

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DISEÑO DE UN SELECCIONADOR DE BOLAS
MODULAR PARA EMPRESA CEMENTERA**

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Ingeniero en Fabricación y Diseño
Industrial con Licenciatura en Ingeniería
en Fabricación y Diseño Industrial.

Alumno:

Diego Cáceres

Profesor Guía:

Sr. Mario González Carvallo

OCTUBRE-2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño de un Seleccionador de Bolas Modular para Empresa Cementera

Nombre del candidato(a): Diego Eduardo Cáceres Gallegos

Carrera / Grado: Ingeniería en Fabricación y Diseño Industrial

Campus: José Miguel Carrera Departamento: Diseño y Manufactura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mario González Carvallo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

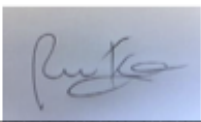
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un período de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26/10/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/10/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

A la vida, por el invaluable regalo de existir y por brindarme la oportunidad de cumplir esta meta.

A mi padre, Juan Carlos, quien, sin compartir mi sangre, fue un pilar fundamental en mi vida, impulsando mis estudios y mi formación profesional. Sé que hoy, desde el cielo, sigues guiando y cuidando mis pasos.

A mi pareja, Daniela, por su amor incondicional, su paciencia y por permanecer a mi lado con firmeza ante cualquier dificultad que el camino me presentara.

A mi madre, por haberme dado la vida y ser el origen de todo lo que soy.

A mis amigos, por transformar los años universitarios en una etapa inolvidable, haciendo más ameno y alegre cada momento compartido.

A mis profesores, por su entrega y vocación al formar profesionales de excelencia; y de manera especial, a aquellos maestros que hoy ya no están físicamente, pero cuyo legado y enseñanzas vivirán siempre en mi ejercicio profesional.

Resumen

Palabras claves: Molienda de clínker, Medios de molienda, Ovoides, Clasificación granulométrica, Norma VDI 2221, Análisis por Elementos Finitos (FEA), Decreto Supremo N° 594

Capítulo N°1: Este capítulo expone los antecedentes y la problemática del desgaste de medios de molienda en la industria cementera. Define los objetivos, alcances, limitaciones y el marco normativo.

Capítulo N°2: Se describe la ruta metodológica basada en la norma VDI 2221 para estructurar el proyecto en cuatro fases. Asimismo, se detallan las técnicas de recolección de datos operativos y las herramientas CAD/CAE empleadas en la modelación y validación estructural.

Capítulo N°3: En este capítulo se desarrolla la ingeniería de detalle del seleccionador de bolas. A partir de la matriz de Pugh y los requerimientos operativos, se dimensionan matemática y geoméricamente los módulos de tolva, cinta y tambor, especificando sus materiales y accionamientos

Capítulo N°4: Presenta la planimetría, la cubicación y una estimación referencial de insumos de acero por \$11.112.610 CLP. Esta estimación complementa la documentación del diseño; no constituye una evaluación de viabilidad económica.

Capítulo N°5: Describe el prototipo a escala, la propuesta de valor operacional y el balance de los objetivos. Distingue los resultados del diseño de las prestaciones que requieren verificación experimental e industrial.

Índice

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES	2
1.1 Planteamiento de problema	3
1.2 Identificación del problema técnico	3
1.2.1 Interrogante del Proyecto	4
1.3 Justificación	5
1.3.1 Sustentabilidad Operativa y Económica	5
1.4 Marco Legal y Seguridad Industrial	5
1.5 Objetivos	8
1.5.1 Objetivo General	8
1.5.2 Objetivos específicos	8
1.6 Aplicaciones y Limitaciones	9
1.6.1 Alcances del Proyecto	9
1.6.2 Limitaciones del Proyecto	9
1.7 Marco Teórico	10
1.7.1 Fundamentos de la Molienda Clinker	10
1.7.2 Dinámica y Desgaste de los Medios de Molienda	11
1.7.3 Principios de Clasificación por Tambor Rotativo	11
1.7.4 Normativa de Seguridad y Salud Ocupacional	12
1.7.5 Fundamentos del Análisis por Elementos finitos (FEA)	13
2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	16
2.1 Naturaleza de la Investigación	17
2.2 Metodología de diseño: Modelo de la Norma VDI 2221	17
2.3 Fase del Desarrollo del Proyecto	19
2.3.1 Fase I: Clarificación de la Tarea y Definición de Requerimientos	19
2.3.2 Fase II: Diseño Conceptual y Estructura de Funciones	19
2.3.3 Fase III: Diseño de Proyecto (Embodiment Design)	20
2.3.4 Fase IV: Diseño de Detalle y Validación estructural	20
2.4 Técnicas y Herramientas de Recolección de Datos	20
2.5 Recursos y Herramientas Tecnológicas	21
3. CAPÍTULO III: INGENIERÍA DE DETALLE	23
3.1 Definición de las Variables de Entrada (Input Data)	25
3.2 Fase II: Diseño Conceptual y Estructuras de Funciones	27

3.2.1	Abstracción y Estructuras de Funciones.....	27
3.2.2	Matriz Morfológica y Selección de Concepto	28
3.2.3	Matriz de Decisión de Pugh	30
3.3	Ingeniería de Detalle del Seleccionador para Plantas Cementeras	33
3.3.1	Módulo N°1: Tolva de Recepción	34
3.3.2	Módulo N°2: Tambor Clasificador Multietapa (Tambor)	37
3.3.3	Sistema de Transporte (Cinta Transportadora Chevron) — Especificaciones de Referencia.....	40
3.4	Fundamentos y Metodología de Simulación Computacional	43
3.4.1	Criterios de Falla Estática (Tensiones Equivalentes de Von Mises).....	44
3.4.2	Propiedades Mecánicas del Acero Estructural A36 en Vigas HEB-100	45
3.5	Configuración del Modelo Numérico en Autodesk Inventor	45
3.5.1	Simplificación Geométrica y Definición de Contactos rígidos	46
3.5.2	Condición de Borde y Sistema de Cargas	46
3.6	Resultados de Simulaciones Estáticas FEA/FEM.....	47
3.6.1	Distribución de Tensiones de Von Mises	47
3.6.2	Deformación y Campo de Desplazamientos Elásticos	48
3.6.3	Evaluación del Factor de Seguridad Estructural	49
3.7	Síntesis y Verificación de Criterios Admisibles (AISC 360/NCh427).....	50
4.	CAPÍTULO IV: PLANIMETRÍA, CUBICACIÓN Y COSTO DEL PROYECTO.....	51
4.1	Expediente de Planimetría Normalizada (Norma ISO 7200).....	52
4.1.1	Estructura Jerárquica del Árbol de Producto (BOM) y Codificación Alfanumérica	52
4.1.2	Planos de Ensamble General y Despiece de Componentes.....	55
4.2	Estimación de Costos con Referencia al Enfoque ABC	55
4.2.1	Separación de Insumos Brutos de Acero vs. Procesos de Maestranza	55
4.3	Estimación Directa de Insumos y Materiales.....	57
4.3.1	Cubicación y Desglose de Insumos Brutos	57
4.3.2	Distribución de Costos por Familia de Acero (AR500, ASTM-A36, HEB-100).....	58
5.	CAPÍTULO V: PROPUESTA DE VALOR, PROTOTIPO FUNCIONAL Y	
CONCLUSIONES		60
5.1	Validación de Cinemática Mediante Prototipo Físico a Escala (Impresión 3D)	
61		
5.1.1	Fabricación aditiva y Componentes Normalizados.....	61
5.1.2	Verificación Experimental de Flujo pasivo y Rotación de tambor	61
5.2	Evaluación Operacional y Propuesta de Valor	62

5.2.1	Análisis Comparativo “Antes vs Después”	62
5.2.2	Protección del Operador y Criterios del D.S. N° 594.....	63
5.3	Conclusiones Generales del Proyecto de Título	63
5.3.1	Cumplimiento de Objetivos Específicos.....	63
5.3.2	Aportes Técnicos y Condiciones para la Implementación.....	64

Índice de Tablas

Tabla 1-1 Límites de exposición a vibraciones del segmento mano-brazo según D.S. 594	6
Tabla 1-2 Límites permisibles de exposición a ruido estable o fluctuante.....	7
Tabla 1-3 Distribución de accidentes según tipo de evento en plantas de procesamiento.....	7
Tabla 3-1 Lista de Exigencias del Proyecto.....	25
Tabla 3-2 Clasificación técnica de los medios de molienda según su estado de desgaste.....	26
Tabla 3-3 Distribución de Calibres Nominales y Objetivos de Clasificación	26
Tabla 3-4 Matriz Morfológica del Sistema.....	29
Tabla 3-5 Matriz de decisión de Pugh para la selección del concepto óptimo	31
Tabla 3-6 Cálculo de la Variante 1: Clasificador Vibratorio	32
Tabla 3-7 Cálculo de la Variante 2: Seleccionador Modular	33
Tabla 3-8 Comparativa de propiedades mecánicas entre el acero estructural ASTM A36 y el acero antiabrasivo AR500.	45
Tabla 3-9 Verificación de Criterios de Aceptación Estructural	50
Tabla 4-1 Listado maestro de materiales (BOM) y codificación alfanumérica por módulos.....	54
Tabla 4-2 Distribución de masa y presupuesto de inversión bruta (CAPEX) en insumos de acero por categoría de suministro.	59

Índice de Figuras

Figura 1-1 Desgaste progresivo y pérdida de esfericidad de los medios de molienda	4
Figura 2-1 Flujograma Metodológico de Diseño Según Norma VDI 2221	18
Figura 3-1 Diagrama de Caja Negra del Seleccionador Automatizado	28
Figura 3-2 Ángulo de Caída para Chute	38
Figura 3-3 Configuración de cargas verticales y restricciones de empotramiento 3D	46
Figura 3-4 Distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en el chasis	47
Figura 3-5 Campo de desplazamientos elásticos bajo carga vertical máxima	48
Figura 3-6 Mapa del Factor de Seguridad (FS) global de la estructura	49
Figura 4-1 Paneles de visualización de datos analíticos de distribución de masa total, materialidad y concentración por módulo	53
Figura 4-2 Distribución porcentual en masa (kg) y costo (\$) de la compra comercial de acero bruto.	57
Figura 4-3 Variación de la inversión entre aceros de calidad estructural y aceros de calidad antiabrasiva.	58

Índice de Ecuaciones

<i>Ecuación 1-1</i>	10
<i>Ecuación 1-2</i>	12
<i>Ecuación 1-3</i>	15
<i>(Ecuación 3-1)</i>	32
<i>(Ecuación 3-2)</i>	34
<i>Ecuación 3-3</i>	34
<i>Ecuación 3-4</i>	37
<i>Ecuación 3-5</i>	41
<i>Ecuación 3-6</i>	42
<i>Ecuación 3-7</i>	42
<i>Ecuación 3-8</i>	44
<i>Ecuación 4-1</i>	56

Índice de Anexos

<i>Anexo A Prototipo Digital Vista Isométrica</i>	<i>69</i>
<i>Anexo B Prototipo Digital Vista Frontal</i>	<i>69</i>
<i>Anexo C Planimetría General.....</i>	<i>70</i>
<i>Anexo D Enlace a la Página General</i>	<i>71</i>

Índice de Siglas, Abreviaturas y Nomenclatura

<i>AISI:</i>	<i>American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero; norma aplicable al eje del tambor).</i>
<i>ANSI:</i>	<i>American National Standards Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares; regulación de planos de ingeniería).</i>
<i>AR:</i>	<i>Abrasion Resistant (Denominación de aceros de alta dureza resistentes a la abrasión, ej. AR400 y AR500).</i>
<i>ASTM:</i>	<i>American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales; ej. acero estructural A36).</i>
<i>AWS:</i>	<i>American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura; aplicable al código de electrodos).</i>
<i>CAD:</i>	<i>Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora).</i>
<i>CAE:</i>	<i>Computer-Aided Engineering (Ingeniería Asistida por Computadora / Entorno de simulaciones numéricas).</i>
<i>CEMA:</i>	<i>Conveyor Equipment Manufacturers Association (Asociación de Fabricantes de Equipos Transportadores).</i>
<i>D.S. 594:</i>	<i>Decreto Supremo Número 594 (Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo).</i>
<i>EP:</i>	<i>Polyester-Nylon (Especificación de la estructura textil interna de alta resistencia de la banda transportadora).</i>

<i>EPP:</i>	<i>Elementos de Protección Personal.</i>
<i>et al.</i>	<i>Et alii (Locución latina que significa "y otros", exigida en APA 7 para citar múltiples autores).</i>
<i>FEA</i>	<i>Finite Element Analysis (Análisis por Elementos Finitos; validación estructural computacional).</i>
<i>HB:</i>	<i>Hardness Brinell (Escala de dureza Brinell empleada para especificar revestimientos anti-desgaste).</i>
<i>HDPE:</i>	<i>High-Density Polyethylene (Polietileno de Alta Densidad utilizado en los polines de apoyo).</i>
<i>IPE / H:</i>	<i>Perfiles estructurales europeos de ala ancha en forma de "I" o de "H" para el chasis de la maquinaria.</i>
<i>ISO:</i>	<i>International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización).</i>
<i>Moly-Cop:</i>	<i>Empresa fabricante y de referencia técnica para proveedores de medios de molienda industriales).</i>
<i>NIOSH:</i>	<i>National Institute for Occupational Safety and Health (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional).</i>
<i>SCADA:</i>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition (Sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos Industriales).</i>
<i>SERNAG</i>	<i>Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile.</i>
<i>EOMIN</i>	
<i>SMAW:</i>	<i>Shielded Metal Arc Welding (Soldadura por Arco de Metal Protegido o Arco Manual).</i>

UTFSM / Universidad Técnica Federico Santa María.

USM:

VI / V2: Variante 1 (Clasificador vibratorio) y Variante 2 (Seleccionador modular) evaluadas en el proyecto.

VDI: Verein Deutscher Ingenieure (Asociación de Ingenieros Alemanes; entidad creadora de la metodología de diseño).

