

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN MOLINO
TRICILÍNDRICO PARA LA PRODUCCIÓN DE PINTURAS AL ÓLEO**

COMPONENTE:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL PARA EL PROTOTIPO DE
UN MOLINO TRICILÍNDRICO**

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

CARLOS ANDRÉS GUAPI SÁNCHEZ

carlos.guapi@epn.edu.ec

DIRECTOR: WILSON IVÁN GUACHAMÍN ACERO

wilson.guachamin@epn.edu.ec

DMQ, marzo 2024

CERTIFICACIONES

Yo, CARLOS ANDRÉS GUAPI SÁNCHEZ 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.

CARLOS ANDRÉS GUAPI SÁNCHEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CARLOS ANDRÉS GUAPI SÁNCHEZ, bajo mi supervisión.

WILSON IVAN GUACHAMÍN 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.

CARLOS ANDRÉS GUAPI SÁNCHEZ

WILSON IVAN GUACHAMÍN ACERO

DEDICATORIA

A Dios por guiar mi camino y darme fortaleza en los momentos más difíciles de mi vida personal y estudiantil.

A mis padres Víctor y Carla por ser el motor que me impulsa cada día para conseguir mis sueños, por ser mi ejemplo de superación y brindarme su apoyo en estos años de sacrificio. Esto es por y para ustedes.

A mi hermano Martín y mi abuelito Jorge, que apoyarme siempre y estar presente en cada alegría y tristeza.

Al amor de mi vida, Mónica, por brindarme tu cariño y apoyo en estos cinco largos años y estar en cada momento de este logro.

A toda mi familia por sus consejos y ayuda.

Carlos

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios padre todo poderoso por darme fuerzas para continuar con este sueño y llegar a lograrlo.

A mis padres, Víctor y Carla, por todo el amor incondicional que me han brindado durante todo este camino. Por todo el cariño, los consejos y el apoyo. Sin ustedes nada de esto ha sido posible. Han sido el motor para levantarme y superarme cada día. Gracias por estar siempre pendiente de mí, por acompañarme en los momentos más difíciles. Ustedes son el motivo por el que luche cada día hasta conseguirlo. A mi hermano Martín y mi abuelito Jorge por siempre estar para mí, por cuidarme, escucharme, impulsarme y aconsejarme.

A la Escuela Politécnica Nacional, en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica por abrirme sus puertas y poder cursar sus aulas hasta convertirme en un gran profesional.

Al Ing. Wilson Guachamín, por brindarme su conocimiento y dedicación para la elaboración de este proyecto. Gracias por ser un apoyo a lo largo de mi vida estudiantil y de este proyecto.

Al amor de mi vida, mi compañera fiel, Mónica, por todo el cariño y consideración a lo largo de estos cinco años. Gracias por recordarme siempre de lo que soy capaz y de lo que puedo llegar a ser. Te dedico este logro y espero compartir contigo muchos logros más. Eres y serás siempre mi inspiración para lograr las cosas. Te amo.

A mis compañeros de TIC, Marcos y Pao, con quienes hemos sacado este proyecto adelante, gracias por ser un apoyo en los momentos difíciles, por brindarme su ayuda y conocimientos. Gracias por dar todo para que este proyecto salga adelante. Sé que se convertirán en grandes profesionales y espero poder regresarles todo ese apoyo.

A mis amigos, Adrián, Gaby y Ronny por hacer especiales estos cinco años, por su amistad sincera e incondicional. Gracias por permitirme compartir tantos momentos y recuerdos con ustedes. Los llevo siempre en mi corazón.

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 <i>Manufactura de la pintura al óleo</i>	3
1.4.2 <i>Molinos de tres rodillos</i>	4
1.4.3 <i>Importancia del control de temperatura en el proceso de molienda de pinturas al óleo</i> 6	
1.4.4 <i>Mecanismos de refrigeración en los molinos de tres rodillos</i>	7
1.4.5 <i>Análisis de la transferencia de calor en los rodillos de molienda</i>	10
1.4.6 <i>Sistema de control en el molino de tres rodillos</i>	20
1.4.7 <i>Benchmarking</i>	23
2 METODOLOGÍA.....	27
2.1 Casa de la calidad.....	29
2.2 Especificaciones técnicas	31
2.3 Análisis funcional	32
2.4 Plantamiento de soluciones modulares.....	33
2.4.1 <i>Módulo 1: Control y reducción de velocidad</i>	34
2.4.2 <i>Alternativas del módulo 1</i>	35
2.4.3 <i>Selección de alternativas del módulo 1</i>	36
2.4.4 <i>Solución virtual para el módulo 1</i>	37
2.4.5 <i>Módulo 2: Refrigeración de los rodillos</i>	38
2.4.6 <i>Alternativas del módulo 2</i>	41
2.4.7 <i>Selección de alternativas del módulo 2</i>	41
2.4.8 <i>Solución virtual para el módulo 2</i>	42

2.5	Solución virtual de los sistemas de control y refrigeración.....	43
2.6	Diseño de los componentes.....	44
2.6.1	<i>Módulo 1: Control y reducción de velocidad</i>	44
2.6.2	<i>Módulo 2: Refrigeración</i>	48
3	PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..	57
3.1	Pruebas.....	57
3.1.1	<i>Unión del sistema de control a la máquina</i>	57
3.1.2	<i>Unión del sistema de refrigeración a la máquina</i>	59
3.1.3	<i>Protocolo de pruebas</i>	60
3.2	Resultados	61
3.2.1	<i>Sistema de control y refrigeración en vacío</i>	61
3.2.2	<i>Sistema de control y refrigeración con carga</i>	62
3.2.3	<i>Calidad de la pintura</i>	65
3.2.4	<i>Verificación de dimensionamiento del sistema de refrigeración</i>	66
3.2.5	<i>Costos de fabricación</i>	68
3.3	Discusión de los resultados	71
3.4	Conclusiones	72
3.5	Recomendaciones	73
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
5	ANEXOS.....	76

RESUMEN

La demanda de producción de pinturas al óleo de alta calidad es fundamental para crear obras artísticas de alto impacto en el Ecuador. Para obtener esta calidad se debe disponer de un molino tricilíndrico. En este proyecto se diseña, fabrica y construye el sistema de refrigeración, además, se implementa el sistema de control en este tipo de molino. El sistema de refrigeración consta de un arreglo de tuberías de cobre de 1/4 pulg. que transporta agua hacia los tres rodillos de molienda por medio de una bomba de agua que está conectada a la tubería. Esta bomba, comúnmente utilizada en acuarios o fuentes, tiene la capacidad de suministrar un caudal de 2.5 lt/min. A medida que el agua circula por los rodillos, absorbe el calor generado por la fricción durante el proceso de molienda de la pintura, y posteriormente se recolecta en una especie de reservorio anclado a la estructura de la máquina. Luego, esta agua se traslada a un tanque más grande para su tratamiento y recirculación. Esto permite que la temperatura en la superficie de los rodillos se mantenga en un rango óptimo de operación. Por otro lado, el sistema de control consta de un arrancador directo que se encarga de iniciar y detener la máquina, y un reductor de velocidad que proporciona una velocidad constante de 90 rpm al eje motriz del molino.

PALABRAS CLAVE: refrigeración, control, tubería, bomba, temperatura, arrancador, reductor, velocidad, agua.

ABSTRACT

Good-quality oil paint production is crucial for creating impactful artworks in Ecuador. Achieving this quality requires a three-rolling mill machine. This project deals with the design, manufacture, and construction of the cooling system and the implementation of the control system. The cooling system consists of a 1/4 pulg. copper pipe arrangement that transports water to the three grinding rollers using a water pump connected to the pipe. This aquarium water pump can supply a flow rate of 2.5 lt/min. While the water circulates through the rollers, it absorbs the heat generated by friction during the paint grinding process. The heated water then collects in a reservoir fitted to the machine's structure. Finally, the water transfers to a larger tank for treatment and recirculation. This allows the surface temperature of the rollers to be maintained in an optimum operating range. On the other hand, the control system consists of buttons that initiate and stop the machine. It also includes a speed reducer that provides a constant speed of 90 rpm to the mill's drive shaft.

KEYWORDS: cooling, control, pipe, pump, starter, reducer, speed, water.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La pintura al óleo es una mezcla de pigmentos (sustancia colorante) con una base aglutinante, que por lo general son aceites naturales. La forma primitiva de conseguir esta pintura es la mezcla manual, donde el pintor tritura y dispersa los pigmentos en el aceite con un mortero hasta obtener una solución viscosa y brillante. Este proceso es laborioso, ya que para obtener 40 gramos de pintura se requiere entre media y una hora.

El molino tricilíndrico es una alternativa automatizada para la obtención de pintura al óleo. Este tipo de molino está compuesto de tres rodillos de molienda dispuestos horizontalmente que giran a diferente velocidad y en sentido contrario. Este movimiento genera fuerzas de corte que dispersan, de manera homogénea, las partículas de pigmento en el aceite. Además, la distancia entre rodillos se puede ajustar para obtener una mejor dispersión.

Una de las consideraciones importantes al diseñar este tipo de molinos es el calentamiento de los rodillos de molienda cuando se trabaja en largas jornadas de trabajo. Si la temperatura es excesiva, la pintura pierde sus propiedades de brillo y consistencia resultando en una textura inconsistente y con pobre homogeneidad. Por esto, es necesario que la máquina cuente con un sistema de refrigeración que permita mantener una temperatura óptima en la superficie de los rodillos y obtener pintura de calidad.

Por otro lado, la implementación del control en este tipo de máquinas permite regular la velocidad de entrada al molino. Esto debido a que este tipo de molinos funcionan a velocidades relativamente bajas. Además, proporciona una respuesta rápida en situaciones de emergencia, posibilitando que el molino se detenga para prevenir accidentes o daños en caso de atasco o sobrecarga del motor. Esta función es crucial para proteger al operador y evitar costosas reparaciones.

En este contexto, el desarrollo del presente proyecto contempla el Diseño y Construcción del Sistema de Refrigeración e Implementación del Control para el Prototipo de un Molino Tricilíndrico. Se empieza por realizar una revisión bibliográfica del sistema de refrigeración y control en este tipo de máquinas. Con toda esta información recopilada, se elaboran propuestas de alternativas obteniendo la mejor solución para ambos sistemas. Luego, se diseñan los elementos del mecanismo de refrigeración, el cual se fabrica. Después, se elaboran los planos de subconjunto y de taller para determinar la materia prima necesaria y los pasos necesarios para la fabricación de todos los elementos teniendo en cuenta el estudio de costos respectivos. Finalmente, se integra el módulo encargado de regular la velocidad, así como de gestionar el detenimiento y arranque del motor.

1.1 Objetivo general

Diseñar y construir el sistema de refrigeración e implementar el control de un molino tricilíndrico para la molienda de pintura al óleo.

1.2 Objetivos específicos

1. Analizar el estado de arte respecto al sistema de refrigeración y control en los molinos tricilíndricos
2. Determinar y establecer las especificaciones técnicas del sistema de refrigeración y control.
3. Proponer alternativas para el sistema de refrigeración y control para encontrar la solución general de ambos sistemas.
4. Dimensionar y seleccionar los componentes del sistema de refrigeración en base a la mejor alternativa planteada.
5. Elaborar el plano de subconjunto y los planos de taller de los elementos a fabricar del sistema de refrigeración.
6. Construir y ensamblar el sistema de refrigeración.
7. Implementar el sistema de control con las respectivas conexiones eléctricas.
8. Realizar pruebas de funcionamiento de los sistemas en vacío y con carga.

1.3 Alcance

El trabajo de Integración Curricular “Diseño y Construcción de un Prototipo de un Molino Tricilíndrico para la Producción de Pinturas al Óleo” está definido por tres componentes principales que son:

- Sistema de transmisión
- Sistema de Molienda
- Sistema de Refrigeración y Control

Los dos primeros componentes desarrollados por Changoluisa, M. [1] y Oña, P. [2], respectivamente, se une al componente desarrollado en el presente documento para obtener el prototipo de un molino tricilíndrico.

Este proyecto se centra en el diseño y construcción del sistema de refrigeración y la implementación del control del molino tricilíndrico.

1.4 Marco teórico

En este capítulo se presenta una recopilación de información acerca del funcionamiento del molino tricilíndrico, así como de los parámetros necesario para el diseño del sistema de refrigeración, e incorporación del control de la máquina.

1.4.1 Manufactura de la pintura al óleo

La pintura al óleo es un tipo de pintura artística que se compone de un aglutinante y pigmentos de color. La característica del óleo es su alta proporción de aceite en el aglutinante, que permite que la estructura de los pigmentos se mantenga o cambie muy poco manteniendo su color característico. Por lo general, el aceite utilizado es de origen vegetal como el aceite de linaza.

La manufactura de pintura al óleo es un oficio antiguo realizado a mano por los propios pintores. El proceso es simple y consiste en mezclar el pigmento seco con el aceite hasta formar una pasta. Después, se utiliza un triturador, generalmente de vidrio, para “moler” la pintura, es decir, cubrir cada partícula de pigmento con el aceite (ver figura 1.1). Sin embargo, la fabricación hecha a mano puede demorar en hacer un tubo de pintura de 30 minutos a 2 horas, por lo que, la fabricación de la pintura al óleo se ha industrializado. Para la producción de la pintura al óleo basta con dos máquinas: la primera es una máquina que permita mezclar el pigmento y el aceite hasta obtener la solución pastosa, y la otra debe realizar la molienda de la pintura. El molino de rodillos cumple la función de moler la pintura.

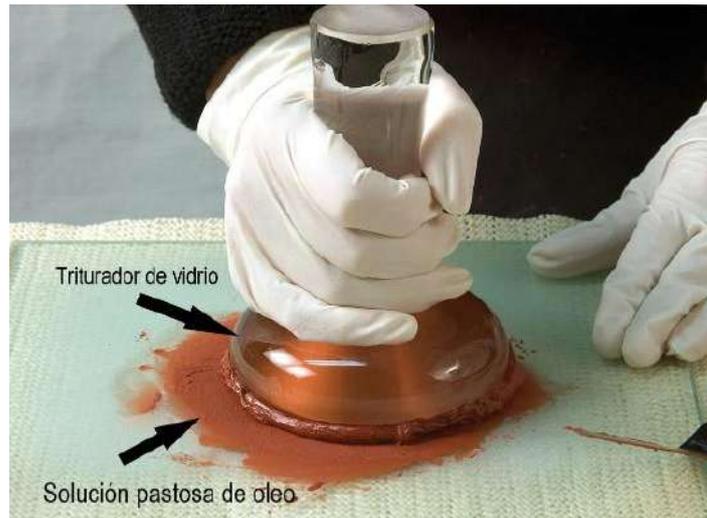


Figura 1.1. Proceso manual de molienda de pintura al óleo.

Fuente: [3].

1.4.2 Molinos de tres rodillos

El molino de tres rodillos es el más versátil y exitoso de todos los que usan rodillos. Este ha experimentado un gran desarrollo en el siglo XIX. Entre 1870 y 1890 se realizó un trabajo considerable en el diseño y mejora de los rodillos. Algunos estaban fabricados de granito sólido o diorita, y otros de hierro. Estos tenían un agujero en el centro por donde pasaba agua para enfriarlos. Para la década de 1890, estos estaban equipados con camisas enfriadas por agua [4]. En la actualidad, los rodillos están fabricados de acero cementado y son enfriados con refrigerante o agua mediante una cavidad interna o camisas de refrigeración.

En la figura 1.2 se muestra el funcionamiento de este tipo de molinos. El rodillo delantero y trasero giran en sentido horario, mientras que el rodillo central gira en sentido antihorario. Estos operan en el siguiente rango de velocidades: $20 < N1 < 100$ rpm, $60 < N2 < 200$ rpm, $180 < N3 < 600$ rpm; con una relación de transmisión de $1 : 3 : 9$, y algunas veces, $1 : 2 : 4$. El material en forma de pasta se alimenta entre el rodillo trasero y central, pero gran parte de este permanece inicialmente en la zona de alimentación debido a la estrecha holgura entre los rodillos. El tamaño de la holgura generalmente se establece en 0.2 mm, pero puede llegar hasta una holgura mínima de 0.0254 mm [5]. La parte de material que logra pasar la primera holgura experimenta una fuerza de corte muy elevada debido a las diferentes velocidades de rotación. Después, el material se conduce por el rodillo central hasta la segunda holgura (entre el rodillo central y delantero), donde se somete a una

fuerza de corte aún mayor por la velocidad de rotación del rodillo delantero. Por último, la tolva de descarga, que contiene una cuchilla, raspa el material procesado y lo descarga hacia afuera. Este ciclo de molienda puede repetirse varias veces.

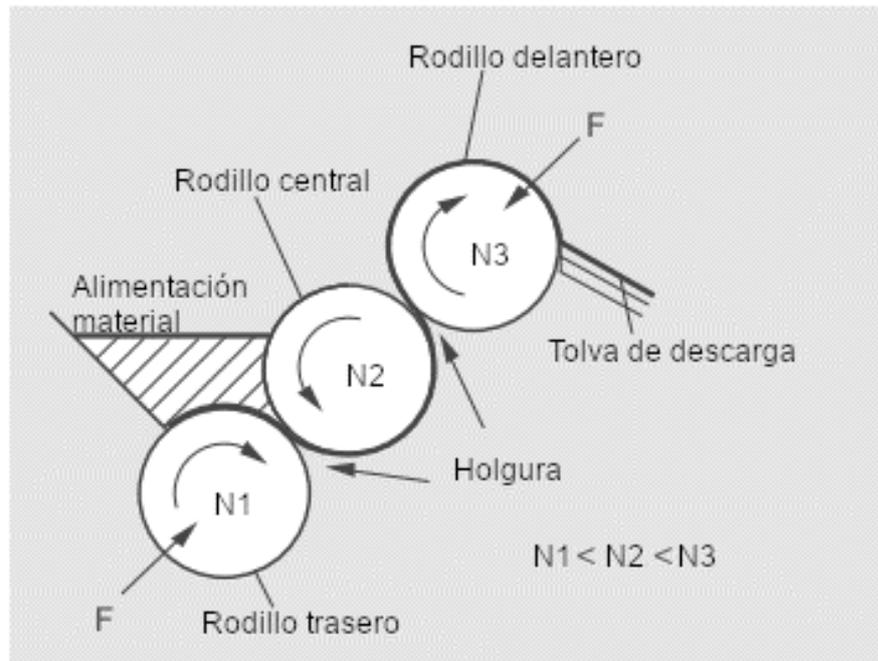


Figura 1.2. Funcionamiento del molino de tres rodillos (F = Fuerza de contacto, N = velocidad de rotación)

Fuente: [5].

Los molinos de tres rodillos se clasifican en función del diámetro y longitud de los rodillos. Estas medidas se expresan generalmente en pulgadas. Por ejemplo, un molino de 8 in x 20 in tiene rodillos de 8 in de diámetro y 20 in de largo. Los molinos industriales pueden llegar a tener un tamaño de hasta 16 in x 40 in, mientras que los molinos de laboratorio pueden ser tan pequeños como de 2.5 in x 5 in.

En la figura 1.3 se observa la estructura típica de un molino de laboratorio. Los tres rodillos (trasero, central y delantero) se montan sobre la estructura mediante rieles que sirven como correderas. La holgura entre estos se puede ajustar por medio de las manivelas que empujan los rodillos sobre los rieles. Estos empiezan a rotar cuando un interruptor activa el motor que está conectado directamente al rodillo central. Los separadores ayudan a que el material se alimente uniformemente hacia los rodillos.

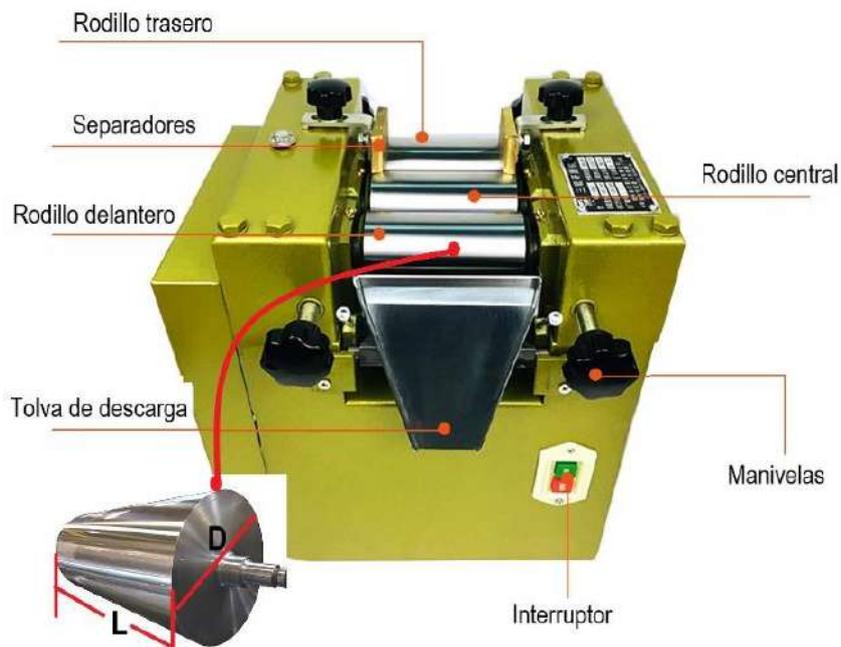


Figura 1.3. Molino de tres rodillos de laboratorio de 2.5 in x 5 in.

Fuente:[6]

1.4.3 Importancia del control de temperatura en el proceso de molienda de pinturas al oleo

Una de las variables más importantes en el proceso de molienda de las pinturas al óleo es el control de la temperatura superficial de los rodillos utilizados para moler y mezclar los componentes. Esto debido a que la temperatura de los rodillos afecta directamente a la dispersión de los pigmentos en el aceite. En la figura 1.4 (a), se evidencia cómo una temperatura excesivamente alta en los rodillos conduce a una disminución en la viscosidad del aceite. Este cambio afecta negativamente la dispersión de los pigmentos, resultando en una distribución desigual donde ciertas áreas acumulan más pigmento, creando así manchas oscuras. Además, la pintura pierde estabilidad y luminosidad característico de la pintura al óleo. En contraste, la figura 1.4 (b) muestra los efectos de una temperatura demasiado baja, haciendo que se incremente la viscosidad del aceite e impidiendo una dispersión adecuada, dando lugar a la formación de grumos o texturas indeseadas.

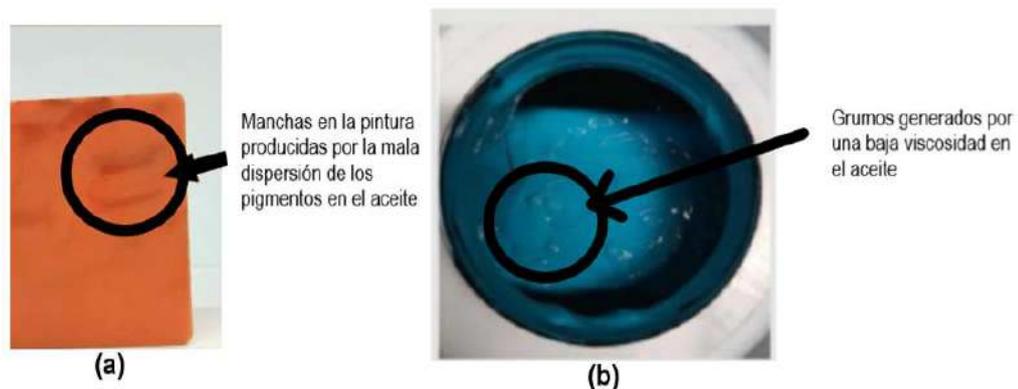


Figura 1.4. (a) Efectos de alta temperatura en los rodillos en la calidad de la pintura.
 (b) Efectos de baja temperatura en los rodillos en la calidad de la pintura.

Fuente: Propia

Entonces, para obtener una buena dispersión en el proceso de molienda, la temperatura de los rodillos debe mantenerse entre 18 °C y 24 °C, aceptando una diferencia de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ [7], [8]. Esto resulta en que la pintura al óleo se mantenga a temperatura ambiente durante todo el proceso.

Para el control de la temperatura, los molinos de tres rodillos vienen equipados con un sistema de refrigeración que funcionan con agua. Esto se describe en la sección 1.4.4.

1.4.4 Mecanismos de refrigeración en los molinos de tres rodillos

Con el fin de evacuar el calor generado en la superficie de los rodillos debido a la fricción producida por el paso del material en la pequeña holgura entre los rodillos y las fuerzas de corte, los tres rodillos van refrigerados [9]. Los diferentes mecanismos de refrigeración en los rodillos se presentan en la figura 1.5.

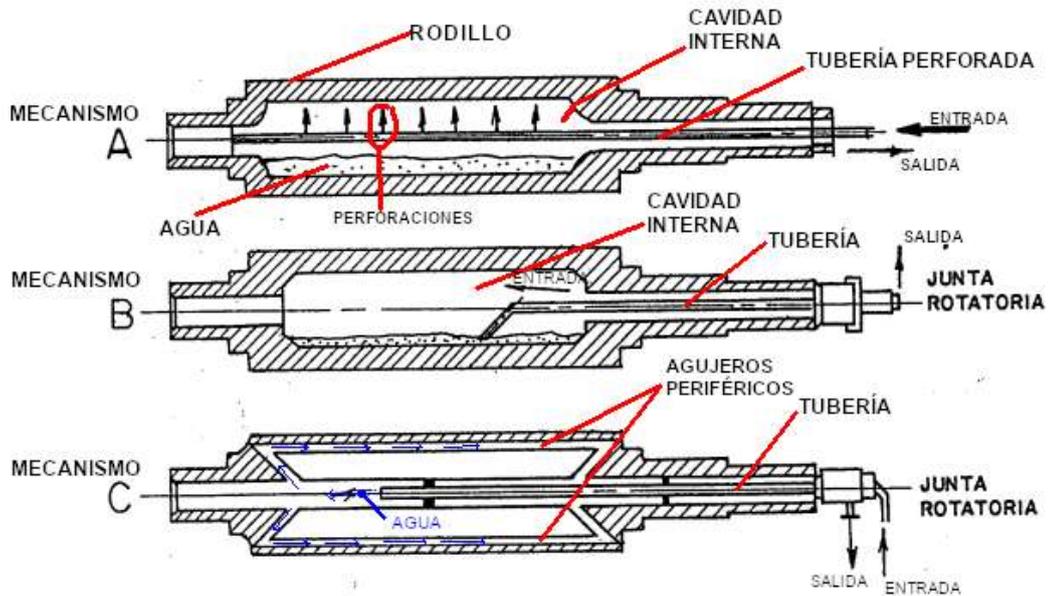


Figura 1.5. Mecanismos de refrigeración en los rodillos de un molino de tres rodillos.

Fuente: [9].

En el mecanismo A, los rodillos se fabrican con una cavidad interna por cuyo centro pasa una tubería perforada por donde entra agua. El agua sale por las perforaciones y bañan la pared interior del rodillo. Después, esta sale concéntricamente a la entrada del rodillo.

En el mecanismo B se cuenta con la misma cavidad interna, pero se suma una junta rotatoria (ver figura 1.6). Esta junta o unión es un dispositivo de sellado que conecta el rodillo que está rotando con la tubería fija para transferir agua al interior. El agua entra por la tubería fija que se conecta a la junta, y sale por un orificio de la misma junta.

