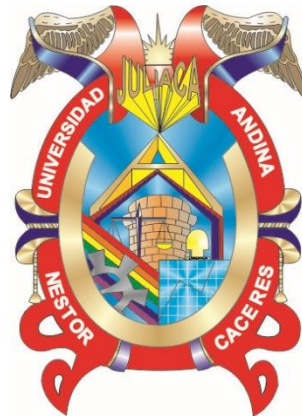




**UNIVERSIDAD ANDINA**  
**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**



**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA  
MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN  
MINERA LA RINCONADA DISTRITO  
DE ANANEA, PUNO 2024**

TESIS PRESENTADA POR:

**Bach. RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE**

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

JULIACA - PERÚ

2025



**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA  
MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN  
MINERA LA RINCONADA DISTRITO  
DE ANANEA, PUNO 2024**

TESIS PRESENTADA POR:

**Bach. RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE

:   
Dr. BENJAMÍN CHUQUIMAMANI QUINTO

PRIMER MIEMBRO

:   
Mgrt. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS

SEGUNDO MIEMBRO

:   
Ing. CARLOS ALEJANDRO CÁCERES VARGAS

ASESOR DE TESIS

:   
Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

: TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA – P18



**UNIVERSIDAD ANDINA**  
**"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"**

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 249-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 06 de mayo del 2025

**VISTO:** El expediente N° 2025-CU- 1577, presentado por el señor (a) **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE** solicitando **CAMBIO DE ASESOR DE INVESTIGACIÓN**, el Proveído del Director de la Unidad de Investigación de la FICP, y la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 1345-2024-D-UI-FICP-UANCV** Aprobación de la **PROPUESTA DE INVESTITIGACIÓN**, para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

**CONSIDERANDO:**

Que, el señor (a): **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE** ha presentado cambio de asesor de tesis del tema investigación Titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, el Director de la Unidad de Investigación de la FICP a tomado conocimiento que el asesor **MSc. MARIO ALEJANDRO RAMOS HERRERA** no tiene vínculo laboral en la facultad de ingenierías y ciencias puras y existiendo la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 1345-2024-D-UI-FICP-UANCV** Aprobación de la **PROPUESTA DE INVESTITIGACIÓN**.

Estando, a la solicitud del ejecutante y en cumplimiento al reglamento al Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención Grados Académicos y Títulos Profesionales; el director de la Unidad de Investigación **Dr. Fritz Willy Mamani Apaza** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió el proveído favorable del cambio de asesor de investigación del tema titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable del Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, el **CAMBIO DE ASESOR DE INVESTIGACION**, designado al señor (a): **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, con el Tema Titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**, **se le asigna como:**

**ASESOR:** Ing. **ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN**

**ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER** como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a la) docente Ing. **ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN**.

**ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CS. PURAS

Dr. **OSCAR V. VIAMONTE CALLA**  
DECANO (e)  
CIP. 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS  
Dr. **Fritz Willy Mamani Apaza**  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo 2025  
Interesado (a)



# NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

## RESOLUCIÓN DECANAL N° 1661-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 02 de diciembre del 2025

**VISTO:** El expediente N° 2025 - CU - 12310 presentado por el (la) Bachiller: **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN**.

**CONSIDERANDO:**

Que, el (la) Bach. **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulada: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024**, la misma que pertenece a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO. APROBAR**, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- \* **Presidente** : Dr. BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
- \* **1er Miembro** : Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
- \* **2do Miembro** : Ing. CARLOS ALEJANDRO CACERES VARGAS

**ARTICULO SEGUNDO. - RECONOCER** como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON**.

**ARTICULO TERCERO. - APROBAR**, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de él (la) bachiller: **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE**; del informe final de la investigación (tesis) titulada: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**. de acuerdo al siguiente detalle:

- \* **FECHA** : jueves 11 de diciembre del 2025
- \* **HORA** : 10:00 horas
- \* **LUGAR** : Aula 204 - EPIME

**ARTÍCULO CUARTO. DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

cc.  
Archivo  
interesado (a)



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA  
DECANO (e)  
CIP. 32730



Dr. Cesar G. Camargo Najjar  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 961-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 02 de setiembre del 2025

**VISTO:** El expediente N° 2025-CU - 4493 por el señor (a): **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el **PROVEIDO - N° 426 - 2025-UI-FICP-UANCV/J**, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACION (BORRADOR DE TESIS)** formato N° 026 - 2025 del integrante del comité de investigación **EPIME** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

**CONSIDERANDO:**

Que, el señor (a): **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE**, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Mgr. Salvador Teodoro Valdivia Cardenas** de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 026 - 2025 **aprobando** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024**, Correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, presentado por el señor (a): **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**, con el Tema Titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**, en virtud a los considerandos expuestos.

**ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR** como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a) la), Ing. **ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON**.

**ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

*[Signature]*  
.....  
CAROL V. VILLALBA  
DECANO (e)  
CIP. 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

*[Signature]*  
.....  
Dr. Pío Pío Mamani Apaza  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo  
interesado (a)



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 1345-2024-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 22 de octubre del 2024

**VISTO:** El expediente N° 2024-CU-14090, presentado el señor (a) **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el PROVEIDO - N° 1156 -2024-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 030 -2024 del integrante del comité de investigación **EPIME** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

**CONSIDERANDO:**

Que, el señor (a): **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE** ha presentado su propuesta de investigación Titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Dr. Benjamin Chuquimamani Quinto** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 030 -2024- aprobando la propuesta de investigación titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): **RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**, con el Tema Titulado: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

**ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER** como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **M.Sc. MARIO ALEJANDRO RAMOS HERRERA**.

**ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Dr. MILTON QUISPE HUANCA  
DECANO  
CIP. 47790



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS  
Dr. Efraín Parillo Sosa  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo 2024  
Interesado (a)



# TESIS UANCV

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN  
"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

## INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1

[repositorio.uta.edu.ec](http://repositorio.uta.edu.ec)

Fuente de Internet

3%

2

Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez

Trabajo del estudiante

2%

3

[hdl.handle.net](http://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

1%

4

[repositorio.utc.edu.ec](http://repositorio.utc.edu.ec)

Fuente de Internet

<1%

5

Submitted to Universiti Tenaga Nasional

Trabajo del estudiante

<1%

6

[repositorio.uancv.edu.pe](http://repositorio.uancv.edu.pe)

Fuente de Internet

<1%

7

M Alonso. "Modelling a Twin Tube Cavitating Shock Absorber", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 01/01/2006

Publicación

<1%

8

Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador

Trabajo del estudiante

<1%

9

[scielo.sld.cu](http://scielo.sld.cu)

Fuente de Internet

<1%

10

[dspace.esPOCH.edu.ec](http://dspace.esPOCH.edu.ec)

Fuente de Internet

<1%

11

[repositorio.continental.edu.pe](http://repositorio.continental.edu.pe)

Fuente de Internet

<1%

12

[repositorio.undac.edu.pe](http://repositorio.undac.edu.pe)


<1%



### Metadatos Complementarios UANCV

<b>DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024</b>	
<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	77047146
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0009-0002-7315-4142">https://orcid.org/0009-0002-7315-4142</a>
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02064066
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0001-8065-6533">https://orcid.org/0000-0001-8065-6533</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02406088
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02383061
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	CARLOS ALEJANDRO CACERES VARGAS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	29591476
<b>Datos de investigación</b>	



Línea de investigación	Tecnología e Ingeniería Mecánica – P18
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	<p>Edificio: Distrito de Ananea</p> <p>País: Perú Departamento: Puno Provincia: San Antonio de Putina Distrito: Ananea</p> <p>Latitud: -14.63248116750 Longitud: - 69.4464998807 <a href="https://maps.app.goo.gl/TuYkVS6uznXuxR928">https://maps.app.goo.gl/TuYkVS6uznXuxR928</a></p> 
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Octubre 2024 – Diciembre 2025
URL de disciplinas OCDE - Librería	<p><b>Ingeniería Mecánica</b> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.00">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.00</a></p> <p><b>Ingeniería Mecánica</b> <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01</a></p>



UNIVERSIDAD ANDINA "NESTOR CERRES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PLURIAS

*César G. Camargo Najar*  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo RONALD ALEX LOPEZ CHOQUE, identificado con DNI Nro. 77047146 en mi condición de egresado de:

- [X] Escuela Profesional
[ ] Programa de Segunda Especialidad,
[ ] Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la [X] Tesis o [ ] Trabajo de Investigación, [ ] Trabajo Académico denominada:

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024

Asesorado por: Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 19 de Diciembre del 2025

Firma del Asesor (obligatoria)

Firma del Estudiante (obligatoria)



Huella



## DEDICATORIA

A la memoria de mi mamá, cuyo modelo de integridad, dedicación y cariño sigue siendo una orientación sobre mi vida personal y laboral. A mi padre, por su constante respaldo, por inculcarme el valor del trabajo y por acompañarme con firmeza en cada etapa de este camino. Asimismo, expreso mi profundo agradecimiento a los docentes que, con dedicación y compromiso, contribuyeron de manera decisiva a mi formación.

*Ronald Alex Lopez Choque*



## AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a Dios por brindarme salud y fortaleza para culminar esta etapa académica; a mi familia, por su apoyo constante, comprensión y motivación incondicional durante todo el desarrollo de la presente tesis; a mi asesor, por su orientación técnica y académica, así como por los conocimientos impartidos que contribuyeron a mi formación profesional; y a todas las personas que, de manera directa o indirecta, colaboraron en la realización de este trabajo de investigación.

*Ronald Alex Lopez Choque*



## INDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
INDICE GENERAL.....	v
INDICE DE TABLAS.....	x
INDICE DE FIGURAS .....	xi
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	xv

### CAPÍTULO I

#### ASPECTOS GENERALES

1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Formulación del Problema.....	2
1.2.1. Problema General .....	2
1.2.2. Problemas Específicos.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Objetivos de la Investigación. ....	3
1.4.1. Objetivo General. ....	3
1.4.2. Objetivos Específicos.....	3
1.5. Hipótesis. ....	4
1.5.1. Hipótesis General.....	4
1.5.2. Hipótesis Especificas. ....	4
1.6. Variables .....	4
1.6. Operacionalización de Variables.....	5



**CAPÍTULO II**

**FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

**2.1. Antecedentes..... 6**

    2.1.1. Antecedentes Internacionales..... 6

        En su estudio ..... 6

    2.1.2. Antecedentes Nacionales. .... 7

    2.1.3. Antecedentes Locales..... 8

**2.2. Marco Teórico..... 9**

    2.2.1. Molienda. .... 9

    2.2.2. velocidad de Giro. .... 11

    2.2.3. La Velocidad Crítica..... 13

    2.2.4. Volumen de Carga..... 14

    2.2.5. Potencia..... 15

    2.2.6. Ley de Bond..... 16

    2.2.7. Esfuerzo según el criterio de Von Mises..... 17

    2.2.8 Diseño de Fatiga..... 17

    2.2.9 Selección del Motor Eléctrico..... 18

    2.2.10 Cálculo de la Potencia del Motor. .... 20

    2.2.11. Molino de Bolas o Balines..... 20

    2.2.12. Componentes de un Molino de Bolas: ..... 22

    2.2.13. Tipos de Molino de Bolas..... 23

**2.4. Modelado CAD de Sistemas Mecánicos..... 28**

    2.4.1. Ventajas del Modelado CAD en Ingeniería Mecánica..... 28

    2.4.2. Proceso General de Modelado CAD..... 29

    2.4.3. Método de elementos finitos ..... 30



**2.5. Normativas Técnicas Aplicables al Diseño del Molino de Bolas ..... 30**

2.5.1. Normas de Diseño Mecánico y Transmisión..... 30

2.5.2. Normas sobre Materiales Metálicos..... 31

2.5.3. Normas Nacionales Peruanas ..... 31

**2.6. Marco Conceptual. .... 31**

2.6.1. Diseño de Tambor ..... 31

2.6.2. Volumen del Cilindro..... 32

2.6.3. Dimensionamiento de las Tapas del Tambor..... 32

2.6.4. Peso de los Cuerpos Moledores..... 33

2.6.5. Grado de Llenado en húmedo ..... 33

2.6.6. Potencia Teórica Necesaria ..... 34

2.6.7. Potencia Real Necesaria ..... 35

2.6.8. Cálculo de la Velocidad Crítica ..... 35

2.6.9. Relación de Transmisión ..... 35

2.6.10. Procedimiento AGMA para el Cálculo de Engranajes..... 36

2.6.11. Esfuerzo Equivalente de Von Mises ..... 40

2.6.12. Límite de Fatiga ..... 41

2.6.13. Factor de Seguridad del Eje ..... 42

**CAPÍTULO III**

**METODOLOGÍA**

**3.1. Tipo de Investigación..... 43**

**3.2. Nivel de Investigación..... 43**

**3.3. Ámbito de la Investigación ..... 44**

**3.4. Técnicas e Instrumentos ..... 44**

**3.5. Población y Muestra..... 45**



3.6. Recogida de Datos ..... 46

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación..... 48

4.2. Análisis de Resultados. .... 48

4.2.1. Datos de Entrada. .... 48

4.2.1 Cálculo del Volumen del Tambor. .... 49

4.2.2. Cálculo del tamaño óptimo de la bola. .... 51

4.2.3. Cálculo del Número de Bolas del Molino. .... 52

4.2.4. Cálculo de Potencia del Molino..... 53

4.2.5. Velocidad crítica del molino. .... 54

4.2.6. Cálculo de Transmisión. .... 54

4.2.7. Cálculo por Fatiga Superficial..... 56

4.2.8. Determinación por Resistencia a la Fatiga. .... 61

4.2.9. Dimensionamiento del eje principal ..... 64

4.2.10. calculo de la chaveta ..... 65

4.2.11. Calculo y Selección de Rodamientos..... 66

4.3. Modelado de Componentes del Molino de Bolas en SolidWorks. .... 70

4.3.1. Modelado de tambor ..... 70

4.3.2. Modelado Tapa de Molino. .... 71

4.3.3. Modelado de piñón. .... 71

4.3.4. Modelado de Corona. .... 72

4.3.5. Modelado de Rodamientos y Chumacera..... 73

4.3.6. Modelado de Motor Eléctrico. .... 73

4.3.7. Modelado de la Bola de Molienda..... 74



4.3.8. Ensamblaje Final del Molino. ....	74
<b>4.4. Simulación del molino de bolas. ....</b>	<b>75</b>
4.4.1. Análisis estático por gravedad. ....	75
4.4.2. Análisis estático bajo carga de operación (carga interna total) .....	77
4.4.3. Análisis bajo efectos centrífugos. ....	78
4.4.4. Validación Dinámica del Movimiento de la Carga (Simulación DEM) .....	80
<b>4.5. Costos estimados de Fabricación de Molino de Bolas.....</b>	<b>81</b>
4.5.1. Costo de materiales. ....	81
4.5.2. Costos de Mano de Obra.....	83
4.5.3. Costos indirectos .....	84
4.5.4. Inversión Total .....	84
<b>4.6. Comparativa con Molinos Comerciales Fabricados en Perú .....</b>	<b>84</b>
4.6.1. Comparativa Técnica.....	85
4.6.1. Comparativa Económica.....	86
<b>4.7. Recomendación de Plan de Mantenimiento.....</b>	<b>86</b>
4.7.1. Alcance .....	87
4.7.2. Mantenimiento preventivo.....	87
4.7.3. Mantenimiento Correctivo.....	88
4.7.4. Mantenimiento predictivo.....	88
<b>4.8. Discusión de Resultados.....</b>	<b>89</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Operacionalización de variables .....	5
<b>Tabla 2.</b> Clasificamos el sistema de acoplamiento según el tamaño de los molinos.....	12
<b>Tabla 3.</b> Carga del molino.....	15
<b>Tabla 4.</b> Tipos de molienda.....	15
<b>Tabla 5.</b> Ventajas y desventajas de un molino planetario de bolas.....	24
<b>Tabla 6.</b> Ventajas y desventajas de un molino de tambor.....	27
<b>Tabla 7.</b> Ventajas y desventajas de un molino de bolas de alta energía .....	28
<b>Tabla 8</b> Espesor del tambor .....	32
<b>Tabla 9</b> Peso de los elementos que componen el molino de bolas .....	34
<b>Tabla 10.</b> Características geográficas de minera la rinconada .....	44
<b>Tabla 11.</b> Datos de Entrada.....	48
<b>Tabla 12.</b> Resultados de los parámetros del molino de bolas.....	69
<b>Tabla 13</b> Costos estimados de materiales .....	82
<b>Tabla 14</b> costos de fabricación y montaje .....	83
<b>Tabla 15</b> Costos Indirectos .....	84
<b>Tabla 16</b> Inversión Total .....	84
<b>Tabla 17</b> Comparativa técnica .....	85
<b>Tabla 18</b> Comparativa económica .....	86



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Diagrama Esquemático de Molino de Bolas .....	9
<b>Figura 2</b> molino de bolas .....	11
<b>Figura 3</b> Molino de Bolas o Balines .....	21
<b>Figura 4</b> Mecanismo de operación de un Molino de Bolas .....	21
<b>Figura 5</b> Componentes de un molino de bolas .....	22
<b>Figura 6</b> Molino de bolas planetario.....	23
<b>Figura 7</b> Molino Attritor .....	25
<b>Figura 8</b> Molino de bolas de Tambor .....	26
<b>Figura 9</b> Molino de bolas de alta energía .....	27
<b>Figura 10</b> Tabla de factores de sobrecarga.....	38
<b>Figura 11</b> factor dinámico .....	38
<b>Figura 12</b> tabla de factores de distribución de carga .....	39
<b>Figura 13</b> Factor de sobrecarga. ....	56
<b>Figura 14</b> factor dinámico .....	56
<b>Figura 15</b> Factor de distribución de carga .....	57
<b>Figura 16</b> Factor geométrico.....	58
<b>Figura 17</b> coeficiente elástico del material.....	58
<b>Figura 18</b> Factor de vida.....	59
<b>Figura 19</b> Factor de seguridad.....	59
<b>Figura 20</b> condiciones típicas de dureza para piñones y engranajes .....	60
<b>Figura 21</b> esfuerzos permisibles de contacto .....	60
<b>Figura 22</b> esfuerzos permisibles para engranajes .....	61
<b>Figura 23</b> Factor dinámico. ....	62



<b>Figura 24</b> Factor geométrico.....	62
<b>Figura 25</b> Factor de vida.....	63
<b>Figura 26</b> factor de seguridad.....	64
<b>Figura 27</b> Modelado del tambor cilíndrico.....	70
<b>Figura 28</b> Modelado de tapa de molino .....	71
<b>Figura 29</b> Modelado del piñón. ....	72
<b>Figura 30</b> Modelado de corona.....	72
<b>Figura 31</b> Modelado de rodamientos y chumaceras.....	73
<b>Figura 32</b> Modelado de motor eléctrico .....	73
<b>Figura 33</b> Modelado de la bola de molienda.....	74
<b>Figura 34</b> Ensamblaje final del molino de bolas .....	74
<b>Figura 35</b> Simulación de fuerza en Y.....	75
<b>Figura 36</b> Enmallado del molino .....	76
<b>Figura 37</b> Análisis estático por gravedad.....	76
<b>Figura 38</b> Análisis estático bajo carga de operación .....	78
<b>Figura 39</b> Análisis bajo efectos centrífugos .....	79
<b>Figura 40</b> Análisis de trayectoria .....	80
<b>Figura 41</b> Distribución de velocidades traslacionales y zonas de energía cinética .....	81



## RESUMEN

La presente tesis, titulada "diseño y simulación de molino de bolas para mejorar el proceso de molienda en Minera La Rinconada Distrito de Ananea, Puno 2024". En la minera la Rinconada existe mineros informales los que trabajan artesanalmente, lo que provoca un esfuerzo físico y mayor tiempo para obtener el producto, Para abordar este problema, el presente estudio propone realizar un molino de bolas de menor capacidad para economizar costo de la energía eléctrica y optimizar el tiempo. Para cumplir el objetivo se ha optado una cantidad de material a moler, en este caso específico es de 150kg con esta capacidad se determina los parámetros del molino de bolas. Como materiales recolección de datos y procesamiento de cálculo se llegó como resultado: volumen de molino de  $0.21 m^3$  de los cuales las bolas de acero ocupan un 30% del volumen, la velocidad crítica del molino calculada es de 57rpm para mejorar el proceso de molienda se calculó una velocidad inferior a la crítica con un porcentaje de 75% resultando una velocidad optima de 42.8 rpm con una capacidad de 1 tonelada/hora y un procesamiento de material de entrada de  $5000 \mu m$  y salida de  $200 \mu m$  de material molido. Asimismo, el diseño estructural se validó mediante simulación DEM (Elementos Discretos)

**Palabras Claves:** Diseño, molino de bolas, proceso de molienda, minera



## ABSTRACT

The present thesis, entitled “Design and Simulation of a Ball Mill to Improve the Grinding Process at Minera La Rinconada, Ananea District, Puno 2024”, addresses the following problem: In Minera La Rinconada, informal miners work using artisanal methods, which results in significant physical effort and longer processing times to obtain the final product. To address this issue, the present study proposes the design of a small-capacity ball mill aimed at reducing electrical energy costs and optimizing processing time. To achieve the objective, a specific amount of material to be milled was considered—in this case, 150 kg. Based on this capacity, the main parameters of the ball mill were determined. Using data collection and calculation procedures, the following results were obtained: a mill volume of 0.21 m<sup>3</sup>, of which steel balls occupy 30% of the total volume. The critical speed of the mill was calculated to be 57 rpm; to improve the grinding process, an operating speed below the critical speed was selected, using 75% of the critical value, resulting in an optimal speed of 42.8 rpm. The designed mill achieves a capacity of 1 ton/hour, processing material from an input size of 5000 μm to an output size of 200 μm. Furthermore, the structural design was validated through Discrete Element Method (DEM) simulation.

