

**Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña**  
**Facultad de Ciencias y Tecnología**  
**Escuela de Química**



**“Diseño y construcción de un molino de bolas para el Laboratorio de Operaciones  
Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”**

**Trabajo de grado**

**presentado por:**

Yudith Rodríguez Jesús  
Estefanía Almonte Gómez

**Para optar por el título de:**

Ingeniero Químico

**Santo Domingo, Distrito Nacional**

**2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Gracias señor, porque has sido luz en mis pasos, fuerza en mi debilidad, tranquilidad en mi mente, sabiduría en mis decisiones, y respuesta en su tiempo a mis preguntas. Gracias, porque eres bueno, eterno es tu amor. Agradezco a ti señor por haber encontrado el amor, y compartir mi existencia con él, Raimer González.

A mis padres:

Narciso Rodríguez y Gregoria Jesús, este triunfo más que nada se los quiero dedicar a ustedes, ustedes hicieron todo lo posible para que yo hoy en día pudiera lograr uno de mis más grandes sueños. Gracias por darme la vida, por empujarme a seguir adelante en esos momentos que caí, por haberme motivado y darme la mano cuando sentí que ya no podía dar más. ¡Los amo!

A mis hermanos:

Juana, Francisco, José Luis, Luis José, Kelvin. Gracias por su apoyo, estímulo, palabras de superación, y oración, de manera especial a mi hermana Juana, y mi hermano Kelvin por hacerme olvidar con risas y aliento lo duro y tormentoso que a veces se me hacía este camino.

A mi abuela:

Ana Ramírez, porque mientras estuviste de paseo en esta tierra fuiste un gran ejemplo de amor para mí, aunque hoy no estás aquí carnalmente para celebrar este triunfo junto a mí, sé que está en espíritu viéndome desde el cielo orgullosa, y feliz por mí. Te amo y te amaré por siempre.

A mi amiga:

Rosalín Báez, por acompañarme en esta etapa tan bonita y a la vez difícil de mi vida, gracias por tus consejos, en mi corazón llevo grabado los mejores recuerdos de nuestra amistad. Contigo he compartido experiencias preciosas que jamás podré olvidar. No hay palabras para describir todo lo que significas para mí: Eres mi amiga, mi hermana, mi todo. Gracias por estar ahí para mí y fortalecerme cuando más lo necesite.

A mi comunidad de la iglesia (Camino Neo-Catecúmenal):

Porque siempre han estado ahí en mis momentos de angustia, y por apoyarme siempre con sus oraciones.

A mis asesores:

Ing. Doris Peña Calderón, y Ramón Pérez Romero, durante la realización de mi proyecto, ustedes han sido mi mano derecha y quienes me ha guiado en el complicado proceso. Gracias por darme todo el apoyo y motivación, por el cual llegué a concluir y desarrollar la tesis.

Por último y no menos importante, me agradezco a mí misma, por confiar en mi potencial, por luchar por este sueño, por trabajar incansablemente por cumplir esta meta y por creer que cuando más oscura esta la noche, es cuando más pronto esta por amanecer. Debo agradecerme por no perder la fe y por creer que Dios es grande y que su tiempo es perfecto.

**Yudith Rodríguez Jesús**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Gracias padre, porque todo lo haz hecho perfecto, porque aún en la incertidumbre me enseñaste de tu infinita misericordia, que solo tu enderezas mis pasos y cuidas de mí.

A mis padres Julio Almonte y Miguelina Gómez:

Por ser mi soporte vital, la demostración más pura y simple de amor, por ser mi fuente de fuerza y energía ante las adversidades, guerreros incansables, gracias infinitas. Esta demás decir que este logro es enteramente de ustedes, no hay palabras para expresar lo agradecida que estoy de llamar a estos admirables seres humanos papá y mamá, los amo.

A mis hermanos:

En especial a Julissa y Julio, gracias por el apoyo incondicional, por ser el epítome de padres adoptivos, por la certeza de sus palabras en cada corrección y por ser mi ejemplo a seguir.

A mi querido Al:

Mi caballero andante, mi más bonita casualidad, gracias por tu amor y entrega, por darle calma a este terremoto, aún tengo la acuarela esperando verte pintado de azul.

A mis asesores ing. Doris Peña e ing. Ramón Pérez:

Gracias por impulsarme a lograr esta meta, gracias por el empeño con el que realizan su labor, con sus enseñanzas han calado profundamente en mí.

**Estefanía Almonte Gómez**

## **ÍNDICE**

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
JUSTIFICACIÓN .....	20
OBJETIVOS .....	23
OBJETIVO GENERAL.....	24
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
PRIMERA PARTE.....	25
MARCO TEÓRICO .....	25
CAPÍTULO I ANTECEDENTES .....	26
I.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS MOLINOS .....	26
I.2 ESTUDIOS PRECEDENTES .....	27
CAPÍTULO II MARCO CONCEPTUAL.....	29
II.1 CLASIFICACIÓN DE LA MOLIENDA .....	29
II.2 FUERZAS DOMINANTES EN LA MOLIENDA .....	30
II.3 FACTORES QUE DETERMINAN EL TIPO DE MOLIENDA .....	30
II.3.1 VELOCIDAD DE GIRO .....	31
II.3.2 VELOCIDAD CRÍTICA .....	32
II.3.3 RELACIONES ENTRE LOS ELEMENTOS VARIABLES .....	32
II.3.4 TAMAÑO MÁXIMO DE LOS ELEMENTOS MOLEDORES .....	33
II.3.5 VOLUMEN DE CARGA .....	33
II.3.6 POTENCIA.....	34
II.3.7 TIPO DE MOLIENDA: HÚMEDA Y SECA .....	35
II.4 MOLINOS .....	36
II.4.1 MOLINOS A MARTILLOS.....	36

II.4.2	MOLINO DE RODILLOS.....	37
II.4.3	MOLINO DE BARRAS .....	38
II.5	MOLINO DE BOLAS .....	39
II.5.1	COMPONENTES DE LOS MOLINOS DE BOLAS.....	40
II.5.2	FUNCIONAMIENTO DEL MOLINO DE BOLAS .....	41
II.5.3	CUERPOS MOLEDORES .....	42
II.5.4	EFICIENCIA DE LOS MOLINOS DE BOLAS .....	42
II.5.5	TIPOS DE MOLINOS DE BOLAS.....	43
II.6	CALIZA.....	44
II.6.1	COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA.....	45
II.6.2	USOS DE LA CALIZA .....	46
CAPÍTULO III.	METODOLOGÍA .....	47
III.1	MATERIAL DE ESTUDIO .....	47
III.2	MÉTODO .....	47
III.3	PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	47
III.3.1	CRITERIOS DE PONDERACIÓN.....	48
III.4	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	49
CAPÍTULO IV.	DISEÑO.....	50
IV.1	POTENCIA TEÓRICA .....	50
IV.2	DIMENSIÓN DEL MOLINO .....	51
IV.3	VELOCIDAD DEL MOLINO .....	52
IV.4	SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR .....	54
IV.5	CARGA DE CALIZA Y DE BOLAS .....	56
IV.6	DIÁMETROS DE LOS CUERPOS MOLEDORES .....	56



IV.7 EJE Y COMPONENTES .....	59
IV.8 POTENCIA DE OPERACIÓN .....	63
IV.9 SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE TRACCIÓN .....	64
IV.9.1 CÁLCULOS DE FUERZAS SOBRE EL EJE Y DIAGRAMAS DE MOMENTO.....	65
IV.9.2 CÁLCULO Y SELECCIÓN DE COJINETES PARA LAS FLECHAS DISEÑADAS.....	72
SEGUNDA PARTE.....	75
PROTOTIPO FÍSICO Y ENSAYOS .....	75
CAPÍTULO V COMPONENTES DEL PROTOTIPO .....	76
CAPÍTULO VI DISEÑO EXPERIMENTAL .....	79
CAPÍTULO VII RESULTADOS .....	81
CAPÍTULO VIII ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	82
TERCERA PARTE .....	85
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES .....	85
CAPÍTULO IX CONCLUSIÓN.....	86
CAPÍTULO X RECOMENDACIONES .....	87
CUARTA PARTE .....	88
REFERENCIAS .....	88
QUINTA PARTE .....	94
ANEXOS .....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA II.1 COMPARACIÓN ENTRE MOLIENDA SECA Y HÚMEDA.....	36
TABLA II.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE MOLINO .....	44
TABLA II.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PIEDRA CALIZA. ....	46
TABLA III.1 CRITERIOS DE PONDERACIÓN EN LOS PARÁMETROS.....	48
TABLA III.2 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS EN LOS DISTINTOS MOLINOS DE BOLAS.....	49
TABLA IV.1 CONTAMINACIÓN Y CONSIDERACIONES DE MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DEL TAMBOR. ....	54
TABLA IV.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLICLORURO DE VINILO.....	55
TABLA IV.3 PESO DE LOS CUERPOS MOLEDORES SEGÚN SU DIÁMETRO. .....	57
TABLA IV.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACERO AL CROMO. ....	58
TABLA IV.5 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA. .....	64
TABLA IV.6 EQUIVALENCIA ENTRE LOS VALORES DE LA FIGURA IV.7 Y EL DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL EJE PARA EL ANÁLISIS DEL PLANO (X-Y). ....	68
TABLA IV.7 EQUIVALENCIA ENTRE LOS VALORES DE LA FIGURA IV.8 Y EL DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL EJE PARA EL ANÁLISIS DEL PLANO (X-Z).....	69
TABLA IV.8 DIÁMETRO MÍNIMO EN LOS PUNTOS CRÍTICOS DEL EJE CONDUCTOR. ....	72
TABLA V.1 PARTES MECÁNICAS DEL EQUIPO. ....	76
TABLA V.2 ELEMENTOS ELÉCTRICOS. ....	77

TABLA V.3 FICHA TÉCNICA DEL MOLINO DE BOLAS SEMIAUTÓGENO.  
..... 78

TABLA VII.1 RESULTADO DE ENSAYOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL. 81

