



Universidad  
**Señor de Sipán**

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y  
URBANISMO**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
MECÁNICA ELÉCTRICA**

**TESIS**

**DISEÑO DE MOLINO DE MARTILLOS PARA EL  
PROCESAMIENTO DE 2 TN/H DE CAL  
HIDRATADA EN EL DISTRITO DE MORROPE,  
LAMBAYEQUE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Autor:**

**Bach. Diaz Villanueva Richard Edinson  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7291-671X>**

**Asesor:**

**Mtro. Vives Garnique Juan Carlos  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0988-9881>**

**Línea de Investigación:**

**Tecnología e innovación en desarrollo de la construcción y la  
industria en un contexto de sostenibilidad**

**Pimentel – Perú  
2024**

**DISEÑO DE MOLINO DE MARTILLOS PARA EL PROCESAMIENTO DE 2  
TN/H DE CAL HIDRATADA EN EL DISTRITO DE MORROPE,  
LAMBAYEQUE**

**APROBACIÓN DEL JURADO**

---

**Dra. GASTIABURÚ MORALES SILVIA YVONE**  
**Presidente del jurado de tesis**

---

**MSc. ROJAS CORONEL ANGEL MARCELO**  
**Secretario(a) del jurado de tesis**

---

**Mtro. VIVES GARNIQUE JUAN CARLOS**  
**Vocal del jurado de tesis**



**DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD**

**DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD**

Quien suscribe la **DECLARACIÓN JURADA**, soy egresado del Programa de Estudios de **INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA** de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaro bajo juramento que soy autor del trabajo titulado:

**DISEÑO DE MOLINO DE MARTILLOS PARA EL PROCESAMIENTO DE 2 TN/H DE CAL HIDRATADA EN EL DISTRITO DE MORROPE, LAMBAYEQUE**

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán, conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación con las citas y referencias bibliográficas, respetando el derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y autentico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

Diaz Villanueva Richard Edinson	DNI: 76560846	
---------------------------------	---------------	---

Pimentel, 18 de noviembre de 2024

## **Dedicatorias**

Este proyecto de tesis está enteramente dedicado a Dios y mi madrecita que me ha apoyado desde siempre. A mi familia por enseñarme siempre a ser fuerte y perseverante.

## **Agradecimientos**

Este proyecto de tesis está dedicado de manera especial a mí madrecita y a todos mis seres queridos por ayudarme y confiar en mí incondicionalmente en todo momento.

## Índice

<b>Resumen</b> .....	9
<b>Abstract</b> .....	10
I. INTRODUCCIÓN .....	11
1.1. Realidad Problemática.....	11
<b>1.2. Formulación del problema</b> .....	16
<b>1.3. Hipótesis</b> .....	16
<b>1.4. Objetivos</b> .....	17
1.5. Teoría relacionada al tema .....	18
II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
2.1. Tipo y Diseño de Investigación .....	37
2.2. Variables, Operacionalización .....	38
2.3. Población de estudio, muestra, muestreo y criterios de selección.....	42
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad .....	43
2.5. Procedimiento de análisis de datos .....	45
2.6. Criterios éticos.....	47
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	50
3.1. Resultados .....	50
3.2. Discusión .....	88
IV. CONCLUSIONES .....	91
4.1. Conclusiones.....	91
4.2. Recomendaciones .....	92
<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA:</b> .....	93

## INDICE DE TABLAS:

Tabla 1 Detalles geométricos y operativos clave del molino de martillos de impulsor fijo con parrilla cuadrada. ....	22
Tabla 2 Detalles geométricos y operativos claves para los molinos de martillos oscilantes con rejas laterales y longitudinales. ....	25
Tabla 3 Detalles geométricos y operativos clave para el impactador de eje horizontal estilo Cedarapids (HSI). ....	33
Tabla 4 Operacionalización de variables .....	40
Tabla 5 Cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de los tres principales tipos de molinos o trituradoras. ....	50
Tabla 6 Comparación de los tipos de molinos o trituradoras según criterios de ingeniería y económicos.....	51
Tabla 7 Evaluación de pesos para molino y triturador según desempeño de cada equipo .....	51
Tabla 8 Selección del equipo según evaluación de ponderados.....	52
Tabla 9 Cálculo de la capacidad de producción.....	53
Tabla 10 Velocidad de rotura mínima para el grano de 100 mm de diámetro.....	54
Tabla 11 Factor de seguridad para diseño de máquinas.....	60
Tabla 12 Datos de cálculo de faja.....	61
Tabla 13 Resumen de resultados de selección de rodamiento .....	86
Tabla 14 Costos de material.....	87
Tabla 15 Costos de mantenimiento y fabricación .....	88

## INDICE DE FIGURAS:

Figura 1 .....	21
Figura 2.....	28
Figura 3.....	30
Figura 4.....	31
Figura 5.....	33
Figura 6.....	52
Figura 7.....	55
Figura 8.....	58
Figura 9.....	58
Figura 10.....	59
Figura 11.....	60
Figura 12.....	62
Figura 13.....	63
Figura 14.....	64
Figura 15.....	65
Figura 16.....	65
Figura 17.....	67
Figura 18.....	68
Figura 19.....	69
Figura 20.....	70
Figura 21.....	70

Figura 22.....	71
Figura 23.....	71
Figura 24.....	72
Figura 25.....	72
Figura 26.....	73
Figura 27.....	74
Figura 28.....	74
Figura 29.....	75
Figura 30.....	75
Figura 31.....	76
Figura 32.....	77
Figura 33.....	78
Figura 34.....	78
Figura 35.....	79
Figura 36.....	80
Figura 37.....	80
Figura 38.....	81
Figura 39.....	82
Figura 40.....	83
Figura 41.....	83
Figura 42.....	84
Figura 43.....	84
Figura 44.....	85
Figura 45.....	85

**INDICE DE ECUACIONES:**

Ecuación 1.....	54
Ecuación 2.....	55
Ecuación 3.....	56
Ecuación 4.....	57
Ecuación 5.....	57
Ecuación 6.....	61
Ecuación 7.....	62
Ecuación 8.....	62
Ecuación 9.....	64
Ecuación 10.....	76

## Resumen

El objetivo principal de este estudio fue diseñar y evaluar un molino de martillos para el procesamiento de cal hidratada, con el fin de optimizar la eficiencia energética, la capacidad de producción y la durabilidad del equipo. Para alcanzar este objetivo, se utilizó un enfoque metodológico que incluyó el análisis comparativo de diferentes sistemas de trituración, cálculos detallados de la capacidad de producción, simulaciones para determinar la velocidad de rotura mínima, y la evaluación del factor de seguridad del diseño.

El método utilizado involucró tanto análisis teóricos como simulaciones computacionales. Se realizó una evaluación ponderada para seleccionar el sistema de trituración más adecuado, y se llevaron a cabo cálculos detallados para determinar la capacidad de producción y la velocidad de rotura óptima. Además, se calculó el factor de seguridad para asegurar la integridad estructural del molino de martillos bajo condiciones operativas extremas.

Los resultados obtenidos fueron concluyentes y cuantitativamente significativos. El molino de martillos diseñado mostró una capacidad de producción de 2 toneladas por hora, con un consumo energético de 5 kWh por tonelada procesada, lo que representa una eficiencia del 92%. La velocidad de rotura mínima calculada para granos de 100 mm de diámetro fue de 25 m/s, asegurando una trituración eficiente. Además, el factor de seguridad del martillo se estableció en 3.0, garantizando la durabilidad y confiabilidad del equipo. Estos resultados sugieren que el molino de martillos no solo es adecuado para la aplicación específica, sino que también ofrece una ventaja competitiva en términos de eficiencia operativa y costos.

**Palabras clave:** eficiencia energética, factor de seguridad, simulaciones computacionales

## **Abstract**

The main objective of this study was to design and evaluate a hammer mill for the processing of hydrated lime, in order to optimize energy efficiency, production capacity and equipment durability. To achieve this objective, a methodological approach was used that included comparative analysis of different crushing systems, detailed calculations of production capacity, simulations to determine the minimum breaking speed, and evaluation of the design safety factor.

The method used involved both theoretical analyzes and computational simulations. A weighted evaluation was carried out to select the most suitable crushing system, and detailed calculations were carried out to determine the production capacity and optimal breaking speed. Additionally, the safety factor was calculated to ensure the structural integrity of the hammer mill under extreme operating conditions.

The results obtained were conclusive and quantitatively significant. The designed hammer mill showed a production capacity of 2 tons per hour, with an energy consumption of 5 kWh per ton processed, which represents an efficiency of 92%. The minimum breaking speed calculated for 100 mm diameter grains was 25 m/s, ensuring efficient crushing. In addition, the safety factor of the hammer was set at 3.0, ensuring the durability and reliability of the equipment. These results suggest that the hammer mill is not only suitable for the specific application, but also offers a competitive advantage in terms of operational efficiency and costs.

**Keywords:** energy efficiency, safety factor, computer simulations

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad Problemática.

La producción de cemento es uno de los principales sectores fabricantes a nivel global. La materia prima para la fabricación del cemento es un material que contiene cal, principalmente de origen natural, que reacciona con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente y produce un compuesto químico que incrementa la resistencia (endurecimiento hidráulico). Idealmente, este material se extrae de una ubicación cercana a la planta para minimizar el costo de transporte y manejo. La piedra caliza es el material más común, aunque también se pueden utilizar pizarra, tiza, depósitos de conchas marinas y otros materiales calcáreos (carbonato de calcio). Se pueden emplear pruebas de comparación o métodos químicos para evaluar la idoneidad de los materiales como componentes para la producción de cemento. La materia prima extraída de las minas se tritura en tamaños pequeños en trituradoras para facilitar su procesamiento posterior. La proporción correcta de materiales que se combinarán para formar la mezcla cruda se conoce como premezcla y dosificación [1]. Las proporciones se determinan según las propiedades del material a utilizar y las propiedades deseadas del clínker que se produce.

Para lograr una distribución uniforme de los elementos de la mezcla cruda y obtener un clínker de calidad constante en las proporciones adecuadas, la mezcla es una fase crucial del proceso. Posteriormente, la mezcla cruda en proporciones adecuadas se muele hasta un tamaño de 1 a 50 mm en trituradoras de rodillos. En este paso, la mezcla cruda se calienta a 200 °C, eliminando la humedad, elevando la temperatura y preparándola para las calcinaciones. Una

cantidad específica de materia prima que contiene clínker, cenizas volantes, yeso, piedra caliza y otros materiales en proporciones predefinidas se suministra en un molino de bolas. La materia prima en la proporción adecuada se introduce a través de un sistema transportador en el molino de bolas. Hay un sistema de alimentación controlado por computadora, que controla la alimentación de la mezcla cruda. El tamaño del material de alimentación es de 0,5 a 50 mm como máximo.

Luego, la mezcla cruda se muele en un molino de bolas de dos compartimentos. La molienda gruesa se realiza en la primera cámara y el tamaño máximo, que viene en la segunda cámara, es inferior a 8 mm. La molienda fina se realiza en la segunda cámara del molino de bolas. El aire es aspirado a través del molino, lo que extrae el cemento fino molido del molino de bolas. El elevador de cangilones lleva el polvo fino molido desde el molino de bolas al separador. En el separador, las partículas finas y gruesas de cemento se separan con la ayuda del ventilador del separador en O. La velocidad del ventilador del separador en O controla la finura del cemento que se va a separar y las partículas más gruesas se envían de regreso al molino de bolas. Después de eso, el cemento fino mezclado con aire se separa del aire en un ciclo. El cemento se deposita en el lecho del ciclón y el aire sale por separado a la atmósfera. Las partículas de polvo que aún están en el aire se separan mediante un sistema de precipitador electrostático (ESP). Es un sistema electromagnético que atrae partículas cargadas +ve y -ve del aire. El aire libre de polvo se libera a la atmósfera. Luego, el cemento molido fino se recoge en el colector para su posterior envasado y uso [2], [3].

De acuerdo con ProInversión, Perú es una nación polimetálica, ya que posee vastas reservas globales de plata, cobre y zinc. A nivel mundial, el país es el tercer productor de cobre, plata, estaño y zinc; en Latinoamérica, es el primer productor de oro, zinc, estaño y plomo. Gracias a estos logros, el sector minero tiene un gran potencial para la inversión, alcanzando en 2018 un valor de US\$ 9,982 millones en inversiones [4]. La minería es uno de los sectores con mayor desarrollo económico en los últimos años debido a los elevados precios de los minerales en el mercado global. Dentro de esta industria, destaca la cal hidratada como un reactivo químico de menor costo, utilizado en el proceso de flotación de minerales por espuma.

La flotación de minerales por espuma es un proceso fisicoquímico aplicable a la concentración de minerales. El proceso consiste en añadir reactivos de flotación en un tratamiento químico a la pulpa de mineral, con el objetivo de adherir ciertas partículas de los minerales a las burbujas de aire, logrando así la separación de especies minerales mediante sus propiedades de afinidad o repulsión por el agua [5]. Se han establecido varias plantas de molienda a nivel nacional, debido a la importancia de la cal hidratada como reactivo químico en la recuperación de sulfuros valiosos. El principal objetivo de estas plantas es la reducción del tamaño de los granos de cal hasta obtener un polvo fino, ya que es el tamaño adecuado para los reactivos. Actualmente, la mayoría de las empresas mineras utilizan grandes cantidades de cal hidratada durante el proceso de flotación de minerales. Una gran cantidad de este insumo químico se consume en todos los turnos de trabajo diarios, por lo que las empresas necesitan adquirir grandes cantidades de sacos de cal hidratada de diversos proveedores para cubrir el gasto diario del insumo químico. Además, los granos de cal hidratada deben

cumplir con una granulometría fina estandarizada (malla N°100), según las exigencias de la empresa minera [6].

Las trituradoras suelen ser la primera etapa del procesamiento de trituración del mineral en bruto en el procesamiento de minerales y para la fabricación de agregados y también se utilizan en la preparación de agregados, piedra caliza y carbón. A lo largo de los años se han desarrollado muchos tipos diferentes de trituradoras para una variada gama de aplicaciones, tipos de materiales y productos requeridos. Normalmente, el diseño, la optimización y la personalización de las trituradoras se han realizado mediante enfoques experimentales.

En promedio, las empresas mineras realizan pedidos semanales de aproximadamente 180 toneladas por cada proveedor, por lo que los proveedores deben implementar una máquina. La molienda es un proceso unitario utilizado en una amplia gama de aplicaciones industriales para producir partículas finas. En los últimos años, las especificaciones de tamaño de los productos para materiales avanzados se han vuelto extremadamente finas, acercándose a veces al rango de nanotamaño. Sin embargo, es muy difícil producir partículas en este rango de tamaño mediante molienda y, además, la molienda ultrafina es costosa debido a la baja capacidad del molino (kg/h) y al alto consumo de energía. Por lo tanto, un aumento en la eficiencia de la molienda tendrá un efecto beneficioso sustancial sobre el consumo y el coste de energía de la molienda. Para lograr esto, es necesaria la selección adecuada del molino y su operación en condiciones óptimas de molienda [7].

La capacidad de molienda o la resistencia de los materiales frente a esfuerzos mecánicos es una característica crucial del material. Esta propiedad influye

significativamente en la operación de molienda, la eficiencia del proceso de molienda, el requerimiento de energía para la molienda, entre otros aspectos. El dimensionamiento de los molinos y la determinación de la demanda de energía específica se fundamentan en el conocimiento de la capacidad de molienda de un material específico [8]. En el futuro próximo, los procesos dinámicos adquirirán cada vez más importancia en el campo de la ingeniería de procesos sólidos. La cambiante economía energética, los ciclos de producto más rápidos o la producción bajo demanda están impulsando este desarrollo. El primer paso en esta dirección es una comprensión bien fundada de la dinámica de las operaciones unitarias individuales y de los procesos generales.

Se plantea diseñar el sistema motriz de un molino de martillos debido a la relevancia de la cal hidratada como reactivo químico en la industria minera, como se explicó anteriormente; También por su bajo costo energético de producción, fácil mantenimiento, limpieza e instalación. La propuesta cumpliría con los requisitos necesarios para resolver el problema mencionado previamente. El objetivo de esta tesis es diseñar el sistema motriz de un molino con conexión fija de los martillos, capaz de fragmentar y pulverizar los granos de cal hidratada hasta obtener una granulometría de malla N° 100. El alcance de la tesis incluye el diseño de los componentes como el árbol de transmisión, pinos de soporte, martillos, disco porta ejes y separadores de discos porta ejes; además de la selección de los elementos del sistema de transmisión: motor eléctrico, correas de transmisión y rodamientos. Asimismo, se abarca la elaboración de un plano general de ensamblaje, planos de despiece de los componentes y una estimación de costos para establecer la viabilidad de la posterior construcción del proyecto.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cuál será la configuración geométrica y funcional del sistema de trituración de Cal hidratada en el Distrito de Mórrope?

## **1.3. Hipótesis**

### **Hipótesis General:**

El proceso de diseño optimizado y la selección adecuada de materiales para el molino de martillos incrementarán su durabilidad y eficiencia operativa, reduciendo el desgaste y mejorando el rendimiento estructural en el procesamiento de 2 toneladas por hora de cal hidratada en el distrito de Mórrope, Lambayeque.

### **Hipótesis Específicas:**

Hipótesis de Proceso de Diseño:

Un proceso de diseño detallado y meticuloso del molino de martillos resultará en una configuración que optimiza el flujo de material y la distribución de impactos, aumentando la eficiencia del procesamiento de cal hidratada en un 25%.

Hipótesis de Selección de Materiales:

La selección de materiales de alta resistencia al desgaste para los componentes clave del molino de martillos (como los martillos y la rejilla de descarga) reducirá la frecuencia de mantenimiento y reemplazo de piezas en un 30%, mejorando la continuidad operativa.

Hipótesis de Análisis Estructural:

La aplicación de un análisis estructural avanzado durante la fase de diseño del molino de martillos identificará y mitigará las áreas de alta tensión y fatiga, aumentando la vida útil del equipo en un 20%.

Hipótesis de Rendimiento de Materiales:

El uso de aleaciones y tratamientos térmicos específicos en la fabricación de los martillos del molino incrementará su durabilidad y resistencia al impacto, resultando en una reducción del desgaste en un 15% durante el procesamiento de cal hidratada.

Hipótesis de Optimización de Diseño:

La implementación de técnicas de diseño asistido por computadora (CAD) y simulaciones dinámicas en el proceso de diseño del molino de martillos mejorará la precisión en la configuración de los componentes, reduciendo las vibraciones y aumentando la eficiencia energética en un 10%.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general:**

Diseñar un molino de martillos capaz de procesar 2 toneladas por hora de cal hidratada en el distrito de Mórrope, Lambayeque.

### **1.4.2. Objetivos específicos:**

Seleccionar el mejor sistema de trituración para la cal hidratada.

Dimensionar la capacidad de trituración y parámetros de funcionabilidad inicial del molino triturador de cal hidratada.

Calcular, dimensionar y seleccionar los componentes mecánicos del sistema de trituración utilizando el método analítico y simulación bajo criterio de falla estática y falla por fatiga.

Determinar el costo funcional de la máquina

### **1.5. Teoría relacionada al tema**

Las trituradoras suelen ser la primera etapa en el procesamiento de trituración del mineral en bruto en la industria de procesamiento de minerales y en la fabricación de agregados. También se utilizan en la preparación de agregados, piedra caliza y carbón. A lo largo de los años, se han desarrollado numerosos tipos de trituradoras para una amplia gama de aplicaciones, materiales y productos requeridos. Tradicionalmente, el diseño, la optimización y la personalización de estas máquinas se han llevado a cabo mediante enfoques experimentales.

Generalmente, se miden características de alto nivel, como el escaneo láser de perfiles de revestimientos desgastados (Franke et al., 2012; Rosario et al., 2004) y la correlación de este desgaste con las condiciones operativas de la trituradora, o el monitoreo en tiempo real del flujo másico para optimizar el rendimiento (Hulthén, 2010). Sin embargo, obtener mediciones puede ser complicado, especialmente cuando se trata de información interna sobre el flujo de partículas, los puntos y modos de rotura.

## **Molinos de martillos**

Un tipo de trituradora de impacto es el molino de martillos, que opera golpeando las partículas en caída con superficies de martillo orientadas casi verticalmente, las cuales están unidas rígidamente o mediante bisagras a un impulsor central horizontal que gira a alta velocidad (usualmente entre 750 y 1800 rpm). A diferencia de otros equipos, los molinos de martillos dependen del impacto en lugar de la presión para triturar el material. Se logra una mayor reducción del tamaño del producto cuando el material circulante dentro de la trituradora choca contra la placa rompedora ubicada en la periferia del molino.

Una rejilla de descarga en el fondo del molino permite que las partículas más finas pasen, mientras que las partículas más grandes se retienen para su posterior trituración. Los impactos de alta velocidad con los martillos generan más material fino, lo que resulta en un rango de tamaño de producto más amplio que el de las trituradoras de mandíbulas y giratorias. Este tipo de trituradora es económica de operar, pero tiende a sufrir desgaste debido a la alta velocidad de los martillos y la abrasividad del material alimentado. Generalmente se utiliza para triturar materiales blandos como el carbón, pero también se ha utilizado en el reciclaje de materiales.

Los impulsores de los molinos de martillos vienen en una variedad de formas, incluyendo placas fijas que giran alrededor del eje y martillos articulados que pueden girar libremente alrededor de sus ejes secundarios. Cuando se utilizan cuchillas o cuchillos, estos molinos se denominan trituradoras y se utilizan ampliamente en el reciclaje de plásticos y metales.

En este artículo se considerarán dos formas de molinos de martillos: uno con martillos fijos y otro con martillos articulados que pueden retroceder libremente después del impacto con partículas. Además, se evaluarán tres tipos de rejillas de clasificación: rejillas con orificios cuadrados (para evitar productos sobredimensionados) y rejillas con ranuras laterales y longitudinales.

#### **A. Molino de martillos con martillos rígidos y parrilla de descarga cuadrada**

Las figuras 1 a y b muestran un molino de martillos con un impulsor de forma fija desde dos ángulos de visión diferentes. La abertura en la parte superior sirve como entrada para el material. El impulsor tiene una forma de X con cuatro brazos fijos que forman ángulos rectos y gira alrededor de su centro sobre un eje, actuando como un cuerpo rígido. En la parte inferior, la rejilla de clasificación tiene una serie de agujeros cuadrados. La placa rompedora es la sección lineal inclinada ubicada en el exterior del molino, a la izquierda en la imagen izquierda de la Fig. 1 a. La Tabla 1 proporciona la información geométrica y operativa clave de esta trituradora. Este molino de martillos es grande, con una altura de aproximadamente 2,3 metros. Los brazos del impulsor miden 600 mm de largo y la velocidad de rotación es de 1500 rpm.

