



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**Modelación de un tambor aglomerador industrial mediante el método
de elementos discretos**

POR

Carlos Nicolás Henríquez Navarrete

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico.

Profesor Guía:
Dr. Cristian Rodríguez Godoy
Dr. Manuel Moncada Merino

Marzo 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Carlos Henríquez Navarrete

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Dedicatoria y Agradecimientos

Quisiera dedicar esta memoria y agradecer a Dios por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, por bendecirme con claridad, sabiduría y discernimiento para comprender este increíble mundo de la Ingeniería. Todo se lo debo a Él.

Quisiera agradecer a mis padres, Evelyn y Carlos, y a mis hermanas, Camila y Catalina, por su paciencia y apoyo incondicional durante mis años universitarios. Su esfuerzo, perseverancia y amor incondicional me permitieron llegar hasta el último año de mi carrera.

Quisiera expresar mi gratitud por el cariño y preocupación inquebrantable de mi abuelita Flerida y tío José (Pepe), quienes siempre estuvieron presentes a pesar de las dificultades.

Agradezco a mis amigos de la infancia, quienes, a pesar de que con el paso de los años nos vemos cada vez menos, siempre han demostrado preocupación y apoyo mutuo a través de conversaciones y risas.

También quiero agradecer a mis amigos de la iglesia, con quienes he compartido y quienes han sido un apoyo fundamental en los últimos años. Gracias por siempre mostrar su apoyo y preocupación.

Agradezco a mis amigos Cuartinos, mi segunda casa, donde compartimos en las emergencias, la guardia nocturna y fuera del cuartel. Los consejos de los honorarios, las oportunidades de aplicar mis conocimientos de ingeniería y el sentido del humor hasta altas horas de la noche, con una bebida helada, hicieron que el estrés y las preocupaciones fueran más llevaderos.

Agradezco al profesor Manuel Moncada, quien, por medio de su conocimiento, experiencia y consejos, me ayudo y guio durante la formulación de la memoria de título, y fuera de ella. Muchas gracias por su paciencia al recibirme en su oficina, por explicarme cuando tenía dudas y por guiarme en momentos de incertidumbre.

Agradezco al profesor Cristian Rodríguez, quien, a través de su pensamiento crítico y experiencia, me permitió adquirir nuevos conocimientos y analizar los problemas desde un punto de vista distinto. Muchas gracias por su paciencia y amabilidad al recibirme en su oficina, y por haberme dado la oportunidad de trabajar en este tema como memoria de título.

Agradezco a Patricio Toledo, quien inició junto a mí el estudio de tambores aglomeradores, siendo un compañero de apoyo que me permitió discutir ideas, con el propósito de aportar al desarrollo y avance de la ingeniería.

Finalmente, quisiera agradecer a mis amigos y compañeros de Universidad, con quienes reímos y compartimos durante estos últimos seis años. La simpatía, el sentido del humor y las conversaciones hasta altas horas de la madrugada por Discord hicieron que los pequeños momentos se convirtieran en recuerdos invaluable.

Resumen

En la industria minera, existen múltiples equipos que permiten llevar a cabo el proceso de aglomeración. El tambor aglomerador se destaca como uno de los equipos más utilizados para el proceso de granulación, especialmente en la preparación del material para la lixiviación por pilas, donde se busca reducir los finos y mejorar la permeabilidad. A pesar de su amplia aplicación, existen limitados estudios que propongan modelos numéricos para profundizar en la optimización y mejora de estos equipos.

Este informe presenta un estudio detallado del comportamiento de un tambor aglomerador mediante simulación numérica por el método de elementos discretos (DEM) utilizando el software Ansys Rocky DEM. El objetivo principal es analizar el proceso de aglomeración de material en un tambor de 4.6 m de diámetro y 16.3 m de largo, ubicado en la minera BHP Spence. Se utilizó el módulo *liquid bridge* para simular la adherencia entre partículas durante el proceso.

Se realiza una revisión bibliográfica que permite calibrar los parámetros del material (mineral de cobre) y evaluación del modelo numérico con ensayos experimentales obtenidos de la literatura. Se establece una metodología para simplificar los tiempos de simulación DEM, debido al costo computacional y tiempo de resolución. El modelo numérico tiene por objetivo analizar el comportamiento del material de forma transversal y axial. Los resultados obtenidos son: Demanda de potencia y torque, distribución de humedad, análisis de fuerzas, distribución de humedad y tiempo de residencia del material.

Se realizan 9 simulaciones, donde se analiza la sección transversal del tambor, donde se varía la velocidad de rotación y grado de llenado. De los resultados obtenidos se puede destacar que la potencia RMS en régimen estacionario no es lineal, cuando se varían los parámetros antes mencionados. Las fuerzas en el eje y son un 135% mayores a las fuerzas en eje x . El aumento de la velocidad de rotación para un grado de llenado constante del tambor no implica una mejor distribución de humedad del material.

Por otra parte, se realiza una simulación en la cual se analiza el tiempo de residencia del material, en donde se obtiene un error del 3.97% con respecto al valor experimental, obtenido de la literatura e información recopilada.

Finalmente, se diseña, dimensiona y genera un presupuesto de un banco de ensayos de laboratorio con el propósito de estudiar en mayor profundidad la aglomeración en este tipo de equipos. Este banco de ensayos tiene por objetivo obtener datos experimentales (torque, potencia, granulometría, entre otros) para estudiar y analizar la aglomeración, validar un modelo numérico por el método de elementos discretos (reduciendo los costos computacionales) y poder tomar decisiones importantes en la industria.

Palabras clave: Simulación DEM, Tambor aglomerador, aglomeración.

Abstract

In the mineral processing industry, there are multiple equipment types that allow the agglomeration process to be carried out. The agglomerator drum stands out as one of the most commonly used pieces of equipment for the granulation process, especially in preparing material for heap leaching, where the goal is to reduce fines and improve permeability. Despite its wide application, there are limited studies proposing numerical models to further optimize and improve these equipment.

This report presents a detailed study of the behavior of an agglomerator drum through numerical simulation using the Discrete Element Method (DEM) with Ansys Rocky DEM software. The main objective is to analyze the agglomeration process of material in a drum 4.6m in diameter and 16.3m in length, located at the BHP Spence mine. The liquid bridge module was used to simulate the adhesion between particles during the process.

A bibliographic review is carried out to calibrate the material parameters (copper ore) and evaluate the numerical model with experimental tests obtained from the literature. A methodology is established to simplify DEM simulation times due to computational costs and resolution time. The numerical model aims to analyze the material's behavior both transversely and axially. The results obtained include: power and torque demand, moisture distribution, force analysis, moisture distribution, and material residence time.

Nine simulations are conducted, analyzing the drum's cross-sectional area where rotation speed and filling degree are varied. From the results obtained, it can be highlighted that the RMS power in steady-state is not linear when the previously mentioned parameters are varied. The forces in the y -axis are 135% higher than the forces in the x -axis. Increasing the rotation speed for a constant drum filling degree does not result in better moisture distribution of the material.

Additionally, a simulation is performed to analyze the material's residence time, where a 3.97% error compared to the experimental value is obtained, obtained from the bibliography and the information collected.

Finally, a design, dimensioning, and budget for a laboratory test bench are generated with the purpose of studying agglomeration in these types of equipment in greater depth. This test bench aims to obtain experimental data (torque, power, particle size distribution, among others) to study and analyze agglomeration, validate a numerical model using the discrete element method (reducing computational costs), and support important decision-making in the industry.

Keywords: DEM simulation, Agglomerator drum, Agglomeration.

Tabla de Contenidos

Dedicatoria y Agradecimientos	3
Resumen	4
Abstract	5
Tabla de Contenidos.....	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tablas.....	vii
Nomenclatura	ix
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Contexto.....	1
1.3 Planteamiento de la problemática e investigaciones recientes.	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivos generales	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
1.5 Hipótesis	4
1.6 Metodología.....	4
1.7 Planificación de la investigación	6
Capítulo 2: Marco teórico.....	7
2.1 Proceso de extracción de cobre.....	7
2.1.1 Proceso de lixiviación	8
2.2 Proceso de aglomeración	8
2.2.1 Métodos de aglomeración.	9
2.2.2 Etapas de aglomeración.....	10
2.3 Tambor aglomerador en la minería.....	11
2.3.1 Etapas de la aglomeración en tambor aglomerador.....	12
2.4 Factores que afectan la aglomeración.....	13
2.4.1 Grado de llenado y velocidad de rotación.....	13
2.4.2 Humedad	14
2.4.3 Densidad aparente	14
2.4.4 Potencia y torque.....	15
2.4.5 Régimen de partículas.	17

Capítulo 3: Estado del arte.....	19
Capítulo 4: Método de elementos discretos (DEM).....	24
4.1 Método de elementos discretos.....	24
4.2 Modelos de contacto.....	25
4.2.1 Modelo de contacto normal.....	25
4.2.2 Modelo de contacto tangencial: Midlin-Deresiewicz.....	26
4.2.3 Resistencia a la rodadura.....	27
4.2.4 Fuerzas adhesivas.....	28
4.2.5 Análisis de sensibilidad de las fuerzas adhesivas por puente líquido.	32
4.2.6 Paso de tiempo	34
Capítulo 5: Metodología para implementación de un modelo numérico por el método de elementos discretos.....	35
5.1 Caso en estudio: Tambor aglomerador.....	35
5.2 Simplificación del equipo.....	36
5.3 Granulometría del material.....	37
5.4 Análisis de sensibilidad	38
Capítulo 6: Desarrollo del modelo numérico.....	39
6.1 Geometría.....	39
6.2 Software y hardware.....	40
6.3 Condiciones de simulación.....	40
6.4 Partículas	40
6.5 Propiedades de los materiales.....	41
6.5.1 Propiedades de las partículas y parades.	41
6.5.2 Propiedades del fluido.....	42
6.6 Interacción entre los materiales	42
6.6.1 Grado de llenado y humedad.....	43
6.6.2 Zona de ingreso de partículas e inyección de líquido	44
Capítulo 7: Resultados del modelo numérico DEM.....	45
7.1 Precisión del Modelo numérico.....	45
7.2 Resultados obtenidos	46
7.3 Análisis de perfil de velocidades	58
7.4 Análisis de potencia.....	59
7.5 Análisis de espectro en frecuencia.....	61

7.6	Análisis de ángulo de reposo	62
7.7	Análisis de distribución de humedad.....	63
7.8	Análisis de fuerzas radiales	64
7.9	Tiempo de residencia del material.....	68
Capítulo 8: Diseño de un banco de ensayos de tambor aglomerador de laboratorio.		70
8.1	Antecedentes de diseño y requerimientos.....	70
8.2	Diseño preliminar	71
8.3	Cálculo de torque y potencia.	72
8.3.1	Dimensionamiento y selección de motorreductor.	73
8.4	Análisis estático del tambor aglomerador.....	74
8.5	Dimensionamiento de relación del sistema de transmisión.....	76
8.6	Cálculo de sistema de transmisión de potencia motorreductor a eje motriz.....	77
8.7	Dimensionamiento de ruedas de fricción	79
8.8	Dimensionamiento y selección de eje.....	81
8.8.1	Análisis por fuerzas de corte	83
8.8.2	Análisis por momento flector.....	84
8.9	Dimensiones del eje.....	85
8.10	Dimensionamiento de chavetas.....	88
8.11	Dimensionamiento de rodamientos.....	89
8.12	Análisis estructural.....	93
8.13	Presupuesto y descripción de materiales.....	94
Conclusiones y perspectivas		95
	Perspectivas	96
Referencias.....		97
Anexo		102
11.1	Resumen de resultados obtenidos a partir de las simulaciones.....	102

Lista de Figuras

Figura 1.1: Carta Gantt del desarrollo del proyecto de investigación.	6
Figura 2.1: Diagrama de flujo del proceso de extracción de cobre para minerales oxidados.	7
Figura 2.2: Etapas de la aglomeración.	11
Figura 2.3: Partes esenciales de un tambor aglomerador.	12
Figura 2.4: Gráfico que relaciona el número de Froude con el grado de llenado (profundidad del lecho y radio del tambor rotatorio).	14
Figura 2.5: Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre el elemento diferencial del lecho de material.	16
Figura 2.6: Movimiento del material en los distintos regímenes.	17
Figura 2.7: Identificación de capa activa y pasiva de un flujo de partículas en un tambor.	18
Figura 3.1: Primeros modelos numéricos por la metodología DEM de aglomeración de partículas.	19
Figura 3.2: Patrones de flujo de partículas a diferentes velocidades de rotación que muestran diferentes regímenes de flujo.	20
Figura 3.3: Simulación crecimiento de un gránulo.	21
Figura 3.4: Simulaciones DEM que muestran el efecto de la forma de las partículas y la cohesión entre ellas.	21
Figura 3.5: Distribuciones espaciales de la velocidad de las partículas en diferentes etapas de la aglomeración.	22
Figura 3.6: Tamizado virtual simulación DEM de mineral de hierro.	22
Figura 3.7: Captura de modelo numérico para analizar la granulación húmeda de polvo de carbonato de calcio en un tambor giratorio utilizando el acoplamiento DEM-PBM.	23
Figura 4.1: Modelo masa, resorte y amortiguador. (a) Interacción partícula - partícula. (b) Interacción partícula y pared [10].	24
Figura 4.2: Figura (a), puente líquido formado por dos partículas. Figura (b), puente líquido formado por partícula y pared.	29
Figura 4.3. Análisis de sensibilidad del modelo de puente líquido.	33
Figura 4.4. Gráfico entre la relación entre distancia de separación de las partículas y fuerza capilar.	33
Figura 5.1: Imagen a la izquierda, minera BHP Spence. Imagen a la derecha, tambor aglomerador en estudio.	35
Figura 5.2: Simplificación de la geometría en la formulación de un modelo numérico DEM. Imagen derecha, geometría de tambor aglomerador industrial Spence. Imagen izquierda, simplificación de la geometría de un tambor aglomerador.	37
Figura 5.3: Granulometría del mineral de cobre de la minera BHP SPENCE.	38
Figura 6.1: Geometría simplificada del tambor aglomerador para su simulación.	39
Figura 6.2. Geometría y tamaño de la partícula para la representación del mineral de cobre.	41
Figura 6.3: Resultado de ensayo de ángulo de reposo mediante simulación DEM.	43
Figura 6.4. Geometría del tambor aglomerador en el modelo DEM, zona de inyección de líquido y volumen de partículas.	44

Figura 7.1: Comparación de resultados de potencia de ensayo experimental y simulación DEM del tambor de laboratorio.	46
Figura 7.2: Simulación numérica DEM – Tambor aglomerador industrial.	48
Figura 7.3: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 1f1$	49
Figura 7.4: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 2f1$	50
Figura 7.5: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 3f1$	51
Figura 7.6: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 1f2$	52
Figura 7.7: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 2f2$	53
Figura 7.8: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 3f2$	54
Figura 7.9: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 1f3$	55
Figura 7.10: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 2f3$	56
Figura 7.11: Gráfico de los resultados de simulación $\omega 3f3$	57
Figura 7.12: Perfiles de velocidades de las 9 simulaciones. De izquierda a derecha aumento de la velocidad angular 5, 6 y 7 rpm. Desde arriba hacia abajo, aumento del grado de llenado 8%, 10% y 12%.....	59
Figura 7.13: Potencia RMS de las distintas condiciones de operación del tambor aglomerador en las simulaciones DEM.	60
Figura 7.14: Espectro en frecuencia del torque para las distintas condiciones de operación.....	62
Figura 7.15: Distribución de humedad a los 60 segundos de simulación. De izquierda a derecha aumento de la velocidad angular 5, 6 y 7 rpm. Desde arriba hacia abajo, aumento del grado de llenado 8%, 10% y 12%.....	64
Figura 7.16: Fuerza en régimen estacionario en el eje y para diferentes condiciones de velocidad angular y grado de llenado.	66
Figura 7.17: Fuerza en régimen estacionario en el eje x para diferentes condiciones de velocidad angular y grado de llenado.	67
Figura 7.18: Análisis del tiempo de residencia del material – simulación DEM.....	68
Figura 7.19: Tiempo de residencia del material al interior del tambor aglomerador en la simulación DEM.	69
Figura 8.1: Diagrama de las mediciones experimentales a desarrollar en el banco de ensayos.	70
Figura 8.2: Diseño del banco de ensayos para aglomeración de mineral.....	71
Figura 8.3: Régimen estacionario de simulación de tambor banco de ensayos	73
Figura 8.4: Diagrama de cuerpo libre en régimen estacionario de un tambor aglomerador con sistema de transmisión de potencia por ruedas de fricción.	74
Figura 8.5: Fuerzas aplicadas en el eje derecho del banco de ensayos. Imagen superior, plano XY. Imagen inferior, plano XZ.	82
Figura 8.6: Fuerzas de corte en el eje XZ en el eje derecho.....	83
Figura 8.7 : Fuerzas de corte en el eje YZ en el eje derecho.....	83
Figura 8.8: Fuerzas de corte resultante por la superposición de los planos en el eje derecho.	83
Figura 8.9: Momento flector plano XZ.....	84
Figura 8.10: Momento flector plano YZ.....	84
Figura 8.11: Superposición de momento flector de ambos planos.	84

Figura 8.12: Denominación de cada una de las secciones del eje.....	86
Figura 8.13: Resultados del análisis estático de la estructura del banco de ensayos en el software ANSYS.....	93

Lista de Tablas

Tabla 1: Métodos de granulación según el tipo de equipo y sus respectivas aplicaciones típicas.....	10
Tabla 2: Características del equipo.	36
Tabla 3: Características del motor tambor aglomerador Spence.....	36
Tabla 4: Condiciones de operación del tambor aglomerador para la simulación DEM.....	38
Tabla 5: Dimensiones del tambor real.....	39
Tabla 6. Características del computador utilizado para simulación.	40
Tabla 7: Granulometría utilizada en el modelo DEM.	41
Tabla 8: Propiedades de las partículas y paredes.	42
Tabla 9. Propiedades del líquido.	42
Tabla 10. Propiedades de interacción entre partícula y paredes.....	42
Tabla 11: Cantidad de material y humedad según el grado de llenado.	44
Tabla 12: Ángulo de reposo promedio en régimen estacionario para cada una de las simulaciones.	63
Tabla 13: Variables de diseño tambor aglomerador de laboratorio.	72
Tabla 14: Características del motorreductor.	73
Tabla 15: Nomenclatura del diagrama de cuerpo libre.	75
Tabla 16: Datos utilizados para el cálculo de fuerzas en los puntos de contacto.....	76
Tabla 17: Nomenclatura de una relación de un sistema de transmisión.	76
Tabla 18: Relaciones de transmisiones de los distintos componentes mecánicos del banco de ensayos.	77
Tabla 19: Características de cadena ANSI número 50.....	78
Tabla 20: Características de selección de sprockets.....	78
Tabla 21: Resumen de cálculos de potencia y factores de corrección dimensionamiento de cadena.....	79
Tabla 22: Resumen de resultados de cálculos para el dimensionamiento ruedas de fricción.	81
Tabla 23: Datos utilizados para el cálculo de fuerzas en los puntos de contacto.....	82
Tabla 24: Propiedades del acero AISI 1045.....	85
Tabla 25: Factores de corrección para el límite a la fatiga.....	85
Tabla 26: Factores de concentración de esfuerzos a partir del tipo de criterio.	86
Tabla 27: Resultados obtenidos a partir de las iteraciones realizadas en las distintas secciones del eje.	87
Tabla 28: Diámetros establecidos para cada una de las secciones del eje.	88
Tabla 29: Propiedades del acero ASTM A-36.....	88
Tabla 30: Resultados obtenidos para el dimensionamiento de chaveta.	89
Tabla 31: Especificaciones del rodamiento SKF YAR 205-2RF.....	89
Tabla 32: Cálculo de carga dinámica de un rodamiento según las condiciones de operación.....	90
Tabla 33: Cálculo de factor de seguridad a partir de la carga estática del rodamiento.	91
Tabla 34: Características de la grasa SKF LGWA 2.....	92
Tabla 35: Presupuesto y descripción de materiales para la implementación de un banco de ensayos en el Departamento de Ingeniería Mecánica.....	94
Tabla 36: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w1f1$	102
Tabla 37: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w2f1$	102

Tabla 38: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w3f1$	102
Tabla 39: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w1f2$	103
Tabla 40: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w2f2$	103
Tabla 41: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w3f2$	103
Tabla 42: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w1f3$	103
Tabla 43: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w2f3$	104
Tabla 44: Resultados de modelo numérico de condición de operación $w3f3$	104

Nomenclatura

Glosario

CFD	:	Dinámica de fluidos computacional
DEM	:	Método de Elementos Discretos
PBM	:	Modelo de balance poblacional
PSD	:	Distribución de Tamaño de partículas

Variables

Símbolo	Descripción	Unidad
Δt	: Paso de tiempo	[s]
d	: Diferencial	-
e	: Coeficiente de restitución	-
E	: Módulo de elasticidad o Young	[Pa]
f	: Fracción o porcentaje	-
F	: Fuerza	[N]
Fr	: Número de Froude	[-]
g	: Aceleración de gravedad	[m/s ²]
h	: Separación entre partículas o pared	[m]
K	: Rigidez	[N/m]
L	: Largo	[m]
m	: Masa	[kg]
M	: Momento o Torque	[Nm]
$máx$: Valor máximo	-
$mín$: Valor mínimo	-
N	: Potencia	[m]
Q	: Caudal	[kg/s]
r	: Radio de una partícula	[m]
R	: Radio del tambor rotatorio	[m]
t	: Tiempo	[s]
V	: Volumen	[m ³]
v	: Velocidad	[m/s]
w	: Contenido de humedad	%

Letras griegas

Símbolo	Descripción	Unidad
α	: Ángulo Alfa	°
β	: Ángulo Beta	°
γ	: Tensión superficial	[N/m]
θ	: Ángulo teta	°
μ	: Coeficiente de roce	-
π	: Numero irracional pi	-
ρ	: Densidad	[kg/m ³]

φ	: Grado de llenado	-
ω	: Velocidad angular	[rad/s]

Subíndices

Símbolo	Descripción
h	: Húmedo
d	: Dinámico
g	: Granulación
i	: Instante de tiempo
j	: Instante de tiempo posterior
l	: líquido
mh	: Material húmedo
ms	: Material seco
n	: Normal
s	: Estático
t	: Tangencial
u	: Unitario
w	: Humectación

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

En el capítulo se presenta el contexto actual de la minería global y nacional, y se explica un problema específico de la industria. Se realiza un análisis del estado del arte, con el objetivo de plantear una hipótesis. Se establecen los objetivos del proyecto de investigación y la metodología para lograr con éxito el resultado de los objetivos específicos, considerando el trabajo previo desarrollado [1]. Finalmente, se presenta una carta Gantt para el desarrollo del proyecto.

1.2 Contexto

Chile posee una de las reservas de cobre más grandes del mundo, con estimaciones que superan los 190 millones de toneladas, permitiéndole ser el mayor productor de cobre a nivel mundial, con una participación en el mercado del 23.8% en 2023. La industria minera es una de las actividades industriales más importantes para la economía de Chile, representado 11.9% del producto interno bruto del país y el 56% de las exportaciones totales del país en 2023 [2]. Por otro lado, la ley promedio de los minerales de cobre ha disminuido con el tiempo, debido a esta consideración, es necesario la optimización o la búsqueda de nuevos métodos de extracción de cobre [3].

Uno de los métodos de extracción de cobre para minerales oxidados es mediante la técnica de lixiviación, un proceso hidrometalúrgico donde se obtiene cobre de alta pureza por medio del uso de soluciones líquidas para su recuperación. Para lograr una lixiviación eficiente es necesaria la aglomeración, que es un método de pretratamiento del mineral, antes de llegar al apilamiento, que tiene como fin promover la operación de lixiviación en pilas. La aglomeración consiste en la formación de glómeros o partículas de mayor tamaño a partir de la unión de los finos (partículas más pequeñas) que se adhieren alrededor de partículas más gruesas, gracias a la adición de humedad [4]. Según investigaciones y base de datos industriales, la aglomeración mejora la permeabilidad del material mineralizado utilizado en la lixiviación, en un rango de 10 a 100 veces. Esta mejora conlleva una reducción del tiempo necesario para esta etapa del proceso de extracción de cobre entre un 33% y 50%, y la reducción en el uso de ácido sulfúrico entre un 20 y 30%. En efecto, el buscar nuevos métodos de optimización del tratamiento del mineral de cobre por lixiviación podría ayudar a disminuir los costos operacionales de la industria y el uso eficiente de la energía [3]. Por esto, la aglomeración de minerales se considera una de las estrategias clave en la extracción de óxidos de cobre, sulfuros de cobre, níquel de laterita, minerales de hierro, minerales de oro y minerales de uranio [3, 5, 6].

En la industria existen múltiples equipos que permiten llevar a cabo la aglomeración. El tambor aglomerador es uno de los equipos de granulación más simple y uno de los más utilizados en la industria minera. La aglomeración en un tambor comienza con el ingreso de material al equipo, en el interior del tambor se adicionan aditivos, aglutinantes¹ y humedad por medio de rociadores, para

¹ Ácido sulfúrico, en el caso del cobre.

lograr una aglomeración óptima. Simultáneamente, el tambor se somete a un movimiento rotatorio provocando un lecho de material en movimiento. Las acciones mencionadas inducen la colisión y adhesión entre partículas, y en efecto, la aglomeración [7].

1.3 Planteamiento de la problemática e investigaciones recientes.

Determinar los parámetros óptimos de trabajo de un tambor aglomerador minero de forma empírica en la industria, considerando los múltiples parámetros de operación, implica la exposición a un gran riesgo. El mayor riesgo expuesto al realizar una acción de este tipo es el daño parcial o total de la maquinaria [8]. Las consecuencias principales para las empresas son la no producción por periodos de tiempo, gastos de mantenimiento no previstos y disminución en el rendimiento de la planta [9].

Dada la mencionada problemática, en la actualidad existen investigaciones que orientan sus objetivos en validar un modelo computacional capaz de simular el comportamiento del mineral o material en los equipos mineros. Los modelos numéricos desarrollados por diversos autores son capaces de generar resultados cercanos o representativos a la realidad [10, 11]. Los resultados de estos modelos numéricos permitirían maximizar y mejorar el diseño y la eficiencia de operación de estos equipos. Un modelo por el método de elementos discretos (DEM) o por dinámica de fluidos computacional (CFD) permite evaluar las fuerzas, potencia y torque a los que se somete el tambor y su sistema motriz. Al analizar y estudiar los resultados que se pueden obtener por los métodos numéricos, es posible determinar los parámetros adecuados de operación. Sin embargo, el flujo de partículas al interior del tambor aglomerador no está del todo estudiado [12, 13].

Diversos autores han llevado a cabo investigaciones experimentales y numéricas con el fin de estudiar el flujo de partículas en el interior de los tambores aglomeradores y rotatorios. Se han utilizado métodos numéricos como la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) y el Método de Elementos Discretos (DEM) para simular el comportamiento de los tambores. Yan et al. [14] presentaron un modelo numérico 2D por el método de elementos discretos de un tambor de rotatorio validado mediante resultados experimentales por PEPT². La precisión de la simulación se demuestra con datos experimentales publicados. Yu et al. [13] presentaron un modelo en tres dimensiones de un modelo numérico DEM con el objetivo de estudiar un flujo de partículas polidispersas en un tambor giratorio en modo rodante. Los resultados explican y describen el comportamiento de las capas activas y pasivas de partículas. Delele et al. [15] estudió el comportamiento del mineral en tambores rotatorios de forma experimental y numérica por CFD. Se analizan los efectos de la velocidad de rotación del tambor, el grado de llenado, la velocidad de alimentación y el ángulo de inclinación del tambor en conjunto con comportamiento del material tanto en la sección transversal y axial. El resultado fue una buena concordancia cualitativa y cuantitativa entre los resultados experimentales y los predichos. Sin embargo, la precisión del modelo en la predicción del tiempo de residencia de las partículas era relativamente baja. Heim et al. [16] realizaron análisis experimentales de potencia y torque de un tambor aglomerador. Los resultados obtenidos permitieron analizar las demandas de torque y potencia existentes para cada instante de tiempo, de forma que se detectaron comportamientos característicos

² Positron Emission Particle Tracking: Seguimiento de partículas por emisión de positrones

en las etapas de humectación y granulación, variando la cantidad de humedad suministrada al material. Nosrati et al. [17] realizaron un análisis del comportamiento de la aglomeración en un tambor con datos experimentales. Concluyeron que, a partir de una dosificación de aglutinante y tiempo preestablecidos, el aumento de la velocidad del tambor conduce a la producción de gránulos más grandes. Santos et al. [18] propusieron un modelo de dinámica de fluidos computacional para tambor rotatorio de laboratorio con partículas de vidrio, el cual lo validaron con datos experimentales. Se estudiaron diferentes regímenes de flujo transversal y se compararon los perfiles de velocidad de cada una de las fases de las partículas con los datos experimentales. Trung et al. [19] investigaron el crecimiento de un único gránulo dentro de un flujo denso de una distribución inicialmente homogénea de partículas húmedas y secas con el método de elementos discretos. Pachón-Morales et al. [20] examinaron el flujo de partículas de biomasa cruda y torrefacta en un acondicionamiento suelto y dinámico en un tambor rotatorio mediante el método de los elementos discretos. Las simulaciones DEM fueron útiles para estudiar los efectos aislados de la distribución y cohesión del flujo de partículas. Wang et al. [21] estudiaron la granulación en un tambor rotatorio con un modelo DEM para su aplicación en el proceso de sinterización de mineral de hierro. Analizaron las pequeñas partículas adheridas a una partícula central, mostrando que una baja variación en el contenido de agua tiene un impacto en la adhesión de las partículas pequeñas. Peña [22] propuso un modelo CFD numérico multifase de un tambor aglomerador. Se validó un modelo computacional utilizando el software Ansys Fluent, capaz de simular el comportamiento del mineral en el interior de un tambor aglomerador a gran escala en 3 dimensiones utilizado en la industria minera, así como determinar el efecto de diversos parámetros que condicionan el proceso.

Este proyecto de investigación es una continuación de un trabajo previo [1], el cual tiene como objetivo perfeccionar y elaborar una metodología de un modelo numérico por el método de elementos discretos, a través del software Ansys Rocky 2024 R1.1, con el objetivo de modelar y analizar la aglomeración para un tambor aglomerador industrial. Considerando modelos de adhesión y parámetros de operación reales. El propósito principal es comprender y analizar comportamiento del material al interior del tambor, y generar datos de potencia y torque en el tiempo. Se espera que los resultados se asemejen a las condiciones reales de operación, para lograr la optimización del proceso y toma de decisiones importantes en la industria minera.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos generales

El objetivo general de este proyecto es determinar la potencia requerida para el funcionamiento de un tambor aglomerador.

1.4.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Diseñar un tambor aglomerador de laboratorio (banco de ensayos) para analizar y estudiar la aglomeración.

- Determinar una metodología para realizar una simulación por el método de elementos discretos de un tambor aglomerador industrial con un gran contenido de partículas.
- Identificar y describir los parámetros importantes de operación de un tambor aglomerador a través de simulaciones mediante el método de elementos discretos.

1.5 Hipótesis

El diseño de un modelo numérico por el método de elementos discretos (DEM) de un tambor aglomerador industrial minero, que incorpore la geometría del equipo, calibración del mineral utilizado y parámetros de operación, permitirá estudiar el comportamiento del flujo de partículas, demanda de torque y potencia.

1.6 Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizarán diferentes herramientas computacionales y espacios pertenecientes Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción. A continuación, se presenta las actividades a desarrollar para cumplir cada uno de los objetivos específicos planteados.

- i. OE1: Diseñar un tambor aglomerador de laboratorio (banco de ensayos) para analizar y estudiar la aglomeración.

Con base en una revisión bibliográfica e información proporcionada por fabricantes de tambores aglomeradores, se busca diseñar un banco de ensayos que permita estudiar la aglomeración de forma experimental. El banco de ensayos debe considerar las variables operacionales de un tambor aglomerador, la calibración de parámetros físicos del material y la obtención de resultados que permitan validar un modelo DEM. Además, se pretende caracterizar el proceso de aglomeración tanto de manera cuantitativa como cualitativa, y optimizar los parámetros o condiciones de un tambor.

El diseño debe cumplir con criterios de seguridad, costo-sostenibilidad y dimensionamientos adecuados de los componentes mecánicos. Para lograrlo, es necesario desarrollar una memoria de cálculo para correcto dimensionamiento de los elementos mecánicos, evaluar la viabilidad económica y establecer una metodología de operación del banco de ensayos.

Para ello se utilizará el software Inventor de Autodesk para generar el diseño del banco de ensayos, mientras que la memoria de cálculo se realizará utilizando los programas EES y MATLAB.

- ii. OE2: Determinar una metodología para realizar una simulación por el método de elementos discretos de un tambor aglomerador industrial con un gran contenido de partículas.

Es necesario establecer una metodología para realizar una simulación de un tambor aglomerador industrial, debido al gran contenido de partículas necesarias para representar el mineral. Para ello es

necesario establecer los resultados que se quieren obtener, es decir, potencia y torque. Luego, se caracterizará el material y la operación del tambor, desarrollando un modelo geométrico en el software Inventor de Autodesk del tambor aglomerador de la minera BHP Spence, para posteriormente, formular el modelo numérico en el software Ansys Rocky DEM 2024 R1.1. Se ejecutará la simulación en espacios del Departamento de Ingeniería mecánica con recursos computacionales que posean GPU.

Es importante mencionar que durante el desarrollo de la metodología es necesario tener en consideración la demanda y disponibilidad computacional, teniendo un equilibrio en el número de partículas y tiempos de simulación. En efecto, el considerar una parte del tambor aglomerador, puede ser una forma para poder lograr con éxito los puntos antes mencionados.

- iii. OE3: Identificar y describir los parámetros importantes de operación de un tambor aglomerador a través de simulaciones mediante el método de elementos discretos.

A partir del trabajo previo realizado [1], se realiza una revisión bibliográfica que permite identificar y describir parámetros importantes de operación que influyen en el rendimiento de un tambor aglomerador. Esta revisión incluye el análisis de factores como la velocidad de rotación, el tamaño y distribución de partículas, la humedad, y la composición del material, entre otros, que afectan directamente el proceso de aglomeración.

Es fundamental comprender el método de elementos discretos para modelar el comportamiento de un tambor aglomerador, lo que implica comprender la interacción entre partículas y los parámetros necesarios para representar una aglomeración adecuada. Además, para desarrollar la modelación DEM es necesario realizar una exhaustiva calibración de parámetros del software, debido principalmente al uso de parámetros no físicos en la modelación de fuerzas de adhesión. Esto implica aproximar (simular) de manera sistemática y reiterada el modelo numérico a las condiciones reales de operación.

Considerando lo anterior, es posible variar sistemáticamente los parámetros operacionales para evaluar el impacto en el proceso de aglomeración mediante simulaciones DEM. A partir de los resultados de torque y potencia, el análisis de estos resultados permitirá establecer el impacto cuantitativo de las condiciones operacionales en tambores aglomeradores.

1.7 Planificación de la investigación

Para el desarrollo de la metodología planteada anteriormente se programa la planificación ilustrada en la Figura 1.1.

CARTA GANTT - Modelación de un tambor aglomerador industrial mediante el método de elementos discretos.



Figura 1.1: Carta Gantt del desarrollo del proyecto de investigación.

Capítulo 2: Marco teórico

En este capítulo se describe el proceso de extracción del cobre y la importancia del proceso de aglomeración. Se dan a conocer los métodos, etapas y equipos que se utilizan en la aglomeración, dependiendo de la industria y sus aplicaciones. Se describen y profundizan las variables que son fundamentales en la operación de un tambor aglomerador, en particular el comportamiento del material a granel al interior de él.

2.1 Proceso de extracción de cobre

En la industria minera del cobre existen diversos métodos de extracción, en el cual dependerá del tipo de mineral con el cual se esté operando en el proceso productivo. El método de extracción de los minerales sulfurados se detalla en los siguientes pasos de extracción: Extracción de la mina, trituración, flotación, fundición y el refinado. Por otra parte, el método de extracción de cobre a partir de minerales oxidados son: extracción de la mina, trituración, lixiviación, extracción con disolventes y electrodeposición. A continuación, se muestra un diagrama del proceso productivo de extracción de cobre de minerales oxidados.

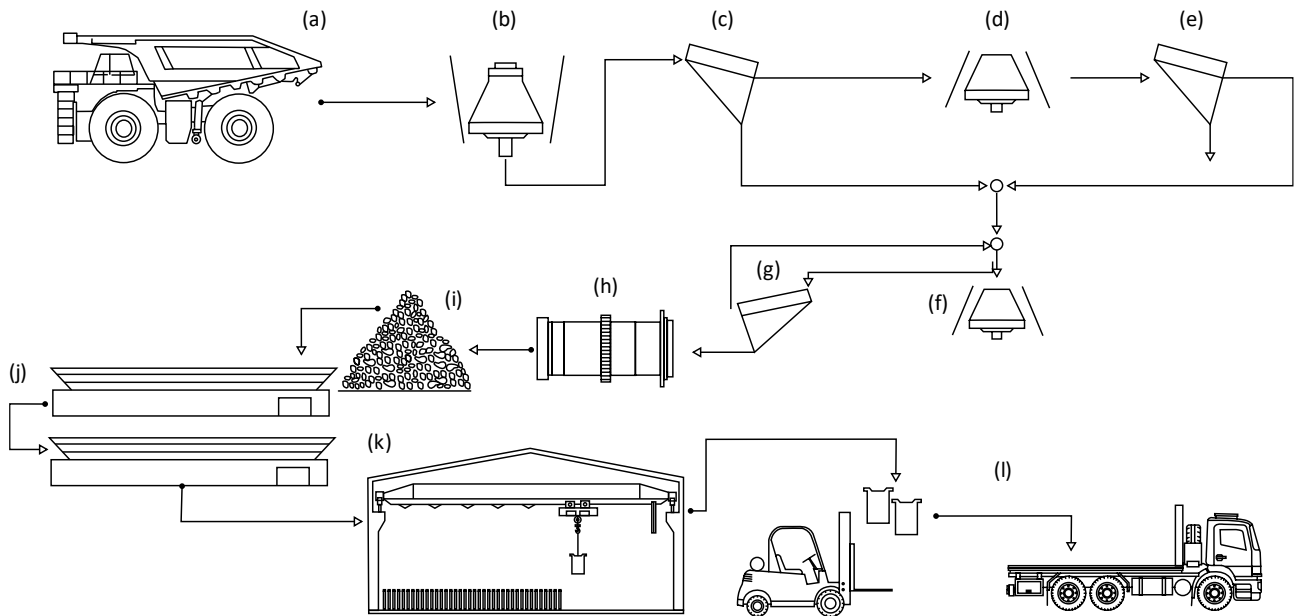


Figura 2.1: Diagrama de flujo del proceso de extracción de cobre para minerales oxidados.
(a) transporte de mineral; (b) chancado primario; (c) criba vibratoria primaria; (d) chancado secundario; (e) criba vibratoria secundaria; (f) chancado terciario; (g) criba vibratoria terciaria; (h) tambor aglomerador; (i) pila de aglomerados; (j) extracción de disolventes; (k) electro obtención; (l) envasado y entrega.

El proceso de extracción de cobre se inicia con la perforación y tronadura del yacimiento, con el objetivo de fragmentar el macizo rocoso, para luego por medio de maquinaria pesada de gran tonelaje transportar el material en camiones mineros hasta el proceso de chancado. En el proceso de chancado del material pasa por tres etapas (chancado primario, secundario y terciario), donde se reduce el tamaño de las rocas gradualmente. El mineral obtenido en el chancado terciario tiene una granulometría aproximada de 0.5 pulgadas de tamaño, el cual es transportado por cintas transportadoras hasta el proceso de aglomeración. El proceso de aglomerado es un proceso previo a la lixiviación por apilamiento en pilas, que permite garantizar un mejor coeficiente de permeabilidad³. Las partículas finas se adhieren a partículas más gruesas por medio de humedad y aglutinantes. Luego, el material obtenido del proceso de aglomeración es transportado por cintas transportadoras para ser apiladas e iniciar el proceso de lixiviación. El proceso de lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que tiene por objetivo extraer el cobre del material en estado sólido a un estado acuoso mediante el uso de químicos. Finalmente, el material en estado acuoso es sometido a proceso de extracción y electroobtención. La extracción por solventes consiste en la transferencia del ion de cobre de la solución acuosa de lixiviación a una fase orgánica utilizando un compuesto orgánico denominado agente de extracción. El proceso de electroobtención es la transformación electroquímica del cobre disuelto en forma de electrolítico en cobre metálico.

2.1.1 Proceso de lixiviación

La ventaja del uso de procesos hidrometalúrgicos es que pueden ser aplicados en minerales oxidados y sulfuros secundarios. Además, el costo de proceso productivo es menor a la extracción por otros métodos y menor gasto energético, ya que se pueden implementar normalmente a temperatura y presión ambiente [23].

La aglomeración es una etapa que tiene como finalidad acondicionar los minerales que se lixiviarán, acreditando un aumento del coeficiente de permeabilidad. Cuando se tienen altos porcentajes de materiales finos (10-20%) se generan serios problemas en la permeabilidad del lecho, evitando la disolución y extracción de los metales de interés, ya que el material fino se aísla y produce regiones en donde la filtración es reducida, beneficiándose la compactación de las pilas y el traslado de este material fino en la parte baja de la pila, evitando el paso de la solución enriquecida. Las consecuencias de un porcentaje alto de material fino contribuyen al alza del tiempo que se requiere para la lixiviación, elevando el consumo de reactivos, generando menores recuperaciones de cobre y cuestionando la viabilidad de un proyecto. Lograr un proceso eficiente en la aglomeración permitiría aumentar el rendimiento del proceso productivo de extracción [24].

2.2 Proceso de aglomeración

El proceso de aglomeración o granulación se encuentra presente en diversos procesos productivos de industrias como agroquímicos, alimentos, detergentes, productos farmacéuticos, industrias químicas y procesamiento de minerales. Este proceso consiste en la formación de glómeros o partículas de

³ La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su composición.

mayor tamaño a partir de la unión de los finos (partículas más pequeñas) que se adhieren alrededor de partículas más gruesas o por la conformación de solo partículas pequeñas. Las ventajas de la implementación de procesos de aglomeración son los siguientes [6, 25]:

- Eliminación de los riesgos de manipulación de los finos.
- Eliminación de pérdidas de fracción de finos.
- Mejorar la apariencia del producto.
- Reducción del apelmazamiento y la formación de grumos.
- Mejorar las propiedades de flujo para su posterior procesamiento.
- Aumentar la densidad aparente para el almacenamiento.
- Controlar la dispersión y la solubilidad.
- Controlar la porosidad y la relación superficie-volumen.
- Formación de mezclas no segregantes que constan de varios componentes en polvo.

En la actualidad, existen múltiples formas de aglomerar materiales, el autor [26] menciona que existen dos métodos de aglomeración: granulación húmeda y seca.

- Granulación húmeda (líquida): Se utiliza un aglutinante líquido para formar enlaces intermoleculares que se mezclan para producir un gránulo cada vez más grande.
- Granulación en seco: empleando a menudo presión para prensar, briquetar o extruir.

2.2.1 Métodos de aglomeración.

Existen numerosos métodos de granulación o aglomeración dependiendo de la aplicación del aglomerado y a las propiedades físicas del material a granel. Algunas de las propiedades importantes que se quieren obtener del aglomerado son: el coeficiente de fricción interna, la densidad, la porosidad del lecho, el tamaño y forma del grano y el contenido de humedad. En la presente investigación, se presta especial atención a la granulación húmeda, que implica combinar el material a granel con un líquido para obtener gránulos. Este es uno de los métodos más comunes debido a su aplicabilidad en la producción de fármacos e industria minera. A continuación, se presenta algunos de los métodos y ejemplos de aplicación [27].

Tabla 1: Métodos de granulación según el tipo de equipo y sus respectivas aplicaciones típicas.
Fuente: [27]

Métodos	Aplicaciones típicas
<u>Granuladores por transmisión:</u>	
Tambores rotatorios Discos	
<u>Mezcladores y granuladores planetarios:</u>	
Mezcladores continuos de alto cizallamiento Mezcladores discontinuos de alto cizallamiento.	Abonos artificiales, minerales de hierro y metales no ferrosos.
<u>Granuladores de lecho fluidizado:</u>	
Cama fluidizada Cama de fuente Recubridores Wurster	Continuo: fertilizantes, sales inorgánicas, detergentes. Lote: productos farmacéuticos, productos químicos agrícolas, residuos nucleares.
<u>Granuladores centrífugos.</u>	
	Productos farmacéuticos, productos químicos agrícolas.
<u>Métodos de pulverización:</u>	
Secado por aspersión Prilado	Productos de alimentación instantánea, detergentes, cerámica. Urea, nitrato de amonio.
<u>Aglomeración por presión:</u>	
Extrusión Compactación Tabletas Briquetas Paletizado	Productos farmacéuticos, catalizadores, productos químicos orgánicos e inorgánicos, plásticos, piezas metálicas, cerámicas, arcillas, minerales, piensos para animales.

2.2.2 Etapas de aglomeración

La aglomeración húmeda está definida por 3 etapas principales [28], como se puede ver gráficamente en la Figura 2.2, estas describen la formación de glómeros, y son las siguientes:

- **Humectación y nucleación:** El aglutinante líquido entra en contacto con el polvo seco. Esto da como resultado la adhesión entre moléculas y la formación de pequeños agregados (núcleos) con una estructura suelta.

- Compactación y coalescencia: Las colisiones entre los gránulos, el lecho y las paredes del dispositivo provocan la compactación y el crecimiento de los gránulos, esta fase afecta la porosidad y densidad de los gránulos finales. En la última fase, los gránulos resultantes se descomponen en partículas más pequeñas,
- Abrasión y trituración: Como resultado de las colisiones, se intercambian porciones del material y se rompen los gránulos más débiles. Esta fase afecta la distribución del tamaño de grano final, particularmente en el mecanismo de alto cizallamiento.

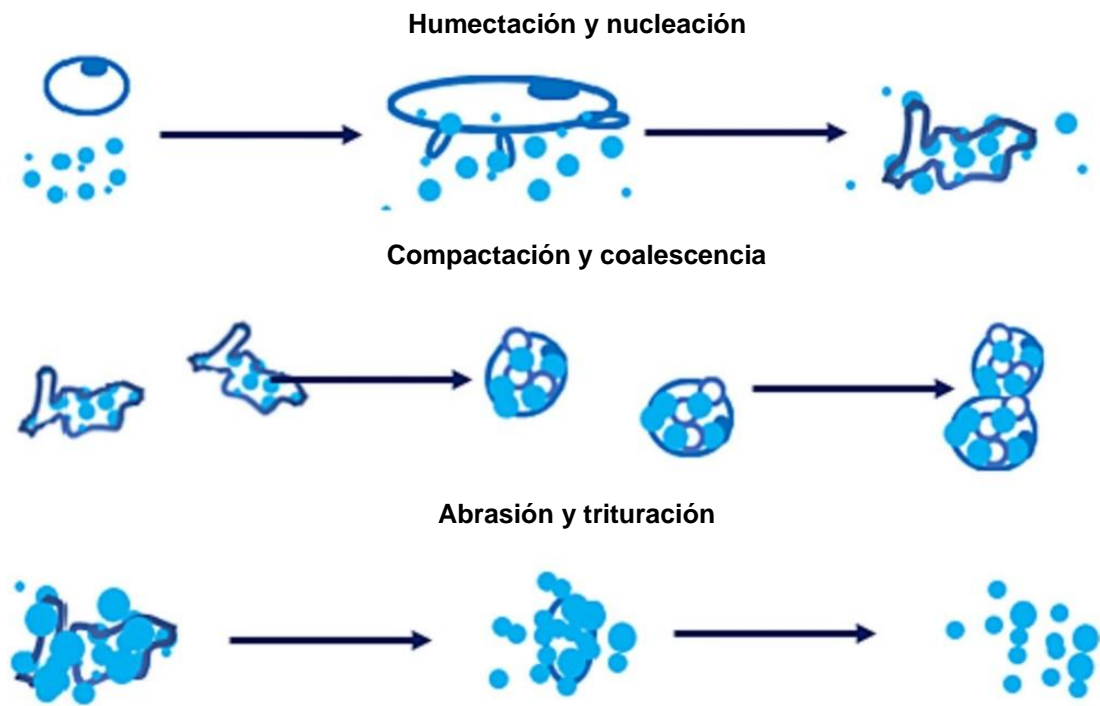


Figura 2.2: Etapas de la aglomeración.

Fuente: [28]

2.3 Tambor aglomerador en la minería.

El tambor aglomerador es un artefacto de granulación más simple y de los más utilizados, especialmente para fertilizantes y minerales, donde el crecimiento de las partículas se logra a través de la colisión de partículas húmedas en un lecho con movimiento rotatorio [4, 22]. En la Figura 2.3 se muestra un tambor aglomerador con sus partes esenciales.

