:

$$D = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{KM}{S'n}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{T}{Sy}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

- Kt: Concentración de esfuerzos producidos por variaciones geométricas, $k_t = 2.5$ para un chaflán agudo, $k_t = 1.5$ para un chaflán redondeado.
- N: Factor de diseño (Se utilizó un valor de 2, dado que en valores de 2 a 2.5 son los sugeridos para el diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas).
- S'n: Valor de resistencia a la fatiga del material.
- M: Momentos flexionantes.
- T: Torque al que se ve sometido el eje.
- Sy: Esfuerzo de fluencia.

Para el primer análisis, se tomaron en cuenta las fuerzas de las cuchillas calculadas anteriormente como fuerzas componentes aplicadas en el eje y visto como un engrane, siendo las fuerzas de corte ($14071.81 \text{ N} = 3163.28 \text{ lb}$) y la fuerza de empuje ($757.17 \text{ N} = 170.21 \text{ lb}$). Fueron consideradas como se muestra en el diagrama de la Figura 21.

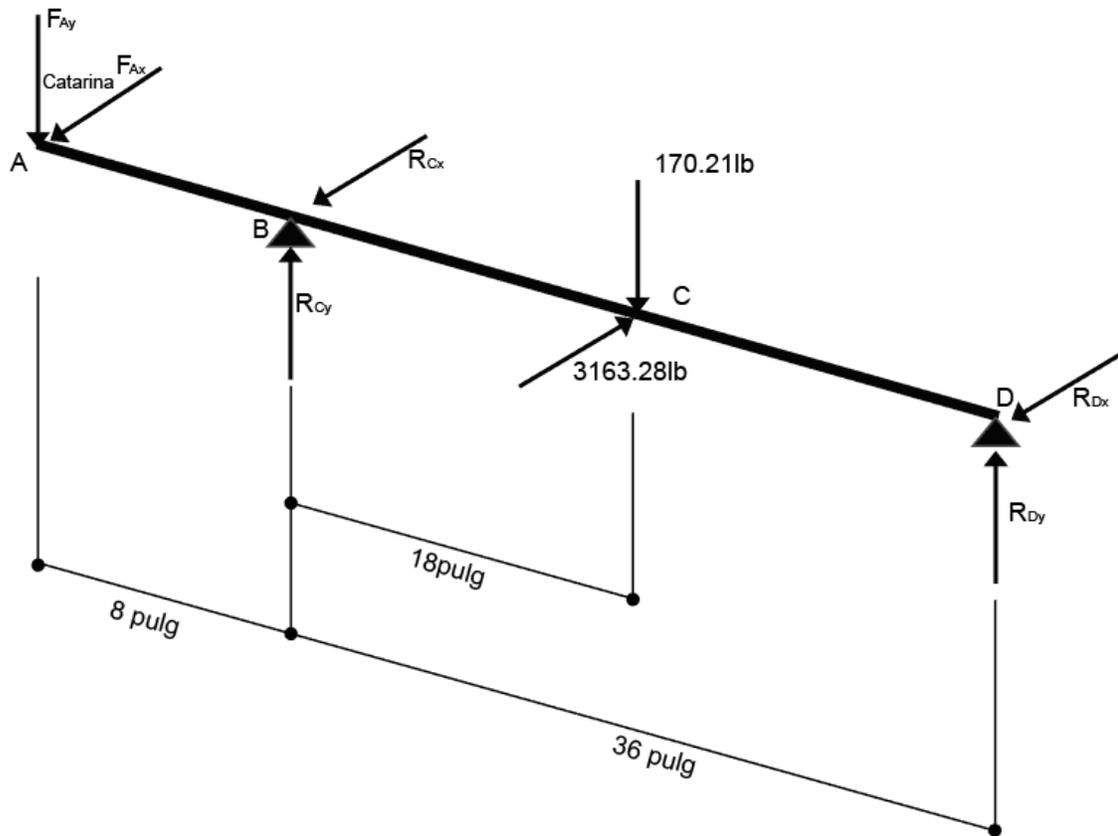


Figura 21. Diagrama de distribución de las fuerzas presentes en el eje.

Se aplicó el torque ya calculado de 950.94 Nm, siendo 8417.06 lb.pulg y se obtuvieron los valores de los componentes de la fuerza presente en la catarina, en este caso se utilizó 20 mm para el diámetro de paso, por ser un valor estandarizado para este tipo de aplicaciones y se propusieron 40° para la inclinación de la catarina.

$$F_c = \frac{T}{D/2}$$

$$F_c = \frac{8417.06 \text{ lb/pulg}}{20/2}$$

$$F_c = 841.706 \text{ lb}$$

$$F_{cx} = F_c \text{ Sen} \theta = 841.706 \text{ Sen} 40^\circ = 541 \text{ lb}$$

$$F_{cy} = F_c \text{ Cos} \theta = 841.706 \text{ Cos} 40^\circ = 644 \text{ lb}$$

Se calcula la resistencia a la fatiga del material según las propiedades presentadas por el acero SAE 4340. Fue necesario tomar en cuenta C_s (factor de tamaño) y C_r (factor de confiabilidad), asignado mediante factores de confiabilidad aproximados, en donde para una confiabilidad deseada de 0.999 el valor de C_r es de 0.75.

$$T = 8417.06 \text{ lb.pulg}$$

$$S_y = 101526 \text{ psi}$$

$$S_n = 18927.42 \text{ psi}$$

$$C_s = 0.75$$

$$C_r = 0.75$$

$$N = 2$$

Se calculó mediante lo siguiente, para posteriormente comenzar a analizar cada uno de los puntos en el eje:

$$S' n = S_n C_s C_r$$

$$S' n = (18927.42)(0.75)(0.75)$$

$$S' n = 11194.4 \text{ psi}$$

-Para el punto A

En el punto A, no se considera el momento flexionante, debido a que es cero ya que es un extremo libre del eje. Por lo tanto, se calcula el diámetro en A solo en términos de torsión como se muestra a continuación:

$$D_1 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_1 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{16834.12}{101506} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_1 = 1.43 \text{ pulg}$$

Posteriormente, para analizar el punto B del eje se realizaron diagramas de cortante y de momento flector en un plano horizontal (en dirección de "x") y un plano vertical (en dirección de "y"), como se muestran en las Figuras 22 y 23.

DIAGRAMAS PARA EJE EN COMPONENTE X

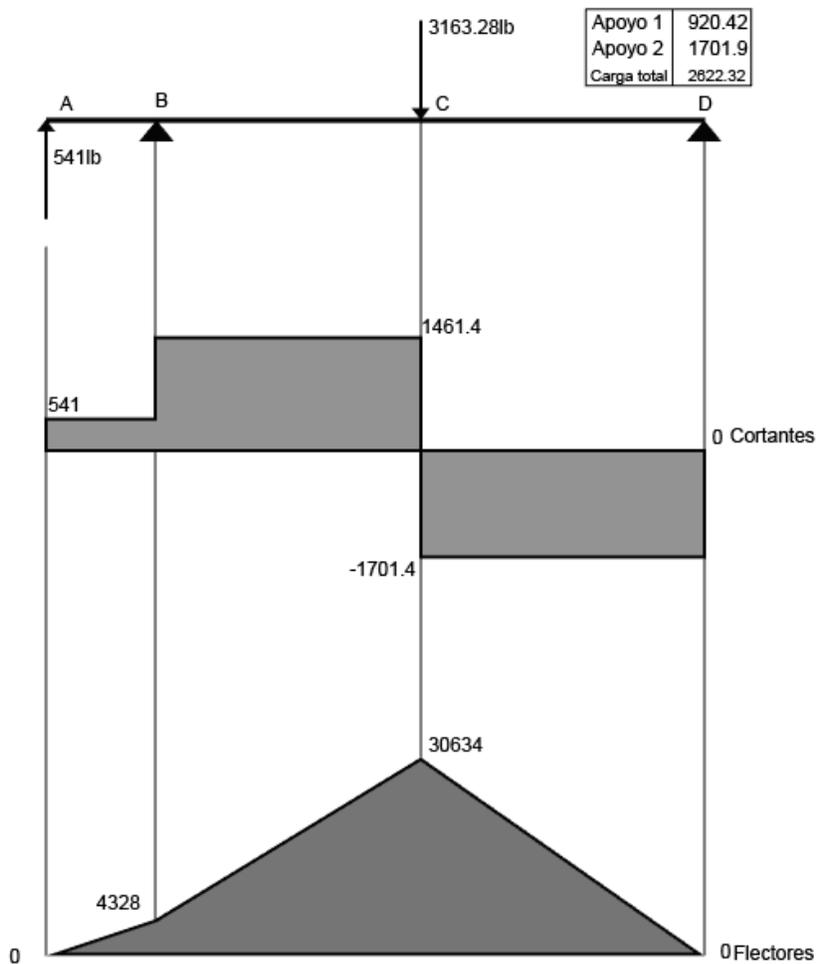


Figura 22. Diagrama de cortantes y momento flector en componente "x".

DIAGRAMAS PARA EJE EN COMPONENTE X

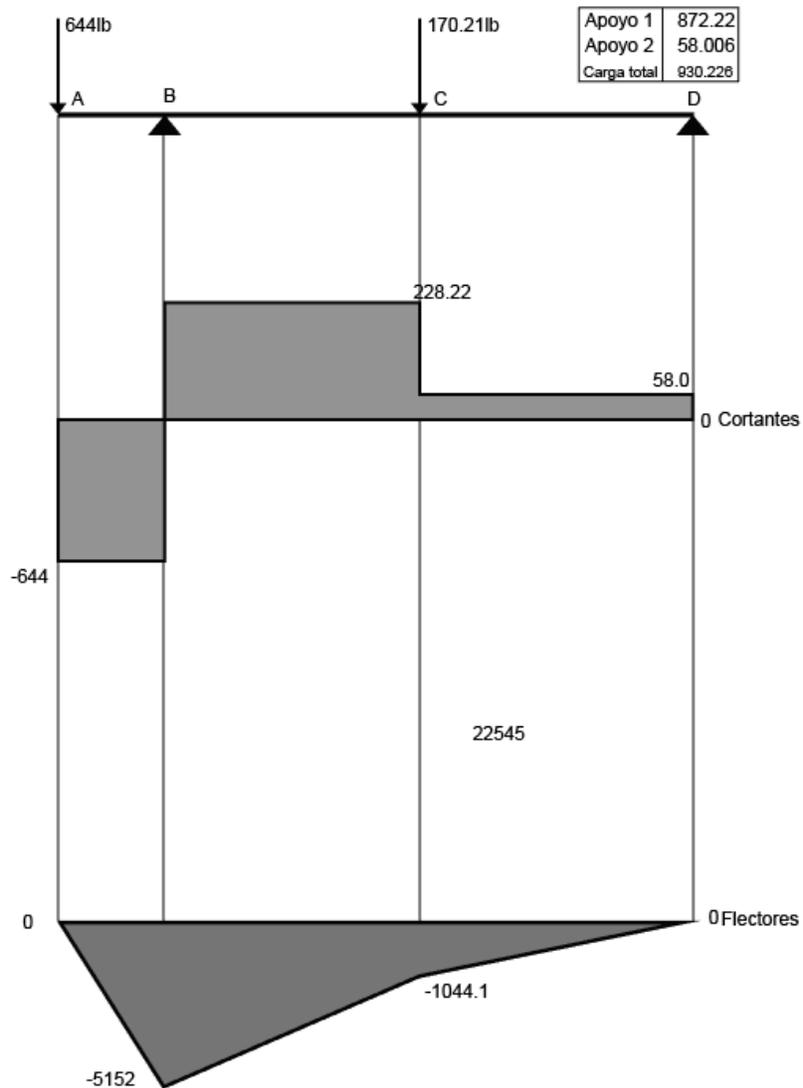


Figura 23. Diagrama de cortantes y momento flector en componente "y".

-Para el punto B

En punto B del eje es el lugar de un apoyo, en este caso un rodamiento con un chaflán agudo a la izquierda y uno redondeado a la derecha. El cálculo se realizó tomando en cuenta el momento flector en el plano horizontal y el plano vertical en este punto.

$$M_B = \sqrt{M_{Bx}^2 + M_{By}^2}$$

$$M_B = \sqrt{5152^2 + 4328^2}$$

$$M_B = 6730 \text{ lb.pulg}$$

$$D_2 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{KM}{S'n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{Sy} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_2 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1.5(6730)}{11194.4} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{8417.06}{101526} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_2 = 2.6 \text{ pulg}$$

Con K=2.5, para un chaflán redondeado:

$$D_3 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2.5(6730)}{11194.4} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{8417.06}{101526} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_3 = 3.1 \text{ pulg}$$

-Para el punto C

$$M_C = \sqrt{M_{Cx}^2 + M_{Cy}^2}$$

$$M_C = \sqrt{1049.1^2 + 30634^2}$$

$$M_C = 30651.8 \text{ lb.pulg}$$

$$D_5 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{KM}{S'n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{Sy} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_5 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1.5(30651.8)}{11194.4} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{8417.06}{101526} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_5 = 4.4 \text{ pulg}$$

-Para el punto D

El punto D, es el asiento de un rodamiento, en esa posición no hay momentos torsionantes ni flexionantes, únicamente existe una fuerza cortante vertical la que pertenece a la reacción en el rodamiento. Se empleó la resultante de las reacciones en los planos vertical y horizontal (x y y) para calcular la fuerza cortante:

$$V_D = \sqrt{V_{Dx}^2 + V_{Dy}^2}$$
$$V_D = \sqrt{58^2 + 1701.4^2}$$
$$V_D = 1702.4 \text{ lb}$$
$$D_7 = \sqrt{\frac{2.94(K)(V)(N)}{S'n}}$$
$$D_6 = \sqrt{\frac{2.94(2.5)(1702.4)(2)}{11194.4}}$$
$$D_6 = 1.5 \text{ pulg}$$

Por lo tanto, se obtienen los siguientes diámetros para el eje según las cargas aplicadas:

$$D_1 = 1.4 \text{ pulgadas}$$

$$D_2 = 2.6 \text{ pulgadas}$$

$$D_3 = 3.1 \text{ pulgadas}$$

$$D_4 = 3.1 \text{ pulgadas}$$

$$D_5 = 4.4 \text{ pulgadas}$$

$$D_6 = 1.5 \text{ pulgadas}$$

Un eje para trituración de neumáticos de este tipo es de un claro longitudinal y un área transversal constante, por lo tanto, se definió el diámetro mayor del cálculo anterior como la dimensión del área transversal en general, siendo de 4.4 pulgadas para este análisis.

