

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE MARTILLOS

Iván Rafael Cuadrado Moncayo

José Luis Rueda Castillo

Tesis de grado presentada como requisito para la
Obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito

mayo de 2009

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE MARTILLOS

**Iván Rafael Cuadrado Moncayo
José Luis Rueda Castillo**

Laurent Sass, Ph.D.
Director de la Tesis

Laurent Sass, Ph.D.
Miembro del Comité

Edison Bonifaz, Ph.D.
Miembro del Comité

Fernando Romo, M.S.
Decano Colegio Politécnico

Quito, mayo de 2009

© Derechos de autor
Iván Rafael Cuadrado Moncayo
José Luis Rueda Castillo
2009

Dedicatoria,

A nuestros padres: por el inmenso apoyo brindado a lo largo de nuestra carrera, por todo su amor y enseñanzas a lo largo de todos estos años. Por habernos brindado todo su contingente moral, espiritual y económico. Por habernos impulsado día a día para ser profesionales.

A nuestros hermanos, amigos y compañeros.

Agradecimientos,

Queremos dejar grabado nuestro más grato agradecimiento a la empresa Cereales la Pradera, por habernos permitido desarrollar y aplicar este proyecto de Tesis.

De igual forma, nuestro grato reconocimiento a Laurent Sass, nuestro profesor, director de carrera, y sobre todo amigo, por su constante apoyo y guía.

RESUMEN

Debido a la falta de apoyo y malas políticas gubernamentales hacia el sector industrial alimenticio, que ha tenido el Ecuador a lo largo de la última década, muchas de las empresas se han visto en la necesidad de cerrar sus fábricas, esto debido a la falta de inversión y además por la importación de productos similares con un menor costo, provenientes principalmente de Argentina, Canadá y EEUU.

Dentro del sector alimenticio, el harinero ha sido uno de los más golpeados, debido principalmente al encarecimiento del costo final de su producto. Las empresas que han sobrevivido a la crisis, se han visto en la necesidad de volverse competitivos, cambiando sus antiguos modelos de producción y tecnologías rudimentarias en procesos más sofisticados y eficientes. Cereales La Pradera es una industria harinera ecuatoriana, que hoy en día se encuentra azotada por este fenómeno.

Esta tesis diseñará e implementará un método barato y la vez más eficiente para la producción de harina, esto se hará mediante la implementación de un molino de martillos. Este nuevo proceso, reducirá los costos y tiempos de producción, para de esta manera volverse más competitivos, acaparar un mayor segmento de mercado y, además, contribuir con el desarrollo de la industria ecuatoriana.

ABSTRACT

Due to the lack of support and the awful government politics to the alimentary industrial sector, which Ecuador has had during the last decade, many businesses have been obligated to shut down their factories. This is product of not having investment and because of the importation of similar cheaper products from other countries, mostly from Argentina, Canada and the USA.

Within the alimentary area the flour production sector has been one of the most affected ones mainly because of the increment in the price of the final product. The business that have survived this crisis, have been forced to become competitive, changing their previous ways of production and old technologies into more sophisticated and efficient methods. Cereals La Pradera is an Ecuadorian flour industry that currently is struck by this phenomenon.

The goal of thesis is to design and implement a cheaper and at the same time more efficient method for the production of flour. This will be made by implementing a hummer mill for flour. This new method will reduce costs and production time and by following this course become more competitive and gain a bigger piece of the market and contribute to the development of the Ecuadorian industry.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. JUSTIFICACION DEL PROYECTO	3
3. OBJETIVOS	4
3.1. Objetivo General	4
3.2. Objetivos Específicos	4
4. MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE HARINA	5
4.1. Antecedentes	5
4.2. El Trigo	5
4.3. El Trigo: Su Cultivo	7
4.4. El Trigo: Su Clasificación	8
4.4.1. Trigo Duro	8
4.4.2. Trigo Suave	8
4.4.3. Trigo Durum	8
4.4.4. Trigo de Invierno	8
4.4.5. Trigo de Primavera	9
4.5. El Trigo: Su Estructura	9
4.5.1. Afrecho	9
4.5.2. Endospermo o Albúmen	9
4.5.3. Embrión o Germen	9
4.6. El Trigo: Variedades y Países Productores	10
4.6.1. Trigo Nacional	10
4.6.2. Trigo de los Estados Unidos	11
4.6.2.1. <i>Trigo Duro Rojo de Invierno</i>	11
4.6.2.2. <i>Trigo Blando Rojo de Invierno</i>	11
4.6.2.3. <i>Trigo Blando Blanco</i>	11
4.6.2.4. <i>Trigo Duro Rojo de Primavera</i>	11
4.6.3. Trigos Canadienses	12
4.6.4. Trigos Argentinos	12
4.7. Harina de Trigo	13
4.7.1. El Almidón (Carbohidratos o Hidratos de Carbono)	15
4.7.2. El Gluten	15

4.8.	Harina: Clases y Tipos	15
4.8.1.	Harina Semi-Integral.....	16
4.8.2.	Harina Especial.....	16
4.8.3.	Harina Común o Flor	16
4.8.4.	Semolas o Semolinas	17
4.9.	Harina: Almacenamiento	17
5.	PROCESOS DE MOLIENDA	18
5.1.	¿Qué es un Molino?.....	18
5.2.	Tipos de Molinos	18
5.2.1.	Molino de Viento	18
5.2.2.	Molino de Rodillos	19
5.2.3.	Molino de Martillos.....	20
5.3.	Comparación entre Molinos	22
6.	CÁLCULOS Y DISEÑO DE LAS PARTES.....	29
6.1.	Capacidad de Molienda.....	29
6.2.	Diseño de los Martillos para la Trituración del Grano.....	31
6.2.1.	Cálculo de las Velocidades Tangenciales del Martillo	33
6.2.2.	Radio de Giro.....	36
6.2.3.	Falla por Desgarramiento	47
6.2.4.	Falla por Tracción	49
6.3.	Diseño del Disco Porta Martillos	51
6.4.	Diseño del Separador de Martillos	54
6.5.	Diseño del Perno del Martillo.	56
6.6.	Diseño, Simulación en Elementos Finitos del Eje Principal del Molino	60
6.7.	Diseño del Separador de Discos.....	61
6.8.	Masa de Todos los Componentes Interiores del Molino.....	62
6.9.	Masa de los Componentes Internos y Externos del Molino.....	66
6.10.	Cálculo de la Inercia del Molino	67
6.11.	Determinación de la Potencia del Motor	69
6.11.1.	Torque del Motor	70
6.12.	Selección de Rodamientos	71
6.13.	Número de Bandas.....	74
6.14.	Dimensión de Poleas	76
6.15.	Componentes Extras	76

6.15.1. Base del Molino	76
6.15.2. Paredes del Molino	77
7. CONSTRUCCIÓN DEL MOLINO	79
7.1. Antecedentes.....	79
7.2. Construcción y Ensamblaje de las Piezas	79
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
8.1. Conclusiones.....	91
8.2. Recomendaciones.....	92
9. MATERIAL DE REFERENCIA	94
9.1. Bibliografía	94
Anexos.....	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Molino de Viento	19
Ilustración 2: Molino de Martillos	21
Ilustración 3: Interior del Molino de Martillos	21
Ilustración 4: Tolva de Almacenamiento de Grano.....	22
Ilustración 5: Caja Térmica.....	23
Ilustración 6: Rodillos	24
Ilustración 7: Banda Transportadora	24
Ilustración 8: Ingreso del Producto hacia la Primera Cámara	26
Ilustración 9: Martillos de la Primera Cámara.....	26
Ilustración 10: Segunda Cámara y Tamiz	27
Ilustración 11: Molino Completo	27
Ilustración 12: Ubicación de los Martillos y Discos	31
Ilustración 13: Impacto Grano – Martillo.....	32
Ilustración 14: Radio de Giro del Martillo.....	36
Ilustración 15: Esfuerzos de Contacto, Martillo-Grano, Grano-Pared.....	39
Ilustración 16: Aplicación de la Fuerza de Corte	40
Ilustración 17: Centro de Gravedad, Largo del Martillo y Fuerza de Corte.....	41
Ilustración 18: Relación Geométrica entre el Martillo y el Disco.....	43
Ilustración 19: Posición de los Martillos en Reposo	43
Ilustración 20: Desgaste y cambio de lado del Martillo.....	44
Ilustración 21: Posición de los agujeros en el Martillo	44
Ilustración 22: Longitud del Martillo	45
Ilustración 23: Por Desgarramiento	47
Ilustración 24: Forma de los Martillos.....	50
Ilustración 25: Configuración del Disco y los Martillos.....	54
Ilustración 26: Dimensiones de la Arandela Separadora de Martillos	55
Ilustración 27: Posición final de la Arandela de Separación.....	55
Ilustración 28: Gráfica del Perno con sus Fuerzas	56
Ilustración 29: Diagrama de Corte del Perno.....	57
Ilustración 30: Diagrama de Momento del Perno	58

Ilustración 31: Simulación en CATIA del eje principal	60
Ilustración 32: Detalle de la Tabla de Resultados de la Simulación	61
Ilustración 33: Gráfica del Separador de Discos	62
Ilustración 34: Gráfica de las Partes del Molino	65
Ilustración 35: Configuración del Disco equivalente a la Masa del Molino	68
Ilustración 36: Carga sobre Rodamientos	73
Ilustración 37: Dimensiones del Rodamiento	73
Ilustración 38: Vista Interna del Rodamiento	74
Ilustración 39: Base de Molino	77
Ilustración 40: Martillo Maquinado	79
Ilustración 41: Disco Maquinado	80
Ilustración 42: Perno porta Martillos Maquinado	81
Ilustración 43: Eje Maquinado	81
Ilustración 44: Rosca, Chavetero y Chaveta del Eje	82
Ilustración 45: Arandela Maquinada	82
Ilustración 46: Separador de Discos Maquinado	83
Ilustración 47: Tuerca del Eje Maquinada	83
Ilustración 48: Ensamblaje de las Masas.	84
Ilustración 49: Masas Ensambladas	84
Ilustración 50: Corte de las Paredes con Oxicorte	85
Ilustración 51: Paredes Pulidas	85
Ilustración 52: Ensamble de las Paredes	86
Ilustración 53: Soldada de la Platinas con Electrodo X99	87
Ilustración 54: Paredes Ensambladas	87
Ilustración 55: Base del Molino	88
Ilustración 56: Cámara de Pintura Electrostática	88
Ilustración 57: Chumacera SKF	89
Ilustración 58: Matrimonio para Unión de Ejes	89
Ilustración 59: Eje del Motor y del Molino, unidos mediante Matrimonio	90
Ilustración 60: Poleas y Bandas del Molino	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Composición Química de los Cereales.....	6
Tabla 2: Composición Química del Trigo	10
Tabla 3: Siembras y Cosechas de Trigo en Algunos Países del Mundo	13
Tabla 4: Comparación de Proteínas y Calorías de algunos Productos	14
Tabla 5: Masa Total de los Componentes Internos del Molino.....	66
Tabla 6: Masa Total de Molino con Todos sus Componentes.....	66
Tabla 7: Masa de un Eje con sus Componentes.....	72
Tabla 8: Diámetro de la Polea.....	76

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Energía Potencial	33
Ecuación 2: Energía Cinética	34
Ecuación 3: Velocidad Tangencial del extremo del Martillo	34
Ecuación 4: Coeficiente de Fluctuación	35
Ecuación 5: Velocidad Tangencial Media.....	35
Ecuación 6: Velocidad Tangencial Final.....	35
Ecuación 7: Velocidad Angular Final.....	36
Ecuación 8: Velocidad Angular.....	37
Ecuación 9: Radio de Giro.....	37
Ecuación 10: Movimiento Angular Desacelerado.....	39
Ecuación 11: Aceleración Angular.....	39
Ecuación 12: Momento de la Fuerza de Corte	41
Ecuación 13: Momento de Inercia del Martillo.....	41
Ecuación 14: Momento que produce la Fuerza de Corte	42
Ecuación 15: Fuerza de Corte.....	42
Ecuación 16: Masa de los Martillos	42
Ecuación 17: Peso del Martillo	46
Ecuación 18: Peso del Martillo	46
Ecuación 19: Área de Desgarre	47
Ecuación 20: Esfuerzo Cortante.....	48
Ecuación 21: Fuerza Centrífuga.....	48
Ecuación 22: Factor de Seguridad	49
Ecuación 23: Esfuerzo Normal.....	49
Ecuación 24: Factor de Seguridad para Esfuerzo Normal	50
Ecuación 25: Espesor del Disco.....	52
Ecuación 26: Fórmula de Navier	58
Ecuación 27: Inercia del Disco	68
Ecuación 28: Ecuación de Rittinger.....	69
Ecuación 29: Torque del Motor	70
Ecuación 30: Clasificación de Catálogo	71

Ecuación 31: Potencia de Diseño.....	74
Ecuación 32: Número de Bandas.....	75

1. INTRODUCCION

La Industria Harinera ecuatoriana ha experimentado una producción deficiente a lo largo de la última década. Esto, en parte, debido a las incorrectas políticas de estado, como la no protección del producto nacional y a la falta de inversión en este sector. Esto ha ocasionado que la pequeña y mediana empresa se debilite por su caída en la producción, dando como resultado que muchas de estas tengan que cerrar.

Por las razones antes mencionadas, las empresas existentes se han visto obligadas a someterse a cambios en su producción, con la finalidad de alcanzar niveles altos de competitividad y de esta manera poder sobrevivir en el mercado nacional. La empresa Cereales la Pradera, se ha visto obligada a realizar una reestructuración en su forma de producción, mediante la implementación de un molino de martillos, que optimice el tiempo de producción, aumente la capacidad de molienda y que se rijan a estándares de calidad alimenticia internacionales.

Esta tesis tiene por objetivo implementar un nuevo sistema de producción de harina, el cual será más versátil y barato, con lo que se pretende reducir los tiempos y maximizar el volumen de producción que actualmente posee la empresa.

El modelo de molino que requiere en estos momentos la empresa, será escogido de varias opciones existentes en el mercado. La elección se

basará tomando en cuenta capacidad de molienda, tiempos de producción, espacio físico y costos.

2. JUSTIFICACION DEL PROYECTO

Dada la situación actual por la que atraviesan muchas de las industrias ecuatorianas como la alimenticia, la textil, la agropecuaria entre otras, donde la evidente falta de inversión ha hecho que la forma de producción, en muchos de los casos sea obsoleta y rudimentaria, ha hecho que los empresarios vean la necesidad de invertir en procesos más sofisticados, así como también en nueva maquinaria.

La realización de este proyecto se justifica primero desde el punto de vista ingenieril, ya que en el diseño y construcción del molino se requerirán criterios y parámetros de diseño importantes y necesarios para el óptimo funcionamiento, y segundo, porque una de las maneras de mejorar la producción y aumentar la competitividad de las empresas, no solo nacionales es el de reemplazar los antiguos procesos artesanales de producción por procesos más sofisticados.

Por lo antes mencionado la importancia de este proyecto es alta, ya que por un lado se reafirmarán y se aplicarán los conocimientos adquiridos dentro la carrera y por otro lado, la empresa contará con un molino que optimizará el proceso de hacer harina, reduciendo los costos y tiempos de producción.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

- El objetivo general del proyecto es el diseño y construcción de un molino, que nos permita optimizar la producción de harina a través de distintas herramientas que nos ofrece la Ingeniería Mecánica. Con ello se busca disminuir los costos de producción, obtener mayor rentabilidad, para de esta forma alcanzar mayores niveles de competitividad dentro del mercado.

3.2. Objetivos Específicos

- Escoger un proceso adecuado de molienda, para mejorar la producción de harina, así como también, los espacios dentro de la empresa.
- Diseñar del molino escogido con todos sus componentes
- Construir el molino.

4. MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE HARINA

4.1. Antecedentes

En este capítulo se abordará todo lo concerniente al trigo. Comenzando desde sus orígenes, se pasará por su cultivo, clases de trigo, su estructura, variedades, hasta terminar con la harina y su almacenamiento. Ya que el tema central de esta tesis es el diseño y construcción de un molino para la producción de harina de trigo, se ha creído necesario hacer un aporte no solo a estudiantes de Ingeniería Mecánica, sino también, a otras carreras como: Ingeniería en Alimentos, Gastronomía, entre otras.

Toda la información del presente capítulo, es un resumen obtenido del libro: Tecnología y Producción de Harina de Trigo. (Ver Bibliografía)

4.2. El Trigo

El trigo es un fruto farináceo, perteneciente a la familia de las "gramíneas" que se cultiva para obtener alimento humano por su alto contenido de carbohidratos y proteínas. Los estudios realizados sobre la humanidad dieron como resultado un común denominador; que la base de la dieta de todos los pueblos y razas tanto prehistóricas como contemporáneas, fue de una u otra forma los cereales y en especial el trigo.

Entre los cereales más importantes del mundo, desde el punto de vista de su producción, utilidad y propiedades alimenticias están: el trigo, el arroz, el maíz, la cebada, la avena. En la tabla 1, se puede observar algunas de las características más importantes de los cereales antes mencionados.

Producto	Humedad %	Proteínas %	Carbohidratos %	Grasa %	Fibra %	Materia Mineral
Trigo	12.5	12.0	68.0	1.8	2.2	1.7
Arroz	11.4	8.3	64.7	1.8	8.8	5.0
Maíz	13.0	9.9	69.2	4.4	2.2	1.3
Cebada	14.5	10.0	66.5	1.5	4.5	2.6
Avena	13.5	10.3	58.2	4.8	10.3	3.1

Tabla 1: Composición Química de los Cereales

Nota: Los porcentajes indicados han sido tomados en promedio.

La harina de trigo contiene del 8 al 13% de proteínas, estas proteínas mezcladas con el agua son las responsables de formar el gluten, que a postre será el armazón, la base y la sustentación del pan. Es por eso que los cereales con un bajo contenido de proteínas, producen un gluten deficiente en propiedades, por lo que no será satisfactorio para la elaboración del pan.

El Trigo: Sus Orígenes

El trigo es tan antiguo como la naturaleza misma. La historia no puede precisar el origen geográfico, histórico, o biológico del trigo. Sin embargo, todo parece indicar a la Mesopotamia como la región de procedencia: en los fértiles valles del Tigris y el Eufrates, el trigo crecía en estado silvestre y se propagó por ambos márgenes del Nilo, donde las primitivas poblaciones se aprovechaban de las naturales cosechas que este prodigioso río les dejaba después de sus periódicos y estacionales desbordamientos. También se menciona a las

habitaciones lacustres de Suiza como fuente originaria de este cereal. Se poseen antecedentes de que el trigo ya se cultivaba en la China unos 5000 años A.C, así como en Egipto y Palestina.

El Trigo es el más importante de los cereales, que comparado con el arroz, el maíz, la cebada, el centeno y la avena, es el que más nutrientes provee al hombre en el mundo.

4.3. El Trigo: Su Cultivo

El trigo como ya dijimos anteriormente, pertenece a la familia de las “gramíneas” y su denominación científica es “triticum vulgare”, existiendo más de 1600 variedades en el mundo.

El trigo crece en casi toda tierra arable, desde el nivel del mar hasta elevaciones de más de 3000 metros de altura, donde haya suficientes precipitaciones de agua y en regiones secas con riego controlado; esta flexibilidad permite su cultivo en diferentes climas, elevaciones y suelos. Los mejores trigos de variedades más duras se dan en áreas templadas frías de mayores elevaciones. Su calidad dependerá siempre del clima, luego de la clase de suelo y de las técnicas empleadas en su cultivo.