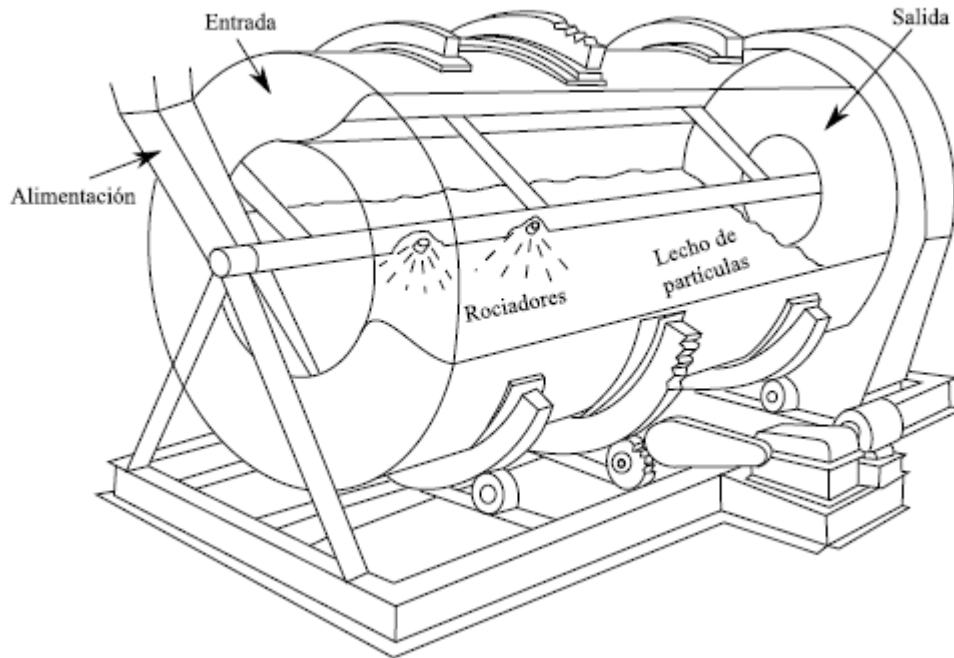


Figura 2.3: Partes esenciales de un tambor aglomerador.

Fuente: [4]

Los componentes principales de un tambor aglomerador son: cilindro metálico revestido interiormente de caucho antiácido con elevadores o lifters que permiten lograr una acción rodante más eficaz al momento del ingreso del material y mezclado; chute de alimentación que permite la alimentación en uno de los extremos del cilindro del tambor; chute de descarga que permite direccionar los glómeros hacia la cinta transportadora y redireccionar los gases nocivos para la salud debido a sustancias químicas; tuberías al interior del tambor que permiten rociar líquido y aglutinante al material en movimiento; y rueda dentada, la cual permite la trasmisión de potencia proveniente del sistema trasmisión–motor eléctrico [4].

El motor eléctrico transmite el momento a una trasmisión con el propósito de disminuir la velocidad de rotación y aumentar el torque del cilindro o tambor. En un extremo del tambor hay un ingreso del material en cual genera un lecho de material en movimiento. A causa del movimiento del tambor, la mezcla al interior del tambor es homogénea. De forma paralela, los rociadores de líquido y aglutinantes son añadidos al material. El líquido, aglutinante y material se mezclan de manera constante, el movimiento induce la colisión entre partículas, lo que permite el proceso de aglomeración. Finalmente, los glómeros obtenidos son enviados a través de cintas transportadoras que se encuentra en el chute de descarga, a nuevos puntos de almacenamiento.

2.3.1 Etapas de la aglomeración en tambor aglomerador.

En las investigaciones [22], [16] y [29] el proceso de aglomeración en tambor aglomerador consiste en dos etapas: la etapa de humectación o nucleación y etapa de granulación o crecimiento.

En la etapa de humectación el material seco se rocía con un líquido aglutinante, el cual, en este proceso, también se conoce como líquido humectante, la cantidad de líquido que se utilice en esta etapa determina el contenido de humedad de la alimentación. En esta etapa aumenta la masa de la alimentación mientras que el número de partículas se mantiene constante.

Una vez completada la etapa de humectación comienza la etapa de granulación, donde el material, ahora de consistencia lodosa, comienza a aglomerarse debido a la rotación del tambor y a las propiedades del material húmedo. La granulación es un evento de procesos discretos que cambia el número total de partículas, donde la colisión entre dos partículas provoca la desaparición de cada partícula individual formando una partícula compuesta más grande. Por lo tanto, en esta etapa disminuye el número de partículas mientras la masa al interior del tambor se mantiene constante.

2.4 Factores que afectan la aglomeración

2.4.1 Grado de llenado y velocidad de rotación

El grado de llenado corresponde al porcentaje de material al interior del tambor respecto al volumen total del tambor, como se muestra en la ecuación (1).

$$\varphi = \frac{\text{Área}_{\text{material}}}{\text{Área}_{\text{transversal del tambor}}} \quad (1)$$

La velocidad de rotación corresponde a la velocidad angular con la que gira el tambor, el cual dependerá del tamaño del tambor y el producto final que se quiere obtener. La velocidad resulta de gran importancia ya que incide en la potencia requerida para el funcionamiento del tambor y el tiempo de residencia de las partículas dentro de este.

Además, la velocidad de rotación del tambor junto con el grado de llenado del tambor y la geometría de este, definen el régimen de flujo de la mezcla al interior de dicho tambor. El autor [12] introduce el concepto del número de Froude, el cual es un valor adimensional que relaciona la velocidad angular, el radio del tambor y la gravedad, en otras palabras, relaciona las fuerzas de inercia y la fuerza de gravedad. Se calcula como se muestra en la ecuación (2).

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (2)$$

Donde,

$$\begin{array}{ll} \omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] & : \text{Velocidad angular del tambor rotatorio} \\ R \text{ [m]} & : \text{Radio del tambor rotatorio} \\ g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] & : \text{Aceleración de gravedad 9,81} \end{array}$$

El número de Froude y el grado de llenado, nos permite conocer el régimen en el cual se encuentran las partículas cuando el tambor está en operación. Como se puede observar, en la Figura 2.4, en el eje

de las abscisas tenemos el número de Froude y en eje de las ordenadas la profundidad del lecho, que va directamente relacionado con el grado de llenado. Dependiendo de los valores que se obtengan, el régimen de partículas puede ser: deslizante, hundimiento, rodante, cascada, catarata o centrífugo.

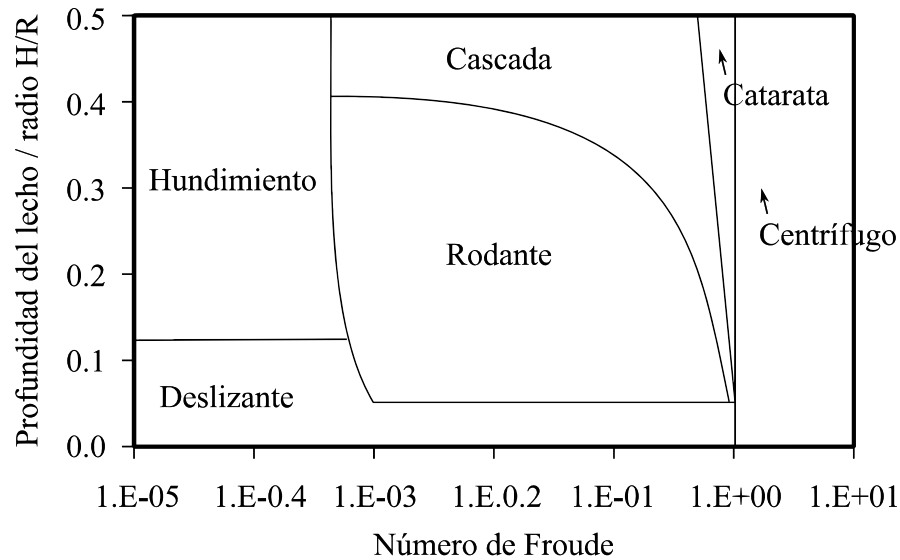


Figura 2.4: Gráfico que relaciona el número de Froude con el grado de llenado (profundidad del lecho y radio del tambor rotatorio).

2.4.2 Humedad

El contenido de humedad del mineral en el proceso de aglomeración es fundamental en la unión de las partículas por granulación húmeda, esto permite la unión entre las partículas (finos principalmente) mediante una combinación de presión capilar mediada por aglutinantes, tensión superficial y fuerzas viscosas. La dosificación correcta del contenido de humedad en el material que se desea aglomerar permite obtener el producto deseado. El contenido de humedad incide en el tamaño de la partícula que se desea obtener, junto con el aglutinante utilizado, ambos parámetros inciden en el tiempo y potencia necesaria para obtener los glómeros.

En la ecuación (3), se puede calcular la cantidad de humedad necesaria de un material para la aglomeración.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (3)$$

2.4.3 Densidad aparente

La densidad aparente es una propiedad que poseen los materiales granulares y corresponde a una medida de la masa de un material por unidad de volumen, incluyendo los espacios porosos entre las partículas del material. Esta es especialmente utilizada en referencia a componentes minerales, sustancias

químicas, materias primas farmacéuticas, productos alimenticios. Materiales que se encuentren de forma granulada o particulada.

Para determinar la densidad húmeda y seca, se presentan las ecuaciones (4) y (5), respectivamente. La densidad húmeda y seca dependerá si consideramos la humedad del material como la masa total.

$$\rho_{ms} = \frac{m_{ms}}{V} \quad (4)$$

$$\rho_{mh} = \frac{m_{ms} + m_{mh}}{V} \quad (5)$$

De las ecuaciones (3), (4) y (5) se puede calcular la densidad húmeda a partir de la densidad seca y el contenido de humedad, la cual se muestra en la ecuación (6).

$$\rho_{mh} = \rho_{ms}(1 + w) \quad (6)$$

Donde,

- ρ_{ms} es la densidad seca.
- ρ_{mh} es la densidad húmeda.
- V es el volumen del material.
- m_{ms} masa del material seco.
- m_{mh} masa del material húmedo.

2.4.4 Potencia y torque

En la investigación [30] estudió la dinámica del lecho del material al interior de un tambor durante la aglomeración, considerando los parámetros del proceso y el equipo (diámetro del tambor, grado de llenado, velocidad de rotación y tiempo de residencia). Para el desarrollo del modelo considera lo siguiente:

- El lecho de material granular es un cuerpo rígido.
- El movimiento del material al interior del tambor es causado por el momento M_t .

En la Figura 2.5, se puede observar el diagrama de material en movimiento.

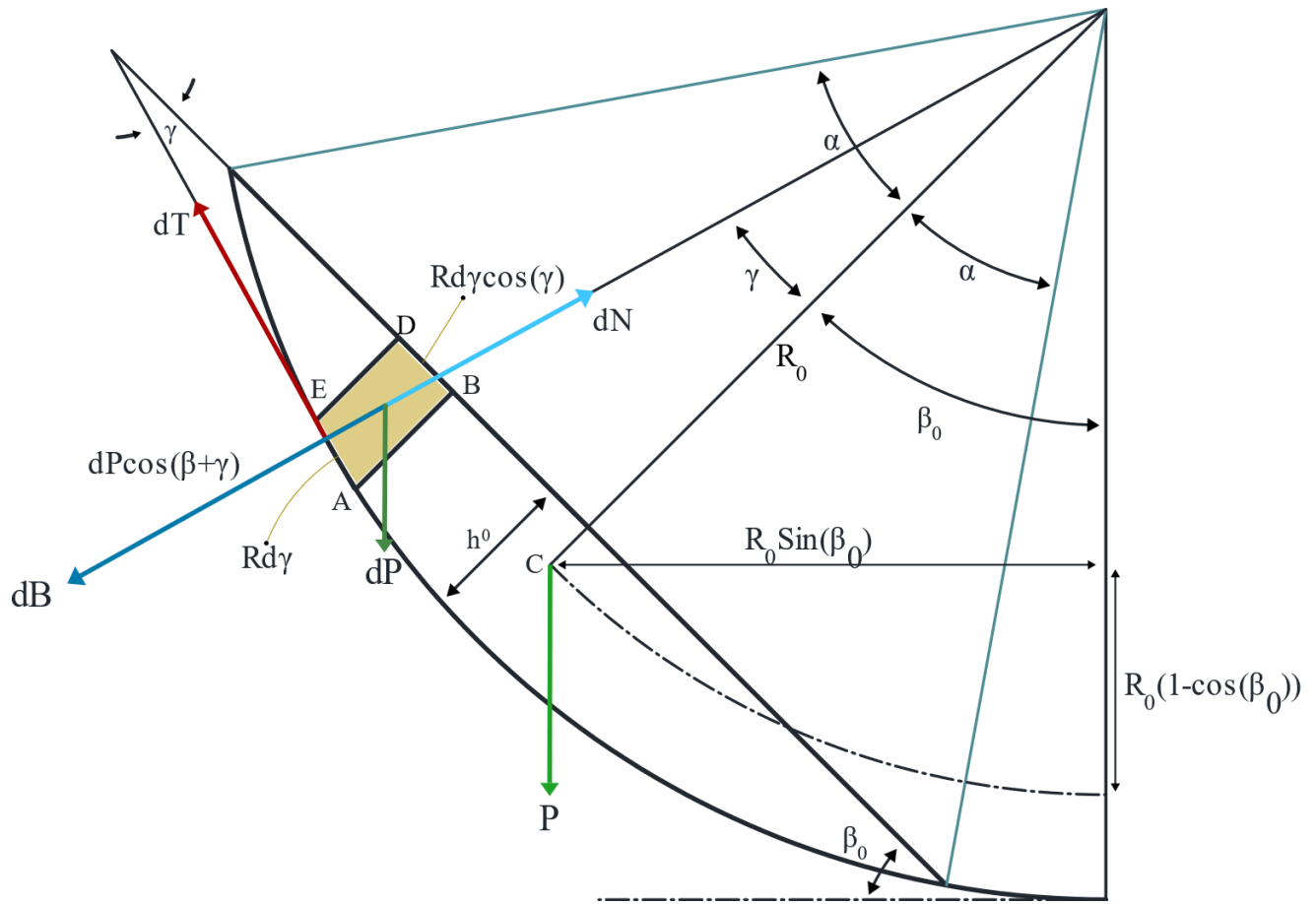


Figura 2.5: Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre el elemento diferencial del lecho de material.

Fuente: [30] [reformulada]

A partir de la Figura 2.5, consideramos un diferencial de área de la superficie del lecho de partículas dF , se puede determinar el valor del momento. Sobre el elemento $ABED$ actúan las siguientes fuerzas:

- i. Fuerza de fricción del levantamiento: $-dT$
- ii. Fuerza de gravedad: $-dP = \rho_n g L dF$
- iii. Fuerza centrífuga: $-dB = \omega^2 R dP / g$
- iv. Fuerza normal: dN

Donde, L es el largo del tambor, ω es la velocidad de giro, R es el radio del tambor.

La fuerza de fricción está relacionada con la fuerza centrífuga y la componente radial de la fuerza de gravedad, la cual se determina con la siguiente fórmula:

$$dT = f dP \left[\frac{\omega^2 R}{g} + \cos(\beta_0 + \varphi) \right] = f \rho_n L g dF \left[\frac{\omega^2 R}{g} + \cos(\beta_0 + \varphi) \right] \quad (7)$$

Considerando la Figura 2.5, el elemento de área dA (ver elemento $ABED$).

$$dA = R^2 \cos(\varphi) (\cos(\varphi) - \cos(\alpha)) d\varphi \quad (8)$$

Tomando las ecuaciones (7) y (8), el momento de fricción distribuido a lo largo del arco en el que el material⁴ está en contacto con la pared del tambor, se puede determinar como

$$M_t = \int_{-\alpha}^{\alpha} R dt = R^3 L f \rho_n g \int_{-\alpha}^{\alpha} \left[\frac{\omega^2 R}{g} + \cos(\beta_0 + \varphi) \right] \cdot (\cos^2(\varphi) - \cos(\alpha) \cos(\varphi)) d\varphi \quad (9)$$

$$M_t = f g L R^3 \rho_n \left[\frac{\omega^2 R}{g} \left(\alpha - \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right) + \cos(\beta_0) \left(\frac{4}{3} \sin(\alpha) - \frac{1}{6} \sin(2\alpha) \cos(\alpha) - \alpha \cos(\alpha) \right) \right] \quad (10)$$

Finalmente, la potencia se puede calcular como

$$N = M_t \cdot \omega \quad (11)$$

2.4.5 Régimen de partículas.

Los diferentes regímenes de las partículas mencionados anteriormente corresponden al comportamiento del material dentro del tambor, como se muestran en la Figura 2.6. Para el proceso de aglomeración, el régimen óptimo de operación es el régimen rodante y cascada.

El lecho de partículas que se encuentra dentro de un tambor en rotación, se identifica dos tipos capas de partículas: activa y pasiva. La capa activa, destacada en color verde, rojo y amarillo, se encuentra superior a la capa pasiva, como se muestra en la Figura 2.7. Como se puede ver en la Figura 2.7, la capa pasiva destacada de color azul, se mueve con las paredes del tambor como un sólido y a baja velocidad que la capa activa. Por otro lado, la capa activa se mueve desde el extremo superior al inferior debido a la gravedad. Entre la capa activa y pasiva hay un grupo de partículas en la zona de interfase que su movimiento tiene una velocidad cercana a 0 m/s. [31]

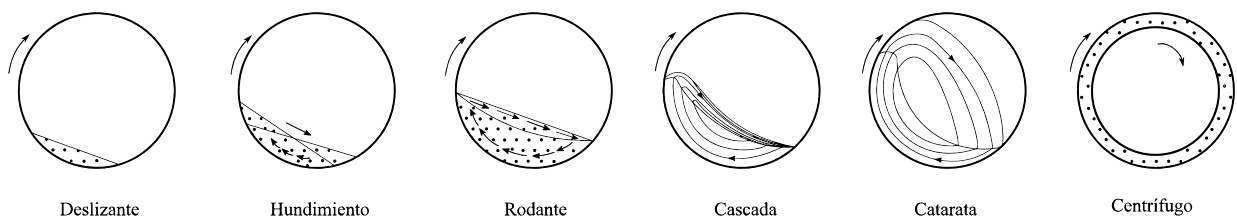


Figura 2.6: Movimiento del material en los distintos regímenes.

Fuente: [32]

⁴ Integración radial, de tal forma que abarque el arco del material.

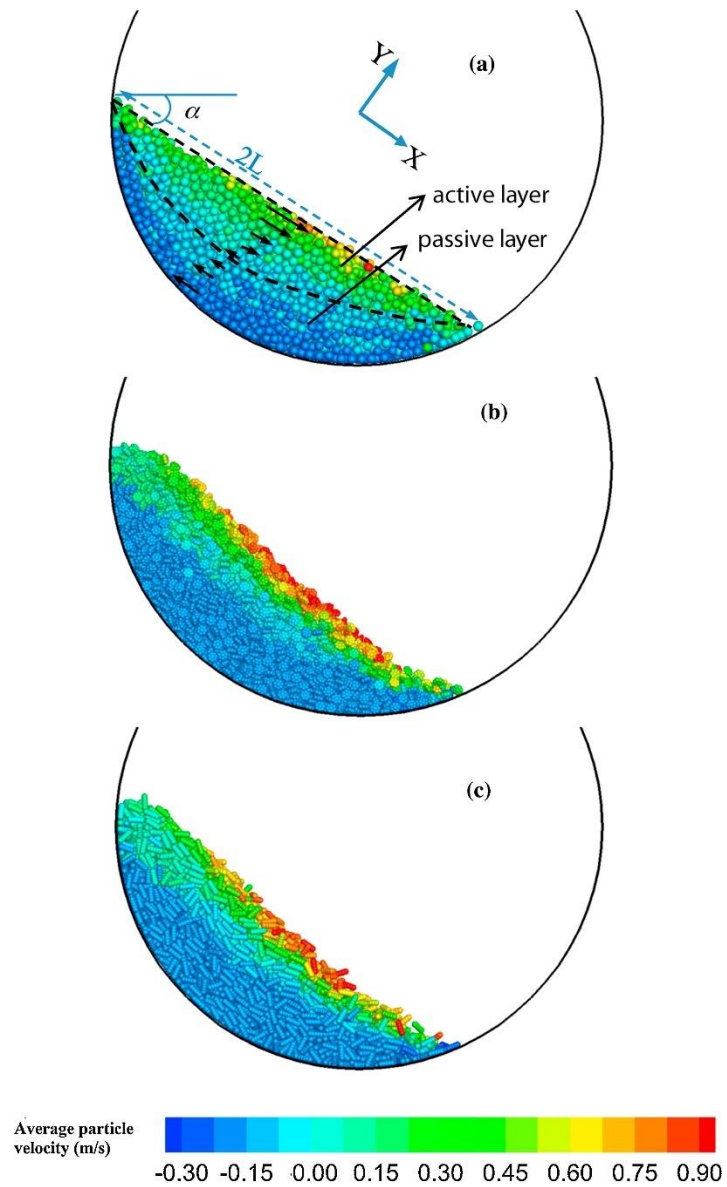


Figura 2.7: Identificación de capa activa y pasiva de un flujo de partículas en un tambor.

Fuente: [31]

Capítulo 3: Estado del arte.

En este capítulo se realizará un análisis de estado del arte de las investigaciones relevantes y que tienen resultados relacionados con el diseño de un modelo numérico para un tambor aglomerador.

Uno de los primeros modelos numéricos por la metodología DEM fue el desarrollado por Mishra et al. [33] en donde presentaron un modelo en 2D para analizar el proceso de aglomeración. Utilizaron modelos de contacto no lineales para las interacciones entre partículas y paredes. Los resultados de la investigación concluyen que fue posible predecir la distribución de tamaño en estado estable de un glómero para un sistema simplificado. Por otra parte, debido a la complejidad del proceso, se establece que el tamaño máximo del gránulo alcanzado durante la aglomeración es finito. Además, el torque requerido para el movimiento del tambor es mayor cuando existe aglomeración, en comparación a cuando hay ausencia de este. En la

Figura 3.1, se puede observar una captura de pantalla de los resultados visuales obtenidos de este modelo numérico 2D.

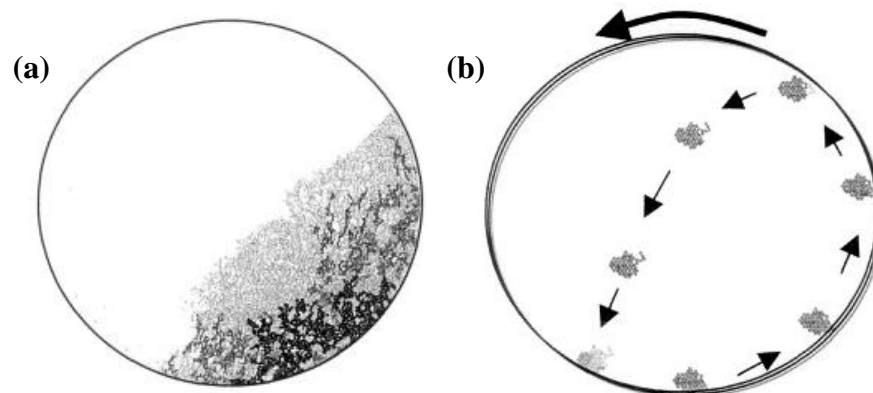


Figura 3.1: Primeros modelos numéricos por la metodología DEM de aglomeración de partículas. (a) Estado intermedio después de una revolución y cuarto, (b) Trayectoria de un aglomerado de partículas. Fuente: [33]

Yang et al. [34] investigaron el flujo de partículas al interior de un tambor rotatorio por el método de elementos discretos, donde analizaron como afecta las propiedades macroscópicas y microscópicas del flujo de partículas al variar la velocidad de rotación y la fricción de deslizamiento de las partículas con la pared. Los resultados obtenidos muestran que el ángulo de reposo tuvo un incremento repentino a medida que el flujo se movía a regímenes en cascada y catarata. Por otra parte, tanto la energía de colisión como la frecuencia de colisión aumentaron con la velocidad de rotación, pero la interacción partícula-pared aumentó mucho más rápido que la interacción partícula-partícula. En la Figura 3.2, se observa el comportamiento del material al interior del tambor aglomerador en su sección transversal, donde se puede ver los 6 tipos de regímenes y sus respectivas velocidades de rotación.

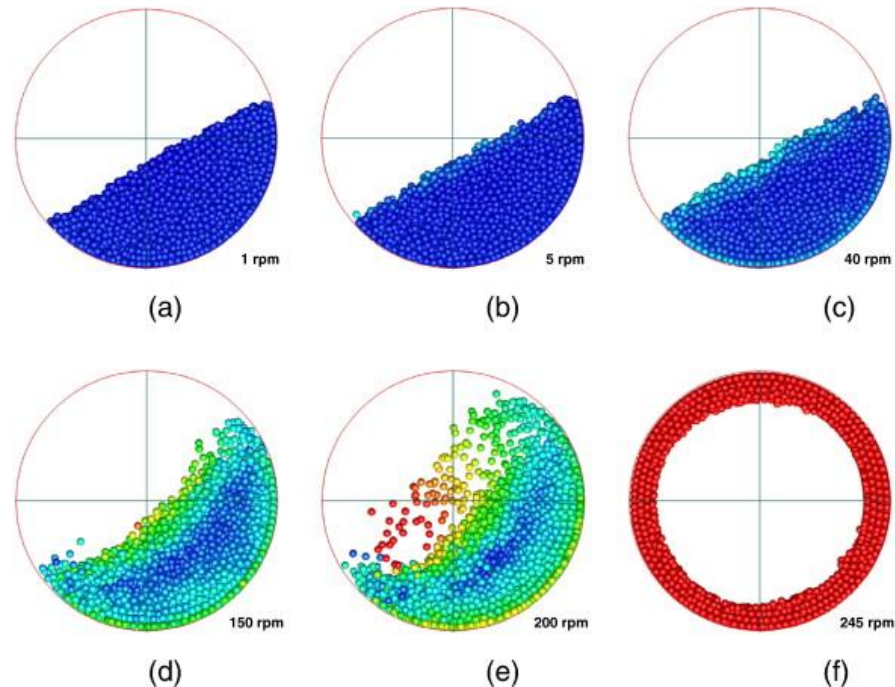


Figura 3.2: Patrones de flujo de partículas a diferentes velocidades de rotación que muestran diferentes regímenes de flujo.

(a) desplome, (b) transición desplome-rodadura, (c) rodadura, (d) cascada, (e) catarata, y (f) centrifugado. Fuente: [34]

Trung et al. [19] investigaron el crecimiento de un único gránulo dentro de un flujo denso de una distribución inicialmente homogénea de partículas húmedas y secas con el método de elementos discretos, donde se consideran los efectos cohesivos y viscosos de un líquido. La investigación concluye que la función que describe el crecimiento de los gránulos en el tiempo tiene un comportamiento exponencial, lo que se ve reflejado en la disminución de partículas finas a través del tiempo. Además, la acreción⁵ del gránulo aumenta cuando la relación de tamaño o coeficiente de fricción aumentan, la acreción disminuye mientras que la erosión aumenta cuando el tamaño medio de partículas es mayor. Finalmente, la acreción aumenta y la erosión disminuye cuando la viscosidad del líquido aumenta. Lo anteriormente se hace a partir de un análisis a partir de las partículas que conforman el glómero en cada instante de tiempo. En la Figura 3.3, se visualiza capturas de pantalla de la simulación realizada.

⁵ Crecimiento por adición de materia.

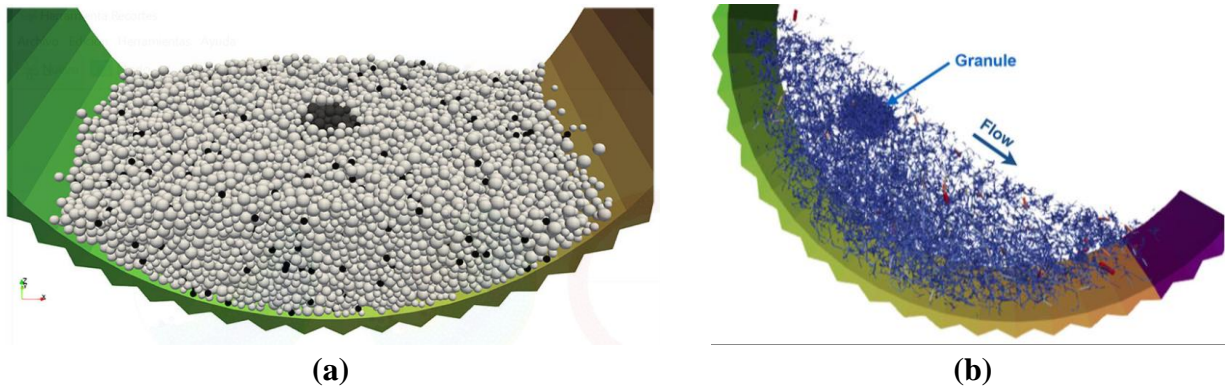


Figura 3.3: Simulación crecimiento de un gránulo.

(a) Captura de imagen de la simulación que muestra la distribución de partículas secas (en blanco) y húmedas (en negro), (b) Captura de la simulación que muestra los vectores de fuerzas durante la aglomeración. Fuente: [19]

Pachón-Morales et al. [20] examinaron el flujo de partículas de biomasa cruda y torrefacta en un acondicionamiento suelto y dinámico en un tambor rotatorio mediante el método de los elementos discretos. Las simulaciones DEM fueron útiles para estudiar los efectos aislados de la distribución y cohesión del flujo de partículas. En la Figura 3.4, se presenta los resultados obtenidos de las simulaciones obtenidas de los distintos tipos de partículas con y sin cohesión.

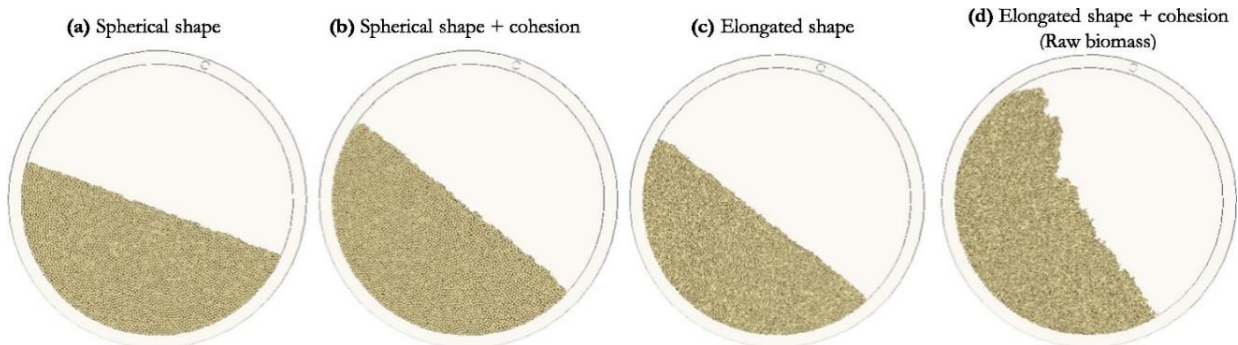


Figura 3.4: Simulaciones DEM que muestran el efecto de la forma de las partículas y la cohesión entre ellas.

(a) forma esférica, (b) forma esférica y cohesión, (c) forma alargada, (d) forma alargada y cohesión. Fuente: [20]

Shi et al. [35] llevaron a cabo un análisis exhaustivo del comportamiento dinámico de la granulación del mineral de hierro, explorando su rendimiento con diferentes tipos de mineral y niveles de contenido de agua. No obstante, estos estudios se han enfocado principalmente en las partículas de mineral, sin considerar las propiedades y la cantidad de partículas adhesivas presentes después de la granulación. En este trabajo se propone también un método para determinar el tamaño de los glómeros resultantes de la simulación mediante un tamizado virtual.

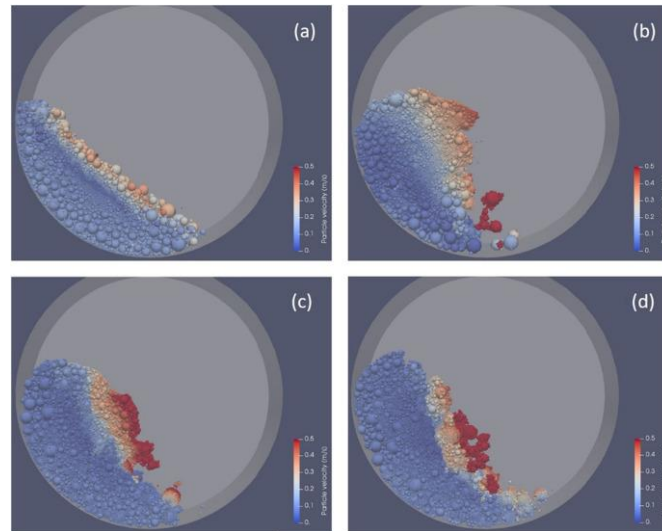


Figura 3.5: Distribuciones espaciales de la velocidad de las partículas en diferentes etapas de la aglomeración.

Fuente: [35]

Wang et al. [21] estudiaron la granulación en un tambor rotatorio pequeño con un modelo DEM para su aplicación en el proceso de sinterización de mineral de hierro (coque, fundente y hierro). Analizaron las pequeñas partículas adheridas a una partícula central, mostrando que una baja variación en el contenido de agua tiene un impacto en la adhesión de las partículas pequeñas. El número de colisiones entre partículas está estrechamente relacionado con la caracterización o el tipo de material, donde la incorporación de deflectores en la estructura del tambor amplificaría el número de colisiones. En la Figura 3.6, se presenta los resultados de los aglomerados obtenidos posterior al proceso de aglomeración, en el cual se realiza un tamizado virtual para analizar el tamaño de estos.

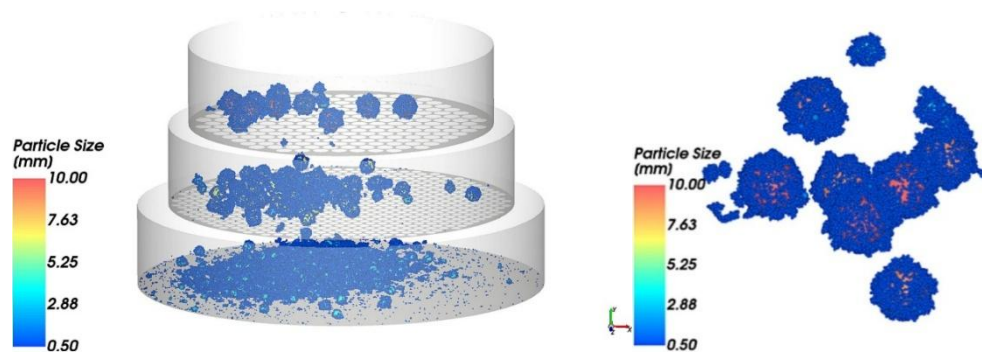


Figura 3.6: Tamizado virtual simulación DEM de mineral de hierro.

Fuente: [21]

Nakamura et al. [36] realizaron un modelo numérico para analizar la granulación húmeda de polvo de carbonato de calcio en un tambor giratorio utilizando el acoplamiento DEM-PBM con un núcleo de aglomeración calculado de forma determinista (DAK). Los resultados mostraron que existe una dependencia del tamaño de la partícula significativamente diferente en comparación con granos existentes utilizados en estudios de PBM. En la Figura 3.7, se presenta los resultados obtenidos inicialmente y posterior a 14 segundos de granulación, con diferentes contenidos de líquido aglutinante. El mapa de color representa el tamaño de las partículas.

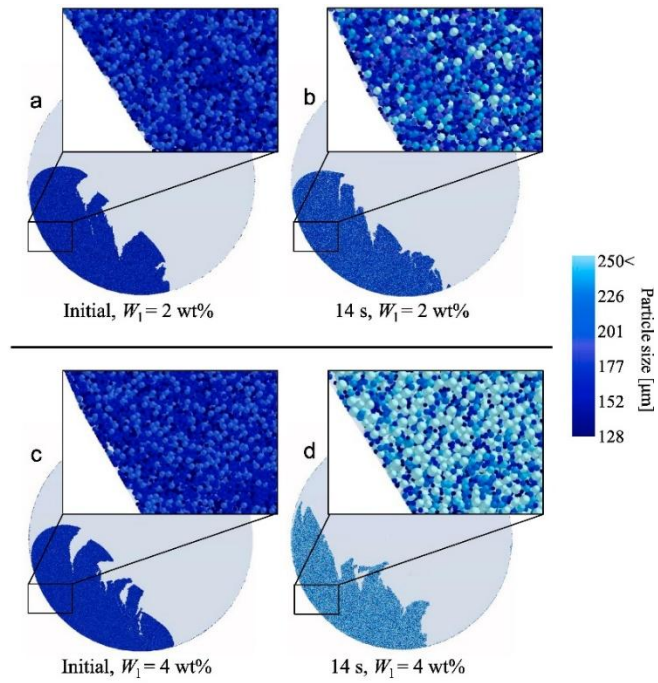


Figura 3.7: Captura de modelo numérico para analizar la granulación húmeda de polvo de carbonato de calcio en un tambor giratorio utilizando el acoplamiento DEM-PBM.
Fuente: [36]

Capítulo 4: Método de elementos discretos (DEM)

En este capítulo se describe los distintos modelos de contacto que posee el software Ansys Rocky 2024 R1.1, con el cual se realiza la modelación DEM [37].

4.1 Método de elementos discretos

El método de elementos discretos o *discrete element method* es una técnica numérica utilizada en las ciencias de la ingeniería para el estudio de materiales granulares.

En DEM, los contactos entre partículas y/o partículas-paredes, se consideran como un sistema masa, resorte y amortiguador, tal como se muestra en la Figura 4.1. Para cada paso de tiempo se aplican las ecuaciones de movimientos a partir de la segunda Ley de Newton, para los grados de libertad de rotación y traslación, como se describe en la ecuación (12) y (13).

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \vec{g} + \sum_{j=1}^N \vec{F}_{ij} \quad (12)$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^N \vec{M}_{ij} \quad (13)$$

Donde m_i es la masa de la partícula, \vec{v}_i es su velocidad, \vec{F}_{ij} es la fuerza de contacto que ejerce j sobre i , I_i es la inercia de la partícula i , $\vec{\omega}_i$ es su velocidad de rotación y \vec{M}_{ij} es el momento de contacto.

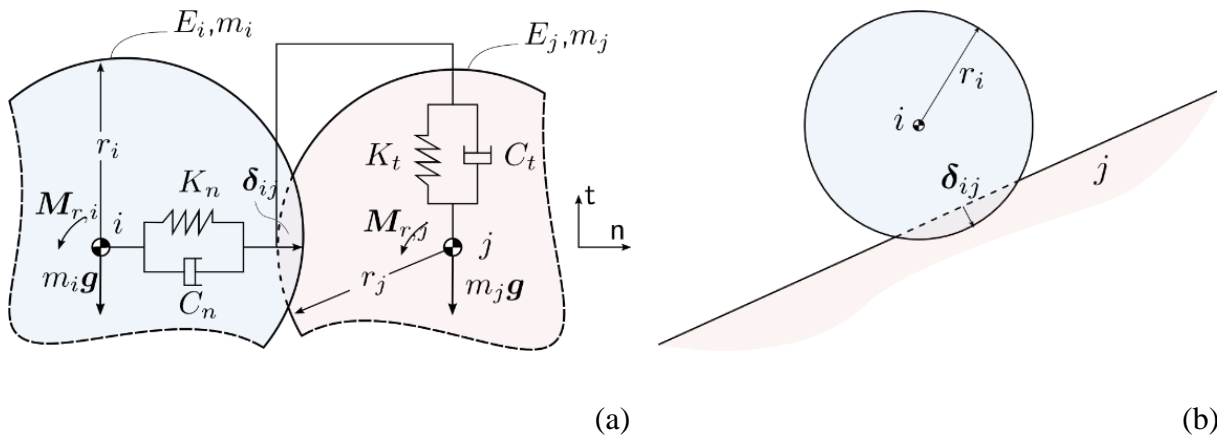


Figura 4.1: Modelo masa, resorte y amortiguador. (a) Interacción partícula - partícula. (b) Interacción partícula y pared [10].

4.2 Modelos de contacto

Las fuerzas de contacto en un modelo numérico por el método de elementos discretos se constituyen de cuatro partes [37].

- i. Fuerzas normales al plano de contacto.
- ii. Fuerzas tangenciales al plano de contacto.
- iii. Fuerza normal de adhesión.
- iv. Resistencia a la rodadura

Para partículas esféricas, el plano de contacto es perpendicular a la línea que une los centros de dos esferas. En el caso de contacto partícula y pared, la línea conecta el centro de una esfera y el punto más cercano de un triángulo que forma un límite.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizará los siguientes modelos de contacto: modelo de Hertz para fuerza normal, modelo de Midlin-Deresiewicz para fuerza tangencial, resistencia a la rodadura Tipo C: Límite de rodadura de resorte lineal y modelo de puente líquido para fuerzas adhesivas.

4.2.1 Modelo de contacto normal

La fuerza normal ocurre experimentalmente por la deformación en la zona de contacto e incluye efectos elásticos, plásticos y viscosos. Por otra parte, no se puede describir el contacto entre partículas sin una fuerza normal, debido a que la fuerza normal es obligatoria.

4.2.1.1 Modelo de Hertz-Deresiewicz

El modelo *Hertzian spring-dashpot* está basado en la Teoría de Hertz [38], el cual es un modelo más avanzado y refinado al propuesto por Cundall y Strack [39] *spring-dashpot*. La principal diferencia es que tanto los componentes elásticos como los de amortiguamiento son funciones no lineales. La fuerza se describe como:

$$F_n = \hat{K}_H s_n^{\frac{3}{2}} + \hat{C}_H s_n^{\frac{1}{4}} \dot{s}_n \quad (14)$$

Donde \hat{K}_H es el factor de rigidez, que se define en la ecuación 8.

$$\hat{K}_H = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (15)$$

E^* es el módulo de elástico reducido, definido por la expresión presentada en la ecuación 9.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (16)$$

Donde, E_1 y E_2 son los módulos de Young de los elementos que están interactuando o están en contacto, es decir, entre partícula- partícula o partícula-pared. Además, ν_1 y ν_2 los coeficientes de Poisson, respectivamente.

Por otra parte, R^* se define como el radio efectivo o equivalente, como se muestra en la ecuación (17).

$$\frac{1}{R^*} = \begin{cases} \frac{2}{L_1} + \frac{2}{L_2} & \text{colisión entre partícula - partícula} \\ \frac{2}{L} & \text{colisión entre partícula - pared} \end{cases} \quad (17)$$

Donde, L_1 y L_2 son el tamaño de las partículas involucradas en la colisión partícula-partícula en la colisión, y L es el tamaño de la partícula, en la colisión partícula-pared.

También otra de las variables que se describe en la ecuación (14), se encuentra el coeficiente de amortiguamiento propuesto por [40], el cual es similar al propuesto para el modelo *linear spring-dashpot*. El coeficiente se calcula como se muestra en la ecuación (18).

$$\hat{C}_H = 2\eta_H \sqrt{m^* \cdot \hat{R}_H} \quad (18)$$

Donde, m^* es la masa efectiva definida como

$$\frac{1}{m^*} = \begin{cases} \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} & \text{para el contacto partícula - partícula} \\ \frac{1}{m} & \text{para el contacto partícula - pared} \end{cases} \quad (19)$$

Además, la razón de amortiguamiento se determina con la ecuación (20).

$$\eta_H = \frac{\sqrt{5}}{2} \eta \quad (20)$$

El valor η se determina a partir de la resolución de la ecuación (21), la cual permite relacionar el coeficiente de restitución entre dos materiales y la relación de amortiguamiento.

$$\varepsilon = \begin{cases} \exp \left[-\frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \left(\pi - \arctan \frac{2\eta\sqrt{1-\eta^2}}{1-2\eta^2} \right) \right] & \text{para } 0 \leq \eta < \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \exp \left(-\frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \arctan \frac{2\eta\sqrt{1-\eta^2}}{2\eta^2-1} \right) & \text{para } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq \eta \leq 1 \\ \exp \left(-\frac{\eta}{\sqrt{\eta^2-1}} \ln \frac{\eta + \sqrt{\eta^2-1}}{\eta - \sqrt{\eta^2-1}} \right) & \text{para } \eta > 1 \end{cases} \quad (21)$$

4.2.2 Modelo de contacto tangencial: Midlin-Deresiewicz

El modelo de contacto de Midlin-Deresiewicz [41], propone un modelo para el cálculo de las fuerzas tangenciales, las cuales ayudan a representar las fuerzas de fricción entre un mismo o varios materiales al momento de interactuar. La fuerza se describe en la ecuación (22).

$$F_\tau = -\mu F_n \left(1 - \zeta^{\frac{3}{2}} \right) \frac{s_\tau}{|s_\tau|} + \eta_\tau \sqrt{\frac{6\mu m^* F_n}{s_{\tau, \max}}} \zeta^{\frac{1}{4}} \dot{s}_\tau \quad (22)$$

$$\zeta = 1 - \frac{\min(|s_\tau|, s_{\tau,max})}{s_{\tau,max}} \quad (23)$$

Donde,

- μ es el coeficiente de fricción.
- F_n es la fuerza normal.
- s_τ es el desplazamiento tangencial relativo en el contacto.
- \dot{s}_τ es la componente tangencial de la velocidad relativa en el contacto.
- m^* es la masa efectiva, que se obtiene de la ecuación (19).

η_τ es el coeficiente tangencial de amortiguación, el cual se estima a partir de la ecuación (24).

$$\eta_\tau = -\frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \quad (24)$$

Donde, ε es el coeficiente de restitución

Por otro lado, $s_{\tau,max}$ es el desplazamiento tangencial relativo máximo, el cual se determina a partir de la ecuación (25).

$$s_{\tau,max} = \mu \left(\frac{1 - \nu_1}{2 - \nu_1} + \frac{1 - \nu_2}{2 - \nu_2} \right)^{-1} s_n \quad (25)$$

ν_1 y ν_2 son los coeficientes de Poisson de la partícula y las paredes, respectivamente. Además, s_n es el traslapo en la dirección normal.

4.2.3 Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura es un parámetro que se introduce en el modelo que se opone al movimiento de rodadura de la partícula. Esto permite de forma práctica incorporar la no esfericidad, rugosidad o irregularidad de la superficie de una partícula esférica. Uno de los modelos del modelo numérico u ofrecido por el software Rocky es el modelo de rodadura tipo C: Límite a la rodadura de resorte lineal [42]. El modelo establece la siguiente ecuación para determinar la rigidez a la rodadura

$$K_r = R_r^2 K_\tau \quad (26)$$

Donde, K_τ es la rigidez tangencial, y R_r es el radio de rodadura, que se obtiene de la siguiente ecuación (27).

$$\frac{1}{R_r} = \begin{cases} \frac{1}{|\mathbf{r}_{p,i}|} + \frac{1}{|\mathbf{r}_{p,j}|}, & \text{para contacto partícula - partícula} \\ \frac{1}{|\mathbf{r}|}, & \text{para contacto partícula - paredes} \end{cases} \quad (27)$$

$\mathbf{r}_{p,i}$ y $\mathbf{r}_{p,j}$ corresponden a los radios de rodadura de las partículas en contacto, mientras que \mathbf{r} es el radio de rodadura de la partícula que está en contacto con la pared. El radio de rodadura se define

como el vector que une el centroide de una partícula y el punto de contacto en un tiempo en específico.

Si la resistencia a la rodadura es puramente elástica, se determina como se muestra en la ecuación (28).

$$M_{r,e}^t = M_r^{t-\Delta t} - K_r \omega_{rel} \Delta t \quad (28)$$

Donde,

- $M_r^{t-\Delta t}$ es el vector de resistencia a la rodadura en el instante de tiempo $t - \Delta t$ (instante previo).
- K_r es la rigidez de la rodadura.
- Δt es el paso de tiempo.
- ω_{rel} es la velocidad angular relativa entre las partículas o entre la partícula-pared, la que se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\omega_{rel} = \begin{cases} \omega_i - \omega_j \\ \omega_i \end{cases} \quad (29)$$

La magnitud del momento o resistencia a la rodadura esta limitada en magnitud cuando se logra un ángulo de rodadura de movilización completa, el cual se determina con la ecuación (30).

$$M_{r,lim} = \mu_r r_r F_n \quad (30)$$

Dónde,

- μ_r es el coeficiente de fricción por rodadura
- r_r es el radio de rodadura
- F_n es la fuerza normal de contacto

Finalmente, el momento de resistencia a la rodadura se define como:

$$M_r^t = \min(|M_{r,e}^t|, M_{r,lim}) \frac{M_{r,e}^t}{|M_{r,e}^t|} \quad (31)$$

4.2.4 Fuerzas adhesivas

Las fuerzas de adhesión utilizadas son las del modelo de puente líquido del software de Ansys Rocky, el cual representará la formación de glómeros o partículas de mayor tamaño en el proceso de aglomeración. A continuación, se presentan las ecuaciones y metodología de cálculo que representa el modelo de puente líquido [43].

El modelo de puente líquido calcula las fuerzas capilares y viscosas que actúan sobre las partículas debido a la presencia de puentes líquidos intersticiales. Se forma un puente líquido cuando las partículas húmedas se acercan entre sí o hasta un límite, como se muestra en las Figura 4.2.

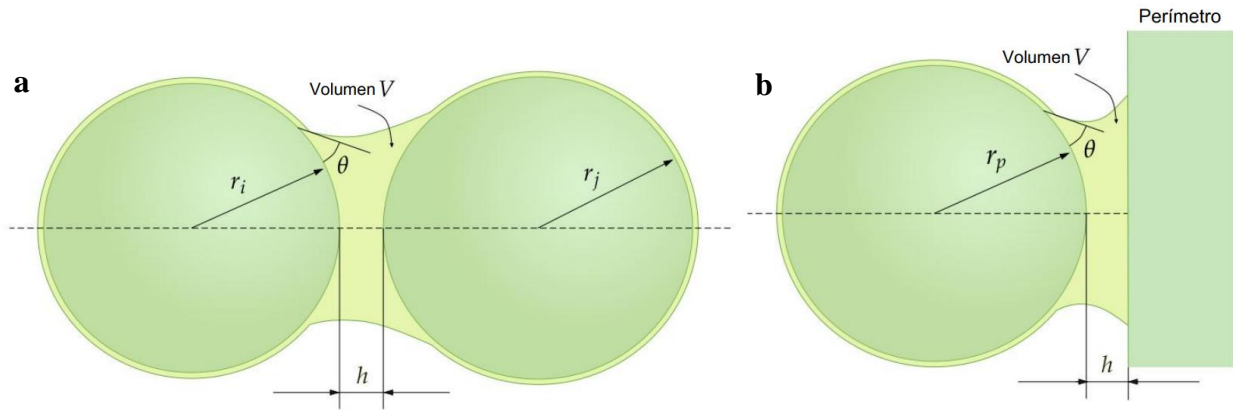


Figura 4.2: Figura (a), puente líquido formado por dos partículas. Figura (b), puente líquido formado por partícula y pared.