Para el siguiente cálculo, se tomó en cuenta la inclinación de las cuchillas de 20° al colocarse en el eje, lo que da por resultado dos cuchillas en contacto para el corte del material al mismo tiempo por cada revolución del eje. El diagrama mostrado en la Figura 24, se observan la posición de dos fuerzas en el eje, las cuales simulan la distribución de las cuchillas que tienen contacto para el corte al mismo tiempo, lo que corresponde a su funcionamiento en un caso real y se calculó de igual forma que el análisis anterior a diferencia que el torque aplicado se duplicó por ser dos fuerzas las presentadas correspondientes a las cuchillas.

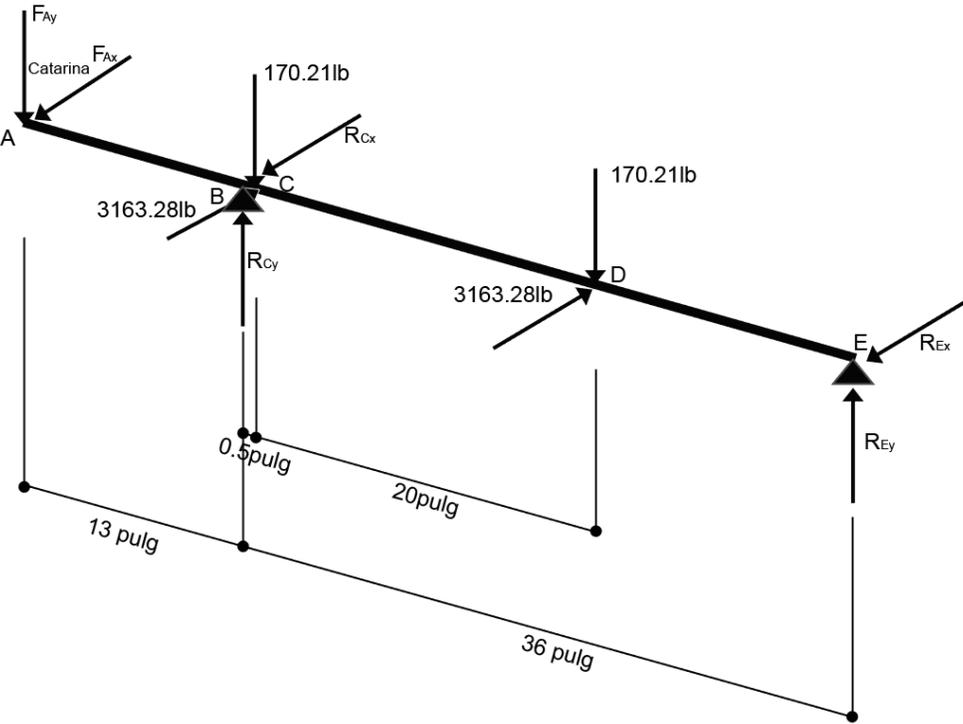


Figura 24. Diagrama de distribución de las fuerzas en el eje con dos cuchillas.

Se calcula la resistencia a la fatiga del material según las propiedades presentadas por el acero SAE 4340.

$$T = 16834.12 \text{ lb.pulg}$$

$$S_y = 101526 \text{ psi}$$

$$S_n = 18927.42 \text{ psi}$$

$$C_s = 0.75$$

$$C_r = 0.75$$

$$N = 2$$

Entonces se calculó por medio de lo siguiente:

$$\begin{aligned} S' n &= S_n C_s C_r \\ S' n &= (18927.42)(0.75)(0.75) \\ S' n &= 11194.4 \text{ psi} \end{aligned}$$

Para el cálculo de la fuerza empleada por la catarina según lo siguiente:

$$\begin{aligned} F_c &= \frac{T}{D/2} \\ F_c &= \frac{16834 \text{ lb/pulg}}{20/2} \\ F_c &= 1683.4 \text{ lb} \end{aligned}$$

Se descompone la fuerza de la catarina en "x" y "y" y posteriormente se comienzan a analizar los puntos en donde actúan las fuerzas en el eje:

$$\begin{aligned} F_{cx} &= F_c \text{ Sen} \theta = 1683.4 \text{ Sen} 40^\circ = 1082.06 \text{ lb} \\ F_{cy} &= F_c \text{ Cos} \theta = 1683.4 \text{ Cos} 40^\circ = 1289.56 \text{ lb} \end{aligned}$$

-Para el punto A

$$D_1 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_1 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{16834.12}{101506} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_1 = 1.43 \text{ pulg}$$

Se muestran los diagramas de cortantes y momento flector para cada plano horizontal y vertical en el eje propuesto, como se observa en las Figuras 25 y 26.

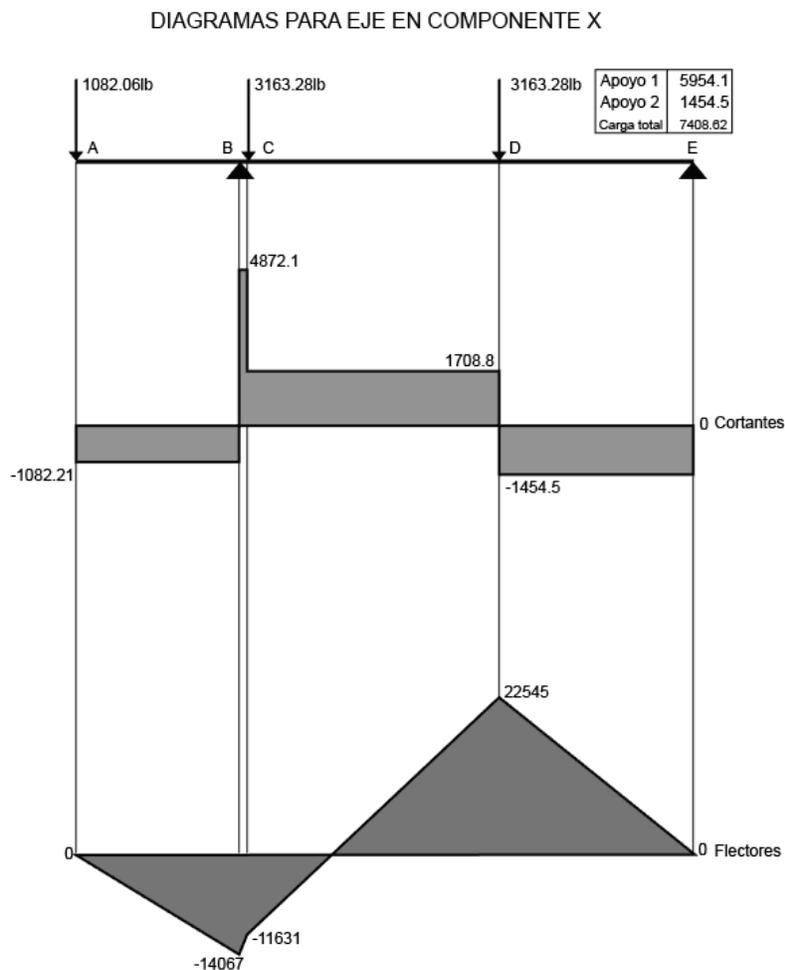


Figura 25. Diagrama de cortantes y momento flector en componente "X" para el segundo análisis.

DIAGRAMAS PARA EJE EN COMPONENTE Y

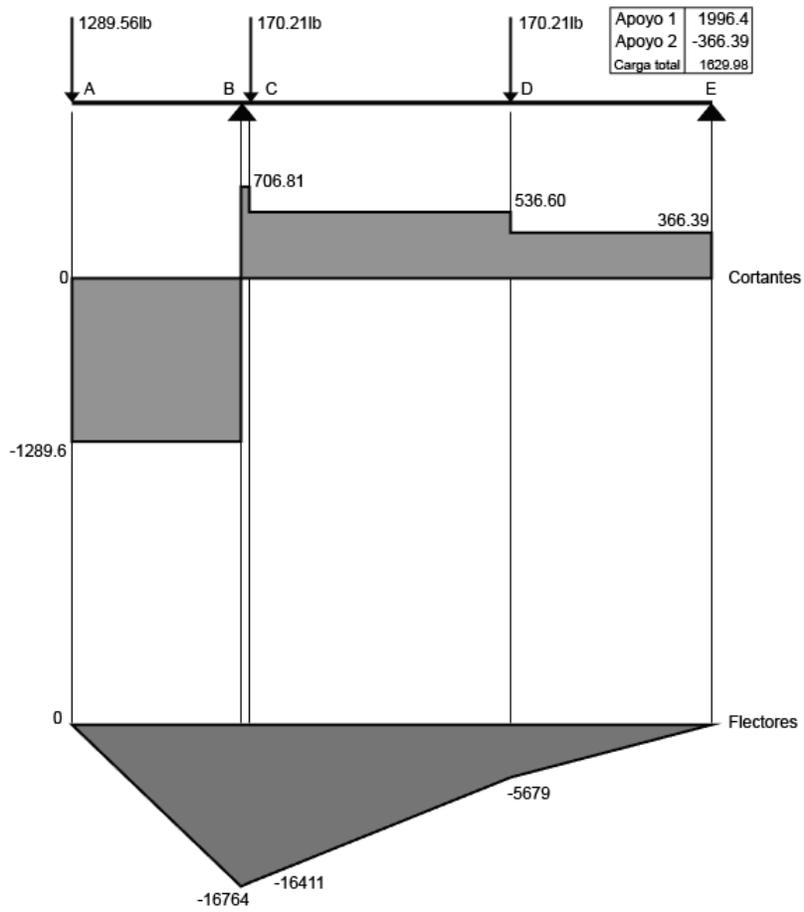


Figura 26. Diagrama de cortantes y momento flector en componente “Y” para el segundo análisis.

-Para el punto B

$$M_B = \sqrt{M_{Bx}^2 + M_{By}^2}$$

$$M_B = \sqrt{16764^2 + 14067^2}$$

$$M_B = 21884.06 \text{ lb.pulg}$$

$$D_2 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{KM}{S'n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{Sy} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_2 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1.5(21884.06)}{11194.4} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{16834.12}{101526} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_2 = 3.9 \text{ pulg}$$

Con K=2.5

$$D_3 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2.5(21884.06)}{11194.4} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{16834.12}{101526} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_3 = 4.6 \text{ pulg}$$

-Para el punto C

$$M_C = \sqrt{M_{cx}^2 + M_{cy}^2}$$

$$M_C = \sqrt{16411^2 + 11631^2}$$

$$M_C = 20114.7 \text{ lb.pulg}$$

$$D_5 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{KM}{S'n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{Sy} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_5 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1.5(20114.7)}{11194.4} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{16834.12}{101526} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D_5 = 3.8 \text{ pulg}$$

-Para el punto D

$$M_D = \sqrt{M_{Dx}^2 + M_{Dy}^2}$$
$$M_D = \sqrt{5679^2 + 22545^2}$$
$$M_D = 23249.25$$

$$D_6 = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{KM}{S'n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$
$$D_6 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1.5(23249.25)}{11194.4} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{16834.12}{101526} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$
$$D_6 = 3.99 \text{ pulg} \approx 4 \text{ pulg}$$

Con K=2.5

$$D_6 = \left[\frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2.5(23249.25)}{11194.4} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{16834.12}{101526} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$
$$D_6 = 4.7 \text{ pulg}$$

-Para el punto E

$$V_E = \sqrt{V_{Ex}^2 + V_{Ey}^2}$$
$$V_E = \sqrt{366.39^2 + 1454.5^2}$$
$$V_E = 1499.9 \text{ lb}$$
$$D_7 = \sqrt{\frac{2.94(K)(V)(N)}{S'n}}$$
$$D_7 = \sqrt{\frac{2.94(2.5)(1499.9)(2)}{11194.4}}$$
$$D_7 = 1.4 \text{ pulg}$$

Por lo tanto, se obtienen los siguientes diámetros para el eje según las cargas aplicadas:

$D_1=1.4$ pulgadas

$D_2=3.9$ pulgadas

$D_3=4.6$ pulgadas

$D_4=4.6$ pulgadas

$D_5=3.8$ pulgadas

$D_6=4.7$ pulgadas

$D_7=1.4$ pulgadas

Para un eje para trituración de neumáticos de este tipo es necesario tener un claro longitudinal constante debido al trabajo que realiza, por lo tanto, se consideró el diámetro mayor calculado, como la dimensión del área transversal en general, siendo de 4.7 pulgadas, entonces se puede establecer, la dimensión mínima del diámetro del eje, la cuál es la dimensión mínima del diámetro del círculo inscrito de la forma transversal hexagonal.

3.2.2.3 Dimensiones del árbol de transmisión

El eje de transmisión tiene un perfil hexagonal en el claro donde estarán distribuidas las 36 cuchillas y 36 separadores, respectivamente, permitiendo una mayor área de contacto entre eje y cuchillas y, por lo tanto, una mayor adherencia y sujeción del sistema de corte. Se debe tomar en cuenta que tanto las cuchillas, como los espaciadores poseen una forma hexagonal en el interior de la geometría. La longitud del claro del eje está dada por la suma de los espesores tanto de cuchillas como

espaciadores, 914.4 mm y, sumando los apoyos laterales, la medida de cada árbol de transmisión es de 1306.90 mm como se muestra en la Figura 27 (ANEXO 2).

