

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE UN MÓDULO EDUCATIVO DE UN MOLINO SAG PARA  
EL ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE MOLIENDA**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico**

**AUTOR:**

Kevin Giancarlo Pérez Castillo

**ASESOR:**

Dr. Ing. Jorge Hernán Alencastre Miranda

Lima, Setiembre, 2024

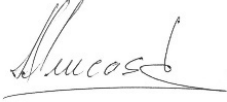
### Informe de Similitud

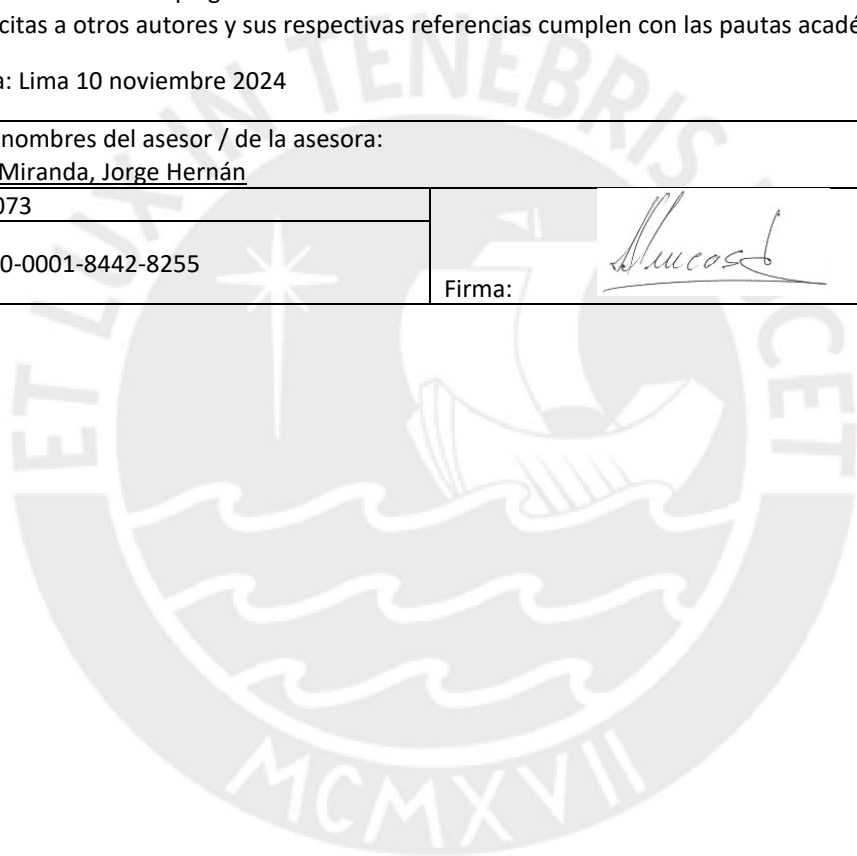
Yo, Jorge Hernán Alencastre Miranda, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado DISEÑO DE UN MODULO EDUCATIVO DE UN MOLINO SAG PARA EL ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE MOLIENDA del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) Kevin Giancarlo Pérez Castillo.

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud del 11%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 05/11/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 10 noviembre 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Alencastre Miranda, Jorge Hernán</u>	
DNI:10588073	
ORCID: 0000-0001-8442-8255	
Firma:	



# RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo diseñar un módulo educativo de un molino SAG que permita observar y modificar los parámetros de operación para estudiar cualitativamente los mecanismos de molienda. El desarrollo de este módulo responde a la necesidad de mejorar la enseñanza de los procesos de conminución en los molinos SAG, un área crucial en la industria minera.

El proyecto sigue la metodología de diseño VDI 2221, la cual abarca desde la recopilación de información sobre el estado del arte de los molinos hasta la elaboración de planos de fabricación. Se establecen requisitos claros para el diseño, se evalúan diversas alternativas de solución y se desarrolla la ingeniería de detalle que incluye simulaciones en 3D y análisis mediante el método de elementos finitos.

Los resultados incluyen un diseño que permite la interacción con los parámetros operativos del molino, proporcionando una herramienta educativa útil tanto para la comprensión teórica como para la validación práctica de los cálculos. Además, el módulo ofrece la posibilidad de realizar experimentos que mejoran la eficiencia de los procesos de molienda al permitir la observación directa de los mecanismos involucrados.

En conclusión, el módulo propuesto cumple con los objetivos planteados, facilita una mejor comprensión de los mecanismos de molienda y abre nuevas vías para futuras investigaciones en el ámbito de la minería.



# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

### TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : DISEÑO DE UN MÓDULO EDUCATIVO DE UN MOLINO SAG  
PARA EL ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE MOLIENDA

ÁREA : Diseño

PROPUESTO POR : Dr. Ing. Jorge Hernán Alencastre Miranda

ASESOR : Dr. Ing. Jorge Hernán Alencastre Miranda

TESISTA : Kevin Giancarlo Pérez Castillo

CÓDIGO : 20120202

FECHA : 22/11/2022

#### **DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

Las plantas concentradoras están expuestas a cambios constantes debido a las necesidades de las mineras. Estos cambios se deben por un aumento de producción, ya que estas desean generar más concentrado de mineral, por lo que fuerzan a los equipos a trabajar fuera de condiciones nominales. En el caso de los molinos, cuentan con un parámetro restrictivo, siendo este el diámetro, el cual limita la operación del aumento de carga para molienda. Entonces, lo que se busca establecer para los molinos es una mejora en la eficiencia enfocada en términos de producción, generando con ello la necesidad de investigación y desarrollo.

En la actualidad, existen diferentes molinos de laboratorio, los cuales están destinados a la caracterización de los minerales. Sin embargo, estos no permiten visualizar e interactuar con la formación de los mecanismos de molienda, los cuales dependen de los parámetros de operación como lo son la velocidad de giro, el número de levantadores y el porcentaje de carga.

La presente tesis busca diseñar un módulo educativo de un molino SAG utilizando la metodología de diseño VDI 2221 que permita la visualización de los mecanismos de molienda y facilite la interacción, y modificación de los parámetros de operación para determinar un proceso de molienda eficiente.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**DISEÑO DE UN MÓDULO EDUCATIVO DE UN MOLINO SAG PARA EL  
ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE MOLIENDA**

Introducción

1. Generalidades
2. Concepción del diseño
3. Costos de fabricación

Conclusiones

Bibliografía

Anexos - Planos

---

Dr. Ing. Jorge Hernán Alencastre Miranda

Asesor



*Dedico este trabajo a mis amados padres, por su esfuerzo y sacrificio en mi formación profesional, y por enseñarme a perseverar. A mi hermano y a mis tíos, por su apoyo constante en los momentos más difíciles. A Rossangel, por tu amor y comprensión, y por estar siempre a mi lado. A mis queridas mascotas Romeo, Vali y Lola, que con su compañía y alegría han llenado de luz mi vida. A todos ustedes, les dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi asesor, Jorge Alencastre, por darme la oportunidad de trabajar a su lado. Su guía y mentoría han sido invaluable para mi desarrollo profesional. Gracias por motivarme a seguir forjándome como ingeniero y por compartir conmigo su conocimiento y pasión por la ingeniería. Su apoyo y confianza han sido fundamentales en este camino.

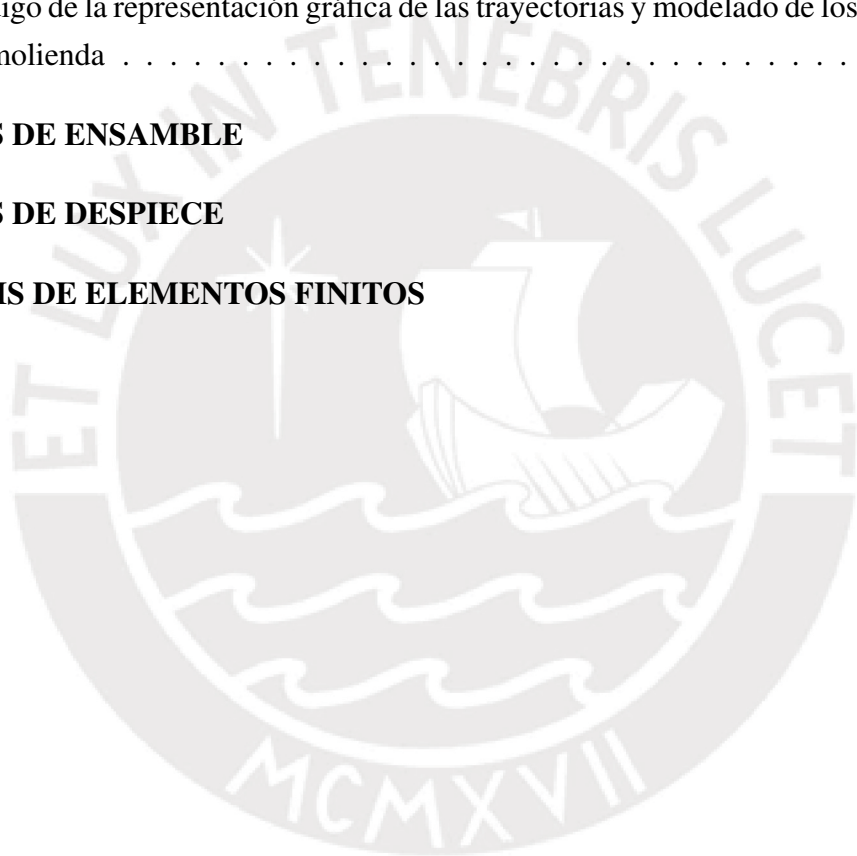


# Índice general

Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XII
Listado de Símbolos	XII
<b>1. Generalidades</b>	<b>5</b>
1.1. Proceso de molienda . . . . .	5
1.2. Clasificación de molinos giratorios . . . . .	5
1.2.1. Molino giratorio de primera etapa . . . . .	6
1.2.2. Molino giratorio de segunda etapa de molienda . . . . .	8
1.3. Partes del molino . . . . .	9
1.4. Medios de molienda . . . . .	11
1.5. Principios de molienda . . . . .	12
1.5.1. Impacto . . . . .	12
1.5.2. Atricción y Astillado . . . . .	13
1.5.3. Compresión . . . . .	14
1.6. Mecanismos de molienda . . . . .	14
1.6.1. Riñón . . . . .	14
1.6.2. Hombro de carga . . . . .	15
1.6.3. Pie de carga . . . . .	16
1.6.4. Efecto de cascada . . . . .	16
1.6.5. Efecto de catarata . . . . .	16
<b>2. Concepción del Diseño</b>	<b>17</b>
2.1. Concepción de la solicitud . . . . .	17
2.2. Estado de la tecnología . . . . .	18
2.3. Lista de exigencias . . . . .	22
2.4. Abstracción caja negra . . . . .	23
2.5. Estructura de funciones . . . . .	24
2.6. Matriz morfológica . . . . .	25

2.7.	Conceptos solución . . . . .	28
2.7.1.	Primera alternativa . . . . .	28
2.7.2.	Segunda alternativa . . . . .	29
2.7.3.	Tercera alternativa . . . . .	30
2.7.4.	Cuarta alternativa . . . . .	31
2.8.	Evaluación de Conceptos . . . . .	32
2.9.	Proyectos preliminares . . . . .	35
2.9.1.	Primer Proyecto preliminar . . . . .	35
2.9.2.	Segundo Proyecto preliminar . . . . .	36
2.9.3.	Tercer Proyecto preliminar . . . . .	38
2.9.4.	Cuarto Proyecto preliminar . . . . .	39
2.10.	Evaluación de los proyectos preliminares . . . . .	40
2.11.	Parámetros para el diseño del molino . . . . .	43
2.11.1.	Dimensiones del molino . . . . .	43
2.11.2.	Velocidad de operación . . . . .	43
2.11.3.	Ángulo dinámico de reposo de la carga . . . . .	44
2.11.4.	Estimación de la carga . . . . .	45
2.11.5.	Estimación de la potencia . . . . .	47
2.12.	Cálculo del medio de molienda . . . . .	50
2.13.	Diseño de levantadores . . . . .	52
2.13.1.	Grafica de diseño de levantador . . . . .	56
2.14.	Trayectoria del lanzamiento . . . . .	58
2.15.	Representación Gráfica de Trayectorias y Modelado de Mecanismos de Molienda	60
2.16.	Estimación de Número de levantadores . . . . .	64
2.17.	Plano de ensamble . . . . .	65
2.18.	Lista de materiales . . . . .	67
2.19.	Planos de despiece . . . . .	69
2.20.	Simulación 3D . . . . .	74
2.20.1.	Simulación de elementos finitos en software 3D . . . . .	74
2.20.2.	Simulación Análisis Modal en software 3D . . . . .	76
<b>3.</b>	<b>Evaluación Económica del Modulo</b>	<b>83</b>
3.1.	Costos de materiales . . . . .	83
3.1.1.	Costos de Elementos Normalizados . . . . .	84
3.1.2.	Costos de Elementos Estructurales . . . . .	85
3.1.3.	Costos de Materiales para Elementos de Máquina . . . . .	85
3.1.4.	Costos de Materiales Eléctricos-Electrónicos . . . . .	86
3.2.	Costos de manufactura y ensamble . . . . .	87
3.3.	Costos de diseño . . . . .	87

3.4. Costos de Total . . . . .	88
<b>Conclusiones</b>	<b>89</b>
<b>Propuestas de mejora</b>	<b>91</b>
Bibliografía . . . . .	93
<b>Anexos</b>	<b>1</b>
<b>A. CODIGO MATHLAB</b>	<b>2</b>
A.1. Código del diseño y dimensionamiento de la altura del levantador y angulo de cara . . . . .	2
A.2. Código de la representación gráfica de las trayectorias y modelado de los mecanismos de molienda . . . . .	4
<b>B. PLANOS DE ENSAMBLE</b>	<b>8</b>
<b>C. PLANOS DE DESPIECE</b>	<b>9</b>
<b>D. ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS</b>	<b>10</b>



# Índice de figuras

1.1. Circuito de conminución . . . . .	6
1.2. Molino SAG esquemático . . . . .	7
1.3. Interior de un molino de barras . . . . .	8
1.4. Molino de bolas con descarga periférica . . . . .	9
1.5. Modelo SAG de FLsmith . . . . .	10
1.6. Distintos tipos de revestimiento . . . . .	11
1.7. Levantadores con ángulo de cara de 65° . . . . .	11
1.8. Medios de molienda utilizado para molinos SAG . . . . .	12
1.9. Rotura de mineral por impacto . . . . .	13
1.10. Rotura de mineral por atricción y astillado . . . . .	13
1.11. Reducción de mineral por compresión . . . . .	14
1.12. Distribución de los mecanismos de molienda . . . . .	15
2.1. Mecanismos para la optimización en los molinos SAG . . . . .	18
2.2. Molino de Bach modelo 2x3 (ft) . . . . .	19
2.3. Modelo de laboratorio de un molino SAG . . . . .	20
2.4. Abstracción por medio de la caja negra para los parámetros de entrada y salida .	23
2.5. Estructura de funciones óptima . . . . .	24
2.6. Matriz morforlogica-1 . . . . .	26
2.7. Matriz morforlogica-2 . . . . .	27
2.8. Concepto de solución C-S1 . . . . .	28
2.9. Concepto de solución C-S2 . . . . .	29
2.10. Concepto de solución C-S3 . . . . .	30
2.11. Concepto de solución C-S4 . . . . .	31
2.12. Proyecto preliminar 1 frontal y lateral . . . . .	35
2.13. Proyecto preliminar 1 isométrico . . . . .	36
2.14. Proyecto preliminar 2 frontal y lateral . . . . .	37
2.15. Proyecto preliminar 2 isométrico . . . . .	37
2.16. Proyecto preliminar 3 frontal y lateral . . . . .	38
2.17. Proyecto preliminar 3 isométrico . . . . .	38
2.18. Proyecto preliminar 4 frontal y lateral . . . . .	39

2.19. Proyecto preliminar 4 isométrico . . . . .	39
2.20. Gráfico de evaluación de proyectos preliminares . . . . .	42
2.21. Ubicación del ángulo dinámico de reposo . . . . .	45
2.22. Resta de áreas . . . . .	47
2.23. Ubicación del ángulo geométrico, ángulo de reposo dinámico y distancia hacia el centro de gravedad . . . . .	48
2.24. Especificaciones técnicas del molino SAG de Tintaya-Antapacay . . . . .	50
2.25. Posiciones de ángulo de pie de carga, hombro, radio del riñón interno . . . . .	52
2.26. Ubicación del ángulo de cara del levantador (face angle) . . . . .	54
2.27. Gráfica de altura de levantador en función del ángulo de pie. . . . .	56
2.28. Gráfica de altura de levantador en función del ángulo de hombro . . . . .	57
2.29. Esquema para estimar la trayectoria de la carga . . . . .	59
2.30. Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de $L_h = 10$ y $l_a = 0$ . . . . .	60
2.31. Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de $L_h = 10$ y $l_a = 30$ . . . . .	61
2.32. Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de $L_h = 10$ y $l_a = 60$ . . . . .	61
2.33. Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de $L_h = 20$ y $l_a = 0$ . . . . .	62
2.34. Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de $L_h = 20$ y $l_a = 30$ . . . . .	62
2.35. Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de $L_h = 20$ y $l_a = 60$ . . . . .	63
2.36. Pedestal del buje de rodamientos . . . . .	69
2.37. Pedestal del motor . . . . .	70
2.38. Posiciones de ángulo de pie de carga, hombro, radio del riñón interno . . . . .	71
2.39. Bujes de rodamiento isométrico . . . . .	71
2.40. Tambor del Molino . . . . .	72
2.41. Unión posterior del tambor con Tornillo Avellanado . . . . .	73
2.42. Disposición de los pernos avellanados al interior del tambor . . . . .	73
2.43. Soldadura de la plancha rolada con la tapa trasera . . . . .	73
2.44. Simulación de la fuerza aplicada en el tambor . . . . .	74
2.45. Zona más crítica sometido a esfuerzos . . . . .	75
2.46. Esquema del modelo conceptual del módulo educativo . . . . .	76
2.47. Esquema del modelo conceptual para estimar la rigidez . . . . .	77
2.48. Desplazamiento en el plano Z-Y por la aplicación de una fuerza de 1N . . . . .	78
2.49. Desplazamiento en el plano X-Y por la aplicación de una fuerza de 1N . . . . .	78
2.50. Tabla de Propiedades Físicas totales del módulo generadas por el software Inventor	79

2.51. Frecuencia Modales generadas por el Software . . . . .	81
2.52. Frecuencia Modales generadas por el Software . . . . .	81



# Índice de tablas

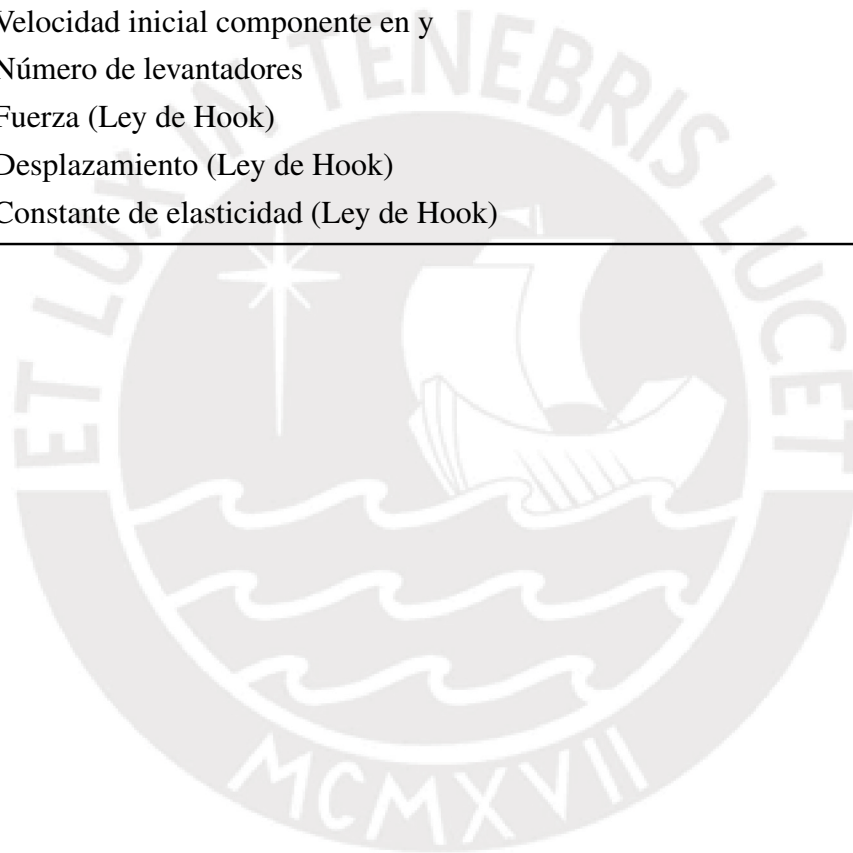
2.1. Datos generales Molino de laboratorio-Work Index . . . . .	20
2.2. Datos generales Molino para ensayos de impacto . . . . .	21
2.3. Lista de exigencias . . . . .	22
2.4. Add caption . . . . .	25
2.5. Evaluación de conceptos de solución . . . . .	32
2.6. Índice de Conceptos de Evaluación . . . . .	32
2.7. Tabla de peso y puntaje para la evaluación técnica y económica . . . . .	40
2.8. Evaluación técnica de los proyectos preliminar . . . . .	40
2.9. Evaluación económica de los proyectos preliminares . . . . .	41
2.10. Tabla de contenido de la evaluación técnica . . . . .	41
2.11. Contenido de la evaluación económica . . . . .	42
2.12. Tabla de resumen de parámetros de diseño . . . . .	49
2.13. Diametros de bolas de acero y escalado . . . . .	51
2.14. Dimensiones de los levantadores . . . . .	65
2.15. Lista de materiales . . . . .	67
2.16. Cálculo de ala frecuencia natural en planos Z-Y y X-Y . . . . .	80
2.17. Calculo de frecuencia de operación . . . . .	80
2.18. Comparación de valores de frecuencias naturales simuladas y calculadas . . . . .	82
2.19. Comparación de valores de frecuencias naturales simuladas y generadas por motor . . . . .	82
3.1. Costo de elementos normalizados . . . . .	84
3.2. Costos parciales de elementos Estructurales . . . . .	85
3.3. Costos parciales de elementos de Maquina . . . . .	85
3.4. Costo parcial de elementos electrónicos - eléctricos . . . . .	86
3.5. Costo parciales de manufactura y ensamble . . . . .	87
3.6. Costo parciales de diseño . . . . .	88
3.7. Costo Total del Modulo . . . . .	88

# Listado de Símbolos

Símbolo	Descripción	Unidad
$D$	Diámetro del molino	[m]
$L$	Longitud del molino	[m]
$r_m$	Radio del molino	[m]
$v_c$	Velocidad crítica	[RPM]
$v_o$	Velocidad de operación	[RPM]
$w_o$	Velocidad de operación en radianes	[rad/s]
$\alpha_d$	Ángulo dinámico de reposo	[°]
$D_g$	Diámetro de partícula	[mm]
$V_t$	Volumen total del volumen	[m <sup>3</sup> ]
$V_j$	Volumen de la carga	[m <sup>3</sup> ]
$J_t$	Porcentaje volumétrico de la carga en el molino	-
$C$	Porcentaje volumétrico de las bolas en la carga	-
$V_b$	Volumen de las bolas	[m <sup>3</sup> ]
$V_p$	Volumen de la pulpa	[m <sup>3</sup> ]
$m_j$	Masa de la carga	[kg]
$m_b$	Masa de las bolas	[kg]
$m_p$	Masa de la pulpa	[kg]
$\rho_b$	Densidad del medio de molienda	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	Densidad de la pulpa	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	Ángulo para resta de áreas	[°]
$H_{COG}$	Distancia del centro del molino al centroide de la carga	[m]
$l_{COG}$	Distancia del brazo de palanca	[m]
$\tau$	Torque	[Nm]
$g$	Gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
$P_M$	Potencia requerida para el funcionamiento del molino	[W]
$r_b$	Radio del medio de molienda	[m]
$n_b$	Número de medio de molienda	-
$\theta_T$	Ángulo de posición de pie de la carga	[°]
$C_s^*$	Velocidad crítica experimental	-
$C_s$	Velocidad crítica	-
$A$	Factor de velocidad crítica	-
$H_l$	Relación altura y diámetro del molino	-
$L_h$	Altura del levantador	[m]
$\theta_s$	Ángulo de posición del hombro de la carga	[°]
$\beta$	Fracción del tiempo de la carga activa sobre la carga total	-
$r_i$	Radio interno del riñón	[m]

$t_c$	Tiempo de subida del medio de molienda del pie al hombro de la carga	[s]
$t_f$	Tiempo de caída del medio de molienda del hombro al pie de la carga	[s]
$\underline{N}$	Velocidad de operación media del giro molino	[RPM]
$\underline{r}$	Radio intermedio del riñón	[m]
$\psi$	Ángulo para estimar la mitad de un levantador	[°]
$e_l$	Ancho del levantador	[m]
$x_i$	Posición inicial en x	[m]
$y_i$	Posición inicial en y	[m]
$\phi$	Ángulo de dirección de lanzamiento	[°]
$v_t$	Velocidad tangencial	[m/s]
$v_{xi}$	Velocidad inicial componente en x	[m/s]
$v_{yi}$	Velocidad inicial componente en y	[m/s]
$NL$	Número de levantadores	-
$F$	Fuerza (Ley de Hook)	[N]
$\varphi$	Desplazamiento (Ley de Hook)	[mm]
$K$	Constante de elasticidad (Ley de Hook)	[N/mm]

---



# Introducción

Los molinos son el activo fijo más importante en una planta concentradora debido a su capacidad de liberar grandes cantidades de mineral, pero al mismo tiempo es un equipo con una gran ineficiencia energética aprovechando solo 3 % al 4 % de la energía que se le entrega para moler el mineral. Esta problemática se agrava cuando, en campo, las necesidades de producción fuerzan ajustes fuera de los procesos nominales, lo que altera los parámetros de operación y resulta en una disminución de la eficiencia. Para abordar esta situación, es fundamental comprender los principios de funcionamiento de estos equipos, identificar qué parámetros se pueden ajustar para corregir la ineficiencia, ya sea a través de un nuevo diseño de los elementos internos como levantadores y revestimientos, o mediante modificaciones como el aumento de la velocidad de giro, entre otros.

Existe una barrera muy grande para la recolección de la información. La intervención por medio de equipos de medición (sensores) depende de los tiempos de parada que asuma la mina ya sea por mantenimiento o por ampliación, los cuales no son accesibles y son escasos. Además, los molinos trabajan cerrados y no existe opción para realizar un estudio directo o un seguimiento al comportamiento real en el proceso de molienda. Los sensores, al fin y al cabo, recopilan información la cual se procesa y se interpreta, dando pie a que la interpretación también requiere un estudio para validar la información y que reside nuevamente en entender los principios a los que se somete el molino. En ese sentido, existe una necesidad en entender los principios y como estos se relacionan con la modificación de diferentes parámetros. Para ello, la mejor manera de trabajar es con modelos a escala o módulos educativos, para recrear estos principios, ensayarlos y estudiarlos.

Al día de hoy no hay una empresa que se dedique exclusivamente a elaborar modelos o módulos con fines educativos, dando pie a una oportunidad para desarrollar un diseño que permita experimentar con diferentes ensayos orientados a los mecanismos de molienda, estudiando su formación, sus características y como poder optimizarlos para diferentes escenarios.

## **Objetivo General**

Diseñar un módulo educativo de un molino SAG que permita observar y modificar los parámetros de operación para generar y estudiar de manera cualitativa los mecanismos de molienda.

## **Objetivo Específico**

### **1. Investigación y recopilación de información:**

- Recopilar información relacionada al estado del arte de equipos o módulos de molinos.
- Plantear una lista de exigencias para el diseño del módulo del molino.

### **2. Desarrollo conceptual:**

- Elaborar una estructura de funciones.
- Dibujar en bosquejos los conceptos soluciones.
- Evaluar los conceptos de solución.

### **3. Desarrollo preliminar del proyecto:**

- Elaborar proyectos preliminares.
- Evaluar los proyectos preliminares.

### **4. Desarrollo detallado del diseño:**

- Desarrollar la ingeniería de detalle.
- Desarrollar la memoria de cálculo de los parámetros de diseño orientado al molino.

### **5. Documentación final y costos:**

- Realizar planos de fabricación.
- Presentar costos de diseño, fabricación y obtención.

## **Metodología**

Se utiliza la metodología de diseño VDI 2221 y VDI 2225 planteado las 6 fases del desarrollo del diseño.

1. Recopilar información relacionada al estado del arte de equipos o módulos de molinos.
2. Plantear una lista de exigencia para el diseño del módulo del molino.
3. Comprensión de la solicitud
4. Concepción de la solución
5. Elaboración del proyecto
6. Elaboración de ingeniera de detalle

## **Resultados Esperados**

- Elaborar de planos de ensamble y despiece del modulo.
- Elaborar la memoria de cálculo del diseño y dimensionamiento de la altura del levantador y angulo de cara.
- Elaborar la memoria de cálculo para la representación grafica de la trayectoria de los mecanismos de molienda.

## **Impactos**

- El diseño del módulo educativo permitirá evaluar los impactos generados dentro del molino SAG, clasificándolos en óptimos, que favorecen la molienda, y críticos, que afectan negativamente el tambor. La capacidad de modificar parámetros de operación, como la velocidad de rotación, la carga de material y la configuración del medio de molienda, ofrecerá una plataforma para investigaciones detalladas sobre la optimización del proceso de molienda.

- Con el uso de sensores avanzados, se podrán monitorear los impactos en tiempo real, facilitando el conteo y clasificación de los mismos. Esto permitirá ajustar los parámetros de operación para maximizar la eficiencia de la molienda y minimizar el desgaste del molino, optimizando el consumo energético y el rendimiento del proceso.
- Además, el módulo ofrecerá la posibilidad de realizar estudios vibracionales, permitiendo un análisis detallado sobre la criticidad de los impactos. Estos análisis contribuirán a comprender mejor cómo los impactos críticos afectan la estructura del molino y a diseñar estrategias para reducir su ocurrencia.



# Capítulo 1

## Generalidades

En este capítulo abarcará el estado de la tecnología, con teoría relacionada al proceso de molienda, mecanismos de molienda, medios de molienda y principios de molienda.

### 1.1. Proceso de molienda

La molienda es un proceso metalúrgico que realizan los molinos el cual consiste en liberar el material valioso de la ganga<sup>1</sup> por medio de la reducción del tamaño, utilizando los principios físicos de impacto, atricción y compresión de manera repetitiva; además los molinos pueden trabajar con flujos másicos, secos o húmedos.

### 1.2. Clasificación de molinos giratorios

La clasificación de los molinos dependerá de la capacidad que tienen para liberar el mineral de la ganga, para ello estos equipos deben contemplar las propiedades metalúrgicas del mineral y el tamaño de partícula a procesar. En la metalurgia se denomina como F80 al tamaño de entrada y P80 al tamaño de salida en un proceso de conminución<sup>2</sup>. Según Lynch (2015), el *work index*, es un término que determina la resistencia a la rotura en términos de energía

---

<sup>1</sup>La ganga es el conjunto de minerales no valiosos que acompañan al mineral deseado y que se eliminan durante el proceso de conminución.

<sup>2</sup>La conminución es el proceso de reducción de tamaño de los minerales mediante trituración y molienda, con el fin de liberar las partículas valiosas contenidas en la mena.

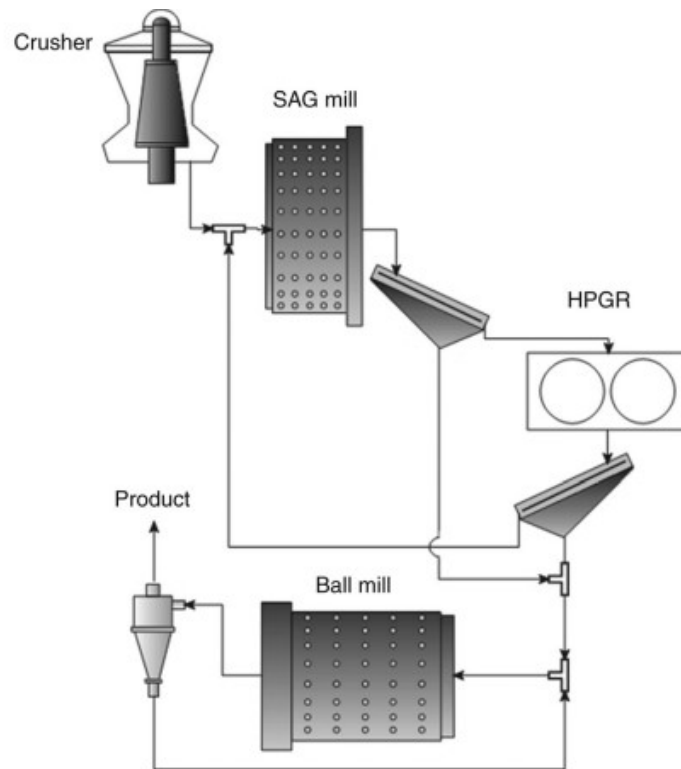


Figura 1.1: Circuito de conminución

Tomado de "Mineral processing design and operation" por Gupta y Yan (2016)

del mineral, estos términos también alteran la manera en la que predominan los diferentes principios de conminución y a su vez afectará, principalmente, la forma del diseño constructivo de los molinos.

Las líneas de producción de molienda utilizan estos equipos separándolos en molinos de primera etapa y segunda etapa, en ese sentido, son los molinos de primera etapa trabajan con F80 y P80 más gruesos, mientras que, los de segunda etapa se caracterizan por entregar un producto mucho más fino.

### 1.2.1. Molino giratorio de primera etapa

Para los molinos de primera etapa, el tamaño máximo de las partículas de ingreso por parte de las trituradoras giratorias rondas entre los 300 mm y el de las trituradoras de mandíbulas es de unos 180-100 mm; por tanto, como señalan Gupta y Yan (2016), el tamaño de la alimentación puede oscilar entre 150 y 300 mm y poseen una ratio de reducción de partícula de 1/100. Estos equipos tienen un diámetro mayor a comparación del largo del tambor, debido a que se prioriza

el efecto de impacto sobre la abrasión al poseer mayor altura de levantamiento por su geometría. Además, pueden trabajar entre un 25 % hasta 30 % de carga total en volumen. Para los molinos de primera etapa pueden dividirse en 2 tipos los autógenos (AG) y los semi autógenos (SAG).

### **Molino Autógeno (AG)**

El molino autógeno no utiliza ningún medio de molienda, esto quiere decir que la ganga dentro del molino interactúa entre sí para romperse y reducir su tamaño. Por lo general, estos molinos son destinados para moler minerales de alto *work index*.

### **Molino Semi autógeno (SAG)**

Los molinos semi autógenos trabajan con un work index moderado como, por ejemplo el cobre o el zinc, que por sí solos no logran romperse y liberar el mineral, por lo que añaden medios de molienda que permite ayudar en la reducción del tamaño de partícula.

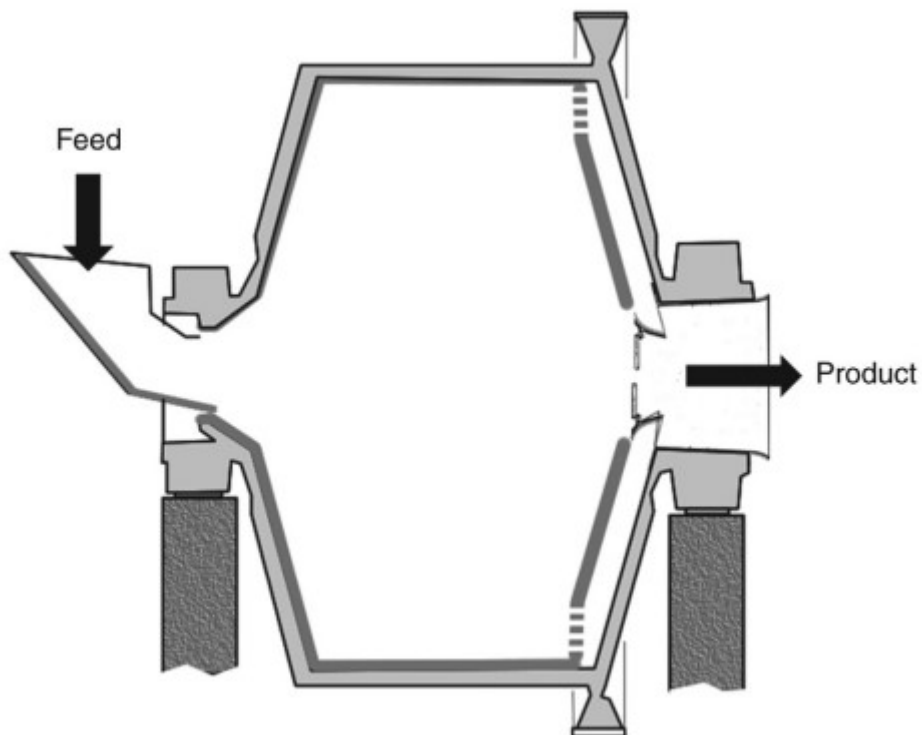


Figura 1.2: Molino SAG esquemático  
Tomado de “*Mineral processing desing and operation*” por Gupta y Yan (2016)

### 1.2.2. Molino giratorio de segunda etapa de molienda

Los molinos de segunda etapa tienen la característica de tener el tambor alargado, con el fin de mantener al mineral más tiempo dentro del molino exponiéndose a mayores ciclos de conminución. Para reducir el tamaño hasta las 100 micras, estos molinos tienen una ratio de reducción de partícula de 1/25. Asimismo, pueden trabajar entre un 30 % hasta 45 % de carga total en volumen, el principio de trabajo es la reducción de partículas por medio de la atricción, fricción y compresión.

#### Molino de barras

Los molinos de barras se utilizan para la molienda de materiales con un tamaño superior de 20-30 mm y producen un producto más homogéneo llegando hasta los 500  $\mu\text{m}$ .

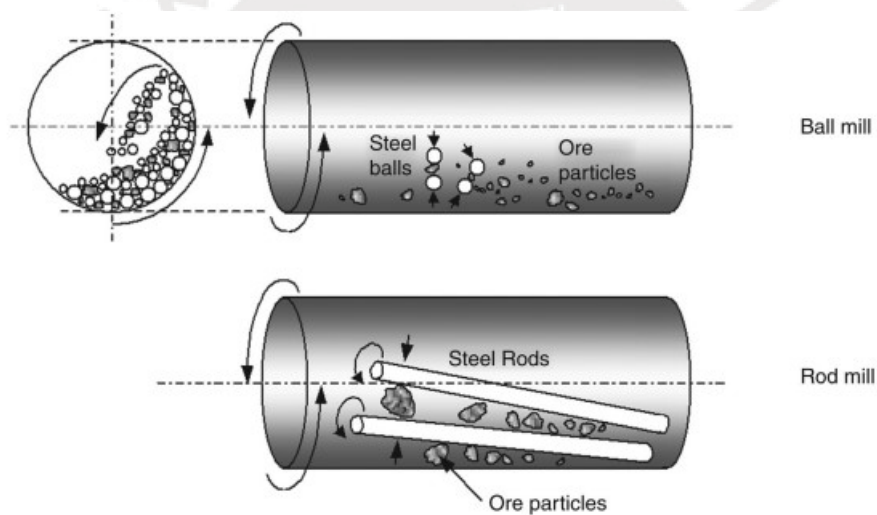


Figura 1.3: Interior de un molino de barras  
Tomado de "Mineral processing desing and operation" por Gupta y Yan (2016)

#### Molino de bolas

Estos equipos al igual que los molinos de SAG utilizan bolas de acero. Por lo general no trabajan con levantadores (lifters), y sólo con revestimientos (liners). La reducción de partículas en la salida de los molinos de bolas puede llegar hasta las 100 micras.

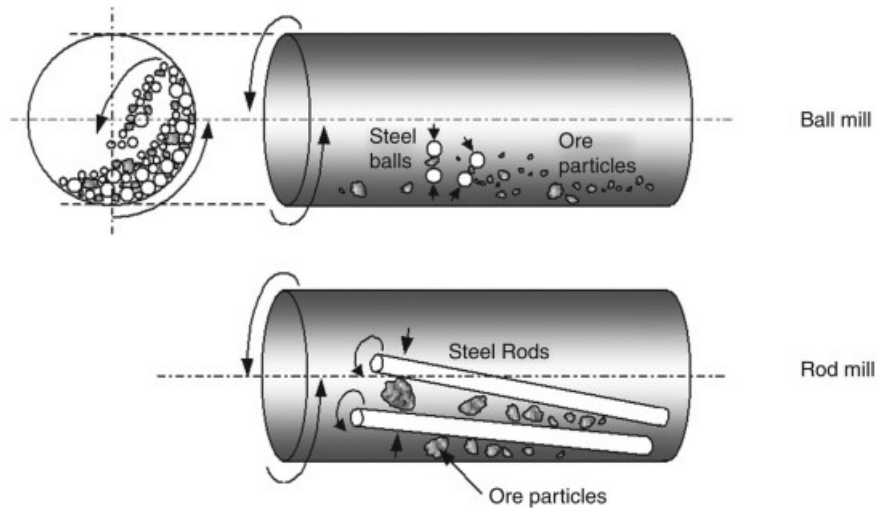


Figura 1.4: Molino de bolas con descarga periférica  
 Tomado de “*Mineral processing desing and operation*” por Gupta y Yan (2016)

### 1.3. Partes del molino

A continuación, se explicarán los principales elementos que conforman los molinos.

- **Muñón de alimentación y descarga:** Elementos cilíndricos que están unidos a las tapas laterales del molino, su función principal es permitir la alimentación y descarga de la ganga. Los muñones sirven como descanso que sostiene el molino, el cual le permiten trabajar como un eje rotacional.
- **Tapas:** Son elementos sólidos que se unen a los muñones, estos elementos se anclan al tambor aumentando rigidez al molino.
- **Tambor:** El tambor es un cilindro hueco de espesor delgado. Este se encarga de contener a los elementos de molienda y al igual que las tapas está cubierto en el interior por el mismo tipo de revestimiento y en algunos casos lifters con el objetivo de proteger el tambor y ayudar a levantar la pulpa<sup>3</sup> para producir el efecto de cascada y catarata.
- **Parrilla:** El tamaño de las aberturas de la parrilla y la presión de la suspensión a medida que entra en la ranura de la rejilla controlará el caudal que sale de la rejilla.

<sup>3</sup>La pulpa se refiere a la mezcla de material sólido (minerales triturados) y agua, que es transportada a través de diferentes etapas del proceso de concentración.

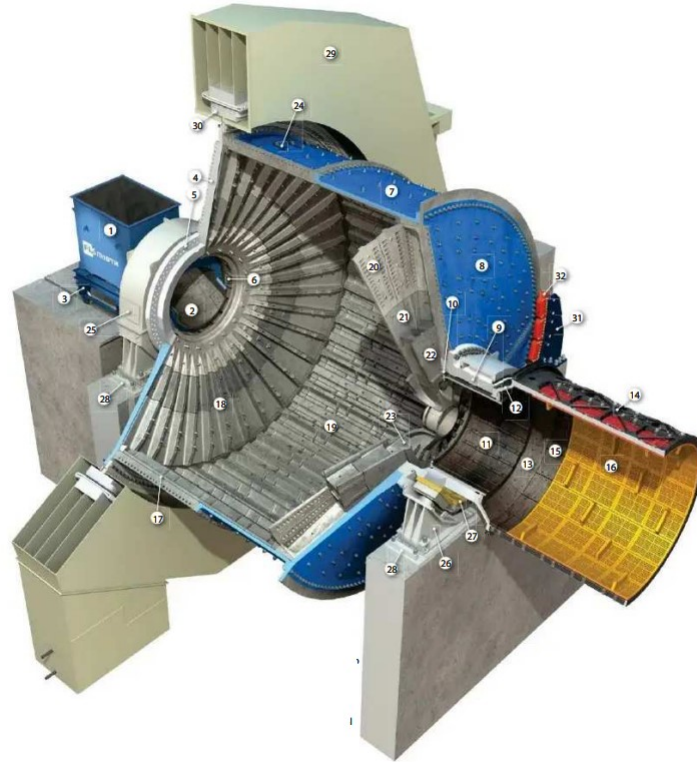


Figura 1.5: Modelo SAG de FLsmith  
 Tomado de "Advances in comminution" por Kawatra (2006)

- **Revestimiento:** Los revestimientos trabajan como una capa de sacrificio al interior del molino, estos pueden ser de acero, caucho o caucho recubierto de acero. Su función principal es proteger el molino de desgaste y el daño causado por el impacto fricción. Luego, se transfiere la energía del motor a la masa de mineral y a las bolas molienda de forma eficaz para optimizar la rotura del mineral. Según Lynch (2015), se retira eficazmente el contenido molido arrastrándolo al muñón de descarga.
- **Levantadores:** Son un tipo de revestimiento que tiene la característica tener una altura más pronunciada como si fueran aletas, para levantar el material dentro del molino, con el fin de mejorar los efectos de catarata, estos están destinados a trabajar con molinos SAG, ya que es en estos tipos de molinos donde predomina el impacto.

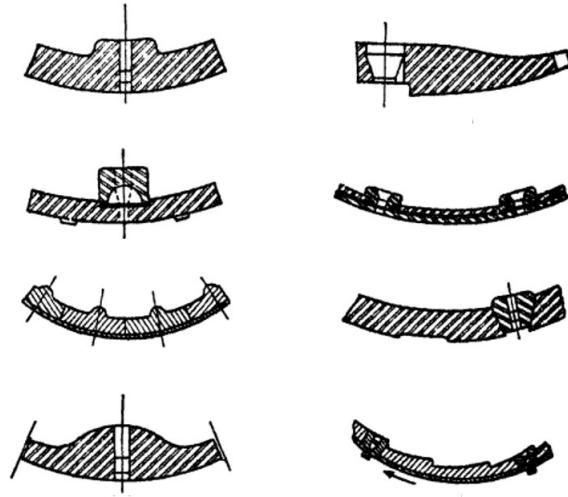


Figura 1.6: Distintos tipos de revestimiento  
 Tomado de “handbook of mineral dressing ore and industrial minerals” por Taggart (1994)

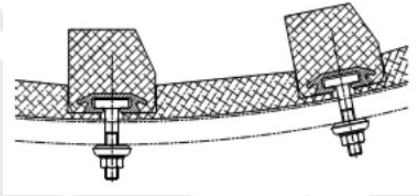


Figura 1.7: Levantadores con ángulo de cara de 65°  
 Tomado de “Comminution Handbook” por Lynch (2015)

## 1.4. Medios de molienda

A continuación, se explicarán los principales elementos que conforman los molinos. Los medios de molienda son todos los elementos que se agregan en los molinos para ayudar en el proceso de conminución, estos elementos poseen una dureza mayor al elemento a moles. En los casos de los molinos SAG se usan esferas de acero, los cuales interactúan directamente con el mineral dentro del molino, su función es impactar con las rocas para liberar el mineral, para ello se utilizan bolas de acero que cumplan con una adecuada dureza volumétrica de 60 HCR.

El tamaño de las bolas varía dependiendo del tipo de mineral a trabajar, como, por ejemplo, en el manual de operaciones de la planta concentradora de Tintaya-Antapacay, se utiliza un calibre de 5 pulgadas de bolas para el molino 310-MLS-001 fabricado por FFE Minerals. Es recomendable trabajar con un gradiente de tamaños de bolas, para que llenen los intersticios entre bolas y mineral y la molienda sea más eficiente.



Figura 1.8: Medios de molienda utilizado para molinos SAG  
Tomado de “Comminution Handbook” por Lynch (2015)

## 1.5. Principios de molienda

La molienda involucra la reducción del tamaño de las partículas mediante fuerzas mecánicas, tales como impacto, compresión, y abrasión. En los molinos SAG, estos principios se aplican de manera específica debido a la naturaleza del equipo y los materiales procesados. Los principales principios de molienda incluyen

### 1.5.1. Impacto

Este mecanismo de fractura se produce por la rápida aplicación de una tensión por compresión. Además, como señala King (2001), ser un proceso no selectivo, en la cual, la partícula madre se divide formando múltiples tamaños de productos como se puede observar dicha distribución en la figura 1.9

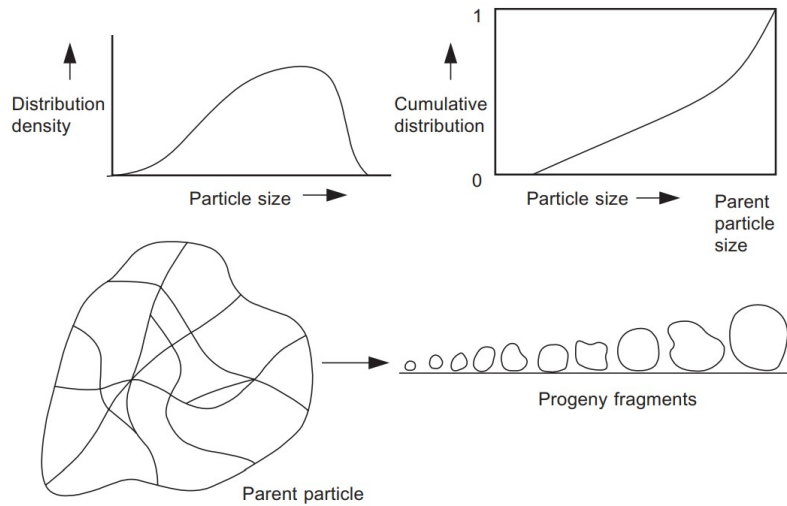


Figura 1.9: Rotura de mineral por impacto  
 Tomado de “*Modeling & simulation of mineral processing systems*” por King (2001)

### 1.5.2. Atricción y Astillado

La atricción y el astillado se producen cuando la tensión no es suficiente para romper la partícula produciendo una distribución de tamaños denominada bimodal. Esta tiene como resultado a una partícula madre residual de la cual se desprenden partículas muy pequeñas a comparación de esta. En la figura 1.10 se muestra un gráfico con la distribución de las partículas (King 2001).