Fuente: [43]

Un puente líquido ejerce una fuerza capilar de atracción sobre las partículas. Para un puente entre dos partículas, la magnitud de esta fuerza viene dada por la expresión [44]:

$$F_c = \pi\gamma r_g [\exp(A\hat{h} + B) + C] \quad (32)$$

Donde γ es la tensión superficial, $r_g = \sqrt{r_i r_j}$ es la media geométrica de los radios de las dos partículas y \hat{h} es la distancia de separación adimensional entre las partículas. Además, A, B y C son coeficientes que dependen del volumen adimensional del puente líquido \hat{V} y del ángulo de contacto θ , mediante las siguientes expresiones:

$$A = -1.1\hat{V}^{-0.53} \quad (33)$$

$$B = (-0.34 \ln \hat{V} + 0.96)\theta^2 - 0.019 \ln \hat{V} + 0.48 \quad (34)$$

$$C = 0.0042 \ln \hat{V} + 0.78 \quad (35)$$

Los parámetros adimensionales incluidos en las expresiones anteriores se definen a través las siguientes expresiones:

$$\hat{h} = h/r_m \quad (36)$$

$$\hat{V} = V_b/r_m^3 \quad (37)$$

Donde h es la distancia de separación entre las partículas puenteadas, como se muestra en la Figura 4.2, y V_b es el volumen del líquido contenido en el puente. Además, r_m se define como:

$$r_m = \max(r_i, r_j) \quad (38)$$

Donde r_i y r_j son los radios de ambas partículas. Para partículas no esféricas, el radio de cada partícula se toma como la mitad de su tamaño del tamiz.

El volumen del puente líquido se calcula como:

$$V_b = f_b(V_{l,i} + V_{l,j}) \quad (39)$$

Donde $V_{l,i}$ y $V_{l,j}$ son los volúmenes de las películas líquidas alrededor de las dos partículas respectivamente, los cuales se definen como:

$$V_{l,i} = \frac{m_{l,i}}{\rho_{l,i}} \quad (40)$$

$$V_{l,j} = \frac{m_{l,j}}{\rho_{l,j}} \quad (41)$$

Donde $m_{l,i}$ y $m_{l,j}$ son las masas líquidas, $\rho_{l,i}$ y $\rho_{l,j}$ son las densidades de las películas líquidas alrededor de las dos partículas. Además, $f_b < 1$ es un parámetro definido por el usuario, como la fracción de volumen del puente líquido.

En [44] proporcionan expresiones para los coeficientes de la ecuación (26) correspondientes a un puente líquido entre una partícula y un límite o pared, como el que se muestra en la Figura 4.2. Esas expresiones son las siguientes:

$$A = -1.9\hat{V}^{-0.51} \quad (42)$$

$$B = (-0.016 \ln \hat{V} + 0.76)\theta^2 - 0.12 \ln \hat{V} + 1.2 \quad (43)$$

$$C = 0.013 \ln \hat{V} + 0.18 \quad (44)$$

En este caso específico, tanto r_g como r_m son iguales al radio de la partícula que interactúa con el límite r_p . En el modelo “Liquid Bridge” actual en Rocky, los límites no tienen asociada una película líquida. Por lo tanto, en los puentes entre partículas sólo las partículas contribuirán con el líquido a la formación del puente. Esto significa que el volumen del puente en esos casos vendrá dado por:

$$V_b = f_b V_{l,p} \quad (45)$$

Donde, $V_{l,p}$ es el volumen de la película líquida alrededor de la partícula en una interacción de puente entre partículas y límites.

En Rocky, la cantidad de líquido transportado por cada partícula se rastrea a través de una propiedad especial de la partícula llamada Masa Líquida. Esta propiedad se puede visualizar y post-procesar una vez completada la simulación.

La masa de las películas líquidas adheridas a las partículas puede variar a lo largo de una simulación porque puede redistribuirse cuando finaliza una interacción de puente entre partículas. Cuando se rompe un puente líquido entre dos partículas, la mitad de la masa de líquido que estaba contenida en el puente se suma a la masa líquida asociada a cada partícula. Por otro lado, cuando se rompe un puente entre partículas, toda la masa líquida va a la partícula, ya que las paredes no son capaces de retener películas líquidas en el modelo actual implementado en Ansys Rocky.

El criterio para la rotura de un puente líquido se basa únicamente en el valor de la distancia de separación h . Cuando esa distancia supere un valor crítico h_c , el puente líquido se romperá, finalizando la interacción del puente. Rocky utiliza las siguientes expresiones para la distancia crítica adimensional:

Para puente líquido entre partículas:

$$\hat{h}_c = (0.62\theta + 0.99)\hat{V}^{0.34} \quad (46)$$

Para puente líquido entre límites y partículas:

$$\hat{h}_c = (0.22\theta + 0.95)\hat{V}^{0.32} \quad (47)$$

Además de las fuerzas capilares, el modelo incluye fuerzas viscosas que se oponen al movimiento relativo entre partículas o entre partículas y su límite, unidos por un puente. Las fuerzas utilizadas para esas fuerzas viscosas vienen de [45]. A diferencia de la fuerza capilar que actúa siempre en dirección normal, las fuerzas viscosas tienen una componente normal y una tangencial. Las expresiones para estas componentes son, respectivamente:

$$F_{\mu,n} = -6\pi\mu R * v_n^{rel}\hat{r} \quad (48)$$

$$F_{\mu,t} = -6\pi\mu R * v_t^{rel}\hat{r} \left(\frac{8}{15} \ln \hat{r} + 0.9588\right) \quad (49)$$

Donde,

- μ es la viscosidad absoluta del líquido.
- R es el radio equivalente, definido como:

$$\frac{1}{R} = \begin{cases} \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} & \text{puente entre partículas} \\ \frac{1}{r_p} & \text{puente entre partículas y paredes} \end{cases} \quad (50)$$

- v_n^{rel} y v_t^{rel} son las componente normal y tangencial de la velocidad relativa en relación con el plano medio entre las dos partículas o partícula y límite.
- \hat{r} es el radio equivalente adimensional, definido como:

$$\hat{r} = \frac{R^*}{h} \quad (51)$$

El signo menos de las ecuaciones (42) y (43) indica que las fuerzas viscosas se oponen al movimiento relativo. Como consecuencia, la fuerza viscosa normal se comportará como fuerza de repulsión cuando las partículas se aproximen entre sí, y como la fuerza de atracción cuando se alejen.

A medida que la separación h disminuye a cero, ambas componentes de la fuerza viscosa tienden a infinito. Para evitar problemas de estabilidad causado por fuerzas muy grandes, Ansys Rocky utiliza

un valor límite para la distancia de separación como relación de separación mínima. Si f_{min} es el valor del parámetro, el valor de corte para la separación estará dada por:

$$h_{min} = \begin{cases} f_{min}r_m & \text{puente entre partículas} \\ f_{min}r_p & \text{puente entre partículas y paredes} \end{cases} \quad (52)$$

Siempre que la distancia de separación sea menor que h_{min} , se utilizarán las ecuaciones (36) y (51).

4.2.5 Análisis de sensibilidad de las fuerzas adhesivas por puente líquido.

A partir del modelo de *liquid bridge*, existen 2 parámetros no físicos, que son asignados por el usuario y tienen una incidencia en la fuerza capilar entre las partículas y paredes. Estos parámetros corresponden a la fracción o porcentaje de aporte de líquido de la partícula al puente líquido y la distancia de separación partícula - partícula o partícula-pared.

En la Figura 4.3 y Figura 4.4 se realiza un análisis de sensibilidad de cada uno de estos parámetros, para comprender y dimensionar el efecto ocasionado en la fuerza capilar. A partir de la superficie generada y el mapa de color, tenemos que la fuerza capilar aumenta cuando la superficie adquiere una tonalidad roja, mientras que disminuye su valor adquiriendo un color azul. La fuerza capilar aumenta con mayor intensidad a medida que disminuye la distancia de separación entre las superficies de forma exponencial. Por otra parte, el aporte de líquido tiene una incidencia importante en la fuerza capilar cuando su valor oscila entre 0 y 20%, a menor volumen es la fuerza capilar, hasta llegar a máximo. Un aporte de líquido mayor al 20% no tiene incidencia en la fuerza capilar, su valor es se mantiene constante.

Finalmente, el ángulo de contacto solo desplaza la superficie generada en el gráfico, a mayor ángulo de contacto disminuye la fuerza capilar y viceversa.

Gráfico 3D: Relación entre la separación y volumen de aporte al puente. Ángulo de 30°

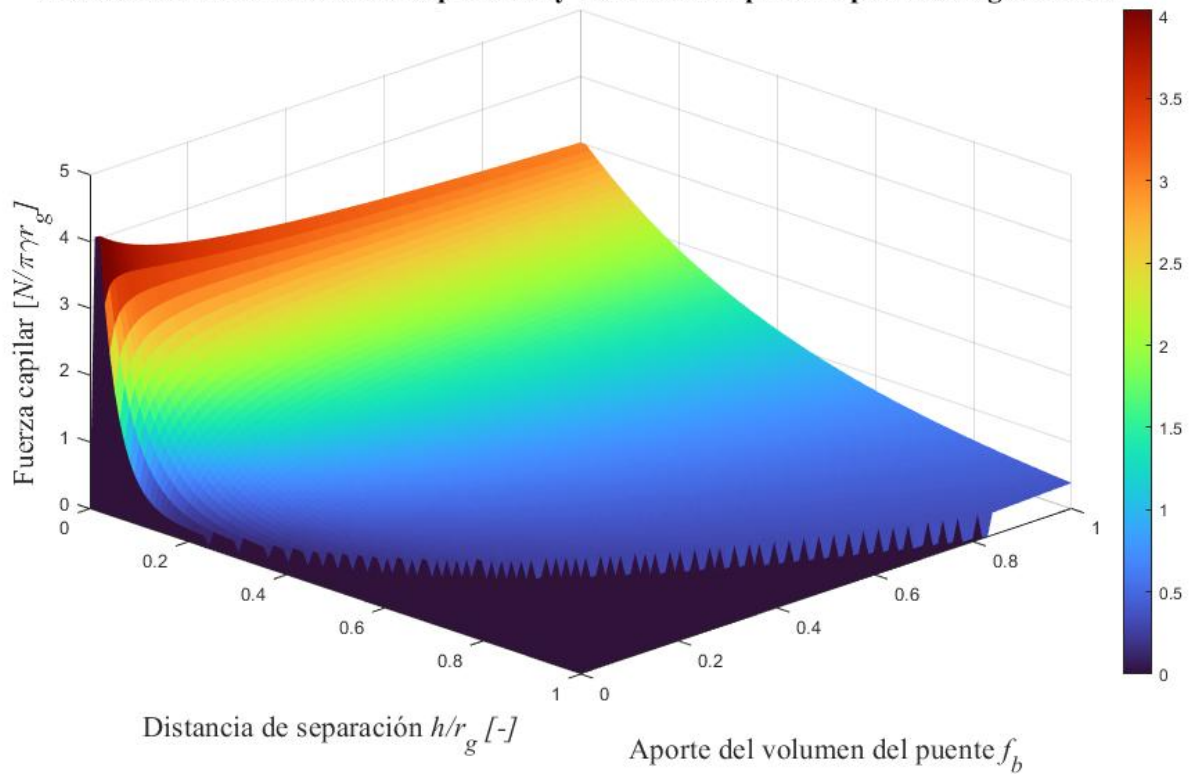


Figura 4.3. Análisis de sensibilidad del modelo de puente líquido.

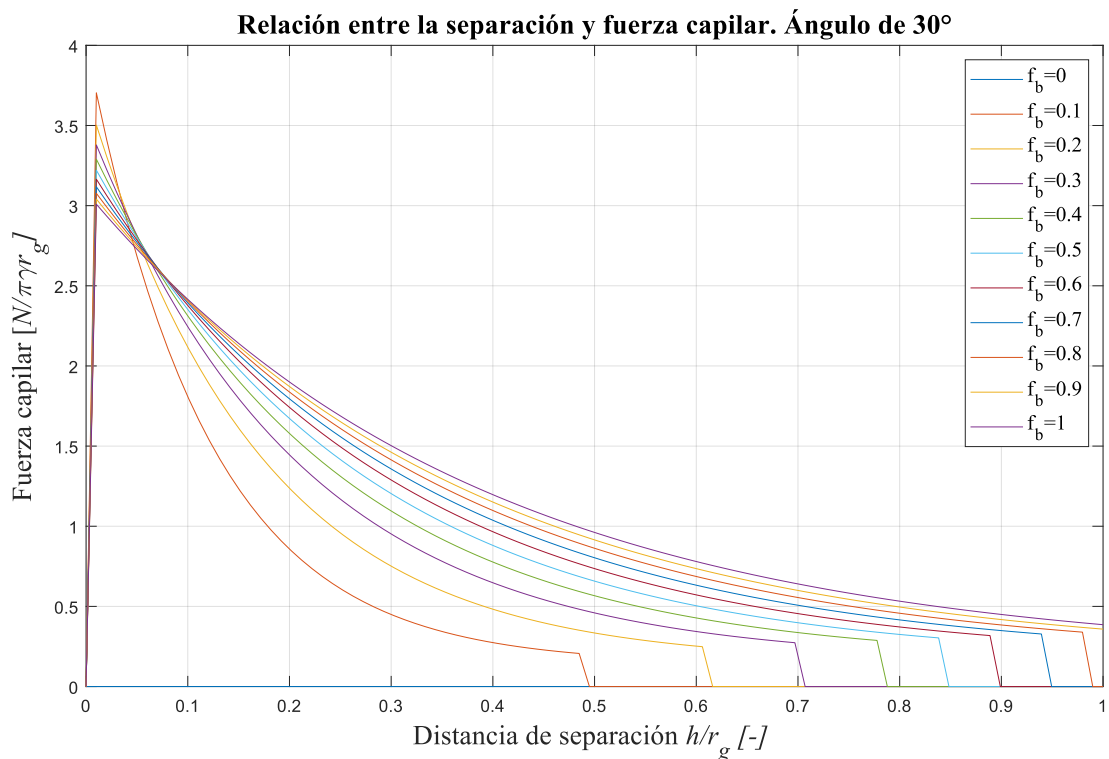


Figura 4.4. Gráfico entre la relación entre distancia de separación de las partículas y fuerza capilar.

4.2.6 Paso de tiempo

Para determinar el paso de tiempo se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

- i. Si Δt es muy grande, la velocidad de transferencia de energía en el sistema es incorrecta
- ii. El traslapo no puede exceder un cierto límite (según el manual de usuario 0,5% [37]), porque el traslapo δ representa la energía almacenada en la deformación de la partícula y elegir Δt demasiado grande conduce a una generación de energía no física en el sistema.
- iii. Para reducir el tiempo de cálculo o simulación, Δt debe ser lo suficientemente grande.

Se puede calcular con la frecuencia natural de la partícula más pequeña:

$$\Delta t_{crit,\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m_{mín}}{K_n}} \quad (53)$$

Este tiempo se puede simplificar a:

$$\Delta t = 0.1 \sqrt{\frac{m_{mín}}{K_n}} \quad (54)$$

Por la frecuencia de onda de Rayleigh

$$\Delta t_{crit,R} = 2\pi \frac{\pi r_{mín}}{0,1631\nu + 0.8766} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (55)$$

Paso de tiempo de Hertz:

$$\Delta t_{crit,H} = 2.87 \left(\frac{\bar{m}^2}{\bar{r} \bar{E}^2 v_{máx}} \right)^{0.2} \quad (56)$$

Por otra parte, una práctica usual para acelerar simulaciones DEM es disminuir el módulo de Young E , debido a que permite Δt mayores, pero las fuerzas de contacto no son representativas. Lo mínimo es cercano a $E = 5 \cdot 10^5 [Pa]$.

Capítulo 5: Metodología para implementación de un modelo numérico por el método de elementos discretos.

En este capítulo, se propone una metodología para el diseño de un modelo numérico utilizando el método de elementos discretos para un tambor aglomerador industrial. Basándose en la investigación desarrollada en [1], se destaca la importancia de explorar nuevos enfoques que permitan reducir los tiempos de simulación y mejorar la precisión de un modelo numérico de un tambor aglomerador a gran escala. Por lo tanto, en este capítulo se busca establecer criterios que faciliten una representación adecuada de un tambor aglomerador, teniendo en cuenta los múltiples parámetros que influyen en el proceso de aglomeración, buscando un equilibrio entre tiempos de simulación y precisión de los resultados obtenidos en las simulaciones.

5.1 Caso en estudio: Tambor aglomerador

El desarrollo de este trabajo se realiza a partir de un caso de la industria, particularmente el desarrollado por [22], quien estudió el torque motriz de un tambor aglomerador de la minera BHP SPENCE. La minera Spence está ubicada en la comuna de Sierra Gorda, región de Antofagasta, en el kilómetro 62 de la ruta 25, a 1.750 msnm.

Las especificaciones técnicas que posee el equipo son: 4.8 m de diámetro interno, 16.3 m de largo y posee un ángulo de inclinación de 6.5° . Su capacidad nominal es 2800 ton/h. el rango de velocidad de rotación es entre 4 a 7 rpm. En la Figura 5.1, la imagen de la izquierda presenta una vista aérea de la minera, mientras que la imagen de la derecha exhibe el equipo en estudio.



Figura 5.1: Imagen a la izquierda, minera BHP Spence. Imagen a la derecha, tambor aglomerador en estudio.

Fuente: [22]

Tabla 2: Características del equipo.**Fuente:** [46]

Características	Valor	Unidad
Dimensiones del tambor aglomerador	4.6 x 16.3	m
Capacidad nominal	2800	ton/h
Tiempo de aglomeración a capacidad nominal	60	s
Humedad del aglomerado	5	%
Inclinación	6.5	°
Rango de velocidad	4 a 7	RPM
Aglutinante utilizado y concentración	Ácido sulfúrico 98%	-
Ángulo de reposo del mineral seco	38	°
Caudal de ácido y de refino	17 y 16 kg/ton para óxido y 7 y 35 para sulfuro	kg/ton

Tabla 3: Características del motor tambor aglomerador Spence.

Características	Valor	Unidad
Tipo de motor	Jaula de ardilla	-
Potencia nominal al eje	597	kW
Frecuencia	50.2	Hz
Velocidad	1500.1	RPM
Torque nominal	3800	Nm
Eficiencia	97.2	-
Sentido de giro	Bidireccional	-

5.2 Simplificación del equipo

En trabajos previos [1], una de las dificultades que se presentó fue la relación entre el tamaño del equipo y la cantidad de partículas a generar. Para el desarrollo del modelo numérico DEM para un tambor aglomerador industrial, se considerará una sección del tambor, de tamaño lo suficientemente reducido para reducir la cantidad de partículas y dominio de cálculo del programa. Pero, lo suficientemente grande para que pueda entrar las partículas de mayor tamaño, y, además, la formación de glómeros, según la distribución de tamaño del mineral (PSD).

El enfoque de esta investigación es obtener resultados en términos de potencia y torque motriz. Aunque la simplificación estructural del tambor no permitirá obtener directamente los resultados de potencia para un tambor a gran escala, proporcionará una muestra representativa del comportamiento del material y de la potencia requerida. A partir de la metodología de cálculo de las interacciones entre partículas y su entorno, empleando el método de elementos discretos, se podrá calcular la potencia del tambor a gran escala mediante la integración de los resultados obtenidos en la muestra a lo largo de toda la geometría del tambor. De esta manera, se estimarán la potencia y el torque demandados por el equipo a gran escala de forma más precisa.

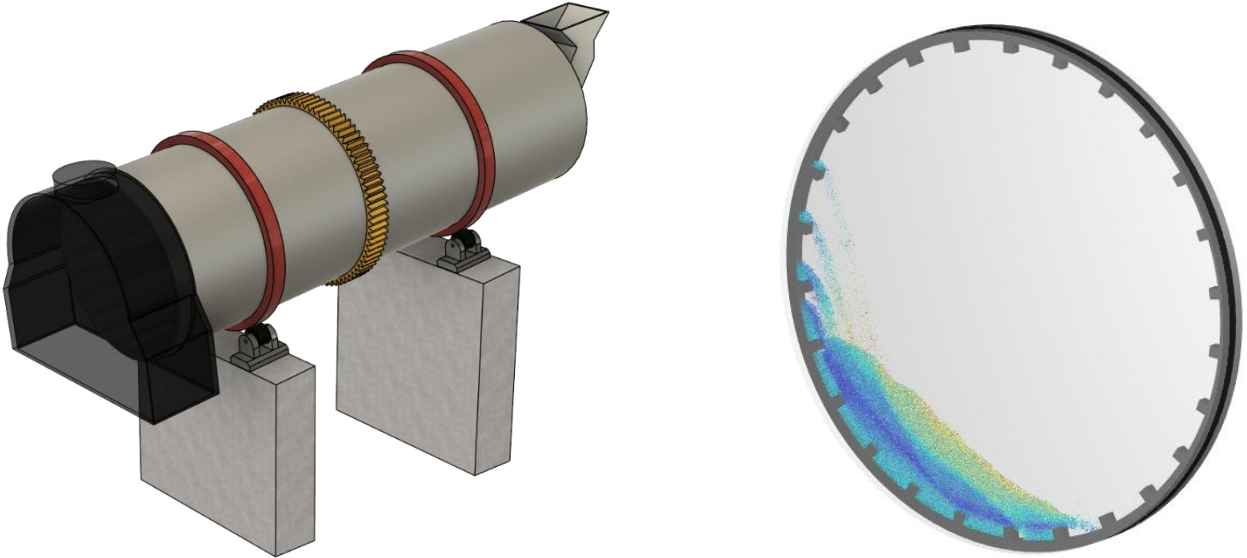


Figura 5.2: Simplificación de la geometría en la formulación de un modelo numérico DEM. Imagen derecha, geometría de tambor aglomerador industrial Spence. Imagen izquierda, simplificación de la geometría de un tambor aglomerador.

5.3 Granulometría del material

En el estudio desarrollado por Guzmán [46], se menciona que la granulometría de trabajo para el tambor aglomerador es 98% bajo 19 [mm] y 92% bajo 12,7 [mm]. A partir de los datos entregados por el autor, se genera a partir de la ecuación de Rosin-Ramler la curva granulométrica del mineral de cobre en la minera BHP SPENCE.

En la Figura 5.3, se muestran los resultados del porcentaje acumulado dependiendo del tamaño del mineral. Considerando la curva granulométrica y modelo numérico DEM, es necesario establecer un diámetro mínimo de partículas para disminuir la cantidad de partículas generada por el modelo.

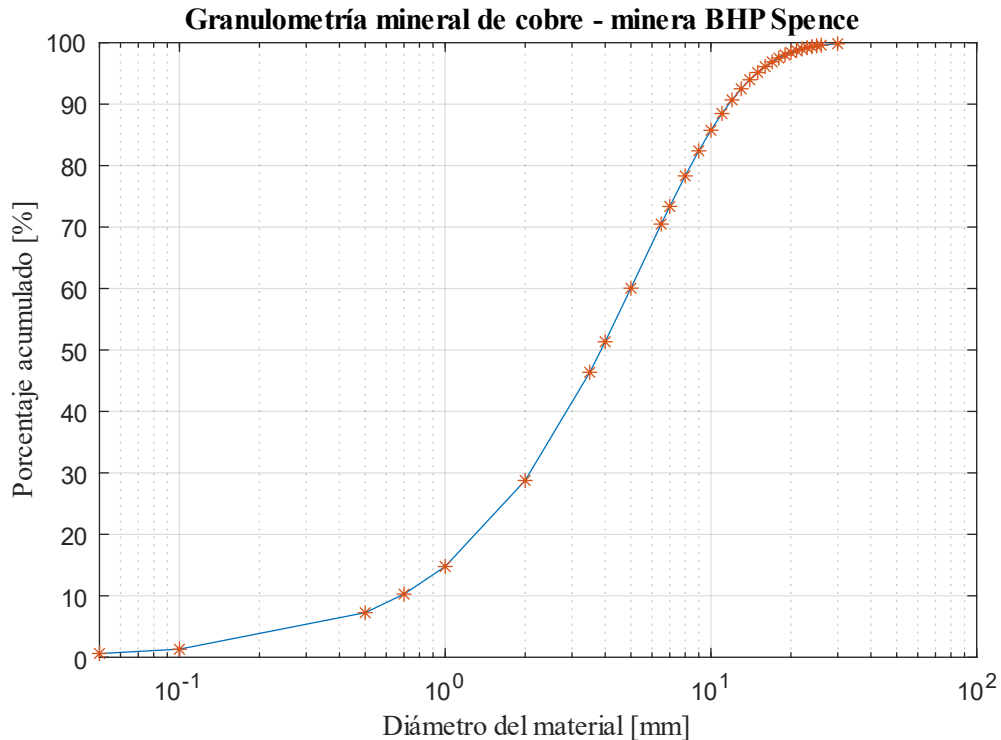


Figura 5.3: Granulometría del mineral de cobre de la minera BHP SPENCE.

5.4 Análisis de sensibilidad

En el Capítulo 2, se detallaron algunos de los parámetros o variables incidentes en la aglomeración de un tambor. Por esta razón, se realizarán múltiples simulaciones con el objetivo de analizar cómo se afectan la potencia, la fuerza radial (eje y), el ángulo de reposo y la distribución de humedad en el interior de un tambor. El análisis de sensibilidad se enfocará en dos variables clave: velocidad de rotación y el grado de llenado del tambor. En la Tabla 4, se muestra un resumen y denominación a cada una de las simulaciones que se realizarán dependiendo de la condición de operación del tambor en la simulación DEM. Se asigna la letra ω_i para referirse a la velocidad de rotación y f_j para referirse al grado de llenado.

Tabla 4: Condiciones de operación del tambor aglomerador para la simulación DEM.

Condición	Grado de llenado		
	8%	10%	12%
5 [rpm]	$\omega_1 f_1$	$\omega_1 f_2$	$\omega_1 f_3$
6 [rpm]	$\omega_2 f_1$	$\omega_2 f_2$	$\omega_2 f_3$
7 [rpm]	$\omega_3 f_1$	$\omega_3 f_2$	$\omega_3 f_3$

Capítulo 6: Desarrollo del modelo numérico

En este capítulo se detalla las configuraciones utilizadas en el modelo DEM, detallando los parámetros utilizados en la simulación del tambor a gran escala. Estos parámetros fueron definidos a partir de un proceso previo de búsqueda bibliográfica, calibración y simulaciones.

6.1 Geometría

Para el desarrollo del modelo o representación del equipo en estudio, el tambor aglomerador de la minera BHP Spence se modela en el programa Inventor, con el objetivo de generar una frontera límite de interacción con las partículas, como se muestra en la Figura 6.1, el cual consta de 3 partes: tambor, tapa frontal y tapa trasera. En la Tabla 5, se muestra cada una de las dimensiones utilizadas para el diseño de la geometría.

Tabla 5: Dimensiones del tambor real.

Variable	Valor
Diámetro externo del tambor	4.6 [m]
Diámetro interno del Tambor	4.5 [m]
Lifters (levantadores)	0.1 X 0.1 [m]
Largo del tambor	0.1 [m]

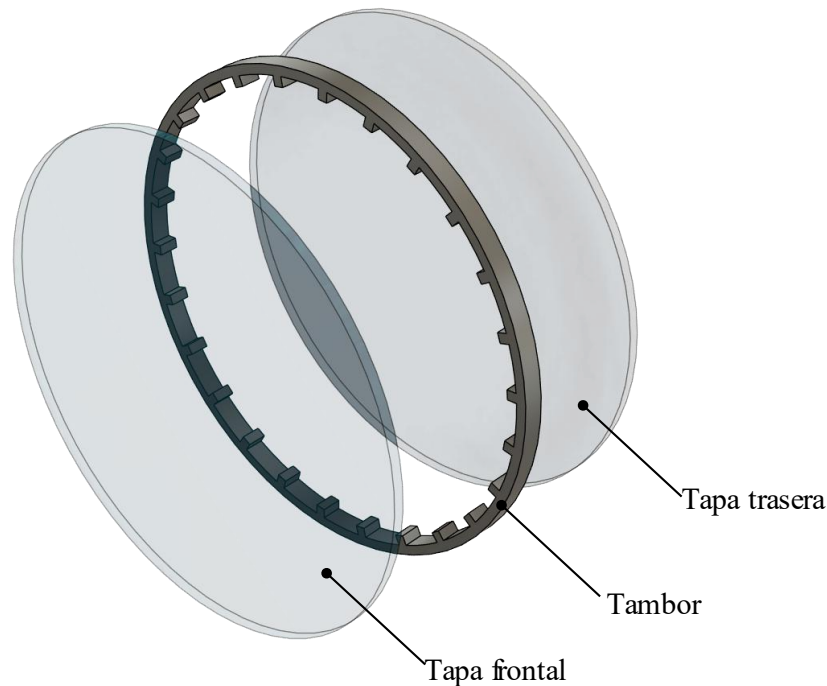


Figura 6.1: Geometría simplificada del tambor aglomerador para su simulación.

6.2 Software y hardware

Para el desarrollo de este proyecto de investigación las simulaciones se desarrollaron el software ANSYS Rocky 2024 R1.1 en un computador del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción. Las características técnicas del computador se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Características del computador utilizado para simulación.

Componente	Detalle
Procesador	Intel Core i7-i7-12700F
Memoria RAM	64 GB
Tarjeta grafica	2 x NVIDIA Quadro A2000 (16 y 12 GB)
Disco duro	SSD 2TB

El tiempo de ejecución para llevar a cabo la simulación fue de aproximadamente de 10 días, para obtener como resultado, un tiempo de 60 segundos de simulación. Además, se desarrollaron simulaciones de prueba y de verificación de parámetros.

6.3 Condiciones de simulación

Se genera el movimiento del tambor aglomerador, asignando un *motion frame* de rotación al cuerpo del tambor.

Como se describió anteriormente, el equipo de aglomeración posee un grado de inclinación, el cual permite el movimiento de las partículas axialmente. Para el caso de la simulación, se considera el análisis del flujo de material de forma axial y transversal.

Caso I: Se realiza el análisis el comportamiento del material de la sección transversal del tambor, para ello se consideran 9 casos, donde se analiza el comportamiento de este cuando hay variación de grado de llenado y velocidad de giro. Para ello, se considera solo la rotación del tambor y una aceleración (aceleración de gravedad) de $9,8 \text{ m/s}^2$ para el eje y , sin considerar la inclinación de este ya que solo provocara el movimiento de forma axial del tambor.

Caso II: Se realiza un análisis del comportamiento del material axialmente en el tambor, específica. Este análisis permitiría poder determinar la precisión del modelo para el tiempo de residencia del material al interior del tambor. En efecto, se realiza una descomposición de la aceleración de gravedad en el eje x e y , con la finalidad de representar de forma simple la inclinación del tambor industrial, esto quiere decir que el valor de cada componente será de 1.110 y 9.747 m/s^2 para el eje x e y , respectivamente.

6.4 Partículas

Guzman [46] menciona que “*se considera una operación normal aquella que proporciona un flujo promedio de 3.109 ton/h de mineral, obteniendo un producto de granulometría esperada de 98% bajo 19 mm y 92% bajo 12,7 mm*”. De acuerdo a lo citado anteriormente, se genera la granulometría de las

partículas utilizadas en el modelo numérico, la cual se muestra en la Tabla 7. Además, se utiliza una geometría esférica, como se muestra en la Figura 6.2.

Tabla 7: Granulometría utilizada en el modelo DEM.

Diámetro de la partícula [mm]	Porcentaje acumulado [%]
25	100
15	95.2
10	85.8
6	67.3

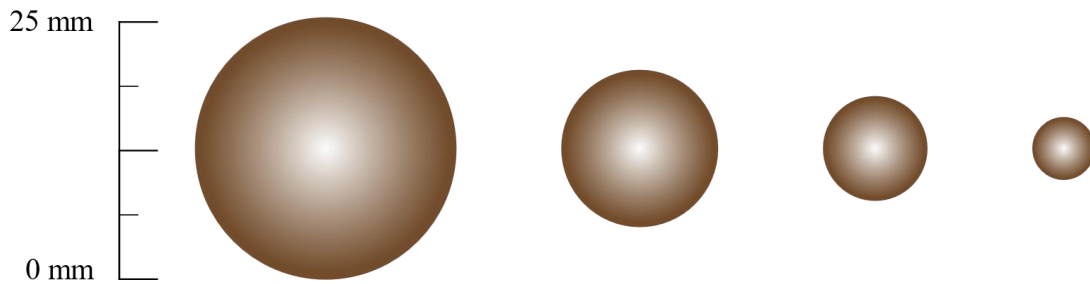


Figura 6.2. Geometría y tamaño de la partícula para la representación del mineral de cobre.

6.5 Propiedades de los materiales

A continuación, se detallan las propiedades de cada uno de los materiales utilizados para el modelo. Las propiedades que se detallaran son: densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson, módulo de corte, características del modelo de puente líquido.

Tavares et al. [47] realizó un estudio de chancadores con mineral de cobre en donde utilizo una relación del módulo de elasticidad entre acero y mineral de cobre de 1/10. El autor menciona que esto hace posible una división adecuada de la energía entre los elementos involucrados en los contactos. Estos valores están en el orden de magnitud de los materiales, tal como menciona Delaney et al. [48] la rigidez de la roca en una simulación de trituradora debe ser bastante realista de la del material y no debe reducirse artificialmente para acelerar una simulación, ya que esto puede generar resultados alejados a lo experimental.

6.5.1 Propiedades de las partículas y paredes.

En el modelo DEM el material utilizado para representar las propiedades de las paredes del tambor, tapas y receptor se consideran que son de acero ASTM A-36.

Por otra parte, las propiedades del material utilizado en la aglomeración corresponden a mineral de cobre. La Tabla 8 presenta las propiedades del material correspondiente a los elementos mencionados.

Tabla 8: Propiedades de las partículas y paredes.

Propiedades	Magnitud	Unidad
Densidad - paredes	7850	kg/m ³
Módulo de Young - paredes	1000	MPa
Coefficiente de Poisson - paredes	0.3	-
Densidad aparente - partículas	1600	kg/m ³
Módulo de Young - partículas	100	MPa
Coefficiente de Poisson - partículas	0.3	-

6.5.2 Propiedades del fluido

El líquido que se utilizó como intermediario en la fuerza de adhesión fue el agua, con las propiedades que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades del líquido.

Propiedades	Magnitud	Unidad
Densidad	1000	kg/m ³
Viscosidad	0,001	<i>Pa s</i>
Tensión superficial	0.072	N/m
Fracción máxima de líquido	0.01	-

6.6 Interacción entre los materiales

Se establecen los parámetros de contactos entre materiales, los cuales se detallan en la Tabla 10. Los parámetros calibrados en el modelo numérico describen la interacción entre: partícula y partícula, y partícula y paredes (límites).

Tabla 10. Propiedades de interacción entre partícula y paredes.

Propiedades	Magnitud	Referencia
Coefficiente de fricción estática partícula - partícula	0.6	[49] [50]
Coefficiente de fricción dinámica partícula - partícula	0.6	[49] [50]
Coefficiente de fricción estática partícula - pared	0.5	[49] [50] [47]
Coefficiente de fricción dinámica partícula - pared	0.5	[49] [50] [47]
Coefficiente de restitución partícula - partícula	0.4	[51]
Coefficiente de restitución partícula - pared	0.5	[49] [50]
Coefficiente de rodadura	0.33	[49] [50] [47]
Fracción del puente líquido partícula - partícula	0.02-0.05	[35] [21]
Ángulo de contacto partícula - partícula	20°-30°	[35] [21]
Separación de radio mínima partícula - partícula	0.0001	[35] [21]
Fracción del puente líquido partícula - pared	0	Calibrado
Ángulo de contacto partícula - pared	30°	[35] [21]
Separación de radio mínima partícula - pared	0.01	[35] [21]

Como etapa previa a la simulación numérica, se realiza un ensayo denominado ángulo de reposo estático que permite determinar y calibrar los coeficientes de fricción y rodadura, con el propósito de comparar el comportamiento del material experimental y numéricamente.

Con los antecedentes presentados en el ítem 5.1, Guzmán [46] menciona que mineral de cobre experimentalmente tiene un ángulo de reposo de 38° . Se replica este ensayo en el Software Rocky DEM mediante 16 simulaciones, complementado con información obtenida de la literatura. Los resultados obtenidos son un ángulo de reposo de 37.06° lo cual tiene un error de 2.6% con respecto al valor experimental.

Los resultados de la simulación arrojaron un ángulo de reposo de 37.06° , lo que representa un error relativo de 2.47% respecto al valor experimental. En efecto, los resultados indican una adecuada concordancia entre el modelo numérico y el comportamiento real del material. En la Figura 6.3, se presentan los resultados obtenidos, después de realizar un posprocesamiento de los resultados de la simulación en Rocky DEM.

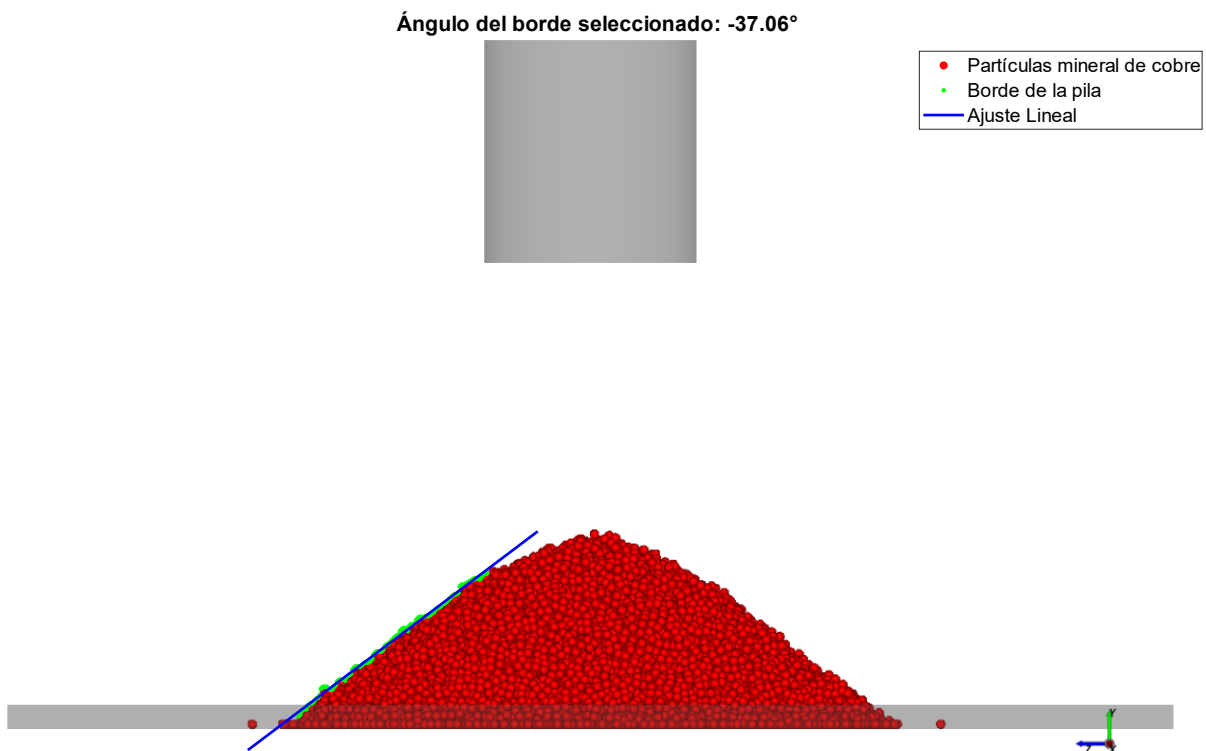


Figura 6.3: Resultado de ensayo de ángulo de reposo mediante simulación DEM.

6.6.1 Grado de llenado y humedad

Como se mencionó en la sección 5.4, se llevarán a cabo 9 simulaciones que contemplan tres grados de llenado diferentes: 8%, 10% y 12%, manteniendo un grado de humedad fija del 8%. Es importante destacar que el modelo de puente líquido implementado en el software no considera directamente la masa del líquido en su metodología de cálculo. Por esta razón, se ajustará la densidad del material (mineral de cobre) para incluir esta masa líquida en los cálculos de los resultados esperados.

Dado que el grado de humedad es constante, la densidad del material se modificará de 1600 kg/m^3 a 1728 kg/m^3 , con la ecuación (3) presentada en el ítem 2.4.2. Este ajuste permite considerar la masa del líquido en la resolución de las ecuaciones de movimiento por el método de elementos discretos, ya que en el software solo se utiliza para calcular las fuerzas. En cada grado de llenado, solo variará la masa de líquido incorporada dentro del tambor, ya que esta está directamente relacionada con la cantidad de material presente en el interior del tambor. De este modo, el modelo reflejará de manera más precisa las condiciones reales del proceso.

Tabla 11: Cantidad de material y humedad según el grado de llenado.

Simulación	Carga [kg]	Humedad [kg]
Grado de llenado 8%	216.3	16.02
Grado de llenado 10%	270.3	20.02
Grado de llenado 12%	324.41	24.04

6.6.2 Zona de ingreso de partículas e inyección de líquido

El modelo DEM contempla una zona de ingreso de mineral en la que, durante un intervalo de tiempo definido, se introduce un flujo másico de partículas. Este flujo permite alcanzar el grado de llenado especificado, y el tiempo asignado para este proceso es de 2 segundos.

Adicionalmente, se incluye una zona de inyección de líquido diseñada para simular la proyección de líquido sobre el material mediante barras rociadoras. Esta zona corresponde a un volumen definido cuyas dimensiones son $0.1 \times 1.2 \times 0.1 \text{ m}$. Durante un periodo de tiempo determinado, este volumen permite aplicar a cada una de las partículas una película de líquido (numéricamente, no de forma visual) al momento de pasar por este volumen de control, las partículas mediante un flujo másico de líquido establecido por el usuario, representando de manera realista el proceso de humectación.

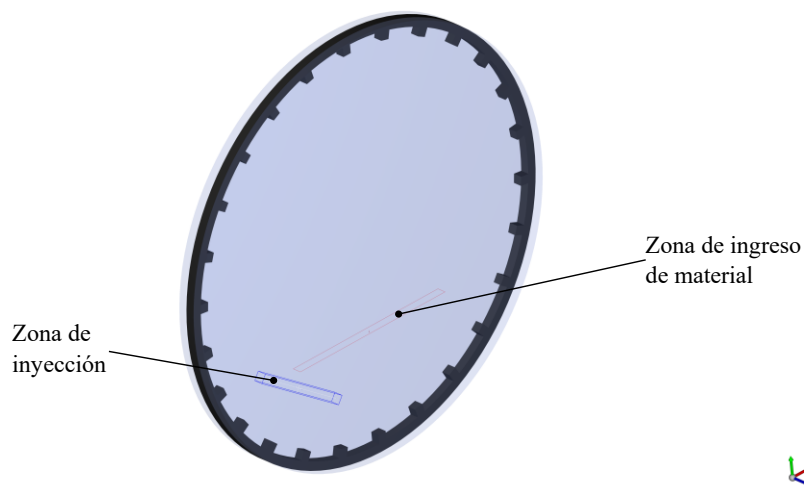


Figura 6.4. Geometría del tambor aglomerador en el modelo DEM, zona de inyección de líquido y volumen de partículas.

Capítulo 7: Resultados del modelo numérico DEM

En este capítulo se presentan los resultados de cada una de las simulaciones realizadas por el método de elementos discretos. Se realiza un análisis de parámetros como el perfil de velocidad del material al interior del tambor industrial, potencia, torque, fuerzas radiales, ángulo de reposo, distribución de humedad y tiempo de residencia.

7.1 Precisión del Modelo numérico

Para determinar la precisión del modelo numérico por el método de elementos discretos en comparación con los resultados experimentales, se realiza una comparación de las potencias RMS en régimen estacionario. Se utilizan los resultados experimentales de potencia y torque unitario⁶ obtenidos en [16] y se comparan con la simulación DEM.

Los resultados obtenidos en [16] corresponden a un tambor de laboratorio de 0.5 m de diámetro y 0.4 de largo, con una velocidad de rotación de 20 rpm, un grado de llenado del 10%, con una condición de humedad de 0.135%. El material utilizado es dolomita con una densidad aparente de 1111.3 kg/m³ y ángulo de reposo dinámico de 45°.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.1, en donde la curva de color azul corresponde a la potencia de la simulación en el tiempo, la línea roja es la potencia RMS en régimen estacionario de la simulación DEM y la línea de color verde la potencia RMS experimental de [16]. Los resultados evidencian un error relativo del 5.31%, donde la potencia por la simulación DEM es de 1.288 kW/kg y para los resultados experimentales de 1.361 kW/kg.

⁶ Potencia consumida dividida en la cantidad de material al interior del tambor aglomerador.

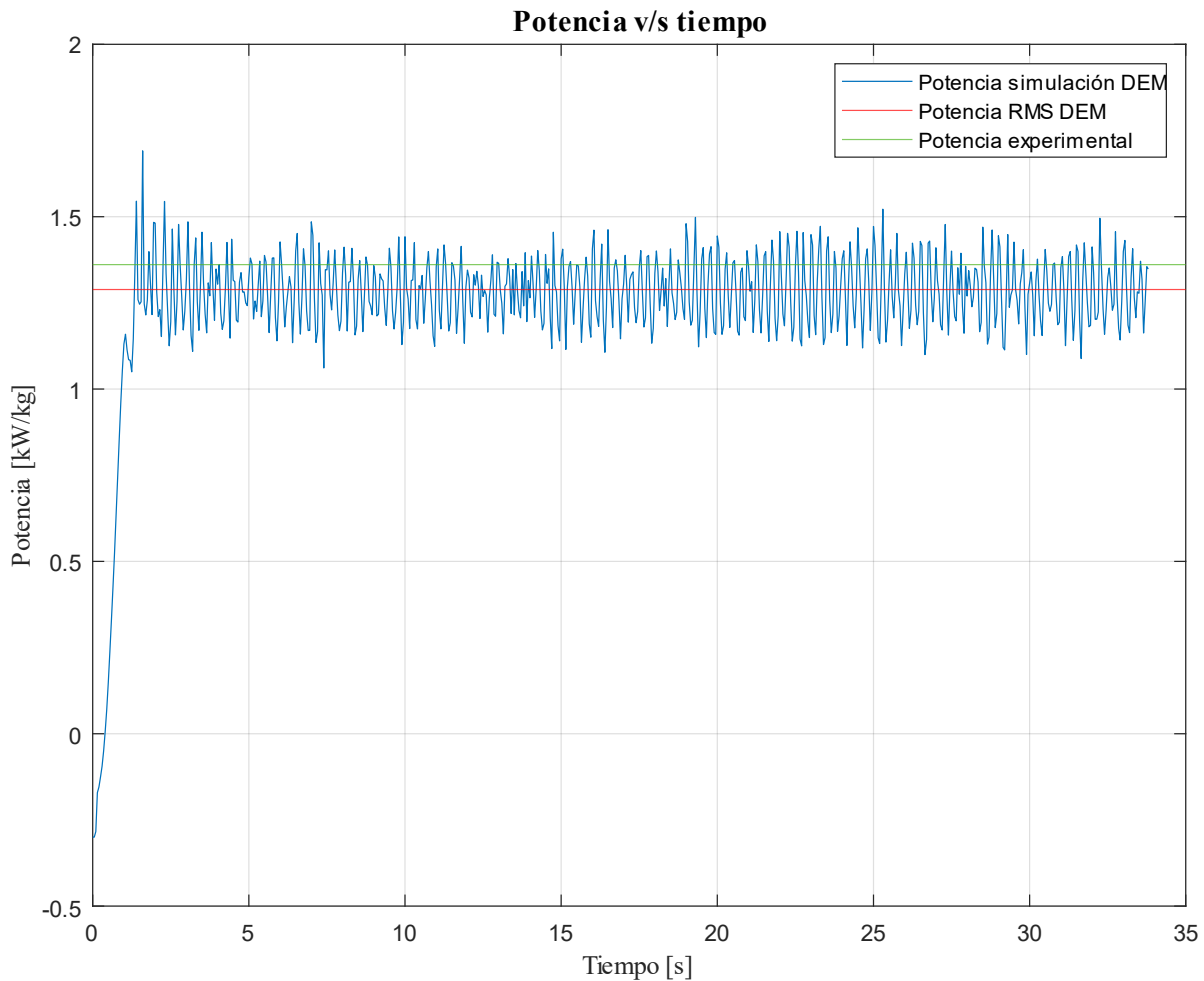


Figura 7.1: Comparación de resultados de potencia de ensayo experimental y simulación DEM del tambor de laboratorio.

7.2 Resultados obtenidos

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se obtienen las Figura 7.3 a Figura 7.11, las cuales presentan los siguientes resultados de operación con respecto al tiempo: I) Potencia, torque, II) Fuerza en el eje x e y , III) ángulo de reposo y IV) distribución de humedad en el tiempo de operación nominal del tambor aglomerador. La operación del tambor consistió en un tiempo de simulación de 60 segundos, donde los primeros 2 segundos fue de ingreso de material al interior del tambor, luego en el $t = 10$ a $t = 15$ segundos hay inyección de agua al material, del tiempo $t = 15$ a $t = 60$ segundos es periodo de granulación al interior del tambor.

El primer gráfico de la figura muestra la demanda de potencia (representado en el eje izquierdo del gráfico) y torque (representado en el eje derecho del gráfico). Durante los primeros 10 segundos, hay un comportamiento transiente del tambor, donde hay *peaks* máximos y mínimos. Posteriormente al segundo 10, tanto la potencia como el torque, muestran un comportamiento estable. Existe una relación directamente proporcional entre el torque y la potencia, esto se ve reflejado en la ecuación

(57). A partir de los resultados y la ecuación mencionada, un torque estable minimiza la variabilidad en la potencia requerida.

$$Potencia = T \cdot \omega \quad (57)$$

A partir de las diferentes condiciones de operación, los valores RMS oscilan entre 197.51 kW - 401.17 kW y 377.54 – 548.28 kNm para la potencia y torque, respectivamente. Estos valores son importantes ya que son las condiciones más críticas en la demanda por parte del equipo, lo cual puede ser clave en el dimensionamiento de los elementos mecánicos del tambor.