La evolución vegetativa completa de la planta de trigo, desde que se siembra la semilla hasta su maduración o cosecha (trilla), se divide en cinco etapas perfectamente delimitadas y distintas:

1.- Germinación.

2.- Foliación.

3.- Macollaje.

4.- Floración.

5.-Fructificación.

Este ciclo vegetativo de la planta dura de 90 días en zonas tropicales hasta 180 días en zonas templadas, como en nuestra sierra o el Norte de EEUU. La calidad del trigo, que se revertirá en la calidad de la harina, dependerá de varios factores como: la semilla, el suelo y su fertilización, el clima, y el manejo y almacenamiento del grano.

4.4. El Trigo: Su Clasificación

Según los factores antes señalados el trigo se divide en:

4.4.1. Trigo Duro

Este trigo tiene granos que son duros, fuertes y difíciles de partir. Este tipo de trigo produce la mejor harina para la producción de pan.

4.4.2. Trigo Suave

Este trigo tiene granos relativamente más blandos y produce una harina suave (floja), que es muy buena para bizcochos, cakes, y galletas.

4.4.3. Trigo Durum

Las semolinas extraídas de este trigo son muy duras y se emplea exclusivamente para la fabricación de pastas (fideos).

Según el tiempo en que crece el trigo se divide en:

4.4.4. Trigo de Invierno

Este trigo se siembra antes de comenzar el invierno y, durante este tiempo, permanece en estado durmiente, para ser cosechado al comienzo del verano.

4.4.5. Trigo de Primavera

Este trigo se siembra al comienzo de la primavera y se lo cosecha al final del verano.

Nota: Según los grupos botánicos, el trigo tiene innumerables clasificaciones que no son de interés en este momento.

4.5. El Trigo: Su Estructura

El grano de trigo puede considerarse formado por tres partes bien definidas:

4.5.1. Afrecho

Es la cáscara o cubierta protectora del grano.

4.5.2. Endospermo o Albúmen

Conocido comúnmente por harina, son pequeñas células poliédricas de paredes sutiles y transparentes, llenas de gránulos de almidón, contorneadas de materia proteicas (gluten).

4.5.3. Embrión o Germen

Es el órgano reproductor del grano, es la parte que contiene en proporción la mayor cantidad de elementos nutritivos, tales como: proteínas, grasa, minerales, vitaminas.

La composición media del grano de trigo, dependiendo de las características inherentes son las siguientes:

Afrecho..... 14%.

Endospermo..... 84%.

Germen.....2%.

En la tabla 2, se muestra la composición química de un grano de trigo.

<i>*Humedad</i>	de 8% a 17%
<i>Almidón</i>	de 63% a 71%
<i>Proteína</i>	de 8% a 15%
<i>Celulosa</i>	de 2% a 2.5%
<i>Grasa</i>	de 1.5% a 2%
<i>Azúcares</i>	de 2% a 3%
<i>Materia Mineral</i>	de 1.5% a 2%

Tabla 2: Composición Química del Trigo

**La Humedad*, es la cantidad de agua existente en cada grano de trigo.

4.6. El Trigo: Variedades y Países Productores

Mencionaremos las variedades de trigos que son los más consumidos en América Latina y en especial los que son más procesados en Ecuador.

4.6.1. Trigo Nacional

Existen diferentes variedades y por consiguiente cualidades distintas, dependiendo de las zonas cultivadas. Generalmente son trigos de características blandas, con relativo contenido de gluten y su harina se presta para la fabricación de galletas, pasteles, biscochos. Así mismo son indicados para mezclas con trigos fuertes. Se cultivan especialmente en la Sierra y la Costa tomando los nombres de "Crespo", "Antisana", "Chimborazo", "Atacazo", entre otros.

4.6.2. Trigo de los Estados Unidos

Los principales países productores de trigo y que exportan hacia otros, deficitarios de este cereal como el nuestro son: Australia, Estados Unidos, Argentina, Canadá. Este último produce el trigo Manitoba, que por su alta calidad del gluten es muy apetecido por la rama panificadora.

Nuestro país cubre sus necesidades internas con la importación del trigo desde Estados Unidos y cuya clasificación es:

4.6.2.1. *Trigo Duro Rojo de Invierno*

Estos trigos crecen principalmente en los Estados de las grandes llanuras como Kansas, llamado "El Granero del Mundo" y constituyen la mayoría de los trigos producidos en los EEUU. Cubriendo un 60% de las exportaciones. Son magníficos para la panificación.

4.6.2.2. *Trigo Blando Rojo de Invierno*

Este trigo crece principalmente por debajo de los grandes lagos. Sus harinas son de baja proteína, gluten débil y no hacen buen pan; pero son aptos para pasteles.

4.6.2.3. *Trigo Blando Blanco*

Se producen en los grandes lagos, en el noreste y noroeste de los EEUU, son más blandos y más bajos que los anteriores. Hacen un muy mal pan; pero, son excelentes para galletas y pasteles.

4.6.2.4. *Trigo Duro Rojo de Primavera*

Estos trigos crecen en los estados más al norte de las Grandes Llanuras, como Dakota del Norte. Representan el 15% de toda la

producción y el 9% de las exportaciones. Sus harinas son de alta proteína y un gluten fuerte; por lo cual, son muy apropiadas para el pan francés, para el pan de molde y para el pan fino de levadura.

4.6.3. Trigos Canadienses

Son de gran demanda en el mercado internacional. Se justifican por su alta capacidad correctiva que se demuestra por su elevado contenido de gluten. Son homogéneos de muy buen rendimiento y el aspecto de la harina es cremoso.

4.6.4. Trigos Argentinos

Existen tres tipos: duro, semiduro y blando. Son trigos de aceptable calidad para la fabricación de pan, galletas, tortas, etc. Se pueden emplear en forma independiente o hacer mezcla entre ellos. Se les conoce con los nombres de Rosafe, Baruso, Baril.

En la tabla 3, se muestra los meses de siembra y cosecha del trigo en los diferentes países.

<i>Países</i>	<i>Siembras-Verano</i>	<i>Siembras-Invierno</i>	<i>Cosechas</i>
Argentina	-----	Mayo-Junio	Diciembre
Brasil	-----	Junio-Julio	Noviembre-Diciembre
Chile	-----	Junio-Julio	Diciembre-Enero
México	Mayo	Octubre-Diciembre	Abril-Mayo
Canadá	Marzo-Mayo	Septiembre-Octubre	Julio-Septiembre
EEUU	Marzo-Mayo	Agosto-Septiembre	Mayo-Agosto
España	-----	Octubre-Noviembre	Mayo-Julio
Portugal	-----	Octubre-Noviembre	Mayo-Julio

Francia	Marzo-Abril	Octubre-Noviembre	Junio-Agosto
Italia	-----	Septiembre- Noviembre	Junio-Julio
Alemania	Marzo-Abril	Septiembre-Octubre	Julio-Agosto
Polonia	Marzo-Junio	Septiembre-Octubre	Junio-Agosto
Turquía	-----	Octubre-Noviembre	Mayo-Junio
Rusia	Marzo-Abril	Agosto-Noviembre	Junio-Septiembre
Austria	-----	Mayo-Julio	Noviembre-Diciembre
Escandinavia	Mayo-Junio	Septiembre- Diciembre	Julio-Septiembre
Egipto	-----	Noviembre-Diciembre	Abril-Mayo
Ecuador	-----	Septiembre- Noviembre	Febrero-Mayo
Australia	-----	Abril-Julio	Noviembre-Enero

Tabla 3: Siembras y Cosechas de Trigo en Algunos Países del Mundo

4.7. Harina de Trigo

En el largo y complejo proceso de la molienda, obtenemos como resultado final un polvo fino, blanco, con características propias, que después de ser mezclado con otros ingredientes, tales como: agua, sal, azúcar, levadura, leche, huevos, etc, y sometido a un proceso de fermentación y cocción en un caso, nos proporciona un producto comestible, denominado “Pan”, Galletas, Pasteles, Biscochos o Fideos en otro caso.

Esta harina, por ser procedente del trigo, es la única que tiene las características esenciales del “gluten”, que forma la estructura del pan. La técnica molinera consiste en extraer el máximo de harina del “endospermo” en sus diferentes pasajes, sin dañar ni perjudicar la calidad requerida por el panadero.

Subsidiariamente de la molienda, se sacarán los subproductos, afrecho, afrechillo, germen, etc., los cuales tienen un valor comercial como alimento animal. Todo el producto en las diferentes etapas es trasladado mediante sistemas mecánicos o neumáticos, por lo que la mano del hombre no entra en contacto con el producto.

Como ya hemos visto anteriormente, las cualidades físico-químico del trigo se revierten a la harina y esta al pan. En la tabla 4, se muestra las proteínas y calorías de algunos productos, entre ellos el pan.

<i>Producto - 1 Kg</i>	<i>Calorías</i>	<i>Proteínas (gr)</i>	<i>Carbohidratos</i>
Plátano	596	7	153
Carne de Ternera	1900	305	---
Pastas Cocidas	1480	50	300
Papas	900	30	212
Arroz Cocido	1190	25	250
<u><i>Pan</i></u>	<u><i>2896</i></u>	<u><i>91</i></u>	<u><i>552</i></u>
Azúcar	3750	---	1000
Maíz Cocido	500	21	120

Tabla 4: Comparación de Proteínas y Calorías de algunos Productos

Los principales componentes de la harina son los carbohidratos (almidón) y las proteínas (gluten). Estos componentes constituyen el fundamento mismo de la planificación y son los siguientes:

4.7.1. El Almidón (Carbohidratos o Hidratos de Carbono)

El almidón es una sustancia hidrocarbonada que se encuentra en muchos vegetales, formando constituyentes de las células de los tubérculos, bulbos, raíces, semillas, tallos, frutos, etc. Según del vegetal que provenga se lo denomina como: fécula, sagú, tapioca, salep, etc.

4.7.2. El Gluten

El gluten es una sustancia albuminosa, viscosa, amarillenta y elástica cuando está húmeda, insoluble en el agua, que, mezclada con el almidón y otros compuestos, se encuentra en la harina de trigo. El gluten está compuesto de dos proteínas principales que son: gliadina y gluteína.

4.8. Harina: Clases y Tipos

Al tratar de la estructura del grano de trigo, pudimos ver que la harina extraída del endospermo del grano y, por lo tanto, las cualidades físico – químicas del trigo se revertían a la harina.

Así pues, las harinas igual que el trigo, se dividen en dos grande grupos que son:

- *Fuertes o duras.*
- *Blandas o suaves.*

De estos dos grupos deduciremos otras clasificaciones que se relacionan con el tipo de harina que necesitemos en el campo industrial. Su clasificación es la siguiente:

- Para la elaboración de pan y otros productos de panadería.
- Para la elaboración de fideos espaguetis.
- Para la elaboración de bizcochos y galletas.
- Para la elaboración de tortas, cakes, otros en dulcería.
- Para la elaboración de obleas, barquillos y moldes.
- Para la elaboración de almidón, gluten, engrudos, etc.
- Para uso casero (harinas leudantes).

Dentro de la clasificación de harinas para *pan*, tendremos también que subdividir las en cinco clases que son:

4.8.1. Harina Semi-Integral

Esta harina se la obtiene de la mezcla de harina con afrecho o afrechillo, las proporciones dependen del producto final deseado.

4.8.2. Harina Especial

Esta harina es la obtenida en determinados pasajes de la molienda, se caracteriza por el bajo contenido de ceniza (blanca), gluten fuerte y excelente absorción.

4.8.3. Harina Común o Flor

Esta harina es la obtenida de todos los pasajes de la molienda. Es el íntegro del trigo, después de la separación del afrecho, afrechillo, sema (granillo) y germen.

4.8.4. Semolas o Semolinas

Se le denomina a los gránulos de endospermo (harina), adheridas a la capa aleurona (capa interna del grano de trigo). Es decir, expresado en forma sencilla, son partículas de almidón y gluten pegadas a la parte interna inmediatamente después de la cascara externa del grano.

4.9. Harina: Almacenamiento

La harina por ser un producto higroscópico se debe almacenar y conservar con el máximo de exigencias. De no hacerlo, el producto final (es decir el PAN) pagará las consecuencias. Para un buen almacenamiento se presenta las siguientes indicaciones:

- a) Dar a la harina el suficiente reposo para que el gluten se reponga del trato recibido en la molienda y manipuleo.
- b) Colocarla en un lugar seco, ventilado, limpio, lejos del horno y las cámaras de fermentación.
- c) Mantener los pisos y paredes libres de insectos para eliminar contaminaciones bacteriológicas e infestaciones.
- d) Los sacos deben estar alejados de las paredes para controlar la limpieza y humedad.
- e) Usar planchadas o estibas de madera sobre el piso.
- f) Alejar de fuertes olores o componentes químicos, como kerex, gasolina, etc.
- g) No arrumar demasiados sacos unos sobre otros (rumas de 5 o 6 sacos).
- h) Ventilar la harina antes de procesarla y cernirla.

5. PROCESOS DE MOLIENDA

5.1. ¿Qué es un Molino?

Según la definición del diccionario de la Real Academia de la Lengua, un molino es “una máquina o artefacto que sirve para moler granos por medio de cierta fuerza producida por el viento, hombre o animales. Entre sus utilidades está no solo la de molienda de granos, sino la de mover agua y producir electricidad, entre las más importantes”.

5.2. Tipos de Molinos

En la actualidad existen varias clases de molinos, muchos de ellos hasta ahora se los utiliza a pesar de tener algunos siglos de invento.

Entre los principales molinos que se utilizan hoy en día están:

5.2.1. Molino de Viento

El molino movido por el viento tiene orígenes muy antiguos. Se dice que ya en el siglo XII de la era cristiana se encontraban algunos de estos en las ciudades persas. La particularidad de este molino radicaba en que la rueda que sujetaba las aspas era horizontal y estaba soportada sobre un eje vertical.

Cinco siglos después, aparecen los primeros molinos en Europa (Francia e Inglaterra), pero con ciertas particularidades. Este nuevo tipo de molino de viento consistía en una torre, generalmente de piedra, coronada por una estructura rotativa de madera que soportaba el eje del molino y la maquinaria superior del mismo.

El principio básico del molino de viento es el de transformar el viento en energía útil o aprovechable. Este tipo de molino posee aspas oblicuas (generalmente de entre 3 y 9 metros de longitud), que están unidas a

un eje común, la fuerza del viento hace que dichas aspas giren a cierta velocidad produciendo energía. El eje común se conecta a ciertos sistemas de engranajes y estos a su vez a unas piedras, que son los encargados de triturar los diferentes granos.

El texto y la figura ha sido obtenida de la página:

<http://olmo.pntic.mec.es/~jpgag0004/resena.htm#arriba>.



Ilustración 1: Molino de Viento

5.2.2. Molino de Rodillos

El molino de rodillos es uno de los más usados en la actualidad. Su sistema esta formado por dos rodillos, generalmente construidos de de hierro fundido o de acero colado. Los rodillos tienen las superficies estriadas, giran en sentido contrario el uno del otro a velocidades reducidas.

Los rodillos son regulables a precisión, con esto poco a poco se reduce la separación entre los rodillos para de esta manera ir reducción el

tamaño del grano. Todo el proceso de molienda consiste en hacer pasar el grano a través de una serie de molinos en sucesión. Generalmente esta sucesión esta formada por 10 molinos. El producto de cada fase es pasado por tamices de diferentes diámetros hasta llegar a la granulometría de la harina que es de 0.05 mm.

El texto anteriormente descrito, es un resumen de la página:

<http://www.quiminet.com/pr8/Martillo%2Bde%2BReflejos.htm>.

5.2.3. Molino de Martillos

El primer molino de martillos se desarrolló a partir de la machacada a mano. Este constaba de un mortero que presionaba el grano sobre una superficie que generalmente era una piedra. Con el pasar del tiempo el mortero se lo cambio por un martillo más pesado. En la actualidad los molinos de martillo, han remplazado el martillo de madera por una serie de martillos de metal, ubicados horizontalmente sobre un eje que rota.

La fractura del maíz no se produce por frotamiento, sino por el choque y corte entre los martillos y los granos enteros o trozos de ellos. El grano de maíz absorbe la energía potencial del martillo en la caída, dicha energía es la necesaria para triturar el grano. El material molido sale a través de orificios ubicados abajo del molino.

Las ilustraciones 2 y 3, han sido tomadas de la siguiente página:

www.fam.de/generator/streamjpeg.php?res=flwid.

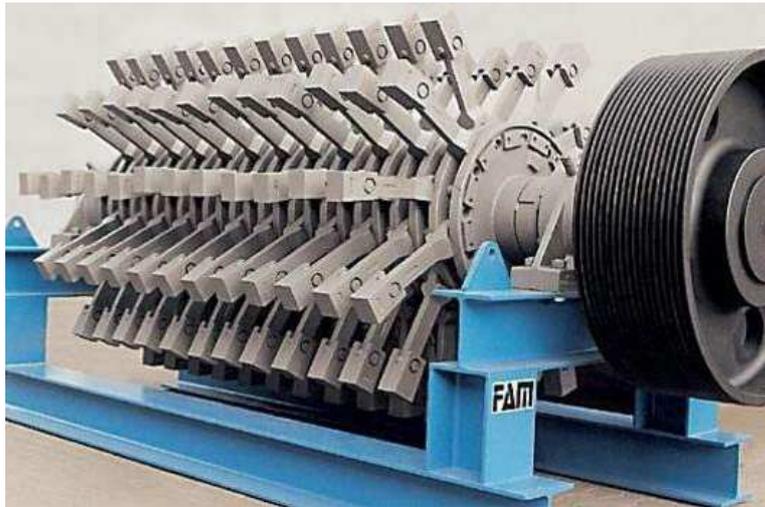


Ilustración 2: Molino de Martillos

En la ilustración 2, se muestra un prototipo de molino de martillos para triturar piedras. Este modelo posee martillos fijados a los discos, existen molinos que poseen los martillos de diferente geometría, esto depende del uso. Estos martillos pueden estar fijados al disco (soldado o empernado), o con cierta movilidad, para que en reposo se encuentren en posición vertical.

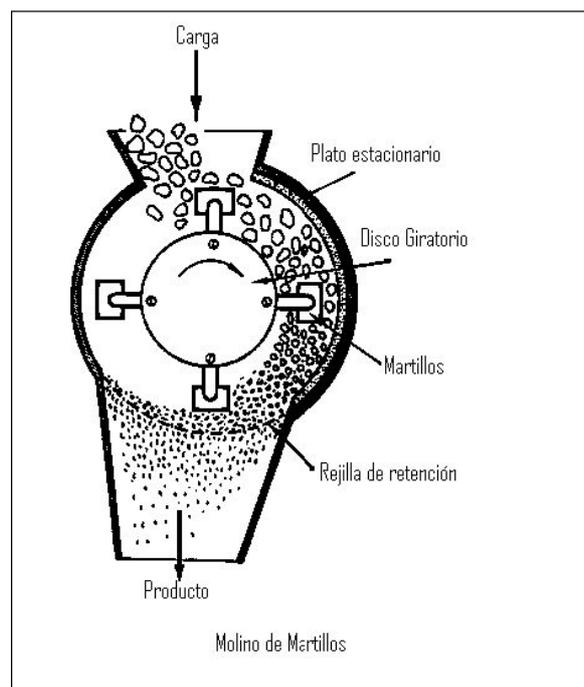


Ilustración 3: Interior del Molino de Martillos

5.3. Comparación entre Molinos

En esta sección haremos una pequeña comparación entre el antiguo proceso de molienda de la empresa “Cereales la Pradera” (Molino de Rodillos), y el nuevo proceso que se propone, que es el Molino de Martillos.