Unidades de Medida

%	Porcentaje (Unidad de relación adimensional para la frecuencia de accidentes o grado de llenado).
dB(A):	Decibelio con filtro de ponderación acústica A (Unidad estándar para medir la presión sonora industrial).
g^*	Aceleración de gravedad estándar ($9,81m/s^2$)
HP	<i>Horsepower</i> (Caballo de fuerza; unidad de potencia mecánica para motores)
kg	Kilogramos (Unidad internacional de masa)
kg/m^3	Kilogramos por metro cúbico (Unidad de densidad de masa aparente)
m	Metros (Unidad internacional de longitud o dimensión lineal)
s/m^2	Metros por segundo al cuadrado (Unidad física de aceleración lineal o vibración de componentes)
m^3	Metros cúbicos (Unidad internacional de volumen o capacidad de almacenamiento)
mm	Milímetros (Unidad dimensional estándar de calibres, espesores y componentes mecánicos)
MPa	Mega pascal (Unidad de esfuerzo y presión mecánica de fluencia)
Puntos	Unidad de valorización numérica adimensional asignada dentro de la matriz de Pugh

RPM	Revoluciones por Minuto (Unidad de frecuencia de rotación o velocidad angular de un mecanismo)
<i>Ton/h /</i> <i>Tonh:</i>	Toneladas por hora (Unidad de flujo másico o tasa de procesamiento de la planta)
V	Voltios (Unidad de potencial eléctrico o tensión de alimentación trifásica)
°	Grados geométricos (Unidad de medida angular para pendientes e inclinación de paredes)

Índice de Nomenclatura y Variables Matemáticas

B_{min}	Ancho de banda mínimo requerido para la estabilidad de la carga sobre la cinta
C	Capacidad de transporte requerida en la cinta transportadora
D	Diámetro interior nominal de diseño del tambor clasificador
d_{max}	Diámetro máximo del medio de molienda o tamaño límite de la carga de entrada
F	Factor de fricción de los componentes rotativos de la cinta transportadora
FS/fs	Factor de seguridad general de diseño / Factor de servicio por impactos dinámicos
H	Altura de elevación de la cinta transportadora
i	Índice correlativo del criterio de evaluación analizado en la matriz de Pugh
J	Grado o nivel de llenado total del volumen interior del molino tubular
L	Longitud horizontal del transportador de cinta
M_d	Masa total de diseño estático y dinámico calculada para la tolva de recepción
n	Cantidad total de criterios técnicos y económicos establecidos para la evaluación

n_c/N_c	Velocidad crítica teórica de rotación angular del tambor rotatorio
P_e	Potencia entre la demanda por el accionamiento de la cinta transportadora
P_{Total}	Puntaje total ponderado obtenido por las variantes evaluada en matriz de Pugh
Q	Carga máxima de material concentrada sobre la banda transportadora
S_y	Límite de fluencia estática longitudinal del material metálico
V_c	Volumen útil ocupado por la carga interna dentro del molino tubular
V_i	Clasificación numérica asignada a una variante respecto a un criterio específico
V_m	Volumen interior total geométrico disponible en el molino de cemento
V_{Total}	Volumen geométrico útil de diseño de la tolva de recepción
W_i	Factor de ponderación o peso relativo asignado a un criterio de selección
δ_{max}	Ángulo de inclinación máximo permitido por fricción en la cinta transportadora

θ	Ángulo de inclinación de diseño de las paredes cónicas de la tolva
μ/μ_s	Coeficiente de fricción estática superficial entre los cuerpos de contacto
ρ_{ap}	Densidad aparente del mundo de molienda almacenado
σ_{VM}	Esfuerzo equivalente o de comparación calculado bajo el criterio de Von Mises
$\phi/\emptyset$	Ángulo de fricción interna o de reposo del material a granel

Introducción

La industria cementera es fundamental para la infraestructura y la construcción, pero enfrenta desafíos asociados al consumo energético y a los costos operativos. La molienda de clinker, componente principal del cemento Portland, representa una fracción importante de la demanda energética de la planta (Bhatty et al., 2004) [1].

No obstante, la gestión de los medios de molienda a escala de las plantas cementeras presenta constantes problemas que suelen ser subestimados. Durante la operación continua, las bolas de acero sufren un desgaste severo debido a la atricción e impacto contra el duro *Clinker*, lo que altera la geometría original esférica. Al desgastarse, se transforma en elementos irregulares que no solo pierden su capacidad de molienda fina, sino que además amenazan la continuidad operacional al saturar el interior del molino (Cleary, 2001) [2]. La separación de la chatarra metálica y la recuperación de las bolas útiles son tareas que históricamente han dependido de zarandeos manuales o procesos reactivos ineficientes.

Frente a esta necesidad, se propone el diseño mecánico de un seleccionador modular y compacto para operaciones de menor escala. El sistema comprende una tolva de recepción y un tambor rotativo con tres zonas de tamizado intercambiables. La arquitectura modular facilita la sustitución de componentes expuestos al desgaste y el mantenimiento del conjunto. La cinta transportadora se aborda como interfaz de alimentación mediante especificaciones de referencia, fuera del modelado y del prototipo.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES **GENERALES**

1.- Este capítulo expone los antecedentes y la problemática del desgaste de medios de molienda en la industria cementera. Define los objetivos, alcances, limitaciones y el marco normativo.

1.1 Planteamiento de problema

El rendimiento de la molienda está vinculado con la calidad y el estado de la carga de los molinos tubulares. La abrasividad del clinker produce un desgaste no uniforme de los medios de molienda, que afecta su capacidad para reducir el tamaño del material. Esta situación plantea necesidades de mantenimiento y control de la carga para evitar pérdidas de eficiencia y sobrecostos operativos.

1.2 Identificación del problema técnico

La eficiencia en la obtención de la finura del cemento está directamente ligada a la integridad operativa de los medios de molienda. El desgaste multifactorial, producto del impacto y la abrasión constante contra el clinker, provoca que las bolas de acero pierdan su esfericidad original, transformándose en piezas deformadas o fragmentándose en residuos metálicos denominados “Chatarra”. Esta degradación morfológica impide que los cuerpos molidores mantengan la superficie de contacto necesaria para una molienda fina efectiva lo que disminuye drásticamente la transferencia de energía hacia el material procesado.

Figura 1-1

Desgaste progresivo y pérdida de esfericidad de los medios de molienda



Fuente: La secuencia ilustra la transición desde una bola de acero nueva hasta el desecho final o *Scraps*. Elaboración IA (2026)¹

1.2.1 Interrogante del Proyecto

Considerando la problemática expuesta por la degradación geométrica de los medios de molienda en el procesamiento de clinker y los riesgos operativos que se asocian a la intervención manual para su clasificación, surge la siguiente interrogante

¿Es técnicamente factible y estructuralmente viable el diseño de un sistema mecánico modular y continuo que permita segregar de forma eficiente la chatarra metálica y clasificar los medios de molienda en plantas cementeras, optimizando la mantenibilidad por medio de componentes de selección desmontables, reduciendo la exposición del personal frente a los riesgos operacionales?

1.3 Justificación

1.3.1 Sustentabilidad Operativa y Económica

La pertinencia del diseño se fundamenta en la necesidad de mejorar la gestión de los medios de molienda. La molienda final puede representar hasta un 40% de la demanda eléctrica de la instalación (Bhatty et al., 2004) [1]. Las bolas de acero también constituyen un componente relevante de los costos operativos (Wills & Finch, 2016) [3].

La pérdida de esfericidad y de masa de los medios de molienda puede reducir la eficacia del proceso (Cleary, 2001) [2]. El seleccionador se propone facilitar el mantenimiento de una carga equilibrada; su efecto sobre el consumo específico de energía deberá comprobarse en operación (Napier-Munn, 2019) [4].

1.4 Marco Legal y Seguridad Industrial

El diseño considera como referencia las condiciones sanitarias y ambientales del Decreto Supremo N° 594 (Ministerio de Salud, 1999). La clasificación mecanizada busca reducir la intervención manual y la exposición del personal. La comprobación del cumplimiento en planta requiere evaluar los resguardos y medir las exposiciones durante la operación.

El control de la dispersión del polvo y las salpicaduras en la zona de alimentación se resuelve de forma pasiva con un chute de traspaso inclinado, cubierto con placas de sacrificio AR500 y faldones o cortinas de goma industrial en las aberturas. Se descarta el uso de fuelles o sellos elastoméricos complejos por razones de viabilidad y facilidad de mantenimiento en maestranza. Esta solución sigue la jerarquía de controles de salud

ocupacional (NIOSH, 2023) [6] y actúa como un control de ingeniería fuerte que reemplaza las tareas de selección manual de chatarra.

Tabla 1-1

Límites de exposición a vibraciones del segmento mano-brazo según D.S. 594

Tiempo de Exposición (T) [horas]	Aceleración Vibratoria Máxima	
	$[m/s^2]$	$[g]^*$
$4 < T \leq 8$	4	0,40
$2 < T \leq 4$	6	0,61
$1 < T \leq 2$	8	0,81
$T \leq 1$	12	1,22

Fuente. $[g]^* = 9,81 [m/s^2]$ (aceleración de gravedad). Adaptado de Decreto Supremo 594, por el Ministerio de Salud (1999), Artículo 92 [7].

Tabla 1-2

Límites permisibles de exposición a ruido estable o fluctuante.

Niveles de Presión Sonora [dB(A) lento]	Tiempo de Exposición Total diaria
85	8 horas
88	4 horas
91	2 horas
100	15 minutos
103	7,5 minutos
110	1,49 minutos
115	29,12 segundos

Fuente. Adaptado de *Decreto Supremo 594*, por el Ministerio de Salud (1999), Artículo 74 [7].

Tabla 1-3

Distribución de accidentes según tipo de evento en plantas de procesamiento

Tipo de Evento	Frecuencia Relativa %	Gravedad Potencial
Golpeado por objeto	26%	Media – Alta
Atrapamiento en partes móviles	14%	Crítica (Amputaciones)
Caída a mismo/distinto nivel	18%	Baja – Media
Exposición a agentes físicos (Ruido/Vibración)	22%	Crónica (Enfermedad Profesional)
Otros eventos	20%	Variable

Fuente. Elaboración propia a partir de datos de SERNAGEOMIN (2023), *Anuario de la Minería de Chile*, Sección Estadísticas de Seguridad.

La clasificación permite distinguir el material de descarte de las bolas subdimensionadas susceptibles de reutilización. El aporte esperado es mejorar la gestión de la carga y reducir la intervención manual. Los ahorros y la disminución de los costos por tonelada de cemento son beneficios potenciales que requieren mediciones en planta y no se cuantifican en este trabajo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar un seleccionador de bolas (compuesto por tolva, y tambor rotativo) para optimizar la clasificación de los medios de molienda en la industria cementera, validando su desempeño estructural y cinemático mediante simulaciones de elementos finitos (FEA) y la construcción de un prototipo funcional a escala

1.5.2 Objetivos específicos

1. Determinar los requerimientos técnicos y parámetros operativos del sistema, mediante el análisis de las tasas de desgaste y flujos de carga de bolas de molienda para dimensionamiento inicial.
2. Desarrollar la ingeniería de detalle y el modelo tridimensional del seleccionador de bolas, empleando el software CAD para integrar los mecanismos de transmisión y las estructuras de soporte.
3. Validar la viabilidad técnica del diseño mediante simulaciones de elementos finitos (FEA) y fabricar un prototipo a escala que permita verificar la cinemática de clasificación.

1.6 Aplicaciones y Limitaciones

1.6.1 Alcances del Proyecto

La investigación final se materializará en un expediente de ingeniería de detalle el cual comprende los siguientes entregables o productos:

1. **Dossier Técnico de Diseño:** Comprende de un conjunto de planos de fabricación y ensamblaje, bajo las normativas (ISO/ANSI), en los cuales se detallarán las geometrías, tolerancias y especificaciones de materiales a escala industrial según las partes del conjunto que corresponda
2. Informe de Integridad Estructural: Análisis estático por elementos finitos de la estructura de soporte bajo las condiciones de carga y restricción del modelo. Sus resultados se limitan a ese caso y no sustituyen una evaluación de fatiga ni ensayos de impacto.
3. **Prueba de Concepto Física: Prototipo a escala de la tolva y el tambor, mediante impresión 3D e integración de componentes normalizados, destinado a examinar la cinemática y el flujo de material. La cinta queda excluida del prototipo.**

1.6.2 Limitaciones del Proyecto

Dentro de las fronteras o limitaciones que tendrá este proyecto, estas se definirán bajo las siguientes consideraciones

1. Exclusión de Fabricación Industrial: No se contempla la fabricación a escala real (1:1) ni el montaje en planta. La evaluación se limita al modelo tridimensional, las simulaciones y el prototipo a escala.

2. **Frontera Electrotécnica:** No se incluirá el diseño de la infraestructura eléctrica de media o alta potencia, tableros de transferencia ni la integración a sistema SCADA industriales.
3. **Estudio de materiales:** La selección de los materiales y la respuesta al desgaste se basará en el análisis de las propiedades según catálogos (En Chile) y literatura técnica especializada, sin realizar ensayos metalográficos o de abrasión de largo aliento en laboratorios

1.7 Marco Teórico

1.7.1 Fundamentos de la Molienda Clinker

La molienda del clinker representa la etapa final e intensiva del proceso de fabricación del cemento. En comparación de la gran minería, la industria cementera utiliza molinos tubulares en donde la reducción de tamaño se logra predominantemente por atricción (fricción) y en menor medida por impacto, el objetivo es alcanzar una alta superficie específica (finura Blaine) [1]. El nivel de llenado del molino es un parámetro crítico en las operaciones que se generan, calculando mediante una relación volumétrica expresada por la siguiente ecuación

Ecuación 1-1

$$J = \frac{V_c}{V_m} \cdot 100$$

Fuente: Relación volumétrica definida a partir de los volúmenes de carga y molino; elaboración propia.