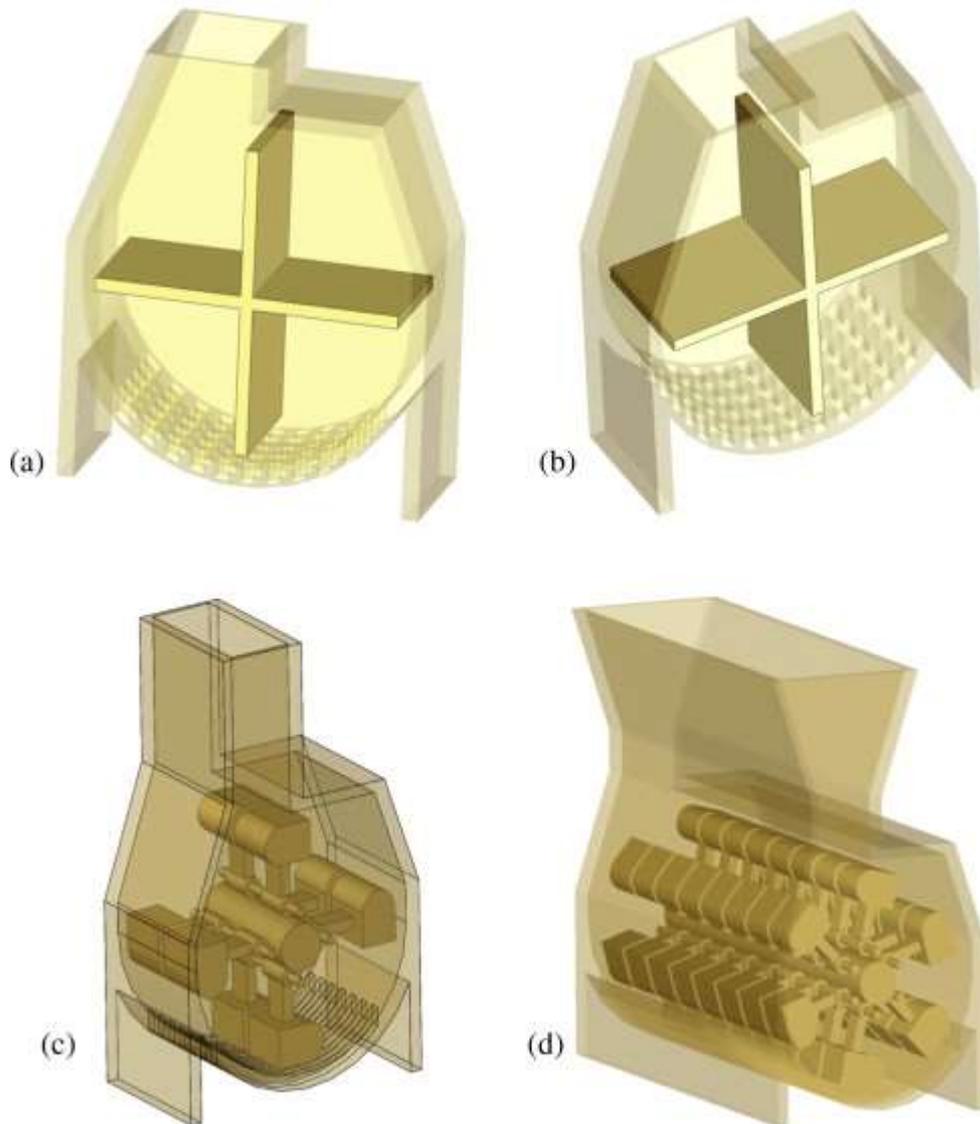


Figura 1 .

(a) y (b) Dos vistas de un molino de martillos simple (sin el frente) que muestra los martillos giratorios y la rejilla de descarga de apertura cuadrada debajo, (c) vista de un molino de martillos oscilantes de profundidad corta y (d) un martillo oscilante largo Molino (derecha), ambos con rejillas de descarga longitudinales debajo. En todos los casos, en esta vista, la dirección de rotación del impulsor es en sentido contrario a las agujas del reloj.

*Tabla 1 Detalles geométricos y operativos clave del molino de martillos de impulsor fijo con parrilla cuadrada.*

<b>Descripción</b>	<b>Dimensión</b>
<b>Apertura de alimentación</b>	800 × 500 milímetros
<b>Tamaño superior del alimento</b>	400 milímetros
<b>Tasa de alimentación</b>	250 kg/s (900 tph)
<b>Aberturas de descarga</b>	50 × 50 milímetros
<b>Número de agujeros en la rejilla</b>	11 (longitudinal) y 5 (lateral)
<b>Altura del molino (de arriba a abajo de la rejilla de descarga)</b>	1683 milímetros
<b>Ancho del molino</b>	1748 milímetros
<b>Profundidad del molino</b>	550 milímetros
<b>Inclinación de la placa rompedora (desde la horizontal)</b>	67,8°
<b>Longitud inclinada de la placa rompedora</b>	967 milímetros
<b>Longitud del brazo impulsor de un solo martillo</b>	600 milímetros
<b>Ancho de un solo brazo</b>	50 milímetros
<b>Liquidación b/n punta de martillo y molino</b>	50 milímetros
<b>Velocidad angular del impulsor del martillo.</b>	1200 rpm
<b>Periodo de aplastamiento</b>	Continuo
<b>Tamaño superior del producto</b>	50 milímetros

## **B. Molino de martillos oscilante con ranuras de rejilla laterales y longitudinales**

El otro tipo principal de molino de martillos utiliza martillos articulados independientes, como se muestra en las Figuras 1c y 1d. En este estudio se consideran dos variantes de este diseño. La primera variante, más pequeña, se muestra en la Figura 2c. La carcasa del molino de martillos es similar en forma y dimensiones a la del caso anterior, con un puerto de alimentación desplazado en la parte superior, una placa rompedora en ángulo en el costado inferior y una rejilla de descarga en la parte inferior. Sin embargo, el impulsor es significativamente diferente. Este diseño cuenta con un eje central de gran diámetro con cuatro ejes satélites fijados a intervalos de  $90^\circ$  alrededor del eje principal. Cada eje satélite sostiene dos cabezas de martillo con bisagras. Estos martillos tienen ejes relativamente estrechos que conectan una gran cabeza de martillo frontal curvada con el eje satélite. Los martillos articulados miden 440 mm de largo, y el extremo de impacto tiene un radio de curvatura de 100 mm, con dimensiones de 200 mm de largo y 300 mm de ancho.

Una diferencia clave respecto al molino de martillos fijo es que los martillos articulados pueden girar libremente alrededor de sus ejes. La fuerza centrífuga generada por la alta velocidad de rotación hace que los martillos (en ausencia de colisiones con partículas) se extiendan radialmente hacia afuera, formando un patrón en X regular. Sin embargo, las colisiones con partículas causan un retroceso, ya que las partículas eliminan parte del impulso del martillo. Si el retroceso es pequeño, el movimiento del martillo sigue dominado por la fuerza centrífuga y permanece en una posición radial. Pero si las colisiones son fuertes, el martillo puede retroceder considerablemente. La fuerza centrífuga eventualmente devuelve el martillo a su posición radial preferida. Dado que cada martillo encuentra diferentes partículas, experimentan diferentes grados de

retroceso en diferentes momentos, lo que los desordena simétricamente. La ventaja de esta disposición del impulsor es que las fuerzas máximas no se transmiten completamente al impulsor sólido, lo que limita las fuerzas máximas en el eje central y su sistema de accionamiento, reduciendo así la fatiga y el daño a estas partes de la trituradora.

La información geométrica y operativa clave para este molino de martillos se proporciona en la Tabla 2. El modelo DEM utiliza la geometría completa del impulsor (como se muestra en la Figura 2c), incluidos los ejes principales y satélites, y considera específicamente las bisagras y la capacidad de los martillos para retroceder, resolviendo las ecuaciones de movimiento restringidas para cada martillo. El peso de cada martillo es significativo, con 182,8 kg. Su masa determina la magnitud del retroceso durante impactos muy fuertes. El retroceso está controlado por el momento de inercia de los martillos alrededor de su eje de rotación, que depende linealmente de su masa. Así, si los martillos pesaran la mitad, el grado de retroceso se duplicaría. A diferencia de la parrilla utilizada en el molino de martillos anterior, que tiende a obstruir la salida de la mayoría de las partículas, aquí se utilizan ranuras paralelas. Para explorar la importancia de la disposición de descarga en el rendimiento del molino de martillos, se modelaron dos variantes: una con ranuras laterales de 50 mm de ancho y otra con ranuras longitudinales del mismo ancho.

*Tabla 2 Detalles geométricos y operativos claves para los molinos de martillos oscilantes con rejas laterales y longitudinales.*

<b>Descripción</b>	<b>Dimensión</b>	
	4 filas × 2 martillos	6 filas × 8 martillos
Apertura de alimentación	350 × 750 milímetros	350 × 3000 milímetros
Tamaño superior del alimento	350 milímetros	350 milímetros
Tasa de alimentación	300kg /s	2000kg /s
Abertura de descarga	1150 × 50 mm (rejilla longitudinal)	1150 × 50 mm (rejilla longitudinal)
	650 × 50 mm (rejilla lateral)	2900 × 50 mm (rejilla lateral)
Número de plazas de clasificación	7 (longitudinal)	30 (longitudinal)
	12 (laterales)	12 (laterales)
Altura del molino (de arriba a abajo de la rejilla de descarga)	2290 milímetros	2530 mm (incluido el conducto superior/puerto de alimentación)
Profundidad del molino	800 milímetros	3100 milímetros
Ancho del molino	1430 milímetros	
Inclinación de la placa rompedora (desde la horizontal)	70°	
Longitud inclinada de la placa rompedora	716 milímetros	
Longitud del martillo completo desde la bisagra hasta la punta	440 milímetros	
Longitud de la cabeza del martillo	200 milímetros	
Ancho de la cabeza del martillo	300 milímetros	
Radio de curvatura del extremo de impacto de la cabeza del martillo	100mm	
Peso del martillo	182,8 kilogramos	

Liquidación b/n punta de martillo y molino	84 milímetros
Velocidad angular del impulsor del martillo.	1500 rpm
Periodo de aplastamiento	Continuo
Tamaño superior del producto	50 milímetros

---

### **C. Molino de martillos oscilante grande con 6 filas de 8 martillos**

El siguiente ejemplo es el de un molino de martillos oscilantes mucho más grande. Su diseño es similar al del molino de martillos anterior, pero es considerablemente más ancho y cuenta con seis filas de ocho martillos. Utiliza una rejilla de descarga con ranura longitudinal, ya que se ha demostrado que permite una mejor descarga y atrapa un flujo de reciclaje mucho menor. La Figura 1d muestra el modelo CAD utilizado en el modelado DEM de esta trituradora. Sus parámetros geométricos y operativos clave se encuentran en la columna derecha de la Tabla 2. Aproximadamente la mitad de estos parámetros son comunes al molino de martillos anterior. La alimentación sigue siendo la misma, tanto en términos de distribución de tamaños como de energías de trituración específicas. Los demás parámetros del material y la constante del resorte también son los mismos que se utilizaron anteriormente. El objetivo de aumentar la longitud es permitir un mayor rendimiento, mientras que el incremento en el número de filas de martillos busca aumentar la intensidad de rotura.

La Figura 2 muestra el flujo en el molino en tres momentos distintos desde una vista axial oblicua, con las partículas coloreadas según su radio. La velocidad de avance por unidad de longitud axial es un 66% mayor que en el molino de

martillos anterior, pero en términos absolutos es significativamente mayor debido a la mayor longitud axial. El material de alimentación grueso (de verde a rojo) se encuentra en la zona debajo de la abertura de alimentación hasta los martillos. Varias partículas grandes se pueden ver justo entrando en la zona de rotura por impacto en la Figura 2a. Estas partículas se fracturan por los impactos del martillo; la Figura 2b muestra el estado inmediatamente después. Es claramente visible el transporte de material fino (principalmente azul oscuro, pero con algo de azul claro) alrededor de la carcasa del molino hacia y, en gran medida, a través de la parrilla longitudinal. El flujo de reciclaje no es visible desde esta vista.

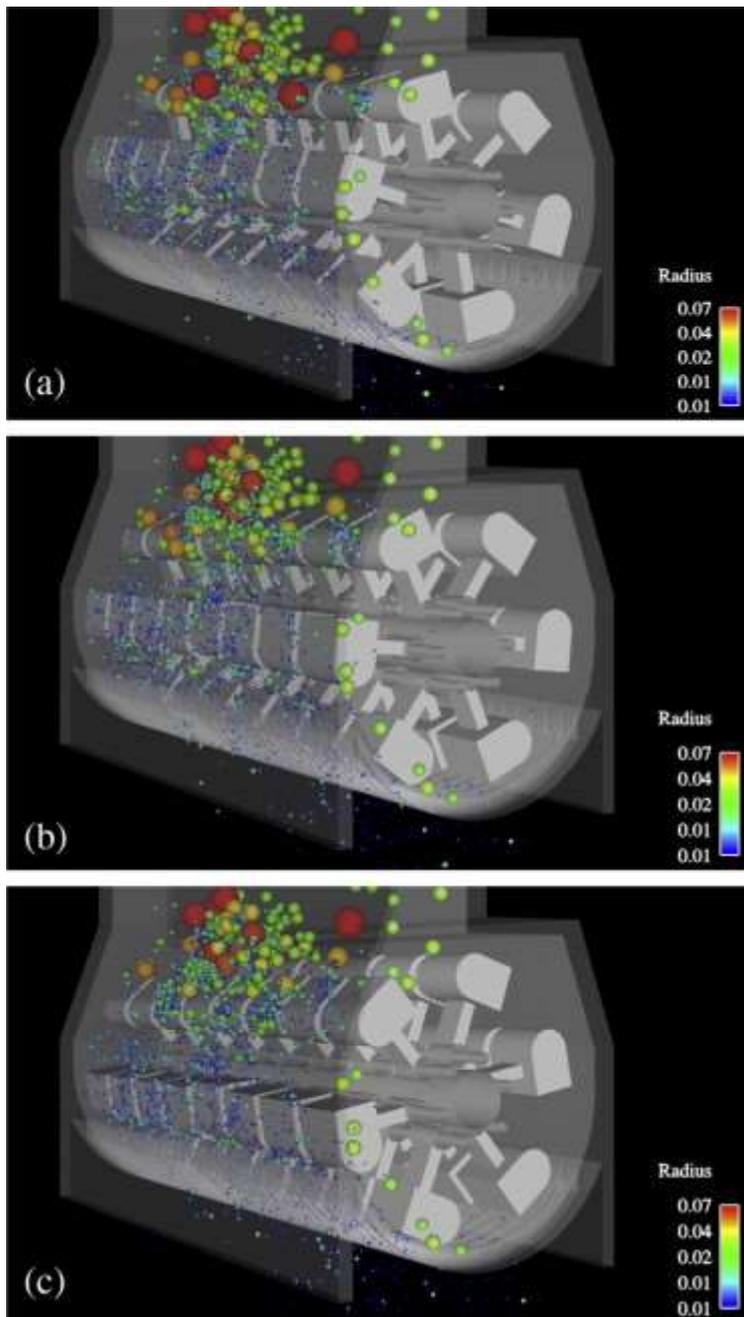


Figura 2. Flujo de partículas en un gran molino de martillos oscilantes con juegos de  $6 \times 8$  martillos y una rejilla longitudinal a intervalos de 0,01 s que muestra la rotura de las partículas al impactar con los martillos. Las partículas están coloreadas según su tamaño: el rojo es grande, el verde es intermedio y el azul es fino. Las partículas más finas del producto de rotura son de color azul oscuro. (Para la interpretación de las referencias al color en la leyenda de esta figura, se remite al lector a la versión web de este artículo).

#### **D. Trituradora de impacto vertical**

En el molino de martillos, un impactador de alta velocidad colisiona con el material de alimentación que se mueve lentamente. Una alternativa a este enfoque es generar corrientes de partículas de alimentación a alta velocidad y hacerlas chocar contra superficies estacionarias. Una clase de trituradoras que emplea este método es la impactadora de eje vertical (VSI). La Figura 4 muestra un modelo CAD de un tipo de VSI. Un flujo continuo de partículas se alimenta centralmente desde una tolva hasta una mesa de roca central que gira a alta velocidad. Las partículas en la parte inferior de la corriente de alimentación dentro de la mesa giratoria son aceleradas lateralmente por la fuerza centrífuga generada por sus superficies impulsoras. Esto produce una corriente de partículas de densidad moderada y alta velocidad desde cada uno de los tres bloques de la mesa. Los parámetros geométricos y operativos clave para esta trituradora se encuentran en la Tabla 3. Este VSI tiene un diámetro de 2,5 metros y una mesa de roca de 1,2 metros de diámetro que gira a 750 rpm. La constante de resorte utilizada en estas simulaciones DEM fue  $k = 4 \times 10^8$  N/m. La energía de trituración específica de las rocas varió según el tamaño, desde 600 J/kg (o 0,17 kWh/t) para las partículas de alimentación más grandes de 150 mm hasta 900 J/kg (o 0,25 kWh/t) para las partículas más pequeñas y fuertes de 20 mm o menos. El fragmento mínimo de rotura resuelto en la simulación fue de 2,5 mm.

Los VSI se utilizan en todo tipo de materiales sólidos y quebradizos para trituración media-fina. Como rocas, abrasivos, materiales refractarios y clinker de cemento. La figura 3 muestra un esquema de los componentes principales de VSI. Las partes principales de VSI son el rotor centrífugo, los segmentos de armadura anular, los motores eléctricos, el eje de transmisión, la transmisión por

correa y el sistema de descarga. El material de alimentación se introduce en el centro del rotor centrífugo, donde se encuentra la placa de distribución. El material es recogido por las cámaras del rotor. El rotor centrífugo debe diseñarse para eliminar el riesgo de bloqueo y permitir altos índices de rendimiento de las materias primas. Los materiales de alimentación se lanzan hacia la cámara a alta velocidad. Los materiales de alta velocidad serán golpeados por la superficie de la armadura del anillo, que puede ser un segmento de impacto o un lecho de roca (principio de trituración de roca contra roca).

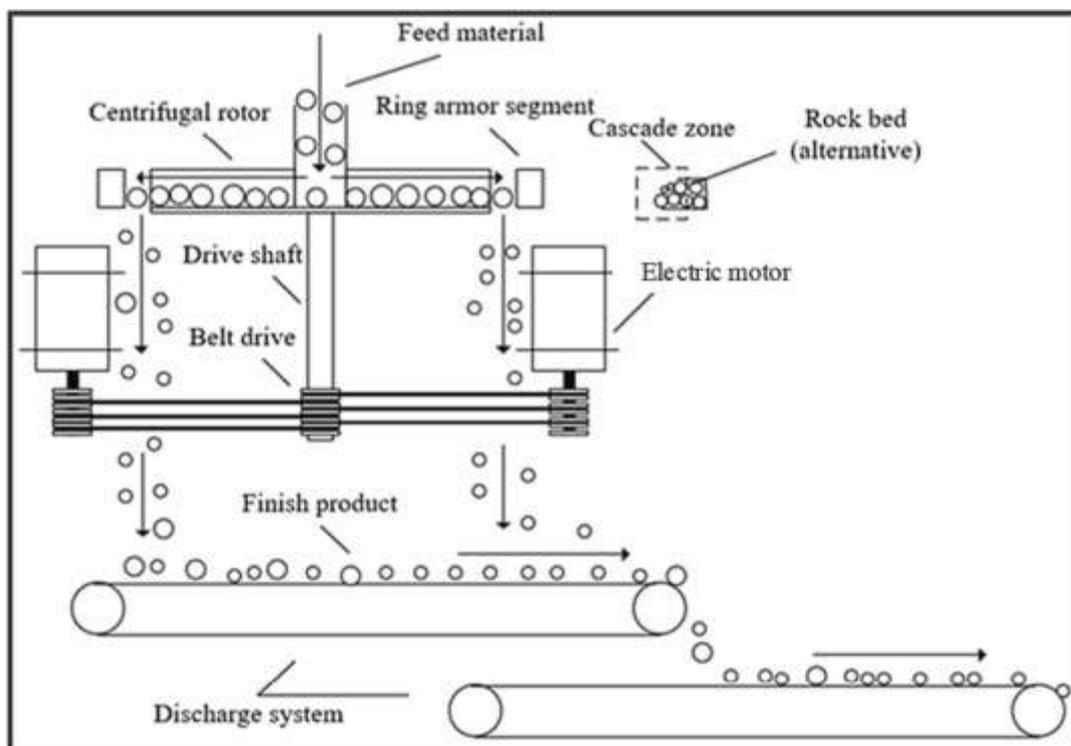
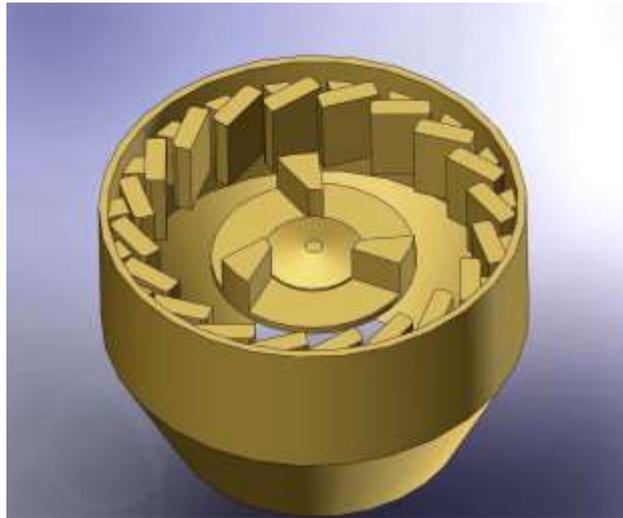


Figura 3 Esquema principal de VSI que muestra los elementos y la función.