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA II.1 DESCRIPCIÓN DE FUERZAS Y MOVIMIENTOS DENTRO DE UN MOLINO DE BOLAS.....	31
FIGURA II.2 MOLINO A MARTILLOS .....	37
FIGURA II.3 MOLINO DE RODILLOS.....	38
FIGURA II.4 MOLINO DE BARRAS. ....	38
FIGURA II.5 MOLINO DE BOLAS. ....	39
FIGURA II.6 PARTES DE UN MOLINO DE BOLAS. ....	40
FIGURA II.7 ZONAS DE MOVIMIENTO DENTRO DE UN MOLINO DE BOLAS .....	41
FIGURA II.8 PIEDRA CALIZA.....	45
FIGURA IV.1 DISEÑO DE ALERONES PARA EL INTERIOR DEL TAMBOR. ....	53
FIGURA IV.2 DIAGRAMA LONGITUDINAL DEL EJE CONDUCTOR.....	60
FIGURA IV.3 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA RUEDA SOBRE EL EJE CONDUCTOR. ....	60
FIGURA IV.4 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL EJE CONDUCTOR. ....	61
FIGURA IV.5 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA DISTRIBUCIÓN DE CARGA DEL TAMBOR COMO PARTÍCULA. ....	63
FIGURA IV.6 ESQUEMA DE FUERZAS EN EL EJE. ....	65
FIGURA IV.7 DIAGRAMA DE MOMENTO EN EL PLANO X-Y.....	68
FIGURA IV.8 DIAGRAMA DE MOMENTO EN EL PLANO X-Z .....	69
FIGURA IV.9 DIMENSIONES Y CLASIFICACIONES DE CARGA PARA COJINETES DE BOLAS DE RANURA PROFUNDA, DE UNA SOLA HILERA. ....	73

FIGURA IV.10 DISEÑO BASE DE PROTOTIPO DE MOLINO DE BOLAS A ESCALA.....	74
FIGURA VI.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE ENSAYOS DE MOLIENDA. ....	79
FIGURA VIII.1 TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS RETENIDAS EN LAS DIFERENTES MALLAS.....	82
FIGURA VIII.2 CANTIDAD DE PRODUCTO MENOR A 250 $\mu\text{M}$ .....	83
FIGURA VIII.3 CANTIDAD DE PARTÍCULAS MENOR A 75 $\mu\text{M}$ .....	84

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I GLOSARIO.....	94
ANEXO II TABLAS .....	94
TABLA 1. ÍNDICES DE TRABAJO DE MOLIENDA DE BOND.....	96
TABLA 2. FACTORES DE SERVICIO PARA TRANSMISIÓN POR CORREA V.....	96
TABLA 3. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS SEGÚN EL DIÁMETRO DE LOS CUERPOS MOLEDORES.....	97
TABLA 4. VALORES DEL FACTOR DE FORMA DE LEWIS Y PARA UN ÁNGULO NORMAL DE PRESIÓN DE 20° .....	98
TABLA 5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TENSIÓN EN METALES .....	99
TABLA 6. PARÁMETROS DEL FACTOR DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL .....	99
TABLA 7. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN EN LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN DEL ACERO .....	100
TABLA 8. FACTORES DE CONFIABILIDAD KE.....	100
TABLA 9. RECOMENDACIONES DE VIDA DE COJINETES.....	101
TABLA 10. PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MOLINO DE BOLAS .....	101
ANEXO III MANUAL DE USO .....	96
ANEXO IV MANUAL DE PRÁCTICAS .....	104
ANEXO V FIGURAS .....	110
FIGURA 1. PLANO ESTRUCTURAL DEL MOLINO DE BOLAS .....	125
FIGURA 2. PLANO ELÉCTRICO DEL MOLINO DE BOLAS .....	127
FIGURA 3. SELECCIÓN DE PARTÍCULAS MENORES A 20 MM PARA PRUEBAS M2, M3, M4 Y M5.....	128

FIGURA 4. COMPARACIÓN PARTICULAS TRITURADAS Y SIN TRITURAR, PRUEBA M1 .....	128
FIGURA 5. PESAJE DE BALINES Y TAMICES VACÍOS .....	128
FIGURA 6. LLENADO DE MOLINO Y PUESTA EN MARCHA .....	129
FIGURA 7. RESULTADO POSTMOLIENDA DE PRUEBAS M3, M5 Y M1 RESPECTIVAMENTE.....	129
FIGURA 8. RESULTADO POST MOLIENDA DE ARCILLA.....	129

## **INTRODUCCIÓN**



## INTRODUCCIÓN

La molienda es una operación unitaria, que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra, por medios mecánicos, hasta el tamaño deseado. Los métodos de reducción más empleados en las máquinas de molienda son compresión, impacto, frotamiento de cizalla y cortado.

El fraccionamiento del material es realizado en dos etapas: La primera, consiste en fraccionar sólidos de gran tamaño. Para ello se utilizan los trituradores o molinos primarios. Los más utilizados son: el de martillo, muy común en la industria cementera, y el de mandíbulas. La segunda etapa sirve para reducir el tamaño con más control, manejándose tamaños intermedios y finos. Para esta etapa el molino más empleado en la industria es el molino de bolas (Condori, 2015).

Los molinos de bolas a escala de laboratorio son utilizados para simular los procesos de molienda a nivel industrial, con la finalidad de optimizar la producción y mejorar la eficiencia energética de la operación, además de lograr la homogeneización, compactado y extrusión de numerosas muestras para su posterior tratamiento y análisis.

A lo largo de este trabajo se pretende realizar una revisión bibliográfica sobre la molienda de minerales, en específico, de roca caliza, así como las metodologías requeridas para la construcción de un molino de bolas semiautógeno a escala de laboratorio. Para ello, se describen en detalle los cálculos, los materiales a utilizar y el diseño final para la elaboración del mismo; posteriormente, también se habla sobre la construcción y puesta en marcha del prototipo. Cabe señalar que todo lo anterior se encuentra ejemplificado con la asistencia de trabajos y artículos enmarcados primordialmente en los últimos veinte años.

El desarrollo de este estudio se estructura en tres segmentos: el primero, el marco teórico dividido en tres secciones, el capítulo I conformado por la historia de la molienda según varios autores y la síntesis de diversos estudios precedentes. El capítulo II constituido por el

marco conceptual, en el cual se exponen los conceptos generales y específicos de esta investigación; y el capítulo III, describe la metodología y los aspectos prácticos como los parámetros de selección para la elaboración del modelo; por último, el capítulo IV, presenta los cálculos y el diseño del equipo.

El segundo segmento consta de los capítulos V, VI, VII, VIII donde se detalla la descripción del equipo y las instrucciones de funcionamiento, así como el diseño experimental e interpretación de los resultados. La tercera y última parte en donde se puntualizan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

**PLANTEAMIENTO**  
**DEL PROBLEMA**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La operación de molienda consiste esencialmente en producir unidades de masa inferior, a partir de trozos más grandes del material que se desea moler. Esta operación es generalmente necesaria bien sea para el caso de obtener polvos de una cierta finura, para homogeneizar productos de orígenes diferentes o para acelerar una reacción química. Por imposición de la naturaleza de la propia materia y por los tratamientos físicos y químicos que puedan seguirse, la molienda o pulverización es a menudo una operación compleja, bajo su apariencia de simplicidad (Dueñas & González, 2016).

Actualmente la molienda de minerales debe satisfacer los requerimientos específicos definidos por el mercado, de manera que el proceso sea eficiente y que se encuentre a la par con el nivel de productividad mensual o anual. Para lograr estos objetivos las industrias utilizan equipos experimentales que estiman los resultados óptimos en base al escalamiento de potencia, energía, toneladas de producto obtenido y el tamaño de los molinos.

Al realizar pruebas a partir de los molinos de bolas en los laboratorios, se percibe que las esferas tienen diferentes trayectorias e interactúan con los revestimientos de la carcasa y las partículas de mineral en forma distinta a las de un molino de bolas a gran escala. Adicionalmente, otro dilema entre estos equipos se encuentra en el uso de técnicas como el índice de trabajo de Bond y los factores de escalamiento, ya que son útiles para la molienda de partículas gruesas, pero pueden subestimar significativamente las necesidades de molienda por debajo de 100 micrómetros (Glencore technology , 2013).

Los avances que se proyectan en el laboratorio de operaciones unitarias II de la carrera de Ingeniería Química en la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, implican el desarrollo de nuevas tecnologías y sistemas, que favorecen la actualización y creación de métodos, los cuales principalmente buscan simplificar las operaciones industriales. Por esta razón, surge la necesidad de contar con equipos de simulación para el estudio de las operaciones asociadas a la minería y la metalurgia, además de facilitar el tratamiento de muestras provenientes de diversas matrices dentro del laboratorio.

## **JUSTIFICACIÓN**

## **JUSTIFICACIÓN**

Los molinos de bolas se han usado por muchos años en las plantas de procesamiento de minerales metálicos y no metálicos, probablemente con mayor incidencia en el primero de los nombrados. El objetivo principal del equipo es realizar la reducción de tamaño del material hasta uno adecuado para poder efectuar el proceso de concentración y/o de lixiviación (Michaud, 2016).

En la República Dominicana existen pocas industrias que en sus operaciones incluyen el uso de molinos de bolas, ya que estos son mayormente empleados en mineras o para la fabricación de cemento. Conforme a los datos suministrados por la Subdirección de Fiscalización Minera y Ambiental, durante los años 2017 y 2018, de los recursos minerales no metálicos producidos en el país, los de mayor valor económico son la roca caliza con una producción de 4,083,011 m<sup>3</sup> y 94,595 m<sup>3</sup> de yeso. Por su parte, la roca caliza se destaca como el único recurso que mantuvo incrementos interanuales sostenidos desde 2011 (MEM, 2019).