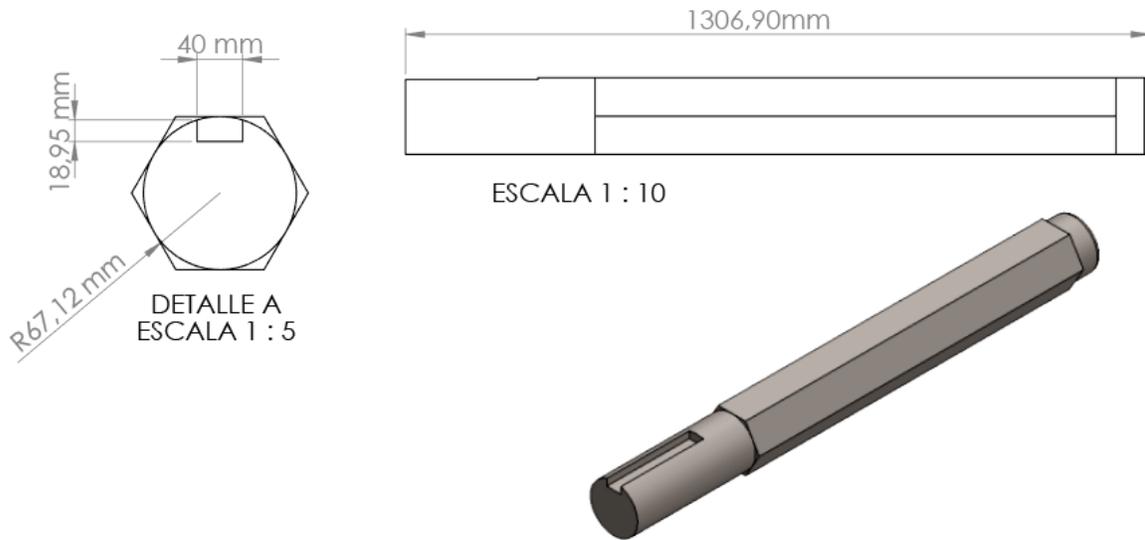


Figura 27 Dimensiones de árbol de transmisión.

3.2.3 Cálculo y resultados del árbol de transmisión

Para el triturador de neumáticos propuesto son necesarios dos ejes que sostienen el sistema de corte, los cuales son sometidos a diferentes cargas de flexión y torsión. En el caso del árbol de transmisión, se realizó una simulación a través de un análisis estático considerando los datos mostrados en la Tabla 12. Se muestran valores significativos que actúan debido al peso del sistema de corte y a los separadores y al torque que es generado por el corte de las cuchillas. Los datos obtenidos de peso fueron con base en los resultados arrojados por el software al tener la geometría y material propuestos.

Tabla 12. Parámetros utilizados en la simulación.

Parámetros necesarios	
Torque máximo	950.9418 Nm
Peso de cuchillas	102.9744 Kg
Peso de espaciadores (por los 18)	56.7468 kg
Fuerza de cizalla	558.91N
Carga con las 18 cuchillas y espaciadores	1,565.2676 N

Se consideran los valores del peso de los espaciadores más el peso de las cuchillas, para ser procesados en la simulación de análisis estático en el software SolidWorks®, obteniéndose lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Peso total } (Wt) &= \text{Peso espaciadores} + \text{peso cuchillas} \\ &= 56.7468 \text{ kg} + 102.9744 \text{ kg} = 159.7212 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$Wt = 159.7212 \text{ kg} * 9.8 \text{ m} / \text{s}^2$$

Por lo tanto, la carga total aplicada en el claro del árbol de transmisión será de 1565.2676 N. Este peso se considera para la simulación como una carga distribuida a lo largo del eje (L_c) tomando en cuenta espaciadores y cuchillas de corte en el área del claro presentado:

$$q = \frac{Wt}{L_c}$$

$$q = \frac{1565.2676 \text{ N}}{0.914 \text{ m}}$$

$$q = 1,712.5466 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

En la Figura 28 y 29, se muestran las cargas distribuidas de $1712.5466 \frac{N}{m}$ en la cara perpendicular a la fuerza de acción de las mismas. También se muestran los dos apoyos que sostienen dicho árbol de transmisión.

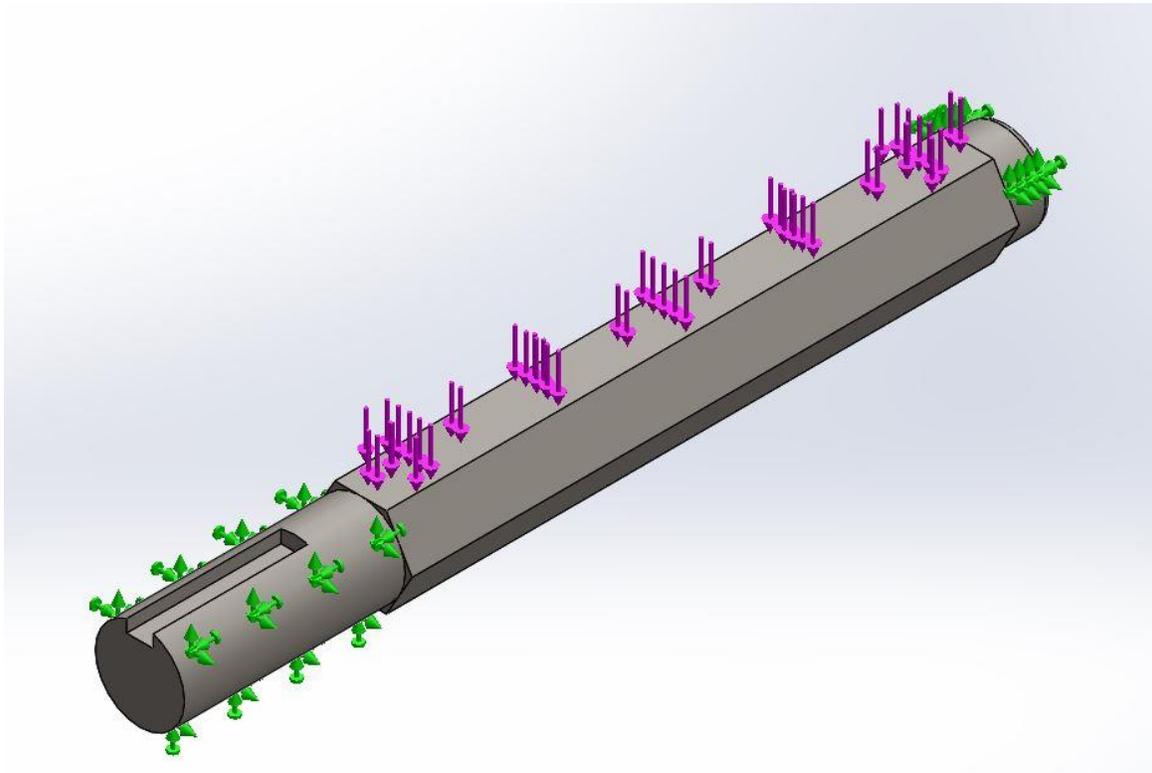


Figura 28. Simulación estática del árbol de transmisión.

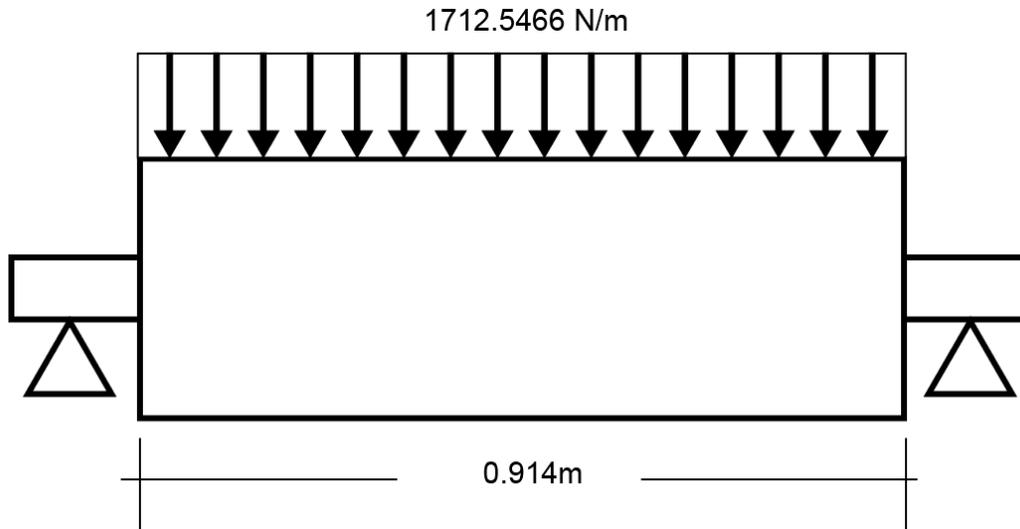


Figura 29. Carga distribuida tomando en cuenta cuchillas más espaciadores.

Es importante considerar el torque generado por las cuchillas al momento de hacer contacto con el neumático, tomando en cuenta la fuerza de cizalla y el volumen del neumático.

$T = F \times d$, donde T es el torque

$$T = \frac{F_{\text{cizalla}}}{A_{\text{cuchilla}}} \times \text{Volumen de neumático}$$

$$T = \left(\frac{558.91 \text{ N}}{0.028692 \text{ m}^2} \right) \times 0.048817204 \text{ m}^3$$

$$T = 950.9418 \text{ Nm}$$

Considerando el torque obtenido y el radio de las cuchillas cuyo diámetro es 0.286m, se obtiene la fuerza de corte F_c .

$$F_c = \frac{T}{d/2}$$

$$F_c = \frac{950.9418 \text{ Nm}}{0.14\text{m}} = 6,792.4414 \text{ N}$$

Esta fuerza de corte es aplicada en cada cuchilla de corte, considerando una situación extrema en donde las 18 cuchillas ingresan simultáneamente a cortar el neumático, como se muestra en la Figura 30.

$$F_c = 6,792.4414\text{N} \times 18$$

$$F_c = 122,263.9457 \text{ N}$$

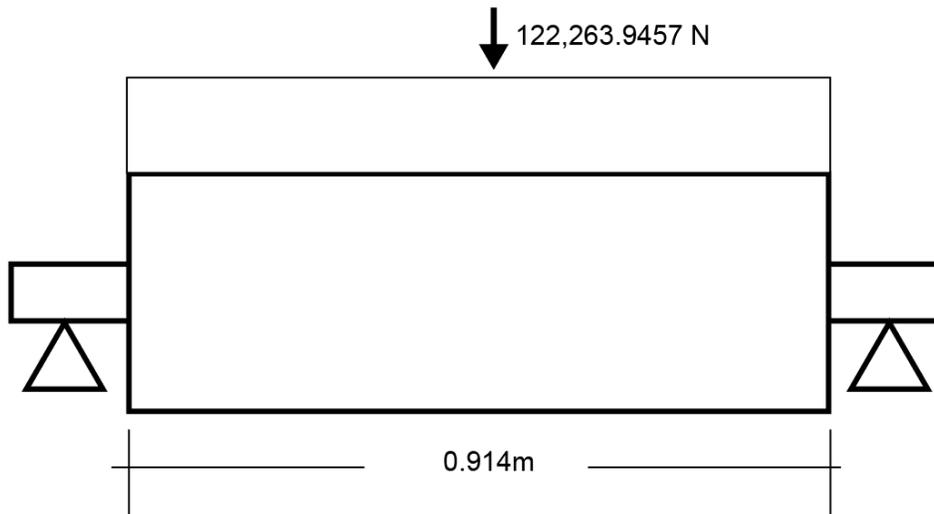


Figura 30. Fuerza de corte tomando en cuenta el torque en cada cuchilla.

3.2.3.1 Resultados de simulación estática generado por el software

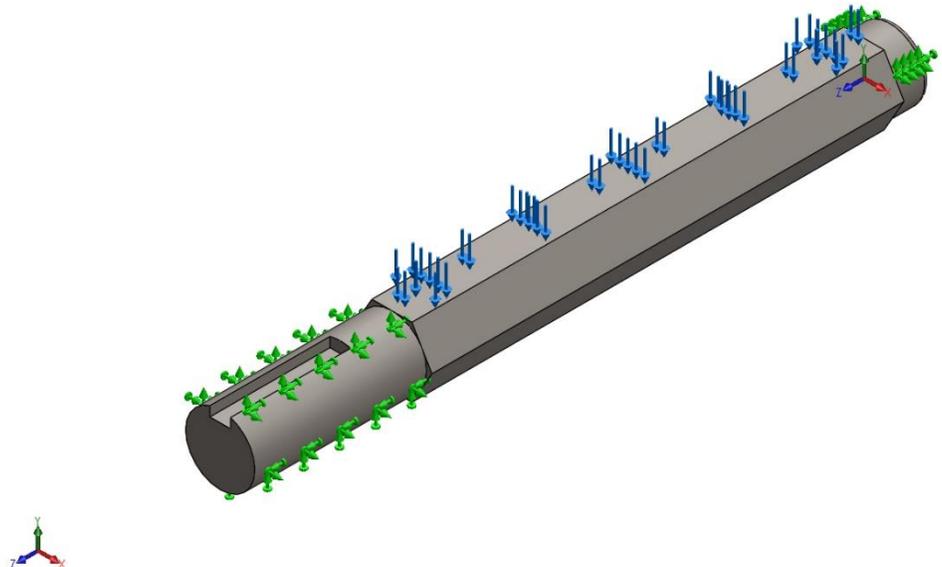
SolidWorks®

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante las simulaciones efectuadas por el software. Es importante recalcar que se tomaron en cuenta parámetros de salida del software para obtener resultados más visibles en cuanto a

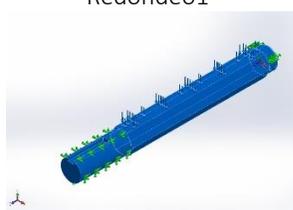
la deformación y desplazamiento para enfatizar los puntos críticos otorgando color rojo-naranja en los de mayor valor, los resultados reales se muestran etiquetados en cada figura en su máximo.

El primer análisis a tomar en cuenta es el realizado aplicando una carga resultante generada por el peso de las cuchillas y los espaciadores, en la Tabla 13 se especifican las donde se aplicó la carga y cuáles fueron los puntos fijos o de apoyo simulados.

Tabla 13. Disposición de las cargas y apoyos en el eje.