Para el mecanismo C, los rodillos en vez de fabricarse con una cavidad interna, se fabrican con agujeros periféricos por donde circula agua de refrigeración. Estos agujeros están dispuestos circunferencialmente a poca distancia de la superficie para conseguir una uniformidad y mejora en la transferencia de calor. Este mecanismo es el más costoso por su fabricación y se limita para molinos industriales.

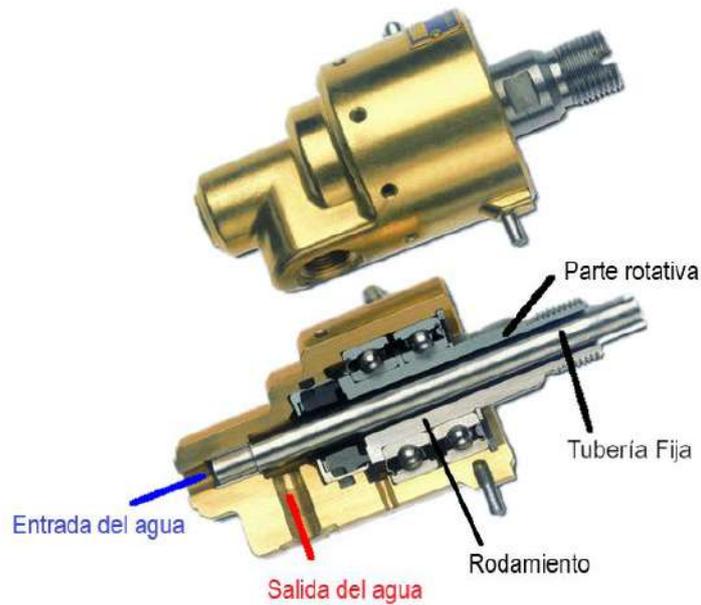


Figura 1.6. Funcionamiento de una junta rotatoria.

Fuente: Propia.

En la figura 1.7 (a) se muestra un sistema de tubería de cobre utilizado en los molinos de tres rodillos seleccionado por su notable flexibilidad. Esta característica permite una instalación sencilla en disposiciones complejas, evitando la necesidad de un excesivo número de uniones o accesorios, lo cual reduce significativamente el riesgo de fugas y disminuye los costos asociados a la mano de obra. Adicionalmente, se minimiza el requerimiento de mantenimiento. Por otro lado, la figura 1.7 (b) destaca el uso de tubería de acero inoxidable, conocida por su solidez y capacidad para soportar altas presiones y temperaturas. Estas cualidades hacen del acero inoxidable una opción preferente para entornos de trabajo más exigentes, donde mantener la integridad del sistema de refrigeración es fundamental. No obstante, cabe mencionar que la instalación de tuberías de acero inoxidable implica mayores costos en comparación con las de cobre, además de requerir personal altamente calificado para su correcta instalación.

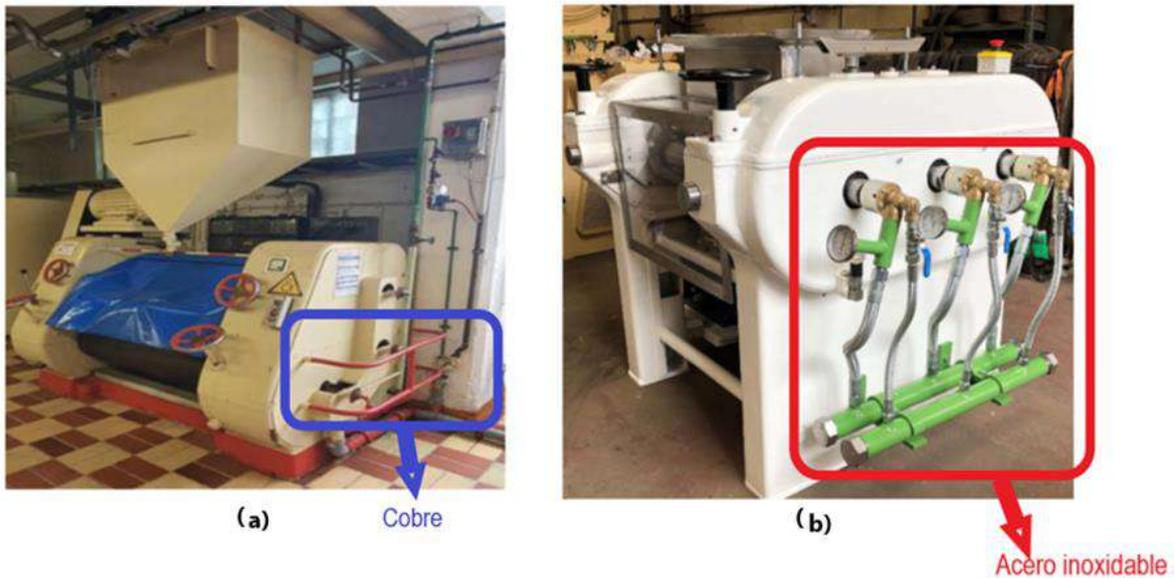


Figura 1.7. (a) Sistema de tubería de cobre en molinos de tres rodillos. (b) Sistema de tubería de acero inoxidable en molinos de tres rodillos.

Fuente: Propia.

1.4.5 Análisis de la transferencia de calor en los rodillos de molienda

Modelo matemático del molino de rodillos

Un análisis matemático del paso de material (fluido) entre dos rodillos giratorios es complejo. Sin embargo, este análisis puede ser simplificado mediante la aplicación del modelo newtoniano como se especifica en los trabajos realizados por Tadmor, Z., y otros [10]. Según este modelo, la viscosidad del fluido (μ) se mantiene constante, sin importar la magnitud de los esfuerzos cortantes (τ) que se ejerzan sobre él. Se realiza esta simplificación para encontrar el perfil de velocidad y de presión del fluido durante su paso entre los rodillos.

Para implementar este modelo, se deben considerar las siguientes suposiciones:

1. El flujo es estacionario y laminar.
2. El flujo es isotérmico.
3. El fluido es incomprensible.

4. No hay deslizamiento entre el fluido y los rodillos.

En la figura 1.8 se describen esquemáticamente las variables que inciden cuando fluye un fluido entre dos rodillos de igual radio (R) que giran en dirección opuesta a una velocidad de rotación (N). Asumimos que el fluido se distribuye uniformemente en toda la longitud de los rodillos (W). En una ubicación axial $x = X_2$ ($X_2 < 0$), los rodillos empiezan a “empujar” al fluido hacia la ubicación $x = X_1$ ($X_1 > 0$), y en este punto el fluido se desprende de los rodillos.

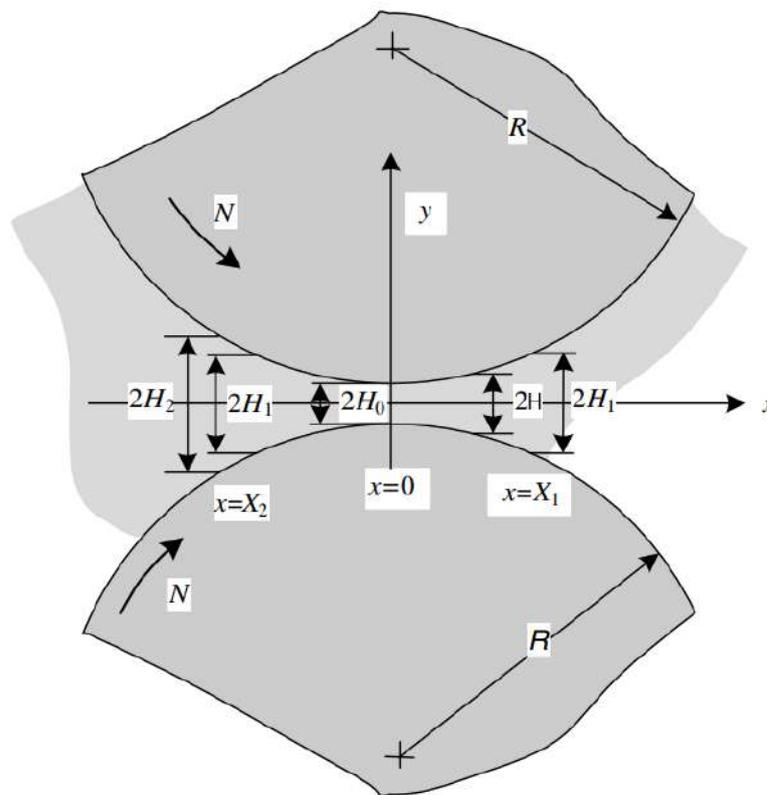


Figura 1.8. Configuración esquemática del paso del fluido entre dos rodillos giratorios.

Fuente:[10].

Con todas las variables y consideraciones descritas anteriormente, se deriva el modelo newtoniano. Además, hay que tener en cuenta que la proporción holgura radio es mucho menor que uno ($2H/R \ll 1$). Esto hace que se pueda utilizar la aproximación de lubricación como se describe en los trabajos de Tadmor, Z., y otros [10]. Esto implica que el perfil de velocidad de un fluido entre dos rodillos giratorios es equivalente al perfil de velocidad del

mismo fluido cuando pasa entre dos placas paralelas infinitas que están a una distancia $2H$ (ver figura 1.9).

Las componentes de velocidad del fluido son V_x , V_y y V_z . Donde la máxima velocidad alcanzada por el fluido es U (ver figura 1.9). En el contexto del paso del fluido entre dos rodillos giratorios, la velocidad máxima U es la velocidad tangencial en la superficie de los rodillos y se calcula como $U = 2\pi NR$.

Además, el fluido tiene presión P . En el punto 1 (P_1) la presión es baja, y en el punto 2 (P_2) la presión es alta (ver figura 1.9).

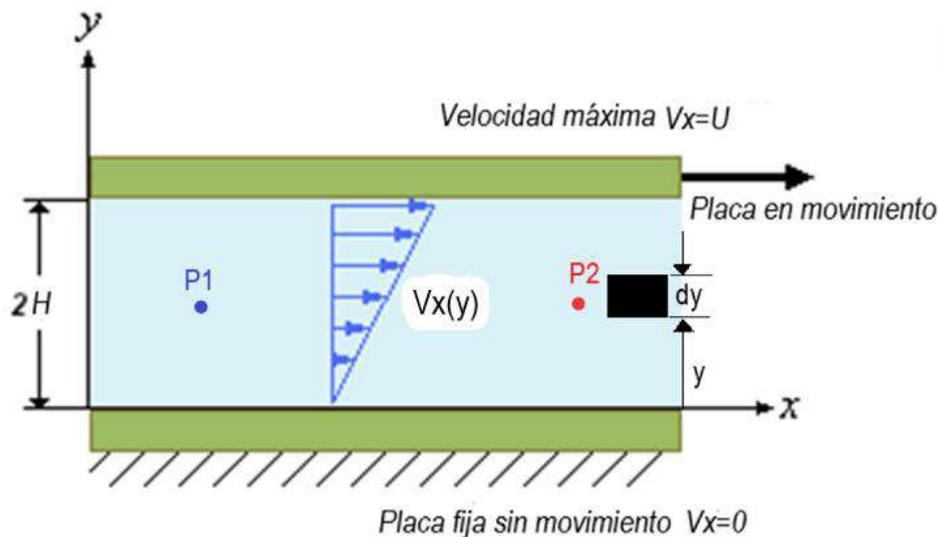


Figura 1.9. Perfil de velocidad del paso del fluido entre dos placas paralelas.

Fuente: Propia.

Se hacen las siguientes suposiciones con respecto al paso del fluido entre dos placas paralelas para encontrar el gradiente de presión y el perfil de velocidad [11]:

5. El fluido tiene densidad (ρ) y viscosidad (μ) constante (suposición de fluido newtoniano).
6. Solo la componente de velocidad del fluido V_x es diferente de cero, mientras que los componentes $V_y = V_z = 0$.
7. Las fuerzas de gravedad se desprecian.

Bajo las suposiciones previamente establecidas, se simplifica las ecuaciones generales de continuidad (ecuación 1.1), y de conservación del momento en la dirección x (ecuación 1.2). Estas ecuaciones describen el comportamiento de los fluidos como se explica en White, F. [12]

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho V_x)}{dx} + \frac{d(\rho V_y)}{dy} + \frac{d(\rho V_z)}{dz} = 0$$

Ecuación 1.1. Ecuación general de continuidad.

$$\rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

Ecuación 1.2. Conservación de momento en la dirección x .

Con las suposiciones 5, 6 y 7, las ecuaciones 1.1 y 1.2 se reducen a las ecuaciones 1.3 y 1.4, respectivamente.

$$\frac{dv_x}{dx} = 0$$

Ecuación 1.3. Ecuación simplificada de continuidad.

$$\frac{dP}{dx} = \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}$$

Ecuación 1.4. Ecuación simplificada de la conservación de momento en la dirección x .

La ecuación 1.4 se integra dos veces con respecto a y teniendo en cuenta la condición de frontera $V_x(+2H) = U$ (ver figura 1.9). Esto resulta en el perfil de velocidad del paso del fluido entre dos placas paralelas (ecuación 1.5), donde H es cualquier valor de holgura entre los rodillos.

$$V_x = U + \frac{y^2 - H^2}{2\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right)$$

Ecuación 1.5. Perfil de velocidad del paso del fluido entre dos placas paralelas.

Cómo se menciona en los trabajos de Tadmor, Z., y otros [10], el caudal del fluido entre dos placas paralelas por unidad de longitud (q) se determina integrando la ecuación 1.5 para un elemento diferencial del fluido (dy), como se muestra en la ecuación 1.6.

$$q = 2 \int_0^H V_x dy = 2H \left(U - \frac{H^2}{3\mu} \frac{dP}{dx} \right)$$

Ecuación 1.6. Caudal de fluido entre dos placas paralelas por unidad de longitud.

Por otro parte, el caudal del fluido entre dos rodillos giratorios (qr) se puede expresar en términos del valor de la holgura en el punto X_1 ($2H_1$) y la velocidad tangencial en la superficie de los rodillos (U) [10] (ver figura 1.8), como se muestra en la ecuación 1.7

$$qr = 2H_1 U$$

Ecuación 1.7. Caudal de fluido entre dos rodillos giratorios por unidad de longitud.

Como se mencionó anteriormente, la ecuación 1.7 se puede igualar con la ecuación 1.6, por la aproximación de lubricación. Esto permite encontrar el gradiente de presión del paso del fluido entre dos rodillos giratorios como se muestra en la ecuación 1.8.

$$\frac{dP}{dx} = \frac{3\mu}{H_1^2} \left(1 - \frac{H_1}{H} \right) \left(\frac{H_1}{H} \right)^2$$

Ecuación 1.8. Gradiente de presión del paso del fluido entre dos rodillos giratorios.

La ecuación 1.8 implica que el gradiente de presión es cero cuando $H = H_1$. Entonces, el valor de presión (P) del fluido se obtiene integrando la ecuación 1.8 con la condición de frontera $P(X_1) = 0$ [10]. Pero primero se necesitan las siguientes relaciones geométricas que se obtienen a partir de la figura 1.8:

$$H = H_0 + R - \sqrt{R^2 - x^2}$$

Ecuación 1.9. Relación geométrica para el valor de la holgura entre los rodillos.

La ecuación 1.9 se puede simplificar expandiendo la relación $\sqrt{R^2 - x^2}$ usando la serie binomial y conservando solo los dos primeros términos [10]. Esto resulta en:

$$\frac{H}{H_0} = 1 + \rho^2$$

Ecuación 1.10. Simplificación de la ecuación 1.9.

Donde:

$$\rho^2 = \frac{x^2}{2RH_0}$$

Ecuación 1.11. Valor de constante ρ en la ecuación 1.10.

Integrando la ecuación 1.8 con respecto a x y sustituyendo las ecuaciones 1.10 y 1.11, resulta en el valor de presión como se muestra en la ecuación 1.12.

$$P = \frac{3\mu U}{4H_0} \sqrt{\frac{R}{2H_0}} \left\{ \left[\frac{\rho^2 - 1 - 5\lambda^2 - 3\lambda^2 \rho^2}{(1 + \rho^2)^2} \right] \rho + (1 + 3\lambda^2) \tan^{-1} \rho + C(\lambda) \right\}$$

Ecuación 1.12. Valor de presión del paso del fluido entre dos rodillos giratorios.

Donde:

$$\lambda^2 = \frac{X_1^2}{2RH_0}$$

Ecuación 1.13. Valor de constante λ en la ecuación 1.12.

El valor de $C(\lambda)$ se puede aproximar a $5\lambda^3$ [10]. Por otro lado, sustituyendo $\rho = -\lambda$ en la ecuación 1.12, se obtiene el valor de la presión máxima (P_{max}), donde U_p es el promedio entre las velocidades tangenciales de los rodillos de análisis como se muestra en la ecuación 1.14.

$$P_{max} = \frac{3\mu U_p}{4H_0} \sqrt{\frac{R}{2H_0}} [2C(\lambda)] \cong \frac{15\mu U_p \lambda^3}{2H_0} \sqrt{\frac{R}{2H_0}}$$

Ecuación 1.14. Valor de presión máxima del paso del fluido entre dos rodillos giratorios.

De las investigaciones realizadas por Vlachopoulos, J. [13], el valor de holgura mínima ($2H_o$) y el valor de la holgura en X_1 ($2H_1$) (ver figura 1,8), se pueden relacionar de la siguiente forma:

$$\frac{2H_1}{2H_o} = 1.226$$

Ecuación 1.15. Relación entre valores de holgura.

La ecuación 1.15 es necesaria para encontrar el valor de X_1 en donde la presión P alcanza su valor máximo P_{max} .

Calor de fricción generado por el paso de fluido entre los rodillos

El calor por fricción se genera debido al paso del fluido por el estrecho espacio entre los rodillos. Según Tsuritani, T. [14], la cantidad de calor de fricción (Q_f) generado por unidad de tiempo en la holgura entre los rodillos ($2H_o$) está determinado por la presión alcanzada por el fluido (P), el coeficiente de fricción entre el fluido y la superficie de los rodillos (μ_m), la longitud de los rodillos (W), y el promedio de la velocidad tangencial de los rodillos $U_p = (U_1 + U_2)/2$. Con estas consideraciones se obtiene la ecuación 1.16. El coeficiente de fricción se determina con base en experimentaciones y tiene un valor de $\mu_m = 0.03$.

$$Q_f = U_p \mu_m W \int_{-X_2}^{+X_1} P dx$$

Ecuación 1.16. Calor de fricción generado por el paso del fluido entre dos rodillos giratorios.

En la figura 1.10, se puede observar que el perfil de presión dibuja una parábola con un valor máximo (P_{max}) en la posición $x = X_1$. Por otro lado, el área de contacto del fluido con los rodillos es entre los puntos X_1 y X_2 . Si se supone que $|X_2| = |X_1|$, la ecuación 1.16 se puede integrar entre estos puntos, y con el valor máximo de presión (P_{max}) se obtiene la ecuación 1.17 [14]:

$$Q_f = 2U_p \mu_m W P_{max} X_1$$

Ecuación 1.17. Calor de fricción en el área de contacto del fluido con los rodillos.

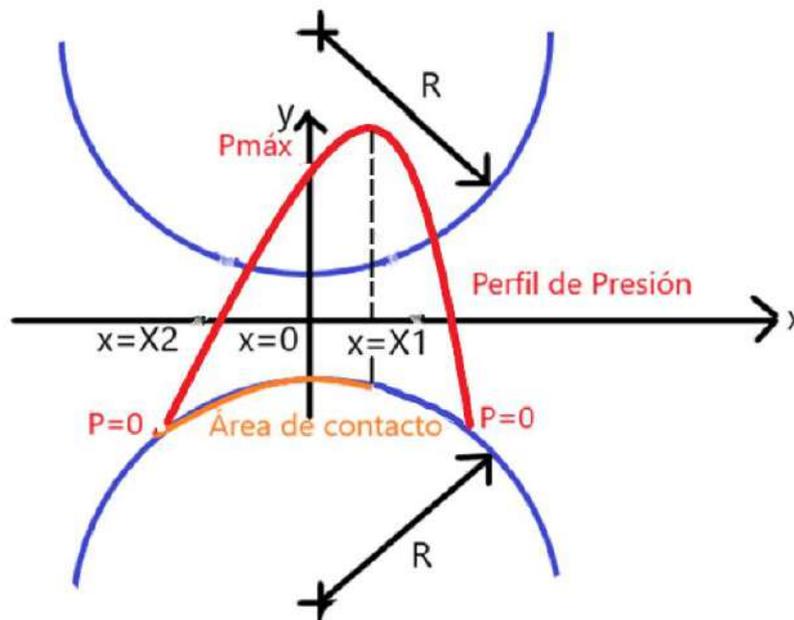


Figura 1.10. Diagrama esquemático del perfil de presión del paso del fluido entre rodillos giratorios.

Fuente: Propia.

Análisis de transferencia de calor del rodillo por conducción radial

Una vez obtenido el calor de fricción, el análisis de transferencia se vuelve un problema de conducción unidimensional en dirección radial [15]. En la figura 1.11 se observa el diagrama esquemático de un rodillo del molino, y en cuya cavidad interna pasa agua de refrigeración. El radio interno del cilindro es R_i , y el radio exterior es R . La temperatura de la superficie interior y exterior del rodillo es $T_{s,1}$ y $T_{s,2}$, respectivamente. La temperatura de entrada del agua al rodillo es $T_{\infty,i}$, y la temperatura de salida es $T_{\infty,o}$. Por otro lado, la tasa de transferencia de calor de fricción generada por el paso del fluido entre los rodillos (Q_f) se transfiere al interior del cilindro a través de una red de resistencias térmicas [15]. Una resistencia de conducción a través de la pared del cilindro (R_{cond}), y otra resistencia de convección por el paso del agua en la cavidad interior del cilindro (R_{conv}).

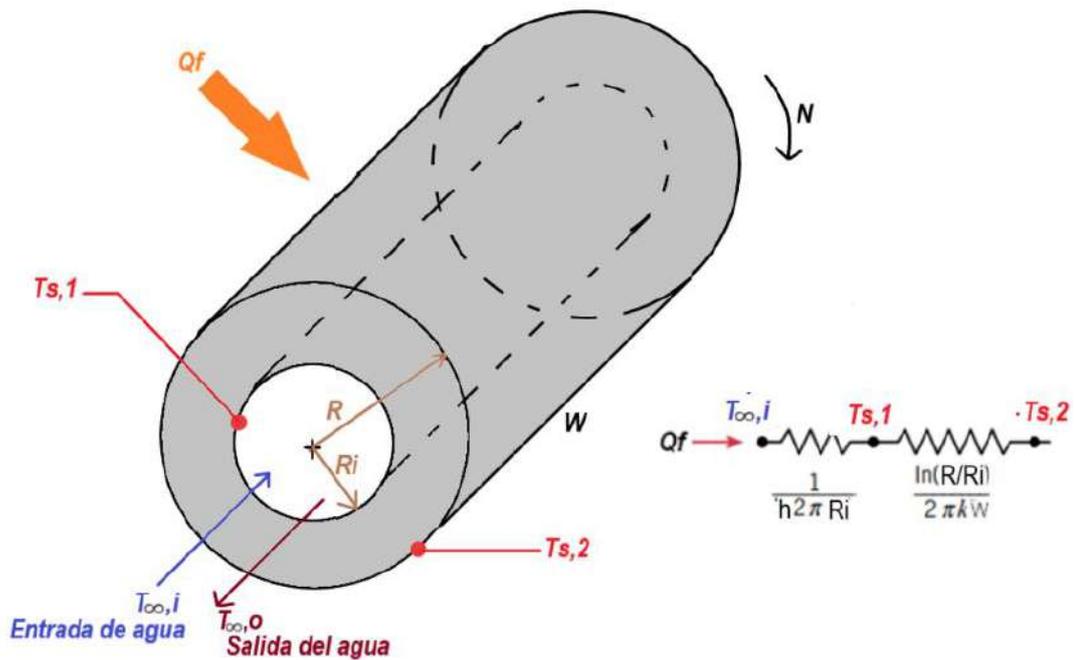


Figura 1.11. Análisis de transferencia de calor por conducción radial en un rodillo de molienda.

Fuente: Propia

Las resistencias térmicas son de convección y conducción, respectivamente, como se describen a continuación:

$$R_{conv} = \frac{1}{h2\pi R_i W}$$

Ecuación 1.18. Resistencia térmica de convección.

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{R}{R_i}\right)}{2\pi k W}$$

Ecuación 1.19. Resistencia térmica de conducción.

Donde k es el valor de conductividad térmica del material del rodillo, W es la longitud del cilindro. Y h es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección (h), primero se determina el número de Reynolds para determinar si el fluido se encuentra en régimen laminar ($Re < 4000$) o turbulento ($Re > 4000$).

$$Re = \frac{\rho u_m D}{\mu_w}$$

Ecuación 1.20. Número de Reynolds.

Donde ρ es la densidad del agua (1000 kg/m^3); u_m es la velocidad del agua con la que entra al cilindro; D_i es el diámetro interno del cilindro; y μ_w es la viscosidad del agua ($1.15 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$)

Una vez determinado el régimen del fluido, se utilizan correlaciones para calcular el número de Nusselt [15], [16], que permitirá obtener el coeficiente de transferencia de calor (h).

$$Nu_D = \frac{h D_i}{k_f} = 4.36$$

Ecuación 1.21. Número de Nusselt para flujo laminar y Q_f constante.

$$Nu_D = \frac{h D_i}{k_f} = 0.023 Re^{4/5} Pr^n$$

Ecuación 1.22. Correlación de Dittus-Coelter para el número de Nusselt para flujo turbulento.

Donde Pr es el número de Prandtl del agua, k_f es la conductividad térmica del agua (0.58 W/mK). Y el valor de $n = 0.4$ para calentamiento y 0.3 para enfriamiento.

Para aplicar la ecuación 1.19 se deben seguir las siguientes consideraciones:

- a) $0.7 < Pr < 160$
- b) $Re > 1000$
- c) $\frac{W}{D} > 10$

1.4.6 Sistema de control en el molino de tres rodillos

El sistema de control en los molinos de tres rodillos se encarga de dos tareas principales. La primera es controlar la velocidad de los rodillos y la segunda es el paro y arranque del motor eléctrico.

Para controlar la velocidad, este tipo de máquinas utiliza un variador de frecuencia o un reductor de velocidad. El variador es un dispositivo electrónico que se utiliza para ajustar la velocidad del motor eléctrico mediante la variación de la frecuencia y el voltaje que se le suministra. Este dispositivo permite ajustar la velocidad desde 0 rpm hasta la velocidad máxima de operación del motor. Además, el motor puede ser arrancado directamente a través del variador, gracias a que este está equipado con circuitos eléctricos que facilitan dicha función. En la figura 1.12 se muestra un típico variador de frecuencia que consta de un panel digital para visualizar la velocidad del motor. El potenciómetro, que es una especie de perilla, es el encargado de ajustar la velocidad. Y botones de encendido y paro del motor.