Hoy en día el crecimiento del sector minero está marcando la diferencia en el desarrollo e innovación de las técnicas de molienda en nuestro país, las cuales se venía practicando de manera empírica. Promoviendo la investigación en el caso particular de la caracterización de roca caliza, ya que en el proceso de la molienda no abundan muchas bases profundas, puesto que los estudios que se han realizado en el área de la trituración y molienda de minerales convergen más que todo en minerales como la grava, cuarzo, barita, entre otros (SBM, 2014).

Debido a este desarrollo tecnológico, el laboratorio de Operaciones Unitarias II, perteneciente a la carrera de Ingeniería Química en la UNPHU, ambiciona promover el análisis de las aleaciones existentes y la formación académica en minería, así como complementar el esquema de estudio que se enfoca en la parte teórica del mismo. Actualmente esto no ha sido posible a causa de que el área carece de dispositivos para la obtención de polvos, los cuales son esenciales para la obtención de aleaciones mecánicas por la técnica de pulvimetalurgia.

Al encontrar dicha limitación se justifica la realización de este proyecto, puesto que, desde el punto de vista de la ingeniería, se requiere del diseño y construcción de un molino de bolas a escala, basados en el planteamiento de criterios y parámetros necesarios para su óptimo funcionamiento; además de que se cubrirá la necesidad presentada, contribuyendo al desarrollo de investigaciones por parte de docentes y al enriquecimiento de los estudiantes.

## **OBJETIVOS**



## **OBJETIVOS**

A continuación, se describen los objetivos a alcanzar a lo largo de esta investigación y para la puesta en marcha del prototipo propuesto.

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno a escala para la pulverización de roca caliza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar y determinar los parámetros de operación óptimos para el diseño del molino en base a la carga de entrada.
- Diseñar y calcular los elementos mecánicos que componen el molino de bolas.
- Elaborar el modelamiento y detallar la estructura del molino.
- Construir y poner en funcionamiento el prototipo.
- Elaborar un manual de operación y de prácticas didácticas para el laboratorio de Operaciones Unitarias II.

**PRIMERA PARTE**  
**MARCO TEÓRICO**

## **CAPÍTULO I ANTECEDENTES**

Para el hombre primitivo, el trigo comenzó a ser indispensable por su fácil adquisición y por la escasez de carne. Como el trigo es de granos duros y casi imposible triturarlo con los dientes, el hombre tuvo que ingeniárselas para molerlo, así que con la ayuda de dos piedras comenzó esta labor de macerar el trigo, conservando íntegramente las cualidades nutritivas del grano. El resultado de esta molienda fue un polvo, que en la actualidad sirve para la fabricación del pan, uno de los principales alimentos de la humanidad.

Para facilitar la trituración del grano, el hombre inventó el molino, que facilitó la molienda y sustituyó al par de piedras de antaño. Primero se utilizó un sistema complicado, pues sobre un gran bloque de piedra fijo y plano se movía otra piedra redonda de gran peso. Esta última era movida por animales, esclavos o prisioneros (CANIMOLT, 2008).

### **I.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS MOLINOS**

En la investigación de Bolaños, presentada en 2006, se explica que en 1868 Alsing utilizó en Inglaterra el proceso de molienda para pulverizar sílex calcinados para la industria de la cerámica, de ahí el nombre de molino Alsing; el cual aún se utiliza para designar a los molinos de bolas de funcionamiento intermitente. Los primeros molinos de bolas de alimentación y rendimiento continuo parecen haber sido diseñados en 1876, y aunque no fue el primer constructor, el nombre de la firma Krupp ha estado unido siempre a este tipo de máquinas.

Según el autor, los molinos Krupp eran principalmente máquinas para realizar una molienda relativamente gruesa, y preferentemente fueron utilizados como preparadores. El molino se caracterizaba por la utilización de un tambor cilíndrico de longitud suficiente como para que la materia admitida por una de las extremidades fuera reducida completamente al tamaño deseado antes de salir por la extremidad opuesta. Este recibió algunas aplicaciones antes de 1890; pero es a partir de 1892 cuando fue comercializado bajo el nombre de molino acabador “Dana” en Europa y de molinos Mill “Gates” en U. S. A.

En lo que se refiere a la época actual, puede pensarse que la técnica de construcción y utilización de los molinos de bolas a alcanzado un puesto cuya duración no puede preverse, pero que sin embargo está caracterizada por la puesta en servicio de unidades cada vez más potentes, puesto que en menos de 30 años hemos pasado de 200 y 300 KW por molino a 600 KW y más (Bolaños, 2006).

## **I.2 ESTUDIOS PRECEDENTES**

En 2008 Alcántara J.R, plantea el diseño práctico de un molino de bolas para la obtención de grava. El modelo es llevado a cabo en base al análisis de relaciones y supuestos, con la finalidad de que sus resultados sean confiables en modelos industriales y a escalas. Esta investigación permite realizar modificaciones que desarrollen la eficiencia de los diseños como el caso del blindaje interno del tambor; el material, geometría y tamaño de los elementos moledores, así como el progreso de nuevas teorías, expresiones y consideraciones.

Un avance importante es el de Grueso y Herrera, en 2005, los cuales basados en simulaciones dinámicas describen el análisis estructural y la elaboración de todos los mecanismos que constituyen un molino de bolas compuesto de cuatro tambores, dispuestos en forma vertical, logrando la combinación del movimiento planetario y rotatorio para alcanzar el objetivo de alta eficiencia y capacidad conferido a los recipientes que contienen el material.

En ese mismo año, Ángulo G. sienta las bases, sobre la elaboración de un molino pendular para la trituración de arcillas, donde se ilustran aspectos de suma importancia como es la reducción del desgaste de sus componentes; con miras a disminuir la carencia en las operaciones de mantenimiento, además de mitigar el nivel de ruido y vibraciones transmitidos hasta un nivel mínimo.

Con la meta de mejorar la recuperación de mena en la Corporación Minera Ananea S.A, Condori en 2015 plantea la descripción teórica y los cálculos necesarios para el rediseño

de la transmisión de un molturador de bolas, con la intención de optimizar la fragmentación adecuada del mineral. En las conclusiones del estudio se redujo de manera significativa los desgastes causados durante la transmisión de movimiento, tomando en cuenta diferentes aspectos básicos en el cálculo de engranes, ejes, rodamientos, acoplamientos, selección del motor eléctrico y el reductor de velocidad.

Dueñas y González en 2016 presentan un proyecto acerca de la fabricación de un molino de bolas escalado, con el propósito de ofrecer al laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba, un recurso funcional y rápido para auxiliar el proceso de pulverización manual de arcilla seca, a fin de ser utilizado en la realización de prácticas de caracterización. Con la construcción del dispositivo se logró minimizar los tiempos de producción de polvos, en un 98.5% con respecto al proceso manual y se duplicó la cantidad de material pulverizado.

En este mismo orden, Cabeza Casco (2017) propone un molino de bolas a escala, el cual surge con el objetivo de obtener nuevas aleaciones mecánicas, partiendo de parámetros de molienda como la velocidad crítica, el tamaño de partícula y la potencia necesaria para operar. Como resultado de su diseño el equipo es capaz de soportar hasta 18 kg y de acuerdo con la distribución de las bolas es apto para alcanzar un tamaño de partículas de 20  $\mu\text{m}$ .

## **CAPÍTULO II MARCO CONCEPTUAL**

“La molienda es la última etapa del proceso de conminución, en esta las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión, ya sea en seco o como una suspensión en agua, también llamado pulpa. La molienda se realiza en molinos de forma cilíndrica que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como medios de molienda, los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la conminución de las partículas de mena” (Alcántara Valladares, 2008).

### **II.1 CLASIFICACIÓN DE LA MOLIENDA**

Bolaños en 2006 describe que la molienda se encuentra clasificada como se muestra a continuación:

- Molienda simple. En este tipo de molienda solo se convierte el material en elementos inferiores a una dimensión determinada, sin ninguna consideración de la granulometría interna del producto.
- Molienda forzada. En este tipo de molienda el producto molido debe tener claramente una cantidad de finos superior a un límite determinado; es decir, el producto molido debe presentar la máxima superficie posible dentro de un rango determinado.
- Molienda condicionada. En ocasiones, puede interesar obtener la menor cantidad posible de materiales supertriturados, bien porque sea necesario o bien porque sea perjudicial. Existen varios tipos de molienda condicional los cuales se verán a continuación.
- Molienda diferencial. Denominada selectiva, aplicada a productos estructuralmente heterogéneos, permite con ciertas precauciones aumentar la reducción de los componentes fiables algo más que la de los componentes más duros. De esta manera

es posible una selección más o menos gruesa, mediante clasificación volumétrica los resultados de la molienda diferencial son esencialmente función de la naturaleza física del material a tratar.

## **II.2 FUERZAS DOMINANTES EN LA MOLIENDA**

Andrea Blanco (2014), establece que los materiales y las sustancias a fragmentar se caracterizan para esta función, entre otras, mediante las propiedades siguientes:

- Molturabilidad: aptitud o facilidad para la fragmentación, normalmente relacionada con la energía necesaria o con la dificultad para su fragmentación.
- Abrasividad: carácter más o menos agresivo en cuanto al desgaste de los equipos y de los materiales entre sí. Se mide, normalmente, por el contenido en sílice, SiO<sub>2</sub>.
- Pegajosidad: cualidad de adherencia entre los materiales, que es función, normalmente, de la humedad y que se identifica también como pastosidad.

Las fuerzas que participan, normalmente, en un proceso de fragmentación son:

- Compresión.
- Frotación.
- Percusión o impacto.
- Abrasión.