El segundo gráfico presenta las fuerzas resultantes que actúan sobre la estructura del tambor, distribuidas en los ejes x (representado en el eje derecho del gráfico) e y (representado en el eje izquierdo del gráfico). Estas fuerzas son el resultado de la interacción dinámica entre el material en el interior del tambor y las condiciones de operación. De forma análoga al comportamiento observado en el gráfico de potencia y torque, ambas fuerzas experimentan un régimen transitorio durante los primeros segundos de la simulación. Este comportamiento transitorio se atribuye al ingreso del mineral al tambor y a su redistribución. Es precisamente en este período transitorio donde se registran los valores máximos y mínimos tanto en el eje x como en el eje y . Posteriormente, las fuerzas se estabilizan, reflejando que el sistema ha alcanzado un estado operativo estacionario. En el caso del eje x , las fuerzas son considerablemente más bajas en comparación con el eje y . Esto es coherente con la disposición física del tambor y las condiciones gravitacionales, ya que el lecho de material está principalmente sometido a la fuerza de gravedad y, en consecuencia, las mayores fuerzas actúan en la dirección del eje y . Adicionalmente, el eje y coincide con la dirección predominante del movimiento del material, lo que genera una mayor interacción dinámica y, por ende, mayores magnitudes de fuerza en comparación con el eje x .

El tercer gráfico muestra como varía el ángulo de reposo del material, el cual se calcula a partir de un procesamiento de imágenes (código elaborado en Matlab) obtenidas del software Ansys Rocky. El paso de tiempo de exportación de cada imagen fue 0.5 segundos. Este gráfico tiene un comportamiento similar al de potencia y torque, donde el tiempo en régimen transitorio y estacionario coincide con el gráfico anteriormente mencionado. Como ya se presentó, la incidencia de la distribución y comportamiento del material afectará directamente al ángulo de reposo del material. Por otra parte, el comportamiento del material estará asociado a la caracterización del material: coeficiente de roce, rodadura, coeficiente de restitución, densidad aparente, entre otros.

El último gráfico, presenta la distribución de humedad promedio (línea central) por partícula, y las barras de error corresponden a la desviación estándar por cada paso de tiempo. Ambas mediciones mencionadas anteriormente, nos permiten determinar y analizar cómo es la distribución de humedad al interior del tambor durante el transcurso del tiempo.

En la Figura 7.2, se puede observar una captura la simulación numérica, donde se puede ver la formación de glómeros al interior del tambor.

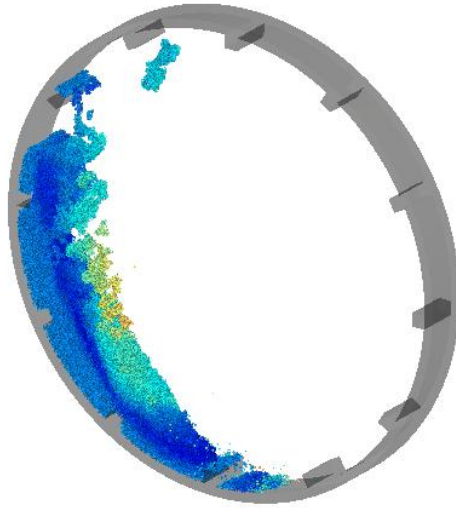


Figura 7.2: Simulación numérica DEM – Tambor aglomerador industrial.

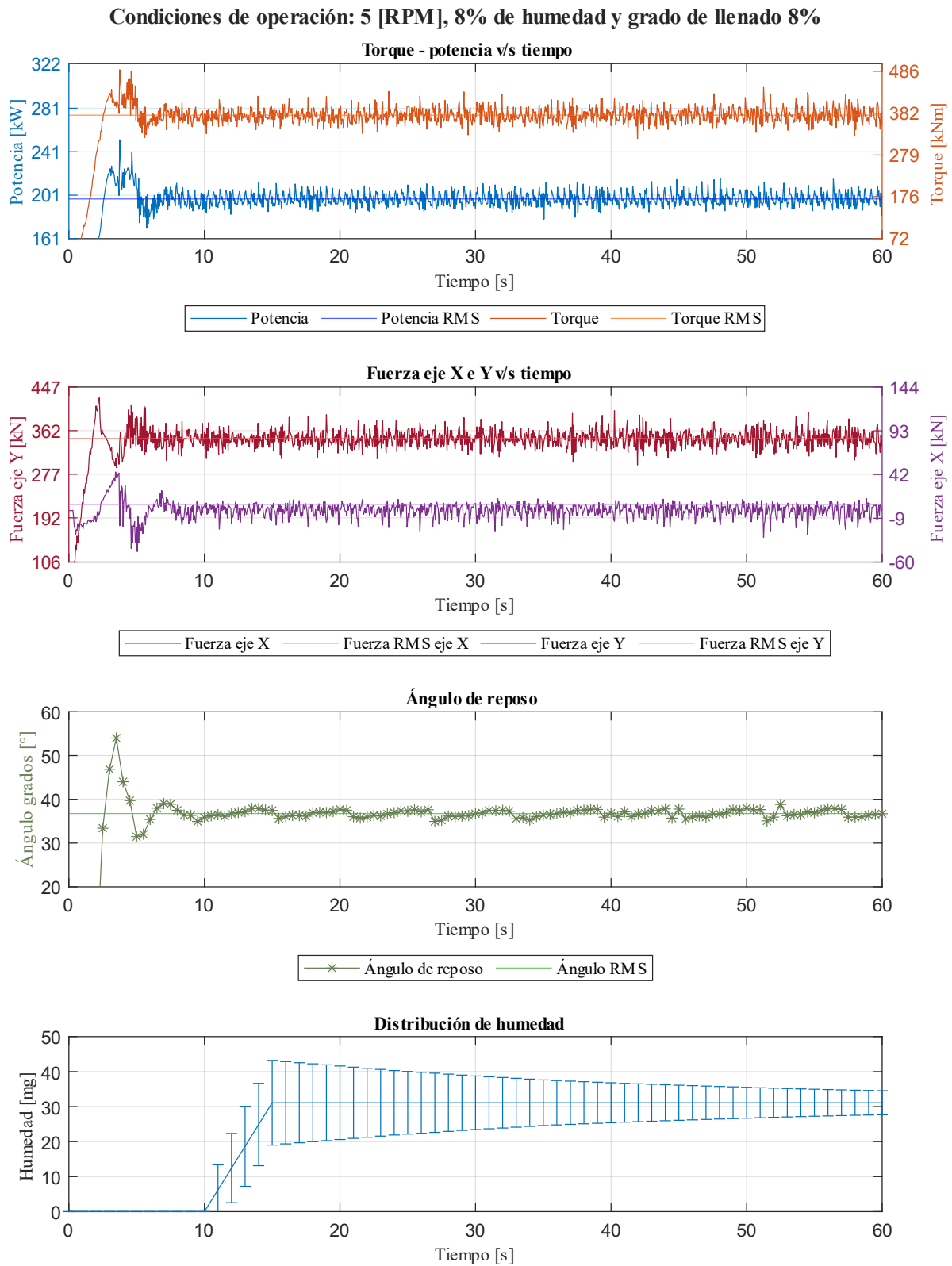


Figura 7.3: Gráfico de los resultados de simulación $\omega_1 f_1$.

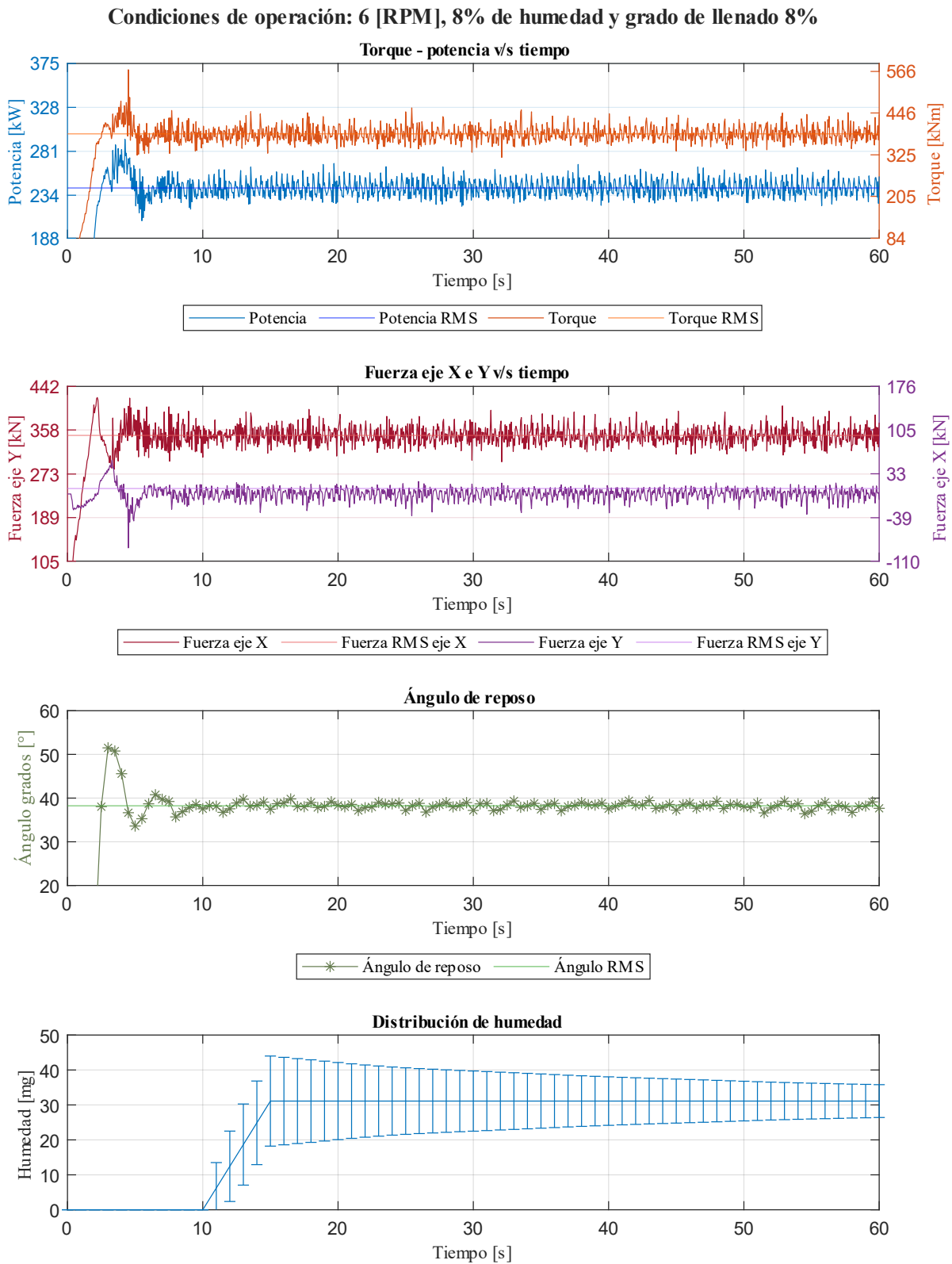
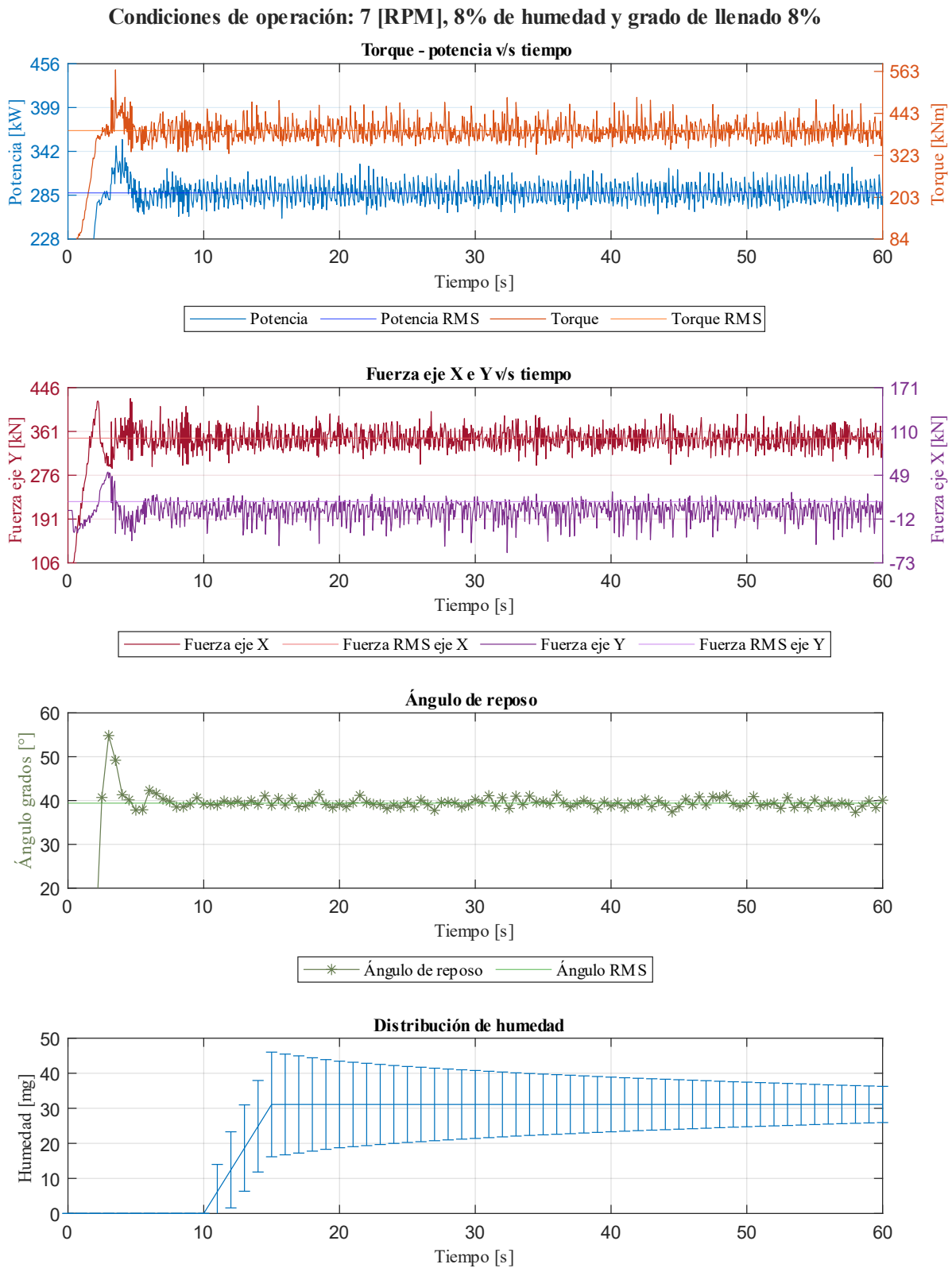


Figura 7.4: Gráfico de los resultados de simulación $\omega_2 f_1$.



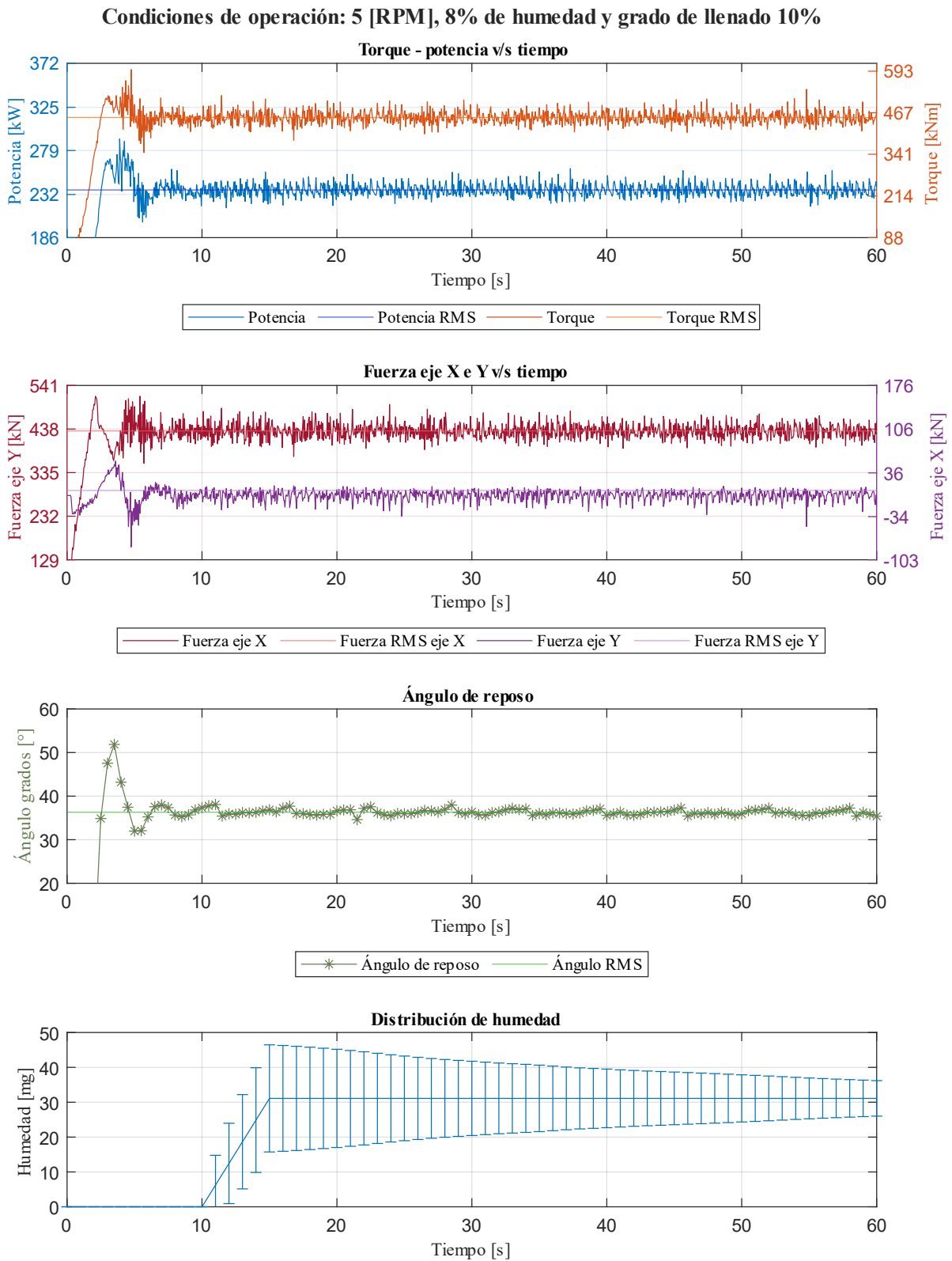


Figura 7.6: Gráfico de los resultados de simulación $\omega_1 f_2$.

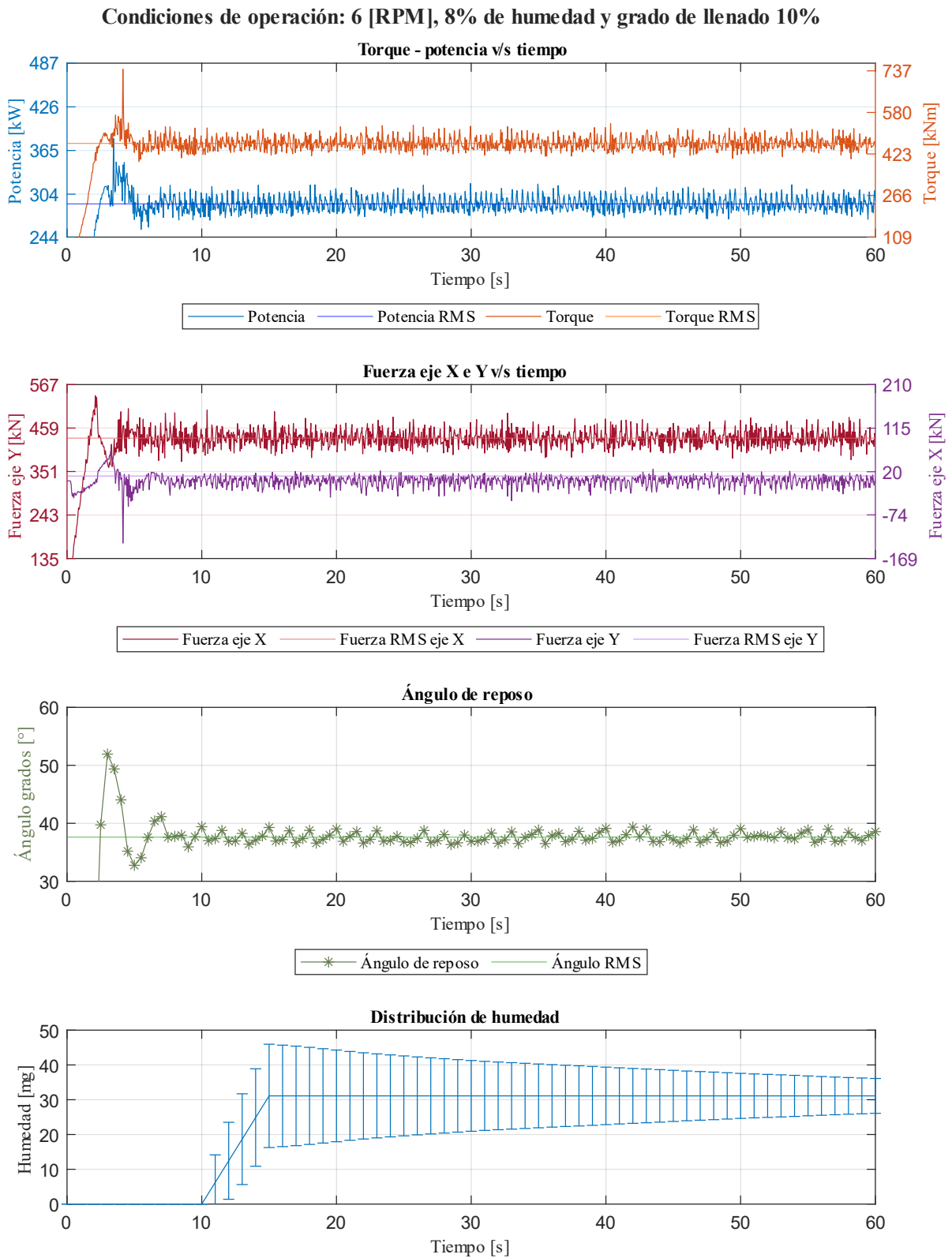


Figura 7.7: Gráfico de los resultados de simulación $\omega_2 f_2$.

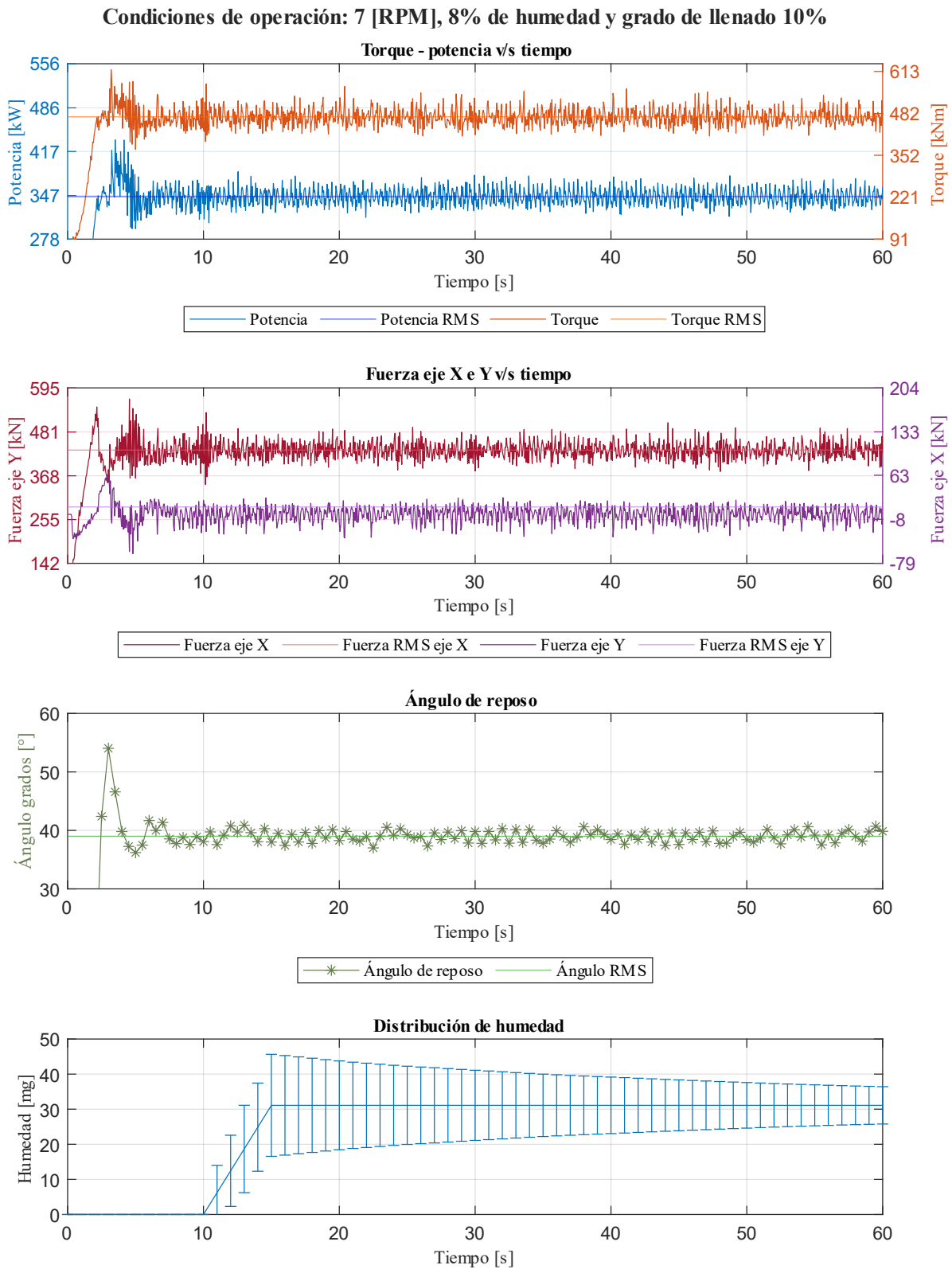


Figura 7.8: Gráfico de los resultados de simulación $\omega_3 f_2$.

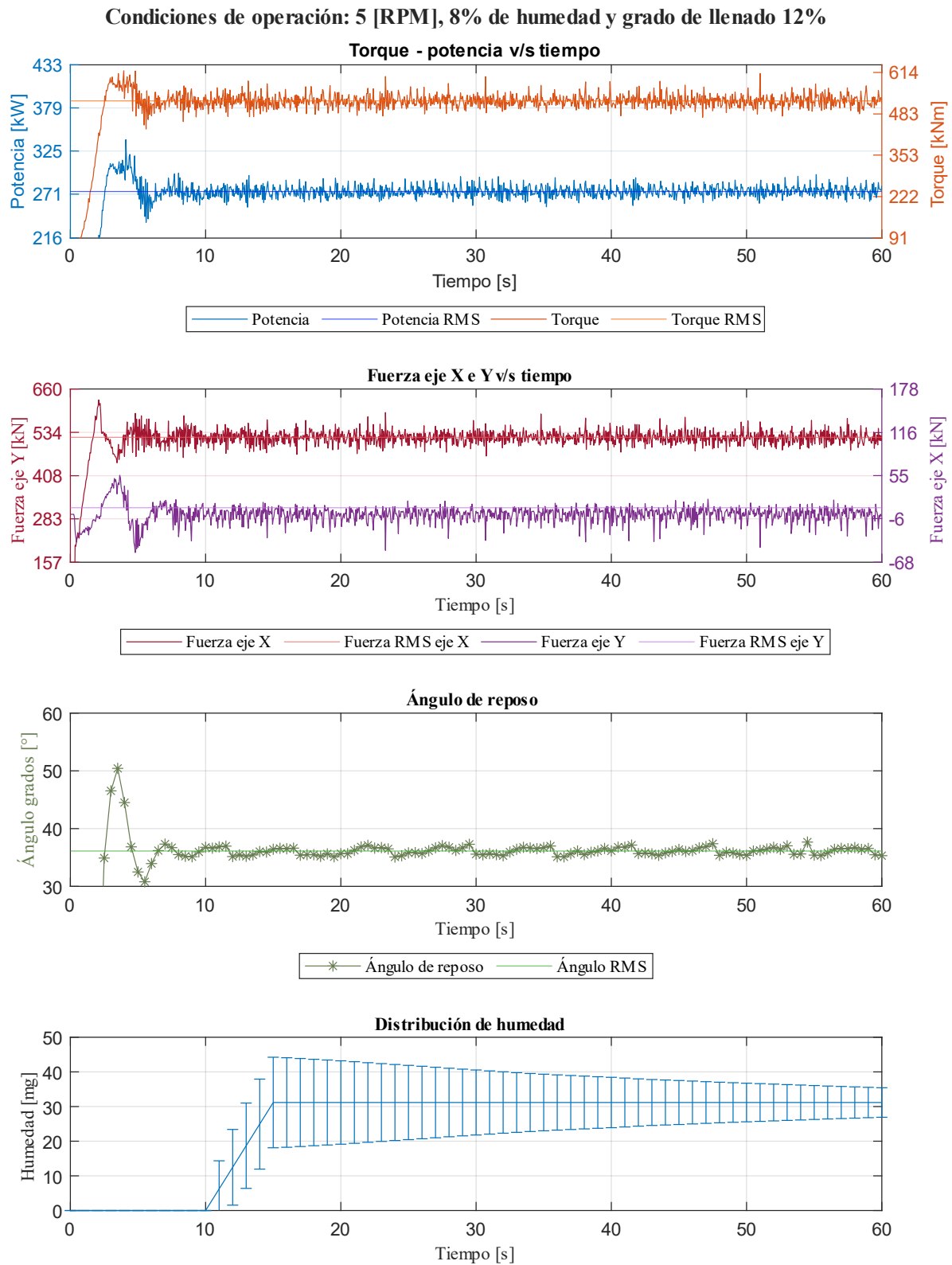
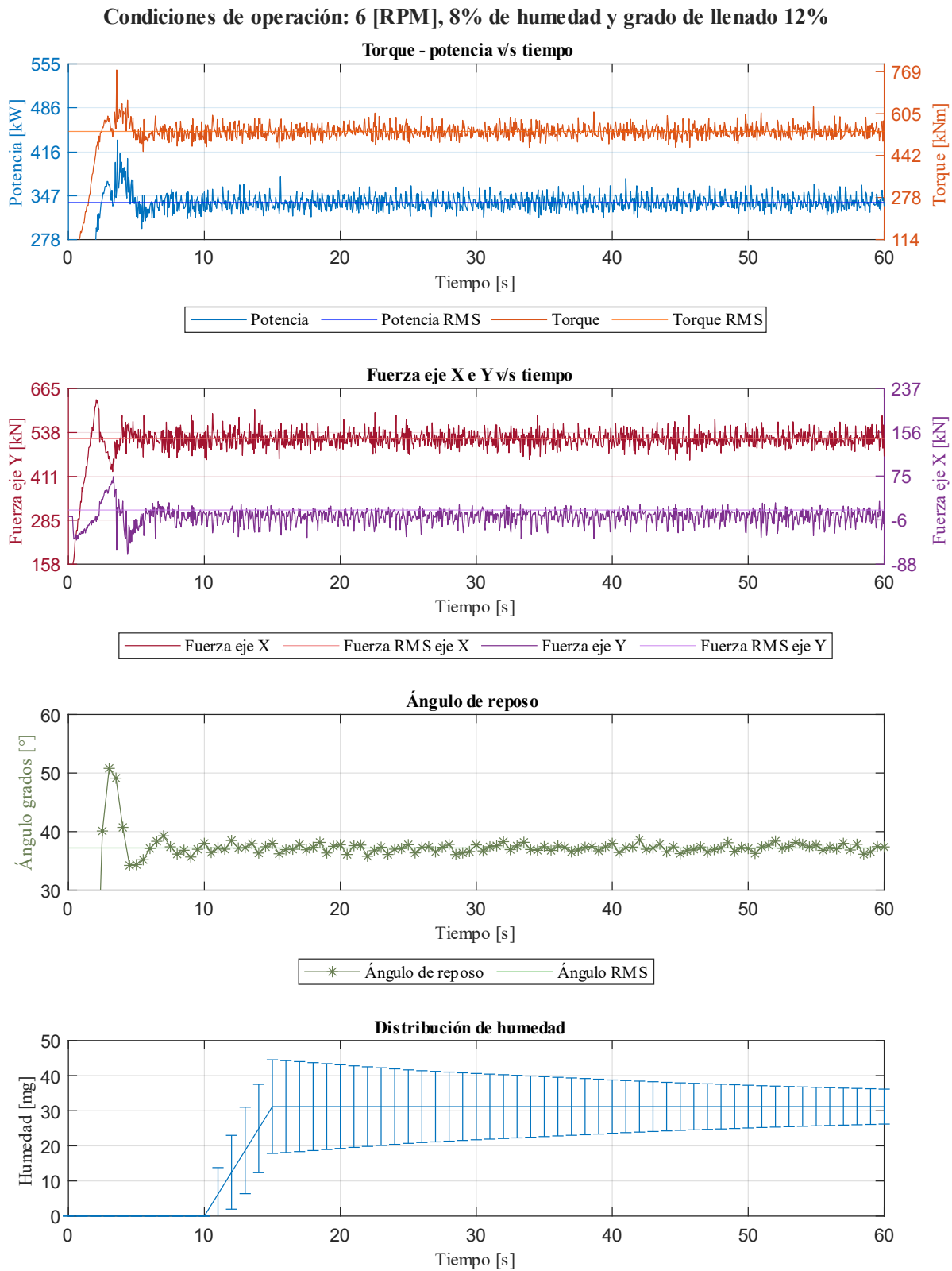


Figura 7.9: Gráfico de los resultados de simulación $\omega_1 f_3$.



Condiciones de operación: 7 [RPM], 8% de humedad y grado de llenado 12%

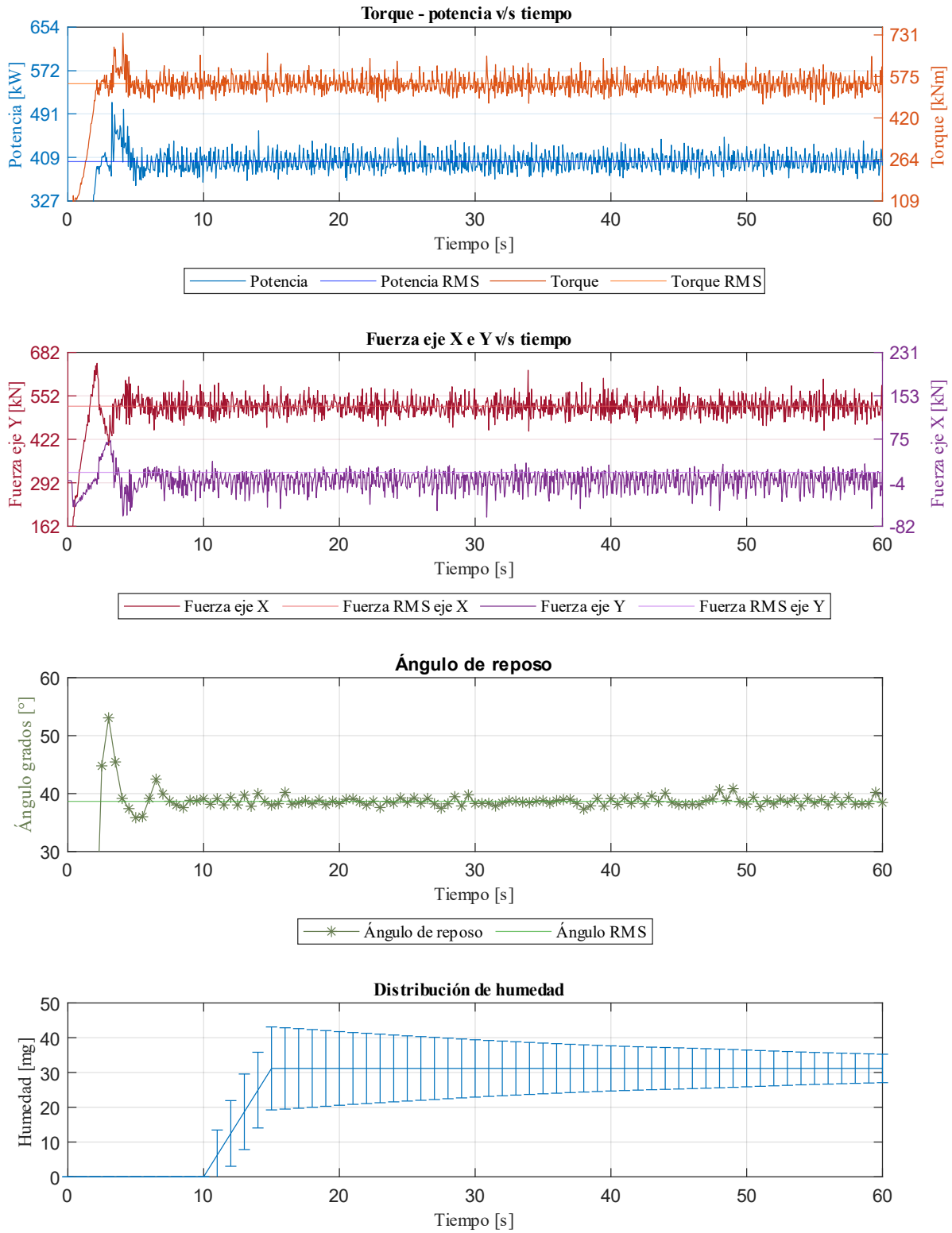


Figura 7.11: Gráfico de los resultados de simulación $\omega_3 f_3$.

7.3 Análisis de perfil de velocidades

En la Figura 7.12, se puede observar un mapa de color con los perfiles de velocidad de las distintas simulaciones en régimen estacionario. La figura muestra que de izquierda a derecha aumenta la velocidad de rotación del tambor: 5, 6 y 7 rpm. Además, desde arriba hacia abajo, aumenta el grado de llenado: 8%, 10% y 12% rpm.

En cada una de las figuras se logra reconocer las capas activas y pasivas del material. La capa activa con una tonalidad celeste – amarillo, alcanza velocidades entre los 2 y 6 m/s. Por otra parte, la capa pasiva con una tonalidad azul alcanza velocidad entre los 0 y 1 m/s. Se observa que hay partículas que adquieren una mayor velocidad cercana a los 8 m/s, con una tonalidad de color rojo, este fenómeno se debe a que hay material que queda depositado en los lifters, y luego cae por efecto de la gravedad.

A medida que aumenta la velocidad de rotación del tambor se observa que las regiones con mayores velocidades (colores celeste y amarillo) se vuelven más prominentes y extensas, lo que indica que las partículas están sometidas a fuerzas de mayor magnitud. Por otra parte, la energía disponible para mezclar y aglomerar partículas aumenta, lo que podría beneficiar procesos de formación de glómeros, aunque también podría generar una dispersión excesiva. Es importante verificar cómo afecta la velocidad en la formación de glómeros.

Al analizar cómo afecta el grado de llenado en los perfiles de velocidad, se logra identificar que a medida que aumenta el grado de llenado, las áreas de color celeste-azul cercanas a las paredes del tambor tienden a incrementar su tamaño, suavizándose con la capa pasiva. El aumento de material al interior del tambor genera más fricción y amortiguación en el movimiento de las partículas, lo que resulta en un comportamiento del material más compacto, dificultando el movimiento libre de partículas que se encuentran en la zona entre la capa activa y las paredes del tambor.

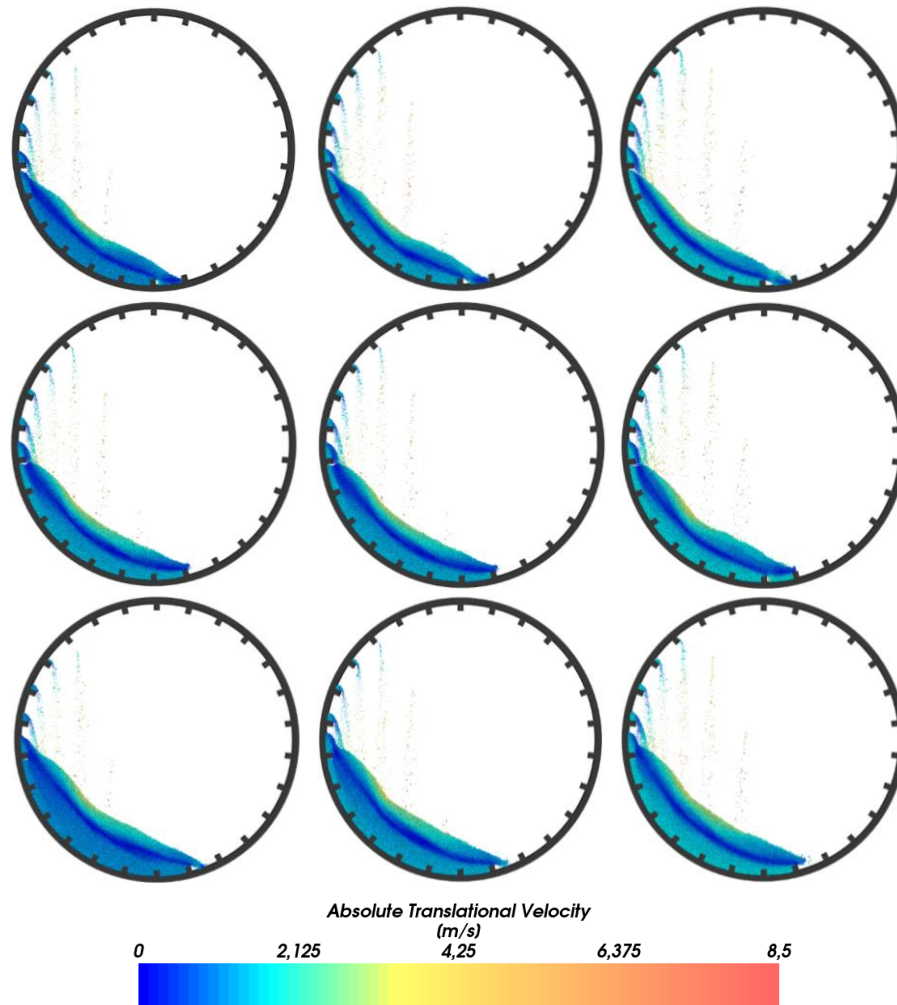


Figura 7.12: Perfiles de velocidades de las 9 simulaciones. De izquierda a derecha aumento de la velocidad angular 5, 6 y 7 rpm. Desde arriba hacia abajo, aumento del grado de llenado 8%, 10% y 12%.

7.4 Análisis de potencia

De los resultados obtenidos de potencia en función del tiempo de cada una de las simulaciones, se determina la potencia RMS en régimen estacionario de cada una de las simulaciones, lo cual corresponde posterior al segundo 10. La Figura 7.13, presenta un gráfico de la potencia respecto a la velocidad angular del tambor aglomerador. En el gráfico se destacan con artísticos los valores de potencia RMS con respecto a la velocidad de rotación del tambor aglomerador para una condición de rotación y grado de llenado específico. Adicionalmente, se generan curvas de interpolación polinómicas de segundo grado, que interpolan las potencias que poseen el mismo grado de llenado.

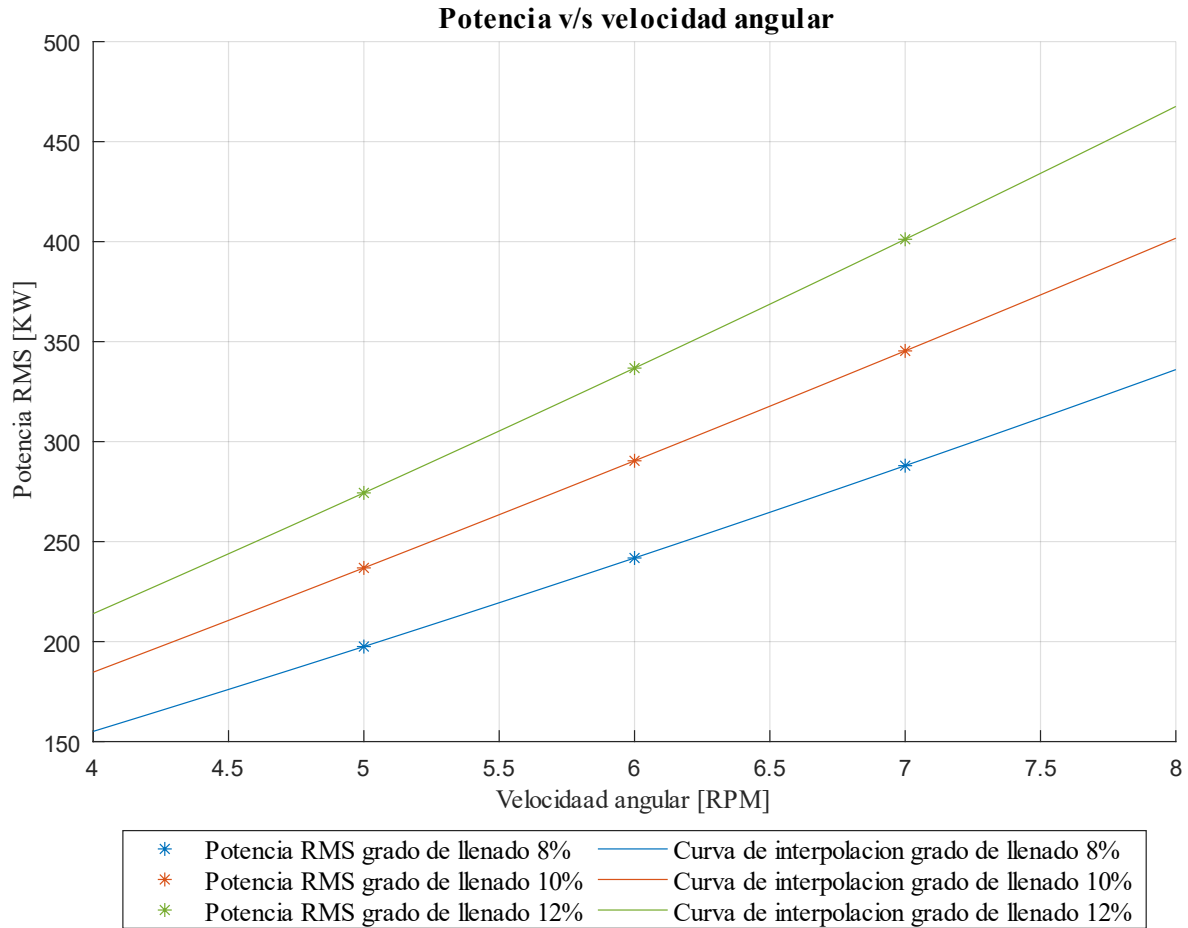


Figura 7.13: Potencia RMS de las distintas condiciones de operación del tambor aglomerador en las simulaciones DEM.

Del análisis del gráfico, se observa que el incremento del grado de llenado y la velocidad de rotación del tambor genera un aumento en la potencia, pero este incremento de potencia no lineal del tipo polinómico cuadrático. El incremento del grado del grado de llenado de tambor provoca un desplazamiento de las curvas de interpolación en la dirección vertical del gráfico, es decir, un desplazamiento positivo si el grado de llenado aumenta, y viceversa. El aumento cuadrático de la potencia con respecto a la velocidad nos indica que pequeños incrementos en la velocidad generan aumentos desproporcionados en el consumo de potencia. Esto implica un compromiso entre la productividad y costos energéticos asociados.

A partir de las curvas de interpolación, se determina los posibles consumos de potencia RMS para las velocidades de rotación de 4 y 8 rpm para los distintos grados de llenado. Los valores potencia para 4 rpm varían entre 155.11 y 213.96 kW, mientras que para 8 rpm los valores varían entre 336.0 y 467.60 kW.

En términos de demanda energética, la condición menos exigente corresponde a un grado de llenado del 8% y una velocidad de rotación de 5 rpm, con un consumo de 197.15 watts. Por otra parte, el consumo más crítico es con un grado de llenado del 12% y 7 rpm con un consumo de 401.17 watts, lo que representa un aumento del 203.5%. Además, el incremento de 1 rpm para los distintos grados de llenado afecta porcentualmente a la potencia RMS entre 18.92% a 22.75%. Además, el aumento del grado de llenado de 1% un aumento en la potencia porcentualmente entre un 15.83% y 20.10%

Es importante evaluar el impacto del grado de llenado y la velocidad con otras variables del proceso, como la eficiencia en el proceso de aglomeración, es decir, en la formación de glómeros a través del tiempo o el desgaste estructural del tambor. Con la finalidad de encontrar equilibrio entre la eficiencia y productividad.

7.5 Análisis de espectro en frecuencia

En la Figura 7.14 se muestra el espectro en frecuencia del torque para tres condiciones de velocidad angular: 5, 6 y 7 rpm. En el eje y se presenta la amplitud del torque en Newton-metro (Nm) y en el eje x la frecuencia en Hertz (Hz).

El análisis del espectro en frecuencia en régimen estacionario del tambor industrial permite identificar las componentes 1X, 2X y 3X de la frecuencia de paso de los lifters del tambor aglomerador. Por ejemplo, para el caso de 5 rpm, considerando que el tambor tiene 26 lifters, la frecuencia de paso se determina mediante la ecuación (58), obteniéndose un valor de 130 repeticiones por minuto, lo cual equivale a 2.16 Hertz y puede observarse en el gráfico superior para la 1x.

$$\text{Frecuencia de paso} = \text{Velocidad de rotación} \cdot \text{Cantidad de lifters} \quad (58)$$

Los gráficos muestran una tendencia a aumentar su amplitud a medida que aumentan el grado de llenado y la velocidad de rotación.