Donde:

- J : Grado de llenado total del molino [%]
- V_c : Volumen ocupado por la carga (clinker, bolas y aditivos) [m^3]
- V_m : Volumen interior total del molino [m^3]

Una estabilización de $[J]$ asegura que el mecanismo de molienda predominante sea Catarateo (impactado) sobre el cascadeo (atrición), lo que maximiza la eficiencia en la fractura (Gupta & Yan, 2016) [8]

1.7.2 Dinámica y Desgaste de los Medios de Molienda

Los cuerpos moledores están expuestos en las operaciones a un ambiente de alta abrasividad física. El desgaste de las bolas en los molinos de cemento es un fenómeno multicausal el cual altera bruscamente su geometría original. Por medio que las esferas de acero pierden su masa, estas se transforman en fragmentos irregulares u ovoides (Chatarra). Esta pérdida de esfericidad reduce considerablemente el área de contacto que es efectiva en la molienda, lo que por consiguiente aumenta el consumo energético sin aportar al proceso del clinker y favorece la obstrucción de las rejillas divisorias del molino tubular [2]

1.7.3 Principios de Clasificación por Tambor Rotativo

El sistema de clasificación mecánica por medio de tambor rotativo tiene sus fundamentos en la segregación volumétrica de partículas de una superficie cilíndrica perforada. Mientras que el tambor gira, la carga es elevada por la fricción hasta que la componente tangencial de la gravedad supera la fuerza centrífuga, lo que provoca que el

material caiga en forma de cascada. La condición crítica de rotación se define teóricamente por la velocidad crítica (N_c), que es expresada en revoluciones por minuto:

Ecuación 1-2

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}}$$

Fuente: Relación de velocidad crítica citada en el texto [4].

Donde:

- N_c : *Velocidad crítica de totación del tambor [RPM]*
- D : *Diametro interior del tambor [m]*

Con el fin de que la clasificación geométrica de la chatarra sea eficiente y las bolas caigan a través de las mallas sin quedar adheridas por la fuerza centrífuga, el tambor debe de operar a una fracción operativa (típicamente entre 30% y 45%) de su velocidad crítica [4]

1.7.4 Normativa de Seguridad y Salud Ocupacional

Para la industria cementera deben de regirse estrictamente al marco regulador nacional para proteger la integridad física de todos los operadores. En Chile, el Decreto Supremo N°594 establece claramente las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los puestos de trabajo. En el contexto de la manipulación y clasificación de las bolas de acero, las principales variables críticas que se encuentran sin de exposición al ruido e

impacto y las vibraciones mecánicas. Según el artículo 74 del cuerpo legal, el límite permisible de exposición a ruido continuo es de 85 dB(A) para una jornada de 8 horas de trabajo; sin embargo, el choque constante de metales durante el proceso de clasificación eleva drásticamente los niveles de presión sonora, reduciendo el tiempo de exposición (ej., a 100 dB(A) el máximo legal es de 15 minutos diarios) por su parte, los artículos 89 y 92 regulan la exposición a vibraciones del segmento mano – brazo, un riesgo inminente y causante de enfermedades profesionales si la separación de Scraps se realiza por medios de harneros manuales o intervención humana directa [7]

Además, y no menor, el procesamiento del clinker conlleva un riesgo de exposición a material particulado en suspensión. La manipulación abierta de la carga moledora expone al personal a polvos abrasivos. La implementación de un sistema de flujo continuo – comprendido por una tolva, cinta y tambor rotativo – permite una gestión más controlada del material, lo que limita la dispersión de polvo y se alinea con los estándares de higiene industrial de la planta

La propuesta sigue la jerarquía de controles como criterio de diseño (NIOSH, 2023) [6]. La mecanización busca reducir la selección manual y la exposición del operador; las partes móviles requieren resguardos y procedimientos de operación y mantenimiento. La reducción efectiva de los riesgos debe comprobarse en la instalación.

1.7.5 Fundamentos del Análisis por Elementos finitos (FEA)

El análisis por elementos finitos (FEA) divide la geometría en elementos conectados por nodos y permite calcular su respuesta bajo condiciones de carga y

restricción definidas (Logan, 2016) [10]. En este trabajo se utiliza para evaluar el comportamiento estático de la estructura de soporte.

El problema, los objetivos y los alcances definidos en este capítulo orientan la metodología del capítulo II. Los requerimientos se desarrollan en el capítulo III; la planimetría y cubicación del capítulo IV documentan el diseño, y el capítulo V reúne la prueba de concepto y las conclusiones vinculadas con los tres objetivos específicos.

Para el entorno de clasificación de las bolas de molienda de clinker, las estructuras no solo soportaran las cargas estáticas proporcionales al peso de la misma estructura, sino que el de la maquinaria y las cargas dinámicas asociadas a estos movimientos de impacto (derivadas de la caída de material desde la tolva) y esfuerzos cíclicos por la rotación del tambor. Como consecuencia, la evaluación estructural en el software de diseño se aborda desde dos perspectivas mecánicas.

- a) **Análisis Estático Lineal y Teoría de Falla:** Para los materiales que son dúctiles empleados en la fabricación de la maquinaria pesada (como los aceros estructurales y chapas anti – desgaste), el criterio de fluencia que predomina es la Teoría de la Energía de Distorsión Máxima, además se conoce como Criterio de Von Mises. Cuyo principio establece que la fluencia ocurre cuando la energía de distorsión por unidad de volumen iguala a la energía de distorsión en la fluencia en un ensayo de tensión simple. Desde la perspectiva Matemática, el componente se considera estructuralmente seguro si el esfuerzo equivalente de Von Mises (σ_{VM}) es inferior al límite de fluencia del material (S_y) dividido por el factor de seguridad estandarizado (FS)

$$\sigma VM \leq \frac{S_y}{FS}$$

Fuente: Criterio de fluencia y factor de seguridad descrito en Budynas y Nisbett [9].

Donde:

- $\sigma VM \leq$: *Esfuerzo equivalente de Von Mises [MPa]*
- S_y : *Límite de fluencia elástica del material [MPa]*
- FS : *Factor de seguridad estandarizado de diseño [Adimensional]*

El factor de seguridad se selecciona en base a severidad del impacto dinámico de las bolas de acero. En el diseño de los equipos para trabajos de impacto o ambientes abrasivos es habitual trabajar con un factor de seguridad FS que oscile entre 2.0 y 3.0 para tener el resguardo de la integridad ante sobrecargas accidentales o atascamientos de la cinta [9]

- b) **Análisis de Fatiga:** Las cargas fluctuantes pueden producir fallas por fatiga incluso bajo esfuerzos inferiores al límite de fluencia. Su evaluación requiere un historial de cargas y un criterio de resistencia apropiado. El análisis estático presentado no permite establecer la vida a fatiga del equipo.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.-Este capítulo organiza el trabajo en cuatro fases basadas en VDI 2221. La definición de requerimientos responde al primer objetivo específico; la selección conceptual, el dimensionamiento, el modelo CAD y los planos responden al segundo; el análisis estructural y el prototipo se vinculan con el tercero. El capítulo III desarrolla el diseño y el análisis, el IV reúne su documentación y el V presenta el balance de resultados.

2.1 Naturaleza de la Investigación

La investigación corresponde a un proyecto de ingeniería aplicada con enfoque de desarrollo tecnológico. Emplea principios de mecánica y ciencia de materiales para resolver una necesidad de clasificación de medios de molienda.

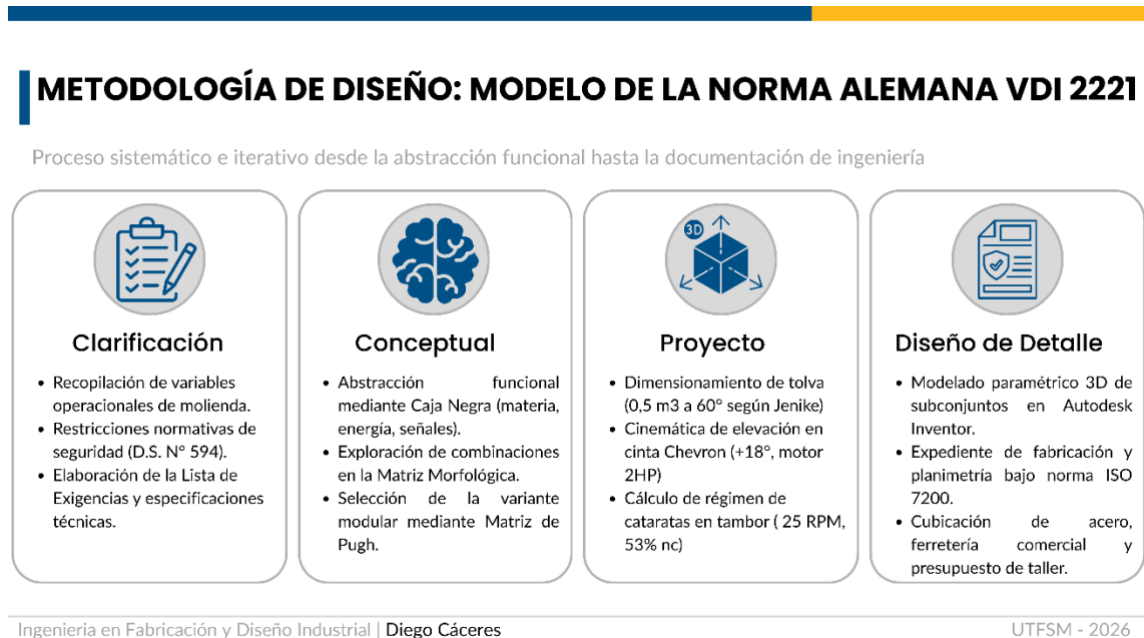
El enfoque es cuantitativo para el dimensionamiento y la simulación estructural. Se consideran diámetros, capacidades de carga y propiedades de los materiales. La precisión de clasificación, la capacidad efectiva y la reducción de la exposición del personal requieren comprobaciones experimentales que no pueden inferirse únicamente del modelo CAD o del análisis estático.

2.2 Metodología de diseño: Modelo de la Norma VDI 2221

Se utiliza la metodología VDI 2221 para organizar el desarrollo desde los requerimientos hasta la documentación de fabricación (Verein Deutscher Ingenieure [VDI], 1993) [11]. Su aplicación permite relacionar las funciones de recepción y clasificación con la geometría, los materiales y las estructuras de soporte.

Figura 2-1

Flujograma Metodológico de Diseño Según Norma VDI 2221



Fuente: Adaptado de VDI 2221. Systematic approach to the development and design of technical systems and products, Por Verein Deutscher Ingenieure (1993). Elaboración propia (2026).

Con el fin de poder visualizar la integración de este modelo investigación, en el flujograma metodológico de la Figura 2–1 se detalla la correspondencia secuencial entre las fases teóricas de la norma alemana y los módulos de diseño desarrollados para el seleccionador

Pahl et al. (2007) [12] presentan el diseño sistemático como una guía para evaluar las funciones del sistema antes de comprometer recursos de fabricación. Aquí se emplea para transformar la necesidad de clasificación en decisiones de diseño verificables, sin que ello demuestre por sí solo la viabilidad económica.

El proceso de metodología se articula en la secuencia por medios de etapas que van desde la definición de las exigencias, hasta la elaboración de la documentación para la fabricación, lo que garantiza que el seleccionador soporte todas las condiciones extremas, de abrasión y de carga de impacto dinámico propias del entorno donde desarrollara las tareas de clasificación

2.3 Fase del Desarrollo del Proyecto

El desarrollo y ejecución del proyecto no tiene un camino lineal común, al contrario, sino que sigue un proceso iterativo de refinamiento técnico. Con el fin de asegurar la coherencia entre la necesidad que se detecta en la selección de bolas y la solución mecánica final, se han estructurado cuatro fases esenciales que fusionan el rigor sistémico alemán con el análisis metodológico propuesto por Munari (1981) [13], el cual sostiene que “el problema no se resuelve por sí mismo, sino que contiene en sí todos los elementos para su solución” por medio de una descomposición lógica

2.3.1 Fase I: Clarificación de la Tarea y Definición de Requerimientos

En la etapa inicial se realiza la recopilación de datos críticos de la operación de molienda de clinker. Se hace el desglose de la problemática y los subproblemas específicos: tipos de desgaste, flujos de carga y restricciones de espacio en la planta cementera. El entregable principal será la Lista de Exigencias, que establecen los límites técnicos como la capacidad de procesamiento y los diámetros de corte para la segregación

2.3.2 Fase II: Diseño Conceptual y Estructura de Funciones

En la segunda etapa de la metodología se identifican las funciones principales que la maquinaria debe de cumplir: recibir (Tolva), transportar (Cinta) y segregar (Tambor).

Se empleará una matriz morfológica para explorar soluciones técnicas y sea seleccionado el concepto más óptimo por medio de una Matriz de Decisión de Pugh, evaluando los criterios de viabilidad, mantenimiento y los costos de fabricación

2.3.3 Fase III: Diseño de Proyecto (Embodiment Design)

Con el concepto seleccionado, se comienza a realizar el dimensionamiento real de cada uno de los componentes. Se define la geometría del tambor, la selección de los materiales a utilizar en el modelado 3D y en el prototipo funcional a escala, la selección de los materiales resistentes a la abrasión y el cálculo de potencias correspondiente para los sistemas motrices de la cinta. Se desarrollará el modelo tridimensional completo en el software Autodesk Inventor, integrando estructuras de soporte y uniones mecánicas

2.3.4 Fase IV: Diseño de Detalle y Validación estructural

La fase final comprende el análisis estático por elementos finitos y la elaboración de planos de fabricación, ensamble y soldadura. El prototipo a escala complementa la revisión de la geometría y la cinemática. La validación industrial, la fatiga y los impactos transitorios requieren estudios adicionales.