Actualmente la fábrica cuenta con un solo proceso para la producción de harina (que a parte de obsoleto es muy grande), el cual consta de varias etapas detalladas a continuación:

- La primera fase para la producción de harina comienza con la molienda del grano por medio de un molino de rodillos.
- Después de ser triturado el grano, es puesto en un tanque de agua por al menos 4 horas para suavizarlo y mejorar su pre-cocción.
- El grano remojado es puesto en una tolva, como se muestra en la ilustración 4.



Ilustración 4: Tolva de Almacenamiento de Grano

- De la tolva pasa a una caja térmicamente aislada por donde el producto avanza aproximadamente 3 metros en 45 minutos. Mientras el grano avanza por medio de un tornillo sin fin, un caldero transfiere vapor por medio de unos agujeros en el interior de la caja produciendo la pre – cocción del producto, como se muestra en la ilustración 5.



Ilustración 5: Caja Térmica

- Después, el grano avanza hacia la primera sección de rodillos separados entre si 2mm, después de esta primera pasada, el producto aplastado es transportado por medio de una banda transportadora hacia la segunda sección de rodillos, esta vez la separación entre si es de 1mm, y por último mediante otra banda transportadora el producto llega hacia la última sección de rodillos donde termina hecho harina, como se muestra en la ilustración 6.



Ilustración 6: Rodillos



Ilustración 7: Banda Transportadora

Como nos damos cuenta, es un proceso largo que requiere por lo menos de cuatro moliendas por medio de rodillos antes de tener la harina. Adicionalmente, este tipo de molino es demasiado grande (por todos los componentes que posee, rodillos, bandas transportadoras,

tornillo sin fin), por lo que este proceso ocupa un área considerable dentro de la empresa. Aproximadamente para la instalación de este tipo de molinos, sin la etapa de pre cocción, se necesita un área de 10m², que es el espacio que ocupan las 3 secciones de rodillos de trituración y bandas de transportación del producto.

Por otro lado, los materiales con los que fue construido el molino de rodillos no son los adecuados según las normas vigentes en las industrias de alimentos.

La propuesta de esta tesis es de diseñar y construir un Molino de Martillos. Este molino solo reemplazará la parte de la molienda del grano, no su pre cocción. Su funcionamiento lo detallamos a continuación:

- La producción comienza en el momento en el que el grano entero, limpio y sin cascara, es puesto en la tolva, De la tolva, pasa a una primera cámara, por medio de una abertura, como se muestra en la ilustración 8.



Ilustración 8: Ingreso del Producto hacia la Primera Cámara

- En el interior de la cámara, el grano se parte por medio del contacto con los martillos, además, cuando el grano disparado de los martillos hacia las paredes del molino, se produce esfuerzos de contacto, que es lo que también ayuda a la trituración del grano, como se muestra en la ilustración 9.

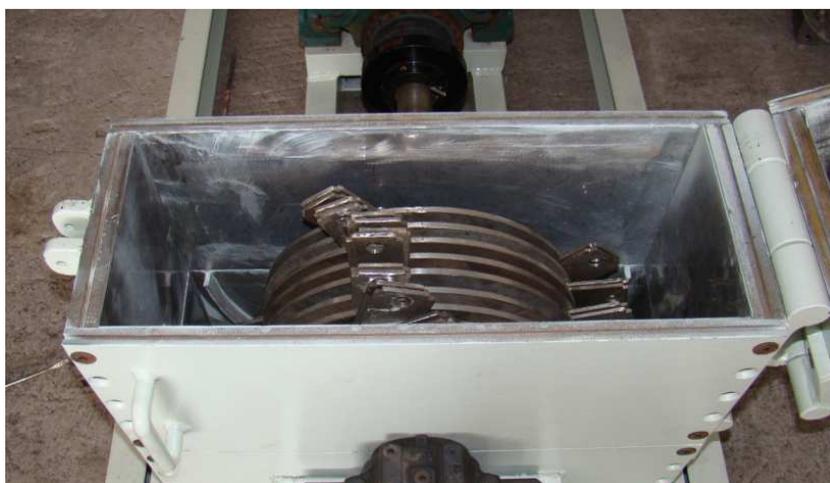


Ilustración 9: Martillos de la Primera Cámara

- Después de esta primera molienda, el grano partido cae a un tamiz de 1mm de espesor (el grano superior a este diámetro sigue en la cámara moliéndose hasta que pueda pasar por el tamiz).
- A continuación, el grano de la primera cámara que ha pasado por el primer tamiz, pasa a la segunda cámara, como se muestra en la ilustración 10, en donde se encuentra el segundo set de martillos, para hacer que el grano termine completamente pulverizado y hecho harina. El grano pulverizado pasa por un tamiz de 0.05mm (que es el diámetro requerido para la harina).



Ilustración 10: Segunda Cámara y Tamiz

- Una vez que el trigo se encuentra hecho harina en la parte inferior del molino, es aspirado a una segunda tolva para su posterior almacenamiento en sacos.

La ilustración 11, muestra la configuración completa del molino de martillos.



Ilustración 11: Molino Completo

- Generalmente, los molinos de martillos poseen una sola cámara de trituración, el que se ha diseñado constará de dos. La razón principal es que por medio de las dos cámaras se reducirá el tiempo de producción de la harina.

Al ser más rápido que el anterior (molino de rodillos), además de optimizar tiempo, se reduce gastos como el de energía eléctrica, etc., que a la postre hará que el molino sea más competitivo.

Cabe recalcar que, el espacio requerido para la implementación del molino de martillos es inferior al de rodillos. Aproximadamente para la implementación de este molino se requiere $2m^2$, lo que hace también que se optimice el espacio dentro de la empresa.

Debido a lo antes mencionado, se escogió el molino de martillos, como el necesario para implementarlo en la empresa Cereales la Pradera. En los siguientes capítulos se diseñará el molino con todos sus componentes.

6. CÁLCULOS Y DISEÑO DE LAS PARTES

6.1. Capacidad de Molienda

La capacidad de molienda es el primer parámetro que se requiere para el diseño del Molino. Este valor (determinado por el Gerente de Producción de la empresa “Cereales la Pradera”), es de 1000 Kg por hora, es decir, se necesita moler 22 quintales por hora para cumplir la demanda que tiene en la actualidad la empresa.

Si se parte de la siguiente conversión de unidades, se puede obtener aproximadamente cuantos granos se deberán triturar por minuto para cumplir la capacidad requerida de molienda.

Si se tiene:

$$1000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ grano}}{0.08 \text{ g}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 2.0833 \times 10^5 \frac{\text{granos}}{\text{min}}$$

Como se puede apreciar, la cifra obtenida anteriormente es muy alta. Considerando que el valor recomendado para la velocidad angular de un molino de martillos (especificaciones y recomendaciones de productores americanos y brasileños), oscila entre las 3000 y 3500 [r.p.m], y no se quiere trabajar al límite de revoluciones, además de que el trabajo del motor será continuo, se ha escogido el valor intermedio de 3250 [r.p.m]. Con este valor se puede realizar la siguiente operación.

Si se divide el número de granos por minuto que se necesita triturar, para las 3250 [r.p.m] escogidas, se obtiene aproximadamente el número de granos que se deberán partir por cada revolución del eje del motor, es decir:

$$\frac{2.0833 \times 10^5 \frac{\text{granos}}{\text{min}}}{3250 \text{ [r. p. m]}} \approx 64 \text{ granos/rev}$$

Con esto tenemos dos datos importantes que son:

$\omega = 3250 \text{ [r. p. m]}$, donde $\omega \rightarrow$ es la velocidad angular del motor.

64 granos/rev, que es el número aproximado de granos que se deben triturar por cada revolución del motor.

Ahora, si son 64 los granos que se deben triturar por cada revolución, y se supone que cada martillo del molino golpeará un grano, se tiene que el molino tendrá 64 martillos por cada cámara (en total el molino tendrá 2 cámaras de trituración, es decir, 128 martillos).

Por otro lado, si se considera que por cada disco del molino habrá 4 martillos, separados 90° entre sí (este diseño de disco porta martillo se lo justificará más adelante), y se disponen 2 martillos entre cada disco, separados mediante una arandela o separador, se obtienen 9 discos. Las respectivas ubicaciones que tendrán los martillos, así como los discos, se muestran en la ilustración 12.

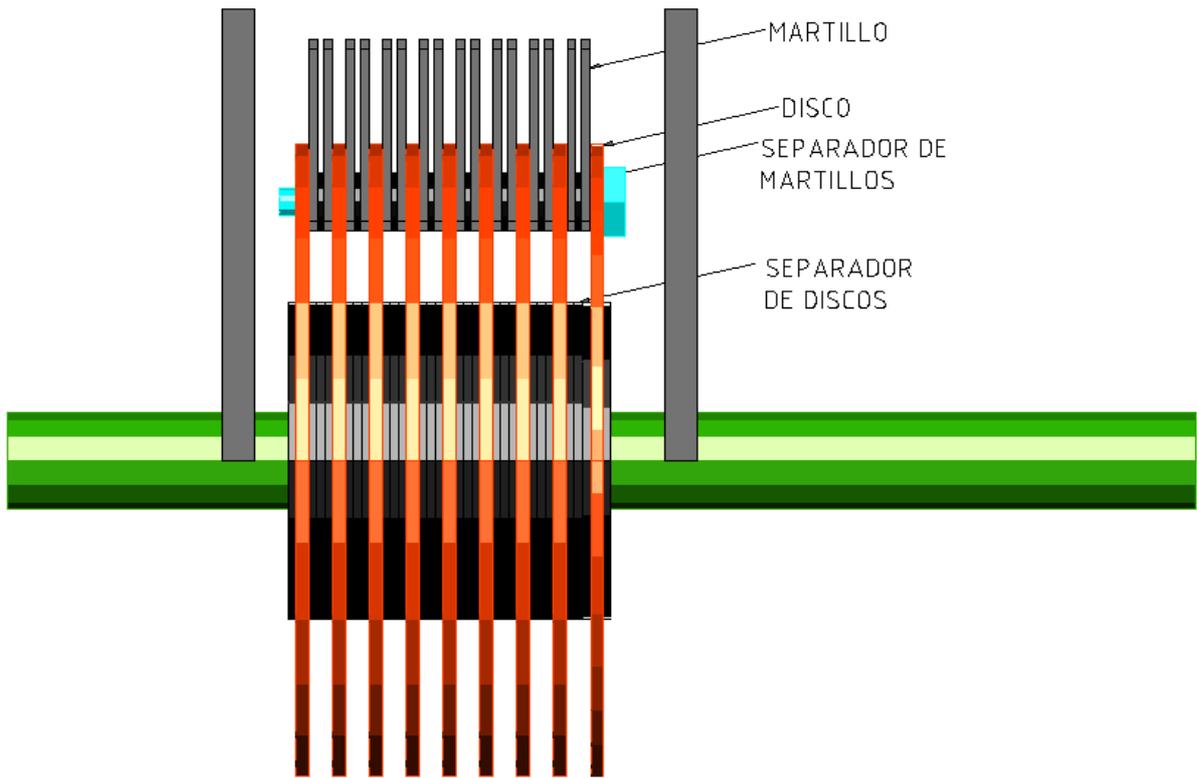


Ilustración 12: Ubicación de los Martillos y Discos

Con esto se ha obtenido otros dos valores importantes, que son:

de Martillos, por cámara → 64

de Discos porta Martillos, por cámara → 9

6.2. Diseño de los Martillos para la Trituración del Grano

El diseño de los martillos es fundamental en el molino, ya que esta pieza será la que produzca la fractura de los granos de trigo al momento del choque entre ambos. La representación de este choque se lo puede observar en la ilustración 13.

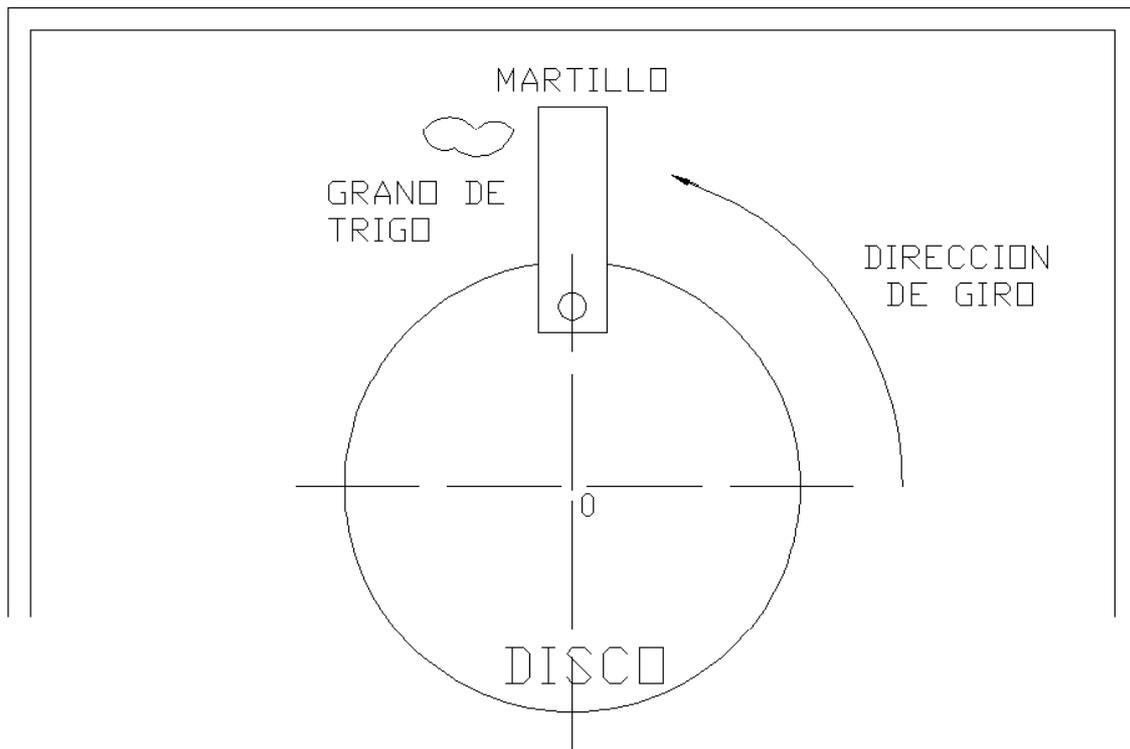


Ilustración 13: Impacto Grano – Martillo

El choque del grano y el martillo cuando está girando es mayoritariamente de forma frontal. De aquí se puede obtener la primera consideración de diseño: el espesor del martillo debe ser igual o mayor al espesor del grano. Realizando mediciones de 50 muestras de trigo, se obtuvo que el grosor promedio de un grano de trigo es de 2.5 mm.

Ahora bien, mediante un experimento se determinó que la energía necesaria para romper el trigo, es equivalente a dejar caer un objeto metálico de 120 gr desde una altura de 50 cm sobre el grano (la masa aproximada del trigo es de 0.08 gr, cuando tiene una humedad del 12 al 14%).

La energía de ruptura del trigo, se la puede calcular mediante la ecuación de la energía potencial, descrita en la ecuación 1.

Ecuación 1: Energía Potencial

$$E_{\text{ruptura}} = m_m * g * h \quad (\text{Gere , 129})$$

Donde \rightarrow m_m = masa del objeto metálico \rightarrow 120 g

g = gravedad \rightarrow 9.81 m/s²

h = altura \rightarrow 50 cm

Reemplazado valores en la ecuación 1, se obtiene:

$$E_{\text{ruptura}} = 0.120 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.5\text{m}$$

$$E_{\text{ruptura}} = 0.588\text{Nm}$$

Nota: Este tipo de experimento, donde se obtiene la energía necesaria de trituración para cualquier grano, no es nuevo, ya que fue realizado anteriormente en centros alimenticios. Para este proyecto se tuvo que realizar este experimento, ya que el valor de la energía de trituración para el trigo no se encontró.

6.2.1. Cálculo de las Velocidades Tangenciales del Martillo

Al momento de dejar caer un objeto (metálico, en este caso), se produce energía potencial, por lo que: la *ecuación 1* antes descrita, se la puede traducir en la práctica, como la energía que debe tener el martillo cuando está girando y choca contra el grano.

Por otro lado, cuando en la molienda el grano de trigo choca con el martillo se genera energía cinética, la fórmula de esta energía se la encuentra en la ecuación 2.

Ecuación 2: Energía Cinética

$$E_c = \frac{1}{2} m_t * V^2 \quad (\text{Gere , 129})$$

Donde \rightarrow E_c = Energía del trigo

m_t = masa del trigo

V = velocidad del martillo

La *ecuación 2*, se traduce como la energía del grano al momento del impacto con el martillo.

Si igualamos la ecuación 1 y 2 tenemos:

$$m_m * g * h = \frac{1}{2} m_t * V^2, \quad \text{Despejando la velocidad de esta expresión}$$

obtenemos la ecuación 3:

Ecuación 3: Velocidad Tangencial del extremo del Martillo

$$V_t = \sqrt{\frac{m_m * g * h}{m_t}}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 3 obtenemos:

$$V_t = \sqrt{\frac{120g * 9.8 \frac{m}{s^2} * 0.5m}{0.08g}}$$

$$V_t = 85.21 \frac{m}{s}$$

La velocidad obtenida es la velocidad tangencial del martillo, que la llamaremos V_v , (Velocidad al vacío, o sin carga).

En la molienda, cuando el grano choca con el martillo se produce una disminución en la velocidad del mismo, por lo que existe una velocidad

que será menor a la velocidad de vacío que se llamará V_c , (Velocidad con carga).

Para el cálculo de V_c , se considera a los martillos, discos, ejes y demás componentes, como un solo cuerpo que gira, a esto se lo conoce como volante. En proyectos donde se utiliza volantes se considera un coeficiente de fluctuación, definido en la ecuación 4 como:

Ecuación 4: Coeficiente de Fluctuación

$$C_s = \frac{V_v - V_c}{V} \quad (\text{Shigley, 1046})$$

Donde $\rightarrow V =$ velocidad tangencial del volante, tomada como la velocidad tangencial media.

Ahora, si definimos V como se muestra en la ecuación 5 tenemos:

Ecuación 5: Velocidad Tangencial Media

$$V = \frac{V_v - V_c}{2} \quad (\text{Hibbeler, 19})$$

Si reemplazamos la ecuación 5 en la ecuación 4, y luego despejamos V_c , obtenemos la ecuación 6 que es:

Ecuación 6: Velocidad Tangencial Final

$$V_c = -V_v * \frac{C_s - 2}{C_s + 2}$$

El valor de C_s , para molinos de harina esta entre (0.015 – 0.025), (Shigley, Tabla 16.5), reemplazando este valor en la fórmula 6 obtenemos:

$$V_c = -85.21 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \left(\frac{0.025 - 2}{0.025 + 2} \right)$$

$$V_c = 83.11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Como V_c es menor a V_v , existe una cesión de potencia por parte del volante al grano.

Nota: El sistema de giro del molino es desacelerado, lo que significa que el sistema cede energía.

Con el dato obtenido podemos calcular la velocidad angular con carga mediante la fórmula 7, que es la siguiente:

Ecuación 7: Velocidad Angular Final

$$\omega_c = \frac{V_c}{r_g} \quad (\text{Hibbeler , 63})$$

De esta relación se deduce el radio de giro, que es necesario para obtener la velocidad angular que va a tener el martillo.