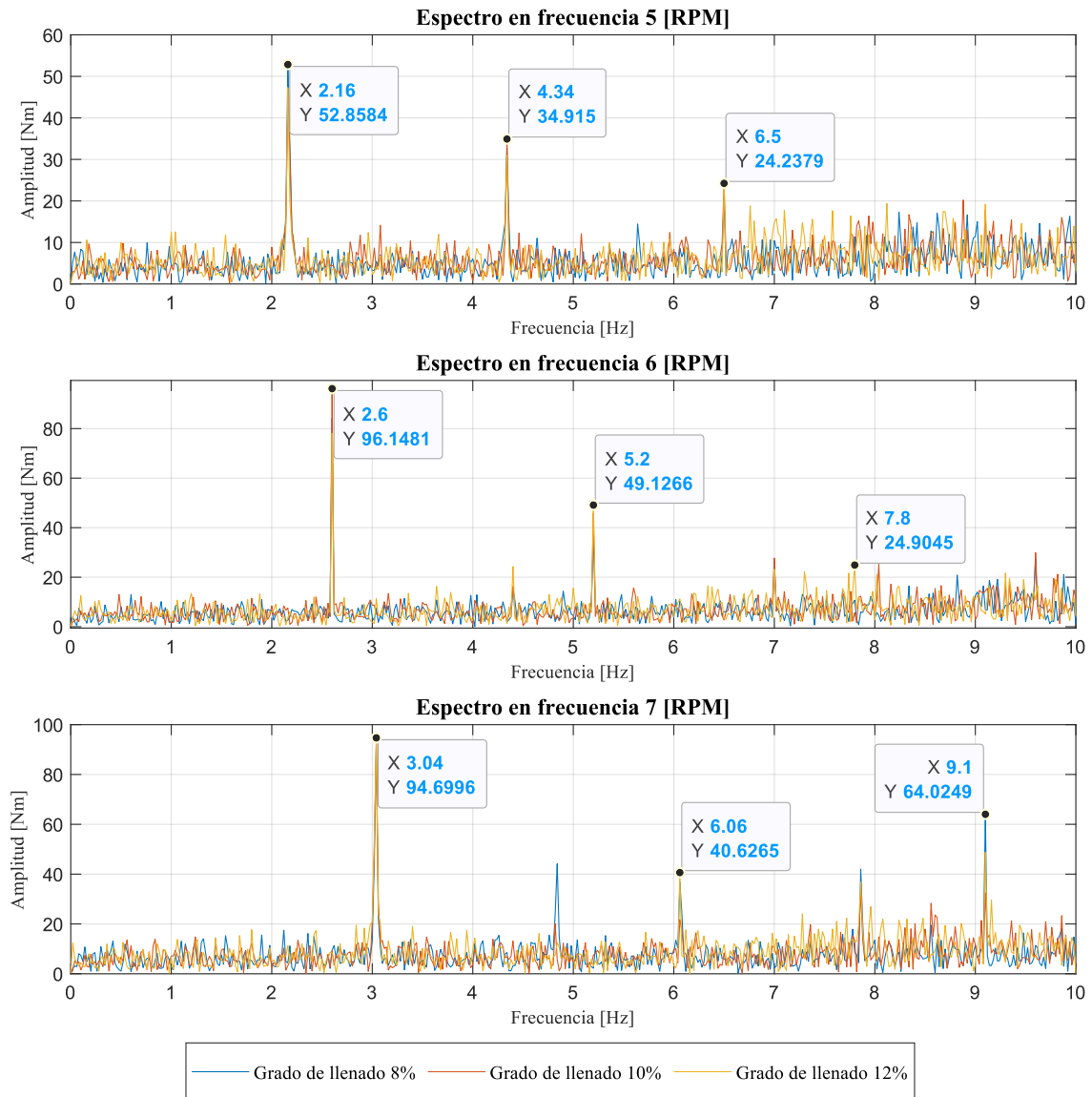


Figura 7.14: Espectro en frecuencia del torque para las distintas condiciones de operación.

7.6 Análisis de ángulo de reposo

En la Tabla 12 se presenta el ángulo de reposo promedio en régimen estacionario de cada una de las simulaciones. Se puede observar que, al aumentar el grado de llenado con una la velocidad de rotación constante, el ángulo de reposo tiende a disminuir. Este comportamiento se debe que hay mayor cantidad de material al interior del tambor, por lo que la fuerza peso de las partículas que se encuentran cercanas a la superficie del lecho (capas superiores), tienden a reducir la movilidad de las partículas que se encuentran en las capas inferiores.

Por otro lado, el aumento de la velocidad para un mismo grado de llenado genera un aumento del ángulo de reposo. Este aumento del ángulo de reposo se debe al incremento de la energía cinética de

las partículas, principalmente en la periferia del tambor, lo que permite que las partículas alcancen mayores alturas, generando ángulo de reposo más elevado.

Tabla 12: Ángulo de reposo promedio en régimen estacionario para cada una de las simulaciones.

Condición	Grado de llenado		
	8%	10%	12%
5 [rpm]	36.75°	36.30°	36.12°
6 [rpm]	38.24°	37.62°	37.20°
7 [rpm]	39.40°	39.01°	38.66°

7.7 Análisis de distribución de humedad

A partir de los resultados obtenidos de los gráficos y la Figura 7.15, se realiza un análisis de la distribución de humedad al interior del tambor para las diferentes condiciones de operación.

En los gráficos presentados, se obtienen 2 datos relevantes en el tiempo. El primero, es la masa de líquido o humedad promedio en el tiempo, el cual se ve representado de forma gráfica con la línea de color azul. El segundo dato, es la desviación estándar de humedad por cada paso de tiempo, que nos indica la dispersión o variabilidad de un conjunto de datos respecto a su media, es decir, que tanto se alejan los datos de la media de una población.

Se puede observar en los gráficos, que el tiempo en que hay una estabilización del promedio de la masa de líquido es posterior a los 15 segundos en todas las simulaciones. La razón de este fenómeno es que justamente en este tiempo es el cual termina el ingreso o inyección de humedad a la simulación, para posteriormente pasar al proceso de granulación.

Se puede observar en los gráficos que a medida que transcurre el tiempo y se llega al segundo 60, la desviación estándar para el grado de llenado del 8% es menor para una velocidad angular menor. Esto quiere decir que la segregación de las partículas es menor a velocidades angulares menores. Esto se puede complementar con los perfiles transversales de la Figura 7.15, donde la zona central del material, en color azul, se desataca a una velocidad angular mayor. Una mayor velocidad del material no implica que habrá una mejor distribución de humedad al interior del tambor. De forma análoga, sucede un comportamiento similar para los grados de llenado de 10 y 12%.

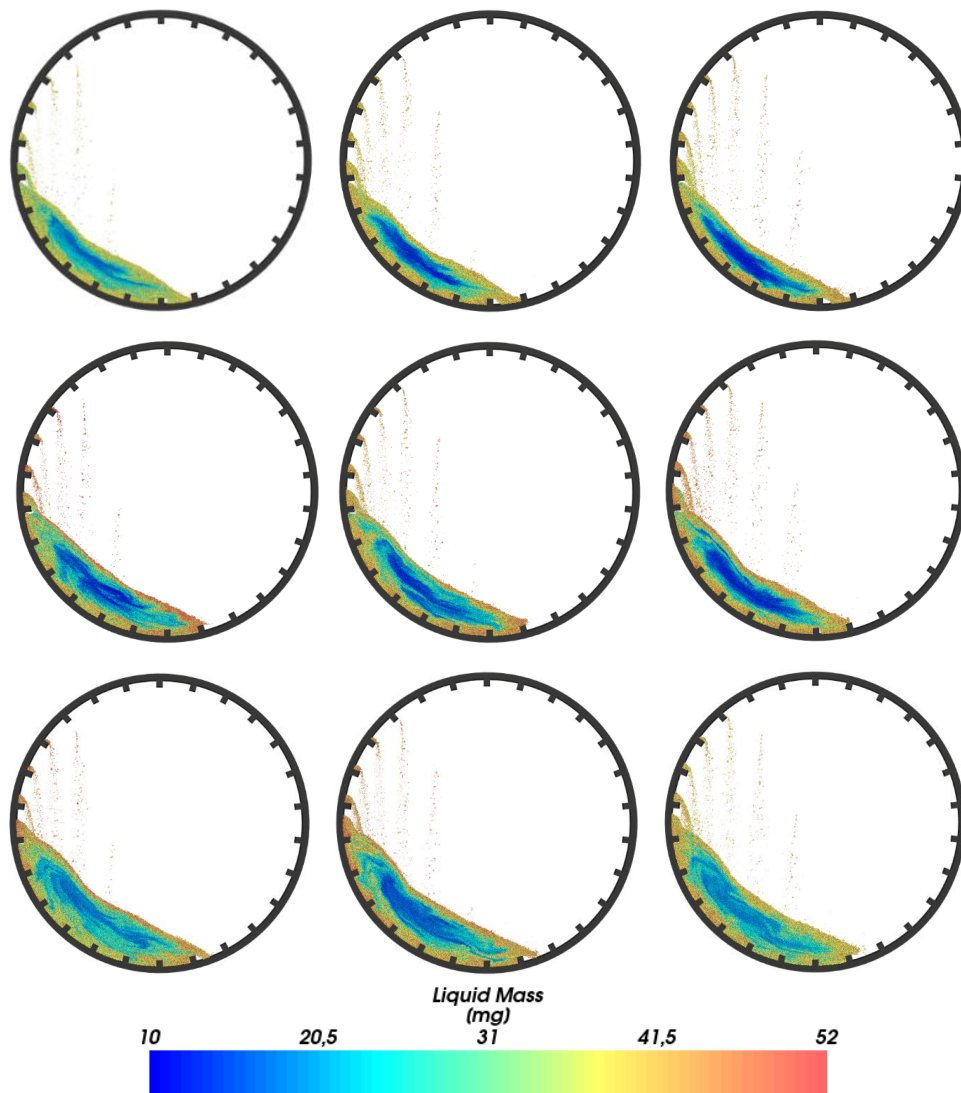


Figura 7.15: Distribución de humedad a los 60 segundos de simulación. De izquierda a derecha aumento de la velocidad angular 5, 6 y 7 rpm. Desde arriba hacia abajo, aumento del grado de llenado 8%, 10% y 12%.

7.8 Análisis de fuerzas radiales

Se realiza un análisis de las fuerzas en los ejes principales del tambor, es decir, en el eje vertical o radial y horizontal o transversal. El objetivo de este análisis es evaluar la sensibilidad con las que se ven afectadas las fuerzas ante cambios como la velocidad angular y el grado de llenado. A continuación, se presentan las Figura 7.13 y Figura 7.16, las cuales presentan las fuerzas en los ejes y y x , respectivamente, para las distintas condiciones de operación.

El primer gráfico muestra las fuerzas RMS en régimen estacionario en el eje y y con respecto a la velocidad angular. Al igual que los gráficos previos, se destaca en asterisco las condiciones de operación específica y se interpola con una curva del tipo lineal. Se observa que, a medida que aumenta el grado de llenado, también aumenta la fuerza en el eje y . Esto se debe al aumento de la

masa al interior del tambor, y en efecto, un aumento en la fuerza peso ejercida sobre las paredes del tambor. Las fuerzas RMS oscilan entre 346.7 y 348 kN para 8% de llenado, entre 433.5 y 434.5 kN para un 10% de llenado y entre 519.5 y 521.2 kN para un 12% de llenado.

Por otra parte, se puede observar que, al aumentar la velocidad angular para un grado de llenado en específico, el aumento de la fuerza es igual o menor al 1%, para cualquiera de los 3 casos de llenado. En consecuencia, para las velocidades angulares evaluadas, este parámetro no tiene un impacto significativo en las fuerzas del eje y . Esto no quiere decir que, para una velocidad angular mayor a las presentadas en el gráfico, tenga el mismo comportamiento. Una de las razones por las cuales la velocidad angular no tiene un impacto en las fuerzas, es por el comportamiento del material al interior del tambor. Los resultados de las simulaciones indican que el comportamiento al interior del tambor es un régimen rodante/cascada, lo que quiere decir que no hay volúmenes considerables de material que suban por efecto del movimiento del tambor, y posteriormente, caigan y generen un impacto que provoque cambios significativos en las fuerzas.

Aunque la velocidad angular no parece tener un efecto directo sobre las fuerzas en el eje y , se recomienda realizar un análisis adicional para determinar cómo este parámetro podría afectar al desgaste de los componentes estructurales del tambor.

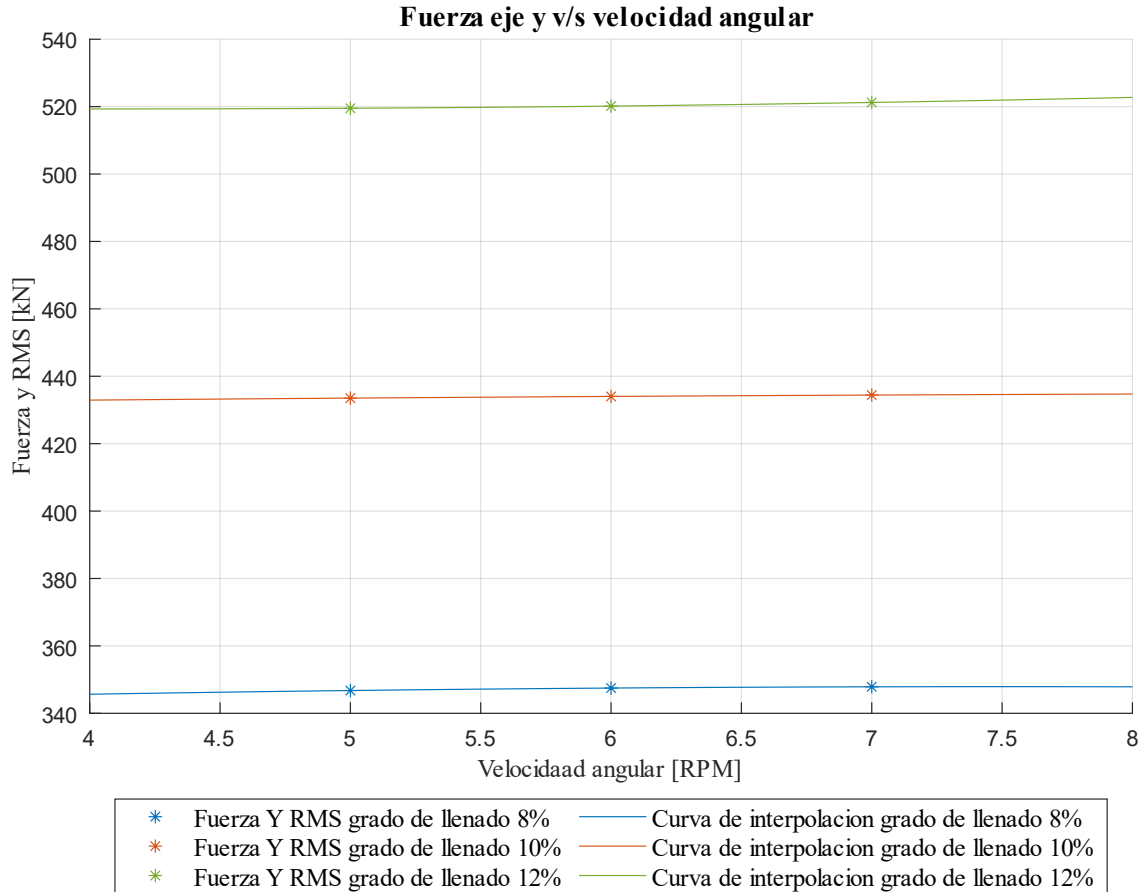


Figura 7.16: Fuerza en régimen estacionario en el eje y para diferentes condiciones de velocidad angular y grado de llenado.

En el segundo gráfico, muestra las fuerzas RMS en régimen estacionario en el eje x con respecto a la velocidad angular. Al igual que los gráficos previos, se destaca en asterisco las condiciones de operación específica y se interpola con una curva del tipo polinomial. En comparación con el gráfico anterior, la fuerza x muestra un aumento más notable con la velocidad angular. También las fuerzas crecen de una manera diferente según el grado de llenado, según las condiciones operativas.

Al comparar los gráficos de las fuerzas RMS en régimen estacionario del eje x e y , se puede observar que las fuerzas en el eje y y su magnitud son mucho mayores a las del eje x , esta diferencia se ve reflejada en aproximadamente un 135% mayor.

Se puede observar que el comportamiento de la fuerza en x para un grado de llenado del 8% y 10% por medio de las curvas de interpolación es del tipo polinomial cuadrático. Por otra parte, el comportamiento de la fuerza para un grado de llenado del 12% es lineal. Los valores en los que oscila la fuerza para cada uno de los grados de llenado son los siguientes:

- i. Grado de llenado del 8% : 6.9 y 12.3 kN
- ii. Grado de llenado del 10% : 7.7 y 12 kN
- iii. Grado de llenado del 12% : 9.3 y 15.2 kN

Se destaca que hay valores de fuerza para el llenado de 8% que son mayores que para el grado de llenado del 10% para una misma velocidad angular. Este comportamiento puede tener 2 explicaciones posibles, puede ser debido al comportamiento dinámico del material al interior del tambor o valores atípicos de la simulación.

Al analizar los perfiles de velocidad y los gráficos de los distintos parámetros para las distintas condiciones de operación, se puede ver que existen fluctuaciones en el ángulo de reposo y fuerzas en x . A medida que aumenta la velocidad angular del tambor, para un mismo grado de llenado, la capa activa del material aumenta de velocidad y experimenta un crecimiento en su espesor, debido a un aumento en la energía cinética transferida al material. Cuando el material sube por las paredes del tambor, y luego cae por efecto de la gravedad, genera fluctuaciones en el ángulo de reposo. Este fenómeno se ve reflejado en un movimiento oscilatorio de la capa activa, y en efecto, en un desplazamiento de mayor y menor volumen de material. Finalmente, el volumen de material colisiona nuevamente con el lecho inferior o las paredes del tambor, generando fluctuaciones en la fuerza y valores RMS de mayor magnitud para un mayor grado de llenado (aumento de material al interior del tambor).

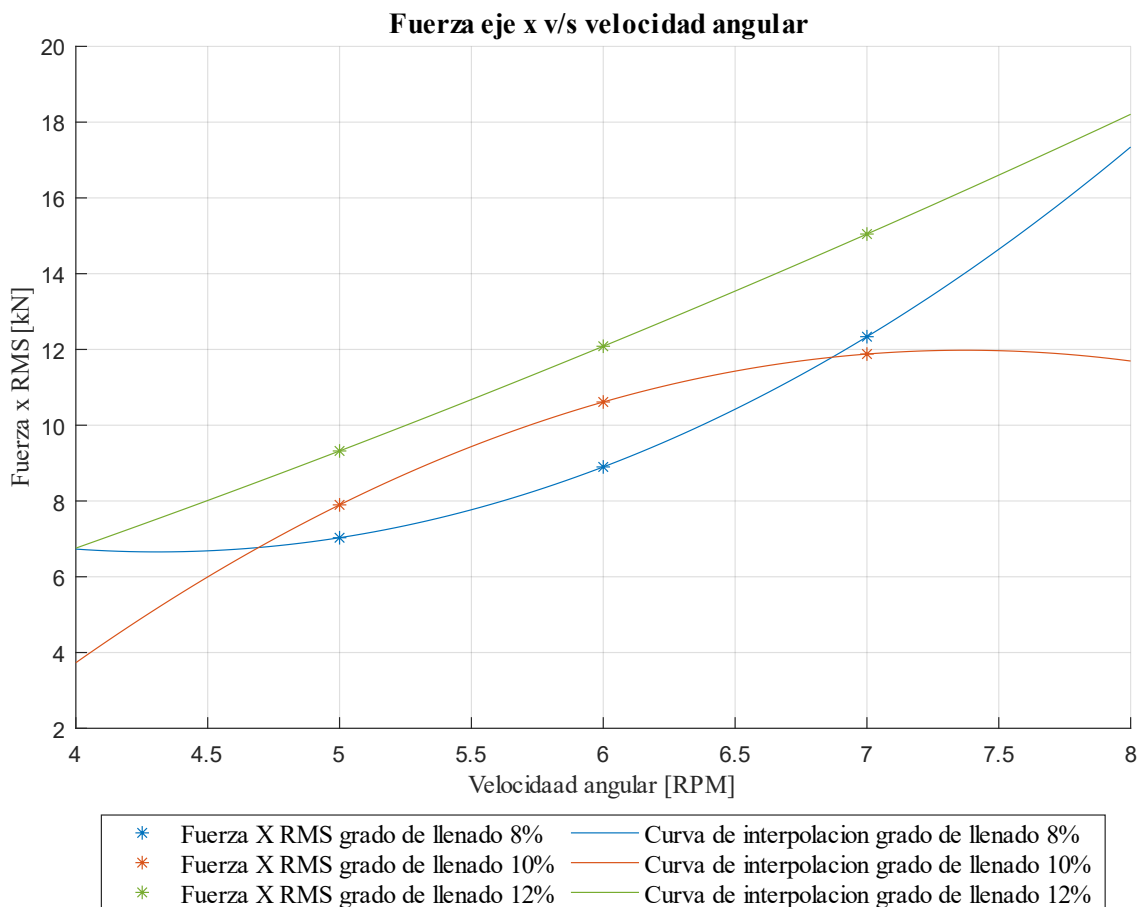


Figura 7.17: Fuerza en régimen estacionario en el eje x para diferentes condiciones de velocidad angular y grado de llenado.

7.9 Tiempo de residencia del material

Como se menciona en el ítem 6.3, se realiza un análisis con la configuración mencionada en el caso 2, para evaluar el tiempo de residencia del material a través del tiempo, considerando un flujo masico de entrada constante en el tambor aglomerador. En la Figura 7.19, podemos ver los resultados de la simulación DEM, en el eje x del gráfico se muestra el tiempo transcurrido de simulación, y en el eje y el tiempo de residencia de material.

Durante los primeros 40 segundos, se observa un periodo de transición en el cual hay material del tambor que sale del tambor aglomerador, debido a la velocidad que adquiere debido a la inclinación de la estructura. Con el transcurso de la simulación, comienza a incrementar el tiempo de residencia hasta estabilizarse desde el segundo 120, donde el tiempo de residencia promedio es de 57.62 s. El error relativo con respecto a los datos expuestos en el ítem 5.1 es de un 3.97%.

El motivo por el cual el tiempo de residencia aumenta y se estabiliza se debe al llenado progresivo del tambor. Este fenómeno provoca que las capas de material superiores generen una fuerza peso sobre las capas inferiores que se encuentra en contacto entre las paredes de tambor, lo cual aumenta la fuerza normal y, por ende, la fuerza de fricción entre el material y las paredes del tambor. En consecuencia, el movimiento del material se hace cada vez más lento, hasta que hay un equilibrio entre el flujo másico de entrada y salida.

En la Figura 7.18, podemos visualizar una captura de la simulación DEM realizada para el análisis del tiempo de residencia.

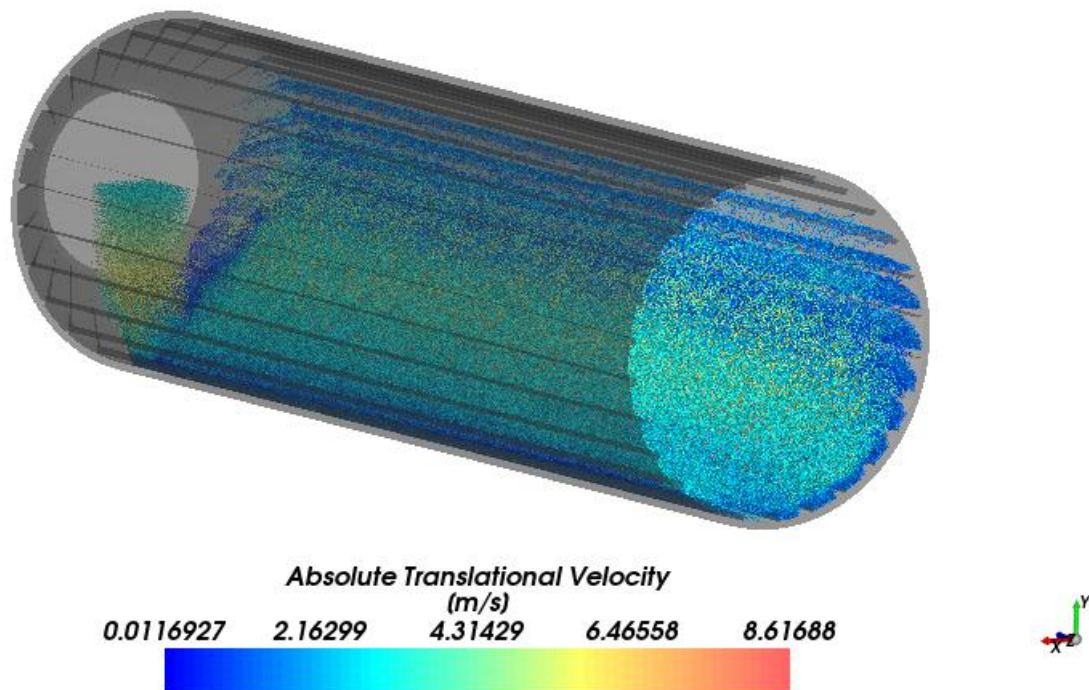


Figura 7.18: Análisis del tiempo de residencia del material – simulación DEM.

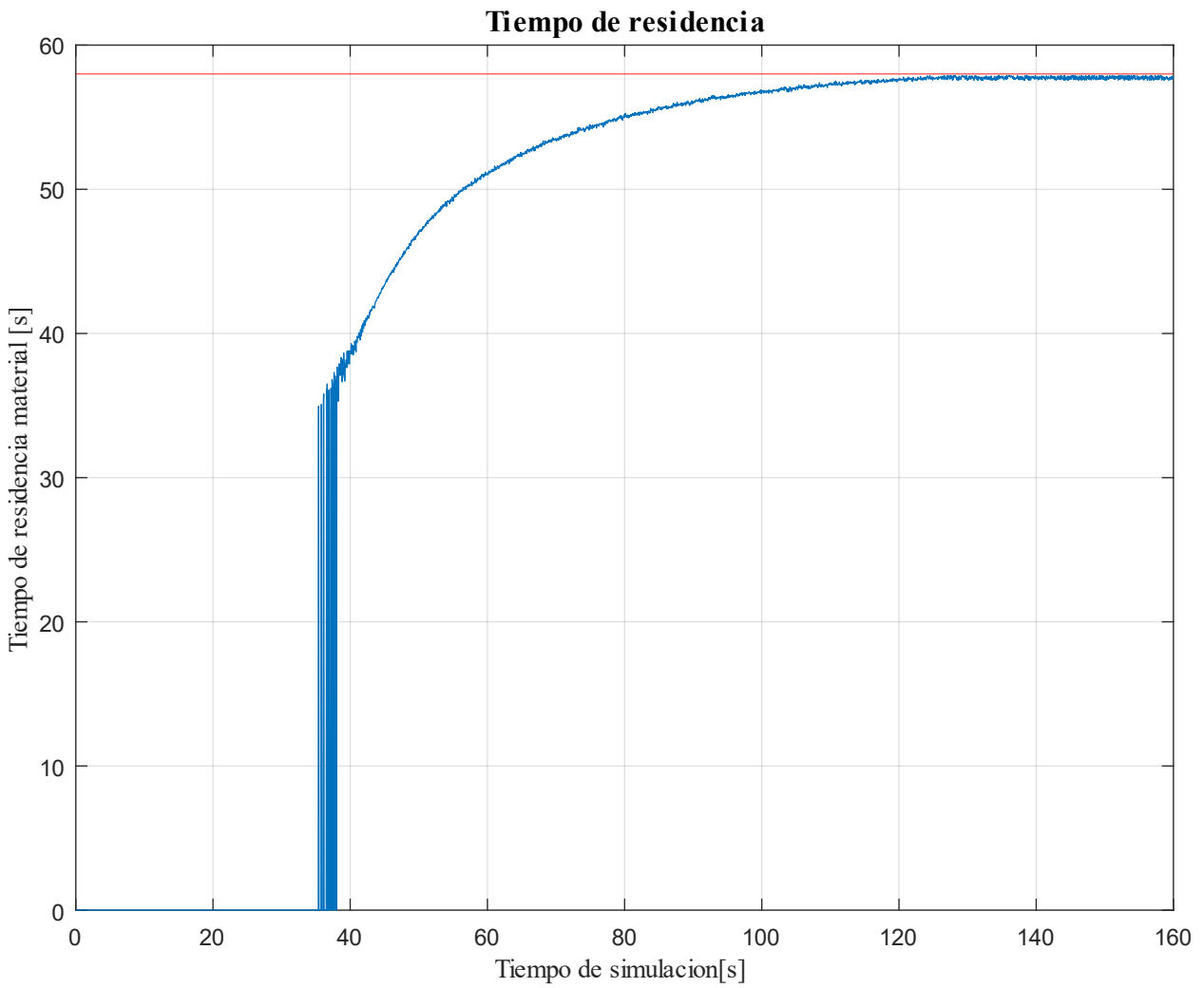


Figura 7.19: Tiempo de residencia del material al interior del tambor aglomerador en la simulación DEM.

Capítulo 8: Diseño de un banco de ensayos de tambor aglomerador de laboratorio.

En este capítulo, se presenta la metodología utilizada para el diseño y fabricación de un banco de ensayos. A partir de la investigación [1], se considera que los resultados experimentales son importantes para la validación y evaluación de la precisión por el modelo numérico DEM. El banco de ensayos tiene por objetivo analizar el consumo de energía en el tiempo para diferentes parámetros de operación y medir la granulometría del material antes y después del proceso de aglomeración.

8.1 Antecedentes de diseño y requerimientos.

En la investigación [52], utilizaron un tambor rotatorio para estudiar la granulometría del mineral obtenido posterior a la aglomeración, analizando los efectos de las variables en el proceso. Utilizaron un tambor pequeño con velocidad variables. En la Figura 8.1, se muestra un diagrama de las mediciones que se desean obtener con un tambor aglomerador a pequeña escala. El enfoque de este proyecto es implementar todos los componentes necesarios para la operación del tambor.

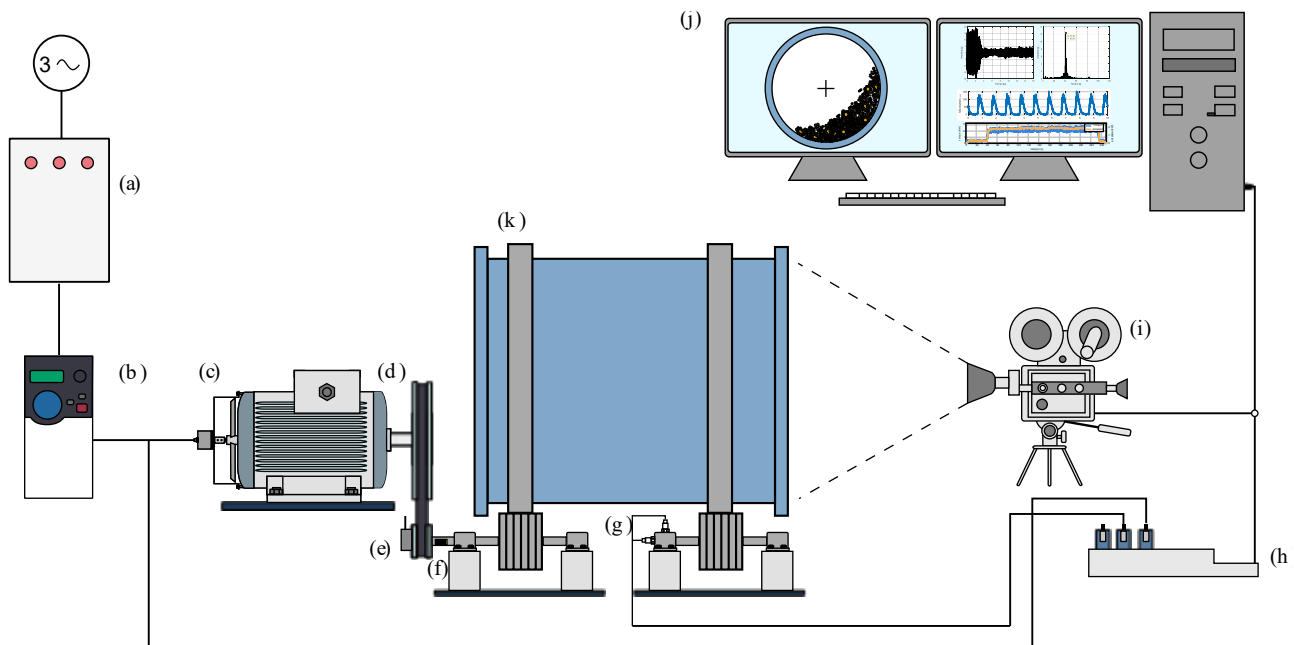


Figura 8.1: Diagrama de las mediciones experimentales a desarrollar en el banco de ensayos.

Componentes: (a) caja de alimentación eléctrica con tenazas y sondas, (b) variador de frecuencia, (c) encoder (d) motor eléctrico, (e) nodo, (f) strain gauge, (g) acelerómetro, (h) chasis con módulos, (i) cámara de video, (j) computador (k) tambor aglomerador.

Considerando las investigaciones experimentales y las complejidades que puede presentar la implementación de un modelo numérico DEM, se considera los siguientes requisitos como criterios para la propuesta de diseño para el banco de ensayos:

- I. El tamaño del tambor debe ser de 0.3 m de diámetro y 0.2 m de largo.
- II. El diseño del tambor estará enfocado en estudiar el PSD de la aglomeración.

- III. Un grado de llenado máximo de 50% y 30% de humedad, con una densidad de material de 2300 kg/m^3 .
- IV. El sistema de transmisión de potencia al tambor será por ruedas de fricción.
- V. Velocidad de rotación del tambor de 40 RPM.

8.2 Diseño preliminar

A continuación, se presenta el diseño del banco de ensayos en la Figura 8.2 del tambor aglomerador de laboratorio considerando los antecedentes anteriormente mencionados.

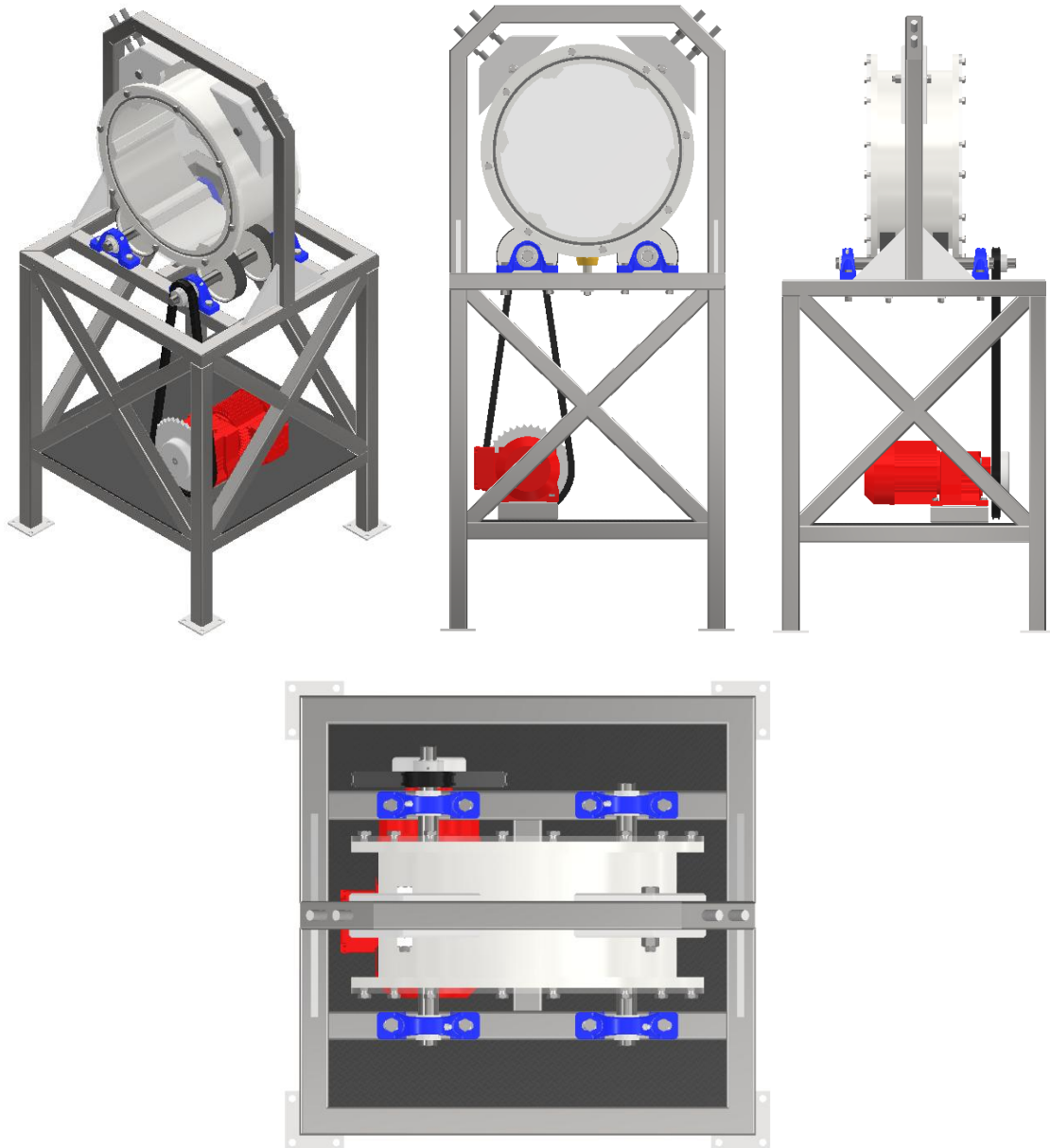


Figura 8.2: Diseño del banco de ensayos para aglomeración de mineral.

En el diseño preliminar de la Figura 8.2, los componentes mecánicos que integran el banco de ensayos son: estructura metálica de 40x40x3 mm, tambor aglomerador de $\phi 300 \times 200$ mm, lifters de polietileno

HMW, motorreductor corona sin fin, 4 ruedas de fricción, 2 ejes de $\phi 32$ mm de acero AISI 1045, tapas de acrílico y sistema de transmisión de potencia por polea o cadena.

8.3 Cálculo de torque y potencia.

Para el cálculo de torque necesario del tambor se utiliza la ecuación (9),

$$M_t = fgLR^3\rho_n\left[\frac{\omega^2R}{g}\left(\alpha - \frac{\sin(2\alpha)}{2}\right) + \cos(\beta_0)\left(\frac{4}{3}\sin(\alpha) - \frac{1}{6}\sin(2\alpha)\cos(\alpha) - \alpha\cos(\alpha)\right)\right] \quad (59)$$

A partir de las múltiples variables de la ecuación (59), que dependen del comportamiento del material al interior del tambor, se realiza una simulación en Ansys Rocky, con el objetivo de determinar estas variables. En la Figura 8.3, se presenta los resultados de la simulación en régimen estacionario, y a partir de la distribución del material al interior del tambor se determina: El ángulo de reposo dinámico y el ángulo que ocupa el material. La condición más exigente para la operación del tambor es cuando este se encuentra operando a máxima capacidad y velocidad. Se consideran los siguientes valores para cada una de las variables.

Tabla 13: Variables de diseño tambor aglomerador de laboratorio.

Variable	Nomenclatura	Valor
Radio del tambor	R	0.19 [m]
Largo del tambor	L	0.2 [m]
Coefficiente de fricción	f	0.5 [-]
Velocidad angular	ω	0-40 [RPM]
Ángulo de reposo dinámico	β_0	40 [°]
Ángulo de apertura	α	189 [°]

Se reemplazan cada uno de los valores presentados en la Tabla 13, en donde se obtiene una potencia requerida de 180 W y un torque de 42.93 Nm. Estos valores nos permitirán seleccionar un motor adecuado para hacer rotar el tambor con el material. Además, permitirán seleccionar y dimensionar de forma adecuada los elementos mecánicos del sistema motriz y de transmisión.

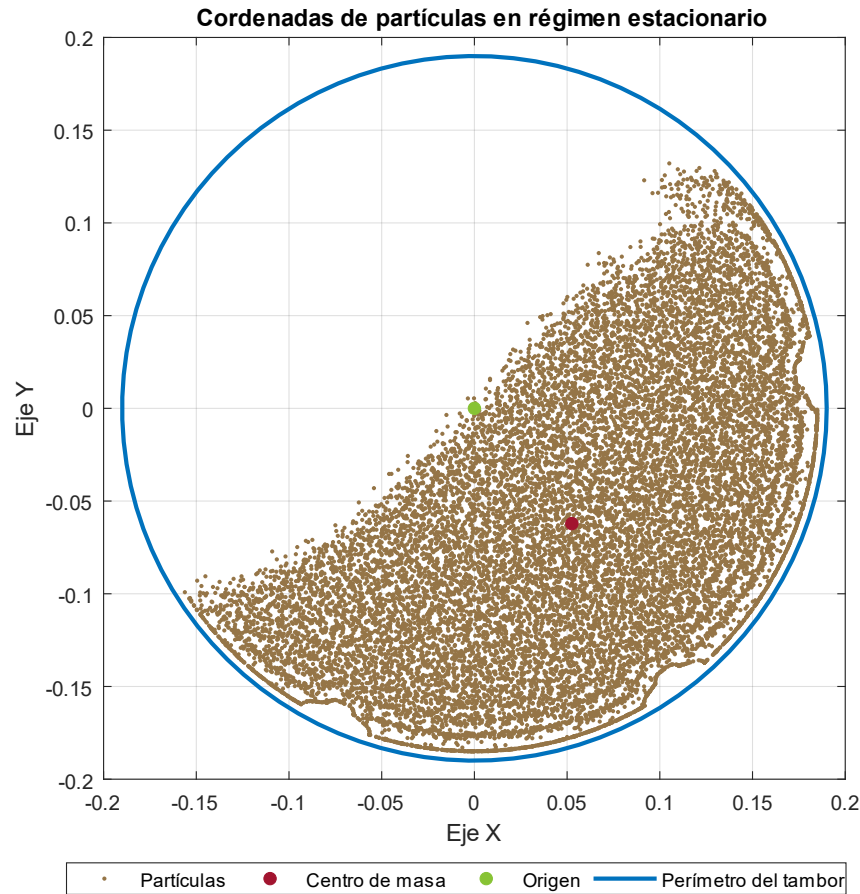


Figura 8.3: Régimen estacionario de simulación de tambor banco de ensayos

8.3.1 Dimensionamiento y selección de motorreductor.

A partir de los requerimientos de potencia y torque, se procede a la selección de un motor monofásico junto a un reductor de velocidad. A continuación, se presenta un motorreductor que cumple con los criterios de potencia y velocidad establecidos en los antecedentes de diseño. La elección del motor se fundamenta en la necesidad de que satisfaga las condiciones operativas definidas, así como en su viabilidad económica y su amplia disponibilidad en el mercado. Esto asegura no solo un acceso eficiente para su adquisición, sino también una adecuada facilidad de mantenimiento a lo largo de su vida útil. En la Tabla 14, se presenta las especificaciones técnicas de dicho equipo.

Tabla 14: Características del motorreductor.

Variable	Descripción
Marca	SEW EURODRIVER
Modelo	R17DZ71C4
Velocidad	1380 [rpm]
Velocidad salida	36 [rpm]
Potencia	0.25 [kW]
Torque	85 [Nm]

8.4 Análisis estático del tambor aglomerador

Se considera el análisis estático del tambor aglomerador para el análisis de las fuerzas en los apoyos y ejes. Para realizar el diagrama de cuerpo libre de la estructura, se considera la condición más desfavorable (exigente) para los elementos mecánicos. Dado el efecto de la rotación del tambor aglomerador en sentido antihorario, se tiene en cuenta la inclinación del lecho de material hacia uno de los ejes, lo cual genera una distribución desigual de cargas que debe ser analizada para asegurar la integridad estructural bajo estas condiciones críticas.

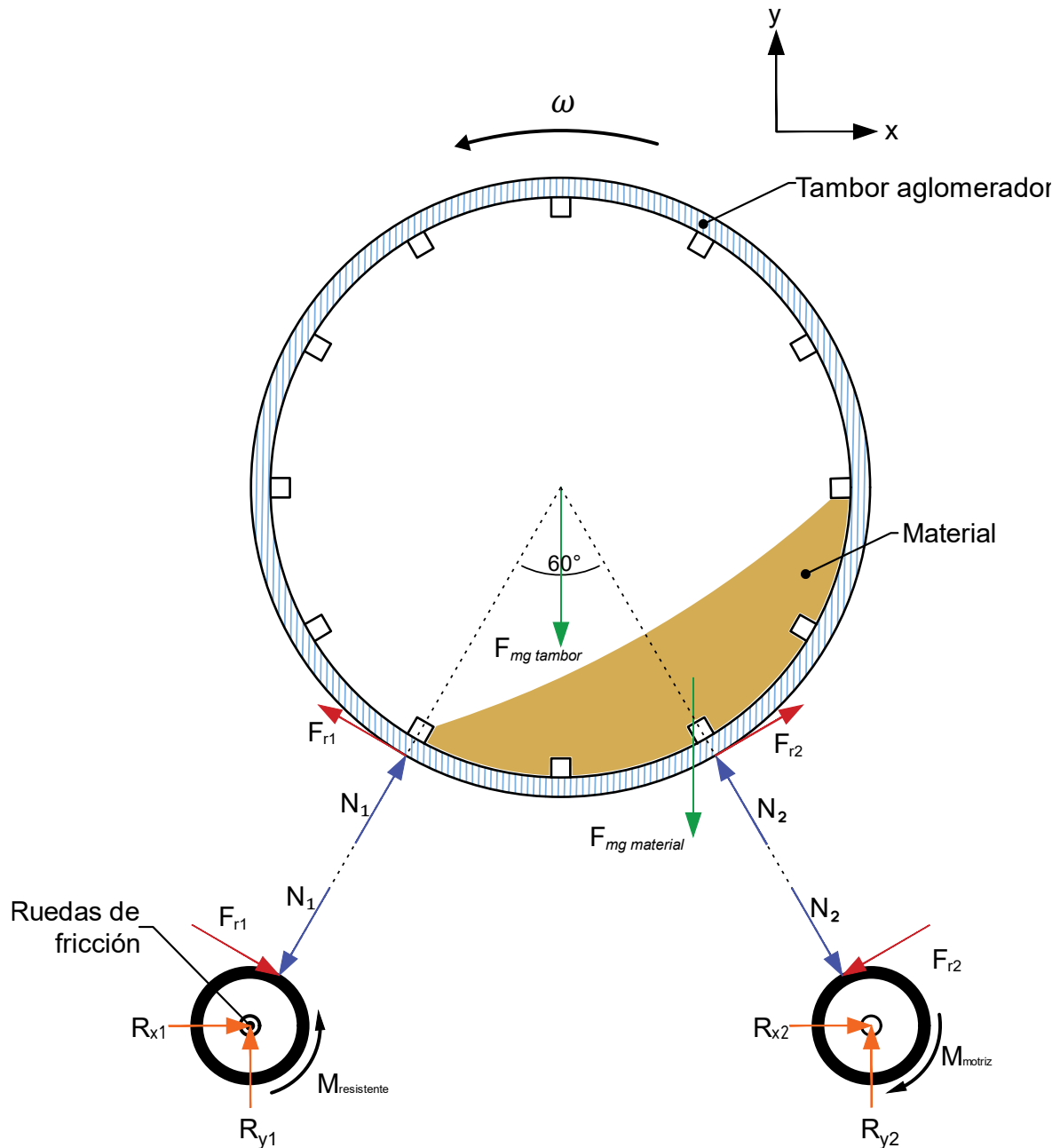


Figura 8.4: Diagrama de cuerpo libre en régimen estacionario de un tambor aglomerador con sistema de transmisión de potencia por ruedas de fricción.

En la Figura 8.4, se presenta el diagrama de cuerpo libre en régimen estacionario del tambor aglomerador con sistema de transmisión de potencia por ruedas de fricción. Tenemos que la rueda derecha se le aplica un torque motriz, lo que produce la rotación del tambor en sentido antihorario. Producto del contacto entre la rueda motriz y el tambor, existen las siguientes fuerzas, las cuales se describen la Tabla 15. Asimismo, la fuerza peso que ejerce la masa del tambor y material.

Tabla 15: Nomenclatura del diagrama de cuerpo libre.

Variable	Descripción	Unidad
$F_{mg\ tambor}^7$	Fuerza peso ejercida por la masa del tambor	N
$F_{mg\ material}^8$	Fuerza peso ejercida por la masa de material	N
M	Torque motriz	Nm
R_x	Componente de la reacción en el eje x	N
R_y	Componente de la reacción en el eje y	N
F_{r2}	Fuerza de fricción	N
N_2	Fuerza normal	N
ω	Velocidad de rotación del tambor	rad/s

Es fundamental destacar que la selección de la rueda motriz y la dirección de rotación de este componente se lleva a cabo de manera estratégica. Este procedimiento se basa en el principio de que, al girar en una dirección específica el tambor, el centro de masa del sistema tiende a trasladarse más cerca del eje motriz. Esta disposición resulta en un aumento de la fuerza normal entre la rueda motriz y la superficie de contacto. Como consecuencia, se incrementa la fuerza de fricción, lo que favorece la transmisión de potencia. De esta manera, se optimiza la eficiencia del sistema y se minimiza el riesgo de deslizamiento, asegurando un rendimiento adecuado durante el funcionamiento. Esto implica que el banco de ensayos, tanto en su fase de puesta en marcha como durante su funcionamiento operativo, tendrá restringido el giro en un sentido único.