2.4 Técnicas y Herramientas de Recolección de Datos

Para que el seleccionador de bolas sea viable en las operaciones, el diseño no puede basarse en supuestos, sino que en la realidad técnica de la molienda de cemento. La recolección de los datos se realizará por medio de una triangulación de fuentes industriales y técnicas con el fin de que los parámetros de entrada sean precisos para el diseño CAD/CAE

- **Análisis Documental:** Se hace una revisión exhaustiva sobre los manuales del molino tubulares y fichas técnicas de los fabricantes de los medios de molienda. Permitiendo obtener los diámetros nominales, las densidades del acero y las tasas de consumo de bolas (Moly – Cop, 2023) [14].
- **Observación Técnica de Campo:** Se hará un levantamiento de la información sobre la disposición física de la canaleta de descarga y el espacio que se requiere para el desarrollo de la maquinaria. Los datos recopilados son críticos para las restricciones de tamaño de la máquina y sus módulos

Según lo expresado por Hernández – Sampieri (2014) [15], en los estudios de alcance técnico, la recolección de datos debe de ser exhaustiva para garantizar que el modelo final sea representado fielmente el fenómeno estudiado. En el caso de esta investigación, cada milímetro de bola de acero y cada grado de inclinación de la canaleta influye en la eficiencia del sistema

2.5 Recursos y Herramientas Tecnológicas

El desarrollo de este proyecto se fundamenta en un ecosistema digital de ingeniería el cual permite pasar del concepto teórico a la validación sin incurrir en gastos extras como un prototipo físico inicial

1. **Modelado Paramétrico (CAD):** se empleará el software Autodesk Inventor para la generación de la maqueta digital 3D. lo que permitirá detectar interferencias o incongruencias en el diseño u ensamblaje de las partes, y ajustar cada módulo correspondiente a una fabricación responsable

2. Simulación de Elementos Finitos (CAE): Se emplea la herramienta de análisis estático para evaluar tensiones, desplazamientos y factor de seguridad del chasis bajo el caso de carga modelado.

CAPÍTULO III: INGENIERÍA DE DETALLE

3.-Este capítulo desarrolla la lista de exigencias, la selección conceptual mediante la matriz de Pugh y la ingeniería de detalle. Se dimensionan la tolva y el tambor, se establecen especificaciones de referencia para la cinta y se analiza el chasis por elementos finitos. Los resultados se interpretan dentro de las condiciones del modelo, con un factor de seguridad de diseño de 2,0. La carga aplicada debe confirmarse con el archivo de simulación, según se indica en el apartado de condiciones de borde.

Para que el diseño sea óptimo, es de suma importancia definir las fronteras técnicas del sistema. Basado en la recopilación de datos de plantas cementeras y de la literatura técnica de molienda fina, se elabora una tabla denominada “Lista de Exigencias”, categorizada según su importancia en Deseos (D) o Exigencias (E)

Tabla 3-1*Lista de Exigencias del Proyecto*

Categoría	Requerimiento Técnico	Valor Especificación	Prioridad
Operación	Capacidad de procesamiento (Tasa de procesamiento)	1,5 a 2,5 toneladas / hora	E
Material	Tipo de carga a procesar	Medios de molienda (bolas de acero) y clinker residual	E
Geometría	Diámetro de corte (Segregación)	≤ 25 mm (Chatarra / Scraps)	E
Mecánica	Módulo 1: Tolva de recepción	Capacidad volumétrica de $0,5\text{ m}^3$	D
Mecánica	Interfaz: Cinta transportadora	Inclinación máxima de 15° , velocidad ajustable	E
Mecánica	Módulo 2: Tambor seleccionador	Diámetro interior 800mm; Longitud: 3000 mm	D
Seguridad	Emisión de ruido operacional	< 85 dB(A) (con protecciones / encapsulamiento)	E
Estructura	Factor de Seguridad (FS)	≥ 2.0 para componentes de impacto	E
Mantenimiento	Acceso a componentes móviles	Desmontaje rápido de mallas de tambor	D

Fuente. Elaboración propia (2026)

3.1 Definición de las Variables de Entrada (Input Data)

El dimensionamiento de los dos módulos requiere caracterizar los medios de molienda provenientes del proceso de clinker. Para los cálculos se consideran las siguientes propiedades y condiciones de entrada.

Tabla 3-2

Clasificación técnica de los medios de molienda según su estado de desgaste

Tipo de Bola	Estado de Desgaste	Diámetro Aproximado (mm)	Acción sugerida
Nueva	Sin uso / Esfericidad 100 %	100 – 80	Carga Inicial del Modelo
Inicial	Desgaste Superficial Leve	80 – 60	Reutilización Inmediata
Medio	Pérdida Moderada de Masa	60 – 40	Reutilización (Molienda Secundaria)
Avanzado	Inicio de Deformación	40 – 25	Evaluación de Descarte
Scrap	Fragmento Irregular (Chatarra)	< 25	Descarte y Reciclaje

Fuente. Los diámetros se basan en los requerimientos de segregación para optimizar la molienda final de clinker. Elaboración propia (2026)

El molino opera con una carga de medios de molienda de diversos calibres. El sistema debe separar los diámetros nominales especificados, considerando un tamaño máximo de alimentación de 100 mm.

Tabla 3-3

Distribución de Calibres Nominales y Objetivos de Clasificación

Calibre (Diámetro Nominal)	Función en el Molino	Estado de Clasificación
100 mm a 80 mm	Molienda primaria (Impacto Grueso)	Retención / Reutilización
80 mm a 60 mm	Molienda Intermedia	Retención / Reutilización
60 mm a 40 mm	Molienda fina (Atricción)	Retención / Reutilización
40 mm a 25 mm	Carga subdimensionadas	Clasificación para Molienda Secundaria
	< 25 mm	Chatarra / Scraps

Fuente. Elaboración propia (2026) basada en requerimientos de molienda de clinker.

- **Densidad del acero de las bolas:** Se adopta 7.850 kg/m^3 como densidad del material. Este valor se distingue de la densidad aparente de 4.800 kg/m^3 utilizada para estimar la masa almacenada en la tolva.
- **Granulometría de Entrada:** El sistema debe de recibir una mezcla de bolas nominales desgastadas y fragmentadas irregulares o “Chatarra” que sus medidas sean inferiores a 25 mm, considerando el comportamiento de la carga en los molinos tubulares
- **Abrasividad del Clinker:** Se debe de considerar la costra del clinker adherida a las bolas, lo que hace aumentar el coeficiente de fricción de estática (μ_s) y el desgaste que abrasión en las superficies de contacto
- **Factor de Seguridad:** Se adoptará un FS de 2.0 con el fin de compensar la severidad del impacto dinámico de las bolas de acero y posibles sobrecargas que pueda tener y provocar un accidente en los diferentes módulos o estructuras de soporte

3.2 Fase II: Diseño Conceptual y Estructuras de Funciones

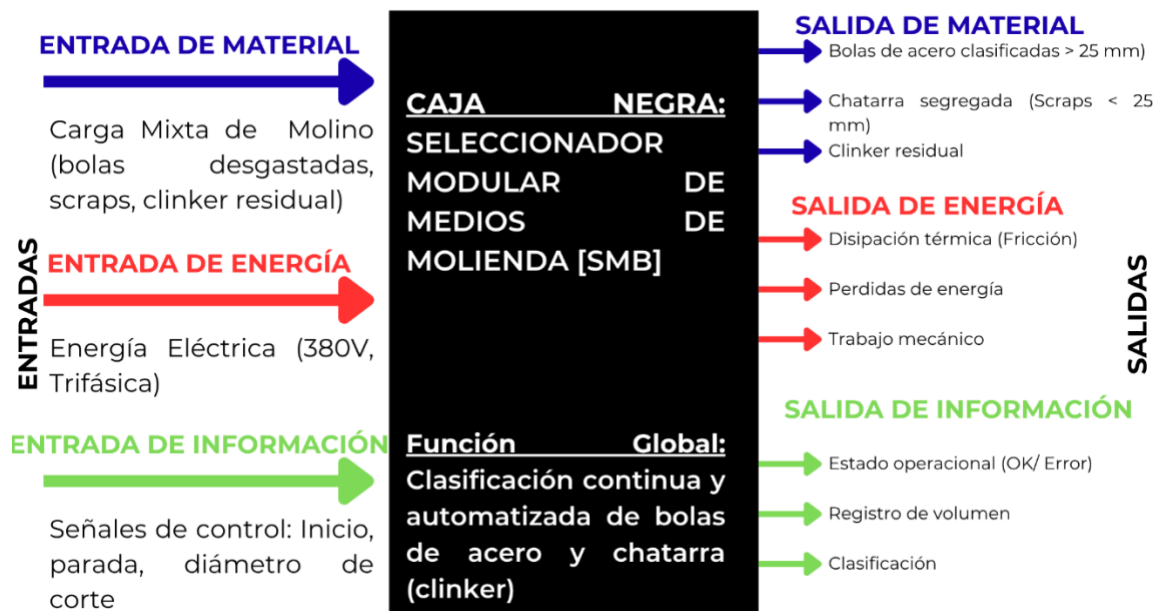
3.2.1 Abstracción y Estructuras de Funciones

De acuerdo con la metodología a emplear que es sistemática, el primer paso para el diseño conceptual consiste en abstraer el problema por medio de una “Caja Negra” que identifique las entradas y salidas de energía, material e información. La función global del sistema es la clasificación continua de los medios de molienda, la tiene como principal objetivo procesar la carga mixta proveniente del molino para segregar de forma eficiente

el material de descarte de las bolas aun operativas. En la Figura 3–1 se visualiza el diagrama de caja negra que rige el diseño propuesto

Figura 3-1

Diagrama de Caja Negra del Seleccionador Automatizado



Fuente. Elaboración propia (2026)

3.2.2 Matriz Morfológica y Selección de Concepto

Para determinar la configuración técnica lo más eficientemente posible, se elaboró una Matriz Morfológica. Cuya herramienta permite combinar diferentes tipos de soluciones para cada sub – función, evaluando su viabilidad en el entorno abrasivo del clinker. De igual forma que lo plantea Munari (1981), el análisis lógico de estas variantes permite que la solución surja de los elementos del problema mismo

Tabla 3-4

Matriz Morfológica del Sistema

Función	Solución A	Solución B	Solución C
Recepción	Tolva Estática	Alimentador Vibratorio	Tolva con Agitador
Transporte	Cinta Transportadora	Tornillo Helicoidal	Elevador de Cangilones
Segregación	Tambor Rotativo	Harnero Vibratorio	Rodillos Divergentes
Accionamiento	Motorreductor AC	Sistema Hidráulico	Motor DC
Estructura de Soporte	Perfiles Tubulares (Cuadrados / Rectangulares)	Vigas IPE / H	Estructura de Celosía (Reticulado)

Fuente. Elaboración propia (2026)

Tras evaluar todas las alternativas por medio de una Matriz de Decisión de Pugh, se optó por seleccionar el concepto integrado por la Tolva Estática, Tambor Rotativo, soportados sobre una estructura de vigas HEB-100. Esta configuración destaca tanto como por su alta resistencia al desgaste abrasivo del clinker, como por su robustez mecánica ante los impactos de los medios de molienda.

De acuerdo con la lógica de diseño de Bruno Munari, se priorizó el uso de los perfiles HEB-100, debido a que son superiores en momento de inercia y facilidad de montaje industrial, frente con los perfiles tubulares o estructuras de celosía. Esta elección asegura una base estable la cual minimiza las vibraciones generadas por la rotación del tambor y facilita el acceso para las labores de mantenimiento preventivo, lo que garantiza la continuidad operacional que exige una planta cementera

3.2.3 Matriz de Decisión de Pugh

Con el fin de validar la selección del concepto óptimo dentro de la norma VDI 2221, se aplicó una Matriz de Decisión de Pugh. Esta metodología o técnica nos permite comparar de manera objetiva diferentes variantes del diseño frente a un “Datum” o punto de referencia, no es el proceso manual, sino los sistemas de clasificación industrial de gran escala (estáticos) que se emplean más comúnmente en la gran minería, cuyo objetivo es demostrar la viabilidad de un diseño compacto y modular, que se enfoque en la molienda de menor escala para empresas cementeras. Manteniendo una capacidad de carga de 2400 kg ($0,5\text{ m}^3$ de Bolas de Acero), el cual logre una reducción significativa en las dimensiones generales con el fin de favorecer la movilidad operativa. Los criterios de evaluación se priorizan la movilidad operativa y la reducción de la huella de espacio en planta

Tabla 3-5

Matriz de decisión de Pugh para la selección del concepto óptimo

Criterios de Evaluación	Peso (%)	Equipo Industrial Estándar (Datum)	Variante 1: Clasificador Vibratorio	Variante 2: Seleccionador Modular
Movilidad y Modularidad	35%	0	-1	+1
Espacio Ocupado (Footprint)	25%	0	-1	+1
Eficiencia de Segregación	15%	0	0	0
Seguridad (D.S. 594)	15%	0	+1	+1
Facilidad de Mantenimiento	10%	0	-1	+1
Puntaje Total	100%	0	-0.55	+0.85

Fuente. Elaboración propia (2026)

La Tabla 3-5 favorece a la Variante 2 por los criterios de movilidad, espacio ocupado, seguridad y mantenimiento. El puntaje de +0,85 frente a -0,55 respalda la elección conceptual con las ponderaciones adoptadas; no constituye una medición de capacidad ni de eficiencia de clasificación.