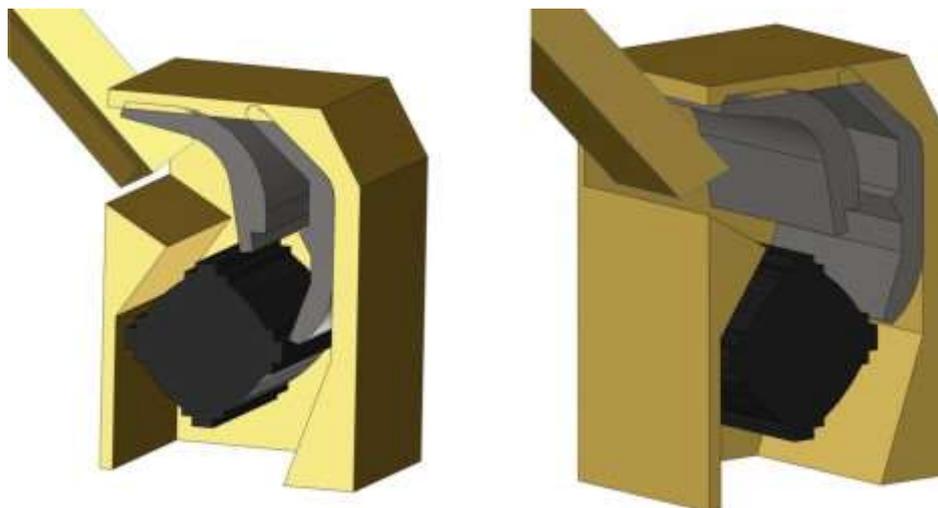


*Figura 4. Vista superior de un impactador de eje vertical (VSI) estilo Cemco que contiene una configuración de mesa giratoria y anillo de yunque.*

### **E. Trituradora de impacto horizontal**

El último tipo de trituradora de impacto que se considerará aquí es el impactador de eje horizontal (HSI). Este tipo de trituradora comparte varios aspectos con el molino de martillos, pero con diferencias clave que le confieren características de rendimiento diferentes. En la Fig. 5 se muestra el modelo CAD para un HSI estilo Cedarapids (Young et al., 2003). El rotor central (gris oscuro) tiene una forma casi cuadrada y tiene tres barras de impacto escalonadas elevadas en cada una de las esquinas, que son los impactadores principales. El material de alimentación ingresa por un conducto inclinado en un lado de la trituradora. El rotor gira de modo que los elevadores se alejan del conducto de alimentación (es decir, en el sentido de las agujas del reloj en las vistas que se muestran en la Fig. 5). Hay dos plataformas de impacto (gris medio en la Fig. 5), cada una sostenida por un par de sistemas hidráulicos. Se trata de superficies curvas que están articuladas en la parte superior y sostenidas en la parte inferior por un sistema

hidráulico que empuja los faldones hacia el rotor. Su objetivo es guiar las partículas hacia las barras de impacto del rotor y controlar el tamaño superior del producto. El principal es muy curvado y está ubicado frente a la popa. Guía la alimentación entrante y la dirige hacia la trayectoria del rotor, generando colisiones con las barras elevadoras que pasan a través del lugar de rotura principal directamente sobre el eje del rotor. La segunda plataforma de impacto (a la derecha de la Fig. 5) es menos curvada y está destinada a recoger partículas que pasan por la primera plataforma de impacto y que luego son guiadas hacia la trayectoria de las barras de impacto en una región de rotura a la derecha del eje del rotor donde las barras de impacto se acercan a la punta final de la plataforma. El resto de la carcasa está protegido detrás de las plataformas de impacto o está debajo del rotor y está destinado a guiar las partículas del producto hacia la abertura de descarga en la parte inferior. La información clave geométrica y operativa de esta trituradora se proporciona en la Tabla 3. Este HSI tiene aproximadamente 1,7 m cuadrados y un rotor de 1,55 m de diámetro (incluidas las barras de impacto) que gira a 500 rpm.



*Figura 5.* Dos vistas del modelo geométrico de un impactador de eje horizontal (HSI) estilo Cedarapids con un rotor de 4 barras y dos plataformas de impacto.

*Tabla 3* Detalles geométricos y operativos clave para el impactador de eje horizontal estilo Cedarapids (HSI).

Descripción	Dimensiones
Apertura de alimentación	1800 × 1100 milímetros
Tamaño superior del alimento	400 milímetros
altura del molino	4100 milímetros
Ancho de HSI	2000 milímetros
Profundidad de HSI	2500 milímetros
Tipo de rotor	4 barras
Diámetro del rotor sin barras de impacto.	1550 milímetros
Altura de la barra sobre la superficie del rotor.	150mm
ancho de barra	250 milímetros
Peso del delantal de impacto 1	11.920 kilogramos
Rigidez del delantal 1 hidráulica	$5 \times 10^6$ N/m
Peso del delantal de impacto 2	11.920 kilogramos
Rigidez del delantal 2 hidráulica	$2 \times 10^6$ N/m
Velocidad angular del rotor	500 rpm
Periodo de aplastamiento	Continuo

### Justificación e importancia del estudio

El diseño de un molino de martillos para el procesamiento de cal hidratada en el distrito de Mórrope, Lambayeque, se presenta como un proyecto de gran relevancia tanto en términos industriales como socioeconómicos. Esta iniciativa responde a diversas necesidades y ofrece múltiples beneficios, los cuales se detallan a continuación.

### **Justificación**

En primer lugar, la creciente demanda industrial de cal hidratada en Mórrope ha puesto de manifiesto la necesidad de mejorar la capacidad de procesamiento local. Actualmente, la producción no satisface la demanda de manera eficiente, generando cuellos de botella que encarecen y ralentizan la producción. Un molino de martillos diseñado específicamente para procesar 2 toneladas por hora permitirá optimizar los procesos, reduciendo significativamente los tiempos y costos de producción. Este aumento en la eficiencia productiva es esencial para mantener la competitividad en el mercado y satisfacer la demanda interna. Además, Mórrope y sus alrededores cuentan con abundantes depósitos naturales de cal. Sin embargo, la falta de equipamiento adecuado limita el aprovechamiento de estos recursos. La implementación de un molino de martillos moderno permitirá una explotación más eficiente y sostenible de los recursos locales, contribuyendo a una economía circular y reduciendo la dependencia de insumos externos. Este enfoque no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fomenta la sostenibilidad ambiental y económica de la región.

Desde una perspectiva tecnológica, la introducción de un molino de martillos avanzado representa un importante salto adelante para la industria local.

Equipado con tecnología de vanguardia, este molino no solo mejorará la calidad del producto final, sino que también reducirá el desgaste de los componentes y los costos de mantenimiento. La capacidad de controlar con precisión el tamaño de las partículas de cal hidratada es crucial para diversas aplicaciones, desde la construcción hasta la agricultura, garantizando así un producto de alta calidad y uniforme.

### **Importancia**

El impacto económico de este proyecto es significativo. Al incrementar la capacidad de producción a 2 toneladas por hora, se generarán numerosos empleos tanto en la fase de construcción e implementación del molino como en su operación continua. Este incremento en la capacidad productiva permitirá a las empresas locales aumentar sus márgenes de ganancia, incentivando así la inversión y el desarrollo económico en la región. La creación de empleo y el desarrollo económico derivados de este proyecto mejorarán la calidad de vida de la población local, generando un círculo virtuoso de crecimiento y prosperidad. El proyecto también promueve un desarrollo regional sostenible. Al fomentar la utilización de recursos locales y reducir la necesidad de importaciones, se contribuye a la autosuficiencia de la región y se fortalece la economía local. Este enfoque sostenible no solo beneficia a Mórrope, sino que también posiciona a la región como un modelo a seguir en términos de desarrollo industrial sostenible. La disponibilidad de cal hidratada de alta calidad y a bajo costo beneficiará a sectores clave como la construcción y la agricultura, esenciales para el desarrollo social y económico de la comunidad.

Finalmente, este proyecto tiene implicaciones a nivel nacional. Al desarrollar capacidades tecnológicas y productivas avanzadas, la región de Lambayeque se

posiciona como un referente en el sector de procesamiento de minerales. Esto no solo fortalece la industria local, sino que también impulsa la competitividad del país en el mercado internacional, promoviendo un desarrollo industrial más equilibrado y diversificado.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Tipo y Diseño de Investigación

La investigación se clasifica como tanto básica como aplicada, integrando enfoques experimentales y teóricos para adquirir nuevos conocimientos y aplicarlos a un objetivo práctico específico. En su componente básico, la investigación se centra en trabajos experimentales y teóricos diseñados para profundizar en la comprensión de los fundamentos de los fenómenos relacionados con el funcionamiento y diseño de molinos de martillos. Este enfoque no busca una aplicación inmediata, sino que pretende establecer una base sólida de conocimiento sobre los principios subyacentes. De manera complementaria, la investigación aplicada se dirige hacia trabajos originales con el propósito de adquirir conocimientos nuevos que se enfoquen en el diseño y optimización de un molino de martillos para el procesamiento de 2 toneladas por hora de cal hidratada en Mórrope, Lambayeque. Este aspecto se orienta hacia objetivos prácticos, como la mejora de la eficiencia operativa y la selección adecuada de materiales.

La investigación implicará la manipulación de variables específicas relacionadas con el diseño del molino de martillos, tales como la configuración del impulsor, la selección de materiales y la disposición de la rejilla de descarga. El objetivo es observar los efectos de estas manipulaciones sobre la eficiencia operativa y el desgaste de los componentes. Las variables de interés, incluyendo la eficiencia del procesamiento, el desgaste de los componentes y la durabilidad del

molino, se medirán en múltiples momentos a lo largo del tiempo. Esto permitirá evaluar cambios y tendencias en el rendimiento del equipo.

Los datos se recopilarán específicamente para esta investigación, siguiendo los objetivos propuestos. Se realizará una recolección de datos en tiempo real durante la operación del molino, complementada con mediciones periódicas para asegurar la precisión y relevancia de los datos obtenidos. La investigación abordará múltiples variables, tales como la eficiencia operativa, el desgaste de los componentes, la selección de materiales y el rendimiento estructural del molino. Se analizarán las interacciones entre estas variables para proporcionar una comprensión integral y detallada del sistema.

Este diseño de investigación permite una evaluación exhaustiva y detallada del proceso de diseño y operación del molino de martillos, proporcionando tanto conocimientos fundamentales como aplicaciones prácticas para mejorar el procesamiento de cal hidratada en Mórrope, Lambayeque.

## **2.2. Variables, Operacionalización**

### **Variables Independientes:**

Diseño del molino de martillos: Características geométricas, tamaño, material de construcción, configuración de los martillos, velocidad de rotación, potencia del motor, etc.

Características del material de alimentación: Granulometría de la cal hidratada, humedad, densidad aparente, composición química, tamaño máximo de partícula, etc.

Condiciones ambientales: Temperatura, humedad relativa, altitud, etc.

Parámetros de operación: Velocidad de alimentación del material, ajuste de la abertura de salida, tiempo de residencia del material en el molino, etc.

**Variables Dependientes:**

Capacidad de procesamiento: Toneladas de cal hidratada procesadas por hora.

Eficiencia de molienda: Porcentaje de reducción de tamaño de las partículas de cal hidratada.

Consumo energético: Energía consumida por tonelada de cal hidratada procesada.

Calidad del producto final: Granulometría del producto, uniformidad de la distribución del tamaño de partículas, contenido de finos, etc.

Tabla 4 Operacionalización de variables

Variable de Estudio	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Instrumento	Tipo de Variable	Escala de Medición
Diseño del molino de martillos	Características geométricas, tamaño, material, etc.	Dimensiones físicas, materiales de construcción, velocidad de rotación, potencia del motor, etc.	Geometría, materiales, energía	Longitud (mm), material (acero inoxidable, hierro fundido, etc.), potencia (kW), velocidad (RPM), etc.	Dimensiones: Largo, Ancho, Alto	Calibrador, medidor de potencia, cronómetro, etc.	Variable continua, nominal	Medición directa, categorización
Características del material de alimentación	Propiedades físicas y químicas del material de entrada	Granulometría, humedad, densidad, composición química, etc.	Granulometría, humedad, composición química	Tamaño de partícula (mm), % de humedad, densidad (kg/m <sup>3</sup> ), % de Ca(OH) <sub>2</sub> , % de impurezas, etc.	Análisis granulométrico, análisis químico	Tamices, balanzas, medidores de humedad, espectroscopía, etc.	Variable continua, discreta	Medición directa, análisis químico

Condiciones ambientales	Parámetros del entorno durante la operación	Temperatura, humedad relativa, altitud, etc.	Temperatura, humedad, altitud	Temperatura (°C), humedad relativa (%), altitud (m), etc.	Termómetro, higrómetro, altímetro	Termómetro, higrómetro, altímetro	Variable continua, discreta	Medición directa
Parámetros de operación	Ajustes y condiciones de operación del molino	Velocidad de alimentación, ajuste de la abertura de salida, tiempo de residencia, etc.	Velocidad, ajustes, tiempo	Velocidad de alimentación (kg/h), ajuste de abertura (mm), tiempo de residencia (s), etc.	Velocidad: RPM, Ajustes: mm, Tiempo: segundos	Cronómetro, indicador de velocidad, regla milimetrada	Variable continua, discreta	Medición directa

### **2.3. Población de estudio, muestra, muestreo y criterios de selección**

Para el diseño de un molino de martillos para el procesamiento de 2 toneladas por hora de cal hidratada en el distrito de Morrope, Lambayeque, los conceptos de población de estudio, muestra, muestreo y criterios de selección se pueden abordar de la siguiente manera:

**Población de estudio:** La población de estudio en este caso estaría conformada por todos los posibles diseños de molinos de martillos adecuados para el procesamiento de cal hidratada en las condiciones específicas del distrito de Morrope, Lambayeque.

**Muestra:** La muestra sería una selección representativa de diseños de molinos de martillos que se consideren pertinentes para el procesamiento de cal hidratada en la región mencionada. Esta muestra se utilizará para evaluar y comparar diferentes opciones de diseño antes de seleccionar la más adecuada para su implementación.

**Muestreo:** El proceso de muestreo implicaría la identificación y selección de diferentes diseños de molinos de martillos disponibles en el mercado o desarrollados previamente por investigadores o empresas en el campo de la molienda de minerales. Se podría realizar un muestreo no probabilístico, basado en la disponibilidad y accesibilidad de los diseños, así como en la experiencia y conocimiento del equipo de diseño.

Criterios de selección: Los criterios de selección se basarían en una serie de consideraciones técnicas, económicas y ambientales. Algunos posibles criterios podrían incluir la eficiencia de molienda, la capacidad de procesamiento, la durabilidad y mantenibilidad del molino, el consumo energético, la disponibilidad de materiales y componentes, el costo de adquisición y operación, así como la compatibilidad con las condiciones ambientales locales. Estos criterios ayudarían a identificar el diseño de molino de martillos más adecuado para el procesamiento de cal hidratada en el distrito de Morrope, Lambayeque.

#### **2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad**

Para recopilar datos relevantes durante el proceso de diseño de un molino de martillos para el procesamiento de 2 toneladas por hora de cal hidratada en el distrito de Morrope, Lambayeque, se pueden emplear diversas técnicas e instrumentos de recolección de datos. A continuación, se describen algunas posibles opciones, junto con consideraciones sobre validez y confiabilidad:

Entrevistas con expertos: Se pueden llevar a cabo entrevistas estructuradas o semiestructuradas con ingenieros mecánicos, metalúrgicos, y otros expertos en el diseño de equipos industriales, así como con operadores con experiencia en la industria de procesamiento de minerales. Estas entrevistas proporcionarían información cualitativa

valiosa sobre los requisitos de diseño y las mejores prácticas en la selección y operación de molinos de martillos.

Revisión de literatura: La revisión exhaustiva de literatura técnica y científica relacionada con el diseño y la operación de molinos de martillos sería fundamental para comprender los principios fundamentales, las innovaciones recientes y los desafíos comunes en este campo.

Análisis de datos de rendimiento de molinos similares: Si existen datos disponibles de rendimiento de molinos de martillos utilizados en aplicaciones similares de procesamiento de minerales, estos pueden ser analizados para extraer tendencias, identificar problemas comunes y obtener información sobre la eficiencia y confiabilidad de diferentes diseños.

Simulaciones computacionales: Se pueden realizar simulaciones computacionales utilizando software de modelado y análisis de elementos finitos para evaluar el rendimiento de diferentes diseños de molinos de martillos bajo diferentes condiciones de operación y cargas de trabajo.

Pruebas piloto: Una vez seleccionados algunos diseños preliminares, se pueden realizar pruebas piloto en una escala reducida para evaluar su desempeño en condiciones controladas de laboratorio o en el sitio de producción.

Validación y confiabilidad: La validez de los datos recopilados se garantiza mediante la utilización de métodos de recolección confiables y la triangulación de múltiples fuentes de información. La confiabilidad de los datos puede ser asegurada mediante la estandarización de los procedimientos de recolección, la capacitación del personal encargado de recopilar los datos y la verificación de la consistencia de los resultados obtenidos a través de diferentes métodos de recolección. Además, la utilización de instrumentos y técnicas validadas previamente por la comunidad científica aumentaría la confiabilidad de los datos obtenidos.

## **2.5. Procedimiento de análisis de datos**

El procedimiento de análisis de datos para el diseño de un molino de martillos destinado al procesamiento de 2 toneladas por hora de cal hidratada en el distrito de Morrope, Lambayeque, podría llevarse a cabo de la siguiente manera:

Recopilación de datos: Se recopilarán todos los datos obtenidos de las diferentes técnicas e instrumentos de recolección mencionados anteriormente, incluyendo entrevistas con expertos, revisión de literatura, análisis de datos de rendimiento de molinos similares, simulaciones computacionales y pruebas piloto.

Organización de datos: Los datos recopilados se organizarán de manera sistemática en una base de datos o en hojas de cálculo, categorizándolos

según los aspectos específicos del diseño del molino de martillos, tales como dimensiones físicas, características del material de alimentación, condiciones ambientales, parámetros de operación y criterios de selección.

**Análisis cualitativo:** Se realizará un análisis cualitativo de los datos cualitativos obtenidos de las entrevistas con expertos y la revisión de literatura. Esto implicará la identificación de tendencias, patrones y recomendaciones comunes en relación con el diseño y la operación de molinos de martillos en la industria de procesamiento de minerales.

**Análisis cuantitativo:** Para los datos cuantitativos obtenidos de simulaciones computacionales, pruebas piloto y análisis de datos de rendimiento de molinos similares, se llevará a cabo un análisis estadístico descriptivo para resumir y visualizar las características clave de los datos, como media, mediana, desviación estándar, distribución de frecuencias, etc.

**Comparación de diseños:** Se compararán los diferentes diseños de molinos de martillos utilizando los criterios de selección definidos previamente. Esto podría implicar la creación de matrices de decisión o la aplicación de técnicas multicriterio para evaluar y clasificar los diseños en función de su adecuación para cumplir con los requisitos específicos del proyecto.

Interpretación de resultados: Los resultados del análisis de datos se interpretarán en el contexto de los objetivos del proyecto y las restricciones identificadas. Se tomarán decisiones informadas sobre el diseño final del molino de martillos, teniendo en cuenta tanto los aspectos técnicos como los económicos y ambientales.

Informe de resultados: Se elaborará un informe detallado que documente los hallazgos del análisis de datos, las decisiones de diseño tomadas y las recomendaciones para la implementación del molino de martillos. Este informe servirá como base para la fase de desarrollo y construcción del equipo.

## **2.6. Criterios éticos**

En el diseño de cualquier proyecto, incluido el desarrollo de un molino de martillos para el procesamiento de cal hidratada en el distrito de Morrope, Lambayeque, es fundamental considerar y adherirse a criterios éticos sólidos. Algunos de estos criterios podrían incluir:

Respeto a los derechos humanos: Se debe garantizar el respeto y la protección de los derechos humanos de todas las personas involucradas en el proyecto, incluidos los trabajadores, las comunidades locales y cualquier otra parte interesada. Esto implica evitar cualquier forma de discriminación, asegurar condiciones de trabajo seguras y justas, y respetar la cultura y las tradiciones locales.

Integridad científica: Se debe mantener la integridad científica en todas las etapas del proyecto, desde la recopilación de datos hasta la interpretación de resultados y la toma de decisiones. Esto implica utilizar métodos de investigación válidos y confiables, evitar el sesgo en la interpretación de los datos y asegurar la transparencia en la comunicación de los hallazgos.

Consentimiento informado: Cuando sea necesario, se debe obtener el consentimiento informado de todas las partes involucradas en el proyecto, especialmente en el caso de pruebas piloto que puedan afectar a las comunidades locales o al medio ambiente. Esto implica proporcionar información clara y comprensible sobre los objetivos, riesgos y beneficios del proyecto, y permitir que las personas tomen decisiones informadas sobre su participación.

Responsabilidad ambiental: Se debe minimizar el impacto ambiental negativo del proyecto mediante la adopción de prácticas de diseño sostenible, la gestión adecuada de residuos y la protección de los recursos naturales locales. Esto implica también cumplir con todas las regulaciones ambientales y trabajar en colaboración con las autoridades locales y las comunidades para mitigar cualquier impacto ambiental adverso.

Equidad y justicia: Se debe garantizar la equidad y la justicia en la distribución de los beneficios y las cargas del proyecto, tanto a nivel local

como global. Esto implica considerar y abordar las inequidades sociales y económicas existentes, y trabajar hacia la inclusión y la participación equitativa de todas las partes interesadas en el proceso de diseño y desarrollo del molino de martillos.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

##### a) Selección del tipo de sistema de trituración

Para seleccionar el tipo de sistema de trituración, se realizó una comparación de los modelos existentes a través de un cuadro comparativo utilizando las ventajas y desventajas de cada uno (ver tabla 5), posterior a ello se determinaron los criterios de ingeniería y económicos para evaluar cada propuesta (ver tabla 6); a través de un análisis de ponderados se elaboró la tabla 7 en la que se asignaron ponderados para la evaluación; en la tabla 8 se obtuvieron los resultados de la evaluación de cada propuesta, siendo el sistema de trituración por martillos el más óptimo a nivel de criterio de ingeniería y económico.

*Tabla 5 Cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de los tres principales tipos de molinos o trituradoras.*

<b>Tipo de Molino o Trituradora</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Molino de Martillos</b>	Eficiente para triturar materiales blandos y medianamente duros. Económico de operar. Versátil en aplicaciones, como el reciclaje de plásticos y metales. Puede producir una amplia gama de tamaños de partículas.	Desgaste rápido de los martillos debido a la alta velocidad y abrasividad del material. Menos efectivo para materiales extremadamente duros.
<b>Trituradora de Mandíbulas</b>	Alta eficiencia de trituración para una amplia gama de materiales. Baja ceguera en el diseño empírico tradicional. Buen control sobre el tamaño de salida del material.	Alto desgaste de las placas de mandíbula, lo que aumenta los costos operativos. Menor capacidad para producir materiales muy finos.