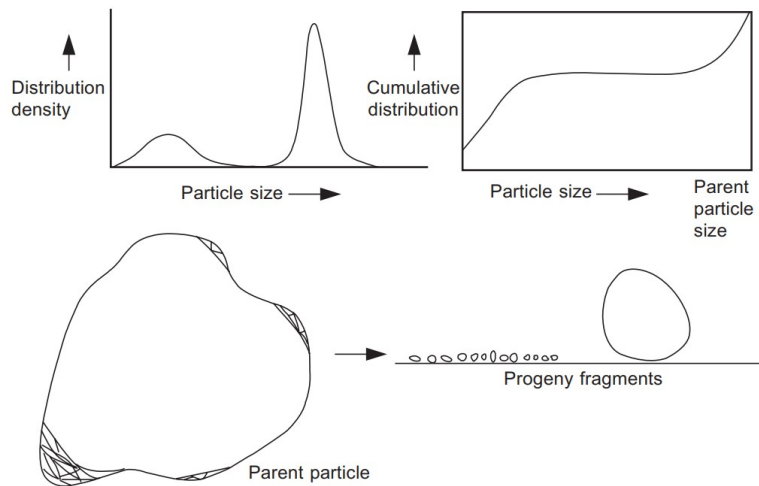


Figura 1.10: Rotura de mineral por atricción y astillado  
 Tomado de “*Modeling & simulation of mineral processing systems*” por King (2001)

### 1.5.3. Compresión

Para este mecanismo, la ganga se somete a cargas de mismo sentido y con sentido contrario, por lo general estas cargas se aplican en la parte entre el centro del riñón y la periferia del molino. Según King (2012), la distribución granulométrica suele ser bimodal, teniendo una distribución de población de partículas hijas gruesas y otra es la población de finos producidos en el punto de aplicación de la tensión. Esto se muestra en la 1.11

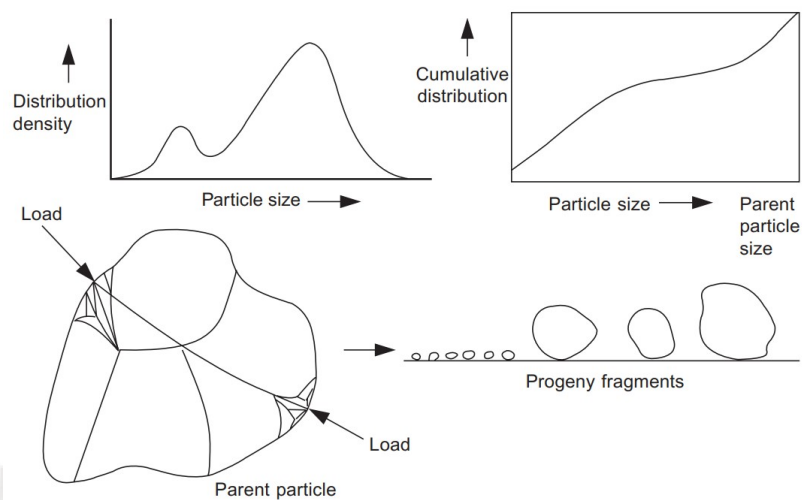


Figura 1.11: Reducción de mineral por compresión

Tomado de “*Modeling & simulation of mineral processing systems*” por King (2001)

## 1.6. Mecanismos de molienda

Los mecanismos de molienda son los fenómenos que se generan dentro del molino a partir del movimiento rotacional del mismo provocando la elevación y la caída de la carga. Estos mecanismos son la catarata, la cascada y el riñón, los cuales permiten la interacción entre el mineral y los medios de molienda para la reducción del tamaño de partícula.

### 1.6.1. Riñón

La velocidad de rotación del molino se efectúa sobre su eje longitudinal produciendo el desplazamiento interno de la carga que se acumula y sube por las paredes internas del tambor formando un cúmulo en forma de riñón. El pie de la carga se encuentra en la zona inferior donde

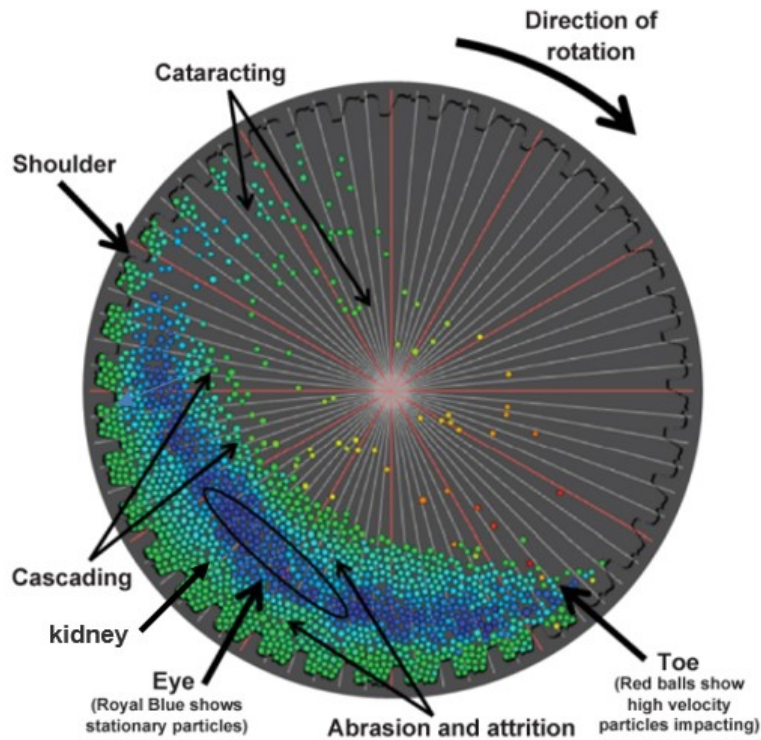


Figura 1.12: Distribución de los mecanismos de molienda  
 Tomado de "Comminution Handbook" por Lynch (2015)

las bolas o las rocas impactan para romper y liberar el mineral. En la zona central, las partículas se exponen a efectos de abrasión y compresión, existe una zona denominada ojo del riñón, el cual mantiene las partículas estáticas. Por último, la zona superior denominada hombro, es el lugar donde las bolas y el mineral se despegan para caer al pie.

### 1.6.2. Hombro de carga

El "hombro" se refiere al punto más alto que alcanzan las partículas y las bolas de molienda antes de caer. A medida que el molino gira, la carga sube por la pared del molino hasta alcanzar el punto más alto (el hombro), antes de caer por efecto de la gravedad. La altura del hombro determina la energía potencial de las partículas y bolas de molienda al caer. Un hombro más alto significa mayores fuerzas de impacto durante el efecto de catarata, aumentando la eficiencia de la molienda por impacto.

### **1.6.3. Pie de carga**

El "pie" se refiere a la parte más baja de la carga del molino, donde las partículas y bolas se asientan después de caer. Es la base de la carga donde se acumulan las partículas más finas y los medios de molienda después de haber sido levantados y caídos. El pie de la carga es crítico para la eficiencia de la molienda, ya que es donde ocurre la mayoría de la acción de abrasión. Mantener un pie de carga adecuado asegura que las partículas estén en constante movimiento y en contacto con los medios de molienda, promoviendo una molienda eficiente.

### **1.6.4. Efecto de cascada**

Este efecto se genera cuando los levantadores empujan a las bolas y mineral del hombro, despegándose del riñón con dirección al pie del riñón, en este efecto se realiza un lanzamiento parabólico con el fin de que las rocas y las bolas impacten entre ellas (interacción bola-mineral).

### **1.6.5. Efecto de catarata**

Se desarrolla cuando las partículas y las bolas ruedan por la pendiente cuando se forma el riñón, consiste en la interacción de contacto minera-mineral y mineral-bola los cuales friccionan entre sí para reducir su tamaño.

# Capítulo 2

## Concepción del Diseño

### 2.1. Concepción de la solicitud

La propuesta para el desarrollo de la tesis parte de la necesidad de estudiar los mecanismos de molienda mediante la modificación de los parámetros de operación con el fin de conocer cómo mejorar el proceso de conminución en los molinos SAG. Por ello, la investigación toma como punto de partida la evaluación de los parámetros de optimización propuesto por Leung (1987), el cual clasifica dos procesos para la optimización en los molinos SAG: la eficiencia del rompimiento, la transferencia de masa y descarga ver la imagen 2.1.

La tesis se centra diseñar un módulo que permita observar, interactuar y ensayar la formación de los mecanismos de molienda reflejando cualitativamente la eficiencia por rompimiento y permitiendo comprobación de cálculos teóricos con ensayos experimentales.

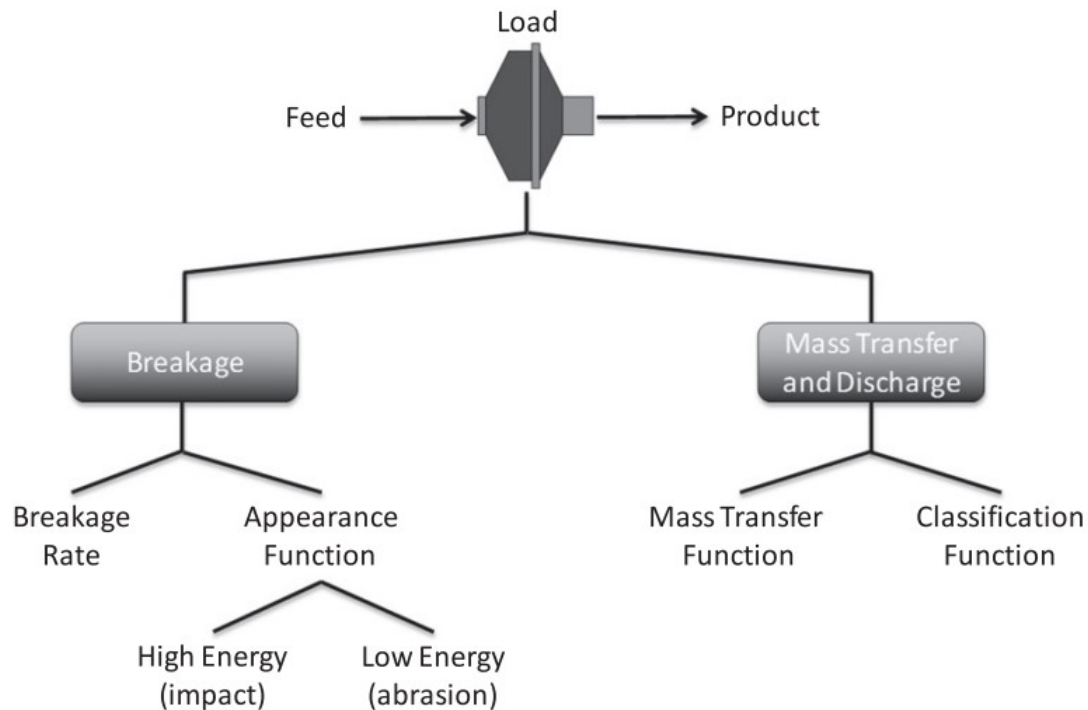


Figura 2.1: Mecanismos para la optimización en los molinos SAG

Tomado de "Leung, K. (1988). *An energy based, ore specific model for autogenous and semi-autogenous grinding mills*".

## 2.2. Estado de la tecnología

Para el diseño del módulo educativo, el primer paso consiste en realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva y recopilar información sobre diseños similares. Esta tarea incluye la consulta de literatura técnica y científica, así como la revisión de catálogos, handbooks y otras fuentes especializadas. Actualmente, las empresas que diseñan molinos para el mercado minero peruano se enfocan en equipos destinados al trabajo en campo, con producciones industriales de alta capacidad. Sin embargo, también existen diseños específicos para laboratorios, los cuales se utilizan para evaluar características metalúrgicas de los minerales, como el *work index*.

En general no hay empresas que se dediquen a la elaboración de molinos con fines pedagógicos. Las publicaciones están orientadas a otros rubros relacionados a la investigación química, desarrollan análisis vibracionales, eficiencia en los procesos de conminución y diseño

óptimo de levantadores mediante el estudio de molinos escalados.

A continuación se muestran 2 tipos de molinos, el primero equipo mostrado en la figura 2.2 se encuentran en el mercado actual, el cual es un equipo que se utiliza en los laboratorios para calcular el *work index*. El segundo caso mostrado en la figura 2.3, se muestra un módulo el cual se diseñó en una empresa consultora, que buscaba identificar los impactos por medio de acelerómetros. Por último, las siguientes tablas describen con más detalle las características más importantes de los equipos.

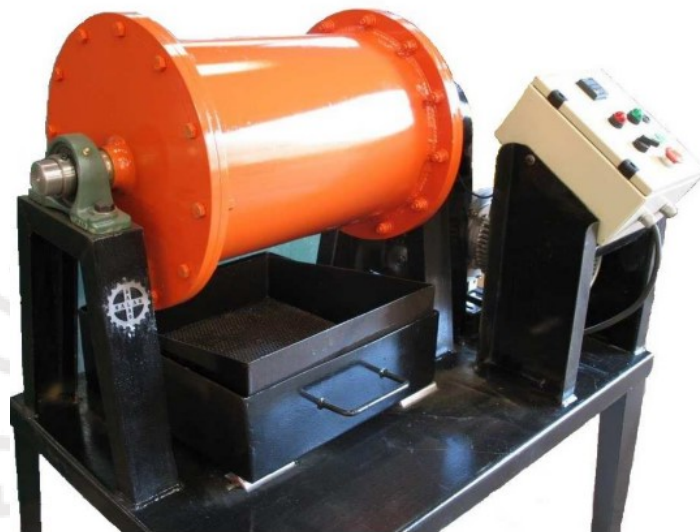


Figura 2.2: Molino de Bach modelo 2x3 (ft)

Tomado de “Catálogo de equipos: Ingeniería y construcciones Hns. Salas” por Industria Salas (2021)



Figura 2.3: Modelo de laboratorio de un molino SAG  
*Elaboración propia*

Tabla 2.1: Datos generales Molino de laboratorio-Work Index

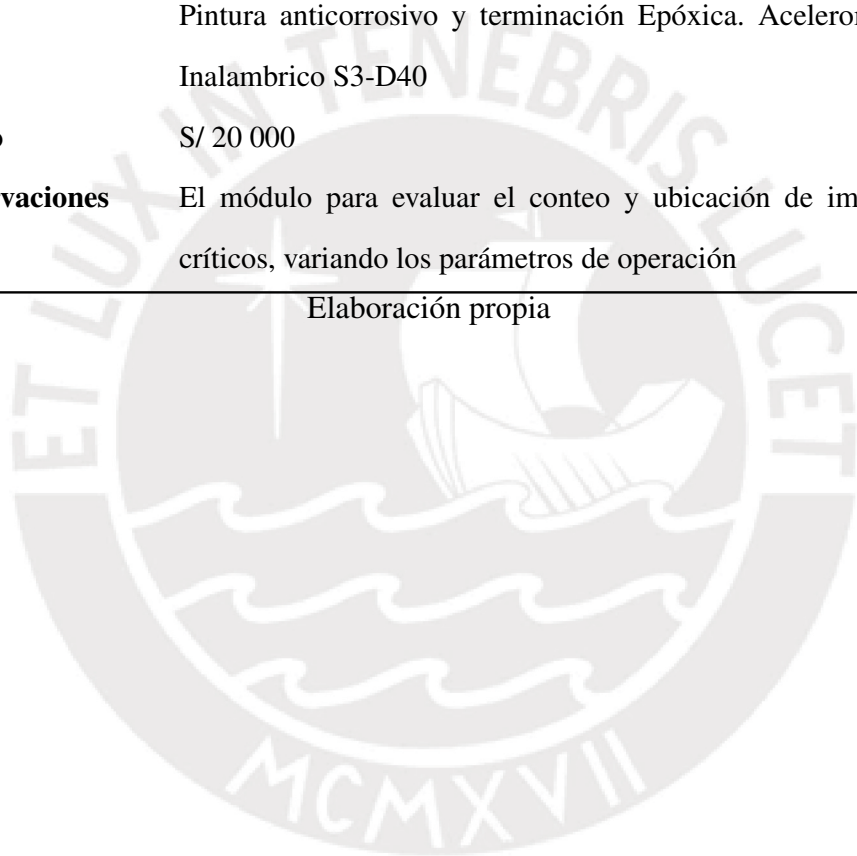
<b>Molino de Bach modelo 2x3 (ft)</b>	
<b>Material</b>	Acero SAE 1020
<b>Apoyos</b>	Rodamientos
<b>Revestimiento</b>	Caucho natural 10 mm
<b>Transmisión</b>	Accionado por conjunto piñón y cadenas
<b>Motor</b>	Motorreductor de 380 V, 50 Hz con variador de frecuencia
<b>Estructura</b>	Vigas IPN 120 mm
<b>Otros</b>	Pintura anticorrosivo y terminación Epóxica
<b>Precio</b>	US\$ 11 990
<b>Observaciones</b>	El módulo para obtener work index

*Elaboración propia*

Tabla 2.2: Datos generales Molino para ensayos de impacto

<b>Molino para ensayos de impactos</b>	
<b>Material</b>	Acero ASTM a36
<b>Apoyos</b>	Rodamientos
<b>Revestimiento</b>	Caucho natural 10 mm
<b>Transmisión</b>	Accionado por conjunto piñón y correa trapezoidal
<b>Motor</b>	Motorreductor de 220 V, 60 Hz con variador de frecuencia
<b>Estructura</b>	Perfil cuadrado de 2 pulgadas
<b>Otros</b>	Pintura anticorrosivo y terminación Epóxica. Acelerómetros Inalambrico S3-D40
<b>Precio</b>	S/ 20 000
<b>Observaciones</b>	El módulo para evaluar el conteo y ubicación de impactos críticos, variando los parámetros de operación

Elaboración propia



## 2.3. Lista de exigencias

Se presenta la lista de exigencias para el desarrollo del diseño del modulo

Tabla 2.3: Lista de exigencias

<b>PROYECTO</b>	<b>DISEÑO DE UN MÓDULO EDUCATIVO DE UN MOLINO SAG PARA EL ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE MOLIENDA</b>	
<b>CLIENTE</b>	<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b>	
<b>REVISOR</b>	<b>Jorge Hernán Alencastre Miranda</b>	
<b>RESPONSABLE</b>	<b>Kevin Giancarlo Pérez Castillo</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Deseo/ Exigencia</b>	<b>Descripción</b>
29/03/2021	E	FUNCIÓN PRINCIPAL: Reproducir el funcionamiento de los mecanismos de molienda de un molino SAG para estudiar y variar los parametros de operación.
29/03/2021	E	ESTABILIDAD: El molino tendrá que ser soportado por cimentación directa que soporte cargas dinámicas.
29/03/2021	E	GEOMETRÍA: El modulo contará con no mas de 1 m x 1m y una altura de 2 m
29/03/2021	E	ENERGÍA: El molino deberá ser accionado por un motor eléctrico con fuente de 220V con una frecuencia de 60Hz, trifásica.
29/03/2021	E	VELOCIDAD: La velocidad deberá ser regulada para los diferentes ensayos para valores entre 30 a 60 RPM.
29/03/2021	D	FUERZAS: La carga dinámica tendrá valores entre 200 N y 300 N.
29/03/2021	E	CINEMÁTICA: El movimiento de las partículas tendrán que cumplir los efectos de cascada, catarata y formación del riñón (carga activa).
29/03/2021	D	MATERIA: Arroz con un diámetro cercano al valor de 1.2 mm
29/03/2021	E	SEÑALES: La máquina tendrá señales de encendido y apagado.
29/03/2021	E	SEGURIDAD: Se tendrá un botón de parada de emergencia.
29/03/2021	E	ERGONOMÍA: El mecanismo debe adaptarse a las necesidades del operador, con alturas 1.5m a 1.70m.
29/03/2021	D	FABRICACIÓN: La máquina podrá ser fabricada en talleres locales, con materiales de fácil adquisición en el mercado Nacional.
29/03/2021	D	MONTAJE: Tendrá facilidad de desmontaje que permita intercambiar diferentes tipos de revestimiento y levantadores.
29/03/2021	D	COSTOS: Los costos totales no excederan los S/50 000.
29/03/2021	E	MANTENIMIENTO: El molino tendrá un fácil acceso para el mantenimiento de lubricación, limpieza y/o cambio de partes.

Elaboración propia

## 2.4. Abstracción caja negra

La concepción de la solicitud inicia con la abstracción del sistema para determinar las entradas y salidas, se emplea el concepto de caja negra para facilitar la identificación.

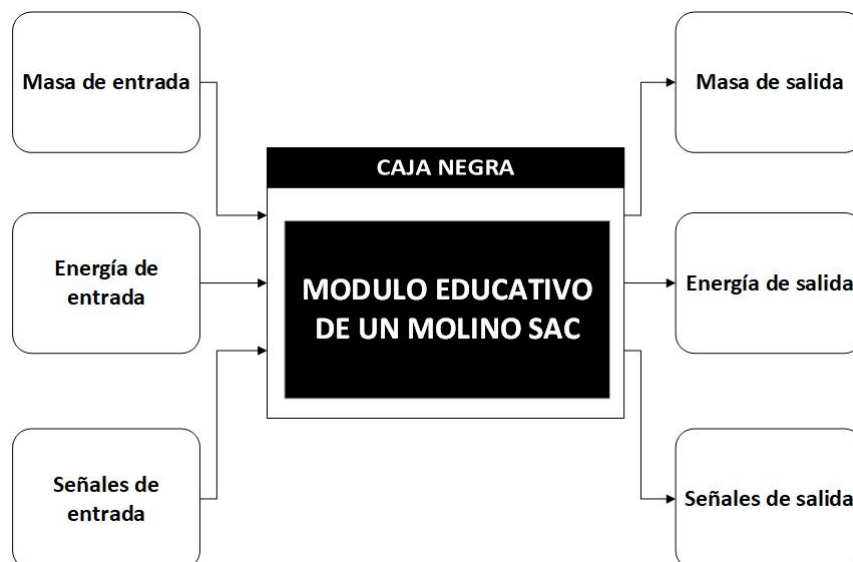


Figura 2.4: Abstracción por medio de la caja negra para los parámetros de entrada y salida  
*Elaboración propia*

### Entradas

- **Masa:** Se colocan los medios de molienda y el material a moler.
- **Energía:** Energía eléctrica que se transforma en energía mecánica.
- **Señales:** Regulación de la velocidad del molino.

### Salida

- **Masa:** reducción del tamaño del mineral y desgaste de medios de molienda.
- **Energía:** Energía por impactos y vibraciones por los medios de molienda, cinética de las partículas y el elemento, ruido y calor.
- **Señales:** Variaciones en el espectro de vibración y ubicación de zonas de impacto.

## 2.5. Estructura de funciones

Se establece la estructura de funciones del módulo educativo de vibraciones para determinar cada función parcial presente en la operación.

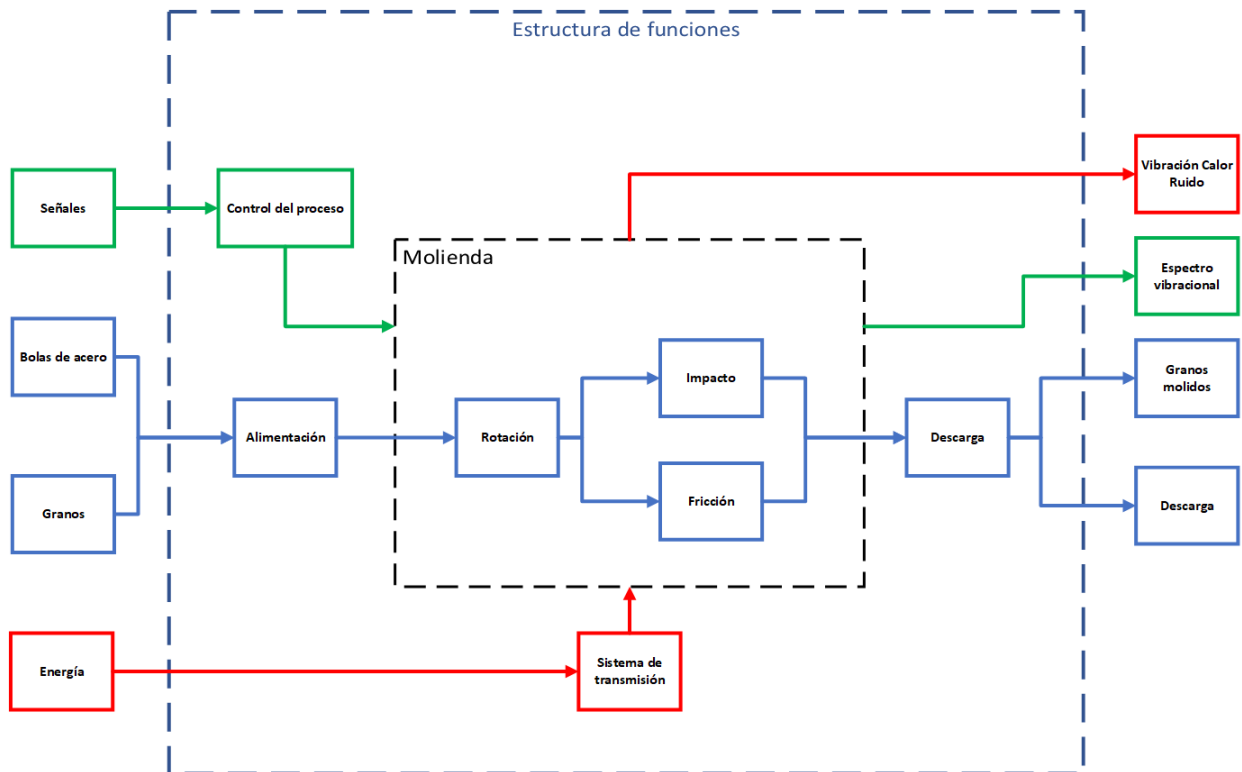


Figura 2.5: Estructura de funciones óptima  
*Elaboración propia*

Tabla 2.4: Add caption

<b>Índice de la Estructura de Funciones</b>	
<b>Alimentar</b>	Inicio del proceso de molienda, donde recibe el mineral bruto, las bolas de acero.
<b>Rotación</b>	El tambor del molino comienza su funcionamiento girando sobre su eje longitudinal
<b>Impacto</b>	Las bolas de acero por el efecto de catarata impactan en el "Pie de carga"
<b>Fricción</b>	Los granos interaccionan entre ellos en el riñón y por medio del efecto de cascada produciendo fricción.
<b>Descarga</b>	Final del proceso en la cual sale el producto molido y las bolas de acero
<b>Bolas de acero</b>	Bolas de acero.
<b>Mineral bruto</b>	Granos de arroz
<b>Energía electromecánica</b>	Energía Mecánica que entrega un motor eléctrico
<b>Transmitir potencia</b>	Sistemas que transfiere la potencia del motor al sistema de molienda.
<b>Ruido, calor y vibraciones.</b>	Energías disipadas y no aprovechadas controladas
<b>Control de velocidad</b>	Se optará por un controlador de velocidades.
<b>Control de seguridad</b>	Un sistema que corte de inmediato la energía del sistema

*Elaboración propia*

## 2.6. Matriz morfológica

En la siguiente figura 2.7, se evalúan las soluciones posibles mediante una matriz morfológica de Zwicky (2018), como se ve a continuación.

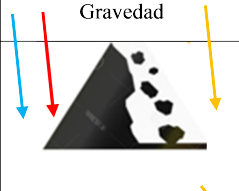
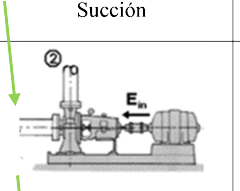
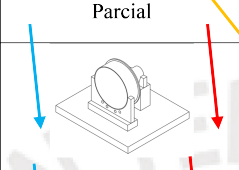
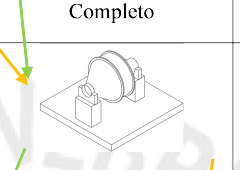
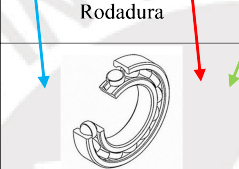
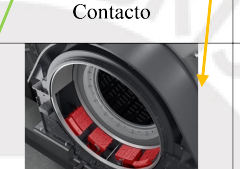
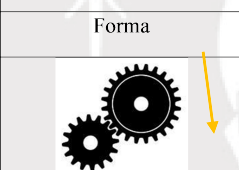
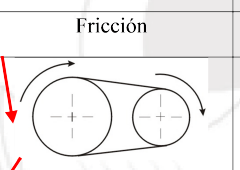
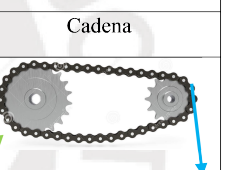
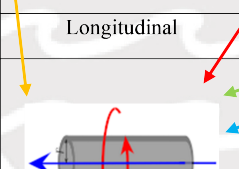
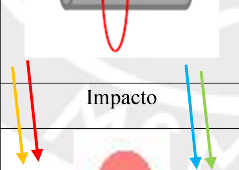
MATRIZ MORFOLÓGICA			
DISEÑO DE UN MÓDULO EDUCATIVO DE UN MOLINO SAG PARA EL ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE MOLIENDA			
Concepto solución 1		Concepto solución 3	
Concepto solución 2		Concepto solución 4	
Funciones	PORTADORES DE FUNCIONES		
Alimentar	Gravedad 	Succión 	
	Parcial 	Completo 	
Estructura	Rodadura 	Contacto 	
	Forma 	Fricción 	Cadena 
Transmisión de potencia	Longitudinal 		
Rotación	Impacto 		
Impacto			

Figura 2.6: Matriz morforlogica-1

*Elaboración propia*



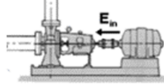



	Abrasión		
Fricción			
Descarga	Gravedad	Succión	
			
Variador de velocidad	Variador de frecuencia		
			
Registro	Visual-rodillo	Digital	
			

Figura 2.7: Matriz morforlogica-2

*Elaboración propia*

## 2.7. Conceptos solución

A continuación, se agrupan las alternativas de cada concepto solución de la matriz morfológica, de tal manera que se tiene como resultado el desarrollo de diversos conceptos de solución.

### 2.7.1. Primera alternativa

Evaluando los distintos portadores de funciones, obtenemos la primera opción la cual tiene como medio de alimentación la gravedad donde se vierten los medios de molienda y el material a moler. Además, posee una tapa lateral transparente que permite observar los mecanismos de molienda donde la transmisión se realizará con cadenas y se tendrá una configuración por apoyos de rodamientos a lo largo de un eje. Para variar las velocidades se implementará un variador de frecuencias, y se usará un dibujador de amplitudes.

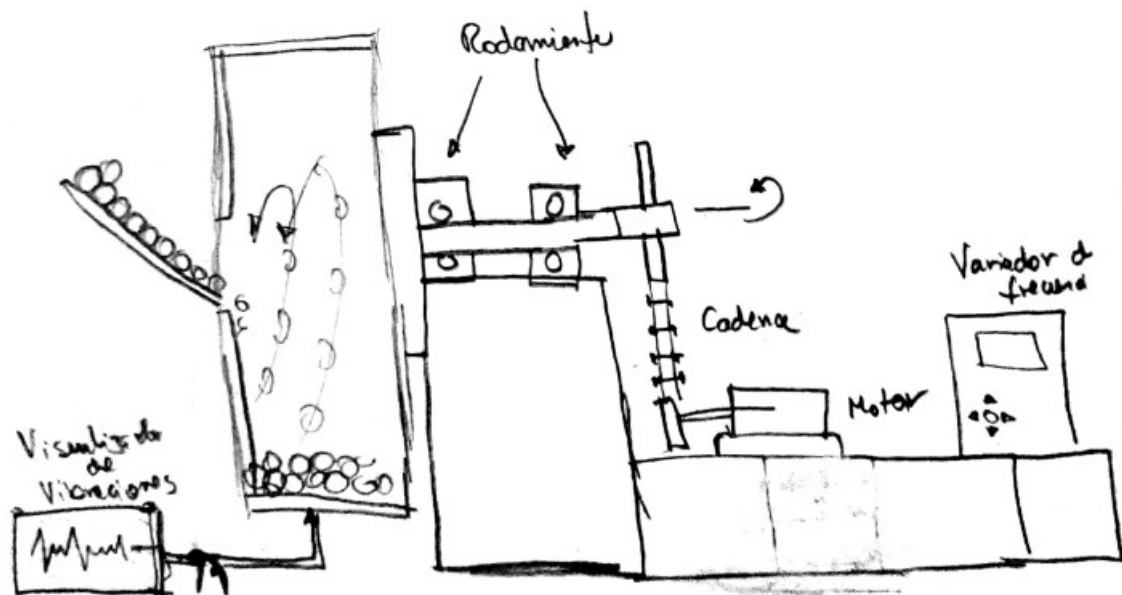


Figura 2.8: Concepto de solución C-S1

*Elaboración propia*

## 2.7.2. Segunda alternativa

Evaluando los distintos portadores de funciones, obtenemos la segunda opción la cual tiene como medio de alimentación la gravedad. Aquí se vierten los medios de molienda y el material a moler. Igualmente, posee una tapa lateral transparente que permite observar los mecanismos de molienda, donde la transmisión se hará con fajas y se tendrá una configuración por apoyos de rodamientos a lo largo de un eje. Para variar las velocidades se implementará un variador de frecuencias, y los sensores se colocarán en la periferia del molino. El prototipo trabajará en Bach.

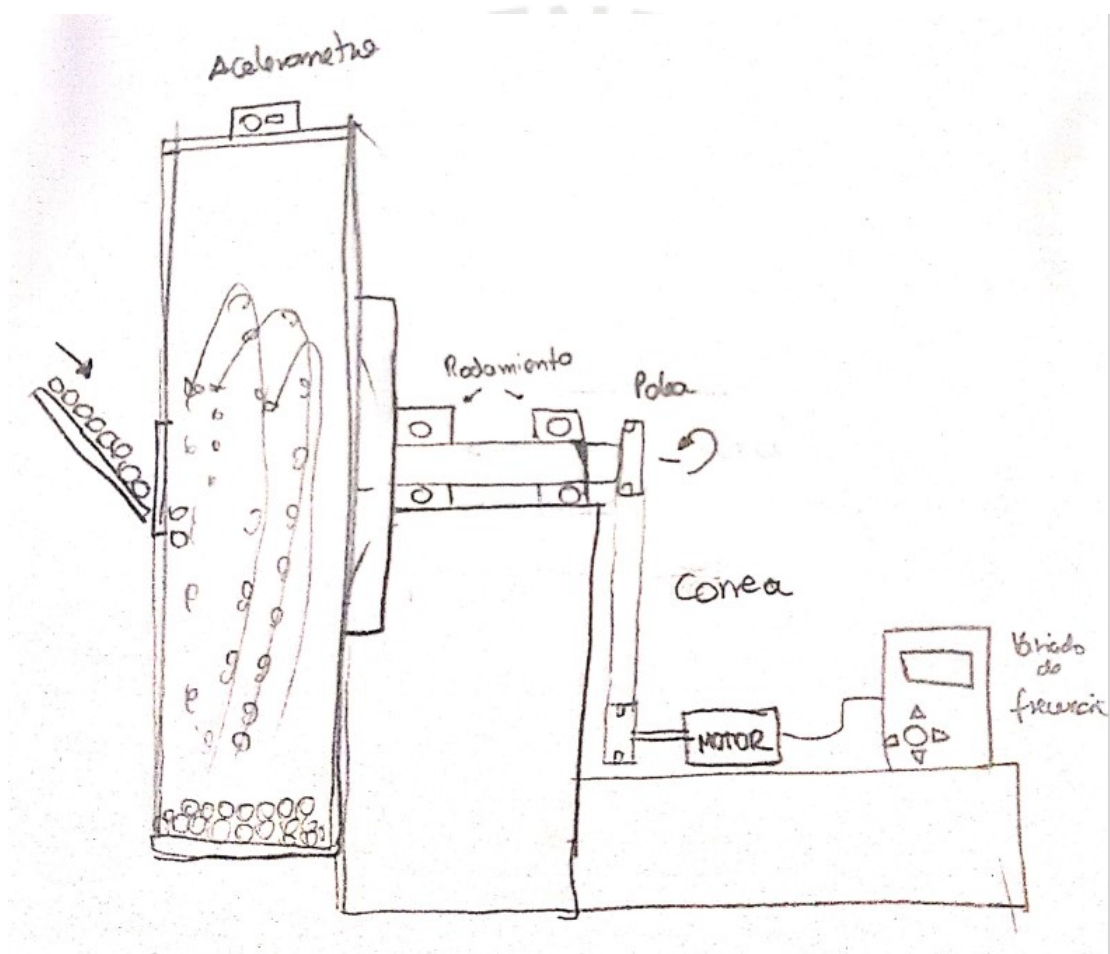


Figura 2.9: Concepto de solución C-S2

*Elaboración propia*

### 2.7.3. Tercera alternativa

Evaluando los distintos portadores de funciones, obtenemos la tercera opción, la cual tiene como medio de alimentación por gravedad y descarga por succión, el molino se soportará en dos muñones que tendrán zapatas hidrostáticas y con ello, bombas para realizar el funcionamiento. La transmisión será por una corona que estará en la periferia exterior del tambor y un piñón. Continuamente, para la reducción se usará variador de frecuencia y los sensores se colocarán alrededor del tambor del molino, para el censado de impactos y vibración.

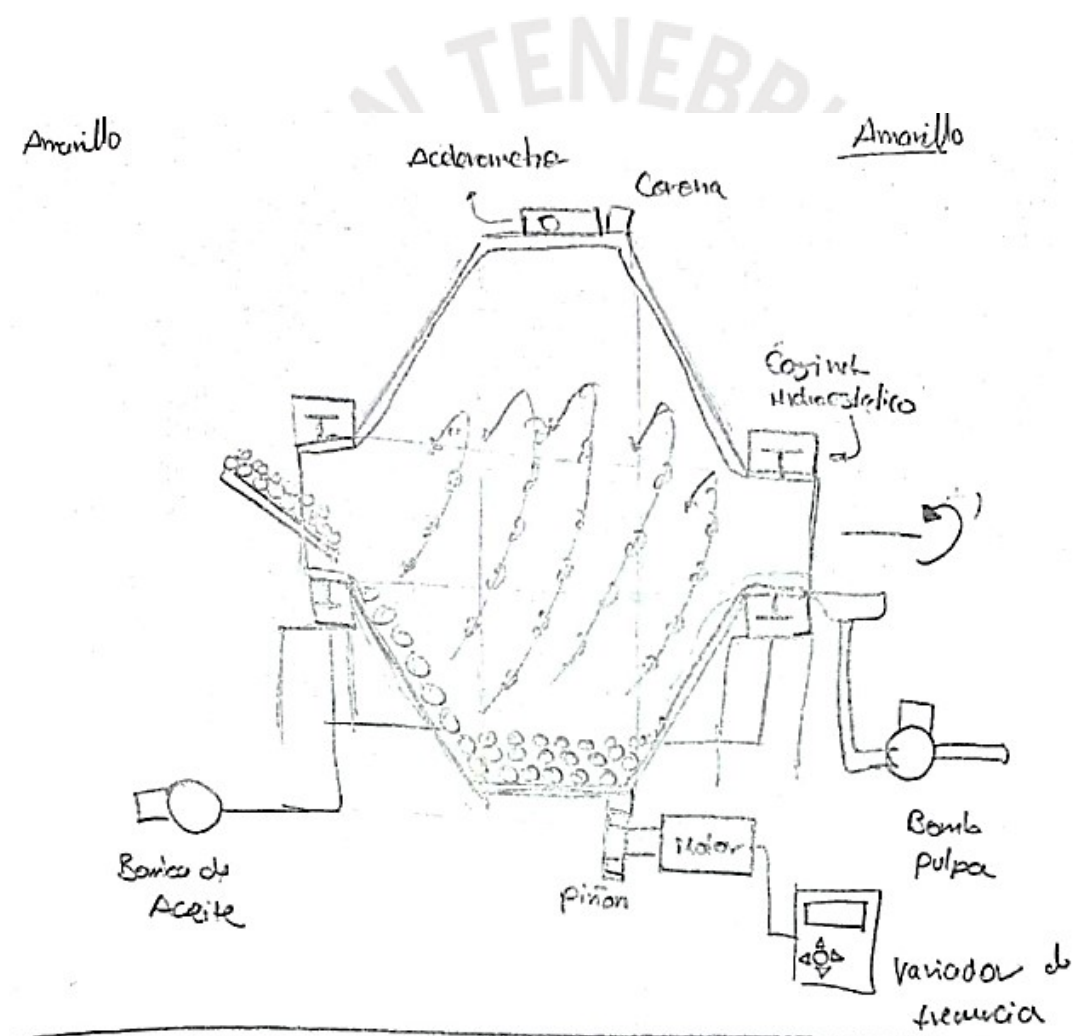


Figura 2.10: Concepto de solución C-S3

*Elaboración propia*

#### 2.7.4. Cuarta alternativa

Evaluando los distintos portadores de funciones, obtenemos la cuarta opción, la cual tiene como medio de alimentación y descarga una bomba de lodo. Para ello, el molino se soportará en dos muñones que tendrán apoyos con rodamientos. La transmisión será por una corona y sproket para cadenas que funcionan como elementos de reducción. Igualmente, para variar la velocidad se usará un variador de frecuencia. Los sensores se colocarán alrededor del tambor del molino, para el censado de impactos y vibración.

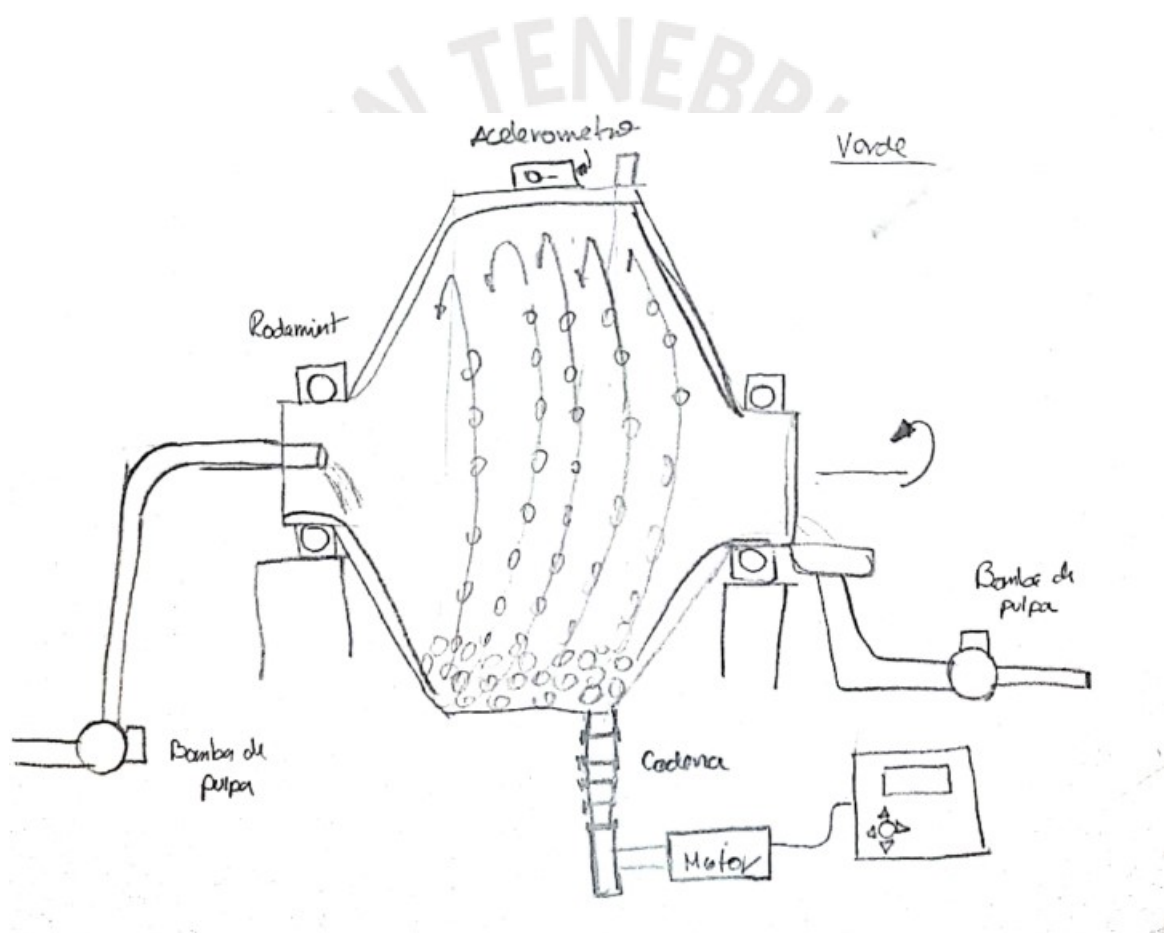


Figura 2.11: Concepto de solución C-S4

*Elaboración propia*

## 2.8. Evaluación de Conceptos

Para completar la información de los criterios que se deseen evaluar es importante contar con una tabla de conceptos para colocar un puntaje y poder seleccionar un mejor concepto de solución.

Tabla 2.5: Evaluación de conceptos de solución

<b>Diseño Mecánico - Evaluación de Conceptos</b>					
<b>0 = No satisface, 1 = Apenas aceptable, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien(ideal)</b>					
<b>Criterios de evaluación para diseños en fase de concepto.</b>					
Criterio	C-S 1	C-S 2	C-S 3	C-S 4	C-S 5 (IDEAL)
Factibilidad	2	3	2	2	4
Facilidad de Fabricación	3	2	3	2	4
Costo de tecnología	2	3	2	1	4
Facilidad de Mantenimiento	2	3	2	3	4
Facilidad de montaje	2	3	2	3	4
Eficiencia de diseño	2	3	2	3	4
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>24</b>
<i>Elaboración propia</i>					

Tabla 2.6: Índice de Conceptos de Evaluación

<b>Índice de Conceptos de Evaluación</b>	
<b>Factibilidad</b>	Contempla la probabilidad de que el concepto solución sea desarrollado en el contexto de trabajo e investigación. Cuanto más sencillos sean los componentes optimizarán el desarrollo de las investigaciones.

<b>Facilidad de Fabricación</b>	Este criterio tiene mayor puntuación cuando los elementos que componen el molino son de fácil adquisición.
<b>Costo de tecnología</b>	Este criterio tiene mayor puntuación si los elementos y procesos de fabricación más baratos que constituyan el molino de bolas.
<b>Facilidad de Mantenimiento</b>	Este criterio tiene mayor puntuación dependiendo de qué tan fácil y rápido se pueda hacer el mantenimiento dependiendo del diseño.
<b>Facilidad de montaje</b>	Este criterio tiene mayor puntuación dependiendo que tan sencillo sea montar y desmontar las piezas para mantenimiento.
<b>Eficiencia de diseño</b>	Este criterio tiene mayor puntuación dependiendo de la capacidad del sistema de utilizar la energía entregada con las menores pérdidas posibles.

---

*Elaboración propia*

Después de evaluar los criterios, se concluye que la mejor opción es el concepto solución N°2, el cual presenta una mejor alternativa para la elaboración de un molino bajo los siguientes puntos:

- Permite una visualización directa del comportamiento de los métodos de molienda, y de esta manera la identificación del conteo y ubicación de los impactos críticos. Es por ello, que se escoge la implementación de una tapa transparente, la cual estará empernada en los extremos del tambor y tendrá una abertura para que permita la alimentación de los medios de molienda y del material a moler.
- El concepto ganador presenta un funcionamiento de Bach, evitando sistemas externos de alimentación para un proceso continuo.

- Reduce la configuración del molino a un eje en voladizo que soporte el tambor y la carga, se evitan apoyos complejos de diámetros grandes como se pueden observar en las figuras 19 y 20. Además, al tener una carga de trabajo que no excederá los 50 kg, se descarta el uso de un sistema de bombeo para zapatas hidrostáticas.
- Presenta el uso de sensores digitales como acelerómetros, strain gauge, micrófonos y cámaras digitales para la medición e identificación de impactos críticos.



## 2.9. Proyectos preliminares

Para esta etapa, se desarrollarán los proyectos preliminares a partir del concepto solución - alternativa 2, se tomará en cuenta el posicionamiento de los apoyos, ya que, como se mencionó en el anterior punto, se escogió una configuración en voladizo. A continuación, se presentan dos proyectos preliminares.