**Keywords:** Design, ball mill, grinding process, mining



## INTRODUCCIÓN

En el sector minero, la molienda es un procedimiento fundamental para conseguir minerales de valor. A fin de minimizar los gastos operativos y elevar la capacidad de producción, es esencial que este proceso sea eficiente.

Un molino de bolas es un equipo ampliamente utilizado en la industria minera, cuya función principal es reducir el tamaño de las partículas minerales mediante un proceso de molienda. En este contexto, el diseño y la simulación del molino desempeñan un papel esencial, ya que permiten optimizar las condiciones operativas y mejorar la eficiencia del proceso de molienda.

La primera fase en el sector minero implica la fragmentación de sólidos grandes a través de molinos primarios o trituradores. Los equipos que se utilizan con mayor frecuencia para esta tarea en la minería son los molinos de martillos y los molinos de mandíbulas.

En la segunda etapa del proceso de molienda, se busca una reducción más precisa del tamaño de las partículas, alcanzando granulometrías intermedias y finas. En esta fase, el equipo de uso más extendido en la industria minera es el molino de bolas, cuyo principio de funcionamiento se basa en el impacto. Durante la rotación del tambor, las bolas de acero se elevan y caen sobre el mineral, generando golpes continuos que fragmentan el material. Este mecanismo permite obtener una molienda uniforme y eficiente.



## CAPÍTULO I

### ASPECTOS GENERALES

#### 1.1. Descripción del problema

La Minera La Rinconada, ubicada a más de 5100 m s. n. m., es considerada una de las zonas de explotación aurífera más altas del mundo. En este entorno extremo predomina una actividad minera de tipo artesanal e informal por el uso de tecnología obsoleta, artesanal y sistemas de molienda ineficientes (como quimbaletes o molinos de bolas y barras de diseño empírico y/o pobremente mantenidos).

En particular, la fase de molienda, que es esencial para la liberación del oro presente en la roca, se lleva a cabo principalmente con molinos artesanales o dispositivos que carecen de un diseño técnico definido. Numerosos de estos molinos tienen problemas con la estructura, no han sido validados mecánicamente, sufren un desgaste temprano, funcionan a una velocidad inapropiada y han dimensionado incorrectamente la carga moledora. Por lo tanto, el procedimiento es ineficaz y lento, consume más energía de la necesaria y genera una



granulometría irregular que tiene un impacto negativo en la recuperación del metal precioso.

En este contexto, se identifica la necesidad de diseñar y validar un molino de bolas con una capacidad más baja pero eficaz, que esté ajustado a las circunstancias reales de La Rinconada. Este molino debe posibilitar la optimización del proceso de molienda, disminuir el esfuerzo físico del trabajador y acortar los tiempos y costos relacionados.

## **1.2. Formulación del Problema.**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cómo contribuirá el diseño y la simulación estructural de un molino de bolas a mejorar el proceso de molienda en la Minera La Rinconada, ubicada en el distrito de Ananea, provincia de Puno, durante el año 2024?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

**P.E.1:** ¿Qué criterios técnicos deben considerarse para el diseño de un molino de bolas eficiente?

**P.E.2:** ¿De qué manera pueden determinarse los parámetros adecuados para el diseño y simulación del molino de bolas?

**P.E.3:** ¿Cómo puede el nuevo diseño mejorar la eficiencia del proceso de molienda en la Minera La Rinconada?

## **1.3. Justificación.**

La eficiencia operativa de un molino de bolas tiende a disminuir con el tiempo debido a diversos factores mecánicos y de operación. Entre los más relevantes se encuentran el desgaste del recubrimiento interno, la selección inadecuada del



tamaño de las bolas, la proporción incorrecta de carga de bolas, el desgaste de los rodamientos, y la velocidad de rotación fuera del rango óptimo.

Ante estas deficiencias, el diseño y simulación de un molino de bolas permite asegurar que el molino opere de manera eficiente y dentro de los límites admisibles del material, reduciendo riesgos de falla y optimizando la reducción granulométrica del mineral. La simulación estructural constituye un respaldo técnico esencial para garantizar la confiabilidad del equipo en condiciones reales de operación.

## **1.4. Objetivos de la Investigación.**

### **1.4.1. Objetivo General.**

Diseñar y simular el molino de bolas con el propósito de mejorar el proceso de molienda en minería la rinconada distrito de Ananea, Puno 2024

### **1.4.2. Objetivos Específicos.**

**O.E.1:** Determinar los criterios técnicos: Establecer las bases teóricas y normativas (Bond, Von Mises, AGMA) necesarias para el dimensionamiento del equipo.

**O.E.2:** Determinar los parámetros de diseño y simulación: Calcular las dimensiones geométricas (diámetro, longitud), potencia del motor y validar el diseño mediante el método de elementos finitos

**O.E.3:** Mejorar el proceso de molienda en minería la rinconada distrito de Ananea, Puno



## 1.5. Hipótesis.

### 1.5.1. Hipótesis General.

Si se diseña y simula un molino de bolas, entonces se garantizará que el equipo opere de manera segura y eficiente, contribuyendo a mejorar el proceso de molienda en minería la rinconada

### 1.5.2. Hipótesis Específicas.

**H.E.1:** Si se determinan los criterios de diseño, entonces se podrán establecer correctamente los parámetros geométricos y operativos del molino de bolas.

**H.E.2:** Si se definen los parámetros de diseño del molino, entonces será posible realizar la simulación estructural mediante el método de elementos finitos.

**H.E.3:** Si se diseña y valida estructuralmente un molino de bolas entonces se contribuirá a mejorar el proceso de molienda minería la rinconada distrito de Ananea, Puno.

## 1.6. Variables

### Variable Independiente

Parámetros de diseño mecánico y simulación estructural del molino de bolas.

### Variable Dependiente

Eficiencia operativa y comportamiento estructural del proceso de molienda



### 1.6. Operacionalización de Variables

Tabla 1.

*Operacionalización de variables*

Tipo de Variable.	VARIABLES.	DIMENSIONES.	INDICADORES.	Tipo.	Unidad de medida	Normas / Referencias
<b>Independiente</b>	Diseño y simulación del molino de bolas	Diseño estructural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro</li> <li>• Longitud</li> <li>• Espesor del molino</li> </ul>	Cuantitativa	m, mm	Normas de diseño mecánico: ASME, ASTM.
		Capacidad de carga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen útil de molienda</li> <li>• Carga de bolas (%)</li> </ul>	Cuantitativa	t/h,%	Bond (1952), ISO 2768
		Velocidad crítica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de la velocidad de operación respecto a la crítica</li> </ul>	Cuantitativa	% / rpm	Ecuaciones de Bond
		Simulación mecánica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Validación de esfuerzos, vibraciones y deformaciones</li> </ul>	Cuantitativa/ Cualitativa		ASTM E8, ASTM E466, ISO 1940-1, ANSYS, EDEM
<b>Dependiente</b>	Mejora del proceso de molienda	Consumo energético y potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia del motor (kW)</li> <li>• Energía por tonelada molida (kWh/t)</li> </ul>	Cuantitativa	kW, kWh/t	Bond (Work Index), ISO 50001
		Rendimiento del molino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material procesado por hora</li> </ul>	Cuantitativa	Ton/h	ISO 9001 (gestión de calidad)
		Calidad del Producto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Granulometría del producto</li> </ul>	Cuantitativa	Micrómetros (µm)	Normas ASTM E11

**Nota:** Elaboración propia



## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1. Antecedentes.

Para respaldar esta tesis, se revisaron estudios anteriores que son pertinentes y están relacionadas con el diseño y la simulación de molino de bolas en contextos académicos y mineros.

##### 2.1.1. Antecedentes Internacionales.

La tesis que desarrollo Cabezas (2017) Su trabajo para obtener polvos metálicos y nuevas aleaciones mecánicas empleando criterios de molienda, como la potencia necesaria y la velocidad crítica y la distribución de cuerpos moledores, son aspectos que resultan fundamentales para el presente estudio.

En su estudio Dueñas y Gonzáles (2016) Universidad de Córdoba, Se enfocó en perfeccionar el procedimiento manual de pulverización. Durante el diseño, se consideraron, durante el diseño, Se tomaron en cuenta aspectos clave como la velocidad crítica, así como el tamaño y peso de las



bolas.

junto con los componentes estructurales para garantizar el funcionamiento del molino.

En la tesis de Quintana (2015) Se implementó una planta de flotación y un molino de bolas en la mina Cerro Negro, se examinaron elementos técnicos y operativos que posibilitaron mejorar el desempeño del molino y su incorporación en el proceso de concentración. Este estudio proporciona datos significativos acerca del comportamiento auténtico de los molinos de bolas en la minería, lo que resulta valioso para respaldar el diseño y simulación de molinos de menor capacidad, tal como se expone en esta tesis.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales.**

Pretel (2022) se enfocó en determinar la capacidad del molino para una producción cercana a 1 tonelada por hora, teniendo en cuenta factores como el deterioro de la carga abrasiva, la velocidad de rotación y la eficiencia energética.

En la tesis de Guerrero (2017) Realizó un sistema automático que mejora la rapidez de un molino de bolas, lo que permite disminuir el consumo de energía sin comprometer la eficacia del proceso de molienda, analizó factores clave como la velocidad crítica, la distribución y el desgaste de las bolas.

En la tesis de Jiménez (2017) diseñó de un molino capaz de procesar 12 toneladas de carbón antracita por hora, con la finalidad de perfeccionar el funcionamiento de una caldera industrial. Su Trabajo abarca el cálculo del



molino, elección de materiales, estudio de la velocidad de rotación y valoración económica.

### **2.1.3. Antecedentes Locales.**

En el estudio de Chambi (2013), diseñó un molino de bolas que pueda producir 3 ton/h, Con el propósito de aumentar la eficacia en la separación de la mena del mineral. Su investigación funcionó como guía para calcular la potencia, elegir el motor y analizar la transmisión.

En la tesis de Pacsi (2023). Se inició la operación de un molino de bolas con chaquetas dedicada a recuperar mercurio y oro a partir de relaves de amalgamación, lo que permitió obtener datos relevantes sobre la eficiencia del sistema de molienda en la minería artesanal.

En la tesis de Hinojosa (2017). se realizó el diseño y simulación de un molino horizontal de 15 toneladas por hora, diseñado para ser utilizado en una planta concentradora. Su trabajo combino el cálculo de dimensiones fundamentado en el método de Bond con el diseño asistido por computadora CAD (Autodesk Inventor 2013), generando un modelo en 3D que simplifica la ejecución de simulaciones dinámicas y el estudio estructural de los componentes del molino.

## 2.2. Marco Teórico.

### 2.2.1. Molienda.

El proceso por el cual se reduce el tamaño de las partículas es la molienda. Para lograrlo, se utilizan métodos mecánicos como el impacto, la compresión, el cizallamiento y el corte Groover (2007).

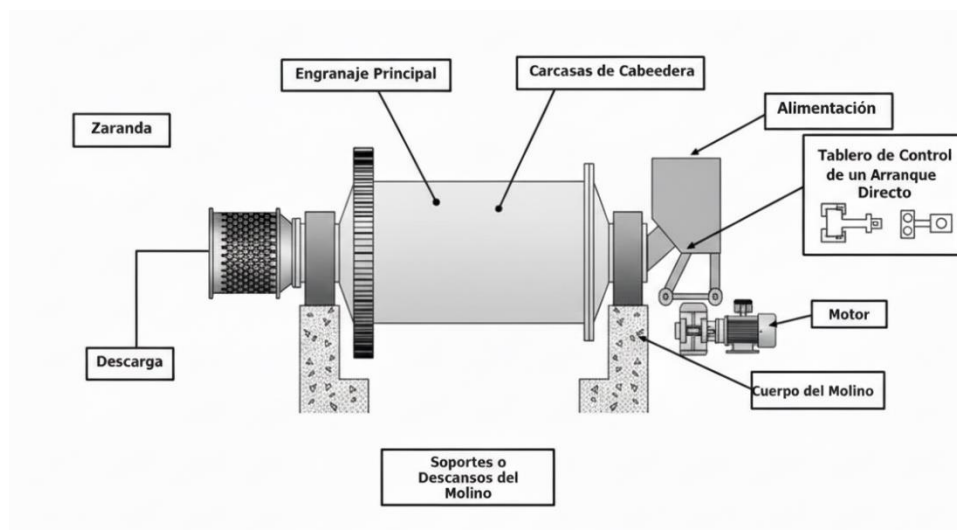
Factores clave en el proceso de molienda:

Los elementos a tener en cuenta en la molienda son:

- Velocidad de giro
- Velocidad crítica
- Volumen de carga
- Tamaño máximo de componentes de molienda
- Potencia

**Figura 1**

*Diagrama Esquemático de Molino de Bolas*



**Nota:** Elaboración propia



## **Alimentación del material:**

La alimentación del material constituye la etapa inicial del proceso de molienda. El material mineral, previamente triturado, es introducido al molino con un tamaño de partícula adecuado para garantizar una operación estable y eficiente. Una alimentación correcta evita sobrecargas, reduce el desgaste de los componentes y mejora la eficiencia energética del proceso de molienda (Wills & Finch, 2016).

## **Movimiento de los cuerpos moledores:**

Durante la operación del molino, el tambor gira alrededor de su eje horizontal, provocando el movimiento de los cuerpos moledores en su interior. Las bolas son elevadas por la fricción con el revestimiento interno y, al superar cierto ángulo, caen por acción de la gravedad, generando impactos sobre el material (Napier-Munn et al., 2005).

## **Componentes mecánicos del molino:**

El molino de bolas está conformado por diversos componentes mecánicos que intervienen directamente en el proceso de molienda. El tambor actúa como contenedor del material y los cuerpos moledores; los revestimientos internos protegen la carcasa y controlan la trayectoria de las bolas; mientras que el sistema de transmisión permite transferir la potencia del motor al tambor (Budynas & Nisbett, 2015).

## **Sistema de accionamiento eléctrico:**

El accionamiento del molino de bolas se realiza mediante un motor eléctrico, el cual suministra la potencia necesaria para la rotación del tambor.

En aplicaciones industriales de baja potencia, es común el uso de sistemas de arranque directo, donde el motor se conecta directamente a la red eléctrica a través de un tablero de control.

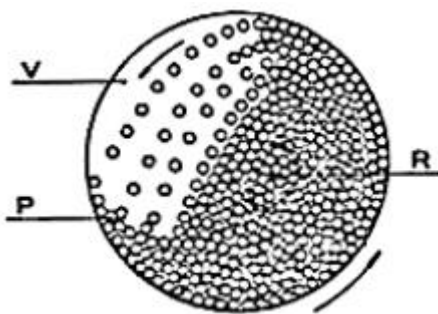
El tablero de arranque directo está compuesto principalmente por un interruptor termomagnético, un contactor, un relé térmico y pulsadores de arranque y paro, cuya función es garantizar la protección y el control básico del motor durante la operación (Chapman, 2011).

### 2.2.2. velocidad de Giro.

La rapidez con la que gira el molino está relacionada con el uso de energía durante su funcionamiento. El movimiento del molino alrededor de su eje, Esto hace que la resistencia a causa de su peso haga que la carga se desplace. se iguale con la potencia del motor. Como resultado, el molino y sus partes se muevan, permitiendo así la trituración del mineral Cabezas (2017).

### Figura 2

*molino de bolas*



**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

El molino se acciona mediante sistemas de acoplamiento que conectan el motor y se adaptan al tamaño del equipo.

**Tabla 2.**

*Clasificamos el sistema de acoplamiento según el tamaño de los molinos.*

<b>Molinos</b>				
<b>Tamaño</b>	Pequeño. (hasta los 50 KW)	Mediano (giro menor a los 20 rpm)	Grande	Muy grande (más de 6 m de diámetro)
<b>Sistema</b>	Correas y Poleas trapezoidal	Motor Reductor, , piñón y corona	Piñón, corona calada sobre molino. motor síncrono.	El molino mismo es el eje, con un motor síncrono de tamaño grande.

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

Los sistemas de acoplamiento pueden incorporar sistemas hidráulicos o reguladores de velocidad para optimizar el control y la transmisión de potencia.

La expresión matemática para calcular la velocidad de giro es la siguiente:

$$Vg(rpm) = \frac{42.3}{\sqrt{D(m)}}$$

**Donde:**

- D: la medida del diámetro interior del molino en (m)
- Vg; es la velocidad a la que gira medida en rpm.



### 2.2.3. La Velocidad Crítica.

La velocidad crítica es un elemento clave para el rendimiento del molino de bolas, Corresponde a la velocidad de rotación en la que los medios molidores, como las bolas de acero, son impulsados por la fuerza centrífuga hasta adherirse a la pared interna del molino, impidiendo que caigan y provoquen la molienda por impacto. Debido a esto, para asegurar una molienda eficiente, El molino debe funcionar a una velocidad más baja que la crítica., idealmente entre el 65% y el 75% de este valor Wills & Napier (2006).

$$n = \frac{42.2}{\sqrt{D}}$$

Donde:

- D: diámetro interno
- n: velocidad critica

### Interacción Entre Variables.

Los cuerpos molidores, el diámetro interno y la velocidad crítica son las variables fundamentales en la molienda, El uso de cuerpos molidores de distintos tamaños afecta directamente la eficiencia y los resultados del proceso cabezas (2017).

- Un diámetro más grande de las bolas de molienda provoca una mayor fractura de partículas grandes a través del impacto o percusión.



- Cuando los cuerpos moledores tienen un diámetro menor, se favorece la molienda de partículas pequeñas debido a que la superficie total de contacto de los elementos moledores es mayor, lo que incrementa el efecto de fricción.
- Para lograr una molienda similar, Si se incrementa la velocidad de rotación o el diámetro del molino, se necesitan bolas molidoras con un diámetro más pequeño.

### **Tamaño de elementos moledores**

El tamaño de los cuerpos de molienda es relevante. Su volumen debe ser al menos tres veces mayor que el de las partículas que se van a moler, para lograr una reducción eficiente del tamaño de partícula y obtener polvos metálicos con las propiedades requeridas.

El tamaño de los cuerpos moledores varía desde diámetros mayores hasta menores, con el objetivo de facilitar la obtención de un polvo metálico más fino y homogéneo. La distribución del tamaño mejora la efectividad y la calidad del resultado final.

#### **2.2.4. Volumen de Carga.**

El volumen de carga afecta de manera directa la eficacia del molino, ya que se refiere a la parte del espacio interior del molino que está ocupada por la carga, los materiales a triturar y los elementos moledores.

El nivel de llenado en el proceso es generalmente alrededor del 45%, considerando tanto los elementos moledores y el material a moler ocupan el volumen interno del molino.

**Tabla 3.***Carga del molino.*

Tipo	% hueco	Peso de los Elementos molidores	Observaciones
Bolas	40	$B = Vm \cdot (0,2 - 0,4) \cdot 0,6 \cdot \delta b$	$Vm =$ es el volumen Kg. $\delta b =$ densidad de las bolas $7,8 \text{ kg/dm}^3$

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)**2.2.5. Potencia.**

Alcanzar un volumen de carga próximo al 50% permite conseguir la máxima potencia. No obstante, el molino suele operar entre el 35% y 40% de su potencia nominal, ya que la curva de potencia es plana en este rango y permite un funcionamiento eficiente sin riesgo de sobrecarga.

**Tipos de molienda:**

La eficacia es más alta al estar secos, pero puede mejorarse si la humedad se aproxima al 1%, puesto que esto disminuye la fricción y la aglomeración, lo cual ayuda a romper las partículas.

**Tabla 4.***Tipos de molienda.*

Molienda húmeda	Molienda seca
Por cada kg de material, la potencia requerida es menor	Se consigue mayor potencia por cada Kg de material.



---

Menor nivel de ruido, un transporte más sencillo y una emisión de polvo más reducida.	El ruido es muy elevado.
Es necesario un consumo más elevado de revestimiento.	Es necesario un consumo más elevado de revestimiento..

---

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

### 2.2.6. Ley de Bond

Según la Ley de Bond, el trabajo requerido para disminuir el tamaño de una partícula sólida está condicionado por la diferencia entre los inversos de las raíces cuadradas del tamaño medio del producto y del alimento.

