UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN EQUIPO DE MOLIENDA DE CASCARILLA DE AVENA, APLICADO A LA INDUSTRIA RECICLADORA DE ALIMENTOS EN FORMATO DE MASAS

CONSTANZA NICOLLE MORAGA ARÉVALO

MEMORIA DE TITULACION PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL MECANICO

PROFESOR GUIA: Ing. RAFAEL MENA YANSSEN

PROFESOR CORREFERENTE: Ing. GUSTAVO BORÉ BACIGALUPPI

Enero de 2021

A mi mamá, por entregarme siempre cariño, contención, consejos y compañía cuando lo he necesitado. Por ser un ejemplo de perseverancia, paciencia y amor.

A mi papá, por entregarme las herramientas. Por ser mi cable a tierra y apoyo incondicional en todo lo que me he propuesto a lo largo de mi vida.

A mi hermano, por ser mi amigo, consejero, player 1 y compañero de aventuras sin importar la distancia, las locuras ni el tiempo disponible.

A mi pololo, por acompañarme estos últimos años, por apoyarme en todo lo que hago y por entregarme amor sin importar lo que pase.

A mis amigas y amigos, por estar siempre presentes sin importar los motivos.

Resumen

El grano de avena es un producto de origen vegetal compuesto de una semilla y su cáscara. Posee un alto porcentaje de fibra, la que se encuentra en un 80% es su envoltorio, transformándolo en un producto de difícil digestión para él ser humano, pero, en una fuente de fibra importante para animales.

Se propone diseñar un equipo capaz de moler la cáscara de avena. Para esto, se realiza un análisis detallado de los tipos de alimentos y maquinarias encontradas en la industria alimentaria, para luego comparar y obtener cuadros resúmenes que facilitan la elección del equipo dependiendo de la materia prima a procesar. En base a esto, se determina que un molino de martillo es el más apropiado para la molienda de la cáscara de avena.

En base a los resultados, el molino debe estar compuesto por ochenta martillos rectangulares capaces de moler la cáscara de avena hasta dejarla en formato de harina. Posee una capacidad de molienda de 20 quintales la hora y trabaja con una potencia de 20 [HP].

Finalmente, los costos de fabricación asociados a los componentes diseñados del molino alcanzan un monto de $ 3.500.000, esto considerando materia prima, mano de obra y maquinaria para la manufactura de las partes. Por otro lado, si se toma en cuenta el armado, soportes, sistema de potencia y transmisión del equipo, el monto aumenta a los $ 6.600.000 aproximadamente.

Índice general

INTRODUCCIÓN **1**

OBJETIVOS **3**

- OBJETIVOS PRINCIPALES 3
- OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

CAPÍTULO 1: **4**

ESTADO DEL ARTE **4**

1.1. ALIMENTOS Y SU CLASIFICACIÓN 4

1.1.1. Origen *4*

1.1.1.1. Origen animal 5

1.1.1.2. Origen vegetal 5

1.1.1.3. Origen mineral 5

1.1.2. Cantidad de humedad *5*

1.1.2.1. Solidos 6

1.1.2.2. Líquidos 7

1.1.3. Clasificación por consumo *7*

1.1.3.1. Grupo 1: Lácteos 7

1.1.3.2. Grupo 2: Carnes y huevo 8

1.1.3.3. Grupo 3: Legumbres, tubérculos y frutos secos 8

1.1.3.4. Grupo 4: Vegetales 8

1.1.3.5. Grupo 5: Frutas 8

1.1.3.6. Grupo 6: Cereales 9

1.1.3.7. Grupo 7: Lípidos 9

1.2. REDUCCIÓN DE TAMAÑO 9

1.2.1. Reducción de tamaño de alimentos solidos *10*

1.2.1.1. Teoría 11

1.2.1.2. Maquinaria 13

1.3. RELACIÓN ENTRE ALIMENTOS Y MAQUINARIAS 28

CAPÍTULO 2: **32**

CASO DE ESTUDIO **32**

2.1. CASCARILLA DE AVENA 33

2.1.1. Propiedades físicas y químicas *34*

2.1.2. Condiciones de almacenamiento *35*

2.2. EQUIPOS DE MOLIENDA PARA LA CASCARILLA 35
2.2.1. Molino de martillo 36
2.2.1.1. Disco giratorio porta martillos 36
2.2.1.2. Martillos 36
2.2.1.3. Rejilla clasificatoria 37
2.2.1.4. Placa de impacto o plato estacionario 37
2.2.2. Molino de rodillos 38
2.2.2.1. Rodillos 38
2.2.2.2. Ajustador de distancia de rodillos 38
2.3. SELECCIÓN DEL EQUIPO 39

CAPÍTULO 3: 40

MARCO TEÓRICO 40

3.1.1. Capacidad de molienda 40
3.1.2. Velocidad angular ($\boldsymbol{\omega}$) y tangencial $\boldsymbol{vt}$ 41
3.1.3. Coeficiente de fluctuación $\boldsymbol{Cs}$ y velocidad con carga ($\boldsymbol{vc}$) 41
3.1.4. Radio de giro $\boldsymbol{rg}$ 43
3.1.5. Dimensiones y masa del martillo 43
3.1.6. Fuerzas 44
3.1.7. Dimensiones y masa del disco 46
3.1.8. Esfuerzos 47
3.1.9. Estudio de ejes 49
3.1.10. Potencia 54
3.1.11. Correas de transmisión 55
3.1.12. Chavetas 58
3.1.13. Rodamientos 59
3.1.14. Velocidad critica 60

CAPÍTULO 4: 62

MEMORIA DE CÁLCULO 62

4.1. MOLINO DE MARTILLOS 62
4.1.1. Cálculos de parámetros básicos 64
4.1.2. Cálculo de martillos 65
4.1.3. Cálculo de fuerzas 67
4.1.4. Cálculo de esfuerzos del martillo 68
4.1.5. Factor de seguridad 69

4.1.6. Cálculo del Disco ... *71*
4.1.7. Cálculo del eje secundario ... *72*
4.1.7.1. Molino con Dos discos ... 75
4.1.7.2. Molino de Tres discos ... 77
4.1.7.3. Molino de Cinco discos ... 79
4.1.7.4. Molino de Seis discos ... 81
4.1.7.5. Molino de Once discos ... 83
4.1.7.6. Molino de Veintiún discos ... 85
4.1.8. Elección de Golillas ... *90*
4.1.9. Cálculo de potencia ... *91*
4.1.10. Determinación de correas y poleas ... *92*
4.1.11. Cálculo eje principal ... *96*
4.1.12. Elección de Rodamientos ... *104*

CAPÍTULO 5: ... 106

DISEÑO Y MODELACIÓN ... 106

5.1. DESCRIPCIÓN Y MEDIDAS ... 106
5.1.1. Martillos ... *107*
5.1.2. Discos ... *108*
5.1.3. Eje principal ... *109*
5.1.4. Eje secundario ... *110*
5.1.5. Arandelas ... *111*
5.1.6. Tapa de discos ... *112*
5.2. PLANOS DE FABRICACIÓN ... 113

CAPÍTULO 6: ... 114

COSTOS DE FABRICACIÓN ... 114

6.1. ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL EQUIPO ... 114
6.1.1. Materiales ... *114*
6.1.2. Maquinaria ... *116*
6.1.3. Mano de obra ... *117*

CONCLUSIÓN ... 119

REFERENCIAS ... 121

ANEXO A ... 124

“CÓDIGO PYTHON PARA ORDEN Y CÁLCULO DE DIÁMETRO DE EJE SECUNDARIO EN UN MOLINO DE MARTILLOS” **124**

ANEXO B **127**

“RESULTADOS COMPLEMENTARIOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE EJE PRINCIPAL EN UN MOLINO DE MARTILLOS” **127**

ANEXO C **131**

“GRÁFICOS UTILIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE FACTOR EN EL ANÁLISIS DE FATIGA” **131**

ANEXO D **133**

“RESULTADOS COMPLEMENTARIOS PARA EL CÁLCULO DE FATIGA DEL EJE PRINCIPAL EN UN MOLINO DE MARTILLOS” **133**

ANEXO E **135**

“PLANOS DE CONJUNTO DE LAS PARTES EXISTENTES DENTRO DE UN MOLINO DE MARTILLO” **135**

ANEXO F **140**

“RESULTADOS COMPLEMENTARIOS PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDAD CRITICA DEL EJE PRINCIPAL EN UN MOLINO DE MARTILLOS” **140**

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Rueda de los Alimentos (SEDCA,2007) 7

Ilustración 2: Rebanadora de alimentos: 1, correa V; 2, rueda porta cuchillas; 3, cuchillas (URSCHEL, 2013)..... 14

Ilustración 3: Cortadora en cubos (URSCHEL, 2013)..... 15

Ilustración 4: Ralladora: 1, impeler giratorio; 2, cuchilla ralladora (URSCHEL, 2013) 16

Ilustración 5: Cortadora de bowl: 1, cuchillas; 2, bowl rotatorio..... 17

Ilustración 6: Fuerza de aplicación en los molinos: (a) Rotación lenta; (b) Rotación rápida . 18

Ilustración 7: Molino de discos: (a) molino de disco único; (b) molino de disco doble (Elaboración propia) 19

Ilustración 8: Formado molino de clavijas y disco: (a) molino “pin and disc”..... 20

Ilustración 9: Molino de martillos (Palamatic, 2019) 21

Ilustración 10: Molino de rodillos (Elaboración propia)..... 22

Ilustración 11: Esquema molino de cuchillas (Maquinova, 2015)..... 23

Ilustración 12: Molino de rotor: (a) Discos de corte (Retsch, 2011); 24

Ilustración 13: Esquema funcionamiento del molino de mortero (Incolor, 2015) 25

Ilustración 14: Tornillo sin fin cónico..... 26

Ilustración 15: Extractor de jugo: (a) Bandas extractoras; (b) Tipo semiesferas 27

Ilustración 16: Partes de un grano de avena (Carrasco, 2007) 33

Ilustración 17: Martillos para impacto de trituradores (Gonzalez, 1977) (Modificado)..... 37

Ilustración 18: Forma y dimensiones teóricas del martillo 44

Ilustración 19: Diagrama teorico de fuerzas existentes en un martillo 46

Ilustración 20: Forma y dimensiones teóricas del disco 46

Ilustración 21: Forma y dimensiones del martillo..... 66

Ilustración 22: Vista en corte del centro de la perforación de un martillo 68

Ilustración 23: Forma teorica eje secundario 74

Ilustración 24: Martillo con diámetro de 26 [mm]: (a) Coeficiente de seguridad; (b) Tensión de Von Mises 88

Ilustración 25: Martillo con diámetro de 30 [mm]: (a) Coeficiente de seguridad; (b) Tensión de Von Mises 89

Ilustración 26: Forma teórica del eje a diseñar 96

Ilustración 27: Tensiones y ángulos de poles conducidas..... 98

Ilustración 28: Fuerzas que actúan sobre el eje principal en el plano X-Y 99

Ilustración 29: Fuerzas que actúan sobre el eje principal en el plano X-Z 100

Ilustración 30: Forma y nomenclatura final de un martillo..... 107

Ilustración 31: Forma y nomenclatura final de un disco porta martillos 108

Ilustración 32: Forma y nomenclatura final de un eje principal 109

Ilustración 33: Forma y nomenclatura final de un eje secundario 110

Ilustración 34: Forma y nomenclatura final de arandela plana 111

Ilustración 35: Forma y nomenclatura final de la tapa de disco 112

Ilustración 36: Pantalla de ingreso de datos iniciales del código Python (Elementos) 125

Ilustración 37: Pantalla de ingreso de datos finales del código Python (Diámetro mínimo) 126

Índice de Figuras

Figura 1: Perdidas y desperdicio de alimentos per cápita en las fases de consumo 2

Figura 2: Diagrama tensión - elongación correspondiente a diversos alimentos (Fellows, 1994) (Modificado) 12

Figura 3: Factor de servicio típico o de corrección de potencia (Intermec, 2013) (Resumido) 93

Figura 4: Tipo de correa (Intermec, 2013) 93

Figura 5: Capacidad de transmisión por canal (en HP) Correa tipo 3V (Intermec, 2013) (Resumido) 94

Figura 6: Eje redondo con filete en el hombro en flexión (Nisbett, 2008) 132

Figura 7: Eje redondo con filete en el hombro en torsión (Nisbett, 2008) 132

Figura 8: Diagrama Fuerza Cortante entregado por Inventor de AutoDesk 141

Figura 9: Diagrama Momento Flector entregado por Inventor de AutoDesk 142

Figura 10: Diagrama Tensión de Von Mises entregado por Inventor de AutoDesk 143

Figura 11: Diagrama Diámetro Ideal entregado por Inventor de AutoDesk 143

Figura 12: Diagrama Flexión Peso del Eje entregado por Inventor de AutoDesk 144

Figura 13: Diagrama Flexión del conjunto entregado por Inventor de AutoDesk (Plano X - Y) 145

Figura 14: Diagrama Flexión del conjunto entregado por Inventor de AutoDesk (Plano X - Z) 145

Índice de Tablas

Tabla 1: Tipo de fuerza que requieren los alimentos 12

Tabla 2: Relación maquinarias con el porcentaje de humedad 28

Tabla 3: Relación maquinarias con la fuerza aplicada 29

Tabla 4: Relación maquinarias con las cualidades 30

Tabla 5: Relación maquinarias con el tamaño de partícula que se obtiene 31

Tabla 6: Composición interna de la avena en porcentaje (Ronco, 2013) 34

Tabla 7: Coeficientes de variación de la velocidad (Salisbury, 1952)(Reducida) 42

Tabla 8: Factor de choque y fatiga (Nisbett, 2008) 50

Tabla 9: Datos del Factor de Superficie para diferentes acabados superficiales (Nisbett, 2008) 52

Tabla 10: Valores del factor de temperatura en [°C] y [°F] (Nisbett, 2008) (Reducida) 53

Tabla 11: Valores de factor de confiabilidad (Nisbett, 2008) (Reducido) 53

Tabla 12: Factor dependiendo de la velocidad de rotación de los martillos (Gonzalez, 1977) 54

Tabla 13: Dimensiones de algunas aplicaciones de cuñas cuadradas y rectangulares, en [mm] (Nisbett, 2008) 58

Tabla 14: Datos ingresador al programa Python 73

Tabla 15: Disposición y numero de martillos entre discos 74

Tabla 16: Resumen dimensiones y datos entregados por código Python 87

Tabla 17: Valores de Esfuerzos alternantes y medios 89

Tabla 18:Valores del Límite de resistencia a la fatiga para cada diámetro 90

Tabla 19: Factores de seguridad para distintos diámetros (Fatiga) 90

Tabla 20: Dimensiones de arandela según ISO 7089..... 91

Tabla 21: Resumen dimensiones eje secundario, en [mm] 91

Tabla 22: Longitud por sección según la cantidad de discos, en [mm] 97

Tabla 23: Fuerza total de los discos sobre el eje principal en cada caso, en [N] 97

Tabla 24: Valor diámetros exteriores finales de cada sección, en [mm]..... 102

Tabla 25: Medidas chavetas según DIN 6885, en [mm] 102

Tabla 26: Factores de seguridad en cambio de diámetro (Mayor a Medio)..... 102

Tabla 27: Factores de seguridad en cambio de diámetro (Medio a Menor)..... 102

Tabla 28: Factores de seguridad en chaveteros (Diámetro menor) 103

Tabla 29: Fuerzas existentes en los soportes del molino de martillo, en [N]..... 104

Tabla 30: Datos calculados para la selección de descansos 105

Tabla 31: Aceros adecuados para manufactura de martillos..... 107

Tabla 32: Aceros adecuados para manufactura de discos 108

Tabla 33: Aceros adecuados para manufactura de eje principal 109

Tabla 34:Costos asociados a materiales para fabricación de un molino de martillos 115

Tabla 35: Costos principales para fabricación de un molino de martillos 117

Tabla 36: Costos totales para la fabricación y montaje de un molino de martillos..... 118

Tabla 37: Valores de esfuerzos alternantes y medios (Diferentes diámetros) 134

Tabla 38: Valores de los coeficientes para la obtención del factor de seguridad (Diferentes diámetros) 134

Tabla 39: Valores de esfuerzos alternantes y medios (Diámetro menor) (Chavetero) 134

Tabla 40: Valores de los coeficientes para la obtención del factor de seguridad (Diámetro menor) (Chavetero) 134

Tabla 41: Peso y deflexión del eje principal debido a su propia masa..... 144

Tabla 42: Peso y deflexión del eje principal debido a la masa del conjunto..... 146

Glosario

- ***Panificación:*** Se refiere a la industria responsable de la producción de pan, esto quiere decir, la actividad artesanal de obtención de la harina por molturación del trigo, el amasado, la fermentación de la masa, el moldeo de las piezas y su cocción.

- ***Cribar:*** Pasar una materia por una criba para separar las partes finas y las gruesas o para limpiarla de impurezas.

- ***Friables:*** Alimentos que se desmenuzan con facilidad

- ***Molturación:*** Moler granos o frutos. Es sinónimo de molienda.

- ***Granujienta:*** Que tiene muchos granos. En el caso de los alimentos, se refiere a aquellos que al tacto poseen gránulos visibles y palpables.

- ***Función plástica:*** Es el proceso a través del cual el organismo toma ventaja de las sustancias nutritivas para formar y mantener los tejidos musculares o los huesos. Los nutrientes que permiten al organismo realizar esta función son las proteínas contenidas en pescados, carnes y lácteos y ciertos minerales.

- ***Función energética:*** Es el proceso necesario para reponer el gasto permanente que se produce para el mantenimiento de las funciones orgánicas.

- ***Función reguladora:*** Es el proceso en el cual se logran regular las reacciones químicas y bioquímicas existentes en el organismo al momento de ingerir algún tipo de alimento.

- ***Poáceas:*** Son una familia de plantas herbáceas, o sea, que no poseen tallos leñosos, por lo que sus tallos mueren al acabar la estación. Dentro de esta familia se encuentra la caña de azúcar, trigo, arroz, maíz, cebada, avena, centeno o el bambú.

Introducción

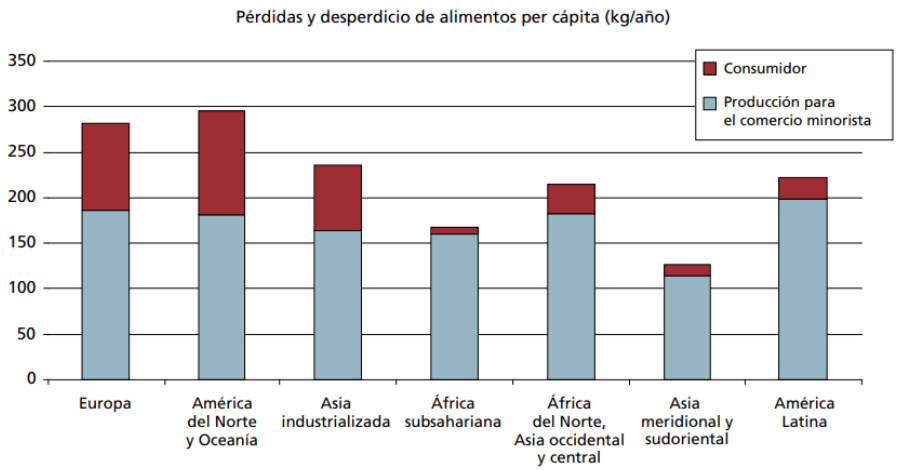
La industria alimentaria es el sector de la producción industrial que tiene como objetivo generar productos destinados a la alimentación humana y animal. Es la encargada de todos los procesos que influyen en la cadena alimenticia, estando presente a lo largo de toda la cadena de suministro que involucra la producción de alimentos, esto quiere decir, desde la recepción de las materias primas, hasta el consumo final del producto.

Las materias primas son principalmente de origen vegetal, animal y fúngico, o sea, todas son orgánicas, lo que conlleva a poseer un proceso de descomposición que limita la vida útil para su consumo. El tiempo que se demora un alimento de origen orgánico en descomponerse es de aproximadamente un mes luego de ser procesado, por lo que al sobrepasar este periodo de tiempo no es posible su consumo y debe ser desechado como basura.

A nivel mundial existe una perdida cercana a 1.300 millones de toneladas de alimentos al año (Recabarren, 2019), lo cual representa un tercio de los alimentos producidos para el consumo humano. Lo anterior causa perdidas de alrededor de 680 mil millones de dólares en los países industrializados y de 310 mil millones en los países en desarrollo. La región latinoamericana es la cuarta en niveles de desperdicios alimenticios (ver Figura 1), ya que, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura, en Latinoamérica se pierden o desperdician el 34% de su masa comestible disponible, lo cual equivale a 127 millones de toneladas de alimentos al año (FAO, 2011).

Observando la Figura 1, según la FAO en el año 2011, es posible cuantificar la cantidad de alimentos desperdiciados en la fase de consumo. Estos números alcanzan en Europa, América del Norte y América Latina un valor de 280, 300 y 225 [kg/año] respectivamente, lo que representa las pérdidas per cápita de alimentos. Por otro lado, la cantidad de alimentos per cápita desperdiciada por los consumidores es de 95 a 115 [kg/año] en Europa y América del Norte, mientras que esta cifra alcanza solo de 6 a 25 [kg/año] en el África subsahariana y América Latina. Se aprecia que a nivel mundial Norte América y Oceanía son las regiones que más desperdician alimentos, quedando en cuarto lugar Latino América.

Figura 1: Perdidas y desperdicio de alimentos per cápita en las fases de consumo y anteriores al consumo en diferentes regiones (FAO, 2011)



La pérdida de alimentos, según la FAO (2013), es la responsable de aproximadamente 3.300 millones de toneladas métricas de emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono equivalente), por lo que, si se consideraran estas emisiones como las generadas por un país, llegarían al tercer lugar de la tabla de países con más emisiones de este tipo de gases, solo después de Estados Unidos y China.

Una propuesta que se ha ido desarrollando en los últimos años es la recuperación de los alimentos que no se descomponen aceleradamente, ayudando de esta forma a reducir las emisiones y la pérdida económica que implica el desecho de alimentos. La idea se basa en separar los alimentos para obtener una nueva materia prima apta para reprocesar, y de esta forma obtener un nuevo producto que sirva de alimento para animales o para abono en zonas de cultivo.

El objetivo de la investigación es diseñar y generar un estudio económico de un equipo de molienda aplicado a la industria recicladora de alimentos en formato de masa, esto a través de la caracterización de los alimentos y equipos existentes, con el fin de seleccionar el más conveniente para la materia prima seleccionada. Además, para completar el diseño se requiere profundizar el marco teórico aplicable al equipo, y con ello lograr una memoria de calculo que respaldará los planos de ingeniería del equipo. Finalmente se estimarán los costos de fabricación del diseño propuesto.

Objetivos

Considerando la problemática existente, se requiere encontrar una solución ingenieril que ayude a reducir el desperdicio de alimentos, esto aplicado directamente a una de las industrias harineras, sacando aprovecho y agregando valor a los subproductos existentes. Con esto, lograr el diseño de un equipo de molienda que produzca una nueva materia prima en formato de harina, con el fin de destinarla a la alimentación animal.

- **Objetivos principales**

  Levantar propuesta de diseño de un equipo de molienda, aplicado a la cáscara de avena, a través de la caracterización de las maquinarias existentes en la industria alimentaria. Realizar una estimación de los costos asociados a la fabricación de las partes del equipo, incluyendo la mano de obra y maquinarias utilizadas para la manufactura de estas.

- **Objetivos específicos**

  Para lograr el objetivo principal se proponen los siguientes objetivos específicos:

  - Identificar los materiales a triturar en la industria de alimentos, clasificándolos según sus características físicas.
  - Estudiar el estado del arte de los equipos utilizados en la molienda y trituración de alimentos.
  - Profundizar el marco teórico de equipos que puedan triturar la cascarilla de avena, desarrollando una memoria de cálculo de los componentes más relevantes del equipo
  - Realizar planos generales del equipo diseñado, a nivel de ingeniería básica.
  - Identificar y obtener los costos principales de fabricación del equipo.

Capítulo 1:

Estado del Arte

1.1. Alimentos y su clasificación

Un alimento se define como una sustancia nutritiva que toma un organismo o ser vivo para mantener sus funciones vitales (Real Academia Española, 2006). Esta definición engloba todos los alimentos sin importar las características que los hacen diferentes unos con otros. Por esto es necesario comprender el origen, la cantidad de humedad o el consumo de cada uno de ellos para poder analizar y comparar la información recopilada con otros parámetros, o bien, para el caso de estudio, con los equipos de molienda utilizados en la industria alimentaria.

Al existir una gran variedad de clasificaciones solo se mencionarán las tres que se consideran más relevantes para el posterior análisis. La idea de clasificar los alimentos es para obtener cuadros resúmenes que faciliten el uso de la información recopilada, y a su vez, comprender de manera rápida que características tienen los alimentos cualquiera sea el caso.

1.1.1. Origen

Separar los alimentos según su naturaleza da la posibilidad de clasificarlos en tres posibles opciones, facilitando de esta forma la comprensión y el análisis de sus características comunes.

Algunas fuentes bibliográficas mencionan que los alimentos provienen solo de origen animal o vegetal, dejando de lado algunos alimentos, como la sal, que son comestible pero que no se pueden caracterizar en ninguna de las opciones. Por esto para el caso de estudio se considera importante incluir otro tipo de origen, el mineral, teniendo de esta forma la posibilidad de incluir alimentos altos de sales y minerales.

1.1.1.1. Origen animal

De la mayoría de los animales es posible consumir solamente su carne e interiores, esto debido a que no se puede obtener nada mas de su organismo o que sea producido por este, pero a su vez, existen casos particulares que producen algunos productos que son comestibles y consumidos por gran parte de la población, como lo son la leche y los huevos. Por esta razón, esta categoría incluye todo alimento proveniente del animal, incluyendo los que por alguna razón deben ser procesador para obtener un subproducto de la materia prima obtenida del origen en cuestión.

1.1.1.2. Origen vegetal

Estos productos provienen principalmente de lo encontrado o cultivado en la tierra, esto significa, alimentos que se extraen de árboles, arbustos, plantas o raíces que sean comestible para el ser humano o animal. Ejemplos de estos son las frutas, verduras, cereales y legumbres, incluyendo igual los alimentos que provienen de ellos, como fideos, arroz, harinas y otros que son de consumo común.

1.1.1.3. Origen mineral

Para determinar o clasificar alimentos en esta categoría deben estar compuestos de al menos un 70% de minerales, esto junto con provenir completamente de origen natural. En esta categoría entran principalmente alimentos altos en sales, hierro y potasio, como también el agua y la sal de mesa.

1.1.2. Cantidad de humedad

Los alimentos se pueden subdividir según su estado inicial, ya sea que se encuentren en forma de solidos o líquidos, esto dependiendo claramente con la cantidad de humedad existente en su composición. El contenido de humedad en un alimento es, frecuentemente, un índice de estabilidad del producto, por ende, conocerlo sirve para tener un control, ayudando de esta forma al proceso y a su conservación de los alimentos.

Esta clasificación se considera complementaria de las otras a estudiar, pero no por ello deja de ser importante para el caso de estudio, ya que servirá para la elección del equipo a diseñar.

1.1.2.1. Solidos

Como definición los alimentos sólidos, al igual que los cuerpos con esta misma condición, presentan forma propia y oponen resistencia a ser dividido (Real Academia Española, 2006), por esto y considerando que el porcentaje de humedad en los alimentos no es igual, se procederá a subdividir de una forma clara y útil para el posterior análisis a realizar.

Para esta categoría es importante entender lo que significa la actividad del agua (A_w), la cual es la humedad en equilibrio de un producto, y se determina por la presión parcial del vapor de agua en su superficie. Este valor dependerá de la composición, la temperatura y el contenido en agua del producto, además de incidir sobre las características de calidad de los alimentos, como la textura, color, sabor, gusto, valor nutricional y el tiempo de conservación. Los valores de la actividad del agua van desde 0 a 1, en donde los más cercanos a 1 se conservarán de peor manera, esto porque serán alimentos más jugosos, lo que conlleva a disminuir su vida útil, aumentando la probabilidad de ser desechados.

1.1.2.1.1. Alimentos húmedos

Estos alimentos poseen un porcentaje de humedad elevado, en otras palabras, tienen un A_w superior al 0.85, provocando un ambiente favorable para la existencia de hongos y bacterias, disminuyendo de esta forma su vida útil. Estos alimentos en su mayoría poseen un alto contenido en fibras, ya sean solubles o insolubles. Además, al ser fibrosos no son capaces de descomponerse en el organismo humano pasando directamente al estómago, intestino delgado y colon.

En esta categoría se encuentran principalmente carnes, frutas, hortalizas, queso y pan, los cuales además de ser altos en fibras, poseen un porcentaje de agua en su composición, lo que los hacen tener propiedades más blandas y dúctiles. Esto último es importante tenerlo en cuenta, ya que para la trituración esto influirá directamente en cómo se tratarán dichos alimentos.

1.1.2.1.2. Alimentos secos

Como dice su nombre, esta categoría está compuesta de alimentos con bajo porcentaje de agua en su composición, o bien, A_w inferior al 0.85, lo que los hacen más manejables y

comparables a minerales como carbón o piedras. Al poseer un bajo porcentaje de humedad, gran parte de estos se fragmenta en forma de polvillo, lo cual en un periodo prolongado de exposición podría llegar a ser nocivo al ser respirado por manipuladores de estos alimentos.

1.1.2.2. Líquidos

Según su definición, un líquido es una sustancia cuyas partículas presentan mayor movilidad que los sólidos y menor que los gases, y no presentan una forma propia determinada, pero sí un volumen fijo que se distribuye en el recipiente que lo contiene adaptándose a su forma (Real Academia Española, 2006). Por lo anterior, todo alimento que cumpla con estas características y que a su vez no entre dentro de categoría de sólidos, se puede tratar como un líquido, y con ello, procesarlo de una manera diferente.

En ocasiones algunas fuentes tratan las frutas y verduras dentro de esta categoría, esto por el porcentaje de humedad existente en ellas, mayor al 90%, pero para el caso de estudio, todo alimento que posea forma y sea capaz de mantenerla en ausencia de una fuerza externa, se considerara como alimento solido con mayor o menor porcentaje de humedad en su interior.

1.1.3. Clasificación por consumo

Esta clasificación también es conocida como la "Rueda de los Alimentos", la cual fue creada por un programa de Educación en la Alimentación y Nutrición (EDALNU) en los años 60, y tenía como función ser una guía para poder realizar una dieta equilibrada. Es posible obtener otra forma de representación, como lo es la "Pirámide Nutricional", la que es utilizada a nivel mundial y ordena los grupos dependiendo de su importancia, esto porque cada uno es separado según las funciones que cumplen y los nutrientes que proporcionan.

Ilustración 1: Rueda de los Alimentos (SEDCA,2007)

1.1.3.1. Grupo 1: Lácteos

Su función es plástica, por lo que participan en la formación y mantenimiento de las distintas estructuras del organismo. Son alimentos proteicos y su poder energético depende de la grasa que acompañe a las proteínas. Por esto, en este grupo se consideran la leche y sus derivados,

esto quiere decir, yogurt, queso, mantequilla, helados y otros productos que provengan de la leche animal.

1.1.3.2. Grupo 2: Carnes y huevo

Su función es plástica, por lo que el organismo toma ventaja de las proteínas y vitaminas entregadas por los alimentos pertenecientes a este grupo. Dichos alimentos son las carnes (vacuno, cerdo, ave), las cuales incorporan proteínas de alto poder biológico como hierro y vitaminas del grupo B, o bien, el pescado que entrega grasas Omega 3. También, dentro de esta categoría se encuentran todos los derivados de los animales, como huevos e interiores.

1.1.3.3. Grupo 3: Legumbres, tubérculos y frutos secos

Su función plástica y energética, esta última en el sentido de que aportan energía gracias al contenido en hidratos de carbono. Los alimentos que pertenecen a esta categoría generan un alto aporte de este hidrato, esto quiere decir, son capaces de aportar energía, ahorran proteínas y forman parte del tejido nervioso. Dentro de esta categoría se encuentran los tubérculos, legumbres y frutos secos, los que aportan proteínas de origen vegetal de alto contenido biológico y fibra, ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados, y vitaminas del grupo B.

1.1.3.4. Grupo 4: Vegetales

Su función es reguladora, por lo que los alimentos pertenecientes a esta categoría aportan grandes cantidades de vitaminas, minerales y fibras (especialmente soluble), además de un alto porcentaje de agua y pocas calorías. Acá se pueden encontrar todas las verduras y hortalizas, en donde estas últimas son cualquier planta herbácea hortícola que se utiliza como alimento, ya sea en crudo o cocido, que no pertenezca a los vegetales considerados verduras. El termino hortalizas es para referirse en general a los frutos, tallos, raíces y semillas, en cambio, las verduras son las que poseen sus órganos verdes (hojas y tallos) tierno, lo que implica que sean comestibles.

1.1.3.5. Grupo 5: Frutas

Su función es reguladora, por lo que ayudan regulando las reacciones bioquímicas de los organismos que consumen los alimentos pertenecientes a este grupo. Su importancia en la

dieta es similar a la del grupo 4, verduras y hortalizas, pero además se caracterizan por ser ricas en azúcares del tipo de la sacarosa, fructosa y glucosa, pero con bajo aporte calórico.