### 2.9.1. Primer Proyecto preliminar

Se propone colocar el tambor en una estructura que sostiene en voladizo. Una de ellas trabajará con una estructura en forma de “C”, conformada por tubos de acero y que soportan el tambor con la carga, este diseño favorece para evitar deflexiones pronunciadas reduciendo la distancia entre el apoyo y la carga. La estructura contará con 3 tubos que funcionarán como patas para la estructura. Se utilizarán los sensores digitales, colocados en la parte externa del tambor.

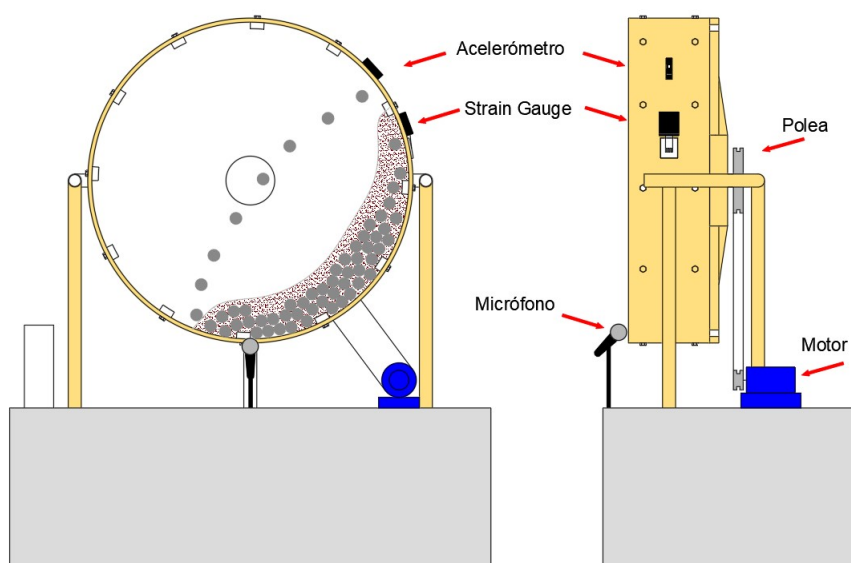


Figura 2.12: Proyecto preliminar 1 frontal y lateral

*Elaboración propia*

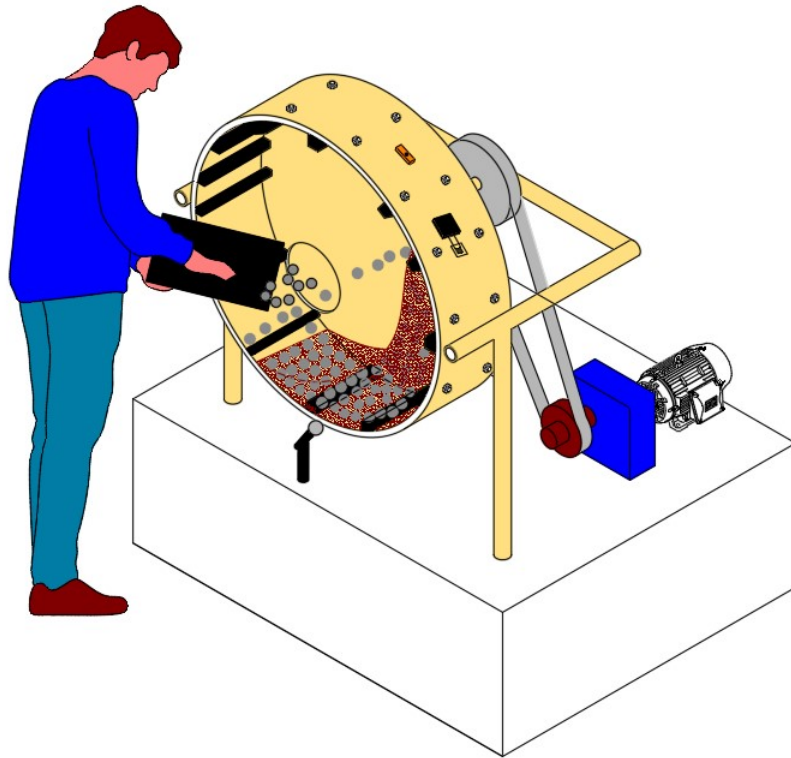


Figura 2.13: Proyecto preliminar 1 isométrico

*Elaboración propia*

### **2.9.2. Segundo Proyecto preliminar**

Se propone una configuración más simple, con un eje más largo que permita colocar apoyos a distancias adecuadas para contrarrestar el peso de la carga y la deflexión. Tendrá la misma configuración que el primer proyecto preliminar, compartiendo la misma función de alimentación y el uso de sensores digitales colocados en la periferia del molino.

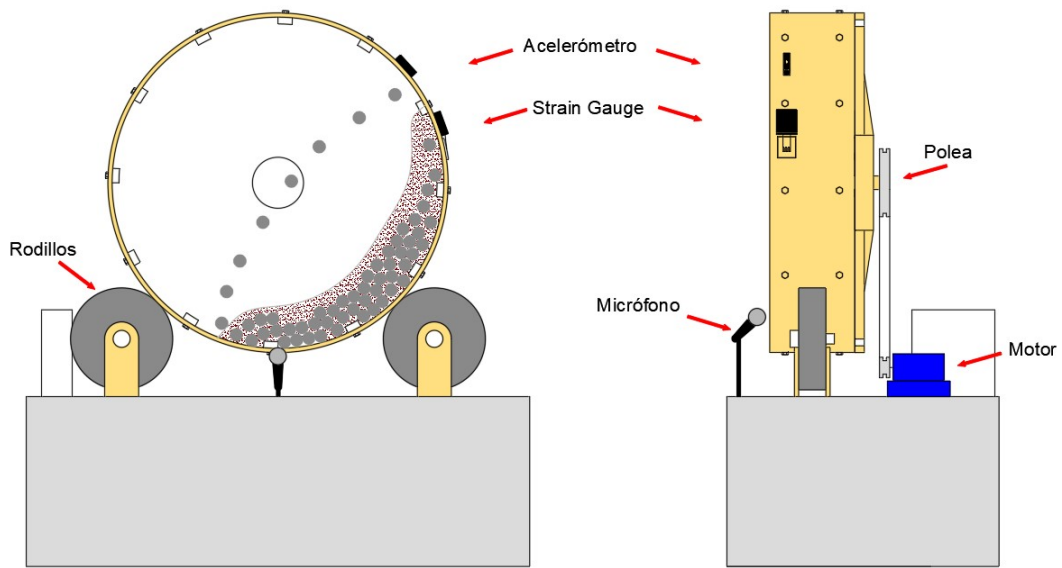


Figura 2.14: Proyecto preliminar 2 frontal y lateral

*Elaboración propia*

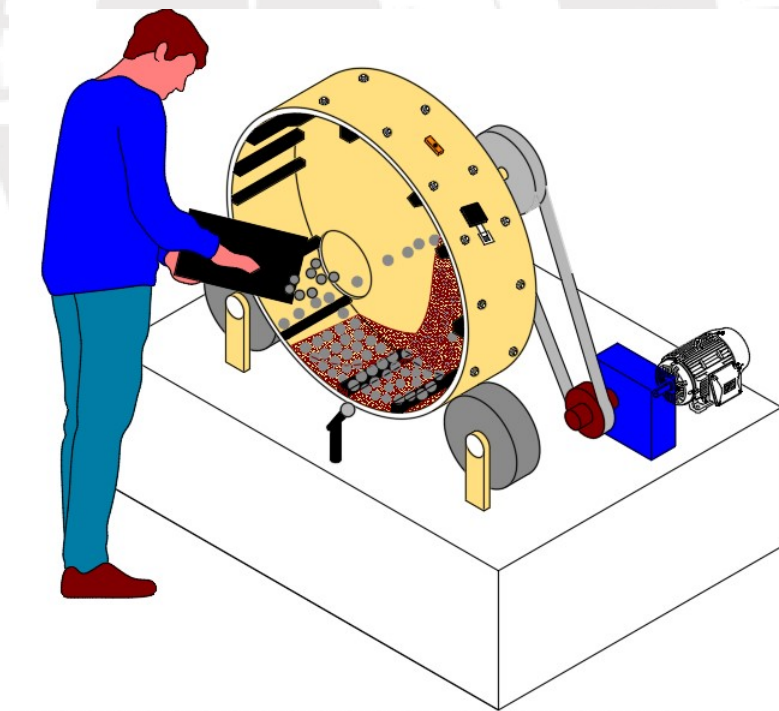


Figura 2.15: Proyecto preliminar 2 isométrico

*Elaboración propia*

### 2.9.3. Tercer Proyecto preliminar

Se propone una alternativa que evita por completo el factor de la deflexión por parte del eje, para ellos se propone colocar al molino sobre rodillos que permiten contacto directo con el tambor y un sistema de transmisión por detrás del molino. Esta alternativa al igual que las primeras compartirá la función de alimentación y el uso de sensores digitales colocados en la periferia del molino.

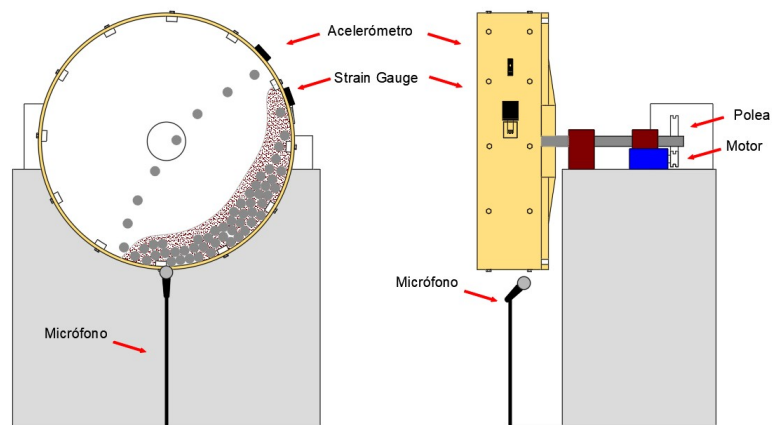


Figura 2.16: Proyecto preliminar 3 frontal y lateral

*Elaboración propia*

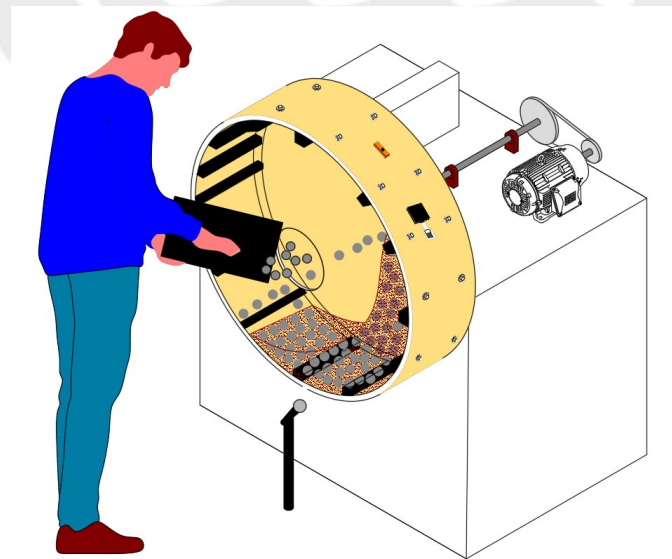


Figura 2.17: Proyecto preliminar 3 isométrico

*Elaboración propia*

#### 2.9.4. Cuarto Proyecto preliminar

Se tiene una última alternativa, en la cual se decide utilizar un sistema de transmisión directo, utilizando un acople flexible y 2 apoyos para sostener al eje del molino. Esta alternativa, al igual que el primer y segundo proyecto preliminar, compartirá la función de alimentación y el uso de sensores digitales colocados en la periferia del molino.

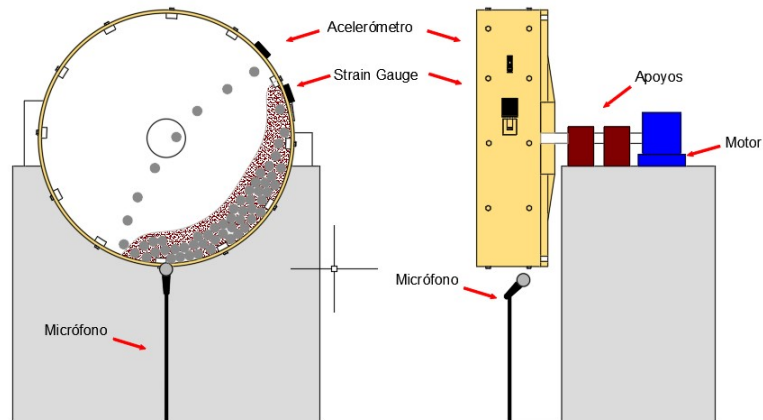


Figura 2.18: Proyecto preliminar 4 frontal y lateral

*Elaboración propia*

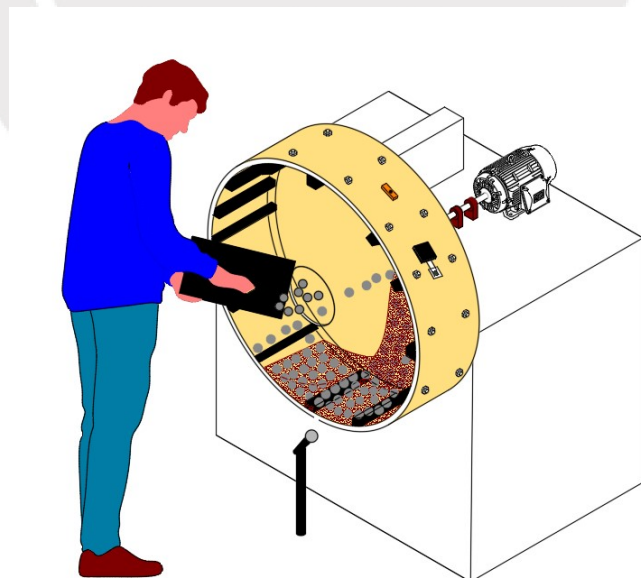


Figura 2.19: Proyecto preliminar 4 isométrico

*Elaboración propia*

## 2.10. Evaluación de los proyectos preliminares

Se evalúan los proyectos preliminares según los criterios económicos y técnicos para encontrar el más adecuado.

Tabla 2.7: Tabla de peso y puntaje para la evaluación técnica y económica

g	Peso ponderado	Se tomará valores de 1 a 6
p	Puntaje	Se tomará valores de 0 a 4 (0=No satisfice, 1=Aceptable holgadamente, 2 Suficiente; 3=Bien,4=Muy bien o ideal)

*Elaboración propia*

Tabla 2.8: Evaluación técnica de los proyectos preliminar

Variantes de Concepto/Proyectos		Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución 4		Solución 5		
Nº	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	<b>Función</b>	0.1	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3	4	0.4
2	<b>Buen uso de la fuerza o energía</b>	0.1	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3	4	0.4
3	<b>Seguridad</b>	0.04	3	0.12	1	0.04	3	0.12	3	0.12	4	0.16
4	<b>Estabilidad</b>	0.1	2	0.2	1	0.1	3	0.3	3	0.3	4	0.4
5	<b>Rigidez</b>	0.1	2	0.2	1	0.1	3	0.3	3	0.3	4	0.4
6	<b>Manipulación</b>	0.04	3	0.12	3	0.12	3	0.12	3	0.12	4	0.16
7	<b>Confiabilidad</b>	0.04	3	0.12	2	0.08	1	0.04	3	0.12	4	0.16
8	<b>Facilidad de manejo</b>	0.05	3	0.15	3	0.15	1	0.05	3	0.15	4	0.2
9	<b>Transportabilidad</b>	0.05	2	0.1	3	0.15	1	0.05	3	0.15	4	0.2
10	<b>Calidad de trabajo</b>	0.05	3	0.15	3	0.15	3	0.15	3	0.15	4	0.2
11	<b>Complejidad</b>	0.04	3	0.12	3	0.12	3	0.12	3	0.12	4	0.16
12	<b>Lista de exigencias</b>	0.1	3	0.3	2	0.2	3	0.3	3	0.3	4	0.4
13	<b>Posibilidades de automatización</b>	0.04	3	0.12	3	0.12	2	0.08	3	0.12	4	0.16
14	<b>Grado de contaminación</b>	0.04	3	0.12	3	0.12	3	0.12	3	0.12	4	0.16
15	<b>Fácil reciclaje</b>	0.02	3	0.06	3	0.06	3	0.06	3	0.06	4	0.08
16	<b>Número de piezas</b>	0.04	3	0.12	3	0.12	3	0.12	3	0.12	4	0.16
17	<b>Fácil adquisición de los materiales de fabricación</b>	0.05	3	0.15	3	0.15	2	0.1	3	0.15	4	0.2
<b>Suma Total</b>		1	48	2.75	43	2.38	43	2.63	51	3	68	4
<b>Valor Técnico Xi</b>		<b>X1</b>	0.69	<b>X2</b>	0.6	<b>X3</b>	0.66	<b>X4</b>	0.75	<b>X5</b>	1	

*Elaboración propia*

Tabla 2.9: Evaluación económica de los proyectos preliminares

Variantes de Concepto/Proyectos		Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución ideal						
N°	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Costo de operación	0.2	3	0.6	3	0.6	3	0.6	3	0.6	4	0.8
2	Costo de fabricación	0.2	2	0.4	2	0.4	3	0.6	3	0.6	4	0.8
3	Costo de tecnología	0.2	3	0.6	3	0.6	2	0.4	3	0.6	4	0.8
4	Costo de mantenimiento	0.2	3	0.6	3	0.6	2	0.4	3	0.6	4	0.8
5	Productividad	0.08	3	0.24	3	0.24	3	0.24	3	0.24	4	0.32
6	Numero de operarios	0.04	3	0.12	3	0.12	3	0.12	3	0.12	4	0.16
8	Costos diversos	0.08	3	0.24	3	0.24	3	0.24	3	0.24	4	0.32
<b>Suma Total</b>		1	20	2.8	20	2.8	19	2.6	21	3	28	4
<b>Valor Económico Yi</b>		<b>Y1</b>	0.7	<b>Y2</b>	0.7	<b>Y3</b>	0.65	<b>Y4</b>	0.75	<b>Y4</b>	1	

*Elaboración propia*

Tabla 2.10: Tabla de contenido de la evaluación técnica

Aspectos Técnicos		
1	Función	Se refiere que tanto el diseño preliminar cumple con satisfacer las funciones principales
2	Buen uso de la fuerza o energía	Se refiere a qué tan eficiente son sus sistemas de transformación de energía para hacer funcionar el molino
3	Seguridad	Este aspecto se refiere si el diseño tiene medidas que disminuyan el riesgo en operación.
4	Rapidez	El uso adecuado de la velocidad para provocar los mecanismos de molienda
5	Estabilidad	Se refiere a que el diseño no permita movimientos oscilatorios o vibratoriales que incomoden y perjudiquen el proceso de molienda.
6	Rigidez	Que el diseño del equipo mantenga la rigidez adecuada para evitar resonancia.
7	Manipulación	Que tanto pueda ser utilizar el proceso completo de trabajo desde la alimentación, accionamiento y descarga.
9	Facilidad de manejo	Que tanto pueda ser utilizar el proceso completo de trabajo desde la alimentación, accionamiento y descarga.
11	Transportabilidad	Facilidad de movilizar al molino
12	Calidad de trabajo	Se refiere a las condiciones de adaptación del operario a la máquina
13	Complejidad	Se refiere a que tanto puede ser minimizado el espacio con las restricciones del diseño.
14	Lista de exigencias	Se refiere a que tanto cumple la lista de exigencia, incluyendo a los deseos
15	Posibilidades de automatización	Se refiere si es posible que pueda automatizarse.
16	Grado de contaminación	Qué tan perjudicial es el proceso que contamine el medio ambiente
17	Fácil reciclaje	Se refiere al nivel de poder reutilizar materiales
18	Número de piezas	A mayor número de piezas suele complicar el ensamblado y mantenimiento

*Elaboración propia*

Tabla 2.11: Contenido de la evaluación económica

Aspectos Económicos		
1	Costo de operación	Gastos que están relacionados con la operación del equipo.
2	Costo de fabricación	Se refiere a cuánto se gastará para la compra, ensamblado y mano de obra.
3	Costo de tecnología	Se refiere a la facilidad de adquisición de los materiales en el mercado nacional.
5	Costo de mantenimiento	Se refiere al coste que los elementos pueden soportar antes de que se necesite hacer un cambio o una corrección.
7	Número de operarios	Se refiere a cuantas personas se involucran en el proceso
8	Pocos desperdicios	Cuanto material utilizado se desperdicia

*Elaboración propia*

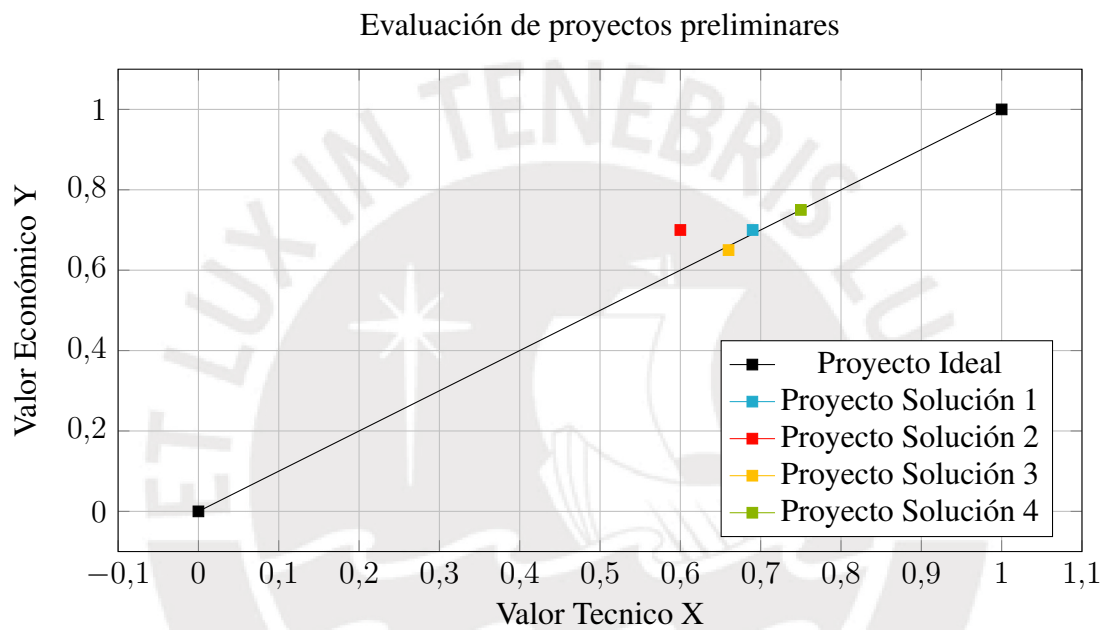


Figura 2.20: Gráfico de evaluación de proyectos preliminares

Según los resultados se decide por trabajar con el proyecto preliminar 4, esto se corrobora en la figura 2.20, en la cual se observa que es el más próximo al proyecto preliminar ideal.

## 2.11. Parámetros para el diseño del molino

En este apartado se realizarán los cálculos específicos para el diseño de la geometría en el molino, referido a la longitud y diámetro del tambor. Además, se contará con los cálculos necesarios de operación como la velocidad y potencia. Por último, se realizará el diseño óptimo del número y forma de levantadores a partir del cálculo de los mecanismos de molienda.

### 2.11.1. Dimensiones del molino

Para el diseño de las dimensiones del molino SAG, se escogerá la relación de high aspect mill, por cuestión de priorizar el principio de impacto, tal como indican Gupta y Yan (2016) teniendo mayor distancia de levantamiento de carga. Partiremos con un valor de 400 mm para cumplir los requerimientos de espacio por la lista de exigencia:

$$D = 0,4 \text{ m} \quad (2.1)$$

$$\frac{0,4}{L} = 0,3 \text{ m} \quad (2.2)$$

$$L = 0,133 \text{ m} \xrightarrow{\text{Aprox.}} L = 0,1 \text{ m} \quad (2.3)$$

### 2.11.2. Velocidad de operación

El aumento de velocidad rotacional en los molinos está relacionado directamente con la tasa de rotura del mineral y aumentando el rendimiento. Cuando la velocidad supera un determinado valor, la carga junto con los medios de molienda tiende a adherirse a la pared interior por causa del aumento de la fuerza centrífuga, evitando la formación de la catarata y cascada. Además, según Gupta y Yan (2016), la acción de molienda se reduce considerablemente o se detiene por completo y la potencia necesaria para hacer girar el molino disminuye drásticamente.

Por lo tanto, la velocidad límite a la cual deben trabajar los molinos antes que se centrifuguen se le conoce como Velocidad Crítica  $v_c$ . Para que se genere la molienda, se debe trabajar con una velocidad de operación la cual es una fracción de la velocidad crítica, trabajando en rangos entre 70 % a 80 %. Para realizar el cálculo de la velocidad partiremos de la siguiente ecuación:

$$v_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (2.4)$$

$$v_c = \frac{42,3}{\sqrt{0,4}} = 67\text{RPM} \quad (2.5)$$

Se decide trabajar con el 75 % de la velocidad crítica por términos de diseño obteniendo una velocidad de operación:

$$v_o = v_c \cdot 0,75 = 50\text{RPM} \quad (2.6)$$

$$w_o = 50 \cdot \frac{\pi}{30} = 5,24 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (2.7)$$

### 2.11.3. Ángulo dinámico de reposo de la carga

Los molinos al levantar la carga generan que los sedimentos resbalan continuamente desde el extremo del hombro al pie de la carga generando el efecto de cascada, este fenómeno traza un desplazamiento en forma de pendiente generando así un ángulo de levantamiento como se muestra en la figura 2.21, a este se le denomina como ángulo dinámico de reposo. Para estimar el valor de dicho ángulo se usará la ecuación propuesta por Xiong, S. L. (1989) citado por Niansheng y Kuifeng (2016).

$$\alpha_d = 36,45 + 4,294 \ln(D_g) \quad (2.8)$$

$$\alpha_d = 36,45 + 4,294 \ln(5) = 43^\circ \quad (2.9)$$

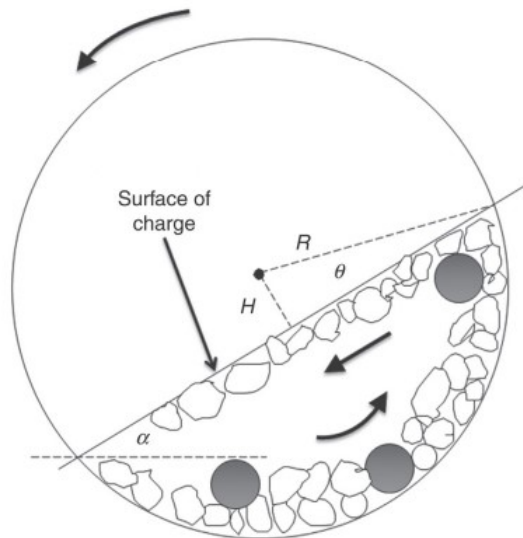


Figura 2.21: Ubicación del ángulo dinámico de reposo

Tomado de “Mineral processing design and operation” por Ashok Gupta y Denis Yan (2016)

#### 2.11.4. Estimación de la carga

Los molinos SAG trabajan con un nivel de carga entre el 30 % y el 35 % del volumen interior, de los cuales los medios de molienda ocupan entre el 5 % y 15 % de volumen (Ashok Gupta y Denis Yan, 2016). Cabe mencionar que la carga está formada por la suma de los medios de molienda y la pulpa.

$$V_t = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \quad (2.10)$$

$$V_t = \frac{\pi}{4} \cdot (0,4)^2 \cdot (0,1) = 0,0126 \text{ m}^3 \quad (2.11)$$

Se denominará como  $J_t$  al porcentaje de volumen ocupado por la carga en el interior del molino, de esta manera multiplicando el valor del volumen total obtendremos:

$$V_J = J_t \cdot V_t \quad (2.12)$$

$$V_J = (0,35) \cdot (0,0126) = 4,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.13)$$

La aglomeración de las bolas de acero en el interior del molino provoca espacios vacíos

los cuales se llaman intersticios, los cuales se llenan con la pulpa. Para estimar el peso de pulpa(arroz) y los medios de molienda se usará un valor de fracción de volumen de sólidos de la carga.

$$V_J = V_p + V_b \quad (2.14)$$

Para referirse a la porosidad en el lecho de la carga use usará el término “C”, acorde a Tangsathitkulchai (2003), el cual recomienda asumir con un valor del 40 %.

$$V_p = C \cdot V_J \quad (2.15)$$

$$V_p = (0,4) \cdot 4,4 \times 10^{-3} = 1,76 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.16)$$

Finalmente calculamos el valor del volumen de bolas

$$4,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1,76 \times 10^{-3} \text{ m}^3 + V_b \quad (2.17)$$

$$V_b = 2,64 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.18)$$

Para estimar el valor de la carga se multiplicarán los volúmenes calculados anteriormente por sus densidades respectivas.

$$m_p = \rho_p \cdot V_p \quad (2.19)$$

$$m_b = \rho_b \cdot V_b \quad (2.20)$$

$$m_j = m_p + m_b \quad (2.21)$$

Considerando la densidad del acero para los medios de molineda y la densidad de arroz para la pulpa:

$$m_p = (7850) \cdot (2,73 \cdot 10^{-3}) = 20,7 \text{ kg} \quad (2.22)$$

$$m_b = (800) \cdot (1,82 \cdot 10^{-3}) = 1,4 \text{ kg} \quad (2.23)$$

$$m_j = 20,7 + 1,4 = 22,1 \text{ kg} \quad (2.24)$$

### 2.11.5. Estimación de la potencia

Primero se debe estimar el valor de la distancia del centro del molino al centro de gravedad de la carga  $H_{cog}$ , para ello se usará la siguiente relación geométrica, donde  $\theta$  es el ángulo geométrico que se proyecta en el tambor, ver figura 2.22 y 2.23:

$$V_J = V_{seccin} - V_{triangulo} \quad (2.25)$$

$$V_J = \frac{r_m^2 \cdot \theta}{2} \cdot l - \frac{r_m^2 \cdot \sin(\theta)}{2} \cdot l \quad (2.26)$$

Apartir de las ecuaciones 2.13 y 2.26, se tiene como resultado:

$$\theta = 2,49\text{rad} = 142,7^\circ \quad (2.27)$$

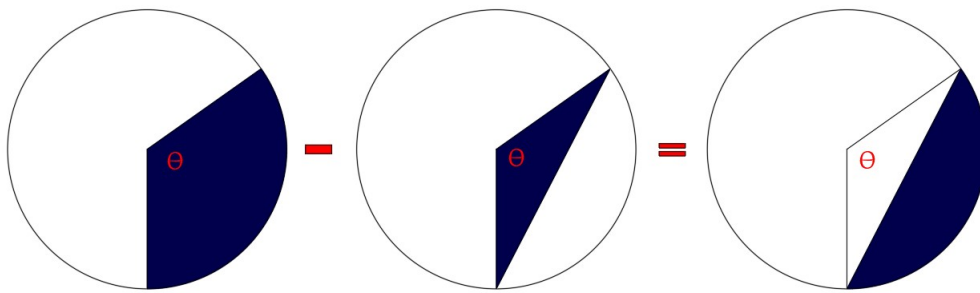


Figura 2.22: Resta de áreas

*Elaboración propia*

Por último, se usará la siguiente relación geométrica:

$$\frac{H_{COG}}{D} = \frac{\frac{2}{3} \sin^3 \left( \frac{\theta}{2} \right)}{\theta - \sin(\theta)} = \frac{\frac{2}{3} \sin^3 \left( \frac{142,7^\circ}{2} \right)}{2,49 - \sin(142,7^\circ)} \quad (2.28)$$

$$H_{COG} = 0,12 \text{ m} \quad (2.29)$$

La potencia de un molino es expresada según Arbiter y Harris (1982) citado por Morrell (1993), se estima que el torque generado para mantener la carga en equilibrio, debe estimar el valor del brazo de palanca ( $l_{COG}$ ), figura 2.23.

$$l_{\text{COG}} = H_{\text{COG}} \cdot \sin(\alpha_d) \quad (2.30)$$

$$l_{\text{COG}} = (0,12) \cdot \sin(43^\circ) = 0,083 \text{ m} \quad (2.31)$$

Teniendo el valor del brazo de palanca y la masa de la carga se puede estimar el torque:

$$\tau = l_{\text{COG}} \cdot m_j \cdot g \quad (2.32)$$

$$\tau = (0,083) \cdot (22,1) \cdot (9,81) = 17,93 \text{ Nm} \quad (2.33)$$

Finalmente se utiliza los valores de torque y rpm para obtener el valor de la potencia requerida:

$$P_M = \tau \cdot \omega_o \quad (2.34)$$

$$P_M = (17,93) \cdot (5,23) = 94,20 \text{ watt} \quad (2.35)$$

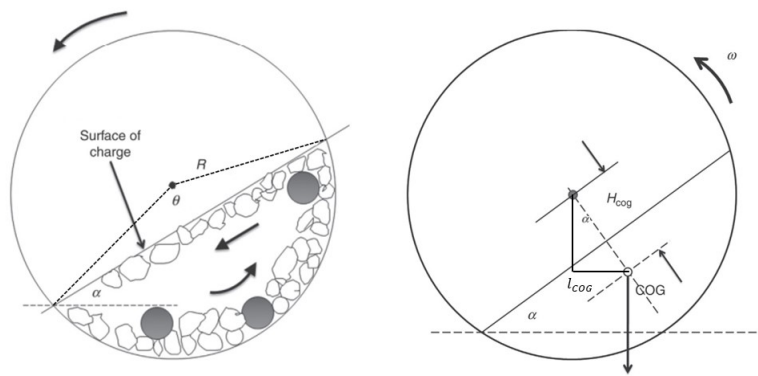


Figura 2.23: Ubicación del ángulo geométrico, ángulo de reposo dinámico y distancia hacia el centro de gravedad

Tomado de “Mineral processing design and operation” por Ashok Gupta y Denis Yan (2016)

A continuación, se colocará una tabla de resumen de los parámetros anteriormente calculados. Además, se realizaron los cálculos para 2 casos adicionales donde se varía la carga y la velocidad de operación.

Tabla 2.12: Tabla de resumen de parámetros de diseño

Parametros de diseño	Simbolo	1	2	3
Diametro (m)	$D$	0.4	0.4	0.4
Longitud (m)	$L$	0.1	0.1	0.1
Velocidad critica (rpm)	$v_c$	66.9	66.9	66.9
Porcentaje de la velocidad de operacion (%)	-	0.8	0.8	1.0
Velocidad de operación (rpm)	$w_o$	50.2	53.5	66.9
Diametro de particula (mm)	$D_g$	5.0	5.0	5.0
Angulo dinamico de reposo (°)	$\alpha_d$	43.4	43.4	43.4
Volumen total (m3)	$V_t$	1.26E-02	1.26E-02	1.26E-02
Porcentaje de la carga (%)	$J_t$	0.4	0.4	0.5
Volumen de la carga (m3)	$V_j$	4.40E-03	5.03E-03	6.28E-03
Factor de insterticios (%)	$C$	0.4	0.4	0.4
Volumen de la pulpa (m3)	$V_p$	1.76E-03	2.01E-03	2.51E-03
Volumen de bolas (m3)	$V_b$	2.64E-03	3.02E-03	3.77E-03
Masa de pulpa (kg)	$m_p$	1.4	1.6	2.0
Maasa de bolas (kg)	$m_b$	20.7	23.7	29.6
Masa de carga (kg)	$m_j$	22.1	25.3	31.6
Angulo geometrico de proyeccion (rad)	$\theta$	2.5	2.7	2.8
Angulo geometrico de proyeccion (°)	$\theta$	142.7	152.5	161.8
Distancia ala COG (m)	$H_{COG}$	1.20E-01	1.11E-01	1.02E-01
Brazo de palanca (m)	$l_{COG}$	8.26E-02	7.63E-02	7.01E-02
Torque (Nm)	$\tau$	17.9	18.9	21.7
Potencia requerida (watt)	$P_M$	94.2	106.0	152.3

*Elaboración propia*

## 2.12. Cálculo del medio de molienda

Previamente se tuvo una experiencia basada en la fabricación del molino (Figura 2.3) y se identificó, en las pruebas, que las bolas de acero de 10 mm, establecen mejores resultados al momento de censar los impactos por medio de acelerómetros y straining gauge. En este apartado se realizará un cálculo aproximado para estimar el tamaño y cantidad de bolas que forman parte de los mecanismos de molienda que deben cumplir dos criterios para el diseño respectivamente, el primero será por medio del escalamiento utilizando los principios de similitud propuesto por (Zhang, 2015) y el segundo para estimar la cantidad de bolas utilizando una conversión volumétrica.

$$\lambda_D = \frac{D_e}{D_r} \quad (2.36)$$

$$\lambda D_b = \frac{Db_e}{Db_r} \quad (2.37)$$

$$\frac{D_e}{D_r} = \frac{Db_e}{Db_r} \xrightarrow{\text{Remplazando}} \frac{\lambda_D}{\lambda D_b} = 1 \quad (2.38)$$

Se utilizarán los sub índices r y e refiriéndose al modelo real y al modelo escalado. Se tienen la relación geométrica entre el diámetro del molino y diámetro de las bolas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Datos generales	
Número de TAG	: 310-MLS-0001
Fabricante	: FFE Minerals
Tipo	: Molienda húmeda, descarga por rejillas ranuradas (stots).
Tamaño (Diámetro x Largo)	: 40 pies x 22 pies
Capacidad (diseño)	: 4, 688 TPH
Carga de Bolas	: 20% del volumen (máx.)
Carga de Mineral	: 30% del volumen (máx.)
Velocidad de Giro	: 9.04 RPM variable.
Pulpa de Alimentación	: 80% pasante 150 mm
Apertura de Rejilla	: 65 mm.
Diámetro de bolas	: 5 pulgadas (127 mm)
Trommel	
Capacidad (diseño)	: 5, 625 TPH
Oversize	: 2, 801 TPM
Undersize	: 3, 544 TPM
Apertura rejilla (Ancho x Largo)	: 13 mm x 50 mm
Agua de Lavado	: 450 m <sup>3</sup> /h

Figura 2.24: Especificaciones técnicas del molino SAG de Tintaya-Antapacay

Tomado de “Manual de operaciones de planta concentradora Tintaya-Antapacay” (s.f.)

Remplazando los valores de diámetros y considerando el tamaño de bolas utilizadas para utilizarán los sub índices r y e refiriéndose al modelo real y al modelo escalado. Se tienen la relación geométrica entre el diámetro del molino y diámetro de las bolas.

$$\frac{D_r}{D_e} = \frac{Db_r}{Db_e} \quad (2.39)$$

A continuación, se coloca un cuadro con los valores recopilados, para realizar el escalado al molino SAG de Antapacay.

Tabla 2.13: Diámetros de bolas de acero y escalado

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro real	40	ft
Diámetro real	12192	mm
Diámetro escalado	400	mm
Diámetro de las bolas real	5	in
Diámetro de las bolas real	127	mm

*Elaboración propia*

$$\frac{12,192}{0,4} = \frac{0,127}{Db_e} \quad (2.40)$$

$$Db_e = 4,2 \xrightarrow{\text{Aprox.}} 10mm \quad (2.41)$$

Conociendo el valor del diámetro del medio de molienda se puede calcular la cantidad de este utilizando ecuaciones el volumen de la esfera y la densidad del acero. De la tabla 2.12 se conoce el volumen que ocupa las bolas de acero y se igualan estas dos ecuaciones para despejar el número de bolas necesarias.

$$V_b = n_b \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_b^3 \quad (2.42)$$

$$2,64x10^{-3} = n_b \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (0,005)^3 \quad (2.43)$$

$$n_b = 5042 \quad (2.44)$$

## 2.13. Diseño de levantadores

Se desea realizar diferentes ensayos en los cuales se pueda observar, registrar y demostrar cómo la altura y el ángulo de cara de levantador, interviene como uno de los parámetros más importantes en el control de los impactos para el mejoramiento del rendimiento en molienda. Es por ello que se propone diseñar 4 tipos de levantadores:

- 2 levantadores con diferentes alturas, pero ángulo de cara constante.
- 2 levantadores con diferentes ángulos de cara, pero con altura constante.

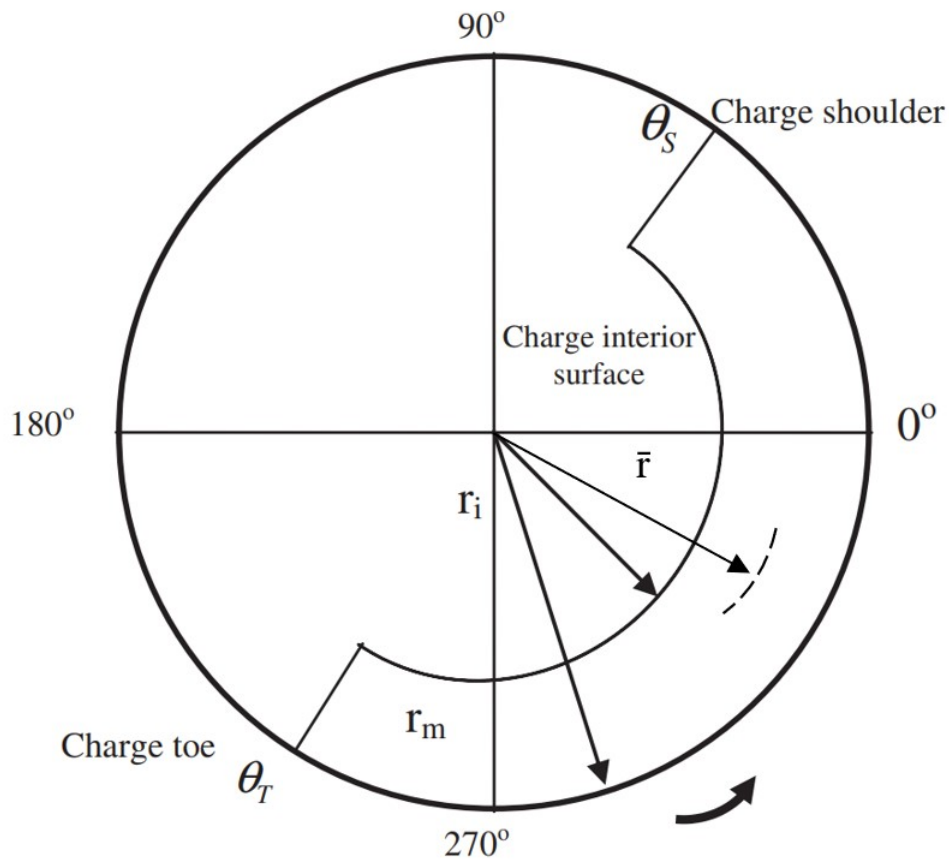


Figura 2.25: Posiciones de ángulo de pie de carga, hombro, radio del riñón interno  
Tomado de “A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills” por  
Maleki et al. (2013)

En primer lugar, se diseñará el levantador con la geometría óptima, de manera que pueda mostrar adecuadamente los mecanismos de molienda y no provoque la menor cantidad de impactos críticos. Para ello se utilizará las ecuaciones de posición del hombro y el pie de la carga, como se muestra en la figura 31. Para realizar el diseño, se usarán las ecuaciones dadas en la publicación del 2013, “A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills”, propuestas por Maleki et al. (2013)

$$\theta_T = (-1,01 \cdot J_t - 0,156(C_s^* - C_s) + 158,5)(1 - e^{-0,69(C_s^* - C_s)}) + 90 \quad (2.45)$$

El valor del ángulo del pie de la carga se expresa en grados decimales, para ello se determinan los valores de fracción de velocidad crítica teórica ( $C_s$ ) y fracción de velocidad crítica experimental ( $C_s^*$ ). La publicación realiza experimentos en molinos de laboratorio, los cuales le permiten concluir con una expresión que representa un valor de la velocidad crítica experimental en función a la altura del levantador y el diámetro del molino:

$$C_s^* = C_s; \quad C_s > A \quad (2.46)$$

$$C_s^* = A; \quad C_s < A \quad (2.47)$$

$$A = -0,5J_t - 0,914H_l + 148,9 \quad (2.48)$$

Donde  $H_l$  es adimensional, y depende de la relación entre la altura del levantador ( $L_h$ ) en y el diámetro del molino ( $D$ ):

$$H_l = \frac{L_h}{0,001D} \quad (2.49)$$

Luego, para estimar el valor de la posición del ángulo de hombro de la carga, se utilizará la siguiente ecuación, la cual depende tanto del ángulo de pie de carga, y el ángulo de cara del levantador:

$$\theta_S = 90 - (\theta_T - 90) \left( \frac{-0,7J_t - 0,57C_s + 0,28l_a + 103,7}{100} \right) \quad (2.50)$$

El ángulo de cara del levantador ( $l_a$ ) se forma a partir de una línea vertical y la cara del levantador, en la figura 2.26.

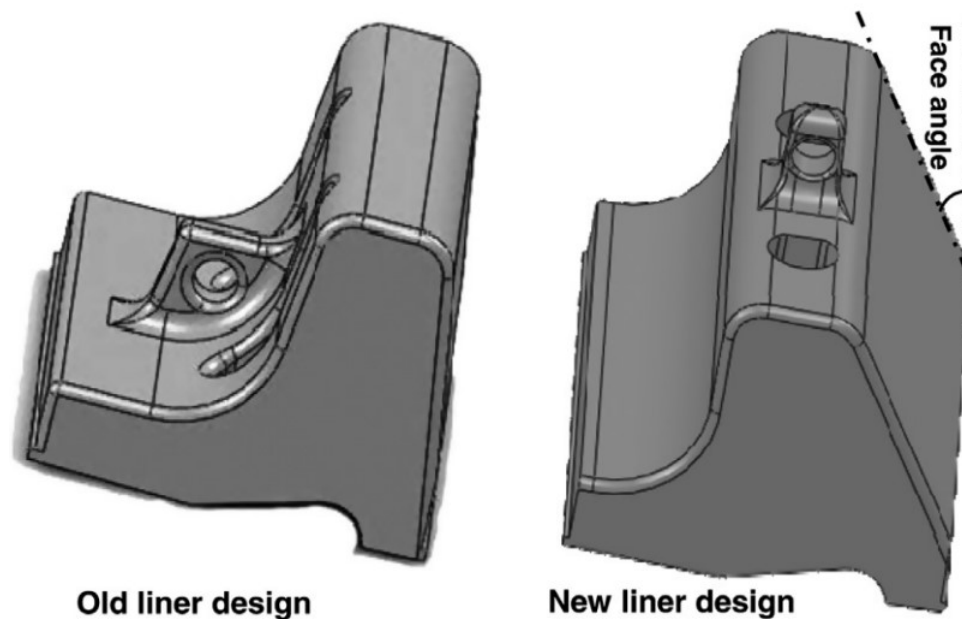


Figura 2.26: Ubicación del ángulo de cara del levantador (face angle)

Tomado de “A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills” por Maleki et al. (2013)

Por último, se tiene la ecuación que permite estimar el radio interior del riñón ( $r_i$ ), con el fin de precisar la geometría y las áreas donde deben caer los medios de molienda figura 2.25. Según Morrell (1993), el radio interno depende del radio del molino ( $r_m$ ) y fracción de la carga activa ( $\beta$ ).

$$r_i = r_m \left( 1 - \frac{2\pi\beta J_t}{2\pi + \theta_s - \theta_T} \right)^{0,5} \quad (2.51)$$

La carga activa se puede expresar como la relación que existe en el tiempo que tarda una partícula en subir del pie al hombro la carga respecto al tiempo total de desplazamiento interno en el molino:

$$\beta = \frac{t_c}{t_f + t_c} \quad (2.52)$$

Para ello se deben calcular los tiempos en la que tarda el medio de molienda en recorrer del pie al hombro dentro de la carga activa ( $t_c$ ), y el tiempo que tarda en desplazarse del hombro al pie de la carga en caída libre ( $t_f$ ).

$$t_c = \frac{2\pi + \theta_s - \theta_T}{\left(\frac{2\pi\bar{N}}{60}\right)} \quad (2.53)$$

$$t_f = \left(\frac{2\bar{r}(\sin(\theta_s) - \sin(\theta_T))}{g}\right)^{0,5} \quad (2.54)$$

Primero se estimará la velocidad de operación media del giro molino ( $\bar{N}$ ). Para ello, se divide la velocidad de operación a la mitad y, por otro lado, se estimará el valor del radio medio del riñón ( $\bar{r}$ ) ubicado entre el radio interno del riñón y el radio del molino en metros como se muestra en la figura 2.25.

$$\bar{N} = \frac{V_o}{2} \quad (2.55)$$

$$\bar{r} = \frac{r_m}{2} \left(1 + \left(\frac{2\pi J_t}{2\pi + \theta_s - \theta_T}\right)^{0,5}\right) \quad (2.56)$$

Se encontrará el valor de la altura del levantador, para ellos se probará con alturas dando valores de 0 a 25 mm en función del ángulo de pie de carga, estos valores se graficarán para ver la tendencia y en qué rango se puede tomar para iniciar el diseño óptimo.