Desde el punto de vista matemático, se expresa así:

$$N = 10 W_{iB} \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right] m_t$$

Donde:

- $W$ : Energía específica (kWh/t)
- $W_i$ : Índice de Trabajo de Bond (kWh/t)
- $F_{80}/F_{80}$ : Tamaño de alimentación ( $\mu\text{m}$ ) con 80% pasante
- $P_{80}/P_{80}$ : Tamaño del producto ( $\mu\text{m}$ ) con 80% pasante
- $m$ : masa en Toneladas

Para el cálculo de la energía necesaria, esta normativa se utiliza a menudo. en los procesos de molienda en molinos de bolas, lo que facilita la



creación y optimización de equipos para triturar y molienda (López Jimeno et al., 2020).

### 2.2.7. Esfuerzo según el criterio de Von Mises.

Se usa mucho, para analizar esfuerzos en materiales dúctiles sometidos a cargas combinadas. Este principio dicta que el desgaste del material sucede cuando el esfuerzo equivalente llega al límite elástico del material bajo una carga uniaxial.

Este esfuerzo equivalente, también conocido como esfuerzo de distorsión, fusiona las tensiones normales y cortantes en un único valor escalar, facilitando así la evaluación de la resistencia del material frente a estados de carga complicados.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Donde:

$\sigma_{eq}$  = esfuerzo normal debido a la flexión.

$\tau_{xy}$  = esfuerzo cortante debido a torsión.

Este criterio es esencial para el estudio estructural, pues facilita la predicción de la falla debido a la deformación plástica en elementos expuestos a estados de tensión complejos (Callister & Rethwisch, 2018).

### 2.2.8 Diseño de Fatiga

Se trata de dimensionar elementos para que aguanten cargas consecutivas, previniendo fallos de fatiga, Aseguramos que las tensiones



consecutivas permanezcan por debajo del límite de resistencia al agotamiento, el cual se ajusta según el factor de seguridad Beer (2016).

$$S_e = K_b * K_a * K_c * K_d * K_e * K_f * S_e'$$

Donde:

- $S_e$ : límite de resistencia a la fatiga en condiciones ideales.
- $K_b$ : factor que corrige el efecto del tamaño de la pieza.
- $K_a$ : factor asociado al acabado o condición superficial del material.
- $K_d$ : factor que considera la influencia de la temperatura.
- $K_c$ : factor correspondiente al tipo de carga aplicada.
- $K_f$ : factor relacionado con la concentración de esfuerzos.
- $K_e$ : factor de confiabilidad del material o componente.

### 2.2.9 Selección del Motor Eléctrico

Es esencial seleccionar correctamente el motor eléctrico, para asegurar su funcionamiento adecuado, eficiencia energética y longevidad del equipo.

El motor tiene la tarea de brindar el torque y la velocidad requeridos para mover el tambor lleno de bolas y material a triturar, superando tanto la resistencia inercial como la fricción del sistema.

En molinos de bolas de escala pequeña y mediana, tal como sucede en este caso, suele emplearse un motor trifásico de inducción, debido a su



robustez, escaso mantenimiento y a su coste reducido.

Estos motores proporcionan un par apropiado desde el inicio, y su velocidad puede ser modificada mediante la utilización de variadores de frecuencia (VFD) si se necesita un control más exacto.

### **Parámetros Para la Selección del Motor**

Para seleccionar un motor se deben considerar los siguientes parámetros técnicos:

- **Potencia requerida ( $P$ ):** Se calcula en base al trabajo mecánico necesario para la molienda, considerando también las pérdidas del sistema de transmisión.
- **Velocidad Nominal ( $n$ ):** Debe permitir, mediante una relación de reducción (engranajes o poleas), alcanzar la velocidad de trabajo del tambor del molino.
- **Tipo de Carga:** En el caso del molino, es una carga de tipo rotativa con alta inercia.
- **Tipo de Arranque:** Arranque directo, estrella-triángulo o por variador, dependiendo de la potencia y del sistema de control.
- **Condiciones de Trabajo:** Incluyen ambiente (polvo, humedad, temperatura), frecuencia de operación y ciclos de arranque/parada.
- **Factor de Servicio (SF):** Se utiliza un valor mayor a 1.0 si se espera trabajo continuo o condiciones exigentes.



- Tipo de Acoplamiento: Directo o indirecto (mediante poleas, correas, reductor, piñón-corona, etc.).

### 2.2.10 Cálculo de la Potencia del Motor.

La potencia generada por el motor tiene que ser la misma o más alta que la potencia mecánica que el molino necesita, considerando márgenes por pérdidas. Esta potencia se determina con la siguiente expresión:

$$N = 10 W_{iB} \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right] m_t$$

Donde:

$W_{iB}$  = índice de trabajo de bond (KWh/ton)

$P_{80}$  ,  $F_{80}$  = tamaño de entrada y salida del material ( $\mu\text{m}$ )

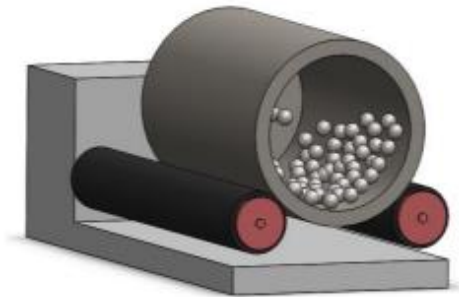
$m_t$  = masa total del sistema en toneladas

### 2.2.11. Molino de Bolas o Balines

El uso de bolas es su principal característica, para moler el material que contiene, el cual presenta un giro en forma cilíndrica. La rotación provoca que las esferas y el material asciendan por las paredes del contenedor, y luego caigan, lo que lleva a la molienda mediante una mezcla de choque y roce, facilitando así la obtención de polvos metálicos.

**Figura 3**

*Molino de Bolas o Balines*



**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

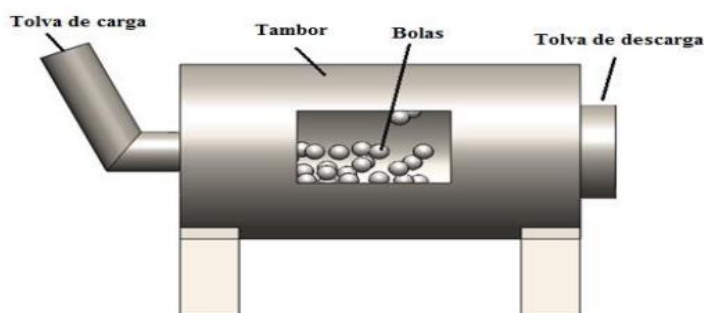
### **Mecanismo de operación de un Molino de Bolas**

Los molinos de bolas funcionan a una velocidad específica que depende de su diámetro. Para el proceso de molienda, se utilizan esferas de acero que tienen diferentes diámetros, durezas y composiciones siderúrgicas.

Cuando comienza a operar, las esferas y el mineral son elevados por las ondulaciones de la chaqueta hasta una altura determinada. Después, caen y chocan entre sí y contra los recubrimientos internos, lo cual se repite múltiples veces. (2017).

**Figura 4**

*Mecanismo de operación de un Molino de Bolas*



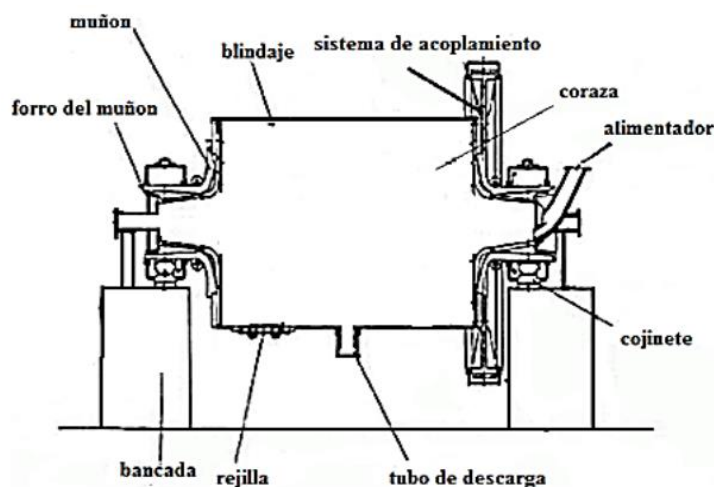
**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

## 2.2.12. Componentes de un Molino de Bolas:

- a). Coraza: estructura externa cilíndrica.
- b). Bancada: soporte para los elementos del molino.
- c). Rodamientos: componentes que facilitan el movimiento giratorio.
- d). Carga y descarga: abertura central para la entrada del material a moler
- e). Muñón: parte del sistema de accionamiento.
- f). Mecanismo de acoplamiento: integración de el piñón y la corona con el molino.
- g). Rejilla: elemento interno de clasificación, presente solo en algunos modelos o instalaciones.
- h). Blindajes: protegen la carcasa, mejoran la molienda y reducen el ruido.

**Figura 5**

*Componentes de un molino de bolas*



**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

### 2.2.13. Tipos de Molino de Bolas

#### Molino Planetario de bolas

Se caracteriza por su alta fuerza gravitacional, que posibilita la obtención de partículas muy finas en poco tiempo, dado que la fuerza centrífuga puede sobrepasar los 40g Alcantara (2008)

Un disco giratorio y un sistema especializado sostienen la fuerza centrífuga que producen los recipientes de molienda al rotar, rota en torno a sus ejes. La mezcla mecánica se forma en el interior de los contenedores que albergan las esferas y el material que se desea procesar. Alcantara (2008)

El sistema funciona a través de los engranajes de un molino planetario. La energía motriz pasa del motor al eje central, que después transmite la rotación a los otros componentes.

#### Figura 6

*Molino de bolas planetario*



**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)



**Tabla 5.**

*Ventajas y desventajas de un molino planetario de bolas*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Pulveriza el mineral con gran fuerza y material.	Una alta velocidad hace que las paredes de la molienda y las bolas se desgasten más, lo cual disminuye la eficacia del impacto.
Molienda en seco y húmedo.	El contenedor presenta desgaste localizado porque las bolas giran únicamente sobre una pista del recipiente.
Velocidades de impacto altas.	El desgaste de las bolas y la contaminación del material de aleación son una consecuencia directa de las elevadas velocidades de impacto
Es fácil de cargar y descargar	Su elaboración tiene un costo alto

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

**Molino Attritor**

El molino Attritor tiene una estructura que está unida a un eje, lo que posibilita la rotación de diversos brazos que están fijados al eje central. El proceso de molienda ocurre mediante un movimiento constante de acercamiento y separación, aunque este patrón no es uniforme, de los elementos alrededor de los brazos. Sin embargo, se elimina el movimiento colectivo y el impacto con las paredes Cabezas (2017).

El material se coloca en un tanque fijo en compañía de los componentes que llevan a cabo la molienda. Tanto el material como los medios se agitan mediante un eje con brazos que gira rápidamente. Esto

provoca que los medios apliquen fuerzas de alto impacto sobre el material. Cabezas (2017).

### Figura 7

*Molino Attritor*



**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

### Tabla 6.

*Ventajas y desventajas del molino attritor de bolas*

<b>Ventaja</b>	<b>Desventaja</b>
Alta velocidad de impacto entre el motor y los medios de molienda.	Costo del sello para mantener el vacío.
Construcción sencilla.	Temperaturas elevadas durante la producción.
Mantenimiento sencillo.	Pérdida considerable de material al intentar mezclarlo en el Tazón
Varias alternativas de molienda están disponibles.	Los impulsores y las bolas se desgastan por el calor extremo que se produce.
Sistema sencillo.	Le cuesta descargar el material.
Obtención de granulometrías extremadamente finas.	Bajos niveles de contaminación, incluso con un sistema de refrigeración que opera continuamente.

---

No necesita premezclado.

Contaminación del material a causa de la degradación de los medios moledores e impulsor.

---

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

### **Molino de Tambor**

Este tipo de molino cuenta con un tambor que gira en torno a su eje horizontal y puede funcionar con bolas o barras. Se le aplican fuerzas externas al material que se introduce junto a las esferas o las barras. Los elementos de molienda se emplean para moler los sólidos a través de impactos y fricción, tanto en estado seco como húmedo.

Para conseguir un material más abundante, se utilizan bolas o barras de diámetro mayor; para lograr una granulometría más fina, en cambio, se requieren cuerpos moledores de menor tamaño.

### **Figura 8**

*Molino de bolas de Tambor*



**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

**Tabla 6.**

*Ventajas y desventajas de un molino de tambor*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Molienda potente y rápida.	Material previamente triturado.
Molienda rápida y potente.	Contaminación de los materiales al alearse debido al deterioro de los instrumentos de molienda.
Operación con barras o bolas.	

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

### **Molinos de bolas de alta energía**

Son molinos que se han diseñado para llevar a cabo moliendas de alta intensidad. Esta clase se caracteriza por utilizar métodos de trituración complejos.

**Figura 9**

*Molino de bolas de alta energía*



**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

**Tabla 7.**

*Ventajas y desventajas de un molino de bolas de alta energía*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Períodos breves de molienda.	Costo elevado de elaboración.
Obtención de aleaciones manométricas.	Contaminación del material a alear debido al deterioro de los instrumentos de molienda.

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

### **2.4. Modelado CAD de Sistemas Mecánicos.**

La herramienta del modelado CAD es fundamental, ya que facilita la creación de modelos tridimensionales exactos de componentes y estructuras mecánicas mediante el modelado CAD, los ingenieros tienen la posibilidad de visualizar, examinar y modificar diseños previos a la producción, optimizando la eficiencia y disminuyendo gastos. Programas como AutoCAD y SOLIDWORKS se utilizan frecuentemente para este fin. AutoCAD posibilita la elaboración de dibujos 2D y modelos 3D de gran exactitud, simplificando la elaboración de geometrías complejas y minuciosas (Universidad Tecnológica de Pereira, 2015; arqMANES, 2021). En contraposición, SOLIDWORKS proporciona características sofisticadas de modelado paramétrico, simulación de movimientos y estudio de esfuerzos, lo que lo hace una herramienta completa para el diseño y validación de sistemas mecánicos (Artec 3D, 2022).

#### **2.4.1. Ventajas del Modelado CAD en Ingeniería Mecánica.**

La utilización de programas CAD (tales como SolidWorks, AutoCAD, Inventor o CATIA) ofrece múltiples beneficios en la realización de proyectos de ingeniería:



- Exactitud en las medidas en la creación de componentes y conjuntos.
- Observación en 3D de elementos individuales y sistemas integrales.
- Identificación de interrupciones o choques entre componentes móviles.
- Mejora de ensamblajes y comprobación de niveles de libertad.
- Disminución de errores en la producción, al disponer de planos minuciosos.
- Creación automatizada de archivos técnicos, listados de materiales (BOM) y simulaciones.
- Exportación de modelos a programas de análisis de estructuras (CAE) o de producción (CAM)

#### **2.4.2. Proceso General de Modelado CAD**

El modelado de componentes mecánicos sigue generalmente el siguiente flujo:

1. Diseño conceptual: basado en especificaciones funcionales (potencia, dimensiones, materiales).
2. Modelado de piezas individuales: creación de sólidos 3D a partir de croquis.
3. Ensamblaje virtual: unión de piezas mediante relaciones geométricas (coincidencia, concentricidad, etc.).
4. Análisis de movimientos o interferencias.



5. Generación de planos de fabricación y vistas.

### **2.4.3. Método de elementos finitos**

El método de elementos finitos (FEM) es una técnica numérica que permite resolver problemas de deformación y tensiones dividiendo la geometría en elementos discretos. Se utiliza ampliamente en diseño mecánico para predecir el comportamiento estructural de equipos bajo diferentes condiciones de carga.

## **2.5. Normativas Técnicas Aplicables al Diseño del Molino de Bolas**

De acuerdo con Arias Garcés y Villacrés (2020), el diseño funcional del molino debe tener en cuenta la resistencia mecánica de sus elementos, el correcto ajuste en las uniones y la protección frente a fuerzas dinámicas relacionadas con el funcionamiento de la mina. En esta línea, diseños tales como el estudio del esfuerzo en la carcasa y los parámetros cinemáticos del molino deben acatar las regulaciones nacionales de cargas y seguridad industrial.

### **2.5.1. Normas de Diseño Mecánico y Transmisión**

AGMA 2001-D04: Establece fundamentos para el cálculo de engranajes rectos y helicoidales, utilizados en el diseño del sistema de piñón y corona del molino.

AGMA 908-B89: Proporciona información geométrica sobre el perfil de los dientes de engranajes.

AGMA 2101-D04: Define métodos de análisis para verificar la resistencia, vida útil y transmisión de potencia de engranajes.



## 2.5.2. Normas sobre Materiales Metálicos

ASTM A29 / A29M: Define los requisitos para barras de acero al carbono y de aleación, utilizadas en la fabricación de ejes y componentes estructurales.

ASTM A370: Describe métodos de ensayo mecánico (tracción, dureza, etc.) para validar la resistencia del acero utilizado.

ASTM E8 / E8M: Se aplica para pruebas de tracción en materiales metálicos, útil para evaluar el comportamiento del tambor del molino.

## 2.5.3. Normas Nacionales Peruanas

NTP ISO 12100:2014: Seguridad de las máquinas — Reglas básicas para la creación, evaluación y disminución de riesgos.

NTP 399.610: 2017 Considera los requisitos mínimos de diseño seguro para maquinaria en operación.

## 2.6. Marco Conceptual.

### 2.6.1. Diseño de Tambor

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

$\rho$ : densidad en  $g/cm^3$

m: Masa en g.

V: volumen en  $cm^3$



### 2.6.2. Volumen del Cilindro

El volumen interno del tambor del molino se calcula como el volumen de un cilindro:

$$V_c = 4V_t$$

Donde:

$V_c$  : volumen del tambor en metros cúbicos

### 2.6.3. Dimensionamiento de las Tapas del Tambor

Las tapas del tambor son componentes estructurales de forma circular que envuelven ambos extremos del cilindro del molino de bolas. Se determina su dimensión para garantizar que se corresponda con el diámetro interno del tambor, añadiendo el grosor del material empleado.

$$D_t = D + 2f$$

Donde:

$D_t$ : diámetro de tapa del tambor(m).

$D$ : diámetro interno del tambor(m).

**Tabla 8**

*Espesor del tambor*

<b>Diámetro del tambor de molino</b>	<b>Espesor de la chapa</b>
≤ 1.6 m	18 mm
1.6 y 2.0 m	20 mm
2.0 y 2.2 m	25.5 mm
2.2 y 2.4 m	28 mm
2.5 y 3.5 m	38 mm



---

3.5 y 4.50 m	52 mm
4.25 y 4.50 m	58 mm
5.0 m	63,5 mm

---

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)

#### 2.6.4. Peso de los Cuerpos Moledores.

Los cuerpos moledores constituyen el método principal de trituración en el molino de bolas. Su peso total dependerá del volumen del tambor

$$P_{bolas} = V_m * 0.25 * 0.6 * \delta_{bolas}$$

$$V_m = \frac{\pi * D^2 * L}{4}$$

Donde:

$V_m$ : es el volumen interno del molino

0.25: fracción del volumen total que se destina a la carga moledora

0,6: coeficiente de eficiencia de llenado.

$\delta_{bolas}$ : densidad de las bolas

#### 2.6.5. Grado de Llenado en húmedo

El grado de llenado en húmedo representa el porcentaje del volumen total del tambor que está llenado por la combinación de las bolas moledoras, el mineral y el líquido (generalmente agua)

$$\delta * V = m$$

Donde:

$\delta$  : densidad de la mescla



*v*: volumen ocupado

*m*: masa total de la carga

### 2.6.6. Potencia Teórica Necesaria

El requisito teórico de potencia en un molino de bolas simboliza la energía mínima necesaria para mover el tambor con toda la carga interna (bolas, mineral, agua, revestimientos).

$$Pt = 12.5 H$$

Dónde:

Pt (cv): potencia teórica necesaria

H (t): peso neto total de la carga

**Tabla 9**

*Peso de los elementos que componen el molino de bolas*

Componente	Unidades	Peso individual (Kg)	Peso total (Kg)
Bolas de molienda	01	6.97	6.97
Material a procesar	01	2	2
Estructura del Tambor	01	6.1	6.1
Tapas del tambor	02	1.12	2.24
molienda húmeda ( 65%)	01	7.43	7.43
Incremento por soldadura(7%)	01	1.83	1.83
Recubrimiento interior del tambor	1	1	1
Carga total estimada (H)			27.57 Kg. (0.03 ton)

**Nota:** Cabezas Casco, E. A. (2017)



### 2.6.7. Potencia Real Necesaria

La potencia real requerida simboliza la cantidad total de energía que el motor necesita proporcionar para que el molino de bolas funcione bajo condiciones de trabajo reales.

$$P = P_t + 20\% P_t$$

Donde:

$P$ : potencia real necesaria (CV o kW).

$P_t$ : potencia teórica estimada

0.20: representa el 20% adicional para cubrir pérdidas mecánicas.

### Velocidad de giro

$$V_g = 92.31 \text{ rpm}$$

### 2.6.8. Cálculo de la Velocidad Crítica

$$V_r = n\% \text{ de giro}$$

Donde:

$V_r$ : velocidad real de operación del molino (en rpm).