1.1.3.6. Grupo 6: Cereales

Su función es energética, por lo que aportan calorías de sus carbohidratos para generar energía y enviarla a las células del organismo. Son importante también por la aportación de vitaminas del grupo B, lo que también aporta a lo mencionado. En este grupo se encuentran los cereales más densos y nutritivos, pan, pastas, azúcar y dulces (pastelería).

1.1.3.7. Grupo 7: Lípidos

Su función es energética, ya que son alimentos que proporcionan gran aporte calórico y vitaminas liposolubles. En este grupo se encuentran alimentos como las grasas, mantequilla y aceites, los cuales al ser ingeridos son capaces de producir sensación de saciedad. En el caso de las grasas, estas pueden ser de origen animal o vegetal, las que se diferencias por su composición, o por el uso que se le da.

1.2. Reducción de tamaño

Por reducción de tamaño se refiere a aquella operación unitaria en la que el tamaño medio de los alimentos sólidos es reducido por la aplicación de fuerzas de impacto, compresión o abrasión. Esta puede ser aplicada a alimentos sólidos como a alimentos líquidos, siendo denominada para este último caso homogeneización o emulsificación. El objetivo de este proceso es mejorar la contestabilidad o adecuación de los alimentos para un determinado proceso de elaboración y para aumentar la gama de fabricación (Fellows, 1994).

Este proceso de reducción tiene ventajas claras, las cuales son:

a) **Aumento de la relación superficie/volumen:** Con esto es posible aumentar la velocidad de deshidratación y, además, al poseer menor tamaño, aumenta la superficie de contacto con el ambiente, y con ello facilita la transferencia de calor, mejorando la eficacia y la velocidad de extracción de compuestos solubles.

b) **Obtención de tamaño deseado:** Al combinar la reducción de tamaño con un proceso de cribado, es posible obtener partículas de un tamaño predeterminado, lo cual, facilita el correcto comportamiento de algunos alimentos durante su elaboración.

c) **Aumenta eficacia al mezclado:** Cuando el tamaño de las partículas del producto se mezclará de forma homogénea, la mezcla llega a ser de mejor calidad, esto quiere decir, es casi imperceptible la heterogeneidad de sus componentes.

Para lograr la reducción de tamaño se conocen tres posibles procesos, los que se diferencian por la forma y tamaño que adopta el alimento luego de pasar por ellos. Por esto, y considerando que todos los alimentos tienen características diferente, se entiende que los procesos no son aptos para todas las materias primas, por lo que la elección de la forma de trituración dependerá del alimento y no del equipo. Por consiguiente, se tiene que las formas de reducción de tamaño son:

- ***Rebanado:*** Se consideran los cortes en tacos, rebanadas o rodajas. Estos pueden tener diferentes tamaños, que van desde uno grande (quesos, filetes), a uno pequeño (carne picada, verduras troceadas).

- ***Molienda:*** Los alimentos que logran un tamaño granular (harinas, azúcar, especias) luego de ser procesados son los que encasillan en esta opción. La molienda en polvo o pastas de finura creciente son algunos de los procesos de los cuales vienen estos.

- ***Emulsiones:*** También llamadas homogeneización, incluye todos los alimentos líquidos, o bien, provenientes de algún proceso posterior de los mismos (leche, mayonesa, mantequilla).

1.2.1. Reducción de tamaño de alimentos solidos

Como se mencionó en el punto anterior, es posible reducir el tamaño tanto de alimentos líquidos como de sólidos, siendo estos últimos los de mayor importancia para la investigación que se debe realizar. Por esto, y teniendo en cuenta que existe una gran variedad de tipos de alimentos, se procederá a explicar en primera instancia el comportamiento mecánico de la materia prima, o sea, los esfuerzos necesarios para poder romper la resistencia interna de ellos. Luego, se ejemplificarán las maquinarias dependiendo del porcentaje de humedad que poseen

los alimentos, esto para agruparlos dependiendo de las fuerzas necesarias para reducir su tamaño.

1.2.1.1. Teoría

Al igual que los metales, los alimentos poseen propiedades mecánicas, las que juegan un papel primordial en el comportamiento de ellos durante su reducción de tamaño. Una de estas es la elasticidad, la cual se define como la propiedad de un material por la que recupera su forma y dimensiones originales, parcial o totalmente al cesar la acción de la fuerza aplicada (Aguilera, 1996). Entonces, si se lleva esta definición al caso de estudio, se tiene que los alimentos son capaces de recuperar su forma original luego de ser sometidos a una fuerza. El problema de lo anterior es que para reducir el tamaño de los alimentos es necesario deformarlos, y para esto se debe superar el límite de esfuerzo elástico, o sea, se tiene que ser capaz de deformar permanentemente el alimento para llevarlo a la rotura.

Para comprender el comportamiento que pueden llegar a tener diferentes alimentos en presencia de tensiones, se tiene la Figura 2. Esta muestra cinco posibles curvas y tres puntos que describen las zonas elásticas, plásticas o rotura de cada una de ellas. Al comparar cada una de estas curvas se logra apreciar que:

- ***Curva 1 y 2:*** Alimentos duros y resistentes. Se diferencian en que uno es quebradizo y el otro dúctil. Esta última cualidad determina que el segundo es capaz de resistir de mejor manera el stress al cual es enfrentado, y con ello lograr una elongación mayor que el primero.

- ***Curva 3:*** Es un alimento que al ser quebradizo llega rápidamente a la rotura.

- ***Curva 4 y 5:*** Alimentos blandos y frágiles. El primero al ser más dúctil es capaz de adaptarme de mejor manera y estirarse más que un alimento quebradizo, pero esto no es suficiente por su cualidad de frágil. La curva 5 al ser quebradizo no es capaz de soportar una alta tensión, llegando rápidamente a la rotura.

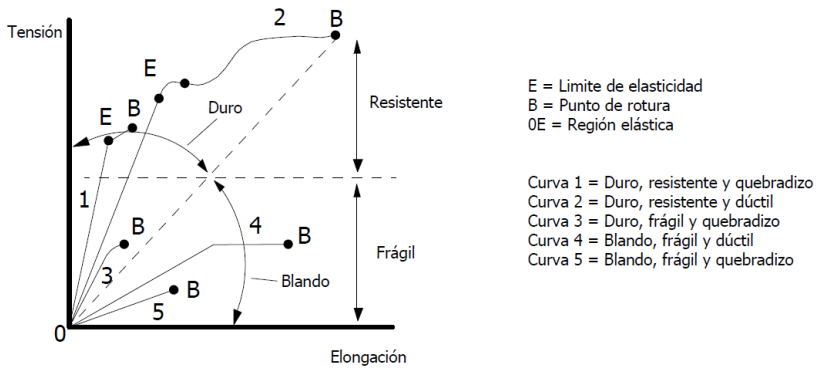


Figura 2: Diagrama tensión - elongación correspondiente a diversos alimentos (Fellows, 1994) (Modificado)

Existen tres cualidades que pueden definir el comportamiento de diferentes materiales en presencia de una o varias fuerzas. Estas propiedades ayudan a clasificar cada uno de los materiales, y con ello, comprender cómo se comportan internamente.

- ***Tenacidad:*** Energía de deformación total que es capaz de absorber o acumular un material antes de alcanzar la rotura en condiciones de impacto, por acumulación de dislocaciones.

- ***Resistencia:*** Capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo.

- ***Ductilidad:*** Propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas o materiales asfalticos, los cuales, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse.

Los alimentos pueden ser clasificados dependiendo de la tenacidad, resistencia y ductilidad que poseen, esto para establecer una relación entre las fuerzas a aplicar y el tipo de alimento, lo que permite determinar cuál de estas es más efectiva para reducir el tamaño de los alimentos según sus propiedades mencionadas (ver Tabla 2).

Tabla 1: Tipo de fuerza que requieren los alimentos

Tipo de alimento	Fuerza requerida
Friables y Cristalinos	Compresión
Fibrosos	Impacto y Cizalla
Blandos	Cizalla

El porcentaje de humedad que presentan los alimentos en su composición interna influye en la forma de molienda que se debe utilizar para reducir su tamaño, por esto en algunos procesos agregar alimentos húmedos, o agua directamente, a la materia prima pertenecientes al grupo de alimentos con bajo porcentaje de humedad, ayuda a tener un mejor control sobre la molienda que se desea. Lo anterior solo es favorable si se tiene un control sobre este porcentaje que se agrega, ya que un exceso puede provocar aglomeración de partículas, o grumos, lo que es desfavorable para el equipo, ya que puede llegar a producir el bloqueo de este. Caso contrario, el no agregar humedad a alimentos secos puede provocar un exceso de polvo al momento de la molienda, lo que presenta un riesgo para la salud del operador, y en ocasiones, riesgo de explosión de dicho particulado.

1.2.1.2. Maquinaria

Ya comprendiendo la naturaleza de los alimentos y la caracterización dada anteriormente, se procede a investigar los tipos de maquinarias que son capaces de reducir el tamaño de cualquier tipo de alimento en formato sólido. Cabe destacar que en la industria del reciclaje de alimentos no se sabe con exactitud el tipo de propiedad que posee la materia prima, por lo cual se tratará de enfocar cada uno de los equipos lo mejor posible, comprendiendo la forma en como ejercen sus fuerzas y cuál de estas es la predominante al momento de la trituración.

A continuación, se presentarán catorce equipos que son utilizados en la industria de producción de alimentos, y no en la del reciclaje de estos. Este detalle no es inconveniente para ninguno de los equipos, ya que, si los alimentos que ingresan a ellos son los adecuados dependiendo de las fuerzas que utilizan, se procesara de manera normal y se obtendrá una nueva materia prima para el uso que se crea conveniente.

1.2.1.2.1. Rebanadoras

Como su nombre lo dice, este equipo es capaz de rebanar el alimento gracias a una serie de cuchillas rotatorias o de vaivén que giran sobre su eje de rotación, las que al entrar en contacto con los alimentos los va cortando en forma de rodajas. En la industria es posible encontrar diferentes tipos de equipos con estas características, algunos de ellos requieren que los alimento permanezcan apretado contra las cuchillas (cortadoras de cecinas), o bien, los que mantienen en un soporte fijo los alimentos (principalmente para cortar carne).

Esta máquina se puede adaptar a los diferentes usos que se le quiera dar, por esto en algunos modelos es posible intercambiar las cuchillas, o ruedas porta cuchillas, obteniendo tres tipos diferentes de formas de cortes (lisos, ondulados o tiras ovaladas). A la vez, algunos modelos de ruedas poseen cuchillas con diferentes filos, generando así la posibilidad de realizar dos tipos de corte con una sola rueda, esto dependiendo del ángulo de inclinación que posea la misma. Además, cada corte puede tener diferentes grosores, dando la opción de regular la distancia de la rueda con el movimiento mismo de la cinta, o el ángulo de la cuchilla. La correa trasportadora es posible encontrarla en algunos modelos, y tiene la función de guiar el alimento a las cuchillas, facilitando de esta forma el corte producido por ellas, ya que al estar sincronizada la cinta con la rueda rebanadora se garantiza el avance adecuado del alimento (ver Ilustración 2).

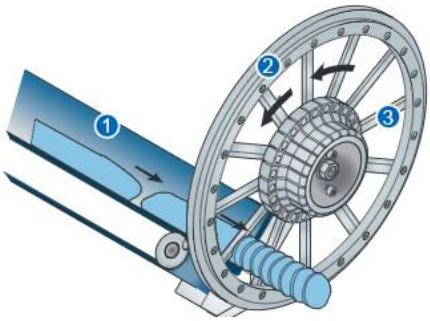


Ilustración 2: Rebanadora de alimentos: 1, correa V; 2, rueda porta cuchillas; 3, cuchillas (URSCHEL, 2013)

La aplicación de este tipo de maquina es principalmente para alimentos fibrosos, lo que no significa que su uso no se pueda aplicar a alimentos blandos o friables, pero estos últimos al ser ingresados al equipo pueden llegar a pegarse a las cuchillas, o bien, atorarse en el mecanismo interno del mismo, lo que sería perjudicial para el corte de los alimentos. Por otro lado, la fuerza que aplica principalmente es la de corte, ya que la reducción de tamaño dependerá del contacto entre el filo y el alimento. También, se pueden llegar a considerar las fuerzas de impacto y cizalla en algunas ocasiones, ya que, si las cuchillas no están en óptimas condiciones, el corte se hará solo por el contacto a gran velocidad.

1.2.1.2.2. Cortadora en cubos

Este equipo corta los alimentos en formato de cubos gracias a la fuerza centrífuga resultante del giro del impeler que guía el alimento, empujándolo de esta forma contra el interior de las cuchillas rebanadoras. A medida que salen las rebanadas de alimento, entran de manera inmediata a unas cuchillas rotatorias, o también llamadas cuchillas circulares (ver Ilustración 3), las que cortan el alimento en tiras, esto para luego entrar a otras cuchillas rotatorias, cuyo sentido de giro está en ángulo recto con respecto al anterior, de esta forma es capaz de generar la forma cubica que se desea obtener.

El formato de cada uno de estos procesos variará según las cuchillas elegidas en ellos, ya que para las rebanas es posible obtener tanto en formato liso como ondulado de diferentes grosores, los cuales variaran dependiendo de la distancia entre el borde de la compuerta para rebanadas y el filo de la cuchilla rebanadora. Para las tiras, pueden ser cortadas en forma lisa, ondulada u ondulado profundo, todos estos con diferentes anchos dependiendo del tamaño final que se quieran los cubos. Lo anterior va tomado de la mano con el control de la longitud de las tiras, ya que es posible utilizar combinaciones de cuchillas circulares o de cuchillas de corte transversal esto alargando o achicando las dimensiones solicitadas. Finalmente, cuando se trata de la obtención de los cubos, se usan arboles motrices de corte transversal, los cuales pueden ser ajustados dependiendo de las dimensiones que se quiera para el producto final, ya que si se desean cubos más pequeños las cuchillas deben tener una separación menor, o bien, si la disposición de los elementos lo permite, el largo de las chuchillas puede aumentar para acercar el corte a la salida de las tiras.

Por lo tanto, este tipo de equipos es capaz de cortar alimentos fibrosos, blandos y fiables, siendo estos dos últimos más complejos porque suelen pegarse en las cuchillas, disminuyendo la eficiencia de corte y evitando lograr los tamaños deseados. Además, como se mencionó en el caso de las rebanadoras, las fuerzas utilizadas serán las de corte, cizalla e impacto en cada uno de los procesos.

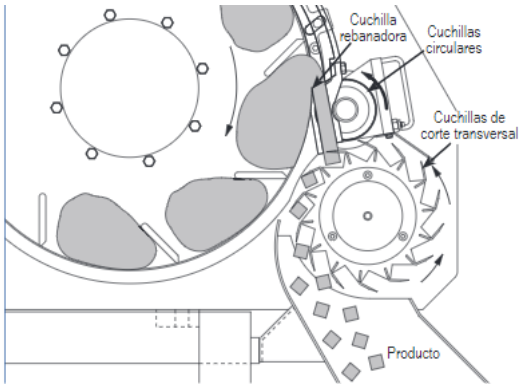


Ilustración 3: Cortadora en cubos (URSCHEL, 2013)

1.2.1.2.3. Ralladoras

Este equipo es utilizado principalmente para el rallado de alimentos como quesos, pan y alimentos fibrosos. En la industria es posible encontrar dos formatos para este tipo de máquina. El primero es un molino de martillo modificado, en donde los martillos son sustituidos por cuchillas para conseguir el corte deseado. La segunda trata de dos jaulas concéntricas dotadas de cuchillas en su extremo, las que son capaces de cortar los alimentos gracias a que ambas jaulas giran en direcciones opuestas, lo que obliga al producto a pasar por las cuchillas.

El rallador compuesto por las jaulas concéntricas es el más utilizado a nivel industrial, por esto se explicará más detalladamente su funcionamiento. El proceso comienza con el ingreso del producto al impeler giratorio (primera jaula concéntrica), en donde gracias a la acción de la fuerza centrífuga el alimento se mantiene en la superficie del ensamble de ambas jaulas (ver Ilustración 4). La segunda jaula consta de varias estaciones de corte fijas individuales (el numero variara dependiendo del tamaño del equipo), la cual gracias al movimiento de ambas jaulas logra el rallado de los alimentos a procesar de manera fluida. Considerando lo anterior, se entiende que pueden existir diferentes longitudes de rallado, las cuales dependerán del tamaño del producto que se carga, o bien, de la distribución y separación de las cuchillas.

Las fuerzas utilizadas en este equipo son las de corte y compresión para poder lograr el rallado de los alimentos, y la de cizalle, para superar la resistencia de la materia prima.

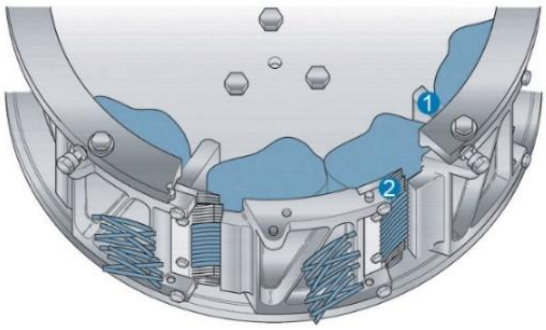


Ilustración 4: Ralladora: 1, impeler giratorio; 2, cuchilla ralladora (URSCHEL, 2013)

1.2.1.2.4. Bowl Chopper

La cortadora de bowl, o también llamada bowl chopper, es un equipo utilizado en frutas y carnes, esto porque es capaz de procesar alimentos duros, elásticos y resistentes al ser cortados. Está compuesto por un recipiente en forma de casquete esférico invertido y de un conjunto de cuchillas que giran a gran velocidad, siendo estas últimas las responsables de cortar los alimentos. El equipo es capaz de triturar la materia prima hasta obtener una pulpa granujienta, la cual es utilizada en salchichas o conservas a base de carne y fruta triturada.

Para lograr la molienda se debe llenar el recipiente de manera uniforme con el alimento que se desea triturar, esto para no forzar ni dañar las cuchillas. El bowl ya cargado comienza a gira horizontalmente con un movimiento lento, esto seguido del movimiento vertical que baja las cuchillas que giran a gran velocidad, logrando así la molienda del alimento. La pulpa granujienta que se obtiene debe ser revisada para corroborar el tamaño que se desea, puesto que la velocidad de las cuchillas, el movimiento que posee el bowl y el tiempo que permanece el alimento en el equipo, determinaran la granulometría que se obtendrá.

La disposición de los componentes es primordial para el buen uso del equipo, esto porque el bowl y las cuchillas deben formar un ángulo recto entre ellos (ver Ilustración 5), logrando que el contacto entre el filo y el alimento genere una fuerza de corte e impacto. En caso contrario, si las cuchillas se encuentren en otro ángulo, se provoca la fuerza de cizalle, generando un mayor desgaste de los filos y la posible falla de componentes del equipo.

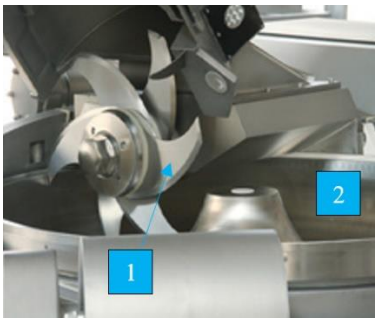


Ilustración 5: Cortadora de bowl: 1, cuchillas; 2, bowl rotatorio
(Hebei Yuanchang Food Mechanism & Technology Co., Ltd., 2016)

1.2.1.2.5. Molino de bolas

Este equipo, al igual que los usados en minería, consiste esencialmente en un cilindro horizontal, el cual es llenado hasta la mitad con bolas de acero, las que poseen un diámetro entre 2,5 y 15 [cm]. Este tamaño es el que determina la granulometría final que tendrá el alimento a moler, ya que entre más pequeña es la bola, más molido quedara este.

El cilindro puede girar de dos formas para poder generar la molienda propia del producto, esto se refiere a que la velocidad de giro puede ser lenta, trabajando con bolas de bajo diámetro, o rápida, cuando se trata de bolas grandes. Las fuerzas que actúan en las situaciones mencionadas son de cizalla e impacto respectivamente, esto porque al aumentar la velocidad, la altura alcanzada por las bolas será mayor, entonces la caída alcanzará una fuerza más elevada (ver Ilustración 6). Estos equipos son utilizados principalmente para alimentos secos y duros, esto porque el porcentaje de humedad afecta a la molienda.

Existe una modificación de estos molinos, en donde se cambian las bolas por rodillos evitado así que los alimentos se peguen a estos últimos. Lo anterior ocurre frecuentemente en molinos de bolas que trabajan con alimentos viscosos o con alto porcentaje de humedad, esto porque la adherencia que posee la materia prima al entrar en contacto con las bolas genera que se pegue a esta, provocando su aumento de tamaño, lo que, al momento del impacto, impide lograr la granulometría de molienda deseada.

Los alimentos más recomendados para moler en los molinos de bolas son los duros, como cereales, harinas de pescado y colorantes, pero en el caso de cambiar las bolas por rodillos, el equipo es capaz de procesar alimentos con un porcentaje de humedad más elevado.

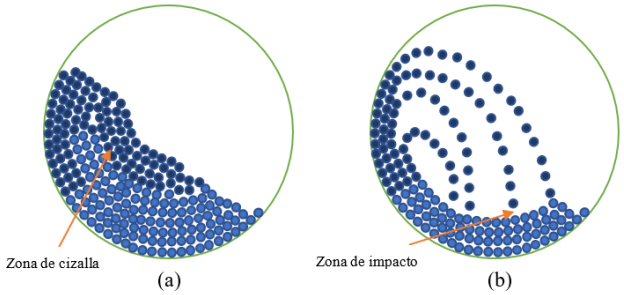


Ilustración 6: Fuerza de aplicación en los molinos: (a) Rotación lenta; (b) Rotación rápida (Elaboración propia)

1.2.1.2.6. Molinos de discos

Los discos dentados utilizados en estos equipos son capaces de moler los alimentos mediante presión y cizallamiento, por esto son ideales para la trituración fina en el rango medio de tamaño de partícula de sólidos blandos a duros, viscosos y sensibles a la temperatura.

En la industria es posible encontrar dos molinos de discos, ambos utilizan la misma lógica de trituración, pero se diferencian por la cantidad de discos que poseen. A continuación, se explicará detalladamente el funcionamiento de cada uno, y con ello, las diferencias que existen entre ellos.

1.2.1.2.6.1. Molino de disco único

En este equipo, el alimento pasa a través de una pequeña separación que existe entre el disco que gira a gran velocidad y el casco del molino (ver Ilustración 7 (a)). Como consecuencia de la acción de la fuerza de cizalla, se tritura la materia prima, y con ello se logra el tamaño deseado, en donde este último puede variar gracias a que es posible regular la separación entre el disco y el casco, esto dependiendo de la granulometría deseada.

1.2.1.2.6.2. Molino de disco doble

Este equipo es una modificación del molino anteriormente explicado, puesto que la armadura contiene 2 discos capaces de girar en direcciones opuesta (ver Ilustración 7 (b)).

El funcionamiento se basa en el giro a gran velocidad de ambos discos, los que al entrar en contacto con el alimento que ingresa por la parte superior del equipo, son capaces de generar una fuerza de cizalla y compresión mayor a la que provoca un molino de disco simple del mismo tamaño. Con esta fuerza el alimento es triturado a un tamaño definido, el cual es posible variar con la regulación de la distancia entre los discos.

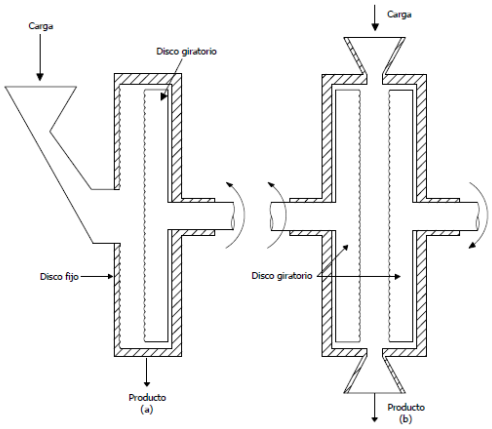


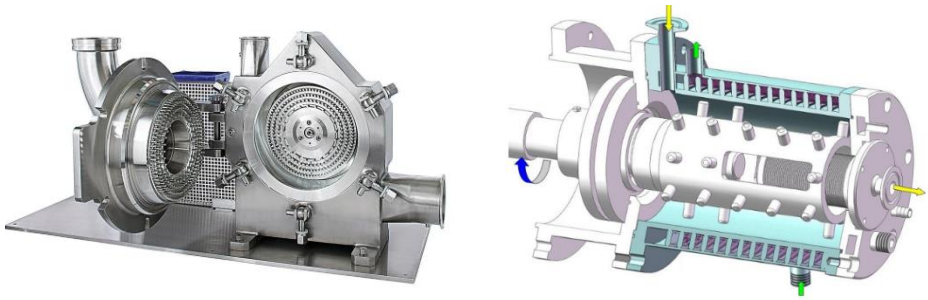
Ilustración 7: Molino de discos: (a) molino de disco único; (b) molino de disco doble (Elaboración propia)

1.2.1.2.7. Molino de clavija

Estos equipos poseen la característica que estar dotado de una serie de clavija, las cuales son piezas delgadas de metal, madera u otro material, con cabeza y punta, que se encaja en el agujero hecho al efecto en una pieza sólida y sirve para sujetar o unir (Real Academia Española, 2006). Estas piezas, gracias a la rotación producida por la transmisión, son capaces de impactar los alimentos, logrando así la reducción de su tamaño.

En la industria se encuentran dos formatos, en donde el primero, también llamado *"pin and disc"* (ver Ilustración 8 (a)), posee el mismo funcionamiento que el molino de disco, pero se diferencia en que remplaza los dientes existentes en los discos por clavijas. En el segundo formato, el material es ingresado a un cilindro, parecido al que existe en el molino de bolas, en donde tiene contacto con las clavijas (ver ilustración 8 (b)), las que desgarran el material ejerciendo fuerza de cizalla e impacto, esta última por la velocidad que puede llegar a alcanzar la rotación del equipo.

Los alimentos que se recomiendan procesar con este tipo de equipos son principalmente lo que poseen bajo porcentaje de humedad (secos) y duro, esto porque las fuerzas utilizadas facilitan su molienda. Ejemplos de alimentos óptimos para reducir su tamaño son el azúcar, almidón, pimienta y nueces tostadas. Caso contrario, no se recomienda procesar alimentos blandos, ya que pueden quedar atascados en las clavijas, aumentando la resistencia al movimiento, y provocando una sobrecarga interna en el molino.



(a) (b)

Ilustración 8: Formado molino de clavijas y disco: (a) molino "pin and disc" (Hosokawa Micron LTD, 2019); (b) molino de clavijas horizontal (Shanghai ELE Mechanical & Electrical Equipment Co., 2012)

1.2.1.2.8. Molino de martillos

Este equipo se compone por una cámara cilíndrica recubierta por una plancha perforada de acero endurecido, que en su interior posee un o dos rotores dotado de martillos en toda su longitud. Los martillos son los encargados de impactar el material que ingresa a la cámara de molienda, por esto las fuerzas que son utilizadas son la de impacto y cizalla, pero, cuando el alimento queda entre el martillo y el plato estacionario, se pone en acción la fuerza de compresión (ver Ilustración 9). En la industria existen diferentes variables de estos equipos, los que se diferencian por la cantidad de martillos o de rotores.

El funcionamiento consta de dos procesos fundamentales, ambos aportando a la reducción de tamaño que se desea para el alimento. Primero los martillos que giran a gran velocidad se encuentran con la materia prima que ingresa por la parte superior del mismo, la golpean y fragmentan, para luego guiarla al fondo del equipo. Este proceso no logra reducir el tamaño de las partículas a la granulometría requerida, por esto se requiere una segunda etapa, la cual ocurre cuando el alimento que se encuentra sobre la rejilla de retención es impactado repetidamente por los martillos, logrando de esta forma triturar el material hasta que sea capaz de cruzar por la rejilla, llegando así a la granulometría definida.

El tamiz, o rejilla de retención, es un elemento que se encarga de definir el tamaño de partícula antes de comenzar la operación. En algunos molinos no se encuentra presente este elemento, esto porque no se requiere tener un tamaño determinado.

Los molinos de martillos son utilizados en alimentos quebradizos, duros, fibrosos y grasos, esto porque son fáciles de fragmentar con la fuerza de impacto ejercida por estos equipos. El tamaño de partícula que se logra obtener es mediano, pero gracias a la rejilla de retención es posible llegar a obtener tamaños de partículas cercanas a los 150 [μm] y 450 [μm], es decir, tamices #100 y #40 respectivamente.

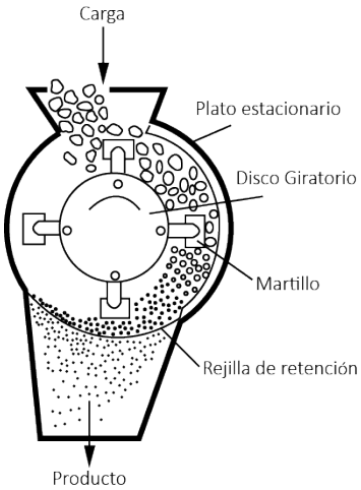


Ilustración 9: Molino de martillos (Palamatic, 2019)

1.2.1.2.9. Molino de rodillo

Un rodillo es un elemento con forma cilíndrica que gira a baja velocidad y que en su superficie son lisos, estriados o dentados, esto dependiendo del uso que se le quiera dar. Un molino de rodillo utiliza estos elementos para la molienda de algún material, lográndolo por la acción de uno, dos o muchos rodillos (ver Ilustración 10). Lo anterior hace más versátil la molienda, ya que cada uno de estos rodillos sirven para diferentes tipos de alimentos. Los estriados tienen buenas aplicaciones para caña de azúcar y trigo, a diferencia de los lisos, que son utilizados para el refino del chocolate. Los dentados son mucho más versátiles que los dos anteriores, pero están limitados para molturar alimentos sólidos muy duros.

Un molino de rodillo es un equipo empleado para la trituración y molienda secundario, o sea, recibe el material que ya ha sido procesado previamente por otro equipo de reducción de tamaño. Esto hace que el tamaño de molienda sea más pequeño, logrando una granulometría menor que en otros casos de equipos de molienda (Cosmo, 2018).

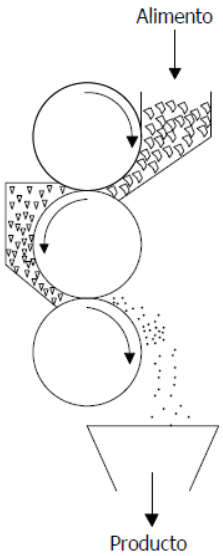


Ilustración 10: Molino de rodillos (Elaboración propia)

Su funcionamiento es muy simple, pero se diferencia dependiendo de la cantidad de rodillos que se estén utilizando, por esto, los molinos con solo uno se deben poner cerca de la placa rompedora para poder aplastar el material y aplicarle fuerza de compresión y cizalla. Por otro lado, los molinos con dos o más rodillos, tritura el material ya que cada uno de estos elementos gira en sentido contrario al que tienen en contacto, entonces, las partículas de alimento quedan atapadas entre los rodillos y son rotas por compresión hasta lograr un tamaño adecuado para caer a la parte inferior.

En la actualidad, las aplicaciones que poseen este tipo de equipos van desde la industria alimentaria, hasta la minería, lo que demuestra la vertibilidad que tienen. Lo anterior se debe a que posee una gran superficie para la molienda, abarcando una mayor cantidad de material de manera rápida. Además, al tener un funcionamiento sencillo, su mantenimiento también se hace fácil, y con ello, más rápido.

1.2.1.2.10. Molino de cuchillas

Son maquinas rotatorias que poseen dos o más filas de cuchillas montadas sobre un eje, este también llamado flecha. Dichas cuchillas giran dentro de una cámara de molienda (ver Ilustración 11) a milímetros de separación, logrando cortar el material que ingresa por la parte superior.

El funcionamiento de este equipo, y la forma en como logra reducir el tamaño de los alimentos es gracias a la fuerza de corte que ejercen las cuchillas sobre estos, pero, además, cuando las cuchillas pierden el filo por mala mantención o excesivo uso, el alimento pasa a ser triturado por la fuerza de impacto generada por la rotación del equipo. La materia prima también es triturada por la arista roma de las cuchillas, esto generando una trituración preliminar, o bien, por la arista afilada de las mismas (molienda fina).

Por otro lado, estos equipos son ideales para triturar y homogeneizar materiales blandos, semiduros, elásticos, secos, húmedos y mojados, entonces, pueden ser aplicados a gran número de alimentos, y con ello, demuestra lo versátil que pueden llegar a ser. También, los tamaños de partícula que logran dependerán de la separación existente entre cuchillas, por lo que este tamaño puede ir entre el rango de los milímetros, hasta los 300 [µm] aproximadamente (Retsch, 2011). Por todo lo anterior, su aplicación es variada, ya que además de ser utilizadas en la trituración de alimentos, también es posible aplicarlas en agricultura, esto para generar pellets, o bien en productos farmacéuticos.