3.2.3.1 Interpretación de la escala de valorización

- **Datum (0):** Representa el punto de referencia o “Estándar Industrial” contra el cual se comparan las nuevas propuestas

- **Mejor (+1):** El concepto supera significativamente el desempeño del estándar en ese criterio específico
- **Igual (0):** El concepto ofrece un desempeño equivalente al estándar
- **Peor (-1):** El concepto presenta deficiencias o dificultades mayores en comparación al estándar

3.2.3.2 Desarrollo Matemático del Puntaje Total

Para determinar el puntaje final de cada concepto, se aplica la sumatoria del producto entre el valor asignado y el peso relativo de cada uno de los criterios. El cálculo se rige por la siguiente ecuación

(Ecuación 3-1)

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^n (V_i \cdot W_i)$$

Donde:

- P_{Total} : Puntaje o valor total ponderado obtenido por la variante de diseño evaluada [Puntos]
- V_i : Calificación o valor numérico asignado a la variante respecto al criterio (i) [Adimensional]
- W_i : Factor de ponderación o peso relativo de importancia asignado al criterio (i) [Adimensional]
- n : Cantidad total de criterios técnicos económicos establecidos para la evaluación
- i : Índice correlativo del criterio de evaluación analizado

Tabla 3-6

Cálculo de la Variante 1: Clasificador Vibratorio

Concepto	Peso (W_i)	Calculo	Resultado
Movilidad	35%	$(-1 \cdot 0,35)$	-0,35
Espacio	25%	$(-1 \cdot 0,25)$	-0,25
Eficiencia	15%	$(0 \cdot 0,15)$	0,00
Seguridad	15%	$(+1 \cdot 0,15)$	0,15
Mantenimiento	10%	$(-1 \cdot 0,10)$	-0,10
Total	100%	Suma Total	-0,55

Fuente. Elaboración propia (2026)

$$\therefore [(-1 \cdot 0,35) + (-1 \cdot 0,25) + (0 \cdot 0,15) + (+1 \cdot 0,15) + (-1 \cdot 0,10)]$$

$$\therefore (-0,35 + -0,25 + 0,00 + 0,15 + -0,10)$$

$$\textbf{Resultado Variante 1} = -0,55$$

Tabla 3-7

Cálculo de la Variante 2: Seleccionador Modular

Concepto	Peso (W_i)	Calculo	Resultado
Movilidad	35%	(+1 · 0,35)	0,35
Espacio	25%	(+1 · 0,25)	0,25
Eficiencia	15%	(0 · 0,15)	0,00
Seguridad	15%	(+1 · 0,15)	0,15
Mantenimiento	10%	(+1 · 0,10)	0,10
Puntaje Total	100%	Suma Total	+0,85

Fuente. Elaboración propia (2026)

$$\therefore [(+1 \cdot 0,35) + (+1 \cdot 0,25) + (0 \cdot 0,15) + (+1 \cdot 0,15) + (+1 \cdot 0,10)]$$

$$\therefore (0,35 + 0,25 + 0,00 + 0,15 + 0,10)$$

$$\textbf{Resultado Variante 2} = +0,85$$

La diferencia de 1,40 puntos favorece la arquitectura modular bajo los criterios y ponderaciones de la matriz. La comparación orienta la selección del concepto; su desempeño operacional requiere verificación posterior.

3.3 Ingeniería de Detalle del Seleccionador para Plantas Cementeras

Tras la validación del concepto por medio de una matriz de decisión, se procede a la base de diseño inicial del proyecto o también denominada *embodiment desing*. Como lo plantea Pahl et al. (2007) [16], esta etapa es crucial para definir la disposición definitiva de los componentes y las formas geométricas de las piezas, consolidando que el sistema modular sea capaz de gestionar la carga crítica de 2500 Kg sin comprometer la estabilidad del conjunto

3.3.1 Módulo N°1: Tolva de Recepción

3.3.1.1 Cálculo de Capacidad y Carga de Diseño de medios de molienda

La tolva ha sido proyectada para trabajar en operaciones de molienda continua, lo que implica una recepción discontinua de material con alta energía de impacto. Para el diseño compacto que se propone, se define una capacidad volumétrica de $0,5 \text{ m}^3$. Conforme con los criterios de Budynas y Nisbett (2021) [17], el cálculo de la masa de diseño (M_d) se debe de integrar un factor de servicio el cual contemple las sollicitaciones dinámicas durante la descarga inicial (ver Ecuación 3– 2)

(Ecuación 3-2)

$$M_d = V_{Tolva} \cdot \rho_{ap} \cdot f_s$$

- M_d : Masa de Diseño de la Tolva (kg)
- V_{Tolva} : Volumen de Tolva (m^3)
- ρ_{ap} : Densidad Aparente del Material (kg/m^3)
- f_s : Factor de Seguridad por Impacto (Adimensional)

Considerando una densidad aparente de $4.800 \text{ kg}/\text{m}^3$ para los medios de molienda y un factor de seguridad por impacto f_s de 1,2 que se recomienda para estructuras de soporte de maquinaria pesada [17], el cálculo quedaría así:

Ecuación 3-3

$$M_d = 0,5 \text{ m}^3 \cdot 4.800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,2 = 2.880 \text{ kg}$$

La masa de diseño resultante es de 2,88 t. Este valor sirve de entrada para dimensionar la estructura de soporte y debe distinguirse de la capacidad nominal y de la masa propia del equipo.

3.3.1.2 Geometría para el Flujo de Masas y Ángulos de Inclinación

Para resolver el diseño compacto de la tolva, esta exige que la geometría elimine el riesgo de obstrucciones como el “puenteo” o bridging. Con el fin de asegurar el flujo de masa donde todo el material se mueva de forma uniforme, se han aplicado los principios de Jenike (1964) [18], que establece que la inclinación de las paredes debe de superar el Ángulo de fricción interna del acero en contacto con clinker

Se adopta preliminarmente una inclinación de 15° respecto de la horizontal y un ángulo de reposo estimado de 15° . La igualdad entre ambos valores no demuestra un flujo libre de obstrucciones. La geometría deberá contrastarse con las propiedades de fricción del material y con pruebas de flujo antes de la fabricación industrial.

3.3.1.3 Especificaciones de Materiales y Componentes del Módulo N°1

Con las solicitaciones de la carga (2.880 kg) y la geometría de flujo, se procede a la selección tentativa de materiales bajo los estándares internacionales de resistencia y durabilidad. La elección de los materiales es fundamental debido a que se tiene que garantizar que el sistema sea compacto, pero estructuralmente robusto frente al entorno abrasivo y hostil como lo es la molienda de este tipo. De acuerdo con Budynas y Nisbett (2021) [17], la selección de los aceros estructurales y el desgaste se deben de equilibrar con la tenacidad necesaria con el fin de absorber los impactos con la dureza requerida para prolongar la vida útil del equipo

Los componentes del Módulo N°1 se regirán por las siguientes especificaciones técnicas

- **Estructura de Soporte (Chasis):** Se proyecta el uso de perfiles ASTM A36 (Vigas HEB-100). este material es el estándar industrial por su excelente soldabilidad y relación **resistencia – costo**, lo que permite una base rígida para el carácter móvil del equipo [17]
- **Cuerpo de la Tolva:** Fabricado en Plancha de acero ASTM A36 de espesor 6 mm dimensionada para soportar la presión lateral del material estático y dinámico
- **Revestimiento Anti-desgaste (Liners/Blindaje):** Con el fin de mitigar el desgaste por la caída de las bolas de acero, se instalarán placas de sacrificio en el acero de alta dureza AR500 (Abrasion Resistant) pudiendo ser 400HB o 500HB. Estas placas se fijarán por medio de pernos cabeza avellanada con el fin de asegurar una superficie de flujo lisa y facilitar el reemplazo preventivo

Uniones y conexiones

- **Soldadura:** Las uniones fijas serán por medio de soldadura de arco manual (SMAW) con electrodo de tipo E7018 (AWS A5.1), lo que garantizaría una unión de alta ductilidad capaz de resistir las vibraciones del entorno industrial
- **Pernos Estructurales:** Para asegurar la modularidad y factibilidad de transporte, las uniones principales entre tolva y chasis se realizarán por medio de pernería **Hexagonal de alta resistencia Grado 8.8 (ISO 898 – 1)**. El uso de este grado del acero evita la deformación de los hilos frente a las cargas y permite el desarme del módulo sin una pérdida de integridad técnica

3.3.2 Módulo N°2: Tambor Clasificador Multietapa (Tambor)

El segundo módulo corresponde al tambor clasificador, con un diámetro propuesto de 0,8 m y tres etapas de separación. La configuración incorpora canaletas bilaterales de descarga. El diámetro y la trayectoria del material son variables relevantes para el cribado (Wills y Finch, 2015) [22].

3.3.2.1 Zonificación de Clasificación y velocidad Crítica

El tambor se divide en tres secciones de tamizado o clasificación longitudinal, cada una con una apertura diferente con el fin de separar: (1) chatarra y finos, (2) Bolas para reutilización inmediata y (3) Bolas de recarga nominal. Con el diámetro propuesto ($D = 0,8\text{ m}$), la velocidad crítica (n_c) se calcula por medio de la ecuación 3-4

Ecuación 3-4

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{0,8}} \approx 47,3\text{ RPM}$$

Donde:

- n_c : Velocidad crítica teórica de rotación del tambor clasificador [RPM]
- 0,8: Diámetro interior del diseño del tambor (D) [m]
- 47,3: Velocidad límite angular donde la fuerza centrífuga iguala a la gravedad [RPM]

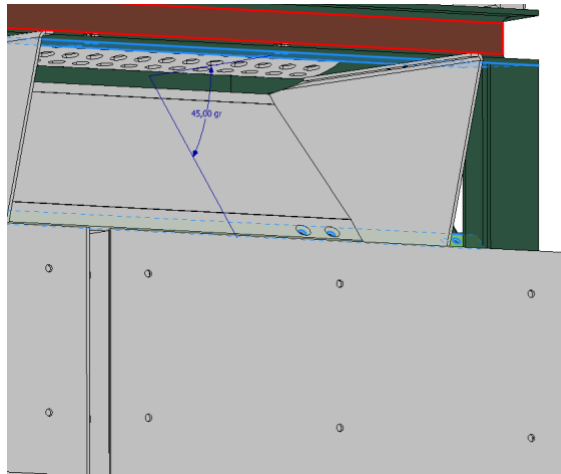
Se adopta una velocidad de 25 RPM, equivalente al 52,9% de la velocidad crítica calculada. Este valor supera el intervalo orientativo de 30% a 45% citado en el marco teórico; su selección deberá confirmarse mediante pruebas de flujo y clasificación. No se dispone de resultados cuantitativos que demuestren un régimen óptimo.

3.3.2.2 Sistema de Descarga Bilateral de Alto Flujo

Con el fin de cumplir correctamente el proceso de clasificación de bolas de acero, además de los requerimientos de logística de la planta, el módulo integra un sistema de canaletas de descarga bifurcadas. Cada una de las tres etapas de clasificación cuenta con una tolva o canaleta receptora interna que divide el flujo hacia ambos costados del equipo (sumados 6 puntos de salida total)

Geometría: Ángulo de caída de 45° para asegurar el rodamiento de las esferas hacia la descarga bilateral para la logística cementera sin la necesidad de terceros o asistencia mecánica adicional (Gupta & Yan) [23]

Figura 3-2
Ángulo de Caída para Chute



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3 Especificaciones de Materiales y Componentes de Módulo N°2

Las selecciones de materiales para el módulo N°2 tambor clasificación es crítica, dado que este componente es crítico y está sometido a impactos constantes y fricción severa. Los materiales buscan el equilibrio resistencia mecánica con la atenuación de ruido y el control de emisiones de polvo, siempre cumpliendo con los estándares de diseño de maquinaria pesada. De acuerdo con Gupta y Yan (2016) [23], en los sistemas de tamizado rotatorio para los medios de molienda, la tenacidad del material es el factor determinante para evitar la falla por fatiga estructural

Los componentes técnicos del Módulo N°2 se definirán bajo las siguientes especificaciones

- **Cuerpo del Tambor:** Fabricado en cilindro de acero ASTM A36 con refuerzos (costillas) longitudinales y circulares con el fin de dar forma y evitar deflexiones bajo carga completa
- **Mallas de Clasificación (Etapa 1,2, y 3):** Se especifican mallas de Acero al Manganeso o acero de alto carbono con tratamiento térmico de endurecimiento. La apertura de esta malla será cortada por láser con el fin de garantizar precisión granulométrica
 - ***Nota técnica:** Para dar cumplimiento al D.S. 594 sobre el control de ruido, se evaluará el uso de mallas con un recubrimiento de **Poliuretano de alta densidad**, el cual reduce el impacto sonoro del metal contra metal [23]*
- **Eje Central y Soportes:** El eje principal será de acero AISI 1045 rectificado, el cual destaca por su excelente resistencia a la torsión y fatiga. El apoyo se realizará

por medio de chumaceras de pie, con rodamientos de rodillos a rótula con el fin de absorber desalineaciones dinámicas

- **Sistema de Descarga Bilateral (Chutes Internos):** Fabricados en acero ASTM A36 de 6 mm, con revestimiento interno de placas de sacrificio en acero AR400 (HB400) o AR500 (HB500) (8 mm) en las zonas de impacto directo con las bolas
- **Carcasa de Confinamiento (encapsulamiento) [TENTATIVO]:** Estructura ligera de planchas de acero ASTM A36 de 2 mm, sellada con perfiles de elastómeros para contener el polvo del clinker y reducir la polución ambiental
- **Transmisión y Seguridad:**
 - **Cadena de Transmisión:** Cadena de rodillos norma ANSI de alta resistencia con guardacadena de seguridad
 - **Pintura:** Recubrimiento con esquema epóxico de alto espesor (color de seguridad industrial), resistente a la corrosión y abrasión ambiental

3.3.3 Sistema de Transporte (Cinta Transportadora Chevron) —

Especificaciones de Referencia

Alcance del modelado: La cinta transportadora se considera una interfaz de alimentación y no integra el modelado CAD ni el prototipo físico de la tolva (módulo 1) y el tambor (módulo 2). Las especificaciones siguientes constituyen referencias para su futura integración.