A partir del diagrama de cuerpo libre en la figura 6.4, se plantea las ecuaciones de equilibrio por la primera ley de Newton.

$$\sum F_Y = 0 \rightarrow -m_{t+m} \cdot g + N_1 \text{Sen}(60^\circ) + N_2 \text{Sen}(60^\circ) + N_1 \mu_r \text{Sen}(30^\circ) + N_2 \mu_r \text{Sen}(30^\circ) = 0$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow N_1 \text{Cos}(60^\circ) - N_2 \text{Cos}(60^\circ) + N_2 \mu_r \text{Cos}(30^\circ) - N_1 \mu_r \text{Cos}(30^\circ) = 0$$

$$= (N_2 - N_1) \mu_r \text{Cos}(30^\circ) - (N_2 - N_1) \text{Cos}(60^\circ) = 0$$

$$= (\mu_r \text{Cos}(30^\circ) - \text{Cos}(60^\circ))(N_2 - N_1) = 0$$

$$\sum M_O = 0 \rightarrow -m_m g \text{Cos}(30^\circ) * c + N_2 \mu_r R - N_1 \mu_r R = 0$$

⁷ Se utilizará el subíndice t para referirse al tambor.

⁸ Se utilizará el subíndice m para referirse al material.

A partir de las ecuaciones de equilibrio planteadas anteriormente, se consideran los siguientes datos para obtener las fuerzas normales:

Tabla 16: Datos utilizados para el cálculo de fuerzas en los puntos de contacto.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
μ_r	Coefficiente de roce	0.8	-
g	Aceleración de gravedad	9.81	m/s^2
m_{t+m}	Masa de tambor y material	51.05	kg
m_m	Masa de material	19.05	kg
c	Ubicación de centro de masa	0.0813	m
R	Radio del tambor	0.15	m

Los resultados de las fuerzas normales (en ambas ruedas) que son ejercidas sobre cada uno de los ejes.

$$N_1 = 169 \text{ N}$$

$$N_2 = 242.8 \text{ N}$$

Es importante mencionar que las condiciones en las que se deba operar el tambor de laboratorio estarán condicionadas hacia un único sentido de giro, el cual permita inclinar el material hacia el eje motriz o el eje que genera el movimiento al tambor. Esto permite garantizar la integridad estructural por medio de los cálculos realizados anteriormente, y la transmisión de potencia de forma adecuada y eficaz del tambor.

8.5 Dimensionamiento de relación del sistema de transmisión

Como se mencionó en el apartado 8.1, el banco de ensayos requiere que el tambor opere a una velocidad angular de 40 rpm. A partir de este requerimiento y considerando las condiciones de operación del motorreductor seleccionado, es necesario definir las especificaciones de los distintos componentes mecánicos de la transmisión de potencia. Esto garantizará que el sistema cumpla con las exigencias o requerimientos establecidos, basándose en las características del motorreductor. En [53] establece la ecuación que define la relación de transmisión en un sistema de transmisión de potencia.

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2} \quad (60)$$

Donde, en la Tabla 17 se presenta la descripción de cada una de las variables.

Tabla 17: Nomenclatura de una relación de un sistema de transmisión.

Variable	Descripción	Unidad
n_1	Velocidad angular de entrada	[rad/s]
n_2	Velocidad angular de salida	[rad/s]
d_1	Diámetro de polea conductora	[m]
d_2	Diámetro de polea conducida	[m]

A partir de la ecuación (60), los valores que se obtuvieron para el dimensionamiento (tamaño y velocidad de rotación) de las ruedas de fricción, sprocket de eje motriz y salida de reductor, se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18: Relaciones de transmisiones de los distintos componentes mecánicos del banco de ensayos.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
n_1	Velocidad angular de tambor aglomerador	40	[RPM]
n_2	Velocidad angular del eje motriz – ruedas de fricción	116	[RPM]
n_3	Velocidad angular del eje motriz – Corona	116	[RPM]
n_4	Velocidad angular del eje de salida motorreductor	36	[RPM]
d_1	Diámetro de Tambor aglomerador	406	[mm]
d_2	Diámetro de ruedas de fricción	140	[mm]
d_3	Diámetro de Corona en eje motriz	50	[mm]
d_4	Diámetro de Piñón en salida de motorreductor	161	[mm]

8.6 Cálculo de sistema de transmisión de potencia motorreductor a eje motriz

El sistema de transmisión por cadena permitirá transmitir la potencia desde la salida del eje del reductor al eje motriz. El motivo principal por la cual se elige este sistema en específico es porque la velocidad de salida del motorreductor es muy baja para utilizar un sistema por correas y poleas, ya que la tensión inicial de la correa sería de una magnitud muy grande, lo cual hace inviable este sistema.

Para el dimensionamiento de una cadena, la norma ANSI B29.1-1975 entrega una tabla con las diferentes capacidades de transmisión de potencia de una cadena dependiendo de la velocidad de la catarina de menor diámetro y el tamaño de la cadena. Dichas capacidades están limitadas para condiciones específicas de operación, las cuales se presentan a continuación.

- 15 000 h a carga completa
- Hilera única
- Proporciones ANSI
- Factor de servicio unitario
- 100 pasos en longitud
- Lubricación recomendada
- Elongación máxima de 3 por ciento
- Ejes horizontales
- Dos catarinas de 17 dientes

Para el desarrollo del cálculo, para determinar de una cadena adecuada para el sistema, a partir de las estimaciones obtenidas en 8.5 se requiere que la velocidad angular de la Catarina de menor diámetro sea de 116 [RPM], según la tabla en sección “Elementos mecánicos flexibles – cadenas” [53] se estima que para transmitir una potencia de 0.34 [HP] se necesita una cadena ANSI número 50. En la Tabla 19, se muestran las características de la cadena seleccionada.

Tabla 19: Características de cadena ANSI número 50.

Características	Valor	Unidad
Paso	0.625	in
Ancho	0.375	in
Resistencia mínima a la tensión	4880	lbf
Peso promedio	0.69	lbf/pie
Diámetro del rodillo	0.4	in
Espaciamiento de hileras múltiples	0.713	in

Por otra parte, debido a los cálculos realizados en 8.5 es necesario seleccionar el tamaño de las catarinas según catálogo comercial. Del catálogo [54], se selecciona 2 catarinas las cuales estará ubicadas a la salida del eje del reductor y en el eje motriz del tambor aglomerador. Las características de dichas catarinas se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20: Características de selección de sprockets.

Posición	Característica	Valor	Unidad
Sprocket salida del motorreductor	Número de dientes	12	-
	Diámetro primitivo	61.34	mm
	Diámetro externo	68.00	mm
Sprocket entrada al eje	Número de dientes	39	-
	Diámetro primitivo	197.29	mm
	Diámetro externo	204.2	mm

Para estimar la capacidad de transmisión de una cadena limitada por resistencia a la fatiga, *American Chain Association* (ACA) (*Chains for Power Transmission and Materials Handling* (1982)) proporciona las ecuaciones (61) y (62), que permiten estimar la potencia de transmisión limitadas por resistencia a la fatiga de la placa del eslabón y rodillos, respectivamente.

$$H_1 = 0.004N_1^{1.08}n_1^{1.08}p^{(3-0.07p)} \text{ [hp]} \quad (61)$$

$$H_2 = \frac{1000 k_r N_1^{1.5} n_1^{1.08} p^{0.8}}{n_1^{1.5}} \text{ [hp]} \quad (62)$$

Donde,

- N_1 es el número de dientes de la catarina de menor diámetro
- n_1 velocidad de la catarina de menor diámetro en [rpm]
- p paso de la cadena [pulg]
- k_r 29 para los números de cadena 25 y 35; 3.4 para cadenas 41; 17 para cadenas 40-240

Para determinar la potencia efectiva o permisible de una cadena H_a , según las condiciones de diseño y operación del banco de ensayos se debe corregir la potencia por medio de factores de corrección, los cuales dependerán del tamaño de las catarinas, número de hileras de cadenas, factor de seguridad y factor de servicio.

A partir del cálculo de potencia limitado por fatiga en las ecuaciones (61) y (62), se determina que componente posee menor capacidad de transmisión, el cual se considera como H_{tab} como se muestra en la ecuación (63). Luego se calcula por medio de la variable H_a la potencia que es capaz de transmitir una cadena en condiciones no ideales de operaciones. Finalmente, se comparan las potencias H_a y H_d , para determinar si la cadena seleccionada puede transmitir la potencia del motor para las condiciones específicas de diseño y operación del tambor aglomerador.

$$H_{tab} = \min(H_1, H_2) \text{ [hp]} \quad (63)$$

$$H_a = k_1 k_2 H_{tab} \text{ [hp]} \quad (64)$$

$$H_d = k_s n_d H_{nom} \text{ [hp]} \quad (65)$$

$$H_a \geq H_d \quad (66)$$

Donde,

- H_{tab} es la potencia que puede transmitir una cadena en una corona de 17 dientes.
- H_a es la potencia que es capaz de transmitir una cadena en condiciones de operación específicas.
- H_{nom} es la potencia nominal que se transmitirá o potencia del motor.
- H_d es la potencia que se debe transmitir o corregida según las condiciones de operación reales.
- k_1 es el factor de corrección de número de dientes.
- k_2 es el factor de corrección de hileras múltiples.
- k_s es el factor de servicio.
- n_d es el factor de diseño.

Tabla 21: Resumen de cálculos de potencia y factores de corrección dimensionamiento de cadena.

Variable	Valor	Unidad
H_{nom}	0.34	HP
H_d	0.612	HP
H_{tab}	1.038	HP
H_a	0.665	HP
k_1	0.64	-
k_2	1	-
k_s	1.2	-
n_d	1.5	-

Finalmente, los resultados obtenidos validan que una cadena ANSI número 50 es capaz de transmitir la potencia del motorreductor al eje motriz del banco de ensayos.

8.7 Dimensionamiento de ruedas de fricción

A partir del catálogo [55], se determinan las dimensiones y capacidad de transmisión de potencia por fricción entre las ruedas y el tambor. En el ítem 8.5, se determina que el diámetro de la rueda es de 140 mm aproximadamente, según la relación de transmisión.

Para determinar las dimensiones y selección de las ruedas de fricción adecuadas para una transición de potencia, es necesario calcular el factor de flexibilidad C_1 . Este factor depende de los diámetros de

los elementos que se encuentran en contacto, según la relación de transmisión, lo cual permitirá corregir la fuerza máxima aplicada cuando los elementos están en contacto y estos no superficies planas. Este parámetro se calcula con la ecuación (67).

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(1 + \frac{d_1}{d_2}\right)}} \quad (67)$$

Adicionalmente, se considera un segundo factor de corrección denominado factor de servicio, el cual depende del tiempo de funcionamiento diario del equipo, la frecuencia de conmutación, pares de arranque y temperatura. Según las condiciones de operación y lo establecido por el autor, se determina que el factor de servicio es $C_2 = 1.1$.

Se calcula la velocidad circunferencial, a partir del diámetro de un de los elementos rodantes y su velocidad angular. La ecuación (68) muestra como determinar la velocidad donde d es el diámetro y n la velocidad angular en revoluciones por minuto.

$$V = \frac{\pi d n}{60} \cdot 10^3 \quad (68)$$

Luego, se determina la fuerza circunferencial o de fricción (69), este parámetro permite determinar la fuerza tangencial necesaria para la transmisión de potencia P y una velocidad circunferencial V .

$$F_{u,erf} = \frac{P}{V} \quad (69)$$

Dado que la fuerza de fricción (69) esta relaciona con la fuerza normal, se calcula la fuerza normal requerida para la transmisión efectiva de potencia considerando el coeficiente de fricción, a partir de la ecuación (70).

$$F_{n,erf} = \frac{F_{u,erf}}{\mu} \quad (70)$$

La fuerza $F_{n,erf}$ es necesario verificar estructuralmente que la rueda pueda soportar esta fuerza normal.

Se determina la potencia admisible (71) utilizando la potencia transmisible admisible P_r , los factores de corrección c_1 y c_2 , según las condiciones de operación establecidas, y el coeficiente de fricción entre los materiales en contacto μ .

$$P_{eff} = \frac{P_r c_1 \mu}{c_2 0.7} \quad (71)$$

Luego, se determina el número de ruedas z , ecuación (72) a partir de la potencia que se desea transmitir P y la potencia admisible P_{eff} .

$$z = \frac{P}{P_{eff}} \quad (72)$$

Finalmente, se recalcula la fuerza de normal de contacto (73) requerida para la transmisión de potencia según las condiciones de operación y la cantidad de ruedas utilizadas para la transmisión.

$$F_n = \frac{Pc_2}{V\mu zc_1} \quad (73)$$

Los cálculos realizados a partir de cada una de las ecuaciones se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22: Resumen de resultados de cálculos para el dimensionamiento ruedas de fricción.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
C_1	Factor de flexibilidad	0.9	-
C_2	Factor de servicio	1.1	-
V	Velocidad tangencial	0.84	m/s
$F_{u\,erf}$	Fuerza tangencial de transmisión	297.62	N
$F_{n,erf}$	Fuerza normal de transmisión	425.17	N
P_{eff}	Potencia admisible	981.8	W
z	Número de ruedas (establecidas)	1	-
F_n	Fuerza normal	259.8	N

De los resultados obtenidos, se concluye que es necesaria una fuerza normal de 259.8 N en cada rueda del eje motriz derecho para transmitir una potencia de 250 W. Esto implica una fuerza normal total aplicada entre el tambor y ambas ruedas de 519.6 N.

Sin embargo, los cálculos en el punto 8.4 indican que la fuerza normal sobre el eje motriz es de 242.8 N en total (121.4 N por rueda), lo que resulta insuficiente. Para garantizar una transmisión efectiva de la potencia, se propone instalar un soporte en la parte superior del banco de ensayos. Este soporte permite, mediante dos ruedas guías, aplicar una carga adicional constante de 276.8 N por lado, aumentando la fuerza normal sin incrementar el tamaño ni la masa del tambor aglomerador.

8.8 Dimensionamiento y selección de eje

Se realiza el diagrama de cuerpo libre del eje en sus distintos planos, para determinar los puntos críticos de fuerza de corte y momento flector en el componente mecánico. En la figura 6.5 se muestra la superposición simplificada de la aplicación de cada una de las fuerzas a las que se encuentra sometido el eje. En la Tabla 23, se detalla cada una de las fuerzas que actúa sobre el eje.

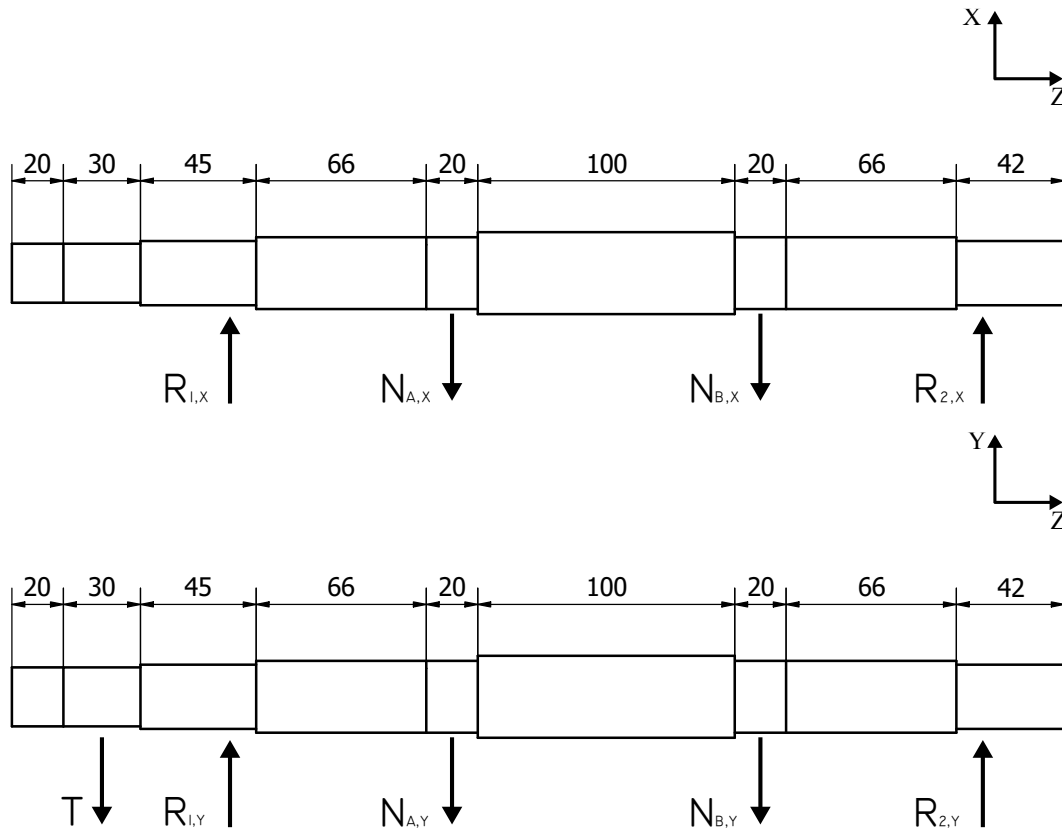


Figura 8.5: Fuerzas aplicadas en el eje derecho del banco de ensayos. Imagen superior, plano XY. Imagen inferior, plano XZ.

Tabla 23: Datos utilizados para el cálculo de fuerzas en los puntos de contacto.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
T	Tensión ejercida por la cadena o polea	823.76	N
$R_{1,x}$	Reacción apoyo 1 en el eje x	61.12	N
$R_{1,y}$	Reacción apoyo 1 en el eje y	1038.42	N
$R_{2,x}$	Reacción apoyo 2 en el eje x	60.88	N
$R_{2,y}$	Reacción apoyo 2 en el eje y	15.92	N
N	Fuerza normal ejercida por el tambor	259.8	N

8.8.1 Análisis por fuerzas de corte

A partir de los resultados de fuerza de corte, en la Figura 8.8 la fuerza de corte crítica se encuentra con un máximo aproximado de 826 N.

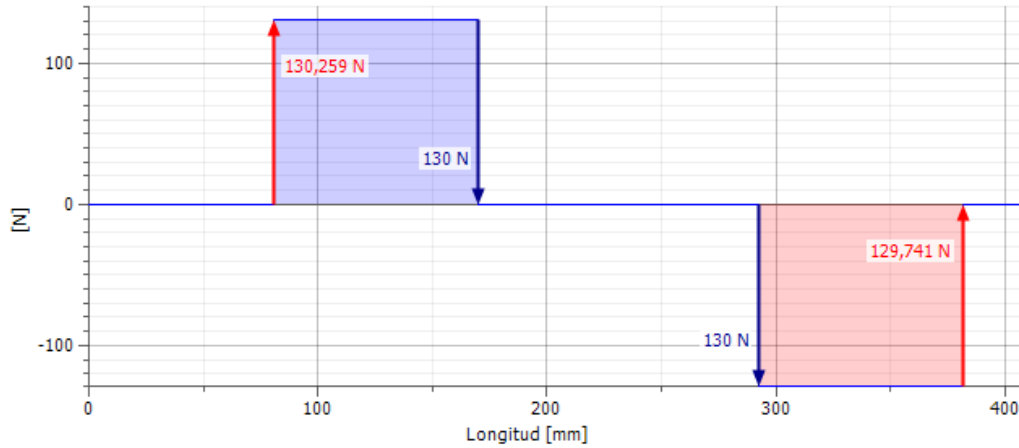


Figura 8.6: Fuerzas de corte en el eje XZ en el eje derecho.

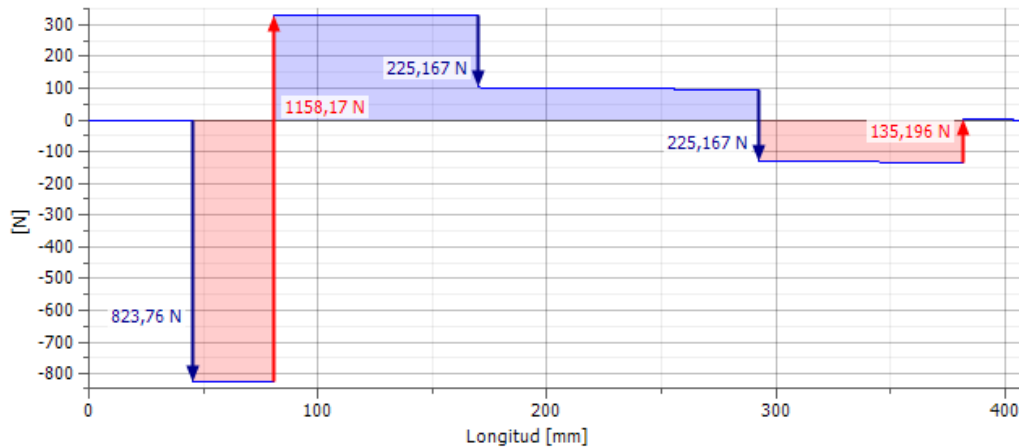


Figura 8.7 : Fuerzas de corte en el eje YZ en el eje derecho.

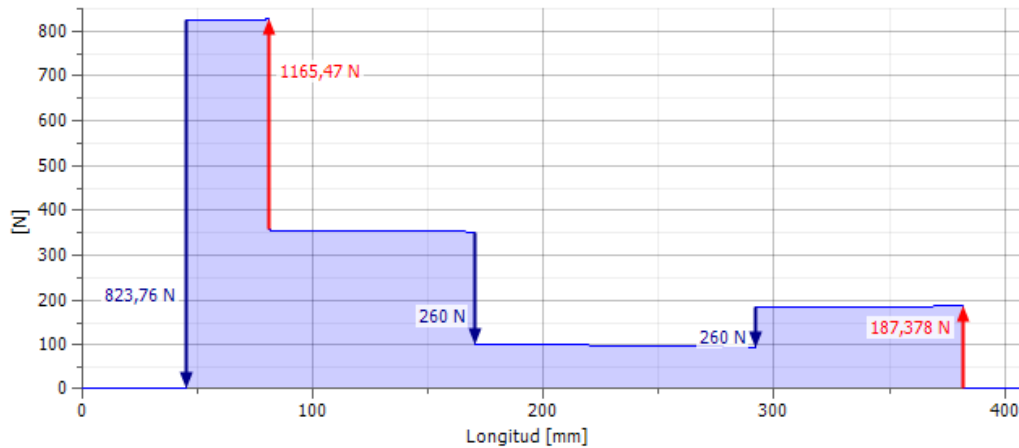


Figura 8.8: Fuerzas de corte resultante por la superposición de los planos en el eje derecho.

8.8.2 Análisis por momento flector

A partir de los resultados de momento flector, en la Figura 8.11 el momento crítico se encuentra con un máximo de 29.6 Nm.

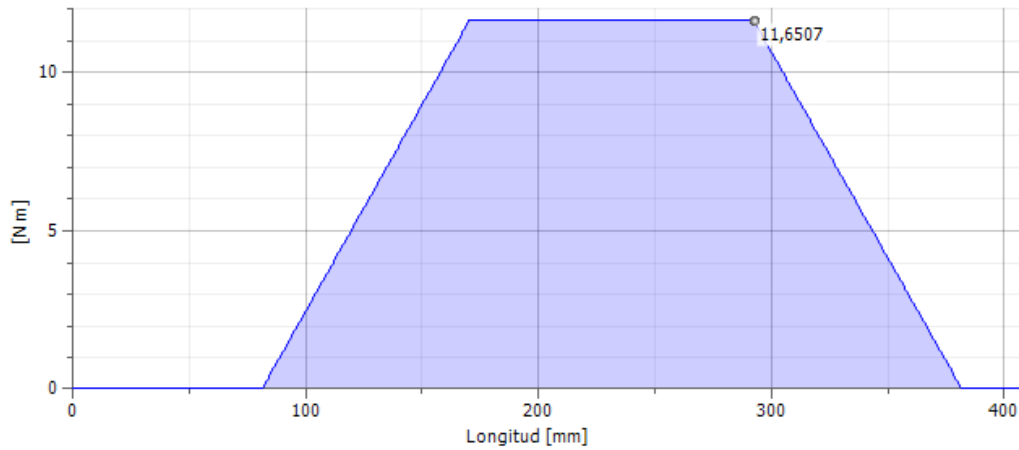


Figura 8.9: Momento flector plano XZ

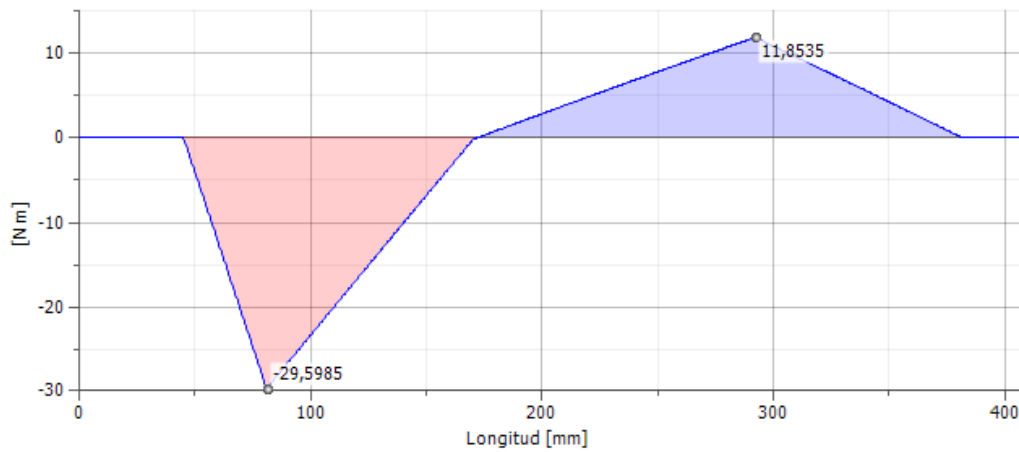


Figura 8.10: Momento flector plano YZ

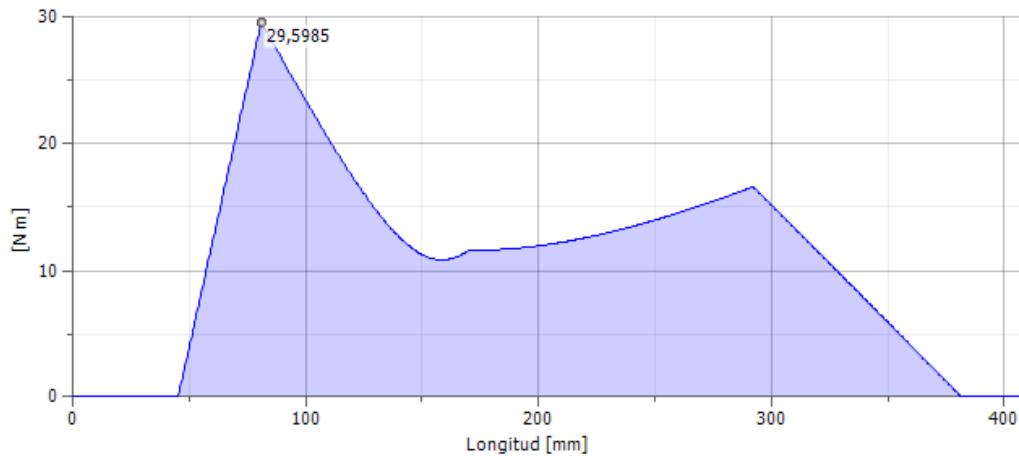


Figura 8.11: Superposición de momento flector de ambos planos.

8.9 Dimensiones del eje

A partir de las fuerzas a las que está sometido el eje, se calcula por métodos iterativos el diámetro del eje por el criterio de fatiga de Gerber, con la ecuación (74). Donde, d es el diámetro, N_f es el factor de seguridad, S_{fat} es el límite corregido a la fatiga, S_{ut} es la resistencia última a la tensión del material, k_f es el factor de concentración de esfuerzos para momentos, k_{sf} es el factor de concentración de esfuerzos para torsión, M_a es el momento flector alternante, T_a es el torque alternante, M_m es el momento flector medio y T_m es el torque medio.

$$d = \left[\frac{8 \cdot N_f \cdot A}{\pi \cdot S_{fat}} \left[1 + \left(1 + \left(\frac{2 \cdot B \cdot S_{fat}}{A \cdot S_{ut}} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right]^{1/3} \quad (74)$$

$$A = \sqrt{4(k_f M_a)^2 + 3(k_{sf} T_a)^2} \quad (75)$$

$$B = \sqrt{4(k_f M_m)^2 + 3(k_{sf} T_m)^2} \quad (76)$$

Además, se considera las propiedades del acero *AISI/SAE 1045* para el diseño y fabricación del eje motriz, como el eje que soporta el tambor. Las propiedades del acero se encuentran descritas en la Tabla 24.

Tabla 24: Propiedades del acero AISI 1045

Descripción	Valor	Unidad
Resistencia a la tensión	617	MPa
Límite elástico	392	MPa
Densidad	7.85	gr/cm ³
Módulo de elasticidad	205 000	MPa

Según las ecuaciones presentadas anteriormente, las cargas a las que se somete el eje son cíclicas, se corrige el esfuerzo a fatiga. Se utilizan los siguientes factores de corrección que permitirán modificar el esfuerzo a la fatiga según las condiciones a las que estará sometido el eje. Además, la ecuación que modifica o corrige el esfuerzo a la fatiga está dado por la ecuación (77) y (78).

$$S'_{fat} = 0.5 S_r \quad (77)$$

$$S_{fat} = S'_{fat} \cdot C_c C_t C_s C_T C_i \quad (78)$$

Tabla 25: Factores de corrección para el límite a la fatiga.

Descripción	Valor	Nomenclatura
Factor de carga	1	C_c
Factor de tamaño	iteración	C_t
Factor de superficie	0.821	C_s
Factor de temperatura	1	C_T
Factor de grado de confiabilidad	0.868	C_i
Límite a la fatiga (acero)	0.5	S'_{fat}

Por otra parte, en la Tabla 26 se establecen factores para la concentración de esfuerzos, los cuales dependerán del tipo de concentrador (criterio): Cambio de sección, cuñero de fresado y anillo de retención. La utilización de los factores de concentración de esfuerzo se debe a la disposición de cada uno de los elementos mecánicos a lo largo del eje para el funcionamiento del sistema, por lo que es necesario modificar secciones del eje para un desempeño óptimo del banco de ensayos. (revisar planos en anexos para más información sobre elementos que componen el eje motriz). Los criterios son:

- i. Cambio de sección: Permite limitar, fijar y alinear axialmente los elementos mecánicos, evitando su movimiento relativo y facilitando el armado del sistema.
- ii. Cuñero fresado: Transmite potencia entre el eje y los componentes acoplados.
- iii. Anillo de retención: Evita el desplazamiento axial de los elementos, incrementando la seguridad operacional.

Tabla 26: Factores de concentración de esfuerzos a partir del tipo de criterio.

Criterio	Nomenclatura	Valor
Cambio de sección	q	1
	k_t	2.7
	k_f	2.7
	k_{ts}	2.2
	k_{fs}	2.2
Cuñero fresado	q	1
	k_t	2.8
	k_f	2.8
	k_{ts}	3.15
	k_{fs}	3.15
Ranura para anillo de retención	q	1
	k_t	5
	k_f	5
	k_{ts}	3
	k_{fs}	3

La Figura 8.12 presenta las distintas secciones del eje, identificando los puntos críticos para el cálculo del diámetro mínimo. Los resultados iterativos para cada sección están resumidos en la Tabla 27.

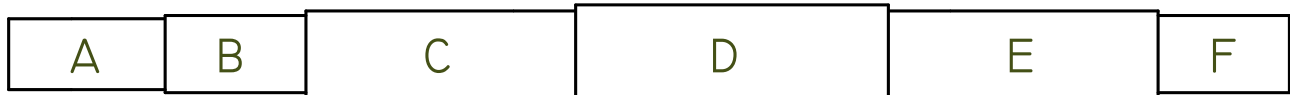


Figura 8.12: Denominación de cada una de las secciones del eje

Tabla 27: Resultados obtenidos a partir de las iteraciones realizadas en las distintas secciones del eje.

Punto crítico	Criterio de concentración de esfuerzos	Nº iteración	$C_{tamaño}$	Esfuerzo de ruptura [MPa]	Momento flector [Nm]	Torque [Nm]	Diámetro [mm]
A	Cambio de sección	1	0.63	139.65	4.62	20.6	14.61
		2	0.66	145.18	4.62	20.6	14.50
		3	0.66	145.29	4.62	20.6	14.50
	Cuñero fresado	1	0.63	139.65	4.62	20.6	15.49
		2	0.66	144.27	4.62	20.6	15.50
		3	0.66	144.26	4.62	20.6	15.50
	Ranura para anillo de retención	1	0.63	139.65	4.62	20.6	17.28
		2	0.65	142.59	4.62	20.6	17.20
		3	0.65	142.66	4.62	20.6	17.19
B	Cambio de sección	1	0.63	139.65	26.75	20.6	23.73
		2	0.63	137.83	26.75	20.6	23.83
		3	0.63	137.77	26.75	20.6	23.84
	Cambio de sección (máximo)	1	0.63	139.65	29.6	20.6	24.62
		2	0.62	137.29	29.6	20.6	24.66
		3	0.62	137.27	29.6	20.6	24.66
	Cambio de sección	1	0.63	139.65	11.66	20.6	18.34
		2	0.64	141.69	11.66	20.6	18.26
		3	0.64	141.75	11.66	20.6	18.26
C	Cuñero fresado	1	0.63	139.65	11.66	20.6	18.90
		2	0.64	141.23	11.66	20.6	18.84
		3	0.64	141.28	11.66	20.6	18.84
	Ranura para anillo de retención	1	0.63	139.65	11.66	20.6	22.29
		2	0.63	138.76	11.66	20.6	22.33
		3	0.63	138.73	11.66	20.6	22.33
	Cambio de sección	1	0.63	139.65	16.73	10.3	20.26
		2	0.66	140.19	16.73	10.3	20.23
		3	0.66	140.21	16.73	10.3	20.23
E	Cuñero fresado	1	0.63	139.65	16.73	10.3	20.56
		2	0.66	139.97	16.73	10.3	20.55
		3	0.66	139.97	16.73	10.3	20.55
Ranura para anillo de retención	1	0.63	139.65	16.73	10.3	24.84	
	2	0.65	137.16	16.73	10.3	24.99	
	3	0.65	137.07	16.73	10.3	25.00	
F	Cambio de sección	1	0.63	139.65	2.35	10.3	11.63
		2	0.68	148.79	2.35	10.3	11.49
		3	0.68	148.90	2.35	10.3	11.49

Se determinó que el diámetro mínimo requerido para la sección del eje con mayores solicitaciones, correspondiente a la sección E, es de 25.00 mm. Por lo tanto, para garantizar la integridad estructural y un margen de seguridad adecuado, se establece un diámetro mínimo de 25.00 mm en esta zona. En consecuencia, en la Tabla 28 se establecen los diámetros necesarios para cada una de las secciones del eje, considerando el diámetro mínimo, seguridad y facilidad de ensamblaje.

Tabla 28: Diámetros establecidos para cada una de las secciones del eje.

Sección	Diámetro [mm]
A	23
B	25
C	28
D	32
E	28
F	25

Considerando las dimensiones estándar disponibles en aceros comerciales, se decidió fabricar el eje con acero de diámetro de 1 ½ pulgadas, asegurando compatibilidad con los materiales y herramientas de fabricación disponibles.

8.10 Dimensionamiento de chavetas

En el ítem 8.9 se determinó los diámetros mínimos de cada una de las secciones de los ejes. Con los antecedentes antes mencionado, se determina las dimensiones de las chavetas del sprocket, y las 2 ruedas que soportar y permiten la transmisión de potencia al tambor aglomerador.

Para el dimensionamiento de la chaveta, se utiliza la norma *ISO2491*, establece que para ejes que tengan un diámetro entre los 22 a 30 mm de diámetro, la sección transversal de la chaveta debe tener un ancho y alto de 8 x 5 mm. En efecto, de la norma y los cálculos de los elementos mecánicos realizados en los ítems anteriores, se calcula el largo mínimo que debe tener la chaveta.

Las ecuaciones (79) y (80) representan los esfuerzos de corte y aplastamiento, respectivamente. Los cuales deben ser menores al esfuerzo de corte admisible y esfuerzo de aplastamiento, considerando un factor de seguridad. Se determina que el material para la fabricación de las chavetas será un acero *ASTM A-36*. Las propiedades del acero se muestran en la

Tabla 29.

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{bL} \leq \tau_{admissible} = \frac{S_s}{N} \quad (79)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{h}{2}L} \leq \sigma_{admissible} = \frac{S_{ap}}{N} \quad (80)$$

Tabla 29: Propiedades del acero ASTM A-36

Descripción	Valor	Unidad
Resistencia a la tensión	400-550	MPa
Límite elástico	250	MPa
Densidad	7.85	gr/cm ³
Módulo de elasticidad	200 000	MPa

Tabla 30: Resultados obtenidos para el dimensionamiento de chaveta.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
F	Fuerza aplicada	1790	N
N	Factor de seguridad	2	-
$\tau_{admisible}$	Esfuerzo admisible por corte	93.75	MPa
$\sigma_{admisible}$	Esfuerzo admisible por aplastamiento	125	MPa
$L_{aplastamiento}$	Largo mínimo por aplastamiento	2.39	mm
L_{corte}	Largo mínimo por corte	5.73	mm

Finalmente, a partir de los cálculos realizados, que se resumen en la Tabla 30, el largo mínimo de la chaveta para la transmisión de potencia es de 5.73 mm. Cabe mencionar que se utilizará este mismo criterio para las chavetas que se encuentran ubicadas en las ruedas que soportan en el tambor, ya que los requerimientos en estas zonas son menores a las presentadas en el caso del sprocket.

8.11 Dimensionamiento de rodamientos

A partir del diámetro determinado en la sección de los soportes, se dimensionan los rodamientos necesarios para el sistema, para ello se considera el fabricante *SKF*, y su catálogo e instructivo para su selección.

Para el diseño de este banco de ensayos se utilizarán 4 criterios para la selección del rodamiento idóneo.

- i. Selección basada en la vida nominal
- ii. Selección basada en la carga estática
- iii. Selección basada en la carga mínima
- iv. Selección basada en la lubricación

Para determinar que el rodamiento seleccionado cumple con los criterios antes mencionados, se selecciona un rodamiento con un diámetro interno nominal de 25 mm (sección del eje donde están ubicados los descansos), el modelo del rodamiento es *SKF YAR 205-2RF*. En la Tabla 31, se presentan las especificaciones del rodamiento.

Tabla 31: Especificaciones del rodamiento SKF YAR 205-2RF.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
C	Capacidad de carga dinámica	14	kN
C_0	Capacidad de carga estática	7.8	kN
P_u	Carga de límite de fatiga	0.335	kN
-	Velocidad límite	4300	RPM
-	Masa	0.19	Kg
-	Ancho	16	mm

Se realiza la verificación de selección basada en la vida nominal. Primero se determina la carga dinámica equivalente sobre los rodamientos, para ello se utiliza la ecuación (81).

$$P = \begin{cases} F_r, & \text{si } \frac{F_a}{F_r} \leq e \\ XF_r + YF_a, & \text{si } \frac{F_a}{F_r} > e \end{cases} \quad (81)$$

Donde,

X_0 : Factor de carga radial, obtenida a partir de catálogo de fabricante

Y_0 : Factor de carga axial, obtenida a partir de catálogo de fabricante

F_r : Carga radial

F_a : Carga axial

s_0 : Factor de seguridad estática

X : Factor de carga radial, obtenida a partir de catálogo de fabricante

Y : Factor de carga axial, obtenida a partir de catálogo de fabricante

e : Límite de relación de carga

En la Tabla 32, se presentan los valores de las variables y los resultados obtenidos.

Tabla 32: Cálculo de carga dinámica de un rodamiento según las condiciones de operación.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
F_r	Fuerza radial (descanso)	1040.22	N
F_a	Fuerza axial (descanso)	0	-
X	Factor de carga radial	1	-
Y	Factor de carga axial	0	-
e	Límite de relación de carga	0	-
P	Carga dinámica equivalente	1.04	KN

Luego, para calcular la vida nominal básica del rodamiento, con una confiabilidad del 90% en horas de funcionamiento, se utiliza la ecuación (82).

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \left(\frac{10^6}{60n}\right) \quad (82)$$

Donde, p es el exponente de la ecuación de la vida (3 para rodamientos de bolas) y n es la velocidad de giro en revoluciones por minuto

El resultado del cálculo realizado determina que la vida nominal de funcionamiento en horas con una confiabilidad del 90% es de 350267 horas.

Luego, para el segundo criterio: selección basada en la carga estática, se utiliza la ecuación (83) y (84). De la última ecuación se desea obtener el factor de seguridad estática, el cual se compara con los valores tabulados por el fabricante [56], los cuales indican la influencia en la deformación permanente en el rodamiento.

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a \quad (83)$$

$$C_0 = s_0 P_0 \quad (84)$$

Tabla 33: Cálculo de factor de seguridad a partir de la carga estática del rodamiento.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
F_r	Fuerza radial	1040.22	N
F_a	Fuerza axial	0	-
X_0	Factor de carga radial	0.6	-
Y_0	Factor de carga axial	0.5	-
C_0	Capacidad de carga estática	7.8	kN
P_0	Carga estática equivalente	0.624	kN
s_0	Factor de seguridad estática	12.5	-

En la Tabla 33 se muestran los valores utilizados y el valor obtenido. El factor de seguridad es de 12.5 lo que garantiza una deformación no permanente.

Para el criterio de carga mínima se presenta la ecuación (85) entregada por el fabricante, donde se cumple con éxito el criterio establecido.

$$F_{rm} = 0,01 C \leq P_0 \quad (85)$$

$$0.14 \leq 1.04$$

Finalmente, se evalúa el criterio de lubricación para el rodamiento. El fabricante establece que para garantizar una vida nominal esperada con límite a la fatiga es importante mantener una condición de lubricación adecuada. Se presenta la ecuación (86), la cual nos indica la condición de lubricación del rodamiento, en relación al lubricante utilizado y las condiciones de operación.

$$k = \frac{v}{v_1} \quad (86)$$

Donde, v es la viscosidad real de funcionamiento del aceite o aceite base de la grasa y v_1 corresponde a la viscosidad nominal, en función del diámetro medio del rodamiento y la velocidad de giro. Ambas variables se miden [mm^2/s]. La mayoría de las aplicaciones de rodamientos están diseñadas para una condición de lubricación que varía con k entre 1 y 4, lo cual garantiza una lubricación mixta, es decir, una reducción del contacto entre superficies ásperas, desgaste y fatiga de superficie sin aditivos (revisar [56]).

Es importante seleccionar una grasa adecuada según las temperaturas de operación. Se determina que la temperatura ambiente, en el lugar donde se encontrará ubicado el banco de ensayos es de 20°C, y la temperatura de operación aproximadamente será entre 40 a 60°C. A partir de lo anterior, el fabricante establece el rango de temperatura recomendado para que una grasa pueda funcionar de manera óptima. Para garantizar una exitosa lubricación dependerá del tipo de aceite base, del espesante y de los aditivos. La grasa que cumple con los estándares es la LGWA 2 (grasa del fabricante SKF) para el rodamiento el rodamiento YAR 205-2RF. En la Tabla 34, se muestran las características de dicho lubricante.

Tabla 34: Características de la grasa SKF LGWA 2.

Descripción	Valor
Aplicación	Para rodamientos de la industria automovilística, electrodomésticos y motores eléctricos
Temperatura LTL	0
Espesante	Jabón complejo de litio
Aceite base	Aceite mineral
NGLI	2
Viscosidad del aceite base (mm ² /s a 40°C)	185

Se calcula la condición de lubricación con la grasa LGWA 2.

$$k = \frac{v}{v_1} = \frac{70}{150} = 0.467 \quad (87)$$

El valor obtenido en la ecuación (87), y la tabla de “Condición de lubricación” del fabricante nos indica que la condición de lubricación del rodamiento para la grasa seleccionada es lubricación mixta, pero debido a la velocidad baja de giro el fabricante recomienda el uso de aditivos EP y antidesgaste (la grasa seleccionada posee dichos aditivos) los cuales permitirán maximizar la vida útil del rodamiento. Por otra parte, otra alternativa es seleccionar una grasa con un aceite base con una viscosidad mucho mayor a 150 [mm²/s] para una temperatura de operación de 60°C, el aumento de la viscosidad permitirá una condición de lubricación mejor, según lo mencionado por el fabricante.

Por otra parte, con la tabla “Intervalos de relubricación” de SKF se determina el intervalo de tiempo de relubricación, para las condiciones de operación del tambor, de aproximadamente 30.000 horas. La grasa que viene incorporado en el rodamiento es un VT307, que posee una vida útil de 100.000 horas (revisar “Vida útil de la grasa para los rodamientos de inserción” SKF).

Si se desea utilizar una grasa distinta a la del fabricante, revisar las recomendaciones en el manual de rodamientos de SKF, o en efecto, utilizar una grasa con características similares a las detalladas en este ítem.

8.12 Análisis estructural

Se realizó un análisis de esfuerzos y desplazamientos de la estructura del banco de ensayos para evaluar su integridad estructural al ser sometida a múltiples fuerzas. Para ello, se aplicó una fuerza de 1500 Newtons en cada perfil de la estructura donde están instalados los rodamientos, así como una fuerza de 300 Newtons en cada uno de los lados donde se ubican los soportes de las ruedas guías superiores.

Como se observa en la Figura 8.13 (derecha), el mapa de colores indica los esfuerzos equivalentes de Von-Mises, cuyo valor máximo es de 26.3 MPa. Este valor es inferior al esfuerzo de fluencia del acero ASTM A-36 y se localiza en una de las uniones de los tres pilares principales (esquina). Es importante destacar que, durante la fabricación de la estructura, se debe ejecutar un cordón de soldadura adecuado para evitar una posible falla en esa zona.

En la figura de la derecha también se muestran los desplazamientos en milímetros de la estructura, evidenciando que el mayor desplazamiento se encuentra en la viga central, con un valor inferior a 0.15 mm, en la zona donde están ubicadas las guías axiales del tambor.

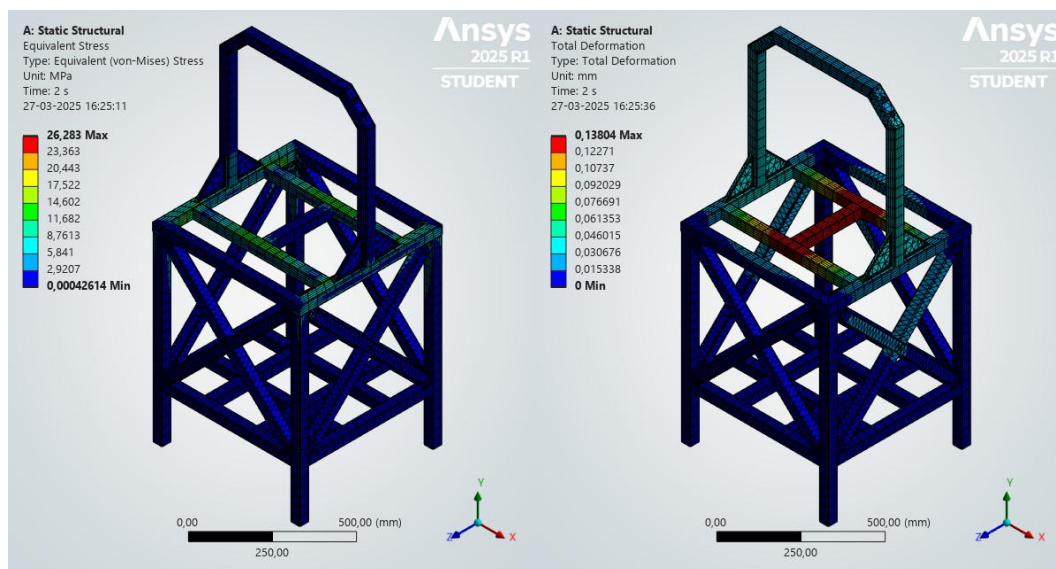


Figura 8.13: Resultados del análisis estático de la estructura del banco de ensayos en el software ANSYS.

8.13 Presupuesto y descripción de materiales

A partir de los capítulos desarrollados, la Tabla 35 presenta un presupuesto detallado para la materialización de un banco de ensayos a pequeña escala, que se destinará al análisis y estudio del proceso de aglomeración. Este presupuesto incluye estimaciones de costos para los materiales, componentes y equipos necesarios. El objetivo de este banco es proporcionar un entorno controlado donde se pueda investigar de manera sistemática el comportamiento de los materiales en el proceso de aglomeración, permitiendo así la obtención de datos relevantes que contribuyan al desarrollo y mejora de modelos numéricos en este campo.