6.2.2. Radio de Giro

Para obtener el radio de giro (r_g), que se muestra en la ilustración 14, se necesita despejarla de la ecuación 8:

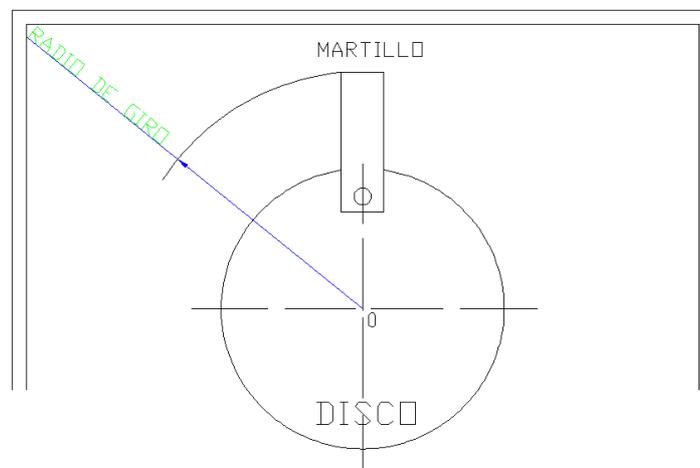


Ilustración 14: Radio de Giro del Martillo

La velocidad angular se la obtiene a partir de la ecuación 8, que es dada por la siguiente expresión:

Ecuación 8: Velocidad Angular

$$\omega = \frac{V * 60}{2 * \pi * r_g} \quad (\text{Hibbeler , 63})$$

Despejando el radio de giro de la ecuación 8, obtenemos la ecuación 9 que es la siguiente:

Ecuación 9: Radio de Giro

$$r_g = \frac{V_c * 60}{2 * \pi * \omega}$$

Donde $\omega \rightarrow$ Velocidad angular del motor, obtenida en la sección 6.1

$V_c \rightarrow$ Velocidad con carga.

Nota: Se toma la velocidad con carga, porque es la velocidad a la que giran los martillos en la molienda.

Remplazando datos tenemos:

El valor de la velocidad angular es el obtenido

$$r_g = \frac{83.11 * 60}{2 * \pi * 3250}$$

$$r_g = 0.244 \text{ m}$$

Por facilidad de manejo se escogerá un valor de radio de giro de 0.25m, el cual se lo usará para calcular la velocidad angular con carga

ω_c . Remplazando los valores en la ecuación 7, se tiene:

$$\omega_c = \frac{83.11 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.25\text{m}}$$

$$\omega_c = 332.44 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La velocidad angular del motor ω , fue determinada en la sección 6.1, la cual es igual a la velocidad angular de vacío ω_v :

$$\omega_v = 3250 \text{ [r.p.m]}$$

$$\omega_v = 340.33 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Con el valor obtenido del radio de giro, se puede tener una idea aproximada de cual debe ser la medida del martillo. Además, también se podrá aproximar la medida que deberá tener el diámetro del disco porta martillos, así como también, la medida que deberá tener la carcasa del molino.

La carcasa debe estar lo más cerca posible a los martillos, porque además de la trituración del trigo por medio de los martillos, el grano al estrellarse contra las paredes produce esfuerzos de contacto de sentido contrario, que hace que el grano se fracture mediante planos, como se muestra en la ilustración 15.

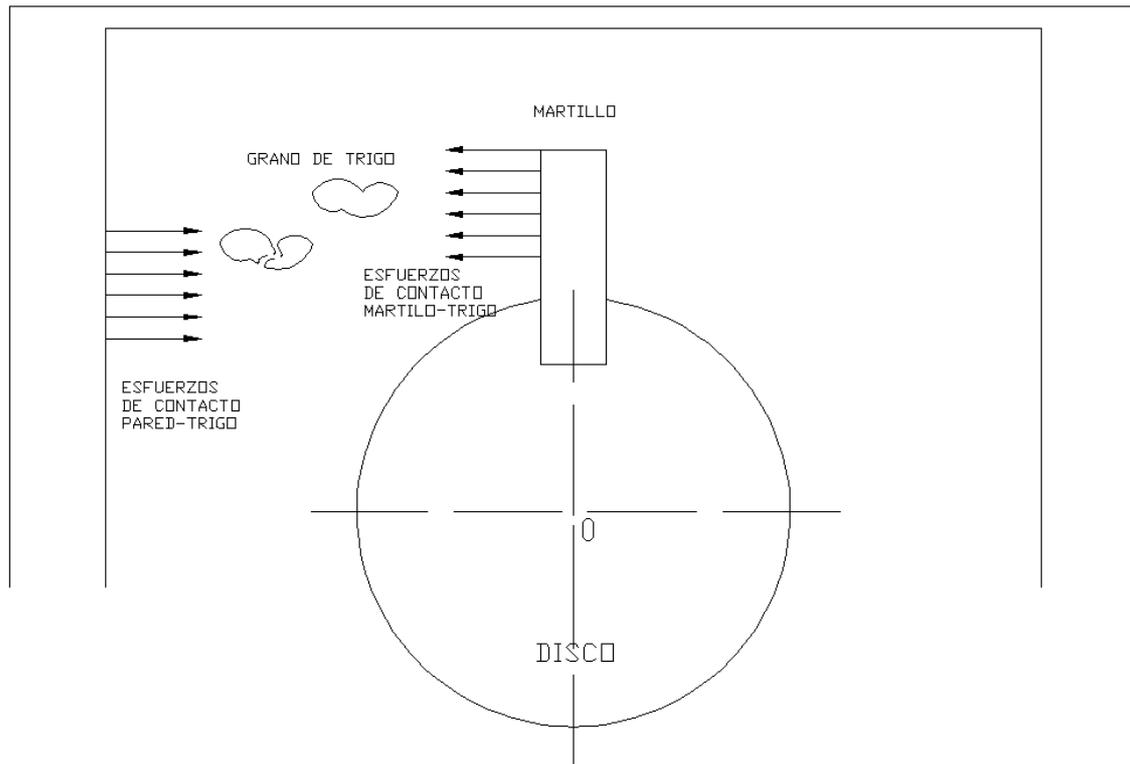


Ilustración 15: Esfuerzos de Contacto, Martillo-Grano, Grano-Pared

Obtenidas las velocidades angulares, se puede obtener la aceleración angular del sistema, por medio de la ecuación 10:

Ecuación 10: Movimiento Angular Desacelerado

$$\omega_v^2 = \omega_c^2 + 2 * \alpha * \theta \quad (\text{Hibbeler , 668})$$

Donde $\rightarrow \alpha = \text{aceleración angular}$

$\theta = \text{Espacio recorrido por los martillos}$

Despejando la aceleración angular de la ecuación 10, obtenemos la ecuación 11, que se define como:

Ecuación 11: Aceleración Angular

$$\alpha = \frac{\omega_v^2 - \omega_c^2}{2 * \theta}$$

El espacio que recorre el martillo (existen 4 martillos ortogonales por cada disco), es de 90° , por lo que tenemos:

$$\theta = 90^\circ \rightarrow 1.5708 \text{ rad.}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 11, obtenemos:

$$\alpha = \frac{(340.33)^2 - (332.44)^2 \frac{\text{rad}^2}{\text{s}^2}}{2 * 1.5708 \text{ rad}}$$

$$\alpha = 1689.63 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Con el valor obtenido de la aceleración angular, se puede calcular la fuerza del martillo para triturar el grano, el cual es llamado: *Fuerza de Corte* (F_c). La aplicación de la fuerza de corte se puede considerar en el extremo superior del martillo, donde existe el contacto, como se muestra en la ilustración 16.

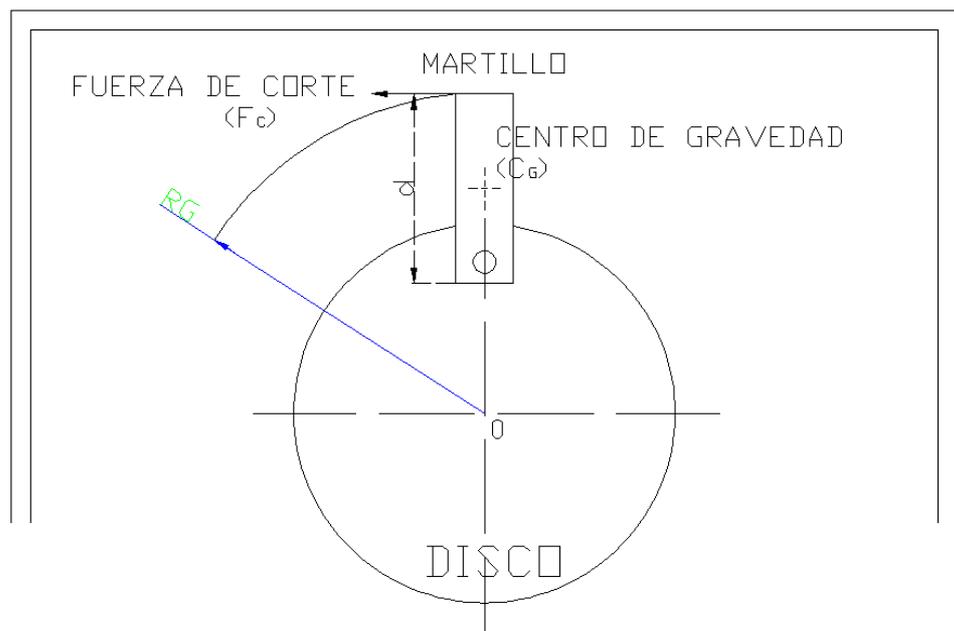


Ilustración 16: Aplicación de la Fuerza de Corte

La fuerza de corte produce un momento que es dado por la ecuación 12, que es la siguiente:

Ecuación 12: Momento de la Fuerza de Corte

$$M = F_c * d \quad (\text{Hibbeler , 223})$$

Donde $\rightarrow d = \text{Largo del Martillo}$

La ilustración 17, indica la distancia d y la posición de la Fuerza de Corte.

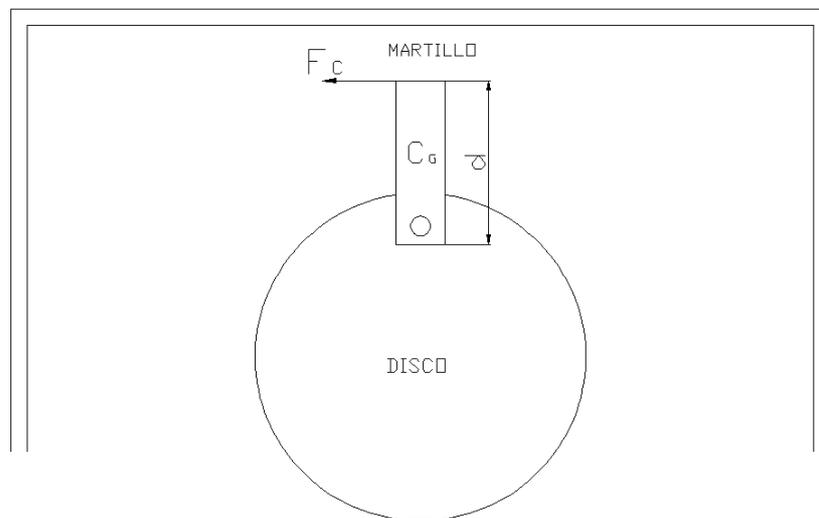


Ilustración 17: Centro de Gravedad, Largo del Martillo y Fuerza de Corte

El momento de Inercia del martillo es dado por la ecuación 13, que es la siguiente:

Ecuación 13: Momento de Inercia del Martillo

$$I_o = \frac{1}{12} * m_m * d^2 \quad (\text{Anexo 1})$$

Donde $\rightarrow m = \text{masa del martillo}$

Ahora, el momento que produce la fuerza de corte con respecto al centro de giro del martillo viene dado la ecuación 14, que es la siguiente:

Ecuación 14: Momento que produce la Fuerza de Corte

$$M = I_o * \alpha \quad (\text{Hibbeler , 120})$$

Si se iguala la ecuación 12 con la ecuación 14 y se despeja Fuerza de corte obtenemos la ecuación 15, que es la siguiente:

Ecuación 15: Fuerza de Corte

$$F_c = \frac{I_o * \alpha}{d}$$

Si reemplazamos la ecuación 13 en la ecuación 15 y despejamos la masa obtenemos la ecuación 16, que es la siguiente:

Ecuación 16: Masa de los Martillos

$$m_m = \frac{F_c * 12}{\alpha * d}$$

En la ecuación 16, existe la incógnita d , para obtener este valor se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- La longitud L del martillo deberá cumplir condiciones geométricas para su correcto funcionamiento, es decir, deberá guardar relación geométrica con respecto al disco que lo portará, como se muestra en la ilustración 18.

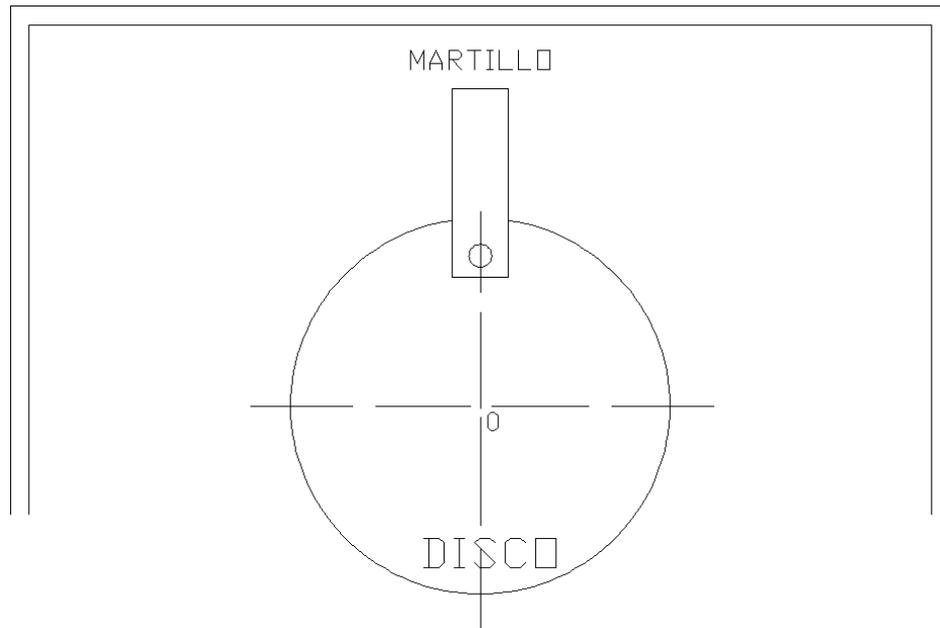


Ilustración 18: Relación Geométrica entre el Martillo y el Disco

- La posición de los cuatro martillos cuando el molino este sin funcionar, será el que se muestra en la ilustración 19.

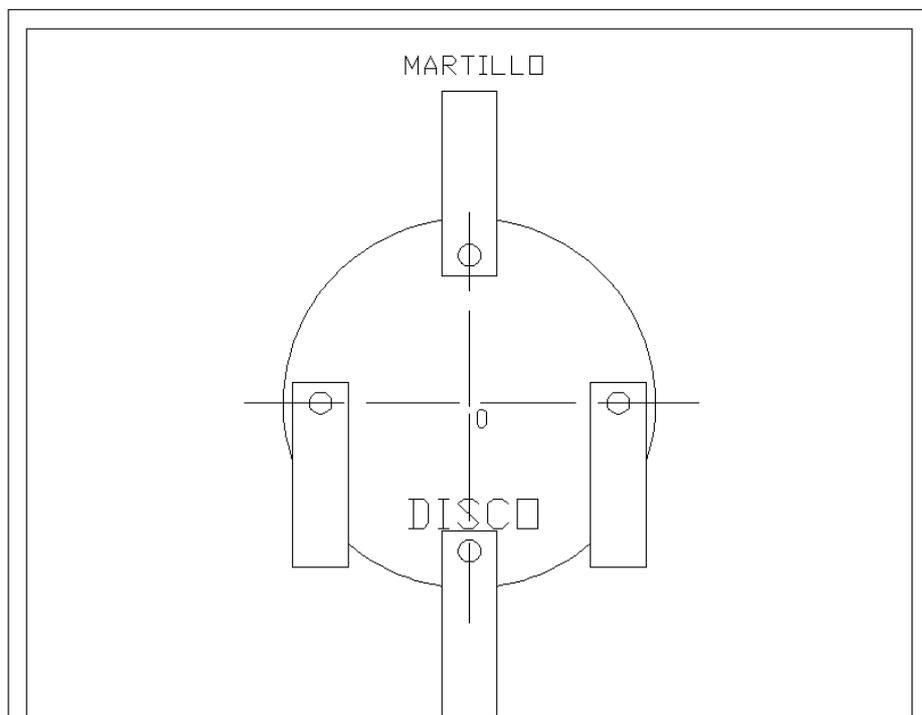


Ilustración 19: Posición de los Martillos en Reposo

- longitud L del martillo deberá estar acorde con la medida del radio de giro obtenido anteriormente.
- El martillo tendrá dos agujeros de 20mm de diámetro, para cambiar el lado del martillo cuando este desgastado, como se muestra en la ilustración 20.

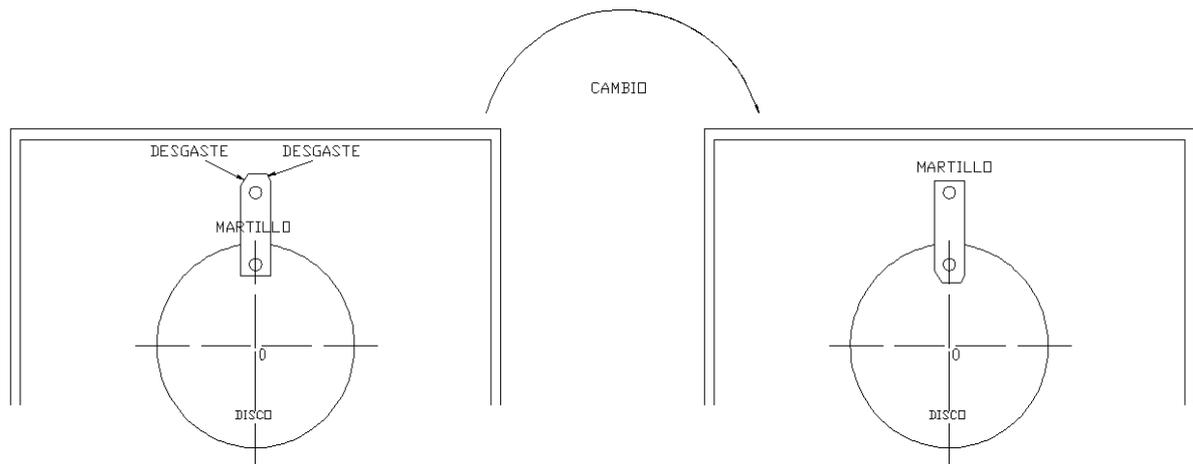


Ilustración 20: Desgaste y cambio de lado del Martillo

- Los agujeros estarán a 20mm del borde del martillo al centro del agujero como se muestra en la ilustración 21.

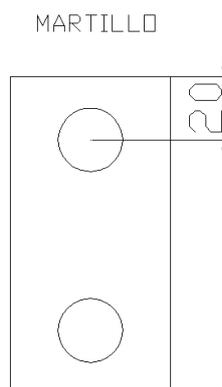


Ilustración 21: Posición de los agujeros en el Martillo

Tomando en cuenta las anteriores consideraciones, sumado a que el diámetro del eje (eje que estará conectado con el eje del molino, para

producir el movimiento del disco y por ende de los martillos), que pasará por medio de los discos porta martillos será de dos pulgadas, se propone una longitud de 100mm para los martillos. Una medida superior del martillo aumentaría el peso que el motor debe girar, además de aumentar el costo ya que todo el molino será construido con acero inoxidable AISI 304 para alimentos.

La longitud final del martillo y la longitud d se muestra en la ilustración 22.