### 2.13.1. Grafica de diseño de levantador

Debido a la extensa naturaleza de las ecuaciones antes mencionadas, se propone la elaboración de gráficos específicos para facilitar la interpretación que ayude a la selección y diseño de los levantadores. Se trabajarán con las ecuaciones 2.45 y 2.50.

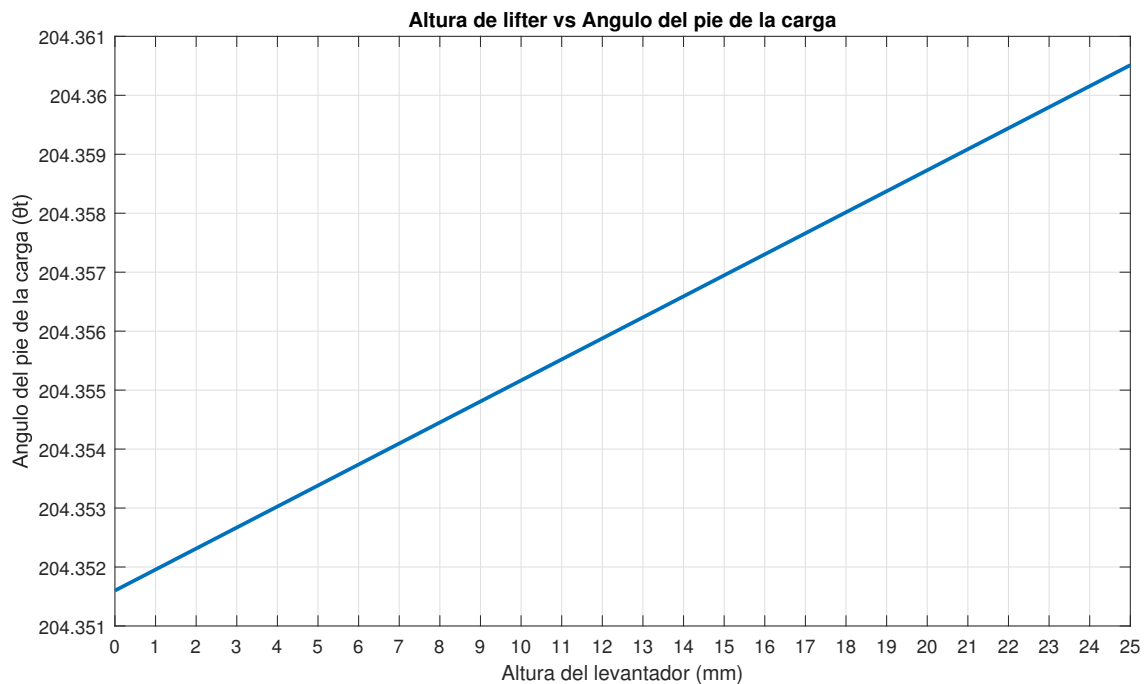


Figura 2.27: Gráfica de altura de levante en función del ángulo de pie.

*Elaboración propia*

Como se ve en la figura 2.27, la gráfica muestra un comportamiento de tendencia lineal, pero la variación de los valores del eje y son casi constantes. De acuerdo a esta gráfica, los levantadores seleccionados para el diseño estarán hasta los valores de 20mm.

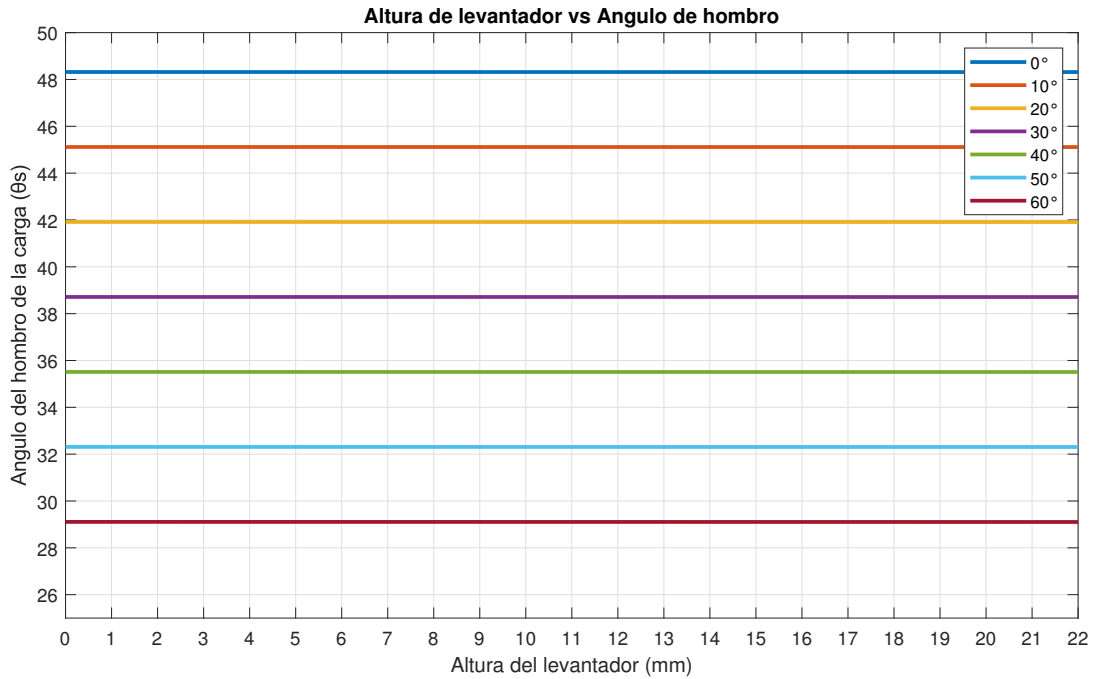


Figura 2.28: Gráfica de altura de levantador en función del ángulo de hombro

*Elaboración propia*

De la misma manera, se evalúa el ángulo de cara de levantador, en la cual se propone trabajar con ángulos de 0° a 60° evaluando en cada caso con alturas de levantador de 0 a 22 mm. En esta gráfica también se observa una tendencia constante para cada ángulo propuesto.

El aumento del tamaño del ángulo de cara del levantador reduce el ángulo de la posición del hombro, esto quiere decir que, si un levantador posee ángulo inclinación más grande, la carga que levante desplazará antes. La elaboración de estas gráficas mencionadas se encuentra en el código del Anexo A.

## 2.14. Trayectoria del lanzamiento

Teniendo en cuenta lo anterior expuesto, se procede a estimar la trayectoria de la carga, se considerará un lanzamiento parabólico cinemático que iniciará en la parte superior del levantador (punto A), como se muestra en la figura 2.29. Se comienza calculando el valor del ángulo  $\psi$ , el cual se forma en el triángulo ACB, donde  $e_l$  es el espesor del levantador el cual está en mm.

$$\psi \cdot (r_m - L_h) = e_l \quad (2.57)$$

Una vez que se ha calculado el ángulo, se usarán las siguientes ecuaciones para estimar las posiciones en los ejes coordenados a partir del centro del molino.

$$x_i = (r_m - L_h) \cdot \cos(\theta_s + \psi) \quad (2.58)$$

$$y_i = (r_m - L_h) \cdot \sin(\theta_s + \psi) \quad (2.59)$$

El ángulo de lanzamiento estará dado por la siguiente ecuación

$$\phi = 90^\circ - (\theta_s + l_a) \quad (2.60)$$

El módulo de la velocidad inicial tendrá el valor de la velocidad tangencial evaluada en el levantador, multiplicando la velocidad de rotación en radianes por la diferencia entre el radio del molino y la altura del levantador.

$$|v_t| = w_o \cdot (r_m - L_h) \quad (2.61)$$

$$v_{xi} = v_t \cdot \cos(\phi) \quad (2.62)$$

$$v_{yi} = v_t \cdot \sin(\phi) \quad (2.63)$$

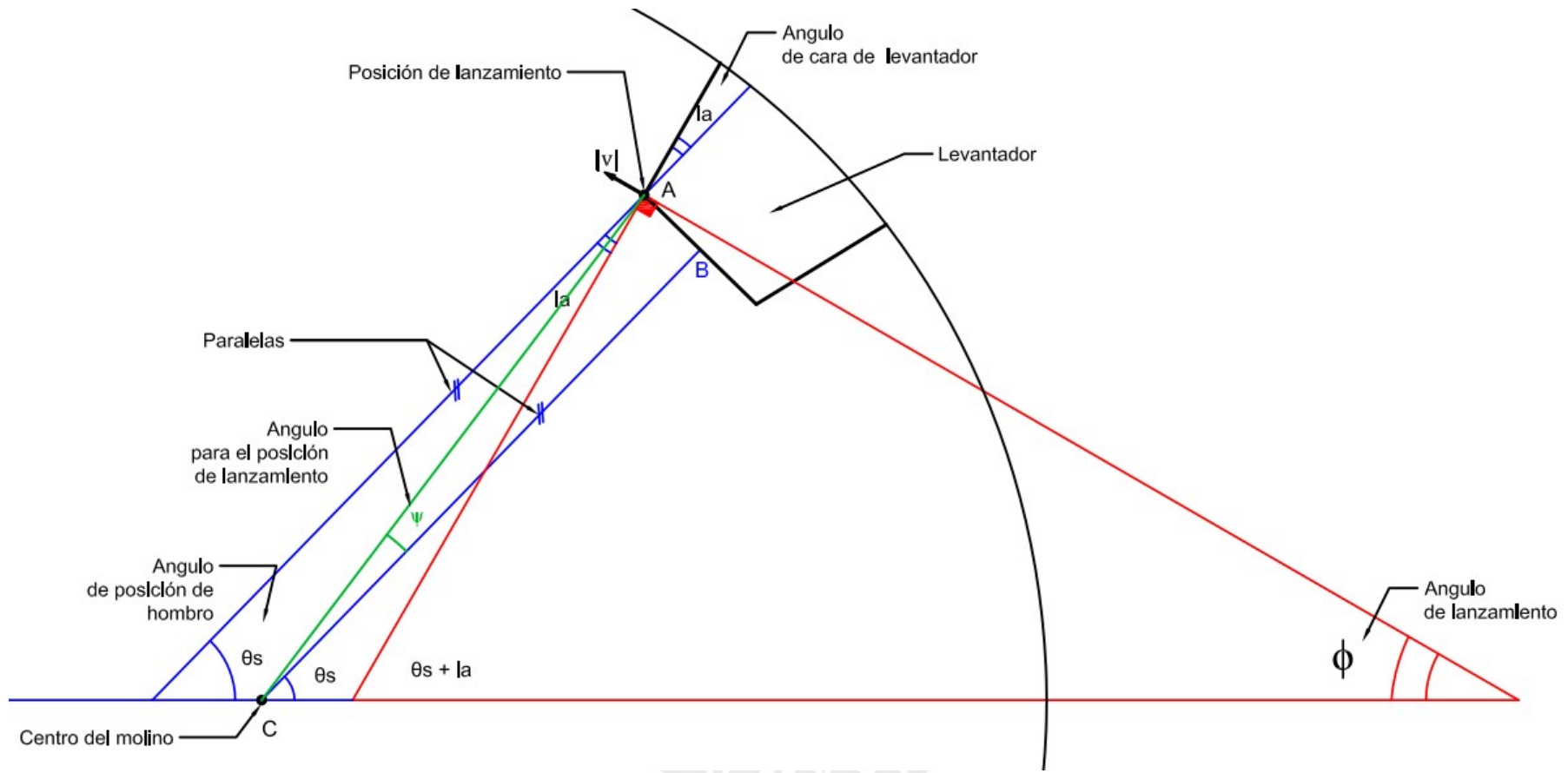


Figura 2.29: Esquema para estimar la trayectoria de la carga  
*Elaboración propia*

## 2.15. Representación Gráfica de Trayectorias y Modelado de Mecanismos de Molienda

Se graficará la trayectoria generada por el efecto de la altura y los ángulos de cara de los levantadores, además de representar la zona de formación del riñón dadas por las ecuaciones. A continuación se mostrarán 6 casos para su evaluación y comparación para determinar el levantador más adecuado, y presentar los parámetros constantes para cada caso. Todas las gráficas se desarrollaron por un código en Matlab ubicado en el Anexo A.

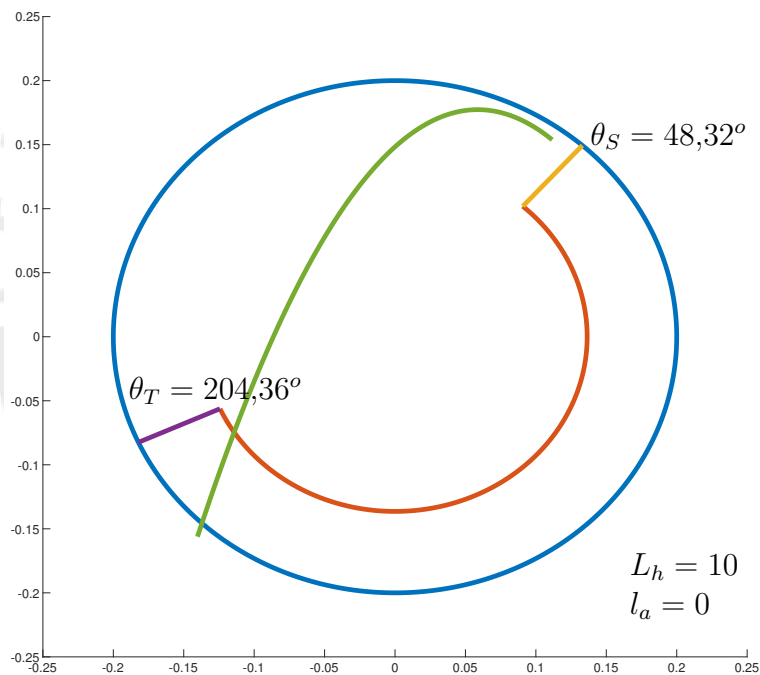


Figura 2.30: Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de  $L_h = 10$  y  $l_a = 0$

*Elaboración propia*

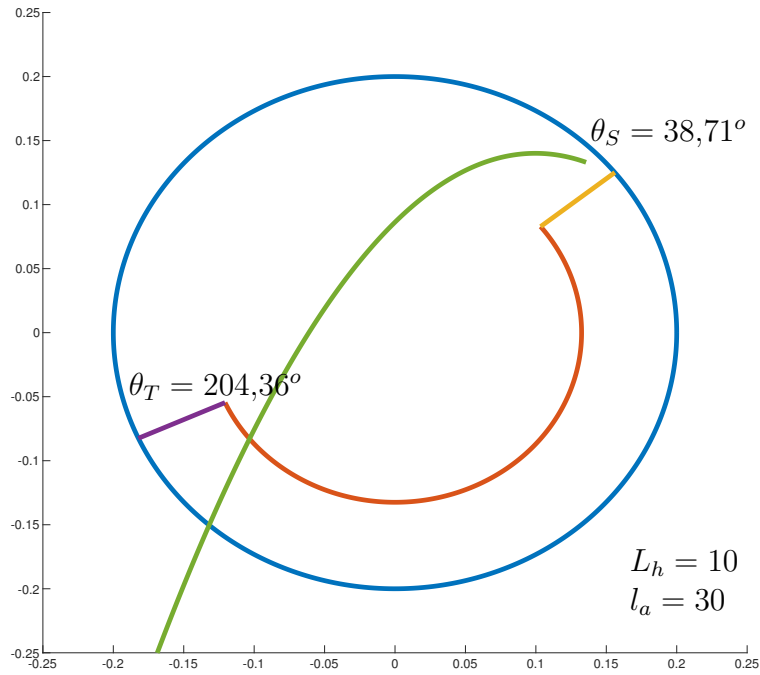


Figura 2.31: Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de  $L_h = 10$  y  $l_a = 30$

*Elaboración propia*

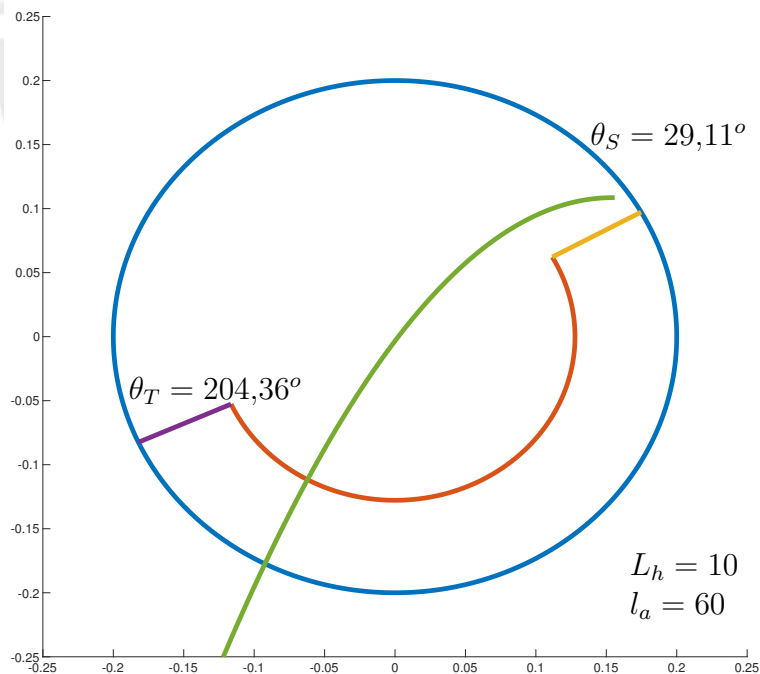


Figura 2.32: Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de  $L_h = 10$  y  $l_a = 60$

*Elaboración propia*

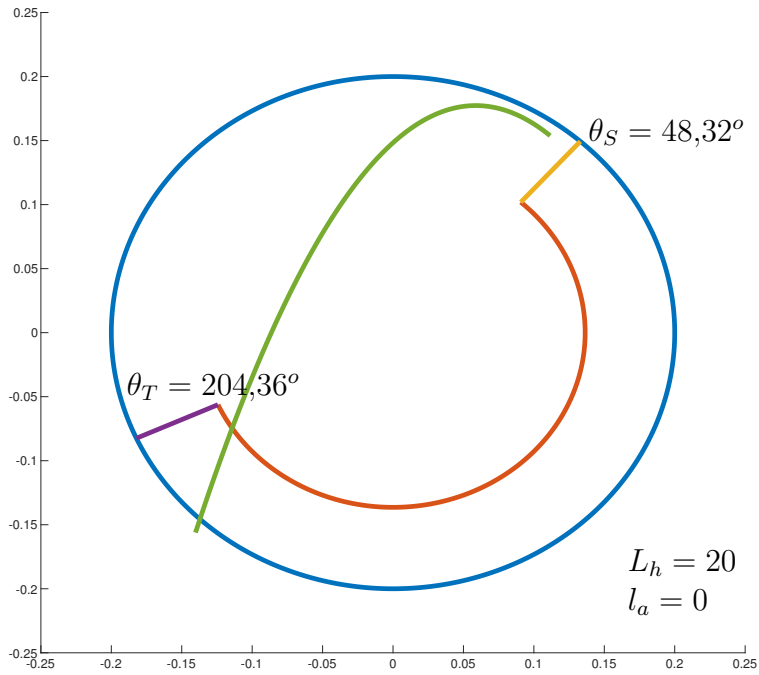


Figura 2.33: Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de  $L_h = 20$  y  $l_a = 0$

*Elaboración propia*

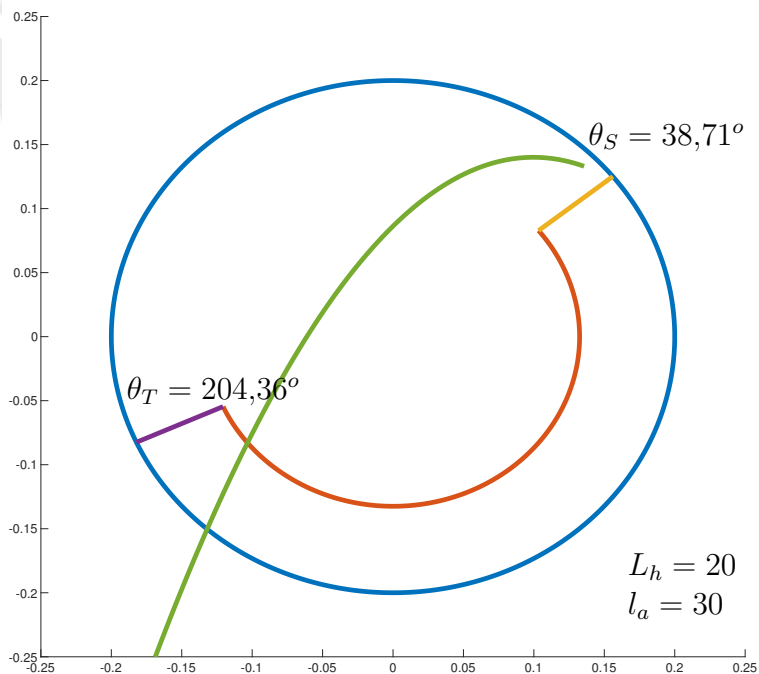


Figura 2.34: Simulación de la formación de los mecanismo de molineda para los casos de  $L_h = 20$  y  $l_a = 30$

*Elaboración propia*

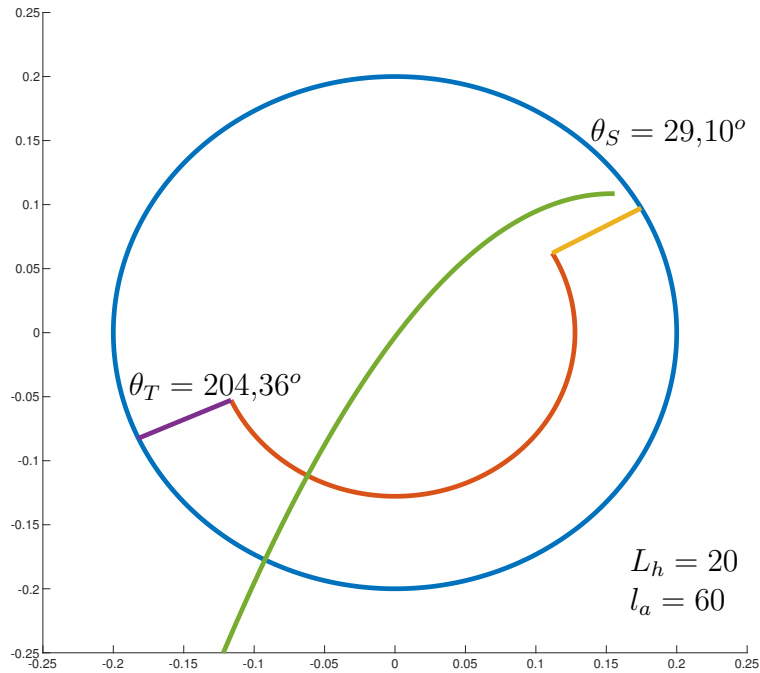


Figura 2.35: Simulación de la formación de los mecanismo de molinada para los casos de  $L_h = 20$  y  $l_a = 60$

*Elaboración propia*

Los resultados indican que el levantador de 20 mm y el de 10 mm, no generan diferencias en la trayectoria del lanzamiento del medio de molienda.

Como se desea reproducir el comportamiento de un molino SAG, los perfiles con ángulo de cara de  $0^\circ$ , tienen la tendencia a generar un impacto crítico probocando un lanzamiento parabólico más pronunciado, por ello, se recomendaría trabajar con un levantador con ángulo de  $30^\circ$ .

## 2.16. Estimación de Número de levantadores

Para estimar la cantidad el número de levantadores que se deben utilizar, se usará la proporción propuesta en la publicación, “Semi-autogenous grinding (SAG) mill liner design and development” dada por Royston, (2007), donde menciona que el número de levantadores será igual a dos veces el valor del diámetro del molino, En este caso, se aproximará el valor del diámetro a una unidad con el fin de tener un valor entero.

Dado que  $D = 0,4 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$  y que  $1 \text{ m} = 3,28 \text{ ft}$ , aplicamos la estimación:

Aplicando la estimación:

$$NL = 2D = 2 \cdot 3,28 = 6,56 \quad (2.64)$$

También, existe otra recomendación que puede ayudar a corroborar la cantidad de levantadores en un molino. Para ello, la ecuación dada por Gupta y Yan (2006) indica que para realizar la estimación del número de levantadores también se redondeará el valor del diámetro a la unidad para trabajar con términos enteros:

$$N_L = 6,6 \cdot D \quad (2.65)$$

$$N_L = 6,6 \cdot 1 = 6,6 \quad (2.66)$$

Con los valores obtenidos, se sugiere trabajar con un número de levantadores cercanos al valor de 6, por cuestión de distribución uniforme, el interior del molino trabajará con 6 y 12 levantadores, con la finalidad de poder comparar cómo influye al momento de realizar el levantamiento de la carga y la formación de los mecanismos de molienda.

Tabla 2.14: Dimensiones de los levantadores

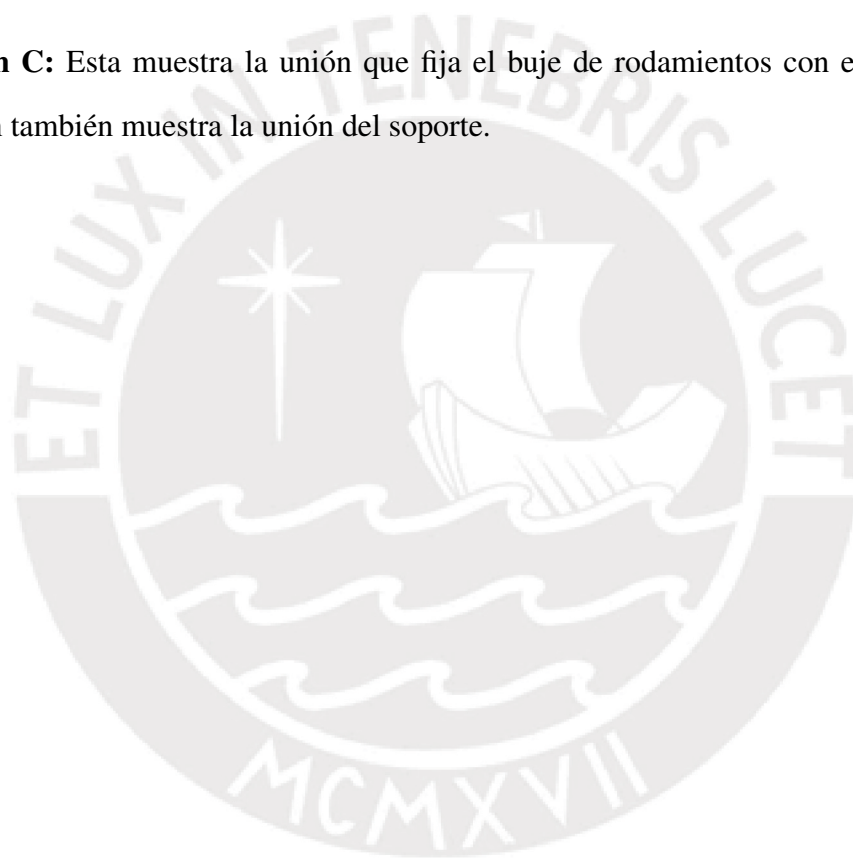
Espesor del levantador			
$e_l$ : 10 mm			
Número de levantadores			
NL: 6 - 12			
Lifter 1 (óptimo)	Lifter 2	Lifter 3	Lifter 4
$L_h$ : 10 mm	$L_h$ : 10 mm	$L_h$ : 20 mm	$L_h$ : 20 mm
$l_a$ : 30°	$l_a$ : 0°	$l_a$ : 30°	$l_a$ : 0°
<i>Elaboración propia</i>			

## 2.17. Plano de ensamble

En el Anexo B se desarrolló los planos de ensamble del módulo educativo del molino SAG los cuales presentan 2 hojas con una vista frontal, y de planta con un dibujo isométrico, 3 secciones y 6 detalles, con el fin de especificar las piezas y las diferentes uniones del módulo.

- **Vista frontal:** Se muestra el molino y como se encuentra la disposición de los pernos de anclaje mostrado en una mordedura (Detalle A), además de los elementos que conforman el soporte.
- **Vista frontal:** Se muestra el molino y como se encuentra la disposición de los pernos de anclaje mostrado en una mordedura (Detalle A), además de los elementos que conforman el soporte.
- **Vista de planta:** Se muestra las uniones que conforman el tambor, el cubo de transmisión, el buje de rodamientos y sus pernos, los pedestales que soportan el molino y el motor. Esta vista también permite ver la unión entre el perno avellanado y el tambor del molino mostrado por una mordedura (Detalle F).

- **Sección A:** En esta se muestra a detalle cómo se unen los elementos de las tapas de alimentación y la tapa del molino con los pernos (Detalle B y C). Se muestran las mordeduras para las chavetas que permiten la transmisión entre el cubo y el eje y el eje con el acople flexible. Se pueden observar las tapas y el buje de los rodamientos (Detalle D).
- **Sección B:** Permite apreciar la disposición de los levantadores sujetos por los pernos alrededor (Detalle E). También la disposición de los pernos avellanados y el seguro de expansión del eje.
- **Sección C:** Esta muestra la unión que fija el buje de rodamientos con el pedestal. La sección también muestra la unión del soporte.



## 2.18. Lista de materiales

A continuación, se presenta el listado de materiales que conforman el módulo educativo del molino SAG.

Tabla 2.15: Lista de materiales

Pos	Cant.	Suministro	Descripción	Norma	Material	Observaciones / Materiales
1	1	Diseño	Estructura Base		ASTM A36	Ángulos estructurales A36 38x38x2mm Plancha de aceros ASTM A36 3mm
2	1	Diseño	Bloque de cimentación		Concreto	
3	8	Adquisición	Tornillo Hexagonal J M8	DIN 3570	8.8	ZINCADO
4	8	Adquisición	Arandela Plana M8	DIN 125	6	ZINCADO
5	8	Adquisición	Tuerca Hexagonal M8	DIN 4032	4.8	ZINCADO
6	1	Diseño	Pedestal del Molino		ASTM A36	Canal U ASTM A36 5'x1.89' tw: 8.13mm tf:8.26mm Plancha PGLAC A36 9,5mm
7	1	Diseño	Buje de Rodamientos		ASTM A36	Bloque de acero A36
8	1	Diseño	Eje del molino		Ck 45	BONIFICADO Barra redonda lisa Ck 45 Ø1'3/8
9	2	Adquisición	Rodamiento de bolas Ø28			SKF 62/28
10	2	Adquisición	Anillo de Retención 28x1.5	DIN 471	6	ZINCADO
11	1	Diseño	Tapa frontal para el rodamiento del buje		ASTM A36	Plancha de aceros ASTM A36 5mm
12	1	Diseño	Tapa posterior para rodamiento del buje		ASTM A36	Plancha de aceros ASTM A36 5mm
13	8	Adquisición	Arandela Plana M4	DIN 125	6	ZINCADO
14	8	Adquisición	Tornillo Hexagonal M4	DIN 125	8.8	ZINCADO
15	1	Diseño	Chaveta lado del tambor		Ck 45	BONIFICADO Barra redonda lisa AISI SAE 4140 Ø15mm
16	1	Diseño	Cubo de Transmisión		ASTM A36/AISI SAE 4140	Plancha PGLAC ASTM A36 4,5mm Barra redonda lisa AISI SAE Ø2' 1/2
17	1	Diseño	Chaveta lado del acople	DIN 125	Ck 45	BONIFICADO Barra redonda lisa AISI SAE 4140 Ø15mm
18	4	Adquisición	Arandela Plana M12	DIN 125	6	ZINCADO
19	4	Adquisición	Tornillo Hexagonal M12	DIN 3570	8.8	ZINCADO

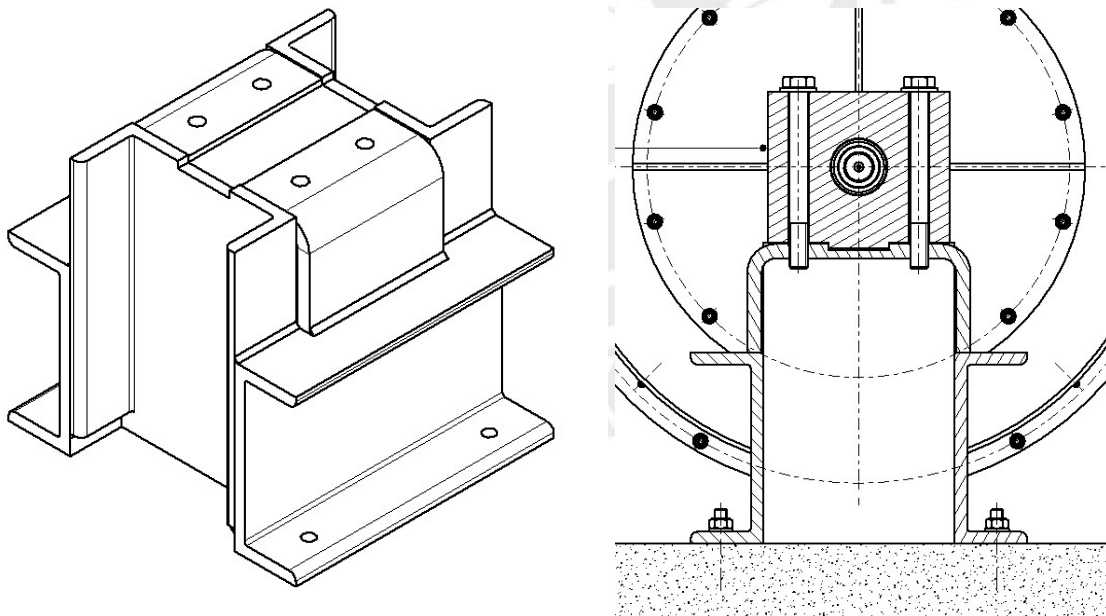
20	1	Diseño	Tambor del Molino		ASTM A36	Plancha de acero ASTM A36 3mm Plancha de acero ASTM A36 4.5mm
21	1	Adquisición	Anillo de retención 25x1.5	DIN 471	6	ZINCADO
22	12	Adquisición	Tornillo Avellanado M5	DIN 3570	8.8	ZINCADO
23	12	Adquisición	Arandela Plana M5	DIN 125	6	ZINCADO
24	12	Adquisición	Tuerca Hexagonal M5	DIN 4032	4.8	ZINCADO
25	12	Adquisición	Levantador		ASTM D2240	CAUCHO NATURAL
26	24	Adquisición	Arandela plana M2	DIN 125	6	ZINCADO
27	24	Adquisición	Tornillo Hexagonal M2	DIN 3570	8.8	ZINCADO
28	24	Adquisición	Tuerca Hexagonal M2	DIN 4032	4.8	ZINCADO
29	1	Adquisición	Sello			CAUCHO NATURAL
30	1	Diseño	Tapa Translucida del Molino			ACRILICO Plancha de acrílico de 14,5mm
31	1	Adquisición	Arandela Plana M5	DIN 125	6	ZINCADO
32	1	Adquisición	Tornillo Hexagonal M5	DIN 3570	8.8	ZINCADO
33	1	Adquisición	Tuerca Hexagonal M5	DIN 4032	4.8	ZINCADO
34	1	Diseño	Tapa de Alimentación			ACRILICO Plancha de acrílico de 19mm
35	1	Adquisición	Arandela plana M3	DIN 125	6	ZINCADO
36	1	Adquisición	Tornillo Hexagonal M3	DIN 3570	8.8	ZINCADO
37	1	Diseño	Pedestal del Motor		ASTM A36	Canal U ASTM A36 5'x1.89' tw: 8.13mm tf:8.26mm
38	1	Adquisición	Motorreductor 29:1			S47DRN71MA/DH
39	1	Adquisición	Acople flexible			RULAND JD36/MJSC57

*Elaboración propia*

## 2.19. Planos de despiece

En este apartado se describirán las formas de fijación y funciones de los conjuntos de elementos pertenecientes al módulo educativo, con el fin de complementar y detallar el diseño propuesto. Los planos se encuentran en el Anexo C

Para soportar el buje de rodamientos se utiliza un pedestal formado por 3 perfiles tipo canal U. Asimismo, se usa una plancha doblada PGLAC A36 9,5mm. Todos los elementos mencionados están unidos por soldadura (a) 2.36. El pedestal posee un canal rectangular que sirve como asiento al buje de rodamientos además para fijarlo se utiliza 4 pernos M12 atornillado a la plancha doblada A36 de 9.5mm. Los agujeros de la parte inferior del pedestal son pasantes y sirven para el anclaje, en la figura (b) 2.36 se observa un corte en el buje que detalla el anclaje.



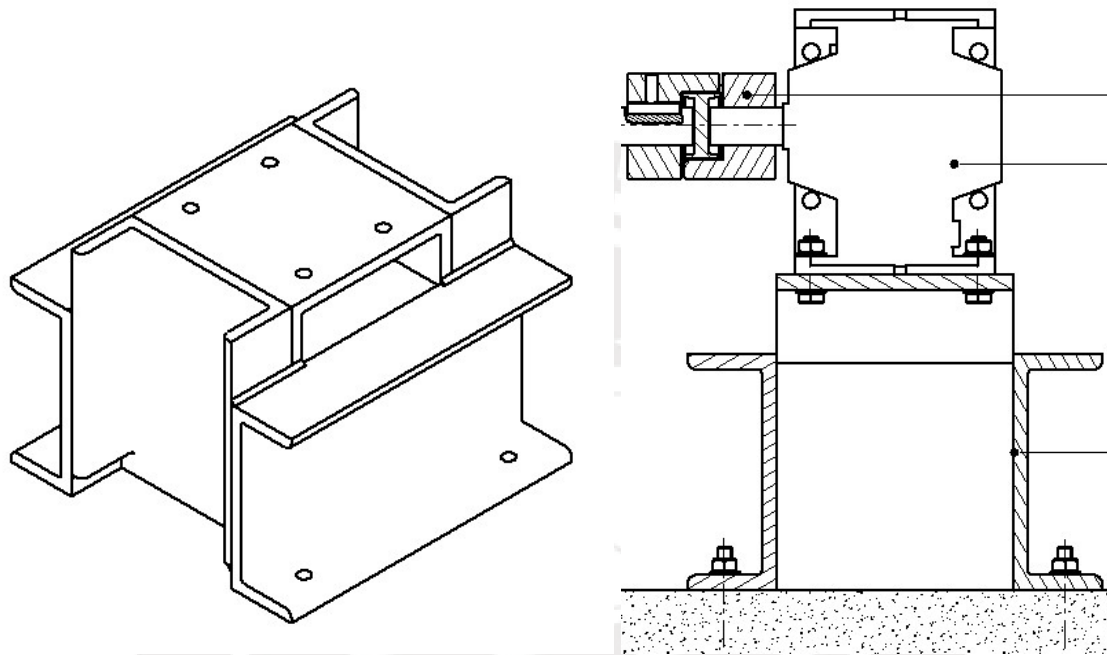
(a) Pedestal del buje Isométrico

(b) Corte de sección: Buje de rodamientos

Figura 2.36: Pedestal del buje de rodamientos

*Elaboración propia*

El motor es soportado por un pedestal unido por 5 pedazos de perfil de tipo canal U los agujeros superiores son pasantes y sujetan al motorreductor (a) 2.37. También, los agujeros de la parte inferior también son pasantes, pero estos son para el anclaje del pedestal. Todos los perfiles mencionados están unidos por soldadura. en la figura (b) 2.37 se observa un corte en el pedestal que detalla el anclaje.



(a) Pedestal del Motor Isométrico

(b) Corte de sección: Pedestal de Motor

Figura 2.37: Pedestal del motor

*Elaboración propia*

El Buje posee dos aberturas, una frontal y trasera para el ingreso de los rodamientos y el eje, además de poseer asientos para las tapas que favorecen la limpieza y el mantenimiento del equipo. Existen 4 agujeros pasantes en la zona superior, estos cumplen la función para conducir los pernos M12 y puedan ser fijados al pedestal, como indica en la figura 2.38. Por ultimo se muestra el buje en isometrico 2.39

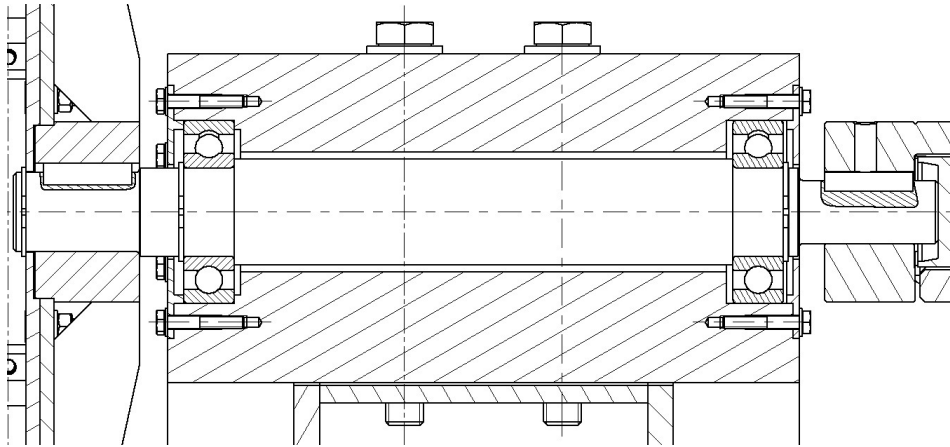


Figura 2.38: Posiciones de ángulo de pie de carga, hombro, radio del riñón interno

*Elaboración propia*

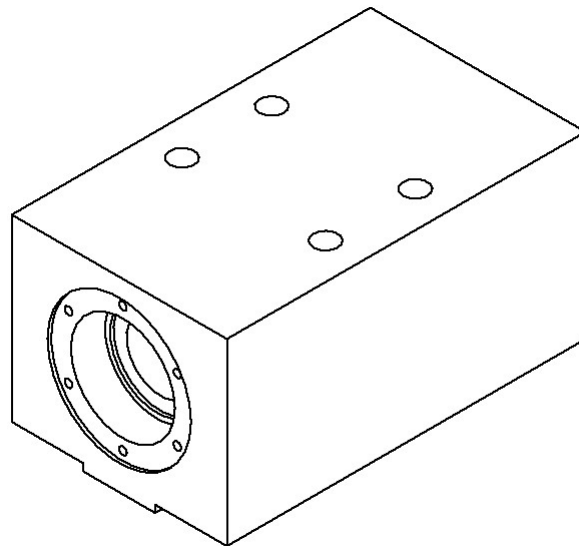


Figura 2.39: Buje de rodamiento isometrico

*Elaboración propia*

El molino se conforma por 3 elementos principales los cuales son las tapas de alimentación, el tambor y el cubo de transmisión 2.40. El cubo de transmisión está formado por un plato de 4,5 mm el cual tiene soldado un bloque de acero que sirve de elemento conductor y el cual contiene el canal chavetero, a este elemento se tiene soldado 4 nervios unidos al plato y al bloque de acero. La unión al tambor se realiza por 12 pernos avellanados M5 como se muestra en la siguiente figura 2.42 y se detalla la posición del avellanado en la figura 2.41. El tambor está

conformado por una plancha rolada de 3mm de espesor, este debe formar un diámetro interno de aproximadamente 400mm, se muestra en la figura . Dicha plancha debe tener 24 agujeros pasantes separados 80 mm M2, los cuales sirven para el anclaje de los levantadores (DETALLE E). Para cerrar el tambor se suelda (Detalle H), una plancha de 4.5mm en la parte trasera. Esta plancha posee agujeros avellanados (Detalle I) para el anclaje del cubo de transmisión 2.43. Adicionalmente se suelda un anillo de 3mm de espesor para la entrada de la alimentación, con el fin de aumentar la rigidez del tambor. También, dicho anillo posee 12 agujeros pasantes repartidos para atornillar la tapa de alimentación

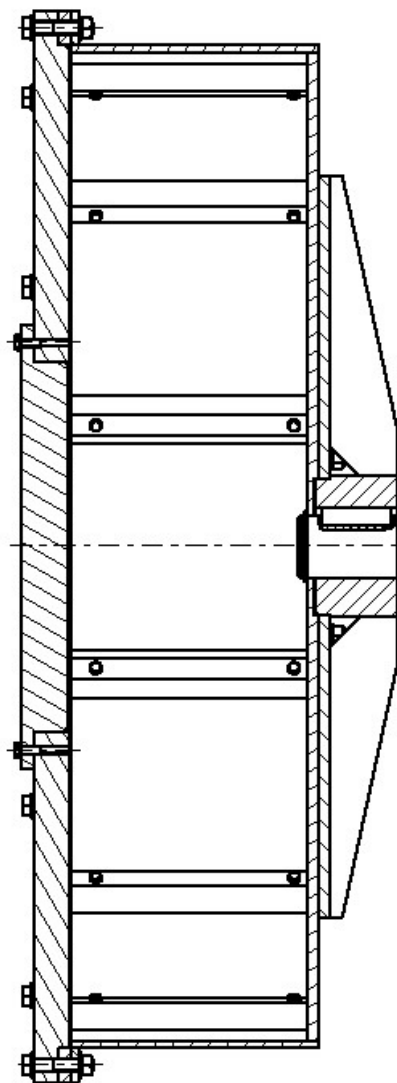


Figura 2.40: Tambor del Molino

*Elaboración propia*

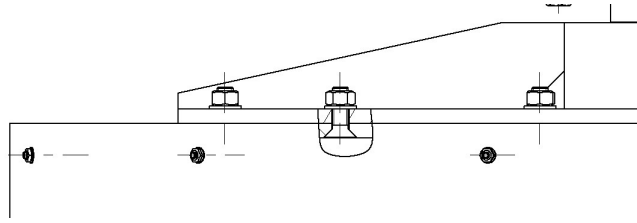


Figura 2.41: Union posterior del tambor con Tornillo Avellanado

*Elaboración propia*

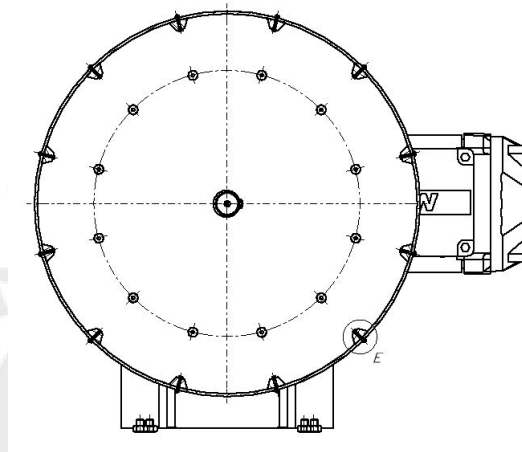


Figura 2.42: Disposición de los pernos avellanados al interior del tambor

*Elaboración propia*

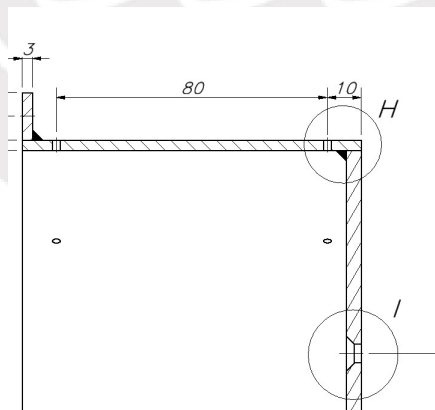


Figura 2.43: Soldadura de la plancha rolada con la tapa trasera

*Elaboración propia*

## 2.20. Simulación 3D

### 2.20.1. Simulación de elementos finitos en software 3D

Para evaluar las condiciones de esfuerzos críticos en condiciones estáticas se realizará mediante el método de elementos finitos, cabe resaltar que el molino se diseñó con condiciones sobredimensionadas, para evitar cualquier tipo de deformaciones elásticas relacionada a la deflexión tanto en el tambor y en el eje de transmisión.

Adicionalmente se coloca una fuerza que simula el peso de la carga. Se calculó el peso en la condición crítica en la tabla 2.12, el cual tiene como valor de 31,6 kg. Para una mejor condición de seguridad la fuerza a simular será de 50kg.

