

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOLINO
TRICILÍNDRICO PARA LA MOLIENDA DE PINTURA AL ÓLEO
COMPONENTE: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE
TRANSMISIÓN DE UN PROTOTIPO DE MOLINO TRICILÍNDRICO
PARA LA MOLIENDA DE PINTURA AL ÓLEO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

MARCOS ALEXANDER CHANGOLUISA RECALDE

marcos.changoluisa@epn.edu.ec

DIRECTOR: WILSON IVÁN GUACHAMIN ACERO

wilson.guachamin@epn.edu.ec

DMQ, marzo 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Marcos Alexander Changoluisa Recalde declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

MARCOS ALEXANDER CHANGOLUISA RECALDE

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARCOS ALEXANDER CHANGOLUISA RECALDE, bajo mi supervisión.

WILSON IVÁN GUACHAMIN ACERO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MARCOS ALEXANDER CHANGOLUISA RECALDE

PAOLA CAROLINA OÑA VEGA

CARLOS ANDRÉS GUAPI SÁNCHEZ

DEDICATORIA

A Dios, por darme sus fuerzas en todos los momentos que pensé caer y abandonar mis sueños, y mostrarme que podía dar aún más, en lo personal y académico.

A mis padres, Marco Changoluisa y Luz Recalde, quienes han estado a mi lado apoyándome permanente.

A mis hermanos, Jhon Changoluisa y Gael Changoluisa, por brindarme su apoyo a través de su cálido cariño.

AGRADECIMIENTO

Agradeceré toda mi vida a Dios, por cada empujón de superación, por estar presente en todo momento de contrariedad emocional. Además, por permitirme ser parte de una familia con un amor inmensurable.

A Marco Changoluisa, por confiar en mí y estar siempre al pie del cañón en cualquier proyecto en el que me involucrara, al punto de ignorar su cansancio por estar conmigo. También a Luz Recalde, por mostrarme todas las virtudes que me costaba ver de mí, por creer constantemente en su hijo e impulsarme a enfrentar desafíos llenos de crecimiento, los cuales me han permitido desarrollar muchas habilidades y conseguir buenas oportunidades.

A mis padres, por nunca atarme, más bien darme la libertad de enfrentar el mundo por mi cuenta, sin dejarme solo. Les agradezco por los valores que impartieron en mí; me han permitido ser una persona de bien, con la aspiración de aprovechar todo lo que Dios me ha dado para conseguir el bien de los demás. Por el ideal que sembraron en mí de siempre buscar un ritmo de vida que me haga feliz, donde pueda hacer lo que me gusta con pasión y con la visión de impactar positivamente en todo lugar al que vaya.

Al Ing. Wilson Guachamin, por su valioso acompañamiento e interés en el desarrollo de este proyecto, pues nos brindó todo su conocimiento para que resulte de la mejor forma.

A mis compañeros de TIC, Paola Oña y Carlos Guapi, por esa gran entrega al proyecto en todo momento, ya que incluso cuando todos nos dijeron que no lo hagamos, que no lo lograríamos, ustedes me acompañaron y dijeron: “¡Hagámoslo!”

A Dayanna Molina, mi fuente de inspiración en momentos en los que creí que no podría superar un problema; por cada abrazo y sonrisa que reavivaban mi espíritu, incluso cuando estaba apagado, y por enseñarme que siempre hay tiempo para lo que uno desea.

A todos los amigos que hice en la EPN, con especial mención a: Paola Oña, Allison Tipan, Dayanara Burbano y Sebastián Macías. Me llevo memorias simbólicas junto a ustedes, que tuvieron lugar a lo largo de nuestro paso por esta prestigiosa universidad.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN, por el constante respaldo brindado de cada autoridad, profesor y personal administrativo. Me llevo valiosas lecciones de cada uno de ellos, lecciones que me impulsarán a dar siempre lo mejor para convertirme en una gran persona y profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Pintura al óleo	3
1.4.2 Componentes	3
1.4.3 Etapas de producción	4
1.4.4 Tecnologías de molienda	4
1.4.5 Fundamentos técnicos	6
1.4.5 Benchmarking	12
2 METODOLOGÍA	14
2.1 Casa de la calidad.....	14
2.2 Especificaciones Técnicas.....	17
2.3 Análisis funcional	19
2.4 Alternativas de solución	21
2.4.1 Módulo 1: Transmisión de potencia	21
2.4.2 Módulo 2: Separación de rodillos.....	24
2.5 Solución virtual.....	27
2.6 Selección del motor.....	28
2.7 Diseño de componentes mecánicos	30
2.5.1 Dimensionamiento de engranajes	30
2.5.2 Diseño de ejes.....	32
2.5.3 Selección de rodamientos.....	43

2.5.4 Selección de chavetas	44
2.5.5 Diseño de engranajes para fatiga por flexión y picadura	45
2.8 Costos de fabricación.....	45
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
3.1 Discusión de resultados de diseño	47
3.1.1 Diseño de engranajes	48
3.1.2 Diseño de ejes.....	48
3.2 Pruebas	49
3.2.1 Integración de componentes.....	49
3.2.2 Protocolo de pruebas	51
3.3 Conclusiones.....	56
3.4 Recomendaciones	57
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
5 ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

Una buena incursión de la producción de pintura al óleo en el mercado nacional requiere de una máquina capaz de optimizar su obtención sin comprometer la calidad del producto. En este proyecto se diseña y construye un prototipo de molino tricilíndrico para la molienda de pintura al óleo de la empresa Óleos América. El presente Trabajo de Integración Curricular se enfoca específicamente en el diseño y construcción del sistema de transmisión del molino.

Se seleccionó un motor trifásico WEG de $\frac{1}{4}$ [hp] con rotación nominal de 1800 rpm, que luego de acoplarse a un reductor de velocidad entrega 90 rpm al eje motriz. La transferencia de potencia se da a través de engranajes rectos fabricados en acero 705 templado. En total, se fabricaron 4 engranajes con ancho de cara de 15 [mm] y módulo 1.5 [mm], dos con 22 dientes y dos con 65 dientes. Estos engranajes están dispuestos de manera que un engranaje pequeño se conecta a uno grande para alcanzar velocidades de giro de 30.2, 90.8 y 267.1 rpm para cada rodillo.

Los ejes de transmisión, fabricados en acero inoxidable 304, forman un cuerpo único con cada uno de los rodillos. Para regular la separación entre rodillos se utilizan perillas de precisión en 4 apoyos.

Los resultados de este trabajo permiten la distribución adecuada de potencia a los rodillos del molino, asegurando así una molienda eficiente de la mezcla de aceite y pigmentos, por tanto, la obtención de una pintura de calidad para sus diferentes aplicaciones.

PALABRAS CLAVE: transmisión, molienda, precisión, fabricación, montaje, pruebas.

ABSTRACT

A high-quality oil paint requires a machine capable of optimizing production without compromising product quality. In this project, a prototype of a three-cylinder milling machine is designed and build for grinding oil paint for the "Óleos América" company. This project focuses on the design and construction of the mill's power transmission system.

A $\frac{1}{4}$ [hp] three-phase WEG motor with a nominal rotation of 1800 rpm is selected. After coupling to a gearbox, it delivers 90 rpm to the drive shaft. Mechanical power is transferred using spur gears made of 705 tempered steel. In total, four gears with a face width of 15 [mm] and 1.5 [mm] module are used: two with 22 teeth and two with 65 teeth. These gears are arranged so that a small gear is connected to a large one to achieve rotational speeds of 30.2, 90.8, and 267.1 rpm for the rollers.

The transmission shafts, made of 304 stainless steel, form a single body with each of the rollers. Precision knobs are used on four supports to control the separation of the rollers.

Results of this work enable the proper distribution of power to the mill rollers. This ensures efficient grinding of the oil and pigment mixture, which is necessary to obtain the production of quality paint for various applications.

KEYWORDS: transmission, grinding, precision, manufacturing, assembly, testing.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El diseño y construcción de un prototipo de molino tricilíndrico nace de la necesidad de la empresa Óleos América de tener una máquina capaz de generar pintura al óleo de consistencia homogénea en un sistema simple (de pequeñas dimensiones), buscando que el esfuerzo del operario se reduzca significativamente, sin comprometer la calidad; que no requiera un gran espacio para la instalación de la máquina y no genere un elevado consumo energético ni de inversión.

El desarrollo de este proyecto contempla el diseño y construcción del mecanismo de transmisión de potencia, que permita a unos rodillos de molienda aplicar el torque necesario para triturar la mezcla de pigmentos con aceites y así obtener una pintura homogénea. Para esto es necesario llevar a cabo las siguientes actividades:

- Sistema de transmisión de potencia; una comparación entre cada uno destacando sus virtudes.
- Benchmarking de los sistemas de transmisión usuales en máquinas destinadas a este fin, junto con otros mecanismos de molienda.
- Especificación de elementos mecánicos, que se ajusten a los requerimientos del cliente, en particular, para satisfacer una relación de transmisión de 1/3 de un rodillo a otro.
- Estudio de fuerzas, donde se describirá las distintas fuerzas que afectan al mecanismo, asegurando así que la transmisión satisfaga las necesidades correspondientes.
- Diseño de elementos mecánicos.

Estos aspectos comprenden un análisis de alternativas que permite seleccionar el mejor sistema de transmisión. Para la alternativa seleccionada se dimensiona los componentes mecánicos y se selecciona aquellos que son normalizados. Consecuentemente, se realizan los planos de subconjunto y taller, para dar paso a la construcción del sistema de transmisión y su ensamblaje en la máquina.

1.1 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de transmisión de potencia para rodillos en la molienda de la mezcla de pigmentos y aceites que conforman la pintura al óleo.

1.2 Objetivos específicos

1. Describir el proceso de producción de la pintura al óleo, sus componentes e importancia actual.
2. Establecer alternativas de sistemas de transmisión que se ajusten a los requerimientos del cliente.
3. Realizar un análisis de cargas en los elementos mecánicos.
4. Dimensionar los elementos mecánicos con base en criterios de trabajo a fatiga.
5. Elaborar planos de conjunto, subconjunto y taller de todo el sistema diseñado.
6. Llevar a cabo un análisis de costos que tenga en cuenta el material usado y la manufactura de los elementos mecánicos.
7. Construir un prototipo que cumpla con el propósito deseado.

1.3 Alcance

El diseño y construcción del prototipo de un molino tricilíndrico comprende tres componentes, que son:

- Diseño del sistema de transmisión
- Diseño del sistema de molienda
- Diseño del sistema de refrigeración y control

El componente de “Diseño del sistema de molienda” y “Diseño del sistema de refrigeración” son estudiados por Oña, P. [1], y Guapi, C. [2], respectivamente; cuyos resultados son parte del desarrollo de este trabajo.

El presente proyecto abarca el diseño y construcción de un sistema de transmisión que permita el funcionamiento adecuado de la máquina.

1.4 Marco teórico

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica pertinente para contextualizar el diseño dentro de los principios fundamentales de la producción de pinturas al óleo y los procesos de molienda.

1.4.1 Pintura al óleo

La pintura de óleo es un tipo de pintura a partir de pigmento y aglutinantes a base de aceite vegetal. El término de pintura al óleo proviene del latín *óleum*, que significa aceite, puesto que esta pintura se basa en el uso de aceites para aglutinar y formar una pasta característica. La historia de la pintura al óleo se remonta al siglo VII, donde se evidencia su uso en murales y obras de arte en diferentes continentes. Sin embargo, se atribuye su invento a los hermanos Van Eyck en el siglo XV, quienes mejoraron la técnica al reemplazar los aceites vegetales usados anteriormente por aceite de linaza, nuez y trementina para estabilizar la mezcla y mantener su color por más tiempo. Desde entonces, se han dado diversos tipos de uso para este material, incluyendo obras en madera, lienzo, metal, tela, vidrio o cerámica, e incluso se han adecuado para interiores [3].

La pintura al óleo tiene un sinnúmero de ventajas y características favorables para su uso, empezando por su acabado, con superficies lisas o texturizados finos y gruesos. Gracias a la consistencia de esta pintura y sus características es posible corregir colores y texturas puestas por debajo y dar volumen como degradados. Además, permite dar brillo, suavidad y colores muy naturales por la cual es una pintura muy cotizada. Una característica importante es el tiempo en el que se demora en secar la pintura, que puede rondar entre 2 a 3 semanas, e incluso meses [3].

Cabe recalcar que, al ser una pintura a base de grasa, es incompatible con pinturas a base de agua como acrílicos y acuarelas. Además, esta misma textura hace que si la capa de la pintura es gruesa y no tiene un adecuado secado se corre el riesgo de agrietamiento, por esta razón, se debe trabajar por capas. Una posible desventaja es que con el tiempo se puede tornar amarillo con el tiempo cuando no se coloca un fijador adecuado para recubrir el óleo [4].

1.4.2 Componentes

En la antigüedad, la fabricación de óleo era casera y requería gran cantidad de tiempo. El material para su fabricación constaba de pigmentos en polvo y aceites vegetales. Los pigmentos provenían de plantas o minerales secados al sol que se trituraban en el mortero

y se mezclaban junto a aceites vegetales hasta conseguir la homogeneidad deseada. En la actualidad, se le adiciona un aditivo y su procesamiento es industrializado [4].

Existen dos tipos de materias a los cuales se atribuye el color: los pigmentos y los colorantes. Los pigmentos son partículas inorgánicas o sintéticas, insolubles en agua, que tienen color y cuerpo, y pueden dispersarse en aceite y formar suspensiones o emulsiones. Esta característica junto con el tamaño de la partícula son las responsables de la consistencia de las pinturas de óleo. Al contrario, los colorantes son sustancias orgánicas, solubles en el agua, que no tienen cuerpo y pueden teñir un medio a través de la absorción e inclusión mediante enlace químico con el medio [5].

Las pinturas de óleo hechas a base de colorantes tienen baja calidad, debido a que, al precipitar el colorante en una base, se forman pigmentos solubles en un medio, sin embargo, no tienen la misma capacidad de cubrimiento, y pueden ser semitransparentes. Además, estos colorantes son poco estables a la luz a diferencia de los pigmentos propios [5].

Los aceites vegetales de linaza y trementina son usados en la producción de pinturas. Los aditivos son escogidos en base a las características requeridas en el producto. Entre los aditivos más comunes se encuentran secantes, humectantes, espesantes o cremosos [5].

1.4.3 Etapas de producción

El procesamiento de la pintura consta de diferentes etapas, que van desde su pesaje, hasta el control de calidad. Como primer paso, se debe pesar el material a usar, como pigmentos, químicos, aditivos y aceites vegetales a usar. Luego, comienza el paso de mezclado de materiales. Para este paso es fundamental que la materia prima sea ingresada a la mezcladora en un orden preestablecido para garantizar homogeneidad. Después, se agita la mezcla procurando que no se formen grumos y se disperse el pigmento de manera homogénea en el medio. Por último, se realiza el control de calidad de la pintura, garantizando el color y consistencia de la pintura [6].

1.4.4 Tecnologías de molienda

Una buena pintura al óleo se destaca por su consistencia homogénea y las concentraciones adecuadas de pigmentos y aceites, que se consigue a través de una adecuada molienda. Existen dos métodos muy empleados en la actualidad; el manual o artesanal y mediante el uso de un molino de rodillos.

Molienda artesanal

Tradicionalmente, la molienda manual implica el uso de una muela de vidrio o porcelana llamada muller o mortero de vidrio, como se observa en la Figura 1.4.1. El artista coloca la mezcla de pigmento y aglutinante sobre una superficie plana, como una paleta de vidrio, y utiliza el mortero para moler y mezclar la pasta. Este proceso se realiza mediante movimientos circulares y de presión para lograr una dispersión uniforme de los pigmentos en el aceite. Otra herramienta generalmente usada en la molienda es la espátula, el procedimiento es el mismo, sin embargo, se aplica para cantidades de pintura aun menores, en consecuencia, sirve para preparar pintura que se ocupará instantáneamente y de la cual no se requiere mucha cantidad.



Fig. 1.4.1. Mortero de vidrio y espátula para amasar óleo.

Fuente: [1]

Molino de rodillos

La molienda con molinos de rodillos es un proceso que implica la trituración o reducción de partículas mediante la aplicación de fuerza entre dos rodillos giratorios. Este método es comúnmente utilizado en la industria para la producción de polvos finos o la reducción de tamaño de materiales. A continuación, se describe cómo funciona el proceso de molienda con molino de rodillos:

1. **Alimentación del Material:** La Figura 1.4.2 muestra que el material que se va a moler se alimenta entre los dos rodillos. Este material puede ser sólido, como granos en la industria alimentaria, pigmentos en la fabricación de pinturas, minerales en la industria minera, entre otros.
2. **Ajuste de la holgura:** La distancia entre los rodillos se puede ajustar para controlar el tamaño de las partículas resultantes, ver Figura 1.4.2. Un ajuste más estrecho entre los rodillos produce partículas más finas, mientras que una brecha más amplia produce partículas más gruesas.