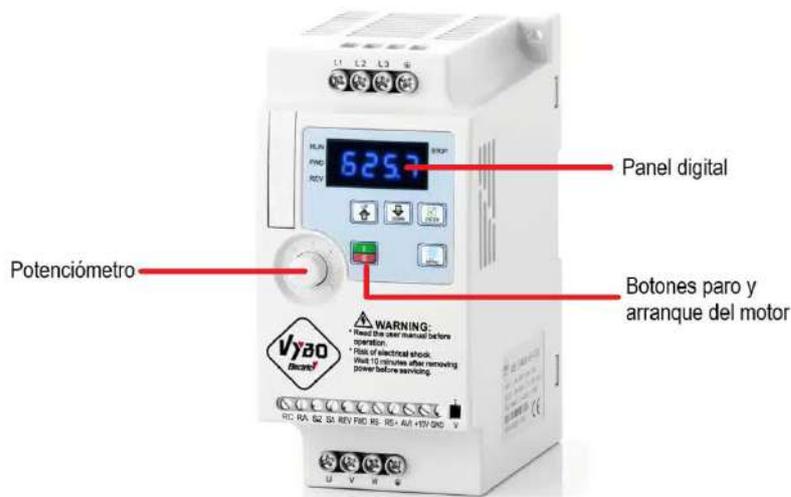


Figura 1.12. Configuración típica de un variador de frecuencia.

Fuente: Propia.

Una de las grandes desventajas al utilizar el variador de frecuencia es la disminución de potencia y torque entregado por el motor al trabajar a bajas velocidades. Como se muestra en la figura 1.13, a menor porcentaje de velocidad del motor, la potencia disminuye al igual que el torque nominal. Es por esto que se recomienda que el variador no trabaje por debajo del 40% de la velocidad nominal.

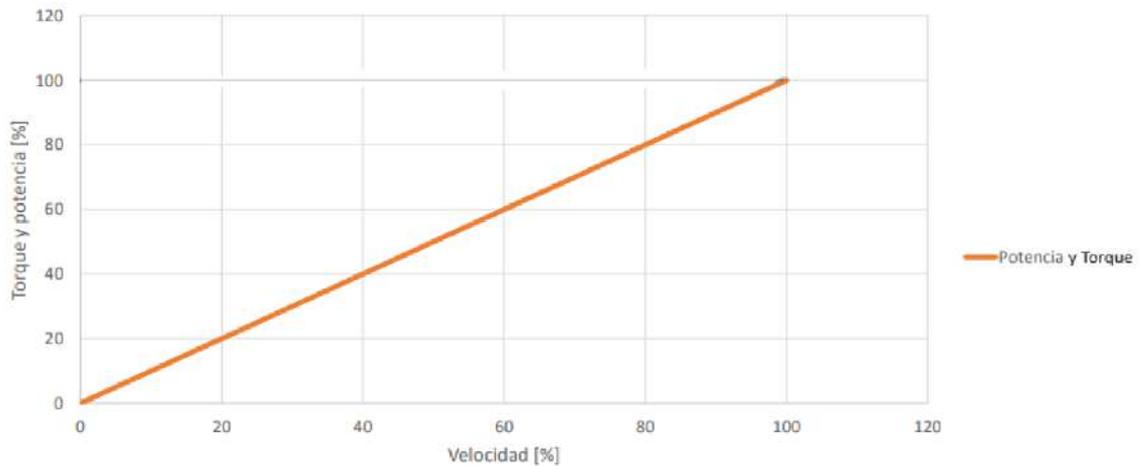


Figura 1.13. Comportamiento de potencia y torque a diferentes porcentajes de velocidad en el variador.

Fuente: Propia.

Por otro lado, el reductor de velocidad, también conocido como caja reductora, es un componente mecánico que, al igual que el variador, reduce la velocidad del motor. Sin embargo, la característica especial de este componente es que al reducir la velocidad entrega un torque más elevado a la máquina, esto se debe a sus elementos constructivos. En la figura 1.14 se presentan los principales elementos de un reductor. Se observa dos engranajes helicoidales. El movimiento del engranaje que se acopla al motor (engranaje motriz) provoca que se mueva el engranaje más grande (engranaje conducido), esto hace que la velocidad de rotación se reduzca proporcionalmente a la relación de los diámetros de los engranajes. Aunque la velocidad disminuye, la potencia se mantiene constante; por lo tanto, dado que la potencia es el producto de torque por velocidad angular, al disminuir la velocidad, el torque debe aumentar. Este incremento en el torque permite que la maquinaria accionada por el motor a través del reductor de velocidad realice tareas que requieren grandes fuerzas, como mover grandes cargas o ejecutar procesos industriales que demandan un alto torque a bajas velocidades [17]

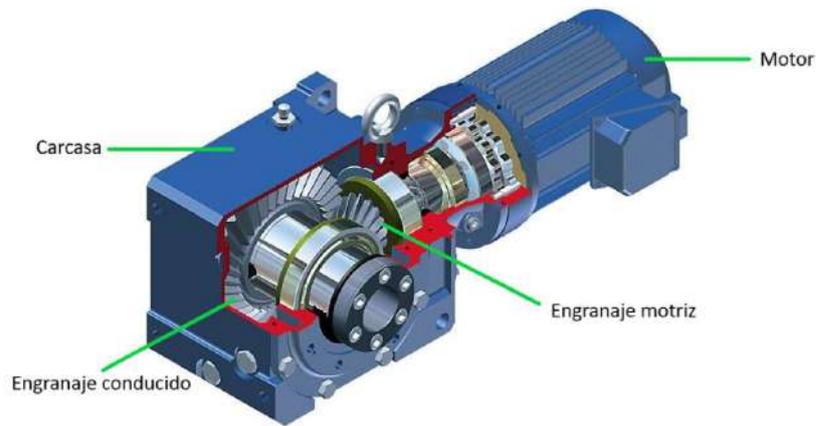


Figura 1.14. Elementos constructivos de un reductor de velocidad.

Fuente: Propia.

Como se mencionó anteriormente, el sistema de control también se encarga del proceso de paro y arranque del motor eléctrico del molino. Esta función se puede realizar mediante conexiones de ciertos elementos eléctricos como se observa en la figura 1.15. Los componentes electrónicos son:

- **Contactor:** Son interruptores eléctricos que cumplen la función de conectar y desconectar la alimentación eléctrica al motor. Son capaces de manejar altas corrientes, siendo los elementos más importantes para el arranque y paro del motor.
- **Relé térmico:** Este dispositivo protege al motor contra sobrecargas, interrumpiendo el circuito cuando detectan que la corriente excede el límite de operación.
- **Botones de paro y arranque:** Son interruptores manuales que permiten al operador iniciar o detener el motor según sea necesario.
- **Interruptores termomagnéticos:** Son interruptores que sirven como protección extra al motor para la protección contra sobrecarga y calentamiento excesivo.

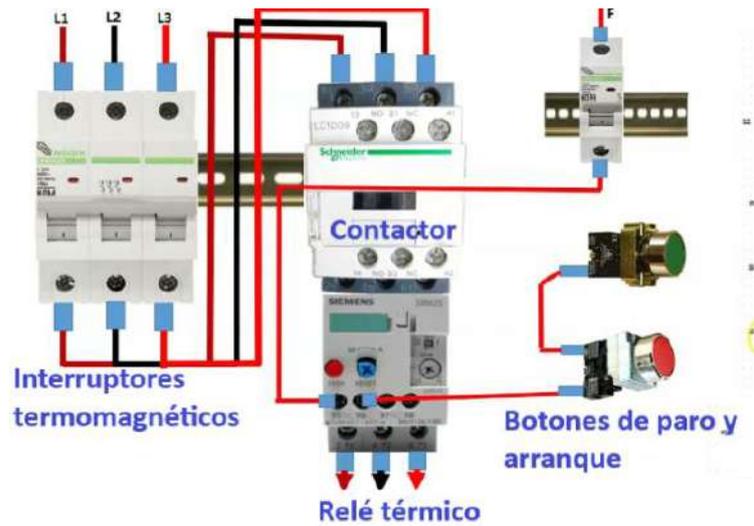


Figura 1.15. Circuito de paro y arranque de un motor eléctrico.

Fuente: Propia.

1.4.7 Benchmarking

Las Tablas 1.1-1.3 presentan un resumen de parámetros técnicos de 3 marcas comerciales de molinos de tres rodillos. Para cada uno se presenta sus especificaciones técnicas, costo, incluyendo una descripción del sistema de refrigeración y de control.

Tabla 1.1 Molino de tres rodillos marca ROSS

Fuente: [18]

Molino de 3 rodillos de laboratorio 2.5 in x 5 in ROSS	
Díámetro de los rodillos	64 [mm]

Longitud total	610 [mm]
Potencia del motor	0.5 [HP]
Capacidad	2 - 11 [lt/h]
Peso	73 [kg]
Control de velocidad	Variador de velocidad
Máxima velocidad	428 [rpm]
Mecanismo de refrigeración	Los rodillos se fabrican con una cavidad interna y el agua se alimenta al interior por medio de tubería de cobre.
Precio	\$3500

Tabla 1.2 Molino de tres rodillos marca Keith Machinery.

Fuente: [19]

Anthony 2.5 in x 5 in Molino de Banco de Tres rodillos	
	
Díámetro de los rodillos	64 [mm]
Longitud total	242.5 [mm]
Potencia del motor	0.5 [HP]
Capacidad	-

Peso	79 [kg]
Control de velocidad	Reductor de velocidad y variador de frecuencia
Máxima velocidad	250 [rpm]
Mecanismo de refrigeración	Los rodillos se fabrican con una cavidad interna y el agua se alimenta al interior por medio de tubería de cobre.
Precio	\$ 3500

Tabla 1.3 Molino de tres rodillos marca Keith CFZHTE.

Fuente: [20]

Molino de Tres rodillos marca CFZHTE	
	
Díámetro de los rodillos	65 [mm]
Longitud total	410 [mm]
Potencia del motor	1 [HP]
Capacidad	2 - 5 [lt/h]

Peso	85 [kg]
Control de velocidad	Motor reductor
Máxima velocidad	140 [rpm]
Mecanismo de refrigeración	Los rodillos se fabrican con una cavidad interna y el agua se alimenta al interior por medio de tubería de cobre.
Precio	\$3000

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se desarrolla el diseño conceptual y de detalle de los sistemas mencionados. La metodología empleada se observa en la figura 2.1.

La primera etapa consiste en la recopilación de información de los molinos tricilíndricos y de los parámetros del sistema de refrigeración y control. Así como de los diferentes molinos disponibles en el mercado, que ayudan al desarrollo de los sistemas. Todo esto se definió en la sección anterior (paso 1).

Después, se establecen los requerimientos, demandas y deseos del usuario. Todos estos se interpretan en criterios ingenieriles denominados voz del ingeniero (paso 2). Posteriormente se desarrolla la casa de la calidad (paso 3), que es una herramienta que permite obtener las especificaciones técnicas de los sistemas (paso 4).

En la segunda etapa se realiza un análisis funcional y modular de los sistemas (paso 5). Esto permite observar el funcionamiento de las partes constituyentes de cada sistema. Se proponen varias soluciones para cada módulo (paso 6). Se escoge la mejor solución (paso 7) y se elabora la solución virtual (paso 8), que será la solución principal. Si cumple la solución principal se procede con las siguientes etapas.

Por último, de la tercera a quinta etapa consta del diseño y selección de los elementos mecánicos de los sistemas (paso 9). Después, se elaboran los planos de taller y montaje (paso 10). Con los planos, se procede a la fabricación de los elementos (paso 11). Se realiza el análisis de costos de la materia prima (paso 12), y se finaliza con el protocolo de pruebas de los sistemas (paso 13).

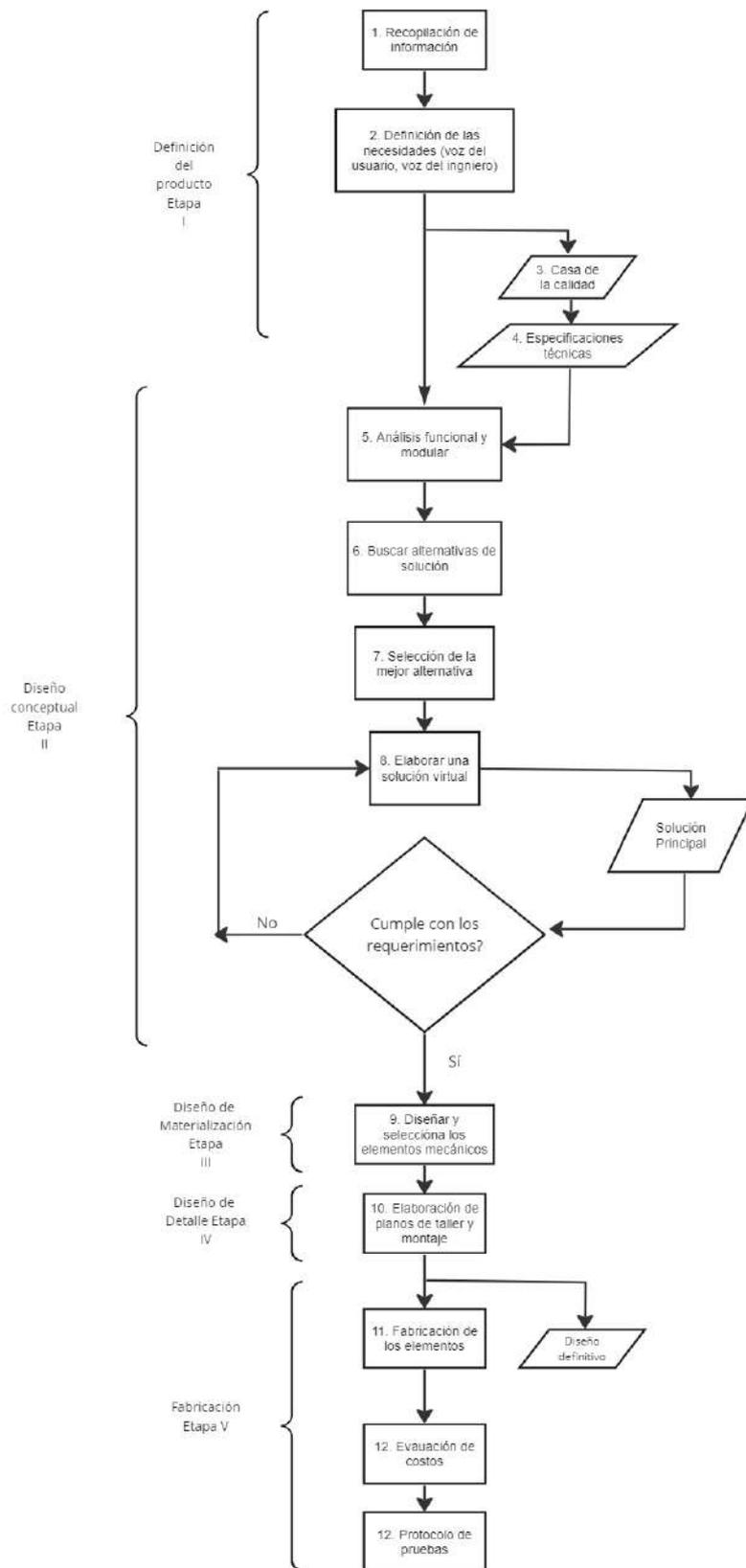


Figura 2.1. Metodología para el diseño del sistema de refrigeración y control.

Fuente: Propia.

2.1 Casa de la calidad

El proceso para obtener las especificaciones técnicas del sistema de refrigeración y control del molino tricilíndrico comienza con la recopilación de los requerimientos del usuario (voz del usuario). Estos pueden incluir, por ejemplo, la temperatura y velocidad deseadas en los rodillos. Una vez recopilados, se desarrollan los criterios técnicos para el sistema (voz del ingeniero).

Voz del usuario

Conforme a las necesidades del usuario, el sistema de refrigeración y el sistema de control deben tener las siguientes características:

- Que el sistema de refrigeración sea compacto.
- Que la temperatura de los rodillos se mantenga en un rango óptimo.
- Que se utilice bomba que se utiliza en acuarios o fuentes.
- Que la velocidad de entrada sea de 90 rpm.
- Que el sistema de refrigeración sea de fácil mantenimiento.
- Que el motor funcione con alimentación trifásica.

Voz del ingeniero

Una vez obtenidos los requerimientos del usuario, se transforman en especificaciones o características técnicas:

- Volumen del sistema de refrigeración.
- Temperatura superficial de los rodillos.
- Caudal de agua de refrigeración.
- Variación de velocidad rotacional del motor.
- Mantenimiento del sistema de refrigeración.
- Alimentación eléctrica del motor.

Resultados

Una vez realizada la matriz de la casa de la calidad que se presenta en el ANEXO I, se identifican tres aspectos importantes que son: utilización de bomba de acuario, temperatura del rodillo y velocidad de entrada de 90 rpm.

Al evaluar las incidencias de las características técnicas de mejora del producto se identifican tres aspectos de importancia que son: caudal de agua de refrigeración, temperatura superficial de los rodillos y variación de velocidad rotacional del motor.

A continuación, se presenta los parámetros de ingeniería que debe cumplir el sistema de refrigeración y control.

- Caudal de agua de refrigeración

El agua de refrigeración se suministrará a los rodillos por medio de una bomba que se utiliza en acuarios o fuentes de agua pequeñas.

- Temperatura superficial del rodillo

El sistema de refrigeración debe ser capaz de mantener una temperatura superficial de los rodillos entre 15 °C a 30 °C [7], [8].

- Regulación de la velocidad rotacional del motor

Dado que los motores comerciales trabajan a velocidades rotacionales altas, es necesario reducir la velocidad del motor para obtener una velocidad de 90 rpm en el eje motriz del molino.

- Volumen del sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración debe ocupar un espacio menor al 5% de todo el volumen de la máquina de forma que el sistema debe ser lo más compacto posible.

- Mantenimiento del sistema de refrigeración

El diseño del sistema de refrigeración debe permitir un fácil montaje de componentes mecánicos.

- Alimentación eléctrica del motor

El motor requiere alimentación mediante una conexión trifásica, con una tensión de 240 V y una frecuencia de 60 Hz.

2.2 Especificaciones técnicas

En la tabla 2.1 se establece las especificaciones técnicas para el sistema de refrigeración y control en base a los resultados obtenidos en la sección 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del sistema de refrigeración y control de un molino tricilíndrico para la molienda de pintura al óleo.

Empresa/ Cliente: Sr. Carlos Vega		Producto: Sistema de Refrigeración y Control de un Molino Tricilíndrico		Fecha inicial: 18/12/2023
Diseñador: Carlos Guapi				Última revisión:
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función		C	R	Mantener una diferencia de temperatura superficial no mayor a 3°C Mantener la velocidad rotacional de entrada al eje motriz del molino en 90 rpm.
Dimensiones		C+D	R	Sistema Refrigeración: Ancho 0,06 x alto 0,15 x largo 0,3 [m] aprox. Tubería de cobre de 1/4 pulg.
Energía		C+D	R	Alimentación eléctrica del motor trifásico (240 V y 60 Hz).
Señales y control		D	R	Encendido y apagado del motor.
Mantenimiento		C+D	D	Fácil montaje y desmontaje.

Donde: C = Cliente, M = Marketing, D = diseño, F = Fabricación, R = Requerimiento, MR = Modificación de requerimiento, NR = Nuevo requerimiento, D = Deseo, MD = Modificación de deseo, ND = Nuevo deseo.

Fuente: Propia

2.3 Análisis funcional

El análisis funcional tiene como propósito identificar las funciones principales y secundarias de la máquina a desarrollarse y del sistema de refrigeración y control. Esto permite evaluar diversas alternativas.

En la figura 2.2 se presenta el Nivel 0 que corresponde a la función global de los modos de operación que son el sistema de control y el sistema de refrigeración. Las variables de entrada son: energía eléctrica y la señal manual del operador para el sistema de control; el rodillo a alta temperatura, energía mecánica y térmica, y la señal del operador para el sistema de refrigeración.

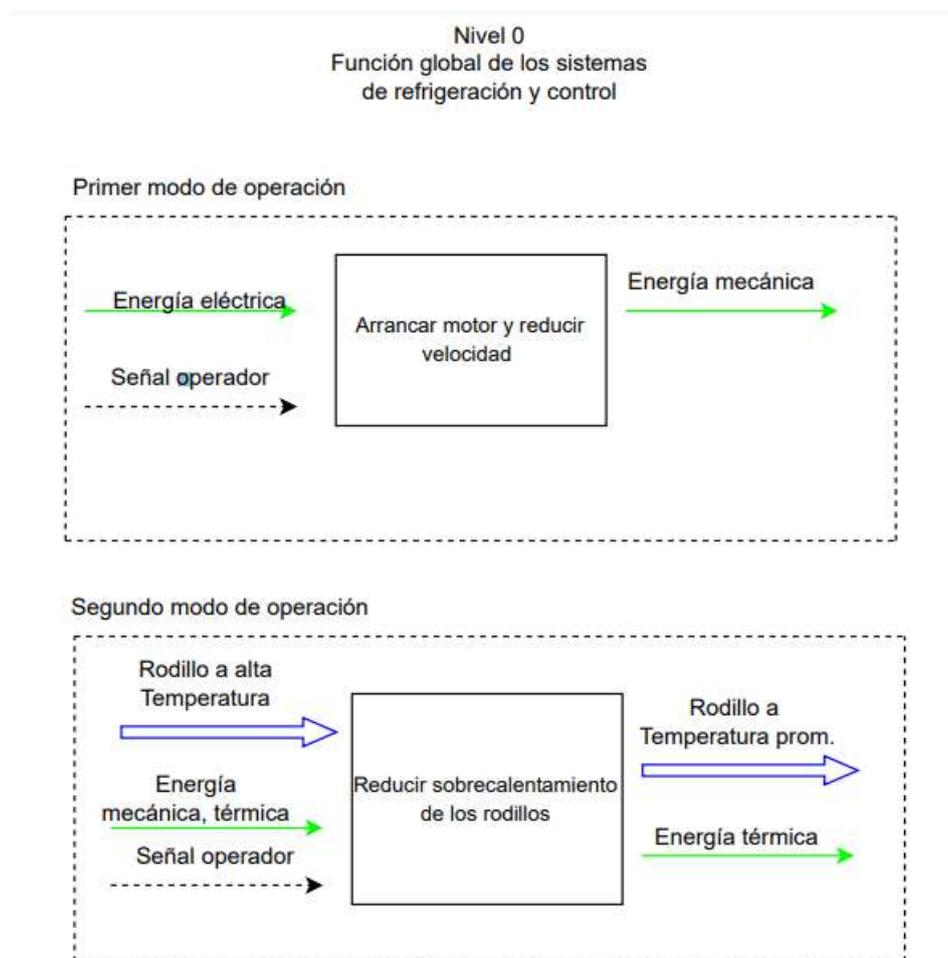


Figura 2.2. Nivel 0: Funcionamiento global del sistema de control y refrigeración.

Fuente: Propia.

En la figura 2.3 se presenta el Nivel 1 donde se muestra con mayor detalle la función tanto del sistema de control como de refrigeración, desde el encendido de la máquina hasta la eliminación de calor de los rodillos.

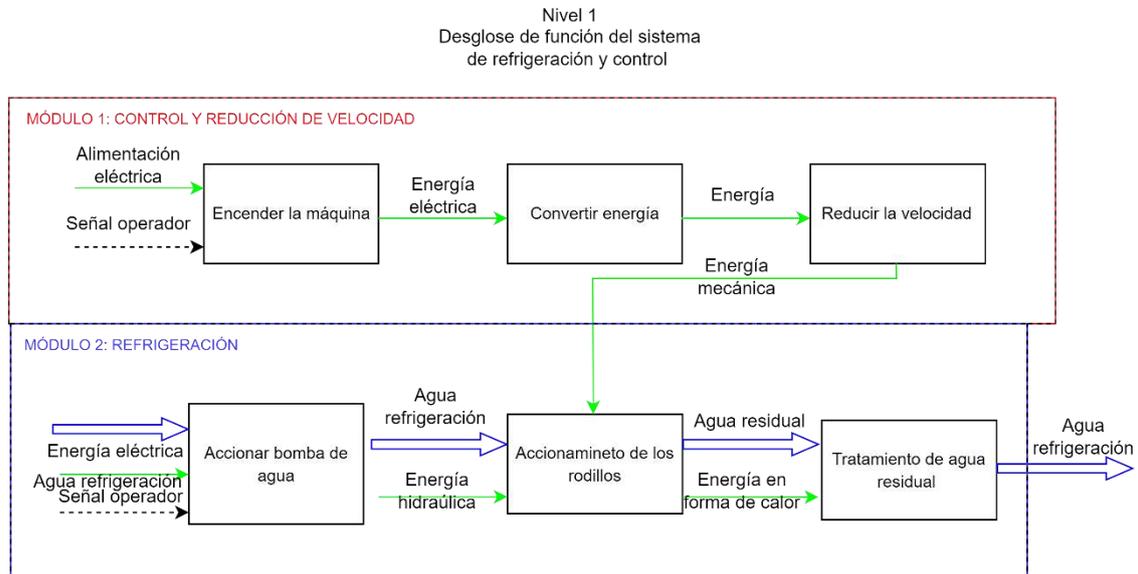


Figura 2.3. Nivel 1: Funciones ejecutadas por el sistema de control y refrigeración.

Fuente: Propia.

Una vez obtenido las funciones detalladas mostrada en la figura 2.3 se identifican 2 módulos que son:

- Módulo 1: Control y reducción de velocidad
- Módulo 2: Refrigeración

2.4 Plantamiento de soluciones modulares

Una vez determinados los 2 módulos se procede a evaluar alternativas para cada uno de ellos, con el fin de cumplir con los requerimientos y necesidades del cliente y especificaciones técnicas, ver tabla 2.1. Esto permite formular la solución virtual para cada uno de los módulos.

2.4.1 Módulo 1: Control y reducción de velocidad

El módulo 1 cumple con las siguientes funciones:

- Encender y apagar la máquina
- Reducir la velocidad rotacional del motor

Encender y apagar la máquina

El cliente ha requerido que el motor eléctrico trifásico sea arrancado y parado por medio de un arrancador directo como se muestra en la figura 2.4. Este dispositivo compacto viene integrado con pulsadores ON/OFF para accionar y detener la máquina, además, de un contactor para la conmutación de la señal eléctrica, y un relé térmico para la protección contra sobrecargas. Este dispositivo debe ser seleccionado en base a la potencia y la corriente nominal del motor.



Figura 2.4. Arrancador directo.

Fuente: Propia.

Reducir la velocidad rotacional del motor

Es necesario reducir la velocidad del motor para que la velocidad de entrada al eje motriz de la máquina sea de 90 rpm, esto por requerimiento del cliente. En la tabla 2.2 se presentan las opciones para obtener esta velocidad de salida.

Tabla 2.2. Opciones de alternativas para la reducción de velocidad del motor.