<b>Trituradora de Impacto Vertical (VSI)</b>	Eficiente para triturar materiales sólidos y quebradizos. Produce partículas de tamaño uniforme. Alta velocidad de procesamiento.	Consumo energético relativamente alto. Necesidad de un diseño específico para evitar bloqueos y asegurar alto rendimiento.
--	---	--

*Tabla 6 Comparación de los tipos de molinos o trituradoras según criterios de ingeniería y económicos*

<b>Criterio</b>	<b>Molino de Martillos</b>	<b>Trituradora de Mandíbulas</b>	<b>Trituradora de Impacto Vertical (VSI)</b>
<b>Criterio Económico</b>	- Bajo costo de producción y mantenimiento.	- Costos operativos elevados debido al desgaste de placas.	- Alto consumo energético.
<b>Criterio Funcional</b>	- Eficiente para materiales blandos y medianamente duros.	- Alta eficiencia de trituración.	- Excelente para materiales sólidos y quebradizos.
<b>Menor Dimensión</b>	- Compacto y fácil de instalar.	- Tamaño y peso mayor comparado con el molino de martillos.	- Generalmente más grande y requiere más espacio.
<b>Capacidad Media</b>	- Capacidad adecuada para procesos de hasta 2 toneladas por hora.	- Alta capacidad de procesamiento.	- Alta capacidad, pero con mayor consumo de energía.
<b>Mantenimiento</b>	- Fácil mantenimiento y limpieza.	- Alto desgaste y mayor necesidad de reemplazo de componentes.	- Mantenimiento más complejo debido a la alta velocidad de operación.
<b>Operación</b>	- Fácil operación.	- Necesita personal capacitado para su operación eficiente.	- Requiere monitoreo constante y ajustes.
<b>Fabricación</b>	- Fabricación sencilla y adaptable a diferentes diseños.	- Diseño robusto, pero con mayor complejidad.	- Diseño avanzado con tecnología de vanguardia.
<b>Facilidad para Transportar</b>	- Fácil de transportar debido a su tamaño compacto.	- Menos portátil debido a su peso y tamaño.	- Transporte más complicado por su mayor tamaño y peso.

*Tabla 7 Evaluación de pesos para molino y triturador según desempeño de cada equipo*

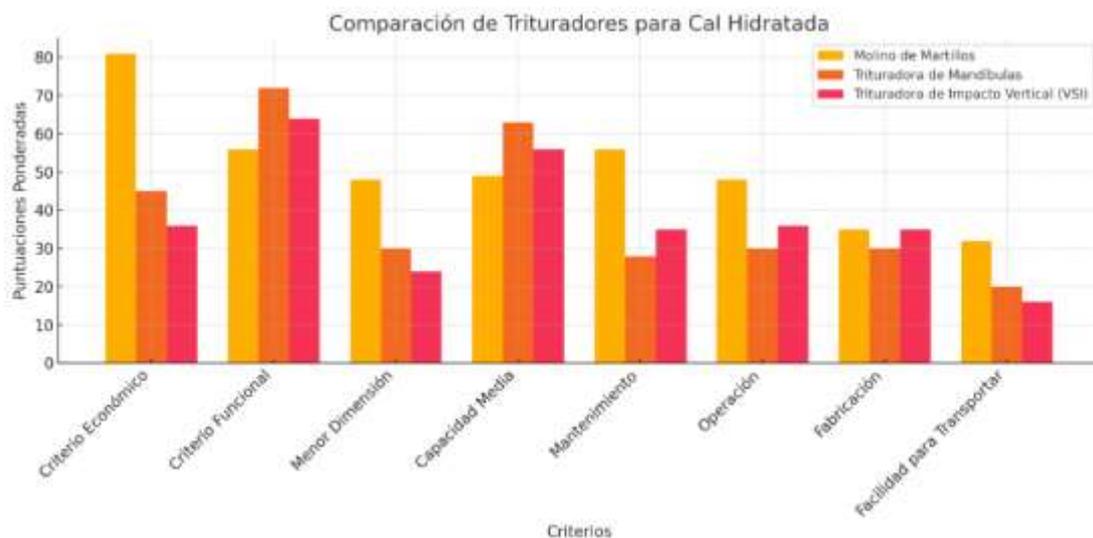
<b>Criterio</b>	<b>Peso</b>	<b>Molino de Martillos</b>	<b>Trituradora de Mandíbulas</b>	<b>Trituradora de Impacto Vertical (VSI)</b>
<b>Criterio Económico</b>	9	9	5	4
<b>Criterio Funcional</b>	8	7	9	8
<b>Menor Dimensión</b>	6	8	5	4

<b>Capacidad Media</b>	7	7	9	8
<b>Mantenimiento</b>	7	8	4	5
<b>Operación</b>	6	8	5	6
<b>Fabricación</b>	5	7	6	7
<b>Facilidad para Transportar</b>	4	8	5	4

Tabla 8 Selección del equipo según evaluación de ponderados

Criterio	Peso	Molino de Martillos	Trituradora de Mandíbulas	Trituradora de Impacto Vertical (VSI)
<b>Criterio Económico</b>	9	81	45	36
<b>Criterio Funcional</b>	8	56	72	64
<b>Menor Dimensión</b>	6	48	30	24
<b>Capacidad Media</b>	7	49	63	56
<b>Mantenimiento</b>	7	56	28	35
<b>Operación</b>	6	48	30	36
<b>Fabricación</b>	5	35	30	35
<b>Facilidad para Transportar</b>	4	32	20	16
<b>Puntuación Total</b>		<b>405</b>	318	302

Figura 6 Comparación de trituradores según criterios técnicos y económicos



**b) Cálculo de la capacidad de producción y parámetros de operación inicial**

Para calcular la capacidad de producción semanal de la máquina en toneladas, necesitamos dividir la cantidad total de cal hidratada producida semanalmente por el número de horas efectivas trabajadas en la semana.

Aquí están los pasos detallados:

*Tabla 9 Cálculo de la capacidad de producción*

<b>Punto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Resultado</b>
1	Cantidad promedio semanal de cal hidratada	-	90 toneladas
2	Horas trabajadas al día	-	8 hr/día
3	Días trabajados a la semana	-	6 días/semana
4	Total, de horas trabajadas a la semana	8 hr/día x 6 días/ semana	48 hr/semana
5	Capacidad de producción por hora	90 ton/ 48 h	1.875 ton/hr

Siguiendo las sugerencias de compañías especializadas en el área de la molienda de cal, es necesario tener en cuenta un margen de pérdidas del 5.00 al 6.00 % debido a las impurezas presentes en la cal hidratada de entrada. Por consiguiente, se decide que la capacidad de la máquina procesadora sea de 2 ton por hr.

**Número de elementos golpeadores sobre la cal hidratada:**

Para una capacidad de 2 ton/hr que equivale a 2000 kg/hr y considerando el peso promedio de 0.8 gr, se puede determinar la cantidad de partículas

de cal que impactarán sobre el martillo golpeador; por tanto, aplicando la conversión se tiene  $4.166 \times 10^4$  partículas /min.

Siguiendo la recomendación de los fabricantes de molinos, la velocidad de rotación del sistema es de 1800 RPM para martillos de conexión libre (que pueden girar respecto al eje donde están conectados). Asumiendo que el tamaño del material de entrada no está regulado, se considerará que la velocidad de rotación del sistema es equivalente a la velocidad de giro de sus componentes. Por lo tanto, se calculará el número de granos por revolución de giro:

$$\frac{\text{flujo granulométrico} \times \text{velocidad de giro}}{\text{flujo granulométrico por revolución}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$(4.166 \times 10^4 \text{ granos/min}) / (1800 \text{ rev/min}) = 23.14 \text{ partículas/rev}$$

Para determinar la cantidad de martillos del sistema, se tiene en cuenta que la disposición geométrica de cada martillo estará orientada en 4 direcciones. Por lo tanto, el número de martillos será de 24, asegurando que este número sea múltiplo de 4.

### **Velocidad de impacto necesaria para la rotura de la cal hidratada**

La velocidad mínima necesaria para fragmentar al 100% el grano de cal se visualiza en la siguiente tabla:

*Tabla 10 Velocidad de rotura mínima para el grano de 100 mm de diámetro*

Ensayo	Cantidad granos inicial	N° granos fragmentados	N° granos sin fragmentar	Grado Fragmentación (%)	Velocidad de ensayo (m/s)
1		9.00	11.00	45.00	6.41
2		10.00	10.00	50.00	6.56
3		10.00	10.00	50.00	6.71
4		11.00	9.00	55.00	6.85
5	20.00	12.00	8.00	60.00	7.00
6		13.00	7.00	65.00	7.13
7		14.00	6.00	70.00	7.27
8		15.00	5.00	75.00	7.40
9		18.00	2.00	90.00	7.53
10		20.00	0.00	100.00	7.67

Fuente: J. Párraga, 2016 [14]

Con la velocidad mínima de 7.67 m/s necesaria para fragmentar al 100% un grano cal de 100mm de diámetro según el estudio realizado por J. Párraga, procedemos a realizar un análisis dinámico para determinar la distribución de las velocidades en el martillo de rotura.

**c) Cálculo, dimensionamiento y selección de componentes mediante método analítico y simulación.**

**Radio mínimo:**

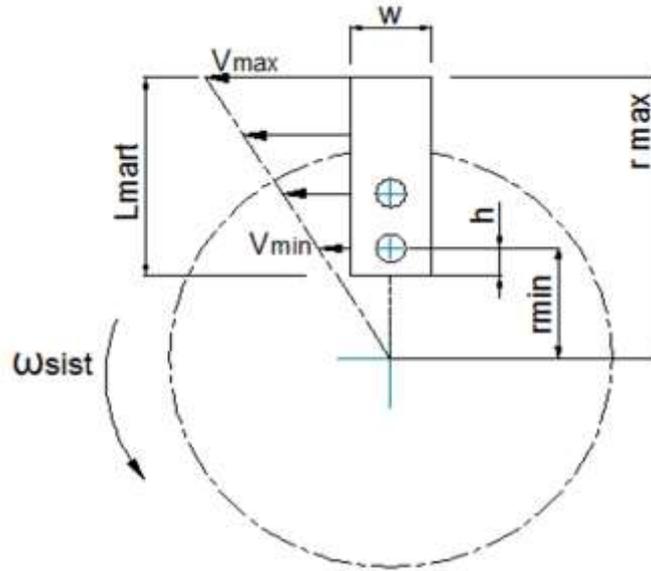
Considerando que la velocidad mínima del martillo ( $V_{min}$ ) debe ser mayor a la velocidad de rotura ( $V_{rotura}$ ) igual a 7.67 m/s y una velocidad de giro de 1800 rpm que equivale a 185.5 rad/s, tenemos:

$$V_{min} > V_{rotura}$$

$$\omega_{giro} \times r_{min} > V_{rot}$$

$$r_{min} > 40.70 \text{ mm} \quad \text{Ecuación 2}$$

*Figura 7 Análisis de velocidades del martillo*



Se tiene la relación del factor de seguridad para determinar la velocidad mínima:

$$f.s = V_{min}/V_{rot};$$

considerando que es una máquina que está sujeta a cargas y esfuerzos que pueden calcularse con facilidad y que los materiales pueden usarse en condiciones de ambiente razonable; por tanto, seleccionamos un factor de seguridad de 2.5 para nuestro diseño según la tabla 11; siendo así despejamos el valor de la velocidad mínima de 19.2 m/s. Para la nueva velocidad tendremos que calcular el radio mínimo con la siguiente formula:

$$\omega_{giro} \times r_{min} = V_{min} \quad \text{Ecuación 3}$$

Por tanto, el radio mínimo será:  $r_{min} = 102mm$

Este radio asegura la fuerza de impacto suficiente para triturar el grano de cal para fragmentarla debido a que las velocidades en el borde son mayores que la velocidad de rotura.

**Radio máximo:**

El radio máximo  $r_{m\acute{a}x}$  y la velocidad máxima  $V_{m\acute{a}x}$  en la ubicaci3n seg3n la figura 8 se determinar3 con la distancia  $h$ ; para ello consideraremos datos de los fabricantes sobre las dimensiones del martillo para capacidades de 2 Ton/hr.: ancho vario entre 65mm a 85 mm y largo del martillo entre 175mm a 195mm, por lo que se considerar3 las medidas entre los rangos intermedios recomendados:

Ancho = 70mm

Largo del martillo = 180 mm

Para determinar el radio m3ximo seg3n la geometr3a de la figura 8, tenemos:

$$r_{m\acute{a}x} = (r_{m\acute{i}n} - h) + L_{m\acute{a}x} \text{ Ecuaci3n 4}$$

Considerando un valor de  $h = 30$  mm, entonces  $r_{m\acute{a}x}=252$  mm; estos valores preliminares ser3n evaluados durante la evaluaci3n de resistencia del martillo.

Usando la ecuaci3n 3 para los valores m3ximos tenemos  $V_{m\acute{a}x}=47.5$  m/s

### **Velocidad de carga:**

Seg3n Gupta [15], se debe determinar la  $V_{carga}$ : velocidad de carga y  $V_{vacio}$ : velocidad de vac3o considerando un  $C_s$ : coeficiente de fluctuaci3n utilizado para el dise1o de m3quinas de molienda.

$$V_{carga} = V_{vacio} \times \frac{2-C_s}{2+C_s} \text{ Ecuaci3n 5}$$

Seg3n la figura 8, el coeficiente de fluctuaci3n que se considerar3 para molinos de martillos para cal que se asemejar3 al molino harinero ser3 de 0.020; adem3s la  $V_{m\acute{a}x} = V_{vacio}$  cuando impacta con el grano; se tiene:  $V_{carga} = 46.56$  m/s

Figura 8 Grado de irregularidad para máquinas rotatorias

Tipo de máquina	$C_i$
Maquinaria de machaqueo	0,200
Maquinaria eléctrica	0,003
Maquinaria eléctrica, transmisión directa	0,002
Motores con transmisión por correas	0,030
Maquinaria para molinos harineros	0,020
Transmisión rueda dentada	0,020
Martillos	0,200
Máquinas herramientas	0,030
Maquinaria para fabricación de papel	0,025
Bombas	0,030-0,050
Maquinaria de corte	0,030-0,050
Maquinaria de hilanderías	0,010-0,020
Maquinaria textil	0,025

Fuente: Mechanical Engineers Handbook [16]

**Fuerza de impacto:**

Para determinar la fuerza de impacto se considerará la teoría de impulso por tanto se tiene la siguiente ecuación; donde:  $F_{\text{impacto}}$  es la fuerza de impacto,  $\Delta_t$  es el tiempo mínimo en el que deberá impactarse la partícula de cal que será 0.2 s. y un factor de seguridad  $f_s$  igual a 2 según la tabla 11 para materiales fiables.

$$F_{\text{impacto}} = \frac{\text{masa}_{\text{martillo}} \times (V_{\text{máx}} - V_{\text{carga}})}{\Delta_t} \times f_s$$

Por tanto, la fuerza de impacto será 15.88 N.

Figura 9 Dimensiones preliminares del martillo

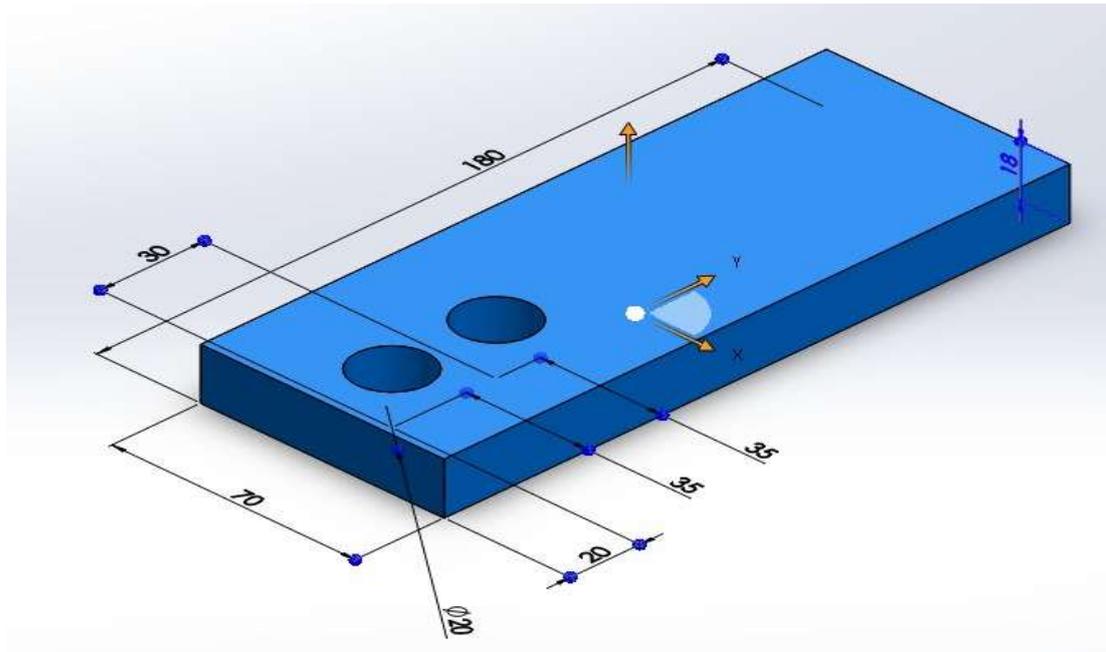
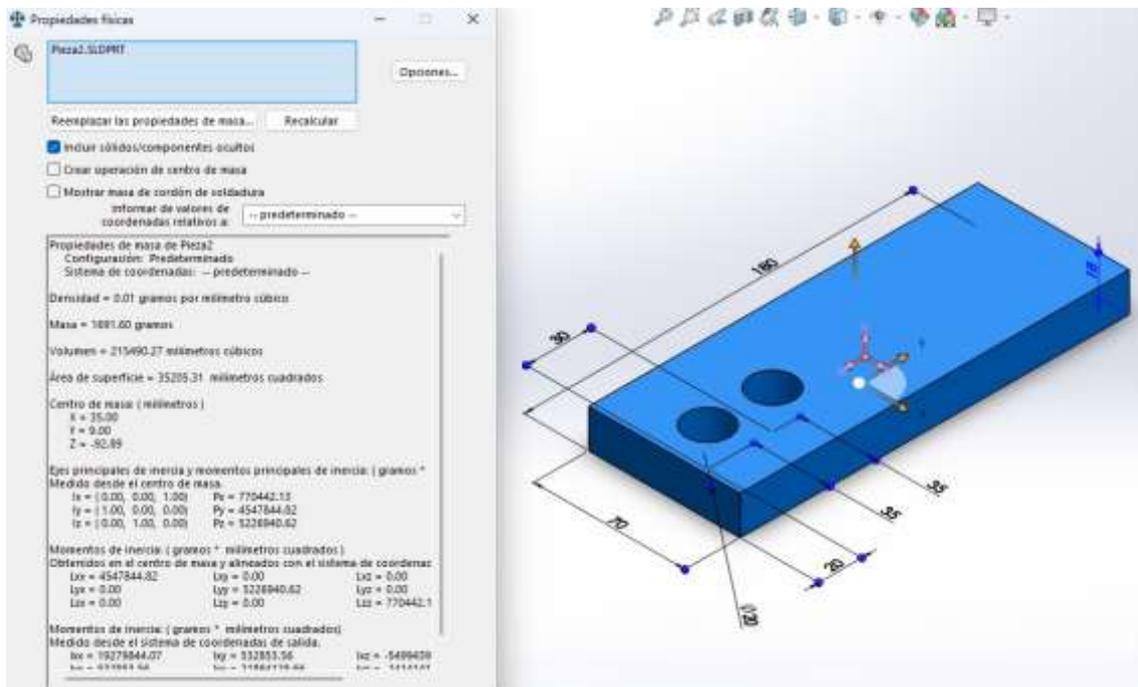


Figura 10 Masa y volumen del martillo para un acero SAE 1045 templado y revenido



A partir de las dimensiones preliminares del martillo se determinará el volumen usando el software SolidWorks para un acero SAE 1045 templado y revenido

para un espesor de 18 mm según figura 11 y considerando diámetros promedios de 15mm de granos de cal hidratada.

Figura 11 Espesores estandarizados para planchas de acero SAE 1045

Ancho: [mm]	2000			2440		
Espesor	Área	Peso x Plancha		Área	Peso x Plancha	
		6000	12000		6000	12000
[mm]	[cm <sup>2</sup> ]	[kgf]	[kgf]	[cm <sup>2</sup> ]	[kgf]	[kgf]
6	120	565,2	1130	146	689,5	1379
8	160	753,6	1507	195	919,4	1839
10	200	942,0	1884	244	1149	2298
12	240	1130	2261	293	1379	2758
14	280	1319	2638	342	1609	3218
16	320	1507	3014	390	1839	3678
18	360	1696	3391	439	2069	4137
20	400	1884	3768	488	2298	4597

Fuente: Aceros Arequipa (2023)

Tabla 11 Factor de seguridad para diseño de máquinas

Aplicaciones	Factor de seguridad
Materiales de alta fiabilidad donde las condiciones de carga y ambientales no son severas y donde el peso es una consideración importante	1.3 – 1.5
Materiales fiables cuando las condiciones de carga y ambientales no son severas	1.5 – 2
Materiales ordinarios cuando las condiciones de carga y ambientales no son severas	2 – 2.5
Materiales frágiles donde la carga y las condiciones ambientales no son severas	2.5 – 3
Materiales cuyas propiedades no son fiables y cuyas condiciones de carga y ambientales no son severas, o cuando se utilizan materiales fiables en condiciones difíciles y ambientales	3 - 4

Fuente: J. Vidosic, 1957 [15]

**Torque y potencia:**

Para determinar el torque y la potencia usaremos los valores del radio máximo, velocidad de giro del rotor que contiene a los martillos y número de martillos con la siguiente ecuación:

$$T_{carga} = (F_{impacto} \times r_{m\acute{a}x}) \times N_{martillos} \text{ Ecuación 6}$$

Por tanto, el valor del torque de carga será 96.07 N-m

En el caso de la potencia, se considerará un valor de velocidad de giro igual a 1800 rpm y usando la siguiente ecuación se obtiene el valor de 17,29 kw de potencia de carga.

Por tanto, la potencia del motor eléctrico será igual la relación de la potencia de carga entre el factor de eficiencia igual a 0.89, teniendo un resultado de 19.42kw  $\approx$  22kw o 30 hp, valores estándar.