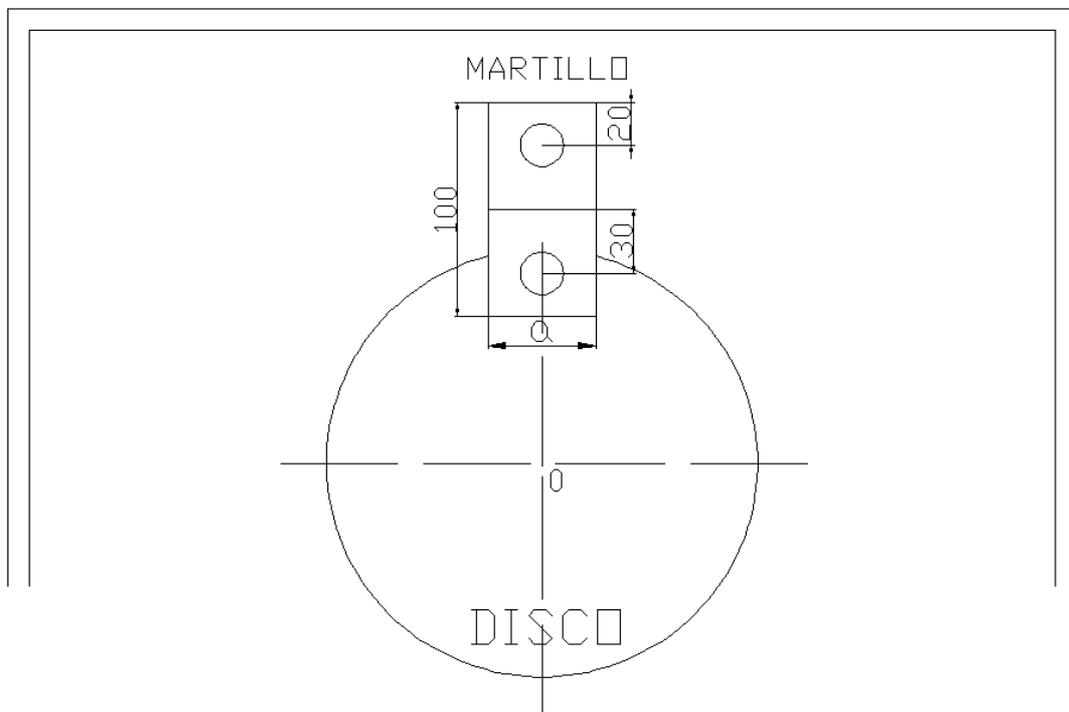


Ilustración 22: Longitud del Martillo

Una vez determinada la distancia d , y obtenida la fuerza de corte experimentalmente (E.P.N), y remplazando en la ecuación 16 tenemos como resultado:

$$F_c = 2.2 \text{ N}$$

$$m_m = \frac{2.2N * 12}{1689.63 \frac{1}{s^2} * 0.1m}$$

$$m_m = 0.156Kg$$

$$m_m = 156 \text{ g por cada martillo}$$

Con el dato obtenido se puede calcular el ancho del martillo. El peso del martillo viene dado por la ecuación 17.

Ecuación 17: Peso del Martillo

$$P_m = V * P_e \quad (\text{Gere , 10})$$

Donde \rightarrow V = Volumen del Martillo

$$P_e = \text{Peso específico del acero (7850 kg/m}^3\text{)}$$

Si se descompone el Volumen y se lo reemplaza en la ecuación 17, se obtiene la ecuación 18, que es la siguiente:

Ecuación 18: Peso del Martillo

$$P_m = d * a * e * P_e$$

Donde \rightarrow d= largo del martillo \rightarrow 0.1m

e = espesor del martillo \rightarrow 0.004m, este valor a sido obtenido tomando en cuenta que el espesor promedio de un grano de trigo es de 2.5mm.

a = ancho del martillo

Despejando el ancho (a) del martillo, y reemplazando todos los valores obtenemos el siguiente valor:

$$a = \frac{P_m}{P_e * e * L}$$

$$a = \frac{0.156 \text{ kg}}{7850 \text{ kg/m}^3 * 0.004 \text{ m} * 0.1 \text{ m}}$$

$$a = 0.0496 \text{ m} \approx 50 \text{ mm}$$

6.2.3. Falla por Cizalladura

Debido a la tracción que genera el perno sobre el área de la placa, se puede dar una falla por desgarramiento o cizalladura como se muestra en la ilustración 23, por lo que se hace necesario calcular el factor de seguridad:

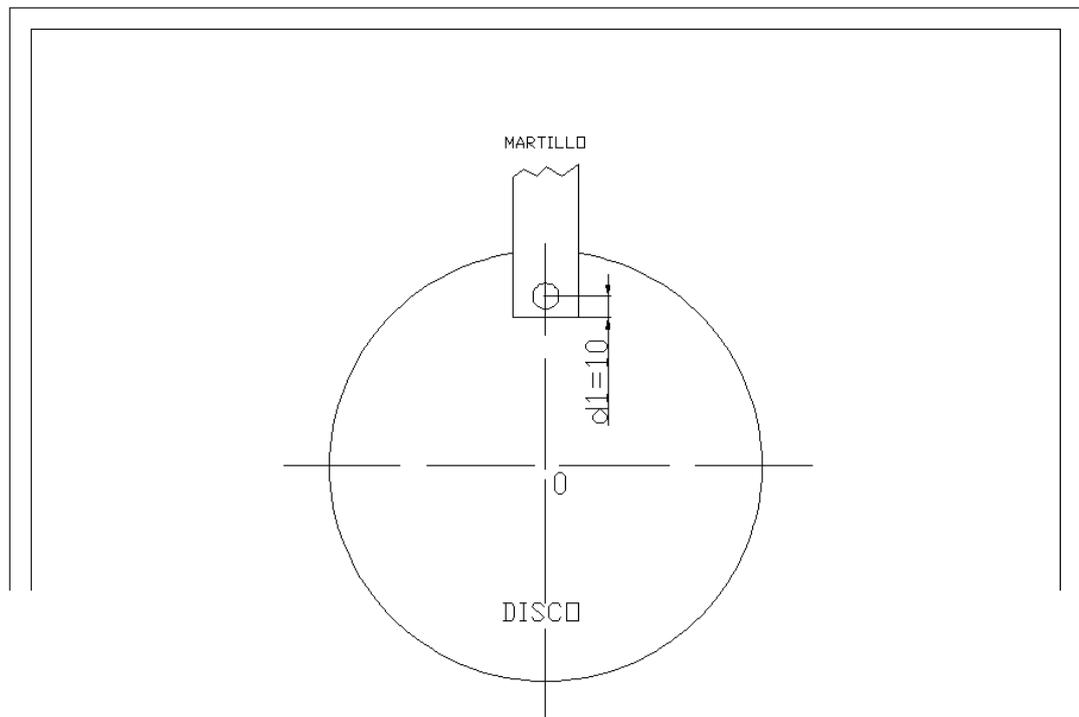


Ilustración 23: Por Desgarramiento

El área del desgarramiento se puede calcular mediante la ecuación 19, que es la siguiente:

Ecuación 19: Área de Desgarre

$$A_d = e * d_1 * 2 \quad (\text{Shigley, 268})$$

Donde \rightarrow e = espesor del martillo

d_1 = distancia del borde del orificio al borde del martillo

(Ver ilustración 15)

El esfuerzo cortante se calcula mediante la ecuación 20, que es la siguiente:

Ecuación 20: Esfuerzo Cortante

$$\tau = \frac{F_{cf}}{A_d} \quad (\text{Gere , 37})$$

Donde $\rightarrow F_{cf}$ = Fuerza Centrífuga

La fuerza centrífuga se calcula mediante la ecuación 21, que es la siguiente:

Ecuación 21: Fuerza Centrífuga

$$F_{cf} = \omega^2 * m_m * R_g \quad (\text{Hibbeler , 136 - 137})$$

Donde $\rightarrow R_g$ = radio de giro

m_m = masa del martillo

Reemplazado los datos se obtiene el siguiente valor:

$$F_{cf} = 340.33^2 \left(\frac{1}{s^2}\right) * 0.156kg * 0.25m$$

$$F_{cf} = 4517.15 N$$

Remplazando los valores obtenidos en la ecuación 20 tenemos:

$$\tau = \frac{4517.15N}{0.004m * 0.01m * 2}$$

$$\tau = 56.4 Mpa$$

El valor del factor de seguridad se puede obtener mediante la ecuación 22, que es la siguiente:

Ecuación 22: Factor de Seguridad

$$\eta = \frac{S_y}{2 * \tau} \quad (\text{Shigley, 333})$$

El valor de S_y para el acero inoxidable 304 es de 276 Mpa, (Anexo 2).

$$\eta = \frac{S_y}{2 * \tau}$$

Remplazando los valores obtenemos

$$\eta = \frac{276 \text{ Mpa}}{2 * 56.4 \text{ Mpa}}$$

$$\eta = 2.44$$

El factor de seguridad es suficiente para garantizar que no habrá falla por desgarramiento.

6.2.4. Falla por Tracción

El esfuerzo normal por tracción, debido a la fuerza centrífuga, se calcula mediante la fórmula 23, que es la siguiente:

Ecuación 23: Esfuerzo Normal

$$\sigma = \frac{F_{cf}}{A_{st}} \quad (\text{Gere, 4})$$

Donde $\rightarrow A_{st}$ = Área del sección transversal del martillo

Remplazando datos obtenemos:

$$\sigma = \frac{4508.4N}{0.004m * 0.05m}$$

$$\sigma = 22,5 \text{ Mpa}$$

El factor de seguridad viene dado por la ecuación 24, que es la siguiente:

Ecuación 24: Factor de Seguridad para Esfuerzo Normal

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \quad (\text{Shigley, 333})$$

Remplazando datos se tiene:

$$\eta = \frac{276 \text{ Mpa}}{22.2 \text{ Mpa}}$$

$$\eta = 12.24$$

El factor de seguridad es alto, por lo que es suficiente para garantizar que no habrá falla por desgarramiento.

Por último nos falta definir la forma que tendrán los martillos, la forma propuesta es la simétrica (porque de esta forma tendrá simetría con respecto a los ejes horizontal y vertical, además de tener 4 aristas para el corte del grano), que es la más utilizada en molinos de martillo.

Tendrá dos aristas de corte como se muestra en la ilustración 24.

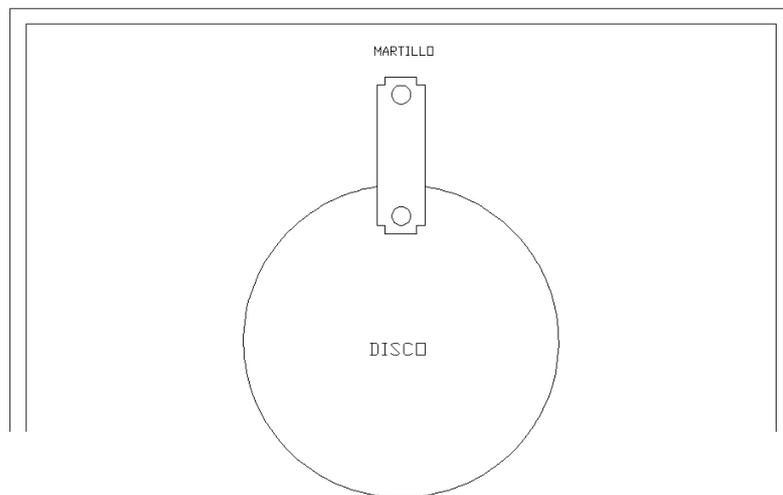


Ilustración 24: Forma de los Martillos

Nota: Las dimensiones y forma final del martillo, se lo puede observar en el Anexo 3.

6.3. Diseño del Disco Porta Martillos

Con el diseño de los martillos que se realizó en la sección 6.2, algunos de las medidas para el disco se han obtenido, como por ejemplo:

El disco será circular, porque presenta algunas ventajas con relación a otras configuraciones como por ejemplo a la cuadrangular.

Las ventajas y desventajas que presenta el disco circular se detallan a continuación:

Ventajas:

1. La fuerza centrífuga (radial en todo momento), coloca a los martillos en posiciones de 90° entre sí, la zona de esfuerzos es más larga, por lo tanto el esfuerzo normal por tracción es menor
2. Mejores condiciones para el balanceo dinámico, ya que es circular.

Desventajas:

1. Ligeramente más pesado que otras configuraciones, como la triangular y circular.
2. Requiere mayor número de martillos, 4 por cada disco. En la configuración triangular por ejemplo, solo se necesitarían 3 martillos por cada disco.

A continuación se exponen algunos datos para el disco.

- Diámetro del Disco $\rightarrow D_D = 330$ mm
- 4 agujeros (por donde pasarán los pernos porta martillos), de diámetro de 20mm (dato obtenido a priori, que más adelante se justificará).

- 1 agujero en el centro del disco de 2 pulgadas para el eje del molino. Se ha tomado este valor porque generalmente los motores poseen un eje de 2 pulgadas, lo que evitaría problemas al unir el eje del motor con el eje del molino, por medio del matrimonio

Lo único que falta determinar para el diseño del disco, es el espesor que tendrá el mismo, dicho espesor se lo calculará por medio de la siguiente expresión, tomando la siguiente consideración:

Consideración: En cada agujero del disco habrá una tracción por consecuencia de las fuerzas centrífugas de los martillos, por lo que en cada agujero se tendrá una fuerza equivalente a dos fuerzas centrífugas de un martillo.

Si tomamos las ecuaciones 20 y 22 antes descritas:

$$\eta = \frac{S_y}{2 * \tau} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\tau = \frac{F_{cf}}{A_d} \quad \text{Ecuación 20}$$

Si tomamos la consideración antes descrita tenemos:

$$\tau = \frac{2F_{cf}}{A_d}, \text{ descomponiendo } A_d \text{ tenemos } \tau = \frac{2F_{cf}}{e * d_1 * 2}$$

Si esta nueva ecuación se la reemplaza en la 22 y se despeja el espesor (e), obtenemos la ecuación 25, que es la siguiente:

Ecuación 25: Espesor del Disco

$$e = \frac{F_{cf} * \eta * 2}{d_1 * S_y}$$

Hemos escogido para el factor de seguridad el valor de 2.

Remplazando los datos obtenemos el siguiente valor:

$$e = \frac{4508.4N * 2 * 2}{0.01m * 276 * 10^6 \frac{N}{m^2}}$$

$$e = 6.43 \times 10^{-3} m$$

$$e = 6.53 mm$$

El espesor de la plancha como se observa es de 6.53, para la construcción se utilizara la plancha de 6mm de acero inoxidable AISI 304.

Nota: Como se puede apreciar en la ilustración 25, a los lados del agujero principal del martillo existen 2 más. Se decidió hacerlos para cuando exista desgaste del agujero principal debido a fricción, cambiar los martillos a los agujeros contiguos.

Además, en el gráfico se puede notar que cuando el martillo se encuentre en posición de reposo, este no topará con el eje porque sobra aproximadamente 2cm.

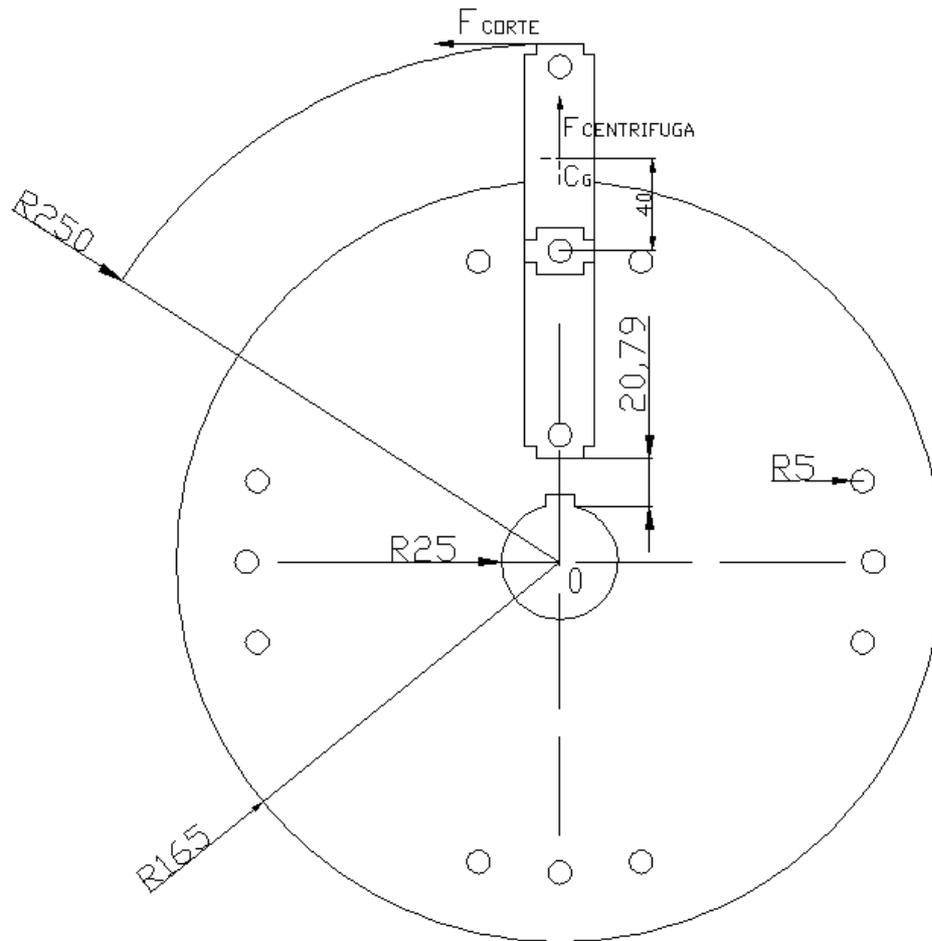


Ilustración 25: Configuración del Disco y los Martillos

Nota: Las dimensiones y forma final del disco, se lo puede observar en el Anexo 4.

6.4. Diseño del Separador de Martillos

Como quedó estipulado en la sección 6.1 y se lo puede observar en la ilustración 12, los martillos están separados por medio de una arandela. Esta tendrá un grosor de 3mm, porque se la puede hacer a partir de la plancha de la misma dimensión de acero inoxidable AISI 304, que se encuentra fácilmente en el mercado. El diámetro exterior

de esta arandela será de 30mm y el interior de 20mm, como se muestra en la ilustración 26:

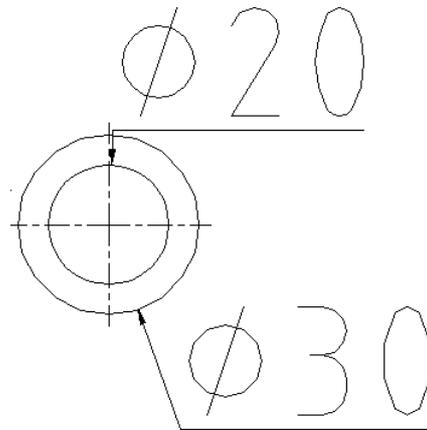


Ilustración 26: Dimensiones de la Arandela Separadora de Martillos

La posición final de la arandela, con los discos y martillos se los puede apreciar en la ilustración 27.