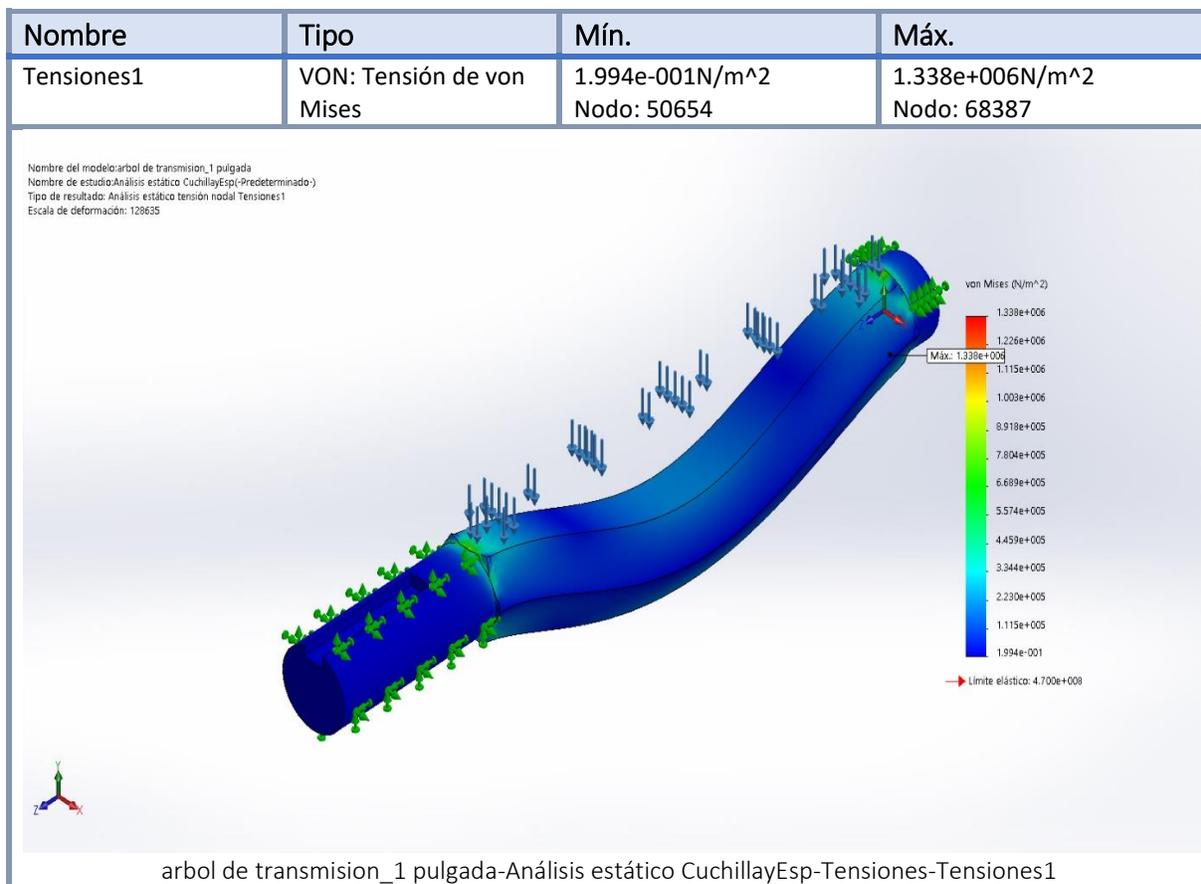
Nombre del modelo: arbol de transmision_1 pulgada

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Redondeo1</p>	Sólido	Masa:154.014 kg Volumen:0.0196196 m ³ Densidad:7850 kg/m ³ Peso:1509.33 N	C:\Users\victo\Documents \MTAM\PROYECTO DE TESIS\TESIS\arbol de transmision_1 pulgada.SLDPRT Dec 05 18:48:10 2018

El resultado mostrado en la Tabla 14, muestra la máxima tensión, basada en la teoría de Von Mises. Según el resultado mostrado en la imagen anterior, la tensión máxima de es de $1.338e+006 \text{ N/m}^2$ ubicada en el punto medio del árbol de transmisión.

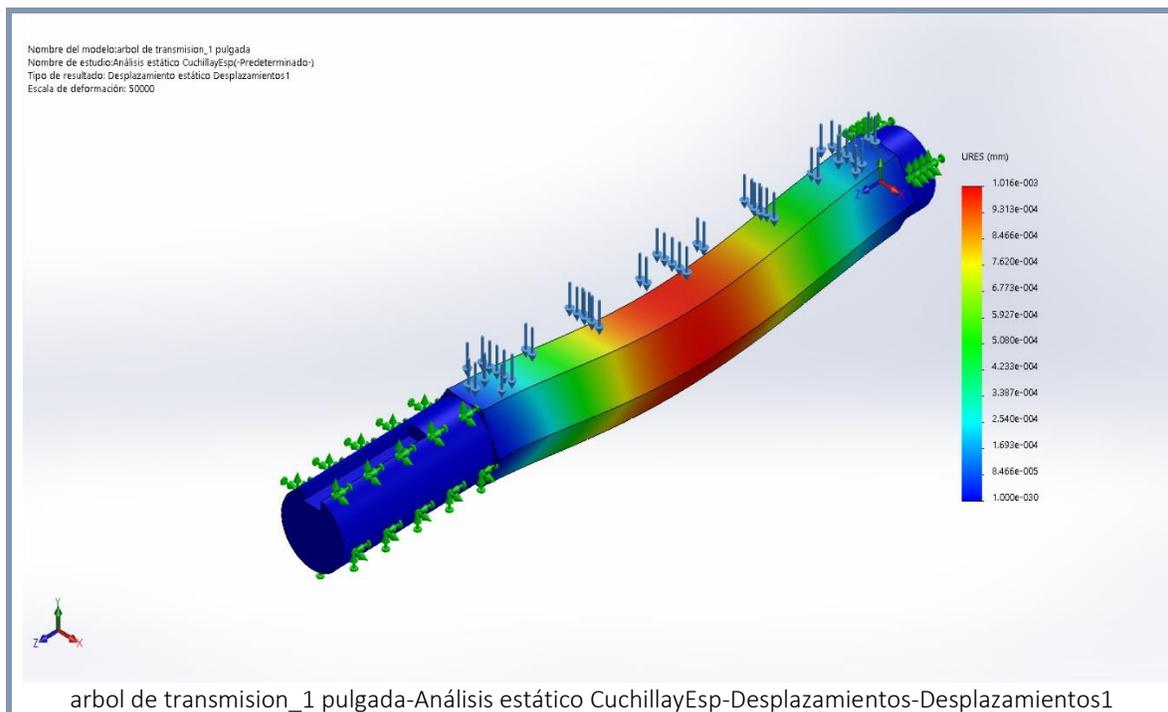
Considerando que el límite elástico del material es de $4.700e+008 \text{ N/m}^2$, se concluye que este valor se encuentra por arriba de la tensión máxima generada en el eje, por lo tanto, se puede asegurar un correcto funcionamiento del eje de transmisión.

Tabla 14. Análisis estático según criterio de Von Mises.



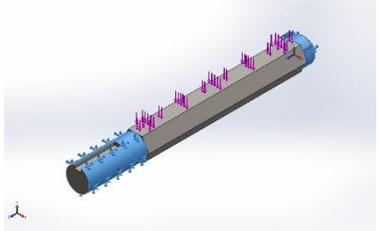
A continuación, en la Tabla 15 se muestra la deformación del eje y el desplazamiento máximo del mismo, el cual se encuentra en el centro del claro de aplicación y es de 0.001 milímetros lo cual resulta despreciable considerando que se encuentra dentro de la fase elástica del material.

Tabla 15. Deformación y desplazamiento máximo del eje.



Además, se realizó el análisis estático tomando en cuenta el torque producido en las cuchillas y en el caso extremo de ser sometidas las 18 en cada eje al mismo tiempo. En la Tabla 16 se muestran los detalles de sujeción en las caras del elemento aplicadas en el software Solidworks®.

Tabla 16. Detalles de sujeción y cargas.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades: 2 cara(s) Tipo: Geometría fija			
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	-0.137863	122229	0.408991	122229	
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0	

En este estudio, el resultado obtenido de von Mises fue de $1.045e+008 \text{ N/m}^2$. Observando que el límite elástico del material es de $4.700e+008 \text{ N/m}^2$ se determina que el valor se encuentra arriba de la tensión máxima generada en el eje, por lo tanto, éste no sufrirá una deformación plástica durante la situación extrema en que todas las cuchillas estén trabajando al mismo tiempo.

En la siguiente Tabla 17 y Tabla 18, se muestran los resultados antes mencionados de deformación del eje y su desplazamiento máximo; éste se encuentra en el centro del claro de aplicación y es de 0.0079 milímetros como se muestra. Comparando el

resultado de desplazamiento con el análisis anterior, se observa una diferencia de 0.0069 milímetros que es despreciable.

Tabla 17. Resultados en cuanto a deformación.

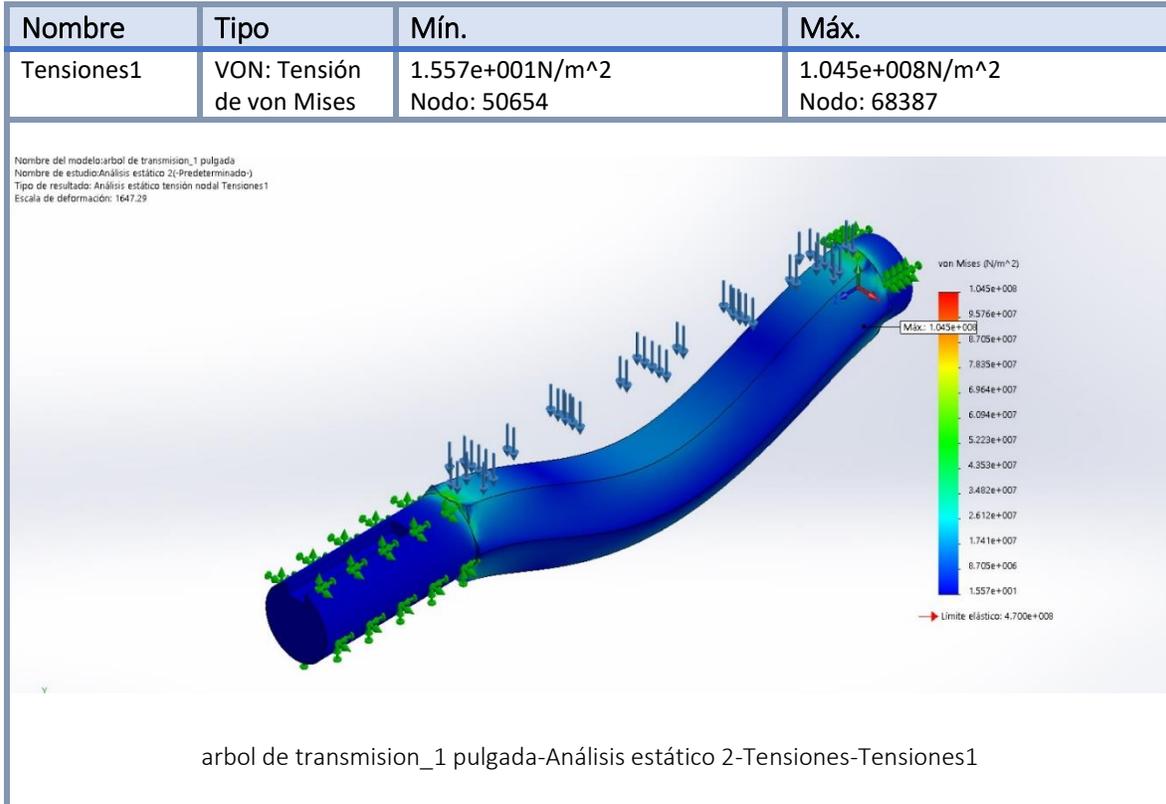
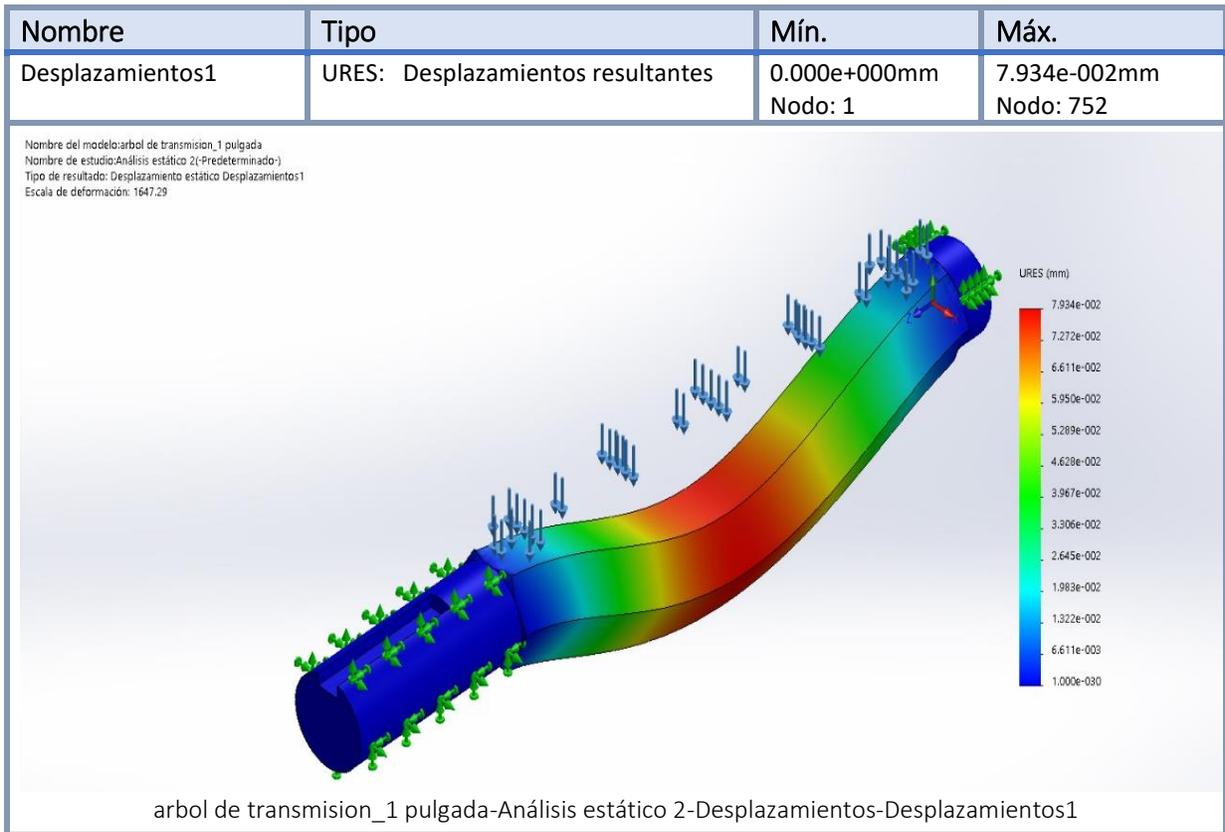


Tabla18. Resultados en cuanto a desplazamiento máximo del eje.