3.3.3.1 *Determinación del Ángulo de Inclinación y Selección de Banda*

La definición geométrica de la cinta de transportadora empieza por asegurar que el área de la superficie de transporte sea suficiente para contener y trasladar los medios de molienda durante la operación. Para garantizar un transporte seguro, estable y evitar desbordamiento de la cinta lateral de los elementos de molienda, se aplica el criterio de ancho de banda mínimo (B_{min}) que se basa en el tamaño de la carga o “lump size”. Siguiendo con lo establecido por Mott et al. (2018) [19], para materiales rodantes, el ancho de la banda debe de ser al menos cuatro veces el diámetro de la bola de mayor tamaño (d_{max}) = 100 mm, según la relacion técnica

Ecuación 3-5

$$B_{min} = 4 \cdot d_{max}$$

Donde:

- B_{min} : Ancho de la banda mínimo requerido para la estabilidad de la carga (mm)
- d_{max} : Diámetro máximo del medio de molienda o tamaño de carga (mm)

Bajo el criterio que se expresa, se determina que el ancho mínimo debe de ser de al menos 400 mm , seleccionándose comercialmente una banda de 500 mm para proveer un margen de seguridad antes posibles oscilaciones de la carga. Se considera de emplear una configuración de Cinta Plana con Faldones Laterales (Tipo Cajón). El sistema confina la carga en el centro de la banda mediante guías de acero A36 y guardas de goma, simplificando la fabricación modular y reduciendo el ancho total del equipo en comparación con los arreglos en artesa convencionales

Con la sección transversal definida, se optimiza el espacio por medio de una inclinación operativa de 15°. Para validar que la carga de 2500 kg no se deslice, se aplica

el criterio de equilibrio de las fuerzas que se basa en el coeficiente de fricción estática (μ) entre el acero y el caucho, según el CEMA [20]

Ecuación 3-6

$$\delta_{max} \leq \arctan(\mu) \cdot f_s$$

Donde:

- δ_{max} : *Ángulo de inclinación máximo permitido por fricción*
- μ : *Coeficiente de fricción estática entre la bola y la banda (estimada en 0,4)*
- f_s : *Factor de seguridad por presencia de finos y vibración (se asume 0,8)*

Dado que el límite teórico para las bandas es de $17,4^\circ$, se justifica la selección de una banda nervada de tipo Chevron con perfiles de 15 mm . Esta traba mecánica permite, según Bridgestone (2020) [21], elevar los elementos esféricos en pendientes de hasta 22° , garantizando que el módulo de transporte sea compacto y funcional

3.3.3.2 *Dimensionamiento del Accionamiento y Potencia*

Para dar el accionamiento, se calcula la potencia necesaria para el sistema de la cinta de transporte (P_e) considerando la altura neta de la elevación ($1,2\text{ m}$) y el torque requerido para superar la inercia de la carga estipulada ($2,4\text{ toneladas}$) en el arranque

Ecuación 3-7

$$P_e = \frac{(C \cdot L \cdot F + Q \cdot H)}{270}$$

Donde:

- C : *Capacidad de transporte requerida (ton/h)*
- L : *Longitud horizontal del transportador (m)*
- F : *Factor de fricción de los componentes rotativos (0,02 – 0,03)*
- Q : *Carga máxima sobre la cinta (2400 kg)*

- *H: Altura de elevación (1,2 m)*

Se conserva la demanda referencial de 1,45 HP y la selección propuesta de un motorreductor de 2,0 HP. Para verificar el cálculo deben precisarse los valores de C y L, la formulación y las unidades de la ecuación. Además, aplicar un factor de servicio de 1,5 a 1,45 HP exige 2,175 HP; por tanto, la selección de 2,0 HP requiere revisión [20].

3.3.3.3 Especificaciones de Materiales y Componentes del Sistema de transporte de referencia

La materialidad de la cinta transportadora responde a la abrasividad del clinker y el peso que se concentra por los Cuerpo moledores de acero:

- **Banda Transportadora:** Caucho sintético reforzado con tela de poliéster/nylon (EP 250/2). El recubrimiento superior será de Grado M (resistencia a la abrasión $< 120 \text{ mm}^3$) para mitigar el desgaste erosivo [21]
- **Perfiles Chevron:** Nervaduras integradas de caucho de 15 mm de altura, vulcanizadas a la banda base
- **Bastidor y Faldones:** Estructura de acero ASTM A36, protegida con pintura epóxica para ambientes industriales
- **Rodillos de Apoyo:** Polietileno de alta densidad (HDPE) o acero al carbono con rodamientos sellados, seleccionados según tabla por su coeficiente de fricción y mínima necesidad de lubricación

3.4 Fundamentos y Metodología de Simulación Computacional

El diseño de estructuras metálicas que son sometidas a cargas de impacto y el propio peso requiere de una comprobación analítica cual debe de garantizar que ningún

componente sufra deformaciones plásticas permanente o fallas catastróficas durante las operaciones. El análisis por Elementos finitos (FEA) es un método computacional el cual divide la geometría compleja en una malla discreta de elementos que se conectan por nodos, lo que permite resolver ecuaciones algebraicas de equilibrio estático con el fin de predecir el comportamiento físico bajo carga (Logan,2016)

3.4.1 Criterios de Falla Estática (Tensiones Equivalentes de Von Mises)

Los materiales de características dúctiles que se emplean en la fabricación de maquinaria industrial tienen un criterio de falla predominante correspondiente a la Teoría de la Energía de Distorsión Maxima, ampliamente conocida también como Criterio de Von Mises (Budynas & Nisbett, 2021). El modelo matemático establece que la fluencia comienza cuando la energía de distorsión por unidad de volumen es igual a la energía de distorsión en el punto de fluencia de un ensayo de tracción simple. De igual forma el esfuerzo equivalente de Von Mises(σ_{VM}) calcula una tensión escalar a partir del estado triaxial de esfuerzos:

Ecuación 3-8

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Fuente: Criterio de Von Mises, Budynas y Nisbett (2021) [17].

Con el fin de asegurar la integridad estructural, el esfuerzo equivalente máximo debe de ser inferior al esfuerzo admisible (σ_{adm}), el cual se determina dividiendo el límite de fluencia del material (S_y) por el Factor de Seguridad (FS) normativo (Budynas & Nisbett, 2021)

3.4.2 Propiedades Mecánicas del Acero Estructural A36 en Vigas HEB-100

El bastidor utiliza perfiles HEB-100 de acero estructural ASTM A36; las zonas de desgaste incorporan placas AR500. La Tabla 3-8 reúne las propiedades adoptadas. Estas deben contrastarse con las especificaciones del material efectivamente adquirido.

Tabla 3-8

Comparativa de propiedades mecánicas entre el acero estructural ASTM A36 y el acero antiabrasivo AR500.

Propiedad Mecánica	Acero Estructural ASTM-A36	Acero Antiabrasión AR500
Componente aplicado	Vigas HEB-100 y Placas de sacrificio Perfilería, estructurales	
Límite de Fluencia (S_y)	248,2 MPa	1.250,0 MPa
Resistencia a la Tracción (S_u)	400,0 MPa	1.550,0 MPa
Módulo de Elasticidad (E)	200,0 GPa	210,0 GPa
Dureza Típica	119 – 140 HB	470 – 530 HB
Norma de Referencia	AISC 360-16	Estándar SSAB (Hardox)

Fuente: Datos extraídos de especificaciones de materiales metalúrgicos industriales y bases de datos CAD (Autodesk, 2023)

3.5 Configuración del Modelo Numérico en Autodesk Inventor

La simulación computacional se configuró en el entorno de Autodesk Inventor Profesional Stress Analysis sobre el ensamble unificado del chasis

Figura 3-3

Configuración de cargas verticales y restricciones de empotramiento 3D



Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Simplificación Geométrica y Definición de Contactos rígidos

Con el propósito de la optimización de cálculo y evitar singularidades en el enmallado del análisis, se omitieron elementos externos no estructurales (pernería menor, biseles de soldadura y tapas acústicas). Se asignó una condición de contacto rígido en todas las interfases de unión entre perfiles HEB-100 y perfiles, simulando el comportamiento monolítico de las uniones soldadas bajo estándar AWS.D1.1 (American Welding Society, 2020)

3.5.2 Condición de Borde y Sistema de Cargas

Se restringieron las cuatro caras de anclaje basal y se distribuyó la carga vertical sobre los perfiles del chasis. El texto de origen consigna 29.400 N, mientras otro apartado

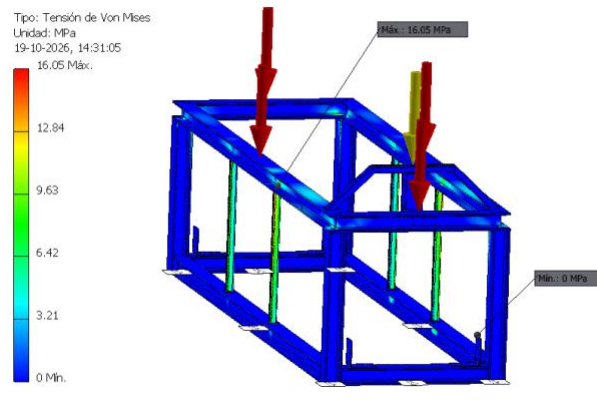
indica 30.000 N. La equivalencia declarada con 2,8 t y un factor de impacto de 1,2 tampoco coincide: $2.800 \times 9,81 \times 1,2 = 32.961,6$ N. Se conserva 29.400 N como carga declarada de este caso, pendiente de confirmar en el archivo de simulación; no se atribuye a ella una equivalencia de masa no demostrada.

3.6 Resultados de Simulaciones Estáticas FEA/FEM

3.6.1 Distribución de Tensiones de Von Mises

Figura 3-4

Distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en el chasis



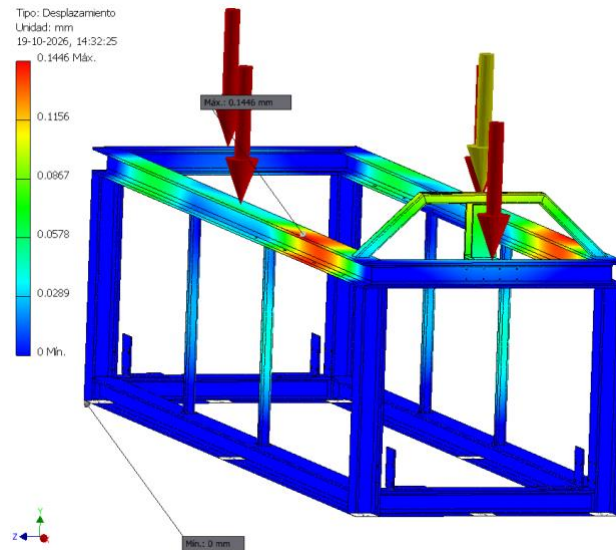
Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-4 muestra una tensión máxima de 16,05 MPa. Comparada con el límite de fluencia adoptado de 248,2 MPa, esta tensión se mantiene en el régimen elástico para el caso simulado. El resultado no se extiende a cargas, contactos o restricciones distintos de los modelados.

3.6.2 Deformación y Campo de Desplazamientos Elásticos

Figura 3-5

Campo de desplazamientos elásticos bajo carga vertical máxima



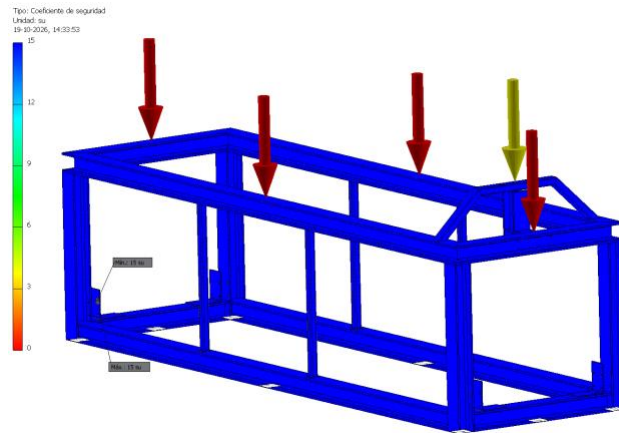
Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-5 muestra un desplazamiento máximo de 0,1444 mm. Con la luz declarada de 1.307 mm y el criterio de comparación $L/500$, el límite calculado es 2,614 mm. La deflexión obtenida es inferior a ese valor. Deben confirmarse la luz efectiva y la aplicabilidad del criterio antes de la fabricación.

3.6.3 Evaluación del Factor de Seguridad Estructural

Figura 3-6

Mapa del Factor de Seguridad (FS) global de la estructura



Fuente: Elaboración propia, simulación estática en Autodesk Inventor (2026).

La relación entre el límite de fluencia y la tensión máxima es $248,2/16,05 = 15,46$.

La Figura 3-6 representa el factor de seguridad en una escala cuyo máximo es 15; por ello, el valor mostrado no debe confundirse con un cociente exacto de 15. El resultado supera el criterio de diseño $FS \geq 2,0$ para el caso estático evaluado.

3.7 Síntesis y Verificación de Criterios Admisibles (AISC 360/NCh427)

La Tabla 3-9 reúne los valores respaldados por las figuras de simulación y los criterios de comparación adoptados. La interpretación queda condicionada a confirmar la carga aplicada y los parámetros del modelo; no constituye una certificación del equipo en operación.

Tabla 3-9
Verificación de Criterios de Aceptación Estructural

Parámetro Evaluado	Valor Simulación (FEA)	Criterio de comparación	Condición
Tensión de Von Mises	16,05 MPa	124,1 MPa ($S_y/2$)	Cumple el caso analizado
Deflexión Máxima	0,1444 mm	2,614 mm ($L/500$)	Cumple el caso analizado
Factor de Seguridad	15,46 (calculado)	$\geq 2,00$ (adimensional)	Cumple el caso analizado

Fuente: Elaboración propia a partir de las Figuras 3-4 a 3-6. Cálculos de comparación:

$S_y/2$, $L/500$ y S_y/σ_{VM} .

CAPÍTULO IV: PLANIMETRÍA, CUBICACIÓN Y COSTO DEL PROYECTO

4.-Este capítulo reúne la planimetría, la cubicación y la estimación referencial de insumos derivados del modelo de diseño. La estimación de \$11.112.610 CLP permite dimensionar los recursos materiales y apoyar futuras decisiones de fabricación. Complementa la ingeniería de detalle del segundo objetivo específico; no se presenta como un objetivo adicional cumplido ni demuestra viabilidad económica. No constituye el costo total del equipo: faltan la valorización de procesos de maestranza y la confirmación del alcance de compra, las masas y los precios.

4.1 Expediente de Planimetría Normalizada (Norma ISO 7200)

4.1.1 Estructura Jerárquica del Árbol de Producto (BOM) y Codificación Alfanumérica

Para garantizar el control documental y facilitar la logística de ensamble, se creó una Estructura de Desglose de Producto (BOM – Bill of Materials). El sistema adopta una codificación alfanumérica jerárquica para asegurar la trazabilidad técnica desde el conjunto mayor hasta las piezas individuales

Figura 4-1
Paneles de visualización de datos analíticos de distribución de masa total, materialidad y concentración por módulo



Figura: Distribución paramétrica extraída del modelo de ensamble CAD. Fuente: Elaboración propia a partir del modelo paramétrico 3D (2026)

Tabla 4-1
Listado maestro de materiales (BOM) y codificación alfanumérica por módulos.