Fuente: Propia

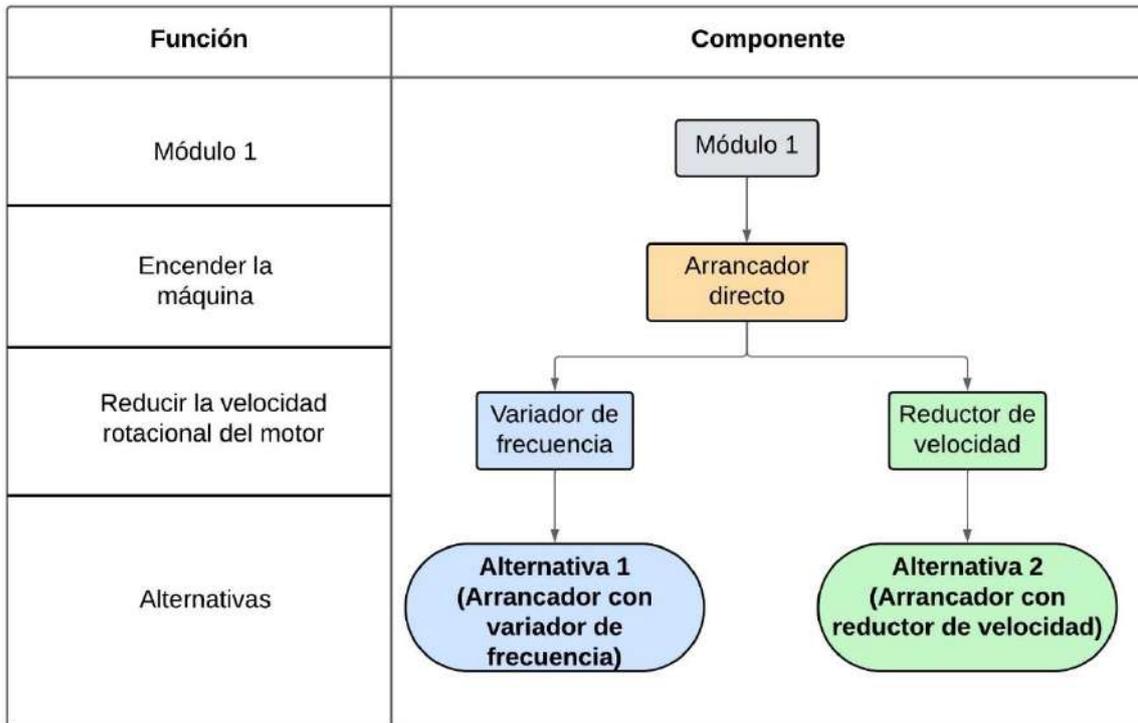
Opc.	Descripción	Ventajas	Desventajas
1	 <p>Figura 2.5. Variador de Frecuencia Fuente: [21]</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Permite que el motor funcione en un rango de velocidad entre cero y la velocidad máxima. -Arranque suave del motor. -Protección contra cortocircuitos del motor. 	<ul style="list-style-type: none"> -Costoso. -Diminución del torque nominal del motor. -Instalación y programación compleja.
2	 <p>Figura 2.6. Reductor de velocidad Fuente: Propia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Posible aumento del torque nominal del motor. -Fácil acoplamiento al motor. 	<ul style="list-style-type: none"> -Permite obtener solo un valor de velocidad de salida. -Desgaste físico de componentes mecánicos como engranajes y rodamientos.

2.4.2 Alternativas del módulo 1

En la tabla 2.3. se muestra la matriz morfológica de las alternativas del módulo 1 que se realiza en base a combinaciones entre las opciones presentadas en la tabla 2.2.

Tabla 2.3. Alternativas del módulo 1.

Fuente: Propia



2.4.3 Selección de alternativas del módulo 1

Para la evaluación y selección de las alternativas del módulo 1 se enlistan a continuación los siguientes criterios:

- Costo: el sistema no debe ser costoso.
- Transmisión de torque: el sistema debe transmitir un alto torque para la molienda de la pintura al óleo.
- Montaje: el sistema no debe ser complejo de montar en la máquina.

En el anexo II se desarrolla la evaluación y comparación de las alternativas para el módulo 1 de acuerdo con el orden de importancia de los criterios. Se suma la ponderación de las alternativas con respecto a cada criterio donde se concluye que la mejor alternativa es la Alternativa 2 como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Alternativas del módulo 1.

Fuente: Propia

Conclusión	Transmisión de torque	Costo	Montaje	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1 (arrancador con variador de frecuencia)	0,165	0,109	0,085	1,36	0,45
Alternativa 2 (arrancador con reductor de velocidad)	0,335	0,224	0,085	1,64	0,55
			Suma	3	1

2.4.4 Solución virtual para el módulo 1

Una vez obtenido la mejor alternativa para el módulo 1 que es la Alternativa 2 (arrancador con reductor de velocidad), se presenta la solución gráfica que se presenta en la figura 2.7 que consta de un reductor de velocidad conectada al motor. Además, se conecta un arrancador directo para el paro y arranque del motor.

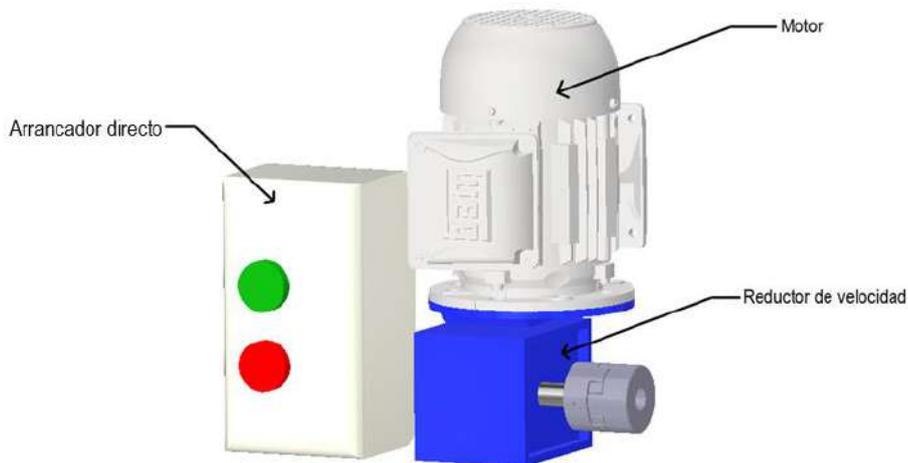


Figura 2.7. Solución Módulo 1. Reductor de Velocidad con arrancador directo conectado al motor.

Fuente: Propia.

2.4.5 Módulo 2: Refrigeración de los rodillos

El módulo 2 cumple con las siguientes funciones:

- Bombear agua de refrigeración a los rodillos.
- Controlar la temperatura superficial de los rodillos.
- Descargar el agua residual

Bombear agua de refrigeración

Para bombear el agua de refrigeración a los rodillos se utiliza una bomba utilizada para acuarios o fuentes de agua. Esta se selecciona en base a los requerimientos de la tubería utilizada y la altura a la que se encuentra los rodillos con respecto a la base del bastidor como se demostrará en la sección 2.6.

Alimentar agua a los rodillos

Para el ingreso de agua a los rodillos se cuenta con dos sistemas principales. El uno es a través de un arreglo de tubería de cobre conectados a los cilindros. El otro es por medio de juntas rotatorias, que se acopla a los rodillos para rotar a la misma velocidad, y que tienen una entrada y salida para el agua. En la tabla 2.5 se presentan las opciones para este caso.

Tabla 2.5. Opciones de alternativas para la entrada de agua a los rodillos.

Fuente: Propia

Opc.	Descripción	Ventajas	Desventajas
1	 <p>Figura 2.8. Arreglo de tubería de cobre de ¼ plg. Fuente: Propia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Diseño sencillo y simple. -Facilidad de construcción. -Facilidad de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> -Complejidad de sellado y ajuste. -Ocupa mayor espacio en la máquina.

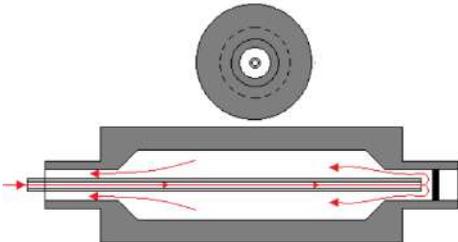
2	 <p>Figura 2.9. Junta rotatoria Fuente: Propia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Facilidad de instalación. -Compacto. -Alta eficiencia 	<ul style="list-style-type: none"> -Altamente costoso. -Escasos en el mercado. -Dificultad para realizar mantenimiento.
---	--	--	--

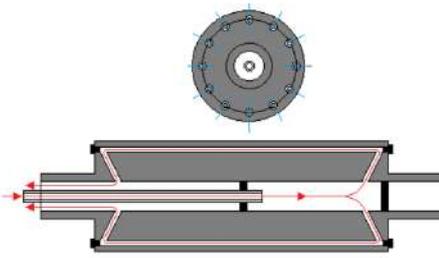
Controlar la temperatura superficial de los rodillos

La construcción de los rodillos es fundamental para evacuar el calor producido durante la molienda de la pintura. Para esto, los rodillos se fabrican con una cavidad interior o con perforaciones periféricas por donde circula el agua. En la tabla 2.6 se resumen estas dos opciones de construcción de los rodillos

Tabla 2.6. Opciones de alternativas para la construcción de los rodillos.

Fuente: Propia

Opc.	Descripción	Ventajas	Desventajas
1	 <p>Figura 2.10. Cavidad interna fabricada en los rodillos. Fuente: [22]</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Diseño sencillo y simple. -Facilidad de fabricación. -Facilidad de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> -Baja eficiencia de transferencia de calor. -Desperdicio de material al mecanizar

2	 <p>Figura 2.11. Perforaciones periféricas fabricada en los rodillos. Fuente: [22]</p>	<p>-Alta eficiencia en la transferencia de calor.</p> <p>-Se necesita poca agua para refrigerar.</p>	<p>-Altamente costoso de fabricar.</p> <p>-Diseño complejo.</p> <p>-Dificultad de mantenimiento.</p>
---	---	--	--

Descargar el agua residual

El sistema principal de descarga del agua residual proveniente del proceso de evacuación de calor en este tipo de molinos consiste en un reservorio que recolecta el agua. Este reservorio descarga el agua a través de un tubo hacia un tanque de agua colocado por debajo para su tratamiento. Este sistema se ancla a la estructura mediante pernos para su fácil montaje y desmontaje (ver figura 2.12).

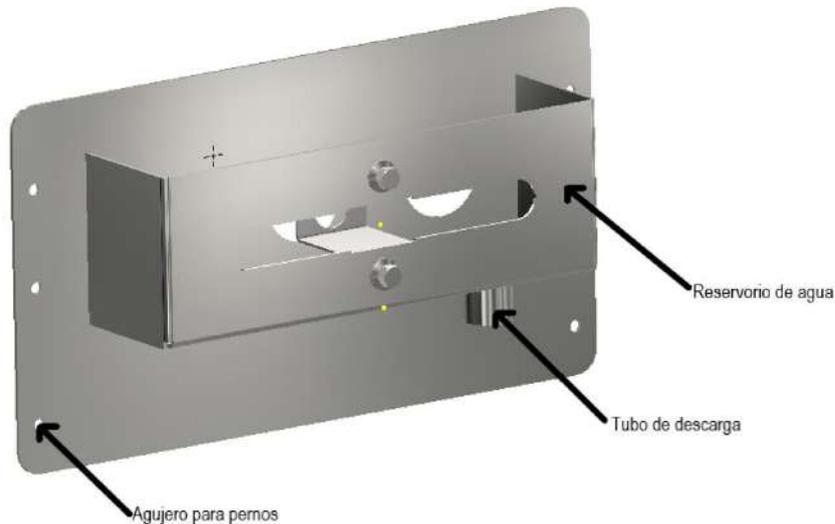


Figura 2.12. Reservorio de agua residual.

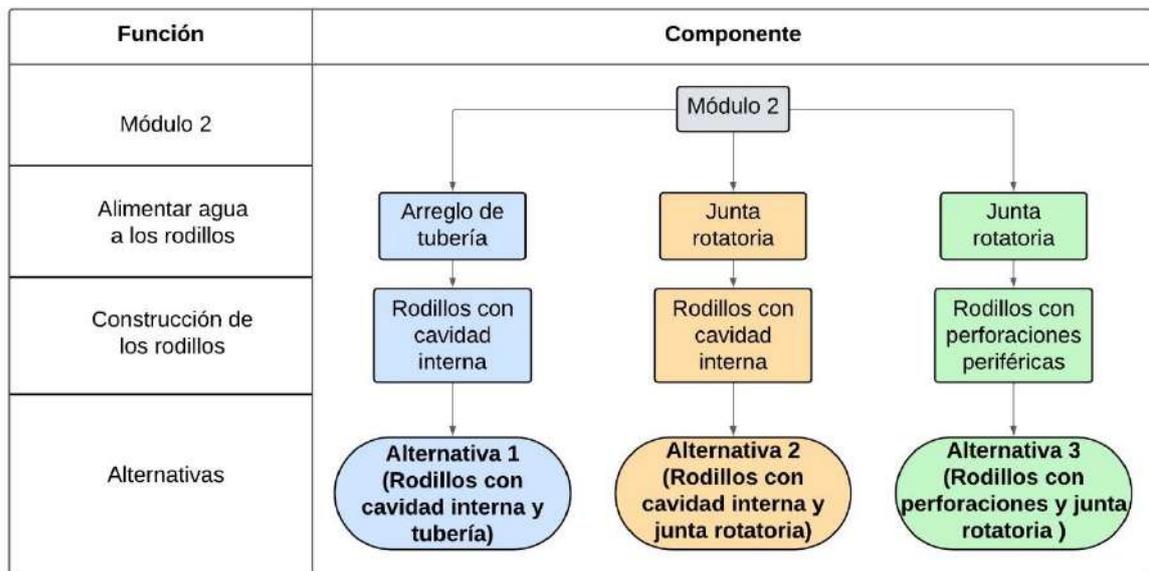
Fuente: Propia.

2.4.6 Alternativas del módulo 2

En la tabla 2.7. se muestra la matriz morfológica de las alternativas del módulo 2 que se realiza en base a las combinaciones posibles y compatibles de las opciones presentadas en las tablas 2.5 y 2.6.

Tabla 2.7. Alternativas del módulo 2.

Fuente: Propia.



2.4.7 Selección de alternativas del módulo 2

Para la evaluación y selección de las alternativas del módulo 2 se enlistan a continuación los siguientes criterios:

- Costo: el diseño debe ser el menos costoso.
- Fabricación: el diseño debe ser sencillo en su construcción.
- Mantenimiento: se debe permitir el mantenimiento de los rodillos.

En el anexo III se desarrolla la evaluación y comparación de las alternativas para el módulo 2 de acuerdo con el orden de importancia de los criterios. Se concluye que la mejor alternativa es la Alternativa 1 como se muestra en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Alternativas del módulo 2.

Fuente: Propia

Conclusión	Fabricación	Costo	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1 (Rodillos con cavidad interna y tubería)	0,209	0,209	0,070	1,49	0,38
Alternativa 2 (Rodillos con cavidad interna y junta rotatoria)	0,138	0,104	0,070	1,31	0,33
Alternativa 3 (Rodillos con perforaciones y junta rotatoria)	0,028	0,104	0,028	1,16	0,29
			Suma	4	1

2.4.8 Solución virtual para el módulo 2

Una vez obtenido la mejor alternativa para el módulo 2 que es la Alternativa 1 (rodillos con cavidad interna y tubería), se presenta la solución gráfica en la figura 2.13.

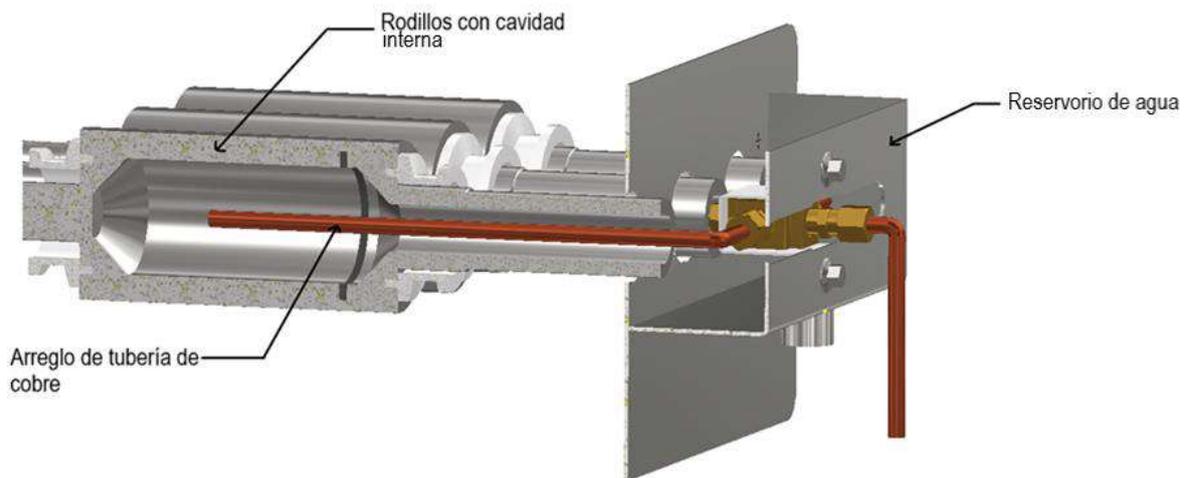


Figura 2.13. Solución Módulo 2. Arreglo de tuberías de cobre que ingresa a los rodillos fabricados con una cavidad interna. Además, el agua residual se descarga por el reservorio.

Fuente: Propia.

2.5 Solución virtual de los sistemas de control y refrigeración

En la figura 2.14 se muestra la solución virtual para el sistema de control y refrigeración según las alternativas seleccionadas en la sección 2.4. Los elementos principales son:

- El arrancador directo (1) servirá para arrancar y parar el motor eléctrico.
- El reductor de velocidad (2) que será el encargado de proporcionar una velocidad de 90 [rpm] al eje motriz de la máquina.
- El arreglo de tubería de cobre (3) que es el elemento encargado de suministrar el agua de refrigeración hacia los rodillos. Este se conecta a la bomba de pecera.
- Los rodillos con cavidad interna (4) permite circular agua dentro del rodillo. El agua rota con la misma velocidad del rodillo, y por la fuerza centrífuga, sale por el eje hueco del rodillo.
- El reservorio de agua (5) tendrá la función de almacenar el agua residual del proceso de evacuación del calor del proceso de molienda. Esta agua sale concéntricamente por los rodillos y se descarga en un tanque más grande.

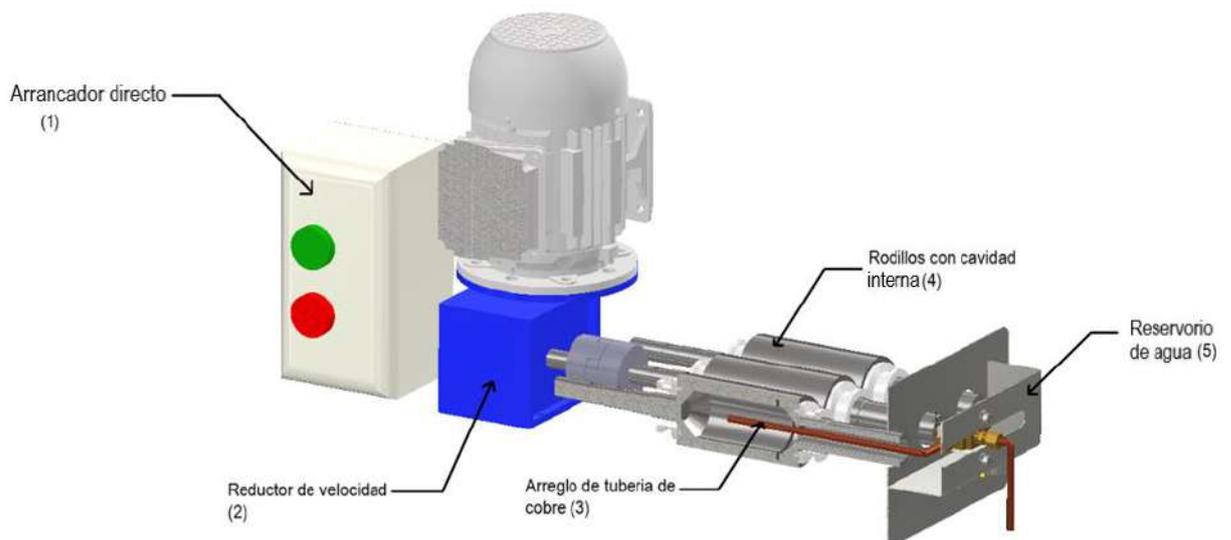


Figura 2.14. Solución virtual para el sistema de control y refrigeración en conjunto.

Fuente: Propia.

2.6 Diseño de los componentes

En este subcapítulo se desarrolla la selección y diseño de los componentes que integran los sistemas de control y refrigeración. Esto se logra teniendo en cuenta las especificaciones técnicas y la solución principal de los sistemas descritos en la sección 2.4 y 2.5 respectivamente.

2.6.1 Módulo 1: Control y reducción de velocidad

Selección del reductor de velocidad

En este apartado se debe seleccionar un reductor de velocidad que se acople al motor eléctrico para entregar una velocidad específica a la máquina (ver figura 2.7). Dentro de las especificaciones técnicas del sistema de control se detalla que la velocidad de salida del eje del reductor (N_s) debe ser de 90 rpm, ya que este se acoplará al eje motriz del molino para entregar esta velocidad. Por otro lado, de los trabajos de Changoluisa, M. [1] y Oña, P. [2] se seleccionó un motor eléctrico en base a los requerimientos de torque necesario para moler la pintura al óleo ($\tau_a = 32 Nm$).

La hoja de datos del motor seleccionado se muestra en el anexo IV. Para la selección del reductor se necesita conocer la potencia del motor ($P_a = 0.75 hp$), además, la velocidad nominal del motor ($N_e = 1800 rpm$). Con la velocidad nominal del motor (N_e) y sabiendo que la velocidad de salida del eje del reductor (N_s) debe ser de 90 rpm, se determina la relación de transmisión del reductor (i) como se describe a continuación:

$$i = \frac{N_e}{N_s} = \frac{1800 rpm}{90 rpm} = 20$$

Con los datos de relación de transmisión (i), la potencia del motor (P_a) y el torque necesario para moler la pintura al óleo (τ_a) se busca un reductor que cumpla con estas especificaciones en los diferentes catálogos de las diferentes casas comerciales. En la figura 2.15 se presenta el catálogo de reductores de la marca WEG distribuidos por Mega Motor, donde se escoge el reductor FCNDK 40 (señalado en rojo) que encaja mejor con los requerimientos anteriormente descritos.

REDUCTORES MECANICOS



REDUCTOR FCNDK (ORTOGONAL EN ALUMINIO)

Ortogonal, con eje hueco, tornillo sin fin. Incluye brida.

CODIGO	POTENCIA	REDUCTOR	MOTOR	i	TORQUE OPERACIÓN
541015	0.25 / 0.33 / 0.5 (HP)	40	63	30	22 / 30 / 45
541096	0.25 / 0.33 / 0.5 (HP)	40	63	40	26 / 36 / 55
550001	0.25 / 0.33 / 0.5 (HP)	40	63	50	31 / 43 / 65
550002	0.25 / 0.33 / 0.5 (HP)	40	63	60	35 / 49 / 73
550003	0.25 / 0.33 / 0.5 (HP)	40	63	100	46 / 64 / 97
541097	0.5 / 0.75 (HP)	40	71	7,5	13 / 20 / 17
541098	0.5 / 0.75 (HP)	40	71	10	17 / 26
541099	0.5 / 0.75 (HP)	40	71	15	26 / 38
541100	0.5 / 0.75 (HP)	40	71	20	32 / 48
541014	0.25 / 0.33 / 0.5 (HP)	50	63	60	35 / 49 / 73
541013	0.25 / 0.33 / 0.5 (HP)	50	63	100	49 / 69 / 103
550030	0.5 / 0.75 (HP)	50	71	15	46 / 68
541018	0.5 / 0.75 (HP)	50	71	30	46 / 68
541101	0.5 / 0.75 (HP)	50	71	40	56 / 83
550004	0.5 / 0.75 (HP)	50	71	50	66 / 98
541104	0.75 / 1 / 1.5 (HP)	50	80	7,5	21 / 27 / 41
541105	0.75 / 1 / 1.5 (HP)	50	80	10	27 / 35 / 52
541106	0.75 / 1 / 1.5 (HP)	50	80	15	38 / 50 / 75
541107	0.75 / 1 / 1.5 (HP)	50	80	20	49 / 65 / 96
541109	0.75 / 1 / 1.5 (HP)	50	80	40	83 / 110 / 163
541017	0.5 / 0.75 (HP)	63	71	60	78 / 115
541016	0.5 / 0.75 (HP)	63	71	100	107 / 158
541094	0.75 / 1 / 1.5 (HP)	63	80	30	69 / 91 / 135
541093	0.75 / 1 / 1.5 (HP)	63	80	40	87 / 115 / 171
550005	0.75 / 1 / 1.5 (HP)	63	80	50	102 / 135 / 201
541112	1 / 1.5 / 2 / 3 (HP)	63	90-80	7,5	27 / 41 / 55 / 81
541102	1 / 1.5 / 2 / 3 (HP)	63	90-80	10	36 / 53 / 72 / 106
541114	1 / 1.5 / 2 / 3 (HP)	63	90-80	15	51 / 76 / 103 / 152
541103	1 / 1.5 / 2 / 3 (HP)	63	90-80	20	66 / 99 / 134 / 198
541022	1 / 1.5 / 2 / 3 (HP)	63	90-80	30	91 / 135 / 184 / 271
541021	1 / 1.5 / 2 / 3 (HP)	63	90-80	40	115 / 171 / 232 / 342

Figura 2.15. Catálogo de reductores mecánicos marca WEG distribuidos por Mega Motor.

Fuente: [23]

Las características principales del reductor que se escoge para el molino de tres rodillos se presentan en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Características del reductor para el molino de tres rodillos.

Fuente: [21]

Marca	WEG
Distribuidora	Mega Motor
Modelo	FCNDK 40
Potencia nominal	0.75 Hp
Velocidad de salida	90 rpm
Relación de transmisión	20
Torque de operación	48 Nm
Imagen	

Como se puede observar de la tabla 2.9, el reductor seleccionado cumple con los requerimientos de velocidad de entrada y potencia, incluso puede operar a un torque mayor al requerido para moler la pintura. La hoja de datos con las especificaciones detalladas del reductor se encuentra en el anexo V.

Selección del arrancador directo del motor

Como se describió en la sección 2.4.1, el accionamiento y detenimiento del motor trifásico se lo hará por medio de un arrancador directo, que es un dispositivo que viene integrado con las conexiones eléctricas necesarias para arrancar y parar el motor directamente.

Este dispositivo se selecciona en base a la potencia del motor ($P_a = 0.75 \text{ Hp}$), y la corriente nominal a la que funciona el motor ($I = 2.69 \text{ A}$). Además, como el motor es trifásico, es

necesario seleccionar un arrancador directo que funcione con estas características. En la figura 2.16, se presenta el catálogo de arrancadores directos de la marca WEG distribuidos por Mega Motor. En base a los datos de potencia y corriente del motor, se escoge el arrancador DLW7-P65-R07 que es capaz de soportar corrientes entre el rango de 2.8 A - 4 A, suficiente para soportar la corriente nominal del motor de 2.66 A. La hoja técnica del arrancador directo se muestra en el anexo VI.