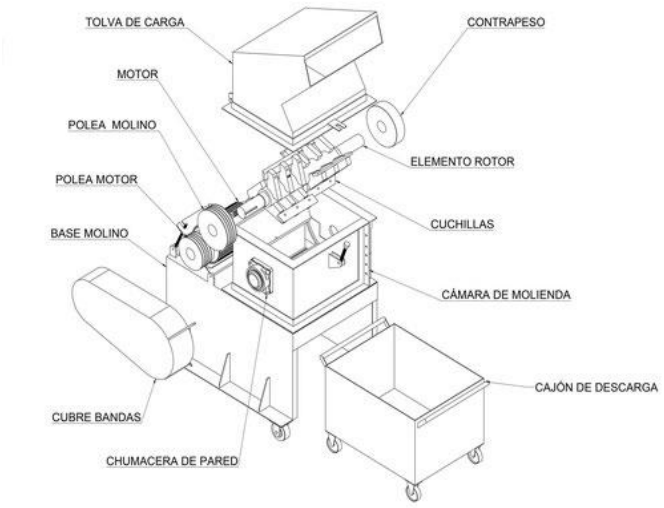


Ilustración 11: Esquema molino de cuchillas (Maquinova, 2015)

1.2.1.2.11. Molino de rotor o de corte

Estos molinos son posible utilizarlos para reducir el tamaño de alimentos blandos, fibrosos o duros, logrando en cada uno de estos un tamaño de partícula fino, esto quiere decir, superior a 40 [µm] (Retsch, 2011). Su aplicación dentro de la industria alimenticia va focalizada principalmente a alimentos como arroz, dulces, granos de café, maíz y hojas de té, lo que demuestra que puede trabajar con materiales de baja cantidad de humedad, hasta algunos con humedad más elevada y viscosos.

Existen dos tipos de molinos de rotor, los verticales y los horizontes, teniendo ambos un funcionamiento y aplicación parecidas, por lo que se considerará una explicación general para poder comprender el mecanismo de reducción de tamaño, y con ello, las partes que componen el equipo.

Trituran todos los alimentos mencionados gracias al efecto de las fuerzas de choque (impacto) y cizallamiento. La materia prima pasa por la tolva de alimentación y llega a la cama de molienda, en donde es triturado por el rotor, que posee la pieza molturadora (discos de corte (ver Ilustración 12 (a)) y los tamices insertables. Al momento de ingresar el alimento en el rotor, estos chocan con las cuchillas y son triturados por la fuerza de impacto que estas le ejercen, pero, no todas las partículas son capaces de obtener el tamaño óptimo para salir, entonces siguen girando en conjunto al rotor hasta que logra alcanzar la granulometría que debe tener (ver Ilustración 12 (b)).

(a) (b)

Ilustración 12: Molino de rotor: (a) Discos de corte (Retsch, 2011); (b) Esquema rotor (Retsch, 2011)

1.2.1.2.12. Molino de mortero

Este equipo tritura, mezcla y pulveriza los alimentos, a través de la acción de un mortero, que, gracias a sus dos movimientos independientes, logra presionar el alimento contra las pareces del recipiente que lo contiene.

Para reducir el tamaño de los alimentos de manera adecuada, se debe depositar la materia prima en el recipiente que contiene el mortero, el cual, con su giro y desplazamiento, ejerce una presión que provoca la fricción entre las paredes y los alimentos, logrando su trituración (ver Ilustración 13). Por lo anterior, las fuerzas predominantes en el funcionamiento del equipo son las de compresión y cizalla.

El molino de mortero se utiliza para procesar alimentos secos y húmedos, logrando alcanzar una granulometría luego de la molienda de 10 [µm]. Además, el tamaño de partícula necesario para ingresar al molino no debe exceder los 10 [mm], por lo que se utiliza en moliendas secundaria o terciaria, o bien, para la trituración de alimentos de bajo diámetro.

En la actualidad es utilizado en la industria química, alimentaria y médica, por lo que se suele trabajar con materiales blancos, duros, frágiles o pastosos. Lo anterior llevándolo al caso se estudió, se aplica para gran variedad de alimentos, pero no es muy utilizado por las limitaciones que presenta.

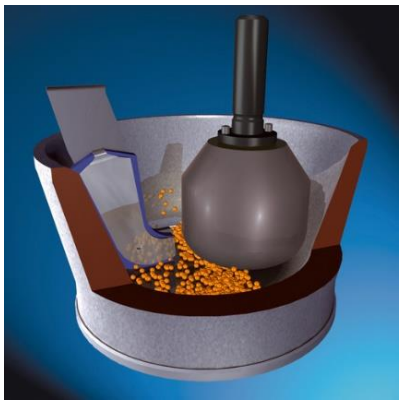


Ilustración 13: Esquema funcionamiento del molino de mortero (Incolor, 2015)

1.2.1.2.13. Despulpadoras

Pulpa es la parte mollar de la carne que no tiene huesos, o bien, es la parte blanda y fácil de partir de la fruta. Por esto, y considerando la última definición, este tipo de equipos se aplica principalmente para extraer la pulpa de las frutas y verduras. Entonces, el producto que es capaz de procesar una despulpadora son los clasificados como fibrosos, de los cuales se logra obtener un tamaño de partícula grande, como lo son los grumos granujientos y las partículas groseras.

La despulpadora es una maquina industrial que procesa, despulpa y deshuesa los alimentos mencionados. Es utilizada por su capacidad de separar la pulpa y los desechos como semillas, piel, huesos, cáscaras y hojas de la fruta fresca, por lo que deja el material necesario listo para el proceso posterior. Para lograr esto, el equipo utiliza las fuerzas de compresión y cizalla, las que se encuentran en gran parte del proceso de molienda.

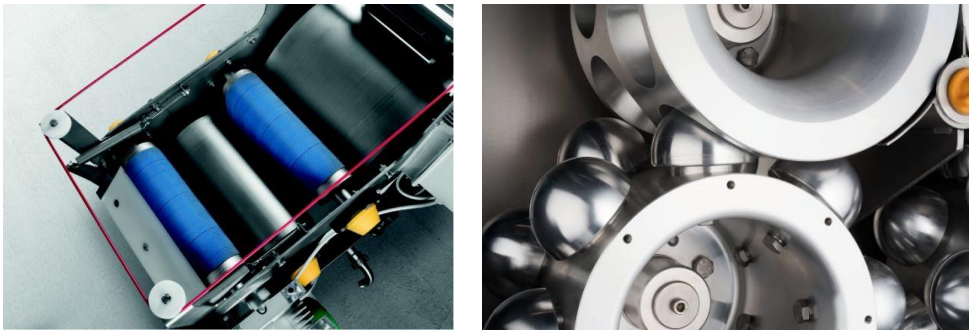
Para lograr la reducción de tamaño de los alimentos, el equipo posee una tolva que almacena toda la materia prima, la que cae sobre un tornillo sin fin que gira por un motor situado en uno de sus extremos. Con este movimiento, el alimento avanza por el tornillo cónico (ver Ilustración 14), esto provocando la presión del material. Luego, la fruta o verdura ya presionada llega a una sección cubierta de mallas, las que permiten o no el paso de la pulpa que se desea obtener. Por esta razón, al llegar el alimento a esta zona, suele existir un porcentaje que queda atrapado en ellas, siendo principalmente semillas y cuero, ya que el resto, o sea, pulpa y jugo, pasan hasta la salida del equipo.

Ilustración 14: Tornillo sin fin cónico
(Zhengzhou Guangmao Machinery Manufacturing Co., Ltd., 2011)

1.2.1.2.14. Extractores de jugo

Como lo dice su nombre, estos equipos se utilizan para extraer el jugo de frutas y verduras mediante la compresión de los alimentos, por esto, se entiende que el producto final es líquido. Lo anterior presenta una limitación, ya que no es posible procesar alimentos duros, elásticos o blandos.

Existen dos tipos de extractores, los cuales poseen la misma lógica de funcionamiento, pero sus componentes principales son diferentes. En primer lugar, están los que utilizan una prensa de banda, la que es la responsable del prensado de los alimentos. En estas, existe un elevador de capachos que sube la materia prima hasta el triturador, el que es capaz de romper todo tipo de frutas, con y sin huesos, gracias a las cuchillas internas que poseen. Luego, lo extraído de la trituración, pasa por las bandas (ver Ilustración 15 (a)), las que comprimen y extraen el jugo restante al interior de la fruta. La segunda opción es la que posee rodillos con semi esferas en su exterior, esto para poder posicionar las frutas de tal manera de ser presionadas por otro rodillo que tiene, igualmente, semiesferas salidas de sus rodillos (ver Ilustración 15 (b)). Los alimentos llegan a través de un elevador de capacho, el que al final tiene carriles que guían las frutas hasta la posición deseada (rodillo), en donde, la fruta gira hasta encontrarse con el otro rodillo que presiona y extrae el jugo. Acá las cáscaras son expulsadas por una salida lateral, y el jugo cae al fondo siendo guiado a la siguiente etapa. La extracción de jugo a nivel industrial utiliza principalmente los con bandas extractoras, esto porque al poseer cuchillas, corta los alimentos antes de ser comprimidos.



(a) (b)

Ilustración 15: Extractor de jugo: (a) Bandas extractoras; (b) Tipo semiesferas

1.3. Relación entre alimentos y maquinarias

En este punto se requiere comenzar a relacionar toda la información ya recopilada para concluir que equipo es el más adecuado para el alimento que se desea moler. Se realizarán cuatro cuadros resúmenes, donde se comprenderán las propiedades que posee cada una de las maquinarias estudiadas. Es importante entender que los cuadros serán generales, ya que la idea es poder elegir el equipo correcto para cualquier tipo de alimento, y no solo para el que se desea realizar el estudio.

Las tablas se basarán en las catorce maquinas estudiadas con anterioridad, las que se compararán con diferentes características que poseen los alimentos que requieren molienda, logrando de esta forma caracterizar los equipos y obtener de una manera clara cual es más conveniente para cada uno de los parámetros. Por esto, después de cada tabla se aportará información en modo de resumen para ir simplificando la elección final del equipo.

Tabla 2: Relación maquinarias con el porcentaje de humedad que poseen los alimentos que pueden procesar (Elaboración propia)

		Porcentaje de humedad		
Maquinaria		*Seco*	*Húmedo*	*Liquido*
Rebanadoras			X	
Cortadora en cubos			X	
Ralladoras		X	X	
Bowl Chopper			X	
Molino de bolas		X		
Molino de discos	Único	X	X	
	Doble	X	X	
Molino de clavijas		X	X	
Molino de martillos		X		
Molino de rodillos		X		
Molino de cuchillas		X	X	
Molino de rotor		X	X	
Molino de mortero		X	X	
Despulpadoras			X	
Extractores de jugo			X	

Como se aprecia en la Tabla 2, los equipos seleccionados son enfocados directamente a alimentos sólidos con alto o bajo porcentaje de humedad, y que, a su vez, la mitad de estas maquinarias es capaz de moler ambos casos. Este último punto es importante para la elección del equipo que se desea diseñar, ya que con esto ya se pueden descartar los que no cumplen con los requerimientos básicos.

Tabla 3: Relación maquinarias con la fuerza aplicada a los alimentos que pueden procesar (Elaboración propia)

		Fuerza			
Maquinaria		*Corte*	*Cizalla*	*Compresión*	*Impacto*
Rebanadoras		X	X		X
Cortadora en cubos		X	X		X
Ralladoras		X	X	X	
Bowl Chopper		X			X
Molino de bolas			X		X
Molino de discos	Único		X	X	
	Doble		X	X	
Molino de clavijas			X		X
Molino de martillos			X	X	X
Molino de rodillos			X	X	
Molino de cuchillas		X			X
Molino de rotor			X		X
Molino de mortero			X	X	
Despulpadoras			X	X	
Extractores de jugo		X		X	

Todos los materiales se pueden romper con la aplicación de fuerzas, pero algunos son más propensos a la fragmentación si se les aplica la fuerza correcta, la que dependerá de las propiedades internas que poseen cada uno de estos. Para el caso de los alimentos, también es posible triturarlos más óptimamente si se le aplica la fuerza correcta, por esto en la Tabla 3 se observa que cada uno de los equipos utiliza una o más de dichas fuerzas para lograr su función.

La caracterización de las maquinarias por la fuerza que aplican no es de mucha utilidad si se trabaja por si sola, por eso es necesario comprender que alimentos son los adecuados para triturar en los equipos de estudio, por esto, en la Tabla 4 se aprecian las características físicas que poseen los materiales que se muelen más fácilmente en cada una de las maquinarias, facilitando y caracterizando de mejor manera el alimento.

Tabla 4: Relación maquinarias con las cualidades físicas a los alimentos que pueden procesar (Elaboración propia)

		Cualidades de los alimentos				
Maquinaria		*Blancos Quebradizo Cristalino*	*Duro*	*Elástico Resistente Cortable*	*Fibroso*	*Graso*
Rebanadoras				X	X	X
Cortadora en cubos					X	X
Ralladoras					X	X
Bowl Chopper			X	X	X	X
Molino de bolas			X			
Molino de discos	Único	X	X	X		
	Doble	X	X	X		
Molino de clavijas		X	X		X	X
Molino de martillos		X	X		X	X
Molino de rodillos		X	X		X	X
Molino de cuchillas		X	X	X	X	X
Molino de rotor		X	X	X		
Molino de mortero		X	X	X		
Despulpadoras					X	
Extractores de jugo					X	

Finalmente, en los procesos, además de comprender que es lo que se quiere moler, se debe tener claro que es lo que se desea obtener, por esto en la Tabla 5 se describe el tamaño de partícula final que se obtiene en cada una de las maquinas. Es importante observa que existen equipos que logran granulometrías diferentes al final del proceso, esto se debe, como se explicó respectivamente en cada una de las descripciones vistas anteriormente, la existencia de accesorios, como rejillas de retención o tamices, los que definen previamente el tamaño de salida del alimento a triturar.

Es importante poder relacionar cada una de las tablas realizadas, ya que serán la base de la elección del equipo que se diseñara, pero, si se cree conveniente, es posible omitir alguna de estas. Para el caso de estudio, se tratará caracterizar de manera clara el alimento que se revalorizará, por eso se utilizarán cada una de estas para resumir a grandes rasgos las propiedades del material.

Tabla 5: Relación maquinarias con el tamaño de partícula que se obtiene (Elaboración propia)

		Tamaño de partícula				
Maquinaria		*Grumos granujientos*	*Partículas groseras*	*Semi finos a finos*	*Finos a ultrafinos*	*Liquido*
Rebanadoras		X				
Cortadora en cubos		X				
Ralladoras		X	X			
Bowl Chopper		X				
Molino de bolas				X	X	
Molino de discos	Único			X		
	Doble			X		
Molino de clavijas				X		
Molino de martillos			X	X	X	
Molino de rodillos				X	X	
Molino de cuchillas			X	X		
Molino de rotor			X	X	X	
Molino de mortero				X		
Despulpadoras		X	X			X
Extractores de jugo						X

Capítulo 2:

Caso de estudio

Masa se define como una mezcla consistente, homogénea y maleable que se consigue deshaciendo sustancias sólidas, machacadas o pulverizadas en sustancias líquidas; en especial la que se emplea en la elaboración de productos de repostería (Real Academia Española, 2006). Por esto, formato de masa se considera a cualquier alimento que posea las características mencionadas, o bien, que al ser procesado se obtenga un mezcla homogénea y maleable para elaborar productos comestibles para el ser humano o animales, y que, la mayor parte de las veces posee como materia prima las harinas prevenientes de cereales.

Se considera cereal al que produce semillas en forma de granos de las que se hacen harinas y que se utilizan para alimento de las personas o para el ganado (Real Academia Española, 2006). Por esto, las harinas son un polvo que resulta de la molienda de cereales, semillas, tubérculos, legumbres u otras materias sólidas, por lo general ricos en almidón o fibras, que sirve para el consumo animal o humano. Este producto proviene principalmente de origen vegetal, pero también es posible obtener harinas con alto aporte proteico, o también llamadas de origen animal. Por esto, a continuación, se ejemplifican los tipos de harinas más comunes utilizados en la industria.

- **Harina de trigo:** Se origina por la molienda de trigo y es la más producida para consumo humano. Posee variedades que se apellidan "blandas" o "débiles", si tienen un contenido de gluten bajo, y "duro" o "fuerte" si tienen un contenido alto de gluten.

- **Harina de maíz:** Es originaria del continente americano y es utilizada principalmente para la realización de tortillas. Esta harina se caracteriza por no poseer gluten dentro de su composición, por lo que es utilizada para la alimentación de personas con trastornos relacionados con el gluten.

- **Harina de arroz:** Su consumo predomina en la cocina del este y sudeste asiático, en donde se fabrica harina de arroz blanco o integral. Esto se logra quitándole su cáscara

para dejar el arroz crudo, el cual se muele para obtener arroz en polvo. También, al igual que la harina de maíz, es utilizada para los trastornos alimenticios relacionados con el gluten.

- **Harina de avena:** Es una fuente natural de hidratos de carbono complejos y fibras hidrosolubles, además de poseer vitaminas del grupo B, ácidos grasos y minerales. Se fabrica moliendo el interior del grano de avena, dejando como subproducto su cáscara.

- **Harina de pescado:** Es un producto obtenido del procesamiento de pescados, eliminando su contenido de agua y aceite. Está conformado de un 70% a 80% de proteína y grasa digerible, aportando un alto contenido de energía.

- **Harina de huesos:** Es un compuesto formado por huesos animales y productos de deshecho. Se utiliza como fertilizante orgánico en plantas y suplemento nutritivo para animales. También se emplea como fuente de fósforo y proteína.

2.1. Cascarilla de avena

La avena es un género de plantas de la familia de las poáceas, la cual, a partir de las flores o flósculo, produce granos, los que están formados por un ovario, tres estambres y dos glumélulas, todo ello envuelto en un par de brácteas o glumelas llamadas lema y palea, las cuales componen la cáscara o cascarilla de la avena (ver Ilustración 16). El envoltorio del grano corresponde al 25% del peso total y en ella se concentra el 80% de la fibra de este.

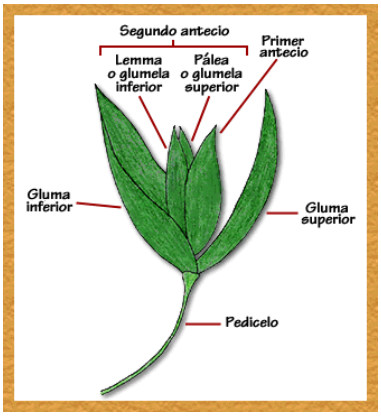


Ilustración 16: Partes de un grano de avena (Carrasco, 2007)

La separación del grano de su cáscara se realiza mediante un proceso llamado descascarado, en donde la avena pasa a través de rodillos que se encargan de quebrar la cáscara. Luego, para poder separar definitivamente ambos productos, los granos son sometidos a un soplado con ventiladores de aire, los que separan gradualmente lo deseado. Estos procesos se realizan ya que el ser humano no es capaz de digerir la cascarilla de avena, entonces solo su interior es el necesario para la comercialización.

La cáscara da avena es utilizada para la fabricación de alimento para animales, principalmente como fuente de fibra para caballos, bovinos, aves, ponedoras y cerdos. Posee aproximadamente un 30% de fibra, la cual controla la defecación, previene el estreñimiento, ayuda a la eliminación de toxinas y produce saciedad en los animales que se alimentan con productos que poseen este cereal.

2.1.1. Propiedades físicas y químicas

La cáscara de avena es un producto con bajo porcentaje de humedad, por lo que es considerado dentro de la categoría de los alimentos secos. Posee una densidad cercana a 200 [gr/L] y su masa promedio es de 15-23 [mg/grano]. Su forma alargada alcanza 12,7 [mm] de longitud y su ancho es inferior a 3 [mm]. Está cubierto por un pelo fino y sedoso que incluye: la capa de células que envuelven la semilla, el endospermo y el germen.

Dentro de la composición de la avena (ver Tabla 6), solo su cascarilla posee el 85% de la fibra total, 40% de cenizas, 4% de proteínas, y 4% de grasa, en donde esta última se pierde en el tratamiento de descascarado. Con esto se logra ver que la fibra de la avena se encuentra concentrada en su cáscara, correspondiendo aproximadamente a la mitad de la composición misma de la cáscara.

Tabla 6: Composición interna de la cáscara de avena, en porcentaje (Ronco, 2013)

Característica	Unidad	Cantidad
Humedad	%	8,00
Fibra	%	30,00
Proteína	%	5,00
Grasa	%	2,00
Ceniza	%	6,00

2.1.2. Condiciones de almacenamiento

Al ser un producto destinado al consumo animal, es necesario almacenarlo con condiciones mínimas que resguarden su condición óptimamente. Se debe mantener el producto a una temperatura ideal entre 18 y 20°C, especialmente en un ambiente seco, limpio y ventilado esto para evitar el exceso de polvo que pueda llegar a contaminar el producto final.

2.2. Equipos de molienda para la cascarilla

Para la elección de el o los equipos que se adaptan mejor a las características que posee la cáscara de avena, se tomaran en cuenta los cuadros resúmenes presentados en el capítulo anterior, y se seleccionaran solo las maquinas que cumplan completamente con los parámetros del material.

- **Tamaño de partícula:** La cascarilla de avena se encuentra en formato de polvo, o harina, y en forma de pellet. Por esto, y para ambos casos, se debe poder triturar este producto a una granulometría fina a ultrafina. Este parámetro reduce los equipos estudiados a solo cuatro opciones, molino de bolas, de martillos, de rodillos y de rotor.

- **Porcentaje de humedad:** La avena es un alimento con bajo porcentaje de humedad, por lo tanto, su cáscara sigue el mismo patrón y se considera un alimento seco. Con esto no se logra reducir las cuatro opciones de molinos que se tienen como opción, pero se ratifica que todas, hasta ahora, son perfectas para la trituración del material.

- **Tipo de alimento:** La principal característica de la avena es su alto porcentaje de fibra, por esto, y ya sabiendo que la cáscara corresponde al 85% de la fibra total del grano, el equipo debe ser capaz de moler alimentos fibrosos. Esto reduce las opciones a solo dos molinos, el de martillo y de rodillos.

Teniendo ya en cuenta los equipos que cumplen con todas las características de la cáscara de avena, se procede a investigar los utilizados en la industria harinera basada en cereales, esto porque no se encuentra información concreta sobre la molienda de este material. Acá, los productores utilizan principalmente los molinos martillos, pero también recomiendan el uso, en algunos casos, de los molinos de rodillos estriados.

Con todo lo anterior, se concluye que el análisis realizado de la información recopilada se acerca a la realidad industrial actual, por lo que se procede a describir con mayor detalle cada uno de estos molinos, entendiendo sus partes principales y funcionamiento de cada una de ellas.

2.2.1. Molino de martillo

El molino de martillos, como se definió en el capítulo anterior, es una máquina destinada al proceso de trituración y molienda. La fuerza principal que utiliza es la de impacto, por lo que es capaz de procesar una gran variedad de materiales, así como también, logra la producción de partículas de diversos tamaños, simplemente cambiando la pantalla de salida.

El molino está compuesto de múltiples partes fundamentales para su fabricación, pero para el caso de estudio solo se mencionarán las cuatro principales, esto porque son las que tienen contacto directo con el material a triturar. Cada uno de estos elementos tienen funciones específicas dentro del proceso de molienda, por lo que se definirán a grandes rasgos para generar una idea de la forma y función dentro del equipo.

2.2.1.1. Disco giratorio porta martillos

Está compuesta de una serie de placas circulares que poseen un orificio central, por donde pasa el eje de rotación, y tres o más orificios en la zona más alejada del centro, esto para hacer pasar ejes secundarios encargados de sujetar los martillos que se disponen entre los discos. Este conjunto gira a velocidad constante por la acción del eje principal que pasa por su centro, que a su vez está conectado a un motor que transforma la energía en movimiento rotatorio.

2.2.1.2. Martillos

Poseen diferentes formas de diseño (ver Ilustración 17) pero generalmente se utiliza los rectangulares. Van puesto en la parte exterior del disco giratorio y tienen un orificio en su parte inferior, esto para poder pasar un eje secundario, el cual es el encargado de sujetar los martillos a los discos.

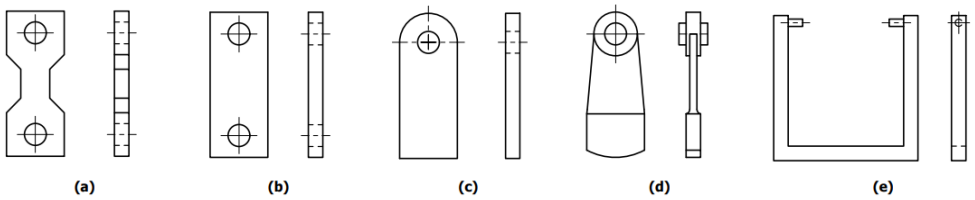


Ilustración 17: Martillos para impacto de trituradores (Gonzalez, 1977) (Modificado)

La función de este elemento es de impactar con el material a procesar, provocando la fragmentación continua de este. Lo anterior se debe a que el giro continuo del disco genera el impacto entre los martillos y el material innumerables veces, provocando que este se triture hasta alcanzar la granulometría esperada, o bien, hasta que el material pueda pasar por la rejilla clasificadora puesta en el equipo.

2.2.1.3. Rejilla clasificatoria

Este elemento, conocido también como tamiz o criba, es puesto en estos equipos para poder definir el tamaño de partícula que se desea obtener. Se encuentra en la parte baja de los martillos, o bien, en el comienzo de la boca de salida, esto para poder tener un control de la granulometría obtenida por la molienda. También tiene la función de retener el material para que los martillos puedan seguir impactando con él, de esta forma se asegura que las partículas pasen por la rejilla clasificadora.

2.2.1.4. Placa de impacto o plato estacionario

Se encuentra fija al cuerpo del molino y tiene la función de ayudar a la trituración el material, esto porque los martillos deben pasar a una distancia pequeña de este elemento, dejando así un espacio reducido para el material. En algunos casos, poseen una forma estriada lo que aporta otros tipos de fuerzas para la molienda, ya que aparte de tener la de impacto, se genera compresión y cizalla entre la cabeza del martillo y la placa de impacto, por lo que el material logra su trituración en menor tiempo.

2.2.2. Molino de rodillos

Es una máquina empleada para la reducción de tamaño de diversos materiales, en donde las partículas sólidas son captadas y trituradas entre uno o más medios rodantes. Estos molinos son utilizados en numerosos sectores industriales, debido a que puede adaptarse a diversos materiales, esto mientras sean duros o semi duros.

Este equipo, como se mencionó en el capítulo anterior, puede llegar a estar conformado por uno o más rodillos, esto dependiendo del tipo de molienda que se le realizará. Por esta razón este elemento es el más importante dentro del diseño de estas máquinas, ya que son los únicos responsables de la reducción de tamaño del material que ingresa al molino.

2.2.2.1. Rodillos

Este elemento posee una forma cilíndrica alargada, esto para poder ocupar la mayor cantidad de espacio dentro del cuerpo del equipo. La superficie de este cilindro puede ser lisa, estriada o dentada, pero en la industria alimentaria, específicamente aplicado a cereales se utilizan las que poseen estrías porque son capaces de moler de mejor manera los alimentos secos y frágiles.

Dentro de un molino aplicado a la trituración de cereales se utilizan principalmente dos rodillos, lo anterior para poder triturar por compresión los granos que van ingresando a la separación que existe entre estos dos elementos. Lo anterior no quita que es posible encontrar molinos con cuatro o más pares de rodillo, lo que dependerá de la dureza del grano o de la granulometría final que se desea.

2.2.2.2. Ajustador de distancia de rodillos

Es el elemento responsable de definir el tamaño de molienda, ya que entre menor será la separación existente entre la superficie de los rodillos, menor será el tamaño de salida de los alimentos a procesar.

Generalmente uno de los rodillos se encuentra fijo a la estructura del equipo, y el otro es el que se ajusta con este elemento, lo que facilita la regulación y mantención del equipo completo.

2.3. Selección del equipo

El molino de martillo y de rodillos presentan características favorables para diferentes tipos de aplicación, y específicamente para la cáscara de avena, son los que mejor se adaptan al alimento y al resultado final que se desea obtener. Lo anterior complica la determinación de cuál será el más apropiado para realizar el estudio posterior, pero no quita que uno de los equipos presentaba cualidades un poco más favorables que el otro, lo que lleva a pensar que su elección es mayoritariamente clara. Por esto y considerando todos los parámetros establecidos y las características propias de cada uno de los equipos aptos para la molienda de la cascarilla de avena, esto más la aplicación real, basándose en lo que se utiliza realmente en la industria harinera, especialmente de granos diferentes al trigo, se llega a la conclusión que el equipo a diseñar será un molino de martillos.

Capítulo 3:

Marco Teórico

En los capítulos anteriores se estudiaron y especificaron los posibles equipos aptos para la reducción de tamaño de la cascarilla de avena, y se llegó a la conclusión que el molino de martillo era al más apropiado para la aplicación requerida. Por esta razón, el marco teórico se concentrará en las definiciones aplicables al cálculo de las partes que posee este tipo de molinos, e incluirá datos relevantes que aporten a la facilidad de elección de factores o valores al momento de la memoria de cálculo.

Para el diseño de este tipo de equipos es necesario tener en cuenta una serie de parámetros que limitaran el movimiento giratorio que posee el molino al momento de la molienda, esto porque no es conveniente trabajar a velocidades muy altas o bajas. Por otro lado, se debe ser capaz de obtener una relación entre la capacidad que posee el equipo, y la fuerza necesaria para llevar a cabo la trituración del alimento, esto para poder determinar el dimensionamiento de las partes del molino

3.1.1. Capacidad de molienda

Para diseñar un proceso productivo, o una línea de producción, es necesario tener claro el concepto de capacidad productiva, o en este caso capacidad de molienda, que se desea alcanzar, esto para evitar retrasos o “cuellos de botellas” existentes dentro de la línea. Por esta razón, se define capacidad de producción a la cantidad de productos, unidades o materiales que se logran desarrollar durante un tiempo determinado, por lo general trabajado en horas o días.

El caso de aplicación tiene como objetivo la producción de harina proveniente de la cáscara de avena, por lo que se debe trabajar con las unidades utilizadas en la industria harinera, la cual mide su producción en quintales de harina, los que corresponden a 0,1 toneladas métricas de harina producida. Por esto, la capacidad de molienda dentro de esta industria es medida por la cantidad de quintales de harinas producidos por hora de trabajo, o bien, por días de trabajo.

3.1.2. Velocidad angular (ω) y tangencial (v_t)

Velocidad angular se define como un delta de ángulo recorrido por unidad de tiempo, por esto es utilizada como medida para obtener la velocidad de rotación de un cuerpo. Su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el radián por segundo, pero también es posible encontrar esta velocidad en unidad de revoluciones por minutos.

$$1\left[\frac{rad}{seg}\right] = \frac{2 \cdot \pi}{60}\ [RPM] \qquad (3.1)$$

Velocidad tangencial se define como el producto vectorial entre la velocidad angular y el vector posición referido a un punto, en otras palabras y explicado en un disco en rotación, es el vector perpendicular al radio del disco. Su unidad en el SI es de metros por segundo.

$$\overrightarrow{v_t} = \omega \times \vec{\rho} \qquad (3.2)$$

Para el diseño de molinos de martillo, según Fellows, se recomienda una velocidad periférica o tangencial de 40 a 50 metros por segundo, lo que equivale aproximadamente a 160 radianes por segundo, o bien, 1500 revoluciones por minuto, esto considerando una distancia aproximada de 300 milímetros desde el centro de rotación al extremo del martillo. Estas recomendaciones aún son consideradas como velocidades óptimas para el diseño de este tipo de equipos, pero también algunos fabricantes las encuentran muy conservadoras, por esto es posible encontrar equipos de alta velocidad, los que alcanzan valores de 3000 a 3500 revoluciones por minuto, lo que equivale a velocidades tangenciales cercanas a los 80 o 90 metros por segundos, esto utilizando la misma distancia que en la relación anterior.

3.1.3. Coeficiente de fluctuación (C_s) y velocidad con carga (v_c)

Un volante de inercia es un elemento que aporta al sistema una inercia adicional, de modo que le permite almacenar energía cinética, esto porque continua su movimiento de inercia cuando cesa el par motor que impulsa la rotación. Dentro de esto se encuentra un coeficiente que ayuda a esclarecer el comportamiento de las velocidades existentes en los diferentes mecanismos, en otras palabras, este dato sirve para obtener un valor más fidedigno de las velocidades de trabajo utilizadas. Por lo anterior, el rotor del molino, junto a sus martillos, se considerará como similar

a un volante de inercia, garantizando un análisis más claro del comportamiento que posee esta parte del equipo.