Desglose Detallado de Materiales (BOM)						
MÓDULO	CÓDIGO (PLANO)	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPESOR	MASA TOTAL (KG)
M1: Tolva	SMB-M1-01-FB-01.1	Placa Lateral	2	ASTM A36	12 mm	128.95
M1: Tolva	SMB-M1-01-FB-01.2	Placa Frontal	1	ASTM A36	12 mm	59.27
M1: Tolva	SMB-M1-01-FB-01.3	Placa Menor	8	ASTM A36	6 mm	25.03
M2: Liners	SMB-M2-01-FB-01.1	Liner Lateral 1	5	ASTM A36	6 mm	94.70
M2: Liners	SMB-M2-01-FB-01.5	Liner Lateral 1 comp.	1	ASTM A36	6 mm	14.25
M2: Liners	SMB-M2-01-FB-01.7	Liner Lateral 3	1	ASTM A36	6 mm	0.99
M3: Soporte	SMB-M3-01-FB-01.1	Perfil PO 75×75×4	2	ASTM A36	4 mm	17.60
M3: Soporte	SMB-M3-01-FB-01.2	Placa Base	4	ASTM A36	10 mm	9.97
M3: Soporte	SMB-M3-SE-02-FB-02.1	Marco PO 100×100×4	2	ASTM A36	4 mm	8.24
M3: Soporte	SBM-M3-03-SE-03-FB-03.1	Cartelas Refuerzo	4	ASTM A36	10 mm	2.11
M4: Chutes Int.	SMB-M4-SE-1.0-FB-01.2	Panel Chute 1	2	AR500	10 mm	7.87
M4: Chutes Int.	SMB-M4-SE-2.0-FB-02.1	Panel Chute 2	2	AR500	10 mm	5.54
M4: Chutes Int.	SMB-M4-SE-04-FB-01.1	Panel Chute 3	2	AR500	10 mm	4.77
M5: Tambor	SMB-M5-SE-01-FB-01.1	Carcasa Cilíndrica	1	ASTM A36	6 mm	30.86
M5: Tambor	SMB-M5-SE-01-FB-01.2	Malla Cribado	1	ASTM A36	6 mm	28.85
M5: Tambor	SMB-M5-SE-01-FB-01.4	Anillo Rodadura	1	AR500	12 mm	58.17
M5: Tambor	SMB-M5-SE-01-FB-01.5	Eje Central	1	AISI 1045	-	6.42
M5: Tambor	SMB-M5-SE-01-FB-01.6	Bridas y Tapas	5	ASTM A36	12 mm	48.47
M6: Sop. Tambor	SMB-M6-SE-01-FB-01.1	Viga HEB 100	2	ASTM A36	-	62.83
M6: Sop. Tambor	SMB-M6-SE-01-FB-01.5	Viga Sec. HEB 100	2	ASTM A36	-	61.95
M9: Cajones	SMB-M9-SE-01-FB-01.3	Panel Cajón	12	AR500	8 mm	119.89
M9: Cajones	SMB-M9-SE-01-FB-01.7	Perfil 100×50×3	12	ASTM A36	3 mm	39.60
M10/11: Chutes	CH-M10-FB-01.1	Placa Frontal 1	12	AR500	8 mm	403.28
M10/11: Chutes	CH-M10-FB-01.2	Placa Lateral 1	12	ASTM A36	8 mm	299.03
M10/11: Chutes	CH-M11-FB-01.3	Perfil 100×50×3	12	ASTM A36	3 mm	49.92
M10/11: Chutes	CH-M11-FB-01.6	Perfil 50×30×3	18	ASTM A36	3 mm	22.84

Fuente: Elaboración propia (2026). Desglose jerárquico de los 127 componentes principales a fabricar.

4.1.2 Planos de Ensamble General y Despiece de Componentes

El expediente se describe como un conjunto de 49 láminas de ensamble y despiece, con vistas, cotas de instalación y detalles de soldadura. Los cajetines identifican escala, material y masa obtenida del modelo CAD. El anexo incorpora la planimetría general y el enlace al expediente; la integridad de las 49 láminas requiere comprobar el conjunto externo.

4.2 Estimación de Costos con Referencia al Enfoque ABC

El enfoque de costos basado en actividades (ABC) permite separar los materiales de los procesos de fabricación (Horngren et al., 2012). En este trabajo se utiliza como estructura para una estimación preliminar. Al no disponerse de horas y tarifas suficientes para valorizar todos los procesos, no se considera completado un presupuesto ABC de fabricación.

4.2.1 Separación de Insumos Brutos de Acero vs. Procesos de Maestranza

Para relacionar el diseño con sus necesidades de fabricación se distinguen dos componentes: insumos de acero y procesos de maestranza. Solo los primeros cuentan con una estimación monetaria presentada; los segundos requieren datos adicionales.

- Costo de Material Directo: Adquisición de planchas y perfiles. Se declara una provisión de 15% para pérdidas por corte en planchas; su aplicación y su conciliación con los formatos comerciales deben confirmarse.

- Costo de Manufactura: Horas-hombre (HH) de armado y soldadura y horas-máquina (HM) de corte, cilindrado y mecanizado. No se dispone de horas ni tarifas suficientes para calcular este componente.

Ecuación 4-1

$$C_{Total} = \sum (M_{Bruto} \cdot P_{Unitario} \cdot 1,15) + \sum (HH \cdot T_{HH} + HM \cdot T_{HM})$$

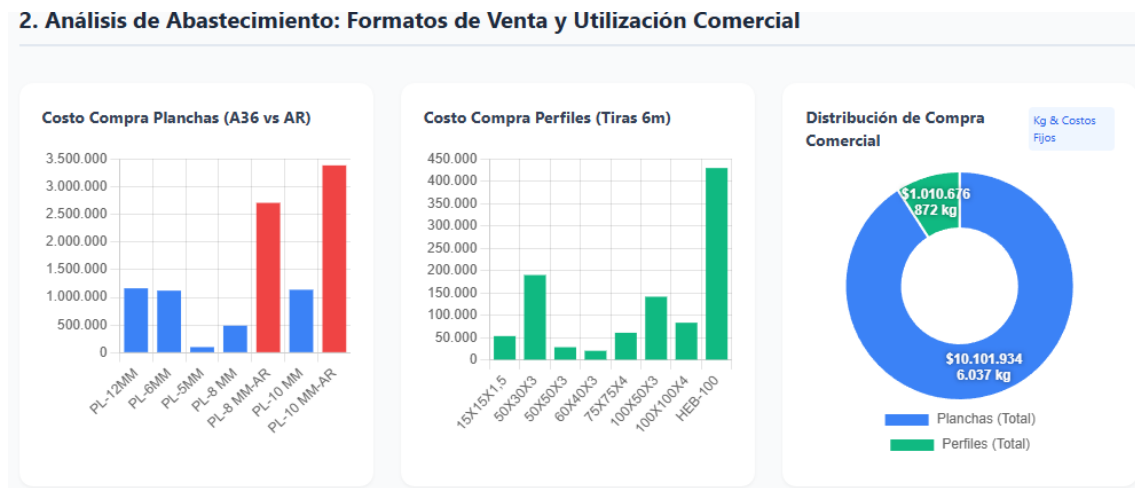
Fuente: Esquema de estimación elaborado para el diseño, con referencia al enfoque de Horngren et al. (2012).

Donde CTotal es el costo estimado de fabricación; MBruto, pese a su nombre, representa en esta expresión la masa neta antes de la provisión por corte; PUnitario es el precio por unidad de masa; THH y THM son las tarifas por hora. El factor 1,15 debe aplicarse solo a los materiales sujetos a dicha provisión, sin volver a aplicarlo a masas o precios de compra que ya la incluyan. La ecuación es una estructura de cálculo y no un costo total calculado.

4.3 Estimación Directa de Insumos y Materiales

Figura 4-2

Distribución porcentual en masa (kg) y costo (\$) de la compra comercial de acero bruto.



Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Cubicación y Desglose de Insumos Brutos

El panel del modelo informa una masa total de 2.949,72 kg. El desglose textual de 1.994,58 kg de planchas y 679,50 kg de perfiles suma 2.674,08 kg, con participaciones de 74,59% y 25,41% sobre ese subtotal, no sobre el total del modelo. La diferencia de 275,64 kg requiere conciliación con la lista de materiales. La Figura 4-2 informa además masas de compra de 6.037 kg y 872 kg; estas no coinciden con las masas de la Tabla 4-2 y requieren confirmación.

La estimación referencial de insumos asciende a \$11.112.610 CLP, suma de las tres categorías de la Figura 4-3. El documento expresa también 269,79 UF al 20-10-2026; esta equivalencia se conserva como referencia declarada, pendiente de confirmar el valor

de la UF utilizado. Deben verificarse las cotizaciones y la inclusión de impuestos, transporte y pérdidas por corte.

4.3.2 Distribución de Costos por Familia de Acero (AR500, ASTM-A36, HEB-100)

Figura 4-3

Variación de la inversión entre aceros de calidad estructural y aceros de calidad antiabrasiva.



Fuente: Elaboración propia

Los costos por familia se concilian con la Figura 4-3. La Tabla 4-2 utiliza los mismos importes; sus masas de compra se conservan como datos pendientes de conciliación y no se emplean para recalcular precios unitarios.

- Planchas antidesgaste (AR500): \$6.088.852 CLP, equivalentes al 54,8% de la estimación de insumos. Corresponden a los revestimientos y componentes expuestos a abrasión. Su contribución a la vida útil requiere verificación en servicio.

- Planchas estructurales (ASTM A36): \$4.013.082 CLP, equivalentes al 36,1% de la estimación. Se destinan a los componentes estructurales de chapa del diseño.
- Perfiles estructurales: \$1.010.676 CLP, equivalentes al 9,1% de la estimación.
Comprenden los elementos portantes, incluidos los perfiles HEB-100.

Tabla 4-2

Distribución de masa y presupuesto de inversión bruta (CAPEX) en insumos de acero por categoría de suministro.

Categoría de Suministro	Masa de compra declarada (kg)*	Inversión Estimada (CLP)	Participación del Presupuesto
Planchas antiabrasivas (AR500)	689,45 kg	\$6.088.852	54,8%
Planchas estructurales (A36)	2.044,24 kg	\$4.013.082	36,1%
Perfiles y Vigas	302,43 kg	\$1.010.676	9,1%
Total de insumos estimado	3.036,12 kg	\$11.112.610	100,0%

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo y los paneles del proyecto (2026). Costos conciliados con la Figura 4-3. *Masas pendientes de confirmación: las filas suman 3.036,12 kg; la masa neta declarada de 2.640,10 kg multiplicada por 1,15 da 3.036,115 kg. Esta coincidencia aritmética no resuelve las diferencias con las Figuras 4-1 y 4-2 ni verifica la aplicación de la pérdida por corte únicamente a las planchas.

CAPÍTULO V: PROPUESTA DE VALOR, PROTOTIPO FUNCIONAL Y CONCLUSIONES

5.-Este capítulo describe la fabricación del prototipo a escala y relaciona los resultados con los objetivos de diseño. Los beneficios operacionales y de seguridad se presentan como efectos esperados, sujetos a verificación en planta.

5.1 Validación de Cinemática Mediante Prototipo Físico a Escala (Impresión 3D)

5.1.1 Fabricación aditiva y Componentes Normalizados

Para examinar la geometría y la cinemática sin fabricar el equipo a escala industrial, se describe un prototipo reducido construido mediante impresión 3D e integración de componentes normalizados. Esta prueba de concepto no reproduce por sí sola las cargas, el desgaste ni la capacidad de procesamiento del equipo real.

Para las geometrías complejas y de alta exigencia volumétrica – tales como la tolva de recepción, las placas perforadas del tambor clasificador y los chutes de descarga – se empleó el proceso de impresión 3D bajo la tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM). Como material de aporte se empleó ácido poliláctico (PLA). Por su parte, la integración estructural y el movimiento de rotación se hibridaron incorporando elementos comerciales normalizados, tales como rodamientos de precisión, pernería normalizada. Esta combinación permitió replicar lo más fielmente a las tolerancias mecánicas y los ajustes de diseño establecidos en el modelo paramétrico de Autodesk Inventor

5.1.2 Verificación Experimental de Flujo pasivo y Rotación de tambor

La descripción de fabricación no incluye un protocolo, número de ensayos, diámetros de prueba ni resultados de separación. Estos antecedentes deben incorporarse para respaldar

la verificación experimental del flujo y de la rotación; no se asignan eficiencias ni capacidades no medidas.

5.2 Evaluación Operacional y Propuesta de Valor

5.2.1 Análisis Comparativo “Antes vs Después”

En la industria cementera tradicional, la gestión de los medios de molienda desgastados constituye una tarea altamente reactiva. El escenario “Antes” de la implementación del seleccionador se caracteriza por detenciones prolongadas de planta con el fin de realizar extracciones manuales de chatarra, acumulación de ovoides que obstruyen las rejillas divisorias, pérdida severa de transferencia de energía y un consumo específico de energía (KWh/ton) elevado debido al trabajo inútil de la carga deformada sobre el clinker

La incorporación del seleccionador busca mejorar la gestión de los medios de molienda. Los efectos siguientes constituyen beneficios esperados y requieren comparación con datos operacionales antes y después de su implementación:

- Continuidad operacional: La clasificación puede apoyar un programa de recuperación de medios de molienda y reducir las intervenciones manuales; el cambio en disponibilidad debe medirse en planta.
- Optimización energética: La separación de medios deformados busca facilitar una carga de molienda adecuada. El ahorro de energía requiere mediciones de consumo específico bajo condiciones comparables.
- **Modularidad y Mantenibilidad:** La arquitectura de los seleccionadores y las rejillas perimetrales desmontables por pernos de alta resistencia (Grado 8.8)

permite la sustitución de tramos desgastados o alternar diámetros de corte en tiempos de mantención reducidos, sin la necesidad de dismantelar la estructura principal soportada por vigas HEB-100

5.2.2 Protección del Operador y Criterios del D.S. N° 594

Desde la perspectiva de la seguridad industrial y la salud ocupacional, la propuesta de valor del proyecto destaca por la aplicación rigurosa de la jerarquía de controles (NIOSH,2023). La manipulación manual de las bolas de acero y la chatarra históricamente exponía crónicamente a los operarios a riesgos críticos, tales como golpes por objetos, atrapamiento en partes móviles, sobreesfuerzos musculoesqueléticos y trastornos derivados de la exposición a ruido estable e impacto por encima de los límites permisibles que se establece en el artículo 74 del Decreto Supremo N°594 (Ministerio de Salud, 1999)

El confinamiento, las cortinas de goma y la transferencia controlada se proponen para reducir la dispersión de polvo y el ruido de impacto. Su eficacia y el cumplimiento de las exigencias sanitarias requieren mediciones y evaluación de resguardos en operación. El diseño no permite afirmar una eliminación completa de los riesgos.