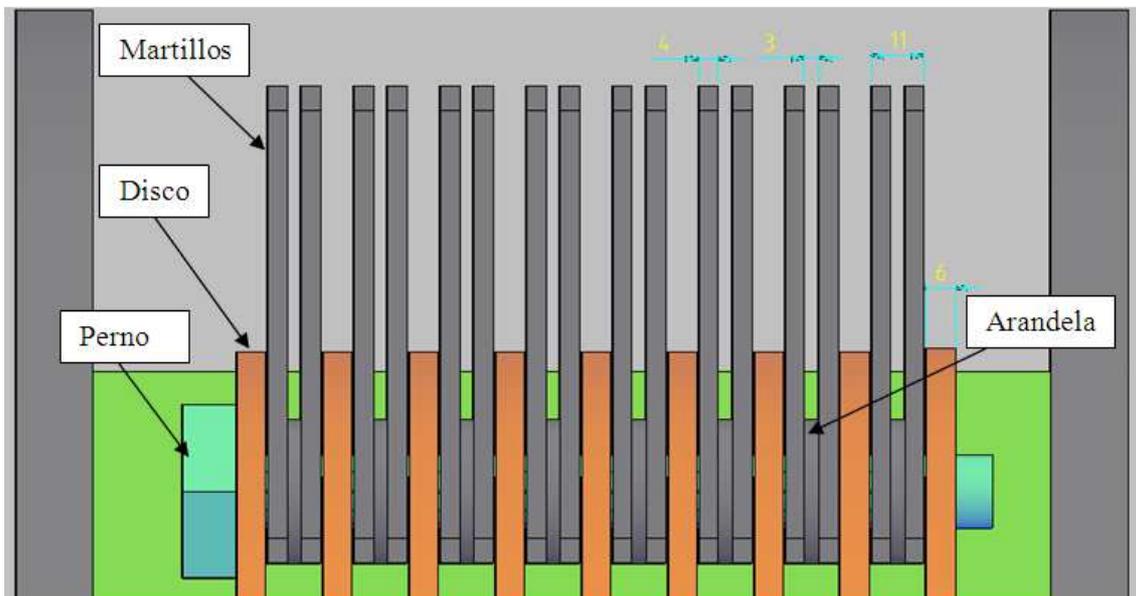


Ilustración 27: Posición final de la Arandela de Separación.

Las dimensiones acotadas que se encuentran en la gráfica anterior corresponden a:

6 mm → Grosor del Disco

11mm → La Suma de dos Martillos con Arandela de Separación

3mm → Grosor de la Arandela de Separación

4mm → Grosor del Martillo

Nota: Las dimensiones y forma final del separador de martillo, se lo puede observar en el Anexo 5.

6.5. Diseño del Perno del Martillo.

Para que los martillos se sostengan en el disco existe un perno que pasará entre ambos, el diámetro de este perno se definió en el diseño de los martillos y es de 20mm, con cabeza hexagonal, y una tuerca de 10mm de espesor, todo estos implementos serán construidos con acero inoxidable 304.

La configuración del perno, con sus respectivas medidas y fuerzas, se pueden observar en la ilustración 28.

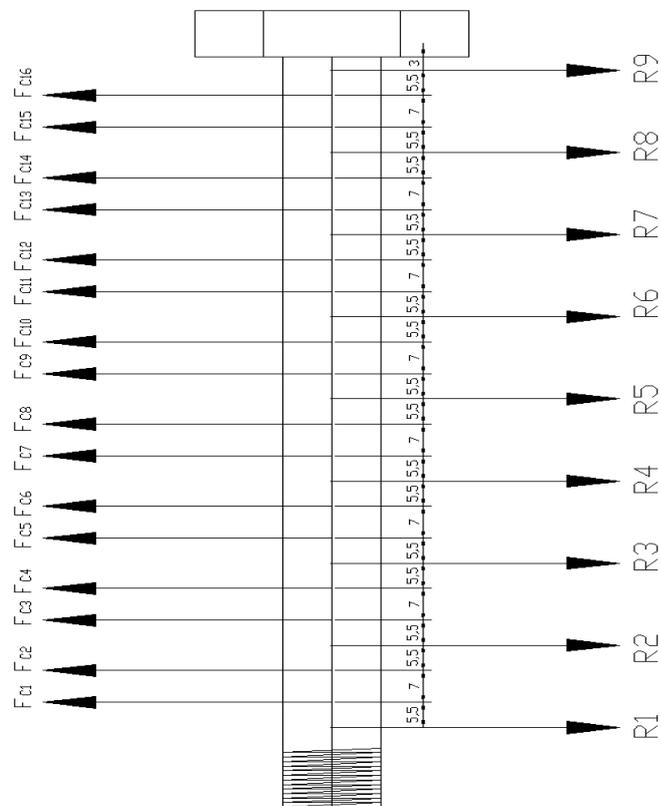


Ilustración 28: Gráfica del Perno con sus Fuerzas

Las F_c son las fuerzas centrífugas que poseen los martillos y la R son las reacciones de los discos.

A continuación se realizará el cálculo de fuerzas y reacciones en equilibrio estático, para poder determinar el factor de seguridad del perno. Se desprecian los valores del peso del eje y las fuerzas de corte porque son mínimas.

Según la ilustración 28, aplicando equilibrio estático de las fuerzas en el perno tenemos:

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 = 16F_{cf}$$

Como todas las R son iguales y se conoce el valor de F_c determinamos el valor de las reacciones:

$$9 * R = 16 * F_{cf}$$

Donde $F_{cf} \rightarrow 4508.4N$ Sección 6.2.3

Por lo que el valor de R es:

$$R = \frac{16 * 4508.4N}{9}$$

$$R = 8014.93N$$

Ingresando estos valores y simulando el perno en el programa Mdsolids, se obtiene los siguientes resultados:

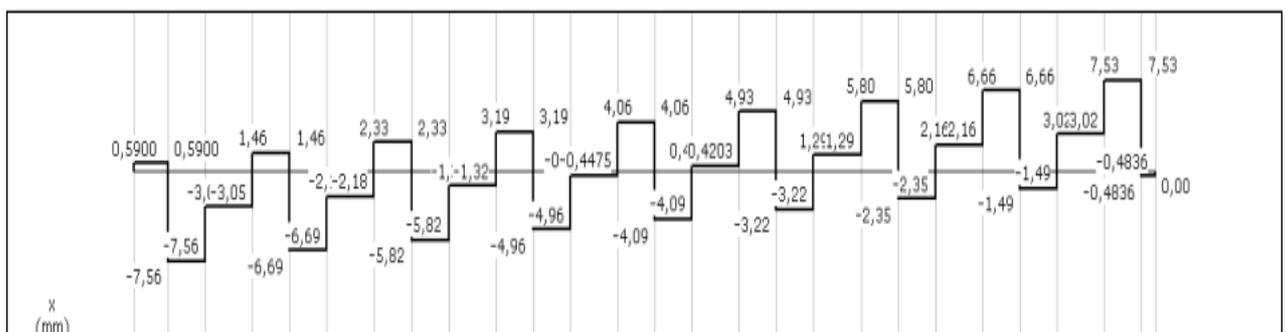


Ilustración 29: Diagrama de Corte del Perno

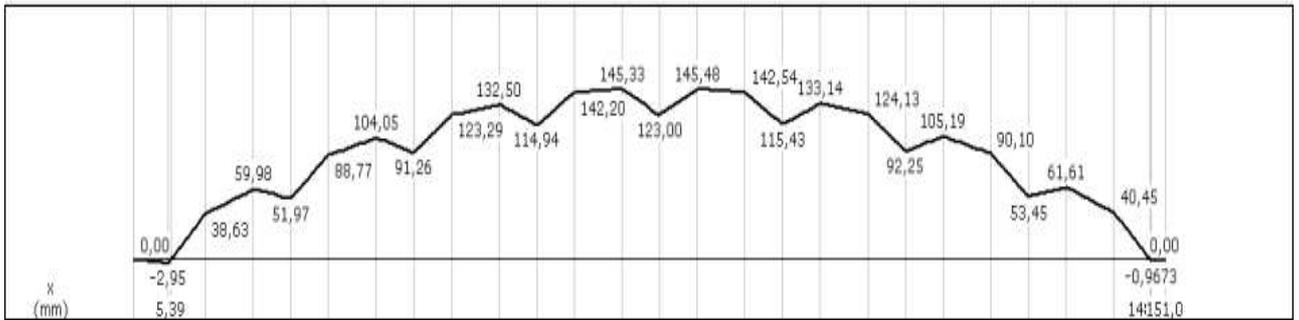


Ilustración 30: Diagrama de Momento del Perno

Como se observa en las ilustraciones 29 y 30, la zona crítica del perno se encuentra en el centro. Para conocer el esfuerzo normal por flexión se utiliza la fórmula 26, que es llamada de Navier, y es la siguiente:

Ecuación 26: Fórmula de Navier

$$\sigma = \frac{M * C}{I} \quad (\text{Gere , 324})$$

Donde $\rightarrow C =$ Distancia desde el eje neutro al extremo

$I =$ Momento de Inercia

$M =$ Momento Flexionante

Descomponiendo la fórmula 26 en factores conocidos tenemos:

$$\sigma = \frac{M * C}{I} = \frac{M * \frac{d}{2}}{\frac{\pi * d^4}{64}}$$

$$\sigma = \frac{M * 32}{d^3 * \pi}$$

Donde $d \rightarrow$ Diámetro del perno, 20mm

$M \rightarrow 145.44 \text{ N}$ (Ver ilustración 30)

Reemplazando los valores en la ecuación obtenemos:

$$\sigma = \frac{145.44 \text{ N} * 32}{(0.02)^3 \text{ m}^3 * \pi}$$

$$\sigma = 185.2 \text{ Mpa}$$

Para obtener el factor de seguridad se aplica la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma}$$

El valor de S_y para el acero inoxidable 304 es de 276 Mpa.

Remplazando datos tenemos

$$\eta = \frac{276 \text{ Mpa}}{185.2 \text{ Mpa}}$$

$$\eta = 1.5$$

Por lo que no hay falla aplicando la Teoría del Esfuerzo Máximo.

Para asegurarnos de que no haya falla con la máxima tensión cortante, se aplica la siguiente fórmula:

$$\tau_{max} = \frac{V_{max}}{A}$$

Donde $V_{max} = 7,53 \text{ KN}$, ver ilustración 29

Remplazando datos tenemos:

$$\tau_{max} = \frac{7,53 \text{ KN}}{(10/1000)^2 \text{ m}^2 * \pi}$$

$$\tau_{max} = 23.96 \text{ Mpa}$$

Para el factor de seguridad se aplica la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{S_y}{2 * \tau_{max}}$$

$$\eta = \frac{276 \text{ Mpa}}{2 * 23.9 \text{ Mpa}}$$

$$\eta = 5.75$$

Nota: Las dimensiones y forma final del perno porta martillo, se lo puede observar en el Anexo 6.

6.6. Diseño, Simulación en Elementos Finitos del Eje Principal del Molino

Nota: Las dimensiones y forma final del Eje Principal y Secundario, se lo puede observar en el Anexo 7 y 8 respectivamente.

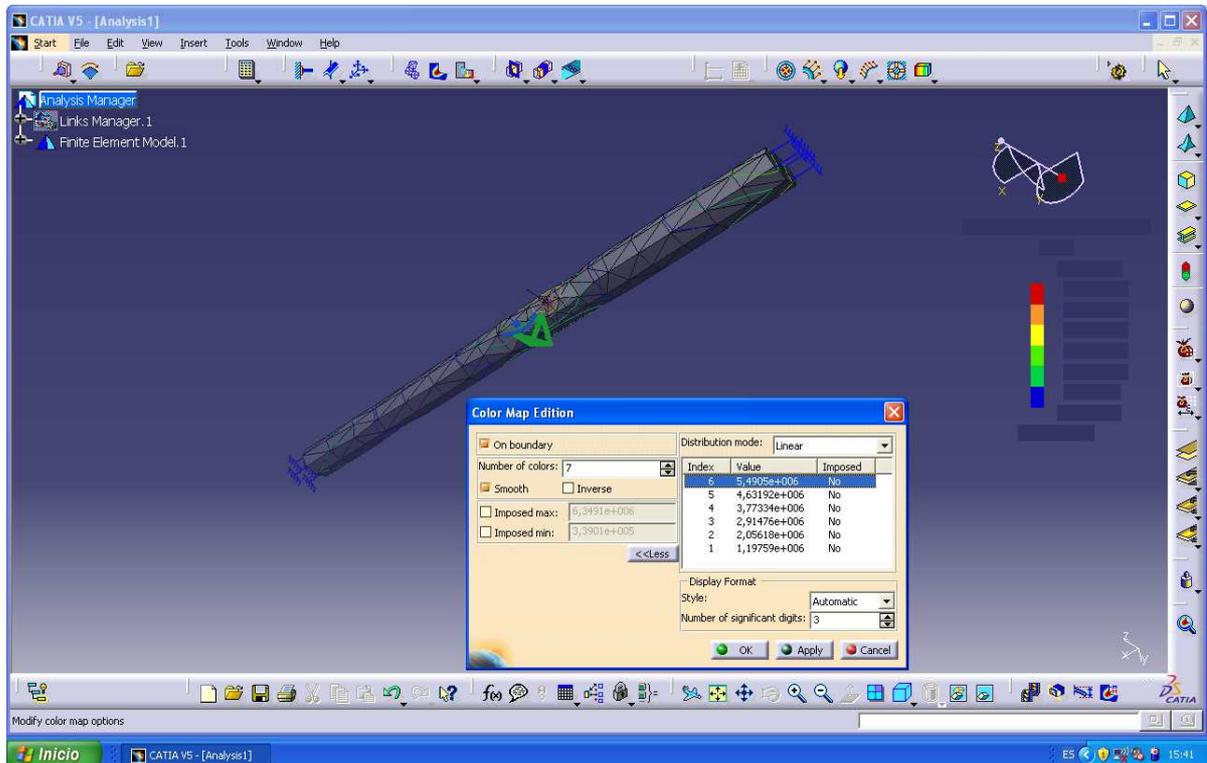


Ilustración 31: Simulación en CATIA del eje principal

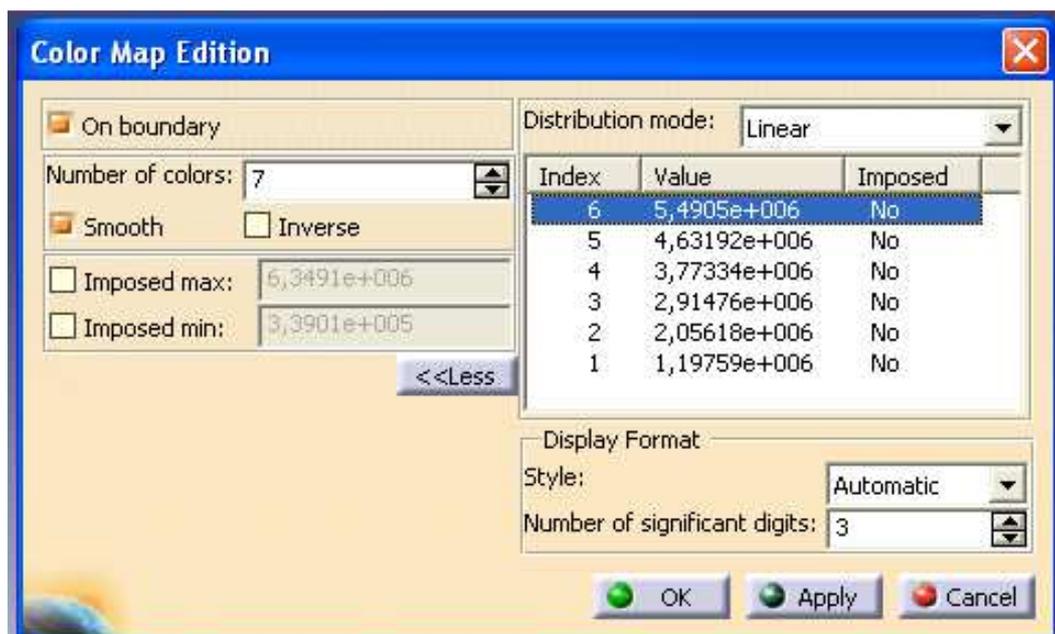


Ilustración 32: Detalle de la Tabla de Resultados de la Simulación

Lo que se realizó en Katia fue simular el eje con su diámetro y largo, 2 pulgadas y 732mm respectivamente, para ver si este eje resiste el peso al que va a estar sujeto.

En la tabla de resultados se puede ver que el esfuerzo máximo del eje es de 5.4MPa, dado que usamos acero AISI 304 el cual tiene un esfuerzo de fluencia de 276 MPa, obtenemos un factor de seguridad de 51.11, concluimos que el eje no fallará al ser sometido a los esfuerzos de trabajo.

6.7. Diseño del Separador de Discos

Una vez que se ha diseñado los martillos con su respectiva arandela, se necesita dimensionar el separador de discos. En la sección 6.4, quedó determinado que el grosor de los martillos, sumado al grosor de la arandela que los separa es de 11mm, (ver ilustración 27). El diámetro de este separador será de 10mm o 4 pulgadas, que es un diámetro que se lo consigue si ningún problema en el mercado nacional, el grosor se lo puede hacer de 12mm, para que exista 1mm de holgura.

Su posición se la muestran en la ilustración 33.

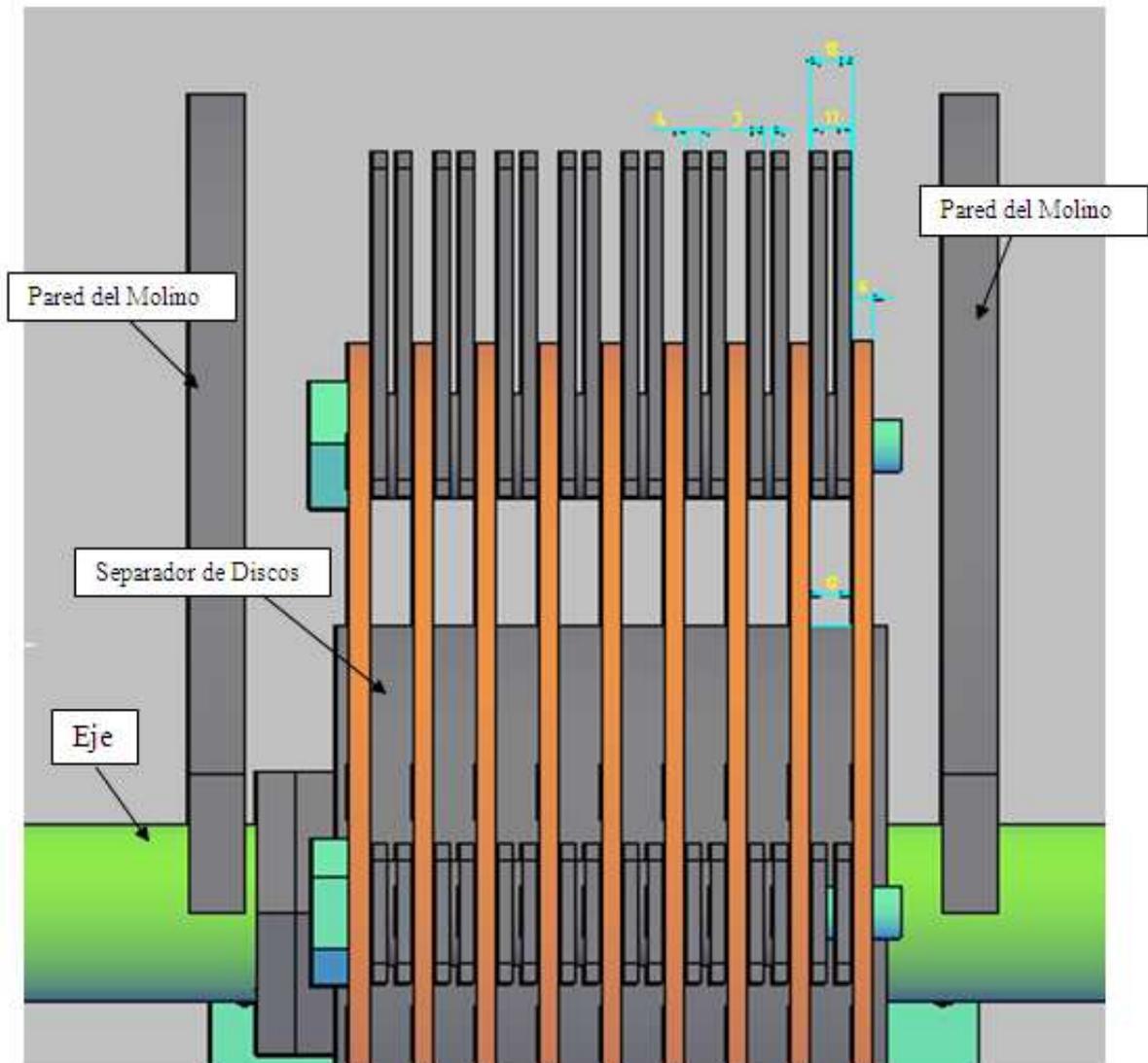


Ilustración 33: Gráfica del Separador de Discos

Nota: Las dimensiones y forma final del separador de disco, se lo puede observar en el Anexo 9.