$n$ : velocidad crítica

% de giro: fracción del 100% (usualmente entre 65% y 80%).

### 2.6.9. Relación de Transmisión

Es un indicador que establece la cantidad de veces que el piñón (motor) debe rotar para que el engranaje (molino) finalice una rotación.

Relaciones geométricas fundamentales



Paso diametral

$$P_d = \frac{Z}{D}$$

Donde:

$P_d$ : paso diametral

Z: cantidad total de dientes presentes en el engranaje.

D: diámetro primitivo que caracteriza al engranaje

### 2.6.10. Procedimiento AGMA para el Cálculo de Engranajes

El método AGMA proporciona un conjunto de normas y fórmulas para el diseño y análisis de engranajes, asegurando que los componentes resistan las circunstancias de carga a lo largo de su vida útil.

Cálculo usando la resistencia

$$S_t = \frac{W_t K_o K_s K_m}{K_v m F J} \qquad S_t \geq \frac{S_{at} K_L}{K_T K_R}$$

Para calcular la máxima potencia que los dientes de engranajes pueden transmitir, se utiliza la siguiente expresión:

$$N = 6.98 \times 10^{-7} \left( \frac{D_p n_p S_{at} m F J K_L K_v}{K_s K_m K_T K_R K_o} \right)$$

Donde:

$S_t$ : esfuerzo calculado en la raíz del diente, expresado en (K/mm<sup>2</sup>)

$m$ : módulo del engranaje en el plano transversal, medido en milímetros por diente.



$K_o$ : *coeficiente que representa la sobrecarga aplicada al sistema*

$W_t$ : *carga tangencial que se debe transmitir en el diámetro primitivo, en kilogramos.*

$K_v$ : *coeficiente que considera los efectos dinámicos en la carga.*

$F$ : *ancho del diente, en milímetros.*

$K_s$ : *factor relacionado con el tamaño del diente.*

$K_m$ : *factor que indica cómo se distribuye la carga sobre el diente*

$J$ : *factor geométrico .*

$S_{at}$ : *esfuerzo admisible permitido para el material ( $Kg/mm^2$ )*

$K_L$ : *factor que considera la vida útil del engranaje.*

$K_T$ : *factor que toma en cuenta la influencia de la temperatura.*

$K_R$ : *Es factor aplicado para asegurar la seguridad del diseño*

$N$ : *potencia transmitida, medida en caballos de vapor (CV)*

$n_p$ : *velocidad de rotación del piñón, en revoluciones por minuto*

$D_p$ : *diámetro primitivo del piñón, expresado en milímetros.*

- Uno de los factores clave en el diseño de engranajes según la norma AGMA es el factor de sobrecarga, el cual se utiliza para incrementar la carga transmitida, tomando en cuenta condiciones reales de funcionamiento, como impactos, choques o variaciones repentinas de carga.

**Figura 10**

*Tabla de factores de sobrecarga*

FACTORES DE SOBRECARGA  $K_o, C_o$

FUENTE DE PODER	CARGA EN LA MAQUINA MOVIDA		
	UNIFORME	CHOQUE MODERADO	CHOQUE FUERTE
Uniforme	1,00	1,25	$\geq 1,75$
Choques pequeños	1,25	1,50	$\geq 2,00$
Choques medianos	1,50	1,75	$\geq 2,25$

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica"

- El factor dinámico  $K_v$  es un coeficiente que se emplea en el cálculo de engranajes para considerar los efectos de las vibraciones.

**Figura 11**

*factor dinámico*

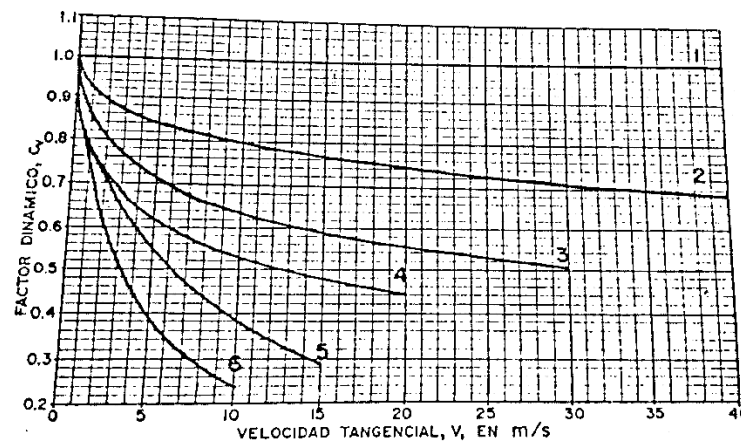


FIG. 18: FACTOR DINAMICO,  $C_v$

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

- El factor de distribución de carga se refiere a cómo se reparte la carga (peso o fuerza) entre los diferentes elementos estructurales.

Figura 12

tabla de factores de distribución de carga

**TABLA N° 12**  
**FACTORES DE DISTRIBUCION DE CARGA  $K_d, C_d$**

CONDICION DEL SOPORTE	ANCHO DE DIENTES							
	≤50mm		150mm		230mm		≥400mm	
	REC	HEL	REC	HEL	REC	HEL	REC	HEL
Montaje cuidadoso, juego pequeño de cojinetes, deflexión elástica mínima, engranajes de precisión	1,3	1,2	1,4	1,3	1,5	1,4	1,8	1,7
Montaje menos rígido, engranajes precisos, 100% de contacto	1,6	1,5	1,7	1,6	1,8	1,7	2,0	2,0
Montaje y precisión tal que no produzca contacto completo con el diente	más de 2,0							

REC=Engranajes cilíndricos de dientes rectos  
HEL=Engranajes cilíndricos de dientes helicoidales

Nota: Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

- diseño estático del eje
- Análisis a flexión

$$\sigma = \frac{M \frac{d}{2}}{\frac{\pi * d^4}{64}}$$

- Análisis de torsión

$$\tau_T = \frac{16T}{\pi * d^3}$$

- Torsión

$$T = F * r$$



### 2.6.11. Esfuerzo Equivalente de Von Mises

Para determinar la capacidad de una pieza para resistir estas combinaciones de carga, se aplica el criterio de Von Mises, que condensa todos los esfuerzos en un único valor: el esfuerzo correspondiente.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Donde:

$\sigma_{eq}$ : esfuerzo equivalente según el criterio de Von Mises.

$\sigma$ : esfuerzo generado por flexión.

$\tau$ : esfuerzo cortante debido a torsión.

Diseño a fatiga

- Flexion

$$\sigma_{xm} = 0$$

$$\sigma_{xa} = \frac{32 M}{\pi * d^3}$$

Donde:

$\sigma_{xa}$ : esfuerzo alternante de flexión

M: momento flector máximo aplicado al eje

d: diámetro del eje

$\pi$ : constante pi ( $\approx 3.1416$ )



- Esfuerzos equivalentes

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + 3\tau_{xym}^2}$$

Donde:

$\sigma_{eqm}$ : esfuerzo equivalente de Von Mises (MPa)

$\sigma_{xm}$ : esfuerzo alternante de flexión (MPa)

$3\tau_{xym}$ : *esfuerzo cortante por torsion (Mpa)*

## 2.6.12. Límite de Fatiga

Considera las condiciones reales del componente.

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S_e'$$

Donde:

Factor de acabado superficial  $K_a = aS_{ut}^b$

Factor de tamaño  $K_b = 0.879 * d^{-0.107}$

Factor de carga  $K_c = 0.85$

Factor de temperatura  $K_d = 1$

Factor de confiabilidad del 99.99%:

$$K_e = 0.702$$

Factor por efectos varios:

$$K_f = 1$$

Para el material acero inoxidable AISI 304:



$$S_{ut} = 620 \text{ MPa}$$

$$S_{e'} = 0.5 * S_{ut}$$

### 2.6.13. Factor de Seguridad del Eje

Es un valor empleado en la ingeniería para asegurar que un elemento, como el eje del molino, pueda funcionar de manera segura sin errores.

$$\frac{\sigma_{eqa}}{S_e} + \frac{\sigma_{eqm}}{S_{ut}} = 1$$

Donde:

$\sigma_{eqa}$ : *esfuerzo altamente equivalente*

$\sigma_{eqm}$ : *Esfuerzo medio equivalente*

$S_e$ : *limite de fatiga corregido del maerial*

$S_{ut}$ : *resistencia a la traccion del material*



## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo de Investigación

##### **Investigación Aplicada:**

Orientada a resolver un problema práctico mediante el diseño y validación estructural de un molino de bolas destinado a mejorar el proceso de molienda en la minería de La Rinconada. Este tipo de investigación emplea conocimientos teóricos de diseño mecánico, resistencia de materiales y simulación por elementos finitos (FEM) para elaborar una solución técnica concreta y viable.

#### 3.2. Nivel de Investigación

##### **Investigación Explicativa:**

Investiga las causas y efectos de un fenómeno, estableciendo relaciones causales y analizando variables.



### 3.3. Ámbito de la Investigación

La investigación tiene lugar en la mina La Rinconada, situada en el distrito de Ananea, que pertenece al departamento de Puno.

**Tabla 10.**

*Características geográficas de minera la rinconada*

<b>Características geográficas</b>	
<b>Coordenadas</b>	: 14°37'54"S 69°26'47"O
<b>Altitud</b>	: 5100 m.s.n.m.
<b>Departamento</b>	: Puno
<b>Provincia</b>	: San Antonio de Putina
<b>Distrito</b>	: Ananea

**Nota:** Extraído de google maps

### 3.4. Técnicas e Instrumentos

- Método de cálculo por etapas: se utilizaron procedimientos secuenciales basados en principios teóricos de Bond para la potencia de molienda, criterios de von Mises para la evaluación de tensiones y normas AGMA para elementos sometidos a carga mecánica.
- Software CAD SolidWorks: utilizado para el modelado tridimensional de los componentes, ensamblaje del molino, verificación dimensional y simulación visual del diseño.
- Herramientas de simulación FEM: incorporadas en SolidWorks Simulation para evaluar el comportamiento estructural del tambor bajo cargas de gravedad, carga total de operación y efectos centrífugos.
- Herramienta de simulación DEM: incorporado en ANSYS ROCKY.



### 3.5. Población y Muestra

#### **Población:**

En el contexto de esta investigación tecnológica y aplicada, la población está constituida por el conjunto de molinos de bolas de operación continua utilizados en la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) para la recuperación de oro. Estos equipos comparten características técnicas comunes en cuanto a principios de conminución, sistemas de transmisión y configuraciones cilíndricas, siendo la tecnología predominante en la zona de estudio (La Rinconada).

#### **Muestra:**

Al tratarse de un proyecto enfocado en el diseño y validación de una solución tecnológica específica, la selección de la muestra no fue al azar. Se optó por un criterio intencional. La muestra está conformada por un (01) diseño específico de molino de bolas con capacidad de 1 tonelada por hora, dimensionado exclusivamente para operar bajo las condiciones geográficas de La Rinconada (5100 m.s.n.m.).

- Cálculos técnicos sustentados en teorías de diseño mecánico (Bond, von Mises);
- Parámetros adecuados para la realidad de la minería artesanal (bajo consumo energético, facilidad de transporte y fabricación);
- Modelado y simulación tridimensional mediante software CAD para validar su comportamiento estructural y mecánico.



### 3.6. Recogida de Datos

Para el desarrollo de la investigación y el cumplimiento de los objetivos específicos, se emplearon las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de información:

#### 1. Análisis Documental y Normativo:

Se recopiló información técnica de fuentes bibliográficas especializadas en diseño de máquinas (Shigley, Mott) y normas internacionales. Específicamente, se extrajeron los coeficientes de seguridad, factores de servicio y tablas de selección de materiales de las normas AGMA (para transmisión) Asimismo, se recolectaron datos in situ sobre las condiciones ambientales de La Rinconada (5100 m.s.n.m.) para ajustar los parámetros de diseño.

#### 2. Cálculo Analítico y Matemático:

Se aplicaron los modelos matemáticos de Bond para la potencia de molienda, ecuaciones de resistencia de materiales para el dimensionamiento de ejes y teorías de falla (Von Mises) para la verificación estática.

#### 3. Simulación Computacional

Se utilizó el software SolidWorks y ANSYS ROcKy como instrumento para la obtención de datos virtuales. Esta técnica permitió recolectar datos críticos que no se pueden medir teóricamente, tales como:

- La distribución de esfuerzos (Von Mises) en el tambor y muñones.



- La visualización de la trayectoria de la carga (efecto catarata) para validar la velocidad óptima.
- Los factores de seguridad resultantes ante cargas combinadas y efectos centrífugos.



## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Presentación.

Se realizaron, en este capítulo, los cálculos necesarios para diseñar un molino de bolas que aumente la eficacia del proceso de molienda en minera La Rinconada. Se planeó una capacidad de 1 tonelada por hora.

#### 4.2. Análisis de Resultados.

El diseño del molino de bolas se lleva a cabo con las siguientes especificaciones:

##### 4.2.1. Datos de Entrada.

**Tabla 11.**

*Datos de Entrada.*

Dato	Símbolo / Valor	Justificación
Capacidad de molienda deseada	1 tonelada por hora (1t/h)	Meta de producción operativa



Tipo de mineral	Mineral aurífero	Predominante en la zona de estudio
Índice de trabajo de bond	8kwh/ton	Valor promedio para mineral aurífero.
Densidad del mineral	2.5 g/cm <sup>3</sup>	Valor típico para menas auríferas
Densidad del acero	7.85 ton/m <sup>3</sup>	Para bolas molidoras de acero
Porcentaje de llenado de bolas	30%	Valor empírico recomendado en molino de bolas pequeños
Porcentaje de velocidad de operación	75% de la velocidad critica	Se aconseja su uso para una molienda eficaz sin que la carga se adhiera.
Masa estimada de carga de mineral	150kg	Carga por lote para estimar el útil del tambor

**Nota:** Elaboración propia.

#### 4.2.1 Cálculo del Volumen del Tambor.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1}$$

Donde:

$\rho$  : Densidad del mineral

$m$ : masa del mineral

$V$ : volumen

Si la densidad del material es:

$$\rho = 2.8 \frac{g}{cm^3}$$

$$m = 150 \text{ kg} = 150000 \text{ gr}$$



$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{150000}{2.8}$$

$$V = 53571.43 \text{ cm}^3$$

### Volumen del Cilindro

$$V_c = 4 V$$

$$V_c = 4 * 53571.43$$

$$V_c = 214285.72 \text{ cm}^3$$

Si:

$$V_c = \pi r^2 L$$

$$L = \frac{V_c}{\pi r^2}$$

$$\frac{L}{D} = 1 a 2$$

$$L = 1.8 D$$

$$L = 1.8 * 2r$$

$$L = 3.6 r$$

$$3.6 r = \frac{V_c}{\pi r^2}$$

$$3.6 \pi r^3 = V_c$$

$$r^3 = \frac{214285.72}{3.6 \pi}$$

$$r^3 = 18947.02$$

$$r = \sqrt[3]{18947.02}$$

$$r = 27 \text{ cm}$$

$$D = 54 \text{ cm}$$



Por lo tanto

$$\frac{L}{D} = 1.8$$

$$L = 1.8 D$$

$$L = 1.8 * 54$$

$$L = 97.2 \text{ cm}$$

#### 4.2.2. Cálculo del tamaño óptimo de la bola.

Según la ecuación de Bond

$$B_s = \left( \frac{F_{80}}{330} \right)^{0.5} \left[ \frac{\rho_{\text{mineral}} \frac{W_{IB}}{1.1022}}{\%N_C D^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

$B_s$ : Tamaño de bola optimo (pulg.)

$\rho_{\text{mineral}}$ : Densidad del mineral  $\left( \frac{\text{tn}}{\text{m}^3} \right) = 2.8 \text{ tn/m}^3$

$W_{IB}$ : Indice de trabajo de bond  $\left( \text{Kw} \frac{\text{h}}{\text{tn}} \right) = 8 - 24 \text{ Kw} \frac{\text{h}}{\text{tn}} = 8 \text{ Kw} \frac{\text{h}}{\text{tn}}$

$\%N_C$ : Porcentaje de la velocidad critica = 75

$F_{80}$ : Diametro 80 de la alimentación = 5mm = 5000  $\mu\text{m}$

$D$ : Diametro efectivo del molino = 1.77 pie

Si:

$$D = 0.54 \text{ m} * \frac{1 \text{ pulg}}{0.0254 \text{ m}} * \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}} = 1.77 \text{ pie}$$

Entonces:

$$B_s = \left( \frac{5000}{330} \right)^{0.5} \left[ \frac{\rho_{\text{mineral}} \frac{W_{IB}}{1.1022}}{\%N_C D^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$$



$$B_s = \left(\frac{5000}{330}\right)^{0.5} \left[\frac{2.8 \frac{8}{1.1022}}{75 * 1.77^{0.5}}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$$B_s = 2.3 \text{ pulg.}$$

Por razones comerciales  $B_s = 2 \text{ pulg}$

#### 4.2.3. Cálculo del Número de Bolas del Molino.

$$\# \text{ de bolas} = \frac{m_t}{m_{bolas}}$$

Donde:

$m_t$ : Masa total

$\rho$ : densidad

$V_c$ : volumen del tambor

$$m_t = \rho V_c$$

Si:

$$V_c = 214285.72 \text{ cm}^3 = 0.21 \text{ m}^3$$

$$V_{t \text{ bolas}} = 30\% V_c$$

$$V_{t \text{ bolas}} = 0.3 * 0.21 \text{ m}^3$$

$$V_{t \text{ bolas}} = 0.063 \text{ m}^3$$

Por tanto:

$$m_t = 7.85 \frac{\text{tn}}{\text{m}^3} * 0.063 \text{ m}^3$$

$$m_t = 0.49 \text{ tn}$$

$m_{bolas}$ : Masa de la bola de molino

$$m_{bolas} = \rho V_{bola}$$



$$m_{bolas} = \rho * \frac{\pi}{6} * D^3$$

$$m_{bolas} = 7.85 \frac{tn}{m^3} * \frac{\pi}{6} * (0.0508m)^3$$

$$m_{bolas} = 5.38 \times 10^{-4} tn$$

Entonces:

$$\# \text{ de bolas} = \frac{0.49}{5.38 \times 10^{-4}}$$

$$\boxed{\# \text{ de bolas} = 910}$$

#### 4.2.4. Cálculo de Potencia del Molino.

$$N = 10 W_{iB} \left[ \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right] m_t$$

Donde:

$$W_{iB}: \text{Indice de trabajo de bond} \left( Kw \frac{h}{tn} \right) = 8 - 24 Kw \frac{h}{tn} = 8 Kw \frac{h}{tn}$$

$$F_{80}: \text{Diametro 80 de la alimentación} = 5mm = 5000 \mu m$$

$$P_{80}: \text{Diametro 80 de la salida} = (100 \text{ a } 200) \mu m = 200 \mu m$$

$$m: \text{Masa} = m_{material} + (m_{bolas} + m_t)$$

$$= 0.150 tn + (5.38 \times 10^{-4} + 0.49) = 0.64 tn$$

$$N = 10 * 8 \left[ \frac{1}{\sqrt{200}} - \frac{1}{\sqrt{5000}} \right] * 0.64$$

$$N = 2.89 kW$$

$$N_T = N (1 + N_{perdidas})$$

$$N_{perdidas} = 10 - 12 \%$$

$$N_T = N (1 + 0.1)$$

$$N_T = N * 1.10$$

$$N = 2.89 * 1.10$$



$$N = 3.1 \text{ kW}$$

Se selecciona una potencia de 3 kW

Un motor de 3kW tiene una velocidad de 970 rpm

#### 4.2.5. Velocidad crítica del molino.

$$n = \frac{42.2}{\sqrt{D}}$$

Donde:

$n$ : velocidad Critica del molino(rpm)

$D$ : diámetro interno del tambor (m)

42.2: constante derivada de la aceleración gravitacional y condiciones geométricas

$$n = \frac{42.2}{\sqrt{0.54}}$$

$$n = 57 \text{ rpm}$$

#### 4.2.6. Cálculo de Transmisión.

Relación de transmisión

$$m_g = \frac{n_m}{n_{\text{molino}}}$$

Donde:

$m_g$ : relación de transmisión(adimensional)

$n_m$ : velocidad del motor (rpm)

$n_{\text{molino}}$ : velocidad del molino (rpm)

$$m_g = \frac{970}{57}$$

$$m_g = 17$$



Asumiremos

Numero de dientes del piñón:

$$Z_p = 18 \text{ dientes}$$

Numero de dientes del engranaje ( $Z_g$ )

$$m_g = \frac{Z_g}{Z_p}$$

$$Z_g = Z_p m_g$$

$$Z_g = 18 * 17$$

$$Z_g = 306 \text{ dientes}$$

Diámetro de paso del piñón

$$D_p = m Z_p = 4 * 18 = 72 \text{ mm}$$

Diámetro de paso del engranaje

$$D_g = m Z_g = 4 * 306 = 1224 \text{ mm}$$

Distancia entre centros

$$c = 0.5 (D_p + D_g)$$

$$c = 0.5 (72 + 1224)$$

$$c = 648 \text{ mm}$$

Ancho del diente

$$F = 8 m = 8 * 4 = 32 \text{ mm}$$

Velocidad tangencial

$$v = \frac{\pi D_p n_p}{60000}$$

$$v = \frac{\pi * 72 * 970}{60000}$$

$$v = 3.66 \text{ m/s}$$

### 4.2.7. Cálculo por Fatiga Superficial.

Figura 13

Factor de sobrecarga.