3. **Compresión y Cizallamiento:** A medida que el material pasa entre los rodillos, se somete a fuerzas de compresión y cizallamiento. La compresión ocurre cuando el material es aplastado entre los rodillos, mientras que el cizallamiento se produce cuando las partículas individuales son cortadas o desgarradas por la acción de los rodillos.
4. **Fricción:** La rotación de los rodillos crea fuerzas de fricción que ayudan a romper las partículas y reducir el tamaño del material.
5. **Recirculación:** En algunos molinos de rodillos, el material puede recircularse para someterse a múltiples pasadas de molienda y mejorar la eficiencia del proceso.
6. **Recolección del Producto Molido:** Una vez que el material ha pasado a través de los rodillos y ha sido reducido a un tamaño deseado, se recoge como producto molido.

Los molinos de rodillos pueden tener una disposición de uno, dos o más pares de rodillos, dependiendo de la aplicación específica y de la finura deseada del producto final. Este método de molienda es eficiente para lograr tamaños de partícula uniformes y controlados.



Figura 1.4.2. Rodillos de molienda para pintura al óleo.

Fuente: Propia

1.4.5 Fundamentos técnicos

Para establecer el dimensionamiento de los diferentes componentes que van a conformar parte del sistema de transmisión, es importante revisar fundamentos para diseño mecánico.

Análisis de engranajes

Los engranajes son elementos mecánicos que pueden transmitir el movimiento y la potencia entre rodillos, y cuentan con diversas ecuaciones que permiten su estudio

cinemático y dinámico, tal como se observa en las Ecuaciones de la 1.4.1 a la 1.4.5. Varios de los parámetros asociados a la relación de transmisión se identifican en la Figura 1.4.3.

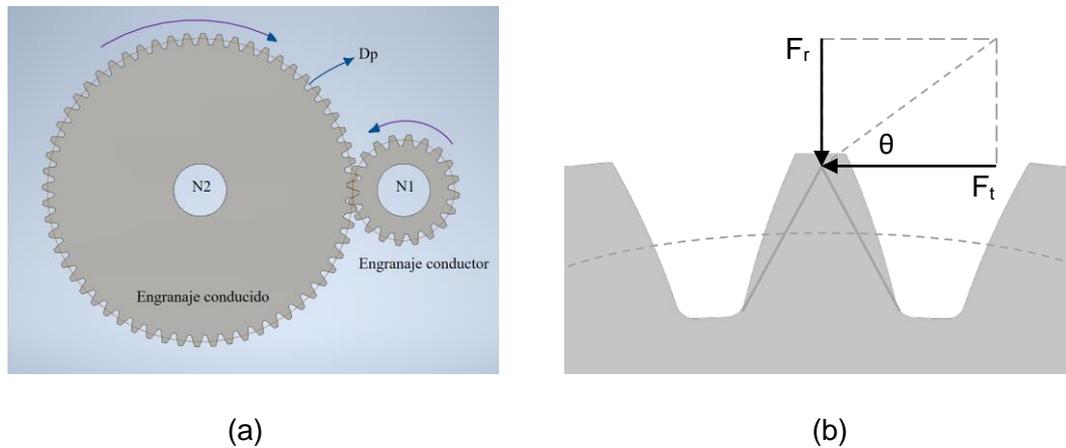


Figura 1.4.3. a) Transmisión por engranajes. b) Distribución de fuerzas en un engranaje recto.

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

Ecuación 1.4.1. Relación de transmisión entre engranajes

$$P = T\omega$$

Ecuación 1.4.2. Potencia mecánica

$$m = \frac{d_p}{N}$$

Ecuación 1.4.3. Módulo de un engranaje

$$F_t = \frac{P}{r\omega}$$

Ecuación 1.4.4. Fuerza tangencial en el diente de un engranaje

$$F_r = F_t \tan(\theta)$$

Ecuación 1.4.5. Fuerza tangencial en el diente de un engranaje

Donde:

i = Relación de transmisión

N = Número de dientes de un piñón

ω = Velocidad angular de un engranaje [rad/s].

T = Par de torsión.

d_p = Diámetro primitivo.

m = Modulo

F_t = Fuerza tangencial en el diente

F_r = Fuerza radial en el diente

θ = Ángulo de presión

Diseño de engranajes

La AGMA (American Gear Manufacturers Association) es una asociación comercial en los Estados Unidos que se enfoca en la industria de fabricación de engranajes. Empleando sus criterios se diseñará los engranajes para fatiga por flexión y picadura, mediante el uso de los modelos mostrados en las Ecuaciones 1.4.6 a la 1.4.9.

$$\sigma = W^t K_o K_v K_s \frac{1}{b m_t} \frac{K_H K_B}{Y_J}$$

Ecuación 1.4.6. Esfuerzo cuasi estático en un diente para fatiga por flexión (Unidades SI).

Fuente: [2]

$$\sigma_{all} = \frac{S_t Y_N}{S_F Y_\theta Y_Z}$$

Ecuación 1.4.7. Esfuerzo admisible en flexión (Unidades SI).

Fuente: [2]

$$\sigma_c = Z_E \sqrt{W^t K_o K_v K_s \frac{K_H Z_R}{d_{w1} b Z_I}}$$

Ecuación 1.4.8. Resistencia a la picadura (Unidades SI).

Fuente: [2]

$$\sigma_{c,perm} = \frac{S_C Z_N Z_W}{S_H Y_\theta Y_Z}$$

Ecuación 1.4.9. Esfuerzo de contacto permisible (Unidades SI).

Fuente: [2]

Donde:

b = Ancho de cara [mm]

d_{w1} = Paso diametral del piñón [mm]

σ_{all} = Esfuerzo admisible en flexión

S_C = Resistencia a la picadura

$\sigma_{c,perm}$ = Esfuerzo de contacto permisible

W^t = Fuerza tangencial que actúa sobre el diente [N]

Y = Factor de forma

K_o = Factor de sobrecarga

K_v = Factor dinámico

K_s = Factor de tamaño

K_H = Factor de distribución de la carga

K_B = Factor de espesor del aro

Y_J = Factor geométrico de resistencia a la flexión

m_t = Módulo métrico transversal

S_t = Resistencia a la flexión

S_F = Factor de seguridad

Y_θ = Factor de temperatura

Y_Z = Factor de confiabilidad

Z_E = Coeficiente elástico [$\sqrt{\text{MPa}}$]

Z_R = Factor de condición superficial

Z_I = Factor geométrico de resistencia a la picadura

Z_N = Factor de vida de ciclos de esfuerzos

Z_W = Factor de relación de durezas de resistencia a la picadura

S_C = Factor de resistencia al desgaste

S_H = Factor de seguridad en fatiga superficial

Diseño de ejes a fatiga

La Ecuación 1.4.4 permite calcular el diámetro de un eje (d) para trabajo a fatiga usando el criterio de Goodman Modificado, mientras que de la Ecuación 1.4.10 a 1.4.15 se muestra las expresiones para la verificación del factor de seguridad a fatiga en una sección de eje.

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

Ecuación 1.4.10. Diámetro bajo el criterio de Goodman modificado.

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a'}{S_e} + \frac{\sigma_m'}{S_{ut}}}$$

Ecuación 1.4.11. Factor de seguridad a fatiga bajo el criterio de Goodman modificado.

$$\sigma_a' = \frac{32 K_f M_a}{\pi d^3}$$

Ecuación 1.4.12. Esfuerzo alternante de von Mises para eje sólido.

$$\sigma_m' = \left[3 \left(\frac{16 K_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Ecuación 1.4.13. Esfuerzo medio de von Mises para eje sólido.

$$\sigma_a' = \frac{32 K_f M_a D}{\pi(D^4 - d^4)}$$

Ecuación 1.4.14. Esfuerzo alternante de von Mises para eje hueco.

$$\sigma_m' = \left[3 \left(\frac{16 K_{fs} T_m D}{\pi(D^4 - d^4)} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Ecuación 1.4.15. Esfuerzo medio de von Mises para eje hueco.

Donde:

S_e = Límite de resistencia a la fatiga del elemento

S_{ut} = Resistencia a la tracción del material

n_f = Factor de seguridad a fatiga

K_f = Factor de concentración de esfuerzos normales

Kfs = Factor de concentración de esfuerzos cortantes

Ma = Momento flector alternante

Mm = Momento flector medio

Ta = Momento torsor alternante

Tm = Momento torsor medio

Selección de Rodamientos

De acuerdo con el catálogo provisto por SKF [9], la selección busca que la capacidad de carga dinámica del rodamiento (C) supere las cargas actuantes en el apoyo (P). La Ecuación 1.4.16, 1.4.17 y 1.4.18 corresponden a los criterios para la selección de un rodamiento de bolas y sus horas de servicio.

$$P = xF_{radial} + yF_{axial}$$

Ecuación 1.4.16. Carga dinámica equivalente.

$$P = F_{radial}$$

Ecuación 1.4.17. Carga dinámica equivalente en ausencia de carga axial.

$$L_{10h} = \left(\frac{10^6}{60n} \right) \left(\frac{C}{P} \right)^3$$

Ecuación 1.4.18. Horas de servicio

Donde:

P = Carga dinámica equivalente [kN]

C = Capacidad de carga dinámica [kN]

x = Factor de carga

y = Factor de carga

F_{radial} = Reacción radial [kN]

F_{axial} = Reacción axial [kN]

L10h = Número de horas de servicio

n = Revoluciones por minuto

Selección de Chavetas

Una chaveta puede fallar por cortante y aplastamiento, ver Ecuaciones 1.4.19 y 1.4.20 respectivamente para la verificación del factor de seguridad en ambos modos de falla.

$$n = \frac{S_{sy}tl}{F}$$

Ecuación 1.4.19. Factor de seguridad por cortante

$$n = \frac{S_{sy}tl}{2F}$$

Ecuación 1.4.20. Factor de seguridad por aplastamiento

Donde:

n = Factor de seguridad

S_{sy} = Resistencia al cortante

t = Ancho de chaveta

l = Longitud de chaveta

F = Fuerza en la superficie del eje

1.4.5 Benchmarking

Se presenta el análisis de tres molinos de rodillos, que se encuentran disponibles en el mercado internacional, con diferentes sistemas de transmisión. En la Tabla 1.4.1, 1.4.2 y 1.4.3 se describen las características relevantes de cada una.

Tabla 1.4.1. Molino de rodillos NF 2235

Fuente: [3]

Molino SM65	
	
Empresa	Shandong Longxing Chemical Machinery Group.

Longitud [mm]	400
Diámetro de rodillo [mm]	65
Peso [kg]	80
Potencia [hp]	0.7
Transmisión	Por bandas y poleas
Precio	\$7100
Capacidad producción [L/h]	0.5 – 1

Tabla 1.4.2. Molino de rodillos

Fuente: [4]

Molino S65	
	
Empresa	Guangzhou Jinfeng Light Industry Machinery Co., Ltd.
Longitud [mm]	440
Diámetro de rodillo [mm]	65
Peso [kg]	80
Potencia [hp]	1
Transmisión	Por bandas y poleas, con engranes
Precio	\$3000
Capacidad producción [kg/h]	1 - 60

Tabla 1.4.3. Molino de rodillos

Fuente: [5]

Molino EGM - 65

	
Empresa	Shanghai ELE Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd.
Longitud [mm]	675
Diámetro de rodillos [mm]	65
Peso [kg]	345
Potencia [hp]	1
Transmisión	Por bandas y poleas
Precio	\$2800
Capacidad producción [L]	200-2000

2 METODOLOGÍA

Con base en los antecedentes teóricos, fundamentos técnicos y benchmarking descritos, el presente capítulo contempla el diseño conceptual, diseño de detalle y construcción del sistema de transmisión. Los requerimientos del cliente se traducen en especificaciones técnicas que debe cumplir el sistema de transmisión. A continuación, se plantea un análisis funcional con las tareas esenciales que el mecanismo debe realizar, presentando alternativas de solución por modulo. Finalmente, se realiza el dimensionamiento y selección de los elementos mecánicos involucrados, con el fin de establecer los planos requeridos para su construcción y el respectivo análisis de costos.

2.1 Casa de la calidad

También conocida como matriz de calidad, es una herramienta que sirve como un puente entre los requisitos de Óleos América y el proceso de diseño, permitiendo identificar las preferencias que aseguran que cada aspecto relativo a la transmisión contribuya a la satisfacción del cliente.

Voz del usuario

El representante de la empresa Óleos América, menciona que el sistema de transmisión debe cumplir con los siguientes requerimientos.

- Sistema de transmisión compacto
- Velocidad de giro de los rodillos constante
- Relación de transmisión de 1:3 entre rodillos
- Separación mínima y máxima entre rodillos de 0.2 y 0.9 [mm] respectivamente
- Portabilidad de la máquina
- Torque suficiente para moler mezcla de aceite y pintura
- Fácil mantenimiento

Voz del ingeniero

Los requerimientos mencionados por el usuario se convierten en especificaciones técnicas:

- Dimensión
- Velocidad angular constante
- Relación de transmisión
- Distancia regulable
- Peso
- Potencia del motor
- Montaje sencillo

Resultados

El análisis de la casa de la calidad se muestra en la Figura 2.1, donde se identifica tres requerimientos preponderantes del cliente:

- Dimensiones

El taller de producción de Óleos América cuenta con un gran número de equipos ya instalados, de modo que el espacio para instalar el molino es reducido y se espera alcanzar dimensiones de 730 x 250 x 450 [mm] de largo, ancho y alto respectivamente, que permiten una operación cómoda y movilidad de la máquina.

- Especificaciones del motor

Basado en la experiencia de los operadores, se requiere un motor, que además de cumplir las exigencias mínimas de carga, aumente su potencia hasta un 25% adicional de lo requerido.

- Velocidad de giro invariable

La participación de diferentes personas, de manera autorizada y no autorizada, genera que se cambien los parámetros de operación cuando son variables; consecuentemente se busca fijar una única velocidad de giro para cada uno de los tres rodillos que conforman la máquina, consiguiendo 30, 90 y 120 rpm respectivamente en todo momento.

- Distancia regulable

La separación entre rodillos debe ser regulable para controlar la consistencia de la pintura, por lo que se busca una separación entre rodillos de 0.2 a 0.9 [mm].

- Peso

Tener el menor peso posible para poder mover el equipo de un punto a otro únicamente mediante la aplicación de fuerza humana, por lo tanto, se establece un máximo de 100 kg.

- Relación de transmisión

Uno de los parámetros de operación para el movimiento de los rodillos es una relación 1:3 entre cada uno de los tres rodillos. Sus velocidades de giro son 30 rpm, 90 rpm y 120 rpm respectivamente.

- Montaje sencillo

Para solucionar problemas mecánicos que se presenten con el tiempo, se busca un montaje sencillo, con el fin de abrir el equipo, visualizar el estado del sistema y reparar en caso de ser necesario.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Column #							
					1	2	3	4	5	6	7	
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)												
					Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")							
					Dimensiones	Velocidad angular constante	Relación de transmisión	Distancia regulable	Peso	Especificaciones del motor	Montaje sencillo	
1	9	11,5	3,0	Sistema de transmisión compacto	⊖				▲		⊖	
2	9	15,4	4,0	Velocidad de giro constante		⊖						
3	9	19,2	5,0	Relación de transmisión 1:3	⊖	⊖	⊖		▲	⊖		
4	9	15,4	4,0	Separación entre rodillos de 1 [mm]				⊖			▲	
5	9	11,5	3,0	Portabilidad de la máquina	⊖				⊖	⊖	⊖	
6	9	19,2	5,0	Torque suficiente para moler						⊖		
7	9	7,7	2,0	Fácil mantenimiento	▲	▲		⊖			⊖	
8												
9												
10												
Target or Limit Value												
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)												
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9	9	9	9	
Weight / Importance					319,2	203,8	173,1	161,5	134,6	265,4	153,8	
Relative Weight					22,6	14,4	12,3	11,4	9,5	18,8	10,9	

Figura 2.1. Casa de la calidad para el sistema de transmisión.

Fuente: Propia

2.2 Especificaciones Técnicas

Los requerimientos del usuario se traducen en especificaciones técnicas, en virtud de lo cual, gracias a los resultados de la sección 2.1 y Figura 2.1, se presenta las especificaciones técnicas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del sistema de transmisión de un molino tricilíndrico para molienda de pintura al óleo

Empresa cliente: Óleos América		Producto: Sistema de transmisión de un molino tricilíndrico para pinturas al óleo		Fecha Inicial: 16/12/2023
Diseñador: Marcos Changoluisa				Última revisión:
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Dimensiones		C	R	Se pueda ubicar en espacios pequeños.
		I/D	D	De dimensiones inferiores a 730 x 250 x 450 [mm]
Potencia		C	D	Motor con una potencia de trabajo 25% superior o igual a la potencia requerida.
		C	D	Motor trifásico
Giro		C	R	Relación de transmisión de 1:3 entre rodillos.
		C/D	D	Velocidad angular constante, de 30, 90 y 270 rpm.

DONDE: C = Caliente, M = Marketing, I = Ingeniería, D = Diseño, F = Fabricación, R = Requerimiento, MR = Modificación de requerimiento, NR = Nuevo requerimiento, D = Deseo, MD = Modificación de deseo, ND = Nuevo deseo.