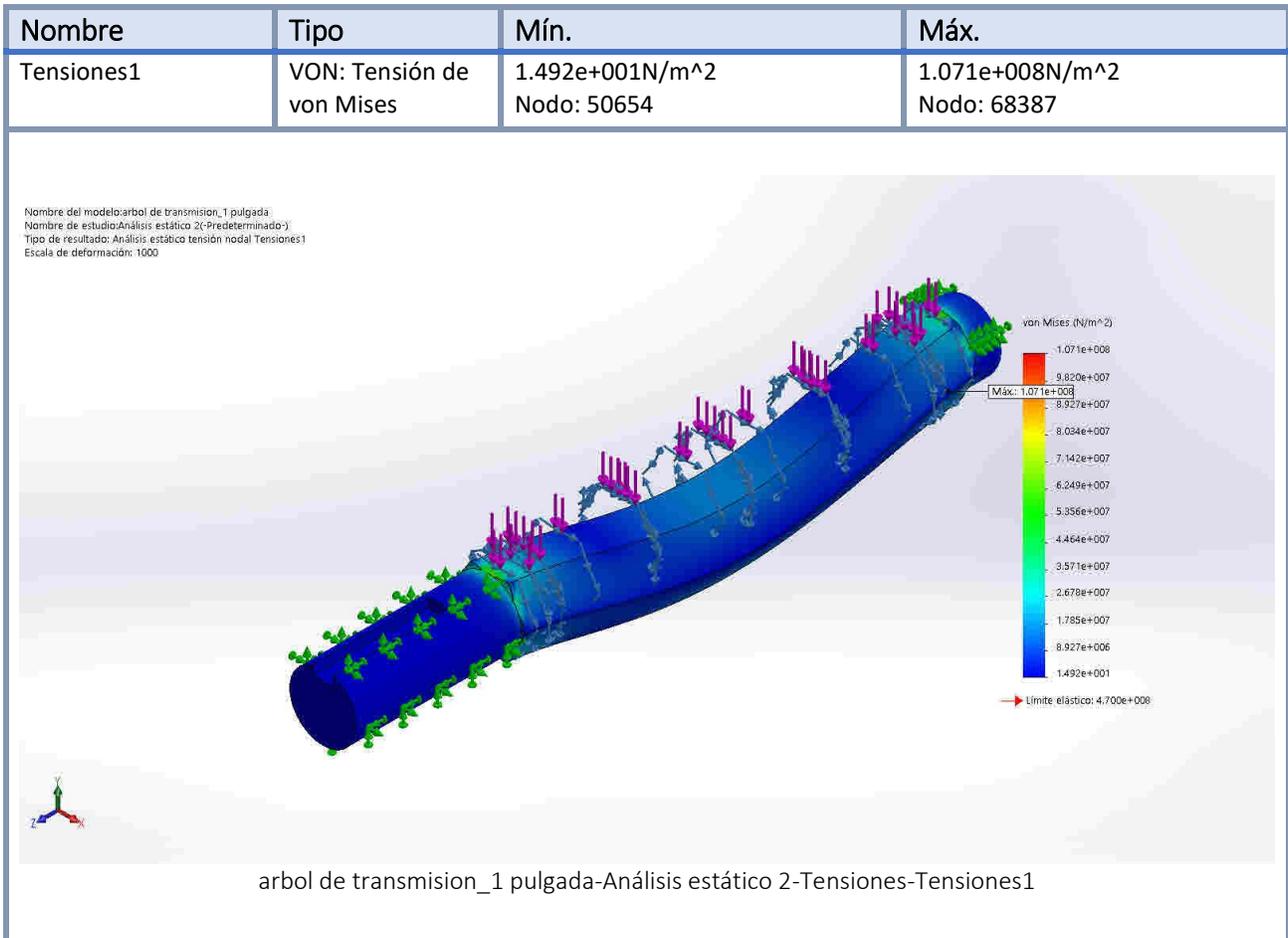


Por último, se realizó un estudio en el cual se tomaron en cuenta las fuerzas y cargas aplicadas en el estudio anterior y agregando una fuerza de torsión para simular el torque en el árbol de transmisión, con una fuerza de 1901.88 Nm, debido al torque aplicado en el elemento al momento de estar dos cuchillas en acción de contacto con el material a triturarse.

A continuación, en la tabla 19 se muestran los resultados obtenidos de Von Mises con un valor de $1.071e+008 \text{ N/m}^2$, en donde el límite elástico del material es de $4.700e+008 \text{ N/m}^2$ el cual se encuentra por arriba del resultado obtenido, por lo tanto,

éste no sufrirá una deformación plástica durante la situación presentada de las cuchillas que entran en contacto y sumando el torque producido por en el eje,

Tabla 19. Análisis estático según criterio de Von Mises para el caso de aplicación del torque.



CAPÍTULO 4. PLAN DE PROCESOS

4.1 Manufactura y material utilizado

Para la manufactura de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión, debe considerarse la factibilidad de su construcción en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, tomando en cuenta las instalaciones y capacidad. Una secuencia típica de los procesos para la fabricación de piezas se muestra en la Figura 31.

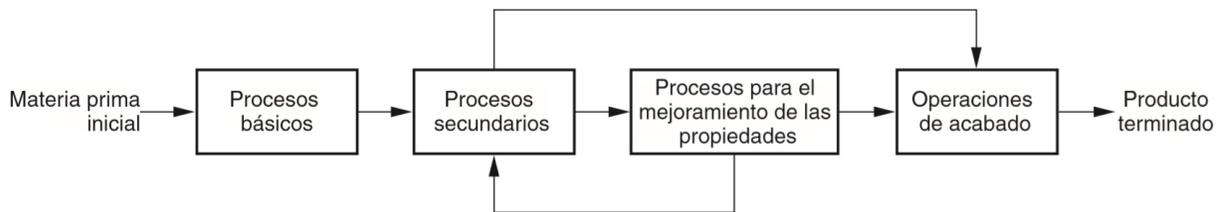


Figura 31. Secuencia de procesos para fabricación de piezas [32].

Terminado el modelado CAD y la simulación CAE del análisis estático, se planteó el proceso para cada componente, describiendo los pasos utilizados para su fabricación, como la elección de la maquinaria y herramienta a utilizar. A continuación, en la Tabla 20 se presenta el material a utilizar y la maquinaria:

Tabla 20. Lista de materiales utilizados para la manufactura de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión

Maquinaria o equipo	Herramientas	Material
Fresadora CNC. Fagor.	Cortador de acero HSS de ¼”, ½”, 1”, 3” Boquillas para husillo Fagor de 3/8”, ½”, 9/16” y 1”.	-Acero AISI 1045 -Acero SAE 4340
Pantógrafo CNC de corte por plasma	Antorcha de corte de plasma.	-Acero AISI 1045
Torno convencional	Buriles para corte de acero de desbaste	-Acero SAE 4340
Sierra de cinta horizontal para metal	Sierra de cinta	-Acero AISI 1045 -Acero SAE 4340
Equipo de corte acetileno	Boquilla de corte oxígeno-acetileno	-Acero AISI 1045

4.2 Operaciones y secuencias para la manufactura

Se establecen las operaciones en serie consecutivas que permitan el maquinado para cada pieza: fresadora, CNC, taladro, aserrado para metal, torno, planta para soldar y algunas realizadas de forma manual. Las operaciones que realiza cada máquina / herramienta se describen a continuación [32]:

4.2.1 Fresadora:

Es una operación de corte interrumpido; los dientes de la fresa entran y salen del trabajo durante cada revolución. Esto interrumpe la acción de corte y sujeta los dientes a un ciclo de fuerza de impacto y choque térmico en cada rotación. Son dos los tipos básicos de operaciones de fresado: el periférico y el frontal, Figuras 32 y 33.

- En el fresado periférico o plano, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando. Esta operación se realiza por los bordes de corte en el exterior del cortador.
- En el fresado frontal, el eje de la fresa se ubica perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta cortando orillas.

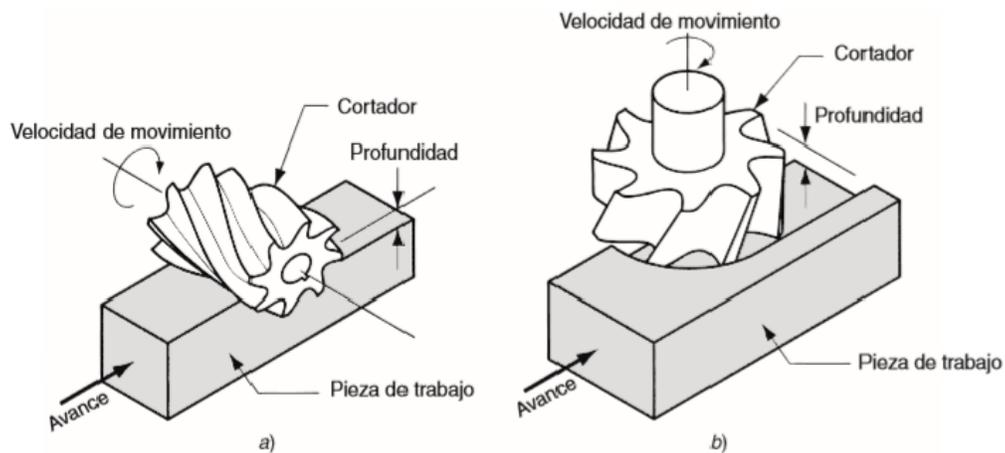


Figura 32. Fresado periférico (a) y fresado frontal (b) [32].



Figura 33. Fresadora disponible en el LABTAM.

4.2.2 Taladrado

Es una operación de maquinado que se usa para crear agujeros redondos en una pieza de trabajo. Se realiza con una herramienta de forma cilíndrica rotatoria (brocas). Esta operación es ejecutada en una prensa taladradora. Existen varios tipos de prensas taladradoras: vertical, radial, múltiple, etc. En la Figura 34, se muestra uno de los taladros disponibles en la UTM.



Figura 34. Taladro de Banco disponible en el LABTAM.

4.2.3 Centro de maquinado CNC vertical

Es una máquina automatizada con la capacidad de llevar a cabo múltiples operaciones de maquinado en una misma instalación bajo un control numérico computarizado con la mínima intervención humana. Este centro de maquinado CNC realiza operaciones típicas que usan herramientas corte-rotatorio, utilizando cortadores y brocas. La UTM, cuenta con un centro de maquinado CNC FAGOR (Figura 35).



Figura 35. CNC FAGOR disponible en el LABTAM.

4.2.4 Aserrado

Proceso en el que se corta una hendidura angosta dentro de la pieza de trabajo por medio de una herramienta que contiene una serie de dientes estrechamente espaciados. Esta operación se utiliza normalmente para separar una pieza de trabajo en dos piezas o remover trozos no deseados. Hay tres tipos de aserrado que depende del tipo de movimiento de la sierra: (a) con segueta, (b) con sierra de cinta y, c) con sierra circular (Figuras 36 y 37).

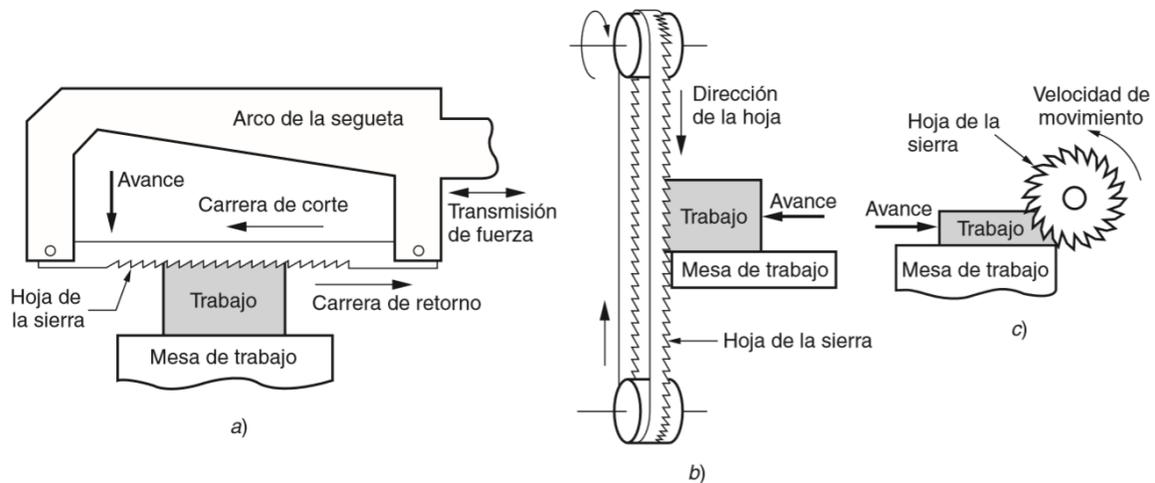


Figura 36. Tipos de operaciones de aserrado [32].



Figura 37. Sierra de cinta horizontal disponible en el LABTAM.

4.2.5 Torno

La operación de torneado es un proceso de maquinado en el cual una herramienta de una punta remueve material de la superficie de una pieza de trabajo en rotación cilíndrica, dicha herramienta tiene un avance lineal y en una dirección paralela al eje de rotación. Como se muestra en las Figuras 38 y 39.

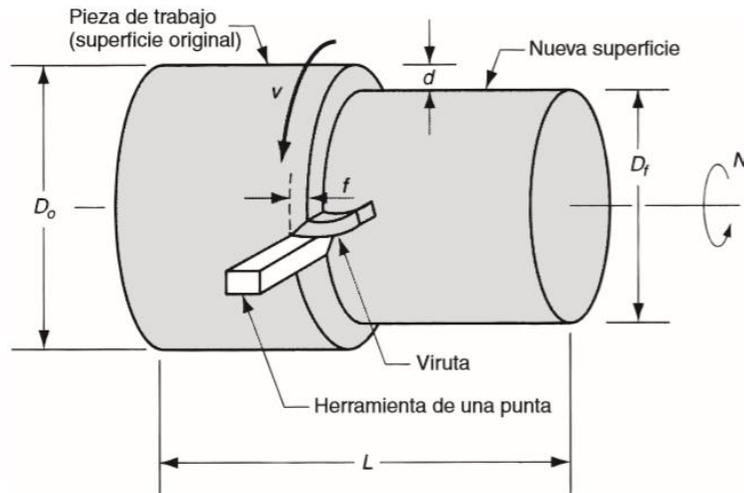


Figura 38. Operación de torneado.