TABLA N° 9  
FACTORES DE SOBRECARGA  $K_0, C_0$

FUENTE DE PODER	CARGA EN LA MAQUINA MOVIDA		
	UNIFORME	CHOQUE MODERADO	CHOQUE FUERTE
Uniforme	1,00	1,25	$\geq 1,75$
Choques pequeños	1,25	1,50	$\geq 2,00$
Choques medianos	1,50	1,75	$\geq 2,25$

Nota: Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$C_0 = 1.25$$

- Factor dinámico: De la figura N°13

Figura 14

factor dinámico

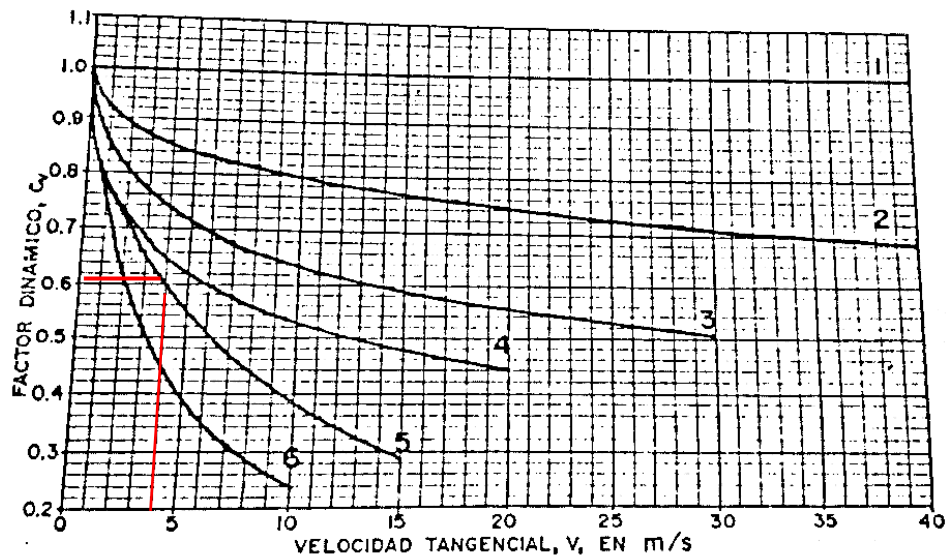


FIG. 18: FACTOR DINAMICO,  $C_v$

Nota: Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$C_v = 0.66$$

- Factor de tamaño.

$$C_s = 1.00$$

- Factor de distribución de carga. De la Figura N° 14.

**Figura 15**

*Factor de distribución de carga*

**FACTORES DE DISTRIBUCION DE CARGA  $K_a$ ,  $C_a$**

CONDICION DEL SOPORTE	ANCHO DE DIENTES							
	≤50mm		150mm		230mm		≥400mm	
	REC	HEL	REC	HEL	REC	HEL	REC	HEL
Montaje cuidadoso, juego pequeño de cojinetes, deflexión elástica mínima, engranajes de precisión	1,3	1,2	1,4	1,3	1,5	1,4	1,8	1,7
Montaje menos rígido, engranajes precisos, 100% de contacto	1,6	1,5	1,7	1,6	1,8	1,7	2,0	2,0
Montaje y precisión tal que no produzca contacto completo con el diente	más de 2,0							

REC=Engranajes cilíndricos de dientes rectos  
HEL=Engranajes cilíndricos de dientes helicoidales

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$C_m = 1.60$$

- Factor de estado superficial

$$C_f = 1.10$$

- Factor geométrico. De la figura N°15

Figura 16

Factor geométrico

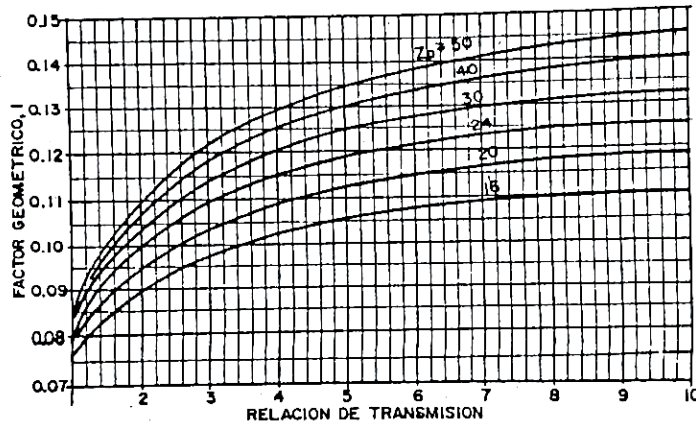


FIG.23: FACTOR GEOMETRICO, I, PARA ENGRANAJES CILINDRICOS DE DIENTES RECTOS,  $\theta = 20^\circ$

Nota: Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$I = 0.120$$

- Coeficiente elástico del material: De la figura 16

Figura 17

coeficiente elástico del material

TABLA N° 18  
COEFICIENTE ELASTICO,  $C_p$ ; PARA ENGRANAJES RECTOS, HELICOIDALES Y BI-HELICOIDALES

MATERIAL DEL PIÑON	MODULO DE ELASTICIDAD (KGS/MM <sup>2</sup> )	MATERIAL DEL ENGRANAJE			
		ACERO	FD FDO	BRONCE ALUMINIO	BRONCE
Acero	$2,10 \times 10^4$	61	53	52	50
Fe Fdo.	$1,34 \times 10^4$	53	48	48	46
Bronce Aluminio	$1,23 \times 10^4$	52	48	46	45
Bronce	$1,14 \times 10^4$	50	46	45	44

\* Para engranajes cónicos al valor obtenido de esta tabla, multiplicar por 1,225

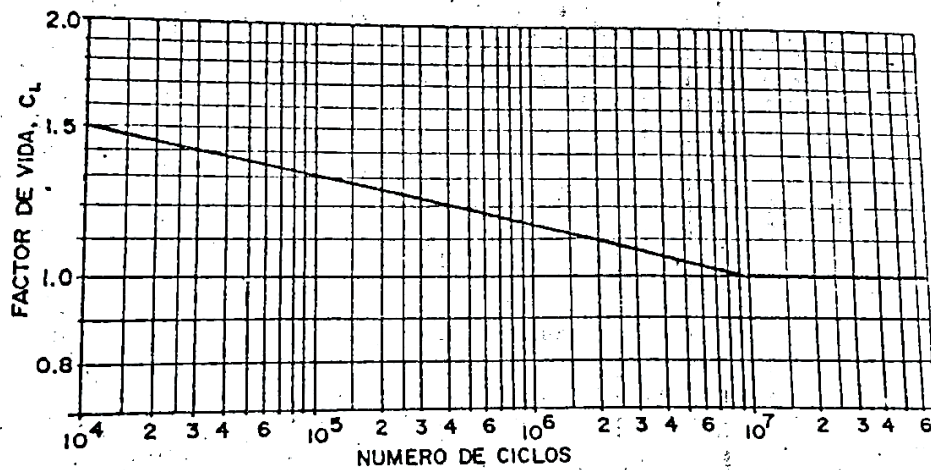
Nota: Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$C_p = 61.0$$

- Factor de vida. De la figura N.º 17.

**Figura 18**

*Factor de vida*



**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$C_L = 1.00$$

*Factor de la relacion de Dureza:  $C_M = 1.00$*

*Factor de Temperatura :  $C_T = 1.00$*

- Factor de seguridad. De la figura N° 18

**Figura 19**

*Factor de seguridad*

**TABLA N° 20**  
**FACTOR DE SEGURIDAD,  $C_r$**

REQUERIMIENTO	$C_r$
Alta confiabilidad	$\geq 1,25$
De 100 falla uno	1,00
De 3 falla uno	0,80

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$C_R = 1.00$$

- Selección de la dureza de los dientes. De la Figura 19.

**Figura 20**

*condiciones típicas de dureza para piñones y engranajes*

COMBINACIONES TÍPICAS DE DUREZA PARA PIÑONES Y ENGRANAJES

BHN PIÑÓN	BHN ENGRANAJE
210	180
245	210
265	225
285	245
300	255
315	270
335	285
350	300

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

Piñón: 300 BHN

Engranaje: 255 BHN

- Esfuerzos permisibles de contacto. De la Figura N° 20.

**Figura 21**

*esfuerzos permisibles de contacto*

ESFUERZOS PERMISIBLES DE CONTACTO,  $S_{ac}$

MATERIAL	DUREZA SUPERFICIAL MINIMA	$S_{ac}$ Kgs/mm <sup>2</sup>
Acero endurecido en toda la sección del diente:	100 DIN	60 - 67
	220 DIN	69 - 72
	260 DIN	78 - 87
	300 DIN	87 - 97
	350 DIN	99 - 110
	400 DIN	110 - 121
Acero endurecido superficialmente por carburización:	55 Rc	127 - 141
	60 Rc	141 - 158
Acero endurecido superficialmente por inducción ó por llama	50 Rc	120 - 134
Fierro fundido:		35 - 42
	- AGMA grado 20	46 - 53
	- AGMA grado 30	53 - 60
Fierro nodular:		51 - 58
	-Recocido	60 - 67
	-Normalizado	69 - 76
-Templado en aceite y revenido	255 DIN	69 - 76
Bronce, AGMA 2c (10 - 12% Sn)	28,2 Kgs/mm <sup>2</sup>	21
Bronce-Aluminio ASTM B 148-52 (aleación 9C-HT)	63,0 Kgs/mm <sup>2</sup>	46

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$S_{ac} = 76.5 \frac{kg}{mm^2}, \text{ para una dureza de 255 BHN}$$

- La expresión representa la potencia que se podrá transmitir.:

$$N = 6.98 \times 10^{-7} \left( \frac{n_p F C_v I}{C_0 C_s C_m C_f} \right) \left( \frac{S_{ac} D_p C_L C_H}{C_T C_R C_p} \right)^2$$

$$N = 6.98 \times 10^{-7} \left( \frac{970 * 32 * 0.66 * 0.120}{1.25 * 1.60 * 1.00 * 1.00} \right) \left( \frac{76.5 * 72 * 1.00 * 1.00}{1.00 * 1.00 * 61.0} \right)^2$$

$$N = 5.98 CV = 4.5 kW$$

$$N = 4.5 kW > 3 kW \text{ ok}$$

#### 4.2.8. Determinación por Resistencia a la Fatiga.

- Esfuerzos permisibles. De la Figura 21.

**Figura 22**

esfuerzos permisibles para engranajes

**TABLA N° 14**  
**ESFUERZOS PERMISIBLES PARA ENGRANAJES RECTOS, HELICOIDALES, BI-HELICOIDALES Y CONICOS**

MATERIAL Y TRATAMIENTO TERMICO	DUREZA MINIMA O ESF. ROTURA MIN.	S <sub>at</sub> (Kgs/mm <sup>2</sup> )	
		RECTO, HELICOIDAL Y BI-HELICOIDAL	CONICO
Acero, normalizado	140BHN	13,4 - 17,6	7,7
Acero, templado y revenido	180BHN	17,6 - 23,2	9,9
Acero, templado y revenido	220BHN	20,5 - 27,0	11,1
Acero, templado y revenido	260BHN	23,1 - 30,3	12,2
Acero, templado y revenido	300BHN	25,4 - 33,1	13,4
Acero, templado y revenido	350BHN	27,6 - 36,3	14,8
Acero, templado y revenido	400BHN	29,5 - 39,2	16,2
Acero, templado y revenido	450BHN	31,0 - 41,5	17,6
Acero, endurecido superficialmente por carburización	55Rc	38,7 - 45,8	19,4
	60Rc	42,3 - 49,3	21,1
Acero, endurecido superficialmente por inducción ó templado en llama: -En todo el diente -Superficialmente	54Rc	31,7 - 38,7 *	
	54Rc	15,5	9,5
Acero, AISI4140, endurecido superficialmente por nitruración	Capa dura: 53Rc nucleo: 300 BHN	26,1 - 29,7	14,1
fierro fundido: AGMA Grado 20 AGMA Grado 30 AGMA Grado 40	175 BHN	3,5	1,9
	200 BHN	6,0	3,2
	200 BHN	9,2	4,9
Fierro nodular, ASTM Grado: - 60-40-18, recocido - 80-55-06, recocido - 100-70-03, normalizado - 120-90-02, templado y revenido		10,6	5,6
		14,1	7,7
		18,3	9,0
		21,1	13,0
Bronce, AGMA 2c (10%-12%)Sn	28,2 Kgs/mm <sup>2</sup>	4,0	2,1

\* Valores para dientes con paso diametral 6 ó más

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

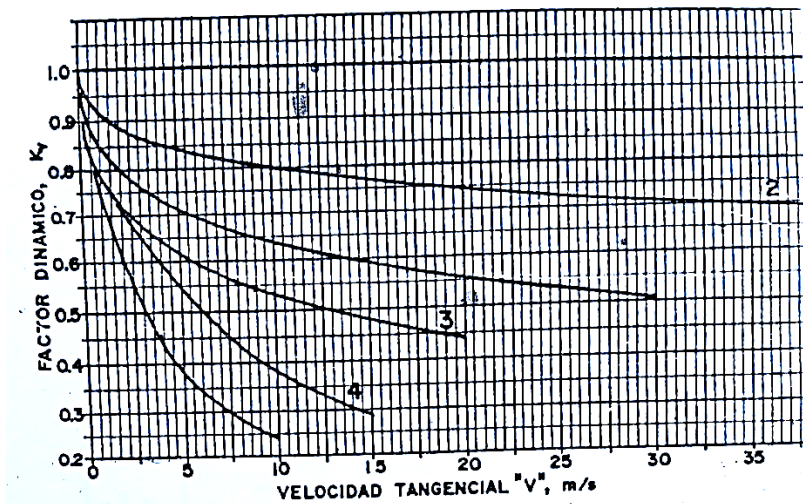
$$S_{atp} = 25.4 Kg/mm^2, \text{ para 300 BHN}$$

$$S_{atp} = 22.5 \text{ Kg/mm}^2, \text{ para } 255 \text{ BHN}$$

- Factor dinámico: De la figura N°22

**Figura 23**

*Factor dinámico.*



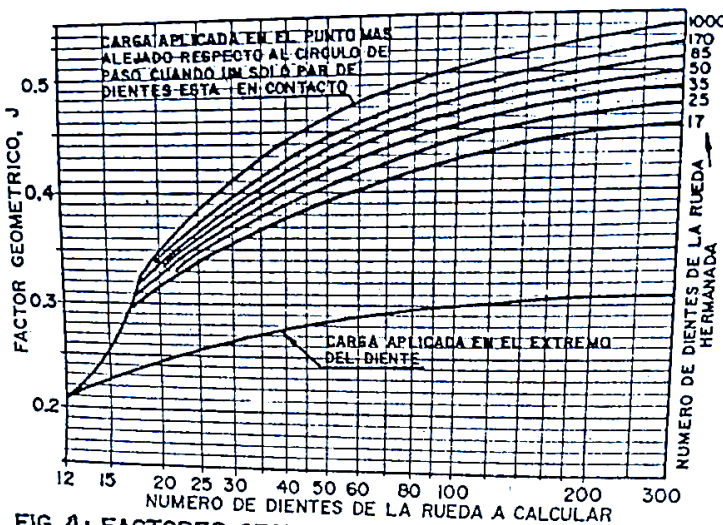
**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$K_v = 0.62$$

- Factor geométrico. De la figura N° 23.

**Figura 24**

*Factor geométrico.*



**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$J_p = 0.38 \text{ para el piñón}$$

$$J_g = 0.46 \text{ para el engranaje}$$

- Factor de tamaño

$$K_s = 1.00$$

- Factor de distribución de carga

$$K_m = C_m = 1.60$$

- Factor de vida. De la Figura N.º 24.

**Figura 25**

*Factor de vida*

**FACTOR DE VIDA,  $K_L$**

NUMERO DE CICLOS	ENGRANAJES RECTOS, HELICOIDALES Y BI-HELICOIDALES				ENGRANAJES CONICOS CAPA DURA, CARBURIZAD. *
	160 BHN	250 BHN	450 BHN	CAPA DURA CARBURIZAD. *	
$10^3$	1,6	2,4	3,4	2,7	4,6
$10^4$	1,4	1,9	2,4	2,0	3,1
$10^5$	1,2	1,4	1,7	1,5	2,1
$10^6$	1,1	1,1	1,2	1,1	1,4
$10^7$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$10^8$	1,0-0,8	1,0-0,8	1,0-0,8	1,0-0,8	1,0

\* DUREZA DE LA CAPA DURA: 55-63 R<sub>c</sub>

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$K_L = 1.00 \text{ para } 10^7 \text{ ciclos}$$

- Factor de temperatura

$$K_T = C_T = 1.00$$

- Factor de seguridad. De la Figura N.º 25.

Figura 26

factor de seguridad

**FACTOR DE SEGURIDAD RESPECTO A LA RESISTENCIA  
A LA FATIGA,  $K_R$**

REQUERIMIENTO	$K_R$
Alta confiabilidad	$\geq 1,50$
De 100 falla uno	1,00
De 3 falla uno	0,70

**Nota:** Shigley, J. E. "Diseño en Ingeniería Mecánica".

$$K_R = 1.00 \text{ para una confiabilidad de } 99\%$$

- Potencia que transmite el piñón

$$N_p = 6.98 \times 10^{-7} \left( \frac{D_p n_p S_{at} m F J_p K_L K_v}{K_s K_m K_T K_R K_o} \right)$$

$$N_p = 6.98 \times 10^{-7} \left( \frac{72 * 970 * 25.4 * 4 * 32 * 0.38 * 0.62}{1 * 1.6 * 1 * 1 * 1.25} \right)$$

$$N_p = 18.67 \text{ CV} = 13.87 \text{ kW}$$

- Potencia que podrá transmitir el engranaje:

$$N_g = N_p \left( \frac{S_{atg}}{S_{atp}} \right) \left( \frac{J_g}{J_p} \right)$$

$$N_g = 18.67 * \left( \frac{22.5}{24.5} \right) * \left( \frac{0.46}{0.38} \right)$$

$$N_g = 20.78 \text{ CV} = 15.5 \text{ KW}$$

#### 4.2.9. Dimensionamiento del eje principal

Calculo del eje.

Torque en Eje.

$$T = \frac{9550 \times P}{n} = \frac{9550 \times 3}{970} = 29 \text{ N.}$$



Fuerza tangencial en piñón.

$$F_t = \frac{D}{2T}$$

$$F_t = \frac{2(30)}{0.072} = 833 \text{ N}$$

Fuerza Radial.

$$F_r = F_t \tan(\phi)$$

Con ángulo de presión:  $\phi=20^\circ$

$$F_r = 833 * 0.364 = 303 \text{ N}$$

Distancia entre rodamientos: en molinos pequeños se usa 180 mm

Momento flector máximo.

$$M = \frac{F_r L}{4} = \frac{303 * 0.18}{4} = 13.6 \text{ N/m}$$

Diámetro del eje:

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{16M}{\pi d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2}$$

Para ASTM A36:

$$\tau_{adm} = 135 \text{ MPa}$$

Diámetro recomendado 30 mm

#### 4.2.10. calculo de la chaveta

Usamos DIN 6885.



Para un eje de 30 mm:

Chaveta estándar:

8 × 7 mm (ancho × altura)

Longitud requerida según esfuerzo de aplastamiento:

Cizalladura en la chaveta:

$$T = Ft \frac{2}{d}$$

Flecha.

$$\sigma_{\text{apl}} = \frac{2T}{bd}$$

Despejamos longitud l:

$$l = \frac{2T}{bd\sigma_{\text{adm}}}$$

Tomamos  $\sigma_{\text{adm}}=90$  MPa para acero al carbono.

$$l = \frac{2(30)}{8 * 30 * 90 \times 10^6}$$

$$l = 0.027 \text{ m} = 27 \text{ mm}$$

Tomamos longitud de chaveta normalizada 32mm (DIN6885)

Se llegó a los siguientes resultados

#### 4.2.11. Calculo y Selección de Rodamientos

Cargas del engranaje



Fuerza tangencial:

$$F_t = 833 \text{ N}$$

Fuerza radial:

$$F_r = 303 \text{ N}$$

Reacciones en rodamientos

Piñón al centro carga simétrica, los dos rodamientos soportan la misma carga.

$$R_A = R_B = \frac{F_r}{2}$$

$$R_A = R_B = \frac{303}{2} = 151.5 \text{ N}$$

Calculo de la vida L10

**Condiciones:**

- Rotación del eje del piñón = 970 rpm
- Factor de aplicación para engranajes:

$$f_a = 1 \text{ (ya que la carga es baja)}$$

$$L_{10} = \left(\frac{P}{C}\right)^3 \cdot 10^6 \text{ rev}$$

$$L_{10} = \left(\frac{19500}{152}\right)^3 \cdot 10^6$$

$$L_{10} = (128.2)^3 \cdot 10^6 = 2.11 \times 10^{12} \text{ rev}$$

Convertido a horas

$$\text{Horas} = \frac{2.11 \times 10^{12}}{970 \cdot 60}$$



$$\text{Horas} = 3.63 \times 10^7 \text{ h}$$

Selección del tipo de rodamientos

Para ejes de transmisiones pequeñas con engranajes rectos.