2.3 Análisis funcional

Mediante el establecimiento de la estructura funcional se puede entender el sistema que engloba el componente desarrollado, empleando flujos de entrada y salida, que corresponden a la energía eléctrica de la red y energía mecánica generada en los rodillos respectivamente, y que se relacionan a través de una tarea, la cual es la transmisión de potencia. En general, resulta conveniente asignar la función a un módulo, por lo que a partir de la estructura funcional se establecerá la estructura modular.

Dependiendo del grado de complejidad del equipo se puede consolidar diferentes niveles, donde solo se plantee la función global o también se divida en subtareas. En este diseño se considera el nivel 0, 1 y 2, en vista de que, por la forma de operación relativamente sencilla de la máquina, es adecuado para entender a detalle la estructura funcional.

Nivel 0

El sistema de transmisión busca entregar la suficiente energía mecánica a cada rodillo para que puedan moler la mezcla de pigmentos y aceites, por lo que la función global consiste en la transmisión de dicha energía, tal como se detalla en la Figura 2.2, que muestra el nivel 0 de la estructura funcional.

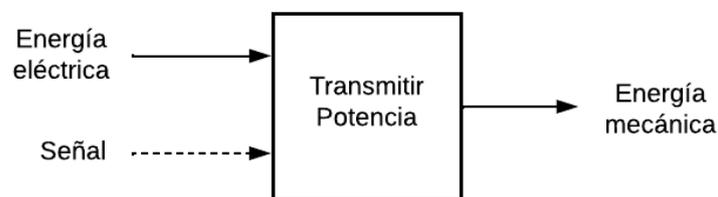


Figura 2.2. Nivel 0: Funcionamiento global del sistema de transmisión.

Fuente: Propia.

Nivel 1

La calidad de la pintura se ve afectada si la molienda se da con el paso de una película fina o gruesa de pintura entre los rodillos. Este aspecto añade una nueva subfunción al sistema, y consiste en la separación entre rodillos sin perder la potencia necesaria. Por esto, se establece el nivel 1 de la estructura funcional en la Figura 2.3.

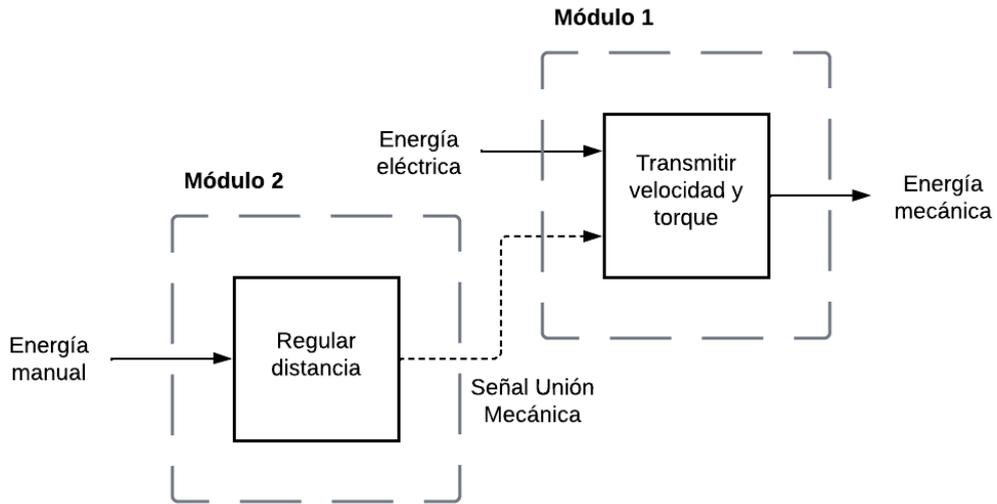


Figura 2.3. Nivel 1: Estructura funcional y modular.

Fuente: Propia.

Nivel 2

El módulo 1 y 2 tienen particularidades respecto al proceso interno de transmisión y regulación de la separación entre rodillos respectivamente, así se establece el nivel 2, ver Figura 2.4, donde se muestran las subfunciones técnicas.

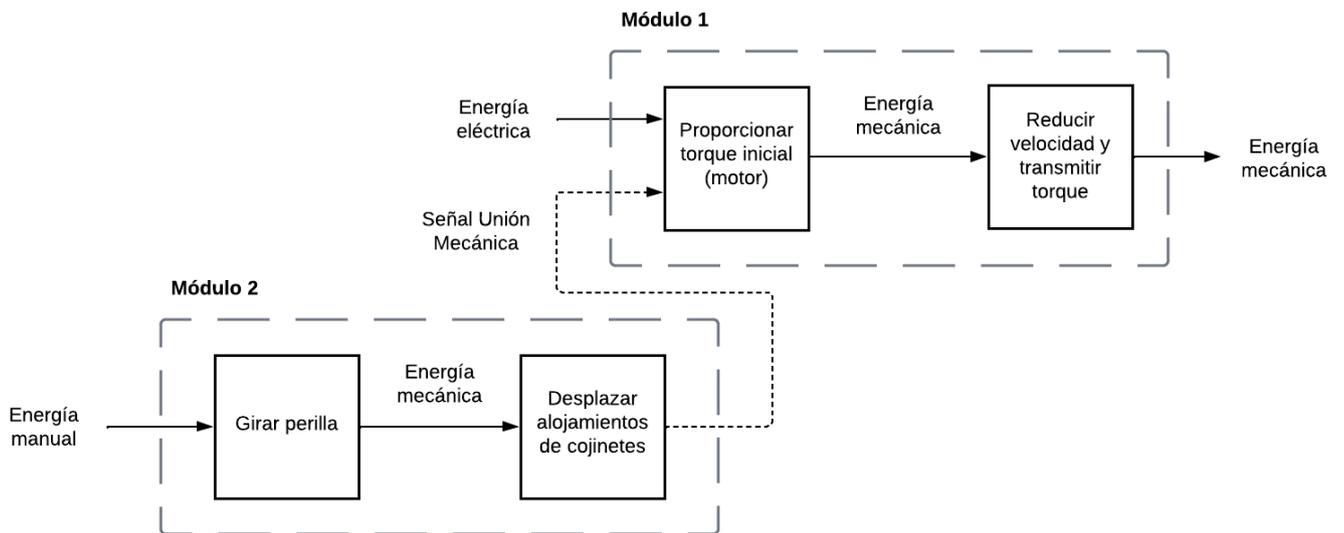


Figura 2.4. Nivel 2: Estructura funcional y modular.

Fuente: Propia.

2.4 Alternativas de solución

En la estructura funcional se identifican dos módulos, cuya relevancia radica en la detección de las funciones principales que debe realizar el componente de transmisión del molino tricilíndrico para alcanzar su objetivo. Estos son:

- Módulo 1: Transmisión de potencia
- Módulo 2: Separación de rodillos

2.4.1 Módulo 1: Transmisión de potencia

Fuente de energía

La infraestructura del taller de producción de Óleos América cuenta con diferentes tomacorrientes para sistema monofásico y trifásico, a 120/240 V respectivamente, teniendo en cuenta que el molino no va a cambiar de posición frecuentemente, lo ideal es usar una fuente de energía eléctrica, que se puede transformar a energía mecánica a través de un motor eléctrico. En la Tabla 2.2 se resume las virtudes de las 2 opciones posibles para esta fuente.

Tabla 2.2. Características de las alternativas de fuente de energía.

Opción	Ventaja	Desventaja	Imagen
1. Motor monofásico	Más simples en diseño y conexión. El control y la protección son más sencillos	Pueden tener problemas de arranque, especialmente con cargas pesadas.	
2. Motor trifásico	Son capaces de proporcionar una potencia elevada. Cuentan con un arranque suave y uniforme. Requieren una corriente de arranque menor en comparación con los motores monofásico.	Tienen un costo inicial alto. Complejos en diseño y requerimientos de control.	

Transmisión de potencia

El equipo va a trabajar a partir de energía mecánica proveniente de una sola fuente, por lo que es necesario distribuir esa energía para que pueda llegar adecuadamente a los dos módulos. La Tabla 2.3 presenta las opciones posibles para este sistema.

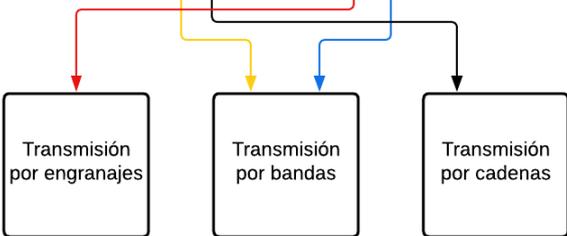
Tabla 2.3. Características de las alternativas de fuente de energía.

Opción 1	Ventaja	Desventaja	Imagen
1. Tren de engranajes	Ocupan poco espacio. Gran capacidad de transmisión para cargas pesadas. Larga vida útil	Costo de fabricación alto. Pueden generar ruido. Requiere lubricación.	
2. Sistema de bandas	Elementos flexibles. Absorben cargas de impacto. Pueden corregir errores de alineación. Montaje sencillo.	Corta vida útil. Su longitud puede cambiar con el uso. No adecuados para requerimientos de alta potencia.	
3. Sistema de cadenas y catarinas	Trabajo a altas velocidades. Silencioso a altas velocidades. Montaje sencillo.	Lubricación continua. Mantenimientos programados. Puede presentar desencadenamiento.	

Alternativas de solución del módulo 1

Las alternativas de solución anteriores permiten construir la matriz morfológica correspondiente al módulo; la cual se presenta en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Matriz morfológica y alternativas de solución correspondiente al módulo 1.

Función	Soluciones
Fuente de energía	
Transmisión de potencia	 <p data-bbox="719 1093 1286 1191"> Alternativa I (Motor trifásico y engranajes) Alternativa II (Motor monofásico y bandas) Alternativa III (Motor trifásico y bandas) Alternativa IV (Motor monofásico y cadenas) </p>

Selección de alternativas

Los criterios empleados para la evaluación de cada alternativa mostrada en la Tabla 2.4 se muestran a continuación:

- Dimensiones pequeñas, acorde al espacio destinado en el taller
- Capacidad de carga
- Complejidad
- Mantenimiento

Con base en los criterios mencionados y las alternativas propuestas, se realiza la respectiva evaluación de soluciones, a partir del método ordinal corregido de criterios ponderados, ver Tabla 2.5. La alternativa I (motor trifásico y tren de engranajes) para el sistema de transmisión es la alternativa preferencial. La evaluación de cada criterio se adjunta en el ANEXO I.

Tabla 2.5. Conclusión de la selección de alternativas para el primer módulo.

Conclusión	Capacidad carga	Mantenimiento	Complejidad	Dimensiones	Σ	Ponderación
Alternativa I (Motor trifásico y tren de engranajes)	0,14	0,04	0,03	0,14	0,35	0,35
Alternativa II (Motor monofásico y bandas)	0,05	0,02	0,07	0,07	0,21	0,21
Alternativa III (Motor trifásico y bandas)	0,11	0,03	0,07	0,07	0,28	0,28
Alternativa IV (Motor monofásico y cadenas)	0,05	0,01	0,03	0,07	0,16	0,16

2.4.2 Módulo 2: Separación de rodillos

Control de empuje

Un aspecto importante en la producción de pintura al óleo es la consistencia, que se controla a partir de la separación entre rodillos y que oscila entre 0.2 y 0.9 [mm]. Para lograr dicha separación variable, los rodillos deben moverse, por ende, los ejes de transmisión también lo harán. En este sentido, se establecen dos rieles sobre las que deslicen los bloques que alojan los cojinetes para su movimiento, tal como se observa en la Figura 2.5. Dicho desplazamiento entre rodillos debe lograrse de una forma sencilla, únicamente mediante la fuerza aplicada del operador, por lo tanto, se contempla dos opciones para empujar los bloques de alojamiento de rodamientos, ver Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Características de los elementos de control de empuje.

Opción	Ventaja	Desventaja	Imagen
1. Perilla	<p>Permite un control más preciso sobre la fuerza de empuje.</p> <p>Puede requerir menos esfuerzo físico para operar, especialmente en aplicaciones de baja fuerza.</p>	<p>Provoca un movimiento lento.</p> <p>La fuerza aplicada puede ser limitada.</p>	

2. Volante de control	<p>La configuración del volante puede proporcionar una mayor fuerza de empuje debido a la mayor palanca.</p> <p>Permite movimientos rápidos.</p>	<p>Difícil lograr un control preciso de la fuerza de empuje debido a la mayor palanca.</p> <p>Disponible en grandes dimensiones.</p>	
-----------------------	--	--	---

Control de retroceso

Los elementos de empuje tienen la función de acercar el bloque izquierdo y derecho al bloque central (fijo), sin embargo, el retroceso a la posición inicial no se puede dar netamente por el giro de estos elementos, se requiere una fuerza de retorno, para lo cual los resortes mostrados en la Tabla 2.7 se ubican como la mejor opción.

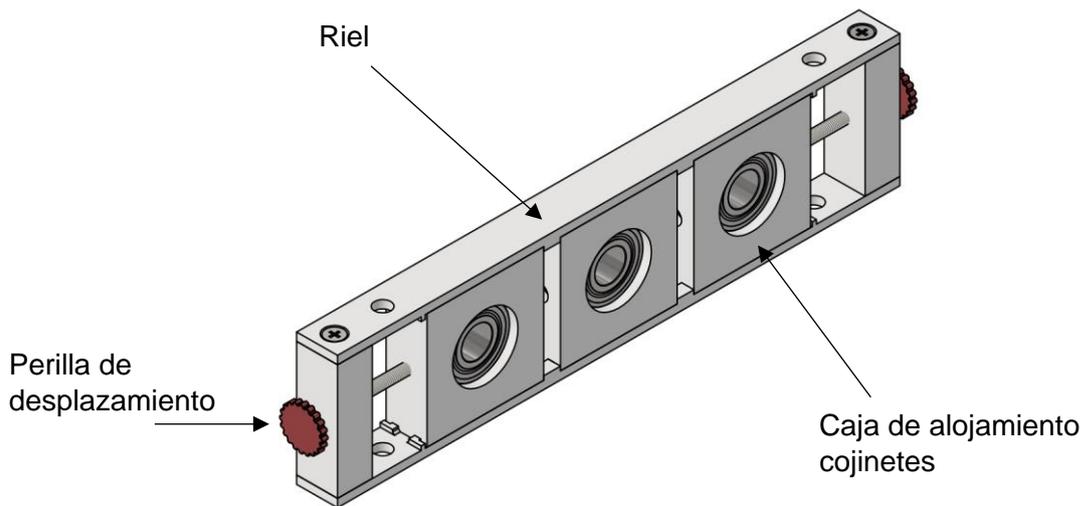


Figura 2.5. Sistema de desplazamiento de cojinetes.

Fuente: Propia

Tabla 2.7. Características de los posibles muelles para retroceso de bloques de cojinetes.

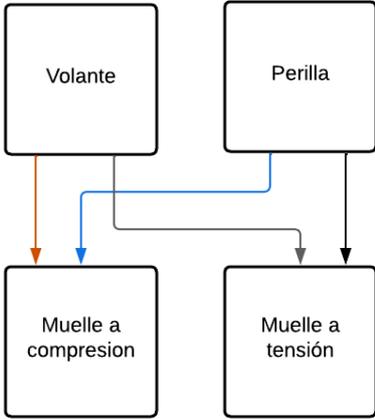
Opción	Ventaja	Desventaja	Imagen
1. Muelle a compresión	<p>Fuerza de compresión constante durante la deformación.</p> <p>Mayor estabilidad lateral. Ideales para espacio reducido.</p>	<p>Requiere un elemento guía.</p> <p>Mayor probabilidad de pandeo en longitudes grandes.</p>	

2. Muelle a tensión	Aplicaciones de carga extendida. Baja probabilidad de pandeo.	Requiere anclaje en uno o ambos extremos. Mayor longitud en reposo. Montaje relativamente complejo. Mayor estabilidad lateral.	
---------------------	--	---	---

Alternativas de solución del módulo 1

Para este módulo, se presenta la matriz morfológica de la Tabla 2.8. Se observaron 4 alternativas de solución en base a los resultados expuestos en esta sección.

Tabla 2.8. Matriz morfológica correspondiente al módulo 1.

Función	Soluciones
Giro y empuje	
Retroceso de caja	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p style="color: orange;">Alternativa I (Volante y muelle a compresión)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p style="color: blue;">Alternativa II (Perilla y muelle a compresión)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Alternativa III (Volante y muelle a tensión)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Alternativa IV (Perilla y muelle a tensión)</p> </div> </div>

Selección de alternativas

Los criterios de evaluación son:

- Pequeño
- Manejable
- Preciso
- Complejidad

Gracias al método ordinal corregido de criterios ponderados, se determina que la mejor opción de diseño es optar por una perilla pequeña que permita el retroceso con ayuda de un muelle a compresión, tal como se evidencia en la Tabla 2.9, cuyos respaldos de evaluación para cada criterio se encuentran en el ANEXO II.

Tabla 2.9. Conclusión de la selección de alternativas para el segundo módulo.