El coeficiente se extrae directamente de la Tabla 7, en donde se debe saber previamente la aplicación que se le dará, o bien, se utiliza la Ecuación (3.3) donde es posible obtener una relación entre la velocidad inicial y final, considerando que la última será la existente al momento de presentar una carga en el volante de inercia. Además, de la Ecuación (3.4) se puede obtener la velocidad media que será el promedio de las velocidades mencionadas anteriormente (Nisbett, 2008).

$$C_s = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega} \tag{3.3}$$

$$\omega = \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} \tag{3.4}$$

Para encontrar una relación conveniente, se deben relacionar ambas expresiones, lo que genera la obtención de la ecuación (3.5), con la cual se obtiene una velocidad aproximada de trabajo considerando la existencia de alguna carga. El valor de ω_1 corresponde a la velocidad corregida, y ω_2 es la velocidad definida de trabajo.

$$\omega_1 = \omega_2 \cdot \frac{2 - C_s}{2 + C_s} \tag{3.5}$$

Estas ecuaciones se pueden aplicar para la obtención de la velocidad tangencial corregida, logrando de esta manera corregir ambos valores.

Tabla 7: Coeficientes de variación de la velocidad (Salisbury, 1952)(Reducida)

Tipo de maquina	$\mathbf{C_s}$
Maquinaria de machaqueo	0,200
Maquinaria eléctrica	0,003
Maquinaria eléctrica, transmisión directa	0,002
Motores con transmisión por correas	0,030
Maquinaria para molinos harineros	0,020
Transmisión rueda dentada	0,020
Maquinas herramientas	0,030
Bombas	0,030 – 0,050
Maquinaria de corte	0,030 – 0,050

3.1.4. Radio de giro $(\mathbf{r_g})$

Según la definición y Ecuación (3.2) definida para encontrar una expresión de la velocidad tangencial, se muestra que el radio o brazo que permite el movimiento entre las dos velocidades que se encuentran en la rotación de un cuerpo se logra al calcular la división de la velocidad tangencial por la velocidad angular. Por esta razón, y considerando que la velocidad tangencial se puede adaptar a la aplicación deseada, la expresión del radio, que para este caso será igual al radio de giro del molino, se obtendrá por la Ecuación (3.6), en donde este valor representará el máximo radio que puede poseer el equipo para su trabajo de molienda, por ello, se tendrá un valor estimado de las dimensiones de las cámaras de triturado.

$$r_g = \frac{v_c}{\omega} \tag{3.6}$$

3.1.5. Dimensiones y masa del martillo

Para comenzar a definir los parámetros de diseño de las partes de un molino de martillo, se debe partir por los responsables de la molienda, o sea, los martillos. Estos son los que tienen contacto directo con el alimento, por esto su forma y material del cual están hechos son los primeros parámetros requeridos para comenzar con los cálculos.

La forma que poseen los martillos es principalmente rectangular, porque se requiere de una superficie plana para generar el impacto entre el alimento y la cara posterior del martillo. Para definir este parámetro se deben tomar en cuenta las recomendaciones de los fabricantes de este tipo de equipos, los cuales dicen que el largo de cada martillo debe ser aproximadamente de un tercio del radio total del equipo, en otras palabras, el radio de giro definido. El espesor que recomiendan para lograr la molienda debe ser mayor al tamaño del alimento a moler, esto aplicado específicamente en la industria de los cereales, o sea, el espesor debe ser mayor que el grano. El ancho del martillo dependerá del volumen y densidad de la pieza, por eso generalmente los fabricantes asignan un valor arbitrario, el cual posteriormente será recalculado y confirmado.

Para la obtención de la masa del martillo, se debe conocer el material con el que se fabricará este, el cual dependerá de la industria de aplicación del equipo, ya que, si se pone el caso de la

minería, por lo general se utilizan aceros al manganeso. Con este dato es posible obtener la densidad del material, y con ello se aplica la Ecuación (3.7).

$$m_M = V_M \cdot \rho \tag{3.7}$$

Se definirán cada una de las dimensiones existentes y que son utilizadas para los diferentes cálculos con las letras mostradas en la Ilustración 18, la que corresponde a un martillo visto desde frente.

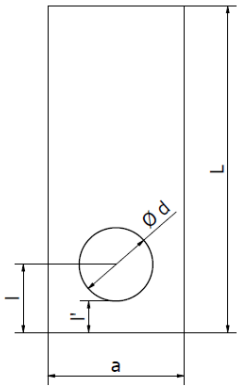


Ilustración 18: Forma y dimensiones teóricas del martillo (Elaboración propia)

3.1.6. Fuerzas

Fuerza centrífuga se define como una fuerza ficticia que aparece cuando un cuerpo entra en movimiento de rotación, y corresponde a la fuerza aparente que percibe un observador no inercial que se encuentra en el cuerpo que gira a una velocidad angular definida.

$$F_{cf} = m_M \cdot r_g \cdot \omega^2 \tag{3.8}$$

Fuerza de impacto corresponde a la producida por la partícula contra el martillo para oponerse al movimiento de este, o bien, es la fuerza generada por la desaceleración del martillo al producirse el choque entre él y el material que se tritura.

$$\vec{F_i} = m \cdot \vec{a} \tag{3.9}$$

En la Ecuación (3.9), la masa corresponde a la de la partícula y la aceleración es el valor con la que esta ingresa a la cámara de molienda. Pero, por definición, aceleración es una magnitud derivada vectorial que nos indica la variación de velocidad por unidad de tiempo (Beer, 2010).

$$\vec{F_i} = m_p \cdot \frac{\overrightarrow{\Delta v}}{\Delta t} \quad \textbf{(3.10)}$$

La variación de velocidad se definirá como la diferencia entre la velocidad del martillo antes y después del impacto, lo que, a su vez, se puede considerar como el vector velocidad de la partícula.

$$\Delta v = v_M - v_i = v_p \quad \textbf{(3.11)}$$

El movimiento rectilíneo uniforme (M.R.U.), es aquel con velocidad constante y cuya trayectoria es una línea recta. Para el caso de la partícula, se puede suponer que su movimiento responde a la de definición de M.R.U. ya que al momento del choque la fracción de tiempo en la que esta ocurre es tan pequeña que el vector de la velocidad de la partícula cumple con ser uniforme.

$$t = \frac{d_p}{v_M} \quad \textbf{(3.12)}$$

La fuerza de trituración es la requerida para lograr la molienda de una cantidad determinada de material. Esta considera todo el material que ingresa al equipo y la fuerza que se genera al impactar un grano de material. En la Ecuación (3.13) se define la expresión utilizada para la obtención de la fuerza, en donde el número de partícula (N_p) dependerá de la capacidad del equipo, de su velocidad angular y de la masa del material al cual se le desea realizar la aplicación (ver Ecuación (3.14)).

$$F_T = N_p \cdot F_i \quad \textbf{(3.13)}$$

$$N_p = \frac{Capacidad}{\omega \cdot m_p} \quad \textbf{(3.14)}$$

Fuerza de corte será la resultante entre la fuerza centrífuga y la de trituración. Se definirá como la fuerza resultante que ejerce el martillo a todo el material que ingresa al equipo y se calcula según la Ecuación (3.15).

$$F_c = \sqrt{F_{cf}^2 + F_T^2} \quad \textbf{(3.15)}$$

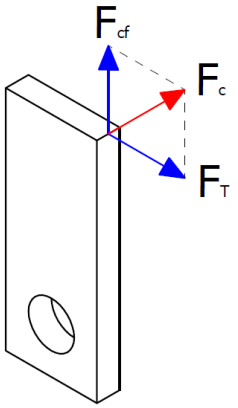


Ilustración 19: Diagrama teorico de fuerzas existentes en un martillo (Elaboración propia)

3.1.7. Dimensiones y masa del disco

Este elemento puede poseer diferentes tipos de formas, ya sea circulares, triángulos con puntas redondeadas, cuadrados, pentágonos, hexágonos, entre otros, pero para la aplicación se considera más apropiada, y fácil de fabricar, un elemento con forma de disco.

El disco posee radio, espesor y cinco perforaciones, cuatro en su parte más alejada para poder sujetar los martillos, y una que pasará por su centro y será la responsable de soportar el eje principal de transmisión. Las medidas de estos orificios dependerán del tamaño de los ejes, por esto en la Ilustración 20 se definen con letras las medidas que debe poseer cada una de estas distancias. Cabe destacar que algunas de estas se repiten del apartado del dimensionamiento de los martillos, ya que al estar unidos sus medidas deben concordar.

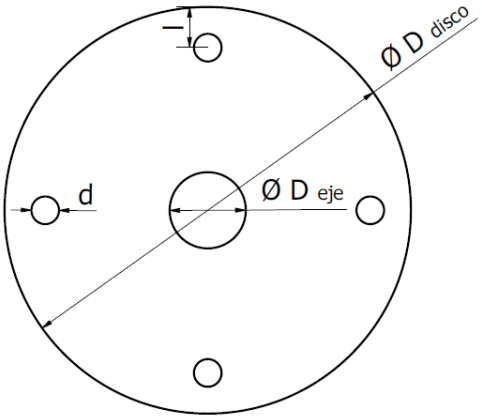


Ilustración 20: Forma y dimensiones teóricas del disco (Elaboración propia)

El radio del disco (r_{disco}) dependerá del radio de giro que posee el equipo, esto porque la distancia entre el centro del disco y el extremo del martillo debe ser igual o menos a la que se define como radio de giro. Lo anterior se explica claramente en la Ecuación (3.16), en donde las variables r'_{disco} y L'_M son las distancias desde el centro del orificio por el que pasa el eje secundario, o el eje de unión entre disco y martillo, y el centro del disco o el extremo del martillo respectivamente.

$$r_g = r'_{disco} + L'_M \qquad \textbf{(3.16)}$$

En la Ecuación (3.17) se plantea la obtención del radio del disco de una forma más clara, ya que se aplican las variables definidas en la Ilustración 18 y 20, en donde la distancia entre el centro del orificio del eje secundario y el extremo del martillo, y del disco, se definen con la misma letra, por esto se puede simplificar la expresión de la Ecuación (3.16) y obtener una forma más directa para la obtención del radio deseado.

$$r_{disco} = r_g - L_M + 2 \cdot l \qquad \textbf{(3.17)}$$

El espesor del disco afecta las medidas del eje secundario y principal, como también a la inercia total que tendrá el equipo. Por lo anterior, y considerando que gran parte de los equipos existentes a nivel comercial este valor se encuentra entre los 10 y 20 milímetros, se tomara este rango como recomendado para definir el espesor del elemento.

3.1.8. Esfuerzos

Esfuerzo se define como el resultado de la aplicación de una fuerza sobre un cuerpo, o área, que tiene como fin el deformarlo. Existen los esfuerzos normales y cortantes, los que se identifican con las letras griegas σ (sigma) y τ (tau), respectivamente. Sus unidades son libras por pulgada cuadrada [psi] en el sistema inglés, pero en el caso de las unidades SI, el esfuerzo se representa en newtons por metro cuadrado [N/m^2], o también llamado Pascal [Pa].

Los esfuerzos normales poseen dirección entrante o saliente a la superficie a la cual se le aplica la fuerza. En el primero de estos casos se considera un esfuerzo compresivo y comúnmente se le asigna una cantidad negativa, caso contrario, se considera un esfuerzo de tensión y es un esfuerzo normal positivo. Por otro lado, el símbolo σ indica un esfuerzo normal, mientras que si posee subíndice este señala la dirección de la normal de la superficie.

El esfuerzo cortante se encuentra paralelo a la superficie y puede tener componentes a lo largo de dos ejes cartesianos, en otras palabras, este esfuerzo actúa sobre la superficie y se descompone en las direcciones de ambos ejes. Posee dos subíndices, el primero indican la dirección de la normal a la superficie mientras que el segundo es la dirección del esfuerzo cortante.

Para el cálculo de estos esfuerzos se debe suponer que son uniformemente distribuidos, en donde se llaman tensión pura, compresión pura o cortante puro. Para esto se requiere que la barra sea recta y de un material homogéneo, además, la línea de acción de la fuerza debe pasar por el centroide de la sección y que esta se encuentre lo suficientemente lejos de los extremos y de cualquier discontinuidad.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.18}$$

$$\tau = \frac{F}{A_d} = \frac{F}{e_M \cdot l' \cdot 2} \tag{3.19}$$

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. Se utiliza en ingeniería estructural en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles, por lo que para su cálculo se deben obtener todos los esfuerzos existentes dentro del estudio en cuestión. En la Ecuación (3.20) supone la existencia de esfuerzos normales y cortantes en todas las direcciones del eje cartesiano, pero se puede aplicar en casos de no existir algunos de estos valores.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2) - \left(\sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} + \sigma_{yy} \cdot \sigma_{zz} + \sigma_{zz} \cdot \sigma_{xx}\right) + 3 \cdot \left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\right)} \tag{3.20}$$

Para la comprobación del valor de la tensión de Von Mises esta tiene que cumplir la relación de la Ecuación (3.21), en donde se debe conocer las propiedades físicas del material y el factor de seguridad que se desea tener del cuerpo.

$$\sigma_{VM} \leq \frac{S_y}{F.S} \tag{3.21}$$

En un eje circular es posible encontrar los esfuerzos normales y cortantes, como también sus valores máximos. Para ello se requiere conocer las fuerzas cortantes, momento flector, diámetro y segundo momento de área, donde este último depende de la forma del eje (Nisbett, 2008).

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot r}{I} = \frac{M \cdot r}{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^4} \left[\frac{N}{m^2}\right] \qquad \textbf{(3.22)}$$

$$\tau_{max} = \frac{4 \cdot V}{3 \cdot A} \left[\frac{N}{m^2}\right] \qquad \textbf{(3.23)}$$

3.1.9. Estudio de ejes

Un eje se define como una barra cilíndrica que atraviesa un cuerpo y que sirve como centro de rotación o como apoyo a elementos que se encuentran girando. Sus dimensiones son variadas y dependen directamente del uso al cual está destinado y de las fuerzas a las que se encuentra sometido.

El diámetro del eje, o los diámetros correspondientes a cada una de sus secciones, se calcula generalmente aplicando la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo, también conocida como Teoría de Tresca o Guest, la cual establece que la fluencia del material se produce por el esfuerzo cortante, o sea, que la falla se produce cuando el esfuerzo cortante máximo absoluto de la pieza sea igual o mayor al esfuerzo cortante máximo absoluto de una probeta sometida a un ensayo de tensión. Para encontrar una expresión concreta del diámetro, este se debe despejar de la expresión planteada en la definición, y se obtiene la Ecuación (3.24), la cual se conoce como la determinación del diámetro mínimo por el Teorema de Esfuerzo Cortante Máximo, que depende de la fuerza o carga axial (F_a), del momento torsor (T) proveniente del motor y del momento flector (M_f) que se obtiene de los diagramas de momento.

$$d^3 > \frac{16}{\pi \cdot \tau_{adm} \cdot (1 + K^4)} \cdot \sqrt{\left[k_f \cdot M_f + \frac{\alpha \cdot F_a \cdot d}{8} \cdot (1 + K^2)\right]^2 + (k_t \cdot T)^2} \qquad \textbf{(3.24)}$$

La expresión para la obtención del diámetro también depende de coeficientes o relaciones que se determinan dependiendo del tipo de eje o de carga que se somete a este. La relación de

diámetros (K) depende de si el eje es hueco o macizo, y su valor se obtiene a través de la Ecuación (3.25), en donde $'d\,'$ es el diámetro exterior del eje. Por otro lado, los factores de choque (k_f) y de fatiga (k_t) se extraen de la Tabla 8, en donde su valor dependerá si el eje se encuentra o no en rotación, y del tipo de carga que este tiene.

$$K = \frac{d_{int}}{d} \qquad \textbf{(3.25)}$$

Tabla 8: Factor de choque y fatiga (Nisbett, 2008)

	Tipo de carga	$\mathbf{k_f}$	$\mathbf{k_t}$
Eje estacionario	*Gradual*	1	1
	Brusca	1,5 – 2	1,5 – 2
Eje giratorio	*Gradual*	1,5	1
	Constante	1,5	1
	Brusca	1,5 – 2	1 – 1,5
	Choque ligero	1,5 – 2	1 – 1,5
	Choque fuerte	2 – 3	1,5 - 3

La fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de estos bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas, esto quiere decir, un elemento al que se aplican cargas de menor valor de manera cíclica tenderá a fallar más rápido que con cargas de mayor valor, pero aplicadas de manera estática.

El método Esfuerzo-Vida tiene como objetivo el determinar si las características consideraras, ya sea de forma, superficie, temperatura u otras, afectan de buena o mala manera a la obtención final del diseño. Se caracteriza por considerar factores anteriormente no considerados, los que ayudan a acercar más a la realidad los cálculos, y por consecuencia, a obtener factores de seguridad más exacto. Existen tres formulas aplicables a este tipo de casos, las que dependen del material y de los esfuerzos medios y alternantes a los que se encuentra sometido el eje. Estas se observan en la Ecuación (3.26), (3.27) y (3.28), y cada una de ellas fue planteada y desarrolladas por diferentes autores.

$$Formula\ elíptica\ ASME: \quad \left(\frac{\sigma_a'}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m'}{S_y}\right)^2 = \frac{1}{n^2} \qquad \textbf{(3.26)}$$

$$Goodman: \quad \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_u} = \frac{1}{n} \tag{3.27}$$

$$Soderberg: \quad \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_y} = \frac{1}{n} \tag{3.28}$$

Los esfuerzos mencionados y aplicados para la obtención del factor de seguridad, depende de los momentos flector y del par torsor, tanto medio como alternante, como también de los factores de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión y de la torsión (Nisbett, 2008).

$$\sigma'_a = \left[\left(\frac{32 \cdot K_f \cdot M_a}{\pi \cdot d^3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{16 \cdot K_{fs} \cdot T_a}{\pi \cdot d^3}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.29}$$

$$\sigma'_m = \left[\left(\frac{32 \cdot K_f \cdot M_m}{\pi \cdot d^3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{16 \cdot K_{fs} \cdot T_m}{\pi \cdot d^3}\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.30}$$

Para el caso de un eje giratorio, tanto el momento flector medio como el par torsor alternante son cero y se pueden simplificar de la Ecuación (3.29) y (3.30). En un eje estático, dependerá del tipo de esfuerzo que se encuentre actuando sobre el eje, por esto solo existirán momento flector y no par torsor.

La existencia de irregularidades o discontinuidades como ranuras u orificios aumentan de manera considerable los esfuerzos teóricos, por esto se requieren corregir la teoría de tal manera que no se genere la falla. El factor de concentración del esfuerzo por fatiga (K_f) se utiliza debido a la disminución de sensibilidad en la zona de la irregularidad y al aumento de la concentración de esfuerzos, y con eso, la posibilidad de una futura falla. Este factor es un valor reducido del factor de concentración de esfuerzos (K_t o K_{ts}), el que es utilizado con el esfuerzo nominal para la obtención del esfuerzo máximo resultante debido a defectos, y se obtiene mediante la Ecuación (3.31) y (3.32), en donde la sensibilidad de la muesca (q) y el factor de concentración de esfuerzos se obtienen mediante gráficos (ver Anexo C).

$$K_f = 1 + q \cdot (K_t - 1) \tag{3.31}$$

$$K_{fs} = 1 + q_{cortante} \cdot (K_{ts} - 1) \tag{3.32}$$

En el caso que no exista muesca el factor de concentración será igual a 1, pero en caso de que la sensibilidad sea máxima, o sea igual 1, el material tiene sensibilidad total a la muesca. Para la obtención de estos parámetros primero se debe encontrar el valor del factor de concentración de esfuerzos, el que dependerá de la geometría de la parte. Luego se debe definir el material y con ello la sensibilidad para poder despejar el factor de concentración del esfuerzo por fatiga.

El límite de resistencia a la fatiga (S_e), se define como el esfuerzo fluctuante máximo que puede soportar un material para un número infinito de ciclos de aplicación de la carga y se obtiene mediante la Ecuación (3.33), en donde se observan la dependencia de este a una serie de factores, los que de definen detalladamente a continuación.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_e{}' \qquad \textbf{(3.33)}$$

- Límite de resistencia a la fatiga modificado (S_e')

$$S_e' = \begin{cases} 0{,}5 \cdot S_{ut} & S_{ut} \leq 200\ kpsi \\ & S_{ut} \leq 1.400\ MPa \\ 100\ kpsi & S_{ut} > 200\ kpsi \\ 700\ MPa & S_{ut} > 1.400\ kpsi \end{cases} \qquad \textbf{(3.34)}$$

- Coeficiente de superficie (k_a)

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b \qquad \textbf{(3.35)}$$

Tabla 9: Datos del Factor de Superficie para diferentes acabados superficiales (Nisbett, 2008)

Acabado superficial	**Factor a**		**Exponente b**
	$S_{ut}\ , kpsi$	$S_{ut}\ , MPa$	
Esmerilado	1,34	1,58	-0,085
Maquinado o estirado en frio	2,70	4,52	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Como sale de la forja	39,9	272	-0,995

- Coeficiente de forma (k_b)

$$k_b = \begin{cases} \left(\frac{d}{7{,}62}\right)^{-0{,}1133} & 2{,}79 \leq d \leq 51\ [mm] \\ \left(\frac{d}{3}\right)^{0{,}1133} & 0{,}11 \leq d \leq 2\ [in] \end{cases} \qquad \textbf{(3.36)}$$

$$k_b = \begin{cases} 0{,}91 \cdot d^{-0{,}157} & 2 \leq d \leq 10\ [in] \\ 1{,}51 \cdot d^{-0{,}157} & 51 \leq d \leq 254\ [mm] \end{cases} \quad \textbf{(3.37)}$$

$$d = \begin{cases} d & Vigas\ redondas\ rotatorias \\ 0{,}37 \cdot d & Vigas\ redondas\ no\ rotatorias \end{cases} \quad \textbf{(3.38)}$$

- Coeficiente de carga (k_c)

$$k_c = \begin{cases} 1 & Flexión \\ 0{,}85 & Carga\ Axial \\ 0{,}59 & Torsión\ y\ Cortante \end{cases} \quad \textbf{(3.39)}$$

- Coeficiente de temperatura (k_d)

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad \textbf{(3.40)}$$

Tabla 10: Valores del factor de temperatura en [°C] y [°F] (Nisbett, 2008) (Reducida)

T [°C]	**k_d**
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,927
400	0,922

T [°F]	**k_d**
70	1,000
100	1,008
200	1,020
300	1,024
400	1,018
500	0,955
600	0,963
700	0,927
800	0,872

- Coeficiente de Confiabilidad (k_e)

$$k_e = 1 - 0{,}08 \cdot z_a \quad \textbf{(3.41)}$$

Tabla 11: Valores de factor de confiabilidad (Nisbett, 2008) (Reducido)

Confiabilidad, %	**Variación de transformación z_a**	**Factor de confiabilidad k_e**
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814

3.1.10. Potencia

Se define como la cantidad de trabajo desarrollado por unidad de tiempo y se aplica a cualquier cuerpo o fuerza que sea capaz de realizar trabajo. Por esto, aplicada a un motor, se logra obtener multiplicando su par motor por su velocidad angular, en donde el primero corresponde a la fuerza desarrollada durante la rotación del cuerpo. Las unidades son los caballos de fuerza [HP] en el sistema inglés y Vatio [W] en el Sistema Internacional.

$$P = \frac{W}{t} = T \cdot \omega \tag{3.42}$$

Dentro de un equipo la potencia dependerá de todos los elementos que lo componen, y a su vez, de las fuerzas existentes dentro de él que se oponen al movimiento natural de este. Por esta razón, es posible considerar estas variables según la Ecuación (3.43), la que toma en cuenta todos los factores que influyen en el par motor del equipo (Gonzalez, 1977). Esta expresión es utilizada en la industria cementera para el diseño de molinos de martillos, por esto es aplicable al caso de estudio.

$$P_{motor} = \frac{m_M\ [kg] \cdot \left(2 \cdot r_g\ [m]\right) \cdot \omega\ [RPM] \cdot n_M \cdot f}{8 \cdot 100.000 \cdot \eta} \cdot 1{,}014 \tag{3.43}$$

El factor dependiendo de la velocidad de rotación de los martillos (f) se obtiene de la Tabla 12 y depende solamente de la velocidad tangencial de los martillos. Además, el rendimiento mecánico de la transmisión viene determinado por cada motor, pero se aproxima generalmente entre 75% a 85%.

Tabla 12: Factor dependiendo de la velocidad de rotación de los martillos (Gonzalez, 1977)

Velocidad tangencial [m/s]	**Factor (f)**
17	0,022
20	0,016
23	0,01
26	0,008
30	0,003
40	0,0015

3.1.11. Correas de transmisión

Este tipo de transmisión mecánica se basa en la unión de dos o más ruedas, o poleas, sujetas a un movimiento de rotación, esto por medio de una cinta o correa continua, la cual envuelve las ruedas y ejerce una fuerza de fricción sobre ellas para suministrarles energía desde la rueda motriz.

Existen diferentes tipos de correas utilizadas para la transmisión, pero generalmente se utilizan las de tipo "V" para la transmisión de potencia de motores eléctricos hacia equipos como maquinaria, ventiladores, compresores, entre otros. Por esta razón, los fabricantes de correas tienen estandarizado cada uno de los componentes necesarios para su correcto uso, y con ello entregan las fórmulas requeridas para el cálculo correcto de cada uno de estos.

Las siguientes definiciones y expresiones son extraídas del Manual DUNLOP para correas de transmisión industrial, en donde se detallan cada uno de los pasos a seguir y las tablas requeridas para la obtención de los datos específicos.

- **Coeficiente de corrección de la potencia (F_{cp}):** Este valor se extrae de tabla y considera el tipo de motor, la maquinaria a la cual se le quiere transmitir la potencia y las horas de servicio esperadas que tenga la maquina en cuestión.

$$P_c = P \cdot F_{cp} \qquad \textbf{(3.44)}$$

- **Selección de correa:** La correa dependerá directamente de la velocidad angular de la polea con menor diámetro y de la potencia corregida obtenida de la Ecuación (3.44). Su determinación es a través de gráficos normados incluidos en los manuales.

- **Relación de transmisión (K):** Se obtienen con la velocidad angular entregada por el motor y la que se desea obtener con la transmisión. La Ecuación (3.45) muestra que la relación sirve también para la obtención posterior de los diámetros de las poleas, en donde las letras mayúsculas corresponden a la polea mayor y las minúsculas a la polea menor.

$$K = \frac{N}{n} = \frac{D}{d} \qquad \textbf{(3.45)}$$

- **Diámetro primitivo:** Es el diámetro correspondiente a cada una de las poleas, y se obtienen de tablas existentes en los manuales, ya que estos valores están normados. La Ecuación (3.46) utiliza el diámetro determinado por tabla y la relación de transmisión para calcular el diámetro de la polea mayor.

$$D = K \cdot d \qquad \textbf{(3.46)}$$

- **Distancia entre ejes (*I*):** Se determina dependiendo de la relación de transmisión calculada con la Ecuación (3.47), y corresponde a la distancia existentes entre los centros de cada polea.

$$I \geq (K+1) \cdot \frac{d}{2} + d \qquad si \qquad 1 < K < 3 \qquad \textbf{(3.47)}$$

$$I \geq D \qquad si \qquad K \geq 3 \qquad \textbf{(3.48)}$$

- **Longitud primitiva de la correa (*L*):** Es el largo teórico que tiene la correa, el cual se puede calcular con la Ecuación (3.49). Este valor se debe corregir utilizando las tablas recomendadas por cada fabricante.

$$L = 2 \cdot I + 1{,}57 \cdot (D + d) + \frac{(D-d)^2}{4 \cdot I} \qquad \textbf{(3.49)}$$

- **Factor de corrección de la longitud de la correa (F_{cl}):** Su valor sirve directamente para compensar la prestación base de la correa dependiendo de si su valor es mayor o menor a lo recomendado por los fabricantes. Se obtiene de las tablas entregadas por los fabricantes, o bien, de gráficos normados.

- **Arco de contacto (Ñ):** Es el valor del arco de contacto de la correa sobre la polea menor y se determina con la Ecuación (3.50).

$$\text{Ñ} = 180 - 57 \cdot \frac{D-d}{I} \qquad \textbf{(3.50)}$$

- **Factor de corrección del arco de contacto ($F_{c\text{Ñ}}$):** Se requiere obtener un arco de contacto igual a 180°, esto para que la correa trabaje en óptimas condiciones, pero en la práctica este ángulo siempre es menor lo que afecta la vida útil de la correa. Por esto

para mantener un correcto nivel de prestación, se debe disminuir la prestación base con un factor que corrija este arco. Se obtiene de las tablas entregadas por los fabricantes, o bien, de gráficos normados.

- **Velocidad de la correa:** Según las especificaciones del fabricante, la velocidad tangencial de la correa no debe superar los 30 [m/s], esto porque si se supera este valor las poleas a utilizar entran en otra categoría y se consideran como especiales. Su valor se obtiene según la Ecuación (3.51).

$$V_t = \frac{\pi \cdot d \cdot N}{60 \cdot 1.000} \; [m/s] \qquad \textbf{(3.51)}$$

- **Prestación base (P_b):** También se le conoce como la potencia base que es capaz de transmitir la correa y es un valor que se extrae de los manuales. En la tabla se debe ingresar con el tipo de sección que tiene la correa, y se extraen los valores de la prestación base y de la prestación adicional por relación de transmisión, ambas utilizadas para el cálculo de la corrección de la prestación que se obtiene con la Ecuación (3.52).

$$P_{bk} = P_b + P_K \qquad \textbf{(3.52)}$$

- **Potencia efectiva por correa:** Es la potencia real que una correa puede transmitir y va a depender de todos los factores de corrección mencionados con anterioridad.

$$P_e = P_{bk} \cdot F_{cl} \cdot F_{c\tilde{N}} \qquad \textbf{(3.53)}$$

- **Cantidad de correas:** Es el número de correas que se requiere para transmitir la potencia necesaria para realizar la molienda del alimento. Dependerá directamente de la potencia corregida y de la potencia efectiva por correa.

$$N_{correas} = \frac{P_c}{P_e} \qquad \textbf{(3.54)}$$

Estos cálculos son los teóricos necesarios para la selección de poleas y correas de transmisión, pero en la mayoría de los casos los manuales traen instrucciones y tablas que ayudan a obviar alguno de estas expresiones.

3.1.12. Chavetas

En la norma DIN 6885 se nombran los tipos de chavetas y las aplicaciones correspondientes a cada una de ellas. También especifica la nomenclatura universal y las dimensiones permitidas entro de la misma norma, dejando en claro las medidas básicas y las que aplican a las chavetas más complejas.

La chaveta, o cuña, es una pieza de sección rectangular o cuadrada que se inserta entre dos elementos para transmitir potencia y evitar que se produzcan deslizamientos de una pieza sobre la otra. Este se introduce en una ranura, o chavetero, que se encuentra en el eje y posee medidas predefinidas o recomendadas que se basan en el diámetro de este. En la Tabla 13 se encuentran las medidas de cada lado de la chaveta, y con ello la profundidad de cuñero para introducir este elemento.

Tabla 13: Dimensiones de algunas aplicaciones de cuñas cuadradas y rectangulares, en [mm] (Nisbett, 2008)

Diámetro del eje		**Tamaño de la cuña**		**Profundidad del cuñero**
Mas de	*Hasta (Inclusive)*	*w*	*h*	
8	11	2,4	2,4	1,2
11	14	3,2	3,2	1,6
14	22	4,8	4,8	2,4
22	32	6,4	6,4	3,2
32	35	7,9	7,9	4,0
35	44	9,5	9,5	4,8
44	57	12,7	12,7	6,4
57	70	15,9	15,9	7,9
70	83	19,1	19,1	15,9

Existen diferentes tipos y formas de chavetas, pero las más utilizadas para transmisión son cuadradas, por esa razón la descripción solo se basará en estas excluyendo el comportamiento y medidas que deben tener las otras para su aplicación.

El cálculo de chavetas planas, o cuadradas, se basa en el par torsor que entrega el motor y en las medidas mismas de la chaveta. En la Ecuación (3.55) se plantea la forma de encontrar el valor del factor de seguridad de la chaveta para esfuerzos de corte, el cual depende, obviando medidas básicas de la cuña, del largo que tendrá esta. El ancho de la chaveta (w) puede variar

dependiendo de la aplicación que se le desea dar, pero se recomienda seguir las medidas planteadas en la Tabla 13.

$$n = \frac{S_y \cdot d \cdot w \cdot l}{4 \cdot T} \tag{3.55}$$

En la Ecuación (3.56) se observa la expresión para determinar el factor de seguridad de la chaveta sometida a aplastamiento. Cabe destacar que esta ecuación tiene la finalidad del diseño de chaveta, y se recomienda que el factor de seguridad sea entre 2 o 3, pero para el caso de estudio se optara por escoger las medidas según las aplicaciones de cuñas cuadradas y rectangulares.

$$n = \frac{0{,}9 \cdot S_y \cdot d \cdot w \cdot l}{4 \cdot T} \tag{3.56}$$

3.1.13. Rodamientos

Un rodamiento, o cojinete, consta de dos cilindros concéntricos entre los que va colocado un juego de rodillos o bolas que pueden girar libremente. Su objetivo dentro del diseño es soportar los componentes del molino, para lo cual debe ser capaz de soportar las fuerzas existentes sobre él. El eje principal pasara entre los cilindros concéntricos del cojinete, por lo que su giro no se debe ver afectado, ni interrumpido, por una mala elección de rodamientos.