Potencia del motor trifásico orientativo 50/60 Hz ¹⁾					Rango de ajuste del relé de sobrecarga  I _r (A)	Máxima corriente nominal (A)	Referencia para completar con código del voltaje de mando	Contactor	Relé de sobrecarga	Peso (kg)
230 V 240 V kW/hp	380 V kW/hp	400 V 415 V kW/hp	440 V kW/hp	690 V kW/hp						
Tamaño 02										
-	-	0,12/0,16	-	-	0,28...0,4	0,4	DLW-7■P65-R01	CW07	RW17-1D3-D004	0,53
-	0,12/0,16	0,18/0,25	-	-	0,4...0,63	0,63	DLW-7■P65-R02	CW07	RW17-1D3-C063	
0,12/0,16	0,18/0,25	0,25/0,33	-	-	0,56...0,8	0,8	DLW-7■P65-R03	CW07	RW17-1D3-D008	
0,18/0,25	0,25/0,33 0,37/0,5	0,37/0,5	-	-	0,8...1,2	1,2	DLW-7■P65-R04	CW07	RW17-1D3-D012	
0,25/0,33	0,55/0,75	0,55/0,75 0,75/1,0	-	-	1,2...1,8	1,8	DLW-7■P65-R05	CW07	RW17-1D3-D018	
0,37/0,5 0,55/0,75	0,75/1,0 1,1/1,5	1,1/1,5	-	-	1,8...2,8	2,8	DLW-7■P65-R06	CW07	RW17-1D3-D028	
0,75/1,0	1,5/2,0	1,5/2,0	-	-	2,8...4	4	DLW-7■P65-R07	CW07	RW17-1D3-U004	
1,1/1,5	2,2/3,0	2,2/3,0	-	-	4,0...6,3	6,3	DLW-7■P65-R08	CW07	RW17-1D3-D063	
1,5/2,0	3,0/4,0	3,0/4,0	-	-	5,6...8	7	DLW-7■P65-R09	CW07	RW17-1D3-U008	

Figura 2.16. Catálogo de arrancadores directos marca WEG distribuidos por Mega Motor.

Fuente: [24].

La conexión eléctrica del arrancador directo con el motor y a la línea trifásica, se presenta en la figura 2.17. El contactor (*K1*) se conecta a la línea trifásica L1, L2 y L3 por medio de los bornes 1, 3 y 5, como se muestra. Por otro lado, el relé térmico se conecta por los bornes 2, 4 y 6 a las fases U1, V1 y W1 del motor en conexión delta.

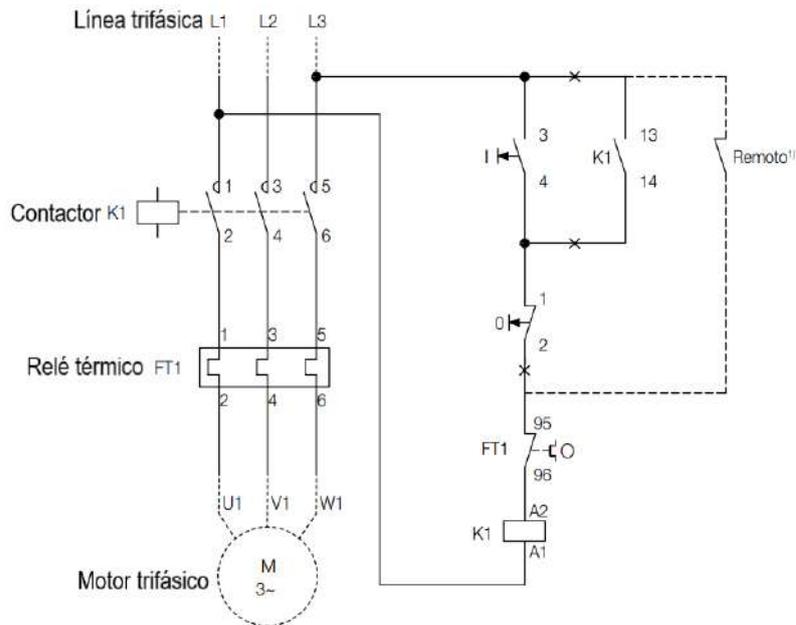


Figura 2.17. Diagrama de conexión del arrancador directo al motor.

Fuente: [24].

2.6.2 Módulo 2: Refrigeración

Cálculo del caudal mínimo de agua de refrigeración a los rodillos

Un esquema del sistema de refrigeración conectado a la bomba de pecera se presenta en la figura 2.18. En la figura, los rodillos de molienda se asignan como 1, 2 y 3. Estos giran a una velocidad de 30.5 rpm , 90 rpm y 266 rpm , respectivamente. Además, la longitud de los rodillos (W) es igual a 125 mm . Esto según los datos obtenidos en el trabajo de Changoluisa, M. [1].

Como se mencionó en la sección 1.4.5, es necesario determinar el calor de fricción generado por el paso del fluido por la holgura entre los rodillos para realizar un análisis de transferencia de calor en los rodillos de molienda. El calor generado depende del promedio de la velocidad tangencial de los rodillos de análisis (ecuación 1.17). Por esta razón, los rodillos 2 y 3 son los más críticos y se tomarán para el cálculo del calor por fricción.

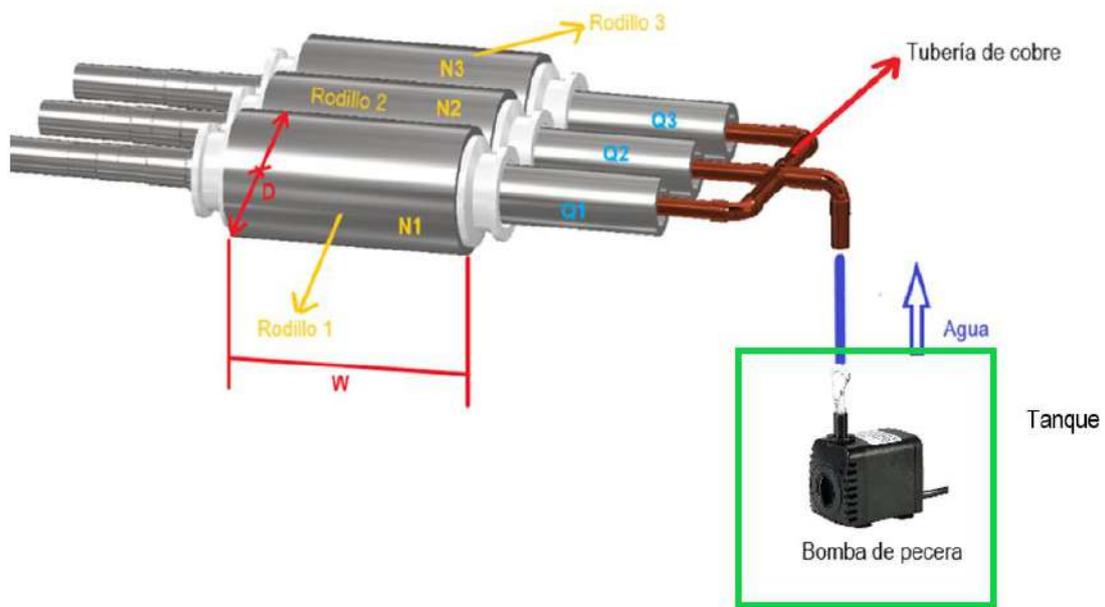


Figura 2.18. Esquema del sistema de refrigeración conectado a la bomba de pecera.

Fuente: Propia.

En la figura 2.19 se presenta el esquema de los rodillos 2 y 3 que serán de análisis para determinar el calor de fricción por el paso de pintura en la holgura de estos. El radio de los rodillos es R y tiene un valor de 32.5 mm . Además, la velocidad de rotación del rodillo 2 (N_2) es 90 rpm , y la del rodillo 3 (N_3) es 266 rpm . Con estos datos se puede calcular la velocidad tangencial de los rodillos de análisis como sigue:

$$U_2 = \frac{2\pi N_2 R}{60} = \frac{2\pi(90\text{ rpm})(0.0325\text{ m})}{60} = 0.306\text{ m/s}$$

$$U_3 = \frac{2\pi N_3 R}{60} = \frac{2\pi(266\text{ rpm})(0.0325\text{ m})}{60} = 0.919\text{ m/s}$$

Y el valor promedio entre las velocidades (U_p) se calcula a continuación:

$$U_p = \frac{U_2 + U_3}{2} = 0.6126\text{ m/s}$$

Por otro lado, el valor de la holgura mínima entre los rodillos ($2H_o$) tiene un valor de 0.2 mm . Todos estos valores definidos en el trabajo de Changoluisa, M. [1]. Por otro parte, de acuerdo con los trabajos realizados por Oña, P. [2] el valor de la viscosidad de la pintura al óleo que se va a moler (μ) es igual a $208.34\text{ Pa}\cdot\text{s}$.

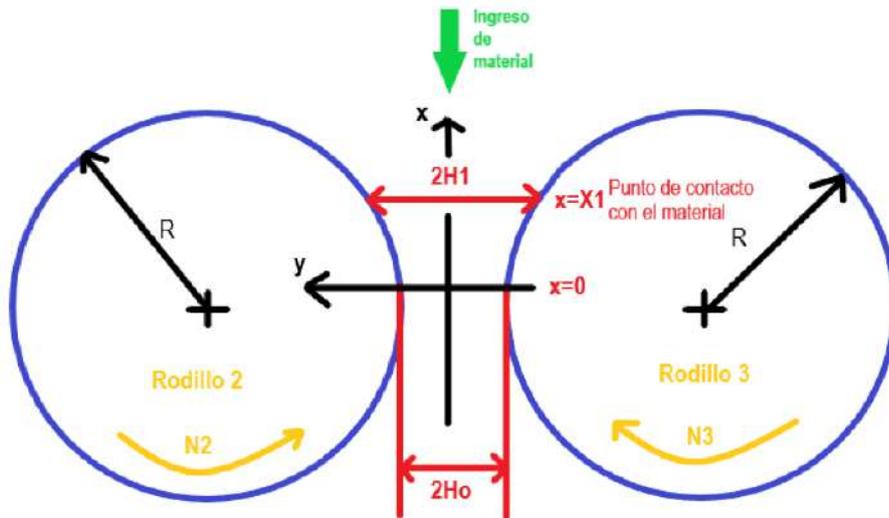


Figura 2.19. Esquema de los rodillos de análisis 2 y 3.

Fuente: Propia.

Con el valor definido de la holgura mínima entre los rodillos ($2H_o$), y mediante la ecuación 1.15, se determina el valor de la holgura en el punto X_1 ($2H_1$) que da como resultado 0.2452 mm . Por otro lado, con la ecuación 1.10 se puede determinar el valor de X_1 que es igual a 1.21 mm , este punto axial corresponde al punto donde la presión (P) del fluido alcanza su valor máximo (P_{max}) como se demostró en la sección 1.4.5. Calculado el valor de X_1 y con la ecuación 1.13, se calcula el valor de la constante λ que es igual a 0.15.

Con todos los parámetros geométricos calculados anteriormente y el valor de la viscosidad de la pintura (μ), se calcula el valor de la presión máxima (P_{max}) mediante la ecuación 1.14 obteniendo el siguiente valor:

$$P_{max} = 411824 \text{ Pa} = 0.42 \text{ MPa}$$

Con el valor de la presión máxima (P_{max}), el valor del punto axial X_1 , el promedio entre las velocidades (U_p), la longitud de los rodillos (W), y teniendo cuenta que el coeficiente de fricción entre el fluido y la superficie de los rodillos (μ_m) es igual a 0,03 [14], se calcula el valor del calor de fricción mediante la ecuación 1.17, donde se obtiene que:

$$Q_f = 2.29 \text{ W}$$

Para determinar el caudal de agua, se realiza un análisis de la transferencia de calor tomando como volumen de control el contorno del rodillo 3 (ver figura 2.20). La temperatura

de entrada del agua de refrigeración ($T_{\infty,i}$) se determina en 18 °C, que es la temperatura que se mide mediante una termocupla en la salida del grifo de una vivienda. Y la temperatura de salida del agua ($T_{\infty,o}$) se determina en 22 °C para que se permita la recirculación de agua para la refrigeración de los rodillos.

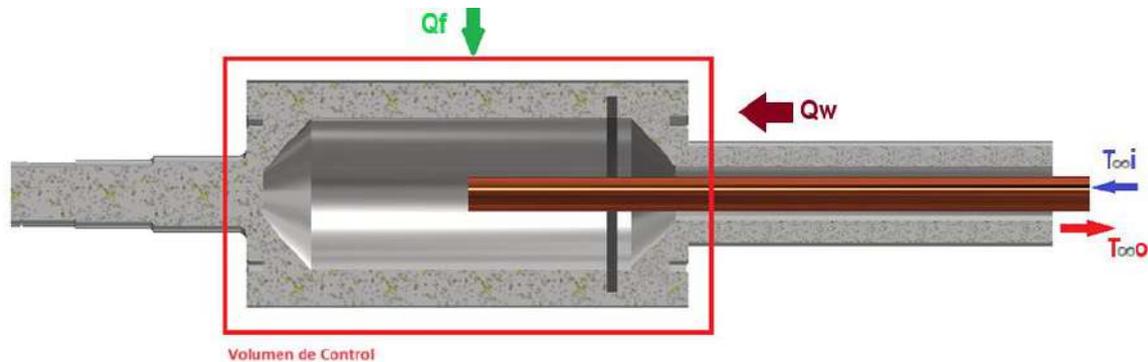


Figura 2.20. Volumen de control en el rodillo 3.

Fuente: Propia.

Como se sabe, de la primera ley de la termodinámica [15], en un volumen de control, el flujo de energía que entra (E_{in}) es igual al flujo de energía que sale (E_{out}). Tomando el volumen de control mostrado en la figura 2.20, se tiene lo siguiente:

$$E_{in} = E_{out}$$

$$Q_f = Q_w$$

$$Q_f = \dot{m}_w C_p (T_{\infty,o} - T_{\infty,i})$$

Donde $C_p = 4180 \frac{J}{kg^{\circ}C}$ (calor específico del agua). Entonces, despejando el flujo másico del agua se tiene que $\dot{m}_w = 1.37 \times 10^{-4} kg/s$. El caudal de agua (Q_3) se obtiene al multiplicar el flujo másico por el inverso de la densidad del agua:

$$Q_3 = \dot{m}_w \times \left(\frac{1}{\rho}\right) = \left(1.37 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}\right) \times \left(\frac{1}{1000} \frac{m^3}{kg}\right) = 1.37 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

El caudal de agua mínimo que debe ingresar al rodillo 3 (Q_3) para disipar el calor de fricción es igual a $1.37 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s} = 0.0822 \text{ lt/min}$. El valor de este caudal se considera el mismo para los tres rodillos debido a que el rodillo 3 se considera como crítico.

Selección de la bomba de pecera

El agua de refrigeración ingresa a los rodillos por medio de un arreglo de tubería de cobre como se muestra en la solución virtual de la figura 2.14. Dentro de las especificaciones técnicas del sistema de refrigeración se detalla que la tubería de cobre debe ser de $1/4$ pulg. Buscando en el mercado nacional se seleccionó tubería de cobre flexible tipo L debido a su precio económico con respecto a otro tipo de tubería. En el anexo VII se muestra las características de esta tubería. El diámetro externo (D_o) es de 6.35 mm y el diámetro interno (D_i) es de 4.35 mm. Según Andalucía, J. [25] el rango de velocidades en instalaciones se debe mantener entre 0.5 m/s y 3.5 m/s, esto para evitar problemas de sedimentación y vibraciones. Entonces, se puede determinar el rango del caudal de agua recomendado dentro de la tubería de cobre de los rodillos como sigue:

$$Q_{\text{mínimo}} = \frac{\pi D_i^2}{4} * 0.5 \frac{m}{s} = 7.43 \times 10^{-6} m^3/s = 0.45 \text{ l/min}$$

$$Q_{\text{máximo}} = \frac{\pi D_i^2}{4} * 3.5 \frac{m}{s} = 5.20 \times 10^{-5} m^3/s = 3.12 \text{ l/min}$$

De lo anterior se observa que el rango de caudal recomendado dentro de la tubería de cobre de $1/4$ pulg. debe estar entre 0.45 l/min y 1.78 l/min, esto quiere decir que la bomba debe suministrar un caudal dentro de este rango. Por otro lado, se conoce, por el esquema del ensamble de la máquina, que la altura desde el bastidor hasta los rodillos (h) es de 155.5 mm (ver figura 2.21).

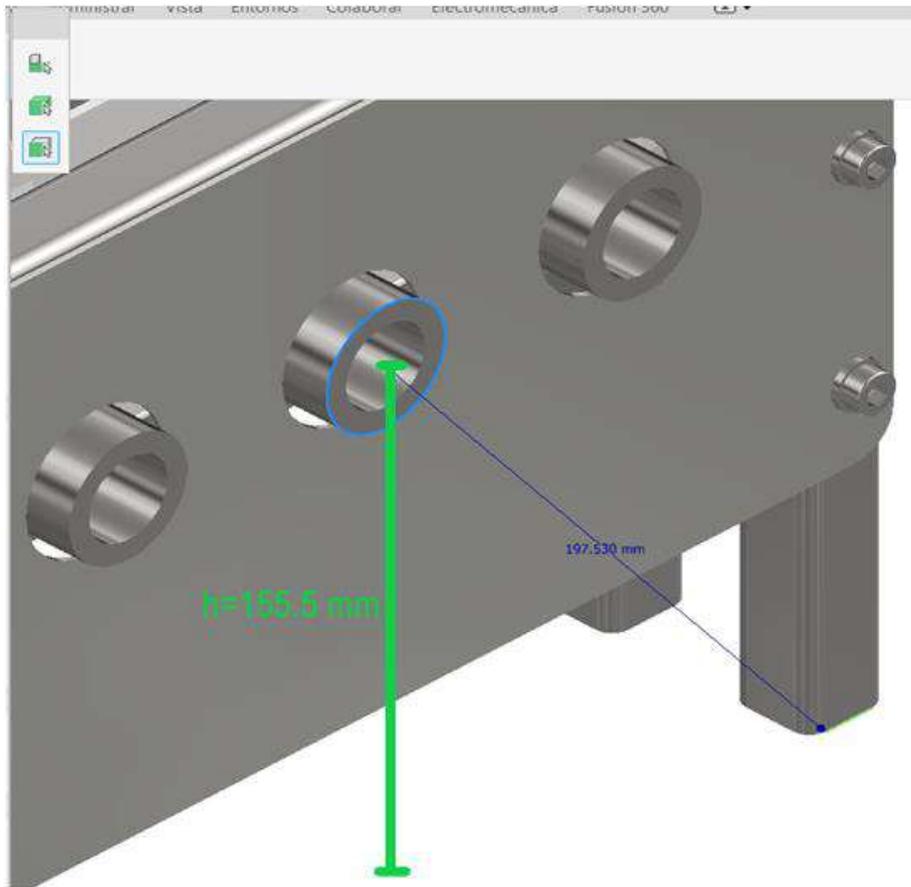


Figura 2.21. Ensamble del molino de tres rodillos realizado en Inventor.

Fuente: Propia.

Con los datos de caudal recomendado y altura (h) se selecciona la bomba de pecera que cumpla con estas condiciones. Buscando dentro del mercado nacional se encontró la bomba de pecera NUBIOS MY-016 con las características que se presentan en tabla 2.10. Una de las características importantes de este tipo de bombas es que es sumergible, es decir, se puede colocar dentro de un tanque de agua para bombear agua a los rodillos.

Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de la bomba NUBIOS MY-016.

Fuente: [26]

Gráfico	Especificaciones técnicas
	Caudal máximo = 2.5 lt/min Altura máxima = 0.45 m Potencia = 2 W Dimensiones = 36x36x28 mm Diámetro del eje de salida = 8 mm

Como se puede observar el caudal de la bomba está dentro del rango recomendado para la tubería. Por otro lado, este caudal es mayor al mínimo requerido para la refrigeración de los rodillos. Además, la altura máxima que alcanza el agua es suficiente para ingresar a los rodillos. La ficha técnica de la bomba se encuentra en el anexo VIII.

DIMENSIONAMIENTO DEL ESPESOR DEL RODILLO DE MOLIENDA POR TRANSFERENCIA DE CALOR

Un esquema de la configuración del rodillo de molienda se presenta en la figura 2.23. Se observa que se presenta una pendiente de 45 ° dentro de la estructura interna para que se permita la salida del agua. Por otro lado, ambas partes del rodillo se unen por medio de rosca y en cuya unión se tiene un sello de caucho para evitar las fugas de agua. Esta configuración presentada por Oña, P. [2].

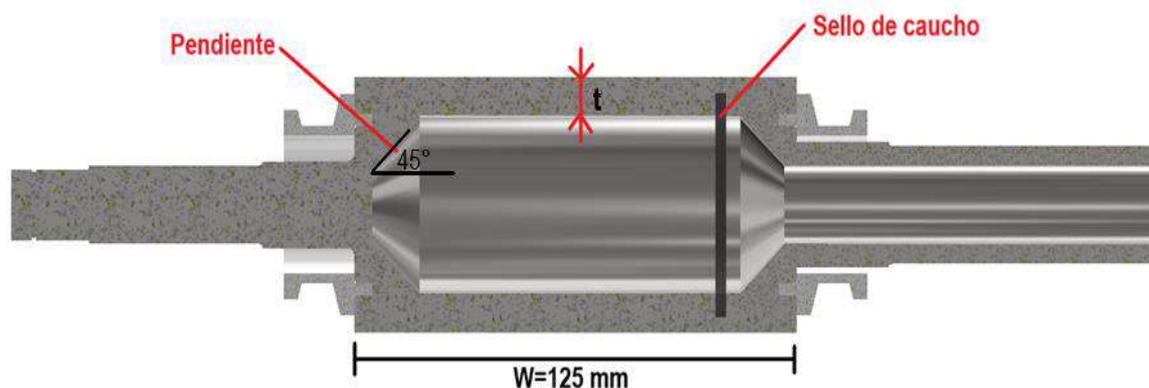


Figura 2.22. Configuración esquemática del rodillo de molienda.

Fuente: Propia.

De la figura 2.22, es necesario determinar un valor de espesor de pared (t) que según la transferencia de calor sea capaz de disipar el calor de fricción. El objetivo es que este espesor permita que en la superficie del rodillo se mantenga una diferencia de temperatura (ΔT_s) no mayor a 3°C , según las especificaciones técnicas del sistema de refrigeración. Como primera aproximación, se decide que el espesor t sea igual a 10 mm . Se toma este valor como una recomendación de los fabricantes de este tipo de molinos [5].

De la sección del análisis de transferencia de calor del rodillo por conducción radial (sección 1.4.5) se determinan las variables necesarias para encontrar ΔT_s . El radio R de los rodillos es 32.5 mm . Con el valor del espesor (t) comentado anteriormente, se tiene que el radio interno de los rodillos R_i es 22.5 mm . La longitud de los rodillos (W) es 125 mm . Por otro lado, el material de los rodillos es de acero inoxidable [2] que tiene una conductividad térmica (k) es igual a 15 W/mK . Con estos valores y la ecuación 1.19, el valor de la resistencia térmica de conducción (R_{cond}) es igual a 0.031 K/W .

Por otro lado, se debe terminar el coeficiente de transferencia de calor por convección (h). Para esto, primero se calcula el número de Reynolds (Re) teniendo en cuenta que la velocidad del agua dentro del cilindro (u_m) se calcula como el valor del caudal de la bomba de pecera ($Q = 2.5\text{ lt/min}$) dividido por el área transversal del rodillo que se calcula como $A_t = \frac{\pi(2R_i^2)}{4}$ que resulta en $u_m = 0.026\text{ m/s}$. Con este valor, se determina con la ecuación 1.20 que $Re = 1017.4$, lo que indica que el fluido se encuentra en régimen laminar, por tanto, se aplica la ecuación 1.21 y se determina que $h = 56.19\text{ W/mK}$. Por otro lado, se puede aplicar la ecuación 1.18 dando que $R_{conv} = 1\text{ K/W}$.

Una vez determinado las resistencias térmicas de conducción (R_{cond}) y convección (R_{conv}), se obtiene la resistencia total del sistema como sigue:

$$R_{total} = R_{cond} + R_{conv} = 1.031 \text{ W/mK}$$

Con la resistencia tota de sistema R_{total} , se aplica la primera ley de la termodinámica teniendo en cuenta que Q_f es el calor de fricción calculado anteriormente, $T_{s,2}$ es la temperatura superficial en el exterior del cilindro y $T_{s,1}$ es la temperatura superficial al interior del cilindro. Entonces:

$$Q_f = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{R_{total}} = \frac{\Delta T_s}{R_{total}}$$

Donde se despeja la diferencia de la temperatura superficial en el rodillo donde se obtiene $\Delta T_s = 2.36^\circ\text{C}$. Esto demuestra que el espesor del rodillo es suficiente para mantener la diferencia de temperatura superficial por debajo de **3 °C**.

3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presenta las pruebas realizadas al prototipo del molino de tres rodillos, especialmente el sistema de control y refrigeración. Se realizan las pruebas en vacío, es decir, cuando no pasa pintura entre los rodillos de molienda, y pruebas con carga cuando pasa pintura. Después, se exponen y discuten los resultados obtenidos. Por último, se realizan conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos.

3.1 Pruebas

En este subcapítulo se realiza el protocolo de pruebas del sistema de control y refrigeración, describiendo primeramente el proceso de ensamble de los sistemas a la máquina. Después, se ejecutan diferentes pruebas en vacío y carga de los sistemas para generar resultados en base a estas.

3.1.1 Unión del sistema de control a la máquina

Para el sistema de control de la máquina, primero se realizaron las conexiones eléctricas como se muestra en la figura 3.1. Primero se conectó el relé térmico del arrancador directo al motor y después, el contactor a la red trifásica.





Figura 3.1. Conexión del arrancador directo al motor y a la línea trifásica.

Fuente: Propia.

Por otro lado, el reductor de velocidad se acopla primero al motor mediante pernos. Después, el eje del reductor se une al eje motriz de la máquina mediante un acople flexible como se muestra en la figura 3.2.

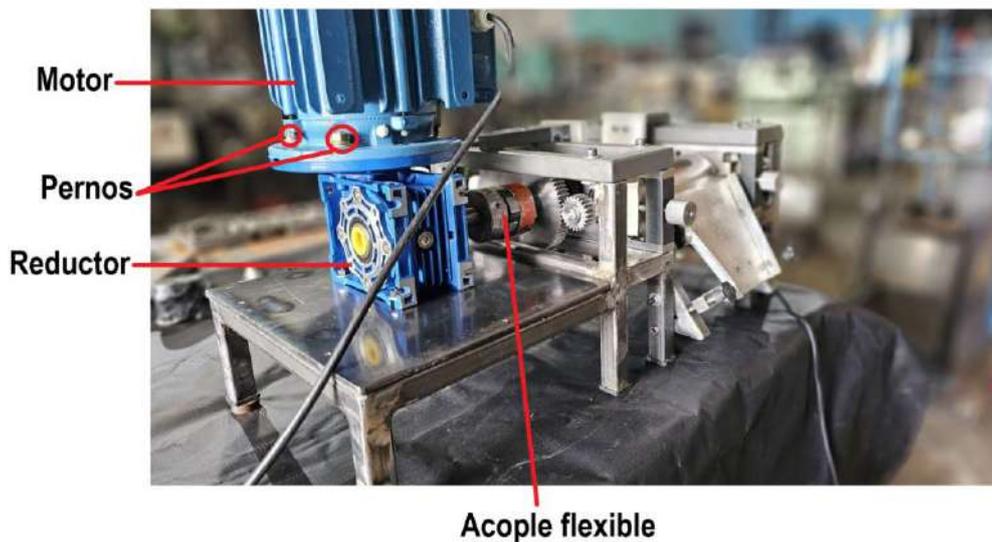


Figura 3.2. Reductor conectado a la máquina.