Conclusión	Preciso	Manejable	Dimensiones	Complejidad	Σ	Ponderación
Alternativa I (Volante y muelle a compresión)	0,06	0,08	0,08	0,04	0,25	0,25
Alternativa II (Perilla y muelle a compresión)	0,14	0,10	0,10	0,03	0,37	0,37
Alternativa III (Volante y muelle a tensión)	0,06	0,03	0,03	0,02	0,13	0,13
Alternativa IV (Perilla y muelle a tensión)	0,14	0,05	0,05	0,01	0,25	0,25

2.5 Solución virtual

La Figura 2.6 presenta la solución virtual con base en la selección de alternativas anteriormente descrita. La Tabla 2.10 resume las alternativas ganadoras.

Tabla 2.10. Alternativas de solución por modulo

Modulo	Alternativa
1	Motor trifásico con un sistema de transmisión por engranajes.
2	Sistema de desplazamiento de rodillos con perilla y retroceso por muelle a compresión.

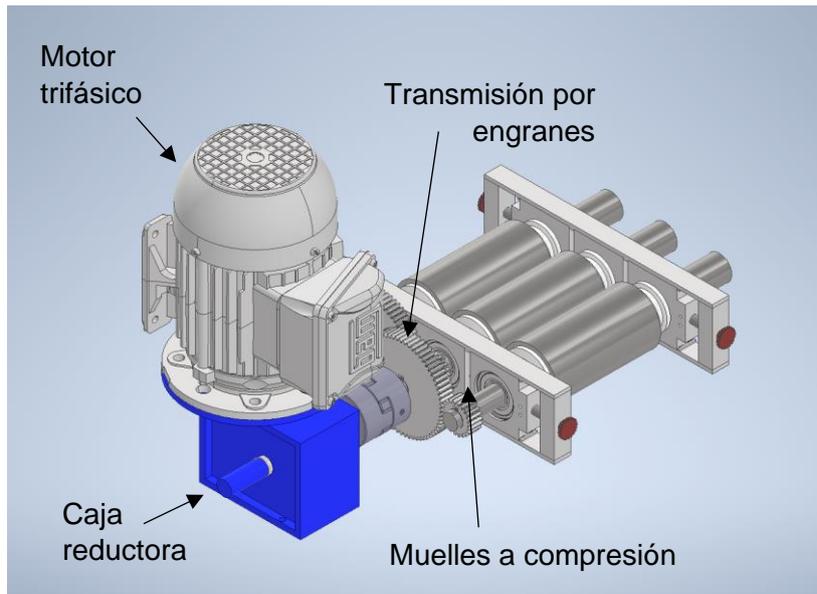


Figura 2.6. Solución virtual del mecanismo de transmisión de potencia.

Fuente: Propia

2.6 Selección del motor

De la comprensión del fenómeno físico se conoce la potencia requerida para la molienda de aceite y pintura [1]. Los resultados de dicho estudio se presentan en la Tabla 2.11. Para la identificación de cada rodillo ver Figura 2.7.

Tabla 2.11. Especificaciones de carga por molienda

Rodillo	Tipo de carga	Valor
1	Fuerza Radial Distribuida [N/m]	8650.52
	Fuerza Fricción Distribuida [N/m]	0
	Torque [Nm]	0
2	Fuerza Radial Distribuida entre cilindro 1-2 [N/m]	8650.52
	Fuerza Radial Distribuida entre cilindro 2-3 [N/m]	25951.55
	Fuerza Fricción Distribuida [N/m]	618.37
	Torque [Nm]	2.51
3	Fuerza Radial Distribuida [N/m]	25951.55
	Fuerza Fricción Distribuida [N/m]	1931.25
	Torque [Nm]	7.85

Fuente: De [1].

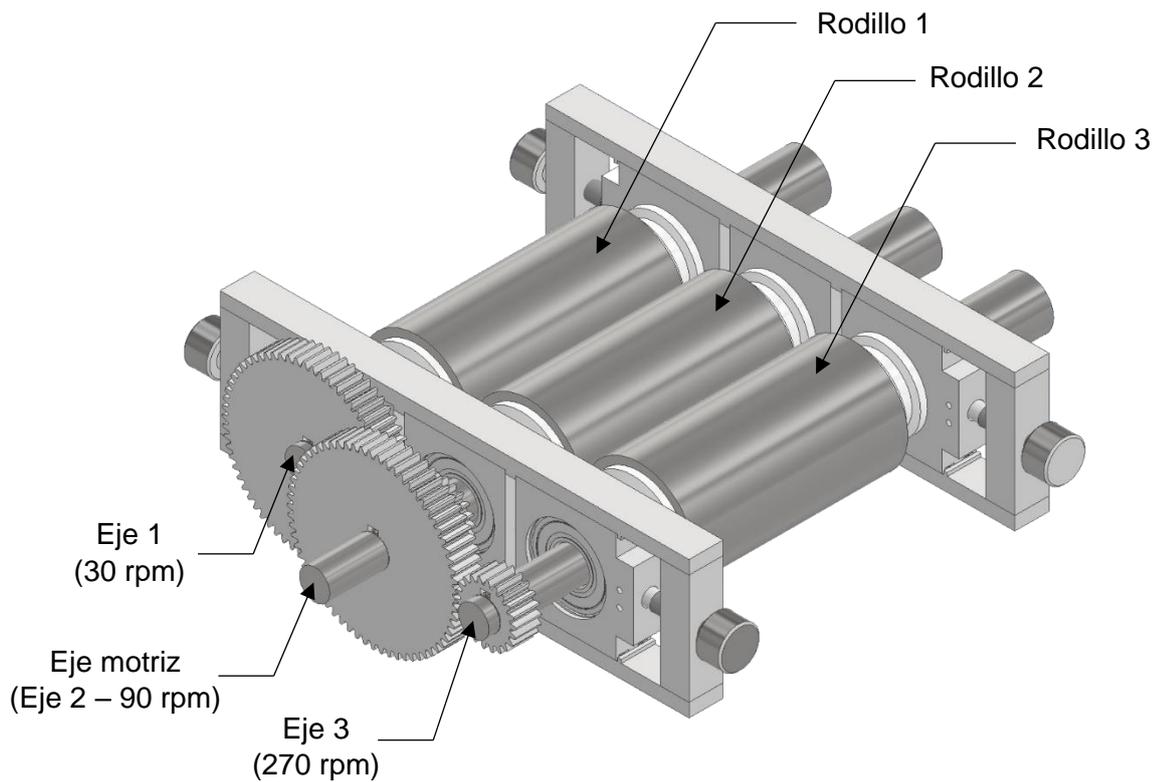


Figura 2.7. Esquema del sistema de transmisión.

Fuente: Propia

La potencia total será la suma de la potencia requerida por cada etapa de molienda en los rodillos, dicha potencia se calcula con la Ecuación 1.4.2. Por otro lado, el factor de servicio, considerando un servicio intermitente y actividades de molienda, es de 1.4 [8], no obstante, se considera un aumento del 25% en la potencia adicional, como parte de uno de los requerimientos del cliente. Ver estos resultados en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Resultados para selección del motor.

Requerimientos del motor	
Potencia del rodillo 1 [hp]	0
Potencia del rodillo 2 [hp]	0.03
Potencia del rodillo 3 [hp]	0.30
Potencia nominal [hp]	0.33
Factor de servicio	1.4
Aumento	25%
Potencia diseño [hp]	0.58
Potencia del motor [hp]	0.75

La potencia para seleccionar el motor es de 0.75 [hp], siendo una potencia habitual con la que cuentan distintos proveedores. Se selecciona el motor trifásico de inducción W22, de

la marca WEG, con rotor de jaula y carcasa de hierro gris, cuya ficha técnica se encuentra en el ANEXO II.

2.7 Diseño de componentes mecánicos

2.5.1 Dimensionamiento de engranajes

Uno de los requerimientos del cliente es cumplir con una relación de transmisión (i) de 1:3 entre el rodillo 2 y rodillo 1, y de igual manera para el rodillo 2 y rodillo 3, ver Figura 2.8. Los 3 rodillos contarán con engranajes. También se busca que la separación entre rodillos (d_s) sea máxima de 0.9 [mm] y mínima de 0.2 [mm], teniendo en cuenta que el diámetro de los rodillos (d_R) es de 65 [mm] [1]. Se dimensiona los engranes bajo la condición de mínima separación (0.2 [mm]), con el fin de evitar un atascamiento cada que se acerquen entre sí.

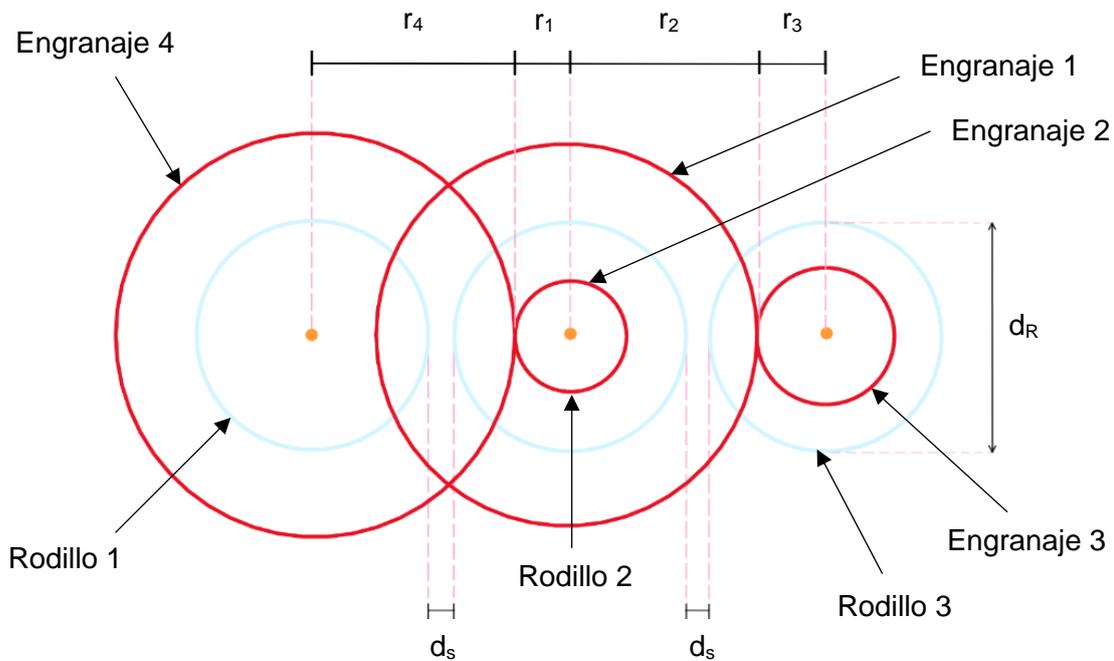


Figura 2.8. Parámetros geométricos de los engranajes en el sistema de transmisión.

Fuente: Propia

Con las condiciones geométricas representadas en la Figura 2.8, se plantean las Ecuaciones de la 2.5.1 a 2.5.4, que permiten determinar el diámetro primitivo de cada engranaje para satisfacer las condiciones de separación y relación de transmisión.

$$d_{p1} = \frac{3(2d_R + 2d_s)}{4}$$

Ecuación 2.5.1. Diámetro primitivo del engranaje 1.

$$d_2 = \frac{2d_R + 2d_s}{4}$$

Ecuación 2.5.2. Diámetro primitivo del engranaje 2.

$$d_3 = \frac{1}{3}d_1$$

Ecuación 2.5.3. Diámetro primitivo del engranaje 3.

$$d_4 = 3d_2$$

Ecuación 2.5.4. Diámetro primitivo del engranaje 4.

Las expresiones antes mencionadas, junto con los cálculos realizados empleando las Ecuaciones 1.4.7 y 1.4.9, y la asunción de un módulo pequeño y común de 1.5 (disponible en la metalmecánica de San Bartolo), brindan las características de los engranajes necesarios para el sistema. Una vez que se conoce el diámetro primitivo y número de dientes aproximado, se establece un número entero de dientes para conseguir engranajes estandarizados, cuyas características se resumen en la Tabla 2.13. Por otro lado, la Figura 2.9 muestra la disposición final de los engranajes ubicados sobre sus respectivos ejes.

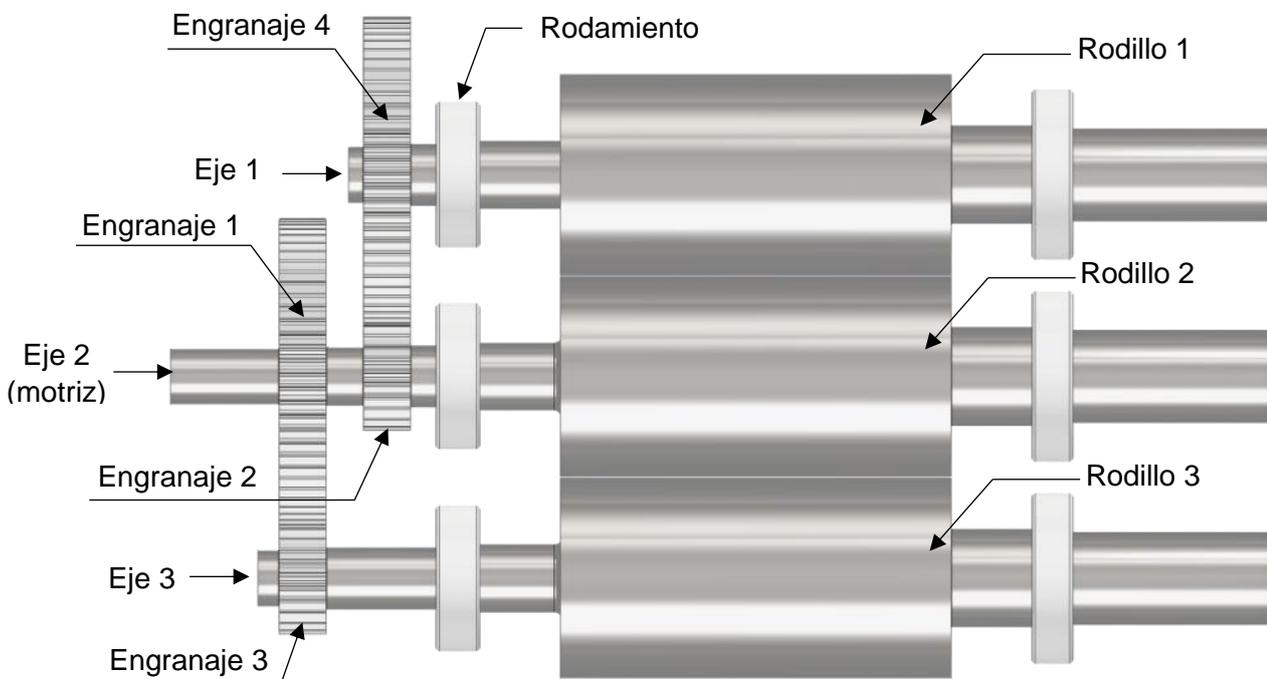


Figura 2.9. Disposición final de los engranajes.

Fuente: Propia

Tabla 2.13. Características de los engranajes requeridos

Engrane	Módulo	Diámetro primitivo [mm]	Número de dientes	Diámetro externo [mm]
1	1.5	97.5	65	100.5
2	1.5	33.0	22	36.0
3	1.5	33.0	22	36.0
4	1.5	97.5	65	100.5

2.5.2 Diseño de ejes

Análisis de carga

La forma y disposición de los ejes se dan bajo las consideraciones de la selección de alternativas y los resultados de Oña, P. [1], y Guapi, C. [2], de manera que se plantea un sistema compacto, de pequeñas dimensiones y con facilidad de montaje. Para favorecer la identificación de los puntos con concentradores de esfuerzos, ubicación de los apoyos y sitios relevantes para el diseño de los ejes se presenta la Figura 2.10.