## **II.3 FACTORES QUE DETERMINAN EL TIPO DE MOLIENDA**

Los elementos que se deben tener en cuenta según Cabezas Casco (2017) son:

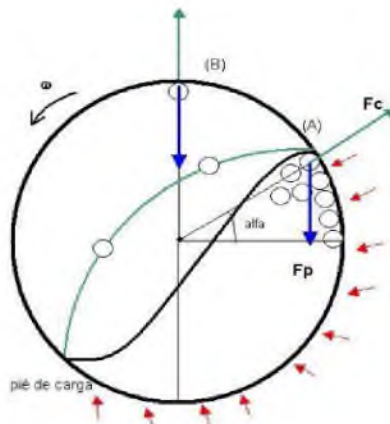
- Velocidad de giro.
- Velocidad Crítica.

- Relaciones entre los elementos variables de los molinos.
- Tamaño máximo de los elementos moledores.
- Volumen de carga.
- Potencia.
- Tipos de Molienda: húmeda y seca.

### II.3.1 VELOCIDAD DE GIRO

Es aquella velocidad de giro mínima alcanzada por el molino, de forma que la fuerza centrífuga creada es suficiente para conseguir que las partículas queden adheridas a los revestimientos del molino. Es lógico que si queremos moler el mineral; la velocidad a la que gire el molino deberá estar por debajo de dicha velocidad crítica, normalmente viene definida a través de un porcentaje de su velocidad crítica (Martínez, 2011).

**Figura II.1** Descripción de fuerzas y movimientos dentro de un molino de bolas.



Fuente: (Andrea Blanco, 2014).

La fórmula de la velocidad de giro esta dado por:

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad \text{Ec. ( II.1)}$$

Donde:

$N_c$  = velocidad de giro en rpm.

$D$  = Diámetro interior del molino en m.



### II.3.2 VELOCIDAD CRÍTICA

Según el informe Industrias I (2017), la velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan pegados a las paredes internas del molino y no ejercen la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda, ni la de percusión.

$$N = N_c * \% \text{ de giro} \quad \text{Ec. (II.2)}$$

La velocidad real del molino se suele fijar en un porcentaje de esta velocidad crítica y varía entre el 60% y el 80% normalmente. El punto de máximo rendimiento, medido por la potencia necesaria para accionar el molino, está en el entorno del 75% y se suelen utilizar velocidades de rotación de 65-70% para los molinos de bolas y de 50-70% para los molinos de barras (Andrea Blanco, 2014).

### II.3.3 RELACIONES ENTRE LOS ELEMENTOS VARIABLES

Las variables principales al momento de realizar la molienda son: la velocidad crítica, el diámetro interno del molino y los cuerpos moledores se debe tener en cuenta que en el proceso de molienda se emplea diámetros de diferentes cuerpos moledores (Andrea Blanco, 2014), por esto la relación entre los diámetros confiere la variabilidad del nivel de molienda en los materiales, ya que:

- Mayor diámetro de los cuerpos moledores, mayor rotura de partículas grandes.
- Menor diámetro de los cuerpos moledores, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores.
- Diámetro mayor de los cuerpos moledores, mejora la molienda de un material duro.

- Para igual molienda, a mayor diámetro del molino o mayor velocidad, menor el diámetro necesario de bolas.

### II.3.4 TAMAÑO MÁXIMO DE LOS ELEMENTOS MOLEDORES

En los molinos de barras y bolas los elementos molidores poseen distintos tamaños, para su diseño se parte de un diámetro máximo y se realiza una distribución de los mismos en tamaños inferiores. Es importante el tamaño ya que los cuerpos molidores deben ser de mayor volumen referente al volumen de las partículas a moler, se estima una relación 3 a 1 para producir la reducción del volumen de las partículas y obtener polvos metálicos. Su tamaño también varía de un diámetro mayor a un diámetro menor con el fin de obtener un polvo metálico más fino (Cabezas Casco, 2017).

Diferentes materiales son utilizados como medios abrasivos, incluyendo bolas cerámicas, guijarros de sílex y bolas de acero inoxidable. Para determinar el diámetro máximo se aplica la siguiente fórmula:

$$D_b = 0.1 \sqrt{\frac{F * E_t}{K * n_r}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\sqrt{D}}} \quad \text{Ec. (II.3)}$$

Donde: El tamaño de alimentación se representa por la letra F,  $E_t$  es igual a  $W_i$ , K es una constante adimensional,  $n_r$  es el porcentaje de la velocidad crítica,  $\rho_s$ : peso específico del material a moler; y D es el diámetro interno del molino.

### II.3.5 VOLUMEN DE CARGA

El volumen de carga es un factor que afecta directamente al rendimiento del molino porque comprende la proporción del volumen interno del molino que ocupa la carga, el material a moler y elementos molidores. El grado de llenado, en la elaboración de la molienda comprende generalmente el 45% y lo forman cuerpos molidores y el material a moler (Industrias, 2017).

$$V_m = \frac{\pi D^2 L}{4} \quad \text{Ec. (II.4)}$$

Donde: D es el diámetro interior del tambor y L es la longitud del molino, en metro.

Este grado de llenado, en la práctica está comprendido entre el 40% y el 55%, habitualmente el 45%, y lo forman bolas o barras y el propio mineral a moler. El volumen ocupado, lo producen normalmente los elementos molturadores y entre estos se introduce el material a moler, siendo estos huecos entre las barras o las bolas el concepto utilizado para obtener el peso del material molturador (Andrea Blanco, 2014).

El óptimo llenado del molino depende del tipo de molienda que se lleva a cabo y la potencia invertida en el proceso. Normalmente el volumen ocupado por material procesado con respecto al total del molino representa entre un 20 y un 25% (Ortíz, 2020).

### II.3.6 POTENCIA

Hoy en día existen modelos empíricos, cada uno eficaz en su rango de trabajo, que pueden aproximarse a los valores reales de molienda, es por ello que la decisión de la potencia a suministrar al equipo de molienda se ha fundamentado fuertemente en la experiencia, desarrollada en base a correlaciones empíricas muy útiles para predecir el comportamiento del equipo de molturación a partir de la incompleta teoría disponible.

Una de las expresiones más usadas es la expresión de Bond, quien postuló en su ley que el trabajo que se requiere para formar partículas de un cierto tamaño D a partir de una alimentación muy grande es proporcional a la raíz cuadrada de la relación superficie/volumen del producto (Alcántara Valladares, 2008).

$$Pt = m(0.3162)Wi\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right) \quad \text{Ec. (II.5)}$$

Donde:  $P_t$  es la potencia de trituración, expresada en KWh por tonelada del material a pulverizar;  $F$  es el tamaño del material de alimentación, en mm; el tamaño del material pulverizado  $P$  se encuentra dado en mm;  $W_i$  es conocido como el índice de trabajo de molienda de Bond; y la variable  $m$  es la cantidad de material de alimentación, en toneladas.

El índice de trabajo de molienda da los KW que hay que aplicar para desmenuzar una tonelada corta, 907 Kg, de material de tamaño de grano teóricamente ilimitado. El índice es válido para molinos de bolas que trabajen por vía húmeda. Para molienda vía seca el valor de  $W_i$  se ha de multiplicar por 1.30 (Duda, 1997).

Para el cálculo de la potencia real del molino es necesario el uso del factor de servicio, F.S, este es un indicador de la capacidad de sobrecarga que puede soportar un motor eléctrico; sin embargo esto no quiere decir que tenga que trabajar continuamente a ese valor, el factor debe entenderse como una capacidad adicional que posiblemente se llegue a ocupar en muy raras ocasiones, de hecho los motores sobrecargados reciben mayor corriente eléctrica que la nominal, calentándose en mayor medida y reduciendo notablemente su vida útil, además de bajar la eficiencia de su operación (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010).

$$\text{Potencia máxima en sobrecarga} = F.S \times P_t \quad \text{Ec. (II.6)}$$

### **II.3.7 TIPO DE MOLIENDA: HÚMEDA Y SECA**

Conocer todas las propiedades físicas y químicas de los materiales a pulverizar es importante al momento del diseño de un sistema de molienda, y esto está definido por distintos elementos que involucran la operación en seco o en húmedo.

Se considera vía seca para una molienda de materiales prácticamente secos, que contengan de 2 a 30% de agua, y vía húmeda a materiales que forman una pulpa, de 30-300 % de agua (Universidad Politécnica de Cartagena, 2014). A continuación, se presenta una comparación de ambas operaciones:

**Tabla II.1** Comparación entre molienda seca y húmeda.

<b>Molienda húmeda</b>	<b>Molienda seca</b>
Menor potencia por kilogramo de material.	Mayor potencia por cada kilogramo de material.
Disminución de ruido, facilidad de transporte y menos polvo.	Ruido excesivo.
Mayor consumo de revestimiento y cuerpos moledores	Menor consumo de revestimiento.

Fuente: (Cabezas Casco, 2017).

Cabezas Casco (2017), explica que el mayor rendimiento de los molinos se consigue en seco, además este rendimiento puede mejorar con una humedad del 1%, lo que permite la rotura de granos de una forma más rápida.

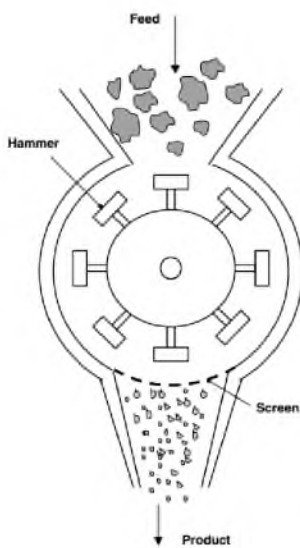
## **II.4 MOLINOS**

La Real Academia Española define la palabra molino como todo ingenio, artefacto o maquinaria que sirve para moler utilizando una energía, sea la fuerza del viento o del agua, o un motor, sea térmico o eléctrico. Existen varios tipos según sus distintas aplicaciones, los más importantes son: a martillo, de rodillos, barras y de bolas.

### **II.4.1 MOLINOS A MARTILLOS**

Se basan en un eje horizontal giratorio del cual cuelgan articuladas, con oscilación libre, unas piezas metálicas, llamadas martillos, que golpean el material a moler al obligar a éste a pasar por los intersticios que quedan entre las paredes cilíndricas del molino, el eje y los propios martillos. La producción que permiten es mayor que la de los pulverizadores, presentándose entre 1 y 60 ton/h; pero la finura media que se puede obtener con ellos es bastante basta, del orden de 1 mm (Angulo García, 2005).