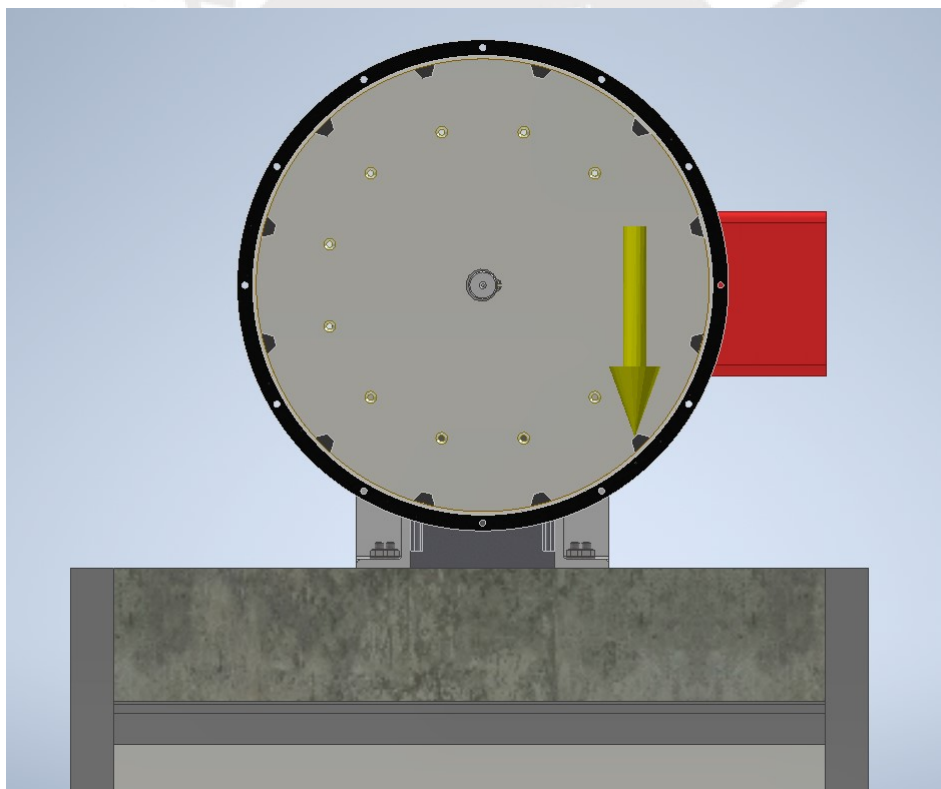


Figura 2.44: Simulación de la fuerza aplicada en el tambor

*Elaboración propia*

Al realizar el análisis de elementos finitos, se observa que la zona afectada más crítica pertenece al eje, este se expone a un esfuerzo máximo por cargas combinadas, evaluado con el criterio de falla por Vom Mises se tiene como resultado 47 MPa.

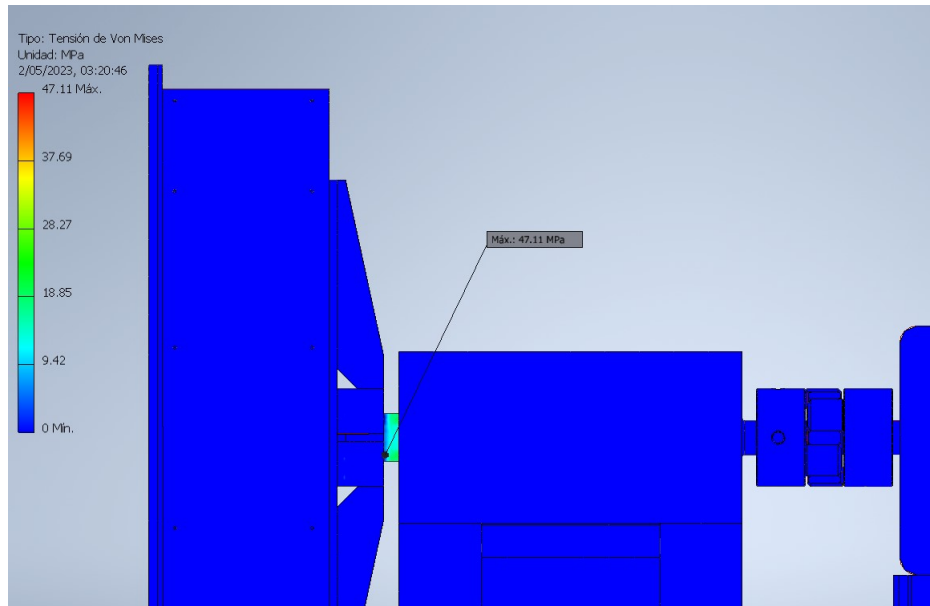


Figura 2.45: Zona mas critica sometido a esfuerzos

*Elaboración propia*

Los esfuerzos que someten al eje no son considerados críticos. Esto se debe a que el límite de la fluencia del eje (Ck45), tiene como un valor mínimo de 390Mpa referido en la ficha técnica de aceros arequipa “Barras, Redondas Lisas y Pulidas CALIDADES: ASTM A36 Y SAE1045”. El método de elementos finitos completo se encuentra en el anexo 5, para más detalle de la evaluación.

### 2.20.2. Simulación Análisis Modal en software 3D

El modulo educativo se expone a dos fuerzas de excitación, una es debido al giro del tambor del molino con la carga y, por otro lado, la segunda fuerza esta constituida por el giro del motor antes de la reducción. Para poder realizar el analisis modal se propone un modelo conceptual del modulo que permita estimar el valor equivalente del coeficiente de rigidez  $K$ .

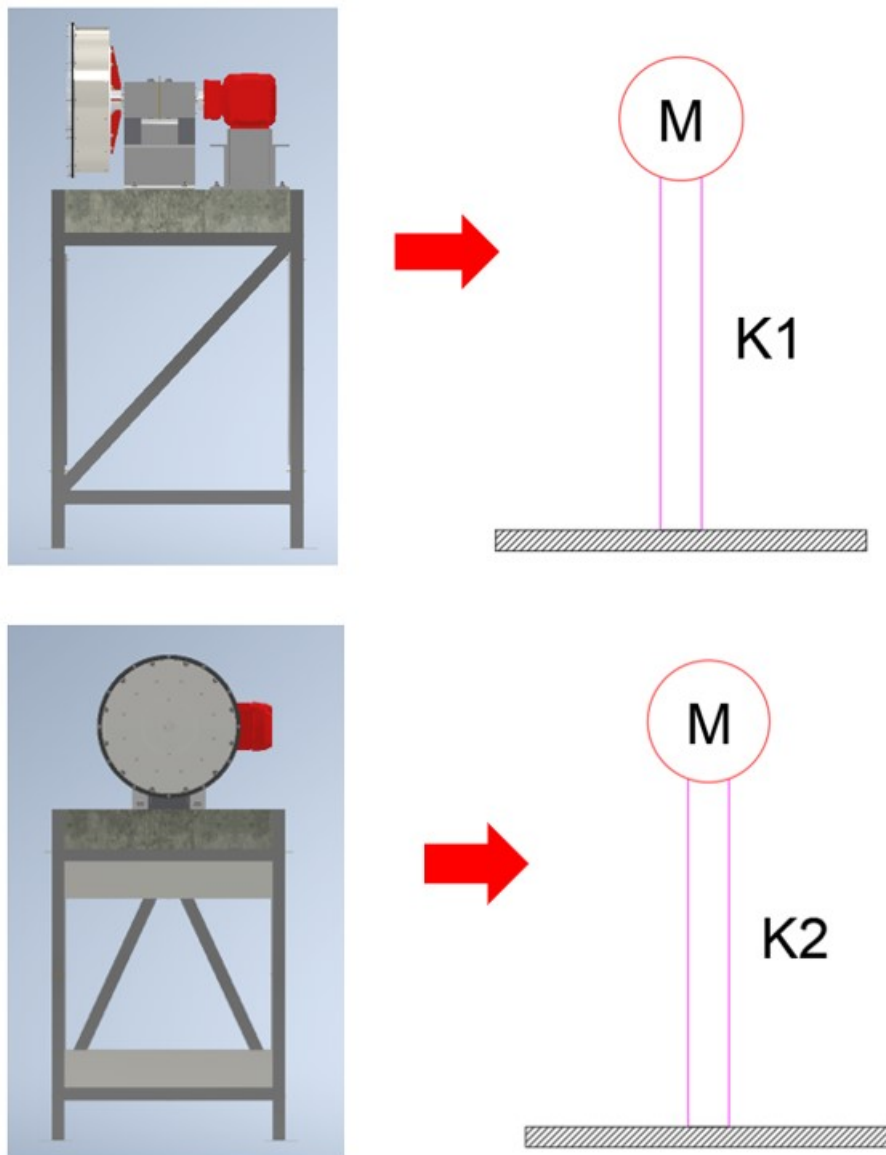


Figura 2.46: Esquema del modelo conceptual del módulo educativo

*Elaboración propia*

Primero se evalúa los grados de libertad que debe tener el módulo, y caracterizar los desplazamientos para las frecuencias naturales. Es por ello que en la imagen 2.46, se tomarán 2 valores de rigidez para diferentes desplazamientos principales del módulo.

Primero se aplica una fuerza que provoque un desplazamiento horizontal, como se muestra en la figura 2.47.

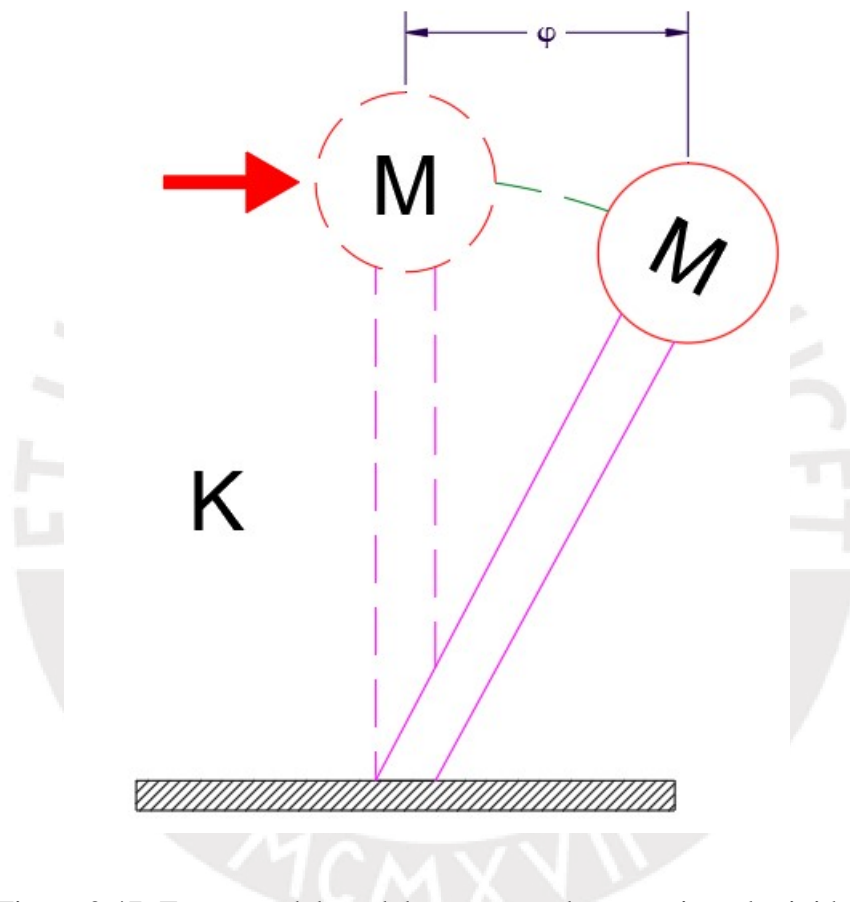


Figura 2.47: Esquema del modelo conceptual para estimar la rigidez

*Elaboración propia*

A continuación, se usará el valor de desplazamiento  $\phi$  para la diferencia de desplazamiento aplicado en la ley de Hooke.

$$F = \phi \cdot K \quad (2.67)$$

Despejando tenemos el valor de la rigidez en términos de la fuerza y el desplazamiento.

$$K = \frac{\varphi}{K} \quad (2.68)$$

Desarrollando el procedimiento antes mencionado, se aplica una fuerza con el valor de 1N en la zona de mayor concentración de masa del modulo como se muestra ne la imagen 2.48 y 2.49, este procedimiento se realiza para los dos casos de desplazamiento en los planos Z-Y y X-Y.

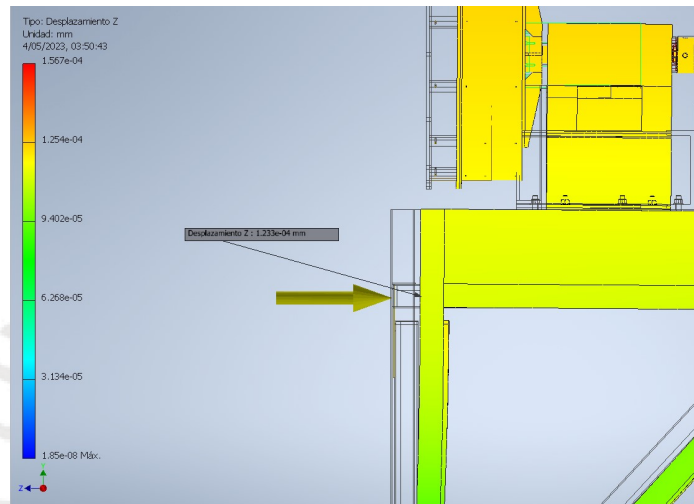


Figura 2.48: Desplazamiento en el plano Z-Y por la aplicación de una fuerza de 1N

*Elaboración propia*

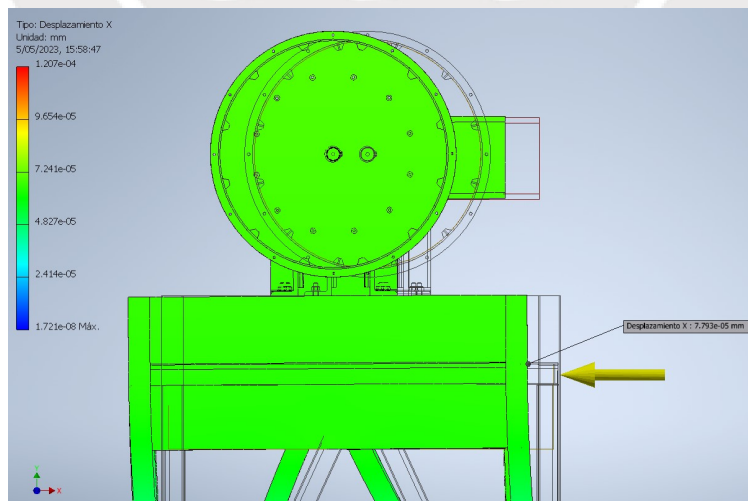


Figura 2.49: Desplazamiento en el plano X-Y por la aplicación de una fuerza de 1N

*Elaboración propia*

Se obtiene el valor de la masa total del equipo por medio de la propiedades físicas generado por el software indicado en la imagen 2.50, Con el valor de la rigidez, el siguiente procedimiento es calcular el valor de la frecuencia natural.

**I MODULO EDUCATIVO MOLINO SAG.iam iProperties**

General Resumen Proyecto Estado Personalizadas Guardar Propiedades físicas

Material

Densidad: 3.509 g/cm<sup>3</sup>      Precisión solicitada: Baja

Propiedades generales

Incluir soldaduras ficticias       Incluir anulaciones de CTDAD

Centro de gravedad\*

Masa	271.582 kg (Error r)	X	27.504 mm (Error r)
Área	7051506.128 mm <sup>2</sup>	Y	67.319 mm (Error r)
Volumen	77392015.355 mm <sup>3</sup>	Z	-24.885 mm (Error r)

Propiedades de inercia\*

Principal      Global      Centro de gravedad

Momentos principales

I1	26871292.187	I2	19394906.310	I3	24432463.112
----	--------------	----	--------------	----	--------------

Rotación a principal

Rx	24.74 gr (Error	Ry	11.21 gr (Error	Rz	17.87 gr (Error
----	-----------------	----	-----------------	----	-----------------

\*Los valores no reflejan la masa o el volumen anulados por el usuario

Figura 2.50: Tabla de Propiedades Física totales del módulo generadas por el software Inventor

*Elaboración propia*

Acontinuación se muestra en la tabla 2.16, los valores calculados de las rigides para cada caso, y las frecuencias naturales que para los desplazamiento en los planos Z-Y y X-Y.

Tabla 2.16: Cálculo de la frecuencia natural en planos Z-Y y X-Y

Parámetro	Plano Z-Y	Plano X-Y	Unidades
Fuerza aplicada	1	1	N
Desplazamiento	0.000123	0.0000779	mm
Rigidez	8110	12800	N/mm
Rigidez	8110000	12800000	N/m
Masa del modulo	271.582	271.582	kg
Frecuencia natural	172.81	217.355	rad/s
Frecuencia natural	27.5	34.6	Hz

*Elaboración propia*

En la tabla 2.17 se tienen las velocidad de operación del tambor y la velocidad del motor, en ambos casos se transforma a valores de Hz, con el fin de poder comparar con los valores calculados. Tambien se tiene la masa que se somete a rotación, y la participacion de esta comprandola como una fracción del total de masa correspondiente al peso del modulo.

Tabla 2.17: Calculo de frecuencia de operación

Parametros	Motor	Tambor	Unidades
Velocidad de giro	1800	40	RPM
Frecuencia	30	0.67	Hz
Masa	1.622	44.49	kg
Porcentaje de participación de masa	0.6 %	16.38 %	-

*Elaboración propia*

La simulación por parte del software el cual describe 9 frecuencias modales además, se puede observar en la imagen 2.51. Se identifica la primera y segunda frecuencias modales corresponden a desplazamiento en los planos Z-Y y X-Y, como se planteó al inicio.

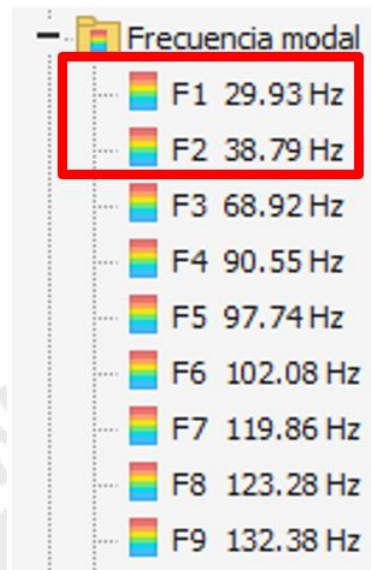


Figura 2.51: Frecuencia Modales generadas por el Software

*Elaboración propia*

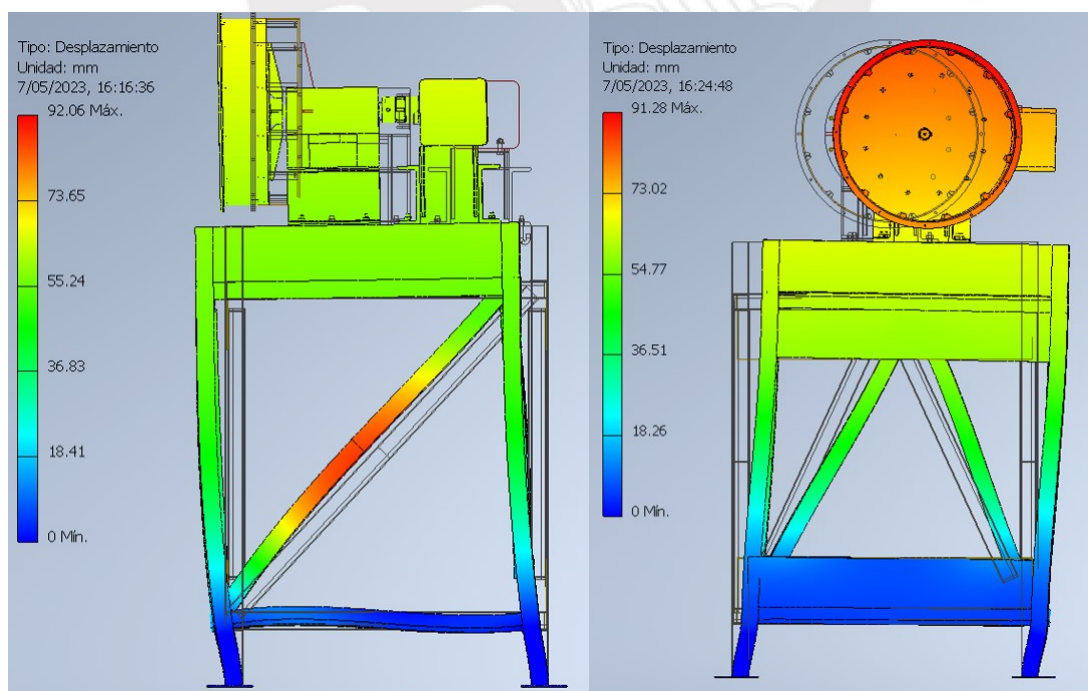


Figura 2.52: Frecuencia Modales generadas por el Software

*Elaboración propia*

En la tabla 2.18 se compara las frecuencias naturales calculadas con las frecuencias simuladas.

Tabla 2.18: Comparación de valores de frecuencias naturales simuladas y calculadas

<b>Valor Calculado (Hz)</b>	27.5	34.59
<b>Valor Simulado (Hz)</b>	29.93	38.79
<b>Error relativo</b>	8 %	11 %

*Elaboración propia*

Para finalizar se tiene la tabla 2.19, en la cual se observa que existe una superposición entre la frecuencia de excitación del modulo y la frecuencia natural, pero como lo muestra la tabla 2.17, la participación de masa no supera el 1 % y la fuerza que genera el motor es de 0.5HP, entonces bajo los principios de resonancia la fuerza de excitación no generará más que leves vibraciones. Por otro lado, la frecuencia que genera la carga en el tambor no entra en resonancia ya que está lejos del valor de la primera frecuencia natural. El análisis modal completo se encuentra en el anexo D.

Tabla 2.19: Comparación de valores de frecuencias naturales simuladas y generadas por motor

<b>Frecuencias</b>	<b>Motor</b>	<b>Tambor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Modales</b>	29.93	38.79	Hz
<b>Excitación</b>	30	0.67	Hz

*Elaboración propia*

## Capítulo 3

### Evaluación Económica del Modulo

En el presente capítulo, se detallará la evaluación económica del módulo educativo, considerando que todos los costos presentados estarán representados en (S/.) Nuevos Soles, además que se tendrá en cuenta el valor de 3.78 para el cambio de dólar americano, consultado el 17 de junio del 2024. Los costos se dividirá en 3 principales:

- Costos de materiales.
- Costos de manufactura y ensamble.
- Costos de diseño.

#### 3.1. Costos de materiales

A continuación, se adjunta una tabla que desglosa los costos de materiales. Los costos se dividen en varias categorías para facilitar su comprensión y análisis:

### 3.1.1. Costos de Elementos Normalizados

Esta categoría incluye los costos de componentes estandarizados que se utilizan comúnmente en diversas aplicaciones.

Tabla 3.1: Costo de elementos normalizados

Cantidad	Suministro	Descripción	Norma	Material	Observaciones	Costo Unitario (S/.)	Costo Parcial (S/.)
8	Adquisición	Tornillo Hexagonal J M8	DIN 3570	8.8	ZINCADO	0.3	2.4
8	Adquisición	Arandela Plana M8	DIN 125	6	ZINCADO	0.3	2.4
8	Adquisición	Tuerca Hexagonal M8	DIN 4032	4.8	ZINCADO	0.3	2.4
2	Adquisición	Rodamiento de bolas Ø28			SKF 62/28	120	240
2	Adquisición	Anillo de Retención 28x1.5	DIN 471	6	ZINCADO	0.3	0.6
8	Adquisición	Arandela Plana M4	DIN 125	6	ZINCADO	0.3	2.4
8	Adquisición	Tornillo Hexagonal M4	DIN 125	8.8	ZINCADO	0.3	2.4
4	Adquisición	Arandela Plana M12	DIN 125	6	ZINCADO	0.3	1.2
4	Adquisición	Tornillo Hexagonal M12	DIN 3570	8.8	ZINCADO	0.3	1.2
1	Adquisición	Anillo de retención 25x1.5	DIN 471	6	ZINCADO	0.3	0.3
12	Adquisición	Tornillo Avellanado M5	DIN 3570	8.8	ZINCADO	0.3	3.6
12	Adquisición	Arandela Plana M5	DIN 125	6	ZINCADO	0.3	3.6
12	Adquisición	Tuerca Hexagonal M5	DIN 4032	4.8	ZINCADO	0.3	3.6
12	Adquisición	Levantador		ASTM D2240	CAUCHO NATURAL	85	1020
24	Adquisición	Arandela plana M2	DIN 125	6	ZINCADO	0.3	7.2
24	Adquisición	Tornillo Hexagonal M2	DIN 3570	8.8	ZINCADO	0.3	7.2
24	Adquisición	Tuerca Hexagonal M2	DIN 4032	4.8	ZINCADO	0.3	7.2
1	Adquisición	Sello			CAUCHO NATURAL	100	100
1	Adquisición	Arandela Plana M5	DIN 125	6	ZINCADO	0.3	0.3
1	Adquisición	Tornillo Hexagonal M5	DIN 3570	8.8	ZINCADO	0.3	0.3
1	Adquisición	Tuerca Hexagonal M5	DIN 4032	4.8	ZINCADO	0.3	0.3
1	Adquisición	Arandela plana M3	DIN 125	6	ZINCADO	0.3	0.3
1	Adquisición	Tornillo Hexagonal M3	DIN 3570	8.8	ZINCADO	0.3	0.3
1	Adquisición	Acople flexible			RULAND JD36/MJSC57	370	370
5042	Adquisición	Billas de acero de 10mm				0.5	2521
						SUBTOTAL (s/.)	4300.2

*Elaboración propia*

### 3.1.2. Costos de Elementos Estructurales

Aquí se encuentran los costos asociados con los materiales estructurales necesarios para la construcción y el soporte del equipo.

Tabla 3.2: Costos parciales de elementos Estructurales

Cantidad	Suministro	Descripción	Norma	Material	Materiales	Costo Unitario (P.U.) (S/.)	Costo Parcial (P.U.) (S/.)
3	Diseño	Estructura Base		ASTM A36	Ángulos estructurales A36 38x38x2mm	50	150
2	Adquisición	Bloque de cimentación		Concreto	Bolsa de cemento	30	60
						SUBTOTAL (s/.)	210

*Elaboración propia*

### 3.1.3. Costos de Materiales para Elementos de Máquina

Esta sección abarca los costos de los materiales específicos necesarios para fabricar los componentes de las máquinas.

Tabla 3.3: Costos parciales de elementos de Maquina

Cantidad	Suministro	Descripción	Norma	Material	Materiales	Costo Unitario (P.U.) (S/.)	Costo Parcial (P.U.) (S/.)
2	Diseño	Estructura Base / Tambor del Molino		ASTM A36	Plancha de aceros ASTM A36 3mm	283.5	567
1	Diseño	Pedestal del Molino		ASTM A36	Plancha PGLAC A36 9,5mm	897.75	897.75
1	Diseño	Buje de Rodamientos		ASTM A36	Bloque de acero A36 (120x100x200)	151.2	151.2
1	Diseño	Eje del molino		Ck 45 / BONIFICADO	Barra redonda lisa Ck 45 Ø 1 3/8	95.8	95.8
1	Diseño	Tapa frontal y posterior para el rodamiento del bujes		ASTM A36	Plancha de aceros ASTM A36 5mm	472.5	472.5
2	Diseño	Chaveta lado del tambor / Chaveta lado del motor		Ck 45 / BONIFICADO	Barra redonda lisa AISI SAE 4140 Ø15mm	50	100
1	Diseño	Tapa trasera / Tambor del Molino		ASTM A36	Plancha PGLAC ASTM A36 4,5mm	425.25	425.25
1	Diseño	Cubo de Transmisión		AISI SAE 4140	Barra redonda lisa AISI SAE Ø2' 1/2	316.7	316.7

1	Diseño	Chaveta lado del acople	DIN 125	Ck 45 / BONIFICADO	Barra redonda lisa AISI SAE 4140 Ø15mm	50	50	
1	Diseño	Tapa Translucida del Molino		ACRILICO	Plancha de acrílico de 14,5mm	150	150	
1	Diseño	Tapa de Alimentación		ACRILICO	Plancha de acrílico de 19mm	200	200	
1	Diseño	Pedestal del Motor / Pedestal del Molino		ASTM A36	Canal U ASTM A36 5'x1.89' tw: 8.13mm f:8.26mm	642.6	642.6	
SUBTOTAL (s/.)							4068.8	

*Elaboración propia*

### 3.1.4. Costos de Materiales Eléctricos-Electrónicos

Incluye los costos de los componentes eléctricos y electrónicos necesarios para el funcionamiento y control de las máquinas.

Tabla 3.4: Costo parcial de elementos electrónicos - eléctricos

Cantidad	Suministro	Descripción	Norma	Material	Observaciones	Costo Unitario (P.U.) (S/.)	Costo Parcial (P.U.) (S/.)	
1	Adquisición	Motorreductor 29:1			S47DRN80MK4	3780	3780	
1	Adquisición	Variado ABB 3.5 A / 1/2 – 3/4 HP / 220 V AC			ACS150-03E-03A5-2	2797.2	2797.2	
2	Adquisición	Interruptor de encendido-apagado			-	30	60	
1	Adquisición	CONTACTOR ABB			AF30-30-00-13	189	189	
1	Adquisición	Relé térmico ABB 3.1-4.2A			TF42-4.2	170.1	170.1	
SUBTOTAL (s/.)							6996.3	

*Elaboración propia*

### 3.2. Costos de manufactura y ensamble

La tabla presentada muestra los costos parciales relacionados con la manufactura y el ensamblaje del proyecto. Los costos se encuentran detallados por tipo de suministro, incluyendo técnicos mecánicos para mecanizado y ensamblaje, técnico eléctrico y alquiler de equipos y talleres. Cada entrada especifica la cantidad de horas o días necesarios, el costo unitario en Nuevos Soles (S/.), el costo parcial sin IGV, el monto del IGV y el costo parcial total con IGV incluido.

Tabla 3.5: Costo parciales de manufactura y ensamble

Suministro	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (P.U.) (S/.)	Costo Parcial Sin IGV (P.U.) (S/.)	IGV	Costo Parcial (P.U.) (S/.)
Tecnico Mecanico (Mecanizado)	100	Horas	20	2000	360	2360
Tecnico Mecanico (Ensamblaje)	50	Horas	20	1000	180	1180
Tecnico Electrico	12	Horas	10	120	21.6	141.6
Alquiler de equipos y talles	7	días	60	420	75.6	495.6
					SUBTOTAL (s/.)	4177.2

*Elaboración propia*

### 3.3. Costos de diseño

La tabla siguiente muestra los costos parciales asociados con el diseño del proyecto. Los costos están desglosados por actividades específicas, incluyendo la búsqueda de información, el diseño del módulo y la elaboración de planos. Cada actividad especifica la cantidad de horas o días necesarios, el costo unitario en Nuevos Soles (S/.), el costo parcial sin IGV, el monto del IGV y el costo parcial total con IGV incluido.

Tabla 3.6: Costo parciales de diseño

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (P.U.) (S/.)	Costo Parcial Sin IGV (P.U.) (S/.)	IGV	Costo Parcial (P.U.) (S/.)
Busqueda de información	240	Horas	10	2400	432	2832
Diseño del modulo	1000	Horas	15	15000	2700	17700
Elaboración de planos	60	días	10	600	108	708
SUBTOTAL (s/.)						21240

*Elaboración propia*

### 3.4. Costos de Total

La siguiente tabla presenta el costo total del módulo, desglosado en varias categorías de costos parciales. Estos incluyen los costos de elementos normalizados, manufactura y ensamblaje, elementos estructurales, y diseño. Cada categoría muestra su respectivo costo parcial en Nuevos Soles (S/.). Al sumar todos estos costos parciales, se obtiene un costo total de S/. 40992.5, lo que proporciona una visión completa de la inversión necesaria para la realización del módulo.

Tabla 3.7: Costo Total del Modulo

Descripción	Costo Parcial (P.P.)(S/.)
Costo parciales de elementos normalizados	4300.2
Costo parciales de manufactura y ensamble	6996.3
Costo parciales de elementos Estructurales	4278.8
Costo parciales de manufactura y ensamble	4177.2
Costo parciales de diseño	21240
40992.5	

*Elaboración propia*

# Conclusiones

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar un módulo educativo de un molino SAG que permita observar y modificar los parámetros de operación para el estudio cualitativo de los mecanismos de molienda frente a la necesidad de investigar los procesos de conminución en los Molinos SAG.

Para alcanzar el objetivo general se establecieron y cumplieron los objetivos específicos planteados en el primer capítulo de la tesis.

- Se investigó el estado de la tecnología de los equipos y módulos de molinos, proporcionando una base de conocimientos actualizados sobre las tecnologías actuales clasificando los molinos en grupos de primera y segunda etapa, de acuerdo al requerimiento de las propiedades metalúrgicas (wrock index) y el tamaño de mineral a reducir. Además, esta investigación se complementó con teoría relacionada al proceso de molienda, mecanismos de molienda, medios de molienda y principios de molienda.
- Se desarrolló el módulo educativo en base a la metodología de diseño VD 2221 como la guía principal para el diseño del molino SAG. Para ello, se creó una lista detallada de requisitos para el diseño del módulo, asegurando que cumpliera con las necesidades educativas y técnicas identificadas. Se elaboró una estructura de funciones que definió los componentes y sus interacciones dentro del módulo, facilitando un diseño coherente y funcional. Se bosquejaron diversos conceptos de solución, los cuales fueron evaluados y refinados mediante un proceso iterativo para seleccionar las opciones más viables. Se desarrollaron y evaluaron proyectos preliminares, destacando aquellos que mostraron mayor viabilidad técnica y económica. Se llevó a cabo el desarrollo de la ingeniería de detalle, incluyendo una memoria de cálculo basada en los parámetros de diseño de molinos además de la creación de gráficos que plasman las ecuaciones de los mecanismos de molienda para el diseño. Se realizaron los planos de ensamblaje y despiece. Finalmente, se presentaron los costos asociados al diseño, fabricación y obtención del módulo, proporcionando una guía clara para su implementación práctica.

- El diseño y desarrollo del módulo educativo de un molino SAG cumplió con los objetivos generales y específicos establecidos, proporcionando una herramienta útil para la educación en ingeniería. El enfoque de la investigación abren nuevas vías para mejorar para la enseñanza de los mecanismos de molienda y de esta manera contribuir en los avances del conocimiento en este campo de la minería. Este módulo no solo facilita la comprensión teórica sino que también permite la comprobación práctica de los cálculos teóricos mediante ensayos experimentales, reflejando cualitativamente en la formación de los mecanismos de molienda.



## Recomendaciones

El módulo se puede utilizar para evaluar los impactos generados dentro del molino, clasificándolos en impactos óptimos que favorecen la molienda y en impactos críticos que afectan negativamente el tambor. Esto requiere la modificación de los parámetros de operación, tal como lo permite esta investigación. El diseño del módulo educativo del molino SAG no solo permite observar y modificar los parámetros de operación, sino que también abre la puerta a investigaciones avanzadas sobre los impactos dentro del molino. Futuros estudios podrían centrarse en el conteo y clasificación de estos impactos para optimizar el proceso de molienda.

La clasificación y conteo de los impactos dentro del molino es esencial para optimizar su eficiencia. Este proceso implica identificar cuántos impactos son óptimos, caracterizados por su capacidad para romper el material de manera efectiva, y cuántos son críticos, donde el medio de molienda golpea directamente el tambor sin contribuir a la molienda efectiva. Para lograr esto, se pueden implementar sensores y técnicas de monitoreo avanzadas que registren y analicen los patrones de impacto en tiempo real. Esta información permitirá ajustar los parámetros de operación para maximizar la eficiencia y minimizar el desgaste y el consumo de energía.

Para llevar a cabo esta investigación, es fundamental modificar los parámetros de operación del molino. Gracias al módulo educativo diseñado, se pueden ajustar:

- **Velocidad de Rotación del Tambor:** Ajustar la velocidad para observar cómo afecta a la distribución y frecuencia de los impactos.
- **Carga de Material:** Variar la cantidad y tipo de material introducido para estudiar cómo diferentes cargas afectan la eficiencia de la molienda.
- **Configuración del Medio de Molienda:** Cambiar la distribución y tipo de medios de molienda (como bolas de acero y rocas) para ver su influencia en la cantidad y tipo de impactos.

Para futuras investigaciones, se recomienda utilizar el módulo educativo para estos propósitos, permitiendo un análisis detallado y optimización de los parámetros de operación para mejorar la eficiencia del proceso de molienda. Para optimizar la eficiencia del molino y avanzar en la investigación, se recomienda lo siguiente:

- **Modificación de Parámetros de Operación:** Ajustar la velocidad de rotación del tambor, variar la carga de material, y cambiar la configuración del medio de molienda. Estas modificaciones permitirán observar cómo afectan la distribución y frecuencia de los impactos, así como la eficiencia de la molienda.
- **Conteo Sistemático de Impactos:** Implementar sistemas de monitoreo y sensores, como sensores acústicos y acelerómetros, para contar y clasificar los impactos de manera precisa en tiempo real.
- **Análisis de Eficiencia de Impactos:** Estudiar cómo diferentes configuraciones de operación afectan la proporción de impactos óptimos frente a críticos. Esto permitirá identificar las condiciones operativas que maximicen la eficiencia de la molienda y optimizar el diseño y tipo de levitador para modificar la trayectoria del impacto.

Estas recomendaciones buscan aprovechar al máximo las capacidades del módulo educativo diseñado, permitiendo una comprensión más profunda y una optimización del proceso de molienda.

La caracterización y el uso de sensores en el módulo educativo abren la posibilidad para realizar análisis vibratoriales que permitan estudiar la criticidad de los impactos y la fatiga acumulada por impactos críticos. Esto incluye la recopilación de datos a través de análisis de Shock Response Spectrum (SRS) y Fatigue Damage Spectrum (FDS). El objetivo es llevar a cabo investigaciones que mejoren la integridad estructural de los molinos de conminución, garantizando su durabilidad y eficiencia a largo plazo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arbiter N. y Harris, C. (1982). Design and Installation of Comminution Circuits. Mular, A. y Jergensen, G. (Ed). *Scale-up and Dynamics of Large Grinding Mills - a Case Study*. (pp.491-505). AIME.
- Gupta, A. y Yan, D. (2016). *Mineral processing desing and operation*. Elsevier
- Industria Salas (2014). Molino de bolas Bach. Ingeniería y Construcciones Salas Hnos.
- Kawatra, K. (2006). *Advances in Comminution*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- King, R. (2001). *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Butterworth Heinemann
- Leung, K. (1988). *An energy based, ore specific model for autogenous and semi-autogenous grinding mills*. [PhD Thesis School of Engineering, The University of Queensland]. UQ Space. <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:362683>
- Comminution Handbook. (2015). Australia: AusIMM. Maleki, M., Yahyaei, M. y Banisi, S. (2013). A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills. *Minerals Engineering*, 46-47, pp. 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.013>
- Monrrell, S. (1993). *The prediction of power draw in wet tumbling mills*. [Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Queensland].
- Niansheng, C. y Kuifeng, Z. (2017). Difference between static and dynamic angle of repose of uniform sediment grains. *International Journal of Sediment Research*, 32, 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.09.001>
- Royston, D. (2007). Semi-autogenous grinding (SAG) mill liner design and development. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 24, 121-132.
- Taggart, A. (1994). Handbook of Mineral Dressing ore and industrial minerals. John Willey & Sons, Inc.
- Tangathitkulchai, C. (2003). Effects of slurry concentration and powder filling on the net mill power of a laboratory ball mill. *Powder Technology*, 137, 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2003.08.048>



## **Anexos**

# Anexo A

## CODIGO MATLAB

### A.1. Código del diseño y dimensionamiento de la altura del levantador y ángulo de cara

```
numbers
%Diseno de un modulo educativo de un molino SAG
%Entrada de datos
clear all;
clc;
D=400           %Diametro del molino
C_s=75          %Porcentaje de velocidad
J_t=35          %Porcentaje de carga
Vo=50           %Velocidad de operacion RPM
L_h= 0:1:25;
L_h_p=L_h/1000  %Rango de valores para la latura del levantador
l_a=0;          %Angulo del levantador
H_l=L_h_p/(0.001*D); %Relacion de altura del levantador y el molino
%Se coloca la relacion para estimar el valor de la velocidad de operacion
A=-0.5*J_t-0.914*H_l+148.9;
if C_s > A ;
C_st=C_s ;
else
C_st=A ;
```

```

end
H=A-C_s;
%Ecuacion para estimar el valor del angulo de pie
AT=(-1.01.*J_t-0.156.*(C_st-C_s)+158.5).*(1-exp(-0.69.*(C_st-C_s)))+90;
%Para cada tamano de levantador se tendra un valor de Angulo de pie
while (l_a<=60);
AS=90 - (AT-90).*(-0.7.*J_t - 0.57.*C_s+0.28.*l_a+103.7)/100;

if l_a==0;
AS0=AS;
elseif l_a==10;
AS1=AS;
elseif l_a==20;
AS2=AS;
elseif l_a==30;
AS3=AS;
elseif l_a==40;
AS4=AS;
elseif l_a==50;
AS5=AS;
elseif l_a==60;
AS6=AS;
end
l_a=l_a+10;
end

%Graficas para ver la tendencia del angulo de pie de carga
figure(1)

plot(L_h,AT, 'LineWidth', 2);
title('Altura de lifter vs Angulo del pie de la carga')
xlabel('Altura del levantador (mm)')
ylabel('Angulo del pie de la carga ( $\theta$ )')
%xticks(0:1:22);
%yticks(24:2:50); % Ajustar los valores de yticks
%xlim([0 22]); % Ajustar los limites del eje x

```

```

%ylim([25 50]); % Ajustar los limites del eje y
grid on;
%Grafica para ver la tendencia del angulo del hombro de la carga

figure(2)
plot(L_h, [AS0;AS1;AS2;AS3;AS4;AS5;AS6], 'LineWidth', 2);
title('Altura de levantador vs Angulo de hombro')
xlabel('Altura del levantador (mm)')
ylabel('Angulo del hombro de la carga ( $\theta$ )')
xticks(0:1:22);
yticks(24:2:50); % Ajustar los valores de yticks
xlim([0 22]); % Ajustar los limites del eje x
ylim([25 50]); % Ajustar los limites del eje y
legend('0', '10', '20', '30', '40', '50', '60')
grid on

```

## A.2. Código de la representación gráfica de las trayectorias y modelado de los mecanismos de molienda

```

numbers
clear all;
clc;

D = 400;
C_s = 75;
J_t = 35;

Vo = (43.3 / (D /1000)^0.5) * C_s/100;
L_h_values = [0.01, 0.01, 0.01, 0.02, 0.02, 0.02];
l_a_values = [0, 30, 60, 0, 30, 60];

for i = 1:6

```

```

L_h = L_h_values(i);
l_a = l_a_values(i);
H_l = L_h / (0.001 * D);

A = -0.5 * J_t - 0.914 * H_l + 148.9;

if C_s > A
C_st = C_s;
else
C_st = A;
end

H = A - C_s;
AT = (-1.01 * J_t - 0.156 * (C_st - C_s) + 158.5) *
(1 - exp(-0.69 * (C_st - C_s))) + 90;
AS = 90 - (AT - 90) * (-0.7 * J_t - 0.57 *
C_s + 0.28 * l_a + 103.7) / 100;
ATD= 0.01 * C_s^2 -0.64 * C_s + 273.34

rm = D / 2000;
N = Vo / 2;

r = (rm / 2) * (1 + ((2 * pi * J_t / 100) /
(2 * pi + AS * pi / 180 - AT * pi / 180))^0.5);
tf = ((2 * r * (sin((pi / 180) * AS) -
sin((pi / 180) * AT))) / 9.81)^0.5;
tc = (2 * pi + (pi / 180) * AS - (pi / 180) * AT) /
(2 * pi * N / 60);
b = tc / (tf + tc);
ri = rm * (1 - (2 * pi * b * J_t / 100) /
(2 * pi + (pi / 180) * AS - (pi / 180) * AT))^0.5;

t0 = 0:0.001:0.33;
AL = 90 - (AS + l_a);
wo = (rm - L_h) * Vo * pi / 30;

```

```

AV = 2 * pi + AS * pi / 180;
AC = (20 / 1000) / (rm - L_h / 1000);
xi = (rm - L_h) * cos(AV + AC);
yi = (rm - L_h) * sin(AV + AC);
vx = -wo * cos(AL * pi / 180);
vy = wo * sin(AL * pi / 180);
xf = xi + vx * t0;
yf = yi + vy * t0 - (9.81 / 2) * (t0.^2);

t1 = linspace(0, 2 * pi, 360);
Dpx = (rm) * cos(t1);
Dpy = (rm) * sin(t1);
t2 = linspace(AT * pi / 180, 2 * pi + AS * pi / 180, 360);
ripx = (ri) * cos(t2);
ripy = (ri) * sin(t2);
rxs = [(ri) * cos(2 * pi + AS * pi / 180), (rm) *
cos(2 * pi + AS * pi / 180)];
rys = [(ri) * sin(2 * pi + AS * pi / 180), (rm) *
sin(2 * pi + AS * pi / 180)];
rxt = [(ri) * cos(AT * pi / 180), (rm) * cos(AT * pi / 180)];
ryt = [(ri) * sin(AT * pi / 180), (rm) * sin(AT * pi / 180)];

figure;
hold on;
plot(Dpx, Dpy, 'LineWidth', 3);
plot(ripx, ripy, 'LineWidth', 3);
plot(rxs, rys, 'LineWidth', 3);
plot(rxt, ryt, 'LineWidth', 3);
plot(xf, yf, 'LineWidth', 3);
hold off;

%title(['Ubicacion de hombro, pie y carga activa (rinon),
Lh = ', num2str(L_h), ', la = ', num2str(l_a)]);

xlim([-0.25 0.25]);