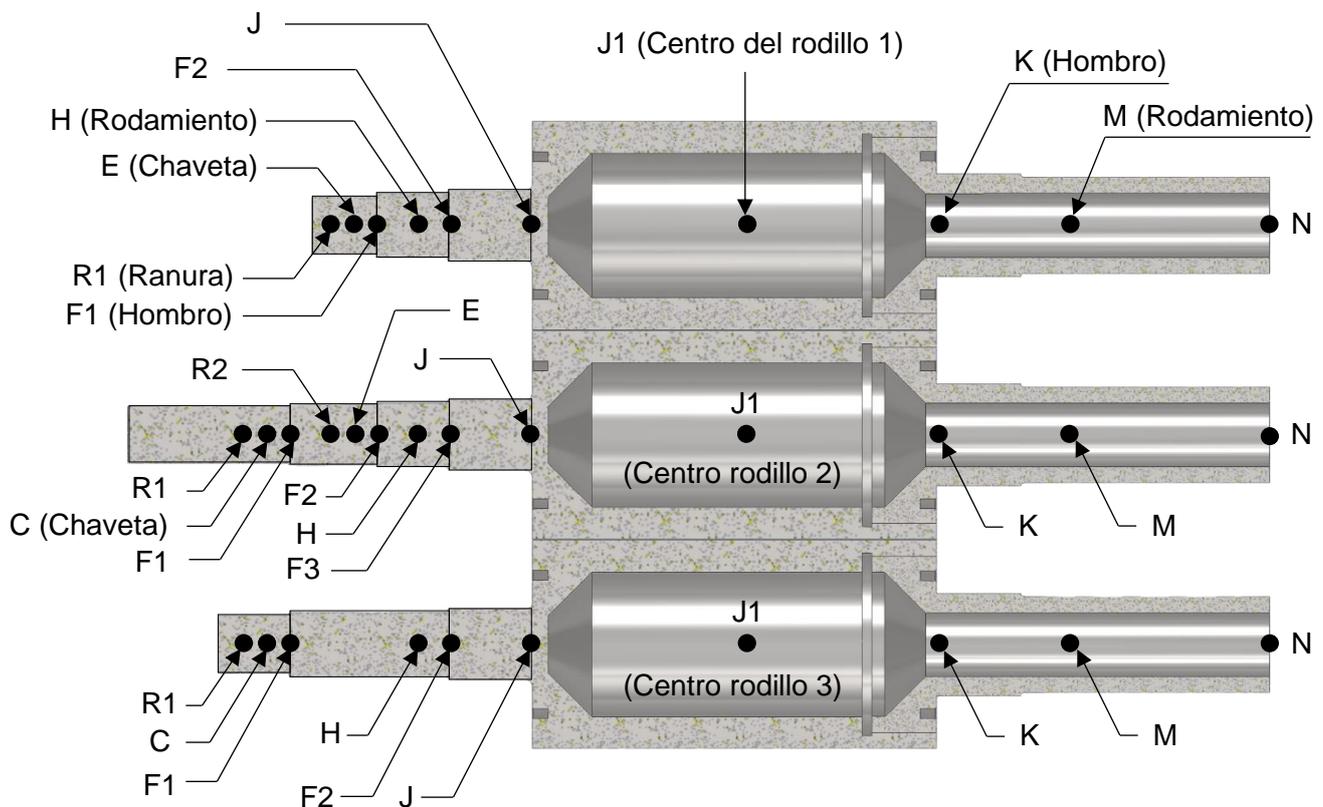


Figura 2.10. Esquema en corte de los ejes a diseñar.

Fuente: Propia

La Figura 2.11, 2.12 y 2.13 muestra los diagramas de cuerpo libre para cada eje. En todos los puntos C y E (eje 2) de dichas figuras se localizan los engranajes, es decir, en estos puntos existirá la presencia de una fuerza tangencial, radial y un momento. Los puntos H y M son aquellos donde se ubican los apoyos de cada rodillo, por lo que existen reacciones en el plano xy y zx para cada uno. Por último, se incluyen las fuerzas definidas por Oña, P. [1].

Es importante señalar que de acuerdo con la Tabla 2.12, los rodillos 2 y 3 consumen el 10% y 90% de la potencia total respectivamente, de manera que entre el engranaje 1 y 3 se transmite 0.675 [hp]. Con esta información, y al conocer los valores de diámetro primitivo de dichos engranajes y sus respectivas velocidades de giro, se usa las Ecuaciones 1.4.4 y 1.4.5 para el cálculo de fuerza tangencial (F_{tC}) y radial (F_{rC}), ver Figura 2.12, dando como resultado 1095.5 [N] y 398.7 [N] respectivamente, y un momento en el punto C (M_{Engrane1}) para el eje 2 de 53.4 [Nm] y para el eje 3 (M_{Engrane3}) de 17.8 [Nm].

Finalmente, el torque a la salida del reductor de velocidad (T_{motor}) es de 62.6 [Nm] (provisto por el fabricante). Una vez que se completa la información requerida en los diagramas de cuerpo libre se establecen los diagramas de momento flector, fuerza cortante, momento torsor y momento flector resultante. El ANEXO IV muestra los valores de momento resultante en diferentes puntos de la Figura 2.10.

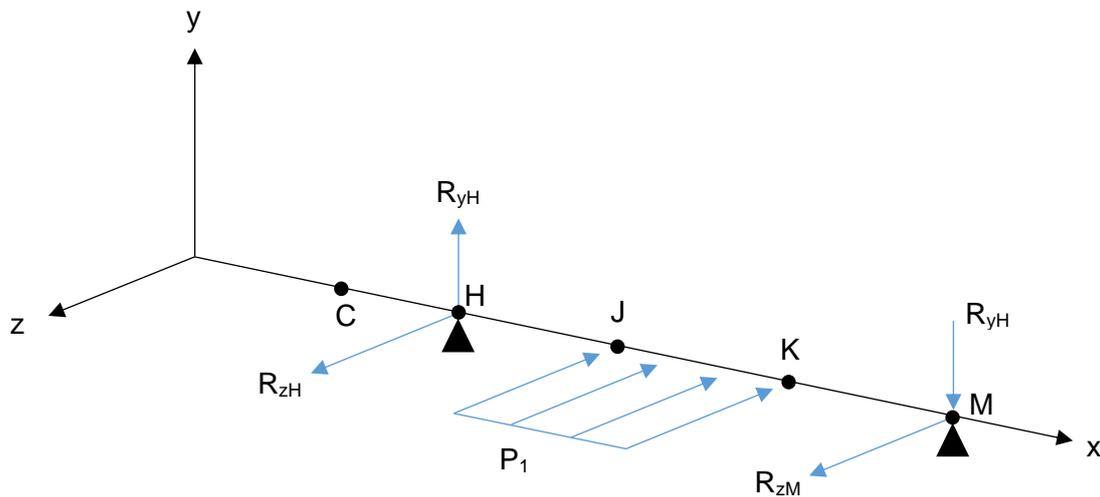


Figura 2.11. Diagrama de cuerpo libre Eje 1, con giro de 30 RPM.

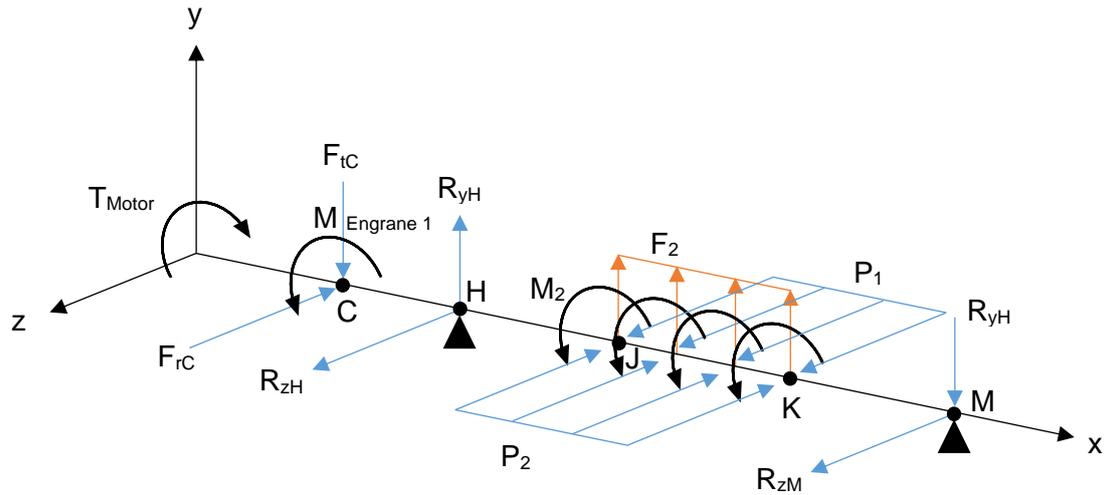


Figura 2.12. Diagrama de cuerpo libre Eje 2, con giro de 90 RPM.

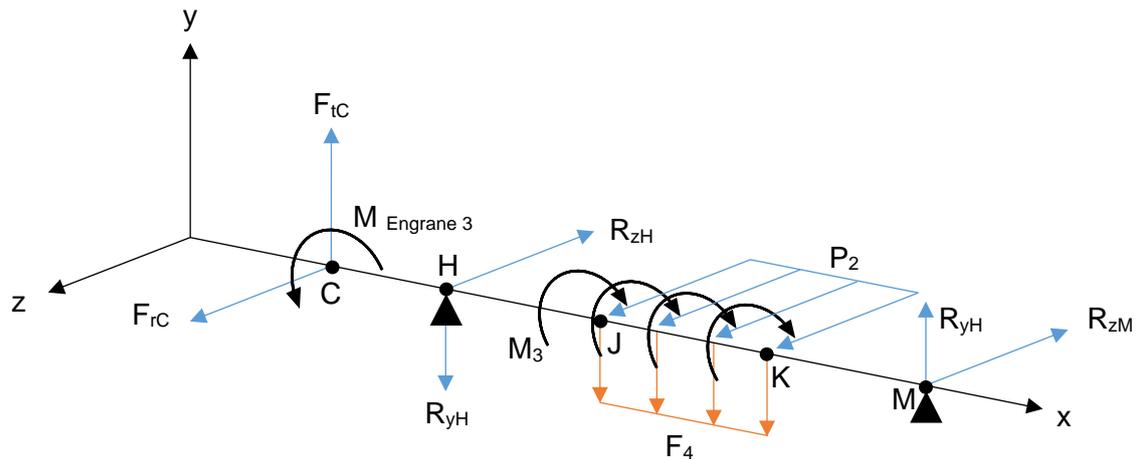


Figura 2.13. Diagrama de cuerpo libre Eje 3, con giro de 270 RPM.

La operación de la maquina no se dará en condiciones extremas de trabajo o de ambiente, y considerando que el material seleccionado para los ejes es acero inoxidable 304 rolado en frío [1], se trabaja con un factor de seguridad a fatiga inicial de 1.3. Resaltar que es un material probado en estas condiciones de uso [7]. Con base en esta recomendación, y la situación de trabajo, el requerimiento para cada sección del eje será cumplir con un factor de seguridad mayor a 1.3, lo que garantice que no se sobredimensione las secciones y el eje satisfaga el requerimiento de cargas.

Diseño eje 2

La Figura 2.12 y 2.13 muestran los diagramas de momento flector y fuerza cortante para el eje 2 (el más crítico por ser el eje motriz y contar con más secciones en relación con el eje 1 y 3), mientras que, la Figura 2.14 muestra el diagrama de momento flector resultante y par torsor. Los diagramas para el eje 1 y eje 3 se muestran en el ANEXO V.

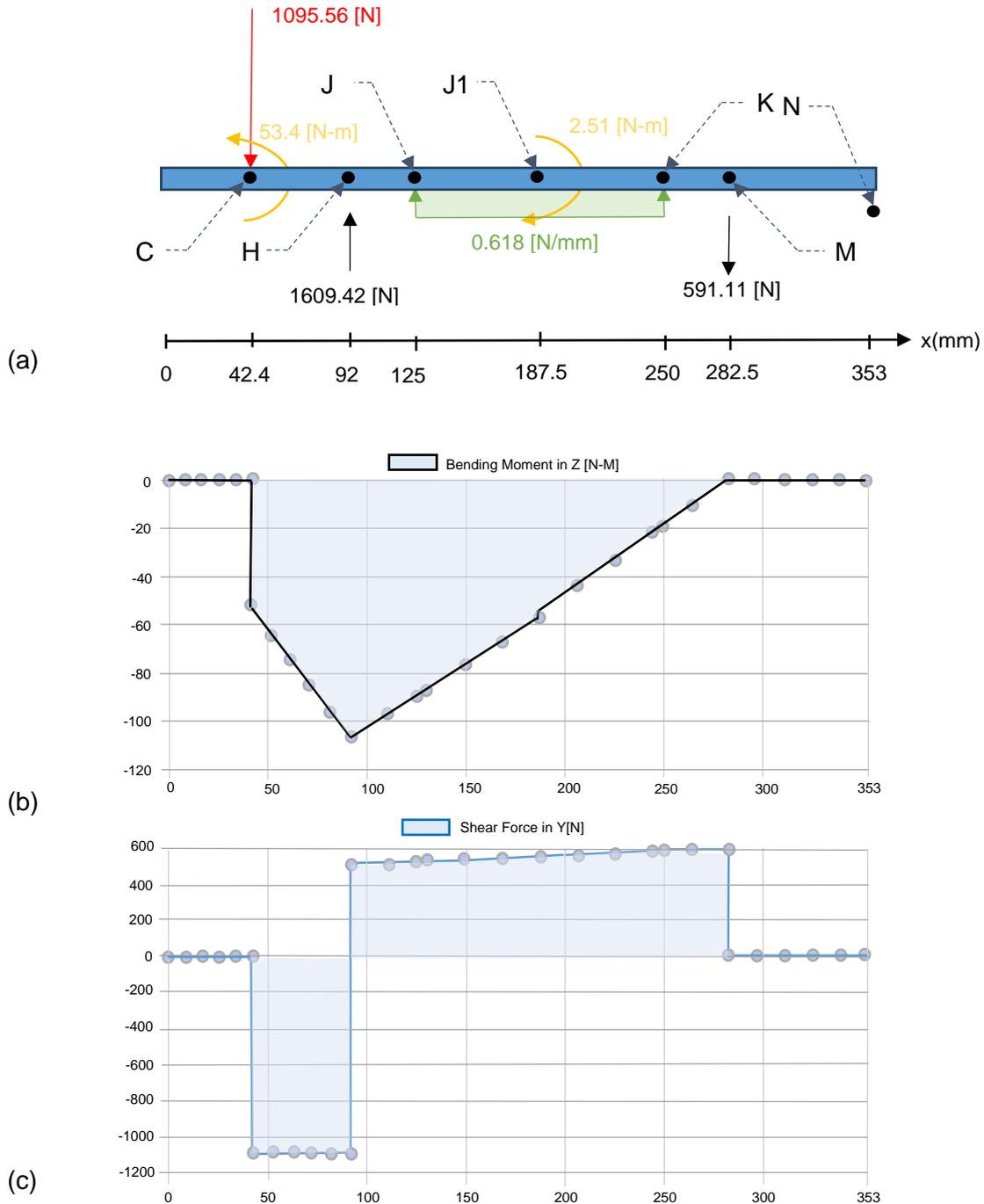


Figura 2.12. Diagramas de cuerpo libre y fuerzas internas en el plano xy para el eje 2: (a) Distribución de fuerzas. (b) Momento flector. (c) Fuerza cortante.