Figura 39. Torno disponible en el LABTAM.

4.3 Operaciones y procesos para la manufactura de los componentes

A continuación, en la Tabla 21 se muestran los parámetros de corte para cada una de las operaciones principales a ser aplicadas en las dos piezas a manufacturar, como lo son las cuchillas de corte y el árbol de transmisión. Estos parámetros fungen como una base para el maquinado, pueden ajustarse para mejorar la calidad dentro de los costos de trabajo.

Tabla 21. Parámetros de corte para cada operación.

PARÁMETROS DE CORTE			
Corte por plasma en pantógrafo CNC			
Espesor	Velocidad de corte (mpm)	Voltaje (V)	Máximo (mpm y V)
Acero 1"	0.1 m/min	146	0.13 y 142
Desbaste para torneado y torneado CNC			
Material	a_p mm (profundidad de corte)	f_n mm/r (avance por revolución)	V_c m/mm (Velocidad de corte)
Acero fundido y de baja aleación	0.7	0.18	180
Taladrado			
Diámetro	Velocidad de corte V_c mm/min	Revoluciones por Minuto (RPM)	
25 mm	0.30	195	
Fresado			
Material	Acabado	Desbaste	
Acero de aleación recocido	$V_c=14 - 18$ RPM $F=45 - 70$ mm/min	$V_c= 10 - 12$ RPM $F= 40 - 60$ mm/min	

Algunas operaciones se ejecutarán de forma manual, por ejemplo, el machuelado y el atornillado. En la tabla 22 se muestra el orden de las operaciones para cada proceso.

Tabla 22. Orden de operaciones de procesos por cada pieza.

Operaciones y secuencias por componente				
No.	Pieza	Secuencia	Máquina o herramienta	Operación
01	Cuchillas de corte	1	Sierra de cinta horizontal	Aserrado
		2	Soplete acetileno	Revenido
		3	Almacén de reposo	Enfriamiento
		4	Fresadora CNC	Maquinado
		5	Esmeril	Afilado
02	Árbol de transmisión	1	Sierra de cinta horizontal	Corte
		2	Torno	Desbaste
		3	Fresadora	Planeado
		4		Maquinado

Ahora en la Tabla 23, se muestra el diagrama de flujo de proceso, el cual cuenta con mayor detalle el proceso operativo. Este tipo de diagrama resulta particularmente útil para registrar los costos ocultos no productivos, como son las distancias recorridas, retrasos, almacenamientos temporales, etc., con esto se pueden tomar medidas para minimizar y eficientar los procesos, siendo este caso para la manufactura de las cuchillas de corte y el árbol de transmisión.

La simbología estándar en conjunto utilizada es la siguiente:

- Flecha: Ésta se refiere al transporte de las piezas durante el proceso dentro de la operación.
- Letra D: Representa un retraso, el cual es presentado cuando una parte no se puede procesar inmediatamente y depende de la siguiente estación.
- Triángulo equilátero: Representa el almacenamiento de alguna pieza en cualquier momento del proceso.
- Círculo: Representa una operación, como es cortar, perforar... etc.
- Cuadrado: Este símbolo representa una inspección del trabajo realizado.

Tabla 23. Diagrama de flujo de proceso.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO								
Descripción de la actividad	Símbolo					Tiempo (Minutos)	Distancia (Metros)	Observaciones
	●	➔	◐	■	▼			
Colocar placa de acero en mesa de trabajo		➔				3	2	
Marcar medidas exactas	●					5		
Realizar corte con equipo de acetileno	●					20		
Trasladar la placa a la mesa de trabajo del pantógrafo		➔				3	3	
Realizar corte con plasma a la geometría deseada	●					8		
Trasladar corte al área de esmerilado		➔				3	6	
Afilar puntas con esmeril	●					15		
Inspeccionar filo de la cuchilla				■		1		
Almacenar pieza terminada					▼	3	5	
Colocar acero para eje en la mesa de trabajo	●					5	2	
Marcar medidas exactas para ser cortado	●					2		
Trasladar a área de corte		➔				7	10	
Cortar mediante la sierra de banco	●					25		
Trasladar al área de fresado		➔				3	4	
Colocar en el área de trabajo	●					2		
Realizar operaciones de planeado en la fresadora	●					80		
Girar pieza para operaciones de planeado (5 veces)	●					10		

Trasladar al área de torneado para los extremos de la pieza						10	9	
Colocar en el área de trabajo						20		
Realizar operaciones de torneado						70		

En la Tabla 24 y en la Figura 40, se puede observar la tabla de componentes a fabricar y el diagrama de proceso de operación, siendo para una cuchilla de corte y un árbol de transmisión, aquí se muestran las operaciones de fabricación y el tiempo en minutos para cada una y en total.

Tabla 24. Tabla de componentes a fabricar.

TABLA DE COMPONENTES A FABRICAR		
Número de pieza	Operaciones de fabricación	Tiempo (minutos)
1.- Cuchillas de corte	1.- Medir	3
	2.- Cortar	20
	3.- Corte con plasma	8
	4.- Afilar	15
	5.- Inspeccionar	1
	6.- Almacenar	1
2.- Árbol de transmisión	1.- Medir	2
	2.- Cortar	25
	3.- Desbastar	80
	4.- Girar	50
	5.- Desbastar	400
	6.- Inspeccionar	2
	7.- Tornear	70

Empresa: UTM

Área: LABTAM

Elaboró: Victor Martínez
Hernández

Fecha: 06/08/19

Proceso: Fabricación del sistema
de corte

Método: Actual

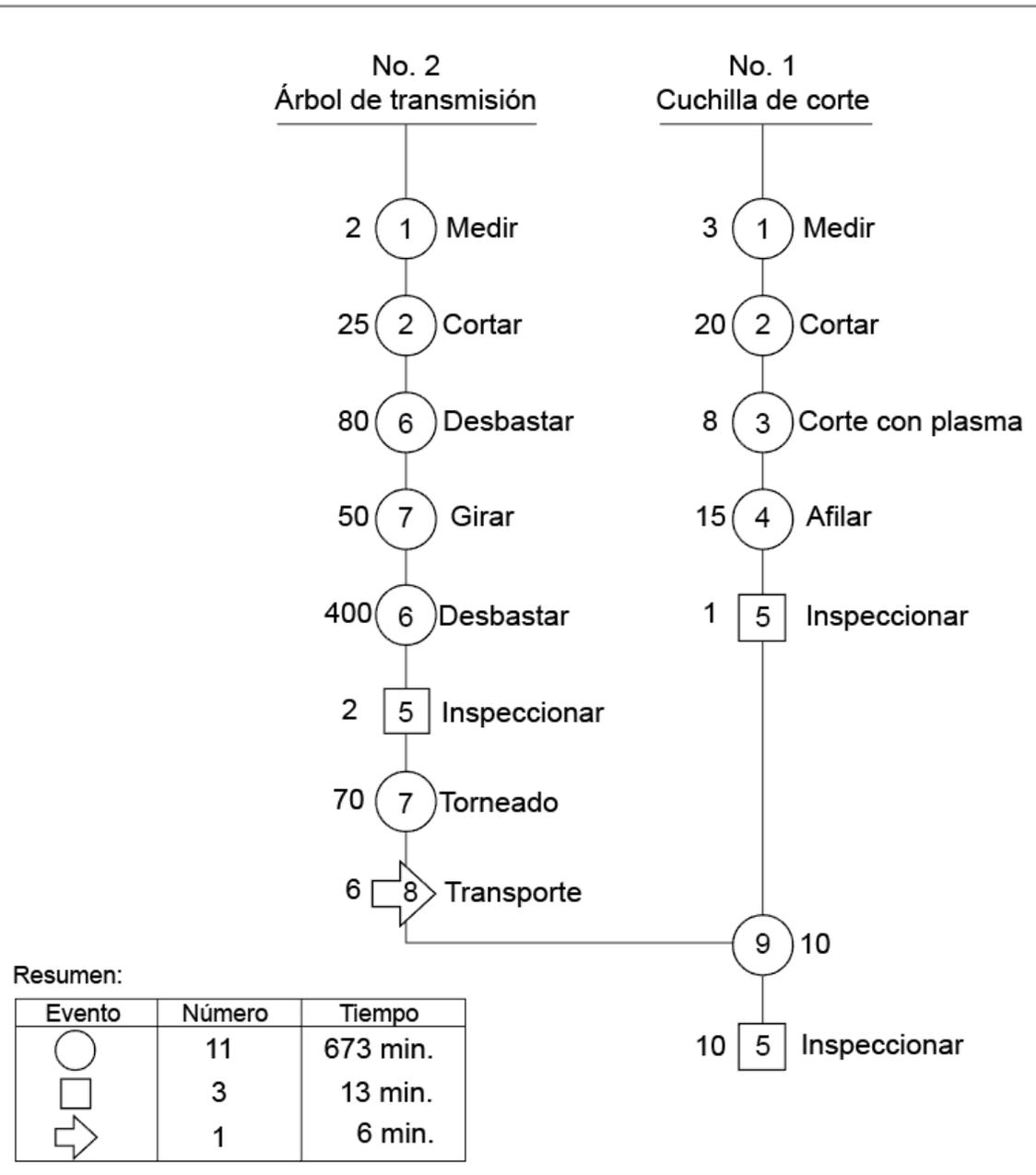


Figura 40. Diagrama de proceso de operación.

Las operaciones del proceso mostrado con base en especificaciones de dimensiones y geometrías según los planos constructivos de cada componente. A continuación, en la Figura 41, se muestra un diagrama de recorrido de los componentes en las operaciones de proceso según la disposición de maquinaria del laboratorio de manufactura, identificándose con los mismos códigos para cada pieza. Finalmente, en la Tabla 24 se describe de manera general el proceso para la fabricación de las partes del dispositivo, detallando la secuencia a seguir de inicio a fin de las mismas paso a paso.

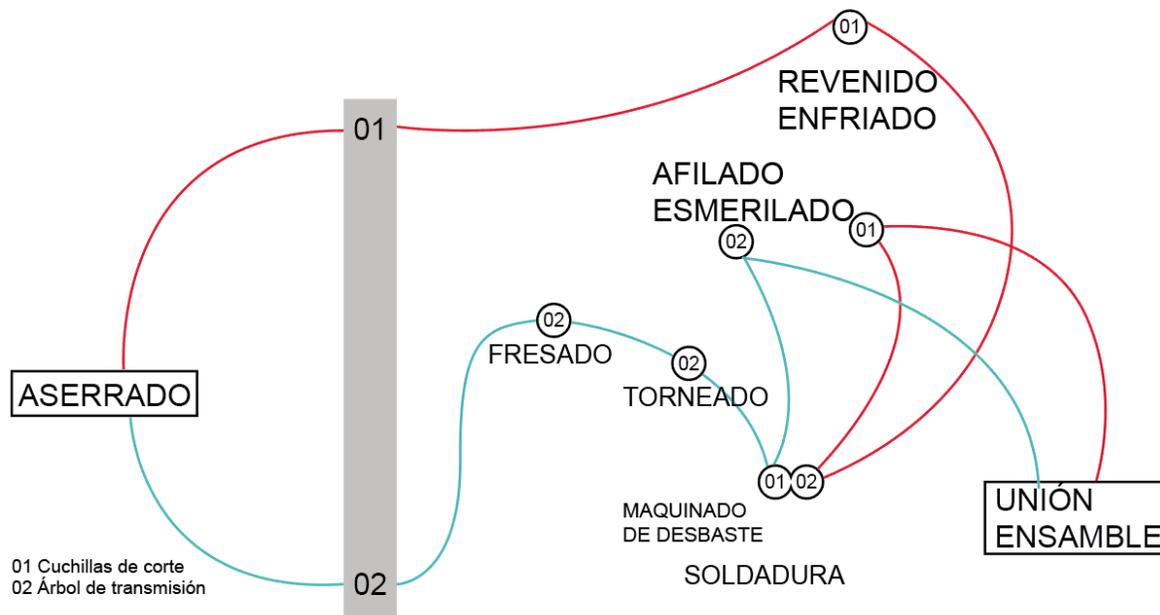


Figura 41. Diagrama de recorrido de la manufactura de los dos componentes.

A continuación, en la Tabla 25 se presenta la descripción del proceso de manufactura para el sistema de corte, siendo las cuchillas de corte y el árbol de transmisión.

Tabla 25. Descripción general del proceso de manufactura por cada componente.

Pieza	Descripción general del proceso de manufactura por componente
01	<p>-Realizar corte de placa con 1 cm de tolerancia.</p> <p>-Llevar a cabo uno de los siguientes procesos “a” o “b” según la disponibilidad de maquinaria.</p> <p>Para “a”:</p> <p>-Cortar placas cuadradas de 30 cm para la sujeción en el centro de maquinado CNC.</p> <p>-Tratar térmicamente el material llevándolo a 460-600°C y dejar enfriar a temperatura ambiente.</p> <p>-Sujetar la placa de acero en la base de la fresadora CNC con la ayuda de clamps.</p> <p>-Preparar fresadora CNC:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Montar cortadores de 1/4”, 1/2” y 1” de diámetro en boquillas de 3/8”, 1/2” y 1” respectivamente y atornillarse a tres conos. • Corroborar cumplimiento de normas del LABTAM antes de encender la máquina. • Introducir conos a tres lugares disponibles del carrusel de herramientas. • Calibrar el cero pieza, cero máquina y posición “Z” para cada herramienta. • Introducir el código para el maquinado en la CNC. • Simular la pieza en la interfaz de la máquina CNC previo al maquinado final para detectar errores de código. <p>Para “b”:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cortar planchas del acero de 1” de espesor tomando en cuenta el diámetro máximo de la cuchilla de 28 cm. • Sujetar la plancha de acero en el área de corte del pantógrafo de corte con plasma.