```

```

ylim([-0.25 0.25]);

%legend('Molino', 'Rinon (Carga activa)',
'Posicion del hombro', 'Posicion del pie',
'Trayectoria del medio de molienda', 'Location', 'southeast');

% Ajustar el tamaño de la figura
set(gcf, 'Units', 'pixels', 'Position', [100, 100, 950, 900]);

% Ajustar los márgenes de los ejes
ax = gca;
% Ajusta los márgenes [left, bottom, width, height]
ax.Position = [0.05 0.05 0.9 0.9];

% Ajustar el tamaño de la figura al guardar
set(gcf, 'PaperUnits', 'inches');
% Aquí defines el tamaño: 660x600 píxeles (1 pulgada = 96 píxeles)
set(gcf, 'PaperPosition', [0 0 660/96 600/96]);

% Guardar la figura
saveas(gcf, ['figura_', num2str(i), '.png']);

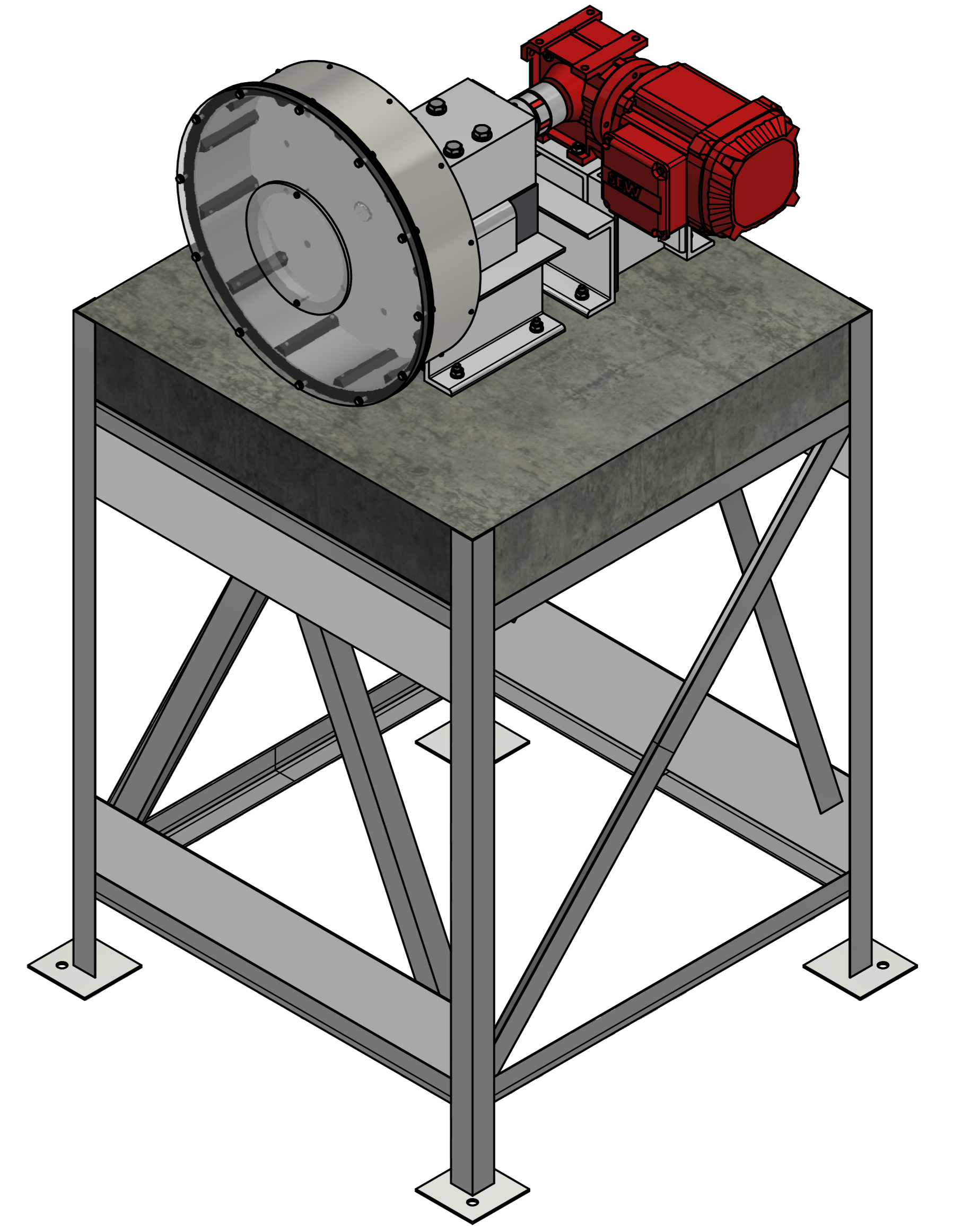
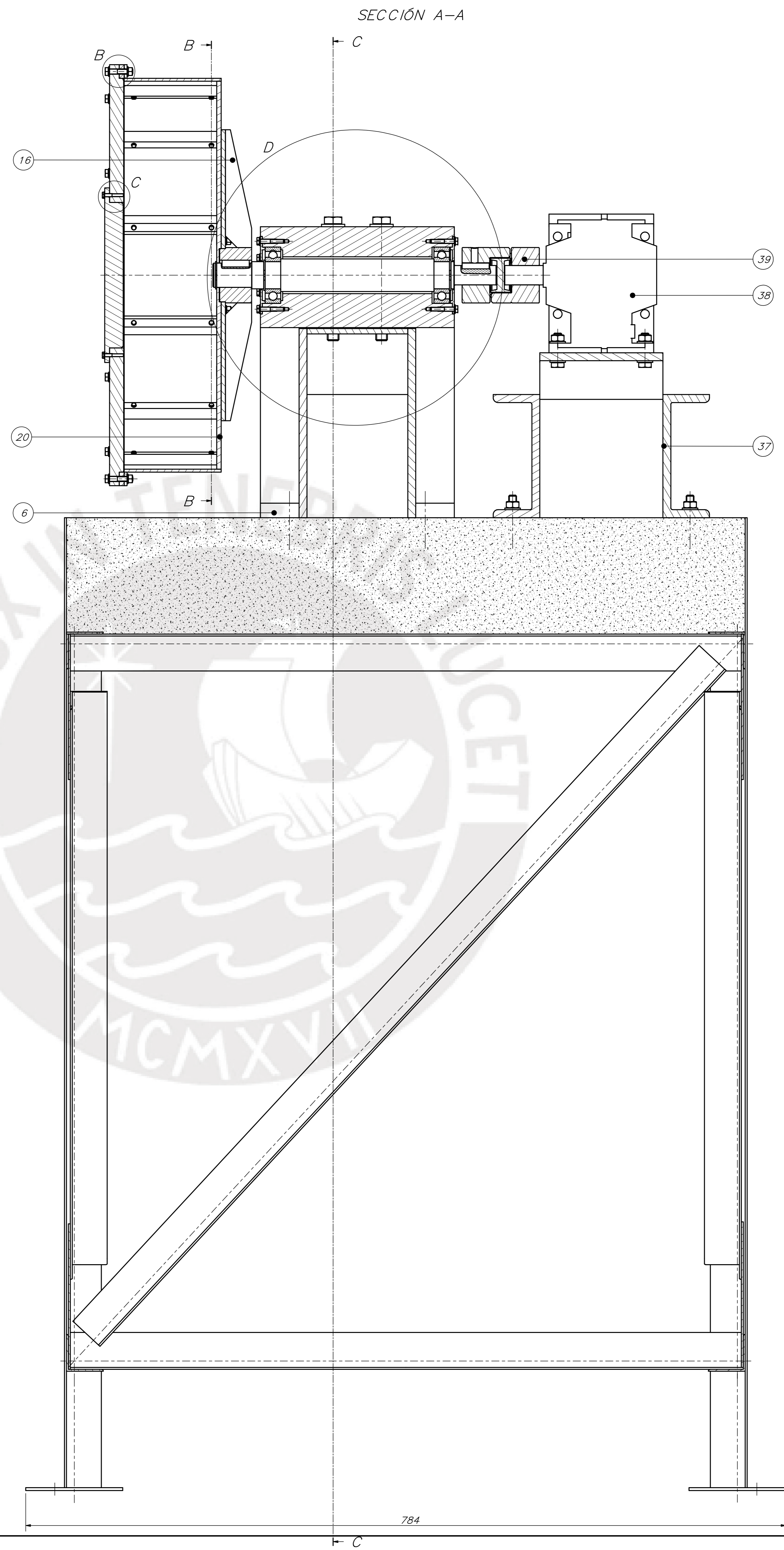
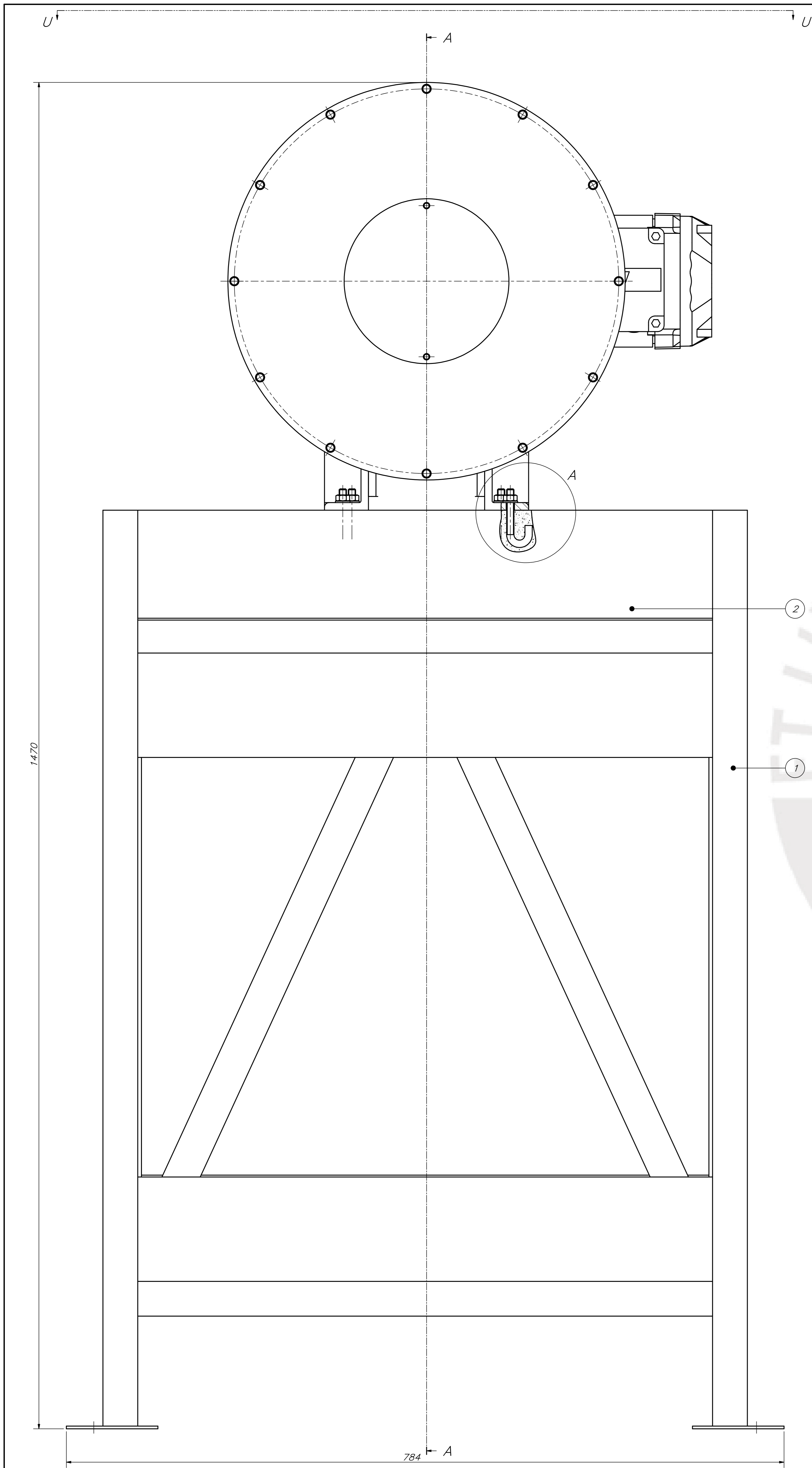
% Mostrar los resultados de la iteración actual
fprintf('Iteración %d:\n', i);
fprintf('L_h = %.2f, l_a = %.2f\n', L_h, l_a);
fprintf('A = %.2f, C_st = %.2f, H = %.2f\n', A, C_st, H);
fprintf('AT = %.2f, AS = %.2f\n', AT, AS);
fprintf('rm = %.4f, r = %.4f, tf = %.4f\n', rm, r, tf);
fprintf('tc = %.4f, b = %.4f, ri = %.4f\n', tc, b, ri);
fprintf('AL = %.2f, wo = %.4f\n', AL, wo);
fprintf('xi = %.4f, yi = %.4f\n', xi, yi);
fprintf('vx = %.4f, vy = %.4f\n', vx, vy);
end

```

## **Anexo B**

### **PLANOS DE ENSAMBLE**





PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
39	1	ACOPLE FLEXIBLE		RULAND JD36/MISC57	
38	1	MOTOREDUCTOR 28:1		S47DRN1M4/DH	
37	1	PEDESTAL DEL MOTOR	ASTM A36		
36	2	TORNILLO HEXAGONAL M3	DIN 933	8.8	ZINCADO
35	2	ARANDELA PLANA M3	DIN 125	6	ZINCADO
34	1	TAPA DE ALIMENTACIÓN		ACRILICO	
33	12	TUERCA HEXAGONAL M5	DIN 4032	4.8	ZINCADO
32	12	TORNILLO HEXAGONAL M5	DIN 933	8.8	ZINCADO
31	12	ARANDELA PLANA M5	DIN 125	6	ZINCADO
30	1	TAPA TRANSLUCIDA DEL MOLINO		ACRILICO	
29	1	SELO	ASTM D2240		CAUCHO NATURAL
28	24	TUERCA HEXAGONAL M2	DIN 4032	4.8	ZINCADO
27	24	TORNILLO HEXAGONAL M2	DIN 933	8.8	ZINCADO
26	24	ARANDELA PLANA M2	DIN 125	6	ZINCADO
25	12	LEVANTADOR	ASTM D2240		CAUCHO NATURAL
24	12	TUERCA HEXAGONAL M5	DIN 4032	4.8	ZINCADO
23	12	ARANDELA PLANA M5	DIN 125	6	ZINCADO
22	12	TORNILLO AVHELLANADO M5	DIN 3570	8.8	ZINCADO
21	1	ANILLO DE RETENCIÓN 25x1.5	DIN 471	6	ZINCADO
20	1	TAMBOR DEL MOLINO	ASTM A36		
19	4	TORNILLO HEXAGONAL M12	DIN 933	8.8	ZINCADO
18	4	ARANDELA PLANA M12	DIN 125	6	ZINCADO
17	1	CHAVETA LADO DEL ACOPLE	DIN 6885	Ck 45	BONIFICADO
16	1	CUBO DE TRANSMISIÓN	ASTM A36		
15	1	CHAVETA LADO DEL TAMBOR	DIN 6885	Ck 45	BONIFICADO
14	8	TORNILLO HEXAGONAL M4	DIN 933	8.8	ZINCADO
13	8	ARANDELA PLANA M4	DIN 125	6	ZINCADO
12	1	TAPA POSTERIOR PARA RODAMIENTO DEL BIJUE	ASTM A36		
11	1	TAPA FRONTAL PARA RODAMIENTO DEL BIJUE	ASTM A36		
10	2	ANILLO DE RETENCIÓN 28x1.5	DIN 471	6	ZINCADO
9	2	RODAMIENTO DE BOLA B28		SKF 62/28	
8	1	EJE DEL MOLINO		Ck 45	BONIFICADO
7	1	BIJUE DE RODAMIENTOS		ASTM A36	
6	1	PEDESTAL DEL MOLINO			
5	8	TUERCA HEXAGONAL M8	DIN 4032	4.8	ZINCADO
4	8	ARANDELA PLANA M8	DIN 125	6	ZINCADO
3	8	TORNILLO HEXAGONAL J M8	DIN 3570	8.8	ZINCADO
2	1	BLOQUE DE CIMENTACIÓN		Concreto	
1	1	ESTRUCTURA BASE		ASTM A36	

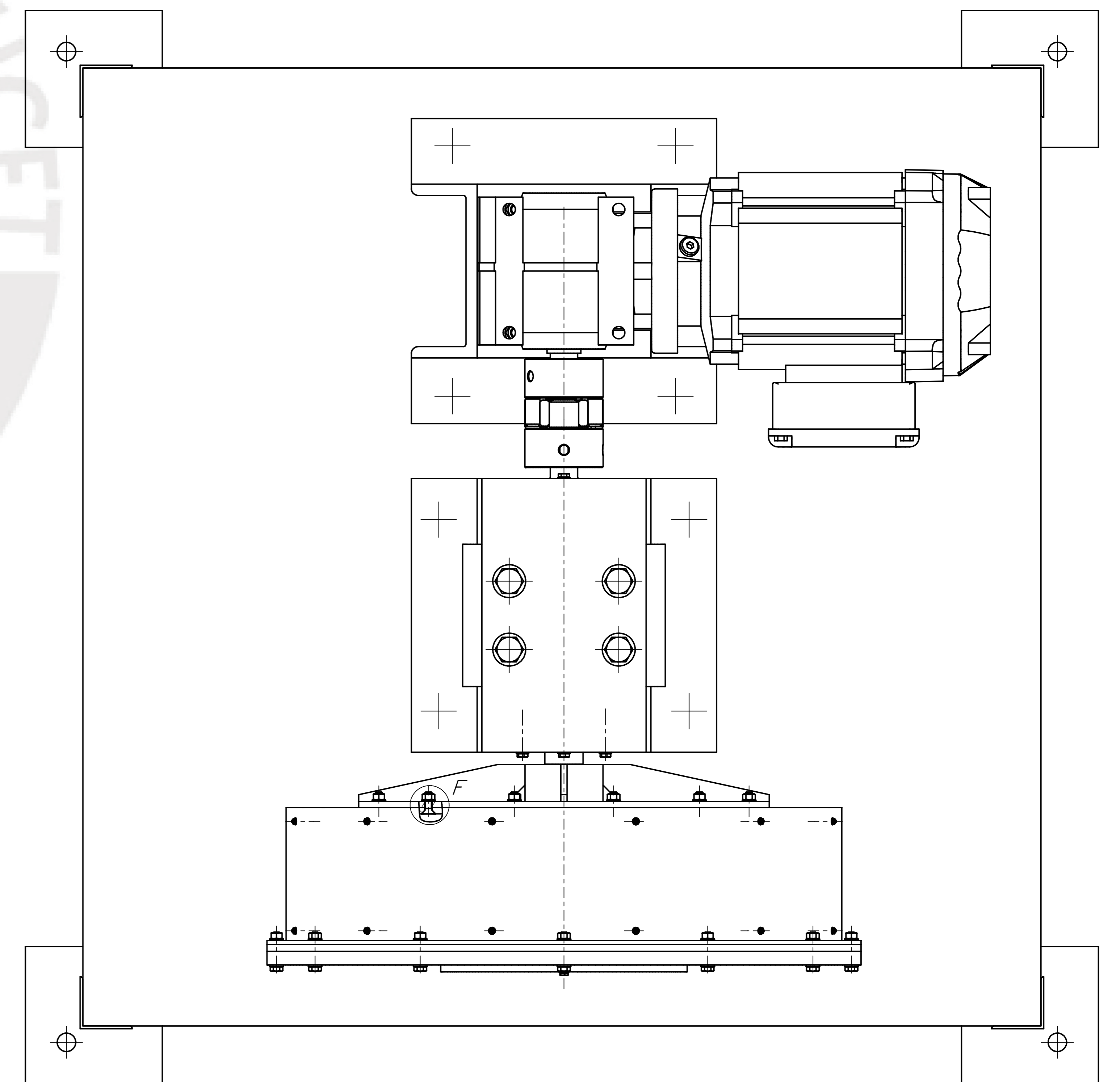
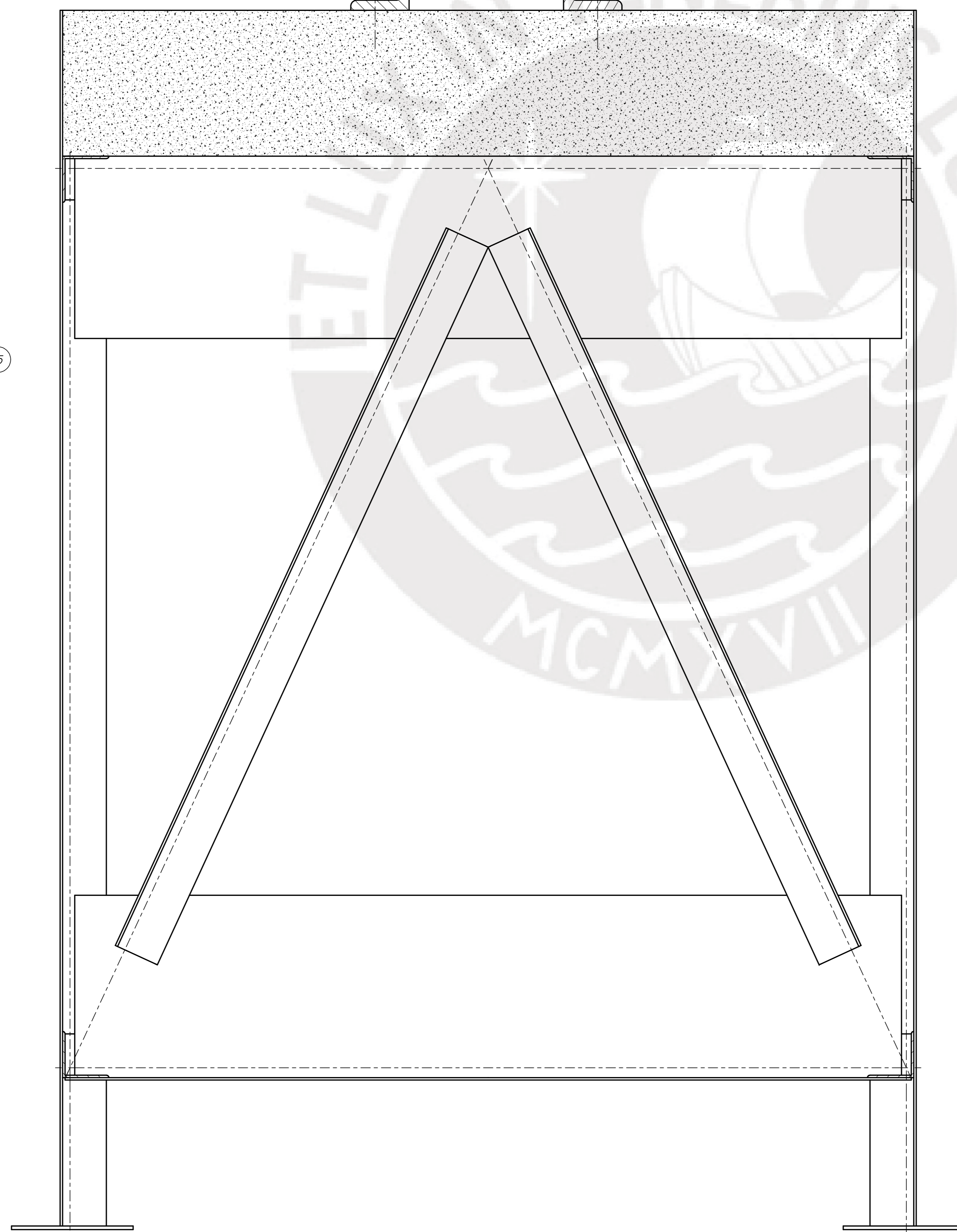
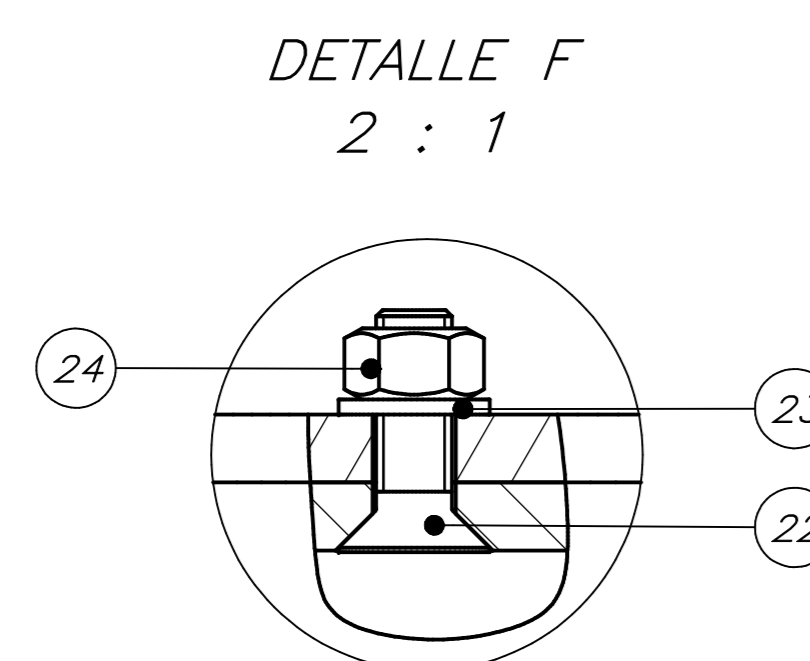
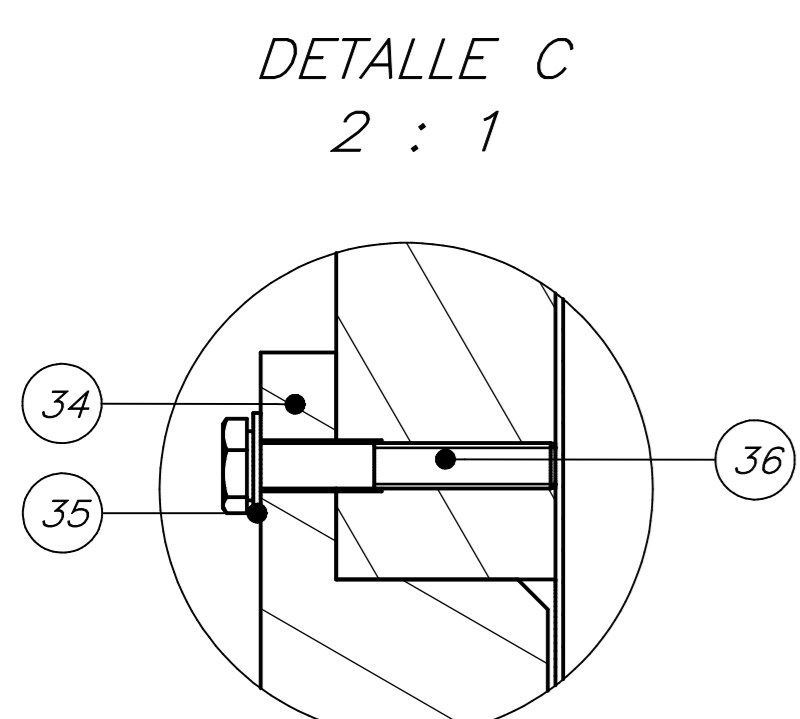
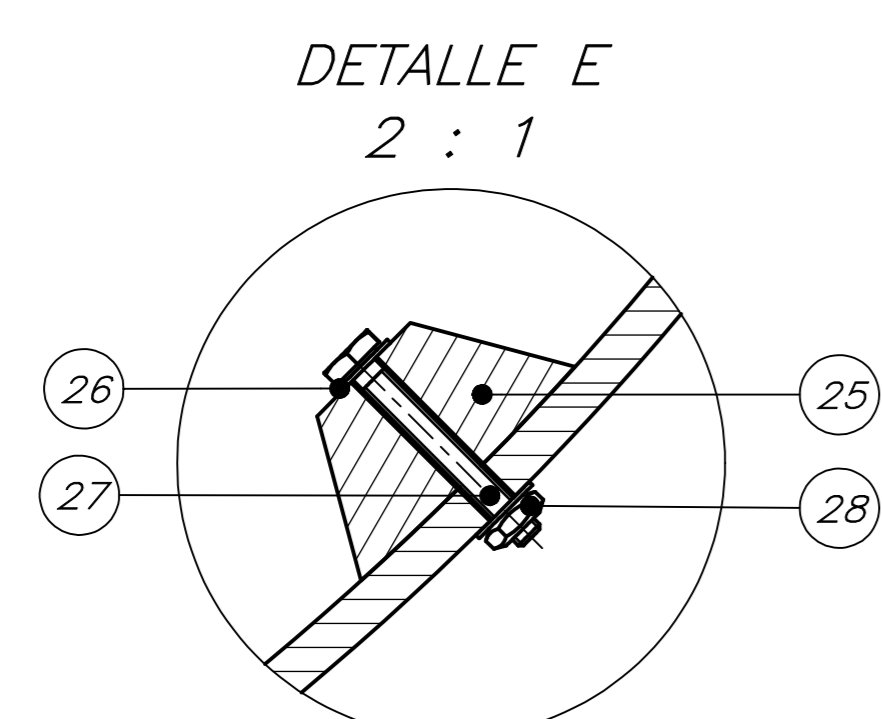
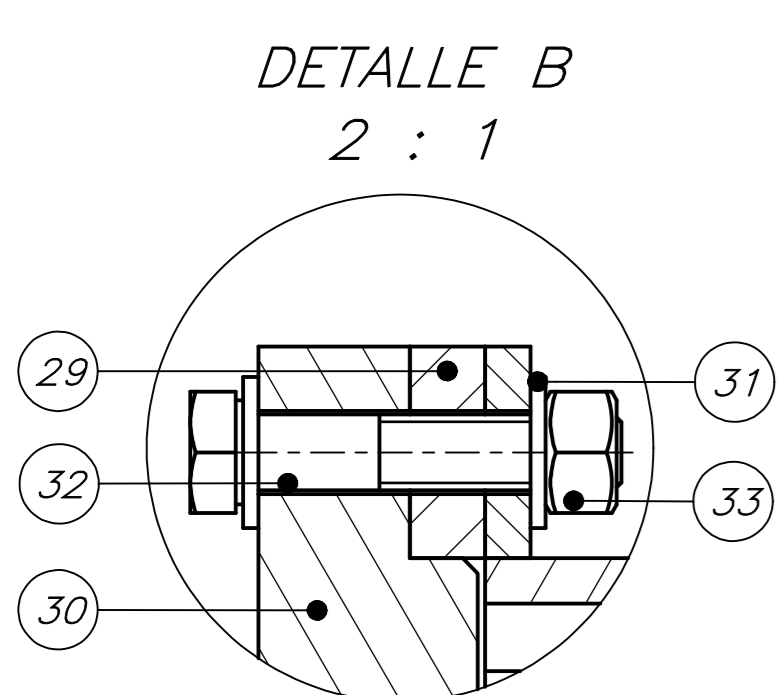
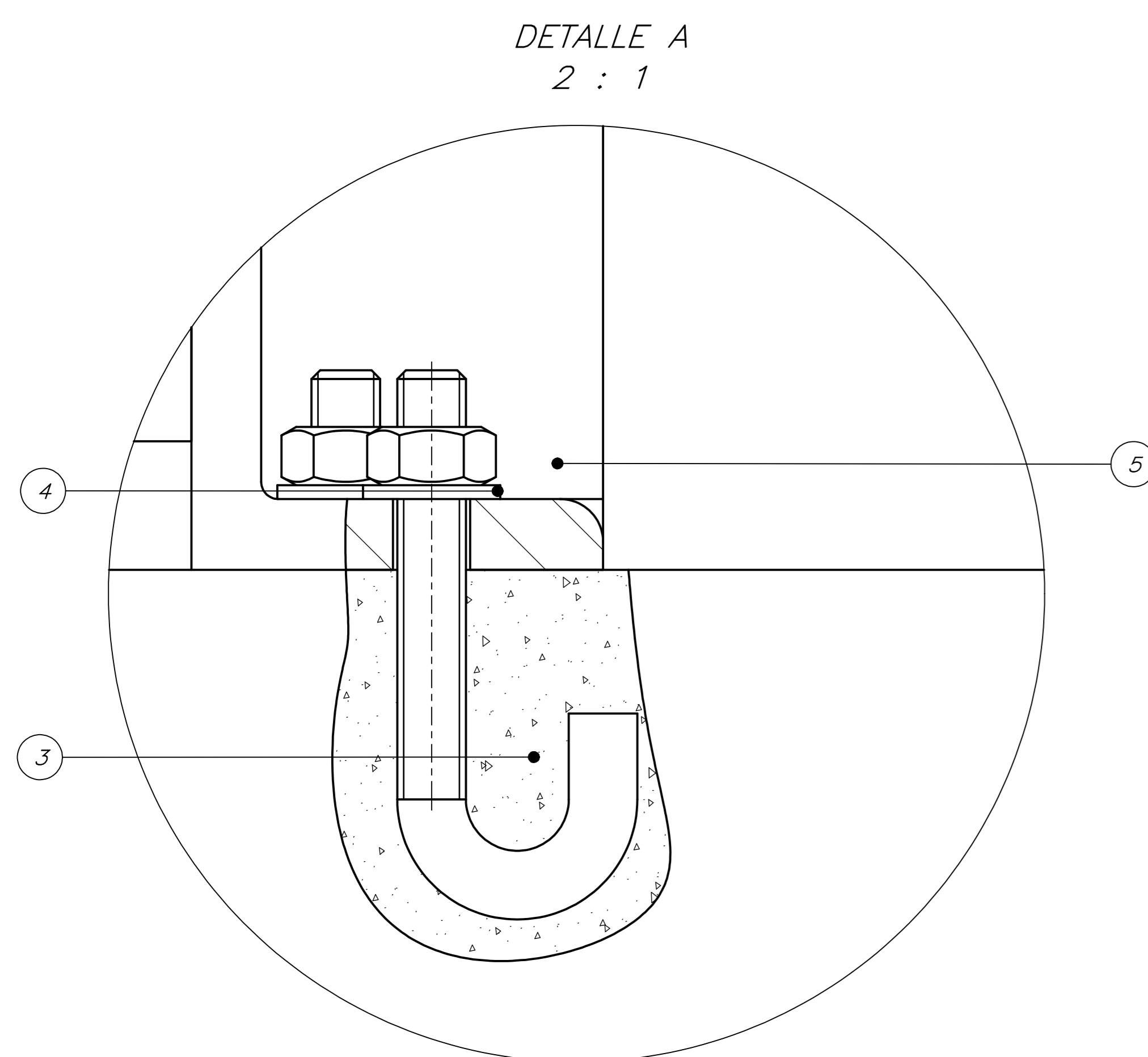
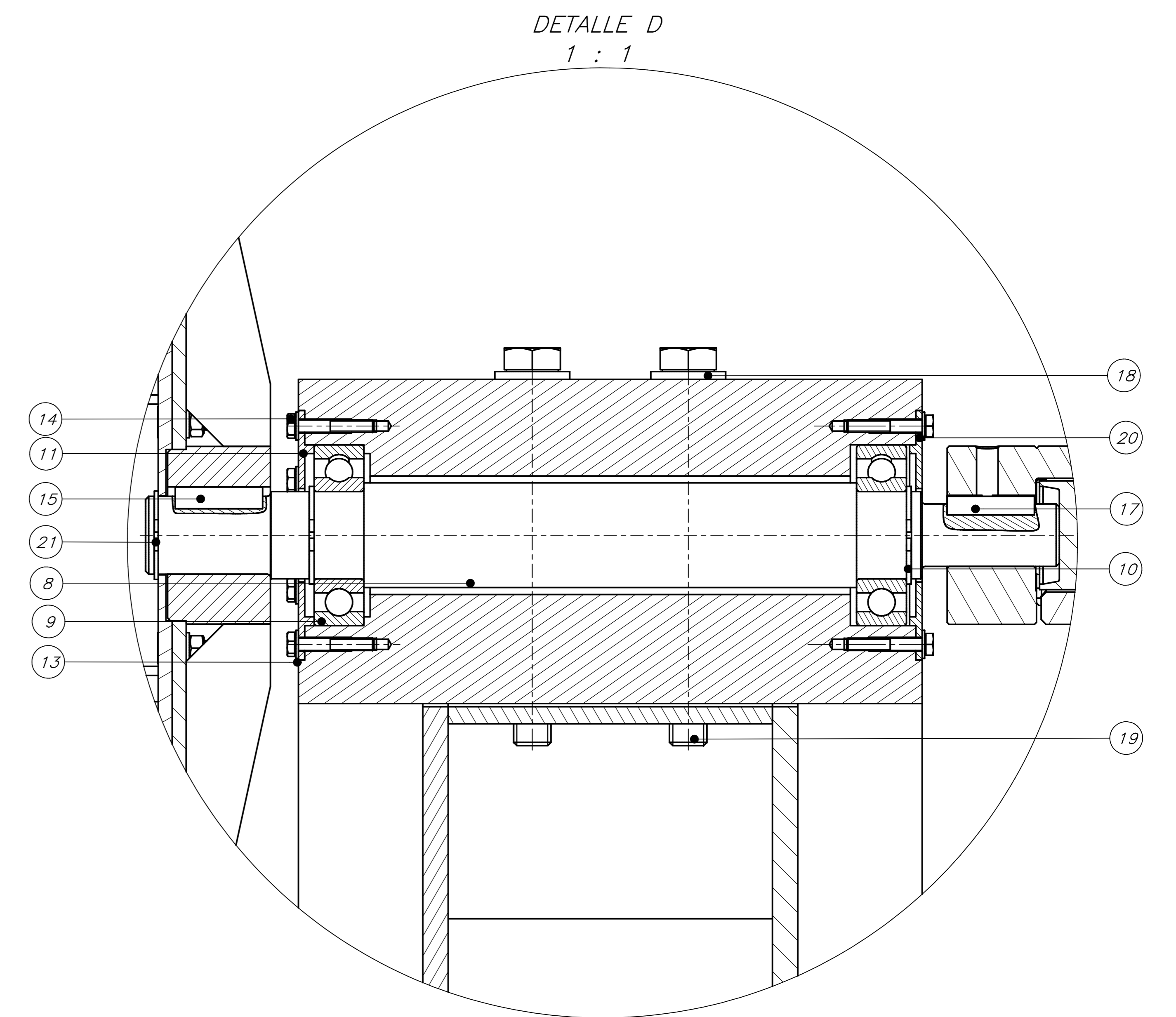
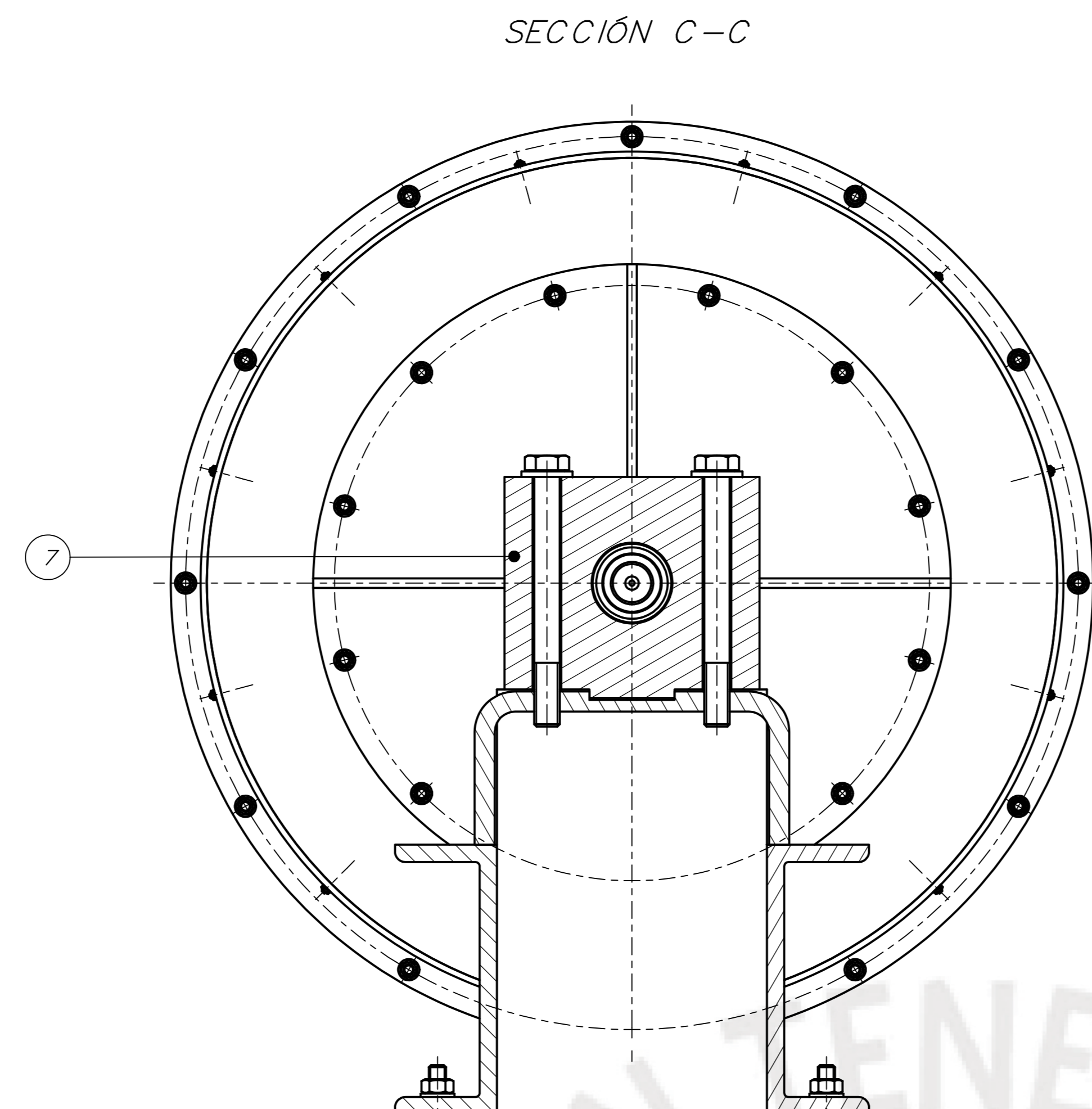
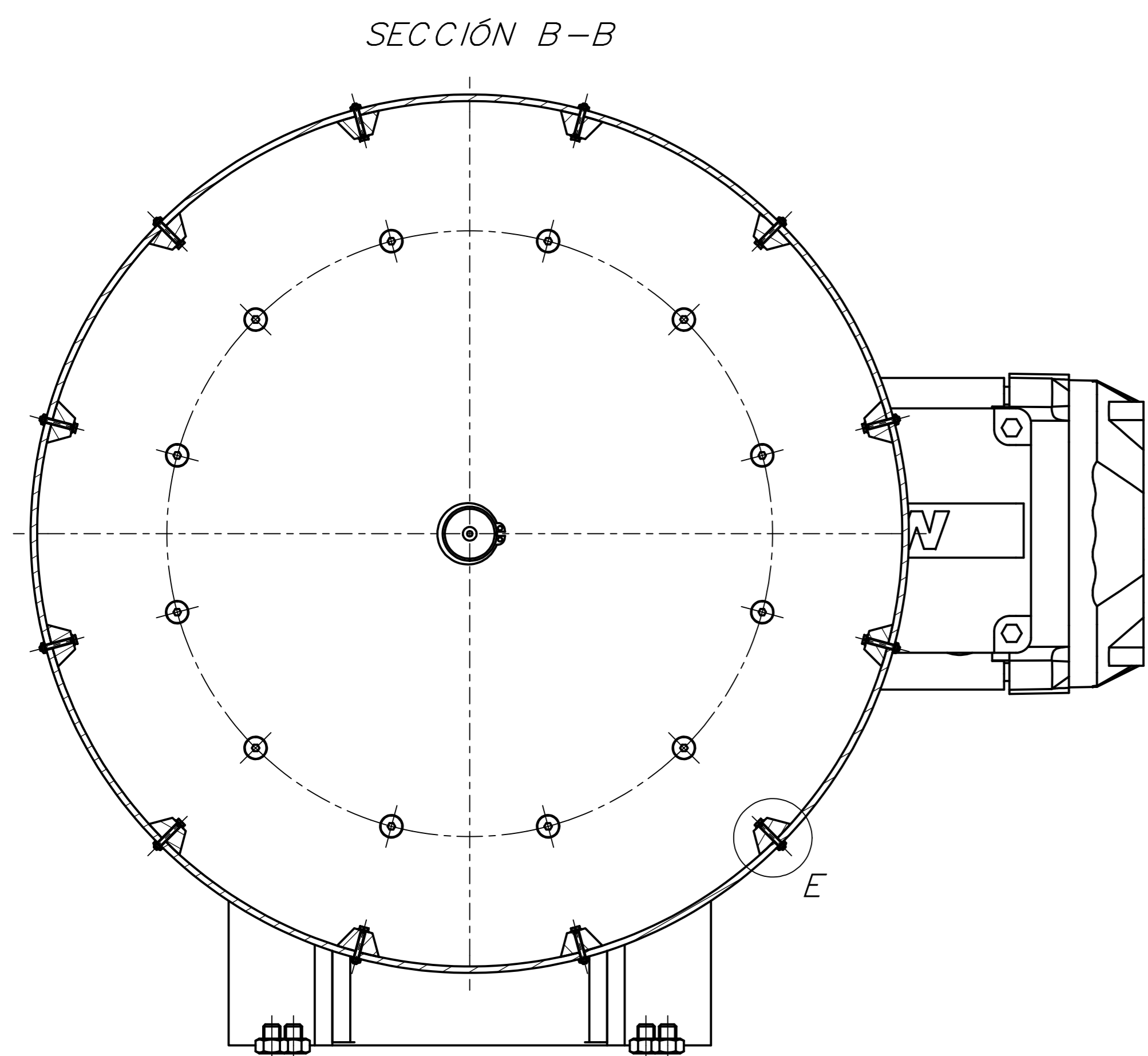
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA

METODO DE PROYECCIÓN: ESCALA: 1:5

PROYECTO DE TESIS: MODULO EDUCATIVO MOLINO SAG

AUTOR: KEVIN GIANCARLO PÉREZ CASTILLO FECHA: 2023.08.02

ASESOR: JORGE ALENCASTRE LÁMINA: A0-1



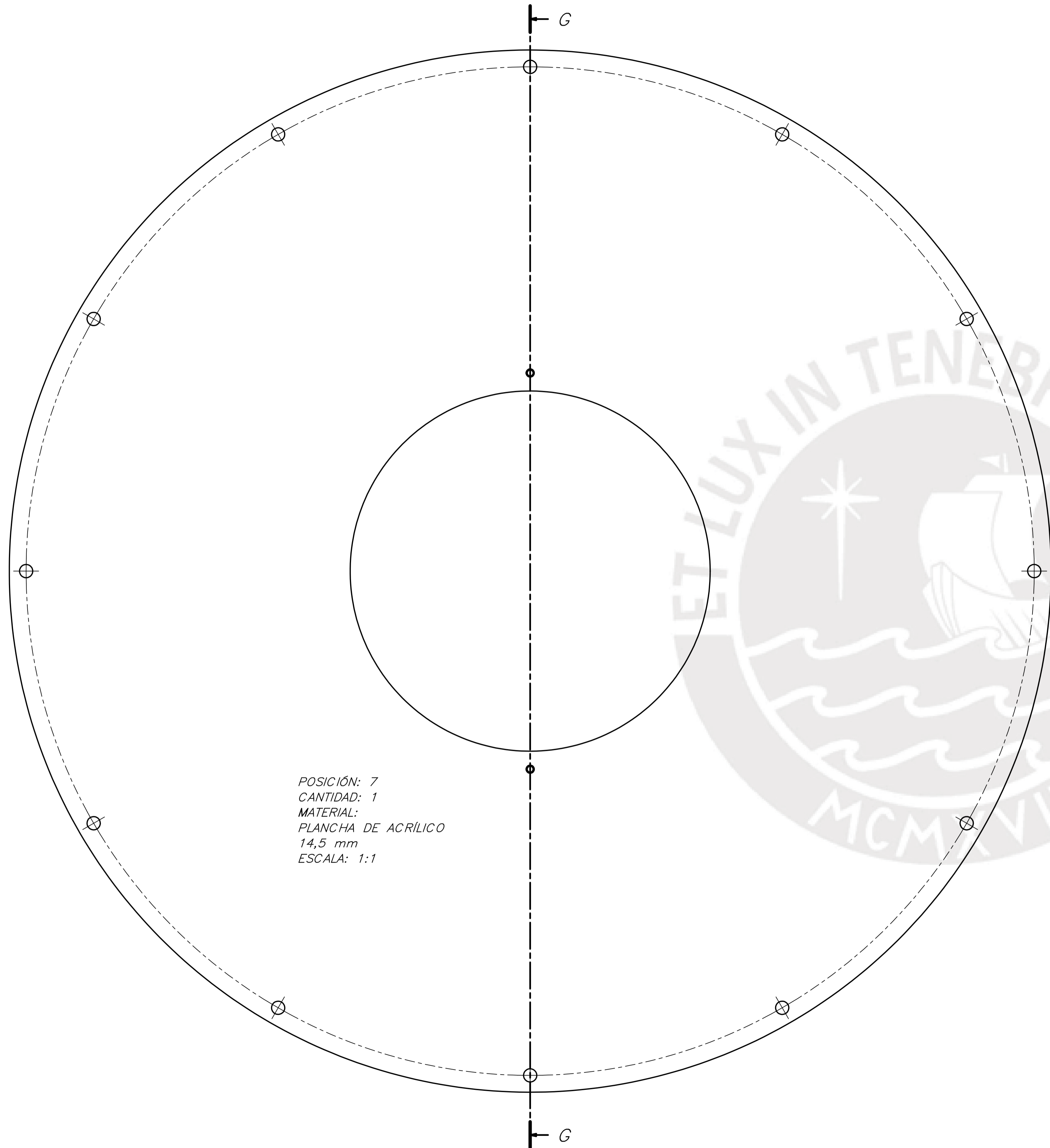
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECÁNICA					
PROYECTO DE TESIS					
MÓDULO EDUCATIVO MOLINO SAG					ESCALA 1:5
AUTOR		KEVIN GIANCARLO PÉREZ CASTILLO			FECHA: 2023.08.02
ASESOR		JORGE ALENCASTRE			LÁMINA: A0-2

## **Anexo C**

### **PLANOS DE DESPIECE**

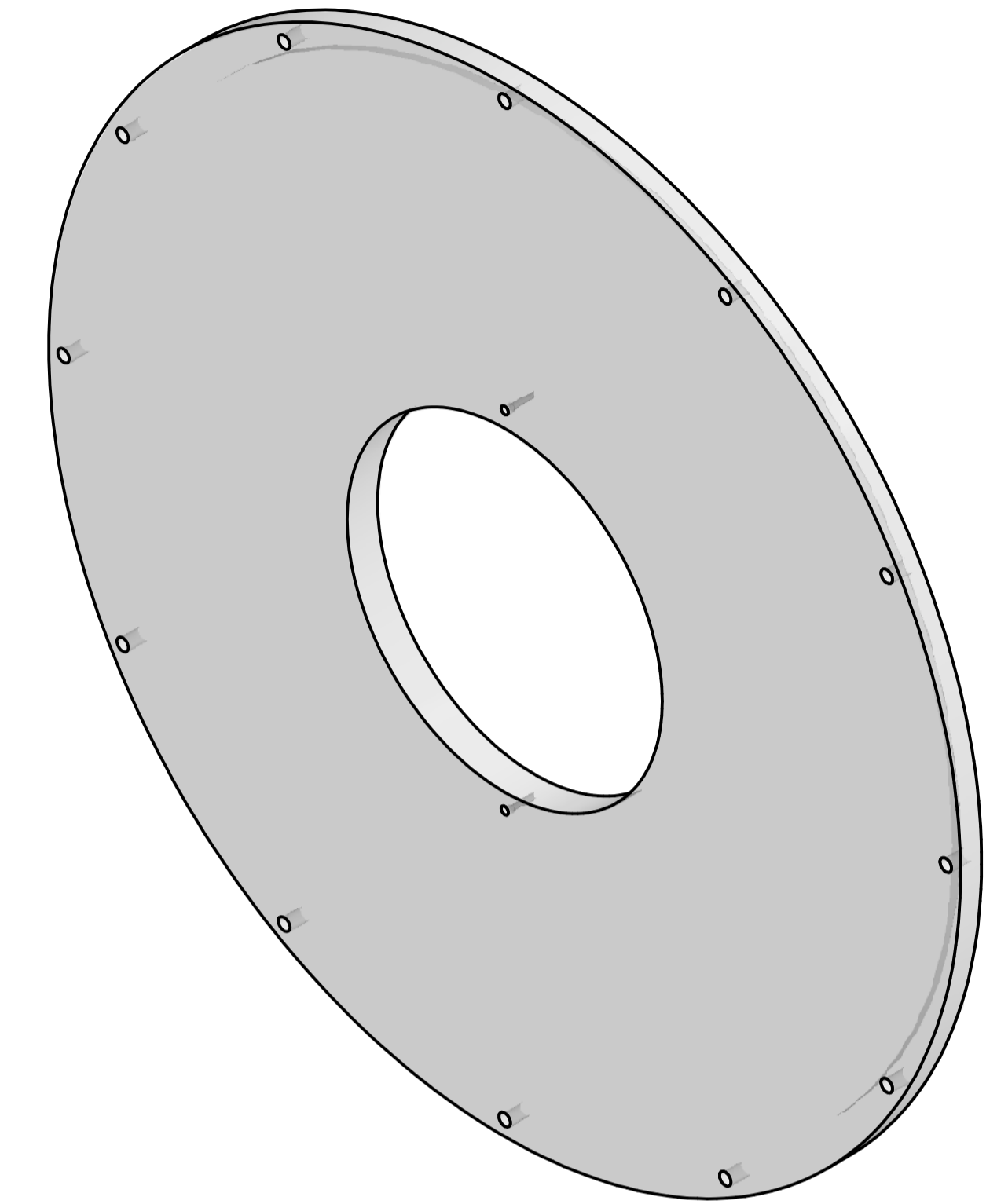
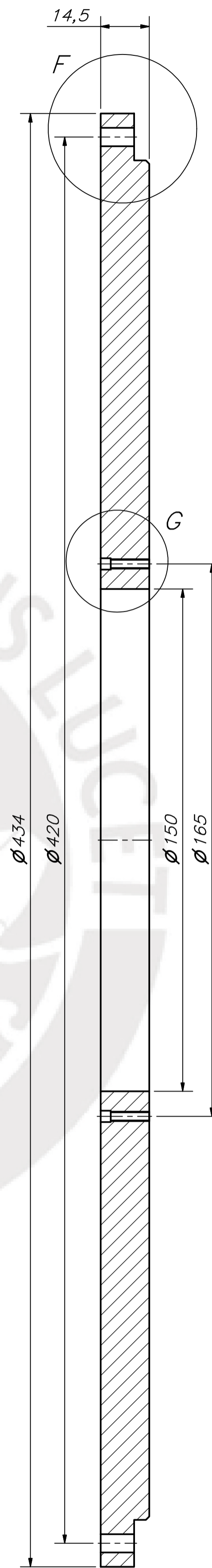