Vida útil de un rodamiento se define como el número de revoluciones y horas de giro que puede soportar el rodamiento a una velocidad fija antes que presente algún tipo de falla, la cuales suelen ocurrir por fatiga, astilladura o descascarado de la superficie que soporta la carga.

Para la correcta elección de un rodamiento, esto según el fabricante SKF, se requieren conocer las fuerzas que actúan sobre él, las que se conocen como cargas estáticas (P_0). De estas se debe obtener un valor conocido como capacidad de carga estática básica (C_0), el que depende del factor de seguridad estático (s_0) del rodamiento. En la Ecuación (3.57) se observa la expresión para obtener dicho valor, el cual además debe ser menor que la capacidad estática básica entregada por el catálogo, la que depende directamente del tipo de rodamiento que se esté seleccionando.

$$C_0 = s_0 \cdot P_0 \tag{3.57}$$

Existe una expresión que iguala los factores determinados por tabla, o entregados por el fabricante, con los que se desea tener según el diseño del equipo que se está estudiando. Por ello, en la Ecuación (3.58), se plantea dicha igualdad, en donde el valor que se requiere obtener es generalmente la clasificación por catálogo, o también llamada capacidad de carga dinámica básica (C_{10}), la cual al ser calculada entrega un valor que debe ser menor al estipulado en el manual.

$$C_{10} \cdot (L_{nom} \cdot n_{nom} \cdot 60)^{\frac{1}{a}} = C_0 \cdot (L_D \cdot n_D \cdot 60)^{\frac{1}{a}} \tag{3.58}$$

$$L_{10} = L_{nom} \cdot n_{nom} \cdot 60 \approx 10^6 \tag{3.59}$$

Esta expresión es suponiendo una confiabilidad igual al 90%, pero a través de correcciones estadísticas se logra obtener la Ecuación (3.60), en donde la carga dinámica depende de la confiabilidad que se desea obtener del rodamiento.

$$C_{10} = C_0 \cdot \left(\frac{\frac{L_D \cdot n_D \cdot 60}{10^6}}{0{,}02 + 4{,}439 \cdot \sqrt[1{,}483]{\ln\left(\frac{1}{R}\right)}} \right)^{\frac{1}{a}} \tag{3.60}$$

En donde, la vida deseada (L_D) y la velocidad deseada (n_D) dependen del equipo y de las horas de vida útil el rodamiento. El factor de la exponente dependerá del tipo de rodamiento que se esté utilizando, y los valores que toma son los mostrados en la Ecuación (3.61).

$$\begin{aligned} a &= 3 && \textit{Para rodillo de bolas} \\ a &= 10/3 && \textit{Para rodillo cilindrico o conico} \end{aligned} \tag{3.61}$$

3.1.14. Velocidad critica

Cuando un eje gira, la excentricidad de este ocasiona una deflexión debida a la fuerza centrífuga que se resiste por la rigidez de flexión, pero mientras estas sean pequeñas no se

ocasiona ningún daño al elemento. El problema aparece con el termino conocido como velocidades críticas, en donde el eje se vuelve inestable si se encuentra trabajando en estos valores, y las deflexiones se incrementan sin un límite superior.

El eje presenta dos velocidades críticas, una debido a su propia masa, y otra por el ensamble de elementos, en donde esta última es mucho menor que la velocidad intrínseca del eje. Para obtener cada uno de estos datos, se debe aplicar la Ecuación (3.62), en donde la deflexión (γ) es la existente en el punto en donde se encuentre el peso o la fuerza (ω).

$$\omega_{cr} = \sqrt{\frac{g \cdot (\sum \omega_i \cdot \gamma_i)}{\left(\sum \omega_i \cdot {\gamma_i}^2\right)}} \qquad \textbf{(3.62)}$$

La velocidad critica total, se obtiene con la Ecuación (3.63), en donde se consideran ambos valores planteados anteriormente. Este resultado debe ser mayor al obtenido por el ensamble de elementos, pero su diferencia es pequeña en comparación a la existente entre la velocidad critica de este último y la debida a su propia masa.

$$\omega_{cr_{total}} = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{\omega_{cr_{peso}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega_{cr_{fuerza}}}\right)^2\right)^{-1}} \qquad \textbf{(3.63)}$$

Con este valor se determina la velocidad de trabajo aceptable para el equipo a diseñar, en donde se recomienda que sea la mitad de la velocidad critica encontrada, valor que puede variar dependiendo del criterio del diseñador.

Capítulo 4:

Memoria de Cálculo

Las memorias de cálculo son los procedimientos descritos de forma detallada de todos los cálculos realizados para el desarrollo de un proyecto de construcción o ingenieril. Se deben indicar los procedimientos que se llevaron a cabo para determinar cada uno de los elementos o parámetros que se utilizan, además de indicar cuales fueron los criterios con los que se calculan todos y cada uno de estos.

Para el estudio, se plantean diferentes tipos de posibles soluciones al problema que se está trabajando, los que varían según el criterio utilizado. En cada sección se explica el método y las razones de cada elección, esto de manera clara para la compresión del lector.

4.1. Molino de Martillos

Para comenzar los cálculos de este equipo, se definirán los parámetros iniciales supuestos para desarrollar la memoria de cálculo. Estos son valores fijos en torno a los cuales se realizarán todas las aplicaciones correspondientes al diseño. Por ello, primero se definirá la capacidad de molienda ya que es el dato base para encontrar la cantidad de martillos y volumen de la cámara de molienda.

$$Capacidad_{Molienda} = 20\ [quintales] = 2.000\ \left[\frac{kg}{hr}\right]$$

Otro de los parámetros iniciales necesarios para comenzar los cálculos serán las velocidades existentes, las que como se mencionó en el marco teórico deben estar dentro de un rango recomendado por los fabricantes. Por esta razón se realizan los cálculos suponiendo dos casos de estudios, los que se diferenciaran por la velocidad angular y tangencial que alcanza cada uno. El objetivo de esto es comprender como varían cada uno de los resultados que se obtienen con solo variar este dato inicial.

Caso 1	***Caso 2***
$v_t = 50\ \left[\frac{m}{s}\right]$	$v_t = 80\ \left[\frac{m}{s}\right]$
$\omega = 1.700\ [RPM] = 178,024\ \left[\frac{rad}{s}\right]$	$\omega = 3.000\ [RPM] = 314,159\ \left[\frac{rad}{s}\right]$

Con estos datos es posible obtener la cantidad de granos por revolución que se logra triturar, pero para lograrlo se debe realizar un cambio en las unidades de la capacidad de molienda ya que se requiere que esta se encuentre en unidades de granos por minuto, y a este valor se le llamara capacidad por minuto (C_{min}). Acá se considera cuanto pesa la cascarilla de avena, dato ya mencionado en capítulos anteriores.

$$C_{min} = 2.000\ \left[\frac{kg}{hr}\right] \cdot \frac{1.000}{1}\ \left[\frac{gr}{kg}\right] \cdot \frac{1}{0,02}\ \left[\frac{grano}{gr}\right] \cdot \frac{1}{60}\ \left[\frac{hr}{min}\right] = 1.666.667\ \left[\frac{grano}{min}\right]$$

En cada uno de los casos se podrá obtener la cantidad de granos que se trituran por revolución del equipo, para lo cual se requiere dividir el valor encontrado en las respectivas velocidades angulares. Este dato recibe el nombre de capacidad por revolución (C_{rev}).

Caso 1	***Caso 2***
$C_{rev} = \frac{C_{min}}{\omega} = \frac{1.666.667}{1.700}$	$C_{rev} = \frac{C_{min}}{\omega} = \frac{1.666.667}{3.000}$
$C_{rev} \approx 980,4\ \left[\frac{grano}{rev}\right]$	$C_{rev} \approx 555,6\ \left[\frac{grano}{rev}\right]$

La capacidad por martillo (C_M) se obtiene dividiendo la capacidad por revolución por la cantidad de martillos totales, y representa la cantidad de granos que cada martillo impacta teóricamente por revolución. Se debe suponer una cantidad de hileras de martillos adecuadas para obtener un valor más real de las unidades de cáscaras que cada elemento impacta, por esto se definen cuatro hileras, cada una con veinte martillos, lo que se resumen en una cantidad total de ochenta de estos elementos. Con esto se obtiene la cantidad de granos capaces de triturar cada uno de los martillos, lo que es un dato hipotético, ya que es posible que dentro de la cámara puedan impactar más o menos cantidad de la que se define.

Caso 1	***Caso 2***
$C_M = \frac{980{,}4}{80} \approx 13 \left[\frac{granos}{rev \cdot martillos}\right]$	$C_M = \frac{555{,}6}{80} \approx 7 \left[\frac{granos}{rev \cdot martillos}\right]$

4.1.1. Cálculos de parámetros básicos

Las velocidades planteadas son las alcanzadas por el equipo en el caso de funcionar sin carga dentro de él, y obviando la resistencia producida por los mismos componentes del molino. Por esto es necesario corregir esos datos a través del coeficiente de fluctuación definido en el capítulo anterior, el cual, permite reajustar los valores de la velocidad angular y tangencial por separado.

Para los cálculos de velocidades se considera un coeficiente igual a 0,020 [-], el que corresponde a molinos harineros. Con este valor se corrige tanto la velocidad tangencial como la angular.

Caso 1	***Caso 2***
$\omega_c = \omega \cdot \frac{2 - C_s}{2 + C_s} = 178{,}024 \cdot \frac{2 - 0{,}020}{2 + 0{,}020}$ $\omega_c = 174{,}498 \left[\frac{rad}{s}\right]$	$\omega_c = \omega \cdot \frac{2 - C_s}{2 + C_s} = 314{,}159 \cdot \frac{2 - 0{,}020}{2 + 0{,}020}$ $\omega_c = 307{,}938 \left[\frac{rad}{s}\right]$
$v_c = v_t \cdot \frac{2 - C_s}{2 + C_s} = 50 \cdot \frac{2 - 0{,}020}{2 + 0{,}020}$ $v_c = 49{,}010 \left[\frac{m}{s}\right]$	$v_c = v_t \cdot \frac{2 - C_s}{2 + C_s} = 80 \cdot \frac{2 - 0{,}020}{2 + 0{,}020}$ $v_c = 78{,}416 \left[\frac{m}{s}\right]$

Con los valores corregidos, y considerando que estas velocidades se acercan de mejor manera a las reales al momento de la molienda, es posible calcular el radio de giro máximo para cada uno de los casos. Este valor como se mencionó en su definición será la cota superior del rango de radios posibles para todo el equipo, o sea, que la distancia existente entre el centro de giro y el extremo del martillo no podrá superar este dato, por lo que claramente se tendrá que diseñar en con un valor menor al determinado.

Caso 1	***Caso 2***
$r_{g_{max}} = \frac{v_c}{\omega_c} = \frac{49{,}010}{174{,}498}$ $r_{g_{max}} = 0{,}281\ [m] \approx 280\ [mm]$	$r_{g_{max}} = \frac{v_c}{\omega_c} = \frac{78{,}416}{307{,}938}$ $r_{g_{max}} = 0{,}255\ [m] \approx 255\ [mm]$

Ya conociendo el radio de giro máximo es posible definir el valor que se utilizará para este parámetro dentro de los requerimientos mencionados, el cual será disminuido para evitar encontrarse en la zona critica de diseño.

Caso 1	***Caso 2***
$r_{g_{max}} = 0{,}260\ [m] \approx 260\ [mm]$	$r_{g_{max}} = 0{,}240\ [m] \approx 240\ [mm]$

4.1.2. Cálculo de martillos

Para la obtención de las dimensiones del martillo se supone que para ambos casos estas serán las mismas, por esto y tomando en cuenta lo mencionado en el capítulo anterior, se tiene que:

- **Largo ($\boldsymbol{L_M}$):** Para la aplicación, y considerando el radio de giro máximo del equipo, se asignará un largo de 120 [mm] a cada martillo.

- **Espesor ($\boldsymbol{e_M}$):** El tamaño del grano de avena es inferior o igual a 3 [mm], por esto el espesor de los martillos será igual a esta dimensión.

- **Ancho ($\boldsymbol{a_M}$):** Al igual que el criterio utilizado para la obtención del largo, se considerará un tercio del largo total del martillo, por ello su valor será 50 [mm].

El material del cual serán manufacturado los martillos será de un acero A36, el cual, al ser una aleación de acero al carbono, se adaptará de manera adecuada a las solicitudes existentes dentro del equipo de molienda. Las propiedades mecánicas que posee este material son:

- $S_y = 250\ [MPa]$
- $S_u = 450\ [MPa]$
- $\rho_{A36} = 7.860\ \left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Con todas estas suposiciones y valores obtenidos, se procede a calcular el volumen y la masa de los martillos que tienen ambos equipos.

$$V_M = L_M \cdot a_M \cdot e_M = 120 \cdot 50 \cdot 3 = 18.000\ [mm^3] = 1{,}8 \cdot 10^{-5}\ [m^3]$$

$$m_M = V_M \cdot \rho_{A36} = 1{,}8 \cdot 10^{-5}\ [m^3] \cdot 7.860\ \left[\frac{Kg}{m^3}\right] = 0{,}142\ [Kg]$$

El martillo tendrá una perforación, dejando la posibilidad de girarlo para usar las dos caras para triturar. En la Ilustración 21 se observan las medidas generales ya calculadas, pero, además se encuentra una dimensión, denominada como l', la que se ve afectada por el diámetro del eje segundario. Por esta razón, y suponiendo que el eje tendrá un radio muy grande, se le asignará el valor de 10 [mm] a esta variable.

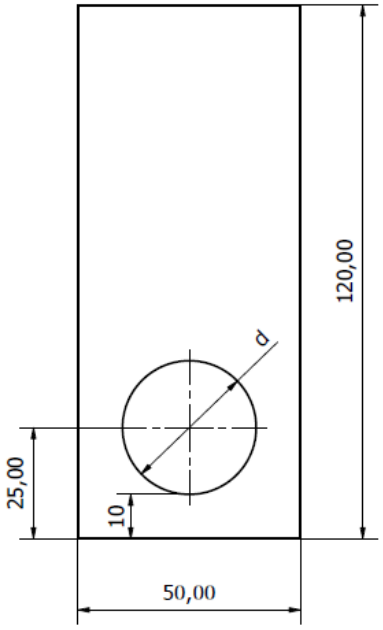


Ilustración 21: Forma y dimensiones del martillo (Elaboración propia)

Suponer las dimensiones que poseen los martillos limitara los diámetros posibles que tenga el eje secundario que sostiene este elemento, esto porque claramente no puede superar el ancho que tiene el martillo. El objetivo es reducir los casos de estudios posibles que se presenten, evitando de esta forma una extensión innecesaria del diseño del molino de martillos.

4.1.3. Cálculo de fuerzas

La fuerza centrífuga depende directamente del radio de giro y de la velocidad angular, por ello se procede a obtener para cada uno de los casos de estudio.

Caso 1	***Caso 2***
$F_{cf} = m_M \cdot r_g \cdot \omega^2$	$F_{cf} = m_M \cdot r_g \cdot \omega^2$
$F_{cf} = 0{,}142 \cdot 0{,}260 \cdot 174{,}498^2$	$F_{cf} = 0{,}142 \cdot 0{,}240 \cdot 307{,}938^2$
$F_{cf} = 1.120{,}085\ [N]$	$F_{cf} = 3.219{,}835\ [N]$

La fuerza de impacto dependerá del tiempo y del delta velocidad, por lo cual, y considerando que la de partícula es pequeña, se le asignara un valor de 5 [m/s], lo que es un numero sobre dimensionado para el tamaño de partícula.

Caso 1	***Caso 2***
$F_i = m_p \cdot \frac{(v_M - v_i)}{d_p} \cdot v_M$	$F_i = m_p \cdot \frac{(v_M - v_i)}{d_p} \cdot v_M$
$F_i = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 49{,}010}{0{,}003}$	$F_i = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 78{,}416}{0{,}003}$
$F_i = 1{,}634\ [N]$	$F_i = 2{,}614 [N]$

La fuerza de trituración depende directamente de la capacidad de molienda que se desea obtener, por esto es necesario calcular el número de partícula por revolución que es capaz de triturar el equipo.

Caso 1	***Caso 2***
$N_p = \frac{Capacidad}{\omega \cdot m_p}$	$N_p = \frac{Capacidad}{\omega \cdot m_p}$
$N_p = \frac{2.000}{3.600 \cdot 1.700 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}$	$N_p = \frac{2.000}{3.600 \cdot 3.000 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}$
$N_p = 159{,}18\ \left[\frac{granos}{rev}\right]$	$N_p = 90{,}21 \left[\frac{granos}{rev}\right]$

Con el número de partícula y la fuerza de impacto obtenida pasos atrás, es posible calcular la fuerza de trituración del equipo.

Caso 1	***Caso 2***
$F_T = N_p \cdot F_i$	$F_T = N_p \cdot F_i$
$F_T = 159{,}18 \cdot 1{,}634$	$F_T = 90{,}21 \cdot 2{,}614$
$F_T = 260{,}057\ [N]$	$F_T = 235{,}785\ [N]$

Finalmente se logra obtener la fuerza cortante que es la resultante entre la fuerza centrífuga y la fuerza de trituración.

Caso 1	***Caso 2***
$F_c = \sqrt{F_{cf}^2 + F_T^2}$	$F_c = \sqrt{F_{cf}^2 + F_T^2}$
$F_c = \sqrt{1120{,}085^2 + 260{,}057^2}$	$F_c = \sqrt{3219{,}835^2 + 235{,}785^2}$
$F_c = 1.149{,}879\ [N]$	$F_c = 3.228{,}457\ [N]$

4.1.4. Cálculo de esfuerzos del martillo

Para realizar el análisis de la resistencia que posee el martillo frente a las fuerzas que actúan sobre él, se tomaran dos casos de estudio. El primero es comprobar si el elemento es capaz de soportar a una falla por tracción, la que dependerá de la fuerza la centrifuga y del área existente en la parte lateral de las perforaciones, esto según lo mostrado en la Ilustración 22. Se supone que la perforación es lo suficientemente grande, o sea de 40 [mm], lo afecta directamente al área y al esfuerzo existente en este punto.

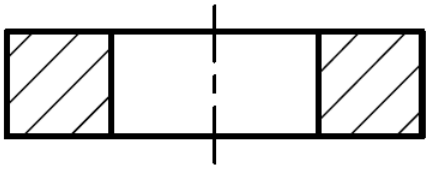


Ilustración 22: Vista en corte del centro de la perforación de un martillo (Elaboración propia)

Caso 1	***Caso 2***
$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F_{cf}}{a_M \cdot e_M}$	$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F_{cf}}{a_M \cdot e_M}$
$\sigma = \frac{1120{,}085}{(50-40)\cdot 3}$	$\sigma = \frac{3219{,}835}{(50-40)\cdot 3}$
$\sigma = 37{,}336\ [MPa]$	$\sigma = 53{,}664\ [MPa]$

El segundo es el esfuerzo cortante, en donde el área de desgarro es la responsable de soportar la fuerza a la cual está sometido el elemento. Con esto se obtiene que a mayor velocidad angular el esfuerzo de corte será más elevado que a una velocidad inferior.

Caso 1	***Caso 2***
$\tau = \frac{F}{A_d} = \frac{F_c}{e_M \cdot l' \cdot 2}$	$\tau = \frac{F}{A_d} = \frac{F_c}{e_M \cdot l' \cdot 2}$
$\tau = \frac{1149{,}879}{60}$	$\tau = \frac{3228{,}457}{60}$
$\tau = 19{,}165\ [MPa]$	$\tau = 53{,}808\ [MPa]$

4.1.5. Factor de seguridad

Los esfuerzos existentes dentro del martillo permiten determinar el factor de seguridad del elemento, esto en conjunto con las propiedades mecánicas del material de construcción. Por esto, se calcula este valor para el caso en tracción y para esfuerzos combinados.

Caso 1	***Caso 2***
$F.S = \frac{S_y}{Esfuerzo} = \frac{S_y}{\sigma}$	$F.S = \frac{S_y}{Esfuerzo} = \frac{S_y}{\sigma}$
$F.S = \frac{250}{37{,}336}$	$F.S = \frac{250}{53{,}664}$
$F.S = 6{,}69 \approx 6\ [-]$	$F.S = 4{,}66 \approx 4\ [-]$

Estos valores, aplicados a la falla por tracción, demuestran que entre mayor sea la velocidad angular con la que gira el equipo, menor será el factor de seguridad, esto porque la fuerza centrífuga existente tendrá un valor más elevado. También se observa que ninguno de los elementos falla por la acción de dicha fuerza, lo que comprueba que las recomendaciones de los fabricantes respecto a las dimensiones del elemento se adaptan correctamente a los casos de estudios planteados con anterioridad.

Para determinar un factor de seguridad que involucre todos los esfuerzos existentes, se calcula la tensión de Von Mises, en donde para el caso de estudio solo existen dos esfuerzos, cada uno en su respectivo plano, por lo que la Ecuación (3.20) se simplifica y se obtiene la aplicada a continuación.

Caso 1	***Caso 2***
$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$	$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$
$\sigma_{VM} = \sqrt{37{,}336^2 + 3 \cdot 19{,}165^2}$	$\sigma_{VM} = \sqrt{53{,}664^{\,2} + 3 \cdot 53{,}808^{\,2}}$
$\sigma_{VM} = 49{,}958\ [MPa]$	$\sigma_{VM} = 107{,}544\ [MPa]$

Con estos valores, se procede a calcular el factor de seguridad del martillo, esto tomando en cuenta todos los esfuerzos existentes dentro del elemento. Se espera que los valores sean inferiores a los obtenidos solo por la tracción del elemento, esto porque al ser un efecto combinado, el factor de seguridad debe verse más afectado.

Caso 1	***Caso 2***
$F.S = \frac{S_y}{Esfuerzo} = \frac{S_y}{\sigma_{VM}}$	$F.S = \frac{S_y}{Esfuerzo} = \frac{S_y}{\sigma_{VM}}$
$F.S = \frac{250}{49{,}958}$	$F.S = \frac{250}{107{,}544}$
$F.S = 5{,}004 \approx 5\ [-]$	$F.S = 2{,}325 \approx 2\ [-]$

Con esto comprueba que los cálculos obtenidos hasta este punto concuerdan con la teoría necesaria para el diseño de elementos.

4.1.6. Cálculo del Disco

Según lo definido, el radio del disco depende del largo de los martillos y del radio de giro del equipo, por esto y considerando las medidas ya calculadas, se obtienen los valores para cada caso de estudio.

Caso 1	***Caso 2***
$r_{disco} = r_g - L_M + 2 \cdot l$	$r_{disco} = r_g - L_M + 2 \cdot l$
$r_{disco} = 0{,}260 - 0{,}12 + 2 \cdot 0{,}025$	$r_{disco} = 0{,}240 - 0{,}12 + 2 \cdot 0{,}025$
$r_{disco} = 0{,}190\ [m]$	$r_{disco} = 0{,}170\ [m]$

El espesor del disco es valor determinante para que el equipo funcione de manera correcta al momento de la molienda. Por esto se recomienda que esta medida se encuentre entre los 10 y 20 milímetros para que el elemento no presente algún tipo de falla o flexión. De esta manera, y considerando que el elemento se manufacturara con un acero A36, se define el espesor con un valor de 15 [mm] para el primer caso, y de 20 [mm] para el segundo. Estas dimensiones se pueden obtener ya sea utilizando una plancha del material, o bien de una barra maciza que cumpla con los parámetros establecidos.

Caso 1	***Caso 2***
$e_{disco} = 15\ [mm]$	$e_{disco} = 20\ [mm]$

Obteniendo ya el espesor de disco, se calcula el volumen completo del elemento. Cabe destacar, que al igual que en el cálculo de volumen en los martillos, no se consideran los orificios, por lo que el volumen y la masa están sobredimensionados lo que no afectara negativamente el cálculo final, sino que suma más fuerza al momento del cálculo de los ejes. Esto se realiza porque no se tiene con seguridad las dimensiones de los diámetros de cada eje, por lo que suponer un valor podría perjudicar el futuro cálculo de los elementos existentes dentro del equipo, esto sumado que los discos son fundamentales para el cálculo de la inercia del equipo.

Caso 1	***Caso 2***
$V_D = \pi \cdot r_{disco}^2 \cdot e_{disco}$	$V_D = \pi \cdot r_{disco}^2 \cdot e_{disco}$
$V_D = \pi \cdot 0{,}190^2 \cdot 0{,}015$	$V_D = \pi \cdot 0{,}170^2 \cdot 0{,}020$
$V_D = 17{,}01 \cdot 10^{-4}\ [m^3]$	$V_D = 18{,}16 \cdot 10^{-4}\ [m^3]$

Finalmente, se calcula la masa que tendrá cada disco, esto con el fin de obtener posteriormente la fuerza que realiza el disco sobre el eje primario solo por su peso. Obteniendo este valor se termina el dimensionamiento necesario para este elemento dentro del equipo.

Caso 1	***Caso 2***
$m_D = V_D \cdot \rho_{acero}$	$m_D = V_D \cdot \rho_{acero}$
$m_D = 17{,}01 \cdot 10^{-4} \cdot 7.860$	$m_D = 13{,}62 \cdot 10^{-4} \cdot 7.860$
$m_D = 13{,}37\ [kg]$	$m_D = 14{,}27\ [kg]$

4.1.7. Cálculo del eje secundario

Este eje es el responsable de sostener y unir los martillos con los discos, por lo que es un elemento que no se encuentra rotando sobre su propio eje, sino que está apoyado en cada uno de los discos que tendrá el equipo. Este punto es importante ya que, dependiendo de la cantidad de discos, se podrá determinar el diámetro mínimo apropiado para este eje secundario.

Para el cálculo del eje secundario se realiza un código a través del programa Python, el cual se muestra y explica detalladamente en el Anexo A. En este código se solicitan doce datos, los que son utilizados para ordenar de manera lógica los elementos martillo, disco y golilla, esto para establecer el lugar de aplicación de cada una de las fuerzas que estos ejercen sobre el eje. Además, tiene la finalidad de obtener los diagramas de Fuerza Cortante, Momento Flector y Esfuerzo de Von Mises, de los cuales es posible extraer el momento flector máximo que se utiliza para la obtención del diámetro mínimo necesario para el diseño del eje secundario.

Con los resultados obtenidos se decide descartar la opción del equipo que rota a una velocidad angular igual a 3.000 [RPM], esto por el bajo factor de seguridad calculado por los esfuerzos

combinados. De esta manera solo queda la posibilidad de estudiar el equipo con velocidad más baja. En la Tabla 14 se muestran los datos ingresados, en donde el único valor que varía es la cantidad de discos, por eso se deben realizar seis simulaciones de las que se extrae en cada una tres diagramas y un diámetro final. Dentro de los datos se encuentra el material con el que se fabricará este eje, el cual será un acero SAE 1020, el que presenta como esfuerzo de fluencia mínimo un valor aproximado de 250 [MPa], y de resistencia a la tracción 390 [MPa].

Para el cálculo del eje se considera un factor de seguridad igual a 3 [-], y, además, que las golillas, que aún no se pueden determinar con exactitud, tendrán un peso máximo de 50 [gr], valor utilizado para el diagrama de Fuerza Cortante.

Tabla 14: Datos ingresador al programa Python

	Caso 1					
N° de Martillos	$80\ [Martillos]$					
Espesor de Martillo	$3\ [mm]$					
Peso de Martillo	$0{,}142[kg]$					
N° de Discos	2	3	5	6	11	21
Espesor de Discos	$15\ [mm]$					
Espesor de Golilla	$3\ [mm]$					
Peso de Golilla	$0{,}05\ [kg]$					
Fuerza Y	$1120{,}085\ [N]$					
Factor de Seguridad	$3\ [-]$					
Sy del Material	$250\ [MPa]$					
Momento Torsor y Fuerza Axial	$0\ [MPa]$					

Se plantea la posibilidad de tener más de una forma de distribución en el interior del molino, lo que variará principalmente por la cantidad de soportes, o discos que tendrá el eje secundario. Se desarrollar todos los posibles formatos de distribución, los que se observan claramente en le Tabla 15, en donde la determinación de la cantidad de discos se obtiene por la expresión de le Ecuación (4.1). Con esto se podrá determinar que elemento cumple con los parámetros establecidos anteriormente, y se descartaran los que sobrepasen las dimensiones propuestas.

$$N°\ de\ Discos = \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{N°\ de\ Martillos}{N°\ de\ Martillos\ entre\ Discos}\right) + 1 \qquad \textbf{(4.1)}$$

Tabla 15: Disposición y numero de martillos entre discos

N° de Martillos	N° de Martillos entre Discos	N° de Discos
80	20	2
80	10	3
80	5	5
80	4	6
80	2	11
80	1	21

De esta manera el caso inicial se subdividirá en seis posibles diseños de molinos. Cada simulación arroja datos específicos que simplifican el manejo de los cálculos requeridos para la obtención de los diámetros, y a su vez, ordena los elementos de forma correcta para que las fuerzas existentes se apliquen en el lugar indicado.

El eje secundario tendrá un cambio de diámetro en cada extremo, por lo que el largo que se obtenidas por las simulaciones será la parte central del elemento a la que se le tendrá que sumar 30 [mm]. Esta extensión se observa claramente en la Ilustración 23, y con ello, la nomenclatura que tendrá cada una de las partes en él.

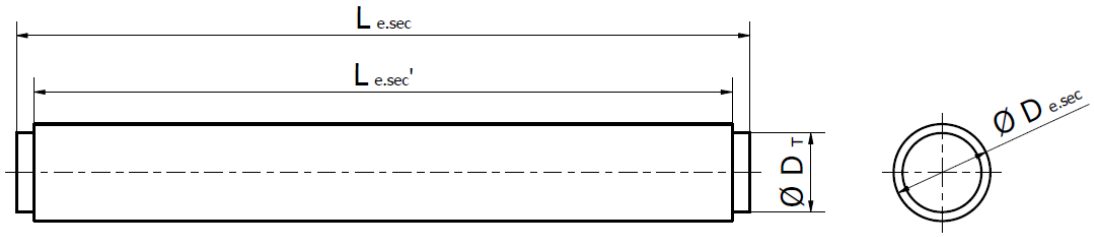


Ilustración 23: Forma teorica eje secundario (Elaboración propia)

La reducción de material en los extremos del eje no afecta el comportamiento de este durante la molienda, ya que teóricamente el momento flector máximo se debe encontrar en la zona central del elemento, por lo que en los extremos el diámetro que se requiere no debe ser igual al necesario en la parte media del eje.

La finalidad de esta sección con menor diámetro es la sujeción del eje secundario, esto porque más adelante se plantea un elemento denominado tapas de discos, los que tendrán la misión de mantener el eje en su posición correcta, evitando de esta forma desviaciones de este.