6.8. Masa de Todos los Componentes Interiores del Molino

En la sección 6.2, se determinó que la masa de cada martillo es de 0.152kg, y según el diseño, se tiene 64 martillos en cada cámara, como son 2 cámaras de las mismas dimensiones y con los mismos componentes, se obtiene 128 martillos en total, en consecuencia la masa total es:

$$M_t = 0.156 \text{ kg} * 128 \text{ martillos}$$

$$M_t = 19.97 \text{ kg}$$

La masa de las arandelas separadoras de martillos fue obtenida experimentalmente, por medio de una balanza electrónica. En cada cámara existen 32 arandelas, como son dos cámaras se tiene 64 arandelas, por lo que la masa total de estos es:

$$M_t = 0.016 \text{ kg} * 64 \text{ arandelas}$$

$$M_t = 1.06 \text{ kg}$$

En la sección 5.3 se determinó las dimensiones del Disco, su masa fue obtenida experimentalmente por medio de una balanza electrónica.

Como consta en el diseño, existen 9 discos por cada cámara, ya que son 2 cámaras se tiene 18 discos en total, por lo que la masa total de estos es:

$$M_t = 4 \text{ kg} * 18 \text{ discos}$$

$$M_t = 72 \text{ kg}$$

Los separadores de los discos son de 5 cm de radio por 1.2 cm de espesor como consta en el diseño del molino. Su masa fue obtenida experimentalmente por medio de una balanza electrónica.

En cada cámara existen 8 separadores, como son dos cámaras se tiene 16 arandelas, por lo que la masa total de estos es:

$$M_t = 0.750 \text{ kg} * 16 \text{ separadores}$$

$$M_t = 12 \text{ kg}$$

En la sección 6.5 se diseñó el perno que atraviesa los martillos y los discos para sujetarlos, su masa fue obtenida experimentalmente por medio de una balanza electrónica.

En cada cámara existen 4 pernos, como son dos cámaras se tiene 8 pernos, por lo que la masa total de estos es:

$$M_t = 0.5 \text{ kg} * 8 \text{ pernos}$$

$$M_t = 4 \text{ kg}$$

La masa del eje de la primera cámara fue obtenida experimentalmente por medio de una romana, su masa es de 8 kg, y la masa del eje de la segunda cámara es de 10 Kg.

Las tuercas para cada eje pesan 1Kg cada una, como son 2 la masa total de estas es de 2kg.

La ilustración 34, muestra los componentes diseñados y pesados

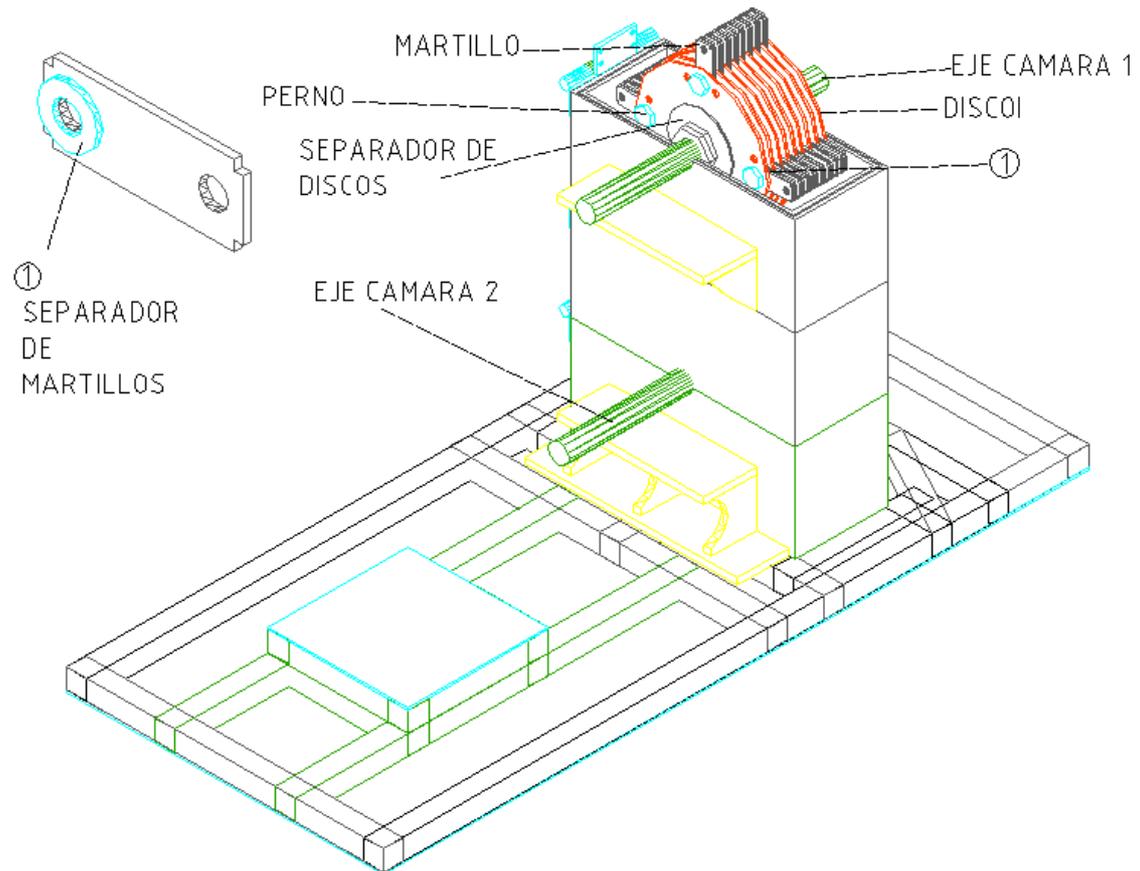


Ilustración 34: Gráfica de las Partes del Molino

Con todos los pesos obtenidos, se puede obtener el peso total del molino. Como se observa en la tabla 5.

<i>Pieza</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Masa_u kg</i>	<i>Masa_T kg</i>
<i>Martillos</i>	128	0.152	19.5
<i>Sep. Martillos</i>	64	0.016	1.06
<i>Discos</i>	18	4	72
<i>Sep. Discos</i>	16	0.750	12
<i>Pernos</i>	8	0.5	4

Eje 1^{ra} Cámara	1	8	8
Eje 2^{da} Cámara	1	10	10
Tuerca de Ejes	2	1	2
Total			128.5

Tabla 5: Masa Total de los Componentes Internos del Molino

6.9. Masa de los Componentes Internos y Externos del Molino

En la tabla 6, se muestra la masa aproximada de todos los componentes internos y externos del molino:

Pieza	Cantidad	Masa_u kg	Masa_T kg
Chumacera	4	4	16
Matrimonio	1	1	1
Motor	1	227	227
Base	1	91	91
Paredes	16	8	136
Molino	1	125.46	125.46
Poleas	2	2	4
Total			600

Tabla 6: Masa Total de Molino con Todos sus Componentes

6.10. Cálculo de la Inercia del Molino

El cálculo de la inercia del molino, se lo hace para poder saber si una vez escogido el motor del molino el torque del mismo podrá mover a todos los componentes internos del molino.

Si la masa total del molino calculada anteriormente la traducimos en un disco mediante la fórmula 17 antes descrita, obtenemos:

$$P_m = V * P_e \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde \rightarrow V = Volumen del Disco

$$P_e = \text{peso específico del acero (7850 kg/m}^3\text{)}$$

Si descomponemos el Volumen y lo reemplazamos en la ecuación 17, obtenemos:

$$P_m = A * e * P_e$$

Donde \rightarrow A = Área del disco con $r = 0.25m$

e = espesor del martillo

P_m = Masa de los componentes internos del molino

Despejando el espesor (e) del disco, y reemplazando todos los valores obtenemos el siguiente valor:

$$e = \frac{P_m}{P_e * A}$$

$$e = \frac{125.46kg}{7850 \frac{kg}{m^3} * \pi * (0.25)^2 * m^2}$$

$$e = 0.082m = 8.2cm = 82mm$$

El disco antes calculado es equivalente a la masa de todos los componentes internos del molino, y queda de la forma que se muestra en la ilustración 35.

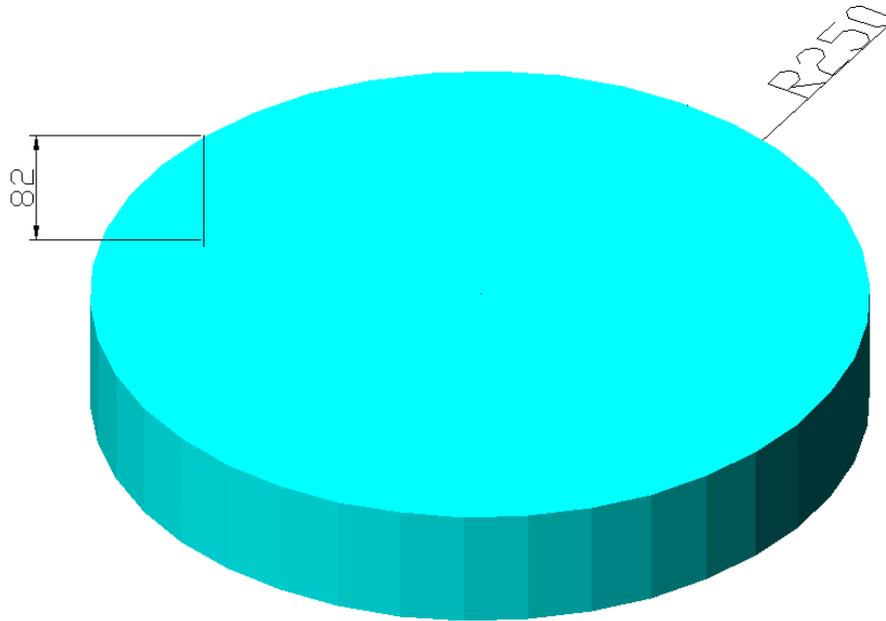


Ilustración 35: Configuración del Disco equivalente a la Masa del Molino

Calculada las dimensiones del disco, se puede obtener la Inercia que este disco posee y que es equivalente a la inercia del molino.

El momento de inercia de un disco se obtiene mediante la fórmula 27, que es la siguiente:

Ecuación 27: Inercia del Disco

$$I_d = \frac{1}{2} m * r^2 \quad (\text{Hibbeler , 384})$$

Donde → m = masa del disco

r = radio del disco

Remplazando los valores se tiene:

$$I_d = \frac{1}{2} (126.4 \text{ kg}) * (0.25)^2 \text{ m}^2$$

$$I_d = 3.95Kg$$

6.11. Determinación de la Potencia del Motor

Para la determinación de la potencia del motor se utiliza la ecuación de Rittinger para molienda. Esta ecuación es buena para aproximación en molienda fina, que es el requerido para harina.

La ecuación de Rittinger es la siguiente:

$$\frac{P}{C} = K_r \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (\text{Fundamento de las operaciones con Sólidos})$$

Ecuación 28: Ecuación de Rittinger

Donde $\rightarrow D_1 =$ Diámetro del trigo antes de la molienda (cm).

$D_2 =$ Diámetro del trigo después de la molienda (cm).

$K_r =$ Constante de Rittinger [H.P. h. cm./ Kg.]

$P =$ Potencia del Motor (HP).

$C =$ Capacidad de Molienda.

El diámetro inicial antes de la molienda fue calculado experimentalmente con una muestra de 20 granos.

$$D_{promedio} = \frac{\text{ancho} + \text{espesor} + \text{largo}}{3}$$

$$D_{promedio} = \frac{2mm + 2mm + 6mm}{3}$$

$$D_{promedio} = 8mm = 0.8cm$$

El diámetro final, es el requerido para harina, que en este caso es de 0.05cm.

$$K_r = 8.3081 * 10^{-3} \text{ (E.P.N, 45).}$$

Remplazando los valores en la ecuación 25 tenemos:

$$\frac{P}{1000 \frac{kg}{h}} = 8.3081 * 10^{-3} \left(\frac{1}{0.05} - \frac{1}{0.8} \right)$$

$$P = 15.58 \text{ HP}$$

Este valor nos indica que necesitamos alrededor de 16 HP, para moler 1000 kg/h.

Se ha seleccionado por facilidad de adquisición un motor de 30 HP, que girará a 3600 rpm.

6.11.1. Torque del Motor

El torque del motor se lo calcula mediante la ecuación 30, que es la siguiente:

Ecuación 29: Torque del Motor

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (\text{Gere , 222})$$

Donde → P = Potencia [W]

ω = Velocidad Angular del Eje ($\frac{rad}{s}$)

T = Torque o Momento Torsor (N.m)

$$P = 30\text{HP} \rightarrow 22371\text{W}$$

$$\omega = 3600\text{rpm} \rightarrow 377 \frac{rad}{s}$$

Remplazando valores se obtiene:

$$T = \frac{22371\text{W}}{377 \frac{rad}{s}}$$

$$T = 59.34\text{N.m}$$

Ahora, si se realiza la siguiente operación:

$$T = \# \text{ de martillos} * F_c * r_g$$

Reemplazando datos tenemos:

$$T = 64 * 2.2N * 0.25m$$

$$T = 35.2 \text{ N.m}$$

Nota: El valor obtenido del torque, es suficiente para mover la inercia del molino anteriormente calculada y mantener su velocidad al estar sometido a los esfuerzos de corte.

6.12. Selección de Rodamientos

Para la selección de rodamientos de los dos ejes, se utiliza la fórmula 30, que es la siguiente:

Ecuación 30: Clasificación de Catálogo

$$C_{10} = F_d \left(\frac{L_d * n_d * 60}{L_R * n_d * 60} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (\text{Shigley, 703})$$

Donde \rightarrow F_d = Carga de Diseño

N_d = Velocidad Angular de Diseño.

$L_R * n_d * 60 = 10^6$ Parámetro de la Compañía SKF.

$a = 3$, Para Rodamientos de Bola.

Vida útil = 240 días/año por 5 años \rightarrow $L_d = 9600$ horas.

Nota: El parámetro de 240 días es porque se espera trabajar 20 días al mes.

$$C_{10} = 313N \left(\frac{9600 \text{ horas} * 3600 \text{ rpm} * 60}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_{10} = 3.986kN$$

Nota: El valor de 313N es el valor que soporta cada rodamiento y se lo obtiene sumando los componentes que soporta el eje, de la siguiente forma.

<i>Pieza</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Masa_u kg</i>	<i>Masa_T kg</i>
<i>Martillos</i>	54	0.156	8.4
<i>Sep. Martillos</i>	32	0.016	0.51
<i>Discos</i>	9	4	36
<i>Sep. Discos</i>	8	0.750	6
<i>Pernos</i>	4	0.5	2
<i>Eje 2^{da} Cámara</i>	1	10	10
<i>Tuerca del Eje</i>	1	1	1
<i>Total</i>			63.91

Tabla 7: Masa de un Eje con sus Componentes.

El valor de 63.91 multiplicado por $9.8m/s^2 = 626.3N$. Como son dos rodamientos se lo divide para 2 los que da: **313N**.

Los efectos dinámicos son despreciables, ya que los componentes internos del molino están completamente alineados y balanceados.

La posición de los rodamientos, así como la de las fuerzas, se lo puede ver en la ilustración 36.

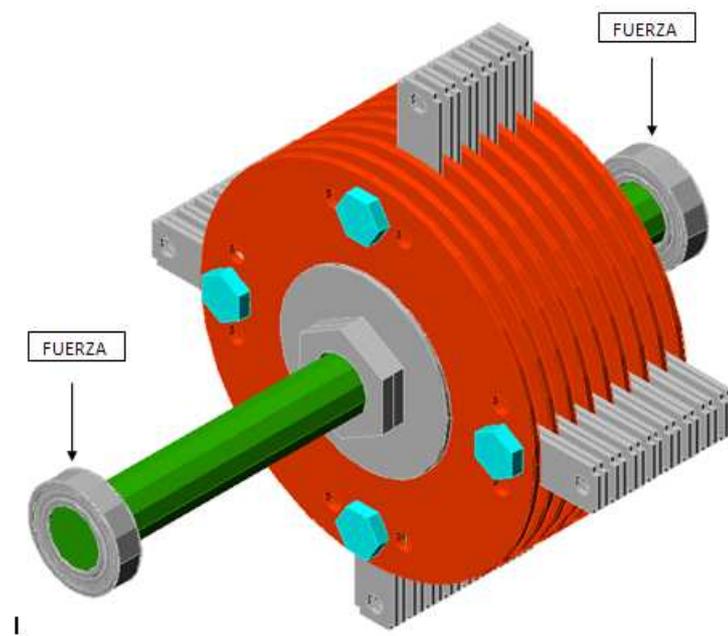


Ilustración 36: Carga sobre Rodamientos

Con el valor obtenido de 3.986kN, y la tabla 11.2 de Shigley, se escoge un rodamiento serie 2 de:

$D_i = 50\text{mm}$.

$D_e = 90\text{mm}$.

Ancho = 20mm

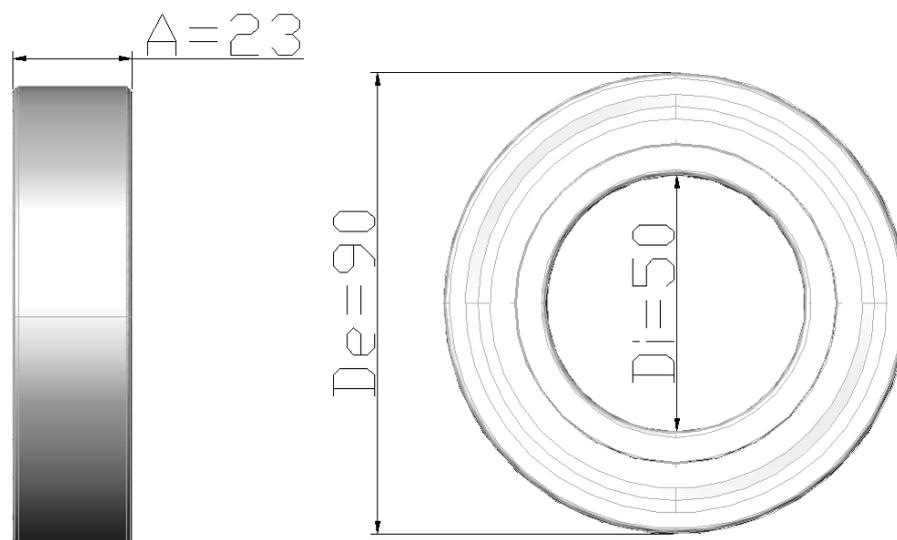


Ilustración 37: Dimensiones del Rodamiento

Estos rodamientos tienen un C_{10} de 35.1kN, por lo que es mucho mayor al requerido.