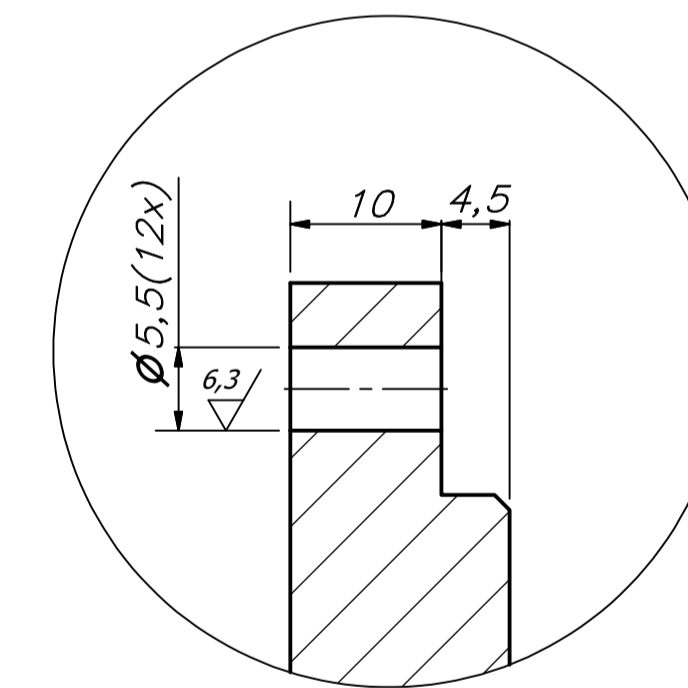


POSICIÓN: 7  
 CANTIDAD: 1  
 MATERIAL:  
 PLANCHA DE ACRÍLICO  
 14,5 mm  
 ESCALA: 1:1

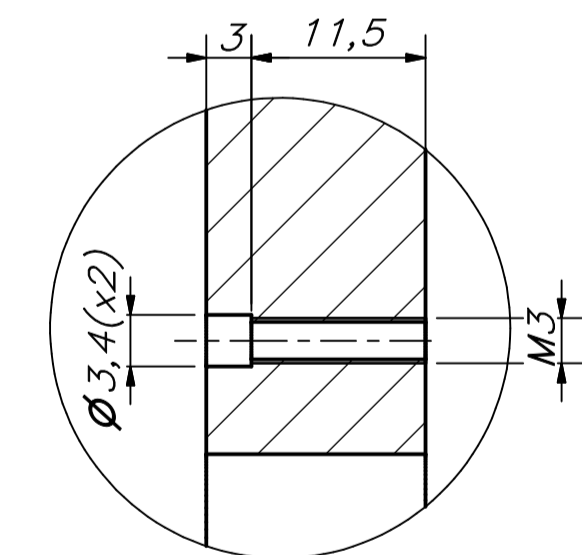
SECCIÓN G-G



DETALLE F  
 2 : 1

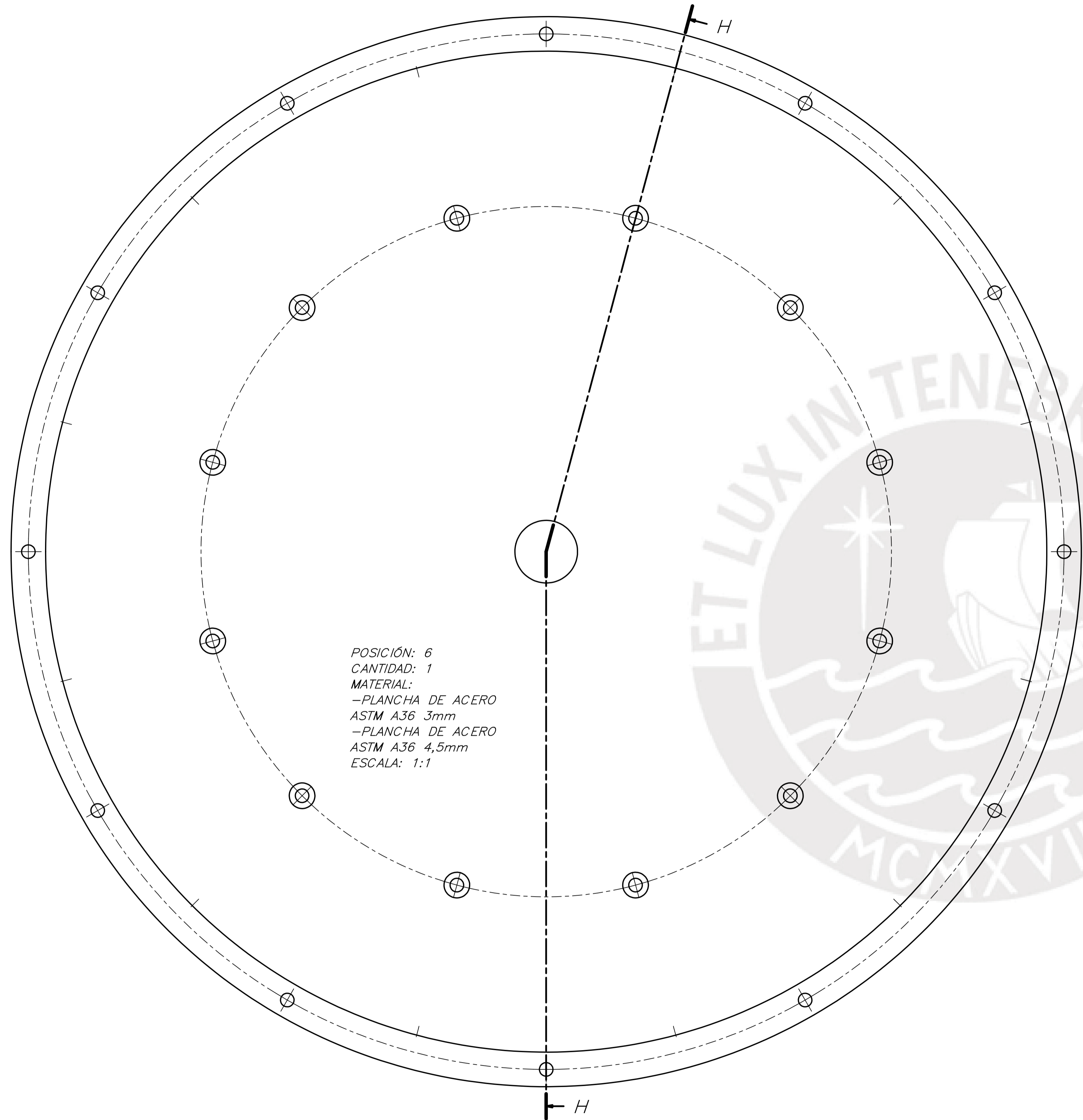


DETALLE G  
 2 : 1



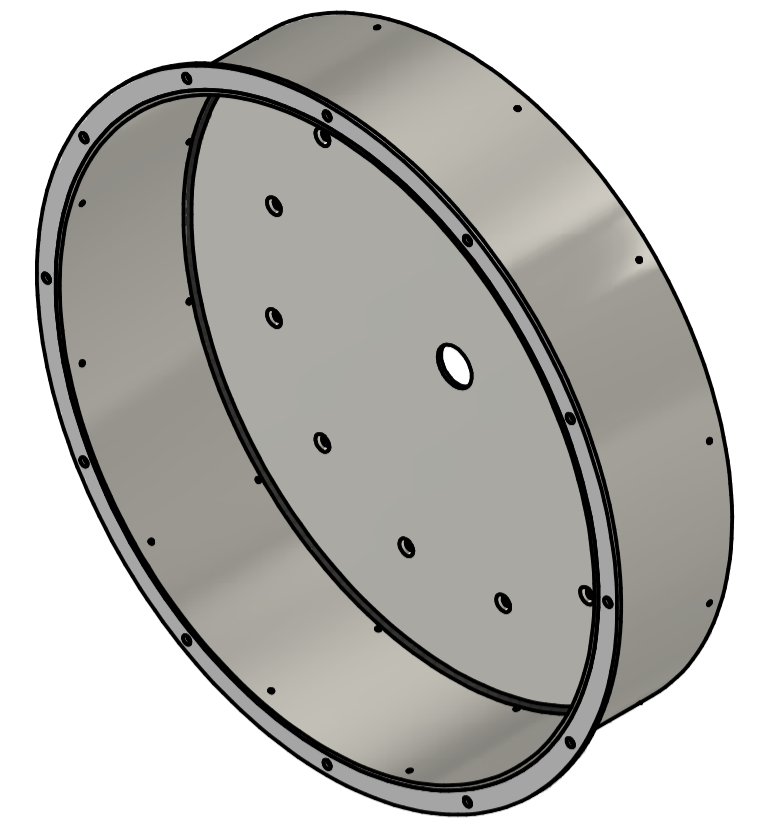
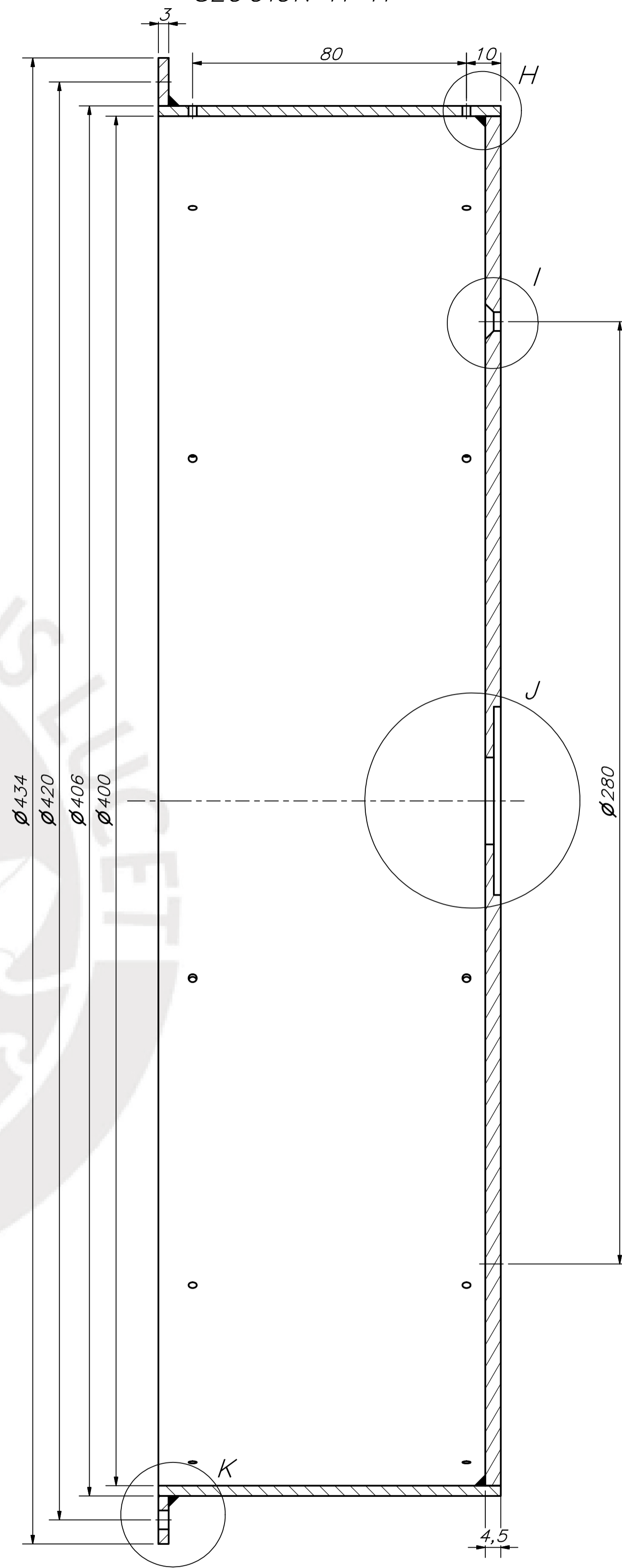
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN 7168				
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3

ACABADO SUPERFICIAL 6,3 / 3,2 / 0,8	TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL ACRILICO
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	ELEMENTOS DESPIECE	ESCALA 1:1
20120202	PÉREZ CASTILLO KEVIN GIANCARLO	FECHA: 2023.03.03
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: A1

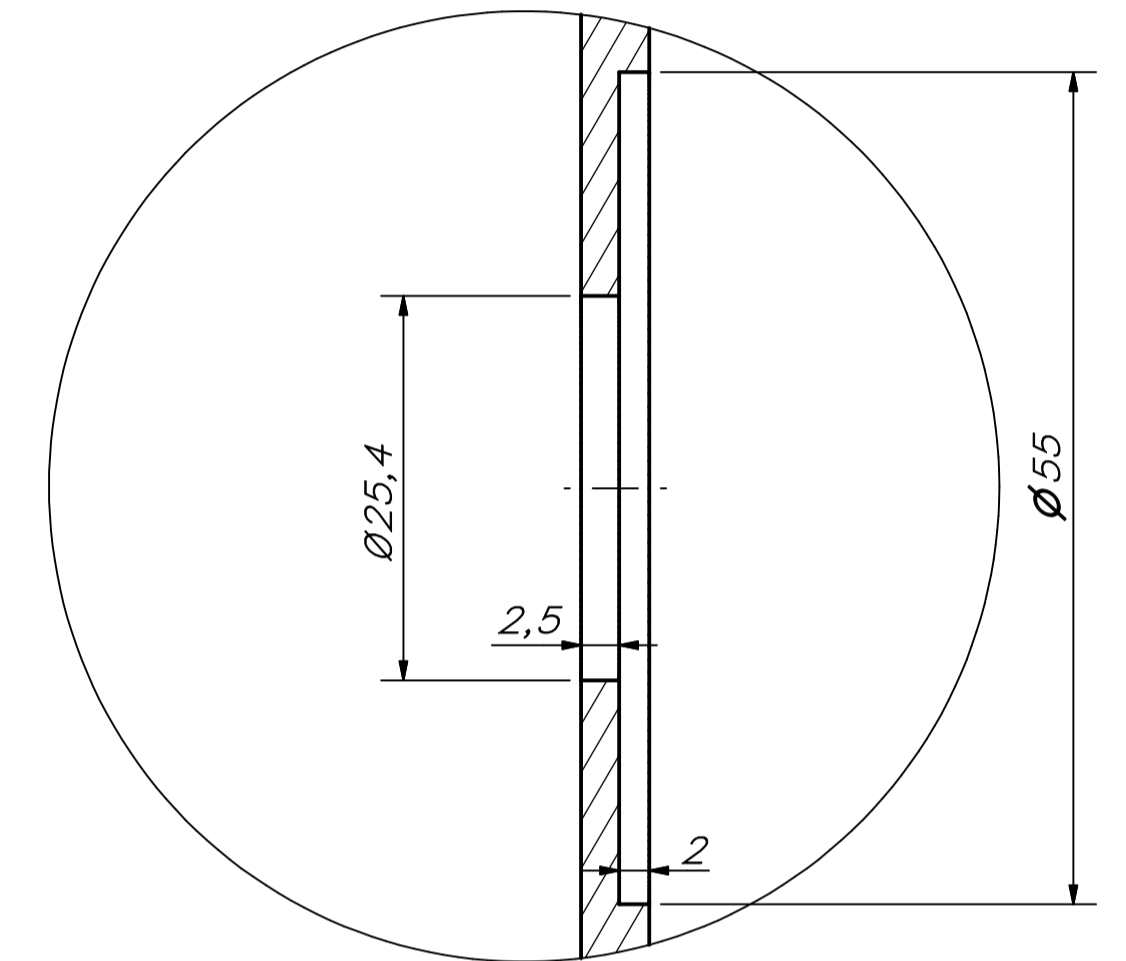


POSICIÓN: 6  
 CANTIDAD: 1  
 MATERIAL:  
 -PLANCHA DE ACERO  
 ASTM A36 3mm  
 -PLANCHA DE ACERO  
 ASTM A36 4,5mm  
 ESCALA: 1:1

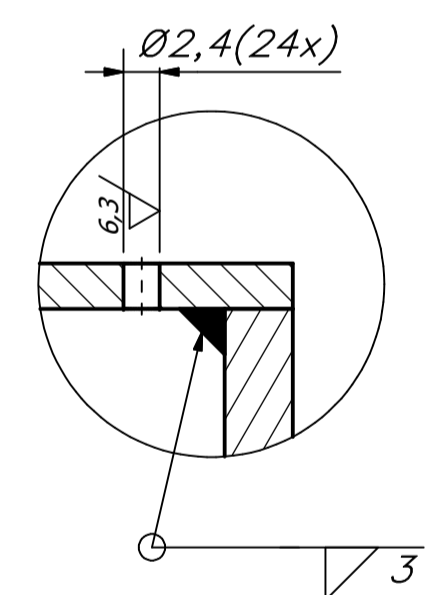
SECCIÓN H-H



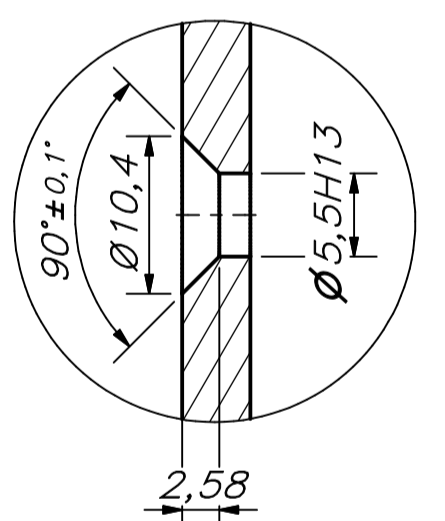
DETALLE J  
2 : 1



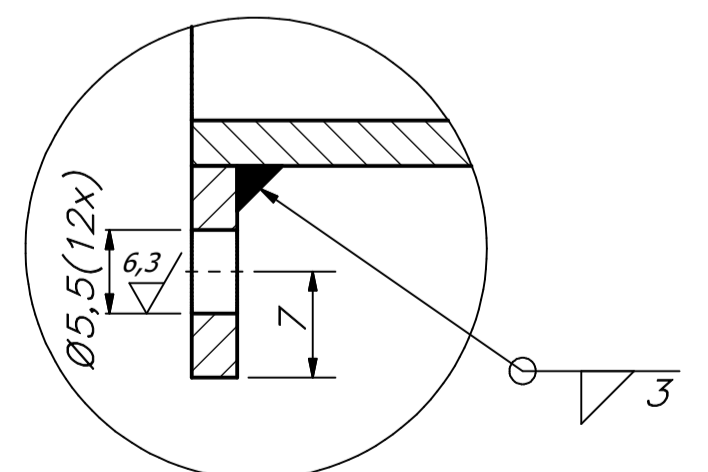
DETALLE H  
2 : 1



DETALLE I  
2 : 1

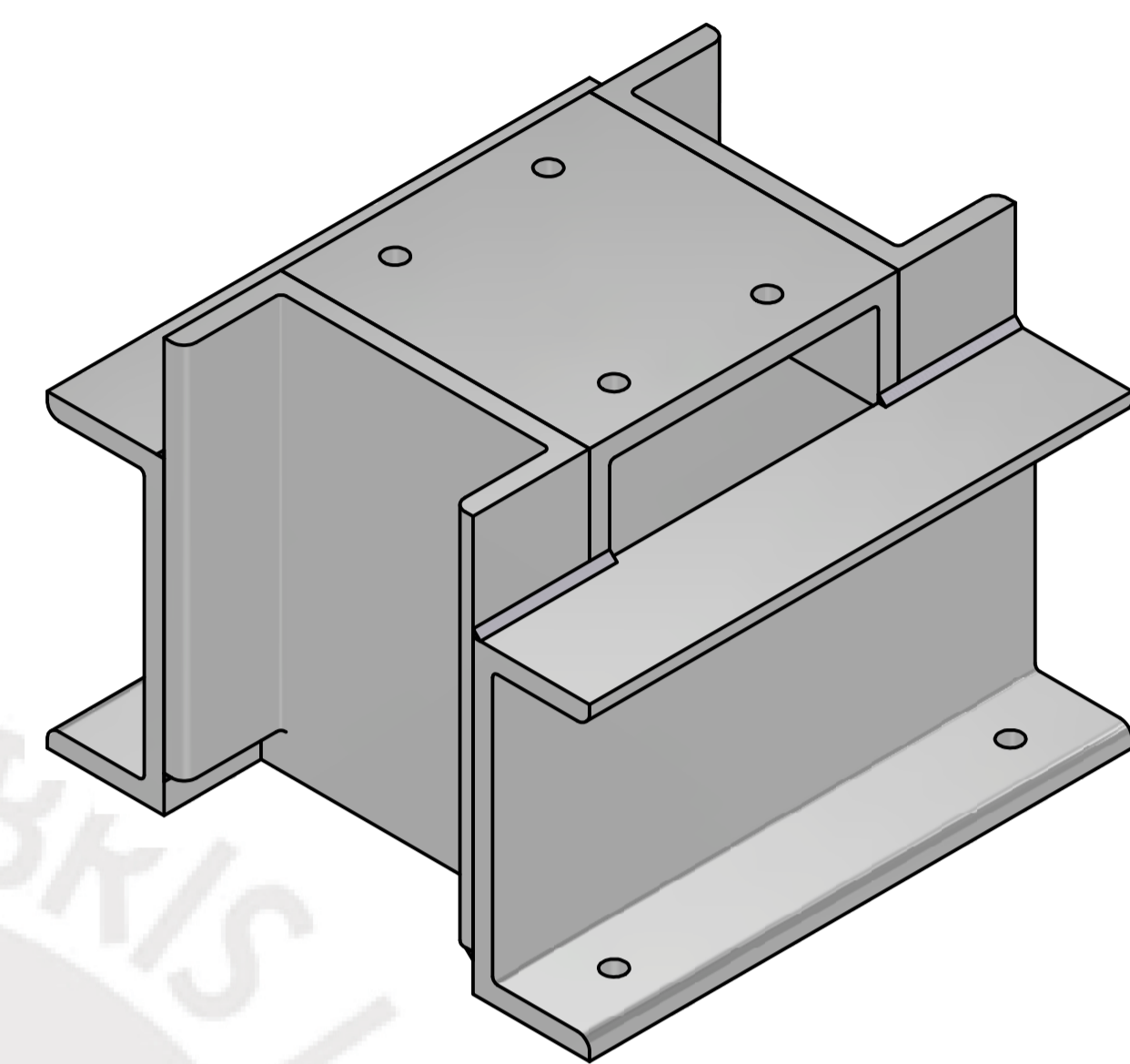
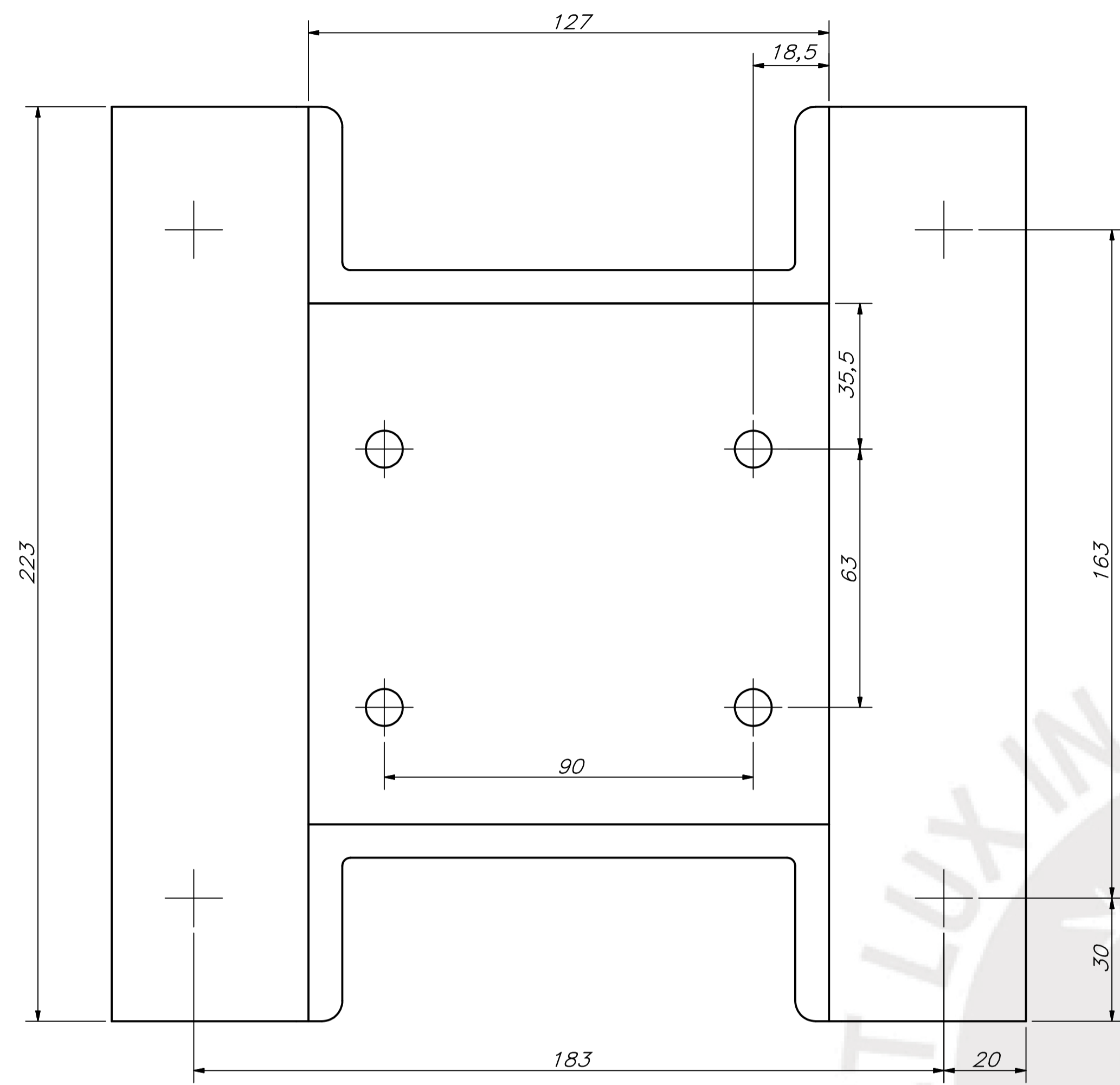


DETALLE K  
2 : 1

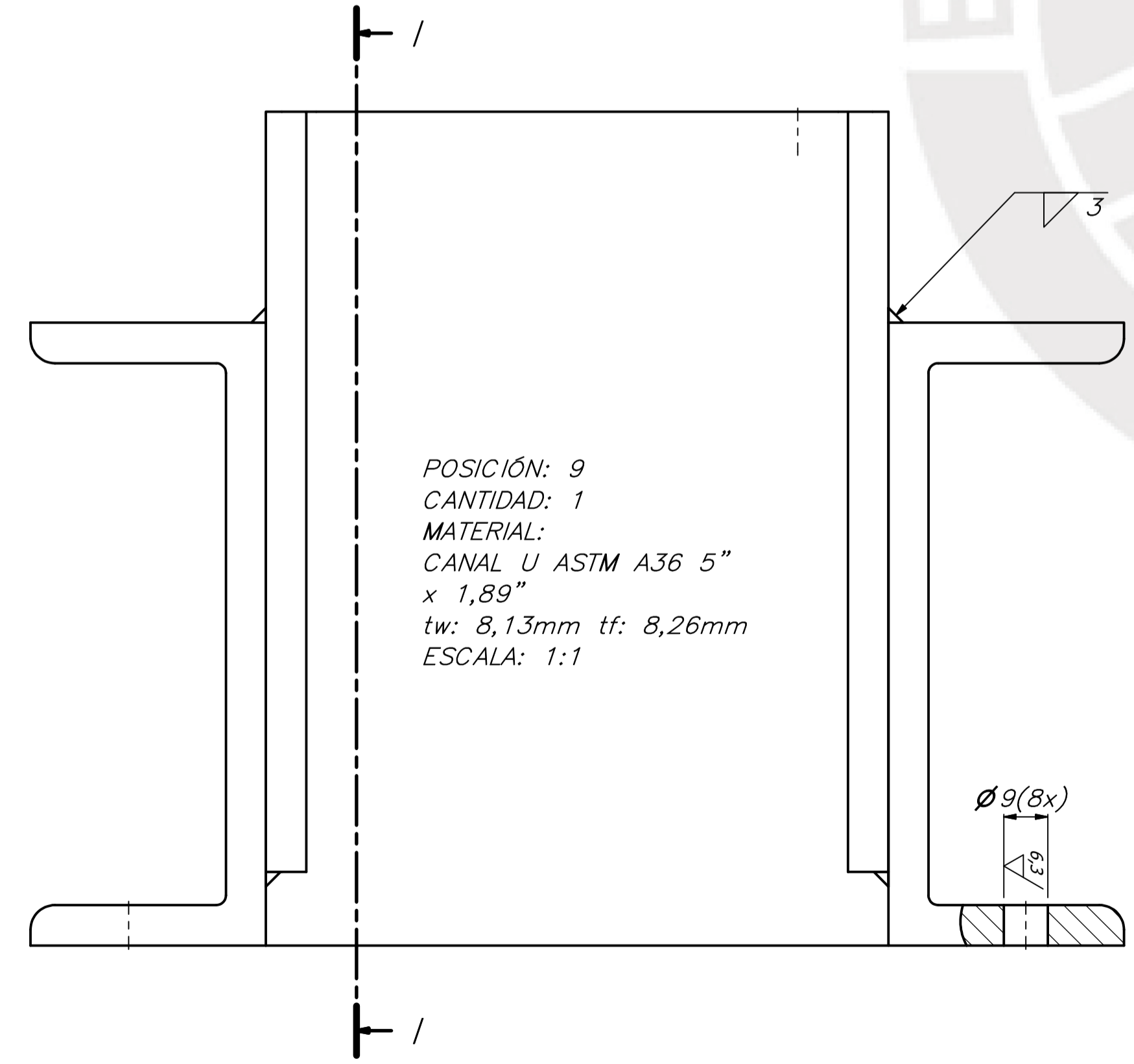


TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGUN DIN 7168					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

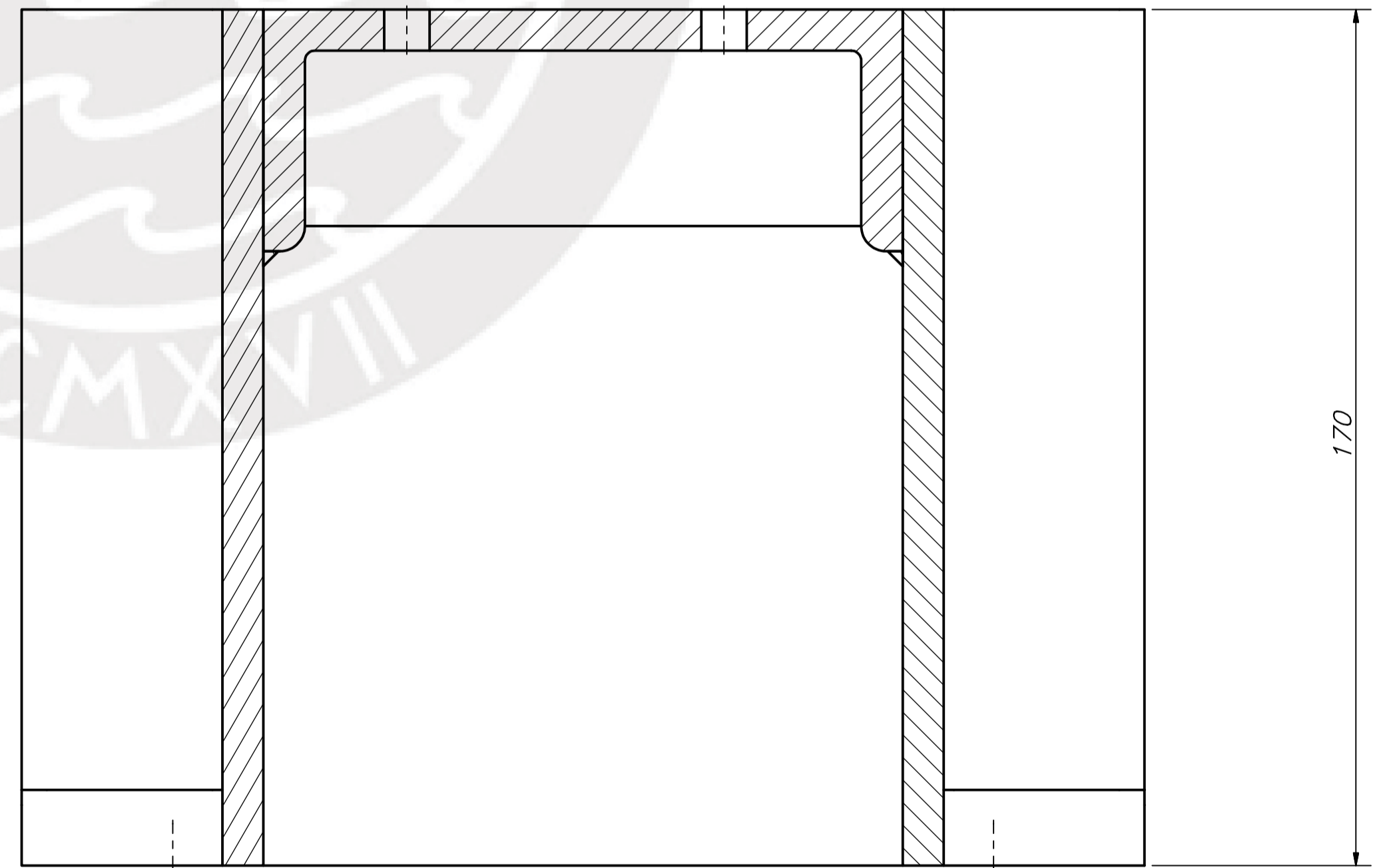
ACABADO SUPERFICIAL 6,3 / 3,2 / 0,8	TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL A36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN ELEMENTOS DESPIECE	ESCALA 1:1	
20120202	PÉREZ CASTILLO KEVIN GIANCARLO	FECHA: 2023.03.03
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: A1



SECCIÓN 1-1



POSICIÓN: 9  
 CANTIDAD: 1  
 MATERIAL:  
 CANAL U ASTM A36 5"  
 x 1,89"  
 tw: 8,13mm tf: 8,26mm  
 ESCALA: 1:1

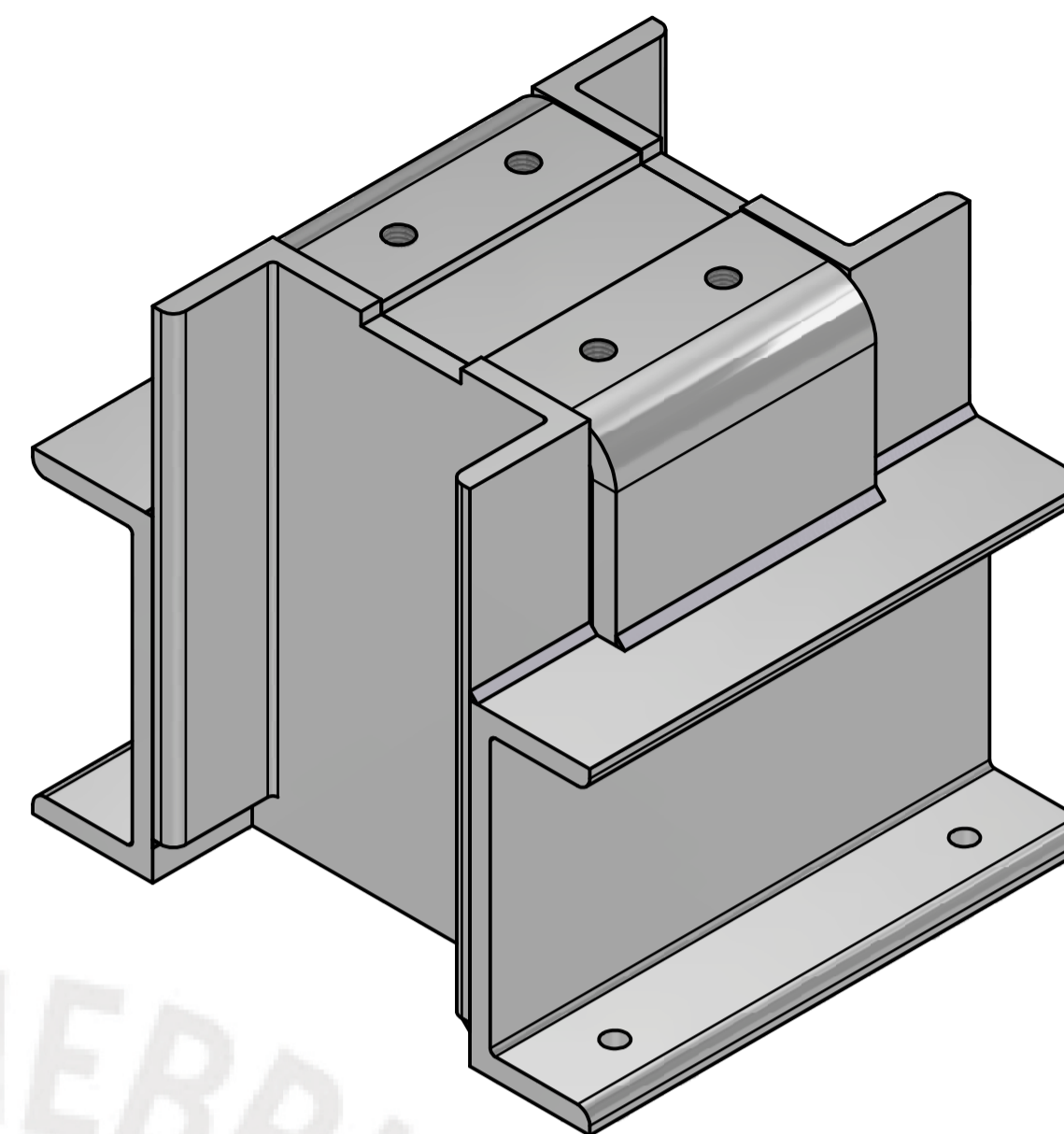
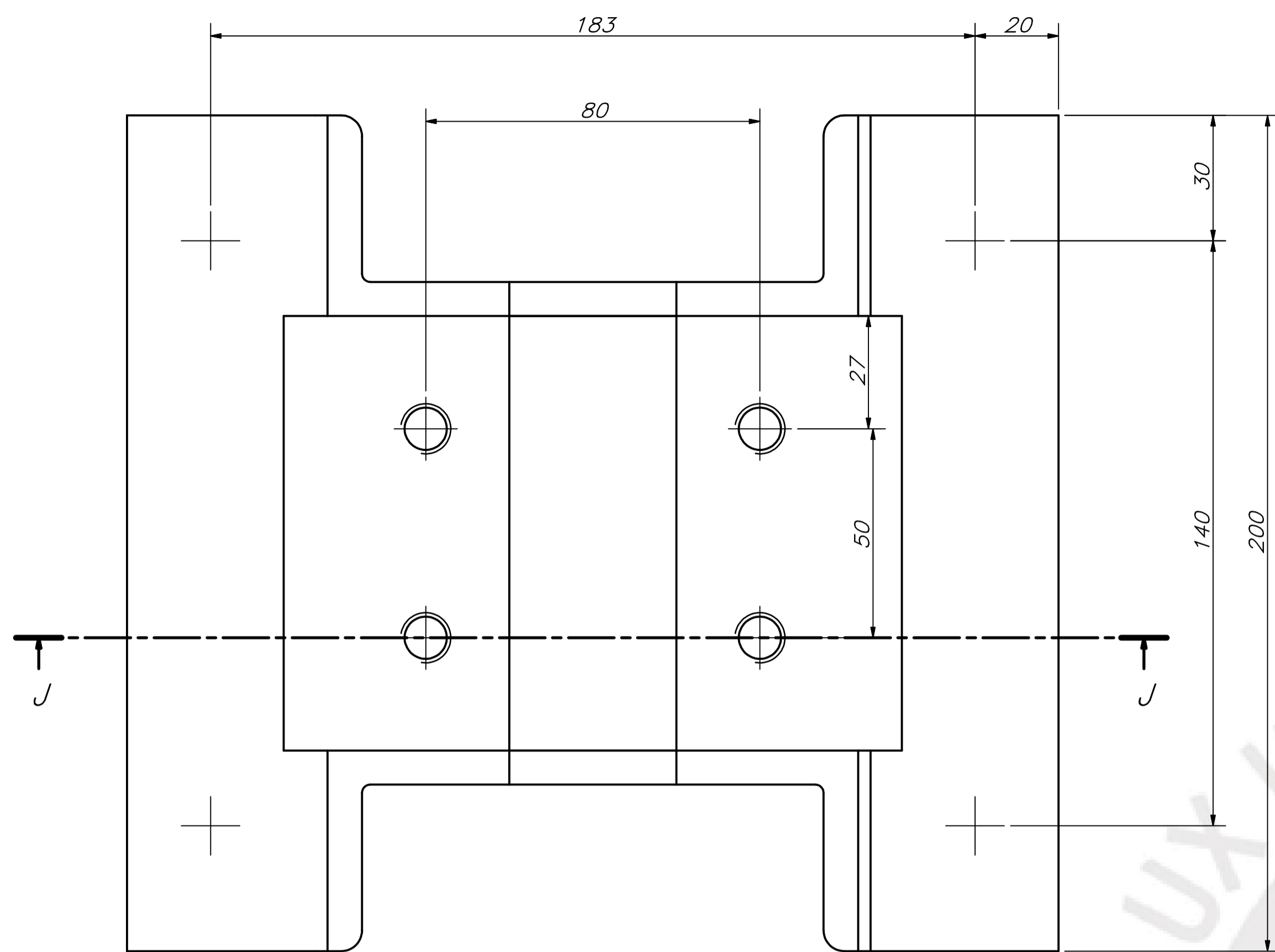


170

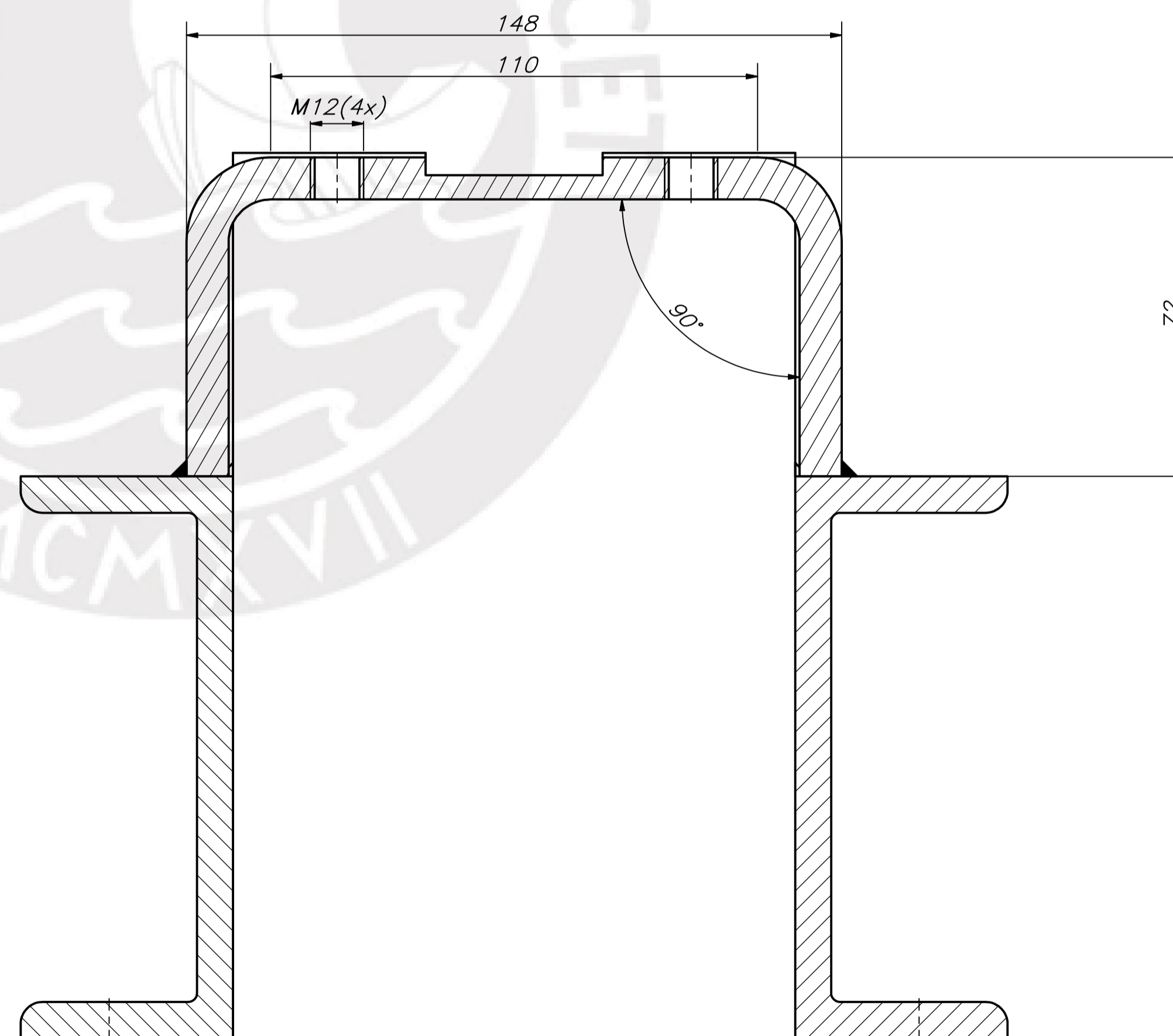
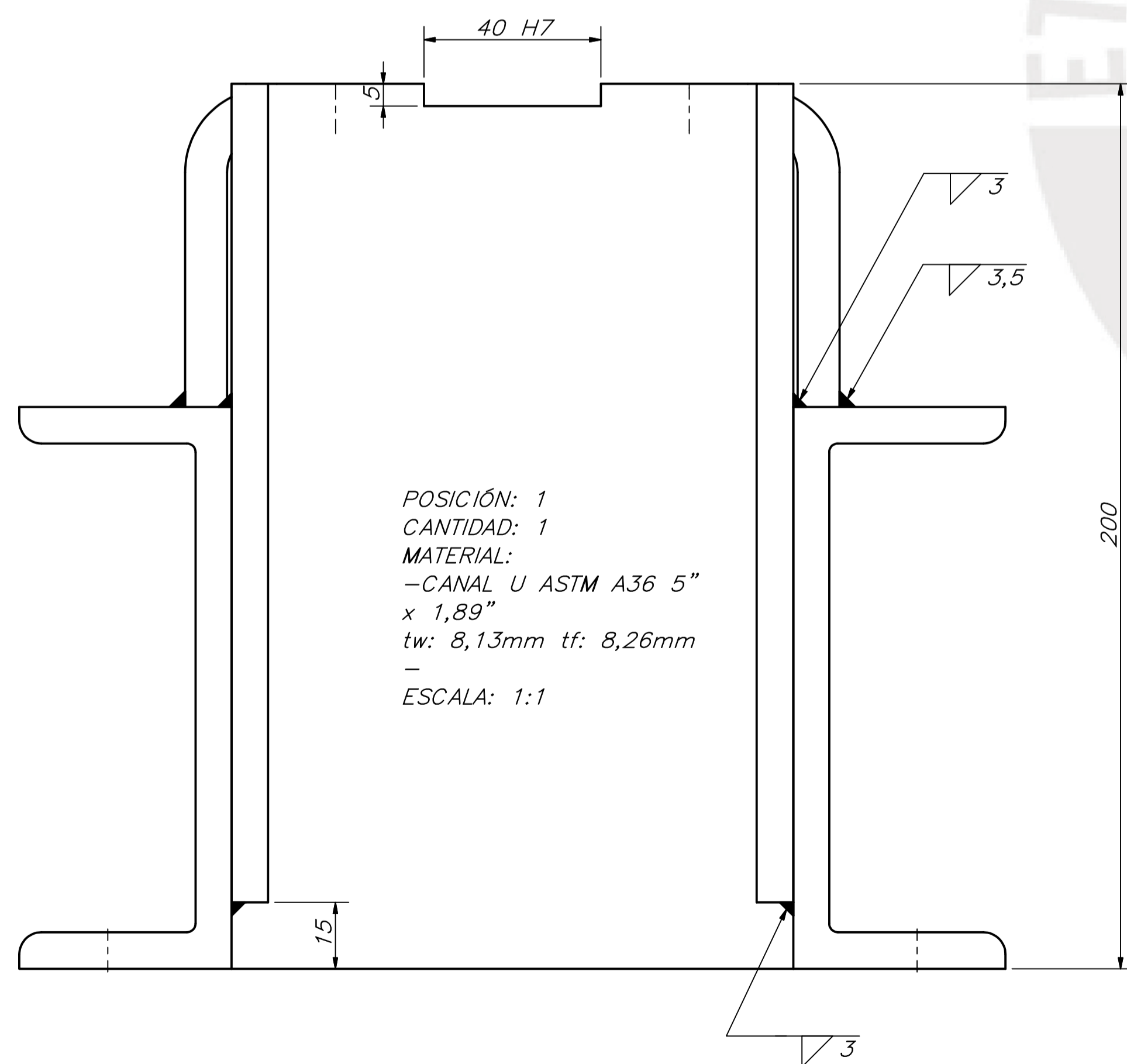
TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
 SEGUN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL 6,3 / 3,2 / 0,8	TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL A36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	ELEMENTOS DESPIECE	ESCALA 1:1
20120202	PÉREZ CASTILLO KEVIN GIANCARLO	FECHA: 2023.03.03
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: A1