Fuente: Propia.

3.1.2 Unión del sistema de refrigeración a la máquina

El sistema de refrigeración consta del reservorio de agua que se monta a la estructura a través de pernos Allen M6x1. Por otro lado, el sistema de tubería de cobre que ingresa a los rodillos se sujeta por medio de pernos M8X1 a la caja para agua. Esto se puede visualizar en la figura 3.3.

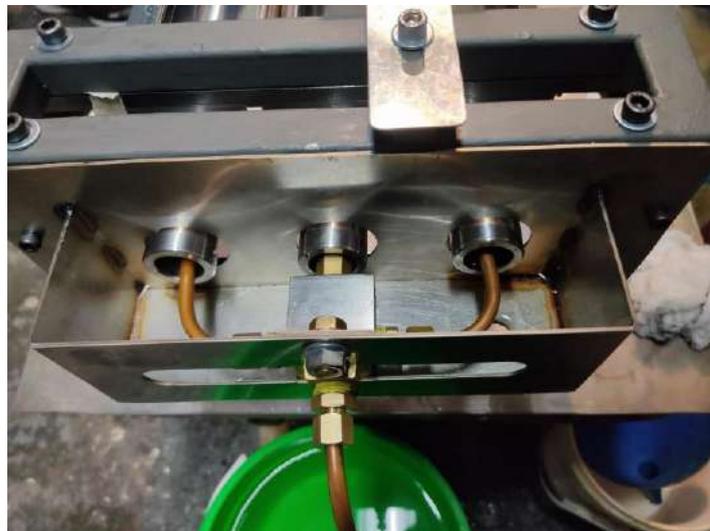
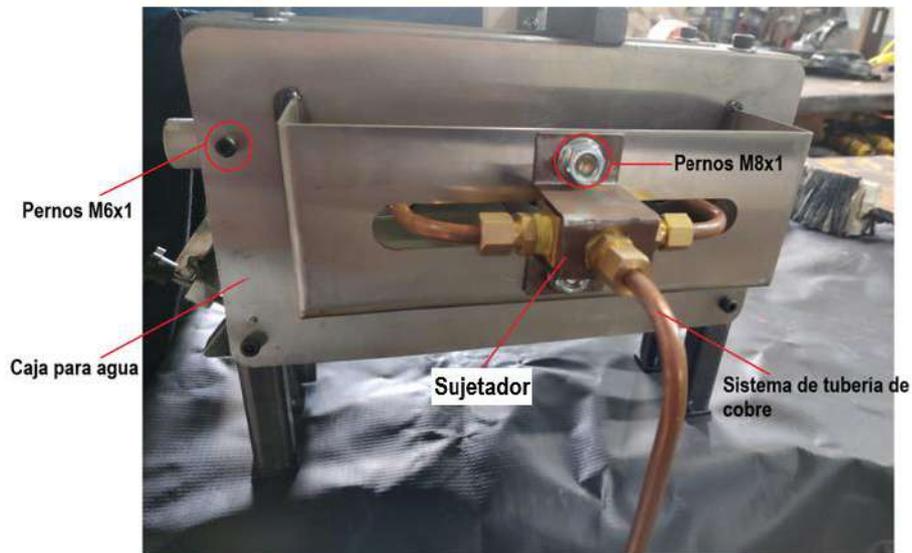


Figura 3.3. Sistema de refrigeración conectada a la máquina.

Fuente: Propia.

Con los sistemas de control y refrigeración incorporados, además, del sistema de transmisión [1] y molienda [2]. El prototipo de molino de tres rodillos se puede apreciar en la figura 3.4.



Figura 3.4. Prototipo de molino de tres rodillos.

Fuente: Propia.

3.1.3 Protocolo de pruebas

Para los sistemas de control y refrigeración se siguió el siguiente proceso:

Sistema de control y refrigeración en vacío

Una vez unido los sistemas a la máquina, se realizan las pruebas cuando no se encuentra moliendo pintura. En este contexto, para el sistema de control se verifica que la máquina arranque al presionar el botón ON del arrancador directo, y al presionar el botón OFF se detenga. Por otro lado, con el sistema de refrigeración se verifica que el agua se alimente a los rodillos y salga por el mismo lado. Además, se verifica que no haya fugas por el reservorio de agua, y que el agua caiga hacia el tanque.

Sistema de control y refrigeración en operación

Con los sistemas en operación de molienda, se verifica que el reductor entregue la velocidad de 90 rpm al eje motriz de la máquina utilizando un tacómetro para medir las revoluciones por minuto del eje motriz. Por otro lado, se mide la temperatura de entrada y salida del agua de refrigeración, además de la temperatura de la pintura antes y después de la operación de molienda que debe mantenerse en la temperatura ambiente de 27 °C utilizando una termocupla conectada a un multímetro.

En el anexo IX se muestra el formato correspondiente a protocolo de pruebas, en donde se detalla el cumplimiento de los procesos descritos en los puntos anteriores, además, de las verificaciones necesarias en la máquina.

3.2 Resultados

3.2.1 Sistema de control y refrigeración en vacío

El sistema de control cumple con la función de arrancar y parar la máquina mediante el arrancador directo conectado a la máquina. Este es capaz de dar una respuesta rápida para parar la máquina enseguida.

Por otro lado, el sistema de refrigeración es capaz de suministrar agua a los rodillos, mediante la bomba de pecera sumergida en el tanque, y esta sale por la cavidad hecha en los rodillos, como se observa en la figura 3.5. Además, esta agua que sale de los rodillos se recolecta en el reservorio de agua y después cae al tanque para la recirculación del agua. Todo esto se logra sin fugas.



Figura 3.5. Sistema de refrigeración en vacío.

Fuente: Propia.

3.2.2 Sistema de control y refrigeración con carga

Una vez la máquina realiza la operación de molienda, el reductor es capaz de entregar los 90 rpm al eje motriz como se muestra en la lectura del tacómetro mostrado en la figura 3.6.

Por otro lado, mediante la termocupla, la temperatura del agua en el tanque y que se distribuye a los rodillos es de 19 °C (ver figura 3.7). Y una vez concluida la operación de molienda, la temperatura del agua en la salida de los rodillos es de 25 °C (ver figura 3.8). Por otro lado, la temperatura de la pintura antes del proceso de molienda es de 27 °C (ver figura 3.9), y la temperatura después del proceso es de 27 °C (ver figura 3.10)



Figura 3.6. Lectura de tocómetro del rodillo central que está conectado al eje motriz.

Fuente: Propia.



Figura 3.7. Lectura de la termocupla en el agua del tanque y que ingresa a los rodillos.

Fuente: Propia.



Figura 3.8. Lectura de la termocupla en el agua en la salida de los rodillos después de la operación de molienda.

Fuente: Propia.



Figura 3.9. Lectura de la termocupla en la pintura antes del proceso de molienda.

Fuente: Propia.



Figura 3.10. Lectura de la termocupla en la pintura después del proceso de molienda.

Fuente: Propia.

3.2.3 Calidad de la pintura

Para determinar la calidad de la pintura se coloca una muestra entre dos placas de acero inoxidable y se las hace deslizar una sobre la otra para determinar la marca que deja la pintura en la placa. Este proceso se lo realiza antes y después del proceso de molienda.

En la figura 3.11 se observa la marca que deja la pintura antes del proceso de molienda y en la figura 3.12 la marca después del proceso de molienda. En la figura 3.11 se puede determinar que la pintura deja una marca poco profunda, opaca y con discontinuidades. Por otro lado, en la figura 3.12, la pintura, después del proceso de molienda, deja una marca más profunda, brillante y sin discontinuidades. Por tanto, se cumple el proceso de molienda obteniendo el brillo y uniformidad característico de las pinturas al óleo de alta calidad.



Figura 3.11. Marca que deja la pintura en la placa antes del proceso de molienda.

Fuente: Propia.



Figura 3.12. Marca que deja la pintura en la placa después del proceso de molienda.

Fuente: Propia.

3.2.4 Verificación de dimensionamiento del sistema de refrigeración

Dentro de los requerimientos del cliente se menciona que el sistema de refrigeración debe ocupar un espacio menor al 5% del volumen total de la máquina. Para esto, se determina las dimensiones totales de la máquina que resulta en: 57.5 cm de largo, 27.2 cm de ancho y 46 cm de alto como se observa en la figura 3.13.

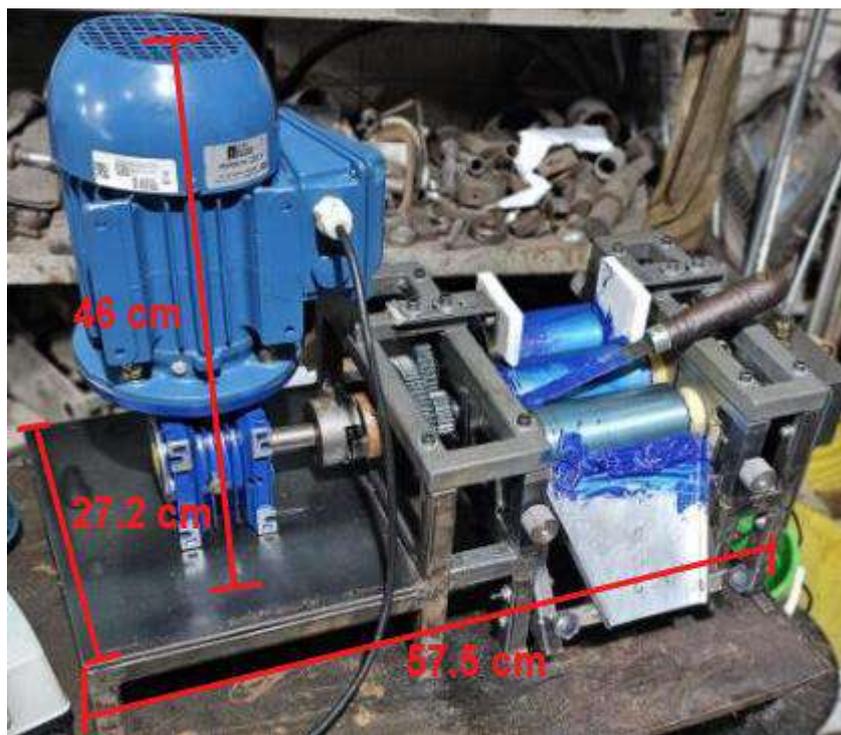


Figura 3.13. Dimensiones totales del prototipo del molino tricilíndrico sin el sistema de refrigeración.

Fuente: Propia.

Por otra parte, para medir el sistema de refrigeración se toma en cuenta que el elemento que se ancla a la estructura y que ocupa espacio es el reservorio de agua. Entonces, las dimensiones del reservorio de agua son: 27.2 cm de largo, 5.85 cm de ancho y 15 cm de alto (ver figura 3.14). Entonces el volumen total de la máquina es de 0.072 m^3 . Por otro lado, el volumen total del reservorio es de 0.002387 m^3 y se cumple que el sistema de refrigeración ocupa menos de 5% del volumen total de la máquina.



Figura 3.14. Dimensiones totales del reservorio de agua.

Fuente: Propia.

3.2.5 Costos de fabricación

En este subcapítulo se detalla los costos que influyen en la fabricación del sistema de refrigeración y para la conexión del arrancador directo con el reductor de velocidad.

Costos directos

Costos del sistema de control

En la tabla 3.1 se detallan los costos del motor-reductor, acople al eje motriz y arrancador directo que contempla el sistema de control del molino.

Tabla 3.1. Costos del sistema de control

Fuente: Propia

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Motor reductor WEG trifásico ortogonal aluminio	1	\$318.07	\$318.07

Acople flexible SPRFLEX AL-090	1	\$62.30	\$62.30
Arrancador directo WEG trifásico DLW7D23PR07	1	\$58.66	\$58.66
Total			\$439.03

Costos de materia prima y elementos normalizados

En la tabla 3.2 se muestran los costos de materia prima para la fabricación para el sistema de refrigeración.

Tabla 3.2. Costos de materia prima para la fabricación del sistema de refrigeración.

Fuente: Propia

Piezas	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Tubería	Tubería flexible de 1/4 pulg. x 1 m	2.35	\$3.30	\$7.75
Caja para agua y Brida	Plancha de acero inoxidable de 1 m^2 y 1.5 mm de espesor	1	\$25	\$25
Conexión sistema de tubería	Cruz de bronce de 1/4 pulg.	1	\$7.49	\$7.49
Conexión sistema de tubería	Conexión cobre macho 1/4 pulg. x hembra 1/4 pulg.	4	\$2.10	\$8.40
Pernos	Perno Allen inoxidable cabeza cilíndrica M6x1	4	\$0.10	\$0.40
Pernos	Perno acero flange M8x1	2	\$0.06	\$0.12
Tuercas	Tuerca acero M6x1	4	\$0.02	\$0.08
Tuercas	Tuerca acero M8x1	2	\$0.02	\$0.04
Arandelas	Arandela plana	4	\$0.01	\$0.04

Bomba de pecera	Bomba de pecera NUBIOS MY016	1	\$12	\$12
Total				\$61.32

Los costos de doblado y soldado para la plancha metálica fue un total de \$20.

Costos indirectos

Costos de ingeniería

Se considera que los costos de ingeniería que involucran el diseño y construcción del sistema de refrigeración tienen un valor del 20% del costo total de materia prima, doblado y soldado del sistema y representa un valor de \$16.26.

Costos imprevistos

Son gastos que están relacionados con transporte, impresión de planos, compra de pernos, etc. Esto se considera un valor de \$10.

Costo total

En la tabla 3.3 se resume el costo total de fabricación del sistema de refrigeración e implementación del sistema de control del molino tricilíndrico.

Tabla 3.3. Costo total de fabricación del sistema de refrigeración e implementación del sistema de control.

Fuente: Propia

Costos	Descripción	Valor
Costos directos	Costos del sistema de control	\$439.03
	Costos de materia prima y elementos normalizados	\$61.32
	Costos de doblado y soldadura	\$20
Costos indirectos	Costos de Ingeniería	\$16.26
	Costos imprevistos	\$10

Total costos	\$546.58
---------------------	-----------------

El costo total de la máquina, incluido el sistema de transmisión [1] y molienda [2] es de \$2441.53

3.3 Discusión de los resultados

La máquina construida cumple con la función de moler pintura al óleo por medio de tres rodillos de molienda contruidos de acero inoxidable y que giran en sentido contrario y a velocidades de 30.5 rpm, 90 rpm y 266 rpm, respectivamente. Además, la holgura entre los rodillos se puede ajustar hasta un mínimo de 0.2 mm, permitiendo así afinar el proceso de molienda para producir pintura de alta calidad. Para mover los rodillos, se conecta un motor trifásico, que a su vez está conectado a una caja reductora que proporciona una velocidad de 90 rpm en el eje motriz de la máquina, y se cuenta con botones para parar y arrancar la máquina.

Por otro parte, la máquina cuenta con un sistema de refrigeración para evacuar el calor producido por el paso de la pintura en la holgura de los rodillos. Este sistema consta de una bomba de pecera que se sumerge en un tanque y proporciona un caudal de agua de 2.5 lt/min a los rodillos. Para alimentar el agua a los rodillos, se cuenta con un sistema de tubería de cobre de 1/4 plg. que se conecta a la bomba. Una vez que el agua sale de los rodillos que están girando, esta se recolecta en el reservorio de agua que está anclada a la estructura, y este a su vez descarga el agua al tanque donde está la bomba. Con este sistema se logra mantener la temperatura de la pintura a la temperatura ambiente, que en el momento de las pruebas era de 27 °C. Además, se logra recircular el agua para un proceso continuo. También, el sistema es compacto y ocupa menos del 5% del volumen total de la máquina. Las dimensiones de la máquina son 57.5 cm de largo, 27.2 cm de ancho y 46 cm de alto.

Además, se pudo mejorar la molienda de la pintura regulando la distancia entre los rodillos hasta 0.05 mm, obteniendo un mejor producto. En el siguiente [link](#) se puede observar el funcionamiento de la máquina en vacío y con carga.

3.4 Conclusiones

- En este trabajo se diseñó y construyó el sistema de refrigeración, además se implementó el sistema de control de un molino tricilíndrico para la molienda de pinturas al óleo.
- El sistema de control del molino consta de un arrancador directo y un reductor mecánico de velocidad. El arrancador directo se seleccionó en base a la corriente nominal a la que funciona el motor para proteger al motor de sobrecargas eléctricas y permitir el accionamiento y detención de este. Por otro lado, el reductor de velocidad se acopla al motor para obtener una velocidad de 90 rpm en el eje motriz de la máquina. Este reductor se acopla al eje motriz mediante un acople flexible y una correcta alineación entre ejes.
- Se seleccionó una bomba de pecera NUBIOS MY016 que es capaz de proporcionar un caudal de 2.5 l/min hacia los rodillos. La bomba se conecta a un sistema de tubería de cobre flexible de 1/4 plg. que se ensambla mediante accesorios normalizados para tubería. Además, el agua residual después del proceso de enfriamiento que sale de los rodillos por su cavidad interna se almacena en un reservorio, que se fabrica de plancha de acero inoxidable y se ancla a la estructura. Esta agua residual se descarga desde el reservorio hacia un tanque que recirculará el agua nuevamente hacia los rodillos.
- De acuerdo con el protocolo de pruebas se observó el correcto funcionamiento del reductor de velocidad y del sistema de refrigeración. El reductor de velocidad fue capaz de proporcionar los 90 rpm al eje motriz de la máquina. Por otro lado, el sistema de refrigeración es capaz de mantener la pintura a una temperatura ambiente, asegurando así que la temperatura en la superficie de los rodillos se mantenga en un rango óptimo de temperatura.
- Se determinó que después del proceso de molienda, la calidad de la pintura al óleo mejora y se vuelve más brillante y uniforme.

3.5 Recomendaciones

- Para optimizar significativamente la calidad de la pintura al óleo, se sugiere someterla a múltiples ciclos de molienda en el molino, hasta lograr una uniformidad superior.
- Se aconseja que el funcionamiento del molino se realice en un entorno controlado, evitando la exposición directa a la luz solar y resguardándolo de temperaturas extremadamente bajas. Esto es crucial para prevenir un calentamiento o enfriamiento excesivo de los rodillos, situaciones que podrían comprometer la calidad de la pintura producida.
- Comprobar que la bomba de pecera no tenga elementos que puedan impedir su correcto funcionamiento y que se alimente el caudal requerido a los rodillos.
- Analizar mejores opciones con respecto a la recirculación del agua para obtener un sistema más eficiente.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Changoluisa, "Diseño y Construcción del Sistema de Transmisión de un Molino Tricilíndrico," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2024.
- [2] P. Oña, "Diseño y Construcción del Sistema de Molienda de un Molino Tricilíndrico," Escuela Politécnica Nacional, 2024.
- [3] C. Julie, "How to Make Oil Paint - Step-by-Step Tutorial and Tips | Natural Pigments." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.naturalpigments.com/artist-materials/tutorial-how-make-paint>
- [4] W. Herbst, "THE DISPERSION OF ORGANIC PIGMENTS IN PRINTING INK AND PAINT SYSTEMS WITH VARIOUS TYPES OF DISPERSING EQUIPMENT," Frankfurt, 1972.
- [5] T. Brock, M. Groteklaes, and P. Mischke, *European Coatings Handbook : 2nd revised edition*. Vincentz Network, 2012.
- [6] "Three Roll Grinding Mill Grinder for Lab Applications S65 125mm Roller 5kg/h | eBay." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.ebay.com/itm/314226668621>
- [7] A. Smith, "When and Why Do I Need Cooling for Three Roll Mill Rollers?" Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: <https://happythreerollmilling.blogspot.com/2013/>
- [8] M. Gottsegen, "MATERIALS INFORMATION and TECHNICAL RESOURCE for ARTISTS-Paint Mediums and Additives," New York, 2006.
- [9] D. Moreno and L. Moreno, "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA LAMINADORA DE CAUCHO 'CALANDRIA,'" Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, Cali, 1994.
- [10] Z. Tadmor and C. Gogos, *PRINCIPLES OF POLYMER PROCESSING*. John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2006.
- [11] J. Wikes, *Fluid Mechanics for Chemical Engineers with Microfluidics and CFD*, 2nd ed. Michigan: Pearson Education, 2006.
- [12] F. White, *FLUID MECHANICS*, 7th ed. New York: McGraw Hill, 2008.
- [13] J. Vlachopoulos and E. Mitsoulis, "Fluid Flow and Heat Transfer in Calendering," *Department of Chemical Engineering*. MacMater University.
- [14] T. Tsuritani, "Studies on Three-Roll Mills (III) On The Temperature Control and Operation of A Three Roll Mill," Tokyo, 1970.
- [15] F. Incropera, D. DeWitt, T. Bergman, and A. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. John Wiley & Sons, 2007.
- [16] F. Incropera and D. Dewitt, *Incropera Fundamentals Heat Mass Transfer*, 7th ed. Danvers: Jhon Wiley & Sons, 2011.
- [17] "Conceptos básicos de motorreductores." Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: <https://inducom-ec.com/conceptos-basicos-de-motorreductores/>

- [18] "Ross 2.5 In. x 5 In. Tabletop Lab Three Roll Mill, XP - Wohl Associates." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.wohlassociates.com/used-mills-roll/ross-2-5-in-x-5-in-tabletop-lab-three-roll-mill-xp.html>
- [19] "Anthony 2.5" x 5" Bench Top Three Roll Mill." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.keithmachinery.com/anthony-2.5-5-bench-top-three-roll-mill>
- [20] "Certification Laboratory S65/s150/s200/ Diameter Three Roll Mill Machine Ink Pigment." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.alibaba.com>
- [21] "Drives < Productos < MEGA MOTOR." Accessed: Feb. 13, 2024. [Online]. Available: <https://megamotor-ec.com/index.php?page=productos&familia=R>
- [22] "Molinos o Mezcladores Abiertos | Ciência e Tecnologia da Borracha." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.ctborracha.com/molinos-o-mezcladores-abiertos/>
- [23] "Inicio < MEGA MOTOR." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://megamotor-ec.com/index.php?page=inicio>
- [24] "ARRANCADOR DLW-7D23P-R07 | DLW - Arrancadores directos." Accessed: Feb. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.weg.net>
- [25] Andalucía J, "Configuración de redes de agua para instalaciones de refrigeración y climatización, así como de conductos de aire," en *CONFIGURACIÓN DE INSTALACIONES DE FRÍO Y CLIMATIZACIÓN.*, p. 19.
- [26] "My-016-bomba De Agua Con Filtro Para Tanque De Peces, Sumergible, Silenciosa, Tecnología De Linterna, 2w." Accessed: Feb. 13, 2024. [Online]. Available: <https://es.aliexpress.com/i/4000322197154.html>

ANEXO II. Evaluación de criterios ponderados para el primer módulo del mecanismo.

Transmisión de Torque > Costo > Montaje					
Criterio	Costo	Transmisión de torque	Montaje	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		0	1	2	0,33
Transmisión de torque	1		1	3	0,50
Montaje	0	0		1	0,17
Suma				6	1

Evaluación de las alternativas respecto a la transmisión de torque.

Alternativa 2 > Alternativa 1				
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
Suma			3	1

Evaluación de las alternativas respecto al costo.

Alternativa 2 > Alternativa 1				
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
Suma			3	1

Evaluación de las alternativas respecto al montaje.

Alternativa 1 = Alternativa 2				
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1,5	0,5
Alternativa 2	0,5		1,5	0,5
Suma			3	1

ANEXO III. Evaluación de criterios ponderados para el segundo módulo del mecanismo

Fabricación = Costo > Mantenimiento					
Criterio	Costo	Fabricación	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		0.5	1	2.5	0.417
Fabricación	0.5		1	2.5	0.417
Mantenimiento	0	0		1	0.167
Suma				6	1

Evaluación de las alternativas respecto a la fabricación.

Alternativa 1 > Alternativa 2 > Alternativa 3					
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,50
Alternativa 2	0		1	2	0,33
Alternativa 3	0	0		1	0,17
Suma				6	1

Evaluación de las alternativas respecto al costo.

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3					
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,50
Alternativa 2	0		0.5	1,5	0,25
Alternativa 3	0	0.5		1,5	0,25
Suma				6	1

Evaluación de las alternativas respecto al mantenimiento.

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3					
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	2,5	2,5	0,42
Alternativa 2	0,5		2,5	2,5	0,42
Alternativa 3	0	0		1	0,17
Suma				6	1

ANEXO IV. Ficha técnica de motor eléctrico trifásico W22 IE2

HOJA DE DATOS						
Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula						
Cliente : _____						
Línea del producto : W22 IE2 Trifásico				Código del producto :		13058116
Carcasa : 71	Potencia : 0.55 kW (0.75 HP)	Polos : 4	Frecuencia : 60 Hz	Tensión nominal : 220/440 V	Corriente nominal : 2.69/1.34 A	Corriente de arranque : 13.7/6.86 A
Ip/In : 5.1	Corriente en vacío : 1.85/0.925 A	Rotación nominal : 1800 rpm	Resbalamiento : 6.67 %	Torque nominal : 3.13 Nm	Torque de arranque : 300 %	Torque máximo : 290 %
Clase de aislamiento : F	Factor de servicio : 1.15	Momento de inercia (J) : 0.0008 kgm ²	Categoría : N	Tiempo de rotor bloqueado : 73s (frío) 41s (caliente)	Elevación de temperatura : 80 K	Régimen de servicio : S1
				Temperatura ambiente : -20°C hasta +40°C	Altitud : 1000 m	Grado de protección : IP55
				Método de refrigeración : IC411 - TEFC	Forma constructiva : B14L(D)	Sentido de giro ¹ : Ambos
				Nivel de ruido ² : 47.0 dB(A)	Método de Arranque : Partida directa	Masa aproximada ³ : 11.0 kg
Potencia	50%	75%	100%	Fuerzas en la fundación		
Rendimiento (%)	71.0	74.5	75.5	Tracción máxima	: 270 N	
Cos Φ	0.50	0.63	0.71	Compresión máxima	: 377 N	
Pérdidas en puntos de funcionamiento estándar (velocidad; par), en porcentaje de la potencia nominal						
P1 (0,9;1,0)	P2 (0,5;1,0)	P3 (0,25;1,0)	P4 (0,9;0,5)	P5 (0,5;0,5)	P6 (0,5;0,25)	P7 (0,25;0,25)

ANEXO V. Ficha técnica del reductor de velocidad FCNDK 40



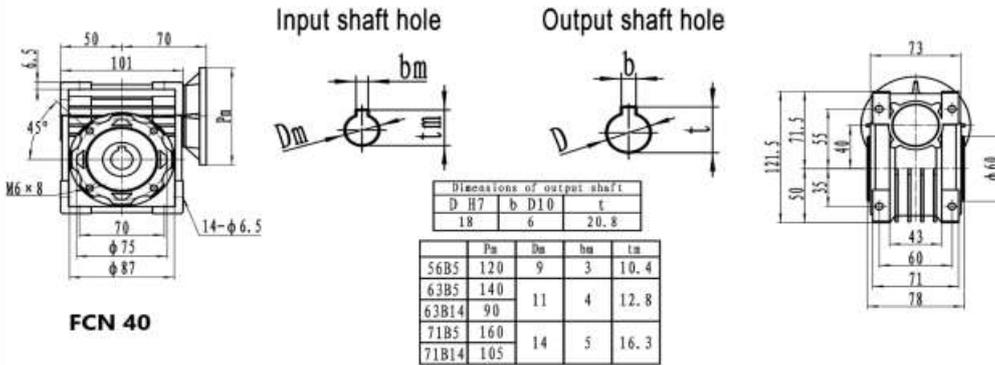
SINFIN CORONA

ITEM: 22



DATOS MOTOR	
POTENCIA	0.5HP
REVOLUCIONES	1760
FRECUENCIA	60HZ
TORQUE MOTOR NOMINAL	2,1
CARCASA (PAM)	71(B5)
TIPO BRIDA	FF-130
EFICIENCIA MOTOR	IE 2
DATOS REDUCTOR	
REFERENCIA	541100
TIPO	ORTOGONAL
MODELO	FCN
MATERIAL	ALUMINIO
CARCASA	40
RELACION DE TRANSMISION i:	20
VELOCIDAD SALIDA	88,00
TORQUE MAXIMO	42
TORQUE OPERACIÓN	32
FACTOR DE SERVICIO	1,3

PLANOS REDUCTOR



ANEXO VI. Especificaciones técnicas del arrancador directo DLW7-P65-R07

ARRANCADOR DLW-7D23P-R07

Producto: 10046366

- VISIÓN GENERAL
- DETALLES DEL PRODUCTO
- SOBRE EL PRODUCTO
- CENTRO DE DESCARGAS



Destinados a hacer la maniobra y protección de motores eléctricos trifásicos y monofásicos. La WEG tiene disponible un arrancador especialmente proyectado y dimensionado de acuerdo con la aplicación.