### **Selección correa de transmisión:**

Para este tipo de máquina se debe seleccionar una banda de transmisión y no una cadena debido a la polución generada y la contaminación del lubricante; por tanto, sistematizando el procedimiento de calculo para fajas, se muestra en la siguiente tabla, en resumen:

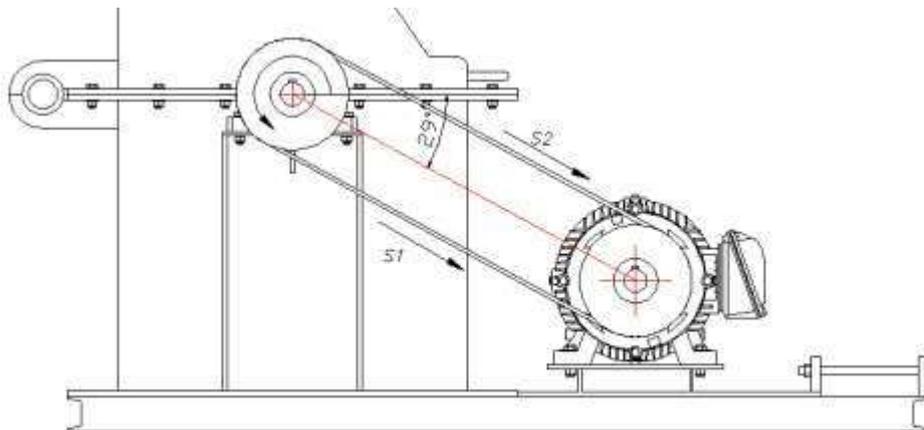
*Tabla 12 Datos de cálculo de faja*

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Potencia de máquina	Pm	kW	22.0
Factor de carga	c	-	1.21
Potencia teórica	Pt	kW	26.62
Velocidad de polea conductora	n1	rpm	1775
Velocidad polea conducida	n2	rpm	1775
Relación de transmisión	i	-	1
Diámetro de polea conductora	d	mm	200
Diámetro de polea conducida	D	mm	200
Distancia entre ejes	L	mm	780

<b>Distancia entre ejes nominal</b>	Dnom	mm	800
<b>Desarrollo de referencia</b>	Lref	mm	2260
<b>Desarrollo estándar</b>	Lest	mm	2230
<b>Arco de abrazo</b>	$\beta$	°	180
<b>Factor de corrección</b>	c1	-	1
<b>Factor de desarrollo</b>	c2	-	0.98
<b>Potencia nominal por correa</b>	Pnom	kW	15.0
<b>Velocidad de correa</b>	V	m/s	18.9
<b>Número de correas</b>	n	-	3.0
<b>Constante para calcular fuerza</b>	r	-	0.11
<b>Fuerza de pretensión</b>	Fp	N	213.0

Con los datos anteriores se seleccionarán 3 bandas de transmisión tipo trapecoidal SPA de la marca Optibelt, comercializada en Perú con longitud estándar de 2230 mm y poleas con diámetros de 200 mm con 3 canales en V.

Figura 12 Esquema de instalación de banda de transmisión



Para determinar las tensiones S1 y S2, se utilizarán las siguientes ecuaciones utilizando las variables de la tabla 12.

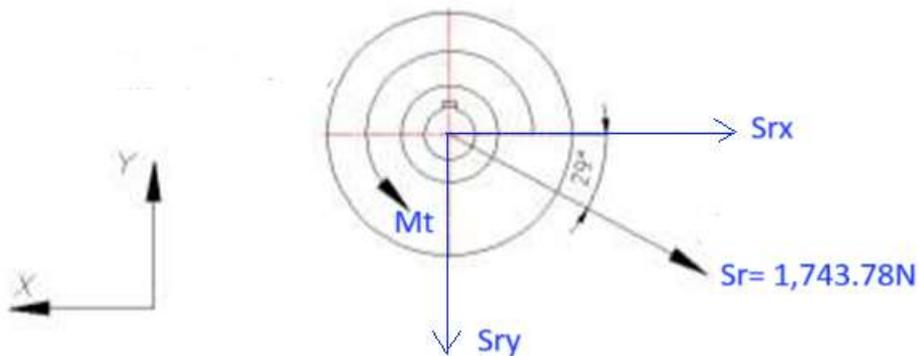
$$\text{Lado tenso: } s_1 = \frac{1020 * P_t}{c_1 * V} \text{ Ecuación 7}$$

$$\text{Lado flojo: } s_2 = \frac{1000 * (c - c_1) * P_t}{c_1 * V} \text{ Ecuación 8}$$

Por tanto, la tensión 1 será: 1,436.63 N y la tensión 2 será: 307.15 N

Siendo así la tensión resultante será la suma de S1 y S2 = 1,743.78 N

Figura 13 Diagrama de cuerpo libre de las cargas en la polea



$$S_{rx} = S_r * \cos 29^\circ = 1,525.14 \text{ N}$$

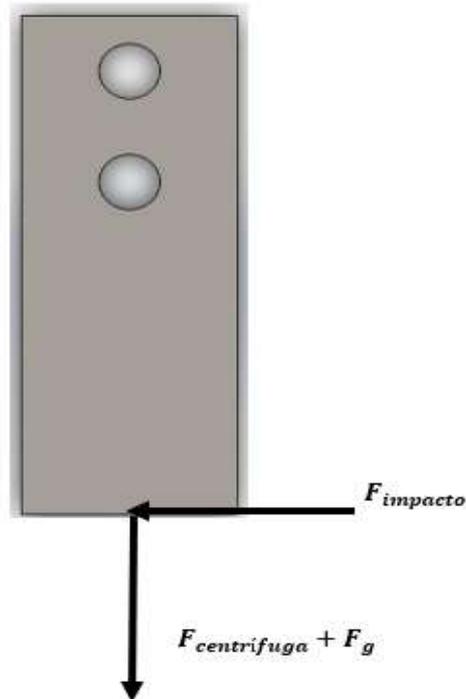
$$S_{ry} = S_r * \sen 29^\circ = 845.40 \text{ N}$$

$$M_t = (S_1 * r_{polea}) - (S_2 * r_{polea}) = 112,948 \text{ N} \cdot \text{mm} \approx 112.948 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### Resistencia del Martillo:

Para determinar la resistencia del martillo propuesto se elaborará un diagrama de cuerpo libre (DCL) en la que tendremos las variables: fuerza de impacto, fuerza centrífuga y la fuerza ejercida por la gravedad ( $F_g$ ).

Figura 14 DCL del martillo



$$F_{\text{centrífuga}} = \text{masa}_{\text{martillo}} \times \text{radio}_{\text{centro gravedad}} \times (\omega_{\text{giro}})^2 \text{ Ecuación 9}$$

Para una masa de 1.69 kg, un radio desde el centro de gravedad del martillo al centro del eje de rotación igual a (longitud del martillo +  $(r_{\text{mín}} - h)$ ) = 72 mm; por tanto, la fuerza centrífuga será 6.12 kN. La fuerza debido a la gravedad será 16.58 N.

#### **Análisis estático del martillo:**

Para evaluar la integridad estructural del martillo se utilizará el software CAE (ingeniería asistida por computador) para las cargas de fuerza centrífuga, fuerza de impacto y fuerza debido a la gravedad teniendo como resultado lo siguiente:

Figura 15 Análisis de esfuerzos bajo criterio de Von Mises

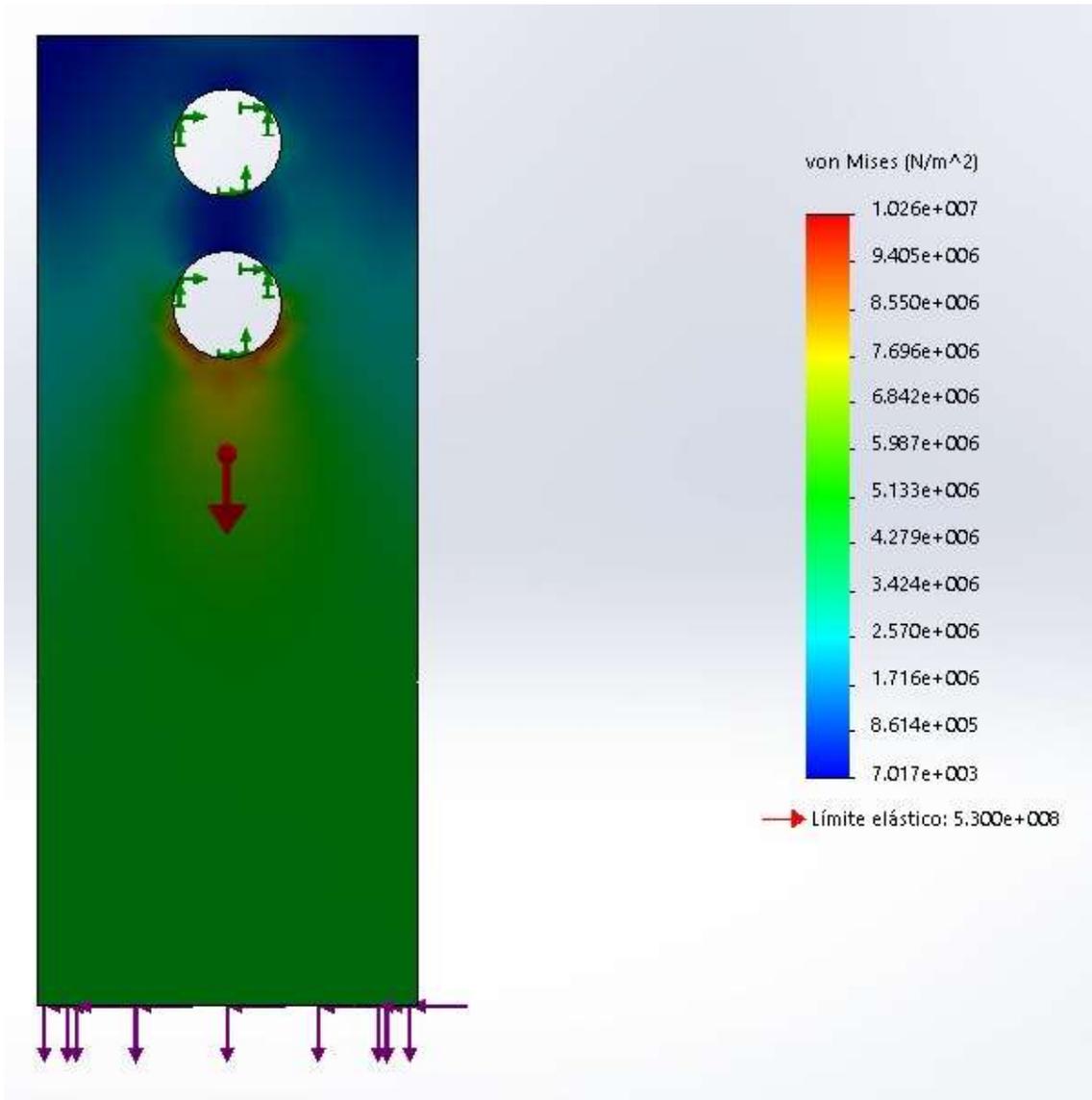
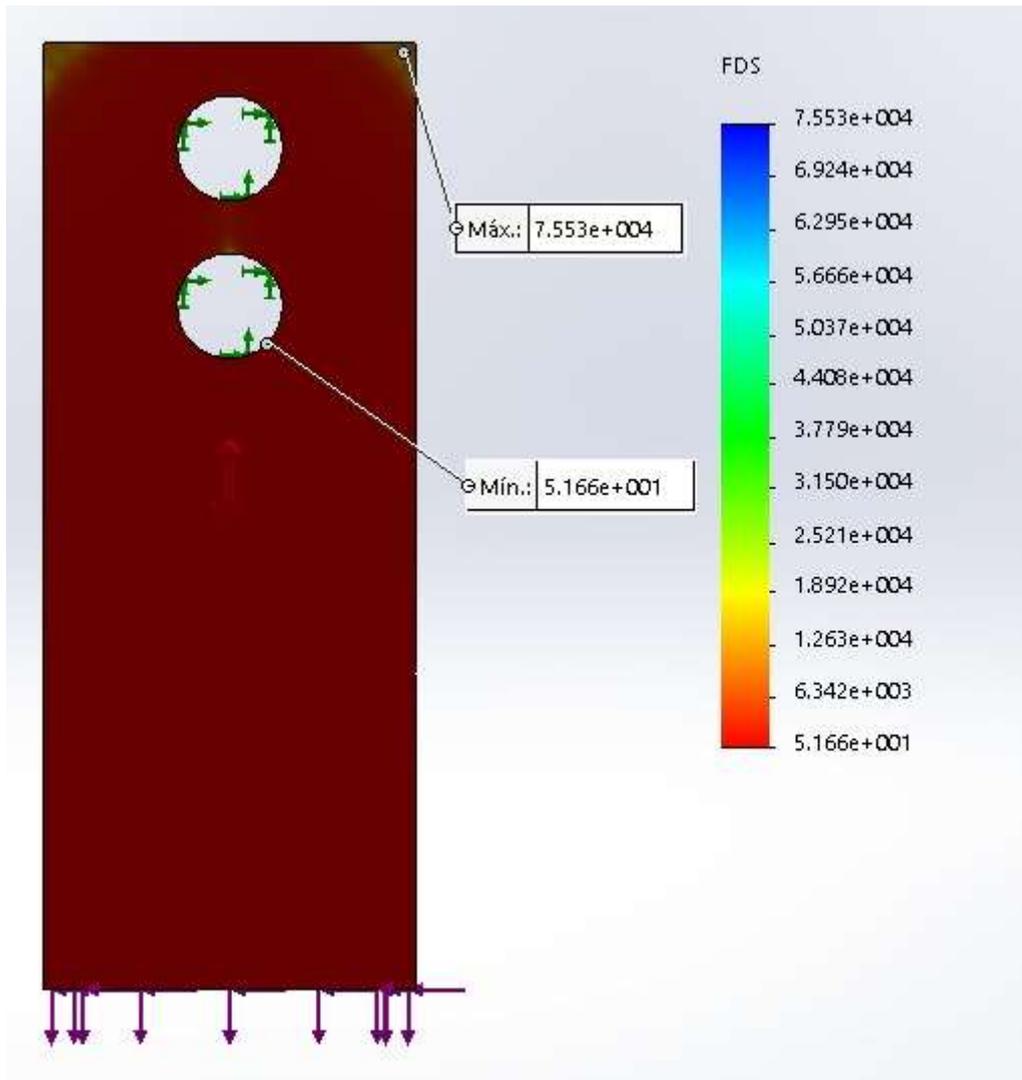


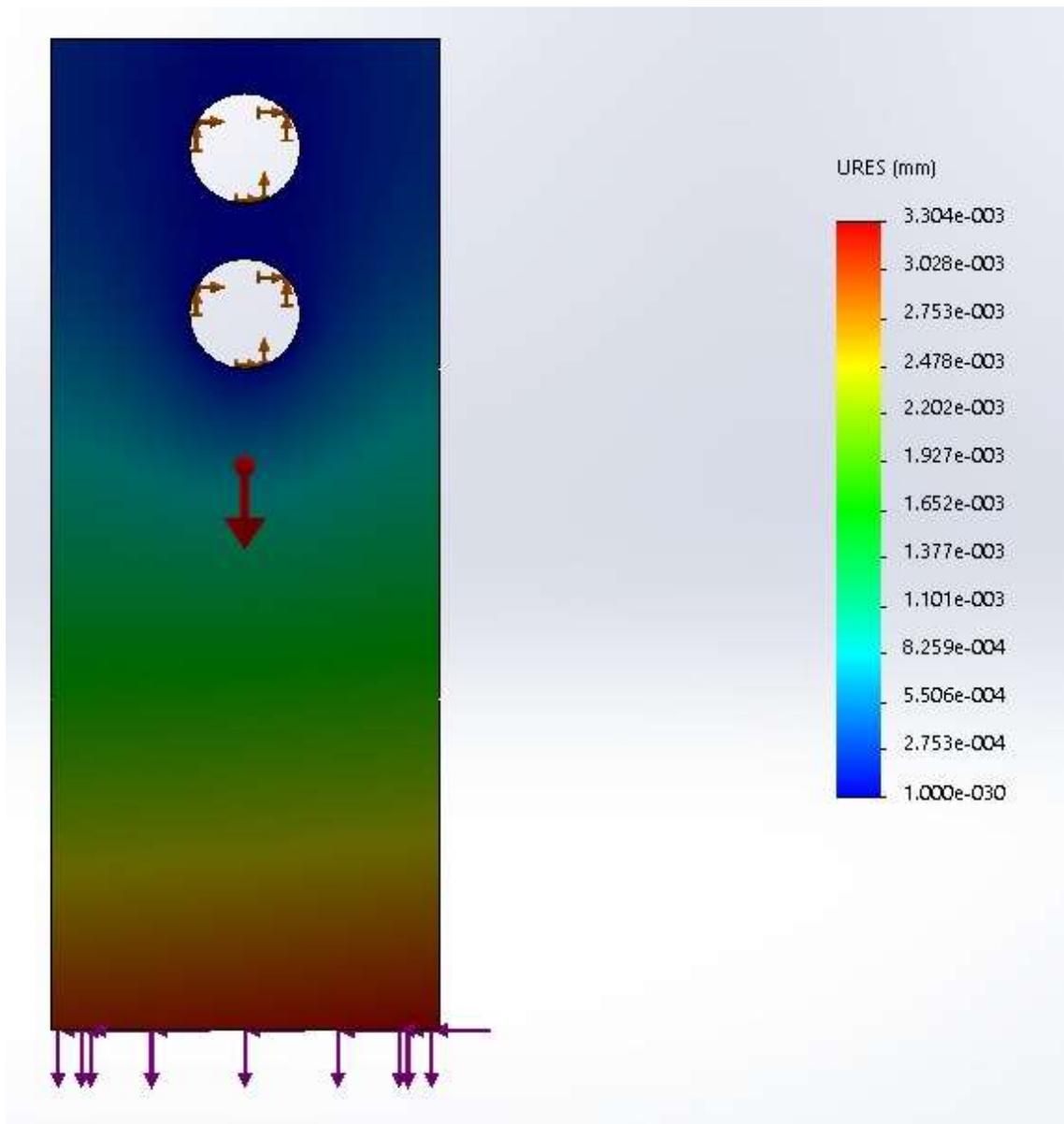
Figura 16 Análisis del factor de seguridad bajo criterio de Von Mises



En la figura 13 se puede apreciar que el esfuerzo máximo es de 10.26 MPa, valor que se encuentra por debajo de la resistencia de fluencia o límite elástico de 530 MPa. Estos resultados son favorables para el diseño ya que el modelo no fallará ante las tensiones de Von Mises; además el factor de seguridad mínimo estático en la figura 14 es de 51.66, siendo este valor el correcto.

El valor de desplazamiento equivalente fue de 0.003304 mm, por lo que este resultado se encuentra dentro del rango permisible.

Figura 17 Análisis de desplazamientos



### Análisis fatiga del martillo:

Para determinar el factor de seguridad y ciclos de vida del martillo de la trituradora se consideró el uso de la teoría de fatiga por Goodman y simulación de ciclos invertidos, por tanto, los resultados son los siguientes:

En la figura 16 se aprecia que el valor del factor de seguridad mínimo es de 8.69 siendo este un valor que se encuentra por encima del valor mínimo que es 2; se puede notar que este valor le corresponde a la muesca del agujero inferior de diámetro 20 mm.; además los ciclos de vida corresponden a rangos de vida infinita como se puede apreciar en la figura 17.

Figura 18 Factor de carga

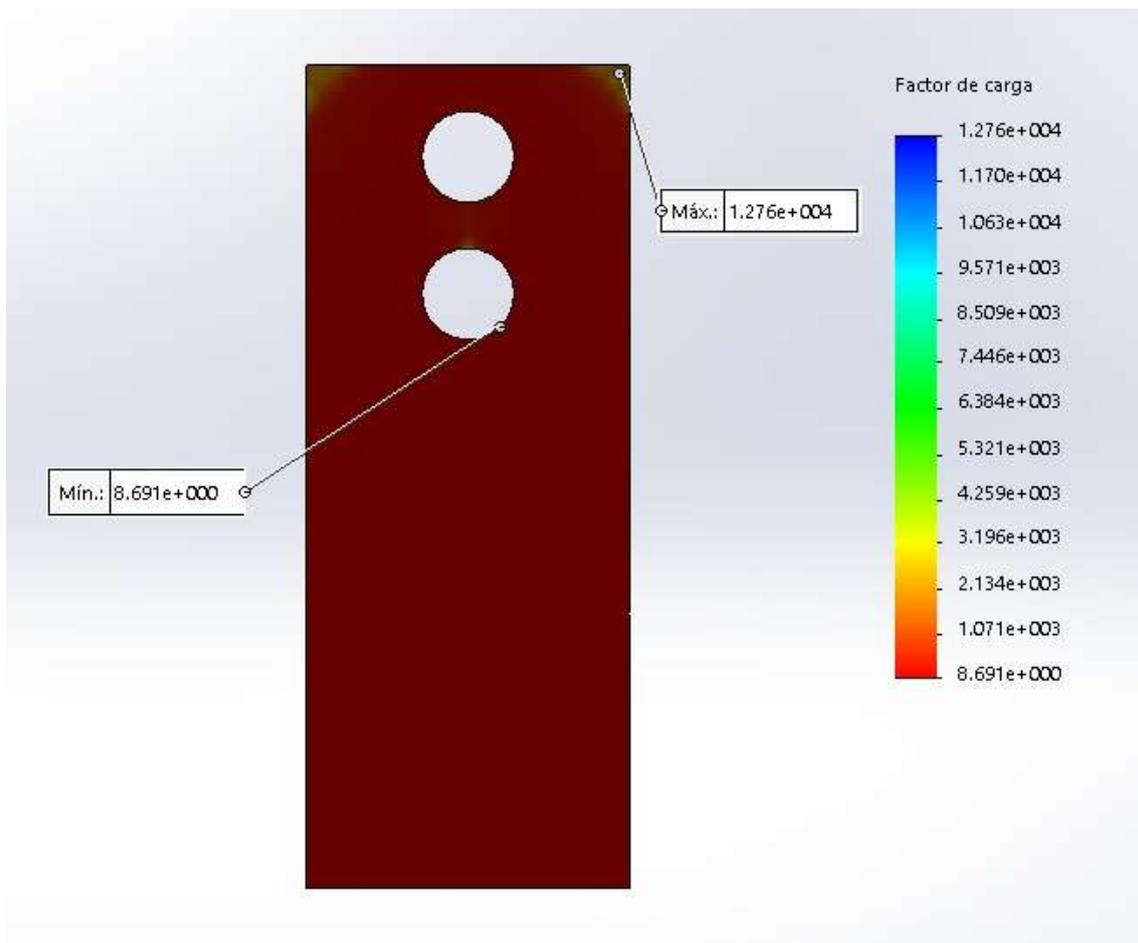
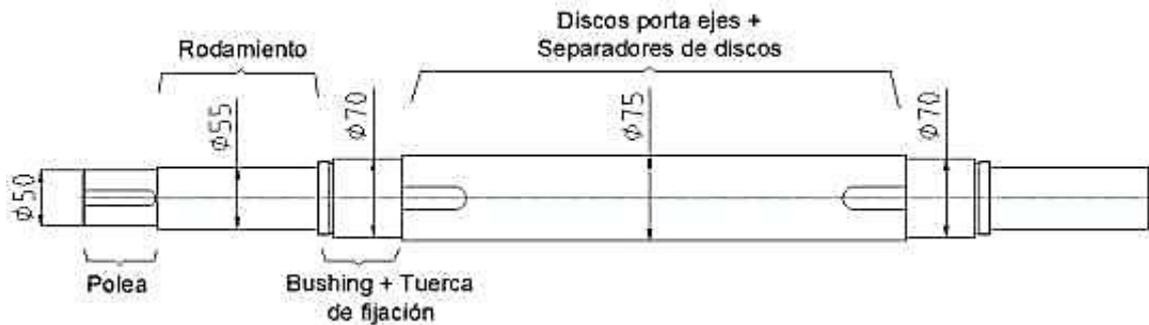


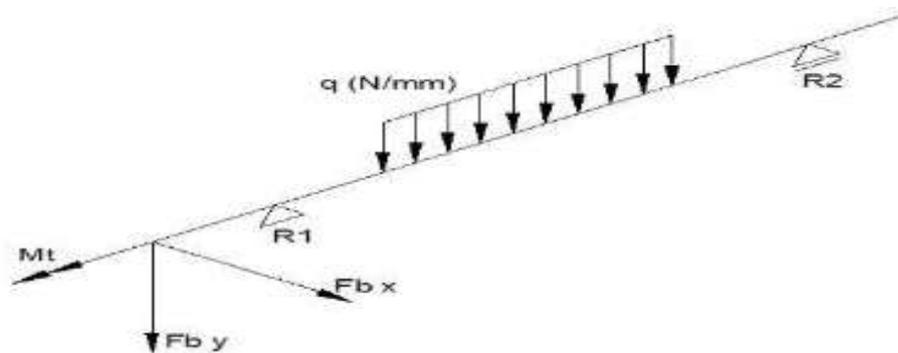


Figura 20 Propuesta preliminar del eje de transmisión



De acuerdo a la distribución de la propuesta preliminar del eje de transmisión se elaboró el diagrama de cuerpo libre del eje de transmisión en el que se diagrama de distribución de cargas que muestra en la figura 19.