SECCIÓN J-J



TOLERANCIAS DIMENSIONALES  
 SEGÚN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL 6,3 / 3,2 / 0,8	TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL A36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN [Symbol]	ELEMENTOS DESPIECE	ESCALA 1:1
20120202	PÉREZ CASTILLO KEVIN GIANCARLO	FECHA: 2023.03.03
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: A1

## **Anexo D**

# **ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS**



# Informe de análisis de tensión 2024



Archivo analizado:	MODULO EDUCATIVO MOLINO SAG-SIMULACIÓN.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2021 (Build 250183000, 183)
Fecha de creación:	2/08/2024, 23:51
Autor del estudio:	Kevin
Resumen:	

## ☐ Información de proyecto (iProperties)

### ☐ Resumen

Autor Kevin

### ☐ Proyecto

Nº de pieza	MODULO EDUCATIVO MOLINO SAG-SIMULACIÓN
Diseñador	Kevin
Coste	S/ 0.00
Fecha de creación	2/02/2023

### ☐ Estado

Estado del diseño Trabajo en curso

### ☐ Propiedades físicas

Masa	254.429 kg
Área	6993660 mm <sup>2</sup>
Volumen	79208100 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=17.8101 mm y=50.4212 mm z=-16.3876 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

## ☐ Análisis modal:1

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis modal
Fecha de la última modificación	3/05/2023, 22:50
Número de modos	10
Rango de frecuencia	Indefinido
Calcular modos precargados	No
Precisión mejorada	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.08
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr

Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

## ⊕ Material(es)

## ⊖ Condiciones de funcionamiento

## ⊖ Resultados

### ⊖ Valor(es) de frecuencia

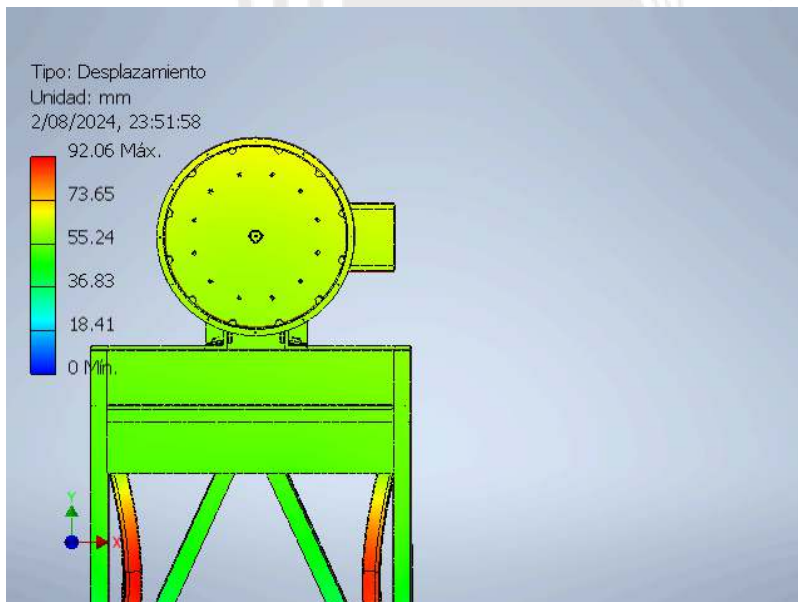
F1	29.93 Hz
F2	38.79 Hz
F3	68.92 Hz
F4	90.55 Hz
F5	97.74 Hz
F6	102.08 Hz
F7	119.86 Hz
F8	123.28 Hz
F9	132.38 Hz
F10	133.60 Hz

### ⊖ Resumen de resultados

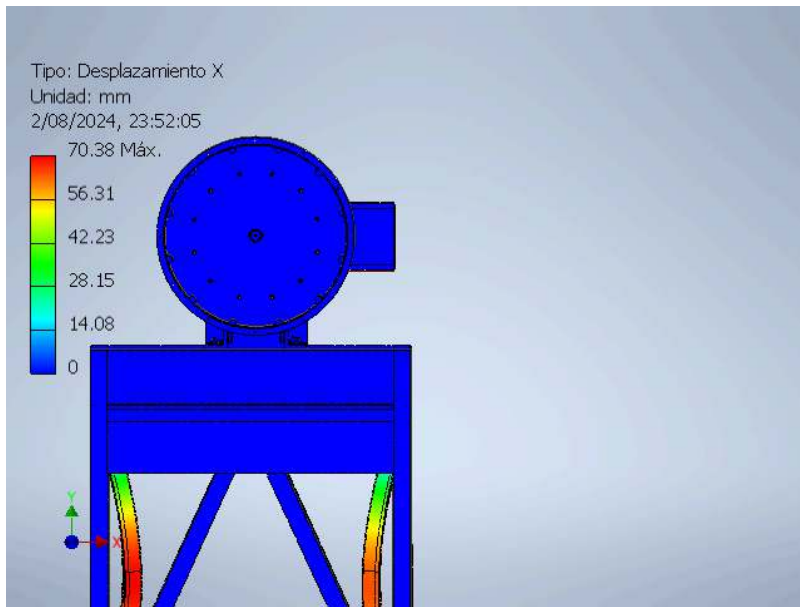
Nombre	Valor del resultado
Volumen	79208100 mm <sup>3</sup>
Masa	254.417 kg

## ⊖ Figuras

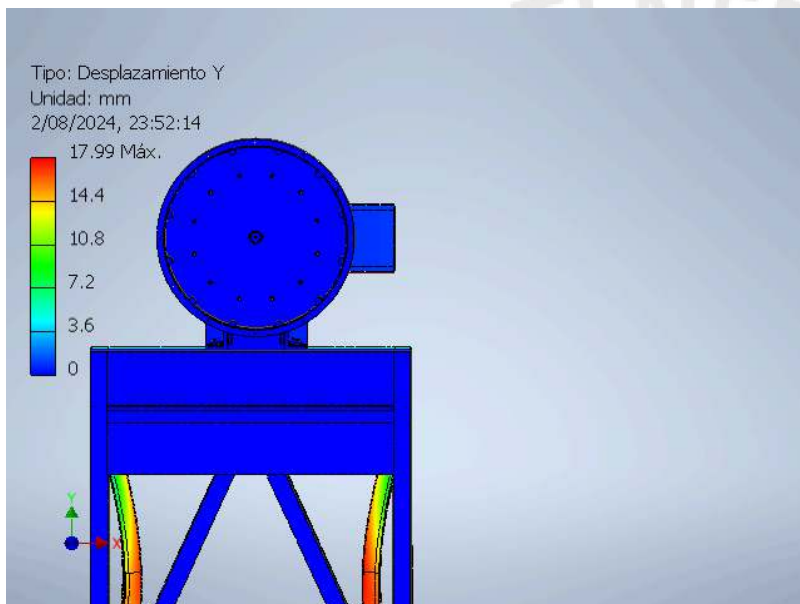
### ⊖ F1 29.93 Hz Desplazamiento



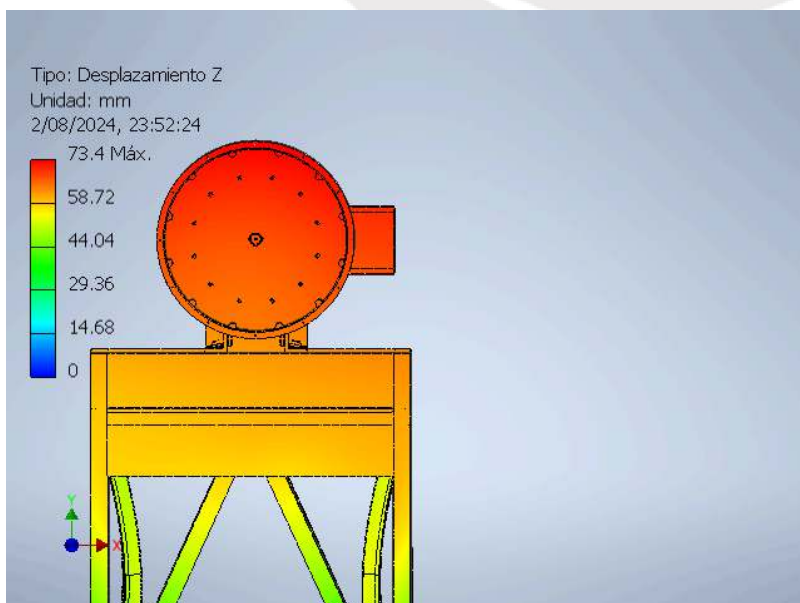
### ⊖ F1 29.93 Hz Desplazamiento X



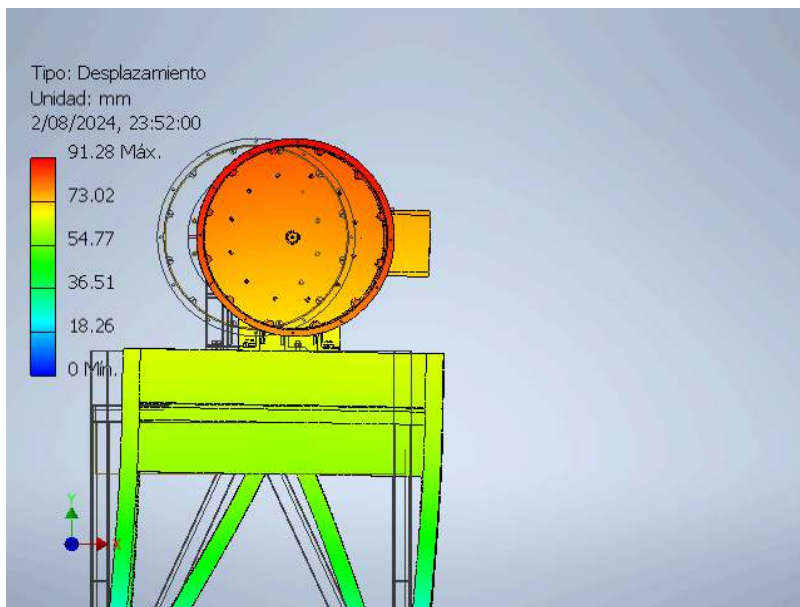
### F1 29.93 Hz Desplazamiento Y



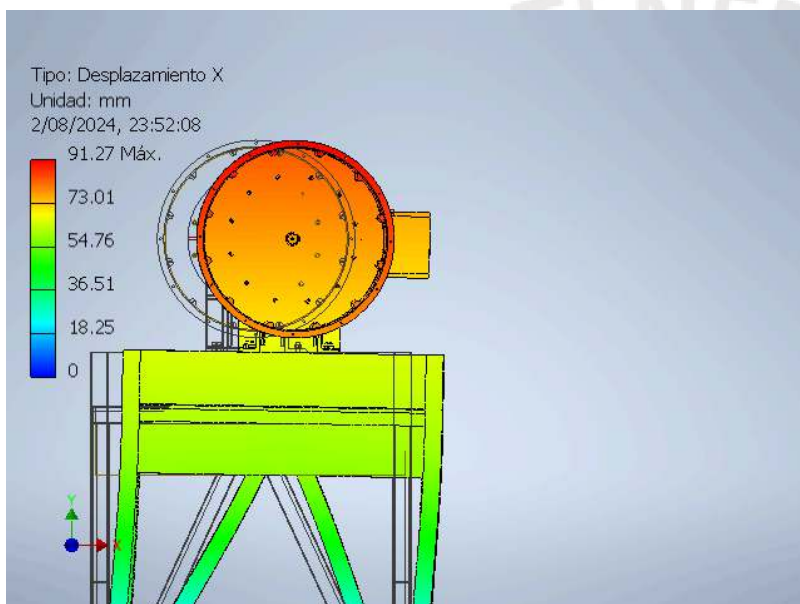
### F1 29.93 Hz Desplazamiento Z



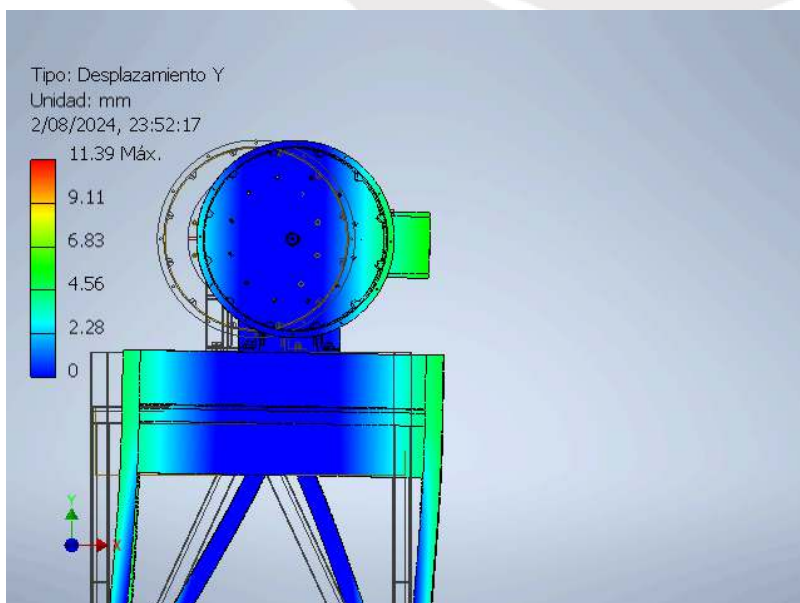
### F2 38.79 Hz Desplazamiento



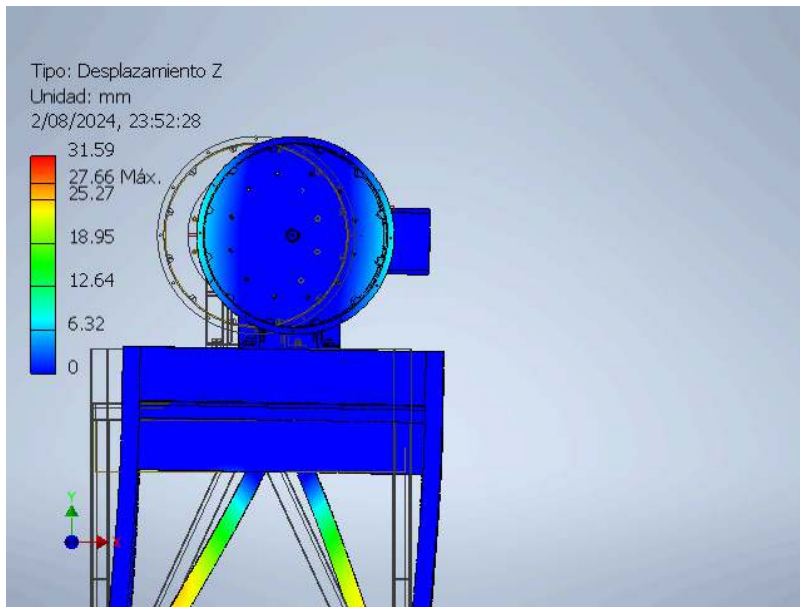
### ☐ F2 38.79 Hz Desplazamiento X



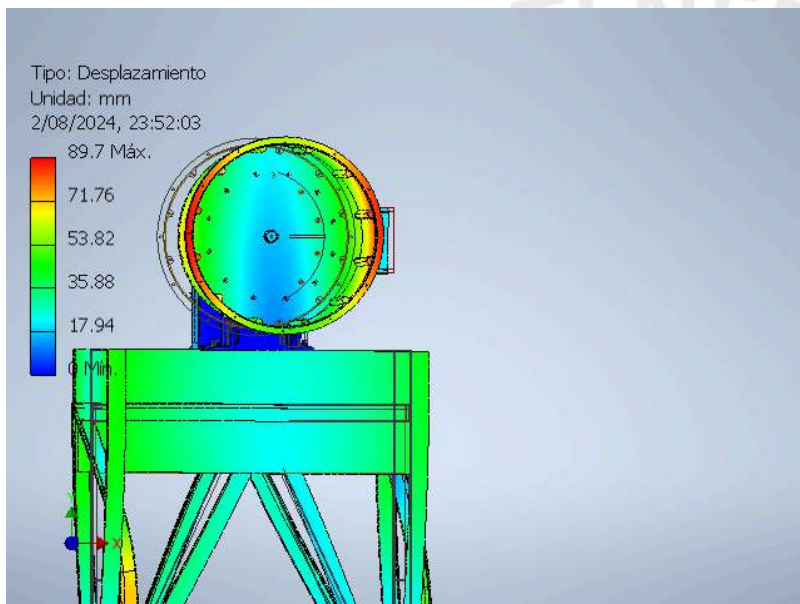
### ☐ F2 38.79 Hz Desplazamiento Y



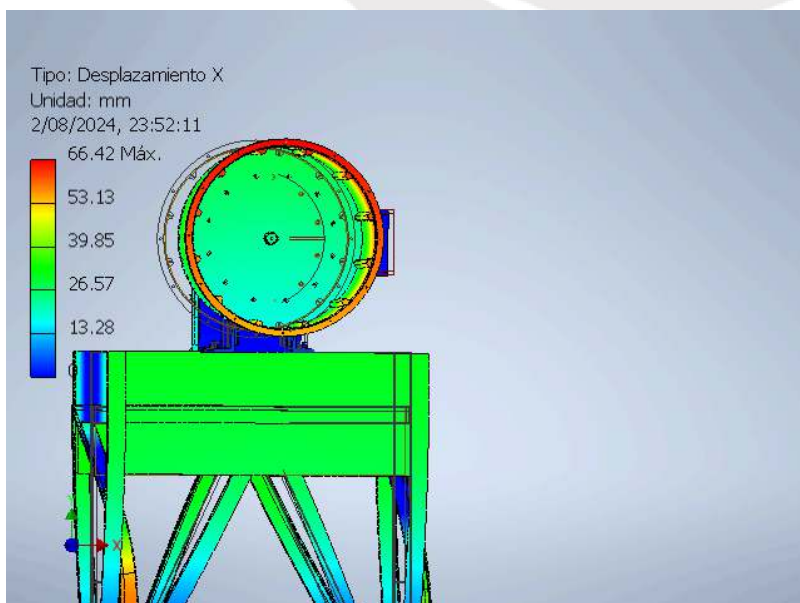
### ☐ F2 38.79 Hz Desplazamiento Z



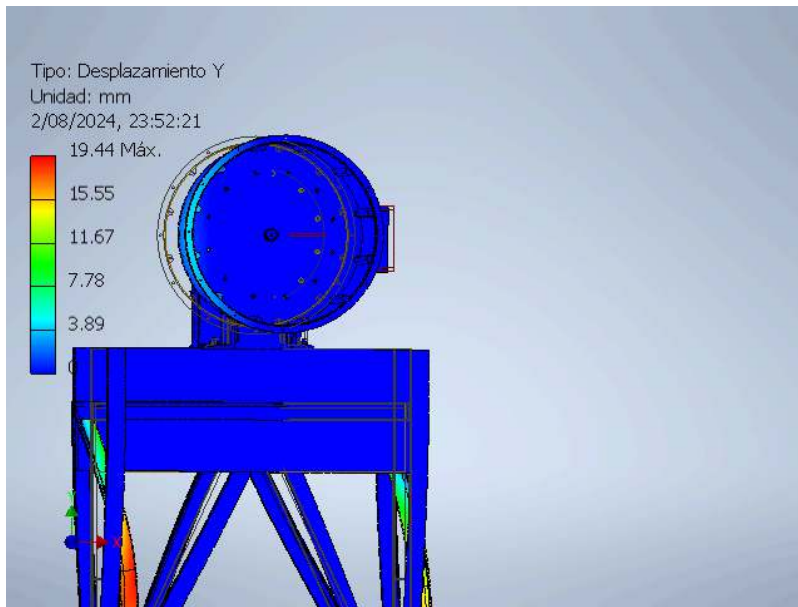
### F3 68.92 Hz Desplazamiento



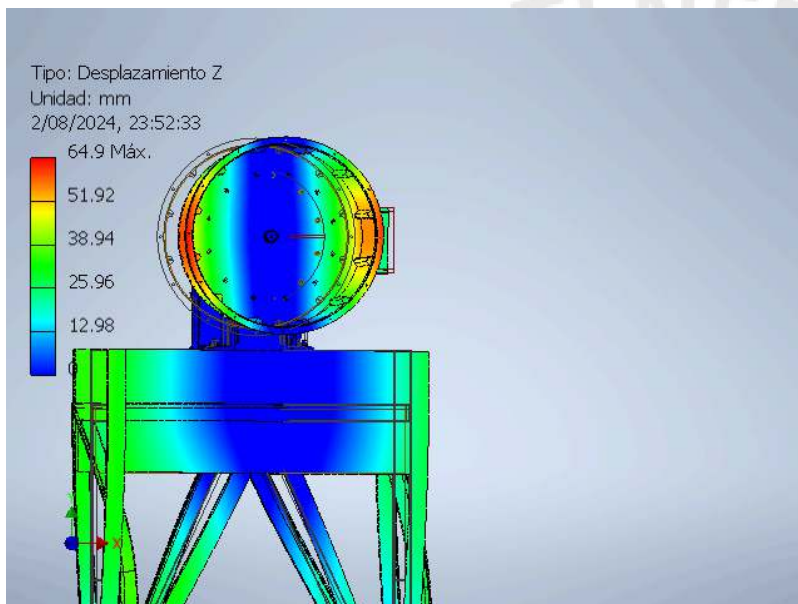
### F3 68.92 Hz Desplazamiento X



### F3 68.92 Hz Desplazamiento Y



### ☐ F3 68.92 Hz Desplazamiento Z



## ☐ Análisis estático:1

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	1/05/2023, 23:05
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

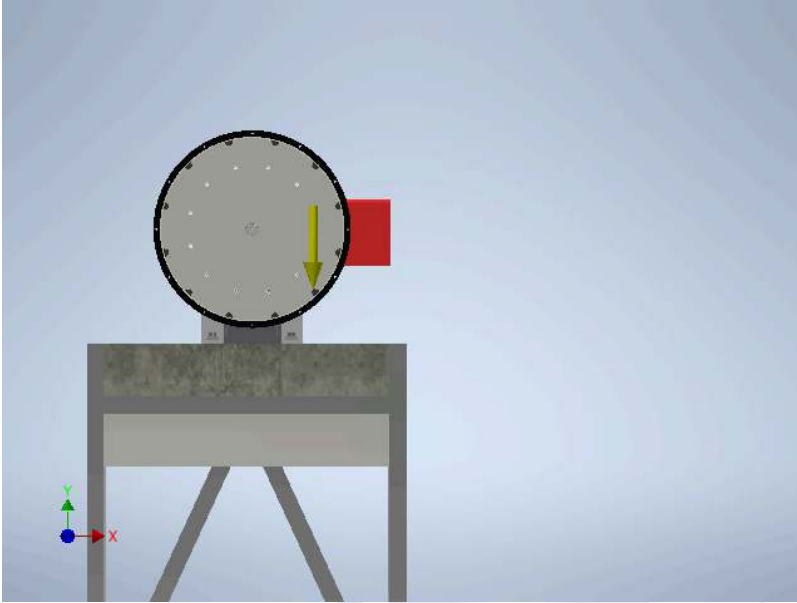
Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

## ☐ Condiciones de funcionamiento

### ☐ Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	0.000 mm/s <sup>2</sup>

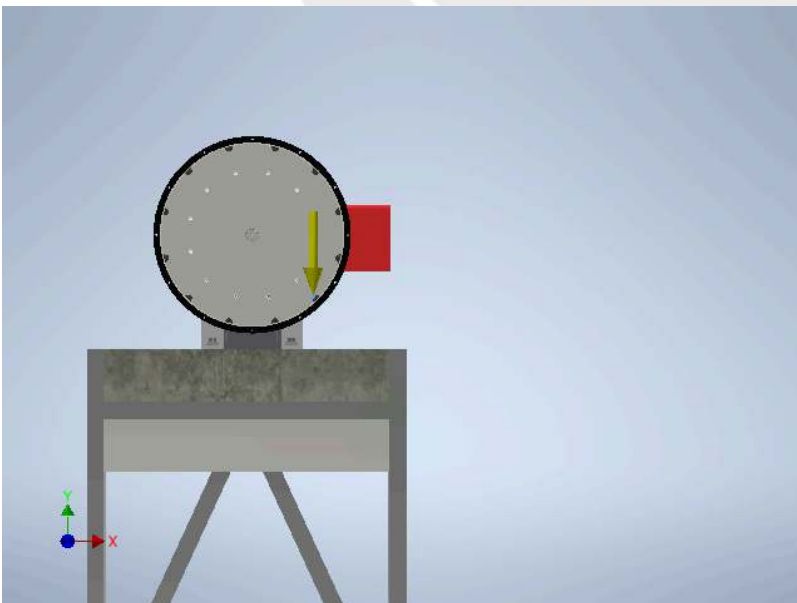
### ☐ Cara(s) seleccionada(s)



### ☐ Fuerza:1

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	490.500 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-490.500 N
Vector Z	-0.000 N

### ☐ Cara(s) seleccionada(s)



## ☐ Resultados

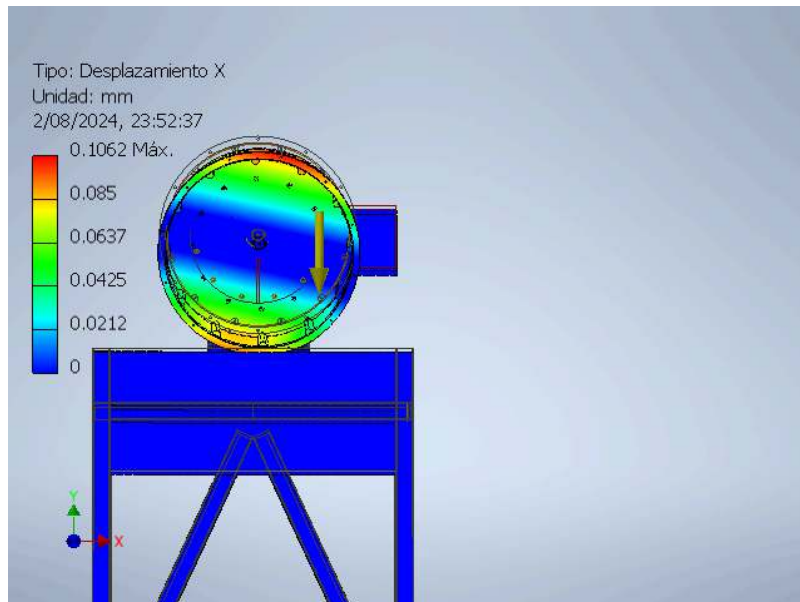
### ☐ Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
--------	--------	--------

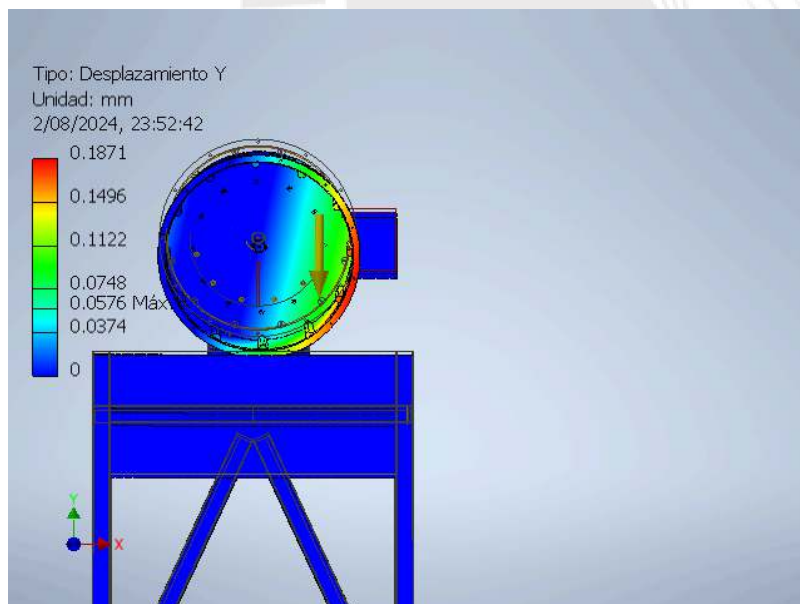
Volumen	79208100 mm <sup>3</sup>	
Masa	254.417 kg	
Desplazamiento X	-0.0962462 mm	0.106235 mm
Desplazamiento Y	-0.192365 mm	0.0575813 mm
Desplazamiento Z	-0.105164 mm	0.0876721 mm
Deformación equivalente	0.000000001526 su	0.00477583 su
Primera deformación principal	-0.00000773056 su	0.00377016 su

## Figuras

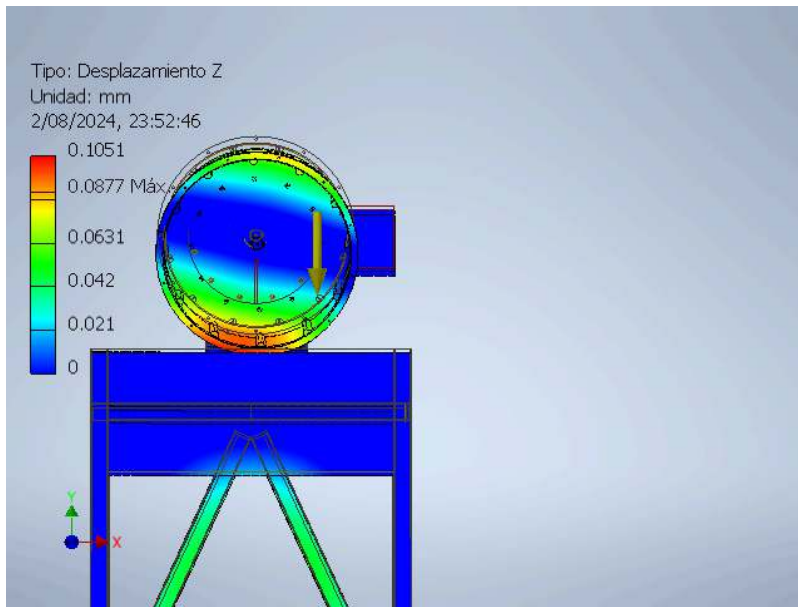
### Desplazamiento X



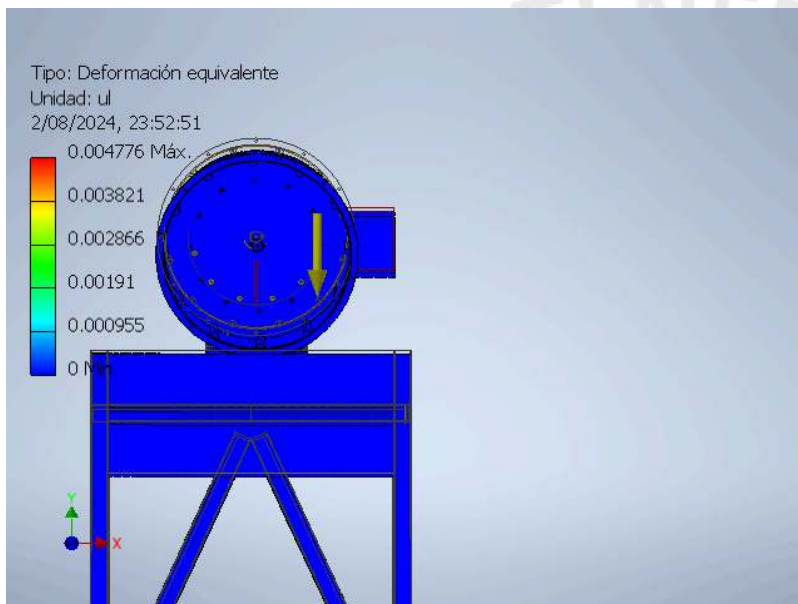
### Desplazamiento Y



### Desplazamiento Z



### ☐ Deformación equivalente



### ☐ Primera deformación principal



## ☐ Análisis estático:3

**Objetivo general y configuración:**

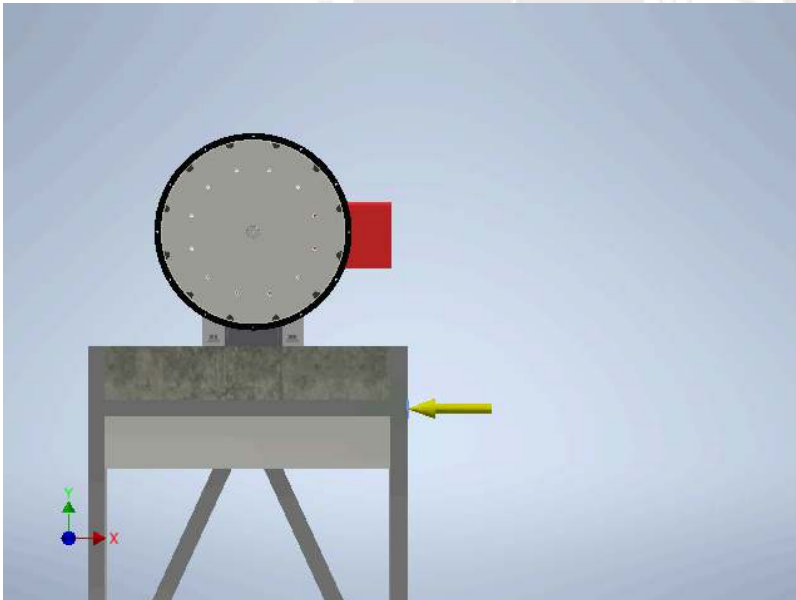
Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	5/05/2023, 15:38
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

**Configuración de malla:**

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

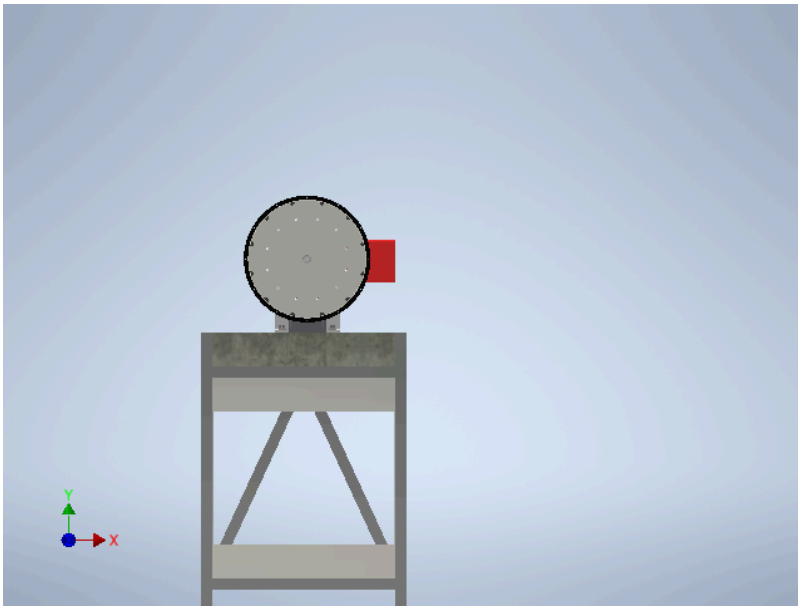
**Material(es)****Condiciones de funcionamiento****Fuerza:1**

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	1.000 N
Vector X	-1.000 N
Vector Y	0.000 N
Vector Z	-0.000 N

**Cara(s) seleccionada(s)****Restricción fija:1**

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

**Cara(s) seleccionada(s)**



☐ **Resultados**

☐ **Fuerza y pares de reacción en restricciones**

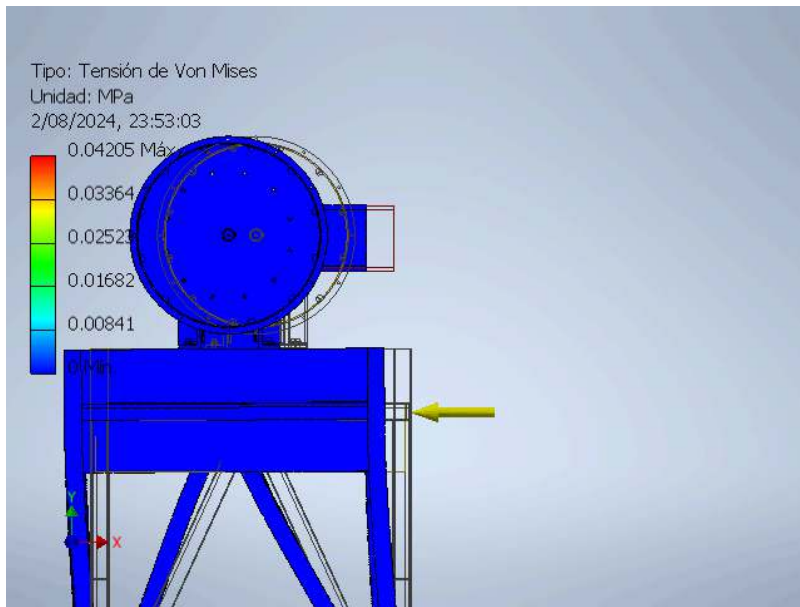
Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	1 N	1 N	0.855085 N m	0 N m
		0 N		0 N m
		0 N		-0.855085 N m

☐ **Resumen de resultados**

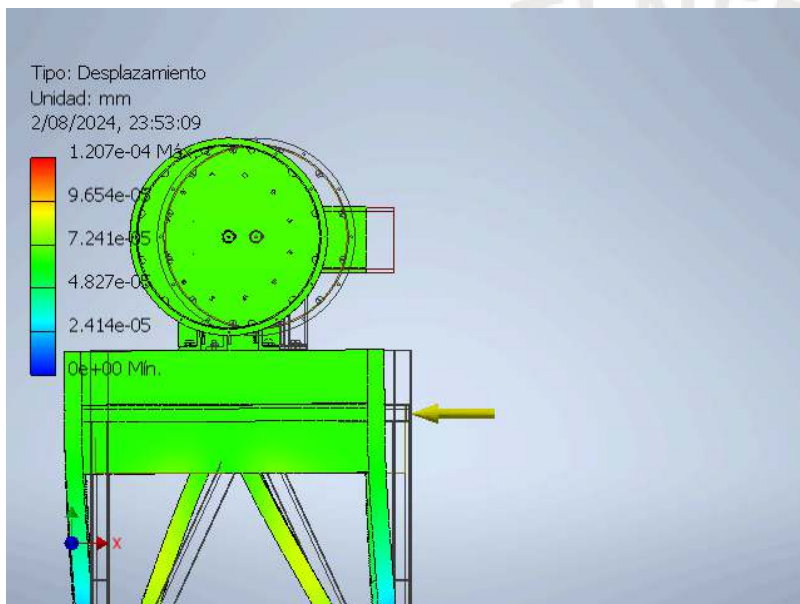
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	79208100 mm <sup>3</sup>	
Masa	254.417 kg	
Tensión de Von Mises	0.000000000728368 MPa	0.0420539 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.000120678 mm
Desplazamiento X	-0.000120676 mm	0.0000000172095 mm
Desplazamiento Y	-0.0000161182 mm	0.0000161703 mm
Desplazamiento Z	-0.0000781167 mm	0.0000795923 mm
Deformación equivalente	0.0000000000097835 su	0.000000182842 su
Primera deformación principal	-0.00000000109179 su	0.000000156132 su

☐ **Figuras**

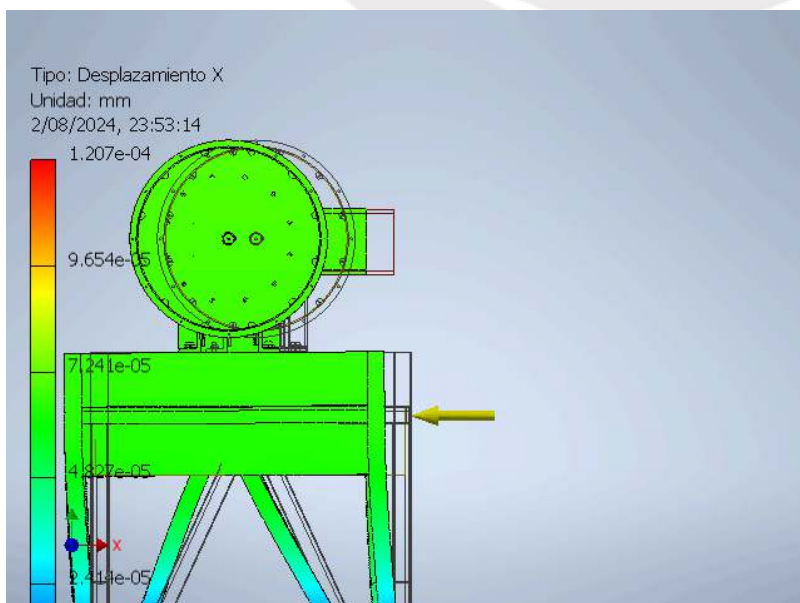
☐ **Tensión de Von Mises**



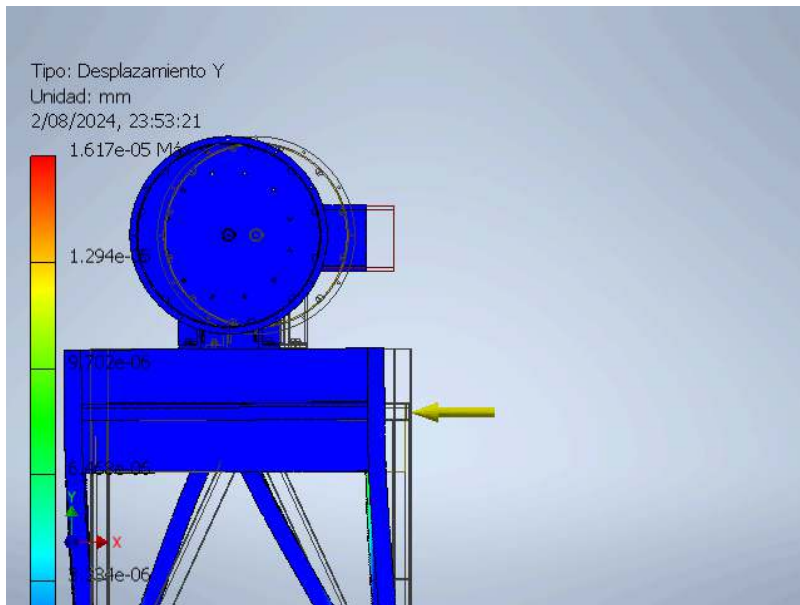
☐ **Desplazamiento**



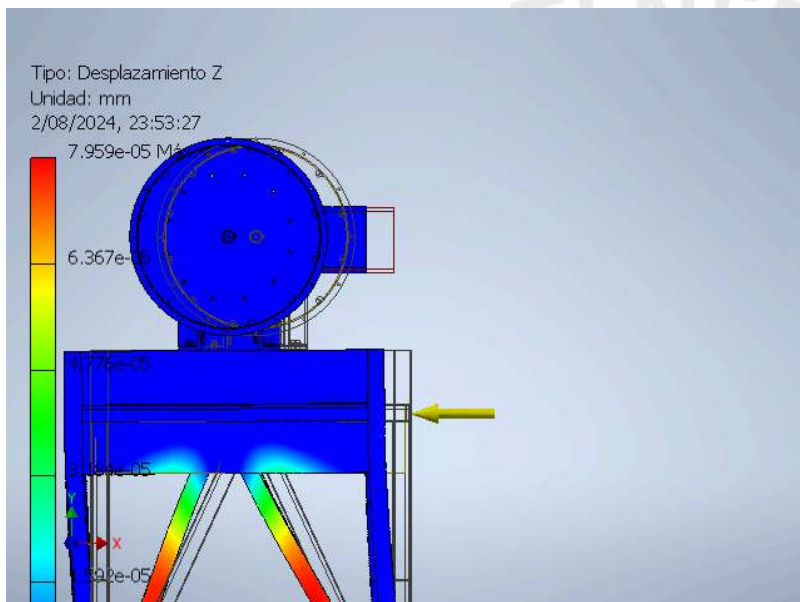
☐ **Desplazamiento X**



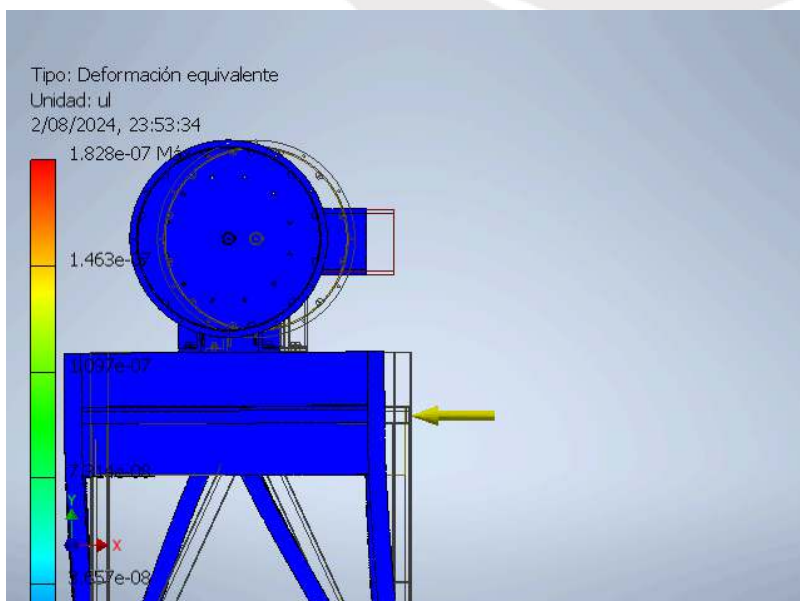
☐ **Desplazamiento Y**



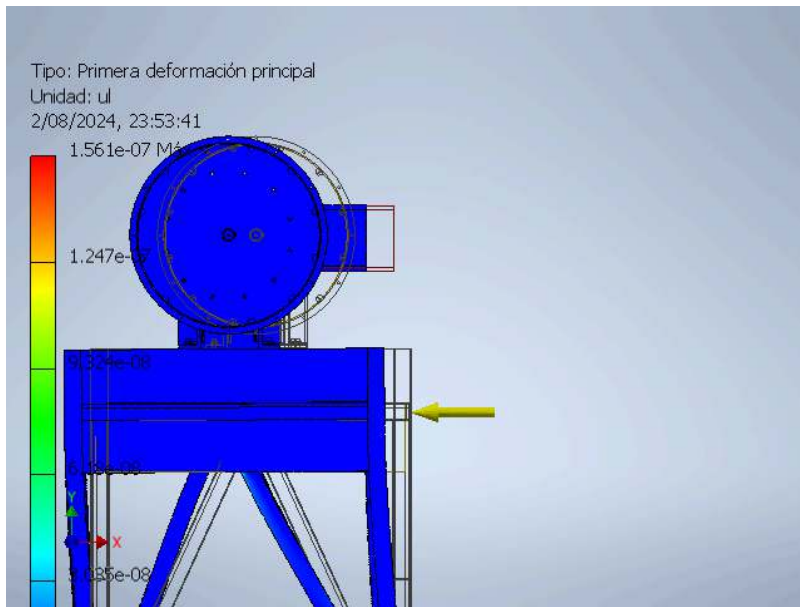
### Desplazamiento Z



### Deformación equivalente



### Primera deformación principal



D:\Kevin\New tesis\Modelo 3d new\MOLINO SAG TESIS\MODULO EDUCATIVO MOLINO SAG-SIMULACIÓN.iam