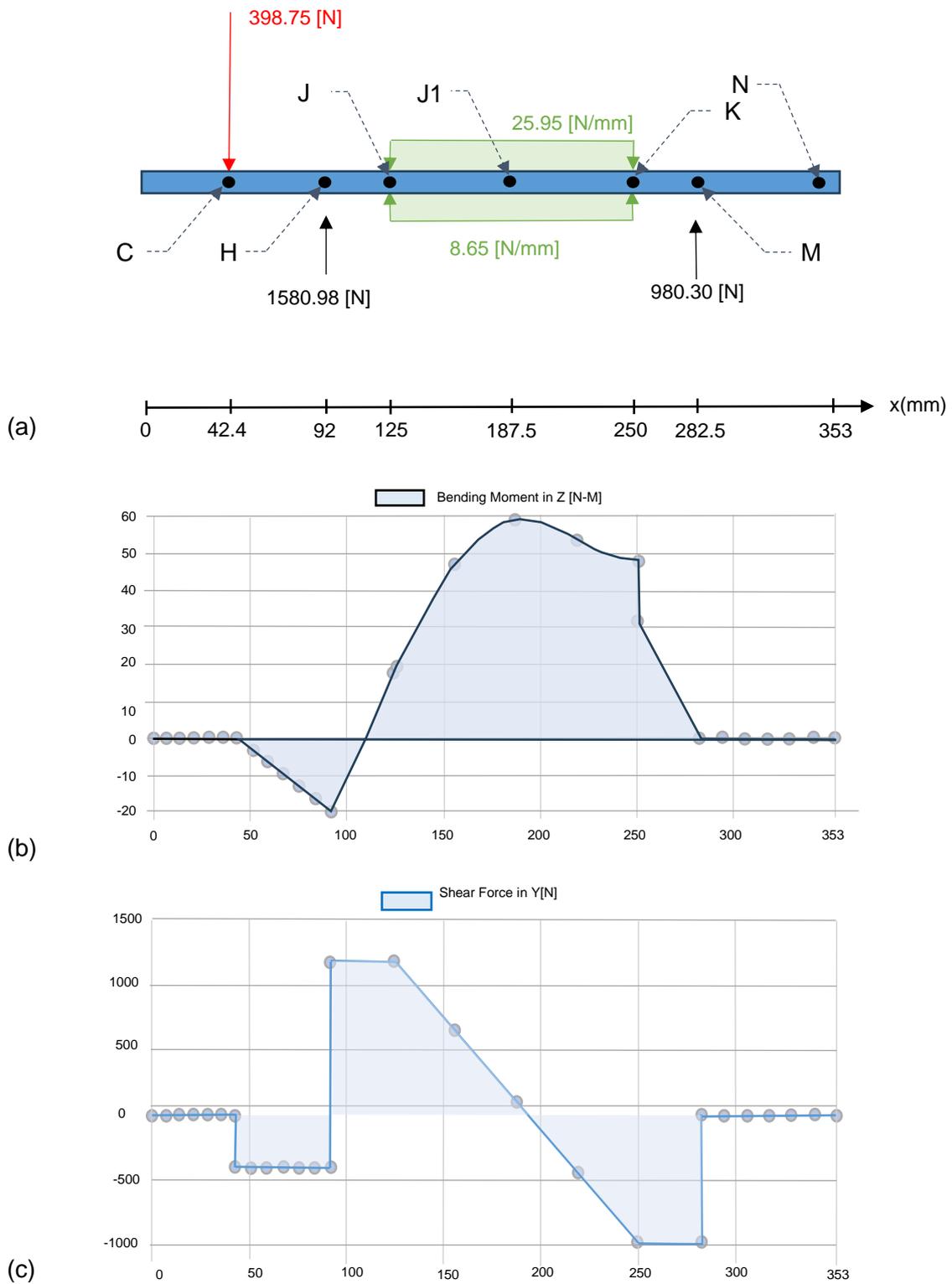
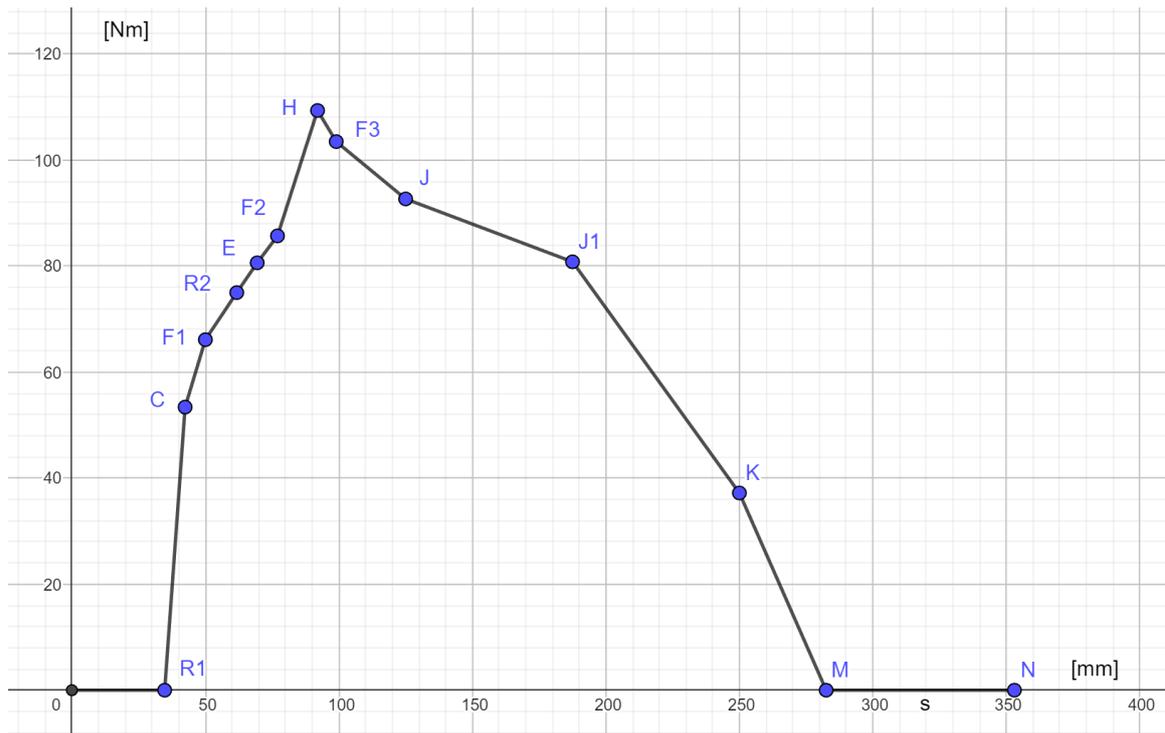
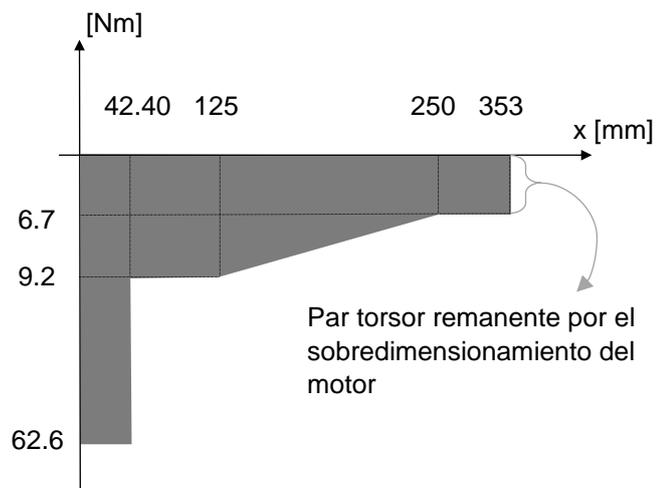


Figura 2.13. Diagramas de cuerpo libre y fuerzas internas en el plano xz para el eje 2: (a) Distribución de fuerzas. (b) Momento flector. (c) Fuerza cortante.



(a)



(b)

Figura 2.14. Diagrama de fuerzas internas para el eje 2: (a) Momento flector resultante.
(b) Par torsor.

El eje motriz cuenta con la mayor cantidad de secciones, véase Figura 2.10, y con un mayor momento flector resultante en relación con los otros ejes, ver Figura 2.14 y ANEXO V. En la Figura 2.14 (a) se observa que el punto H, donde se encuentra alojado un rodamiento, es el punto con mayor momento flector, 109 [Nm] y par torsor de 9.20 [Nm], sin embargo, el punto F3, cuenta con un momento resultante de 103 [Nm] y par torsor de 9.20 [Nm], y

un concentrador de esfuerzos debido a un hombro. En otros puntos, el momento resultante es mucho más bajo, siendo así que en F3 se establece la sección crítica.

Para obtener el diámetro de la sección crítica se aplica el criterio de Goodman modificado, Ecuación 1.4.10. Toda la información requerida se muestra en la Tabla 2.14. Además, se verifica el factor de seguridad con la Ecuación 1.4.11, donde los valores de esfuerzo alternante y equivalente para un eje redondo sólido se calculan con las Ecuaciones 1.4.12 y 1.4.13.

Tabla 2.14. Especificaciones de diseño para el eje 2.

Parámetro	Valor	Descripción
Límite de resistencia a la fatiga del espécimen de laboratorio [MPa]	638	Se tiene un $S_{ut} < 1400$ MPa
Factor de seguridad	1.3	Recomendación de [7]
Resistencia a la tracción del material [MPa]	1276	Se obtuvo de [7]
Factor de modificación de condición de superficie	0.68	Eje maquinado
Factor de modificación de tamaño	1.00	No se conoce a priori el diámetro
Factor de modificación de carga	1.00	
Factor de modificación de temperatura	1.00	Operación por debajo de 20 [°C]
Factor de confiabilidad	0.814	Confiabilidad de 99%
Factor de modificación de efectos varios	1.00	
Límite de resistencia a la fatiga del elemento [MPa]	352	
Concentrador de esfuerzos normales a fatiga	1.7	De manera conservadora se asimila $K_t = K_f$ para un filete de hombro redondeado [2].
Concentrador de esfuerzos cortantes a fatiga	1.5	De manera conservadora se asimila $K_{ts} = K_{fs}$ para un filete de hombro redondeado [2].
Momento alternante [Nm]	103	
Torque medio [Nm]	9.20	
Diámetro [mm]	18.89	

Para el eje No. 2 se requiere diámetro de 18.9 [mm], sin embargo, teniendo en cuenta que en esta sección se aloja un rodamiento y el valor más cercano de diámetro interno para los rodamientos comerciales es de 20 [mm], se define un diámetro de 20 [mm] para la sección crítica. Las secciones adyacentes contarán con diámetros aproximados al de la sección crítica, donde se busca que se optimice el desbaste de material y la ligereza del eje. Indudablemente, se debe garantizar que cada sección trabaje a fatiga de acuerdo con los requerimientos mencionados. La Tabla 2.15 presenta los valores calculados de concentradores de esfuerzos a fatiga en cada punto, con ayuda de las curvas que se

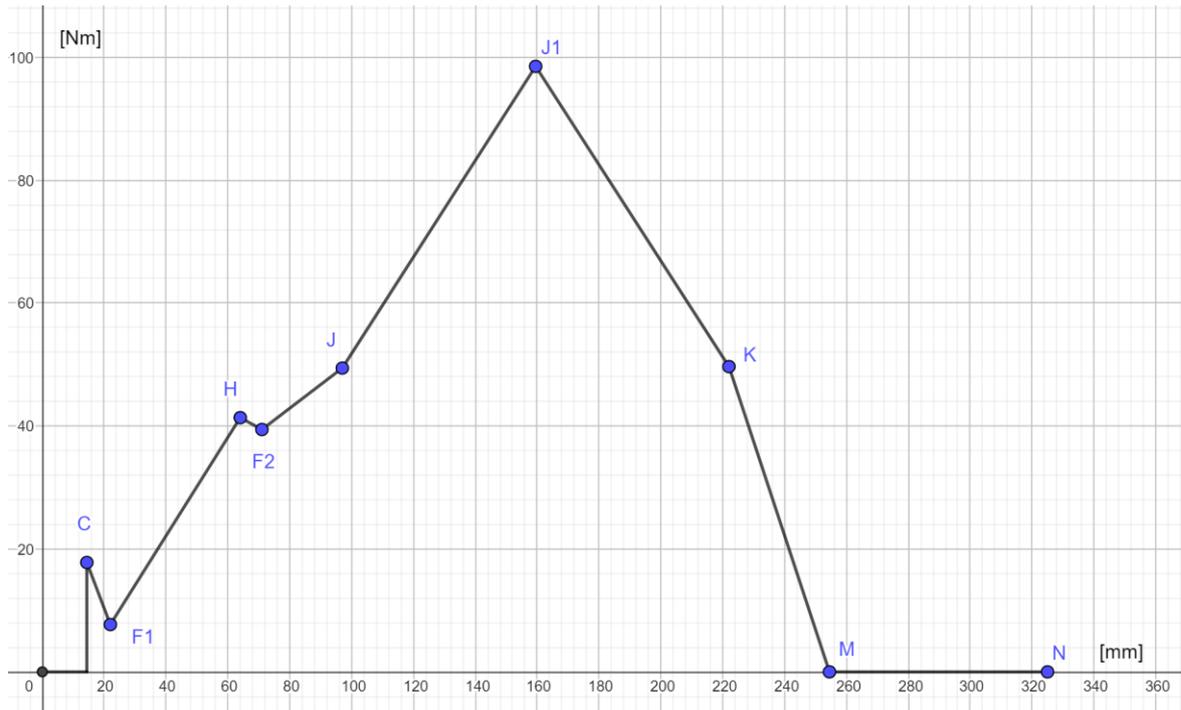
observan en el ANEXO VII, y el respectivo factor de seguridad para cada diámetro seleccionado. Los radios de entalle se encuentran en los planos presentados en el ANEXO VIII.

Tabla 2.15. Resultados de diseño del eje 2 - Eje motriz

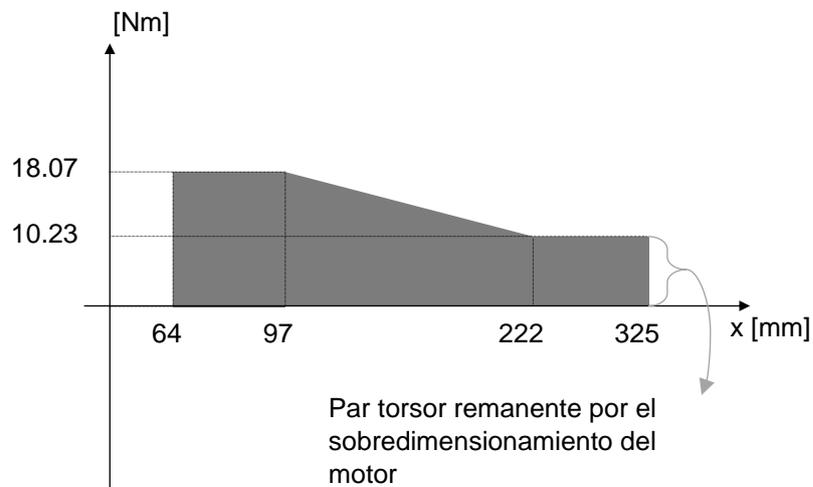
Punto de análisis (Ver Figura 2.10)	Diámetro	Factor de concentración de esfuerzo		Factor de seguridad
		K_f	K_{fs}	
C	18	1.70	2.10	1.53
F1	18	1.92	1.34	1.41
R2	19	3.11	3.88	1.36
E	19	1.70	2.10	1.52
F2	19	1.92	1.34	1.36
H	20	---	---	2.23
F3 (Sección crítica)	20	1.79	1.27	1.32
J	22	1.70	1.54	3.64
J1	65	---	---	55.77
K	30	2.05	1.70	8.61

Diseño eje 3

Este eje cuenta con un par torsor alto a lo largo del eje en relación con los demás, y un momento flector resultante alto en el punto J1; parte central del rodillo (véase Figura 2.11), no obstante, en dicho punto no existen concentradores de esfuerzos. Los puntos contiguos con mayor momento flector son J y K (ver Figura 2.14). Si bien en estos puntos existe un hombro que genera concentración de esfuerzos, se puede establecer un radio de acuerdo alto para disminuirlos. Consecuentemente, se analiza el punto F2, en el cual se tiene un hombro que requiere un radio de filete pequeño por el rodamiento que se acopla a esa sección, dado que tiene un momento alto de 39.40 [Nm] y par torso de 17.80 [Nm], se define este sitio como sección crítica. La Tabla 2.16 resume las consideraciones necesarias para el diseño.



(a)



(b)

Figura 2.14. Diagrama de fuerzas internas para el eje 3: (a) Momento flector resultante. (b) Par torsor.

Tabla 2.16. Especificaciones de diseño para el eje 3.

Parámetro	Valor	Descripción
Límite de resistencia a la fatiga del espécimen de laboratorio [MPa]	638	Se tiene un $S_{ut} < 1400$ MPa
Factor de seguridad	1.3	Recomendación de [7]
Resistencia a la tracción del material [MPa]	1276	Se obtuvo de [7]

Factor de modificación de condición de superficie	0.68	Eje maquinado
Factor de modificación de tamaño	1.00	No se conoce a priori el diámetro
Factor de modificación de carga	1.00	
Factor de modificación de temperatura	1.00	Operación por debajo de 20 [°C]
Factor de confiabilidad	0.81	Confiabilidad de 99%
Factor de modificación de efectos varios	1.00	
Límite de resistencia a la fatiga del elemento	352	
Concentrador de esfuerzos normales a fatiga	1.7	De manera conservadora se asimila $K_t = K_f$ para un filete de hombro redondeado [2].
Concentrador de esfuerzos cortantes a fatiga	1.5	De manera conservadora se asimila $K_{ts} = K_{fs}$ para un filete de hombro redondeado [2].
Momento alternante [Nm]	39.44	
Torque medio [Nm]	17.80	
Diámetro [mm]	14.03	

Se requiere un diámetro de 14.03 [mm] para esta sección, que corresponde al alojamiento del rodamiento, no obstante, resulta impráctico realizar la compra de diferentes rodamientos para cada eje, y resaltar que a nivel comercial los rodamientos más cercanos se encuentran con diámetro interno de 17 y 20 [mm], se define un diámetro de 20 [mm] para la sección crítica. Los diámetros de las secciones adyacentes, sus valores de concentración de esfuerzo calculados y verificación del factor de seguridad se presentan en el ANEXO IX.

Diseño eje 1

El eje 1 (véase Figura 2.9) se diseña en último lugar. Este eje no tiene par torsor (ver Tabla 2.12), únicamente se ve afectado por un momento flector debido a la presión que ejerce la pintura sobre este, y que es máximo en el punto J1 con un valor de 34.6 [Nm], sin concentrador de esfuerzos (ver Figura 2.14). En el punto J se tiene un momento resultante alto de 17.81 [Nm] y un concentrador de esfuerzos debido a un hombro. El resto de los puntos cuentan con un momento bajo; en consecuencia, se define la sección crítica en J y en la Tabla 2.17 se muestran las consideraciones de diseño.