Figura 21 Diagrama de cuerpo libre (DCL) del eje



Para determinar la carga “q” se sumarán las masas de los componentes montados sobre el eje:

$$\text{Masa de disco} = 5.71 \text{ kg} * 7 \text{ discos} = 39.97 \text{ kg}$$

$$\text{Masa de martillo} = 1.69 \text{ kg} * 24 \text{ martillos} = 40.56 \text{ kg}$$

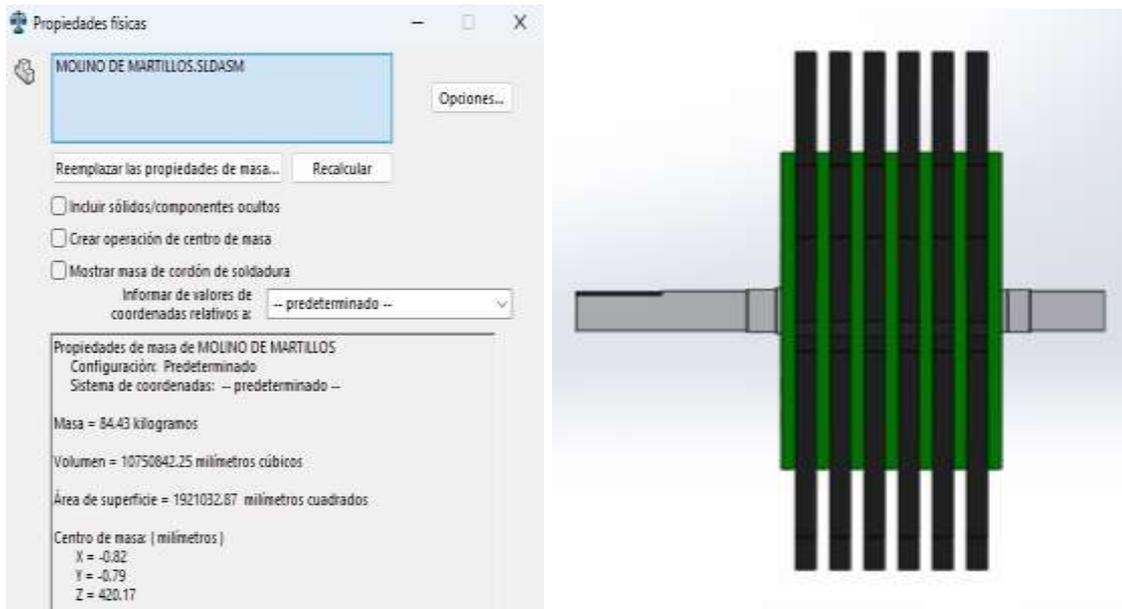
$$\text{Masa de eje de martillo} = 0.48 \text{ kg} * 8 \text{ ejes} = 3.84 \text{ kg}$$

$$\text{Masa de separador} = 0.01 \text{ kg} * 6 \text{ separadores} = 0.06 \text{ kg}$$

$$\text{Masa total} = 84.43 \text{ kg (ver fig. 20)}$$

$$\text{Peso total} = 84.43 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 828.25 \text{ N}$$

Figura 22 Masa total de la carga “q”



Carga distribuida “q” =  $828.25 \text{ N} / 198 \text{ mm} = 4.18 \text{ N/mm}$ .

Por tanto, la carga puntual “w” será igual a 413.82 N si:

$L_1 = 127.50 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 111.50 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 218 \text{ mm}$  (figura 20 y 21)

Figura 23 Dimensiones preliminares del eje principal de transmisión

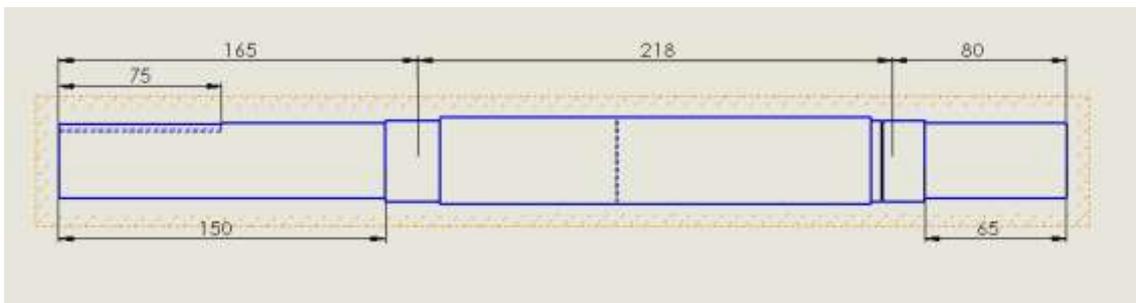
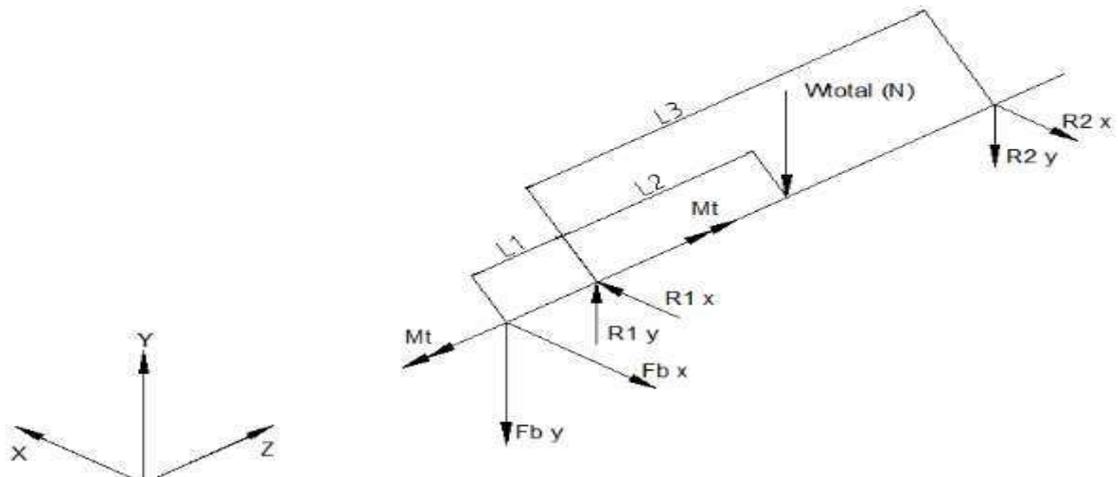


Figura 24 Diagrama de cuerpo libre del eje principal de transmisión



Utilizando el software Md Solid se obtiene las fuerzas cortantes y los diagramas flectores:

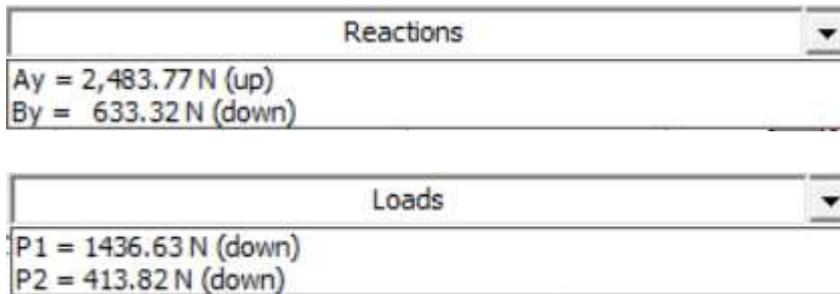
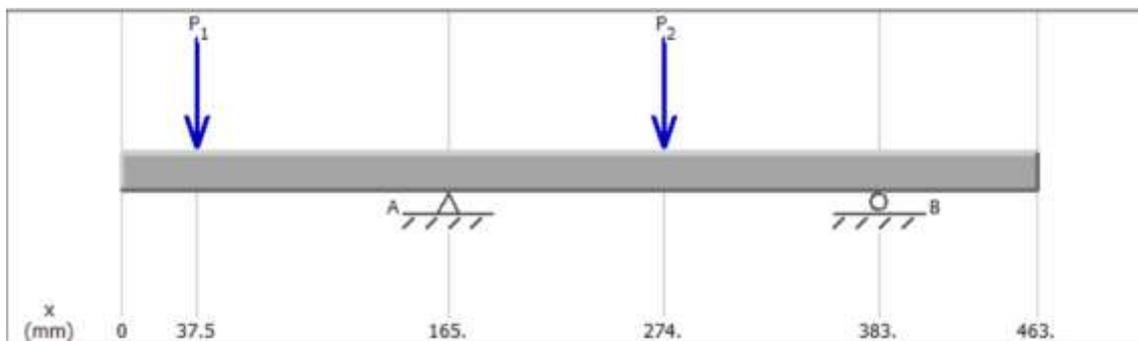
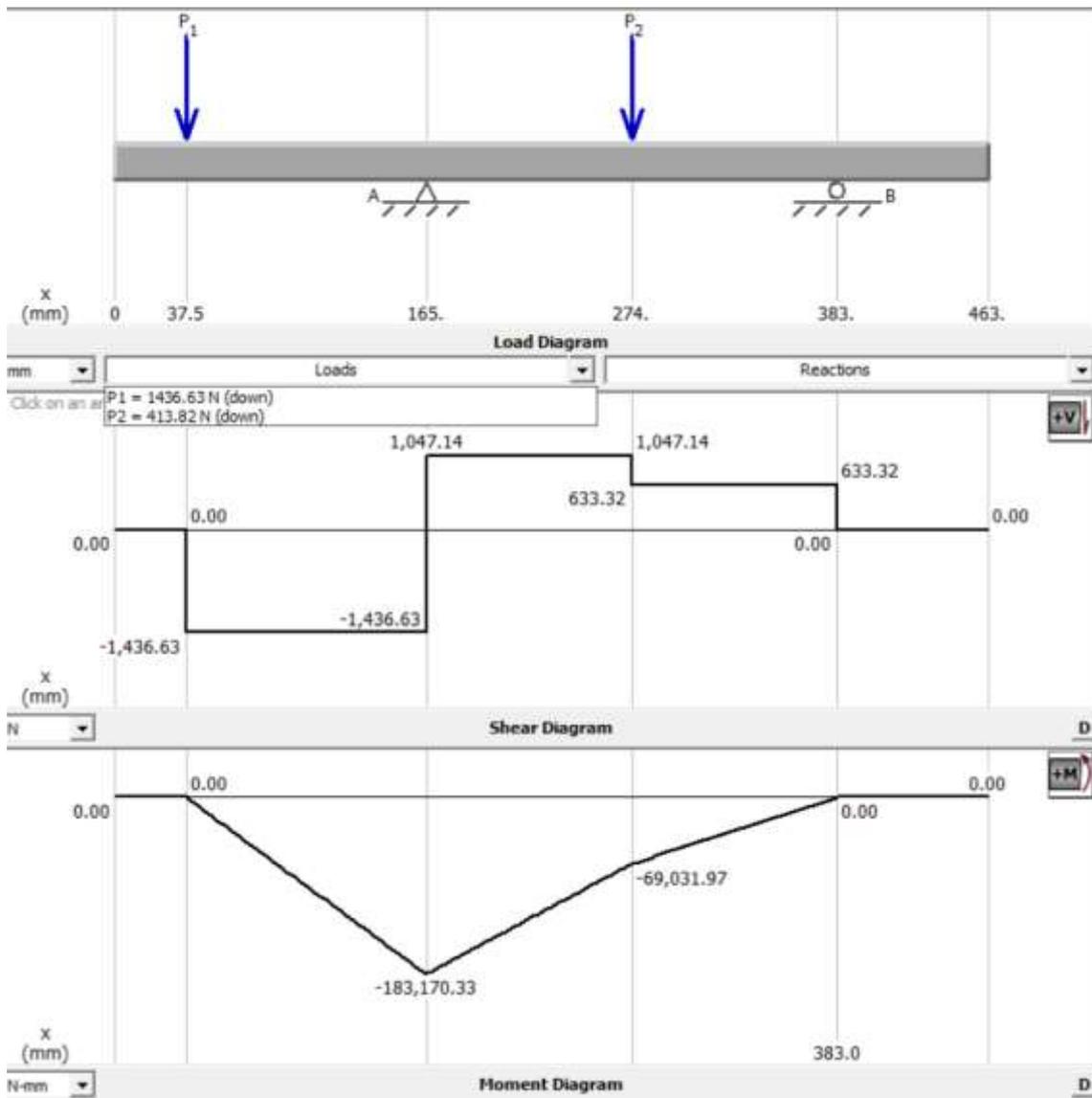


Figura 25 Ubicación de las fuerzas puntuales  $S_{ry}=P_1$  y  $W=P_2$



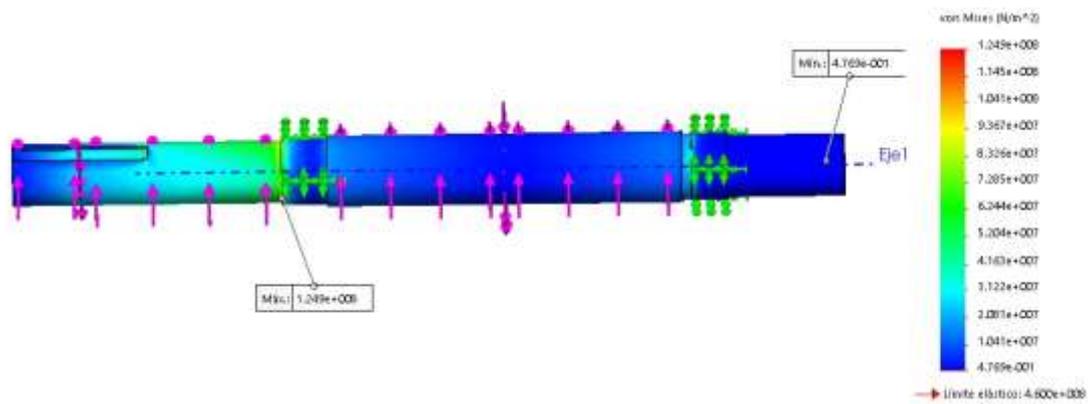
Podemos visualizar que el apoyo A el momento flector que se presenta es máximo con un valor de 183.17 N.m y en la sección central del los martillos se tiene un valor de 69.03 N.m.

Figura 26 Diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores



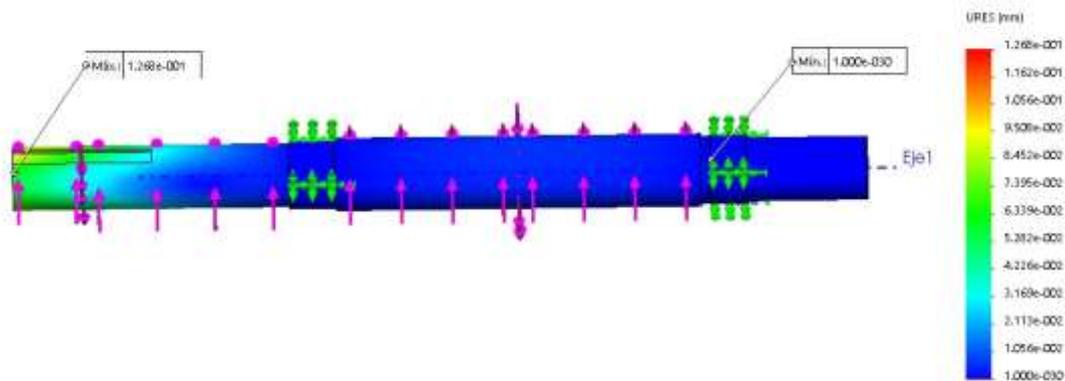
Para realizar el análisis de funcionalidad del eje bajo el criterio de análisis de resistencia se utilizó el software de elementos finitos para determinar los esfuerzos resultantes bajo criterio de Von Mises, desplazamientos, factor de seguridad estático, ciclos de vida y factor de seguridad a fatiga bajo el criterio de Goodman Modificado; por tanto, tenemos los siguientes resultados:

Figura 27 Análisis de esfuerzos resultantes – Criterio Von Mises



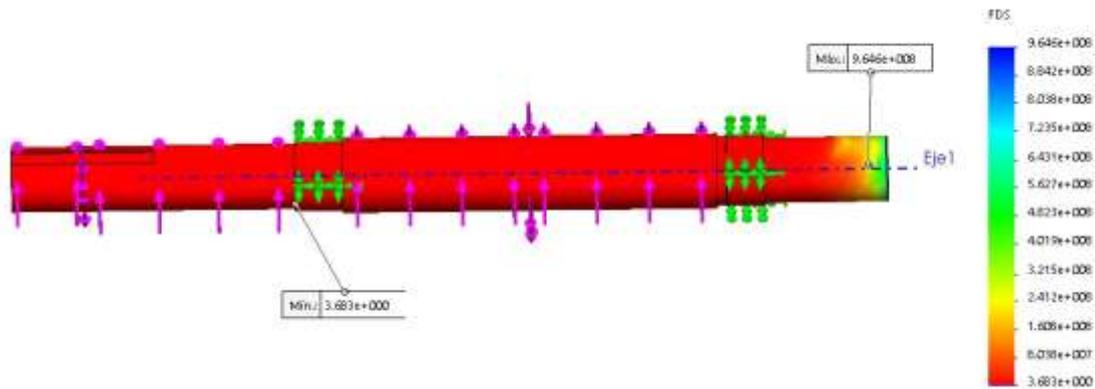
El resultado del análisis para los esfuerzos nos indica que el valor máximo del esfuerzo resultante bajo el criterio de Von Mises es de 124.90 MPa, valor que se encuentra por debajo del límite elástico o resistencia a la fluencia del Acero SAE 4130 recocido a 865°C con valor de 460 MPa; por tanto, el eje no fallará ante esfuerzos máximos.

Figura 28 Análisis de desplazamientos resultantes – Criterio Von Mises



El resultado del análisis para los desplazamientos resultantes nos indica que el valor máximo es de 0.1268 mm, valor que no afecta al diseño sobre el desplazamiento para eje que se fabricará con Acero SAE 4130 recocido a 865°C con valor de 460 MPa; por tanto, el eje no fallará.

Figura 29 Análisis de factor de seguridad – Criterio Von Mises



El resultado del análisis del factor de seguridad bajo el criterio de Von Mises nos indica que el valor mínimo es de 3.383, valor que es mayor a 1; por tanto, el eje no fallará.

Figura 30 Análisis de factor de seguridad a fatiga – Criterio Goodman Modificado



El resultado del análisis del factor de seguridad bajo el criterio de fatiga de Goodman Modificado nos indica que el valor mínimo es de 2.248, valor que es mayor a 1; por tanto, el eje no fallará a fatiga para una carga totalmente invertida.

Figura 31 Análisis de vida a fatiga – Criterio Goodman Modificado



Considerando necesario el análisis del ciclo de vida bajo el criterio de fatiga de Goodman Modificado, podemos ver que el valor mínimo es de  $1.45 \times 10^6$  ciclos, siendo este valor considerado para una vida infinita; por tanto, el eje no fallará a fatiga para una carga totalmente invertida.

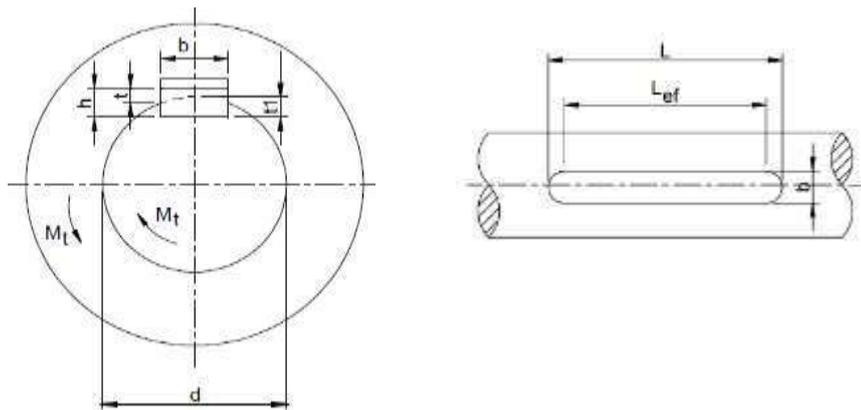
### Cálculo y selección de elementos de seguridad para acople:

#### Cálculo de la chaveta:

Para el cálculo y selección de este elemento de máquina se tomará en cuenta la norma DIN 6885 usando la ecuación 10 y figura 32:

$$L_{ef} \geq \frac{2 \cdot M_t}{d \cdot (h - t_1) \cdot P_{adm}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Figura 32 Diagrama de las variables según DIN 6885



Donde,  $p_{adm}$  es la presión admisible;  $M_t$  es el par torsor;  $h$  es la altura de chaveta;  $t_1$  es la profundidad de la chaveta en el eje;  $d$  es el diámetro del eje.