**Figura II.2** Molino a martillos.



Fuente: (Barbosa & Ortega, 2005).

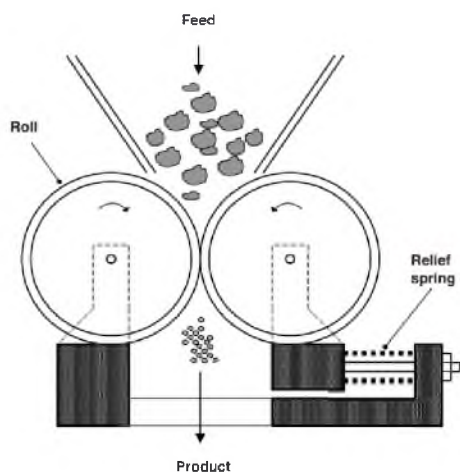
Este tipo de molinos también se emplea para la pulverización de materias poco resistentes a los golpes, pero además sirve también para materias de dureza media, como pueden ser los calcáreos y otras materias minerales (Alcántara Valladares, 2008).

#### **II.4.2 MOLINO DE RODILLOS**

Estos molinos constan de unos rodillos dispuestos horizontalmente sobre una pista situada en la parte inferior del molino y contra la cual producen el aplastamiento del material, por el propio giro de los rodillos, que va siendo suministrado por un alimentador que se encuentra por encima de ellos.

Las producciones que se pueden obtener con ellos son elevadas, hasta las 40 Ton/h; y las finuras son también más que aceptables, con valores de residuo que pueden llegar a ser del orden de tan sólo un 1% del material molido con granulometría superior a 60 micras (Angulo García, 2005).

**Figura II.3** Molino de rodillos.

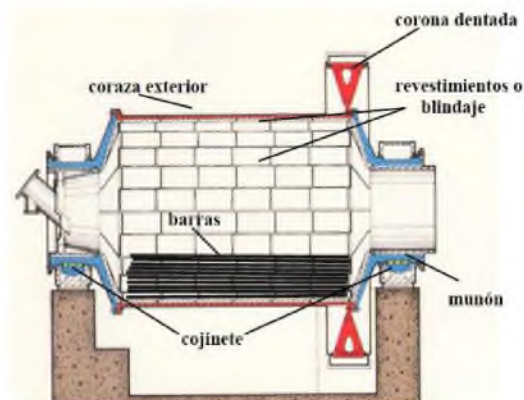


Fuente: (Barbosa & Ortega, 2005).

### II.4.3 MOLINO DE BARRAS

Los molinos de barras son grandes tubos cilíndricos, dispuestos horizontalmente. Están contruidos a base de planchas de acero, protegidas contra el desgaste y la corrosión por revestimientos metálicos intercambiables. La cámara cilíndrica gira alrededor de su eje horizontal apoyada en los extremos sobre unos cojinetes cilíndricos que descansan sobre unos soportes. Están contruidos por cuerpos molidores en forma de barras, que Están fabricadas de acero con alto contenido en carbono. Poseen un alto límite elástico para evitar que se tuerzan las barras evitando que se rompan o se traben con otras barras (Martínez, 2011).

**Figura II.4** Molino de barras.



Fuente: (Martínez, 2011).

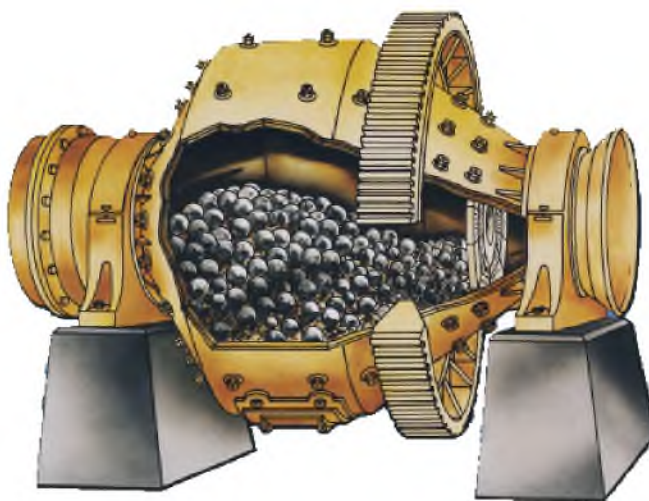
## II.5 MOLINO DE BOLAS

Los molinos de bolas tienen una capa cilíndrica o cónica que gira sobre un eje horizontal, y se cargan con bolas bien sea de acero, pedernal o porcelana, como medio de molienda. La alimentación en los molinos de bolas debe ser de 2.4 a 4 cm para materiales muy frágiles, pero por lo general el tamaño máximo es de 1.3 cm, valores que han sido obtenidos por medio de ensayos experimentales. La mayor parte de los molinos de bolas operan con una razón de reducción de 20:1 a 200:1 (Alcántara Valladares, 2008).

La operación de molienda se realiza en varias etapas; La primera etapa es la de fraccionar sólidos de gran tamaño, para la cual son utilizados los trituradores o molinos primarios, aquí los más usados son: el de martillos y el de mandíbulas (Martínez, 2011).

La segunda etapa es la de reducción de tamaño, esta etapa se lleva a cabo con más control, manejándose tamaños intermedios y finos. Para esta etapa el molino más empleado en la industria es el molino de bolas. El molino de bolas lleva a cabo la mayor parte de la reducción por impacto. Cuando este gira sobre su propio eje, provoca que las bolas caigan en cascada desde la altura máxima del molino. Esta acción causa un golpeteo sobre el material a moler; además de un buen mezclado del material (Alcántara Valladares, 2008).

**Figura II.5** Molino de bolas.



Fuente: (Wordpress, 2014).

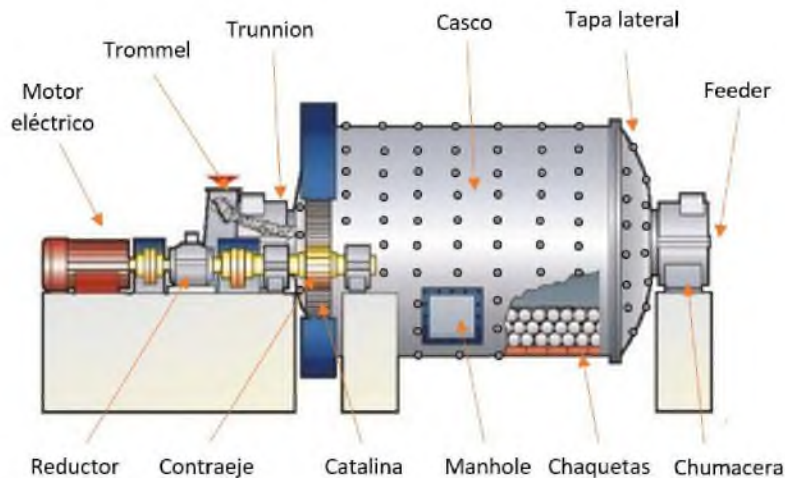


El molino de bolas es una herramienta vital para rectificar materiales que ya han sido triturados. Actualmente, es utilizado en muchas industrias como la de cemento, materiales a prueba de fuego, productos de silicato, materiales para la construcción, cerámica, entre otros; también por su bajo consumo de energía. El molino de bolas mantiene una estructura simple comparada con otros molinos, una fácil instalación, largo tiempo de operación con alta capacidad, las partes que se desgastan son resistentes y con larga vida útil, y su producto de molienda mantiene una muy buena calidad (Shanghai Xuanshi Machinery Co, 2014).

### II.5.1 COMPONENTES DE LOS MOLINOS DE BOLAS

Las partes principales de un molino de bolas según Cabezas Casco (2017) son:

**Figura II.6** Partes de un molino de bolas.



Fuente: (Gamboa Montalvo, 2017).

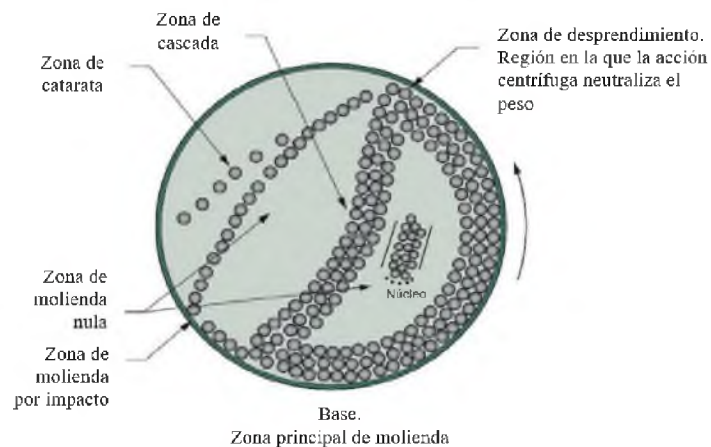
- Coraza: parte exterior resistente de forma cilíndrica.
- Carga y descarga: abertura central por donde ingres el material a moler.
- Rodamientos: componente que ayuda el movimiento de giro.
- Bancada: sostiene de los elementos del molino.

- Muñón. Sistema de accionamiento.
- Rejilla: elemento interno de clasificación, puede o no existir en determinados modelos o instalaciones.
- Blindajes o chaquetas: protege la carcasa del molino, ayuda al efecto de molienda y facilita la disminución del ruido, entre otros.
- Sistema de acoplamiento: corresponde al piñón y corona con el molino.

## II.5.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOLINO DE BOLAS

El molino de bolas es ampliamente utilizado para la molienda de diferentes tipos de minerales o rocas con metales o la minería no metálica. Un molino de bolas funciona por el giro del cilindro con bolas de acero. Así molen la materia prima hasta la fina necesaria. La rotación suele ser de 4 a 20 revoluciones por minuto, dependiendo de la capacidad de la planta concentradora. La regla es lo más grande del tamaño de producto que requiere, lo más lenta será la rotación (Minera Tintaya, 2012).