Resumen de las características técnicas

TIPO DE ARRANQUE	Arrancador Directo Trifásico	Tensión de operación	U _e ≤415V
Tipo de montaje	Caja Plástica	Tensión de mando	220V50/60Hz
Referencia	DLW	Grado de protección	IP52
Potencia de Empleo	No aplicable		

↔ Comparar

ANEXO VII. Especificaciones técnicas de la tubería de 1/4

DIÁMETRO DE TUBO EMPLEADOS EN REFRIGERACIÓN					
Denominación del tubo	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4
Diámetro nominal (mm)	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	5/8"
Diámetro exterior (mm)	6.35	9.52	12.7	15.87	19.05
Espesor (mm)	1	1	1	1	1.05
Peso por metro (kg)	0.151	0.241	0.331	0.419	0.512
Sección interior (cm ²)	0.166	0.465	0.933	1.561	2.29

Denominación del tubo	7/8	1"	1 1/8"	1 3/8"	1 5/8"
Diámetro nominal (mm)	3/4"	7/8"	1"	1 1/4"	1 1/2"
Diámetro exterior (mm)	22.22	25.4	28.57	34.92	41.28
Espesor (mm)	1.14	1.2	1.27	1.4	1.52
Peso por metro (kg)	0.594	0.689	0.975	1.315	1.696
Sección interior (cm ³)	3.122	4.16	5.32	8.107	11.4

ANEXO VIII. Especificaciones técnicas de bomba de pecera NUBIOS MY016

\$7,90



«Mini Bomba De Agua Sumergible Acuario»

Características del Producto:

- Tecnología: Bomba centrífuga
- Estructura: Bomba de una etapa
- Uso: Agua
- Poder: Eléctrico
- Estándar o no estándar: Estándar
- Combustible: eléctrico
- Presión: Baja presión
- Tipo de Bomba: Sumergible
- Color: Negro
- Material: Plástico de Ingeniería
- Caudal máximo: 150L / H

*Ideal para todo tipo de Proyectos *

ANEXO IX. Protocolo de pruebas

MAQUINA:	MOLINO TRICILINDRICO	FECHA:	13/02/2024
ESTUDIANTE:	Changoluisa Marcos	PROFESOR:	Ing. Wilson Guachamín
	Oña Paola	HORA INICIAL:	04:00 p. m.
	Guapi Carlos	HORA FINAL:	05:00 p. m.

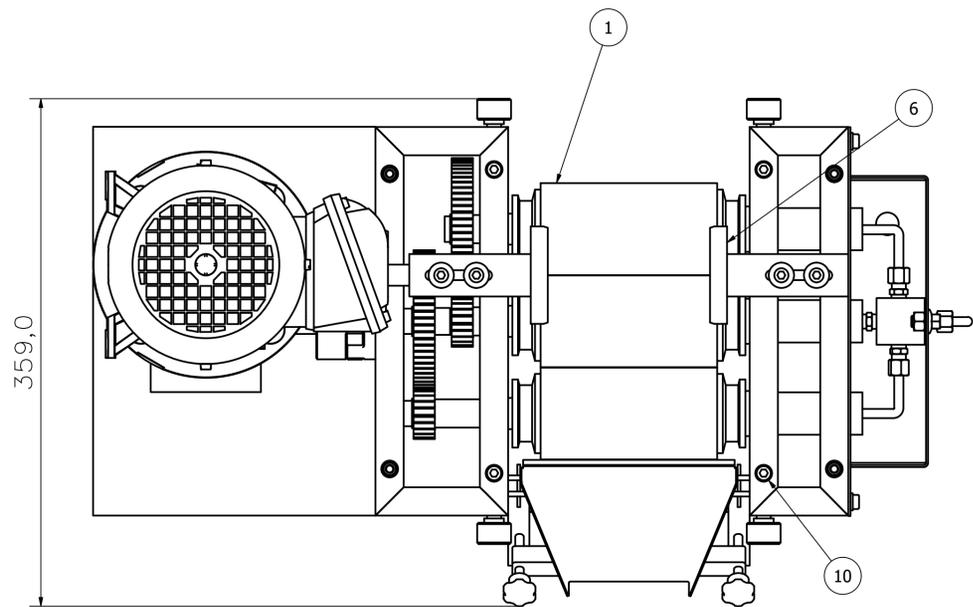
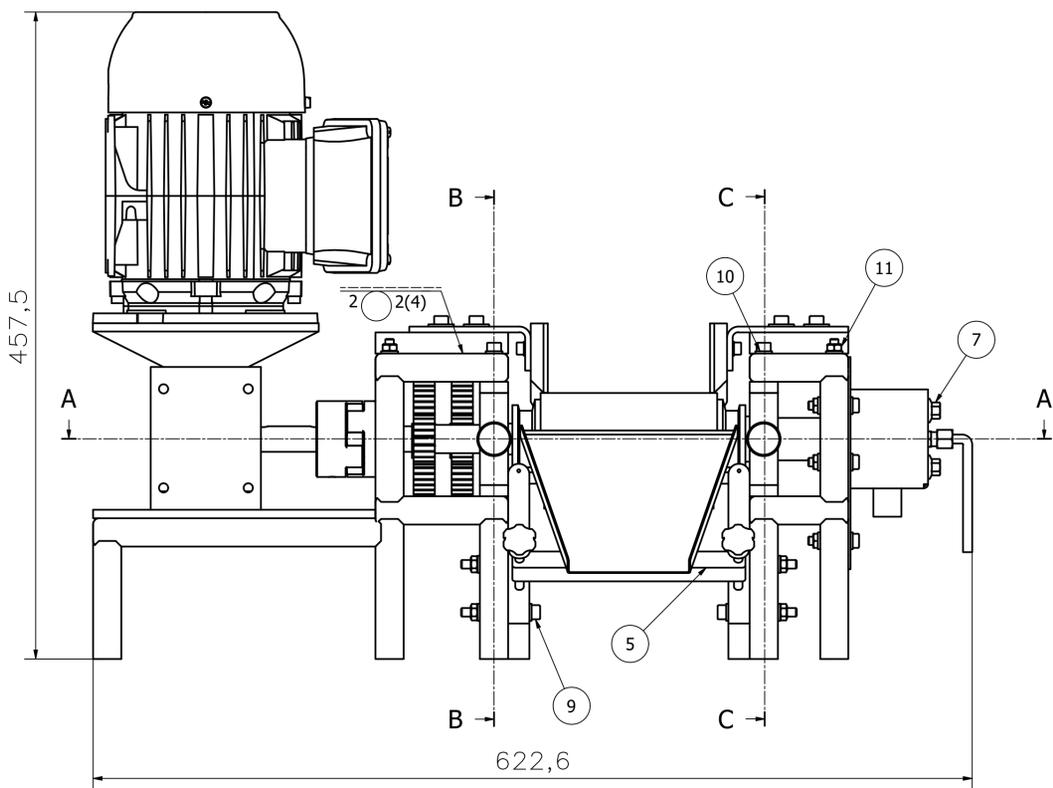
LISTA DE VERIFICACIÓN DE ESTADO DE LA MÁQUINA ANTES DEL INICIO DE PRUEBAS		
ASPECTO DE INSPECCIÓN	CHEQUEO	OBSERVACIÓN
Verificación de las dimensiones de la máquina	X	57.5 cm de largo x 27 cm de ancho x 46 cm de alto
Verificación de las dimensiones del sistema de refrigeración	X	27.2 cm de largo x 5.85 cm de ancho x 15 cm de alto
Verificación de alineación del eje del reductor a la máquina	X	N/A
Verificación de movimiento manual para escuchar si existe rozamiento entre elementos móviles	X	N/A
Verificación de sujeción de pernos de ensamblaje de componentes	X	N/A
Verificación que no existan cables eléctricos sueltos	X	N/A
Verificación de las características eléctricas de la toma eléctrica	X	N/A
Verificación del arrancador directo que se encuentre en OFF	X	N/A
Verificación de que la bomba de pecera este conectada a la tubería de cobre	X	N/A
Verificación que tubería de cobre no tope los rodillos	X	N/A

TOMA DE DATOS (MÁQUINA CONECTADA Y ENCENDIDA)		
ASPECTO DE INSPECCIÓN	CHEQUEO	OBSERVACIÓN
Verificación de pulsador ON	X	N/A
Verificación de pulsador OFF	X	N/A
Verificación de que bomba de pecera este funcionando	X	2.5 lt/min
Verificación que entre y salga agua de los rodillos	X	N/A
Verificación que el agua se descargue por el reservorio al tanque	X	N/A

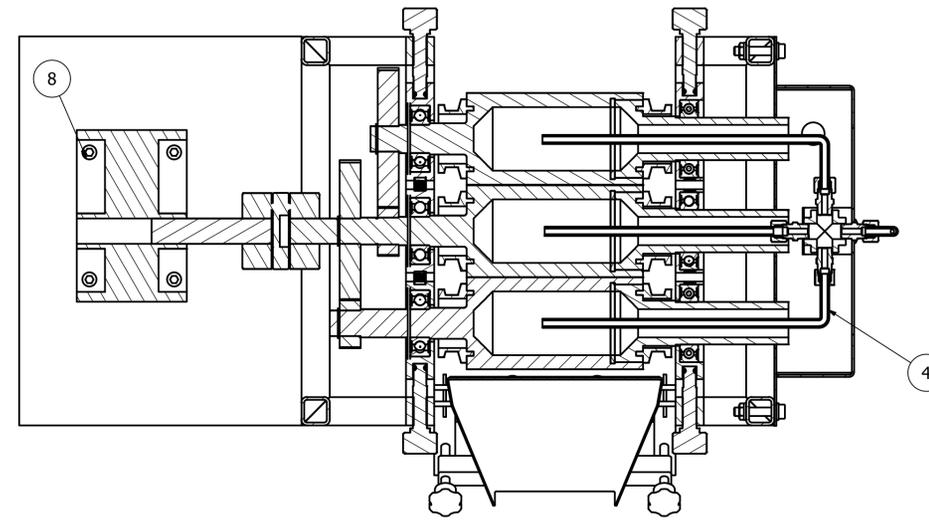
Verificación de la temperatura de entrada del agua a los rodillos	X	18 °C
Verificación de la temperatura de salida del agua de los rodillos	X	25 °C
Verificación de la temperatura de la pintura al inicio de la molienda	X	27 °C
Verificación de la temperatura de la pintura al final de la molienda	X	27 °C

FUNCIONAMIENTO (MÁQUINA EN OPERACIÓN) PARA LA MOLIENDA DE PINTURA		
ASPECTO DE INSPECCIÓN	CHEQUEO	OBSERVACIÓN
Aspecto de pintura al inicio de molienda	X	N/A
Aspecto de pintura al final de molienda	X	N/A

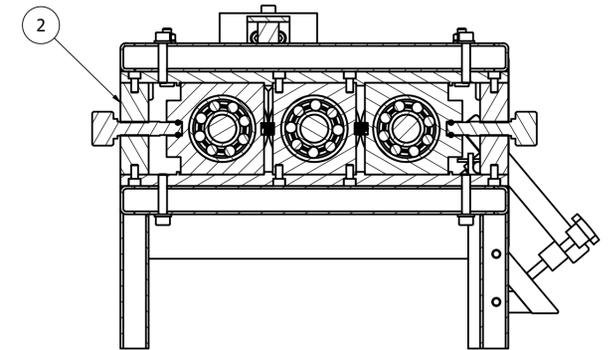
ANEXO X. PLANOS



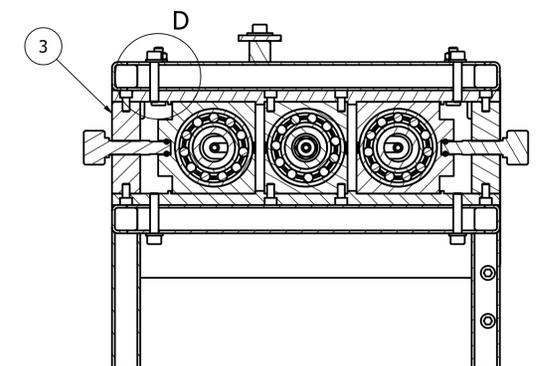
SECCIÓN A-A
ESCALA (1 : 2.5)



SECCIÓN B-B
ESCALA (1 : 2.5)



SECCIÓN C-C
ESCALA (1 : 2.5)



DETALLE D
ESCALA (1 : 1)

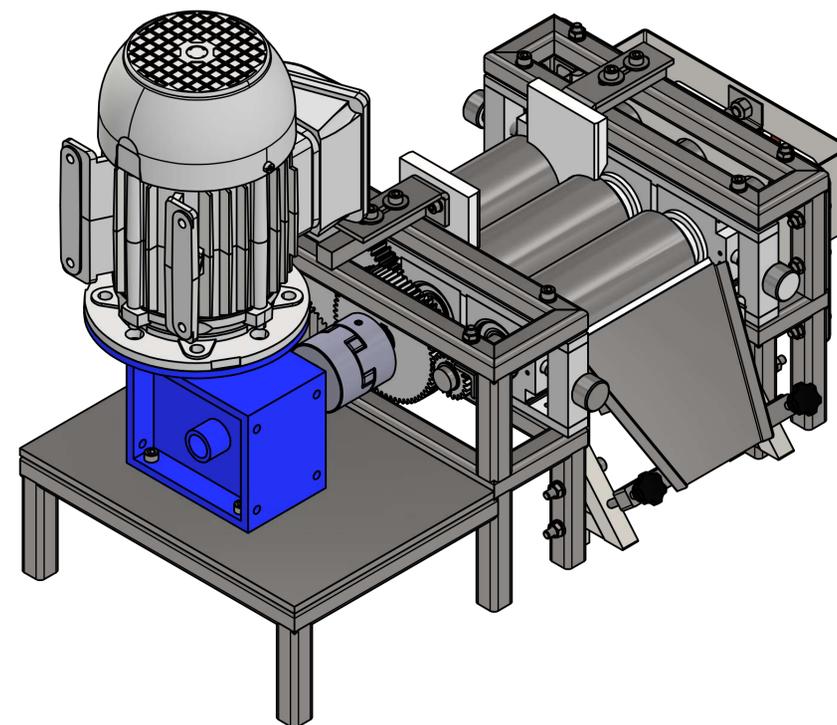
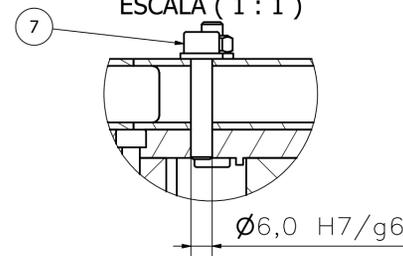
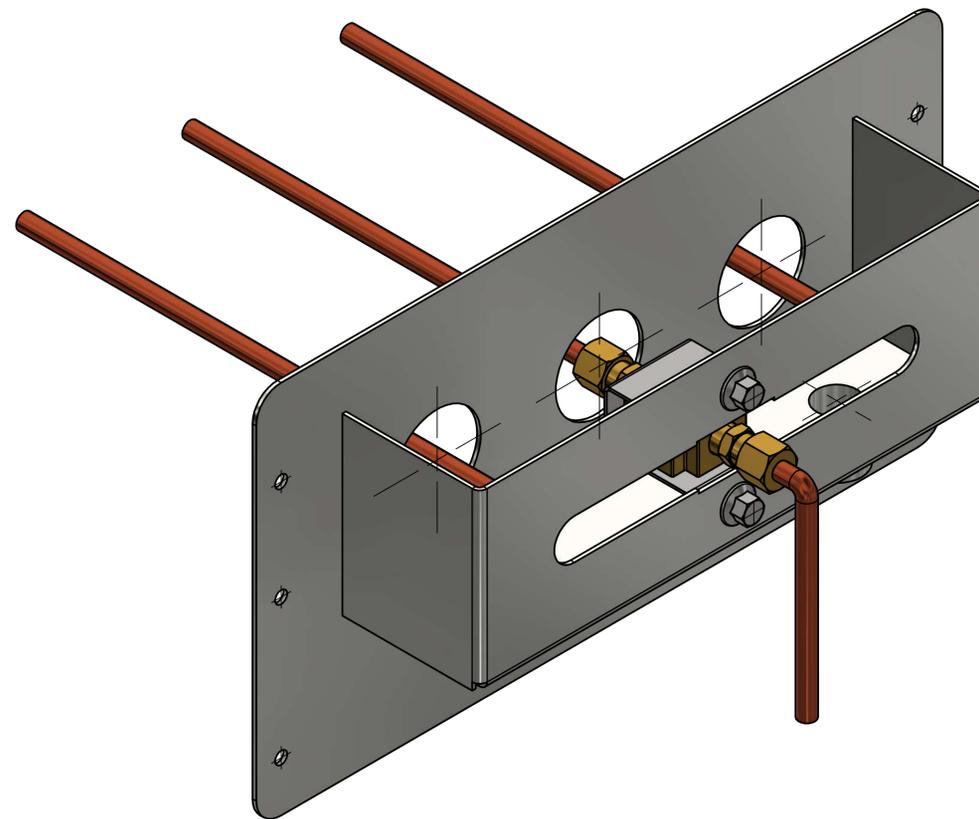
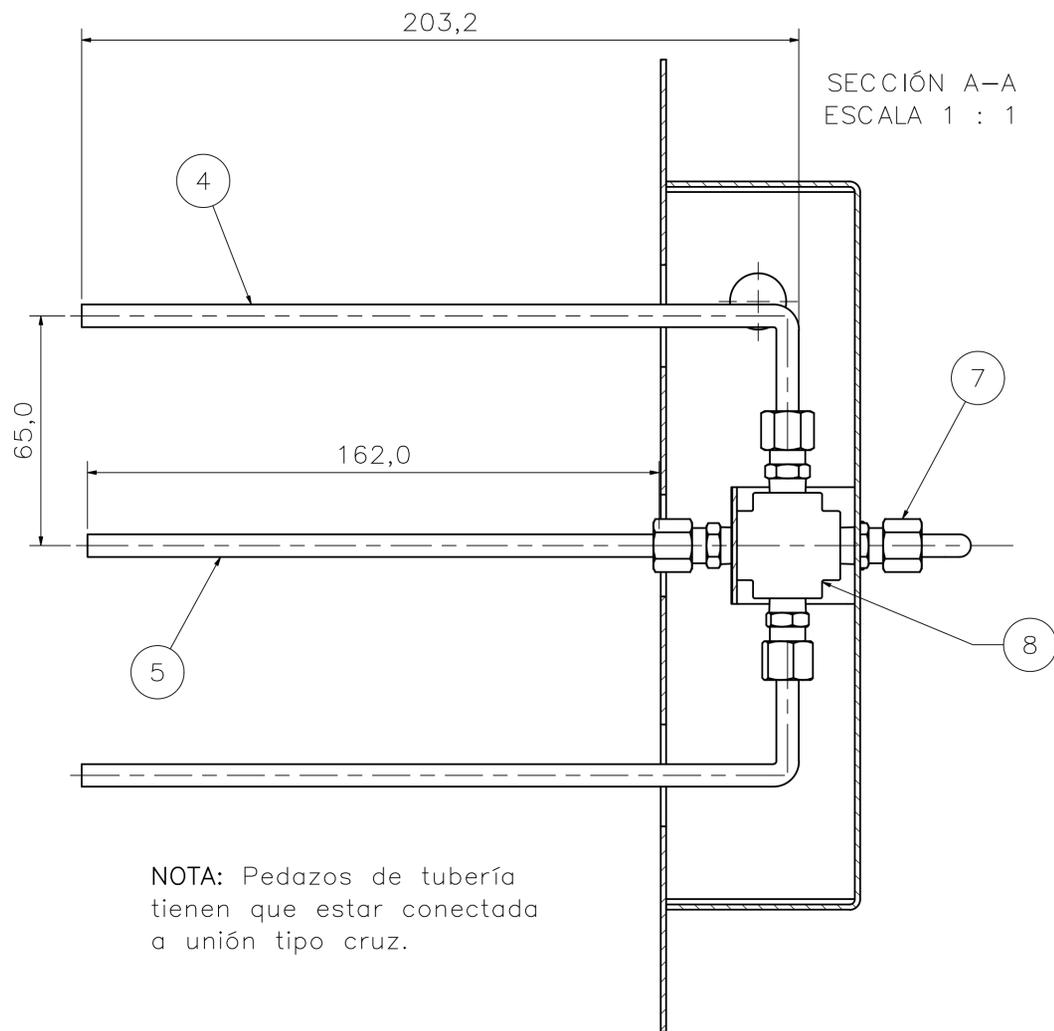
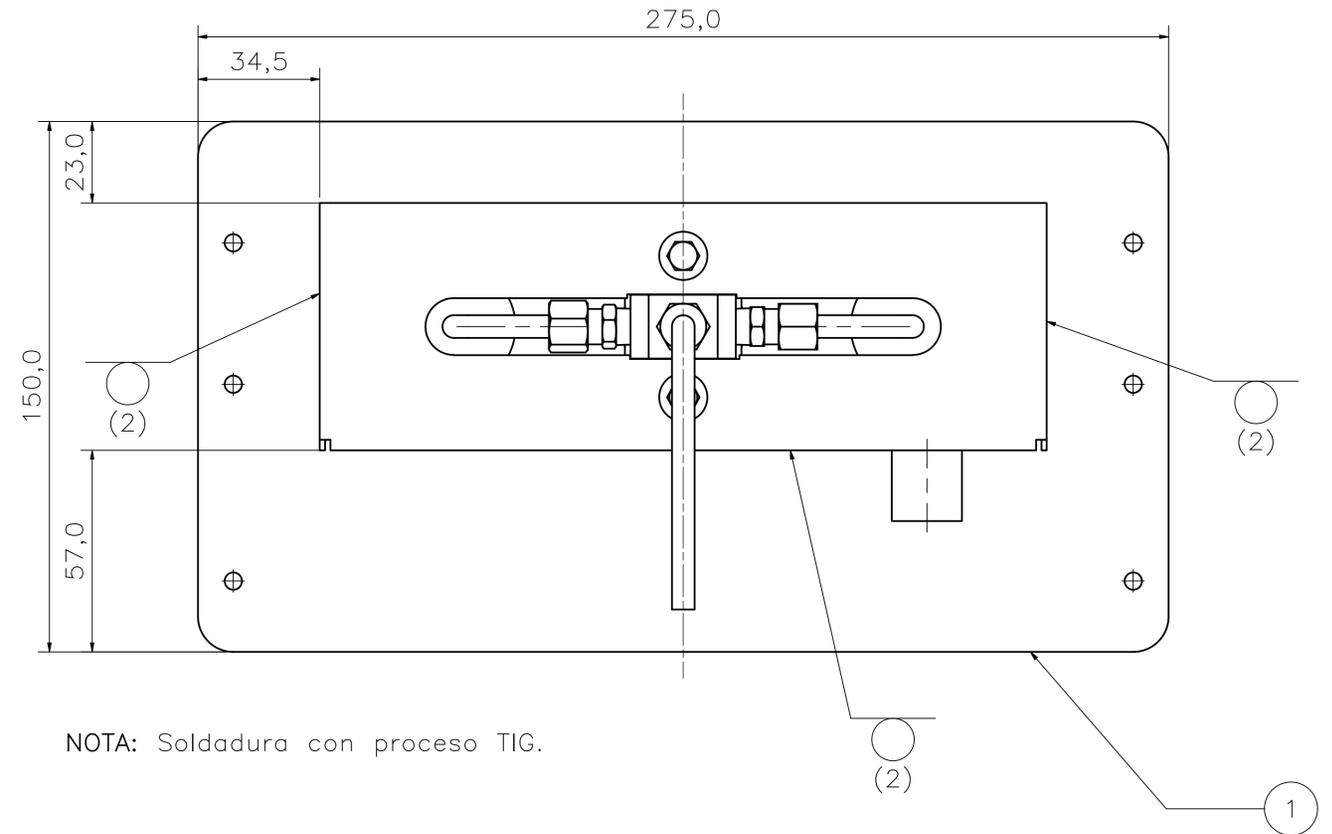
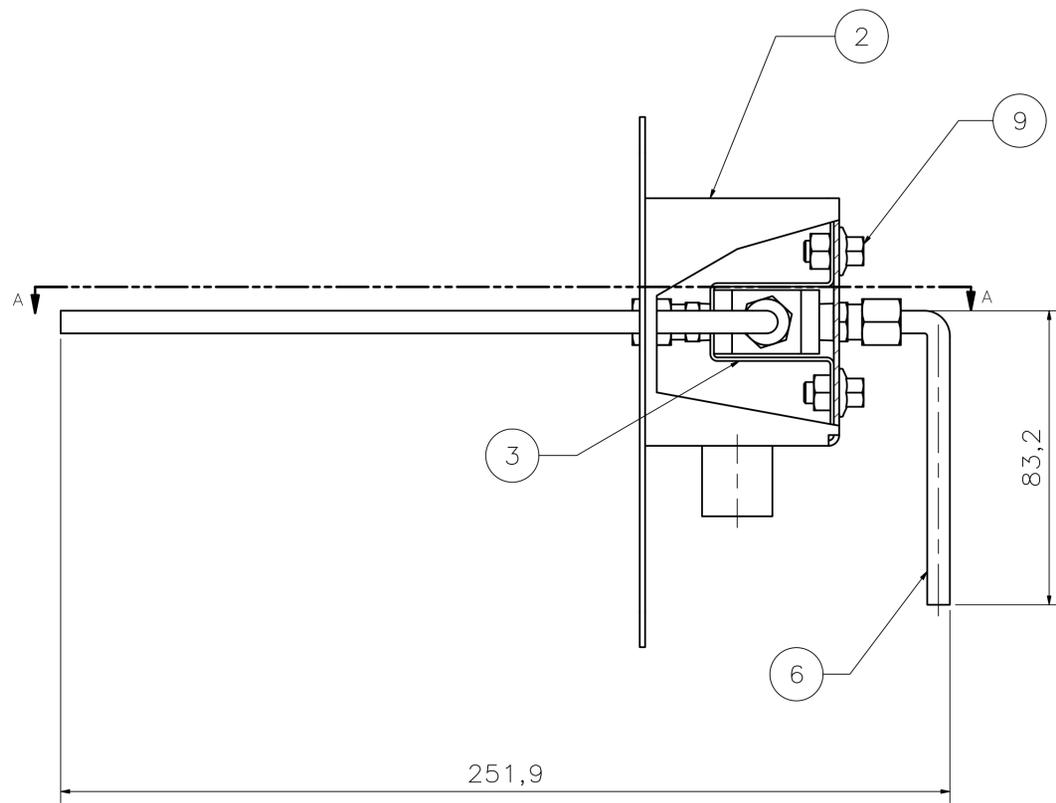