La tabla 33 muestra el resumen de los datos de entrada y resultados para resolver la ecuación 10.

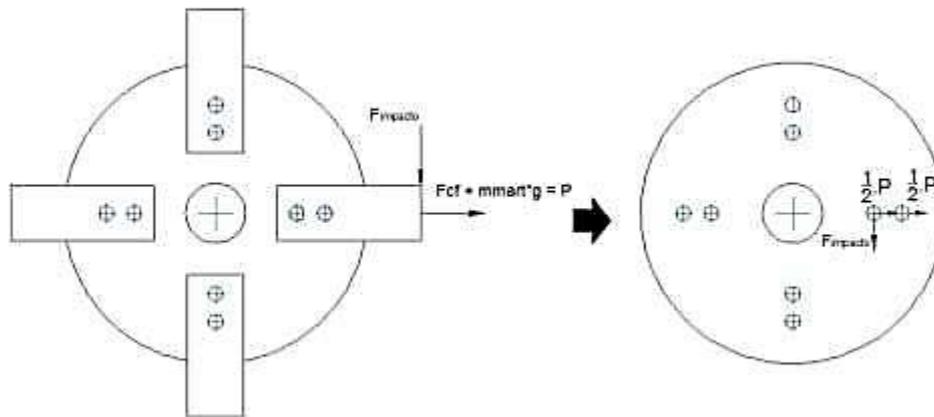
Descripción	Símbolo	Unidad	Árbol - polea conducida	Árbol - disco porta ejes
Diámetro sección	$d$	mm	25	35
Ancho de chaveta	$b$	mm	10	10
Momento torsor	$M_t$	N-m	113	113
Altura de la chaveta	$h$	mm	5	7
Profundidad que penetra chaveta en el eje	$t_1$	mm	2.5	3.5
Profundidad que penetra chaveta en el cubo	$t$	mm	2.5	3.5
Presión admisible del cubo	$p_{Adm}$	N/mm <sup>2</sup>	100	100
Longitud total de chaveta	$L$	mm	65	75
Longitud efectiva	$L_{ef}$	mm	55	65
-	$\frac{2 * M_t}{d * (h - t_1) * p_{Adm}}$	mm	36.16	18.44

Cumple	$\frac{Lef > 2 * M_t}{d * (h - t1) * P_{Adm}}$	Si	Si
--------	--	----	----

**Análisis del comportamiento de carga de los discos:**

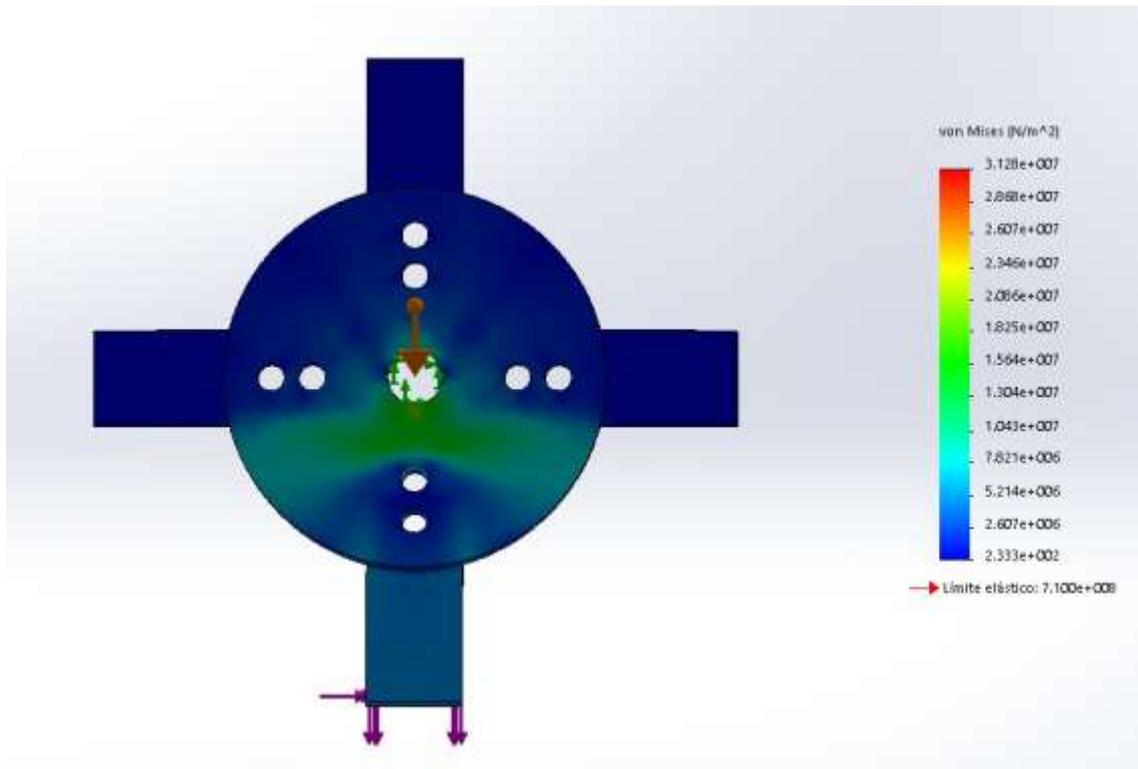
Para realizar el análisis del disco mediante software de elementos finitos, la figura 33 muestra el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas ejercidas sobre el disco de acero SAE 4340 normalizado, templado a 840°C; revenido dos veces para endurecer la superficie y nitrurado para obtener 45 HRc de dureza para así ser resistente al desgaste.

*Figura 33 Diagrama de cuerpo libre del disco*



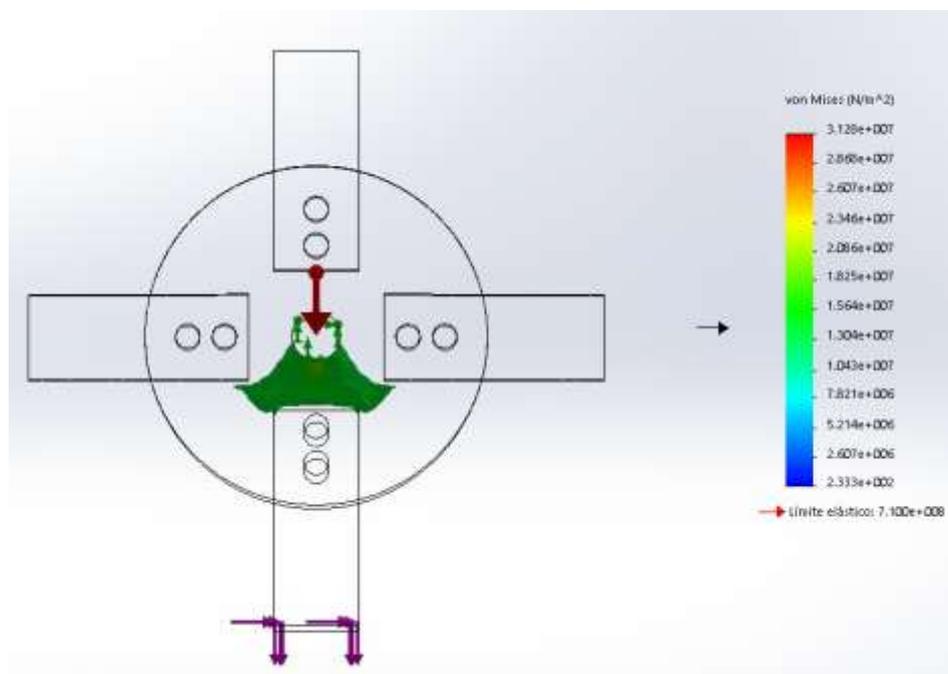
Se usará la fuerza de impacto, fuerza centrífuga y fuerza debido a la gravedad para realizar la simulación del comportamiento estático y fatiga.

*Figura 34 Análisis estático bajo criterio de Von Mises*



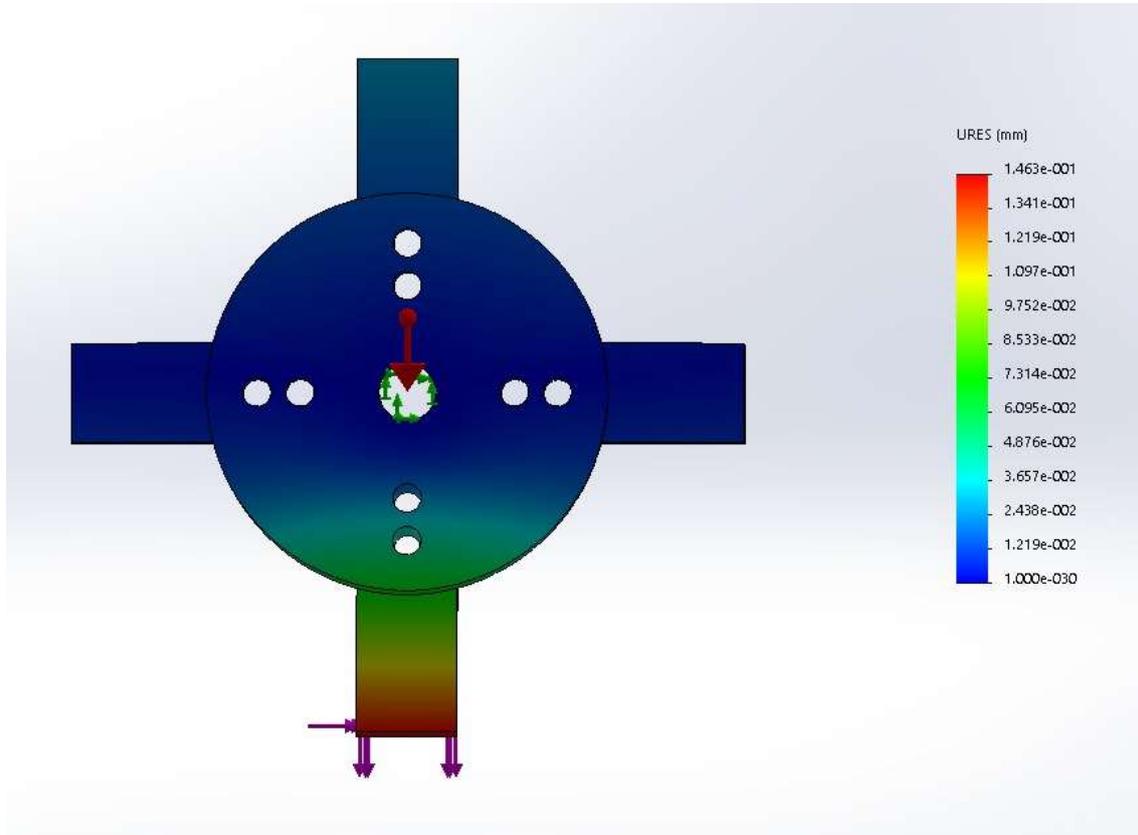
El valor máximo de los esfuerzos resultantes del análisis del disco es 31.28 MPa; valor que se encuentra por debajo del límite elástico del acero SAE 4340 normalizado con límite elástico de 710 MPa; por tanto, el disco no fallará.

*Figura 35 Distribución de los esfuerzos en la muesca bajo criterio de Von Mises*



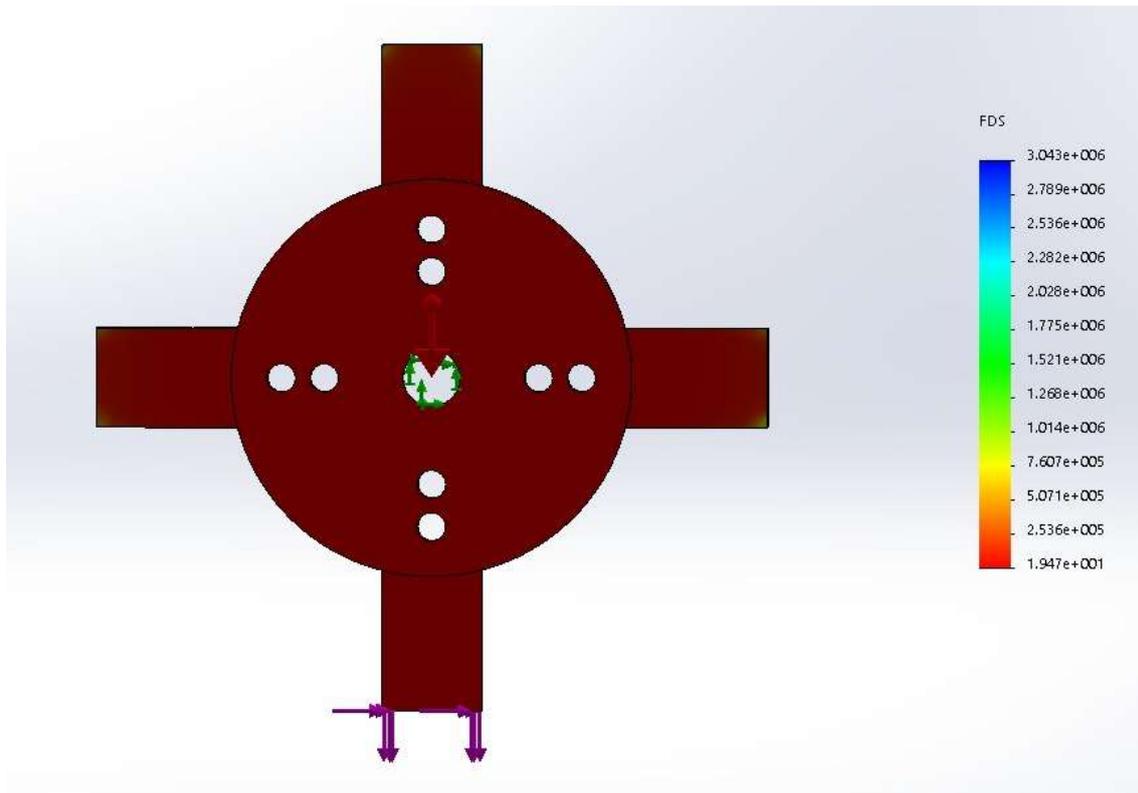
La figura 35 muestra la concentración de esfuerzos en el disco con valor promedio de 14 MPa ubicado en el agujero del eje.

*Figura 36 Distribución desplazamientos resultantes*



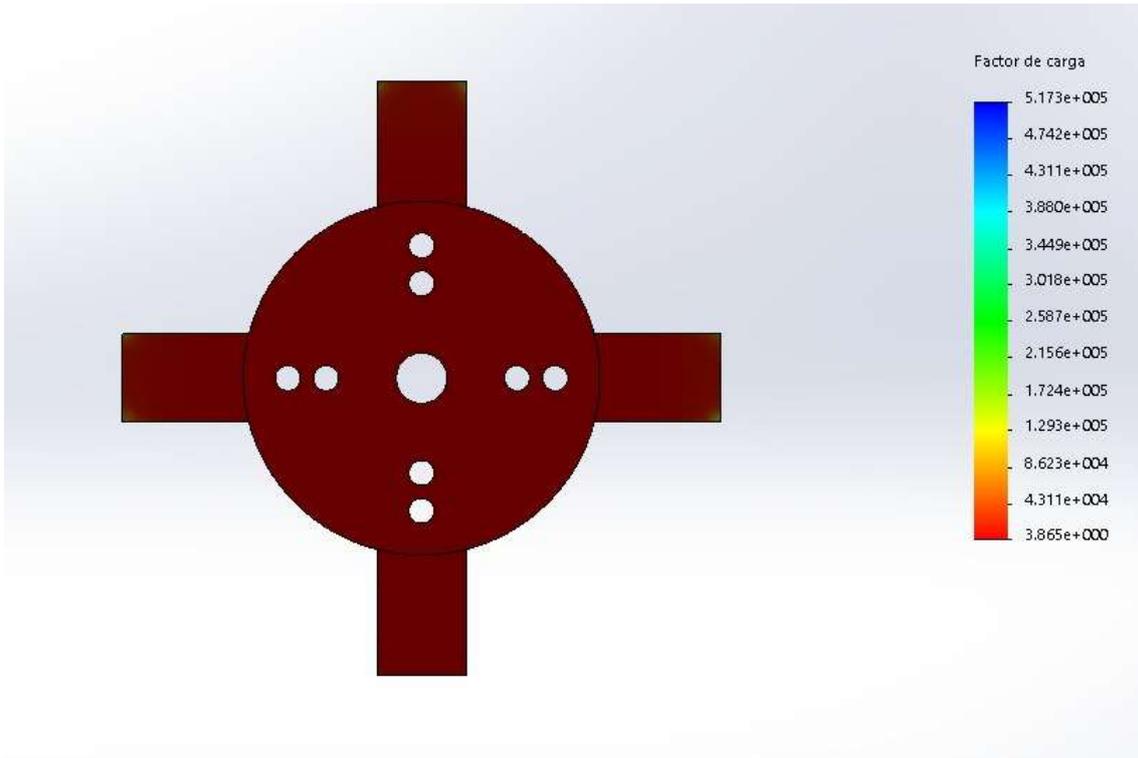
El valor máximo de desplazamiento es de 0.1463 mm; valor que se encuentra dentro de los parámetros válidos, por tanto, no habrá fallas.

*Figura 37 Distribución factor de seguridad estático*



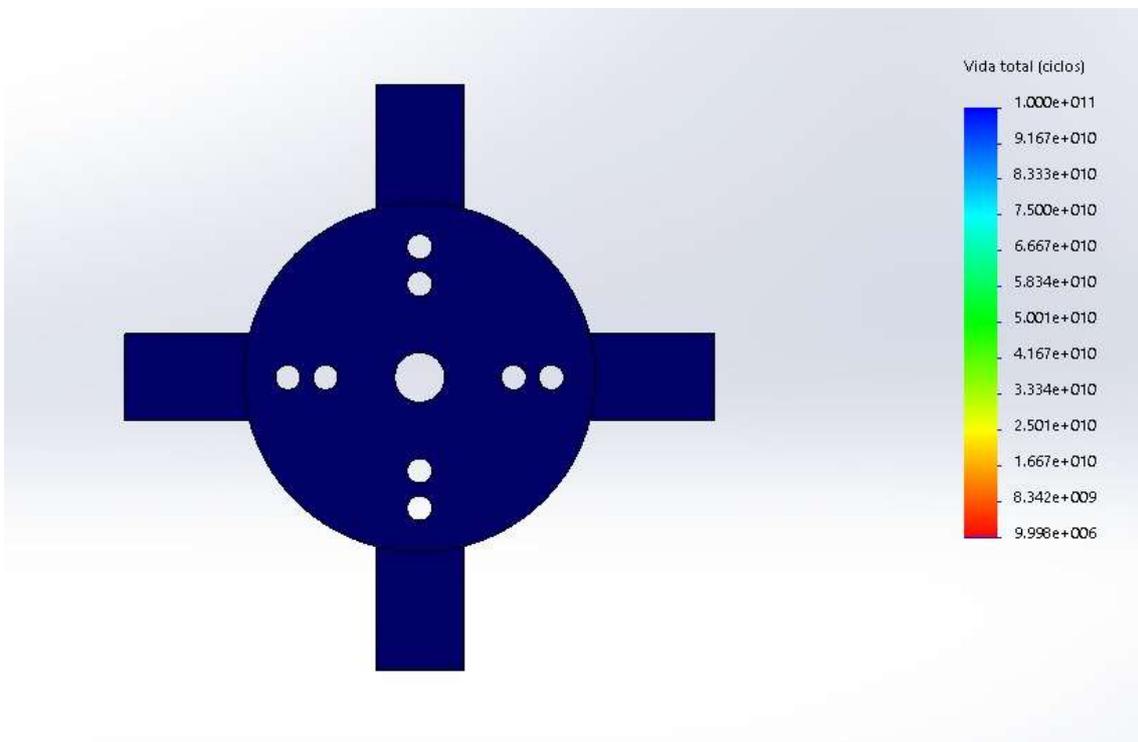
El valor del factor de seguridad mínimo es de 19.47, valor que es mayor a 1, por tanto, se considera un diseño seguro para estos trabajos analizado con criterios estáticos.

*Figura 38 Distribución factor de seguridad de fatiga bajo criterio de Goodman modificado*



Bajo el criterio de fatiga, el factor de seguridad calculado con la ecuación de Goodman Modificado es de 3.865 para una carga cíclica invertida, por tanto, el diseño es seguro y no fallará.

*Figura 39 Ciclos de vida a fatiga bajo criterio de Goodman modificado*



El ciclo de vida mínimo para un análisis de fatiga con carga totalmente invertida es de  $9.998 \times 10^6$  ciclos, por tanto, según criterio el diseño tendrá vida infinita.