4.1.7.1. Molino con Dos discos

Con la utilización de la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo y los datos mencionados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados y gráficos para el molino de dos discos.

$$N° \; de \; Golillas = \; 84 \; [golillas]$$

$$L_{eje} = 174 \; [mm]$$

$$M_{max} = 499{,}278 \; [N \; m]$$

$$d = 39{,}376 \; [mm] \approx 40 \; [mm]$$

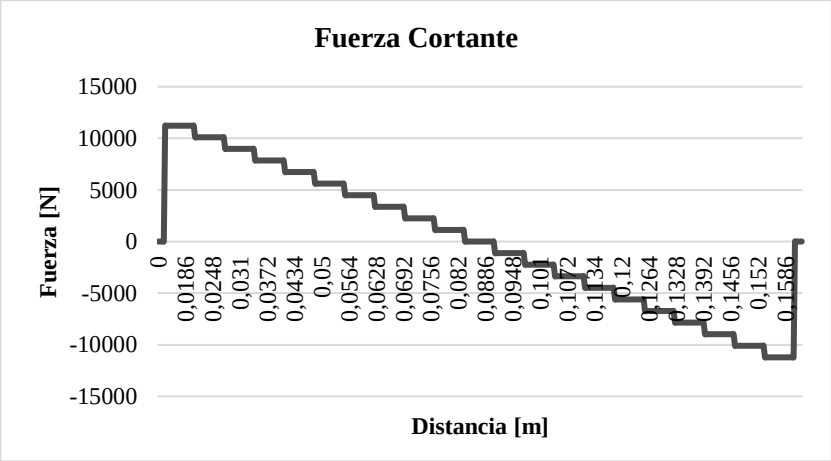


Gráfico 1: Diagrama Fuerza Cortante para 2 Discos (Elaboración propia)

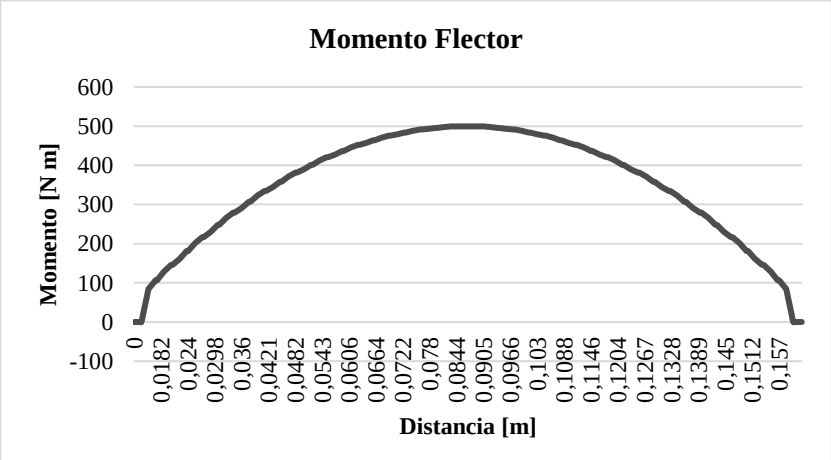


Gráfico 2: Diagrama Momento Flector para 2 Discos (Elaboración propia)

Con los datos obtenidos es posible calcular los esfuerzos de corte y normales a lo largo del eje, y con ello, los esfuerzos máximos que posee el elemento.

$$\sigma_{max} = 39{,}75\ [MPa]$$

$$\tau_{max} = 11{,}91\ [MPa]$$

Los esfuerzos a lo largo del eje permiten utilizar la tensión Von Mises y con esto observar la forma en cómo se comporta la combinación entre de las fuerzas y momentos en el elemento.

$$\sigma_{VM_{max}} = 39{,}81\ [MPa]$$

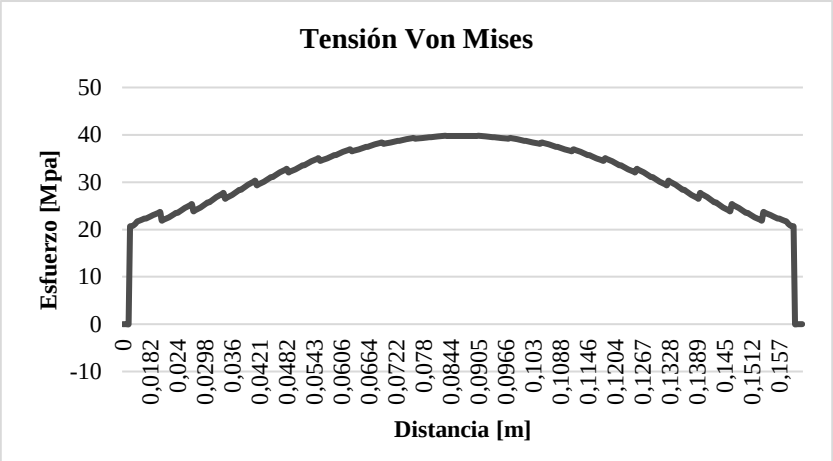


Gráfico 3: Diagrama Tensión de Von Mises para 2 Discos (Elaboración propia)

4.1.7.2. Molino de Tres discos

Con la utilización de la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo y los datos mencionados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados y gráficos para el molino de tres discos.

$$N° \; de \; Golillas = \; 88 \; [golillas]$$

$$L_{eje} = 171 \; [mm]$$

$$M_{max} = 217{,}667 \; [N \; m]$$

$$d = 29{,}858 \; [mm] \approx 30 \; [mm]$$

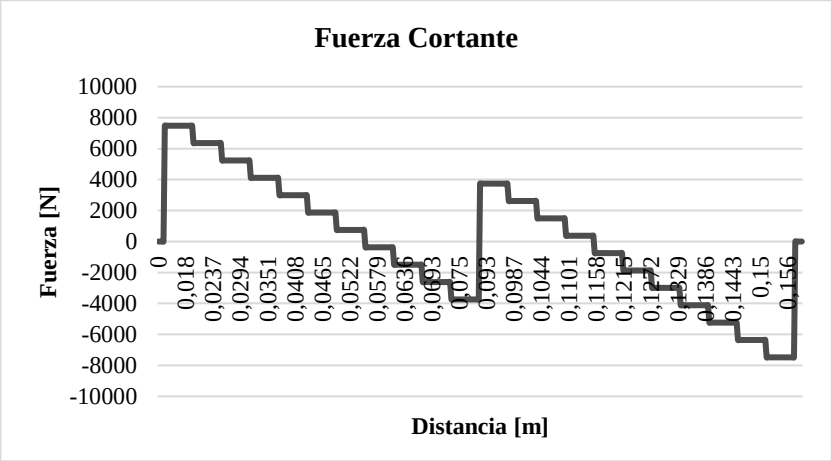


Gráfico 4: Diagrama Fuerza Cortante para 3 Discos (Elaboración propia)

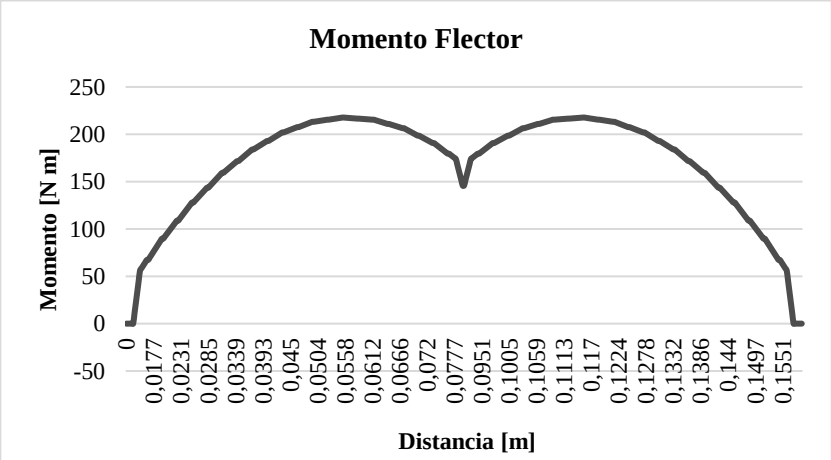


Gráfico 5: Diagrama Momento Flector para 3 Discos (Elaboración propia)

Con los datos obtenidos es posible calcular los esfuerzos de corte y normales a lo largo del eje, y con ello, los esfuerzos máximos que posee el elemento.

$$\sigma_{max} = 41{,}08\ [MPa]$$

$$\tau_{max} = 14{,}12\ [MPa]$$

Los esfuerzos a lo largo del eje permiten utilizar la tensión Von Mises y con esto observar la forma en cómo se comporta la combinación entre de las fuerzas y momentos en el elemento.

$$\sigma_{VM_{max}} = 41{,}15\ [MPa]$$

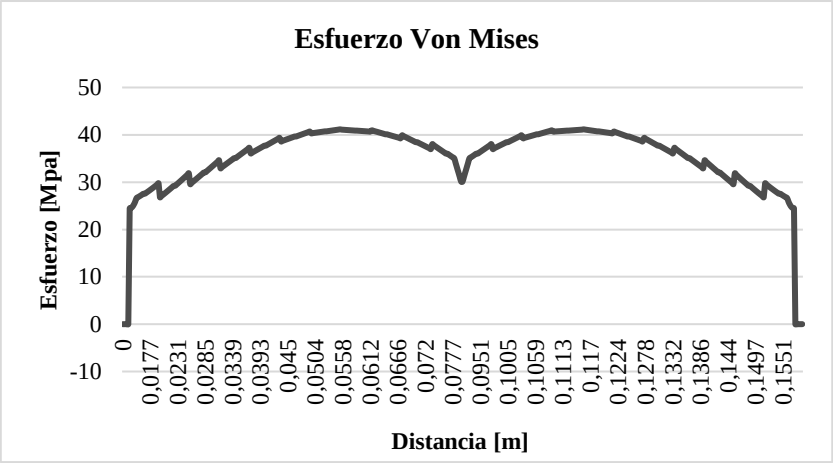


Gráfico 6: Diagrama Tensión de Von Mises para 3 Discos (Elaboración propia)

4.1.7.3. Molino de Cinco discos

Con la utilización de la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo y los datos mencionados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados y gráficos para el molino de cinco discos.

$$N° \; de \; Golillas = \; 96 \; [golillas]$$

$$L_{eje} = 207 \; [mm]$$

$$M_{max} = 141{,}379 \; [N \; m]$$

$$d = 25{,}858 \; [mm] \approx 26 \; [mm]$$

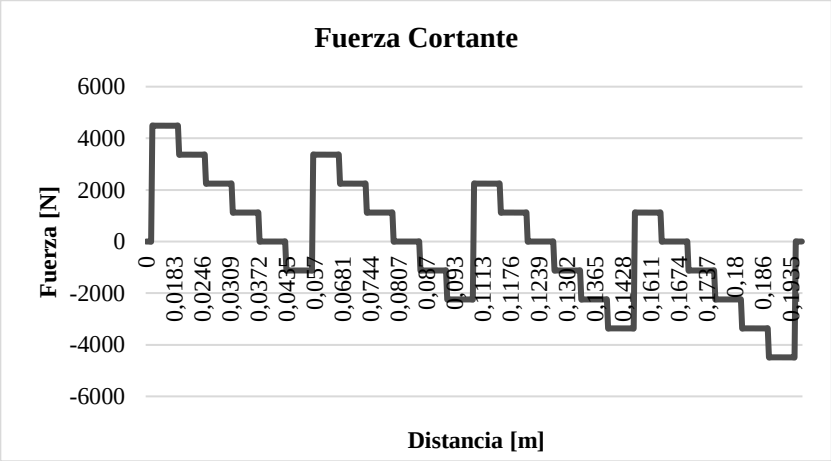


Gráfico 7: Diagrama Fuerza Cortante para 5 Discos (Elaboración propia)

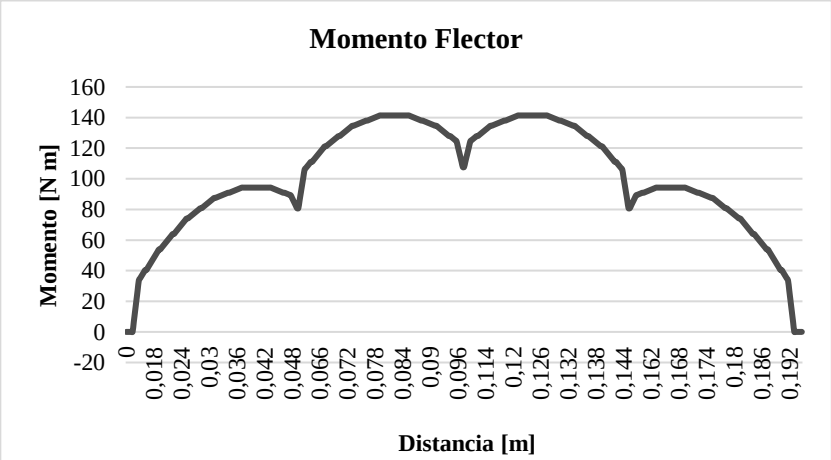


Gráfico 8: Diagrama Momento Flector para 5 Discos (Elaboración propia)

Con los datos obtenidos es posible calcular los esfuerzos de corte y normales a lo largo del eje, y con ello, los esfuerzos máximos que posee el elemento.

$$\sigma_{max} = 40{,}99\ [MPa]$$

$$\tau_{max} = 11{,}28\ [MPa]$$

Los esfuerzos a lo largo del eje permiten utilizar la tensión Von Mises y con esto observar la forma en cómo se comporta la combinación entre de las fuerzas y momentos en el elemento.

$$\sigma_{VM_{max}} = 41{,}28\ [MPa]$$

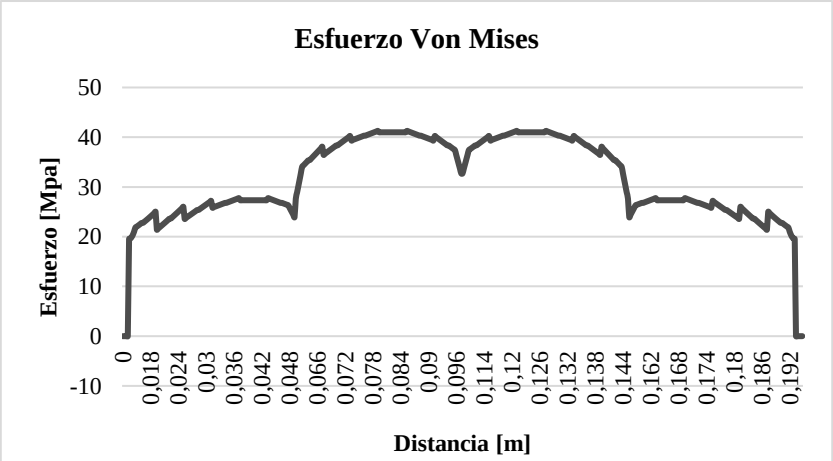


Gráfico 9: Diagrama Tensión de Von Mises para 5 Discos (Elaboración propia)

4.1.7.4. Molino de Seis discos

Con la utilización de la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo y los datos mencionados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados y gráficos para el molino de seis discos.

$$N° \; de \; Golillas = \; 100 \; [golillas]$$

$$L_{eje} = 225 \; [mm]$$

$$M_{max} = 127{,}917 \; [N \; m]$$

$$d = 25{,}009 \; [mm] \approx 26 \; [mm]$$

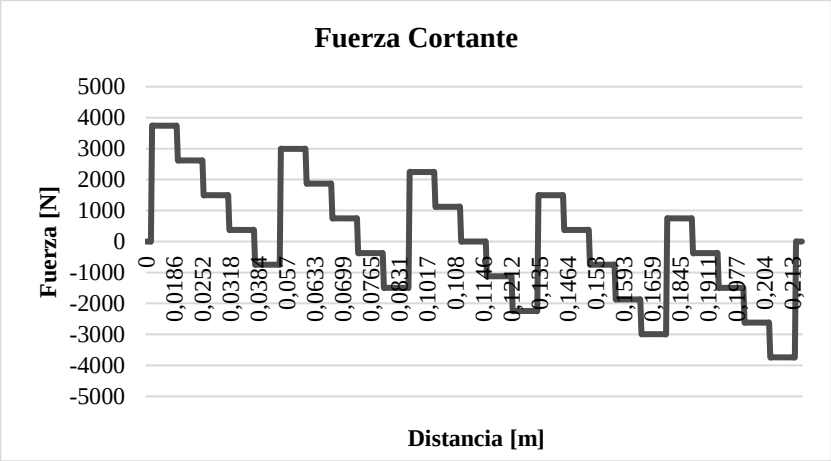


Gráfico 10: Diagrama Fuerza Cortante para 6 Discos (Elaboración propia)

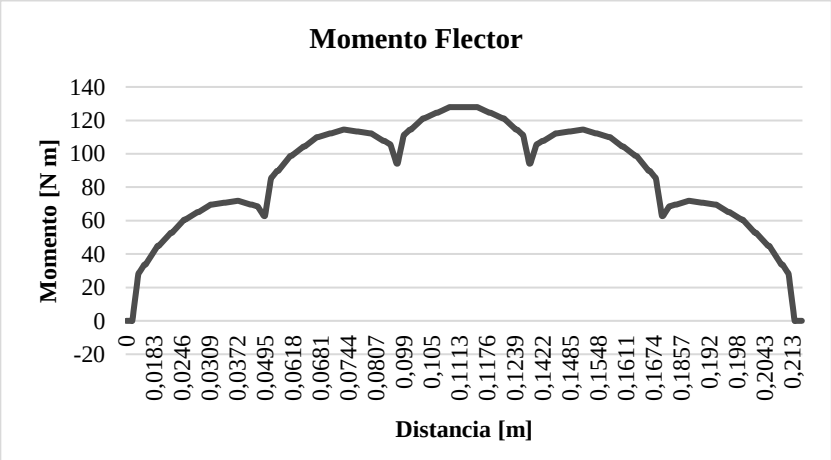


Gráfico 11: Diagrama Momento Flector para 6 Discos (Elaboración propia)

Con los datos obtenidos es posible calcular los esfuerzos de corte y normales a lo largo del eje, y con ello, los esfuerzos máximos que posee el elemento.

$$\sigma_{max} = 37{,}09\ [MPa]$$

$$\tau_{max} = 9{,}39\ [MPa]$$

Los esfuerzos a lo largo del eje permiten utilizar la tensión Von Mises y con esto observar la forma en cómo se comporta la combinación entre de las fuerzas y momentos en el elemento.

$$\sigma_{VM_{max}} = 37{,}41\ [MPa]$$

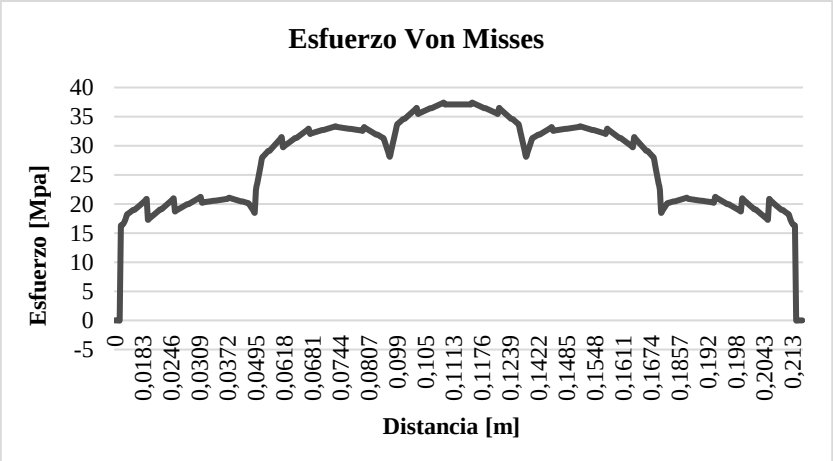


Gráfico 12: Diagrama Tensión de Von Mises para 6 Discos (Elaboración propia)

4.1.7.5. Molino de Once discos

Con la utilización de la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo y los datos mencionados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados y gráficos para el molino de once discos.

$$N° \ de \ Golillas = 120 \ [golillas]$$

$$L_{eje} = 315 \ [mm]$$

$$M_{max} = 88{,}755 \ [N \ m]$$

$$d = 22{,}141 \ [mm] \approx 23 \ [mm]$$

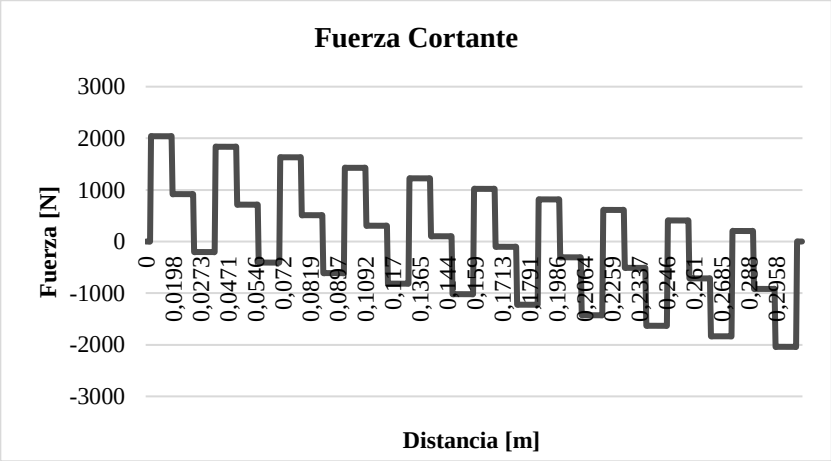


Gráfico 13: Diagrama Fuerza Cortante para 11 Discos (Elaboración propia)

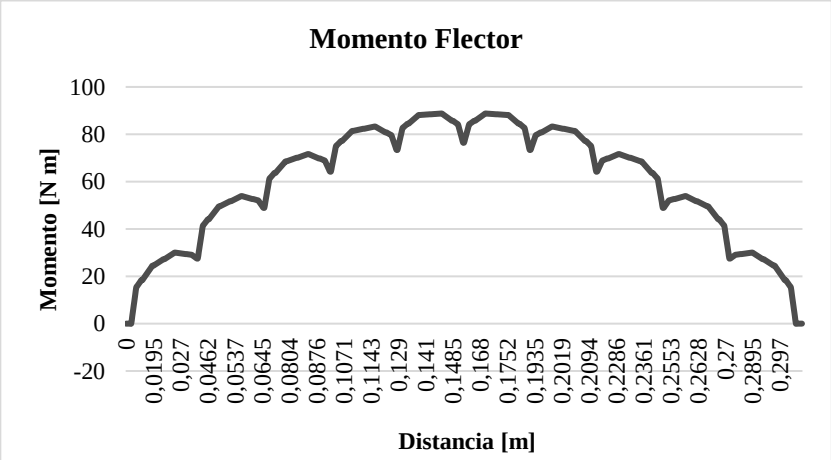


Gráfico 14: Diagrama Momento Flector para 11 Discos (Elaboración propia)

Con los datos obtenidos es posible calcular los esfuerzos de corte y normales a lo largo del eje, y con ello, los esfuerzos máximos que posee el elemento.

$$\sigma_{max} = 37{,}17\ [MPa]$$

$$\tau_{max} = 6{,}55\ [MPa]$$

Los esfuerzos a lo largo del eje permiten utilizar la tensión Von Mises y con esto observar la forma en cómo se comporta la combinación entre de las fuerzas y momentos en el elemento.

$$\sigma_{VM_{max}} = 37{,}60\ [MPa]$$

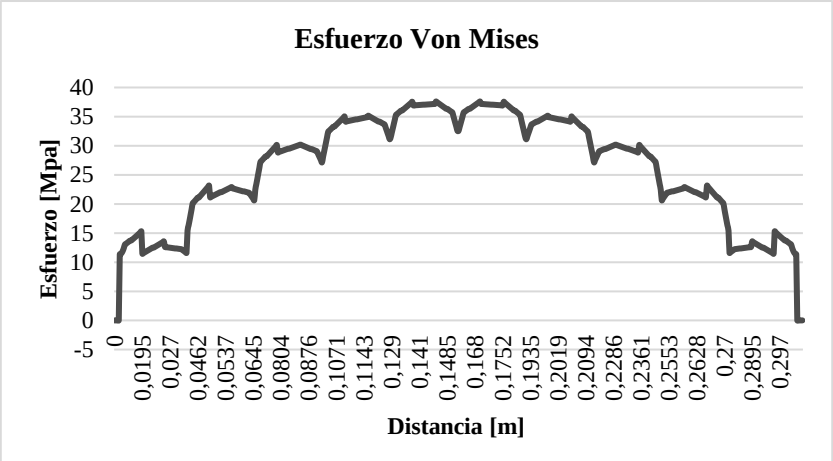


Gráfico 15: Diagrama Tensión de Von Mises para 11 Discos (Elaboración propia)

4.1.7.6. Molino de Veintiún discos

Con la utilización de la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo y los datos mencionados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados y gráficos para el molino de veintiún discos.

$$N° \; de \; Golillas = \; 160 \; [golillas]$$

$$L_{eje} = 495 \; [mm]$$

$$M_{max} = 70{,}553 \; [N \; m]$$

$$d = 20{,}511 \; [mm] \approx 21 \; [mm]$$

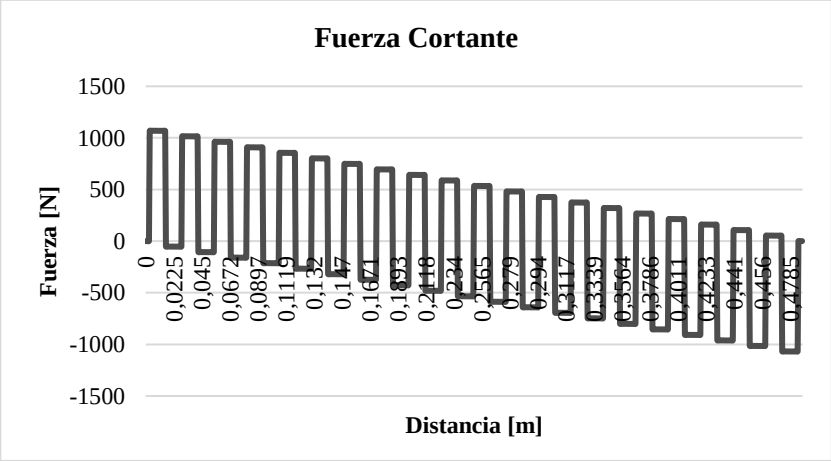


Gráfico 16: Diagrama Fuerza Cortante para 21 Discos (Elaboración propia)

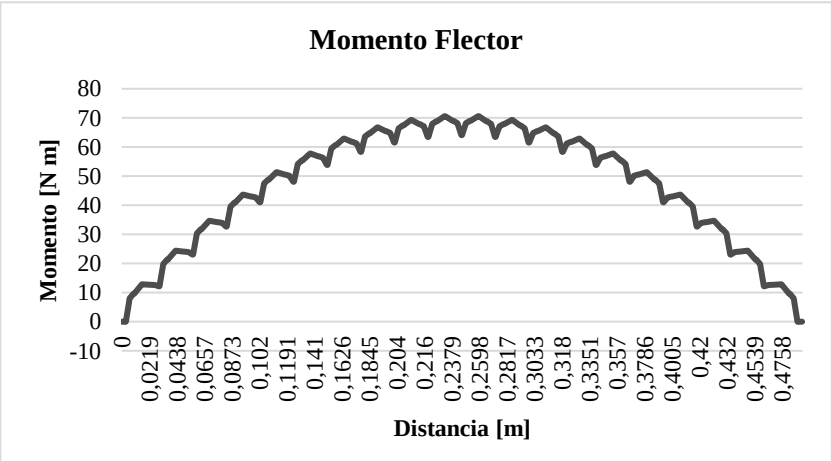


Gráfico 17: Diagrama Momento Flector para 21 Discos (Elaboración propia)

Con los datos obtenidos es posible calcular los esfuerzos de corte y normales a lo largo del eje, y con ello, los esfuerzos máximos que posee el elemento.

$$\sigma_{max} = 38{,}82\ [MPa]$$

$$\tau_{max} = 4{,}12\ [MPa]$$

Los esfuerzos a lo largo del eje permiten utilizar la tensión Von Mises y con esto observar la forma en cómo se comporta la combinación entre de las fuerzas y momentos en el elemento.

$$\sigma_{VM_{max}} = 39{,}12\ [MPa]$$

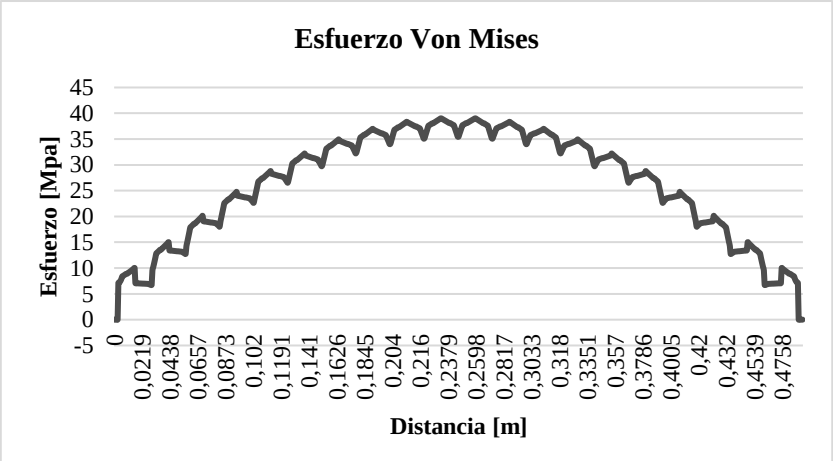


Gráfico 18: Diagrama Tensión de Von Mises para 21 Discos (Elaboración propia)

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 16, en la cual se observan los diámetros mínimos necesarios para que el eje secundario tenga un factor de seguridad de tres. Este punto ayuda a descartar algunos diseños que no son admisibles para el tamaño de equipo que se está planteando, porque el martillo posee un ancho de 50 [mm] lo que limita el posible diámetro del eje secundario que se puede colocar, y, además, demuestra que, para casos con martillos de dimensiones más grandes, se puede optar por poner menor cantidad de discos sin afectar el correcto funcionamiento del equipo.

Tabla 16: Resumen dimensiones y datos entregados por código Python (Elaboración propia)

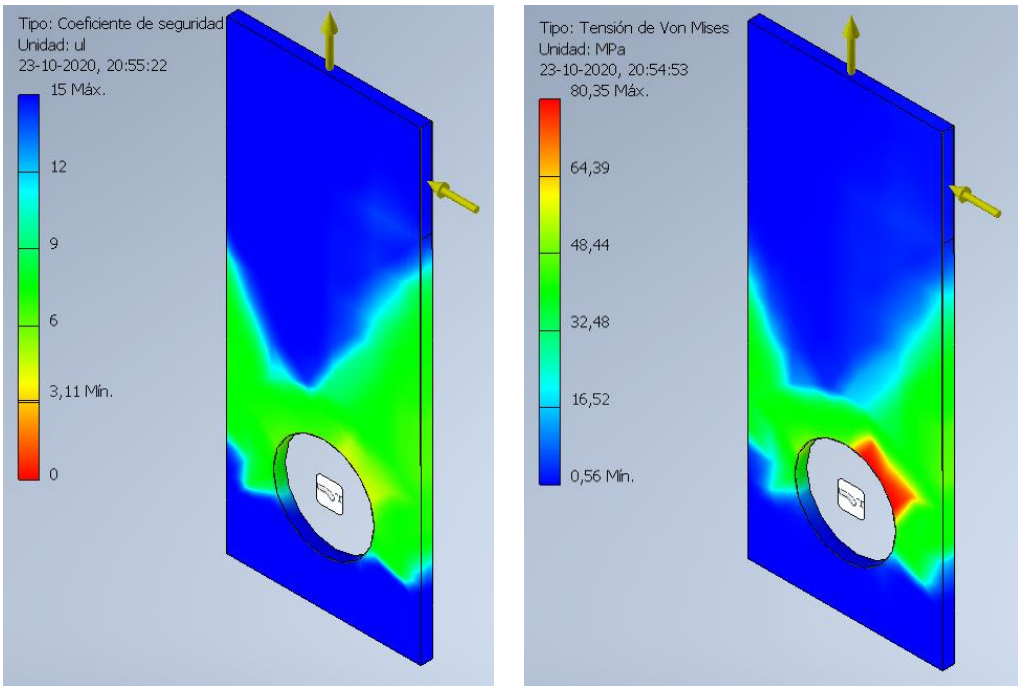
	N° Golillas [golillas]	**Largo Eje [mm]**	**Von Mises [MPa]**	**Diámetro [mm]**
2 discos	84	204	39,805	40
3 discos	88	201	41,152	30
5 discos	96	237	41,277	26
6 discos	100	255	37,405	26
11 discos	120	345	37,601	23
21 discos	160	525	39,017	21

Es posible descartar tres de los equipos planteados, en donde los con un diámetro superior a 30 [mm] y que posean más de 10 discos no se consideraran en el resto del estudio. Lo anterior se debe, en el primer caso, al poco material que queda entre la perforación y la cara lateral del martillo aumentando con esto la concentración de esfuerzo en esa zona, y en el segundo, lo poco prácticos de la distribución de discos en la aplicación industrial, esto por la gran cantidad de peso que agrega cada uno al diseño, el que se aproxima a 13 [kg] por unidad.

Para determinar si los diámetros restantes son aceptables según los criterios mencionados, se procede a simular un martillo sometido a las fuerzas obtenidas previamente a través del programa Inventor de Autodesk, en donde se aplican las fuerzas de manera puntual para poder obtener los esfuerzos y factores de seguridad dentro del elemento. De los resultados se consideran aceptables solo los que presenten un factor de seguridad igual o mayor a 3 [-] y que además no tengan altas concentraciones de esfuerzos.

Para una cantidad de seis y cinco discos el diámetro del eje secundario será el mismo por esto solo se realiza una simulación para ambos casos. En esta se comienzan a presentar concentraciones de esfuerzo en la zona de la perforación, específicamente en el mismo lado al

impacto del material, las que no son catastróficas ni elevadas por lo que teóricamente el elemento debe soportar las cargas mencionadas. El factor de seguridad más bajo es de aproximadamente 3 [-] por lo que el elemento no fallara producto del impacto del alimento.