Rodamiento rígido de bolas 6206

- Diámetro interior: 30 mm
- Diámetro exterior: 62 mm
- Ancho: 16 mm
- $C = 19.5 \text{ kN}$
- $C_o = 11.2 \text{ kN}$
- Vida  $L_{10} > 100,000 \text{ h}$

Para un molino de bolas donde hay polvo fino de material, vibración, impacto, humedad.

### **6206 2RS C3**

- 2RS = sellado por ambos lados
- C3 = juego interno mayor para soportar vibración

### **Selección de Chumaceras para el Soporte del Tambor**

**Peso Total ( $W_{total}$ ):  $607 + 210 + 50 + 100 = 967 \text{ kg}$**

Los soportes del tambor deben resistir la carga total del conjunto giratorio. A diferencia del cálculo de potencia (que considera el torque), para los rodamientos se debe considerar la carga vertical total, la cual incluye la carga interna y el peso propio de los componentes mecánicos.

La fuerza de peso ( $W$ ) que actúa sobre el sistema es:



$$W = 1000kg \times 9.81m/s^2 = 9810N$$

Dado que el molino se apoya simétricamente, la carga radial ( $Pr$ ) sobre cada chumacera es:

$$Pr = \frac{9810N}{2} = 4905N$$

**Selección del Modelo UCP-214**

Se selecciona la unidad de rodamiento **UCP-214** (diámetro de eje 70mm).

**Capacidad Dinámica ( $Cr$ ): 62,200N**

**Factor de Seguridad Real:**

$$FS = \frac{Pr}{Cr} = \frac{62,200}{4,905} \approx 12.7$$

Este valor es óptimo para molinos de bolas, donde las normas de diseño recomiendan factores entre 10 y 15 debido a las cargas de impacto aleatorias generadas por la caída de las bolas y las vibraciones de la transmisión por engranajes abiertos.

**Tabla 12.**

*Resultados de los parámetros del molino de bolas.*

<b>Parámetros del molino de bolas</b>	
Volumen del molino	0.21 m <sup>3</sup>
Longitud	0.97 m
Diámetro	0.54 m
Espesor del tambor	16 mm
Numero de bolas	910
Potencia del molino	3 Kw
Velocidad crítica	57 rpm
Velocidad optima de trabajo	42.8 rpm
<b>Transmisión</b>	
Relación de transmisión	17

Numero de dientes del piñón	18
Diámetro del piñón	72 mm
Numero de dientes del engranaje	306
Diámetro del engranaje	1224 mm
Velocidad tangencial	3.66 m/s

**Nota:** creación propia.

### 4.3. Modelado de Componentes del Molino de Bolas en SolidWorks.

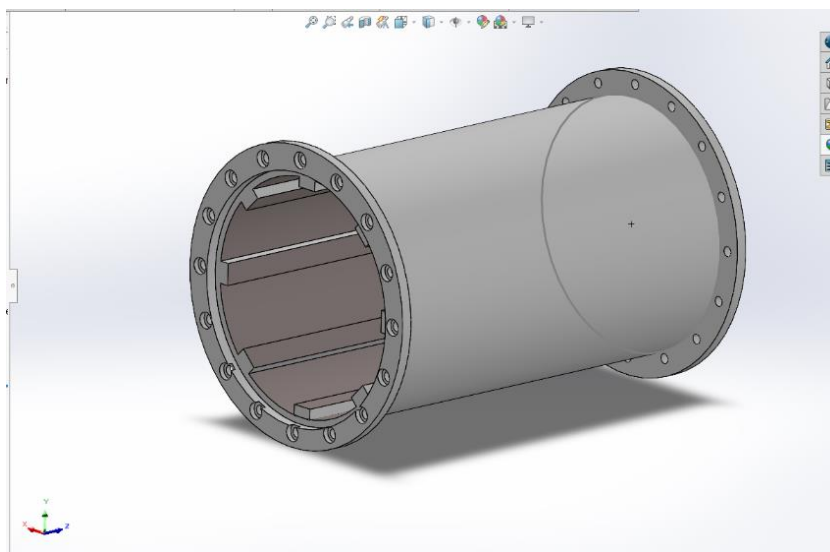
#### 4.3.1. Modelado de tambor

Para el modelado tridimensional del molino de bolas se diseñaron las siguientes piezas:

- Diámetro interno: 0.54 m
- Longitud: 0.97 m
- Espesor de la chapa: 16 mm
- Material: Acero ASTM A 36

#### Figura 27

*Modelado del tambor cilíndrico.*



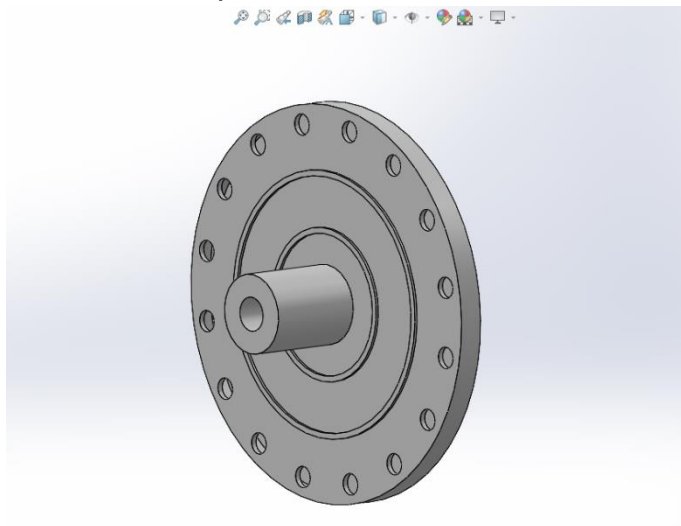
**Nota:** Solidworks 2024 (captura) creación propia.

### 4.3.2. Modelado Tapa de Molino.

- Modelado de las Tapas del tambor
- Dos tapas semicirculares de acero
- Grosor: 25 mm
- Con perforaciones para pernos de sujeción al tambor y a los cojinetes laterales

### Figura 28

*Modelado de tapa de molino*



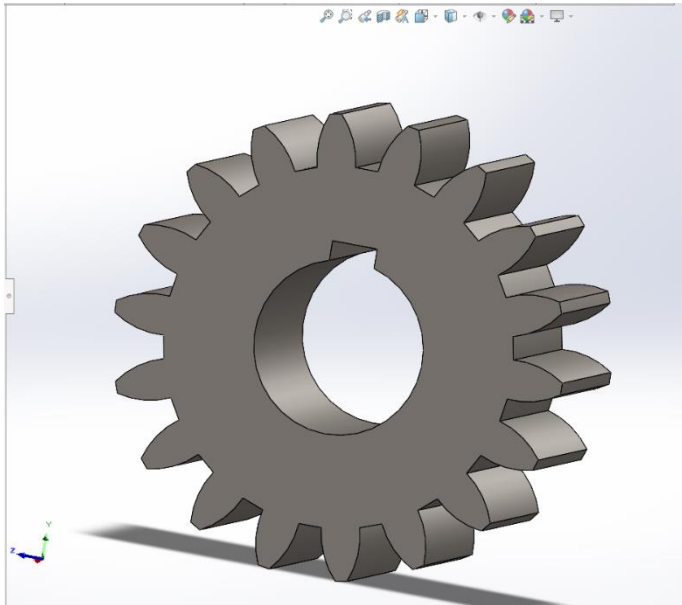
**Nota:** Solidworks 2024 (captura) creación propia.

### 4.3.3. Modelado de piñón.

- 18 dientes
- Módulo: 4
- Material: Acero templado 40Cr
- Acoplado al eje de transmisión mediante chaveta

**Figura 29**

*Modelado del piñón.*



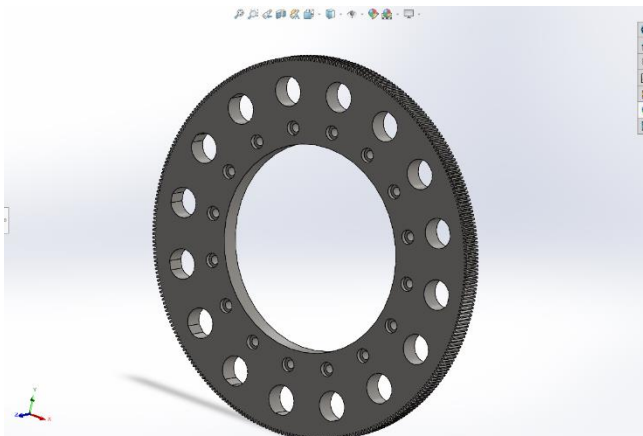
**Nota:** Solidworks 2024 (captura) Creación propia.

#### **4.3.4. Modelado de Corona.**

- 306 dientes
- Módulo: 4
- Diámetro: 1224 mm

**Figura 30**

*Modelado de corona.*



**Nota:** Solidworks 2024 (captura) creación propia.

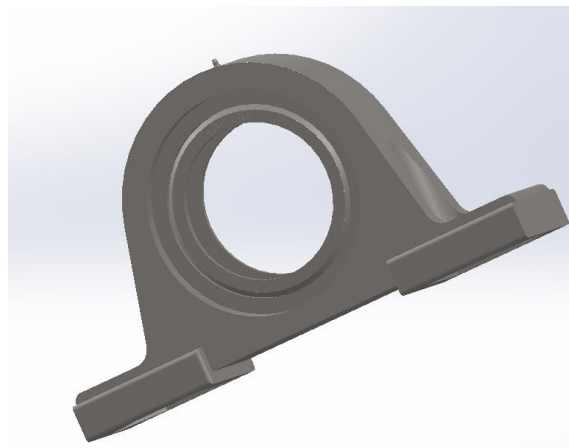
### 4.3.5. Modelado de Rodamientos y Chumacera.

Rodamientos

- Tipo chumaceras con carcasa
- Soportan el eje y permiten el giro del conjunto tambor-eje

#### Figura 31

*Modelado de rodamientos y chumaceras*



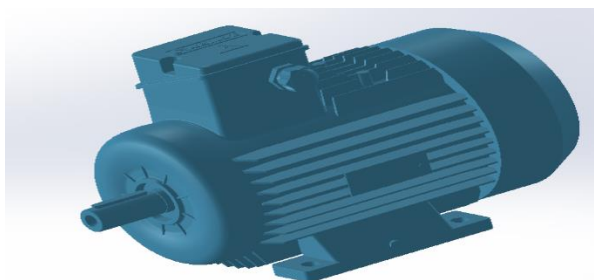
**Nota:** Solidworks 2024 (captura) creación propia.

### 4.3.6. Modelado de Motor Eléctrico.

- Potencia: 3 kW
- Velocidad nominal: 970 rpm
- Acoplado al eje mediante polea o reductor

#### Figura 32

*Modelado de motor eléctrico*

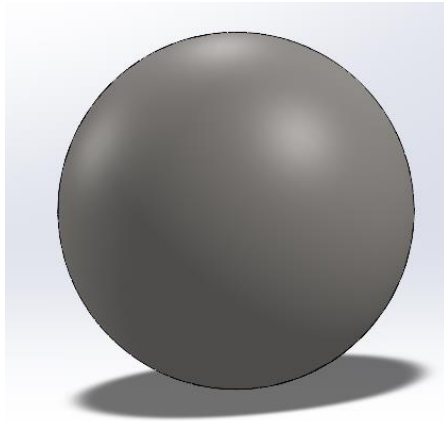


**Nota:** Solidworks 2024 (captura) creación propia.

#### 4.3.7. Modelado de la Bola de Molienda.

**Figura 33**

*Modelado de la bola de molienda*



**Nota:** Solidworks 2024 (captura) Creación propia.

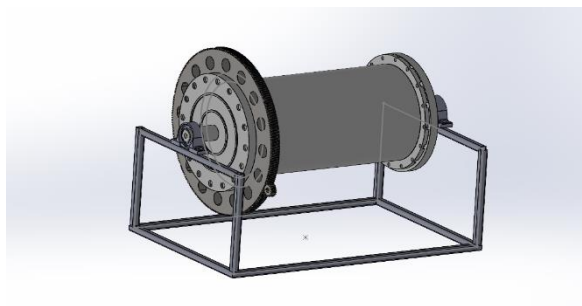
#### 4.3.8. Ensamblaje Final del Molino.

Luego de modelar cada componente, se realizó el ensamblaje completo en SolidWorks. Se verificaron interferencias, alineación de engranajes, ajuste de componentes y libertad de movimiento rotacional.

- El tambor está fijado a la corona que gira solidariamente con él
- El eje de transmisión acoplado al piñón transmite el movimiento desde el motor

**Figura 34**

*Ensamblaje final del molino de bolas*



**Nota:** Solidworks 2024 (captura) Creación Propia

#### 4.4. Simulación del molino de bolas.

##### 4.4.1. Análisis estático por gravedad.

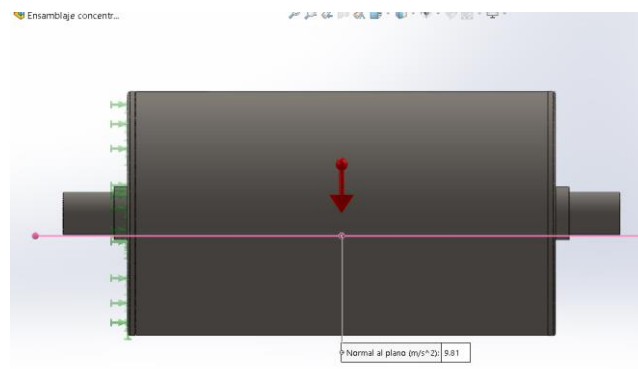
se realizó un análisis estático considerando únicamente la gravedad actuando sobre el tambor y sus elementos estructurales. Este análisis permite identificar las zonas donde se concentran tensiones debido al peso propio del molino

Para ello, el material del tambor se definió como acero ASTM A36 y se aplicó la aceleración gravitacional estándar ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) sobre todo el modelo.

Agregamos una fuerza que actúa verticalmente, siguiendo la dirección del eje Y, lo cual la hace perpendicular al suelo.

#### Figura 35

*Simulación de fuerza en Y*

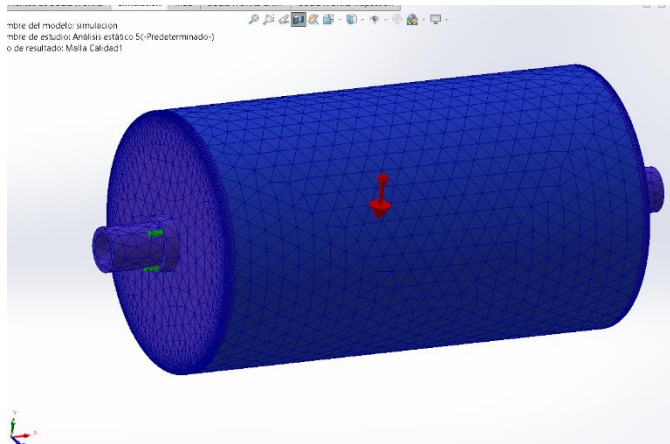


**Nota:** Solidworks 2024 (captura) Creación Propia

El siguiente paso fue crear la malla para nuestro ensamble. Después de este proceso, el modelo queda así, como se ve en la imagen:

### Figura 36

#### Enmallado del molino

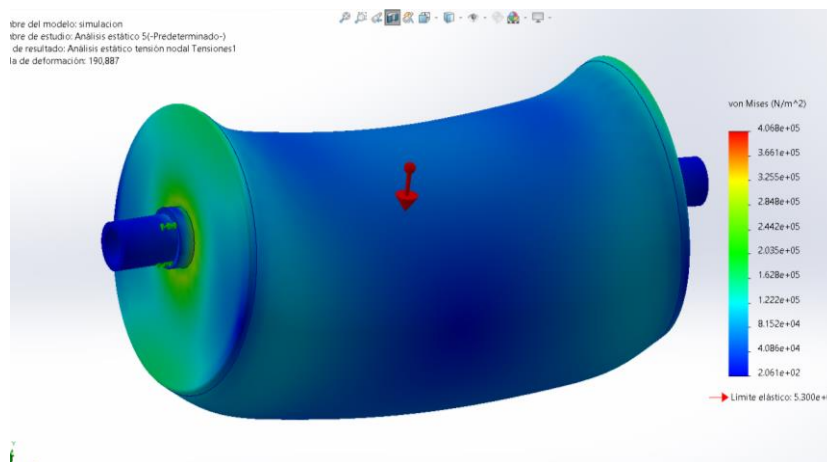


**Nota:** Solidworks 2024 (captura) Creación Propia

Resultado de la simulación tenemos:

### Figura 37

#### Análisis estático por gravedad



**Nota:** Solidworks 2024 (captura) Creación Propia

En la Figura 36 se observa la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en la estructura. Los valores obtenidos muestran un esfuerzo máximo de aproximadamente:

$$\sigma_{max} \approx 4.06 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 0.406 \text{ MPa}$$



Bajo este escenario de carga, el tambor no presenta riesgo alguno de deformación plástica ni falla estructural. Este resultado confirma que el espesor seleccionado y la configuración geométrica del tambor son adecuados para soportar su propio peso.

#### 4.4.2. Análisis estático bajo carga de operación (carga interna total)

Para representar correctamente las condiciones reales de operación del molino, se determinó la masa total de la carga interna a partir de los parámetros definidos en el diseño. La masa de mineral considerada es de 150 kg, En el cálculo del número de bolas el 30% del volumen interno del tambor corresponde al volumen ocupado por los medios molidores, resultando una masa aproximada de 412 kg.

Adicionalmente, para la molienda húmeda, se consideró un aporte de agua equivalente al 30% de la masa del mineral, lo que representa 45 kg.

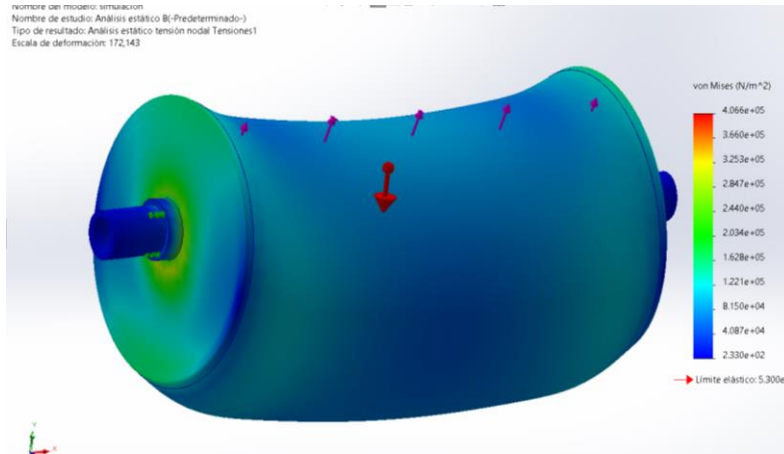
La masa total en el interior del molino es entonces:

$$m_{total} = 150 \text{ kg} + 412 \text{ kg} + 45 \text{ kg} = 607 \text{ kg}$$

La fuerza equivalente aplicada en la simulación se obtuvo mediante:

$$F = m_{total} * g = 607 * 9.81 = 5950 \text{ N}$$

Esta fuerza se aplicó como carga distribuida de manera uniforme sobre la superficie interna del tambor, representando el peso combinado del mineral, los medios molidores y el líquido durante la operación. Asimismo, los ejes de soporte fueron definidos como restricciones fijas, y se aplicó la aceleración gravitacional estándar a todo el conjunto.

**Figura 38***Análisis estático bajo carga de operación*

**Nota:** Solidworks 2024 (captura) Creación Propia

Esfuerzo equivalente máximo (Von Mises):  $\sigma_{max} \approx 4.06 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 0.406 \text{ MPa}$

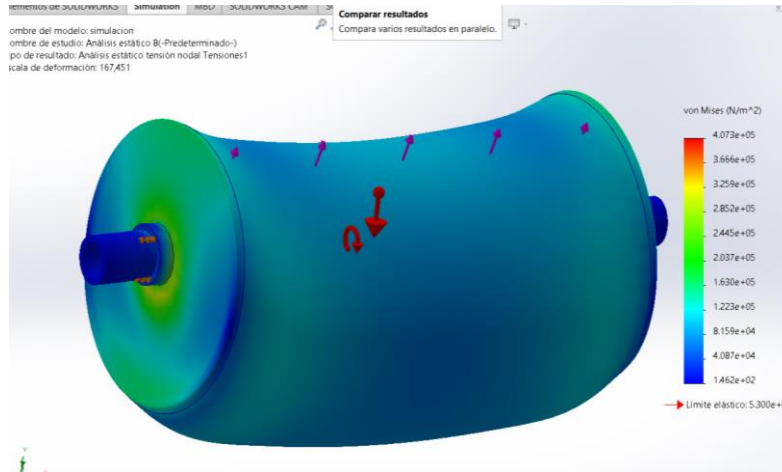
Bajo las condiciones de carga estática evaluadas (gravedad + carga interna equivalente), el tambor fabricado en ASTM A36 muestra un comportamiento estructural completamente seguro.