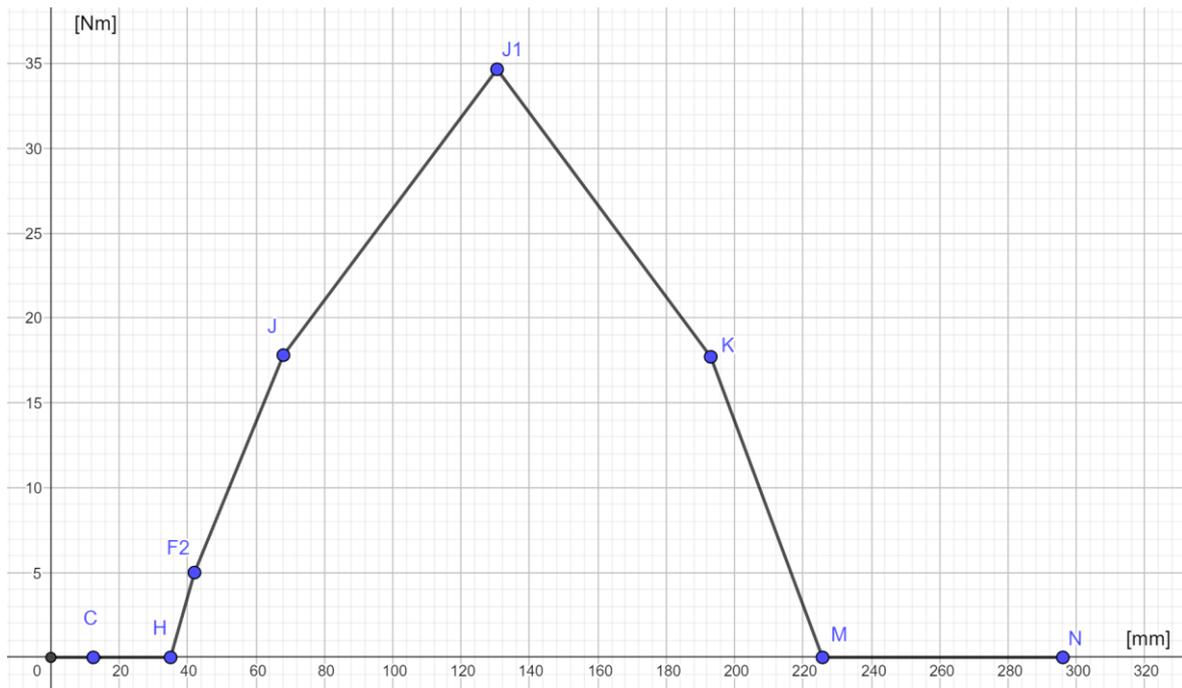


Figura 2.14. Diagrama de momento flector resultante en el eje 1.

Tabla 2.17. Especificaciones de diseño para el eje 1.

Parámetro	Valor	Descripción
Límite de resistencia a la fatiga del espécimen de laboratorio [MPa]	638	Se tiene un $S_{ut} < 1400$ MPa
Factor de seguridad	1.3	Recomendación de [7]
Resistencia a la tracción del material [MPa]	1276	Se obtuvo de [7]
Factor de modificación de condición de superficie	0.68	Eje maquinado
Factor de modificación de tamaño	1.00	No se conoce a priori el diámetro
Factor de modificación de carga	1.00	
Factor de modificación de temperatura	1.00	Operación por debajo de 20 [°C]
Factor de confiabilidad	0.81	Confiabilidad de 99%
Factor de modificación de efectos varios	1.00	
Límite de resistencia a la fatiga del elemento	352	
Concentrador de esfuerzos normales a fatiga	2.7	De manera conservadora se asimila $K_t = K_f$ para un filete de hombro agudo [2].
Concentrador de esfuerzos cortantes a fatiga	2.1	De manera conservadora se asimila $K_{ts} = K_{fs}$ para un filete de hombro agudo [2].
Momento alternante [Nm]	17.81	
Torque medio [Nm]	0	
Diámetro [mm]	12.77	

Se requiere de un diámetro de 12.77 [mm] para la sección crítica, pero bajo la consideración de tener un sistema funcional, se define un diámetro de 22 [mm]. Esto es debido a que esta sección separa el rodamiento y el rodillo al igual que en los otros ejes. Dado que es un eje que no transmitirá potencia, los factores de seguridad son altos; particularmente para esta sección el factor de seguridad a fatiga es el más bajo, con un valor de 6.95. Para el resto de los puntos de análisis, revisar el ANEXO IX que muestra los factores de seguridad en cada punto del eje 1.

2.5.3 Selección de rodamientos

Este proceso depende del tipo de carga que se transmite en los apoyos de los ejes. Cada eje cuenta con dos apoyos y únicamente se transmiten fuerzas radiales, de modo que la carga dinámica equivalente (P) será igual a la carga total radial, como se puede ver en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Fuerza resultante en cada apoyo.

Eje	Apoyo	Reacción yx [N]	Reacción zx [N]	P [kN]
1	H	0.00	539.77	0.54
	M	0.00	541.48	0.54
2	H	1609.42	1580.98	2.26
	M	591.11	980.30	1.14
3	H	1206.80	2120.19	2.44
	M	352.49	1522.32	1.56

Cada rodamiento tiene una capacidad de carga (C) específica, y SKF dispone de un catálogo de rodamientos donde se puede encontrar este valor dependiendo las características físicas [9]. Los rodamientos que se escogen son de bolas y la selección se hace tomando en cuenta que la capacidad de carga dinámica del rodamiento supere la carga dinámica equivalente. De acuerdo con la especificación del cliente, se busca una operación de la máquina de al menos 6 años. Considerando que el uso que se le dará es de máximo 10 horas al mes, su equivalencia en horas de servicio es de 720 horas.

Para el caso del eje 3 (cuenta con la mayor carga dinámica equivalente), en el apoyo H con sección en el eje de 20 [mm], se tiene una carga dinámica equivalente de 0.54 [kN]. Se prueba el rodamiento 6004 – 2RSH, con capacidad de carga dinámica de 2.24 [kN]. Respecto a las horas de servicio, al usar la Ecuación 1.4.18 se obtiene 4202 horas de servicio, superior al requerimiento del cliente, por tanto, el rodamiento 6004-2RSH es adecuado. En la Tabla 2.19 se presentan las cargas dinámicas y horas de servicio de cada rodamiento seleccionado.

Tabla 2.19. Resultados de la selección de rodamientos.

Eje	Punto	Rodamiento	Capacidad de carga dinámica [kN]	Carga equivalente [kN]	Giro [rpm]	Horas de servicio
1	H	6004 – 2RSH	9.95	0.54	30	3479911
	M	61906 – 2RS1	7.28	0.54	30	1350134
2	H	6004 – 2RSH	9.95	2.26	90	15974
	M	61906 – 2RS1	7.28	1.14	90	47654
3	H	6004 – 2RSH	9.95	2.44	270	4202
	M	61906 – 2RS1	7.28	1.56	270	6237

2.5.4 Selección de chavetas

La transmisión de potencia del eje a los engranes se da a través de chavetas, por lo que cuentan con dos modos de falla: cortante y aplastamiento. Se diseña el tercer eje (la sección donde se monta el engrane tiene un diámetro de 18 [mm]), que cuenta con el mayor par torsor de 62.6 [Nm]. El engranaje 3 registra la mayor fuerza cortante (tangente a la superficie del eje y transversal a la chaveta) con un valor de 6955.6 [N]. El diámetro del eje, donde se monta el engranaje 3, cuenta con la menor sección de todos los ejes, en atención a lo cual se define una chaveta cuadrada de 6x6 [mm].

La chaveta es de acero 1045, con una resistencia a la fluencia de 413 [MPa]. Por la teoría de la energía de distorsión, su resistencia al cortante es 238.3 [MPa]. Haciendo uso de las Ecuaciones 1.4.19 y 1.4.20, la longitud que se requiere para evitar falla por cortante en una chaveta cuadrada de 6 mm y con un factor de seguridad de 1.1, es de 6.42 [mm], mientras que por aplastamiento se requiere una longitud de 12.84 [mm], siendo este el modo de falla dominante. El selecciona una longitud de chaveta de 14 [mm] (norma DIN 6885 [15]) al ser la más comercial. Se selecciona misma chaveta para todos los engranajes. En la Tabla 2.20 se resume la verificación del factor de seguridad para las chavetas de engranajes y acople.

Tabla 2.20. Factor de seguridad de chavetas

Modo de falla	Referencia de localización del chavetero	Chaveta seleccionada	Factor de seguridad
Falla por cortante	Engrane 1	DIN 6885 6x6x14	2.88
	Engrane 3	DIN 6885 6x6x14	9.96
	Unión del eje central al acople flexible	DIN 6885 6x6x22	4.11

Falla por aplastamiento	Engrane 1	DIN 6885 6x6x14	1.44
	Engrane 3	DIN 6885 6x6x14	4.98
	Unión del eje central al acople flexible	DIN 6885 6x6x22	2.06

2.5.5 Diseño de engranajes para fatiga por flexión y picadura

Los engranes seleccionados cuentan con dos modos de falla: fatiga por flexión y fatiga por picadura. En esta sección se calcula el ancho de cara con el cual se fabrican los engranajes contra dichos modos de falla. Siguiendo las recomendaciones de la norma AGMA (haciendo uso de las Ecuaciones 1.4.10, 1.4.11, 1.4.12 y 1.4.13), la Tabla 2.23 muestra los resultados para el diseño de engranajes. Estos resultados no incluyen el análisis para el engranaje 2 y 4 por su nula transmisión de potencia. Los engranajes se fabricarán de acero 705 templado (Grado 1), con dureza 430 HB provista por el proveedor.

Teniendo en cuenta que el sistema se encuentra sobredimensionado en los ejes y selección de motor, un factor de seguridad de 1.1, para ambos modos de falla, es suficiente para garantizar la integridad y durabilidad de estos elementos.

La carga tangencial que actúa sobre el diente es de 1092 [N], que, junto con los factores determinados por la AGMA, ver ANEXO X, muestran que el mayor ancho de cara se da para evitar la falla por fatiga superficial en el engrane 3, con un valor de 13.9 [mm]. Se busca engranajes normalizados, por lo que a nivel comercial se encuentra un ancho de cara de 15 [mm] para un engranaje de 22 dientes con módulo de 1.5. En consecuencia, se define un ancho de cara de 15 [mm]. En la Tabla 2.21 se verifica el factor de seguridad con este ancho de cara.

Tabla 2.21. Factor de seguridad de engranes.

Modo de falla	Detalle	Engrane 1	Engrane 3
Fatiga por flexión	Factor de seguridad en flexión (SF)	1.60	1.40
Fatiga superficial	Factor de seguridad en fatiga superficial al cuadrado para dientes sin coronar (SH)	1.89	1.15

2.8 Costos de fabricación

Los costos de fabricación se desglosan en costos de elementos normalizados, materia prima, fabricación y complementarios. En este último se incluyen los costos de mano de obra y costos indirectos de transporte y herramientas. Toda esta información se presenta

en la Tabla 2.22, 2.23 y 2.24. Además, son los costos reales de producción del sistema de transmisión, por lo tanto, incluyen IVA.

Tabla 2.22. Costos de elementos normalizados

N°	Descripción	Cantidad	Precio Unitario [USD]	Precio Total [USD]
1	Motoreductor WEG trifásico hierro 0.75 HP + Ortogonal Aluminio i:20 90 RPM	1	309,57	309,57
2	Perno allen M5x10x0,8.	16	0,17	2,69
3	Tuerca M6x0,8	4	0,02	0,09
4	Perno hexagonal M6x35x0,8	4	0,13	0,54
5	Cara acople LOVEJOY L-090 1/4	2	21,92	43,84
6	Caucho LOVEJOY L-090/095	1	21,12	21,12

Tabla 2.23. Costos de materia prima

N°	Descripción	Cantidad	Precio Unitario [USD]	Precio Total [USD]
1	Barra redonda de acero bonificado 705 de 40 mm.	1	4.00	4.00
2	Barra redonda de acero bonificado 705 de 105 mm.	1	18.00	18.00
3	Bloques de acero A36 de 70x70x30 mm (7,12 kg)	7.12	2.02	14.35
4	Platinas de acero anti abrasivo 280x30x12 (4,60kg)	4.60	3.09	14.22
5	Barra redonda de acero inoxidable 304 3"x130 mm	3	25.76	77.28
6	Barra redonda de acero inoxidable 304 3"x200 mm	1	39.20	39.20
7	Barra redonda de acero inoxidable 304 3"x256 mm	1	50.40	50.40
8	Barra redonda de acero inoxidable 304 3"x228 mm	1	44.80	44.80
9	Acero para chavetas 20x20x70 mm	4	1.90	7.60
10	Eje de transmisión 3/4" x 145 mm	1	1.60	1.60
11	Eje de transmisión 1" x 65 mm	4	1.20	4.80

Tabla 2.24. Costos de manufactura

N°	Descripción	Cantidad	Precio Unitario [USD]	Precio Total [USD]
1	Maquinado de eje izquierdo de acero inoxidable	3	80	240
2	Maquinado de eje derecho de acero inoxidable	3	80	240
3	Engranajes de 22 dientes con módulo 1.5	2	37,93	75,86

4	Engranajes de 65 dientes con módulo 1.5	2	112,1	224,2
5	Maquinado de rieles en CNC	4	15	60
6	Maquinado de cajas para alojamiento de rodamiento	6	15	90
7	Maquinado de acople flexible, perillas, soportes de riel y canales laterales de rodillo	1	30	30
8	Maquinado eje del reductor	1	10	10

Tabla 2.25. Costos complementarios

N°	Descripción	Total [USD]
1	Costos de ingeniería	195,96
2	Costos de montaje	163,30
3	Costos imprevistos	10

De este modo, en la Tabla 2.25 se resume el costo total de fabricación del sistema de transmisión para la molienda de pintura al óleo.

Tabla 2.25. Costo total

Categoría	Total [USD]
Costo de elementos normalizados	378,54
Costo de materia prima	284,37
Costo de manufactura	970,06
Costos complementarios	369,25
Costo total de fabricación	2002,22

El costo del diseño y fabricación del sistema de transmisión corresponde a \$2,002.22, lo que junto al componente de molienda y refrigeración nos da un valor total de fabricación el molino de pintura de \$2441.53. Este costo se encuentra un %15 por debajo del costo del equipo más asequible presentado en el benchmarking (Ver Tabla 1.4.3), sin considerar el costo de importación a Ecuador.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se discute y verifica el funcionamiento del molino tricilíndrico para la molienda de pintura al óleo, es decir, cada uno de los componentes diseñados, teniendo particular énfasis en la operación del sistema de transmisión desde el montaje, encendido y operación con y sin carga.

3.1 Discusión de resultados de diseño

3.1.1 Diseño de engranajes

La geometría de los engranajes diseñados en el capítulo 2, se estableció bajo 3 requerimientos. Primero, que sean engranajes estándar, es decir, que estén disponibles en el mercado y no sean únicos en su tipo. Segundo, que cumpla con la relación de transmisión sugerida por el representante de Óleos América. Por último, que se puedan mecanizar en los Laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional (EPN).

El mecanismo de transmisión cuenta con 2 engranajes de 65 dientes y módulo 1.5, y 2 engranajes de 22 dientes y mismo módulo. El módulo de 1.5 se establece por ser el módulo de fresa más pequeño que dispone la metalmecánica de San Bartolo, y dado que uno de los engranajes tiene un diámetro externo de 36 [mm], no es conveniente usar un módulo mayor. Además, un módulo de 1.5 es común en máquinas industriales.

El ancho de cara establecido cumple con los requerimientos para evitar la falla por flexión y picadura. El ancho de cara es común en el mercado nacional e internacional. Por lo tanto, resulta adecuado preferir este ancho de cara en caso de que los engranajes sufran algún fallo y se necesite reemplazarlos.

Estos engranajes proporcionan velocidades de giro distintas a las inicialmente previstas. Se pretendía lograr giros de 30, 90 y 270 rpm para los rodillos 1, 2 y 3, respectivamente. Sin embargo, la estandarización de los engranajes provoca que estas velocidades se vean afectadas, resultando en 30.5, 90 y 266 rpm, respectivamente, para cada rodillo. La diferencia no es significativa; de hecho, la mayor discrepancia corresponde al tercer rodillo, con una variación del 1.5% respecto a la velocidad requerida, lo cual, según el representante de Óleos América, no representa un problema al no ser perceptible dicha diferencia. Estas velocidades de giro se toman en cuenta para el diseño de los ejes.

3.1.2 Diseño de ejes

Los ejes se diseñan tomando en cuenta: funcionalidad y resistencia. Al ser funcionales, no se adquieren complementos diversos en medida, debido a la similitud de sus secciones por lo que se compran solo 2 tipos de rodamientos y anillos de retención, y 1 solo tipo de chaveta.

Las secciones de los ejes están diseñadas para una vida infinita, con un factor de seguridad a fatiga que supera un valor de 1.3. También se considera que los engranajes pequeños (de 22 dientes y módulo 1.5) posean un espesor de borde al momento de ubicarse en los ejes. Este engranaje cuenta con un diámetro interior de 29.5 [mm], y requiere una sección para el chavetero de 3.3 [mm]; quedando una sección libre con diámetro de 22.9 [mm] para

el agujero del eje, sin considerar el espesor de borde. En otras palabras, la sección del eje, que aloja a estos engranajes, debe ser menor a 22.9 [mm]. Esto se cumple, ya que el eje 2 tiene una sección de 19 [mm] y el eje 3 una sección de 18 [mm] para ambos engranajes de 22 dientes, con lo que se logra optimizar la funcionalidad y resistencia.

Por último, es importante destacar que el eje parte izquierda (sólido) forma un solo cuerpo con el rodillo, para mantener una buena concentricidad entre eje y rodillo.

3.2 Pruebas

El correcto funcionamiento de la máquina se verifica a través de la integración de todos los componentes que conforman el molino tricilíndrico, su adecuada operación en diferentes condiciones de carga y fases de molienda, así como un protocolo de pruebas.