**Figura II.7** Zonas de movimiento dentro de un molino de bolas.



Fuente: (Minera Tintaya, 2012).

Cuando el molino gira sobre sus chumaceras, por acción del motor, las bolas junto con el mineral son elevados por la rotación y por la forma ondulada de los revestimientos interiores. El mineral junto con las bolas de acero sube hasta una altura determinada, de donde posteriormente caen, golpeándose entre sí y contra las chaquetas. El ciclo se repite, cuando vuelven a subir y bajar, el mineral junto con las bolas, dando como resultado el proceso de molienda (Hinojosa, 2017).

### **II.5.3 CUERPOS MOLEDORES**

Los molinos necesitan el empleo de elementos que favorezcan el trabajo de molienda. Estos elementos o cuerpos moledores suelen ser:

- Barras: Están fabricadas de acero con alto contenido en carbono. Poseen un alto límite elástico para evitar que se tuerzan las barras evitando que se rompan o se traben con otras barras. Los molinos de barras se emplean para moliendas más gruesas.
- Bolas: Pueden estar fabricadas de acero de fundición, acero forjado y éste puede estar aleado al Cr-Mo, para ser resistentes al desgaste por impacto o aleado con Ni, para ser resistentes a la abrasión. En ocasiones no son esféricas, sino que toman formas cilíndricas, troncocónicas, entre otros.

Los molinos de bolas se emplean para moliendas finas y pueden accionarse en base al propio mineral, siendo este el cuerpo moledor, denominando la molienda como autógena AG; o un porcentaje de mineral y otro de bolas, llamada molienda semiautógena o SAG (Universidad Politécnica de Cartagena, 2014).

### **II.5.4 EFICIENCIA DE LOS MOLINOS DE BOLAS**

Entre los factores que afectan la eficiencia de los molinos de bola según Alcántara Valladares (2008), se encuentran:

- Densidad del material de alimentación; debería ser lo más alta posible, pero garantizando un flujo fácil a través del molino.
- El contacto metal-metal disminuye la eficiencia.
- El rango de operación normal de los molinos de bolas es entre 65% a 80% de sólidos en peso.
- La carga de bolas y mineral equivalente al 50% del volumen del molino, resulta la capacidad máxima.
- Las bolas de tamaño mínimo capaces de moler el material alimentado dan una eficiencia máxima.
- Los ciclos cerrados en los molinos de bolas ofrecen una mejor producción en cuanto a ciclos abiertos, aunque éstos últimos permiten en mayor control del proceso y del producto cuando no se requieren producciones considerables o de nivel industrial.
- En el trabajo en seco la eficiencia y capacidad se mejora con cargas ligeras de minerales. Así mismo se reduce los requisitos de potencia al disminuir dicha cantidad dentro del molino.

### **II.5.5 TIPOS DE MOLINOS DE BOLAS**

Entre los tipos molinos de bolas más importantes encontramos: el planetario, attritor, de tambor, de bolas de alta energía. A continuación, en la tabla II.2, se describen brevemente sus principales ventajas y desventajas.

**Tabla II.2** Ventajas y desventajas de los tipos de Molino.

<b>Tipo</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Planetario	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trituración rápida y potente.</li> <li>- Molienda en seco.</li> <li>- Velocidades de impacto altas.</li> <li>- Facilidad de carga y descarga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desgaste de las paredes del molino y en las bolas.</li> <li>- Costo elevado de elaboración.</li> </ul>
Attritor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran velocidad de impacto</li> <li>- Fácil construcción.</li> <li>- Fácil Mantenimiento.</li> <li>- Sistema sencillo.</li> <li>- Obtención de granulometrías muy finas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo del sello para mantener el vacío.</li> <li>- Mantener un sistema de refrigeración.</li> <li>- Pérdida abundante del material a alear.</li> <li>- Desgaste de impulsores y bolas.</li> <li>- Contaminación del material a alear.</li> </ul>
Tambor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Molienda rápida y potente.</li> <li>- Grandes cantidades de muestra.</li> <li>- Operación con barras o bolas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material previamente triturado.</li> <li>- Contaminación del material a alear por desgaste de los medios moledores.</li> </ul>
Alta energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempos cortos de molienda.</li> <li>- Obtención de aleaciones nanométricas.</li> <li>- Moliendas de máxima intensidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo elevado de elaboración.</li> <li>- Contaminación del material a alear por desgaste de los medios moledores.</li> </ul>

Adaptado de: (Grueso & Herrera, 2005) y (Davis, 2001).

## II.6 CALIZA

La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio, generalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita y otros carbonatos (Klein & Hurlbut, 1998). También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita o cuarzo que modifican el color y el grado de coherencia de la roca.

**Figura II.8** Piedra caliza.



Fuente: (Maldonado, 2019)

El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita: es menos dura que el cobre, su dureza en la escala de Mohs es de 3, y reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico.

Otras propiedades importantes de la roca caliza son: la resistencia a la compresión, al aplastamiento o molturabilidad oscila entre 98.4 y 583.5 kg/cm<sup>2</sup>, es ligeramente abrasiva con un índice de abrasividad de 0.5 - 1.0; la caliza comercial secada al aire en las condiciones ordinarias tiene una densidad de 1.922 kg/dm<sup>3</sup>, en condiciones de humedad, la densidad bruta puede ser de 2,9 kg/dm<sup>3</sup> (Guerrero, 2001)

### **II.6.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA**

Mineralógicamente una caliza es dominada por calcita, más del 50%, aragonito, y carbonato de magnesio, sin embargo, también puede haber cantidades menores de cuarzo, minerales arcillosos, feldespatos, siderita y algún sulfuro como la pirita. Normalmente el carbonato de calcio puede ser formado por la acumulación de caparzones y conchas de organismo vivos o por precipitación química directa desde soluciones acuosas (Maldonado, 2019).

**Tabla II.3** Composición química de la piedra Caliza.

<b>% de dolomita (Magnesio)</b>	<b>% de calcita (Calcio)</b>	<b>Tipo de roca</b>
0 – 10	90 – 100	Caliza
10 – 50	50 – 90	Caliza dolomítica
50 – 90	10 – 50	Dolomía calcárea
90 – 100	0 -10	Dolomía (roca dolomítica)

Fuente: (Maldonado, 2019).

## **II.6.2 USOS DE LA CALIZA**

La caliza, cortada, tallada o desbastada, se utiliza como material de construcción u ornamental, ejemplos de este uso son numerosos edificios históricos, desde las pirámides de Egipto hasta la Catedral de Burgos (Bustillo Revuelta & Calvo Sorando, 2001).

Luego de su pulverización la roca descubre uno de sus usos más relevantes y es la producción de carbonato de calcio, esencial en la industria del plástico y de cauchos. El producto utilizado en estas áreas posee una granulometría retenida en las mallas 200 o 325, es decir 75 o 45 micras (Coordinación General de Minería, 2013).

El carbonato también es utilizado en la producción de agroquímicos, ya que es altamente recomendado para suelos ácidos, con bajo pH. Estos productos requieren que las partículas de caliza posean tamaño donde el 100% pase a través de la malla de 0,25 mm; 95% por la malla de 0,12 mm y 75% a través de la malla de 0,06 mm (TERRALIA, 2018).

Otros productos dentro de la gama de la caliza se encuentra la cal micronizada, la cual es una cal finamente molida, con un tamaño máximo de partícula desde 30 micras a 250 micras. Esta cal permite mejorar la reactividad y la solubilidad de la cal con granulometrías convencionales, 0-2 mm, y hace idóneo su uso en la industria del cemento (Cementos Tudela Veguín S.A., 2015).

## **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA**

La presente sección corresponde a la descripción de la investigación y la puntualización de los principales parámetros que van a ser decisivos para el diseño y puesta en marcha del prototipo.

### **III.1 MATERIAL DE ESTUDIO**

Unidad de estudio: Molino de Bolas a escala de laboratorio.

Área de estudio: Diseño y construcción de un molino de bolas para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II.

### **III.2 MÉTODO**

El presente trabajo es de tipo experimental, debido a que los datos están basados en manipular una o varias variables independientes para conocer su efecto sobre la variable dependiente. Como diseño en esta investigación se utilizará el comparativo y el muestreo estará basado en la molienda de piedra caliza.

### **III.3 PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

Tomando como fundamento las investigaciones realizadas en el marco teórico, se evaluarán en cada tipo de molino de bolas, los siguientes parámetros para la selección de alternativas que cumplan con los requerimientos del Laboratorio:

- Tamaño de partícula: Es de suma importancia el tamaño de partícula a obtener, ya que de esta dependen las propiedades mecánicas que se buscan alcanzar.



- Tiempo de molienda: El tiempo de molienda tiene una correlación directa y proporcional con el consumo energético, a mayor tiempo de molienda mayor será el costo energético.
- Tipo de molienda: El rendimiento de los molinos aumenta cuando se utiliza una humedad del 1% con el fin de disminuir ruido y la facilidad de reducir el volumen del material, además se debe considerar con algunas excepciones que se puedan producir oxidación o contaminación del material (Cabezas Casco, 2017).
- Potencia requerida: Para efectuar la operación de molienda, se debe tener en cuenta la potencia necesaria, la cual es clave para los requerimientos de trabajo del molino y el tiempo de molienda.
- Costo: es necesario considerar los costes como el energético, que va en función con la potencia que requiera el molino; de mantenimiento, en el cual se consideran los elementos que se puedan adquirir en el entorno y los costes de construcción.