#### 4.4.3. Análisis bajo efectos centrífugos.

Durante la operación del molino, la rotación del tambor genera una fuerza centrífuga que actúa sobre su estructura. Aunque el proceso de molienda ocurre por impacto y caída de las bolas, es necesario verificar la sollicitación estructural debida a las cargas centrífugas, especialmente cuando el molino opera cerca del 80% de su velocidad crítica.

La velocidad de operación definida en el diseño es de 42.8 rpm. La aceleración centrífuga equivalente se calculó mediante:

Figura 39

*Análisis bajo efectos centrífugos*

**Nota:** Solidworks 2024 (captura) Creación Propia

La Figura X muestra la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en el tambor. El valor máximo obtenido en esta condición fue:

$$\sigma_{max} \approx 4.07 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 0.407 \text{ MPa}$$

El análisis bajo efectos de la fuerza centrífuga demuestra que, aun en la condición más exigente de operación, las tensiones máximas en el tambor del molino son insignificantes frente al límite elástico del acero ASTM A36

El tambor del molino de bolas diseñado presenta un desempeño estructural altamente seguro bajo todas las condiciones evaluadas. Las tensiones máximas son bajas respecto al límite elástico del material ASTM A36, confirmando que el espesor seleccionado y la configuración geométrica garantizan un funcionamiento confiable durante la operación con un amplio margen de seguridad.

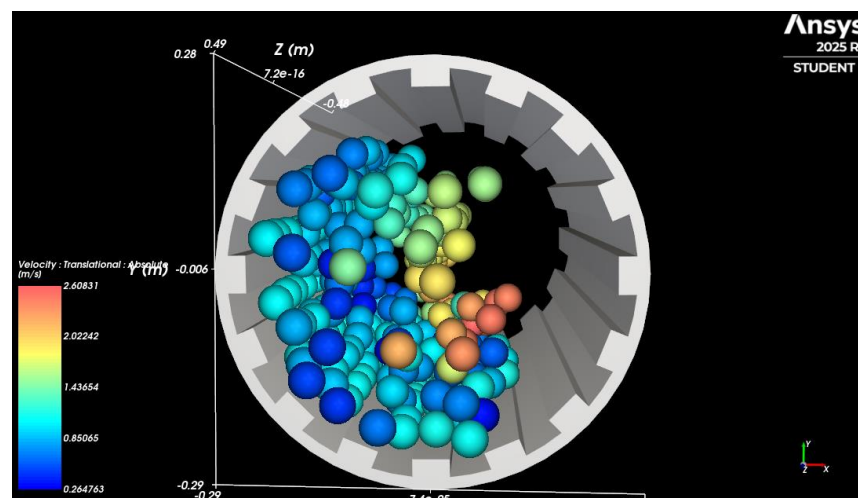
#### 4.4.4. Validación Dinámica del Movimiento de la Carga (Simulación DEM)

Para corroborar los cálculos teóricos de la velocidad de operación y la eficiencia de los levantadores, se realizó una simulación dinámica de elementos discretos (DEM). El objetivo fue visualizar la trayectoria de los cuerpos moledores y confirmar la existencia de las zonas de impacto necesarias para la conminución del mineral.

##### Análisis de la Trayectoria:

##### Figura 40

##### *Análisis de trayectoria*



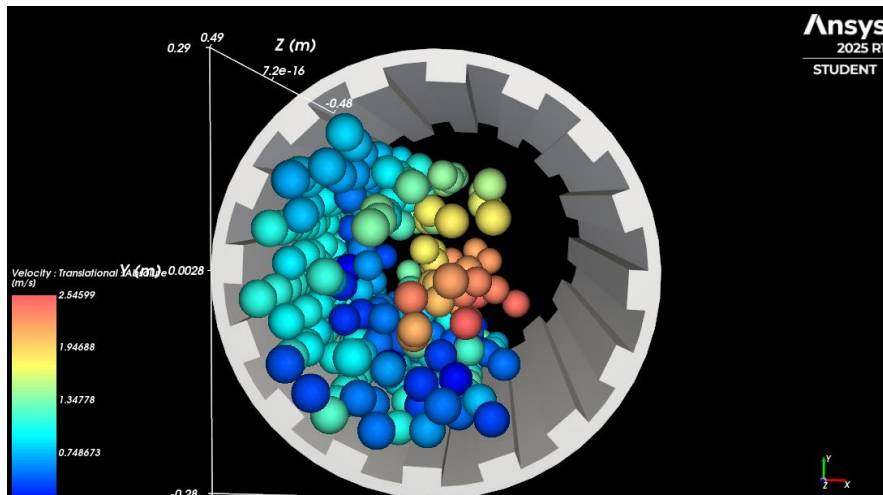
**Nota:** ANSYS ROCKY (captura) Creación Propia

Como se observa en la simulación, el diseño de los levantadores (lifters) rectangulares, combinado con la velocidad operativa de 42.8 rpm (75% de la velocidad crítica), logra levantar la carga de bolas hasta un ángulo de desprendimiento óptimo.

## Distribución de Velocidades:

Figura 41

*Distribución de velocidades traslacionales y zonas de energía cinética*



**Nota:** ANSYS ROCKY (captura) Creación Propia

A escala de colores representa la velocidad traslacional de las bolas. Se evidencia una zona de alta energía cinética (colores amarillo y rojo) en la fase de caída, donde los cuerpos molidores son proyectados en una trayectoria parabólica.

## 4.5. Costos estimados de Fabricación de Molino de Bolas

### 4.5.1. Costo de materiales.

Los materiales requeridos para la fabricación del molino se detallan en la siguiente tabla.



**Tabla 13**

*Costos estimados de materiales*

<b>Componente</b>	<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario (S/.)</b>	<b>Subtotal (S/.)</b>	<b>Proveedor/ Referencia</b>
<b>Tambor y estructura</b>					
Chapa ASTM A 36 16mm	Acero estructural	2 planchas 1.2x2.4m	850	1,700.00	
Perfiles para soporte	Tubo cuadrado 2"	24 metros	45.00/m	1,080.00	Ferretería Industrial
<b>Sistema de transmisión</b>					
Piñón de ataque	Acero 40Cr templado	1 unidad	650	650	Engranajes Perú
Corona dentada	Fundición gris GG20	1 unidad	2,800.00	2,800.00	Fundición Juliaca
<b>Componentes mecánicos</b>					
Eje principal	Acero AISI 1045 Ø30mm	1.2 metros	180.00/m	216	Metales Andinos
Rodamientos 6206	6206 2RS C3	2 unidades	120	240	SKF Perú
Chumaceras	Hierro fundido	2 unidades	180	360	Fundición local
Chavetas	Acero AISI 1020	2 unidades	15	30	Ferretería
Pernos y tuercas	Grado 8.8	Juego completo	350	350	
<b>Sistema eléctrico</b>					



Motor eléctrico 3kW	Trifásico 970 rpm	1 unidad	1,200.00	1,200.00	WEG Perú
Arrancador directo	Contactador + protecciones	1 unidad	450	450	Schneider
Cableado y tablero		Lote	600	600	Eléctrica local
<b>Medios molidores</b>					
Bolas de acero 2"	Alto cromo	910 unidades	3.5	3,185.00	
<b>Otros materiales</b>					
Pintura anticorrosiva	Epoxi industrial	4 galones	180	720	
Electrodos soldadura	E6013, E7018	10 kg	45.00/kg	450	
<b>SUBTOTAL</b>				<b>13,981.00</b>	
<b>MATERIALES</b>					

**Nota:** cotizaciones locales creación propia

#### 4.5.2. Costos de Mano de Obra

**Tabla 14**

*costos de fabricación y montaje*

Actividad	Especialidad	Días requeridos	Jornal (S/.)	Subtotal (S/.)
Corte y preparación	Soldador calificado	3	80	240
Soldadura estructural	Soldador especializado	5	100	500
Mecanizado de partes	Tornero/fresador	4	120	480
Montaje y alineación	Mecánico montador	3	90	270
Pintura y acabados	Pintor industrial	2	70	140



Instalación eléctrica	Electricista industrial	2	85	170
SUBTOTAL MANO DE OBRA				1,800.00

**Nota:** cotizaciones locales creación propia

### 4.5.3. Costos indirectos

**Tabla 15**

*Costos Indirectos*

Concepto	Cálculo	Monto (S/.)
Transporte de materiales	Flete Juliaca-Ananea	800
Herramientas y equipos	Alquiler/desgaste	500
Imprevistos	5% total directo	859.05
<b>SUBTOTAL INDIRECTOS</b>		<b>2,159.05</b>

**Nota:** creación propia

### 4.5.4. Inversión Total

**Tabla 16**

*Inversión Total*

Concepto	Monto (S/.)	Porcentaje
Materiales	13,981.00	72.50%
Mano de obra	1,800.00	9.30%
Costos indirectos	2,159.05	18.20%
<b>INVERSIÓN TOTAL</b>	<b>17,940.05</b>	<b>100%</b>

**Nota:** creación propia

## 4.6. Comparativa con Molinos Comerciales Fabricados en Perú

En Perú existen varios fabricantes de equipos mineros que producen molinos de bolas para la minería artesanal y pequeña minería. Los principales centros de fabricación están en Arequipa, Lima y Trujillo.



4.6.1. Comparativa Técnica

Tabla 17

Comparativa técnica

Parámetro	Molino Diseñado	COMESA (referencial)	Modelo Chino (importado)	Taller Juliaca TJ-1
Modelo/ Referencia	Diseño Actual			Personalizado
Capacidad nominal	1.0 ton/h	1.0-1.2 ton/h	0.8-1.0 ton/h	0.8-1.0 ton/h
Potencia motor	3.0 kW	5.5 kW	4.0 kW	3.7 kW
Diámetro x Longitud	0.54x0.97 m	0.60x1.20 m	0.55x1.00 m	0.50x0.90 m
Velocidad operación	42.8 rpm	38-42 rpm	40-45 rpm	35-40 rpm
Peso total	~450 kg	~600 kg	~550 kg	~500 kg
Sistema transmisión	Piñón-corona directo	Reductor+ corona	Poleas+ correas	Piñón-corona
Material tambor	Acero ASTM A36 16mm	Acero ASTM A36 16mm	Acero SAE 1020 14mm	Acero comercial 16mm
Garantía	6 meses	6 meses	12 meses	3 meses
Tiempo entrega	4-6 semanas	6-18 semanas	8-10 semanas	4-8 semanas

**Nota:** creación propia con datos de mercado

#### 4.6.1. Comparativa Económica.

**Tabla 18**

*Comparativa económica*

Concepto	Molino Diseñado	COMESA (referencial)	Modelo Chino (importado)	Promedio Peruano
Precio de venta	17,940	28,500	25,800	24,500
Flete Arequipa- Puno	0 (fabricación local)	2,800	3,200	2,500
Instalación y puesta en marcha	1,200	2,500	2,000	1,800
Capacitación operarios	800	1,500	1,200	1,100
Costo total implementación	19,940	35,300	32,200	29,900
Diferencia vs. diseño	-	15,360	12,260	9,960
% más económico	-	44.30%	37.70%	27.60%

**Nota:** creación propia

El molino diseñado presenta una ventaja económica significativa, siendo entre 27% y 44% más económico que las alternativas comerciales peruanas equivalentes, con ahorros que superan los S/. 14,000 por unidad en comparación con el fabricante líder del mercado.

#### 4.7. Recomendación de Plan de Mantenimiento

Con el fin de garantizar el funcionamiento adecuado, extender su vida útil y prevenir averías anticipadas del molino de bolas diseñado, se sugiere poner en marcha un Plan de Mantenimiento Correctivo, Predictivo y Preventivo que esté ajustado a las condiciones operativas de la Minera La Rinconada.



## 4.7.1. Alcance

El plan abarca los siguientes componentes del molino:

- Tambor y blindajes internos
- Eje principal
- Rodamientos y chumaceras
- Sistema de transmisión (piñón–corona o poleas–correas)
- Motor eléctrico
- Estructura de soporte
- Sistema de carga de bolas
- Sistema de lubricación

## 4.7.2. Mantenimiento preventivo.

### Actividades Diarias:

- Verificación visual del tambor y puntos de apoyo.
- Revisión de ruidos o vibraciones anormales durante la operación.
- Confirmación de funcionamiento del motor a la velocidad establecida.
- Inspección de fugas en puntos de lubricación.

### Actividades Semanales

- Lubricar rodamientos y chumaceras según la especificación del fabricante.
- Comprobar tensión del sistema de transmisión.
- Verificar apriete de pernos y uniones estructurales.



- Inspeccionar el estado de las correas o engranajes para detectar desgaste.

### **Actividades Mensuales**

- Control del desgaste de blindajes internos del tambor.
- Verificación del desgaste de las bolas de molienda.
- Alineamiento entre el motor y el eje del molino.
- Medición de juego radial en rodamientos.

### **4.7.3. Mantenimiento Correctivo.**

Se ejecuta cuando se detecta una falla inesperada:

- Cambio de blindajes deteriorados o agrietados.
- Sustitución de rodamientos con daños por fatiga o sobrecalentamiento.
- Reparación o reemplazo de piñón o corona por pérdida de geometría del diente.
- Corrección de desalineación en el sistema motor–transmisión.
- Reemplazo o reparación del tambor ante fisuras estructurales.
- Revisión del balanceo del tambor para evitar vibraciones.

### **4.7.4. Mantenimiento predictivo.**

Se recomienda implementar técnicas de diagnóstico para anticipar fallas:

- Análisis de vibraciones: detección de desbalanceo, desalineación y holguras.



- Termografía: identificación de puntos calientes en rodamientos y motor.
- Medición de espesores: control del desgaste de la coraza y blindajes.
- Análisis de corriente del motor: detección de sobrecarga o fricción excesiva.

#### 4.8. Discusión de Resultados.

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo de diseño y simulación de un molino de bolas para procesamiento de mineral con una capacidad aproximada de 1 tonelada por hora. Los resultados obtenidos, tanto en términos de dimensiones geométricas, parámetros operativos y análisis estructural, evidencian una coherencia técnica sólida, acorde con los objetivos planteados.

La simulación computacional (DEM) permitió visualizar el comportamiento interno de la carga. Se confirmó que los levantadores diseñados generan una trayectoria parabólica perfecta a 42.8 rpm, validando que la energía se utiliza en fracturar el mineral y no se desperdicia en abrasión o centrifugado.

1. Cabezas (2017) Este antecedente tuvo como objetivo principal el desarrollo de un molino de bolas destinado a su uso en laboratorios, con la pulverización de materiales metálicos en pequeñas cantidades como prioridad. Si bien su contribución radica en la adaptación de parámetros de molienda para fines experimentales, la escala de operación y los criterios de diseño difieren significativamente del enfoque industrial adoptado en la presente tesis. En contraste, el diseño propuesto para la Minera La Rinconada incorpora criterios de dimensionamiento y selección de materiales (acero ASTM A36) que permiten



soportar cargas y ciclos de trabajo propios de la operación minera continua, además de integrar herramientas de modelado CAD para la validación estructural y funcional del equipo. Esto representa un salto cualitativo en la aplicabilidad y robustez del diseño.

2. El trabajo que se realizó en la mina Esperanza fue optimizar la eficiencia del proceso de molienda. y lograr una mayor recuperación de concentrado en minerales de baja ley. Sin embargo, la presente tesis aporta una mejora significativa al incorporar una simulación detallada de los componentes principales mediante SolidWorks, permitiendo optimizar la geometría del tambor (diámetro interno de 0,54 m y longitud de 0,97 m) y el espesor de la chapa (16 mm), así como la selección precisa del número y tamaño de bolas. Además, de la potencia del motor y la velocidad crítica asegura un funcionamiento estable y eficiente, reduciendo el riesgo de fallas mecánicas y maximizando la vida útil del equipo. Estos aspectos, poco desarrollados en el antecedente de la mina Esperanza, refuerzan la originalidad y aplicabilidad del diseño presentado.

3. Reducción del consumo de energía en un molino de bolas por medio de una estructura automática que controla la velocidad rotacional del mismo.

Este estudio se enfoca en la eficiencia energética a través de la automatización del control de velocidad. Si bien la tesis actual no implementa un sistema automático, optimiza la relación de transmisión y la velocidad de rotación según el comportamiento dinámico del molino y los parámetros de diseño, lo que favorece indirectamente una operación más eficaz con un menor consumo de energía. Asimismo, el diseño para fatiga y la evaluación de esfuerzos (Von Mises)



aumentan la seguridad y fiabilidad del equipo; estos elementos no se tratan a fondo en el antecedente mencionado.

4. Tanto esta tesis como la de Hinojosa (2017) Utilizan la simulación y el modelado CAD para perfeccionar el diseño de molinos de bolas en plantas concentradoras. Las dos investigaciones subrayan la relevancia de calcular parámetros esenciales, como el tamaño de los componentes principales, la potencia del motor y la velocidad crítica.

Sin embargo, esta tesis aporta mejoras significativas al adaptar el diseño a las condiciones específicas de la minería en altura y mineral de baja ley en Puno, integrando un análisis estructural más detallado (esfuerzos de Von Mises, fatiga y factor de seguridad) y seleccionando materiales adecuados para ambientes exigentes. Además, enfatiza la validación práctica del diseño y su aplicabilidad local, mientras que Hinojosa se enfoca en una planta de mayor capacidad (15 tn/hr) y un contexto más general.

#### Aportes y mejoras de la tesis respecto a los antecedentes

La presente investigación se diferencia y supera a los antecedentes seleccionados al integrar:

- Un diseño estructural robusto y validado mediante simulación CAD, adaptado a las condiciones reales de la minería en altura y con mineral de baja ley.
- Un dimensionamiento preciso de componentes basado en cálculos de potencia, velocidad crítica y esfuerzos mecánicos, garantizando la seguridad y eficiencia del equipo.



- La mejora de los parámetros operativos (granulometría, densidad de pulpa, volumen de carga) que impactan directamente en la calidad del producto y el desempeño energético.

Al comparar los parámetros operativos obtenidos con referencias en la literatura y aplicaciones comerciales similares, se observa que la potencia estimada de 3 kW y la velocidad operativa de 42.8 rpm están en rangos compatibles con molinos de bolas de tamaño pequeño a mediano, tal como se documenta en estudios previos sobre molienda por trituración seca y procesos minerales. Asimismo, el tamaño óptimo de bola calculado (~2 pulgadas) coincide con recomendaciones estándar para optimizar la eficiencia del proceso de molienda, lo cual apunta a una selección adecuada del medio moledor.

## CONCLUSIONES

- PRIMERA:** se concluye que el diseño y la simulación de molino de bolas contribuyen significativamente a mejorar el proceso de molienda. en minera La Rinconada, ya que permite definir parámetros óptimos como la capacidad, velocidad de giro, carga moledora y potencia requerida, reduciendo el tiempo de procesamiento del mineral y optimizando el consumo de energía logrando un equipo robusto adaptado a las condiciones geográficas de Puno.
- SEGUNDA:** Los criterios necesarios para el diseño del molino de bolas, tanto técnicos como normativos, fueron identificados y aplicados con éxito, como calcular la velocidad crítica, el cálculo del volumen útil del tambor, la carga de bolas, así como la selección de materiales y componentes según normas ASTM, cumpliendo con el primer objetivo específico.
- TERCERA:** Se obtuvo los siguientes parámetros: volumen de molino de  $0.21 \text{ m}^3$  de los cuales las bolas de acero ocupan un cuarto de volumen, Para optimizar el proceso de molienda, se ha calculado que la velocidad crítica del molino es de 57 revoluciones por minuto, se calculó una velocidad inferior a la crítica con un porcentaje de 75% resultando una velocidad óptima de 42.8 rpm Esta velocidad fue validada mediante software de simulación, demostrando gráficamente una distribución de energía cinética óptima para la fractura del mineral.
- CUARTA:** La simulación del modelo tridimensional en SolidWorks permitió validar el ensamblaje, dimensiones y funcionamiento general del



molino, anticipando posibles interferencias, y asegurando la viabilidad técnica del diseño. Esto aporta valor en la implementación práctica y cumple el aspecto de "simulación" del objetivo general.



## RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** Se recomienda la fabricación y prueba del molino diseñado, con el fin de validar experimentalmente los parámetros obtenidos por simulación y verificar su eficiencia operativa en condiciones reales de trabajo en La Rinconada.
- SEGUNDA:** Elaborar un programa preventivo de mantenimiento para el molino de bolas, que contemple inspecciones periódicas del eje, rodamientos, sistema de transmisión y estructura del tambor. Esto garantizará la continuidad operativa y reducirá el riesgo de fallas por fatiga o desgaste prematuro.
- TERCERA:** Se recomienda contar con personal calificado en el uso seguro y eficiente del equipo, incluyendo el arranque, la carga y descarga del mineral, el monitoreo de la velocidad de giro y la limpieza del sistema. Una operación adecuada reduce el desgaste del equipo y mejora la eficiencia del proceso.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Barros, C. (2020). *Evaluación económica del repotenciamiento de molinos de bolas línea 3, planta concentradora Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Universidad de Chile. <https://doi.org/https://doi.org/10.46296/ig.v4i8edespdic.0053>
- Cabezas, E. A. (2017). *Diseño y construcción de un molino de bolas para aplicaciones de pulvimetalurgia en los laboratorios de ingeniería mecánica de la facultad de ingeniería civil y mecánica de la universidad de ambato*. Universidad Técnica de Ambato .
- Chambi , D. (2013). *Diseño de un Molino de Bolas para la Corporacion Minera Ananea S.A*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Dueñas, J., & Gonzáles, V. (2016). *Diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el laboratorio de catálisis de la universidad de córdoba*. Universidad de Córdoba.
- Guerrero, J. (2017). *Reducción del consumo energético de un molino de bolas mediante un sistema de control automático para la velocidad de rotación del molino*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Hinojosa, J. (2017). *Diseño y simulación de un molino de bolas horizontal de 15 [tn/hr] aplicado a una planta concentradora mediante el uso de software CAD especializado*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Jiménez, J. (2017). *Diseño de un molino de bolas con capacidad de 12 TM/h de molienda de carbón antracita, para mejorar la operación de la caldera TSX-G de lecho fluidizado de la empresa Trupal S.A*. Universidad César Vallejo.



- López, A. (2013). *Detección de anomalías en molino de bolas usando modelos no-paramétricos*. Universidad de Chile.
- Lopez, P. L. (2004). Población muestra y muestreo . *Punto Cero*, 09(08), 69-74.  
[https://doi.org/http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&nrm=iso](https://doi.org/http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012&lng=es&nrm=iso)
- Moron , J. (1975). *Cálculo y diseño de un molino de bolas para procesar 120 tns/hr. de mineral de cobre*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Pacsi, M. (2023). *Implementación de repulpeador cónico y molino de bolas con chaquetas para la recuperación de mercurio y oro en relaves de amalgamación*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Pretel, F. (2022). *Diseño de un molino de bolas para triturar mineral de baja ley y aumentar la producción de concentrado en la mina Esperanza, región La Libertad,2020*. Universidad Privada del norte.
- Quintana, N. (2015). *Estudio de puesta en marcha para molino de bolas y planta de flotación en minera Cerro Negro*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Quispe, D. (2024). *Estudio experimental para determinar la velocidad de corrosión de los molinos de bolas usados en la molienda húmeda de minerales sulfurosos*. Universidad Nacional San Luis Gonzaga.
- Sandoval , R. (2011). *Análisis de Utilización de Motores de Inducción de Rotor Bobinado en el Accionamiento de un Molino de Bolas*. Universidad de Chile.



Tito, E. (2010). *Fabricación de un molino de bolas discontinuo artesanal, con el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo manual*. Universidad Nacional del Altiplano.

Yucra, A. (2023). *Optimización de la frecuencia de reemplazo de forros sujetos al desgaste en molinos de bolas en la Unidad Minera San Rafael - Minsur*. Universidad Nacional del Altiplano.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9.ª ed.). McGraw-Hill.

Chapman, S. J. (2011). *Electric machinery fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill.

Napier-Munn, T., Morrell, S., Morrison, R., & Kojovic, T. (2005). *Minerals comminution circuits: Their operation and optimization*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.



### ANEXOS

#### Anexo 1. Matriz de consistencia

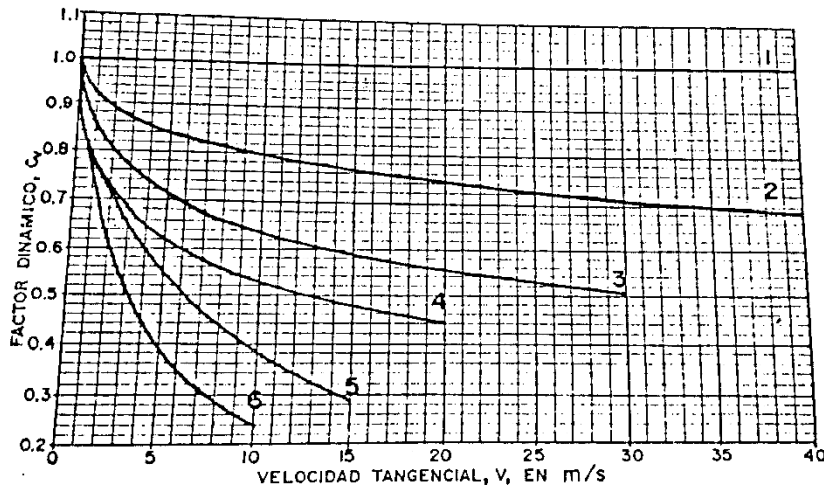
##### DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>	<b>Variable independiente</b>	<b>Tipo de investigación:</b> Aplicada  <b>Nivel de investigación:</b> Aplicativa  <b>Enfoque de investigación:</b> Cuantitativa
¿De qué manera se puede diseñar y simular un molino de bolas para mejorar el proceso de molienda en minería la rinconada distrito de Ananea, Puno 2024?	Diseñar y simular el molino de bolas para mejorar el proceso de molienda en minería la rinconada distrito de Ananea, Puno 2024	Si se diseña y simula el molino de bolas entonces se mejorará el proceso de molienda en minería la rinconada	Diseño y simulación del molino de bolas - Capacidad (kg)	
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Hipótesis Especificas</b>	<b>Variable Dependiente</b>	
¿Cuáles son los criterios para el diseño del molino de bolas? ¿Cómo se puede determinar los parámetros para el diseño y simulación de molino de bolas? ¿Cómo se puede mejorar el proceso de molienda en minería la rinconada distrito de Ananea, Puno?	Determinar criterios para el diseño del molino de bolas Determinar los parámetros para el diseño y simulación de molino de bolas Mejorar el proceso de molienda en minería la rinconada distrito de Ananea, Puno	Si se determina los criterios se podrá determinar los parámetros de diseño del molino de bolas Si se determina los parámetros de diseño entonces se podrá realizar una simulación del molino de bolas Si se mejora el proceso de molienda entonces será productivo en minería la rinconada distrito de Ananea, Puno	Mejora del proceso de molienda - Diámetro del molino (m) - Longitud del molino (m) - Tamaño de bolas (mm) - Potencia del motor (kw)	

## Anexo 2. Otros

**TABLA N° 9**  
**FACTORES DE SOBRECARGA  $K_0, C_0$**

FUENTE DE PODER	CARGA EN LA MAQUINA MOVIDA		
	UNIFORME	CHOQUE MODERADO	CHOQUE FUERTE
Uniforme	1,00	1,25	$\geq 1,75$
Choques pequeños	1,25	1,50	$\geq 2,00$
Choques medianos	1,50	1,75	$\geq 2,25$



**FIG. 18: FACTOR DINAMICO,  $C_v$**

**TABLA N° 12**  
**FACTORES DE DISTRIBUCION DE CARGA  $K_v, C_v$**

CONDICION DEL SOPORTE	ANCHO DE DIENTES							
	$\leq 50\text{mm}$		150mm		230mm		$\geq 400\text{mm}$	
	REC	HEL	REC	HEL	REC	HEL	REC	HEL
Montaje cuidadoso, juego pequeño de cojinetes, deflexión elástica mínima, engranajes de precisión	1,3	1,2	1,4	1,3	1,5	1,4	1,8	1,7
Montaje menos rígido, engranajes precisos, 100% de contacto	1,6	1,5	1,7	1,6	1,8	1,7	2,0	2,0
Montaje y precisión tal que no produzca contacto completo con el diente	más de 2,0							

REC=Engranajes cilíndricos de dientes rectos  
HEL=Engranajes cilíndricos de dientes helicoidales

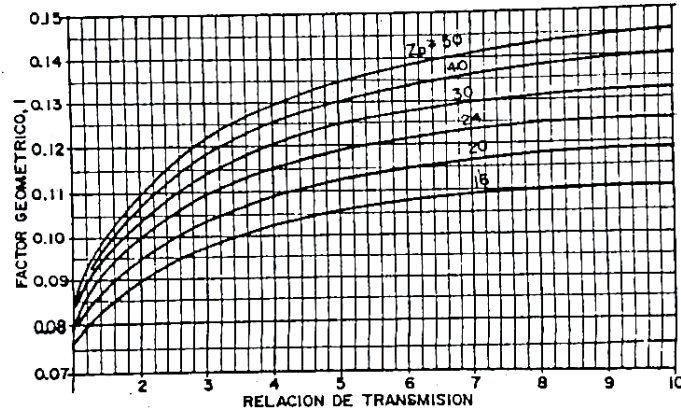


FIG. 23: FACTOR GEOMETRICO, I, PARA ENGRANAJES CILINDRICOS DE DIENTES RECTOS,  $\phi = 20^\circ$

TABLA N° 18  
COEFICIENTE ELASTICO,  $C_p$ , PARA ENGRANAJES RECTOS, HELICOIDALES Y BI-HELICOIDALES

MATERIAL DEL PIÑON	MODULO DE ELASTICIDAD (KGS/MM <sup>2</sup> )	MATERIAL DEL ENGRANAJE			
		ACERO	FD FDO	BRONCE ALUMINIO	BRONCE
Acero	$2,10 \times 10^4$	61	53	52	50
Fe Fdo.	$1,34 \times 10^4$	53	48	48	46
Bronce Aluminio	$1,23 \times 10^4$	52	48	46	45
Bronce	$1,14 \times 10^4$	50	46	45	44

\* Para engranajes cónicos al valor obtenido de esta tabla, multiplicar por 1,225

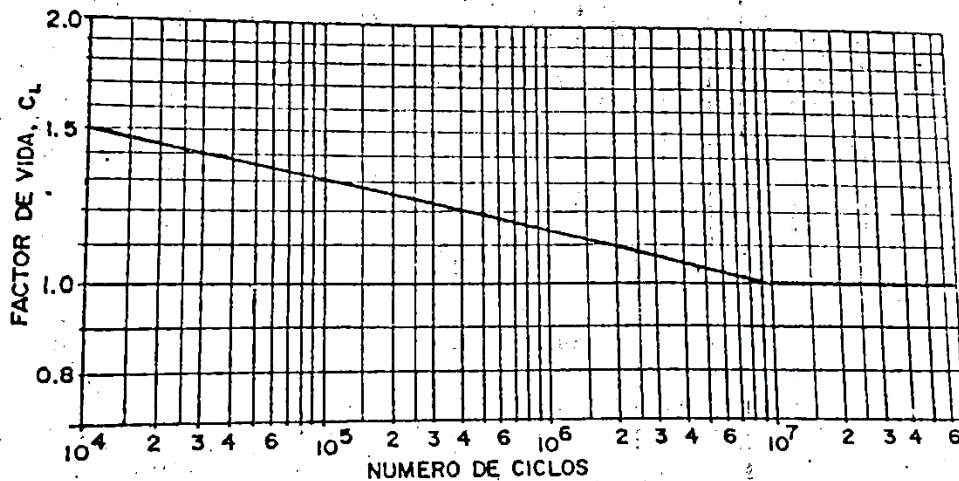


FIG. 32: FACTOR DE VIDA,  $C_L$



TABLA N° 20  
FACTOR DE SEGURIDAD,  $C_r$

REQUERIMIENTO	$C_r$
Alta confiabilidad	$\geq 1,25$
De 100 falla uno	1,00
De 3 falla uno	0,80

TABLA N° 6  
COMBINACIONES TÍPICAS DE DUREZA PARA PIÑONES Y ENGRANAJES

BHN PIÑÓN	BHN ENGRANAJE
210	180
245	210
265	225
285	245
300	255
315	270
335	285
350	300

TABLA N° 19  
ESFUERZOS PERMISIBLES DE CONTACTO,  $S_{ac}$

MATERIAL	DUREZA SUPERFICIAL MINIMA	Sac $F_{qs}/mm^2$
Acero endurecido en toda la sección del diente:	180 DHN	60 - 67
	220 DHN	69 - 72
	260 DHN	78 - 87
	300 DHN	87 - 97
	350 DHN	99 - 110
	400 DHN	110 - 123
Acero endurecido superficialmente por carburización:	55 Rc	127 - 141
	60 Rc	141 - 158
Acero endurecido superficialmente por inducción ó por llama	50 Rc	120 - 134
Fierro fundido: - AGMA grado 20 - AGMA grado 30 - AGMA grado 40	175 DHN	35 - 42
	200 DHN	46 - 53
	255 DHN	53 - 60
Fierro nodular: -Recocido -Normalizado -Templado en aceite y revenido	165 DHN	51 - 58
	210 DHN	60 - 67
	255 DHN	69 - 76
Bronce, AGMA 2c (10 - 12% Sn)	28,2 Kgs/mm <sup>2</sup>	21
Bronce-Aluminio ASTM B 148-52 (aleación 9C-HT)	63,0 Kgs/mm <sup>2</sup>	46



TABLA Nº 14  
ESFUERZOS PERMISIBLES PARA ENGRANAJES RECTOS, HELICOIDALES, BI-HELICOIDALES Y CONICOS

MATERIAL Y TRATAMIENTO TERMICO	DUREZA MINIMA O ESF. ROTURA MIN.	S <sub>a</sub> (Kgs/mm <sup>2</sup> )	
		RECTO, HELICOIDAL Y BI-HELICOIDAL	CONICO
Acero, normalizado	140BHN	13,4 - 17,6	7,7
Acero, templado y revenido	180BHN	17,6 - 23,2	9,9
Acero, templado y revenido	220BHN	20,5 - 27,0	11,1
Acero, templado y revenido	260BHN	23,1 - 30,3	12,2
Acero, templado y revenido	300BHN	25,4 - 33,1	13,4
Acero, templado y revenido	350BHN	27,6 - 36,3	14,8
Acero, templado y revenido	400BHN	29,5 - 39,2	16,2
Acero, templado y revenido	450BHN	31,0 - 41,5	17,6
Acero, endurecido superficialmente por carburización	55Rc	38,7 - 45,8	19,4
	60Rc	42,3 - 49,3	21,1
Acero, endurecido superficialmente por inducción ó templado en llama: -En todo el diente -Superficialmente	54Rc	31,7 - 38,7 * 15,5	9,5
	54Rc		
Acero, A7SI4140, endurecido superficialmente por nitruración	Capa dura: 53Rc nucleo: 300 BHN	26,1 - 29,7	14,1
fierro fundido: AGMA Grado 20 AGMA Grado 30 AGMA Grado 40	175 BHN	3,5	1,9
	200 BHN	6,0	3,2
	200 BHN	9,2	4,9
Fierro nodular, ASTM Grado: - 60-40-18, recocido - 80-55-06, recocido - 100-70-03, normalizado - 120-90-02, templado y revenido		10,6	5,6
		14,1	7,7
		18,3	9,0
		21,1	13,0
Bronce, AGMA 2c (10%-12%)Sn	28,2 Kgs/mm <sup>2</sup>	4,0	2,1

\* Valores para dientes con paso diametral 6 ó más

51

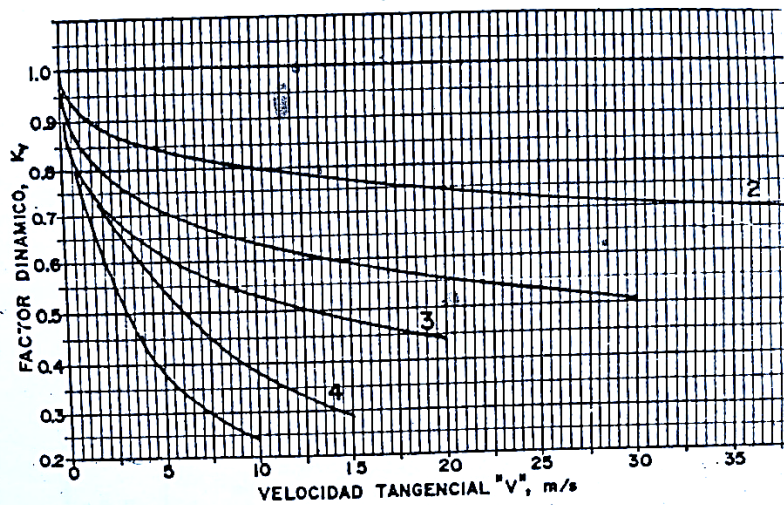


FIG. 1. FACTOR DINAMICO, K<sub>v</sub>

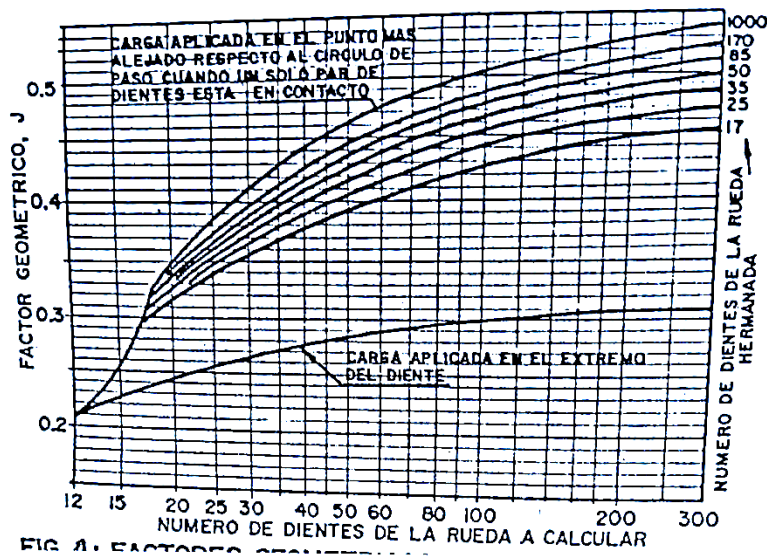


TABLA 15  
FACTOR DE VIDA,  $K_L$

NUMERO DE CICLOS	ENGRANAJES RECTOS, HELICOIDALES Y BI-HELICOIDALES				ENGRANAJES CONICOS CAPA DURA, CARBURIZAD. *
	160 BHN	250 BHN	450 BHN	CAPA DURA CARBURIZAD. *	
$10^3$	1,6	2,4	3,4	2,7	4,6
$10^4$	1,4	1,9	2,4	2,0	3,1
$10^5$	1,2	1,4	1,7	1,5	2,1
$10^6$	1,1	1,1	1,2	1,1	1,4
$10^7$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$10^8$	1,0-0,8	1,0-0,8	1,0-0,8	1,0-0,8	1,0

\* DUREZA DE LA CAPA DURA: 55-63 R<sub>c</sub>



**TABLA N° 16**  
**FACTOR DE SEGURIDAD RESPECTO A LA RESISTENCIA**  
**A LA FATIGA,  $K_f$**

REQUERIMIENTO	$K_f$
Alta confiabilidad	$\geq 1,50$
De 100 falla uno	1,00
De 3 falla uno	0,70



**ANEXO 1**  
**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN**

**AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV**

Formato digital:

Fecha de entrega: 19/12/2025

**1. Datos del autor (es):**

Nombres y Apellidos: Ronald Alex Lopez Choque

Dirección: Jr. Miraflores 1684- Juliaca

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 77047146

Teléfono: 925846039 email: ronaldlopezch25@gmail.com

Nombres y Apellidos: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: \_\_\_\_\_

Teléfono: \_\_\_\_\_ email: \_\_\_\_\_

Facultad y/o Escuela de Posgrado: Ingeniería y Ciencias Puras

Escuela Profesional o Mención: Ingeniería Mecánica Eléctrica

Título o Grado Académico a optar: Ingeniero Mecánico Electricista

Asesor: Ing. Adwar Ranulfo Sanchez Carreon

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:  
 Trabajo de Investigación  Tesis  Trabajo de Suficiencia Profesional  Trabajo Académico

Título: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOLINO DE BOLAS PARA MEJORAR EL PROCESO DE MOLIENDA EN MINERA LA RINCONADA DISTRITO DE ANANEA, PUNO 2024

Palabras claves, (3 a 5 términos): Diseño, molino de bolas, proceso de molienda, minera.

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV 1,2?  
2

1 Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entré otros relacionados.

2 Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

- Bachiller
- Título
- 2da Especialidad
- Maestría
- Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

**Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.**

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación. Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

**Autorizo su publicación (marque con una X)**

- Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.
- Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): \_\_\_\_\_
- No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

**¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?**

**Sí:** significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

**No:** significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

- Sí autorizo
- No autorizo



**Jurisdicción de su Licencia**

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción “internacional” o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción “internacional” emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción “internacional” goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

Internacional

Nacional

Línea de investigación: TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA – P18

Firma de Autor



huella digital

19 de Diciembre del 2025

Fecha