La ilustración 38, muestra el rodamiento escogido, con sus partes internas:

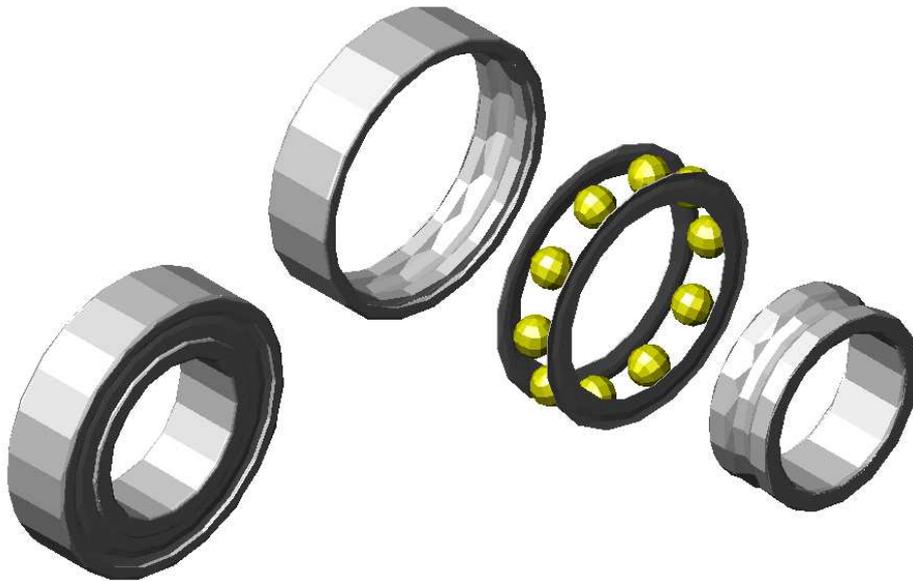


Ilustración 38: Vista Interna del Rodamiento

6.13. Número de Bandas.

Para seleccionar la banda se necesita primero el valor de la potencia de diseño, que se calcula de la siguiente manera:

$$P_d = P_m * F_s \quad (\text{E.P.N, 53})$$

Ecuación 31: Potencia de Diseño

Donde $\rightarrow F_s =$ Factor de servicio

$P_m =$ Potencia del Motor

El factor de servicio se escoge del Anexo 10. (Este anexo ha sido tomado del manual para bandas de Good Year).

$F_s = 1.3$, para trabajo normal.

Remplazando datos se tiene:

$$P_d = 30 \text{ HP} * 1.4$$

$$P_d = 39 \text{ HP}$$

El tipo de banda seleccionada es:

→ Forma en V, tipo A45 (Este tipo A45 de banda, se lo encuentra sin problema en el mercado nacional)

→ 3600 rpm

→ 39 HP

→ Banda tipo A

Para obtener el número de bandas se utiliza la fórmula 32, que es la siguiente:

Ecuación 32: Número de Bandas

$$\# \text{ de bandas} = \frac{P_d}{\text{HP por banda} * f_c} \quad (\text{E.P.N, 54})$$

Donde → P_d = Potencia de Diseño.

f_c = Factor por Corrección de Arco.

HP por banda = HP que transmite cada banda.

El factor de corrección de arco ha si tomado de la tabla 2, que se encuentra en el anexo 11. (Este anexo ha sido tomado del manual para bandas de Good Year).

Este factor es una medida que corrige errores de arco en la polea y bandas, y es determinado por: el valor y la frecuencia de las cargas picos, número de horas operados por año y la categoría de servicio (intermitente, normal o continua). Este valor es dado por los fabricantes de acuerdo a la banda requerida y al trabajo que esta realizará.

Remplazando valores se tiene:

$$\#de\ bandas = \frac{39HP}{5.42HP/banda * 0.92}$$

$$\#de\ bandas = 7$$

6.14. Dimensión de Poleas

El eje de la segunda cámara es el que está conectado por medio de un matrimonio al eje del motor. Por medio de las poleas y bandas se va a transmitir la misma velocidad del motor al eje de la primera cámara. Por lo tanto los 3 ejes (motor y 2 cámaras) girarán a las mismas 3600 rpm. En el anexo 12 (Este anexo ha sido tomado del manual para bandas de Good Year), se obtiene que el diámetro mínimo recomendado para la polea es:

<i>Motor (HP)</i>	<i>Motor (r.p.m)</i>	<i>Diámetro Mínimo (Pulgadas)</i>
30	3600	4.5

Tabla 8: Diámetro de la Polea

Como tiene una relación de velocidad de 1, el diámetro de la polea de la primera cámara será también de 4.5 pulgadas.

6.15. Componentes Extras

6.15.1. Base del Molino

La base del motor ha sido construida con acero UPN de acero al carbono. Todas las partes de la base del molino han sido soldadas con electrodo 7018.

Las dimensiones de la base, se encuentran en el anexo 13

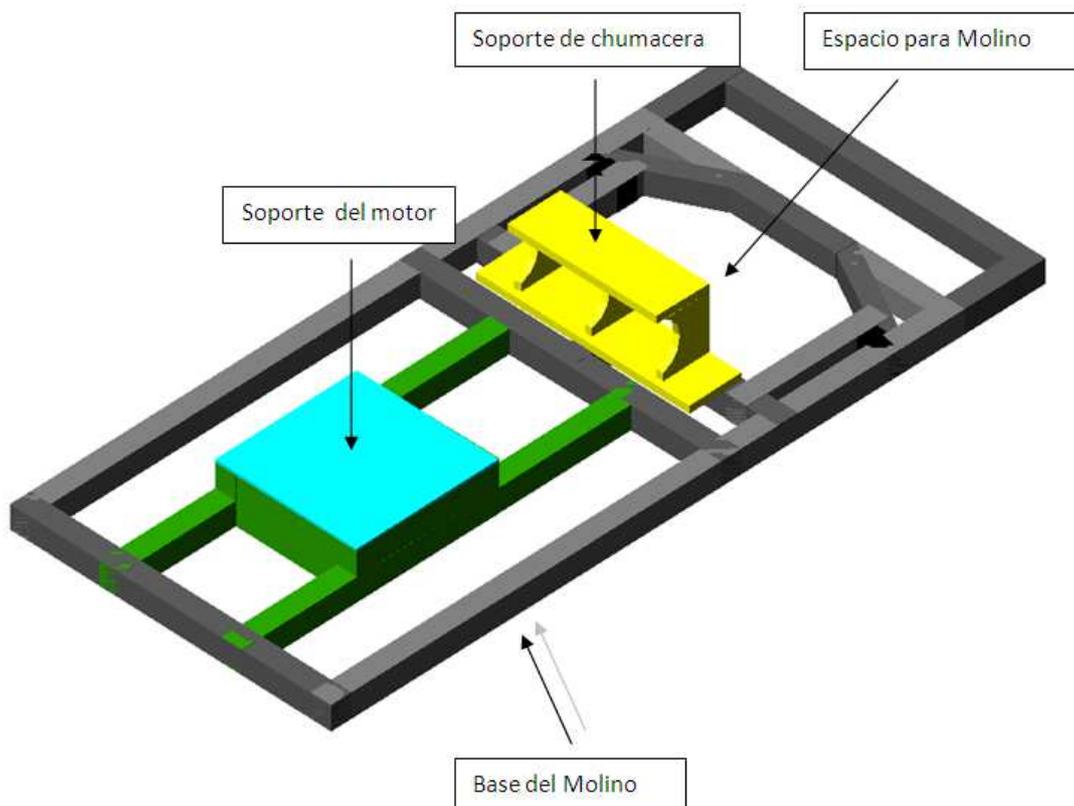


Ilustración 39: Base de Molino

Nota: Debido a las vibraciones que va a tener el molino, se colocará 4 cauchos en cada esquina, de 10 cm de alto y 5 cm de diámetro. Con esto se atenuarán las vibraciones.

6.15.2. Paredes del Molino

Las paredes del molino han sido construidas con acero ASTM A-36. Las Especificaciones de este material están en el Anexo 14. Para la

dimensión final tanto de largo, ancho y altura de las paredes se tomó en cuenta la medida de las cámaras armadas, es decir, se armó los ejes con sus discos martillos y demás componentes y ha esa medida se aumentó 3 cm para ancho y largo, porque como se ha mencionado anteriormente, las paredes también ayudan a la trituración del grano, es por eso que, se necesita que estas estén lo más cerca a los martillos.

En los anexos 15, 16, y 17, se encuentran los planos de las paredes para entender de mejor forma. Las paredes laterales son de un grosor de 5/8 de pulgada, mientras que las frontales son de 1 pulgada.

Todas las paredes han sido unidas mediante pernos, para tener la facilidad de desmontar cuando se haga mantenimiento preventivo en la máquina. El polvo generado por la molienda no tiene por donde fugar, ya que las paredes se encuentran muy bien unidas, en todo caso si existiera una mínima fuga, esta es imperceptible.

El Costo promedio del molino se encuentra en el Anexo 18.

7. CONSTRUCCIÓN DEL MOLINO

7.1. Antecedentes

En este capítulo se detallará con palabras y con fotografías cada paso que se realizó para la construcción del molino. Como se cortaron las planchas?, Que piezas se tornearon?, Cuales se rectificaron?, etc, para de esta manera tener una idea más precisa del trabajo práctico realizado.

7.2. Construcción y Ensamblaje de las Piezas

Una vez que se ha determinado las dimensiones de cada parte del molino y simulado en Katia, se procedió a maquinar las partes.

Las primeras piezas que se maquinaron fueron los *martillos*. Una vez comprada la plancha de acero inoxidable AISI 304 de 4mm de espesor, se procedió a cortar los martillos con las dimensiones estipuladas en los planos, por medio de una cortadora hidráulica. Después se procedió hacer los filos de 5mm con una sierra, para posteriormente realizar los agujeros de radio 10mm con torno. Realizado todo el trabajo anterior el martillo quedó como se muestra en la ilustración 40:



Ilustración 40: Martillo Maquinado

El siguiente paso fue maquinar los *Discos*. Una vez comprada la plancha de acero inoxidable AISI 304 de 6mm de espesor, se procedió a cortar los discos con las dimensiones estipuladas en los planos, por medio de oxicorte. Los agujeros de los pernos porta martillos, así como el del eje, fueron realizados con broca. La rebaba producto del maquinado en torno, se pulió con una pulidora de mano. Una vez maquinado el disco, quedó como se muestra en la ilustración 41.



Ilustración 41: Disco Maquinado

El siguiente paso fue maquinar los *Pernos porta Martillos*. Una vez comprado un eje de acero inoxidable AISI 304 de 1 pulgada de diámetro, se procedió a cortar los pernos con las dimensiones estipuladas en los planos. El diámetro se lo redujo en torno, hasta que tenga un diámetro de 9/16 de pulgada. Realizado esto, se procedió a maquinar la rosca, con paso fino, 2mm. Las tuercas para estos pernos

fueron compradas en acero inoxidable. El resultado final después del maquinado se ve en la ilustración 42.



Ilustración 42: Perno porta Martillos Maquinado

El siguiente paso fue maquinar los *Ejes del Molino*. Una vez comprado un eje de acero inoxidable AISI 304 de 2 pulgadas de diámetro, se procedió a cortar los ejes con las dimensiones estipuladas en los planos. El diámetro de los ejes se los redujo en torno, hasta que tenga las medidas exactas. Realizado esto, se procedió a maquinar la rosca donde se enroscará la tuerca que ajusta a los discos. La rosca es de paso fino. Las tuercas para estos pernos fueron maquinados en acero inoxidable en torno. Los chaveteros de los ejes fueron realizados en fresadora. En la ilustración 43 se ve el resultado final una vez maquinado los ejes, y chavetas.



Ilustración 43: Eje Maquinado



Ilustración 44: Rosca, Chavetero y Chaveta del Eje

El siguiente paso fue maquinar las *Arandelas de Separación de Martillos, tuercas de los Ejes y Separadores de Discos*. Una vez comprada la plancha de acero inoxidable AISI 304 de 3mm, y los ejes para las tuercas, se procedió a maquinar los diámetros de las piezas en el torno, la rebaba producto del torneado se pulió con una pulidora de mano. El maquinado de las piezas produjo el resultado que se muestra en las ilustraciones 45,46, 47.



Ilustración 45: Arandela Maquinada



Ilustración 46: Separador de Discos Maquinado



Ilustración 47: Tuerca del Eje Maquinada

El siguiente paso fue ensamblar las piezas maquinadas, como se muestra en la fotografía en las ilustraciones 48 y 49.



Ilustración 48: Ensamblaje de las Masas.



Ilustración 49: Masas Ensambladas

Una vez maquinadas las masas de las dos cámaras, se procedió a cortar las paredes del molino con oxicorte y as rebabas producto del corte, fueron retiradas con pulidora de mano, como se muestra en las ilustraciones 50 y 51 respectivamente.



Ilustración 50: Corte de las Paredes con Oxicorte



Ilustración 51: Paredes Pulidas

Una vez cortadas se procedió hacer los huecos de 5/8 pulg para los pernos. Se decidió empernar las paredes y no soldarlas, para poder desarmarlas y de esta manera hacer un mantenimiento preventivo de las piezas internas. Además, esto permitirá cambiar fácilmente los martillos una vez que estos estén desgastados.



Ilustración 52: Ensamble de las Paredes

La platina de 7mm de espesor donde irán asentados los tamices, fueron soldados a las paredes del molino con electrodo X99, que es propio para acero inoxidable.



Ilustración 53: Soldada de la Platinas con Electrodo X99



Ilustración 54: Paredes Ensambladas

Después se procedió a hacer la base del molino. Como se dijo anteriormente, la base del motor ha sido construida con acero UPN de acero al carbono y soldado con electrodo 7018.



Ilustración 55: Base del Molino

Nota: La base, así como también las paredes del molino y demás componentes externos, fueron pintadas en una cámara de pintura electrostática.



Ilustración 56: Cámara de Pintura Electrostática

Después se procedió a maquinar las poleas del molino en torno, con las dimensiones especificadas en el plano.

Los componentes extras como: chumaceras, matrimonio para la unión de los ejes y bandas fueron comprados.

Con todos los componentes tanto maquinados como comprados se procedió al ensamble del molino.



Ilustración 57: Chumacera SKF



Ilustración 58: Matrimonio para Unión de Ejes

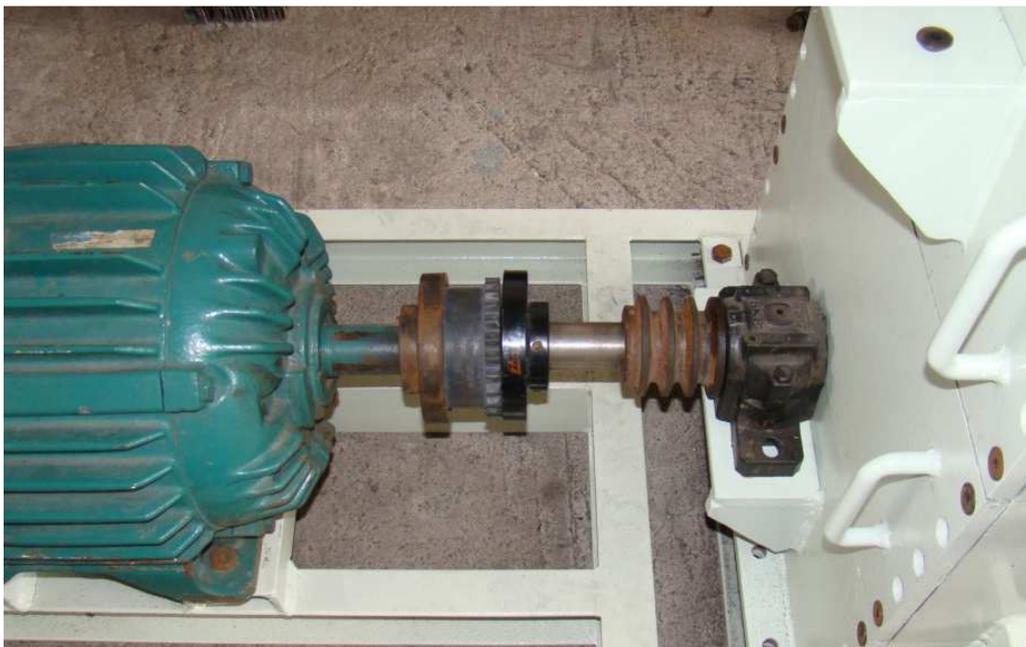


Ilustración 59: Eje del Motor y del Molino, unidos mediante Matrimonio

Nota: En la ilustración 59, se puede observar que la polea es para tres bandas, en el espacio de a lado irá la otra polea para las 4 bandas restantes.



Ilustración 60: Poleas y Bandas del Molino

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- El molino está diseñado para ser implementado en pequeñas y medianas empresas, por que su capacidad de molienda es moderada.
- El molino está apegado a las normas internacionales de alimentos, por que ha sido construido con acero inoxidable A 304.
- En el diseño del molino se ha tratado de optimizar al máximo el tamaño del mismo, para que al momento de instalarlo con todos los demás componentes que tiene el molino como: tolva, aspirador de harina, empaquetadora no requiera un espacio físico grande.

8.2. Recomendaciones

- Para que la productividad y rendimiento del molino no disminuya, se recomienda estar atento al desgaste de los componentes internos, principalmente de los martillos.
- Se recomienda hacer un mantenimiento preventivo, principalmente con lo referente a bandas y engrase de los rodamientos.
- Para que no exista sobrecarga de granos en las cámaras, hay que implementar un dosificador después de la tolva.
- Cada semana hay que hacer una limpieza de los tamices de las dos cámaras, para que el material triturado fluya constantemente y sin problemas.
- Se recomienda estar atento al desgaste de las piezas internas del molino, ya que esto puede provocar que el molino se desalíe o desbalance produciendo daños.
- Los operarios del molino deben trabajar con protectores auditivos, ya que el ruido que produce el motor supera altísimamente los valores estipulados para el ser humano, lo que puede provocar serios problemas auditivos

- Si por cualquier razón se necesita detener y abrir el molino, hacerlo después de que este se encuentre completamente en reposo, el contacto de cualquier parte humana con los martillos en movimiento puede causar una lesión grave.

9. MATERIAL DE REFERENCIA

9.1. Bibliografía

- Gere, James M. Mecánica de Materiales. México: Thomson, 2002.
- Hibbeler, R. C. Mecánica Vectorial para Ingenieros: Dinámica. México: Pearson, 2004.
- Ramp, Ricardo. Tecnología y Producción de Harinas de Trigo. Quito, 1976.
- Shigley, Joseph E. El Diseño en Ingeniería Mecánica. México: McGraw-Hill, 2005.
- Shigley, Joseph E. El Proyecto en Ingeniería Mecánica. México: McGraw-Hill, 2005.
- Garzón, Edwin. Tesis. Quito: E.P.N, 1987.
- Fundamentos de las operaciones con sólidos.
www.slbn.files.wordpress.com/2008/10/iii-unidad_op-mec_problemas_leyes_rt.ppt. (9 dic 2008).
- 10 de Enero de 2009
<http://olmo.pntic.mec.es/~jpag0004/resena.htm#arriba>.
- 10 de Enero de 2009
<http://www.quiminet.com/pr8/Martillo%2Bde%2BReflejos.htm>.
- 10 de Enero de 2009 www.fam.de/generator/streamjpeg.php?res=flwid.