	<ul style="list-style-type: none"> • Programar el dispositivo para realizar los cortes hexagonales de las cuchillas como primera operación. • Programar en segundo lugar el corte exterior de las mismas. • Afilar las puntas de la cuchilla con la ayuda de una esmeriladora.
02	<p>-Realizar corte de acuerdo a la dimensión propuesta en los planos y otorgando una tolerancia mínima de 1 mm.</p> <p>-Sujeción del material a la fresadora CNC mediante clamps, sujetando bases en forma de “L” (Anexo 3) para un agarre vertical a presión.</p> <p>-Preparación de la fresadora CNC.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Montar cortador de 1” en boquillas de 1” respectivamente y atornillarse a un cono. • Introducir el cono con la herramienta en cualquier lugar disponible del carrusel de herramientas. • Calibrar el cero pieza, cero máquina y posición “Z” para cada herramienta. (Cero pieza según el indicado en el anexo 4). • Introducir una operación de planeado con un desbaste vertical según especificaciones de los planos. <p>-Una vez concluido el maquinado final, se procede a girar la pieza y repetir la operación en el lado paralelo de esta. La sujeción del cilindro será ahora tomando como base el lado plano previamente maquinado y con ayuda de un aditamento con el ángulo necesario para lograr la geometría hexagonal según indicado en el anexo 4. El aditamento es colocado de forma vertical, sujetándolo a la base de la mesa de trabajo mediante clamps y tornillos, otorgando un ángulo de 60° y ayudando a lograr la geometría hexagonal.</p> <p>-Concluido repetir la operación y lograr la geometría hexagonal propuesta.</p> <p>-Una vez finalizada la etapa de fresado, se procede a llevar a cabo el torneado de los extremos de la pieza, los cuales serán los apoyos del eje, en donde mediante el desbaste por medio de buriles, se logren las dimensiones especificadas para la pieza.</p>

A continuación, en la Figura 42, se observa la colocación de los dos aditamentos propuestos; siendo el aditamento vertical (1) y el aditamento angular (2), en donde el 1 se utiliza para comenzar las operaciones de desbaste a las primeras dos caras y el segundo para poder proveer el ángulo necesario y así maquinarse seis lados del eje para lograr la forma hexagonal.

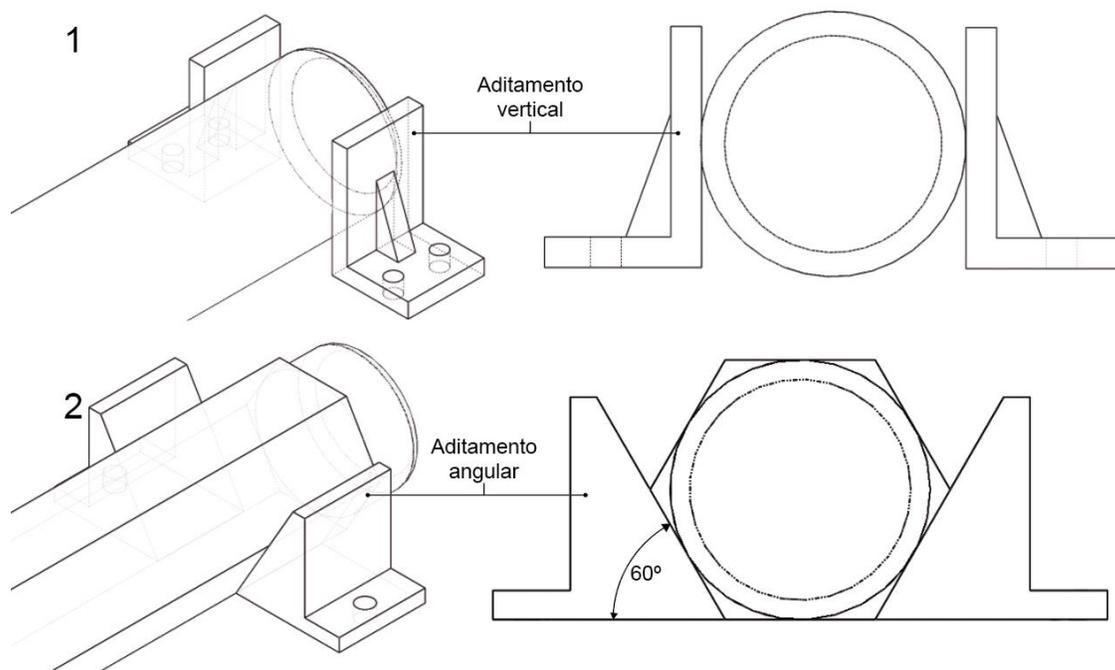


Figura 42. Representación de la colocación de los aditamentos vertical y angular para su maquinado.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La energía de deformación o energía potencial elástica para un sólido deformable viene dada por el producto de las componentes del tensor tensión (σ) y del tensor deformación (ε). Si la deformación ocurre dentro del límite elástico, la energía de deformación no provocará ninguna deformación plástica en el material. La energía de deformación se puede descomponer además en: a) energía de deformación volumétrica [trabajo invertido en comprimir o expandir una determinada porción del sólido] y b) energía de distorsión [trabajo invertido en cambiar la forma del cuerpo (sin alterar el volumen)]. El criterio a la cedencia de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión y, sugiere que la cedencia de un material dúctil inicia cuando el segundo invariante del desviador del esfuerzo J^2 excede el valor crítico. Matemáticamente el criterio a la cedencia de Von Mises es: $J^2 = k^2$, en la que k es el esfuerzo a la cedencia en cortante puro. Al inicio de la cedencia, la magnitud del esfuerzo a la cedencia en cortante puro es tres (3) veces menor que el esfuerzo a la cedencia tensil en el caso de tensión simple. Así, obtenemos que: $k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$. Si se elige el criterio de Von Mises a ser igual al esfuerzo de cedencia y combinando las ecuaciones anteriores, el criterio a la cedencia de Von Mises puede expresarse como: $\sigma_{Von\ Mises} = \sigma_y = \sqrt{3J_2}$. Seguidamente se sustituye el 2^{do} invariante del desviador de esfuerzo (J^2) por el tensor de esfuerzo de Cauchy (σ) y se evalúa los valores obtenidos en las simulaciones realizadas en el Solidworks®. Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, aseguran mediante el criterio a la cedencia de Von Mises que los componentes del dispositivo diseñado no sufrirán deformaciones plásticas durante

su funcionamiento. Finalmente, éste trabajo afirma que el uso de cuchillas de 1 pulgada (1") de grosor es apto para la trituración de neumáticos, a diferencia de los fabricantes de molinos trituradores que postulan un grosor mínimo de pulgada y media (1 ½"), lo que puede reducir el presupuesto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] United States Environmental Protection Agency (2010). Scrap Tires: Handbook on Recycling Applications and Management for the U.S. and Mexico. Washington DC: EPA, p. www.epa.gov/waste.
- [2] Espinosa-Salguero, W. S., Tatamués-Pozo, R. A. "Diseño y simulación de una máquina trituradora de llantas, de una tonelada por hora de capacidad, para la empresa OPTRA-SEMBRES." *Tesis de Licenciatura*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2016.
- [3] U. D. I. Legislativas, "Ley para la prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos." Centro de Información e Investigaciones Legislativas (CILCEO), Oaxaca, México, Junio. 2009.
- [4] Cardona, L., Sánchez, L. M. "Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos." Tesis especialización, Universidad de Medellín, Colombia, 2011.
- [5] NotiGras, "Actualidad del césped sintético." Poligras, Publicación Informativa sobre la actualidad del sector del césped sintético en España, Julio, 2007.
- [6] Presti, L. "Recycled Tyre Rubber Modified Bitumen for road asphalt mixtures" *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 863–881, 2013.
- [7] Zárata-Velandia, C. "Valoración De 3 Métodos De Reciclaje De Llantas Para Implementar En El Municipio Valoración De 3 Métodos De Reciclaje De Llantas Para Implementar En El Municipio De Villavicencio." Tesis de Licenciatura. Bogotá, Colombia, 2011.
- [8] Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., and Mastral, A. M., "Waste tyre pyrolysis - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 179–213, 2013.
- [9] G. Castro., "Materiales y Compuestos para la Industria del neumático", *Diciembre*, p, 54, 2008.
- [10] *Manual de información técnica de neumáticos*; Dirección de transportes CONAE, México, DF.
- [11] *EUROMASTER AUTOMOTION Y SERVICIOS*, S. A. "geo-tag". [online]. Disponible:<https://www.euromaster->

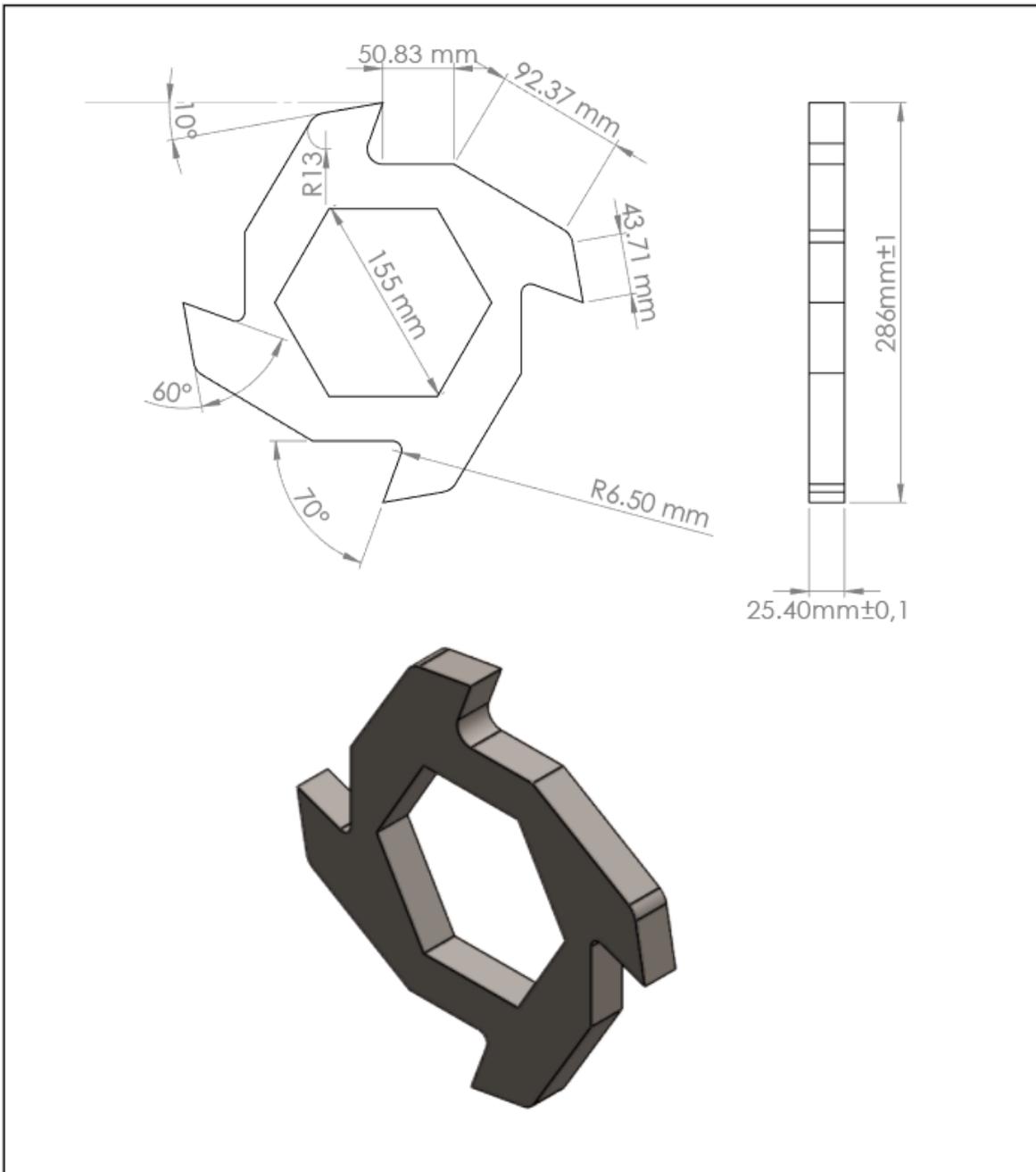
neumaticos.es/neumaticos/información/partes-de-unneumatico

- [12] "Alltyre: Información técnica neumáticos." [Online]. Available: <http://alltyre.blogspot.mx/p/blog-page.html>. [Accessed: 14-Aug-2017].
- [13] "How much does a tyre weigh? » Oponeo.co.uk." [Online]. Available: <https://www.oponeo.co.uk/tyre-article/how-much-does-a-tyre-weigh>. [Accessed: 14-Aug-2017].
- [14] Hernández-García, G. Y. "Plan Tecnológico del proceso de Reciclado de llantas." Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Queretaro, Santiago de Queretaro, Qro., México 2013.
- [15] Lalama-Ochoa, C. G., Navarrete-Mosquera, A. L. "Diseño de una máquina trituradora de neumáticos" Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2016.
- [16] Gallegos, B. V. and Tadeo, J., "Incineration of waste in cement," *Entre Textos*, vol. 6, no. 18, 2015.
- [17] Etrma, "End of life tyres," *End life tyres - a Valuab. Resour. with Grow. potential*, 2011.
- [18] Cantanhede, A., Monge, G. "Estado del arte del manejo de llantas usadas en las américas," *Div. Salud y Ambiente*, p. 41, 2002.
- [19] P. Crusher, *Handbook of Crushing*. 2003.
- [20] Ortiz-Ortega, E. J., Tirado-Abril, R. J., "Diseño y construcción de una trituradora de mandíbulas de excéntrica elevada," *Tesis de Licenciatura*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia, 2005.
- [21] *Trituración*, Industrias I, 72.02 – 92.02, 2015.
- [22] Y. Machinery. (2017) Mandíbula de excéntrica elevada. [Online]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/eccentric-spindle-movable-jaw-plate-fixedjaw-plate-jaw-crusher-parts-discount-from-factory-60461995007.html>
- [23] Portalanza-Rueda, L. R., Rodriguez-Salazar, I. E., "Diseño y construcción de una máquina trituradora de restos alimenticios y farmacéuticos fuera de especificación en envases de Tetra pak y recipientes plásticos," *Tesis de*

Licenciatura. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolqui, Ecuador, 2013.