### III.3.1 CRITERIOS DE PONDERACIÓN

Para la evaluación de los parámetros: tamaño de partícula obtenido al final de la operación, tiempo de molienda, tipo de molienda, potencia requerida y costos se valorarán conforme a los siguientes criterios:

**Tabla III.1** Criterios de ponderación en los parámetros.

Parámetro	Criterio	Valoración
Tamaño de partícula	Muy fino, tamaño $\leq 5 \mu\text{m}$	5
	Fino, tamaño [ $> 5 \mu\text{m}, \leq 20 \mu\text{m}$ ]	3
	Grueso, tamaño $\geq 20 \mu\text{m}$	1
Tiempo de molienda	Rápido, tiempo $< 1$ hora	5
	Normal, tiempo 1 hora	3
	Lento, tiempo $> 2$ horas	1

Continuación **Tabla III.1** Criterios de ponderación en los parámetros.

Parámetro	Criterio	Valoración
Tipo de molienda	Húmeda y seca	5
	Seca	1
Potencia requerida	Alta, potencia > 1 HP	1
	Media, potencia [0.5 HP, 1 HP]	3
	Baja, potencia < 0.5 HP	5
Costos	Alto	1
	Medio	3
	Bajo	5

Fuente: (Cabezas Casco, 2017).

### III.4 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

A continuación, se procederá a ponderar los parámetros de las alternativas consideradas anteriormente, además de tomar en cuenta las ventajas y desventajas de los tipos de molinos descritos en la tabla III.2.

**Tabla III.2** Evaluación de parámetros en los distintos molinos de bolas.

Parámetro	Planetario	Attritor	Tambor	Alta energía
Tamaño de partícula	Muy fino	Fino	Fino	Muy fino
Tiempo de molienda	Rápido	Normal	Normal	Rápido
Tipo de molienda	Seca	Húmeda y seca	Húmeda y seca	Seca
Potencia Requerida	Media	Media	Media	Alta
Costo energético	Medio	Medio	Medio	Alto
Costo Mantenimiento	Alto	Medio	Bajo	Alto
Costo de construcción	Alto	Medio	Medio	Alto
<b>Total Ponderado</b>	19	23	<b>25</b>	15

Fuente: (Cabezas Casco, 2017).

Como resultado de la evaluación queda seleccionado el molino de tipo tambor semiautógeno, con cuerpos molidores de acero, para cumplir con los requerimientos de costo y prolongación de vida útil exigido por el laboratorio.

## CAPÍTULO IV. DISEÑO

Una vez seleccionado el tipo de molino a diseñar, esta sección se verá enfocada en primera instancia, en el planteamiento del motor eléctrico. Posteriormente, se determinarán las dimensiones de molino y el diámetro de los cuerpos moledores, además del diseño de los ejes y del sistema de transmisión del prototipo.

### IV.1 POTENCIA TEÓRICA

La potencia de teórica para la reducción de tamaño de partícula está expresada como los kW por tonelada corta del material a pulverizar, 907 Kg; para determinar dicha potencia es necesario establecer el tamaño del material de alimentación y se debe asignar el tamaño mínimo del material pulverizado a tamizar, para esta investigación se utilizará un orden máximo de 20 mm para la alimentación y para el producto es de 75  $\mu\text{m}$ .

El valor del índice de trabajo se toma del anexo II, tabla 1, multiplicado por el factor 1.3 para una molienda por vía seca (Alcántara Valladares, 2008). Por último, se fija la cantidad de material de alimentación, ya que es un factor determinante en el cálculo de la potencia y que será de 1 Kg aproximadamente. Partiendo de la ecuación II.5, donde sus variables toman los siguientes valores:  $F= 20 \text{ mm}$ ,  $P= 0.075 \text{ mm}$ ,  $W_i= 10.18 \times 1.3= 13.234 \text{ KWh}$ ; y  $m= (1.0 \text{ Kg})/ (907 \text{ kg}) = 0.0011 \text{ ton}$ .

Para para un motor de clase 2, según el anexo II, tabla 2, se utilizará un F.S de 1.6, obteniendo así la potencia máxima en sobrecarga de la ecuación II.6.

$$Pt = 0.0011(0.3162)13.234\left(\frac{1}{\sqrt{0.075}} - \frac{1}{\sqrt{20}}\right)$$

$$Pt = 0.0158 \text{ KW}$$

$$Pt = (0.0158 \text{ KW})(1.6)$$

$$Pt \approx 0.0253 \text{ KW}$$

Siendo 0.0253 KW la potencia requerida para realizar la molienda dentro del tambor.

## IV.2 DIMENSIÓN DEL MOLINO

En función a la potencia requerida, se determinarán las dimensiones del molino tomando como referencia la formula DAWN, mostrada en la ecuación IV.1, la cual relaciona ambos parámetros, pero que hace necesario precisar la masa de carga, la cual está descrita en la expresión matemática IV.2.

$$KW = 0.284DAWN \quad \text{Ec. (IV.1)}$$

$$W = Vm(J)(\delta_b) \quad \text{Ec. (IV.2)}$$

En donde KW= Pt; D: diámetro interno en m; A= (1,073 – J); J es la fracción de carga; W: Masa de carga en Ton; N: velocidad del molino en rpm; Vm: Volumen del molino en m<sup>3</sup> y la densidad de las bolas  $\delta_b$  expresada en ton/m<sup>3</sup>.

La fracción de carga, para molinos de bolas toma valores como mínimo a 28% y máximo de 50%. Se utilizará el valor mínimo, debido a que el diseño es a escala de laboratorio. Adicional, para el cálculo de J, es requerida la densidad de las bolas que, de acuerdo con la densidad de apilamiento, para bolas de acero es de 4.47 ton/m<sup>3</sup> (Dueñas & González, 2016).

Otro factor necesario es la relación longitud/diámetro del molino. Esta correlación a escala industrial es de 1:2.35, y para laboratorios son óptimas las relaciones de 1:1.6 – 1:1.8 (Alcántara Valladares, 2008). Seleccionando este último valor y sustituyendo en la ecuación II.4 nos queda:

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

$$L = 1.8D$$

$$Vm = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)(1.8D)$$

$$Vm = 1.414D^3$$

Introduciendo en la ecuación IV.2 obtenemos:

$$W = 1.414D^3(0.28)(4.47\text{ton}/m^3)$$

$$W = 1.773D^3$$

### IV.3 VELOCIDAD DEL MOLINO

El siguiente parámetro para especificar es la velocidad del molino, la cual se obtuvo como el 72% de la velocidad crítica de rotación; los rangos óptimos están entre 70 y 80% de  $N_c$  (Alcántara Valladares, 2008). Así, haciendo uso de las ecuaciones II.1 y II.2 deducimos:

$$N = 0.72N_c$$

$$N = 0.72\left(\frac{42.3}{\sqrt{D}}\right)$$

$$N = \frac{30.4}{\sqrt{D}}$$

Ahora reemplazando  $W$  y  $N$  en la ecuación IV.1 nos queda:

$$0.0256 Kw = 0.284 D(1.073 - 0.28)(1.773D^3)\left(\frac{30.4}{\sqrt{D}}\right)$$

$$0.0256 = 12.14\sqrt{D^7}$$

$$D = 0.172 m$$

Una vez hallado el diámetro interno del tambor; se emplea para determinar la masa de carga, la velocidad de rotación y la longitud del tambor. Del valor de la masa de carga se sustraerá el 49%, por concepto de espacio vacío.

$$W = 1.773D^3$$

$$W = 1.773(0.172)^3$$

$$W = 0.00909 \text{ ton} = 8.242 \text{ Kg}$$

$$W = 0.51(8.242)$$

$$W = 4.203 \text{ Kg}$$

Calculando la velocidad:

$$N = 0.72 \left( \frac{42.3}{\sqrt{D}} \right)$$

$$N = \frac{30.4}{\sqrt{0.172}}$$

$$N = 73.32 \text{ rpm}$$

Determinando la longitud del tambor:

$$L = 1.8(0.172)$$

$$L = 0.31 \text{ m}$$

Para lograr un movimiento de cascada adecuado dentro del tambor se diseñan 3 alerones o placas deflectoras de 19 cm de largo y 2 cm de ancho que servirán como escalones para elevar el material y los elementos molidores, además de servir como superficie de impacto para la operación, el esquema se encuentra ejemplificado en la figura IV.1.

**Figura IV.1** Diseño de alerones para el interior del tambor.



Fuente: Almonte, Rodríguez. "Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña".

#### IV.4 SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR

La selección del material a usar para la construcción del tambor se hizo de acuerdo a los efectos que presentan ciertos materiales al operar con materiales como la arcilla, la caliza, feldespatos, entre otros; los mismos se encuentran detallados en la tabla IV.1 reflejando los riesgos para la elaboración del cilindro.

**Tabla IV.1** Contaminación y consideraciones de materiales para la fabricación del tambor.

<b>Material</b>	<b>Grado de contaminación</b>	<b>Consideraciones</b>
Cerámicos	Alto, por su contenido de silicio.	- Costos considerablemente altos. Separación compleja del material molido.
Polímeros	Bajo, entre ellos el Polipropileno, Policarbonato y Policloruro de vinilo.	- Resistencia al desgaste y bajo costo. Procedimiento de separación del producto sencillo.
Acero Inoxidable	Bajo.	- Alto costo. - Procedimiento de separación complejo.
Acero al Carbón.	Medio.	- Aleaciones resistentes al desgaste y alto costo. - Procedimiento de separación sencilla.

Fuente: (De Miguel, Arranz, Alberruche, & Canteli, 2002).

Al realizar una revisión de las consideraciones presentes en la tabla III.5 y analizando características como bajo costo, funcionalidad y propiedades mecánicas apropiadas para la construcción del tambor, se elige como material para realizar la fabricación el policloruro de vinilo. La información obtenida de este material se extrajo de ensayos experimentales efectuados en distintos perfiles sometidos a diversas pruebas arrojando las propiedades descritas en la Tabla IV.2.

**Tabla IV.2** Propiedades físicas del policloruro de vinilo.

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	1.24
Dureza (Shore)	75
Alargamiento a la rotura (N/mm <sup>2</sup> )	1.6
Resistencia al desgarre (%)	340
Absorción de agua (%)	-0.2
Temperatura de trabajo (°C)	-15, +50
Temperatura de rotura en frío (°C)	-35°
Protección del sonido (dB)	>35

Fuente: (Suarez, 2012).