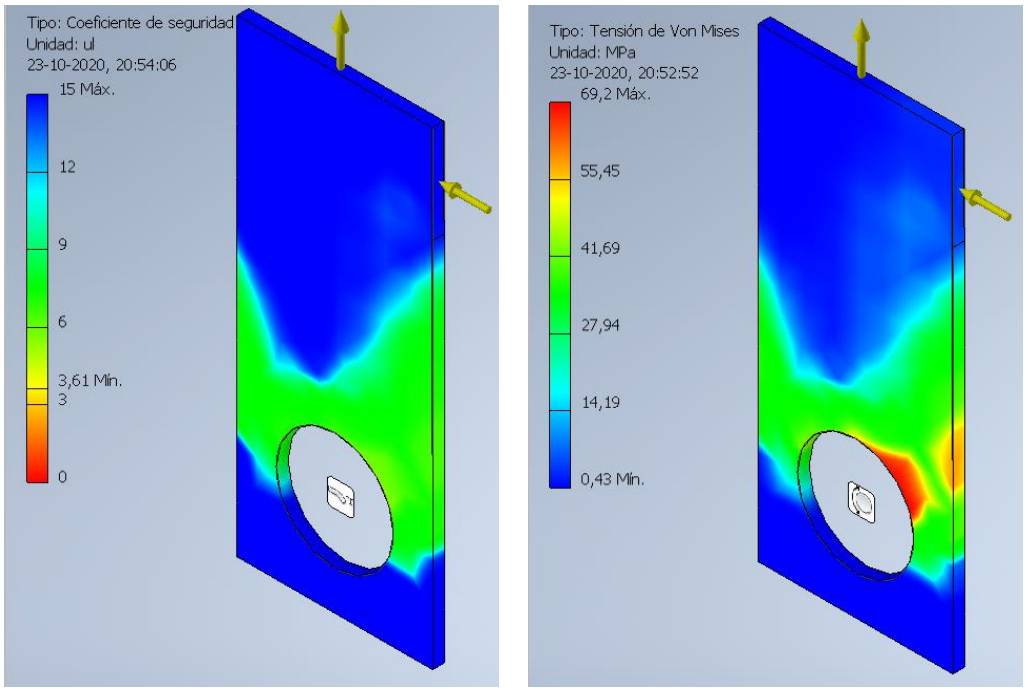


(a) (b)

Ilustración 24: Martillo con diámetro de 26 [mm]: (a) Coeficiente de seguridad; (b) Tensión de Von Mises (Elaboración propia)

En el equipo con 3 discos la perforación de los martillos es de 30 [mm] y se someten a las mismas fuerzas que en el caso anterior. La tensión de Von Mises en este caso se extiende desde el orificio hacia la cara cercana, mostrando una concentración de esfuerzo mayor que en el resto del martillo. El factor de seguridad en este caso es de aproximadamente 3 [-] siendo aceptables al igual que en el caso anterior.

En ambos casos el diámetro del eje secundario no presenta problemas en adaptarse a las dimensiones propuestas para los martillos, logrando de esta forma seguir el estudio con los tres posibles equipos. Además, en las Ilustraciones 24 y 25 se observa que la tensión de Von Mises se concentra en la zona de la perforación por lo que rotar el elemento luego de su repetido uso teóricamente no presentara ningún problema para la cara que impacta con el alimento.



(a) (b)

Ilustración 25: Martillo con diámetro de 30 [mm]: (a) Coeficiente de seguridad; (b) Tensión de Von Mises (Elaboración propia)

En el diseño de un eje es necesario comprobar si el diámetro obtenido por la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo es capaz de soportar una carga cíclica, o sea, se debe desarrollar el análisis de la fatiga del elemento. Por esto se requieren obtener, en primer lugar, los esfuerzos combinados medios y alternantes, los que se especifican en la Tabla 17. Es importante mencionar que el eje se encuentra sometido a esfuerzos repetidos, por lo que su esfuerzo mínimo será igual a cero. Por esto es posible calcular el momento medio existente en cada uno de los casos, el que será teóricamente la mitad del momento flector máximo obtenido de los diagramas.

Tabla 17: Valores de Esfuerzos alternantes y medios (Elaboración propia)

Diámetro [mm]	**M_a [N mm]**	**M_m [N mm]**	**T_a [N]**	**T_m [N]**		**σ'_a [MPa]**	**σ'_m [MPa]**
26	41.277	20.639	0	0		23,921	11,961
30	37.405	18.703	0	0		14,111	7,056

Luego, se obtienen los factores necesarios para calcular el nuevo límite de resistencia a la fatiga, esto considerando cada una de las tablas y ecuaciones. Con estos factores se calcula el valor exacto del límite para cada uno de los diámetros aceptables, como se muestra en la Tabla 18. Es análisis se realiza suponiendo que el eje secundario tiene un cambio de sección en sus extremos, los que serán utilizados para fijar el eje a los discos porta martillo.

Tabla 18:Valores del Límite de resistencia a la fatiga para cada diámetro (Elaboración propia)

D	d	k_a	k_b	k_c	k_d	k_e
26	22	0,943	0,974	1	1	0,897
30	26	0,943	0,958	1	1	0,897

Finalmente se aplican las ecuaciones para la obtención del factor de seguridad, esto para demostrar si el diámetro encontrado por la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo es capaz de soportar las cargas cíclicas. En la Tabla 19 se muestra que cada uno de los diámetros poseen valores superiores o cercanos a 4 [-], lo que se considera aceptable para el caso de aplicación. Además, generalmente se utiliza el cálculo planteado por Goodman, ya que se considera lo apropiadamente conservador para un diseño de ejes.

Tabla 19: Factores de seguridad para distintos diámetros (Fatiga) (Elaboración propia)

		ASME	**Goodman**	**Soderberg**
Diámetro	**Se**	**n**	**n**	**n**
26	153,3	4,5	3,9	3,6
30	150,9	6,8	5,9	5,5

4.1.8. Elección de Golillas

La norma ISO 7089 (DIN 125), la cual aplica a las arandelas planas en milímetros, define las medidas según el diámetro que posee el elemento en donde se introduce la golilla, por esta razón, y considerando las dimensiones calculadas para los ejes secundarios, se determina que las arandelas a utilizar son las mostradas en la Tabla 20.

Para que las medidas normadas de las arandelas se adapten de forma correcta a los ejes, es necesario modificar dos de lo diámetros previamente calculados, evitando con esto un juego excesivo de la golilla. Lo anterior no afecta el comportamiento del eje, pero si al diámetro de las perforaciones existentes en los martillos.

Tabla 20: Dimensiones de arandela según ISO 7089 (Elaboración propia)

Métrico	$\mathbf{d_{1_{interno}}}$ **[mm]**	$\mathbf{d_{2_{externo}}}$ **[mm]**	$\mathbf{h_{espesor}}$ **[mm]**
M27	28,0	50,0	4,0
M30	31,0	56,0	4,0

El ancho de la arandela es 1 [mm] más grande que la considerada en las simulaciones, dato que afecta al largo y diámetro del eje. Se vuelven a simular ambos casos con una golilla de 4 [mm], obteniendo como resultado un aumento de diámetro, para los equipos con 5 y 6 discos, de 26 a 27 [mm], y de 30 a 32 [mm] para el con 3 discos. Este último queda fuera de los parámetros establecidos como máximos para la dimensión del diámetro del eje secundario, por lo que solo quedan los casos de 5 y 6 discos, pero al ser similares, solo se continuara con el estudio del que posee menos discos.

En la Tabla 21 se resumen las dimensiones de los ejes secundarios, tomando en cuenta las modificaciones mencionadas y las normas que afectan a los elementos que se utilizan.

Tabla 21: Resumen dimensiones eje secundario, en [mm] (Elaboración propia)

	$\mathbf{D_{maximo}}$	$\mathbf{D_{minimo}}$	$\mathbf{L_{eje}}$
3 discos	32	28	223
5 discos	27	23	261
6 discos	27	23	280

4.1.9. Cálculo de potencia

El motor debe tener el tamaño y la capacidad necesaria para realizar la trituración del alimento de manera óptima y sin problemas de fuerza, por esto para la obtención de la potencia de este elemento se utilizan diferentes métodos de cálculos, siendo el mencionado en la Ecuación (3.42) el que entrega el valor más elevado. Esto no quiere decir que este resultado este exageradamente sobredimensionado, sino que es el valor más lógico y creíble para el tamaño del equipo propuesto.

El cálculo de la potencia del motor depende principalmente de la cantidad de martillos y de la velocidad angular que posee el equipo, por esto, y teniendo en cuenta que todos los posibles

casos de diseños están dentro del primer caso de estudio, esto quiere decir, con una velocidad angular de 1.700 [RPM], la potencia para cada uno de estos diseños será la misma.

$$P_{motor} = \frac{m_M\ [kg] \cdot \left(2 \cdot r_g\ [m]\right) \cdot \omega\ [RPM] \cdot n_M \cdot f}{8 \cdot 100.000 \cdot \eta} \cdot 1{,}014$$

$$P_{motor} = 15{,}61\ [HP]$$

Por temas de cálculos, se recomienda aproximar este valor a una potencia superior, esto por los factores no considerados dentro de la formula, llegando con esto a un valor de 20 [HP]. Esta potencia será la requerida para triturar la cascarilla de avena y será el valor utilizado para obtener los cálculos posteriores.

Es posible encontrar en el mercado motores eléctricos de 20 [HP] con diferentes velocidades angulares, por esto para el caso de estudio, y considerando que la velocidad requerida es de 1.700 [RPM], se utilizaran un motor con velocidad de 1765 [RPM] extraído del manual (WEG, 2017).

4.1.10. Determinación de correas y poleas

La transmisión correcta de la potencia entregada por el motor permite al equipo lograr la trituración de manera óptima y la fuerza necesaria para mover todos sus elementos. Por esto, y según lo mencionado en el capítulo anterior, se procede a seguir los pasos recomendados por el fabricante para la elección de los elementos de transmisión, el cual en este caso será el manual Intermec.

Esta elección tendrá como finalidad la obtención del diámetro de polea necesario para la transmisión, esto porque es un valor utilizado para la determinación de la fuerza que afecta al eje primario en ese punto.

Para la corrección de la potencia se debe obtener el factor de servicio típico, el cual contempla el tipo de aplicación y las horas de trabajos en las que se utiliza el equipo que requiere la transmisión por correa. En la Figura 3 se muestran una de las tres categorías en las que se dividen los tipos de equipo, que por lo general se diferencian por la potencia que utilizan o por

el uso que se le da. Por esta razón, y considerando que el equipo debería tener un uso normal correspondiente a 16 [hr/día], el factor de corrección obtenido es de 1,5 [-].

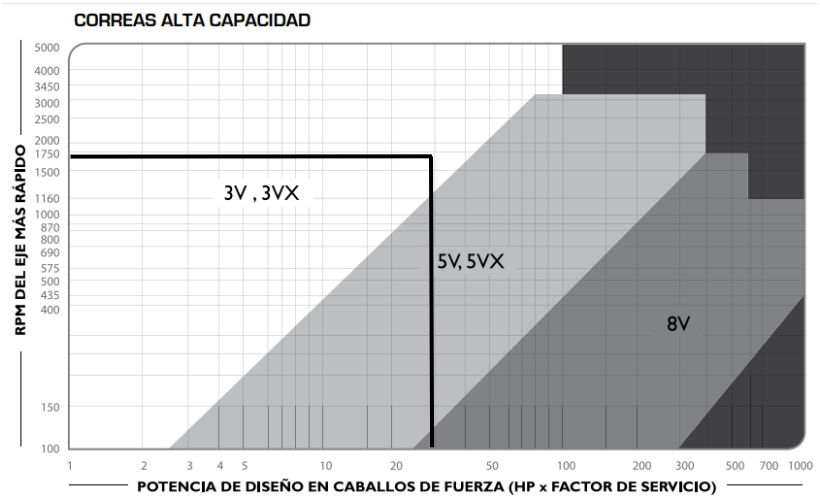
$$P_c = 20\ [HP] \cdot 1{,}5 = 30\ [HP]$$

Figura 3: Factor de servicio típico o de corrección de potencia (Intermec, 2013) (Resumido)

TIPOS DE MÁQUINAS O EQUIPOS	SERVICIO INTERMITENTE	SERVICIO NORMAL	SERVICIO CONTINUO
Maquinaria para aserríos y trabajos en madera Transportadores (arrastre o tornillo) Compresores de pistón Molinos de martillo Pulverizadores Excitadores Maquinaria textil Bombas de pistón Elevadores cangilones Maquinaria para ladrillos Sopladores de desplazamiento positivo	1.4	1.5	1.6

Con la potencia corregida, y la velocidad del eje más rápido, se ingresa a la Figura 4, en donde se obtiene que para el motor de 1.765 [RPM] se debe utilizar una correa 3V, la que entra en la categoría de alta capacidad y se recomiendan para el uso en equipos industriales.

Figura 4: Tipo de correa (Intermec, 2013)



Según el fabricante con la potencia de diseño y las revoluciones por minuto del eje más rápido, es posible determinar automáticamente el diámetro de la polea motriz y la cantidad de canales que tendrá esta. Es importante comprender que los valores entregados por las tablas extraídas del manual corresponden a la potencia transmitida por correa, o sea, si se requiere una mayor

potencia de deben agregar más cantidad de correas o canales a la polea, cumpliendo de esta forma lo planteado en la Ecuación (4.2).

$$P_c > P_{Tabla} \cdot N_{Canal} \tag{4.2}$$

Según la Figura 5, para un eje que gira a aproximadamente a 1.750 [RPM] puede utilizar una polea motriz de cualquiera de los diámetros propuestos, pero se recomienda que la cantidad de correas sea la menor posible. Por esta razón, se escoge una de 200 [mm] con 3 canales.

$$30\ [HP] > 10{,}05 \cdot 3 = 30{,}15\ [HP]$$

Figura 5: Capacidad de transmisión por canal (en HP) Correa tipo 3V (Intermec, 2013) (Resumido)

Diámetro exterior de la Polea Motriz (en milímetros)										RPM del Eje más Rápido
115	120	125	135	140	150	165	175	200	270	
3.97	4.30	4.65	5.05	5.45	5.98	6.63	7.14	8.52	11.56	1425
4.15	4.50	4.86	5.28	5.70	6.24	6.92	7.45	8.88	12.02	1500
4.38	4.75	5.13	5.57	6.00	6.60	7.30	7.86	9.36	12.62	1600
4.60	5.00	5.40	5.86	6.32	6.93	7.68	8.26	9.82	13.20	1700
4.72	5.13	5.53	6.00	6.48	7.10	7.86	8.46	10.05	13.46	1750

Se procede a obtener la relación de transmisión, en donde es importante comprender que un motor con velocidad angular menor a la requerida tendrá una polea de transmisión de mayores diámetros, en cambio, cuando la velocidad del motor es mayor, su polea será de menor diámetro.

$$K = \frac{N}{n} = \frac{1.765}{1.700} = 1{,}038\ [-]$$

El diámetro de la polea conducida se obtiene gracias al valor de la relación de transmisión calculado anteriormente y el diámetro exterior de la polea motriz.

$$D = d \cdot K = 200 \cdot 1{,}038 = 208\ [mm]$$

Con esto se obtiene que se requiere una polea conducida de 210 [mm] con 3 canales para transmitir de manera correcta la potencia del motor. Ambos diámetros obtenidos utilizaran para determinar las fuerzas producidas por la transmisión sobre el eje principal.

La distancia entre centro corresponderá a la posición que se deben colocar cada una de las poleas anteriormente calculadas, por esto según el fabricante se designan tres posibles distancias, las que se expresan según las Ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5)

$$C = 1{,}5 \cdot (D + d) \tag{4.3}$$

$$C_{max} = 2 \cdot (D + d) \tag{4.4}$$

$$C_{min} = 0{,}7 \cdot (D + d) \tag{4.5}$$

Aplicando estas ecuaciones se obtiene un rango óptimo de distancia entre los ejes de las poleas, esto porque existe la posibilidad que el espacio en donde se coloca el equipo no sea lo suficientemente grande para utilizar la distancia recomendada, entonces se podrá adaptar sin la necesidad de incurrir en una posible falla.

$$C = 615\ [mm]$$

$$C_{max} = 820\ [mm]$$

$$C_{min} = 287\ [mm]$$

La longitud de la correa dependerá del valor anteriormente calculado y de los diámetros definidos para cada polea. Este valor debe ser corregido según las especificaciones del fabricante, ya que el largo de la correa esta tabulado, además de tener una nomenclatura clara y normada. Por esto, se elige una correa 3V 750.

$$L = 2 \cdot C + 1{,}57 \cdot (D + d) + \frac{(D + d)^2}{4 \cdot C} = 1.942\ [mm]$$

Otro factor importante es la velocidad tangencial de la correa, esto porque no debe superar los 30 [m/s] para no entrar en otra categoría de poleas. Por esto se calcula la velocidad y se obtiene que la selección de polea es la correcta.

$$V_t = \frac{\pi \cdot d \cdot N}{60 \cdot 1.000} = 18{,}48\ [m/s\ ]$$

4.1.11. Cálculo eje principal

Este eje es el responsable de transmitir el movimiento y la fuerza desde el motor hacia los martillos que se encargan de la molienda, por esta razón su composición será diferente a la planteada en el eje secundario, ya que requiere otros elementos mecánicos dentro de su diseño. Sera manufacturado con un acero SAE 1045, y tendrá un factor de seguridad esperado superior a 3 [-].

El diseño se centra en obtener los diámetros mínimos para el eje principal del equipo con cinco discos, por esto, y suponiendo que los momentos máximos se encontrarán en la zona central del elemento, se propone estableces un eje con tres diámetros diferentes, como se ve en la Ilustración 26.

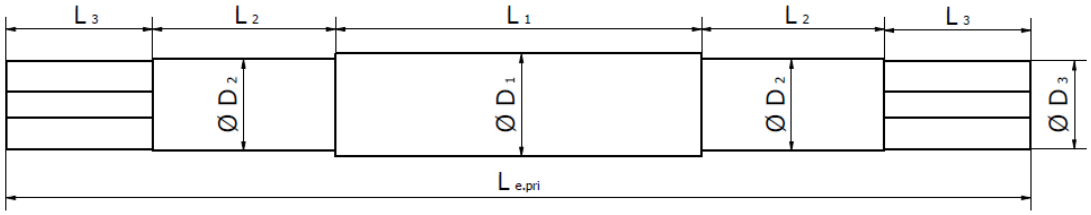


Ilustración 26: Forma teórica del eje a diseñar (Elaboración propia)

La cámara de molienda será ubicada en la zona central del eje, esto porque es donde se encuentran la mayor cantidad de fuerzas, lo que conlleva a suponer que se requiere un diámetro mayor para esa zona. Los rodamientos, o descansos, se colocarán en el segundo diámetro mayor, ya que son el único apoyo del equipo, lo que teóricamente lleva a pensar que las fuerzas existentes serán de una magnitud muy elevada. La zona con menor diámetro será destinada a la transmisión de la energía, que se puede colocar en cualquiera de los lados, o bien, si se requiere un volante de inercia, esa zona servirá para eso.

Las longitudes destinadas para cada sección son las mostradas en la Tabla 22, donde cada una de ellas posee dimensiones aproximadas a las que debería tener el elemento que se coloca en esa posición. En la zona central se agregó una dimensión mayor para considerar el espacio que utiliza la carcasa y estructura del equipo, elementos que no serán considerados dentro del diseño de partes principales de un molino de martillo.

Tabla 22: Longitud por sección según la cantidad de discos, en [mm] (Elaboración propia)

$L_{zona_{polea}}$	$L_{zona_{descanso}}$	$L_{zona_{molienda}}$	$L_{zona_{descanso}}$	$L_{zona_{polea}}$		L_{Total}
80	150	340	150	80		800

Las fuerzas que actúan sobre el eje son tres, una ejercida por los discos, otra por las tensiones de la polea de transmisión, y la última producidas como reacción de estas dos y que se encuentran en los soportes del eje. Para los cálculos se omitirá la fuerza peso generada por la existencia de un volante de inercia, esto porque su valor es insignificante para la magnitud de las fuerzas estudiadas.

Es importante mencionar que el lado izquierdo del eje, o sea en donde se encuentra el espacio para colocar poleas de transmisión o un volante de inercia, será el punto cero, entonces para los cálculos todo lo que este a la derecha tendrá un valor positivo diferente de cero.

En el análisis del eje secundario se obtuvo el valor de las reacciones que efectuaban los discos, esto por el peso y la fuerza centrífuga de los martillos. Este dato es la fuerza que actúa sobre el eje principal, ya que es la reacción de todo lo que se encuentra sostenido sobre los discos giratorios. Además, a cada fuerza se le debe sumar una parte del peso total del elemento, el cual se dividirá en la cantidad de discos que tenga el caso de estudio. En la Tabla 23 se observan las fuerzas que efectúa cada uno de los discos sobre el eje para cada caso.

Tabla 23: Fuerza total de los discos sobre el eje principal en cada caso, en [N] (Elaboración propia)

Fuerza Disco	Peso de elementos		Total Fuerza
4.488,266	54,767		4.543,033

Según el catálogo de la marca WEG para motores trifásicos, para un equipo que requiera 20 [HP] de potencia y una velocidad angular de 1765 [RPM], el par torsor nominal que entrega el motor que se adapta a estas características es de 79,6 [N m], valor del cual se obtendrán todos los siguientes cálculos de fuerza.

Para las tensiones se requiere utilizar la sumatoria de momento en el centro de cada una de las poleas conducidas, la cual deberá ser igual al momento de torsión calculado anteriormente. Por esto se deben definir las tensiones según la Ilustración 27, en donde se observa que ambas

apuntan hacia abajo, esto porque el motor debe ir en la parte inferior del equipo, pero alineado al eje principal.

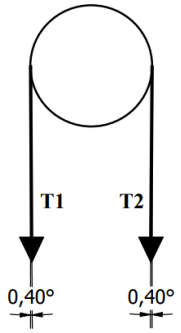


Ilustración 27: Tensiones y ángulos de poles conducidas (Elaboración propia)

A las tensiones se les debe asignar una relación que define que proporción de tensión es una de la otra, esto porque siempre existe una correa que queda más suelta que la otra, ya sea por diseño o desgaste por uso.

$$\frac{T_1}{T_2} = 2 \qquad \textbf{(4.7)}$$

$$T_1 \cdot Cos\,(\alpha) \cdot \frac{d_{conducida}}{2} - T_2 \cdot Cos\,(\alpha) \cdot \frac{d_{conducida}}{2} = M_t \qquad \textbf{(4.8)}$$

En la Ecuación (4.7) se plantea la relación que tendrán las tensiones entre sí, la que sirve para obtener la fuerza que se ejerce sobre el eje, y que será a su vez, la suma de la componente vertical de las tensiones. La Ecuación (4.8) plantea la suma de momento, que se desarrolla gracias al reemplazo de la relación de tensiones y los diámetros de las poleas conducidas. Con estas dos expresiones, se procede a obtener los valores de las tensiones existentes en la transmisión de potencia.

$$T_1 = 2.122{,}74\ [N]$$

$$T_2 = 1.061{,}37\ [N]$$

Estas tensiones se descomponen en sus componentes horizontales y verticales, las que se encuentran en el eje Y e Z respectivamente. Con estos valores se entiende que se tendrá que

realizar un diagrama de fuerza cortante y momento torsor para cada uno de los ejes, y además los rodamientos tendrán que soportar fuerzas radiales.

$$T_{1_{vertical}} = 2.122{,}667\ [N]$$

$$T_{1_{horizontal}} = 18{,}006\ [N]$$

$$T_{2_{vertical}} = 1.061{,}333\ [N]$$

$$T_{2_{horizontal}} = 9{,}003\ [N]$$

Los soportes del eje deben ser capaz de soportar todas las fuerzas descritas anteriormente, por esto, y considerando que el eje primario puede tener su transmisión tanto en el lado derecho como izquierdo, se definirá fuerza en los descansos como la mayor en magnitud obtenida por los cálculos.

$$F_{Des\ XY} = 15.196{,}134\ [N]$$

$$F_{Des\ XZ} = -11{,}116\ [N]$$

Con estos últimos valores se obtienen todas las fuerzas a las que se encuentra sometido el eje principal, y con ello se pueden dividir según el plano en el cual se encuentran. Lo anterior queda claramente explicado en la Ilustración 28, en donde se presenta el plano X – Y. En este se encuentran presentes las fuerzas ejercidas por los elementos que componen el equipo, llegando a un total de ocho en este plano.

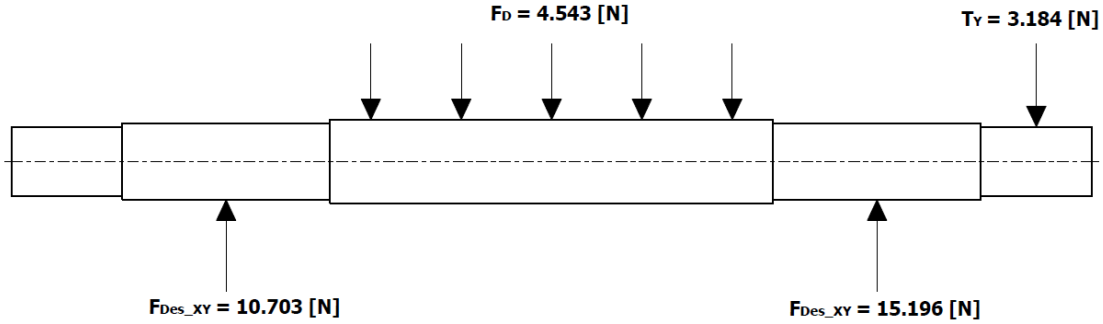


Ilustración 28: Fuerzas que actúan sobre el eje principal en el plano X-Y (Elaboración propia)

Como se demostró en los cálculos de las tensiones, el eje también se encuentra sometidos a cargas radiales las que se encuentran en el plano de trabajo X – Z. Dichas fuerzas son las provocadas por la transmisión de potencia y por los descansos que sostienen el equipo, por ello solo son tres las existentes en este plano. En la Ilustración 29 muestra la ubicación de las cargas sobre el elemento y sus respectivas magnitudes.

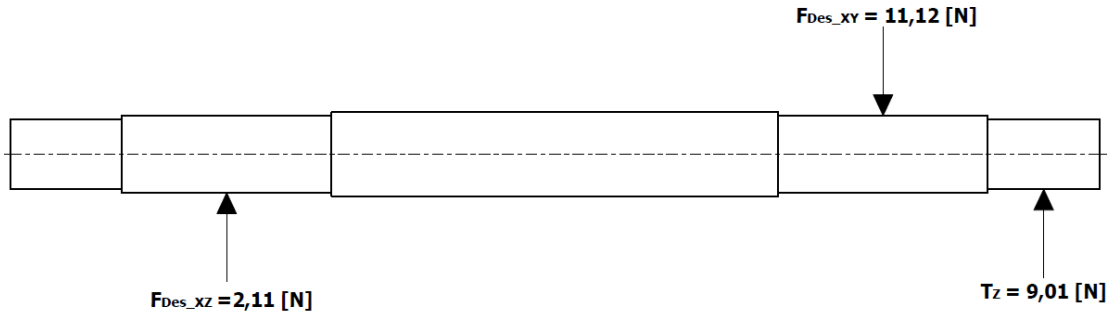


Ilustración 29: Fuerzas que actúan sobre el eje principal en el plano X-Z (Elaboración propia)

Con lo anterior, y ya sabiendo el lugar teórico de aplicación de cada una de las fuerzas, se proceden a graficar el diagrama de Fuerza Cortante, con lo que luego, gracias al área bajo la curva, se obtiene el diagrama de Momento Flector para cada plano.

La aplicación de la Teoría del Momento Máximo permitirá obtener el diámetro mínimo del eje según el valor que se obtiene de los diagramas de Momento Flector (ver Anexo B), pero para eso se debe realizar una combinación de los planos, lo que se logra con le Ecuación (4.9), y de esto obtener el diagrama de Momento Flector Combinado.

$$M_{Total} = \sqrt{M_{XY}^2 + M_{XZ}^2} \qquad \textbf{(4.9)}$$

Considerando todas las fuerzas calculadas, más la fórmula de Momento Flector Combinado, se procede a obtener el diámetro mínimo que debe tener la zona central del eje, esto porque se utiliza en los cálculos el momento flector máximo que se encuentra, según los diagramas, en la zona de molienda de material.

$$d = 54{,}8 \approx 55\ [mm]$$

Al igual que para el eje secundario, es posible obtener los esfuerzos cortantes y normales existentes a lo largo del elemento. Con esto se aplica la Tensión de Von Mises, obteniendo los esfuerzos combinados y las zonas en donde la concentración de estos se mayor.

$$\sigma_{VM_{max}} = 43{,}03\ [MPa]$$

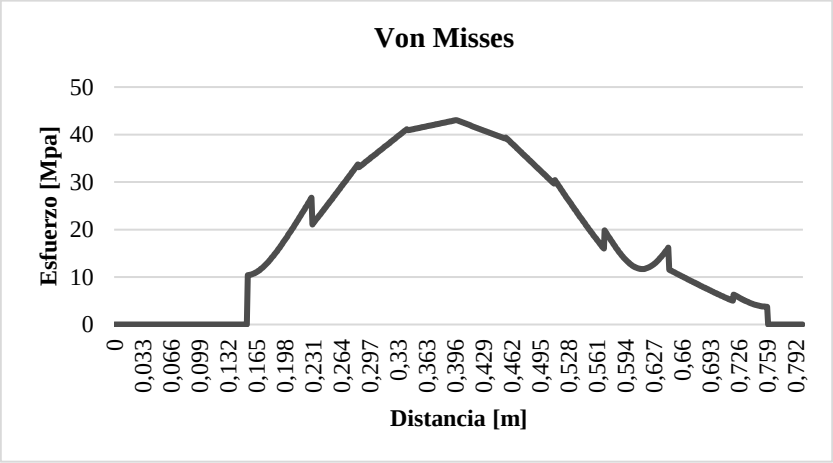


Gráfico 19: Diagrama Tensión de Von Mises para el eje principal (Elaboración propia)

El eje principal, como se mencionó antes del análisis, se dividirá en tres secciones, esto porque no todo el elemento se encuentra sometido a las mismas fuerzas, lo que significa que los momentos flectores no son máximos a lo largo de todo el eje, si no que más bien, si se observan los diagramas, estos se encuentran en su punto más alto en el centro de la cámara de molienda. De esta manera se demuestra el supuesto de la diferencia de diámetros, y, además, que la sección que debe poseer un diámetro de mayor será la cámara de molienda porque los momentos en esa zona son los máximos.

La selección de los diámetros dependerá de las barras de acero SAE 1045 encontradas en el comercio y del estudio previamente realizado. Por esta razón, y considerando la implementación de chaveteros, los diámetros que tendrá el eje son los mostrado en la Tabla 24, en donde se observa que los valores son mucho mayores a los calculados según el momento máximo, esto debido a las ranuras existentes a lo largo del eje, las que son utilizadas para colocar los elementos de seguridad mencionados, y las cuales afectan directamente a la concentración de esfuerzo el eje diseñado.

Tabla 24: Valor diámetros exteriores finales de cada sección, en [mm] (Elaboración propia)

Sección del Eje	***0 -80***	***80 - 230***	***230 - 570***	***570 - 720***	***720 - 800***
Diámetros	65,00	70,00	75,00	70,00	65,00

Las chavetas serán utilizadas para la transmisión de potencia, la que se encuentra en los diámetros menores del eje primario. Se utilizarán cuñas paralelas de extremos rectos, por ello en la Tabla 25 se encuentran las medidas establecidas por la norma DIN 6885 y las que se utilizan en el diseño del equipo. Además, se fijará un asiento fijo en el chavetero del eje y en el chavetero del cubo.

Tabla 25: Medidas chavetas según DIN 6885, en [mm] (Elaboración propia)

$\boldsymbol{b_{ancho}}$		18		20	
$\boldsymbol{h_{alto}}$		7	11	8	12
$\boldsymbol{d_{1_{Diametro}}}$	$>$	58	58	65	65
	$\leq$	65	65	75	75

Con lo anterior se obtienen los puntos más críticos del eje, los cuales serán las ranuras de los chaveteros y los cambios de diámetro existentes. Se deberá realizar un análisis de fatiga especifico en cada uno de esos puntos, ya que la concentración de esfuerzos en estos será mayor que en el resto del eje.

El análisis de fatiga en los cambios de diámetros entrega factores de seguridad iguales o mayor a 2 [-], numero aceptable para el diseño que se realiza. En la Tabla 26 se encuentran los valores obtenidos para el cambio de diámetro existente desde la zona de molienda hacia los descansos, y en la Tabla 27, desde los descansos hacia la transmisión y el volante.

Tabla 26: Factores de seguridad en cambio de diámetro (Mayor a Medio) (Elaboración propia)

	ASME	**Goodman**	**Soderberg**
Diámetro	***n***	***n***	***n***
75	2,1	2,1	2,1

Tabla 27: Factores de seguridad en cambio de diámetro (Medio a Menor) (Elaboración propia)

	ASME	**Goodman**	**Soderberg**
Diámetro	***n***	***n***	***n***
65	3,2	3,1	3,0

Para los chaveteros se utilizó el supuesto que la cuña aplicada a los ejes es una chaveta con talón, o sea, sus extremos son rectos y no fresados, lo que aumenta la cocentracion de esfuerzo en esos puntos. De igual manera, los factores de seguridad encontrado fueron favorables y aceptables para el diseño. En la Tabla 28 se observan los resultados obtenidos, en donde el factor se seguridad se aproxima a 4 [-].

Tabla 28: Factores de seguridad en chaveteros (Diámetro menor) (Elaboración propia)

	ASME	**Goodman**	**Soderberg**
Diámetro	***n***	***n***	***n***
65	4,2	4,1	3,9

La velocidad critica de trabajo que posee el conjunto es el último cálculo necesario para confirmar si el diámetro del eje es adecuado para la aplicación requerida, por esto, se debe obtener la flexión del elemento producto de su propio peso y por el conjunto.