Tabla 35: Presupuesto y descripción de materiales para la implementación de un banco de ensayos en el Departamento de Ingeniería Mecánica

Presupuesto Banco de ensayos - Tambor aglomerador				
Ítem	Descripción	Cant.	Valor unitario	Sub-total
1	Reductor C122P29.5P71B3	1	\$333.750	\$333.750
2	Motor VEMAT trifásico 0,37HP (0,25KW) 4P VTB71A B5	1	\$106.267	\$106.267
3	Variador de frecuencia IMATESA 0.75G1-220V KEW300 1HP-4A	1	\$125.892	\$125.892
4	Acero AISI/SAE 1020 140 mmx400 mm	1	\$86.036	\$86.036
5	Acero AISI 1045 de 1 1/2" x1000 mm (ejes del tambor)	1	\$17.379	\$17.379
6	Cadena AISI N50 2 m	1	\$34.520	\$34.520
7	Sprocket de 39 dientes de 1 hilera	1	\$30.606	\$30.606
8	Sprocket de 12 dientes de 1 hilera	1	\$8.560	\$8.560
9	Perfil tubular 40 mm x40 mm x3 mm y 6 m de Largo	3	\$24.990	\$74.970
12	Planchas Laminado en Caliente 1000x2000x5mm	1	\$79.725	\$79.725
13	Lifters - polietileno HMW (6 lifters)	1	\$29.529	\$29.529
14	Rueda guía Ducasse 35mm	1	\$7.990	\$7.990
15	Acrílico Transparente 5 mm 1.22 x 2.44 m	1	\$73.863	\$73.863
10	Soporte vertical rodamiento de 25mm (SKF P2B 25M-FM)	4	\$48.990	\$195.960
11	Perno anclaje 3/8 x 3 25 unidades	1	\$14.390	\$14.390
16	Pernos M10x35mm, M12x75mm, M14X80, M8X45 (varios)	1	\$30.000	\$30.000
17	Set de discos de corte 4,5" óxido de aluminio 5 unidades	1	\$4.990	\$4.990
18	Disco de desbaste metal 4,5" acero	1	\$1.990	\$1.990
19	Anticorrosivo Aquatech rojo 1/4 gl	1	\$2.780	\$2.780
20	Aguarrás 1 litro	1	\$3.850	\$3.850
21	Electrodo 6011 3/32" 1 kg	1	\$6.990	\$6.990
			Sub-total	\$1.270.037
			Total + 10%	\$1.397.041

Conclusiones y perspectivas

En esta investigación se concluye lo siguiente:

- Se realizó una revisión bibliográfica de los parámetros relevantes que inciden en la operación de un tambor aglomerador. Además, se comprende los fenómenos físicos que ocurren al interior de un tambor.
- Se generó un modelo numérico por el método de elementos discretos en el software Ansys Rocky DEM para un tambor aglomerador industrial de minera BHP-SPENCE. Las dimensiones principales son 4.6 m de diámetro y 16.3 m de largo.
- Se efectuó la calibración de parámetros para el mineral de cobre y una evaluación del modelo numérico DEM, a partir de investigaciones con resultados experimentales. El error relativo de los resultados de potencia experimental y el modelo numérico DEM fue de 5.31%.
- Se generó una metodología para reducir los tiempos y costos computacionales de un modelo numérico por el método de elementos discretos para un tambor aglomerador industrial. La formulación modelo numérico se basó principalmente en considerar una sección del tambor, a lo largo de su eje axial. Al integrar los resultados de la muestra a lo largo de todo el tambor, se obtuvo resultados representativos del comportamiento del mineral al interior del tambor industrial.
- Se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros incidentes en la aglomeración: velocidad de rotación y grado de llenado. Se simulan 9 casos y se analiza el comportamiento del material al interior del tambor. Los resultados que se obtienen son: Potencia y torque, ángulo de reposo, distribución de humedad y fuerzas radiales.
- De los resultados obtenidos se puede destacar lo siguiente:
 - I. Potencia y torque: El aumento de la velocidad de rotación, manteniendo un grado de llenado constante genera un incremento en la potencia, pero este incremento no lineal. La condición menos exigente corresponde a un grado de llenado del 8% y una velocidad de rotación de 5 rpm, con un consumo de 197.15 W. Por otra parte, la condición más crítica es con un grado de llenado del 12% y 7 rpm con un consumo de 401.17 W, lo que representa un aumento del 203.5%. Además, el incremento de 1 rpm para los distintos grados de llenado afecta porcentualmente a la potencia RMS entre 18.92% a 22.75%. Por otro lado, el aumento del grado de llenado de 1% un aumento en la potencia porcentualmente entre un 15.83% y 20.10%. Es importante evaluar el impacto del grado de llenado y la velocidad con otras variables del proceso, como la eficiencia en el proceso de aglomeración.

- II. **Ángulo de reposo:** Al aumentar el grado de llenado con velocidad constante, el ángulo de reposo disminuye debido a que mayor cantidad de material reduce la movilidad de las partículas en las zonas inferiores. En cambio, al aumentar la velocidad con un mismo grado de llenado, el ángulo de reposo aumenta ya que el material tiene mayor energía cinética.
 - III. **Distribución de humedad:** La desviación estándar para un grado de llenado determinado es menor para una velocidad angular menor. Esto quiere decir que la segregación de las partículas es menor a velocidades angulares menores mantenido un grado de llenado constante.
 - IV. **Fuerzas radiales:** Al aumentar la velocidad angular para un grado de llenado en específico, el aumento de la fuerza en el eje y RMS en régimen estacionario es igual o menor al 1%, para cualquiera de los 3 casos de llenado. En consecuencia, para las velocidades angulares evaluadas, este parámetro no tiene un impacto significativo. El comportamiento de la fuerza en x para un grado de llenado del 8% y 10% es no lineal (polinómico cuadrático). Por otra parte, el comportamiento de la fuerza para un grado de llenado del 12% es lineal. Las fuerzas RMS en régimen estacionario en el eje y su magnitud son 135% mayores a las del eje x .
 - V. **Tiempo de residencia del material:** Los resultados de la simulación DEM para el análisis del comportamiento del material de forma axial indican que el tiempo de residencia promedio en régimen estacionario es de 57.62 segundos. El error relativo con respecto a los datos experimentales es de un 3.97%
- Se diseñó, dimensionó y presupuestó un banco de ensayo de un tambor aglomerador a escala de laboratorio. El objetivo principal es analizar el consumo de energía a lo largo del tiempo bajo diferentes condiciones de operación y medir la granulometría del material antes y después del proceso de aglomeración. Además, se instalarán diversos instrumentos con el propósito de obtener más datos experimentales y validar un modelo numérico DEM, lo que permitirá reducir los costos y tiempos de simulación gracias a su menor tamaño. Los componentes mecánicos dimensionados incluyen: tambor, motor, reductor, sistema de transmisión, ruedas de fricción, ejes, chavetas y rodamientos.

Perspectivas

- Implementar el banco de ensayos del tambor aglomerador y obtener resultados experimentales.
- Generar un algoritmo que permita analizar la formación de glómeros en modelos numéricos en el tiempo.
- Analizar en detalle el modelo numérico, y validar experimentalmente.

Referencias

- [1] C. Henríquez Navarrete, «Modelación de un tambor aglomerador mediante el método de elementos discretos.», Departamento de Ingeniería Mecánica - Universidad de Concepción , Concepción, Chile, 2024.
- [2] Consejo Minero, «Cifras actualizadas de la minería,» 2024. [En línea].
- [3] L. Wang, S. Yin y A. Wu, «Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, 2021.
- [4] G. Walker, «Drum granulation process,» vol. Chapter 4, ELSEVIER, Ed., School of Chemistry and Chemical Engineering, Queen's University Belfast - ELSEVIER, 2007.
- [5] J. Petersen, «Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview,» *Hydrometallurgy*, vol. 165, n° 1, pp. 206-212, 2016.
- [6] B. Liu, J. Wang , J. Zeng, Z. Lijie, Y. Wang, Y. Freng y R. Du, «A review of high shear wet granulation for better process understanding, control and product development,» de *Powder Technology*, vol. 381, 2021, pp. 204-223.
- [7] S. C. Bouffard, «Review of agglomeration practice and fundamentals in heap leaching,» Julio 2005. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/248933800>. [Último acceso: 2023 Agosto 2023].
- [8] COMECSA, «análisis de esfuerzos por fractura de un sistema eje-piñón de un tambor aglomerador perteneciente a Minera Spence S.A,» 2012. [En línea]. Available: <https://comecsa.com/2013/01/02/analisis-de-esfuerzo-eje-pinon-tambor-aglomerador-minera-spence-s-a/>.
- [9] M. Moncada, «Modelación dinámica no lineal de harnero vibratorio considerando inercia del mineral y fuerza del mineral sobre el harnero calculada con elementos discreto.,» Tesis para optar al grado de magister - Universidad de Concepción., Concepción , 2017.
- [10] M. Moncada, «Análisis no estacionario de torque en chancadores primarios,» Universidad De Concepción, 2022.
- [11] J. Sobarzo, «Aplicación del software EDEM para predecir el consumo de potencia de un chancador de mandíbula,» 2019.
- [12] S. S. K. J. L. L.-A. T. Susantha Dissanayake, «CFD study of Particle Flow Patterns in a Rotating Cylinder Applying OpenFOAM and Fluent,» Norway.

- [13] H. Z. J. G. J. Z. Y. H. Mengxiao Yu, «Three-dimensional DEM simulation of polydisperse particle flow in rolling mode rotating drum,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591021009396#f0070>.
- [14] R. Z. A. Y. R.Y. Yang, «Microdynamic analysis of particle flow in a horizontal rotating drum,» 2003. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591002002577>. [Último acceso: 4 Agosto 2023].
- [15] F. W. G. F. J. M. M.A. Delele, «Studying the solids and fluid flow behavior in rotary drums based on a multiphase CFD model,» 2016.
- [16] T. G. A. O. Andrzej Heim, «The effect of the wetting droplets size on power consumption during drum granulation,» 2004. [En línea]. [Último acceso: 5 Agosto 2023].
- [17] J. A.-M. D. J. R. Ataollah Nosrati, «Drum agglomeration behavior of nickel laterite ore: Effect of process variables,» Agosto 2012. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X12001326>. [Último acceso: 4 Agosto 2023].
- [18] D. Santos, I. Petri, C. Duarte y M. Barrozo, «Experimental and CFD study of the hydrodynamic behavior in a rotating drum,» vol. 250, pp. 52-62, Diciembre 2013.
- [19] T. Trung Vo, S. Nezamabadi, P. Mutabaruka, J. Y. Delenne, E. Izard, R. Pellenq y F. & Radjai, «Agglomeration of wet particles in dense granular flows,» vol. 42, pp. 1-12, 2019.
- [20] J. Pachón-Morales, P. Perré, J. Casalinho, H. Do, D. Schott, F. Puel y J. Colin, «Potential of DEM for investigation of non-consolidated flow of cohesive and elongated biomass particles,» 2020.
- [21] Y. Wang, J. Xu, S. He, S. Liu y Z. Zhou, «Numerical simulation of particle mixing and granulation performance in rotating drums during the iron ore sintering process,» *Powder Technology*, vol. 429, 2023.
- [22] C. Peña, «Implementación de modelo numérico para el cálculo de torque en un tambor aglomerador,» Universidad De Concepción, Concepción, Chile, 2022.
- [23] R. Duque Soto, «Lixiviación en minerales sulfurados de cobre de baja ley en columnas unitarias utilizando la tecnología CUPROCHLOR.,» Agosto 2014. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131917/Lixiviaci%F3n%20de%20minerales%20sulfurados%20de%20cobre%20de%20baja%20ley.pdf?sequence=4>. [Último acceso: 2024].

- [24] D. Ahumada, «Procedimiento de lixiviación en minerales oxidados con alto porcentaje de arcillas.,» 2019.
- [25] A. KATARIA, «AN ANALYSIS OF DRUG MIGRATION DURING DRYING OF GRANULES AS AN UNDERLYING CAUSE OF CONTENT NON-UNIFORMITY IN WET GRANULATION,» New Brunswick, New Jersey, 2018.
- [26] S. Shanmugam, «Granulation techniques and technologies: Recent progresses,» *BioImpacts*, vol. 5, pp. 55-63, 2015.
- [27] E. S. M. K. G. J. B. K. Agnieszka Szulc, «Powder agglomeration processes of bulk materials – A state of the art review on different granulation methods and applications,» *Powder Technology*, vol. 431, Enero 2024.
- [28] P. Kapur y D. Fuerstenau, «Size Distributions and Kinetic Relationships in Nuclei Region of Wet Pelletization,» 1966.
- [29] M. Butensky y D. Hyman, «Rotary Drum Granulation. An Experimental Study of the Factors Affecting Granule Size.,» 1971.
- [30] T. G. a. A. O. A. Heim, «Bed dynamics during drum granulation,» 2004.
- [31] H. Norouzi, R. Zarghami y N. Mostoufi, «Insights into the granular flow in rotating drums,» de *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 201, 2015, pp. 12-25.
- [32] S. Chou y S. Hsiau, «Dynamic properties of immersed granular matter in a different flow regimes in a rotating drum,» *Powder Technology*, 2012.
- [33] B. Mishra, C. Thornton y D. Bhimji, «A preliminary numerical investigation of agglomeration in a rotary drum,» 2002. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687501001947#FIG4>.
- [34] R. Yang, A. Yu, McElroy y J. Bao, «Numerical simulation of particle dynamics in different flow regimes in a rotating drum,» vol. 188, 2008.
- [35] X. Shi, C. Li, W. Qiang, G. Li, W. Zhang y Z. Xue, « Numerical study of the dynamic behaviour of iron ore particles during,» *Powder Technology*, 2022.
- [36] H. Nakamura, T. Baba , S. Ohsaki, S. Watano, K. Takehara y T. Higuchi, «Numerical simulation of wet granulation using the DEM–PBM coupling method with a deterministically calculated agglomeration kernel,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 450, n° 3, Diciembre 2022.
- [37] ANSYS, «Rocky Technical Manual version 2024 R1.1,» 2024.

- [38] H. Hertz, «On the contact of elastic solids,» p. 156–171, 1881.
- [39] P. Cundall y O. Strack, «A discrete numerical model for granular assemblies,» *Géotechnique*, p. 47–65, 1979.
- [40] Y. Tsuji, T. Tanaka y T. Ishida, «Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe,» *Powder Technology*, vol. 71, pp. 239-250, 1992.
- [41] R. D. Mindlin y H. Deresiewicz, «Elastic spheres in contact under varying oblique force,» *Trans. ASME J. Appl. Mech.*, vol. 20, pp. 327-344, 1953.
- [42] C. Wensrich y A. Katterfeld, «Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM,» *Powder Technology*, pp. 409-417, 2012.
- [43] ANSYS ROCKY, «Liquid Bridge Model Module - Uptated for Rocky version 2024 R1.1,» 2024.
- [44] T. Mikami, H. Kamiya y M. Horio, «Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed,» de *Chemical Engineering Science*, 1927, p. 53.
- [45] S. T. Nase, W. L. Vargas, A. A. Abatan y J. McCarthy, «Discrete chracterizacion tools for cohesive granular material,» de *Powder Technology*, vol. 116, 2001, pp. 214-223.
- [46] B. P. Guzmán, Proyecto optimizacion del área seca de la minera SPENCE - BHP BILLITON, Valparaiso: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO, 2013.
- [47] L. Tavares y F. André, «Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles,» *Powder Technology*, vol. 372, pp. 362-371, 2020.
- [48] G. Delaney, R. Morrison , M. Sinnott, S. Cummins y P. Cleary, «DEM modelling of non-spherical particle breakage and flow in an industrial scale cone crusher,» 2015.
- [49] J. P. Rojas Olmedo, «Desarrollo de metodología de predicción y calibración de parámetros de simulaciones DEM aplicado a flujo de mineral de cobre basada en machine learning,» Santiago, Chile, 2020.
- [50] M. Sallau, N.-E. Bouassale y A. Aittaleb, «Development of a methodology for prediction and calibration of parameters of DEM simulations based on machine learning,» *Mechanics Research Communications*, vol. 141, 2024.
- [51] C. Anh Ho y M. Sommerfeld, «Modelling of micro-particle agglomeration in turbulent flows,» *Chemical Engineering Science*, vol. 57, 2002.
- [52] A. Nosrati, «Drum agglomeration behavior of nickel laterite ore: Effect of process variables,» Vols. %1 de %2125-126, 2012.

- [53] . R. G. Budynas y . J. K. Nisbett, *Diseño de Ingeniería mecánica*, Novena ed., McGRAW-HILL, 2012.
- [54] Ducasse comercial, «Piñones / Norma BS y ASA».
- [55] Continental Contitech, ROTAFRIX: Friction wheels, friction rings and guide pulleys.
- [56] SKF, «Rodamientos,» Grupo SKF 2019, 2019.
- [57] Statista Research Department, «Ranking de los países con mayores reservas de cobre en 2022,» 1 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/635670/reservas-mundiales-de-cobre-por-paises/>. [Último acceso: 11 Agosto 2023].
- [58] C. Lin, J. Miller y C. Garcia, «Saturated flow characteristics in column leaching as described by LB simulation,» *Minerals Engineering*, vol. 18, pp. 1045-1051, 2005.
- [59] O. R. Walton y R. L. Braun, «Stress calculations for assemblies of inelastic spheres in uniform shear,» *Acta Mech.*, pp. 73-86, 1986.
- [60] F. P. André y L. M. Tavares, «Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles,» *Powder Technology*, vol. 372, pp. 362-371, 2020.
- [61] J. Pachón-Morales, P. Perré, J. Casalinho, H. Do, D. Schott, F. Puel y J. Colin, «Potential of DEM for investigation of non-consolidated flow of cohesive and elongated biomass particles.,» *Advanced Powder Technology*, pp. 1500-1515, 2020.
- [62] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica*, vol. Novena Edición , McGraw Hill, 2012.

Anexo

11.1 Resumen de resultados obtenidos a partir de las simulaciones.

Tabla 36: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_1f_1 .

Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	140.28	197.51	252.11	kW
Torque	278.45	377.54	490.05	kNm
Ángulo de reposo promedio	31.47	36.75	53.99	°
Humedad (desviación estándar)	6.88	31.09	24.21	mg
Fuerza en el eje X	0	7.03	47.84	kN
Fuerza en el eje Y	289.81	346.76	425.83	kN

Tabla 37: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_2f_1 .

Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	193.19	241.80	293.88	kW
Torque	313.70	385.59	571.07	kNm
Ángulo de reposo promedio	33.61	38.24	51.49	°
Humedad (desviación estándar)	9.397	31.10	25.78	mg
Fuerza en el eje X	0	8.90	88.38	kN
Fuerza en el eje Y	282.24	347.49	420.64	kN

Tabla 38: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_3f_1 .

Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	249.58	287.97	357.50	kW
Torque	325.63	393.75	567.48	KNm
Ángulo de reposo promedio	37.34	39.40	54.82	°
Distribución de humedad	10.33	31.10	29.85	mg
Fuerza en el eje X	0	12.34	58.73	kN
Fuerza en el eje Y	289.32	347.86	424.84	kN

Tabla 39: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_1f_2 .

Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	172.15	236.85	291.30	kW
Torque	336.88	452.71	598.29	KNm
Ángulo de reposo promedio	31.97	36.3	51.87	°
Distribución de humedad	10.18	31.10	30.73	mg
Fuerza en el eje X	0	7.80	82.66	kN
Fuerza en el eje Y	357.16	433.52	515.62	kN

Tabla 40: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_2f_2 .

Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	235.35	290.40	381.75	kW
Torque	390.67	463.11	743.39	KNm
Ángulo de reposo promedio	32.76	37.62	51.94	°
Distribución de humedad	10.02	31.10	29.70	mg
Fuerza en el eje X	0	10.61	135.41	kN
Fuerza en el eje Y	360.96	434.02	539.59	kN

Tabla 41: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_3f_2 .

Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	294.48	345.35	453.33	kW
Torque	369.79	471.61	618.08	KNm
Ángulo de reposo promedio	36.20	39.01	54.04	°
Distribución de humedad	10.64	31.10	29.07	mg
Fuerza en el eje X	0	11.88	63.87	kN
Fuerza en el eje Y	345.26	434.42	566.27	kN

Tabla 42: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_1f_3 .

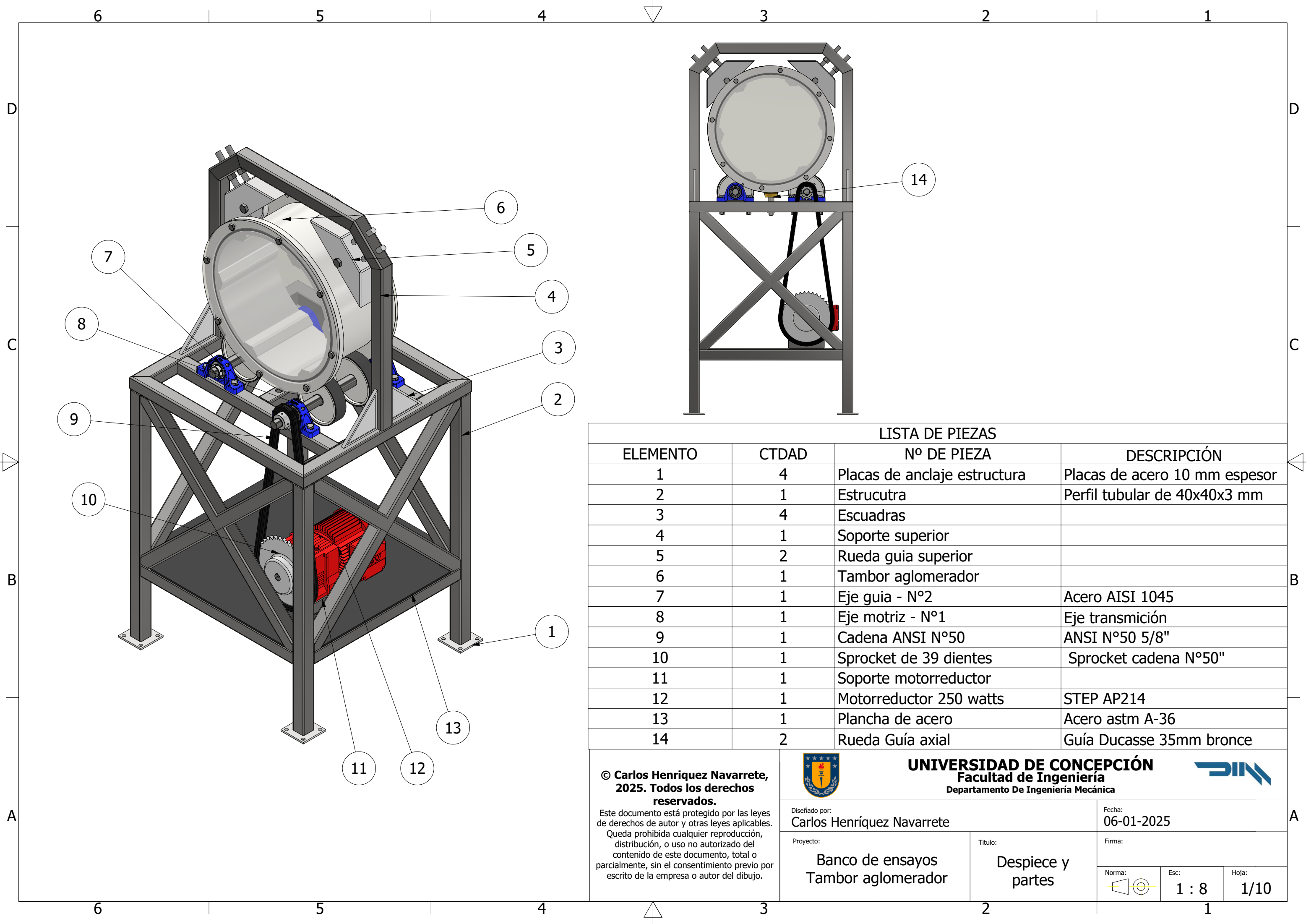
Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	200.87	274.35	339.27	kW
Torque	390.46	524.21	619.17	KNm
Ángulo de reposo promedio	30.79	36.12	50.43	°
Distribución de humedad	8.53	31.17	26.13	mg
Fuerza en el eje X	0	9.32	55.51	kN
Fuerza en el eje Y	445.50	519.52	628.26	kN

Tabla 43: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_2f_3 .

Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	270.29	336.75	435.03	kW
Torque	444.25	535.76	775.68	KNm
Ángulo de reposo promedio	34.21	37.20	50.80	°
Distribución de humedad	9.95	31.17	26.66	mg
Fuerza en el eje X	0	12.08	74.15	kN
Fuerza en el eje Y	425.06	520.16	632.90	kN

Tabla 44: Resultados de modelo numérico de condición de operación w_3f_3 .


Resultado	Valor			Unidad
	mín.	Promedio / RMS	máx.	
Potencia	354.25	401.17	512.53	kW
Torque	470.56	548.28	737.45	KNm
Ángulo de reposo promedio	35.83	38.66	53.07	°
Distribución de humedad	8.179	31.17	23.87	mg
Fuerza en el eje X	0	15.05	72.24	kN
Fuerza en el eje Y	404.10	521.23	649.58	kN




LISTA DE PIEZAS

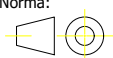
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	4	Placas de anclaje estructura	Placas de acero 10 mm espesor
2	1	Estrucutra	Perfil tubular de 40x40x3 mm
3	4	Escuadras	
4	1	Soporte superior	
5	2	Rueda guia superior	
6	1	Tambor aglomerador	
7	1	Eje guia - N°2	Acero AISI 1045
8	1	Eje motriz - N°1	Eje transmisión
9	1	Cadena ANSI N°50	ANSI N°50 5/8"
10	1	Sprocket de 39 dientes	Sprocket cadena N°50"
11	1	Soporte motorreductor	
12	1	Motorreductor 250 watts	STEP AP214
13	1	Plancha de acero	Acero astm A-36
14	2	Rueda Guía axial	Guía Ducasse 35mm bronce

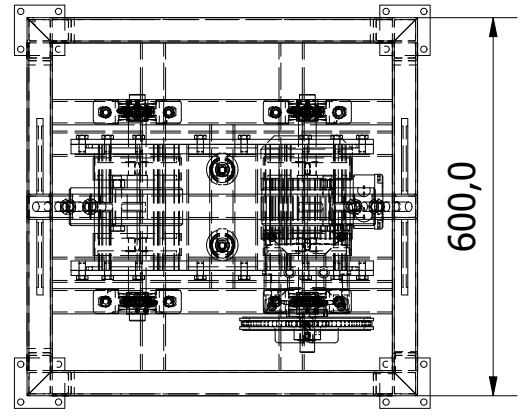
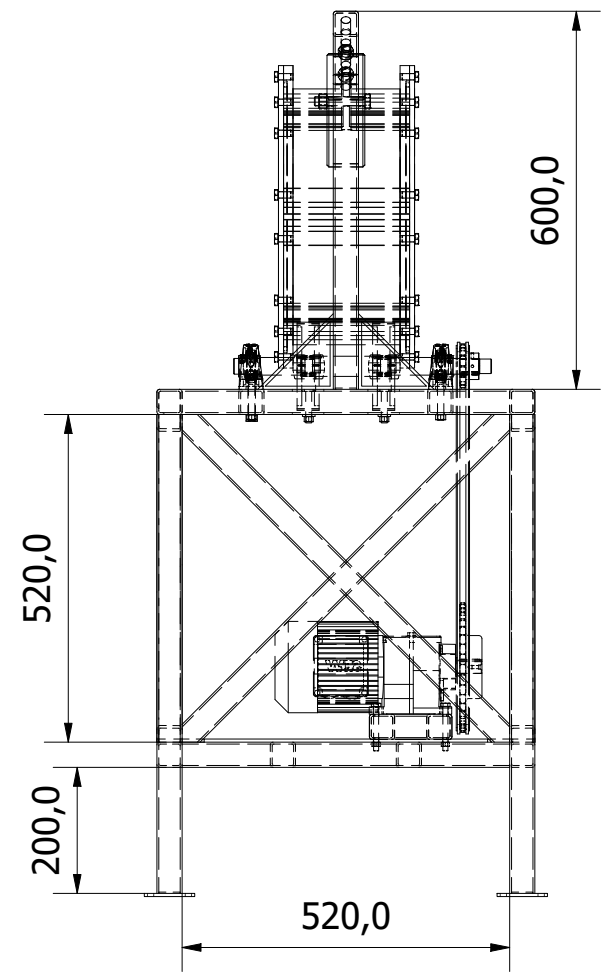
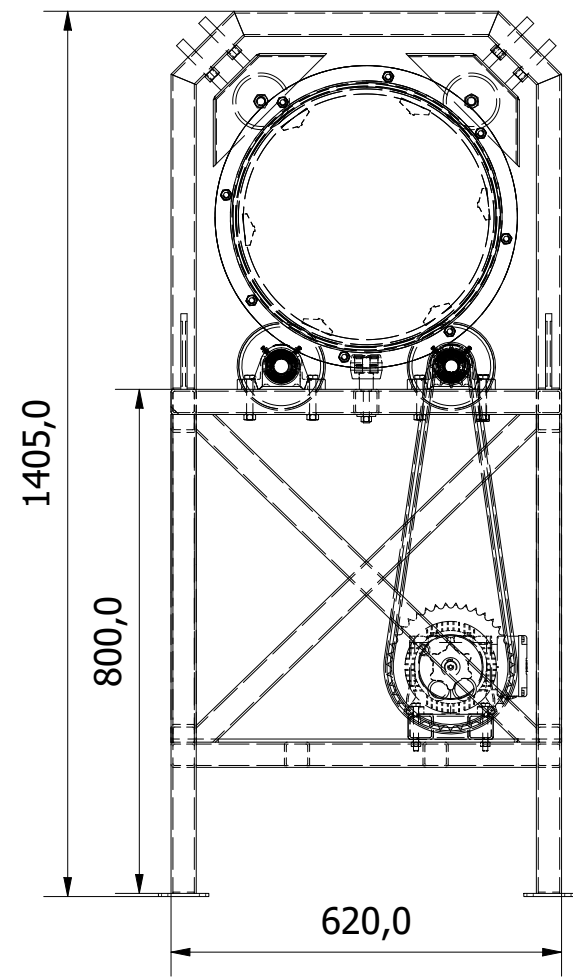
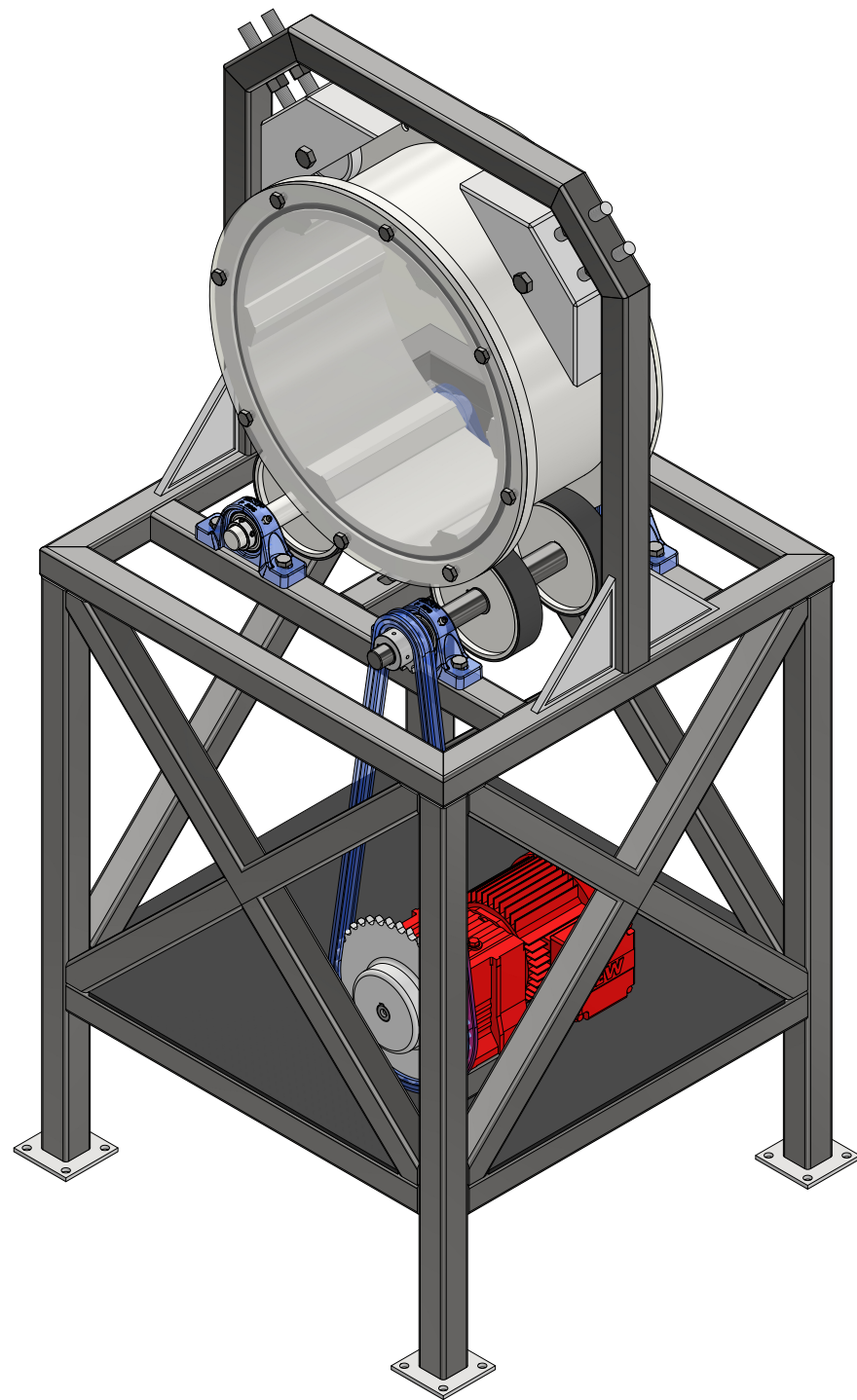
© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.
 Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
 Departamento De Ingeniería Mecánica



Diseñado por: Carlos Henríquez Navarrete		Fecha: 06-01-2025	
Proyecto: Banco de ensayos Tambor aglomerador	Título: Despiece y partes	Firma:	
		Norma: 	Esc: 1 : 8
			Hoja: 1/10



© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.
 Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
 Facultad de Ingeniería
 Departamento De Ingeniería Mecánica



Diseñado por:
Carlos Henríquez Navarrete

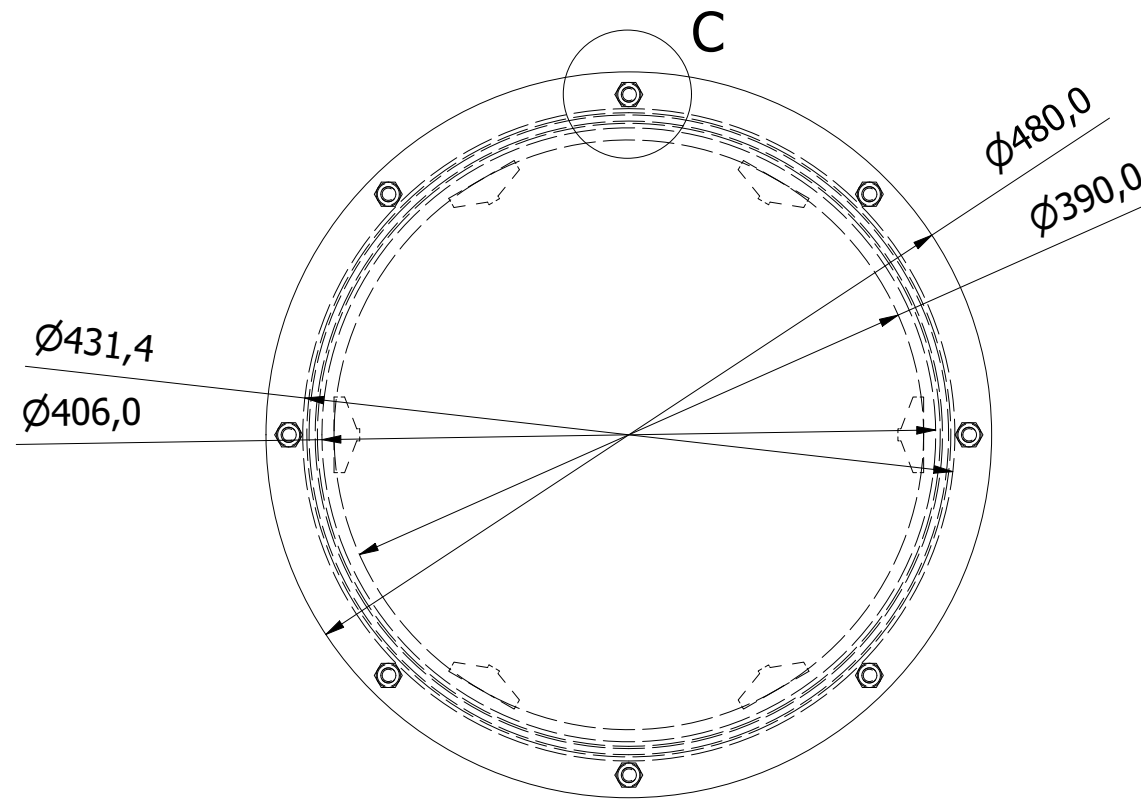
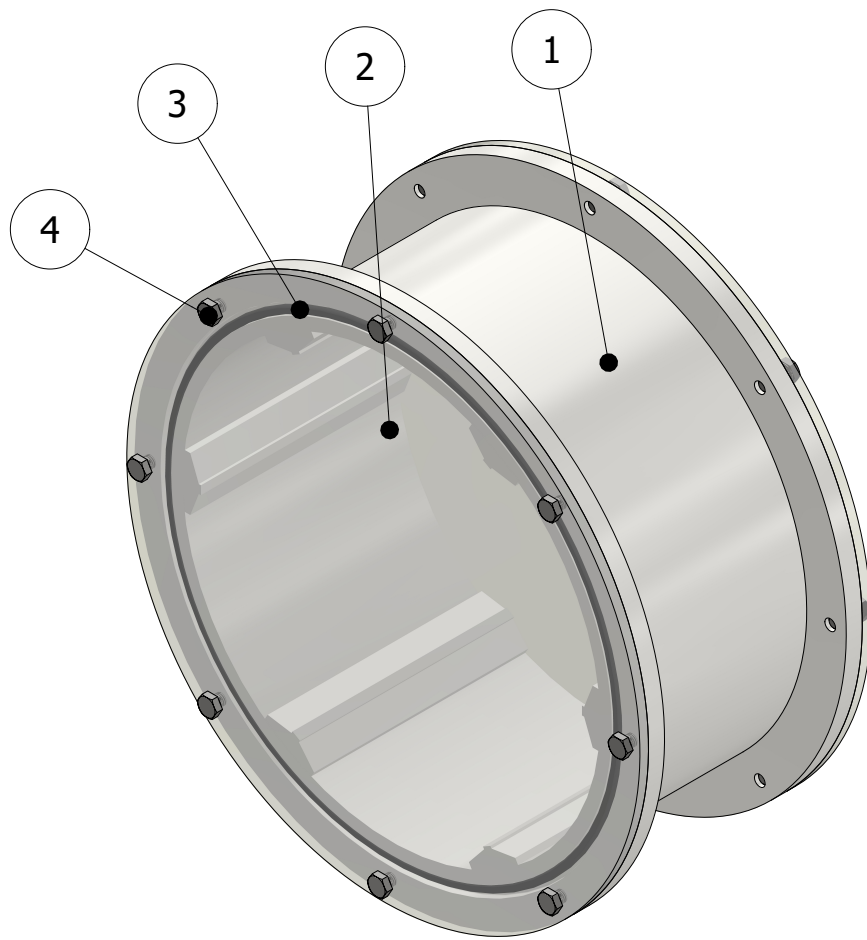
Fecha:
06-01-2025

Proyecto:
**Banco de ensayos
 Tambor aglomerador**

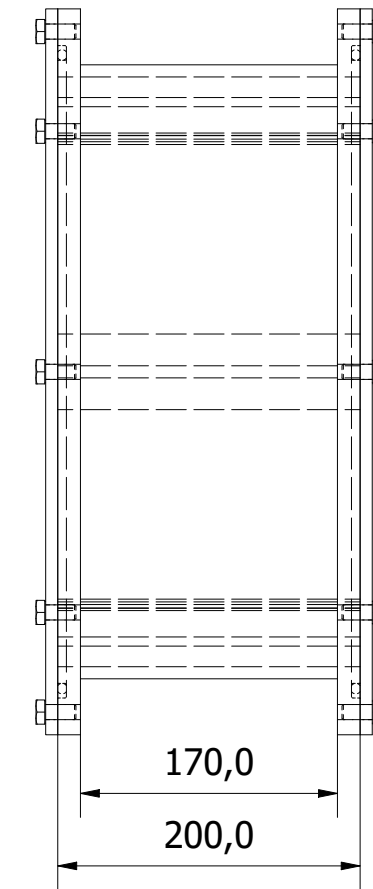
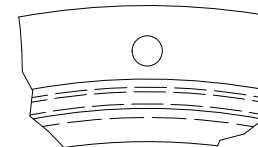
Título:
Dimensiones

Firma:

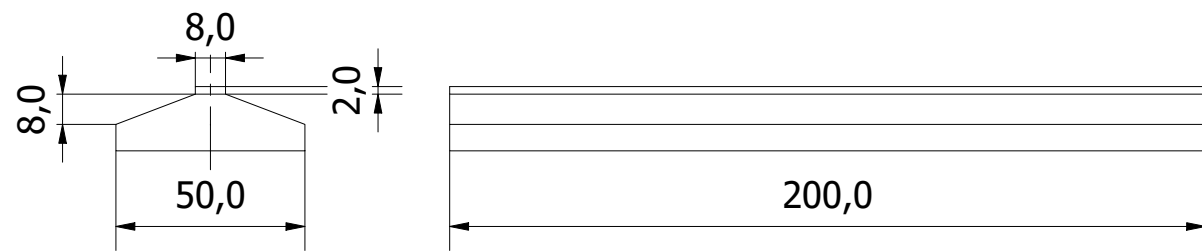
Norma: 	Esc: 1 : 8	Hoja: 2/10
------------	----------------------	----------------------



C (0,40 : 1)



Lifters (x6)



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Tambor Aglomerador	Tuberia de acero ASTM-53 14" SCH10
2	2	Tapa	Tapas de acrilico transparente
3	2	ISO 3601-1 - E 4120 G	Sistemas hidráulicos - Junta tórica
4	16	ISO 4017 - M10 x 20	Perno de cabeza-hex

© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.

Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento De Ingeniería Mecánica



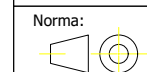
Diseñado por:
Carlos Henríquez Navarrete

Fecha:
15-11-2024

Proyecto:
Banco de ensayos
Tambor aglomerador

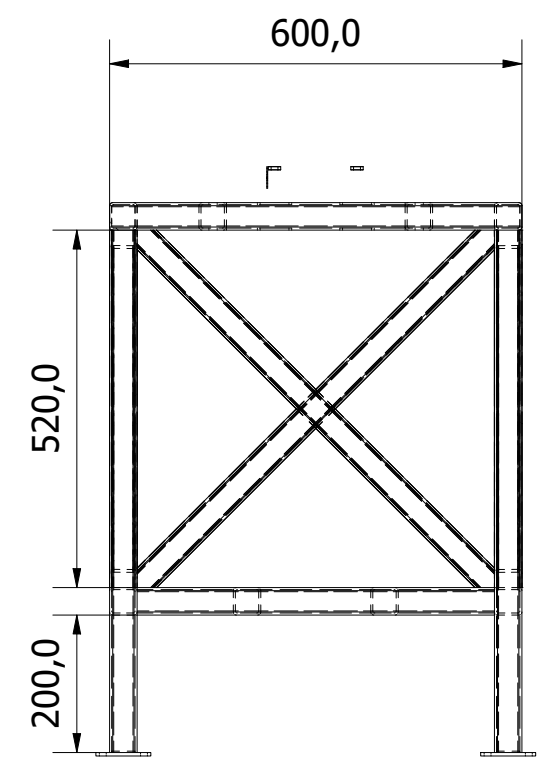
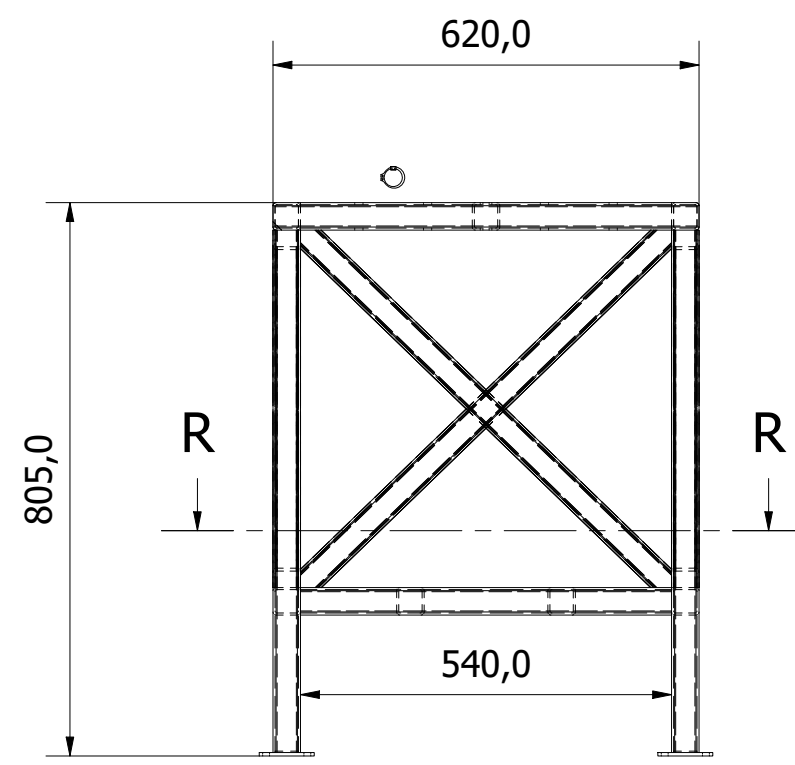
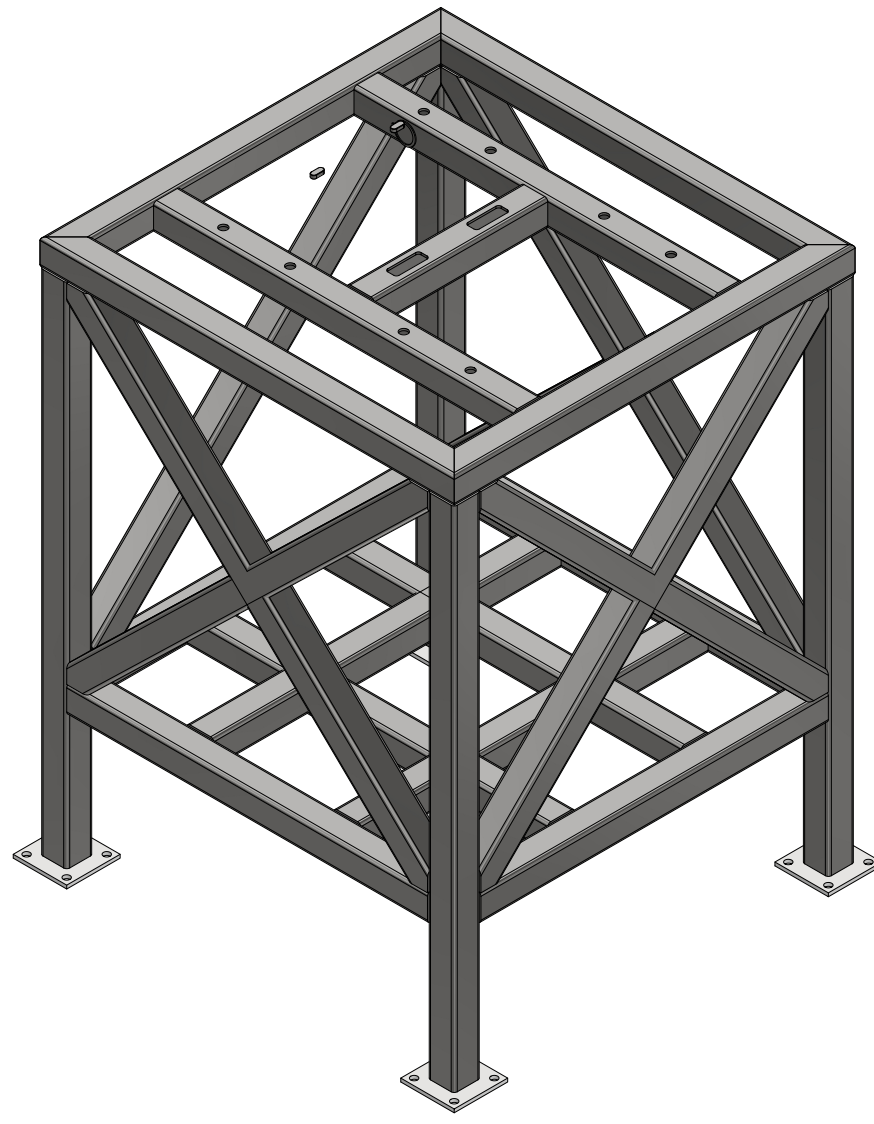
Título:
Tambor
aglomerador

Firma:

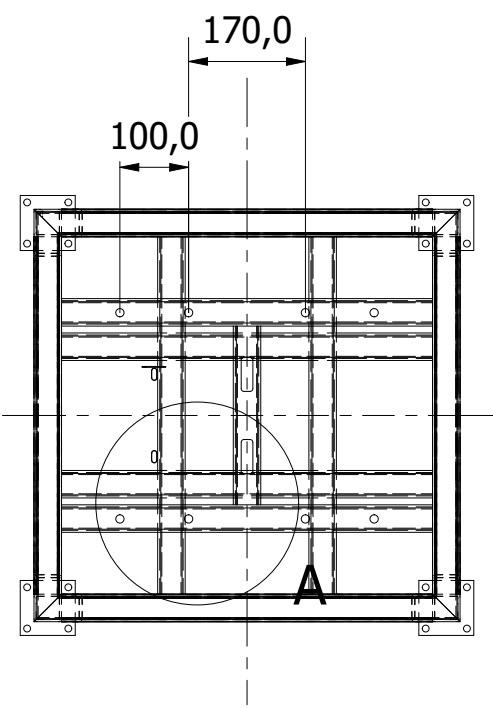
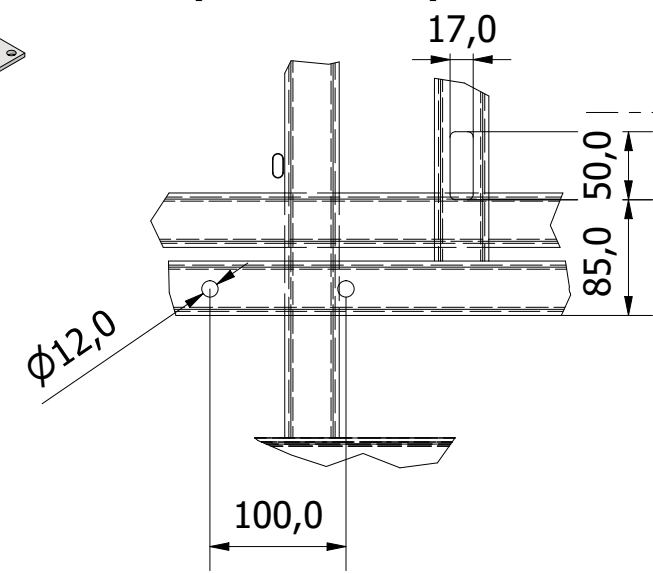


Norma:
Esc:
1 : 5

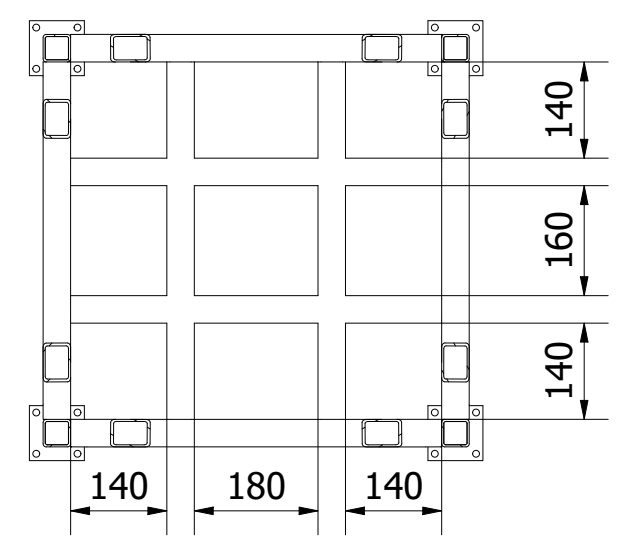
Hoja:
3/10



A (0,18 : 1)



R-R (1 : 11)



© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.

Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento De Ingeniería Mecánica



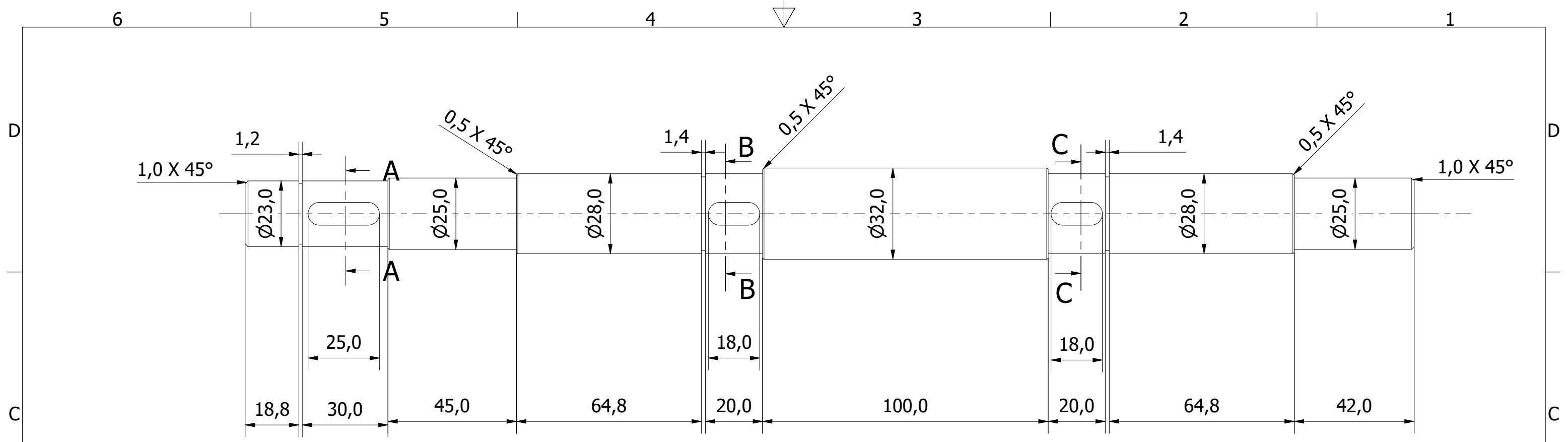
Diseñado por:
Carlos Henríquez Navarrete

Fecha:
06-01-2025

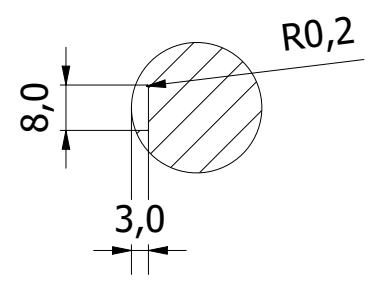
Proyecto:
Banco de ensayos
Tambor aglomerador

Título:
Estructura

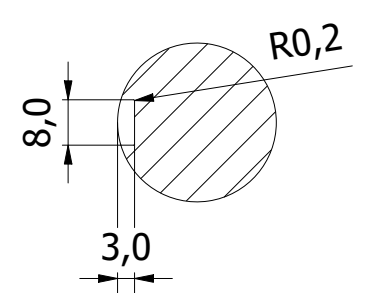
Firma:
Norma: Esc: 1 : 8 Hoja: 4/10



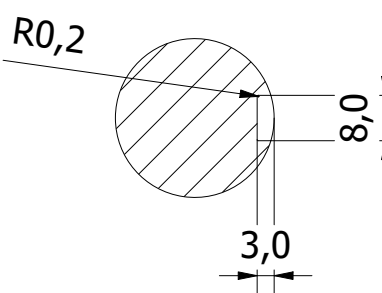
A-A (1.5 : 2)



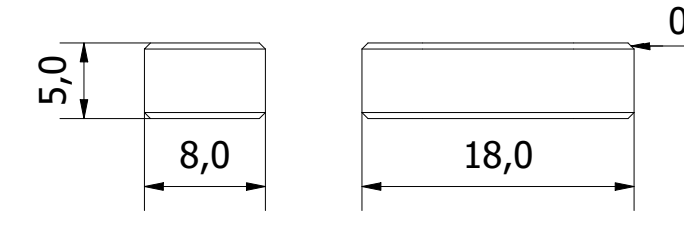
B-B (1.5 : 2)



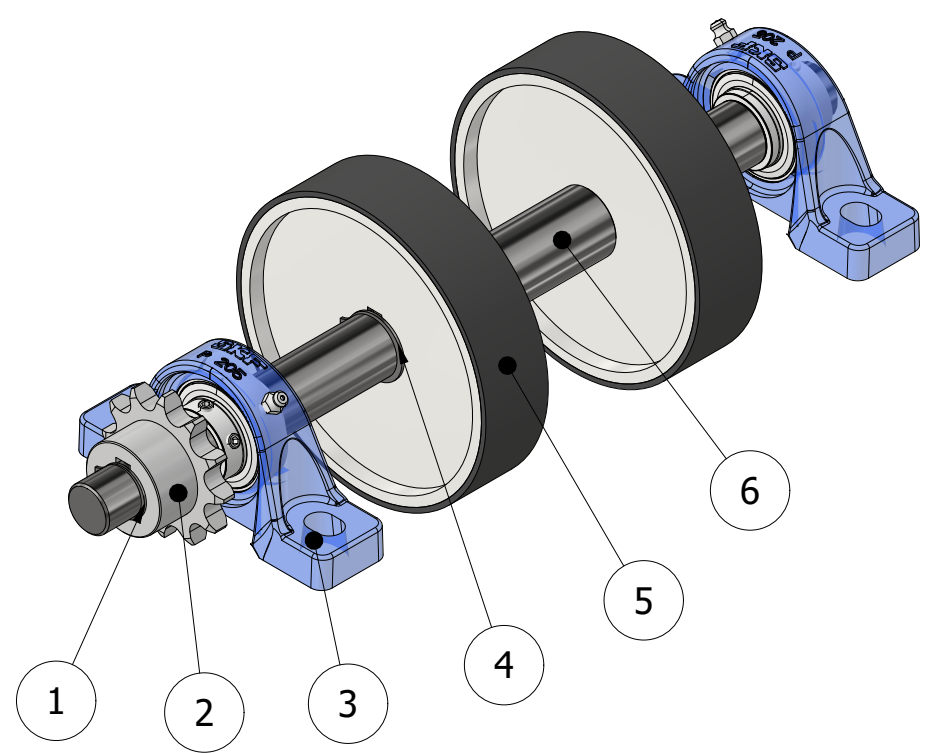
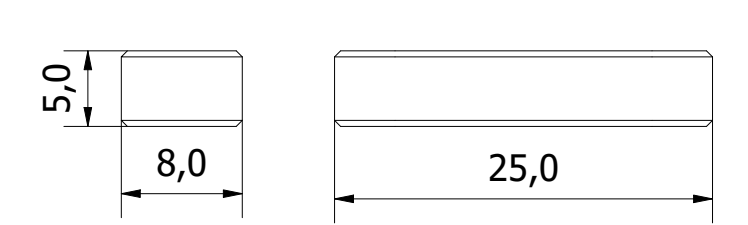
C-C (1.5 : 2)



Chavetas ruedas de fricción




Chaveta Sprocket




LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	ANSI B 27.7M - 3AMI-22	Anillos de retención cónicos ANSI externo - 3AMI
2	1	Sprocket 12 dientes	Sprocket para cadena de 5/8"
3	2	Soporte rodamiento vertical 25mm	SKF YAR 205-2RF o similar
4	2	ANSI B 27.7M - 3AMI-28	Anillos de retención cónicos ANSI externo - 3AMI
5	2	Ruedas de fricción	Ruedas de 140 mm diametro externo
6	1	Eje motriz	Acero AISI 1045

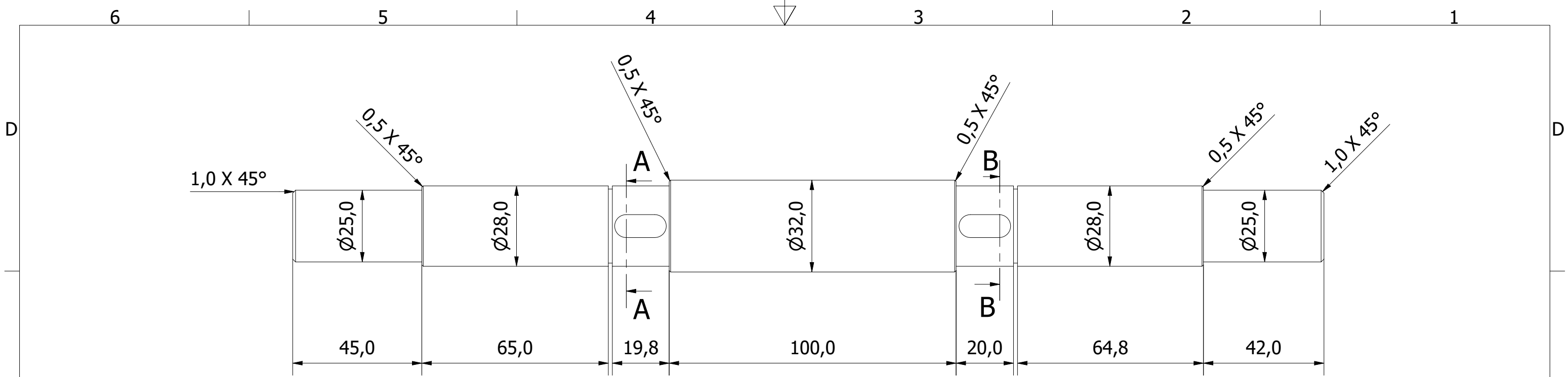
© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.
 Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.



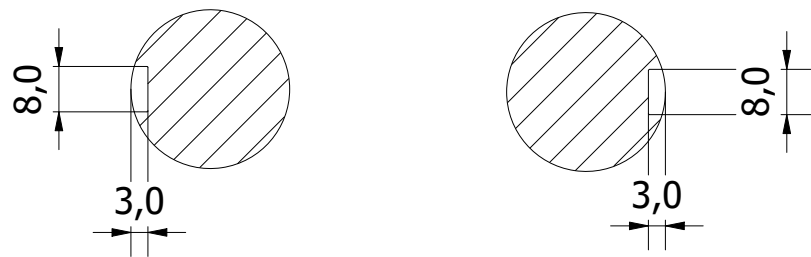
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
 Facultad de Ingeniería
 Departamento De Ingeniería Mecánica



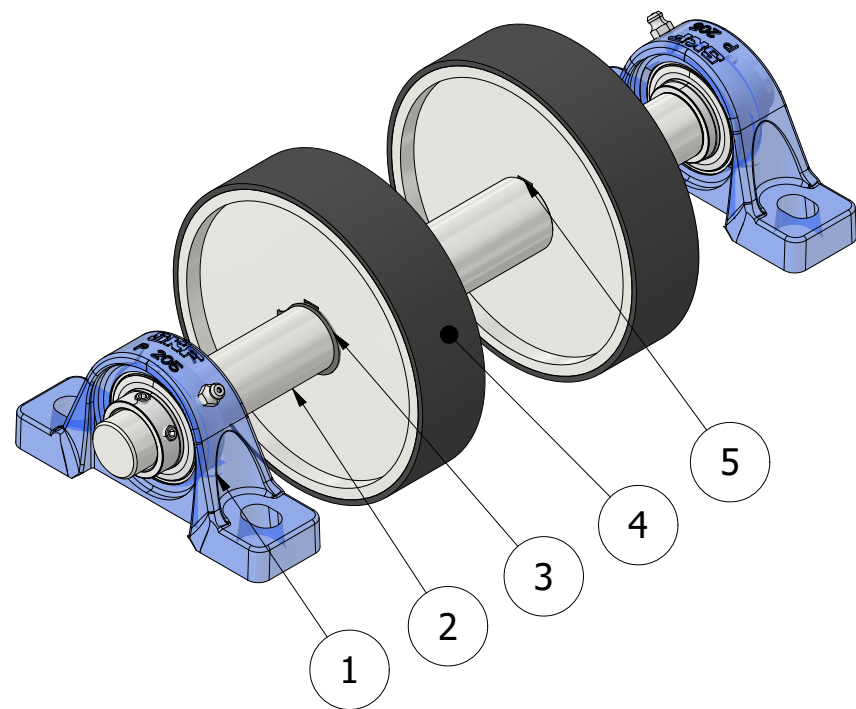
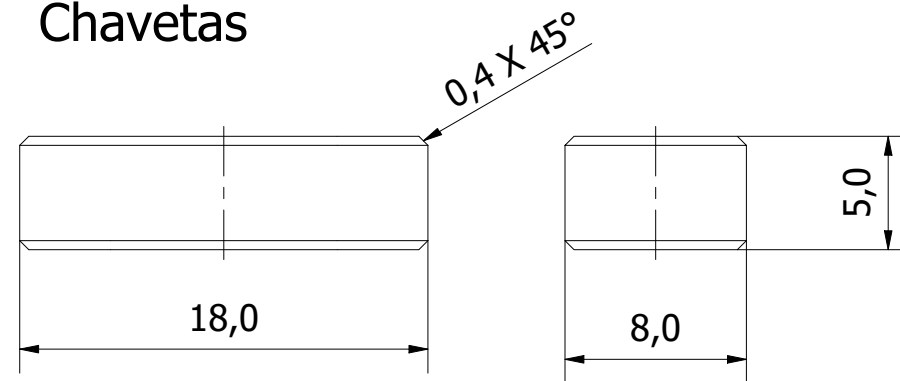
Diseñado por: Carlos Henríquez Navarrete		Fecha: 12-11-2024	
Proyecto: Banco de ensayos Tambor aglomerador		Título: Dimensiones eje	
Firma:		Norma: 	Esc: 1 : 3
		Hoja: 5/10	



A-A (1.5:2) B-B (1.5:2)



Chavetas



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	Rodamiento con soporte vertical	SKF YAR 205-2RF o similar
2	1	Eje N°2 - soporte	Acero AISI 1045
3	2	ANSI B 27.7M - 3AMI-28	Anillos de retención cónicos de la norma American National Standard: serie externa básica - 3AMI
4	2	Ruedas de fricción	Ruedas con diámetros exterior de 140mm
5	2	ISO 2491 - A 8 x 5 x 18	Chavetas paralelas delgadas

© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.

Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento De Ingeniería Mecánica



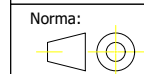
Diseñado por:
Carlos Henríquez Navarrete

Fecha:
20-12-2024

Proyecto:
Banco de ensayos
Tambor aglomerador

Título:
Eje n°2

Firma:



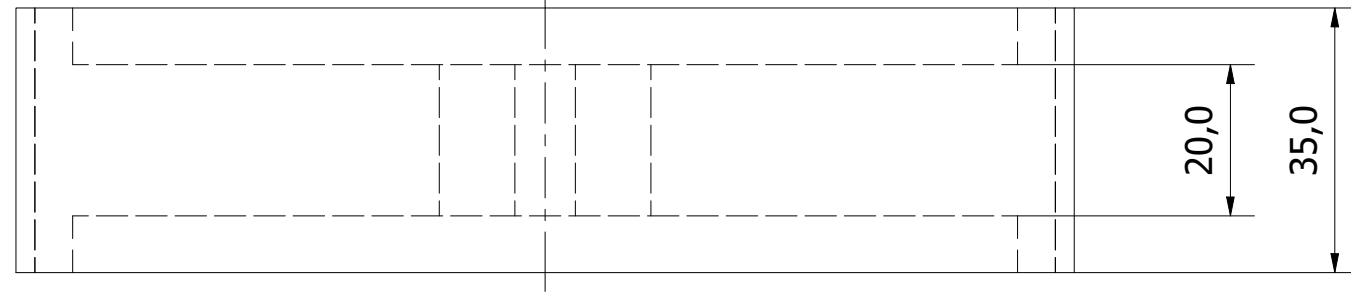
Norma:
Esc:
1 : 3

Hoja:
6/10

6 5 4 3 2 1

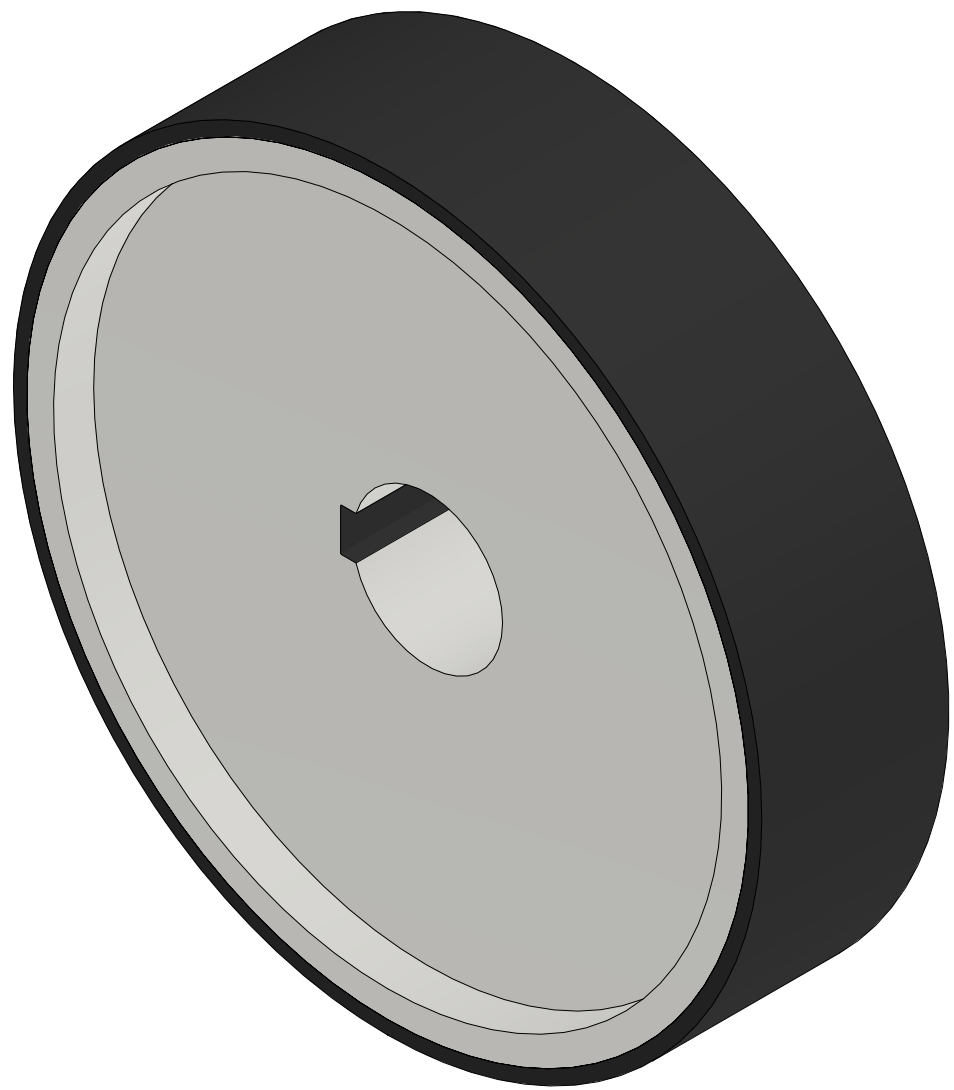
D

D



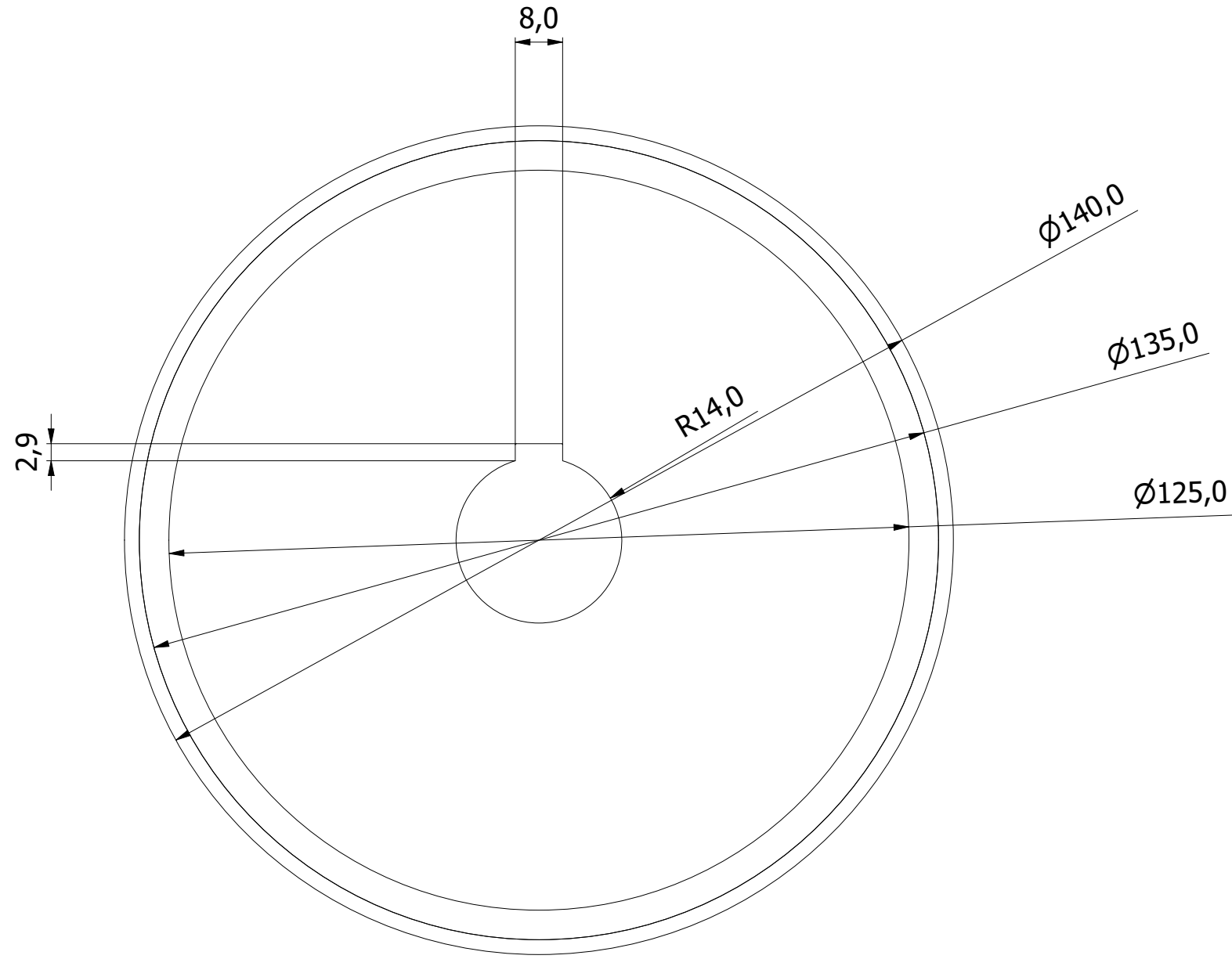
C

C



B


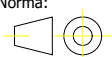
B



A

A

6 5 4 3 2 1

<p>© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.</p> <p>Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.</p>	 <p>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN Facultad de Ingeniería Departamento De Ingeniería Mecánica</p> 		
	<p>Diseñado por: Carlos Henríquez Navarrete</p>		<p>Fecha: 13-08-2024</p>
	<p>Proyecto: Banco de ensayos Tambor aglomerador</p>	<p>Título: Ruedas de fricción</p>	<p>Firma:</p>
	<p>Norma: </p>	<p>Esc: 1 : 1</p>	<p>Hoja: 7/10</p>

6 5 4 3 2 1

D

D

C

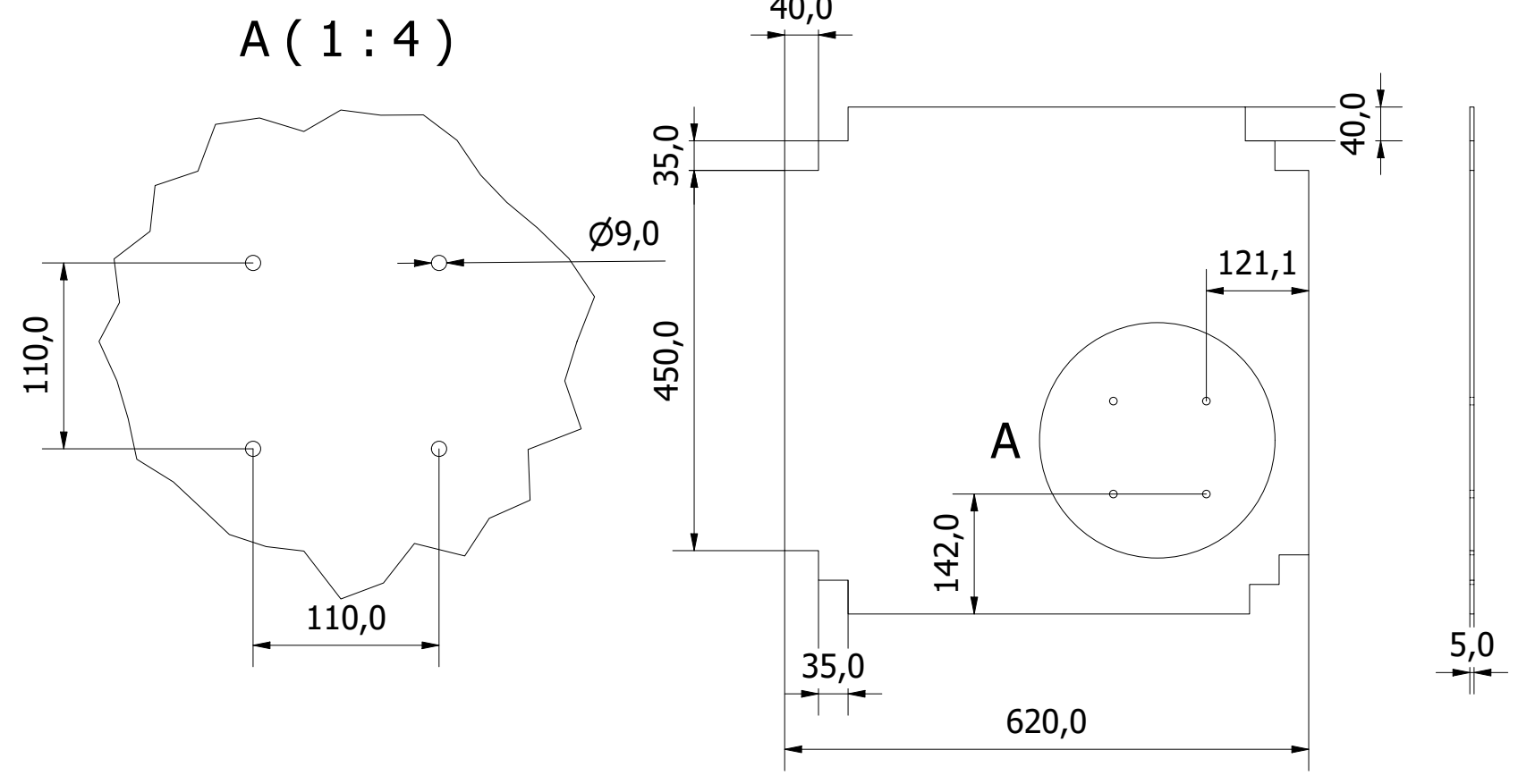
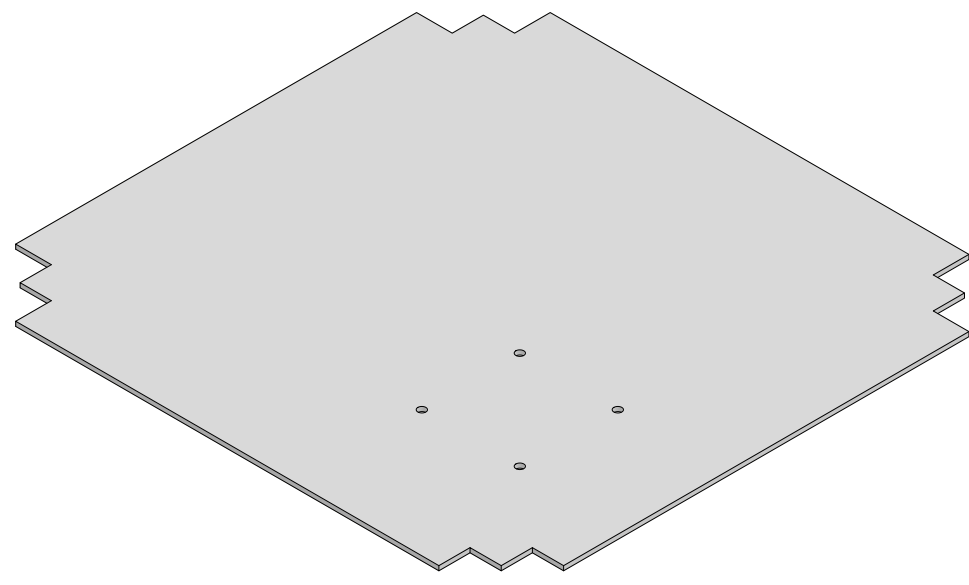
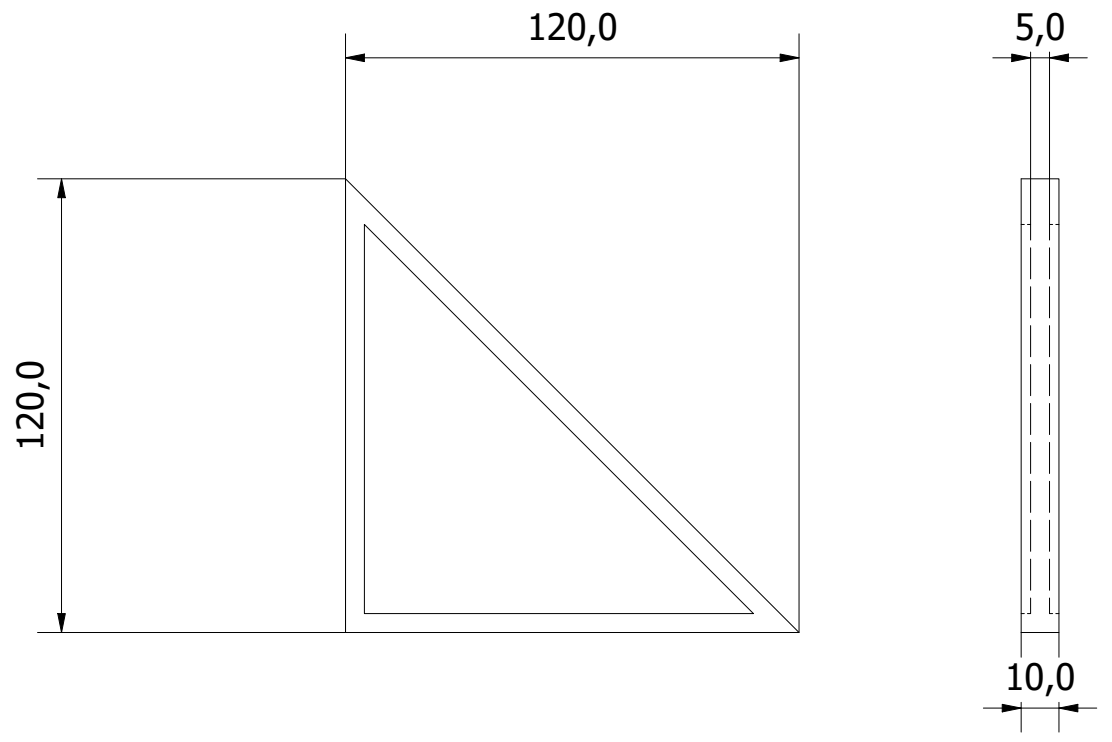
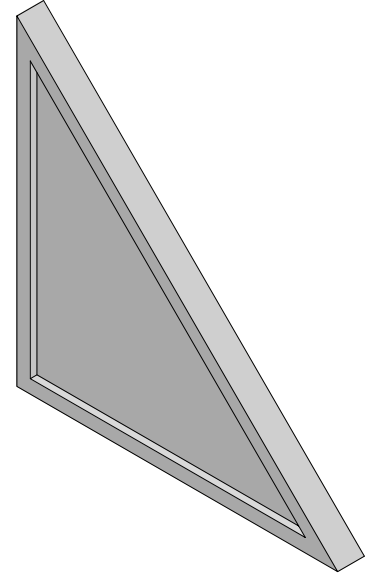
C



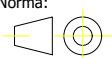
B

B

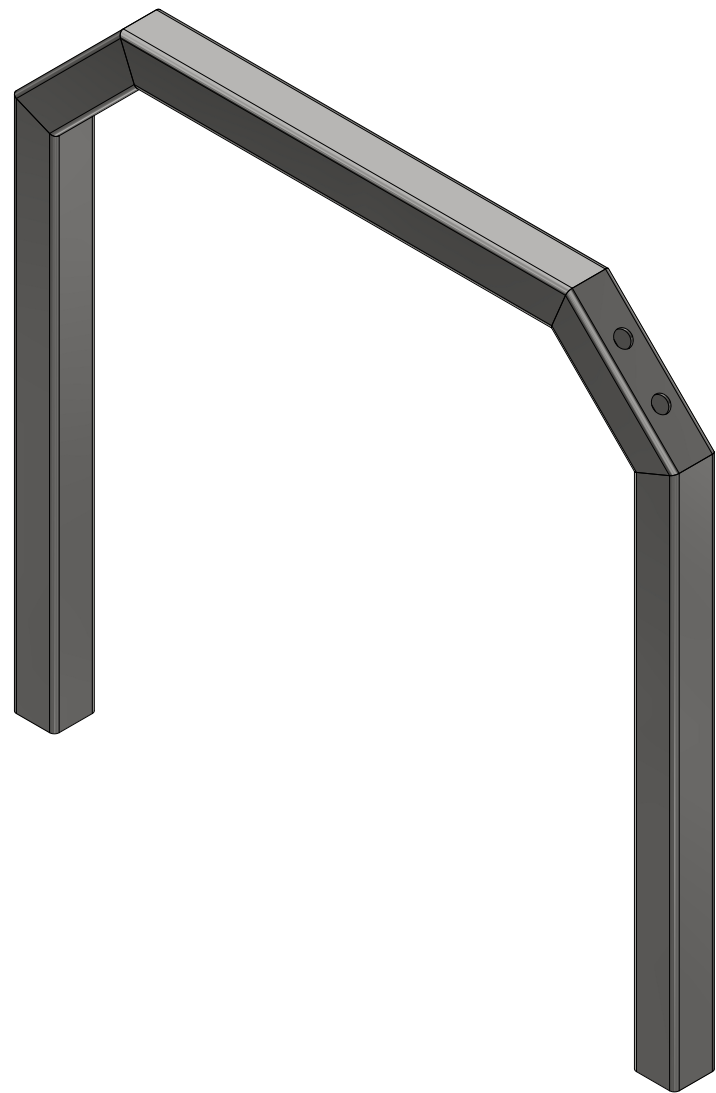
A

A

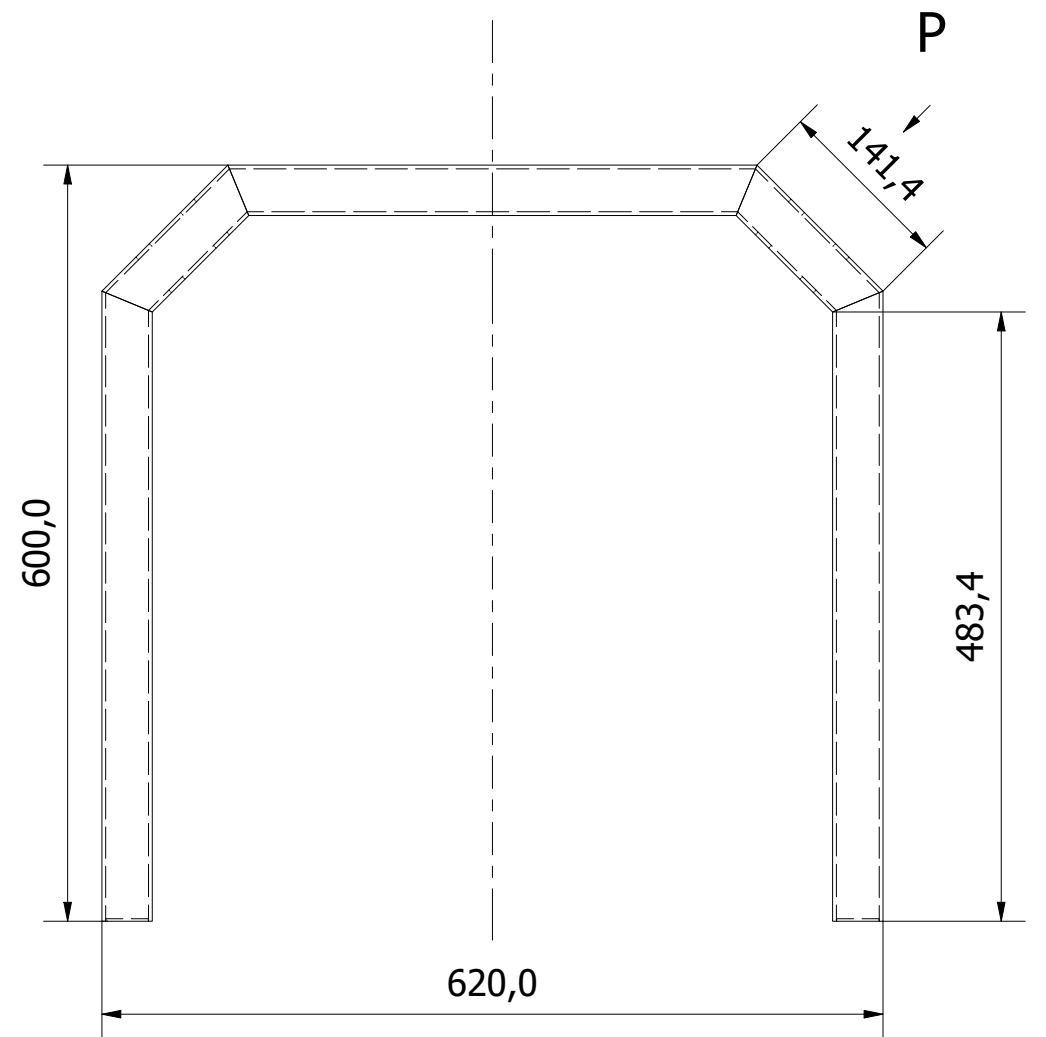
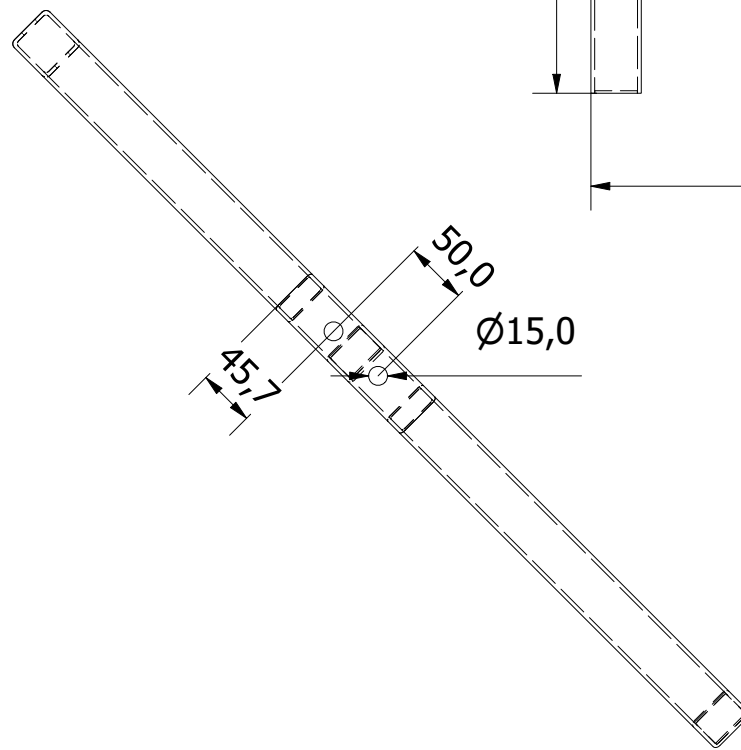


<p>© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.</p> <p>Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.</p>	 <p>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN Facultad de Ingeniería Departamento De Ingeniería Mecánica</p> 		
	<p>Diseñado por: Carlos Henríquez Navarrete</p>		<p>Fecha: 03-03-2025</p>
	<p>Proyecto: Banco de ensayos Tambor aglomerador</p>	<p>Título: Plancha y escuadra</p>	<p>Firma:</p>
	<p>Norma: </p>	<p>Esc: 1 : 2</p>	<p>Hoja: 8/10</p>

6 5 4 3 2 1



P (1 : 6)



© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.
 Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
 Facultad de Ingeniería
 Departamento De Ingeniería Mecánica



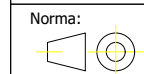
Diseñado por:
 Carlos Henríquez Navarrete

Fecha:
 21-11-2024

Proyecto:
 Banco de ensayos
 Tambor aglomerador

Título:
 Soporte superior
 - rueda guía

Firma:



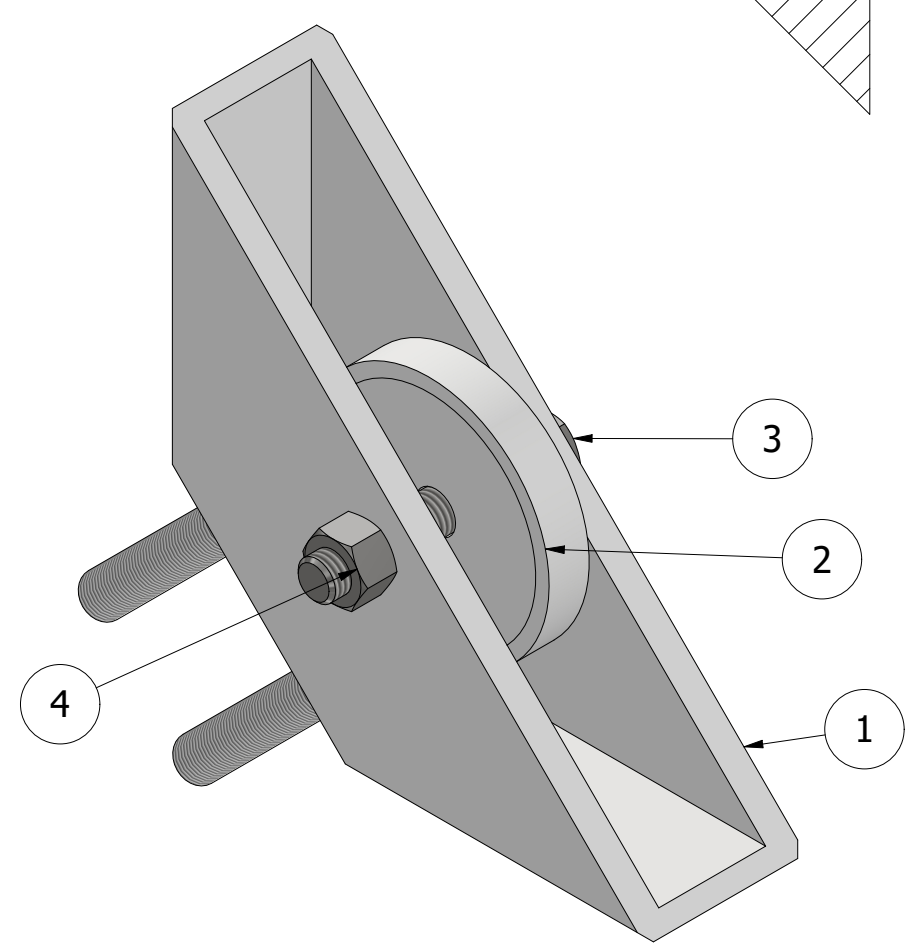
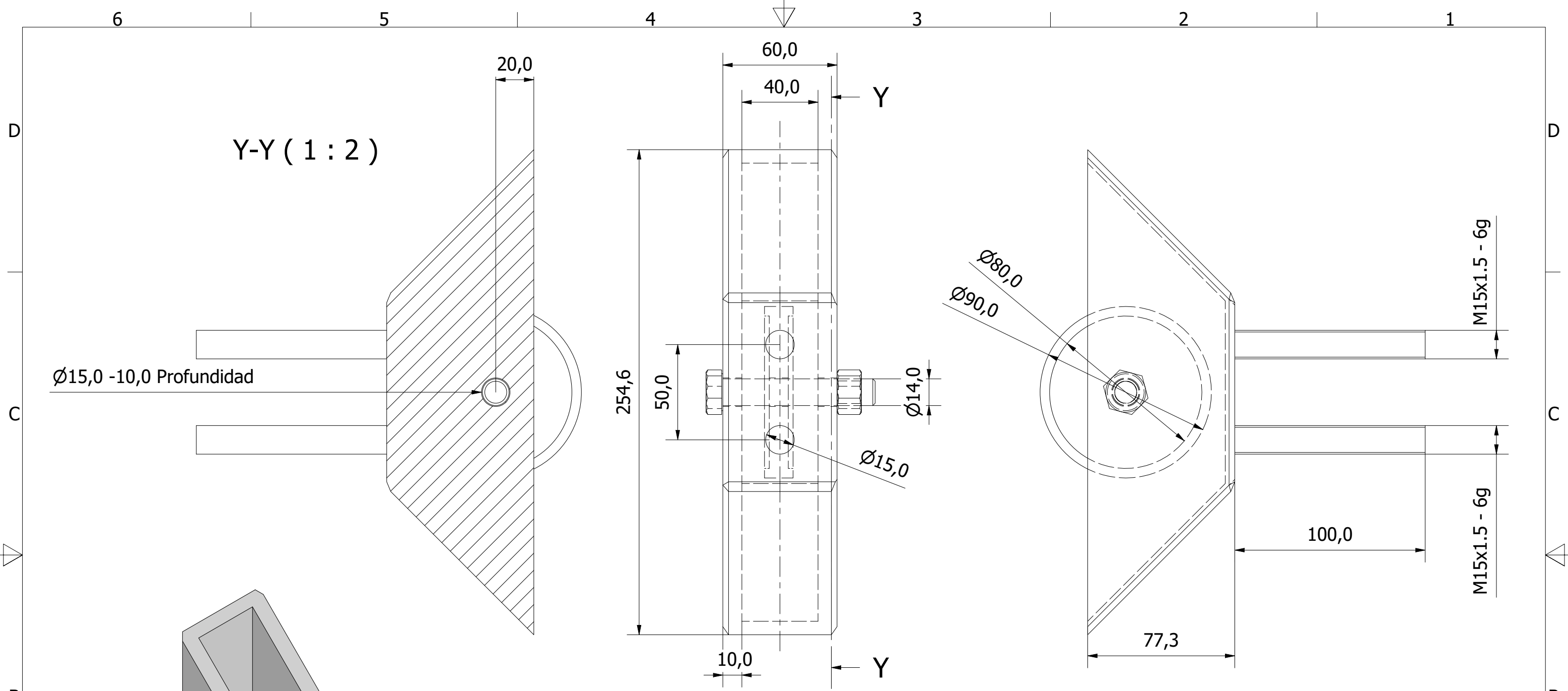
Norma:





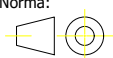
Esc:
 1 : 5

Hoja:

9/10



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Soporte rueda	
2	1	Rueda guía	
3	1	ISO 4017 - M14 x 80	Tornillos de cabeza hexagonal - Productos de clases A y B
4	1	ISO 4032 - M14	Tuerca hexagonal, tipo 1 - Productos de clases A y B

<p>© Carlos Henriquez Navarrete, 2025. Todos los derechos reservados.</p> <p>Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y otras leyes aplicables. Queda prohibida cualquier reproducción, distribución, o uso no autorizado del contenido de este documento, total o parcialmente, sin el consentimiento previo por escrito de la empresa o autor del dibujo.</p>	 <p>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN Facultad de Ingeniería Departamento De Ingeniería Mecánica</p>			
	Diseñado por: Carlos Henríquez Navarrete			Fecha: 21-11-2024
	Proyecto: Banco de ensayos Tambor aglomerador	Título: Rueda guía Superior		Firma:
		Norma: 	Esc: 1 : 2	Hoja: 10/10