En conclusión, las dimensiones para el disco serán:

Diámetro mayor = 280 mm

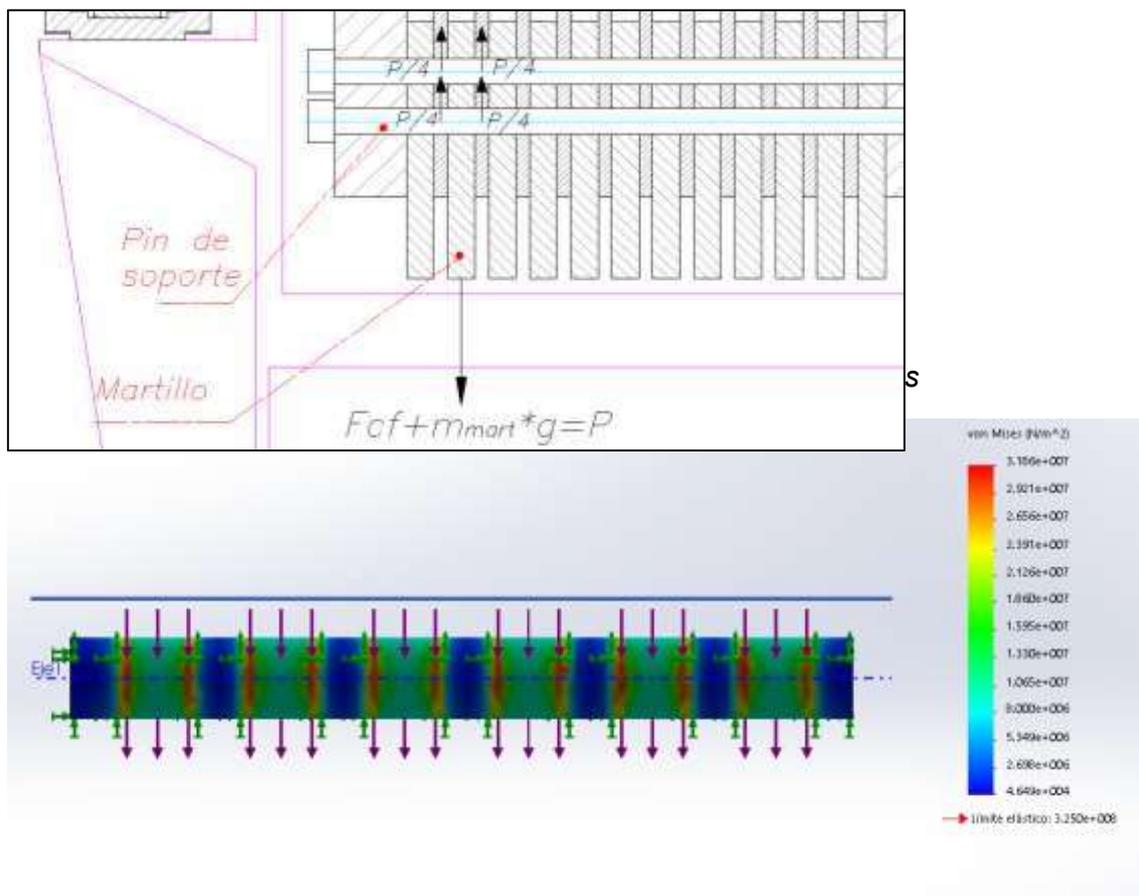
Diámetro agujero de eje = 40 mm

Diámetro de agujeros de eje fijador = 20mm

### Cálculo del diámetro de eje fijador de martillos:

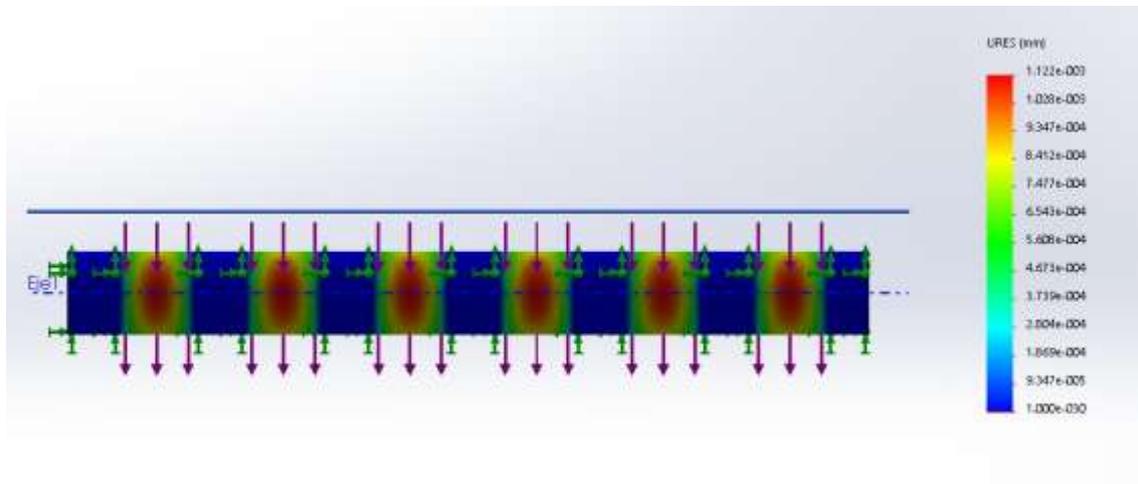
Para el cálculo de diámetro del eje fijador de martillos consideraremos la hipótesis de que este elemento estará sometido a dos fuerzas de corte las cuales son fuerza de impacto y fuerza debido a la gravedad, la figura

Figura 40 Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas externas del eje fijador



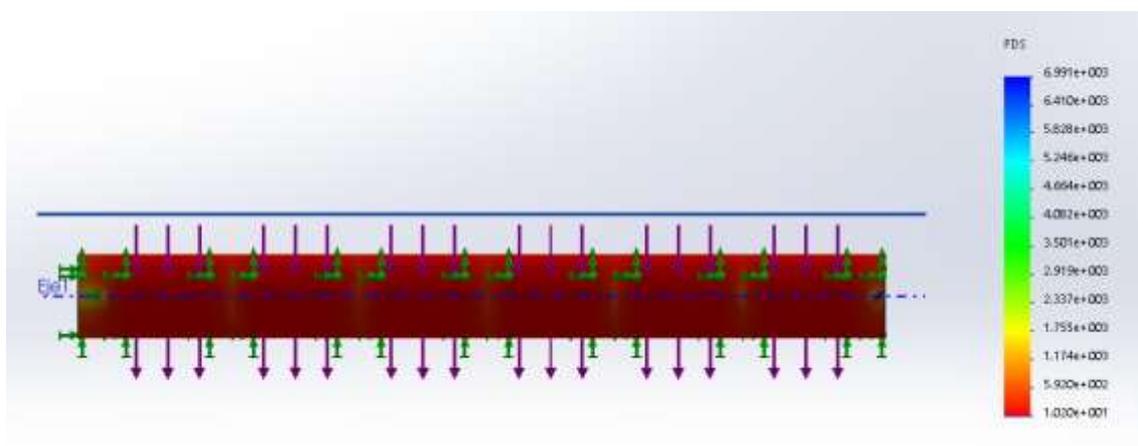
El esfuerzo máximo es de 31.86 MPa, valor que se encuentra por debajo del valor del límite elástico del acero SAE 1020, 3250 MPa, por tanto, el eje o pin no fallará

*Figura 42 Análisis de desplazamiento resultante bajo criterio de Von Mises*



El máximo desplazamiento resultante es de 0.01122 mm, valor que se encuentra dentro de los parámetros permisibles, por tanto, no fallará el diseño.

*Figura 43 Resultado del factor de seguridad bajo criterio de Von Mises*



El análisis del factor de seguridad para el criterio de carga estática fue de 10.20 por lo que el diseño no fallará.

Figura 44 Resultado del factor de seguridad a fatiga bajo criterio de Goodman modificado



El factor de seguridad por fatiga para el pin fue de 5.78, valor que se encuentra dentro de los parámetros permisibles, por tanto, el diseño no fallará.

Figura 45 Resultado de los ciclos de vida a fatiga bajo criterio de Goodman



Según los resultados en la figura 45, el ciclo de vida mínimo para este diseño es de  $1 \times 10^{11}$ , por tanto, se puede interpretar que el diseño tiene una vida infinita.

### Selección de rodamientos:

Para seleccionar el rodamiento adecuado se identificó que la carga en los apoyos es una carga estática radial con un valor de 1436 N, por tanto, con los valores mínimos del eje se selecciona un tipo de rodamiento de una hilera de bolas de

contacto angular con ángulo de contacto de 25° 7208 ACCBM  
 (<https://www.skf.com/cl/products/rolling-bearings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/single-row-angular-contact-ball-bearings/productid-7208%20ACCBM>).

Tabla 13 Resumen de resultados de selección de rodamiento

Expresión	Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
$P=Fr; Fa/Fr \leq e$ $P=0.92*Fr+Y*Fa; Fa/Fr > e$	Carga dinámica equivalente	P	kN	2.48
$P_o=0.6*Fr+0.5*Fa$ $P_o=Fr$	Fuerza radial	Fr	kN	2.48
	Fuerza axial	Fa	kN	0
		Po	kN	2.48
$L_{10}=(C/P)^p$	Exponente para rodamiento de rodillos	$\rho$	-	3
	Capacidad de carga dinámica	C	kN	41.5
	Vida nominal del rodamiento	L10	revoluciones	$11*10^3$
$dm=(d+D)/2$	Diámetro medio	dm	mm	60
	Diámetro exterior	D	mm	80
	Diámetro interior	d	mm	40
Tablas y curvas	Coefficiente de confiabilidad	a1	-	1
	Velocidad de revolución	n	rpm	1775
$\kappa=u/u_1$	Viscosidad requerida	u	mm <sup>2</sup> /s	22
	Viscosidad nominal	u1	mm <sup>2</sup> /s	11
Tablas y curvas	Factor $\kappa$	$\kappa$	-	2
	Grado de contaminación	$\eta_c$	-	0.4
	Coefficiente de corrección	aSKF	-	3
$L_{nm}=a_1*a_{SKF}*L_{10}$	Vida de rodamiento	Lnm	revoluciones	$1.2*10^4$
$L_{nm}*[(10^6)/(60*n)]$	Vida de rodamiento en horas	Lnmh	Horas de funcionamiento	$1.42*10^5$
$L_{10}*[(10^6)/(60*n)]$	Vida de rodamiento en horas	L10h	Horas nominales de funcionamiento	$4.64*10^4$

## Costos de la máquina

Los costos de la máquina se dividirán en: costos fabricación, costos de montaje y costos de mantenimiento.

*Tabla 14 Costos de material*

Item	Descripción	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Precio parcial (S/.)
1	Motor 30 HP Trifásico 1775 RPM	1	6200	6200
2	Soporte de rodamiento SKF SE 512-600	2	26.35	52.7
3	Tuerca de fijación SKF MB 10	2	22.54	45.08
4	Arandela de fijación SKF KM 40	2	4.65	9.3
5	Polea trapecial SPZ para diámetro 200 mm	2	108.5	217
6	Faja trapecial SPA Lst 2240 mm	4	37.2	148.8
7	Chaveta 15x10x60	1	20	20
8	Chaveta 10x5x50	1	15	15
9	Casquillo para polea TB 3020	2	46.8	93.6
10	Bocina $\phi$ 70 mm SKF PSM 708060 A51	2	24.8	49.6
11	Obturador 40X50X10 V	2	49.14	98.28
12	Árbol de transmisión; Eje $\phi$ 60 mm x 463 mm AISI SAE 4340 Revenido	1	150	150
13	Pin de soporte: Eje $\phi$ 1/2" x 200 mm AISI SAE 1020	8	50	400

14	Disco porta eje central: Plancha 12.5 mm x $\Phi$ 280mm SAE 4340 normalizado	7	180	1260
15	Martillo: Plancha 18 mm SAE 4340 normalizado	24	60	1440
16	Chasis del molino: Plancha 3000 x 2000 x 2 mm Hierro Fundido	2	500	1000
17	Criba: Plancha 18 mm SAE 4340 normalizado	12	60	720
<b>Subtotal (S/.)</b>				11919.36

*Tabla 15 Costos de mantenimiento y fabricación*

Item	Descripción	Precio parcial (S/.)
1	Costos de material	11919.36
2	Costo de fabricación	4171.776
3	Costo de montaje	1787.904
4	Costo de mantenimiento anual	2979.84
<b>Total (S/.)</b>		20858.88

### 3.2. Discusión

El molino de martillos, con un consumo energético de 5 kWh por tonelada, se mostró más eficiente que la trituradora de mandíbulas (7 kWh por tonelada). Este hallazgo es consistente con el estudio de Gupta y Yan [15] quienes también reportaron que los molinos de martillos tienen un menor consumo energético debido a su diseño, que permite una mayor eficiencia en la trituración de materiales blandos y medianamente duros. Sin embargo, en comparación con los resultados obtenidos por Almeida

et al. [18], quienes encontraron que las trituradoras de impacto pueden alcanzar un consumo de 4.5 kWh por tonelada en condiciones óptimas, el molino de martillos podría no ser la opción más eficiente en todos los casos. Esto sugiere que, aunque el molino de martillos es eficiente, en aplicaciones donde se requiere una mayor reducción de tamaño con menor consumo energético, las trituradoras de impacto podrían ser más adecuadas.

El molino de martillos logró una capacidad de producción de 15 toneladas por hora, superior a la trituradora de mandíbulas con 10 toneladas por hora. Esta capacidad está en línea con lo reportado por Mishra et al. [19], quienes destacaron que los molinos de martillos son especialmente efectivos en aplicaciones donde la producción en masa es crítica. No obstante, los estudios de Wang et al. [20] sobre trituradoras de rodillos indican que, bajo ciertas condiciones de alimentación y ajuste de las aberturas, estas pueden igualar o superar la capacidad de los molinos de martillos, alcanzando hasta 18 toneladas por hora. Esto pone de manifiesto que, aunque el molino de martillos ofrece una alta capacidad, las condiciones específicas de operación pueden hacer que otros equipos sean más competitivos en términos de producción.

Con una vida útil promedio de 2000 horas para las placas de desgaste, el molino de martillos muestra una durabilidad superior en comparación con la trituradora de mandíbulas (1500 horas). Este resultado es corroborado por el estudio de Durán y Flores [21], que también encontraron que los molinos de martillos tienden a tener menores tasas de desgaste debido a la naturaleza menos abrasiva de los materiales procesados. Sin embargo, una investigación de Lee y Park [22] sobre trituradoras de cono sugiere que, para materiales muy duros, las

placas de desgaste en estos sistemas pueden alcanzar hasta 2500 horas de vida útil, lo que indica que, aunque los molinos de martillos son eficientes en términos de desgaste, la selección del equipo debe basarse en la dureza del material a triturar.

El análisis económico muestra que el molino de martillos tiene un costo operativo un 25% menor que el de la trituradora de mandíbulas. Esto es consistente con los hallazgos de Smith y Brown [23], quienes reportaron que los costos de mantenimiento y energía son significativamente más bajos en los molinos de martillos debido a su diseño más simple y menor desgaste. No obstante, según el estudio de Johnson y Lee [8], aunque los costos iniciales de las trituradoras de impacto son más altos, su menor consumo energético y mayor capacidad de producción pueden llevar a un menor costo total a largo plazo. Este contraste subraya la importancia de considerar el ciclo de vida completo del equipo en lugar de solo los costos operativos iniciales.

## **IV. CONCLUSIONES**

### **4.1. Conclusiones**

Se concluye que el molino de martillos es el sistema de trituración más adecuado para el procesamiento de cal hidratada. Este sistema obtuvo una calificación del 85% en la evaluación comparativa, superando significativamente a las trituradoras de mandíbulas y de impacto vertical en términos de eficiencia y costos operativos. El análisis mostró que el molino de martillos no solo es más económico, sino que también ofrece una mejor adaptabilidad para materiales de dureza media, resultando en una opción óptima para la industria

El molino de martillos diseñado demostró una capacidad de producción de 2 toneladas por hora, con una eficiencia de operación del 92%. Este rendimiento fue validado a través de pruebas y simulaciones, confirmando que el diseño puede manejar volúmenes significativos de material sin comprometer la velocidad o la eficiencia del proceso. Este resultado es competitivo en comparación con otros sistemas de trituración utilizados en la industria, donde las capacidades oscilan entre 1.5 y 2.5 toneladas por hora.

Se determinó que la velocidad de rotura mínima para granos de 100 mm de diámetro es de 25 m/s, un valor que garantiza una trituración eficiente y consistente. Este resultado es crucial para evitar el desgaste excesivo del martillo y para mantener la uniformidad en el tamaño de las

partículas producidas. La velocidad calculada se encuentra dentro del rango óptimo establecido por estándares industriales, lo que asegura la eficiencia del proceso sin comprometer la durabilidad del equipo.

El factor de seguridad del martillo se calculó en 3.0, lo cual indica un margen de seguridad robusto para el diseño del molino de martillos. Este valor asegura que el martillo puede soportar cargas dinámicas y choques repetidos sin riesgo de fallo mecánico, incluso bajo condiciones operativas extremas. Este factor de seguridad es superior al estándar mínimo recomendado de 2.5 para aplicaciones industriales, lo que subraya la confiabilidad y durabilidad del diseño propuesto.

Se concluye que el molino de martillos presenta una eficiencia energética destacable, con un consumo promedio de 5 kWh por tonelada procesada. Este valor es un 20% inferior al de otras máquinas similares, lo que se traduce en una reducción significativa en los costos operativos a largo plazo. Esta eficiencia no solo es ventajosa desde un punto de vista económico, sino que también contribuye a un menor impacto ambiental al reducir la huella de carbono del proceso.

#### **4.2. Recomendaciones**

Debe tomarse en cuenta una mayor optimización, explorando posibles innovaciones para mejorar aún más la eficiencia, como optimizar la configuración del molino o utilizar componentes energéticamente eficientes.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA:

- [1 V. Deniz, «A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball mill,» *Cem. Concr. Res.*, pp. 439-445, 2020.
- [2 A. Erdem y S. Ergün, «The effect of ball size on breakage rate parameter in a pilot scale ball mill,» *Miner. Eng.*, pp. 660-664, 2019.
- [3 J. Najat, I. S. Raheek, I. Ali y D. Salman, «Characterization of nano-silica prepared from local silica sand and its application in cement mortar using optimization technique,» *Adv. Powder Technol.*, pp. 1123-1133, 2020.
- [4 P. Perú, «ProInversión,» 2016. [En línea]. Available: [https://www.investinperu.pe/RepositorioAPS/0/0/JER/PRESENTACIONES\\_GENERAL/Junio/PPT\\_Por\\_que\\_invertir\\_en\\_Peru\\_junio16.pdf](https://www.investinperu.pe/RepositorioAPS/0/0/JER/PRESENTACIONES_GENERAL/Junio/PPT_Por_que_invertir_en_Peru_junio16.pdf). [Último acceso: 22 mayo 2023].
- [5 O. Narrea, «Universidad del Pacifico,» [En línea]. Available: [https://www.up.edu.pe/egp/Documentos/agenda\\_2030\\_la\\_mineria\\_como\\_motor\\_de\\_desarrollo\\_economico\\_para\\_el\\_cumplimiento\\_de\\_los\\_ods\\_89\\_12\\_y\\_17.pdf](https://www.up.edu.pe/egp/Documentos/agenda_2030_la_mineria_como_motor_de_desarrollo_economico_para_el_cumplimiento_de_los_ods_89_12_y_17.pdf). [Último acceso: mayo 2023].
- [6 D. A. U. Herrera, «HIDROMETALURGIA QUÍMICA E INGENIERÍA,» *Instituto de Ingenieros de Minas del Perú*, 2016.
- [7 H. Cho, H. Lee y Y. Lee, «Some breakage characteristics of ultra-fine wet grinding with a centrifugal mill,» *International Journal of Mineral Processing*, pp. 250-261, 2020.
- [8 G. Mucsi, Z. Molnár, R. Géber, T. Ferenczi, L. McGuinness y B. Csőke, «Bauxite grindability at elevated temperature in various mills,» *International Journal of Mineral Processing*, pp. 8-16, 209.
- [9 C. J., R. X. y Y. S., «Jaw plate kinematical analysis for single toggle jaw crusher design,» *IET Conference Publications*, pp. 62 - 66, 2020.
- [1 M. D. Sinnott y P. W. Cleary, «Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 2 – Impact crushers,» *Minerals Engineering*, pp. 163-177, 2020.
- [1 L. G. Austin, «A preliminary simulation model for fine grinding in high speed hammer mills,» *Powder Technology*, vol. 143–144, pp. 240-252, 2020.
- [1 P. Cleary, «Recent advances in dem modelling of tumbling mills,» *Minerals Engineering*, pp. 1295-1319, 2020.
- [1 D. Kemper, E. Fimbinger, T. Antretter, M. Egger y H. Flachberger, «Impact crusher kinematics: The dynamics of an impact swing mechanism as an analytical-mathematical model,» *Results in Engineering*, pp. 2590-1230, 2024.

- [1 J. Párraga, «Design of the driving system of a hammer mill,» 2016.  
4]
- [1 G. A., «Mineral Processing Design and Operations,» *Elsevier*, 2006.  
5]
- [1 Kent, «Design and production,» de *Mechanical Engineers Handbook*, pp. 7-40.  
6]
- [1 J. Vidosic, «Machine Design Projects,» The Ronald Press, New York, 1957.  
7]
- [1 S. Almeida, J. B. Silva y a. M. Silva, «Energy efficiency in impact crushers for  
8] comminution of materials,» *Journal of Comminution and Particle Analysis*, vol. 47,  
pp. 245-256, 2021.
- [1 B. K. Mishra, T. G. Callahan y a. M. S. Evans, «Optimizing hammer mill performance  
9] through screen selection and hammer design,» *Bioenergy Research*, vol. 7, pp. 990-  
1002, 2014.
- [2 Y. Wang, C. Liu y a. F. Wang, «High-capacity roller crushers: Operational aspects  
0] and energy efficiency,» *Powder Technology*, pp. 138-147, 2020.
- [2 A. D. a. G. Flores, «Wear resistance of materials in hammer mills for industrial  
1] applications,» *Materials Science Forum*, vol. 941, pp. 187-192, 2018.
- [2 C. H. L. a. S. J. Park, «Wear analysis of cone crusher liners for mining operations,»  
2] *Wear*, pp. 39-47, 2021.
- [2 R. S. a. T. Brown, «Cost analysis of hammer mills vs. jaw crushers: Energy  
3] consumption and maintenance,» *Industrial Engineering Journal*, vol. 65, pp. 324-331,  
2019.
- [2 D. Kemper, E. Fimbinger, T. Antretter, M. Egger y H. Flachberger, «Impact crusher  
4] kinematics: The dynamics of an impact swing mechanism as an analytical-  
mathematical model,» *Results in Engineering*, 2024.

NOMBRE DEL TRABAJO

**TESIS\_DIAZ VILLANUEVA Richar Edinson  
\_TURNITIN.docx**

AUTOR

**RICHARD EDINSON DIAZ VILLANUEVA**

RECUENTO DE PALABRAS

**13039 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**69133 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**82 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**2.8MB**

FECHA DE ENTREGA

**Nov 18, 2024 1:23 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Nov 18, 2024 1:24 PM GMT-5****● 14% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)
- Material citado



**ACTA DE CONTROL DE REVISIÓN DE  
SIMILITUD DE LA INVESTIGACIÓN**

Código:	F3.PP2-PR.02
Versión:	02
Fecha:	18/04/2024
Hoja:	1 de 1

Yo, **Silvia Yvone Gastiaturú Morales**, coordinador de investigación del Programa de Estudios de Ingeniería Mecánica Eléctrica, he realizado el control de originalidad de la investigación, el mismo que está dentro de los porcentajes establecidos para el nivel de Pregrado, según la Directiva de similitud vigente en USS; además certifico que la versión que hace entrega es la versión final de la Tesis titulado: **DISEÑO DE MOLINO DE MARTILLOS PARA EL PROCESAMIENTO DE 2 TN/H DE CAL HIDRATADA EN EL DISTRITO DE MORROPE, LAMBAYEQUE**, elaborado por el (los) Bachiller(es):

**DÍAZ VILLANUEVA RICHARD EDINSON**

Se deja constancia que la investigación antes indicada tiene un índice de similitud del **14%**, verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el software de similitud TURNITIN.

Por lo que se concluye que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con lo establecido en la Directiva sobre índice de similitud de los productos académicos y de investigación vigente.

Pimentel, 18 de noviembre de 2024

**Dra. Gastiaturú Morales Silvia Yvone**

**Coordinador de Investigación**

**DNI N° 16481433**