Con las medidas del eje principal y las fuerzas que actúan sobre él, se proceden a simular el elemento mediante el programa Inventor de AutoDesk (ver Anexo F). De este análisis se obtienen los diagramas de ambos planos de la flexión del eje, tanto para el caso del propio peso y del conjunto, datos con los cuales se procede a calcular la velocidad critica del eje según sea el caso.

$$\omega_{cr_{peso}} = 2.744{,}88 \left[\frac{rad}{s}\right]$$

$$\omega_{cr_{fuerza}} = 282{,}43 \left[\frac{rad}{s}\right]$$

Con estos valores se comprueba que la velocidad critica del eje solo considerando su peso siempre será mucho mayor a la calculada luego de la aplicación de fuerzas sobre el elemento. Se procede a obtener la velocidad critica del equipo en su conjunto, velocidad que teóricamente debe ser inferior a la calculada por la acción de las fuerzas sobre el eje.

$$\omega_{cr_{total}} = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{\omega_{cr_{peso}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega_{cr_{fuerza}}}\right)^2\right)^{-1}} = 280{,}95 \left[\frac{rad}{s}\right] = 1.765{,}27\ [RPM]$$

Se obtiene que la velocidad critica del equipo es muy cercada a la velocidad de trabajo propuesta para el diseño del equipo, por esto es necesario disminuir las revoluciones por minutos del motor para evitar posibles fallas por este dato. Con esto se recomienda que la velocidad de trabajo sea de 1.000 [RPM] o inferior, lo que implicaría un cambio en el motor o en la relación de poleas definidas anteriormente.

El motor escogido en los puntos anteriores sobrepasa en gran medida las revoluciones requeridas y adecuadas para el equipo según lo obtenido en la velocidad critica, por esto se recomienda el cambio de motor a uno de igual potencia, pero que trabaje a 1.175 [RPM], entregando de esta forma un par torsor nominal de 120 [N m]

4.1.12. Elección de Rodamientos

La elección del rodamiento es la última etapa para el diseño del equipo en cuestión, por ello se requieren especificar las cargas a las cuales se someten los soportes del eje. La Tabla 29 contiene las fuerzas del cojinete que se encuentra junto a la polea conducida, que es a su vez el que se ve afectado por las fuerzas de mayor magnitud, por esta razón y tomando en cuenta la combinación utilizada en el punto anterior, se procede a simplificar dicha tabla eligiendo los valores más altos.

Tabla 29: Fuerzas existentes en los soportes del molino de martillo, en [N] (Elaboración propia)

Plano XY	**Plano XZ**
15.196,134	11,116

Con los datos de la Tabla 36, se procede a calcular la capacidad de carga básica estática y dinámica, para lo cual se debe conocer el factor de seguridad, la confiabilidad y la vida deseada. Estos datos son valores fijos y de ellos dependerá la carga dinámica que debe soportar el soporte a escoger.

$$L_D = 10.000\ [horas]$$

$$n_D = 1.000\ [RPM]$$

$$R = 0{,}9\ [-]$$

$$s_0 = 1{,}5\ [-]$$

Con estos valores definidos, se procede a calcular las cargas básicas estáticas y dinámicas, en donde estas últimas son calculadas para rodamientos de bolas y de rodillos, logrando de esta forma simplificar la elección del elemento en cuestión. En la Tabla 30 se obtienen los valores mencionados, en donde se observa que la magnitud de las cargar presentan poca variación respecto a la cantidad de discos que cada caso, por lo que se elegirá un rodamiento común para los cinco casos de estudio.

Tabla 30: Datos calculados para la selección de descansos (Elaboración propia)

			Bolas	**Rodillo**
s_0	C_0	L_{10D}	C_{10}	C_{10}
1,5	20.885,82	600	205.496,410	163.496,694

Con las cargas básicas dinámicas se determina que los rodamientos de rodillos a rótula son los más adecuados para la aplicación deseada. Por esto, se recomienda un descanso SKF 21314 E.

Capítulo 5:

Diseño y Modelación

En los capítulos anteriores se calcularon las medidas de todos los elementos que se requieren para conformar un molino de martillo funcional, por ello es este apartado se plantean en forma de resumen las dimensiones finales de las piezas que componen el equipo, y con ello algunas consideraciones que mejoran el diseño y materiales propuestos.

Durante el desarrollo del capítulo se especificarán las medidas de los seis elementos principales que conforman un molino de martillo, esto tomando en cuenta todo el análisis previo realizado a cada uno de ellos, pero, además, se planteara la posibilidad de modificar el material del cual están hechos.

5.1. Descripción y Medidas

Según lo calculado a lo largo de los capítulos anteriores, se plantea el diseño de un molino de martillo que trabaja a una velocidad angular de 1.000 [RPM] y que tiene una capacidad de trituración de 2 toneladas por hora. Para esto se requiere un motor trifásico de 20 [HP] con velocidad nominal de 1.175 [RPM].

El molino será dividido en seis partes, en donde cada una de ellas tendrá su forma, medidas y cantidad necesaria claramente especificadas. Además, en cada sección del equipo se plantea la posibilidad de modificación del material de construcción, esto con el fin de mejorar el comportamiento del molino, ya que los nuevos aceros son más acertados para la aplicación requerida.

Las formas y dimensiones que se plantean a continuación son basadas totalmente en los cálculos realizados anteriormente, por esto su base teórica y memoria de cálculo debe ser buscada respectivamente en el capítulo 3 y capítulo 4.

5.1.1. Martillos

Su forma será rectangular con una perforación en la parte inferior para el paso del eje secundario. Se requieren ochenta de estos elementos para la conformación total del molino de martillos, en donde a cada uno de ellos, se le debe realizar un tratamiento térmico (temple) para aumentar la dureza y resistencia del acero.

El acero con el que se realizó el estudio es un A36, el que tiene una aplicación estructural, por esto, y considerando una mejora en el elemento, se plantea el uso del acero TF 2436 (AISI D6), o bien, un BÖHLER K100 (AISI D3) ambos catalogados como aceros para trabajo en frio y herramientas.

Tabla 31: Aceros adecuados para manufactura de martillos (Elaboración propia)

	Densidad $[\boldsymbol{kg/m^3}]$	**Dureza sin temple** $[\boldsymbol{HB}]$
A 36	7.860	120
AISI D6	7.670	250
AISI D3	7.840	230

Las dimensiones del martillo no se ven afectadas por el material de construcción que se elija para este, por esto el ancho, largo, espesor y el diámetro de la perforación son los mostrados junto a la Ilustración 30.

Longitud	$L_M = 120$ [mm]
Ancho	$a_M = 50$ [mm]
Espesor	$e_M = 3$ [mm]
Perforación	$D_{e.sec} = 27$ [mm]

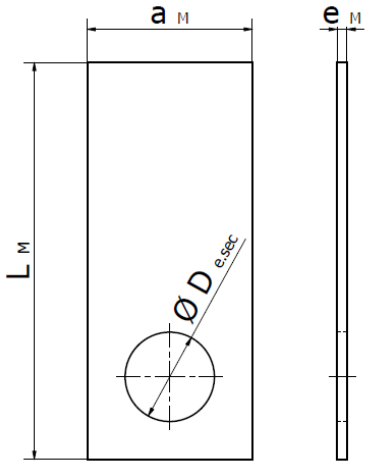


Ilustración 30: Forma y nomenclatura final de un martillo (Elaboración propia)

5.1.2. Discos

Su forma será circular con cuatro perforaciones de igual tamaño en la parte exterior, para los ejes secundarios, y un orificio en la parte central, para el eje principal. Se requieren cinco de estos elementos para el equipo que se está desarrollando, y, además, cada uno de ellos debe ir soldados en su perforación central al eje.

El acero con el que se realizó el estudio es un A36, el que tiene una aplicación estructural, por esto, al igual que en el caso de los martillos, se plantea una mejora en los materiales de construcción, en donde se recomienda un SAE 4340, o bien, un SAE 4320, en donde este último se utiliza para la fabricación de piñones, coronas dentadas, crucetas, tapas de rodamientos y terminales de dirección.

Tabla 32: Aceros adecuados para manufactura de discos (Elaboración propia)

	Densidad $[\boldsymbol{kg/m^3}]$	**Dureza sin temple** $[\boldsymbol{HB}]$
A 36	7.860	120
SAE 4340	7.850	280
SAE 4320	7.840	260

Las dimensiones de los discos no se ven afectadas por el material de construcción que se elija para este, por esto el diámetro, espesor y las perforaciones son las mostradas junto a la Ilustración 31.

Diámetro	$D_D = 400$ [mm]
Espesor	$e_D = 15$ [mm]
Perforaciones	$D_1 = 75$ [mm]
	$D_{e.sec} = 27$ [mm]

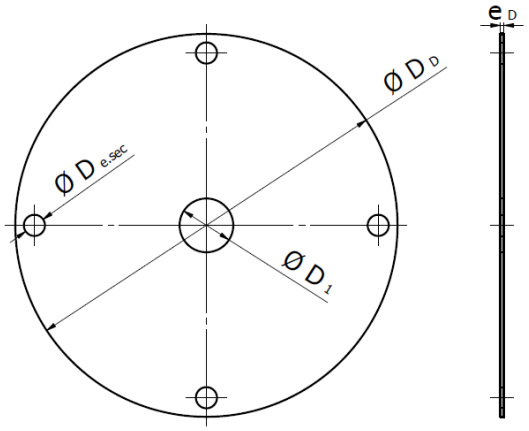


Ilustración 31: Forma y nomenclatura final de un disco porta martillos (Elaboración propia)

5.1.3. Eje principal

Está compuesto de tres diámetros y cada uno con calidades superficiales diferentes. El con mayor diámetro es donde se sueldan los discos y se encuentra la cámara de molienda. El diámetro intermedio debe tener un acabo superficial muy fino ya que es en donde se encontraron los soportes del equipo. Por último, el diámetro menor tendrá un chavetero para colocar la polea de transmisión de potencia.

Tabla 33: Aceros adecuados para manufactura de eje principal (Elaboración propia)

	Densidad $[kg/m^3]$	**Dureza sin temple** $[HB]$
SAE 1045	7.870	180
SAE 4340	7.850	280

El acero con el que se realizó el estudio es un SAE 1045, el que tiene una aplicación en elementos estructurales que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo, por esto, al igual que en los casos anteriores, se plantea una mejora en los materiales de construcción, en donde se recomienda un acero cromo níquel bonificado, o también conocido como un SAE 4340, el que se utiliza generalmente para manufacturas de partes sometidas a muy altos esfuerzos dinámicos, como ejes, cigüeñales, arboles de transmisión, entre otros.

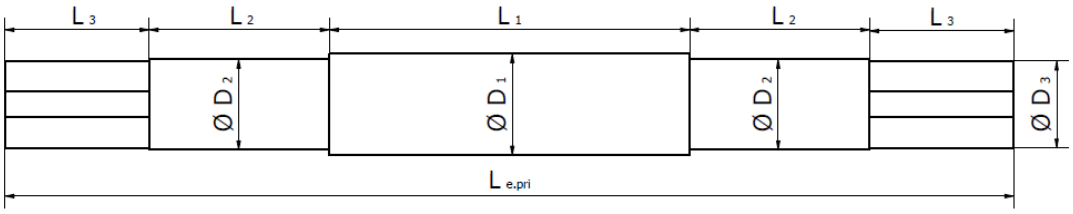


Ilustración 32: Forma y nomenclatura final de un eje principal (Elaboración propia)

Longitud	$L_{\text{e.pri}} = 800$ [mm]
Diámetro	$D_1 = 75$ [mm]
	$D_2 = 70$ [mm]
	$D_3 = 65$ [mm]
Largo	$L_1 = 340$ [mm]
	$L_2 = 150$ [mm]
	$L_3 = 80$ [mm]

5.1.4. Eje secundario

Posee dos diámetros diferentes, en donde el mayor está destinado para sujetar los martillos y arandelas, y el menor para ser insertado en la tapa de los discos. Su calidad superficial debe estar entre N 12 y N 11, o sea debe ser basto, pero sin la existencia de rebaba.

Al igual que el eje principal, el acero con el que se realizó el estudio es un SAE 1045, el que tiene una aplicación en elementos estructurales que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo. Se plantea una mejora en los materiales de construcción, en donde se recomienda un acero SAE 4340, el que se utiliza en piezas que están sometidas a grandes exigencias de dureza, resistencia mecánica y tenacidad.

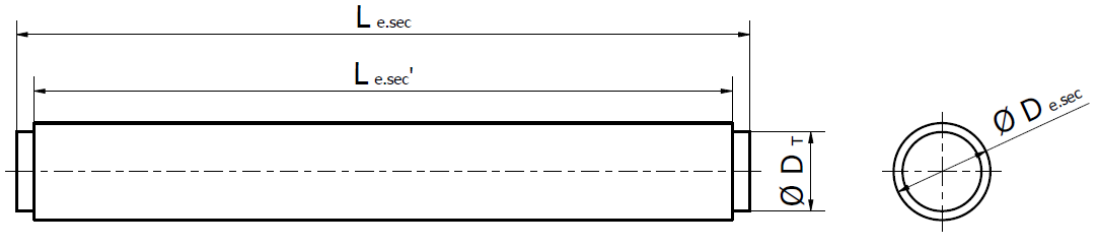


Ilustración 33: Forma y nomenclatura final de un eje secundario (Elaboración propia)

Se requieren cuatro de estos elementos, ya que existen cuatro corridas de martillos, cada una con 20 de estos últimos. Las cuatro dimensiones existentes dentro de este elemento se encuentran claramente descritas en el cuadro siguiente.

Longitud	$L_{e.sec} = 262$ [mm]
	$L_{e.sec'} = 232$ [mm]
Diámetro	$D_{e.sec} = 27$ [mm]
	$D_T = 23$ [mm]

5.1.5. Arandelas

Los cálculos realizados se adaptan para que este elemento sea capaz de encontrarse de manera comercial, por esta razón sus dimensiones están según la DIN 125, norma específica para las golillas planas. Se requieren noventa y seis de estos elementos, y su función es separar los martillos de los discos, o bien, martillos con martillos.

Durante los cálculos se planteó que el material del cual son manufacturados estos elementos es un acero SAE 1020, pero comercialmente no se especifica claramente el acero con el que están construidos, por esta razón solo se requerirá que sea un acero al carbono que cumpla con las dimensiones plantadas en la norma DIN 125, o bien, en la ANSI B18.22.1 o ASTM F436.

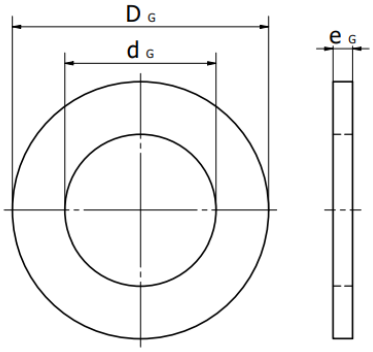


Ilustración 34: Forma y nomenclatura final de arandela plana (Elaboración propia)

Las dimensiones planteadas en las normas mencionadas son muy parecidas, por esta razón, y considerando que el diámetro interior de la golilla corresponde al utilizado en un tornillo de 1 pulgada, las medidas requeridas de este elemento para el uso dentro del molino de martillo son las mostradas en el cuadro siguiente.

Métrico	$M27$
Diámetro	$D_G = 50$ [mm]
	$D_g = 28$ [mm]
Espesor	$e_G = 4$ [mm]

5.1.6. Tapa de discos

Este elemento no fue calculado ni presentado anteriormente, esto porque no es sometido a ninguna fuerza lo que implica que su diseño se basara solamente en su funcionalidad y partes del molino ya diseñadas. Se sujetará a los discos exteriores del molino, esto con tornillos de diámetro pertinente para la sujeción, por lo que dos de los discos tendrán que estar perforados de igual manera que este elemento.

Tendrá forma circular de diámetro y espesor igual a los discos del molino, pero con más perforaciones que estos. Cuatro de ellas debe tener igual diámetro que el menor existente en el eje secundario, y las otras veinte, serán de menor valor que el mencionado. En la Ilustración 35 se observa con mayor claridad lo definido anteriormente.

Diámetro	$D_{TAPA} = 400$ [mm]
	$d_{TAPA} = 200$ [mm]
Espesor	$e_D = 15$ [mm]
Perforaciones	$D_T = 23$ [mm]
	$D_{perf} = 10$ [mm]
Ángulo	$\alpha = 25$ [°]

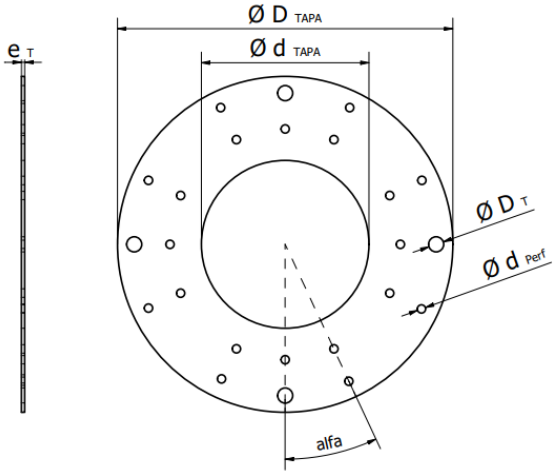


Ilustración 35: Forma y nomenclatura final de la tapa de disco (Elaboración propia)

Será manufacturado con el mismo material que los discos giratorios, esto quiere decir, puede utilizarse un acero A36, SAE 4340, o bien, un SAE 4320. Además, se requieren dos de estas tapas dentro del diseño del molino, esto según lo explicado anteriormente.

5.2. Planos de fabricación

La realización de los planos se extraerá de la modelación de cada uno de los elementos diseñados anteriormente, esto a través del software Inventor de Autodesk, en el cual se realizan las piezas con volumen para luego llevarlas a los dibujos técnicos correspondientes.

En el Anexo E se encuentran los planos para la fabricación de cada una de las partes principales del equipo en cuestión, en donde se especifican las consideraciones y medidas claras que permitan su manufactura. Además, en la primera plana del dibujo, se observa el plano conjunto del equipo, en donde se ve más claramente la forma final del molino y la cantidad de piezas necesarias para su montaje.

Capítulo 6:

Costos de Fabricación

Estimar los costos asociados a la fabricación de los elementos calculados, es el paso final del estudio planteado al comienzo del escrito. Por esto, y considerando que existen costos de materiales, maquinaria y mano de obra, el capítulo se dividirá en tres grandes temas que trataran cada uno de estos.

El estudio económico se basa una parte en valores obtenidos mediante cotizaciones a proveedores, por lo que son costos confiables y reales. En cambio, existes costos que son estimados, por lo que el criterio utilizado se explica en detalle en el lugar de aplicación.

6.1. Estimación de costos del equipo

Para la manufactura del equipo se debe tener una aproximación clara de los costos asociados a cada una de las piezas del molino, y, además, a las maquinarias y mano de obra utilizada para la fabricación de cada elemento. Por lo anterior, esta sección se dividirá en los tres costos existentes a lo largo del proceso, en donde se explicará con detalle el valor de cada operación.

6.1.1. Materiales

Según lo especificado en el capítulo anterior, se propone una mejora en los materiales de construcción del molino de martillo, por esta razón, las cotizaciones fueron realizadas según estos nuevos aceros, dándole de esta forma una mayor dureza a cada una de las partes que componen el equipo.

El eje principal y secundarios se fabricarán con un acero SAE 4340, en donde luego a cada uno se le debe realizar un mecanizado para alcanzar el largo y diámetros establecidos en la parte del diseño. Se cotizo una barra maciza de 1 ¼ [in], con un cargo de 300 [mm] para los ejes secundarios, y de 3 [in] con largo de 850 [mm] para el eje principal.

Para los discos, se consideró una barra de acero SAE 4340 de 15 ¾ [in] de diámetro, esto con un largo de 50 [mm], ya que las desviaciones de la sierra con la que se realizan los corten en el lugar de la cotización se desviaba aproximadamente 15 [mm].

Los martillos serán manufacturados con un acero AISI D3, material especial para la realización de herramientas. Dicho material es comercializado en formato de planchas, las que se dimensionan de forma: espesor 3 [mm], ancho 500 [mm] y largo 1.000 [mm]. Con estas medidas se requieren dos planchas para obtener los ochenta martillos necesarios para el equipo propuesto.

Finalmente, las arandelas planas son encontradas de manera comercial, por esta razón se deben solicitar cien golillas planas de 1 [in] al proveedor. Se debe tener en cuenta que las dimensiones de este elemento sean los establecidos por las normas DIN 125, ANSI B18.22.1 o ASTM F436, ya que sus medidas son cercanas y se adaptan de manera correcta a la aplicación.

Tabla 34:Costos asociados a materiales para fabricación de un molino de martillos (Elaboración propia)

	Material	**Formato**	**Cantidad**	**Valor (con IVA)**
Eje principal	SAE 4340	Barra	1	$ 58.000
Eje secundario	SAE 4340	Barra	4	$ 14.500
Discos	SAE 4340	Barra	5	$ 555.000
Tapa de disco	SAE 4340	Barra	2	$ 220.000
Martillos	AISI D3	Plancha	80	$ 33.000
Golillas	Acero carbono	Unidad	100	$ 15.000
			Total	$ 895.500

Cada uno de los valores utilizados para obtener el monto estimado del costo de los materiales fue cotizado con empresas comerciales, por lo que se considera que el valor final se acerca lo suficiente a la aplicación real.

Con esto se estima que el costo de los materiales necesarios para fabricar el rotor del equipo asciende a un monto de $ 900.000. Este valor varía según el proveedor y materiales que se utilicen para la manufactura del equipo, pero como se mencionó, se considera un monto aceptable para el diseño establecido.

6.1.2. Maquinaria

Los equipos utilizados para el mecanizado de los materiales mencionados en el punto anterior dependerán del elemento que se esté trabajando, ya que cada uno requiere operaciones diferentes para llegar a la forma especificada en los planos de fabricación. Por esto, a continuación, se plantean por separado las operaciones que requiere cada una de las piezas que conforma el molino de martillos.

El eje principal requiere pasar por las operaciones de refrentado, cilindrado y achaflanado, en donde todas se realizan con un torno horizontal. Con esto ya se tiene casi el total del elemento terminado, esto quiere decir, largo y diámetro. Los chaveteros se realizan mediante un fresado de ranura, y como lo menciona su nombre, se utiliza una fresadora.

Al igual que el eje principal, para la manufactura de los ejes secundarios se requiere un refrentado, cilindrado y achaflanado, por lo tanto, el equipo a utilizar es un torno horizontal. Este elemento solo requiere estas operaciones por lo que su fabricación es menos compleja que el caso anterior.

El material cotizado para la manufactura de los discos no posee un corte exacto, por lo que es necesario un planeado para nivelar y alcanzar el espesor establecido. Lo anterior se realiza con una fresadora, la que debe ser capaz de obtener la superficie plana que se requiere. Para las perforaciones se puede utilizar el mismo equipo, solo se debe cambiar la herramienta de corte a una adecuada para la operación.

Los martillos pueden ser cortados con una sierra, pero se requiere una exactitud alta, ya que el ángulo de impacto debe ser lo más perpendicular posible al movimiento de rotación del elemento. Por esta razón se recomienda utilizar corte por chorro de agua, en donde además de la forma rectangular, se puede realizar simultáneamente el orificio de cada uno de los martillos, logrando de esta forma obtener el elemento completo.

La estimación del costo de maquinaria se basará en el costo ya calculado de los materiales, por esto se considera que todas las operaciones anteriores serán un 90% de lo anterior. Este valor puede estar por encima del costo real, o por debajo, pero se considera aceptable por las operaciones anteriormente mencionadas.

6.1.3. Mano de obra

Según lo detallado en el costo de las maquinarias, se requieren trabajadores que sean capaces de utilizar cada uno de los equipos mencionados, lo significa que debe ser mano de obra especializada. Por esto se considera que este costo es el doble el costo de los materiales, valor que incluye el armado del equipo.

En este punto es importante destacar que cada una de las estimaciones pueden no ser acertadas, ya que obtener el precio real de la mano de obra y maquinarias es más complejo que el de los materiales de fabricación, por esta razón existe la posibilidad que el precio final del equipo sea excesivamente sobreestimado, o bien, sea inferior.

Con lo anterior se procede a obtener el costo total de las partes principales de un molino martillo, en donde su valor alcanza el monto de $ 3.500.000. Se recalca que este valor puede no ser muy exacto, pero se considera apropiado para el estudio realizado.

Tabla 35: Costos principales para fabricación de un molino de martillos (Elaboración propia)

	Factor	**Valor base**	**Valor**
Materiales	1	$ 900.000	$ 900.000
Maquinaria	0,9	$ 900.000	$ 810.000
Mano de obra	2	$ 900.000	$ 1.800.000
		Total	$ 3.510.000

Por otro lado, se pueden agregar los elementos restantes para el montaje completo del molino de martillo, esto quiere decir, considerar la estructura, elementos de transmisión, motor y rodamientos que faltan para completar la estimación completa del equipo. Esto provocara un aumento en el costo obtenido anteriormente, pero será espera que sea un valor que se acerque más a la realidad.

Los elementos mencionados se encuentran de manera comercial, pero requieren de un envió o traslado internacional. Por esta razón, en la estimación no se considerará ese costo asociado, provocando de esta forma un posible aumento en el valor final que se plantea.

A continuación, se muestra un cuadro de detalle de los costos asociados a la fabricación y montaje de un molino de martillo, en donde se llega a que el valor total de este equipo es de aproximadamente $ 5.700.000.

Tabla 36: Costos totales para la fabricación y montaje de un molino de martillos (Elaboración propia)

		Valor (con IVA)
Materiales	***Eje principal***	$ 58.000
	Eje secundario	$ 14.500
	Discos	$ 555.000
	Tapa de disco	$ 220.000
	Martillos	$ 33.000
	Golillas	$ 15.000
Maquinarias		$ 810.000
Mano de obra		$ 1.800.000
Elementos comerciales	***Motor***	$ 1.750.000
	Rodamientos	$ 350.000
	Estructura	$ 150.000
		$ 5.697.500

Al costo final del molino de martillo se le agrega un factor de corrección, esto para solventar los supuestos expuestos en los puntos anteriores. Por esto se considera aceptable considerar este factor como un 15% más del valor obtenidos, lo que aumenta el costo final en $ 855.000. Finalmente, se llega a que el costo del equipo completo es de $ 6.600.000 aproximadamente.

Conclusión

Se obtiene como resultado del presente estudio los planos generales de un molino de martillo con capacidad de molienda aproximada de 20 quintales la hora. Junto a esto, se estimas los costos parciales y generales que implica la manufactura del equipo, llegando a un monto total de $ 6.600.000.

Dentro del cálculo y diseño, se observó que la correcta elección de materiales de construcción para cada una de las partes que componen el equipo es fundamental para el buen funcionamiento de este, a lo que se le debe sumar la importancia de la aplicación que se le dará, o bien, al consumidor final que se desea satisfacer.

Los criterios aplicados durante el proceso de diseño deben no solo apoyarse en la teoría misma del cálculo de las partes, sino que también considerar y basar algunas variables en equipos existentes con aplicaciones similares. Esto ayuda a la simplificación de operaciones y a la obtención de factores de seguridad confiables.

En la estimación de costos, los materiales corresponden a un 26% del total parcial del valor del equipo, y a un 17% del total general del molino. Además, dentro del análisis, el 57% de los costos son valores obtenidos por cotización, y el resto son estimaciones consideradas adecuadas para el caso de estudio.

Para futuros lineamientos basados en la investigación se recomienda tratar los siguientes tópicos:

- Realizar el diseño de un molino de martillo con capacidad superior. Con esto llevar a cabo una comparación de las dimensiones de los elementos principales y fundamentar el beneficio del incremento de capacidad de trabajo.

- Modificar el tipo de alimento a moler, estudiando sus propiedades físicas. Determinar si el equipo se adecua a la nueva materia prima, o bien, si es necesario la modificación o incorporación de nuevas partes.

- Llevar a cabo la construcción del molino de martillo, para comprobar si la capacidad de molienda establecida se adecua a la capacidad real del equipo.

- Construir las partes principales del molino, o prototipos, para la realización de ensayos en laboratorio. Determinar si los materiales son los adecuados para la aplicación establecida, y determinar las fuerzas reales que soporta cada uno de los elementos.

- Realizar simulación del equipo y de la cáscara de avena, esto con el fin de estudiar el impacto existente al momento de la molienda. Lograr estudiar la concentración de esfuerzos dentro del grano y en la zona de contacto del martillo.

Referencias

(1) Aguilera, J. y. (1996). *Glosario de Términos Reológicos en español y postugués.* Valencia, España: CYTED-RIPFADI.

(2) Beer. (2010). *Mecánica vectorial para ingenieros (Dinámica).* México: Mc Graw Hill.

(3) Carrasco, M. A. (2007). *Estudio del Efecto del Espesor de Laminado en un Cereal de Avena con Almidón Retrogradado, sobre su Índice Glicémico* . Valdivia.

(4) Cosmo. (2018). *Molino de Rodillos*. Obtenido de https://molinoderodillos.com/

(5) DUNLOP S.A. (s.f.). Correas de transmision industrial. Buenos Aires, Argentina.

(6) FAO. (2011). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo.* Roma, Italia: Swedish Institute for Food and Biotechnology (SIK).

(7) Fellows, P. J. (1994). *Tecnología del procesado de los alimentos: Principios y práctica.* Zaragoza: Acribia.

(8) Gonzalez, A. S. (1977). *Manual tecnologico del cemento.* Barcelona: Tecnicos asociados, S.A.

(9) Hebei Yuanchang Food Mechanism & Technology Co., Ltd. (2016). *Made-in-China*. Obtenido de Made-in-China: https://es.made-in-china.com/co_ycfoodmachine/product_Stainless-Steel-Bowl-Cutter-Chopper-Machine-for-Meat-Fruit-Vegetable-Surimi-Cheese-Tofu-Pet-Food_hsrrnnsou.html

(10) Hernandez, M. y. (1999). *Tratado de Nutricion.* Madrid: Diaz de Santos.

(11) Hosokawa Micron LTD. (2019). *Hosokawa Micron LTD*. Obtenido de https://www.hosokawa.co.uk/products/ultraplex-upz-fine-impact-mill/

(12) Incolor. (2015). *Incolor*. Obtenido de https://www.incolorec.com.ec/sitio/productos/68

(13) INTECH GmbH. (2019). *INTECH GmbH*. Obtenido de https://intech-gmbh.es/milling_plants/

(14) Intermec. (2013). Poleas en "V". Bogotá, Colombia.

(15) Maquinova. (2015). *Maquinova*. Obtenido de https://www.mezcladorasymolinos.com.mx/productos/molinos/de-cuchillas/

(16) Miranda, J. C. (16 de Enero de 2014). Obtenido de http://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2014/01/trituradoras-quijadas-i.html

(17) Nisbett, R. G. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw - Hi.

(18) Palamatic. (2019). *Palamatic Process*. Obtenido de https://www.palamaticprocess.es/equipos-industriales/desterronador-molturacion-0

(19) Real Academia Española. (2006). *Diccionario de la Lengua Española*. Madrid: Espasa Calpe.

(20) Recabarren, P. M. (Febrero de 2019). *Odepa*. Obtenido de Oficina de Estudios y Politicas Agrarias: https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/02/articulo-perdida_desperdicios.pdf

(21) Retsch. (Marzo de 2011). *Molienda y homogeneización con molinos de cuchillas*. Obtenido de http://media.firabcn.es/content/areaExpositor/S013011/1000662/featureProduct/889211/brochure_knife_mills_es.pdf

(22) Retsch. (2011). *Retsch*. Obtenido de https://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-corte/sm-100/funcionamiento-caracteristicas/

(23) Retsch. (Mayo de 2011). *Trituración con molinos de rotor*. Obtenido de https://www.incolorec.com.ec/assets/img/descargas_enlaces/581a3-brochure_rotor_mills_es.pdf

(24) Retsch. (18 de Julio de 2017). Obtenido de http://ipas.com.br/upload/products-fixa-tecnica/original/moinho-grall-mecanico-rm-200-20-07-2017-08-00-59-1996.pdf

(25) Ronco, A. M. (Junio de 2013). *DINTA.* Obtenido de http://www.dinta.cl/wp-content/uploads/2018/11/Avena.pdf

(26) Salisbury, J. K. (1952). *Mechanical engineers' handbook de Kent's , Design and Production.* London: Wiley Handbook Series.

(27) Shanghai ELE Mechanical & Electrical Equipment Co., L. (2012). *Shanghai ELE Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd.* Obtenido de https://es.made-in-china.com/co_elemix/product_Pin-Type-Grinding-Bead-Mill-for-Pigment-Ink-Carbon-Black_rhyrheuig.html

(28) SKF. (Octubre de 2015). *www.skf.com.* Obtenido de https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-10000_2-ES---Rolling-bearings_tcm_201-121486.pdf

(29) URSCHEL. (Octubre de 2013). *URSCHEL.* Obtenido de https://studylib.es/doc/6418584/haga-clic-aqu%C3%AD-para-descargar-un-pdf-imprimible

(30) WEG. (Octubre de 2017). *WEG.* Obtenido de www.weg.net

(31) Zhengzhou Guangmao Machinery Manufacturing Co., Ltd. (2011). *Alibaba*. Obtenido de https://spanish.alibaba.com/product-detail/carton-machinery-pulper-for-paper-making-production-line-high-consistency-hydrapulper-60027820189.html