3.2.1 Integración de componentes

Bajo el requerimiento de tener una maquina funcional cuyo mantenimiento sea sencillo, se priorizan las uniones no permanentes, de tal forma que la máquina es desmontable y en caso de requerir realizar una limpieza al mecanismo o cambio de elementos, resulta sencillo desmontarlos y conseguirlos en el mercado. La Figura 2.15 a 2.20 muestra el proceso de ensamble del sistema de transmisión, junto con el sistema de refrigeración, a la estructura que trabajará a modo de bancada para todos los componentes diseñados.



Figura 2.15. Montaje de rodamientos a cajas móviles.



Figura 2.16. Montaje de rodillos.



Figura 2.17. Montaje de engranajes, anillos de retención y acople del eje motriz.



Figura 2.18. Montaje de canales laterales a rodillos y rieles en bastidor.

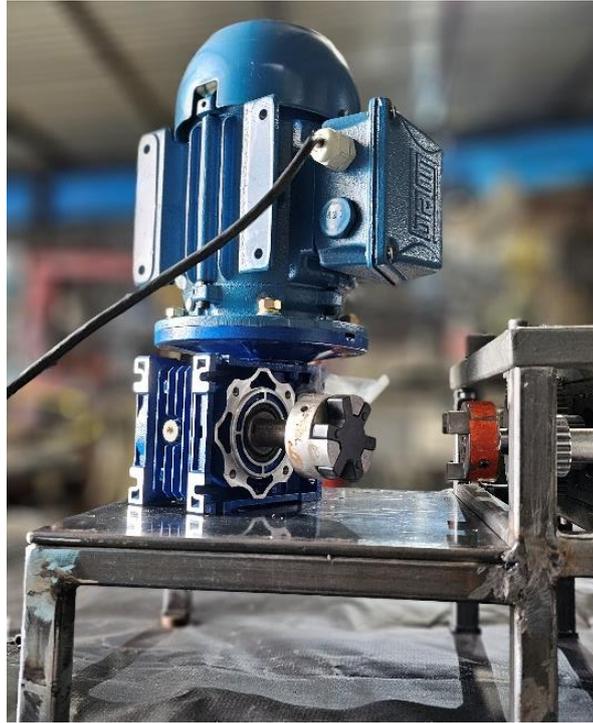


Figura 2.19. Montaje del reductor de velocidad al eje central.



Figura 2.20. Molino tricilíndrico de pinturas ensamblado.

3.2.2 Protocolo de pruebas

El ANEXO XI contiene el protocolo de pruebas aplicado a la máquina, con especial mención en aspectos vinculados al sistema de transmisión.

Inspección de montaje

Se busca asegurar que se cuente con todos los elementos en buen estado para el montaje del sistema de transmisión, incluyendo los componentes de unión entre piezas mecánicas y conexiones de control que se conectan a elementos eléctricos como el arrancador directo.

Los elementos cuentan con tolerancias bajas, es decir, encajan adecuadamente entre componentes, lo que permite que todos los elementos se encuentren estables sin carga. Los ejes se encuentran bien alineados y cuentan con un giro fluido junto con los engranajes. El sistema global no muestra inestabilidad, la estructura está bien nivelada junto con sus componentes.

Sobre las perillas, 3 de las 4 perillas funcionan adecuadamente. Una de ellas presenta un ligero bloqueo en la rosca del soporte de riel y la rosca de la perilla, por lo que existe un bloqueo que no permite alcanzar la separación de 0.2 [mm] entre rodillos. Para solucionarlo, se rectificó la rosca del soporte con un machuelo M10x1, y la rosca de la perilla con una terraja M10x1.

El molino tricilíndrico de pintura, con todos sus componentes ensamblados, alcanza dimensiones de 720 x 270 x 460 [mm] de largo, ancho y alto respectivamente. Estas dimensiones son muy cercanas a las esperadas en un principio de 730 x 250 x 450 [mm] de largo, ancho y espesor respectivamente.

Inspección de funcionamiento sin mezcla de pintura

Esta prueba tiene la finalidad de verificar que los componentes acoplados funcionen adecuadamente, permitiendo un movimiento fluido entre todas las partes móviles y que su movimiento no genere inestabilidad o vibraciones abruptas para el sistema global.

Se inicia con el encendido del motor, y se evidencia fluidez en el giro de los rodillos, por lo que los engranes y cajas móviles fueron fabricados adecuadamente, además, los rodillos no presentan perturbación en su rotación, es uniforme, denotando una buena alineación entre centros. El motor no genera vibración excesiva; los componentes se mantienen unidos, no existe presencia de ruidos anómalos. Se puede mover los rodillos sin que exista rozamiento entre ellos, con una fuerza pequeña aplicada en las perillas, de modo que se puede regular la distancia únicamente con la fuerza generada por el agarre entre el dedo índice y pulgar.

Los engranajes mantienen una temperatura de 26 [°C], ver Figura 2.21, y logran velocidades de giro de 30.2, 90.8 y 167.1 para el rodillo 1, 2 y 3 respectivamente, tal como se observa en la Figura 2.22.



Figura 2.21. Temperatura de engranajes en operación sin carga.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.22. (a) Velocidad de giro del rodillo 1. (b) Velocidad de giro del rodillo 2. (c) Velocidad de giro del rodillo 3.

Existe un error relativo muy bajo en la velocidad de giro real respecto a la teórica, como se muestra en la Tabla 3.1, de tal forma que el diseño no se verá afectado por las velocidades de giro reales.

Tabla 3.1. Error relativo en la velocidad de giro de los rodillos.

Rodillo	Velocidad teórica [rpm]	Velocidad real [rpm]	Error relativo [%]
1	30.5	30.2	0.98
2	90	90.8	0.88
3	266	267.1	0.41

Inspección de funcionamiento con mezcla de pintura

En esta etapa la maquina trabaja con diferentes mezclas de aceite y pintura, por lo que se verifica que el sistema de transmisión conduce la potencia necesaria para moler la mezcla. Asimismo, que se puede realizar el cambio de molienda, a una película más fina de pintura, gracias al desplazamiento de las cajas móviles en operación.

Se coloca pintura en la brecha existente entre el primer y segundo rodillo. La pintura fluye alrededor del primer y segundo rodillo, sin embargo, entre el segundo y tercero no existe un adecuado paso de pintura. Esto se debe a que en un principio el requerimiento del cliente fue conseguir una separación mínima de 0.2 [mm] y máxima de 0.9 [mm] entre rodillos, hecho que se cumple, no obstante, resulta insuficiente para obtener el paso adecuado de pintura al tercer rodillo. Por tal razón, se modifica las cajas de apoyo del rodillo 3, generando una grada de 0.15 [mm] en dos de las esquinas de cada caja móvil, ampliando así su rango de desplazamiento a una separación mínima entre el rodillo 2 y 3 de 0.05 [mm], lo cual garantiza el paso de pintura, tal como se observa en la Figura 2.23.

En operación la fuerza aplicada a las perillas para el desplazamiento de los rodillos es ligeramente mayor, no obstante, sigue siendo suficiente realizar un agarre con el dedo pulgar e índice. Los rodillos se mantienen en la posición definida por las perillas, no retroceden ni avanzan por la vibración existente. Aun con carga, el movimiento de los rodillos no es forzado, es decir, el sistema de transmisión entrega la potencia suficiente para moler la mezcla de pigmento y aceite.

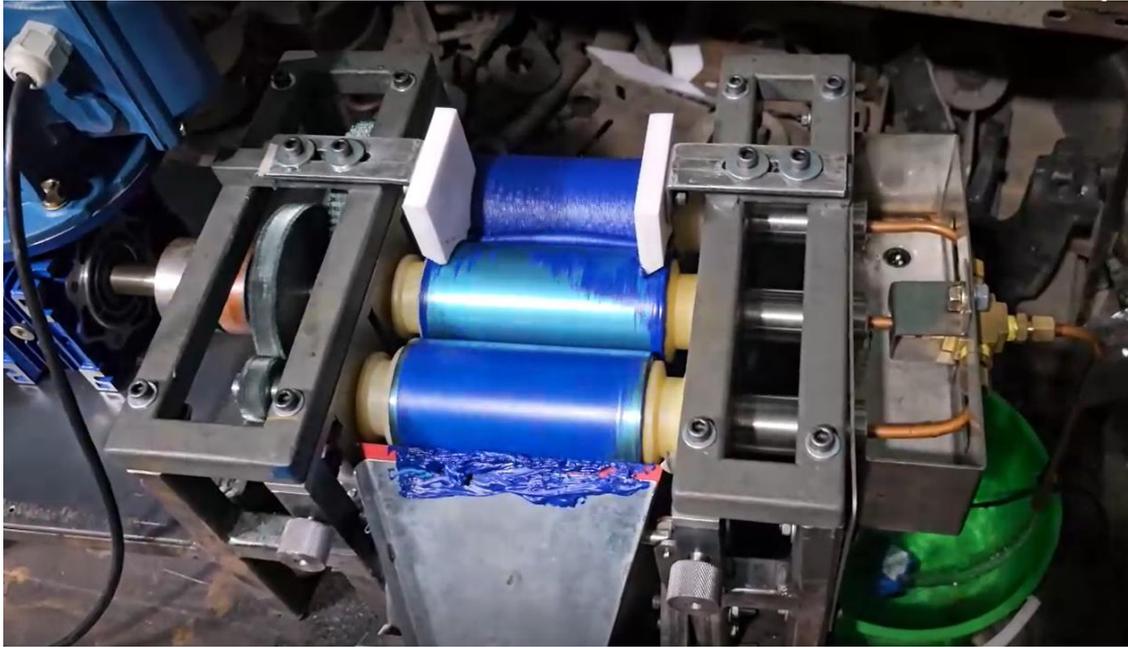


Figura 2.23. Molino tricilíndrico en operación.

Se presenta el siguiente video para constatar la adecuada operación del molino tricilíndrico de pinturas al óleo en condiciones con y sin carga.

Enlace:

https://figshare.com/articles/media/Curricular_Integration_Work_Design_and_Construction_of_a_Prototype_of_a_Three-Roll_Mill_/25255660/1

3.3 Conclusiones

- Se diseñó y construyó un sistema de transmisión capaz de entregar la potencia necesaria para la molienda de la mezcla de pigmentos y aceites que conforman la pintura al óleo.
- Se define el uso del motor WEG W22 de 0.75 [hp] para el accionamiento de la máquina, con un par nominal de 3.13 [Nm], sin embargo, debido al reductor de velocidad presente (relación de transmisión de 20), se tiene un torque de 62.6 [Nm] a la entrada del eje motriz o salida del reductor y velocidad de giro de 90 rpm.
- Se diseñó y construyó un sistema de transmisión por engranajes estandarizados, de acero 705 templado, con 2 engranajes de 22 dientes y módulo 1.5, y 2 engranajes de 65 dientes con el mismo módulo, cada uno con ancho de cara de 15 [mm]. Se consigue una velocidad de giro real de 30.2, 90.8 y 267.1 rpm para los rodillos 1, 2 y 3 respectivamente.
- Los ejes cumplen con la condición de trabajo a fátiga. Para garantizar la funcionalidad del mecanismo, la menor sección en cada eje es de 18 [mm] de diámetro (sección en la que se montan 3 de los engranajes), mientras que la sección de alojamiento de los rodamientos en el apoyo izquierdo es de 20 [mm] y en el derecho de 30 [mm].
- Se seleccionaron rodamientos SKF 6004-2RSH y 61906-2RSH para el apoyo izquierdo y derecho de cada eje respectivamente. Estos rodamientos superan la carga equivalente de cada uno de los apoyos y satisfacen el requerimiento del cliente de cumplir con al menos 6 años de servicio, es decir 720 horas, puesto que el rodamiento tiene una vida útil de 4202 horas.
- Se han diseñado chavetas contra modos de falla por cortante y aplastamiento. Se usan chavetas DIN 6885 5x5x15 para el enlace de cada eje con su respectivo engranaje.
- Se facilitó la fabricación y montaje, de cada uno de los componentes del sistema de transmisión, gracias a la realización de planos de conjunto, subconjunto y taller que señalaron medidas, tolerancias y acabados superficiales.
- Del protocolo de pruebas se tiene una respuesta favorable respecto a la operatividad del sistema de transmisión. Los ejes cuentan con una buena alineación, por lo que no existe roce en entre rodillos, aun cuando su separación es mínima. Las cajas móviles se deslizan para cubrir una holgura entre 0.05 [mm] a 0.9 [mm].

- El costo de los componentes asociados al sistema de transmisión es de \$2,002.22, incluyendo elementos comunes con el resto de los componentes desarrollados para este proyecto: molienda y refrigeración.
- La construcción del sistema de transmisión permite la correcta operación de los rodillos, respetando la relación de velocidades y par torsor necesario para que la mezcla de aceite y pigmentos atraviese un proceso de molienda que garantice la calidad de las pinturas al óleo de la empresa Óleos América.

3.4 Recomendaciones

- Dado que la mayoría de las componentes se maquinaron, es recomendable realizar un estudio profundo sobre alternativas de materiales. En el caso de los engranajes se puede emplear un AISI 1045, mucho más fácil de maquinar, al cual se le puede aplicar posteriormente un cementado para mejorar su dureza.
- Para los rodillos de acero inoxidable se puede plantear un diseño que facilite aún más el mecanizado, teniendo en cuenta que su dureza representa un desafío al momento del desbaste del material en bruto y el tallado de formas complejas, en adición a un elevado costo.
- Estudiar una forma de riel mucho más sencilla, la cual permita el desplazamiento de las cajas móviles con un canal de riel simple de mecanizar.
- En caso de superar por mucho las horas de servicio especificadas en este trabajo, realizar un análisis del sistema de enfriamiento de los engranajes.
- Cubrir el sistema de transmisión, para evitar posibles accidentes con los operadores del molino, y contener el lubricante o grasa que se emplee en los engranajes.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. C. Oña Vega, Diseño y construcción del sistema de molienda de un molino tricilíndrico para la producción de pinturas al óleo, Quito, Pichincha: Escuela Politécnica Nacional, 2024.
- [2] C. A. Guapi Sánchez, Diseño y construcción del sistema de refrigeración e implementación del control de un molino tricilíndrico para la molienda de pintura al óleo, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2024.
- [3] J. M. García Saiz, «Sin pintura y sin pinceles,» *Educación Química*, vol. 22, nº 3, pp. 203-206, 2011.
- [4] P. Barberán Rodríguez, «Estudio técnico y propuesta de intervención de una pintura al óleo sobre lienzo,» : *Universitat Politècnica de València*, 2022.
- [5] M. A. Zalbidea Muñoz, «Nociones básicas sobre materiales colorantes,» *Universitat Politècnica de València*, p. <http://hdl.handle.net/10251/82159>, 2017.
- [6] J. C. Parra Mena y Á. R. Sotomayor Torres, «Diseño, Automatización y Simulación de una línea para Fabricación de pinturas,» *Escuela Politécnica Nacional*, 7 Septiembre 2015.
- [7] P. y. Artistas, «Pinturayartistas.com,» 16 Junio 2008. [En línea]. Available: <https://www.pinturayartistas.com/receta-para-la-fabricacion-del-oleo/>. [Último acceso: 8 Diciembre 2023].
- [8] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, «Mechanical Engineering Design,» de *SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN*, New York, McGraw-Hill Education, 2015.
- [9] SKF, Rolling bearings, SKF Group, 2018.
- [10] M. Yuan, «Made in China,» Shandong Longxing Chemical Machinery Group, [En línea]. Available: <https://lynn2359068.en.made-in-china.com/product/ieOJMkflHbpP/China-Printing-Ink-Lubricating-Grease-Grinding-Usage-Three-Roller-Mill.html>. [Último acceso: 12 Diciembre 2023].
- [11] J. Machinery, «Alibaba,» Guangzhou Jinfeng Light Industry Machinery Co., Ltd., [En línea]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Ink-Making-Machine-Grinding-Equipment-3_62069441068.html?spm=a2700.details.0.0.38a562fcftL5SX. [Último acceso: 12 Diciembre 2023].
- [12] ELE, «Made in China,» Shanghai ELE Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd., [En línea]. Available: <https://elemix.en.made-in-china.com/product/uSjEhqMYEWck/China-Used-in-High-Viscosity-Material-Three-Roller-Mill.html>. [Último acceso: 12 Diciembre 2023].
- [13] I. S.A., Productos mecánicos para transmisión de potencia, Bogotá: INTERMEC S.A., 2015.

- [14] R. L. Norton, *Machine Design - An Integrated Approach*, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2011.
- [15] D. I. f. Normung, DIN 6885, Barcelona: OPAC.
- [16] L. Carvajal, *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado*, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [17] C. W. Machinery, «China Winyone Machinery,» Wintone Machinery, [En línea]. Available: <https://www.molino-para-maiz.com/Productos/Molino-de-maiz/molino-electrico-para-granos.html>. [Último acceso: 9 Diciembre 2023].
- [18] S. T. B.V., «SIEBTECHNIK TEMA B.V.,» Siebtechnik Tema B.V. , [En línea]. Available: <https://www.siebtechnik-tema.nl/es/molinos-de-rodillos/>. [Último acceso: 9 Diciembre 2023].