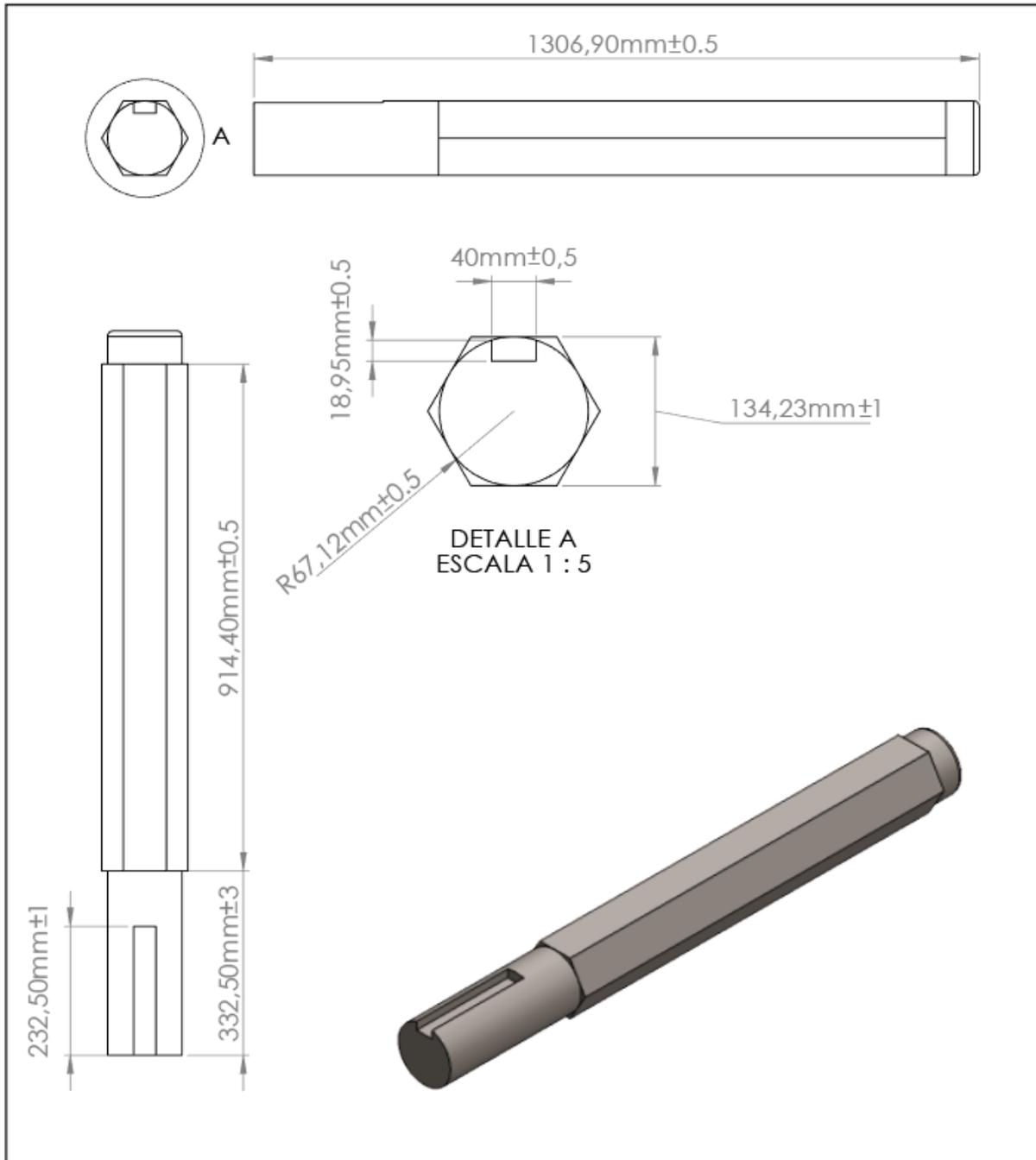
- [24] Junior-Perez L., “Metodología Analítica En Ingeniería,” 2009. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/jpl24/metodologia-analitica-en-ingenieria>. [Accessed: 17-Aug-2017].
- [25] F. Pineda. (2016), Cambio de tamaño en las llantas. [Online]. Available: <https://www.neumarket.com.mx/blog/como-cambiar-el-tamano-de-las-llantas-de-forma-segura/>.
- [26] Espinoza Correa, M. (2015). Aplicación del método QFD para el diseño de un envase de geometría especial en el proceso de termoformado. Doctorado. Universidad de la Rioja.
- [27] I. E. de Normalización, “CAUCHO VULCANIZADO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DEL ALARGAMIENTO PORCENTUAL,” Norma técnica Ecuatoriana., Quito, Ecuador, 2013.
- [28] G. Yahya . (2019), ISO 34-1 - Caucho vulcanizado o termoplástico- Determinación del resistencia al desgarro. [Online]. Available: <https://www.instron.com.ar/es-ar/testing-solutions/by-standard/iso/iso-34-1>
- [29] A. G. Veintimilla, “Implementación de un diseño mecánico para triturar neumáticos reciclables”, Tesis para la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [30] Q. Industry, C. Judong, (2018). Qingdao Judong Industry Co. [Online]. Available: w207251.company.weiku.com
- [31] Aing, “SAE 1020 y SAE 1045 Aceros Ingeniería al carbono,” Cia. General de Aceros S.A., Bogotá, Colombia, 2018.
- [32] M. Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna, 3ra ed., México, McGraw – Hill Interamericana, 2007.
- [33] R. Budynas, k. Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 8va ed., Interamericana, McGraw – Hill Interamericana, 2008.
- [34] C. A. Fortuna, “Departamento técnico, Aceros grado maquinaria”. México, 2018.
- [35] Mott, R. (2006). Diseño de elementos de máquinas. 4th ed. México: Pearson Educación.

ANEXOS
-ANEXO 1



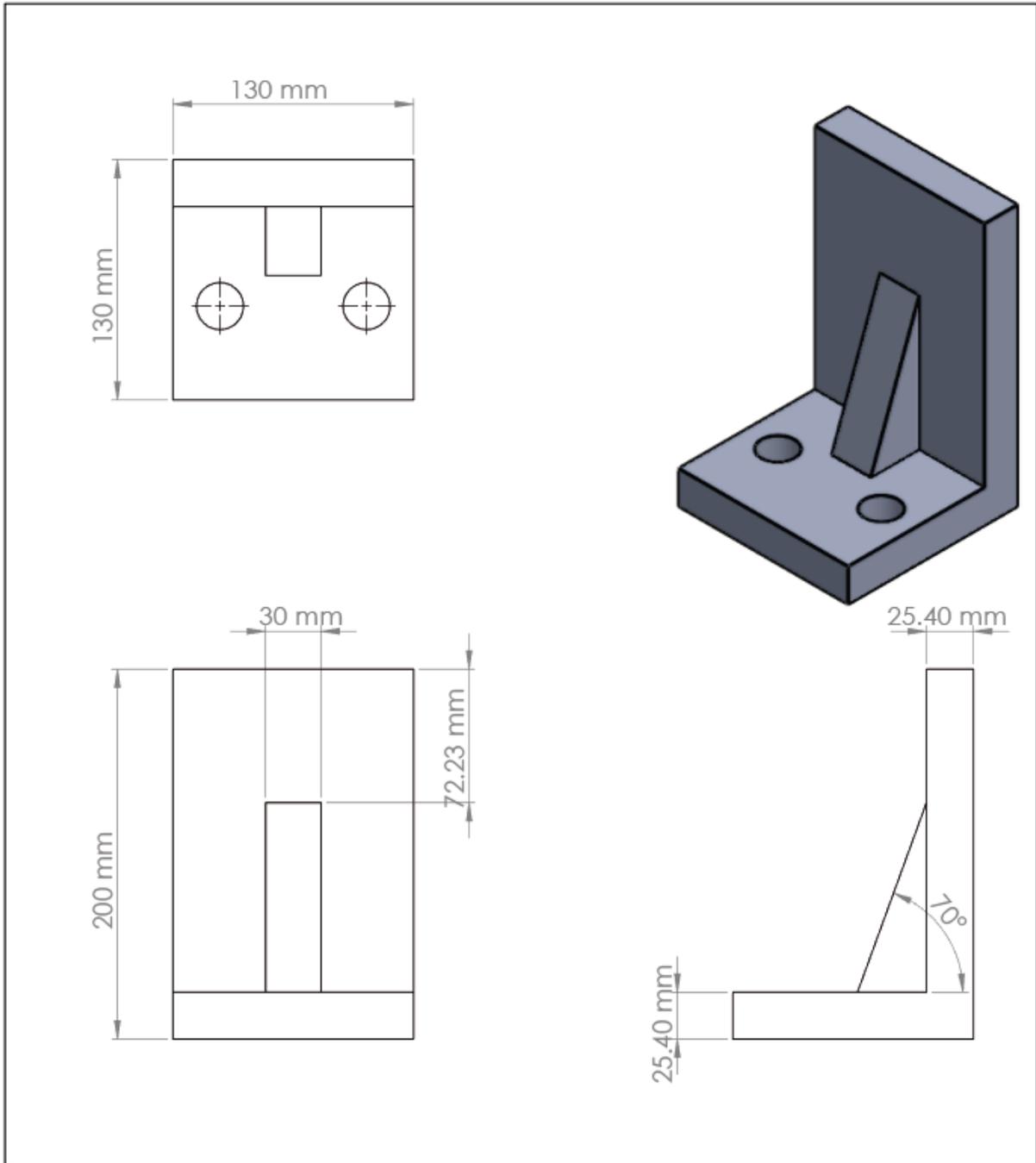
Material: AISI 1045	Universidad Tecnológica de la Mixteca Maestría en Tecnología Avanzada de Manufactura	
Escala 1:4	Dibujó: Víctor Martínez Hernández	Sistema de corte
Proyecto: Diseño de cuchillas y árbol de transmisión para un molino triturador de neumáticos usados.		Cuchilla de corte
		Plano No. 1

-ANEXO 2



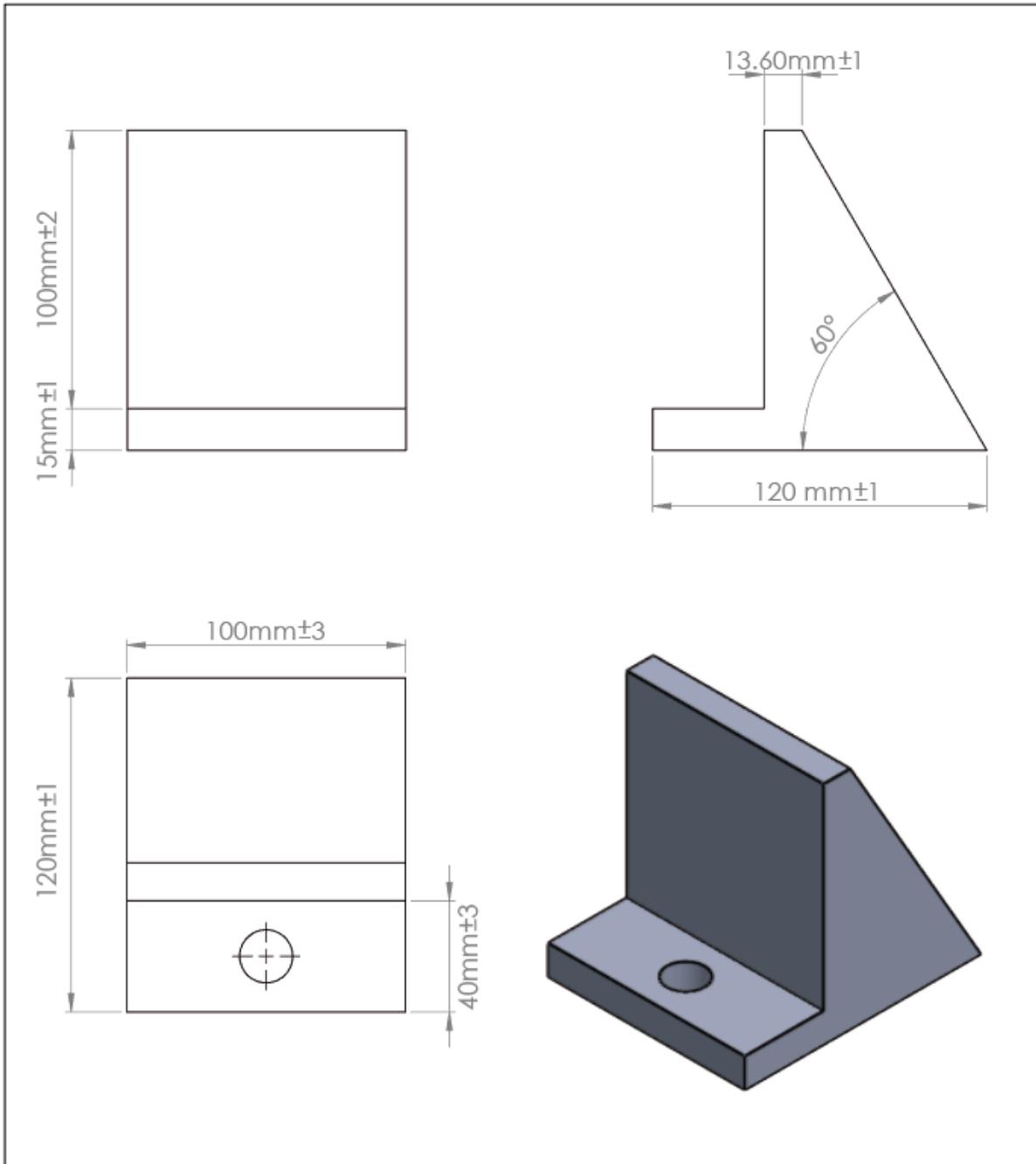
Material: SAE 4340		Universidad Tecnológica de la Mixteca Maestría en Tecnología Avanzada de Manufactura	
Escala 1:5	Dibujó: Víctor Martínez Hernández	Sistema de corte	
Proyecto: Diseño de cuchillas y árbol de transmisión para un molino triturador de neumáticos usados.		Árbol de transmisión	
		Plano No. 2	

-ANEXO 4



Material: Acero aleado	Universidad Tecnológica de la Mixteca Maestría en Tecnología Avanzada de Manufactura	
Escala 1:2	Dibujó: Víctor Martínez Hernández	Herramienta para maquinado
Proyecto: Diseño de cuchillas y árbol de transmisión para un molino triturador de neumáticos usados.		Aditamento para sujeción
		Plano No. 3

-ANEXO 4



Material: Acero aleado		Universidad Tecnológica de la Mixteca Maestría en Tecnología Avanzada de Manufactura	
Escala 1:2	Dibujó: Víctor Martínez Hernández	Herramienta para maquinado	
Proyecto: Diseño de cuchillas y árbol de transmisión para un molino triturador de neumáticos usados.		Aditamento angular	
		Plano No. 4	