5.3 Conclusiones Generales del Proyecto de Título

5.3.1 Cumplimiento de Objetivos Específicos

El balance de los tres objetivos específicos se presenta a continuación, distinguiendo la documentación de diseño disponible de las verificaciones pendientes.

Determinación de requerimientos: La lista de exigencias y las variables de entrada del capítulo III organizan las capacidades, los diámetros y las condiciones de diseño. Su aplicación industrial requiere confirmar los parámetros de la planta, sin atribuir a las referencias bibliográficas el carácter de mediciones propias.

1. Ingeniería de detalle y modelo tridimensional: Se desarrollaron la geometría y la documentación de la tolva y el tambor. Los capítulos III y IV reúnen cálculos, materiales, modelo CAD, cubicación y planimetría. La cinta se limita a especificaciones de referencia, según el alcance declarado.
2. Validación estructural y prototipo: Las imágenes del análisis estático muestran 16,05 MPa de tensión máxima y 0,1444 mm de desplazamiento. Con el límite de fluencia adoptado, el factor de seguridad calculado es 15,46. Estos resultados requieren confirmar la carga y las condiciones del archivo de simulación. Se describe la fabricación del prototipo, pero no se aportan registros cuantitativos de clasificación; por ello, la validación cinemática no se considera demostrada de forma completa.

5.3.2 Aportes Técnicos y Condiciones para la Implementación

El aporte consiste en una propuesta modular de clasificación documentada mediante modelo CAD, análisis estático y planimetría. La estimación de insumos de acero es de \$11.112.610 CLP, coherente con el capítulo IV y la Figura 4-3. Este monto complementa el diseño y no acredita viabilidad económica: faltan costos de fabricación completos, operación y mantenimiento, así como beneficios medidos.

La implementación requiere conciliar las masas y las cotizaciones, confirmar el caso de carga y completar pruebas de flujo, clasificación y seguridad. Sin estos antecedentes no corresponde afirmar un retorno de inversión ni una reducción cuantificada del costo por tonelada de cemento.

Bibliografía

1. Bhatti, J. I., MacFadden, F. M., y Kerkhoff, B. (2004). *Innovations in Portland cement manufacturing*. Portland Cement Association.
2. Cleary, P. W. (2001). Charge dynamics and power draw in tumbling mills. *Minerals Engineering*, 14(9), 1061-1080.
3. Wills, B. A., y Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8ª ed.). Butterworth-Heinemann.
4. Napier-Munn, T. (2019). *Statistical methods for mineral engineers: How to design and analyse experiments and optimise process performance*. JKMRM, University of Queensland.
5. SERNAGEOMIN. (2023). *Anuario de la minería de Chile 2023: Sección estadísticas de seguridad*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
6. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2023). *Hierarchy of controls*. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/>
7. Ministerio de Salud. (1999). *Decreto Supremo 594: Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
8. Gupta, A., y Yan, D. S. (2016). *Mineral processing design and operations: An introduction* (2ª ed.). Elsevier.
9. Budynas, R. G., y Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's mechanical engineering design* (11ª ed.). McGraw-Hill Education.

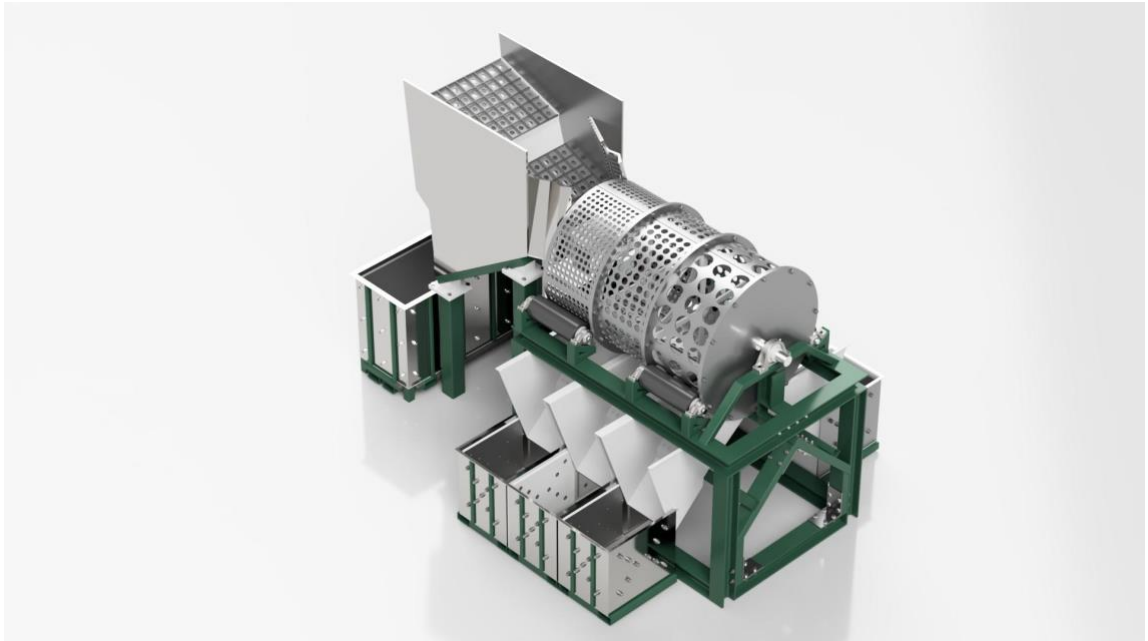
10. Logan, D. L. (2016). *A first course in the finite element method* (6^a ed.). Cengage Learning.
11. **Verein Deutscher Ingenieure (VDI). (1993).** *VDI 2221: Systematic approach to the development and design of technical systems and products*. Beuth Verlag
12. **Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., y Grote, K.-H. (2007).** *Engineering design: A systematic approach* (3^a ed.). Springer.
13. **Munari, B. (1981).** *¿Cómo nacen los objetos?: Apuntes para una metodología de diseño*. Editorial Gustavo Gili.
14. **Moly-Cop. (2023).** *Technical specifications for grinding media: Steel balls for cement industry*. Moly-Cop Tools
15. **Hernández-Sampieri, R., y Mendoza, C. (2014).** *Metodología de la investigación* (6^a ed.). McGraw-Hill
16. Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering design: A systematic approach* (3.^a ed.). Springer-Verlag.
17. Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2021). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (11.^a ed.). McGraw-Hill Education.
18. Jenike, A. W. (1964). *Storage and flow of solids*. University of Utah Engineering Experiment Station.
19. Mott, R. L., Vavrek, E. M., y Wang, J. L. (2018). *Machine elements in mechanical design* (6.^a ed.). Pearson Education.
20. Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA). (2014). *Belt conveyors for bulk materials: A guide to design and application engineering practice* (7.^a ed.). CEMA

21. Bridgestone Corporation. (2020). *Conveyor belt design manual*. Bridgestone Industrial
22. **Wills, B. A., y Finch, J. A. (2015).** *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8.^a ed.). Butterworth-Heinemann.
23. **Gupta, A., y Yan, D. S. (2016).** *Mineral processing design and operations: An introduction* (2.^a ed.). Elsevier Science
24. **Horngren, C. T., Datar, S. M., & Rajan, M. V. (2012).** Contabilidad de costos: Un enfoque gerencial (14.^a ed.). Pearson Educación.
25. **International Organization for Standardization (ISO). (1989).** **ISO 2768-1:1989.** General tolerances — Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications.
26. **International Organization for Standardization (ISO). (2004).** **ISO 7200:2004.** Technical product documentation — Data fields in title blocks and document headers.

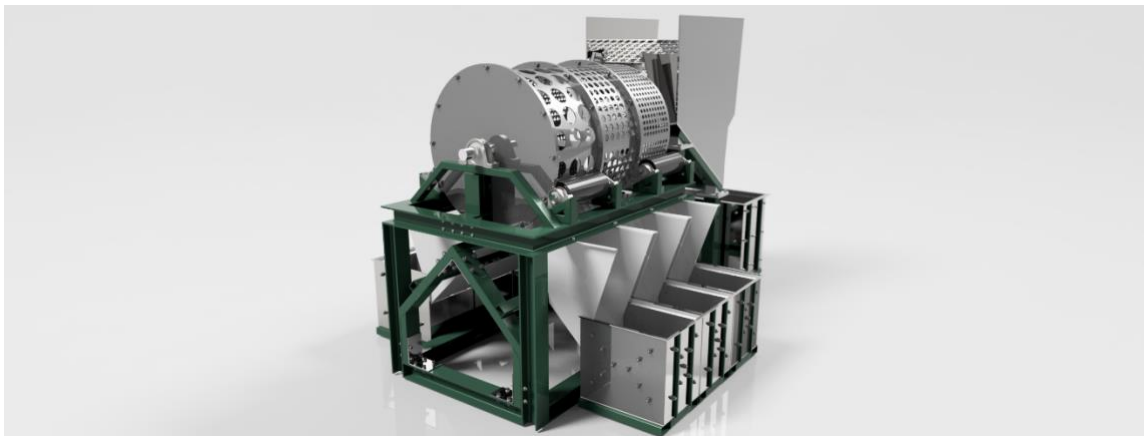
Referencias por completar: las menciones a Autodesk (2023), American Welding Society (2020), AISC (2016) e Instituto Nacional de Normalización (2003) requieren identificación bibliográfica completa y comprobación de las ediciones utilizadas. La referencia Hernández-Sampieri y Mendoza (2014) y las ediciones 2015/2016 de Wills y Finch también requieren confirmación. Las citas textuales sin página se han mantenido como referencias cuya localización debe verificarse.

ANEXOS

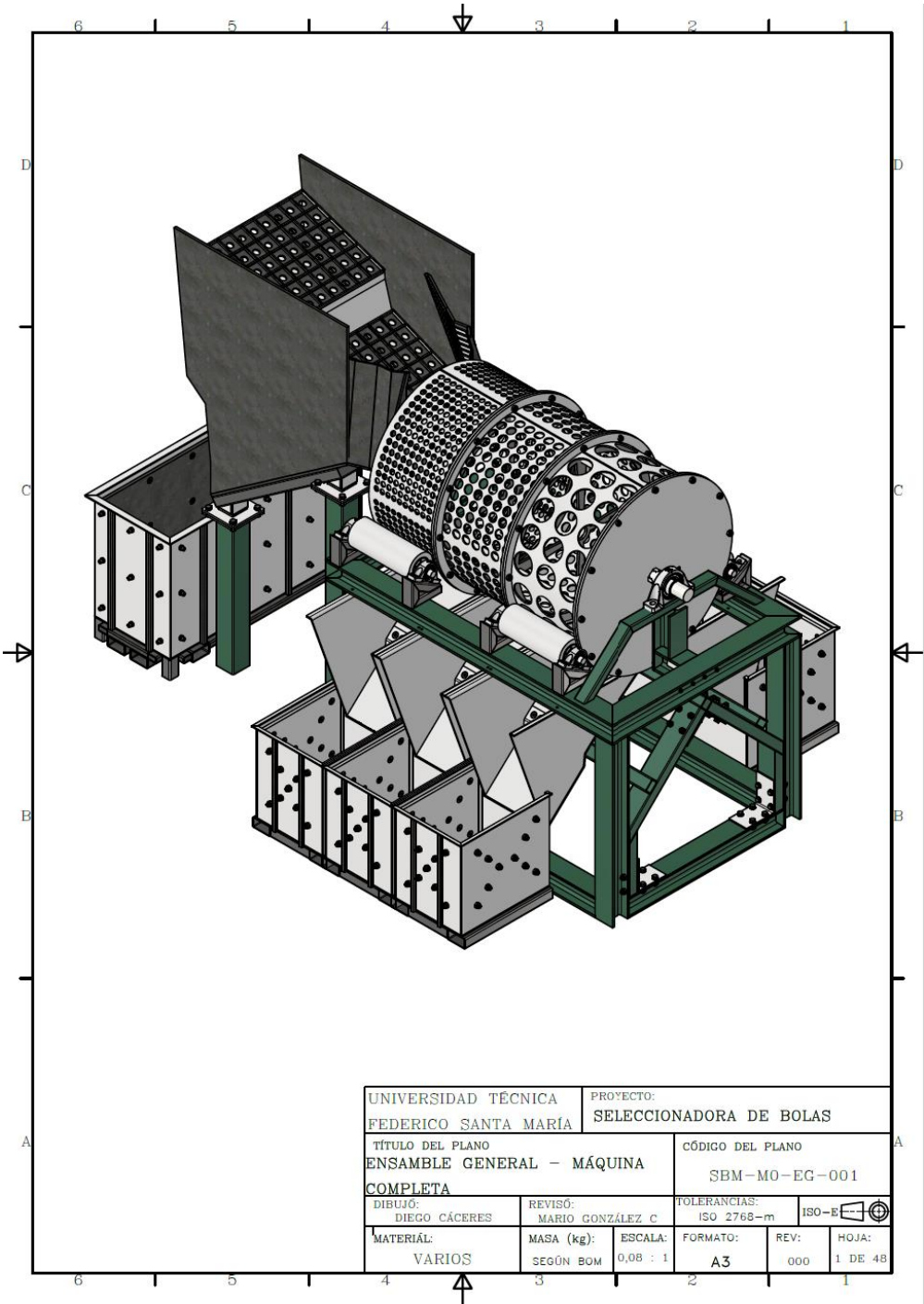
Anexo A Prototipo Digital Vista Isométrica



Anexo B Prototipo Digital Vista Frontal



ANEXOS



Anexo D Enlace a la Página General

<https://pagina-general.tiiny.site>