TABLA DE AJUSTES

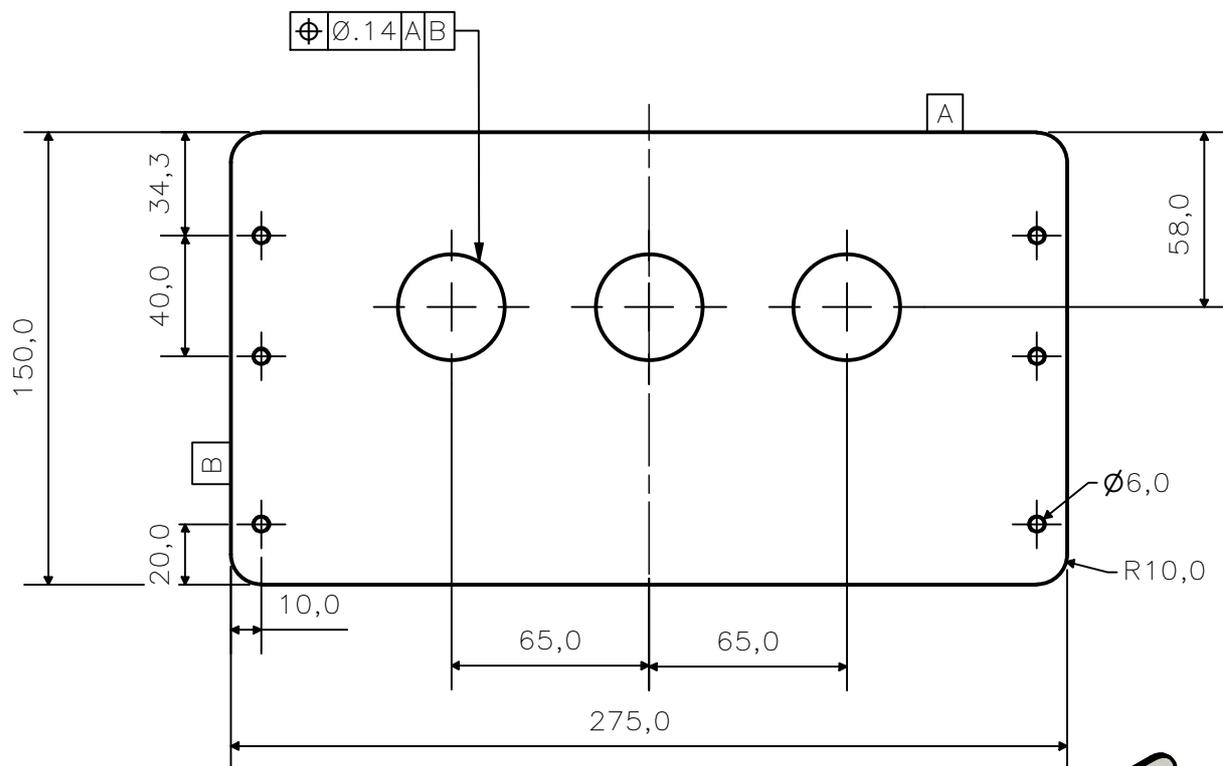
VALOR		AJUSTE				
6 H7/g6		Holgura				
ELEMENTOS NORMALIZADOS						
11	C6	TUERCA M6	DIN 555	14	ACERO NEGRO	
10	C5	ARANDELA M6	DIN 126	26	ACERO GALVA.	
9	E4	PERNO M6x50	DIN 912	4	ACERO NEGRO	
8	B9	PERNO M6x20	DIN 912	4	ACERO NEGRO	
7	C6	PERNO M6x30	DIN 912	14	ACERO NEGRO	
PLANOS DE SUBCONJUNTO						
6	H7	BASTIDOR Y SEPARADORES	.007	1	N.A.	Soldado
5	E5	TOLVA DE DESCARGA	.006	1	N.A.	Empernado
4	D14	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	.005	1	N.A.	Empernado
3	B13	SISTEMA DE RODAMIENTOS - DERECHO	.004	1	N.A.	Empernado
2	B11	SISTEMA DE RODAMIENTOS - IZQUIERDO	.003	1	N.A.	Empernado
1	G4	SISTEMA DE MOLINDEA Y TRANSMISIÓN	.002	1	N.A.	Empernado
N° ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIÓN	
EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA	DIB.: Marcos Changoluisa DIS.: P. Oño, C. Guapi REV.: Prof. Wilson Guachamin			ESCALA: 1 : 2.5	
Molino de pinturas		TIC - MTP.001			FECHA: 20-02-24	



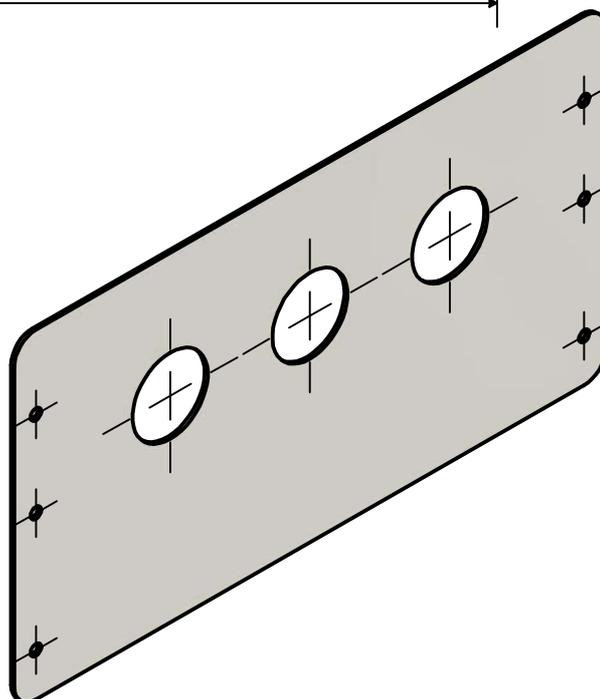
NOTA: Pedazos de tubería tienen que estar conectada a unión tipo cruz.

ELEMENTOS NORMALIZADOS						
N°	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIÓN
8	I5	CRUZ BRONCE HEMBRA NPT 1/4	ASME B 1.20.1	1	Bronce	Cruz roscada que conecta los 4 pedazos de tubería
7	I3	RACOR BRONCE B68 MACHO NPT A 1/4 pulg. X 1/4 pulg.	ASME B 1.20.1	4	Bronce	Racor roscado que une los pedazos de tubería con la cruz
6	C6	PEDAZO DE TUBERÍA DE COBRE DE 1/4 pulg. X 83.2 mm	ASTM B280	1	Cobre	Tubería de cobre flexible para refrigeración
5	I3	PEDAZO DE TUBERÍA DE COBRE DE 1/4 pulg. X 162 mm	ASTM B280	1	Cobre	Tubería de cobre flexible para refrigeración
4	H3	PEDAZO DE TUBERÍA DE COBRE DE 1/4 pulg. X 203.2 mm	ASTM B280	2	Cobre	Tubería de cobre flexible para refrigeración
PLANOS DE TALLER						
3	B5	SUJECIÓN DE TUBERÍA	.503	1	ACERO INOXIDABLE 304	Plancha de 1.5 mm de espesor
2	C12	RESERVORIO DE AGUA	.502	1	ACERO INOXIDABLE 304	Plancha de 1.5 mm de espesor
1	H2	PLACA SOPORTE DE RESERVORIO	.501	1	ACERO INOXIDABLE 304	Plancha de 1.5 mm de espesor
N°	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIÓN
EPN		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			DIB.: Carlos Guapi DIS.: Carlos Guapi REV.: Prof. Wilson Guachamín	ESCALA: 1 : 1
Sistema de Refrigeración					TIC - MTP.005	FECHA: 19-02-2024

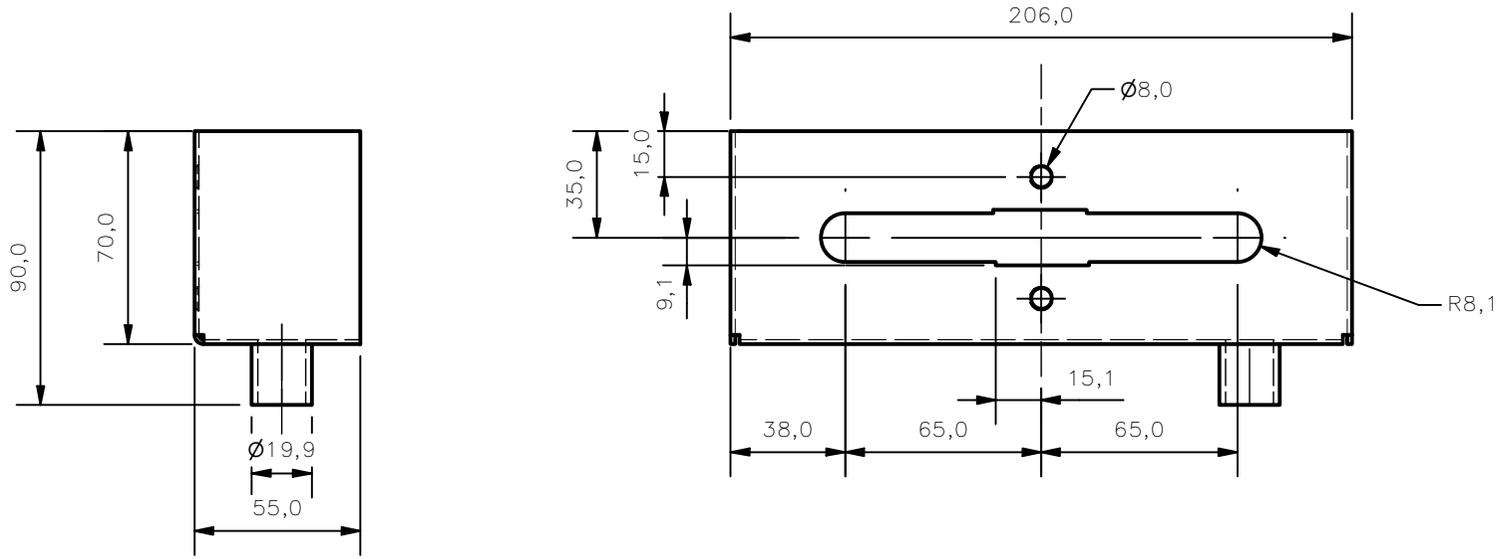
ESCALA 1:2.5



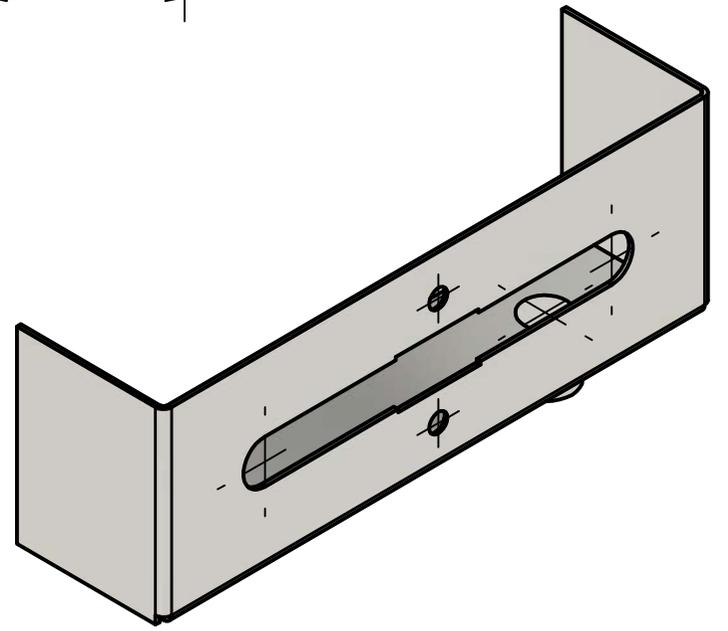
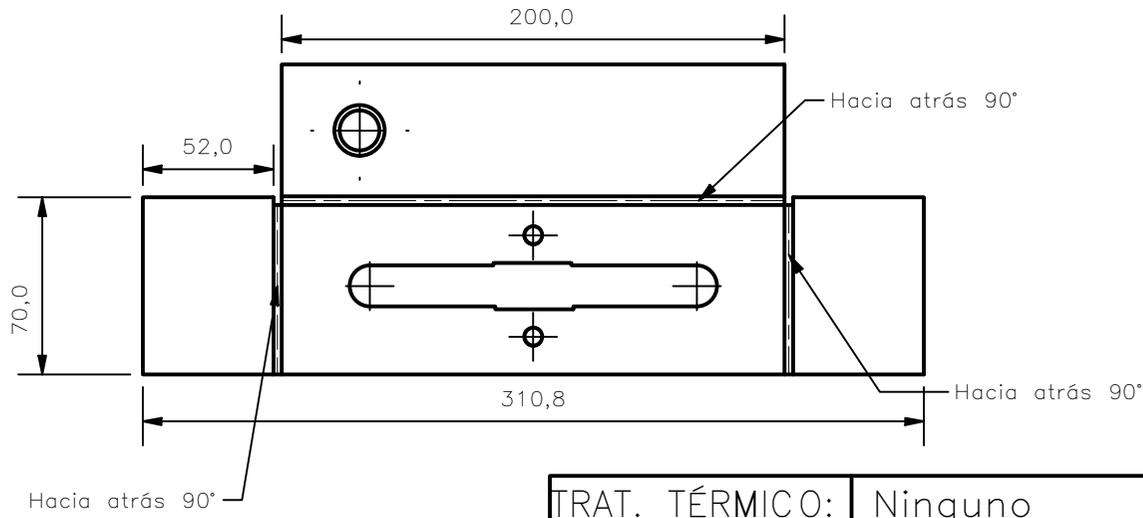
NOTA: Espesor de 1.5 mm
Proceso de corte por láser



TRAT. TÉRMICO:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO:	Ninguno		DIB.:	Carlos Guapi
MATERIAL:	Acero inoxidable	TOL. GRAL.:	ESCALA:	DIS.:
			1 : 2.5	Prof. Wilson Guachamín
TÍTULO:		TIC – MTP.501		FECHA:
PLACA SOPORTE DE RESERVORIO				19/02/2024

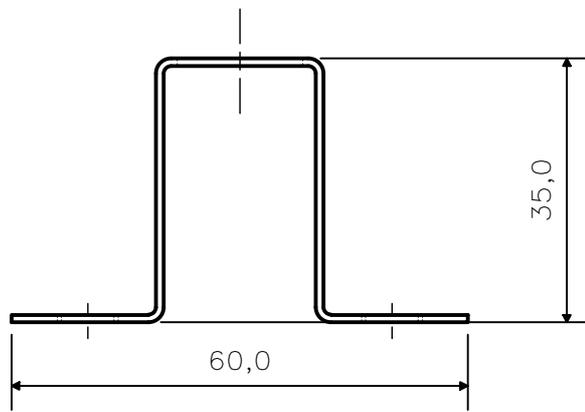


DESARROLLO:
ESCALA 1:3

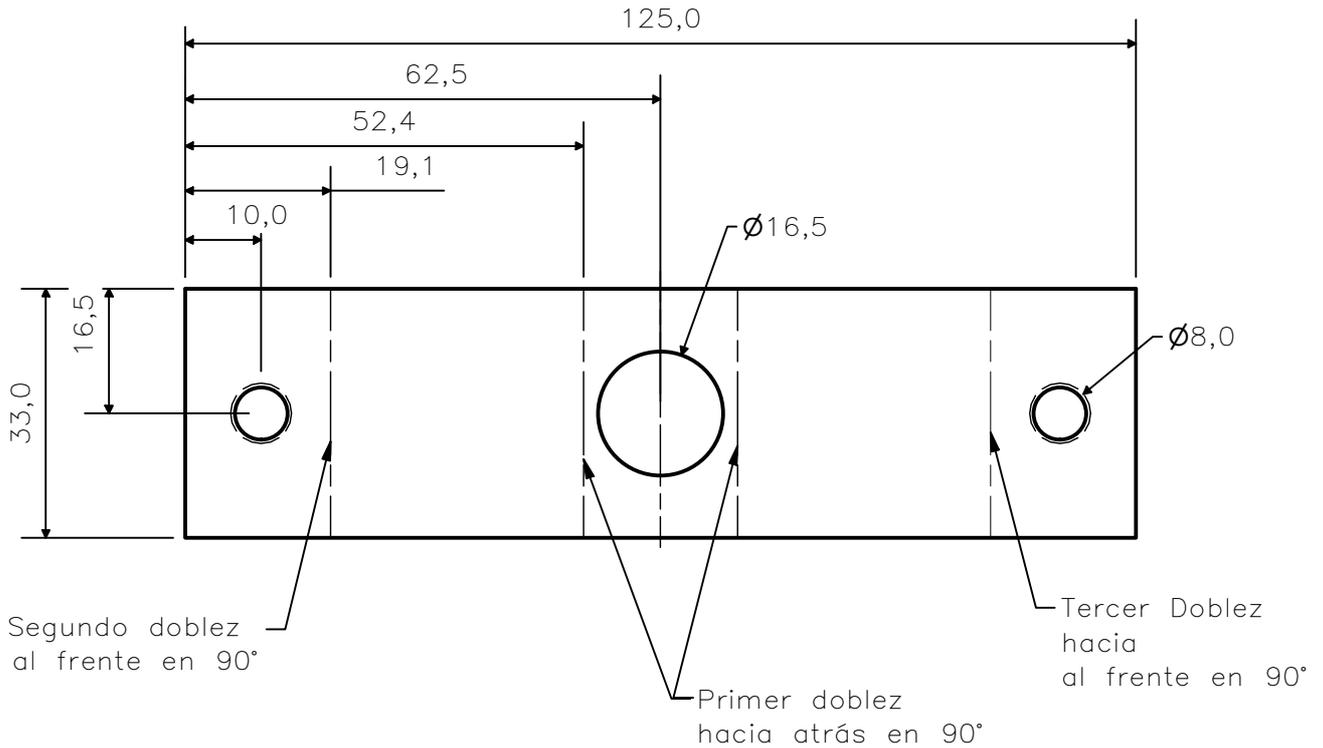


NOTA: Espesor de 1.5 mm
Proceso de doblado

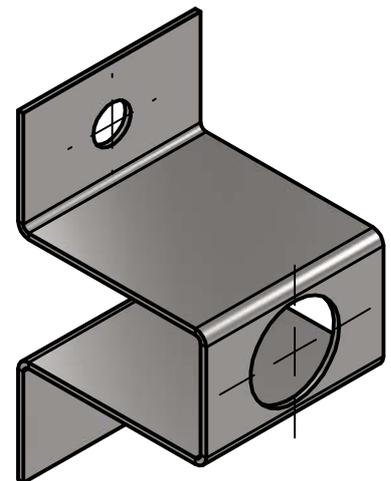
TRAT. TÉRMICO:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
RECUBRIMIENTO:	Ninguno		DIB.:	Carlos Guapi	
MATERIAL:	Acero inoxidable	TOL. GRAL.:	ESCALA:	DIS.:	Carlos Guapi
				1 : 2.5	REV.:
TÍTULO:	Reservorio de agua	TIC - MTP.502		FECHA:	19/02/2024



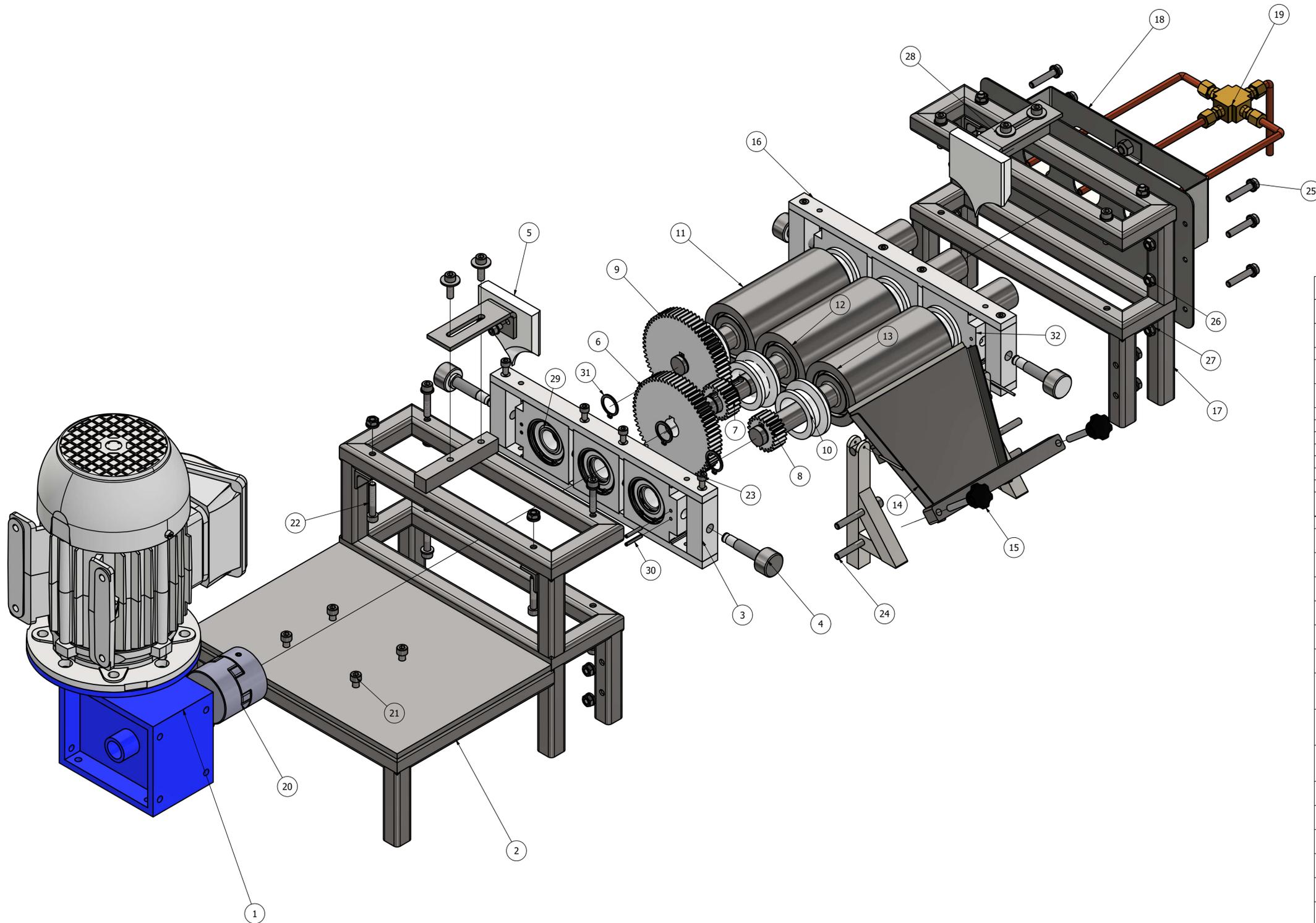
Desarrollo:
Escala 1:1



NOTA: Espesor 1.5 mm
Proceso de doblado



TRAT. TÉRMICO:	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO:	Ninguno		DIB.:	Carlos Guapi
MATERIAL: Acero inoxidable	TOL. GRAL.:	ESCALA: 1 : 1	DIS.:	Carlos Guapi
			REV.:	Prof. Wilson Guachamín
			TÍTULO: Sujeción de tubería	



ELEMENTOS NORMALIZADOS					
32		Rodamiento ø47 mm	SKF	3	Rodamiento SKF 61906 2RSH
31		Anillo de seguridad	BS 3673	3	Acero al carbono BS 3673/1 - S018M
30		Pasador elástico	ISO 8752	8	3 X 20 A
29		Rodamiento ø30 mm	SKF	3	Rodamiento SKF 6004 2RSH
28		Arandela M6		2	Acero inoxidable
27		Arandelas M5		16	Acero negro
26		Tuercas M6	ASTM A574	18	Acero negro
25	E12	Pernos Allen M6X35	ASTM A574	6	Acero negro
24	G9	Pernos Allen M6x50	ASTM A574	2	Acero negro
23	F5	Pernos Allen M5x10	ASTM A574	8	Acero negro
22	G4	Pernos Allen M6X35	ASTM A574	6	Acero negro
21	H3	Pernos Allen M6x20	ASTM A574	6	Acero negro
20	H3	Acople flexible ø54 mm	SKF	1	Hierro fundido Acoplamiento flexible
LISTA DE PIEZAS					
19	E12	Sistema de tubería	TIC-MTP. 501	1	Cobre Tubería de cobre flexible de 1/4 pulg.
18	D11	Sistema de refrigeración	TIC-MTP. 005	1	
17	E10	Batidor derecho	TIC-MTP. 702	1	Acero suave
16	D10	Desplazamiento izquierdo	TIC-MTP.00 4	1	
15	G10	Perilla de pivote	TIC-MTP. 605	1	Aisi 1018
14	F9	Tolva de descarga	TIC-MTP.00 6	1	
13	E8	Rodillo/Eje 3	TIC-MTP.20 3	1	Acero inoxidable 304
12	E8	Rodillo/Eje 2	TIC-MTP. 202	1	Acero inoxidable 304
11	E8	Rodillo/Eje 1	TIC-MTP. 201	1	Acero inoxidable 304
10	F8	Recogedor	TIC-MTP.20 5	6	Grilón
9	E7	Engranaje 4	TIC-MTP.20 9	1	Acero 705
8	F8	Engranaje 3	TIC-MTP. 208	1	Acero 705
7	F8	Engranaje 2	TIC-MTP. 207	1	Acero 705
6	F7	Engranaje 1	TIC-MTP. 206	1	Acero 705
5	E5	Separadores	TIC-MTP.70 3	1	
4	E5	Perilla de posicionamiento	TIC-MTP. 305	4	Aisi 1018
3	F6	Desplazamiento derecho	TIC-MTP.00 3	1	
2	I2	Bastidor izquierdo	TIC-MTP.70 1	1	Acero, suave Parte izquierda del bastidor
1	H2	Motorreductor		1	Motorreductor trifásico 0.75 Hp, 60 Hz, 90 rpm

N°	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIÓN
EPN		FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA	DIB.: Chanaoluís, Guapi, Oñe DIS.: Chanaoluís, Guapi, Oñe REV.: Prof. Wilson Guachamin			ESCALA: 1 : 2
Plano de Ensamble			TIC-MTP.008			FECHA: 19-02-2024