Otras propiedades importantes de este polímero son:

- Elevada resistencia química: elevada tolerancia a sustancias altamente alcalinas y ácidas. Posee también una excelente resistencia a la degradación y/o deterioro causado por la acción de microorganismos (Plasticbages Industrial, 2014) (Suarez, 2012).
- No contaminante: no migratorio, lo que significa que no reacciona con elementos y compuestos residentes en los suelos (Suarez B. 2012).
- Resistencia al impacto: el PVC posee una excelente resistencia al choque, en efecto, pruebas realizadas en varios perfiles sometidos a diferentes temperaturas, entre los 0 °C y los 20 °C con una energía de impacto de 50 J, han dado resultados extraordinarios (Plasticbages Industrial, 2014).



## IV.5 CARGA DE CALIZA Y DE BOLAS

Los molinos de bolas industriales son fabricados con relaciones de material triturado y cuerpos moledores mínimo de 7:8 y máximo de 10 (Duda, 1997); ya que el prototipo a diseñar es a escala, se elige un valor menor, igual a la relación L/D utilizada anteriormente. De esta forma se procede calcular la distribución de caliza y bolas con  $W = 4.203 \text{ Kg}$ .

$$\frac{S}{C} = 1.8 \quad \text{Ec. (IV.3)}$$

$$W = S + C \quad \text{Ec. (IV.4)}$$

$$S = 4.203 - C$$

Donde:

S= Peso máximo de cuerpos moledores.

C= peso máximo de Caliza.

Despejando S de la ecuación IV.3 y luego igualando a la ec. IV.4 tenemos:

$$4.203 - C = 1.8 C$$

$$C \approx 1.501 \text{ Kg}$$

$$S \leq 2.702 \text{ Kg}$$

## IV.6 DIÁMETROS DE LOS CUERPOS MOLEDORES

El tamaño de los cuerpos moledores es importante para asegurar un rompimiento de las partículas grandes. En general, el tamaño de los medios de molienda es necesario para realizar la fractura, mientras mayor sea la partícula, mayor será el tamaño del medio de molienda.

Haciendo uso de la ecuación II.3 con los siguientes parámetros como variables necesarias:  $K$  es una constante adimensional, que para bolas es equivalente a 143 en el sistema métrico y 200 en el inglés (Dueñas & González, 2016);  $n_r$  es el porcentaje de giro

utilizado en el cálculo de la velocidad del molino de un 72%,  $E_t$  es equivalente a  $W_i$  de la caliza en molienda por vía seca; usando  $D$  calculado con un valor de 0.172 m; la alimentación establecida es de 20 mm y  $\rho_s$  se toma del anexo II, tabla 1.

$$D_b = 0.1 \sqrt{\frac{F * E_t}{K * n_r}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\sqrt{D}}}$$

$$D_b = 0.1 \sqrt{\frac{(0.02)(13.234)}{(143)(0.72)}} \sqrt{\frac{2.68}{\sqrt{0.172}}}$$

$$D_b = 0.0129m = 12.9 \text{ mm}$$

Teniendo presente que el equipo es diseñado para dar un tamaño de partícula muy pequeño, es recomendable usar tres tamaños de bolas, un tamaño estándar arrojado por la expresión II.3, el cual dará finura y los demás para fragmentar (Dueñas & González, 2016).

Es obligatorio que las bolas de mayor tamaño sobrepasen el tamaño de las partículas en la alimentación, ya que estas se encargaran de fragmentar los terrones grandes. Un intervalo adecuado para la distribución de diámetros es: 25 a 30.4 mm de diámetro, en una proporción de 25%; 19 mm – 23 mm de diámetro, en una proporción de 40% y para las bolas pequeñas un tamaño adecuado sería  $\leq 13$  mm, en una proporción de 35%, para lograr una operación de molienda adecuada.

Como el peso máximo total de los cuerpos moledores es  $S= 2702$  g obtenemos el peso de la distribución de balines:

**Tabla IV.3** Peso de los cuerpos moledores según su diámetro.

<b>Diámetro</b>	<b>Proporción</b>	<b>Peso</b>
$\leq 13$ mm	35%	$(0.35)(2702) = 945.76$ g
$\approx 23$ mm	40%	$(0.4)(2702) = 1080.87$ g
$\approx 30.4$ mm	25%	$(0.25)(2702) = 675.54$ g

Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

Según Alcántara J. (2008) y Duda W. (1997) los procesos de molienda en los cuales se implementan molinos de bolas el material más usado y recomendado para los cuerpos moleadores es el acero AISI/SAE 52100, debido a que tienen una superficie con calidad excepcional, larga vida útil y alta capacidad de soporte de carga, en la tabla IV.4 se describen otras cualidades importantes que consideraron para usar este material en los balines.

**Tabla IV.4** Propiedades físicas del Acero al cromo.

<b>AISI/SAE 52100 (Acero al cromo)</b>	
Composición química	C 0.9- 1.5 %
	Si 0.15- 0.30%
	Mn 0.25- 0.45%
	P ≤ 0.03%
	S ≤ 0.03%
	Mo ≤ 0.9%
	Cr 1.35- 1.6%
Tratamientos	Temple. 800 - 830 °C agua 830 – 870 °C aceite
	Revenido 150 – 180 °C
Propiedades mecánicas	Alta capacidad de soporte de carga
	Alta dureza superficial 60 – 66 HRC
	Alta resistencia a la deformación
	Alta resistencia al desgaste
	Alta resistencia a la corrosión

Fuente: (METALSERVICE, 2016).

Esta Información compete a los balines que se emplearan en el proyecto, seleccionados de los rodamientos consignados en el Catálogo WL 41 520/3 SB de FAG, según el estándar DIN europeo o AISI/SAE 52100 americano, descritos en el anexo II, tabla 3.

## IV.7 EJE Y COMPONENTES

En las primeras etapas del diseño es necesario especificar la distribución general de un eje, ya que es indispensable ubicar cada uno de los elementos que lo conforman, para poder realizar un análisis estructural efectivo, que incluya todas las fuerzas a las que se encuentra sometido el eje y obtener los diagramas de momento cortante.

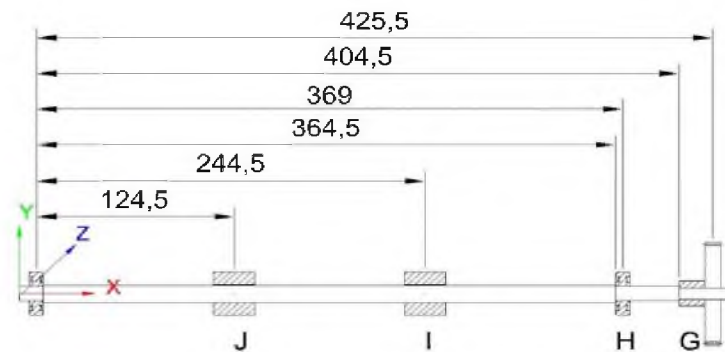
La resistencia requerida para sostener esfuerzos de carga en una barra afecta la elección de los materiales y sus tratamientos. Muchos ejes están hechos de acero de bajo carbono, acero estirado en frío o acero laminado en caliente. Las aleaciones de acero típicas para tratamiento térmico son ANSI 1340-50, 3140-50, 4140, 4340, 5140 y 8650 (Budynas & Nisbett, 2011).

Es conveniente evaluar los esfuerzos en puntos potencialmente críticos, que, por lo general, se encuentran en ubicaciones axiales donde el momento flexionante es extenso, hay concentraciones de esfuerzo y el par de torsión se encuentra presente. Los momentos de flexión sobre la estructura se determinan mediante diagramas de cortante y momento flexionante y las resultantes se obtienen con la sumatoria de los vectores del momento en los puntos de interés a lo largo del eje.

Un momento flexionante constante producirá un momento completamente reversible sobre un eje giratorio, como un elemento de esfuerzo específico alternará de compresión a tensión en cada revolución del eje. En situaciones donde un cojinete se localiza en el extremo del eje, con frecuencia los esfuerzos cerca del cojinete no son críticos puesto que el momento flexionante es pequeño. Los esfuerzos axiales sobre los ejes, debido a componentes axiales transmitidos a través de cojinetes ahusados de rodillo, casi siempre son despreciables en comparación con el esfuerzo de momento flexionante (Budynas & Nisbett, 2011).

Una vez determinadas las dimensiones del molino, se procede con la elaboración de los bosquejos para determinar las longitudes requeridas de cada cambio de sección del eje, teniendo en cuenta los componentes del mismo.

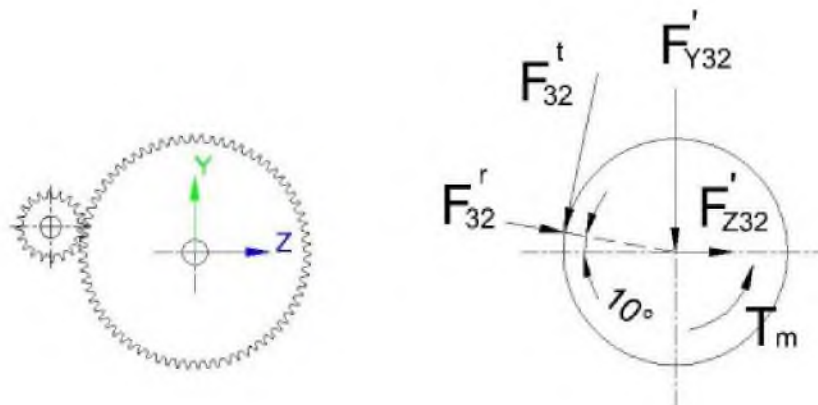
**Figura IV.2** Diagrama longitudinal del eje conductor.



Fuente: (Dueñas & González, 2016).

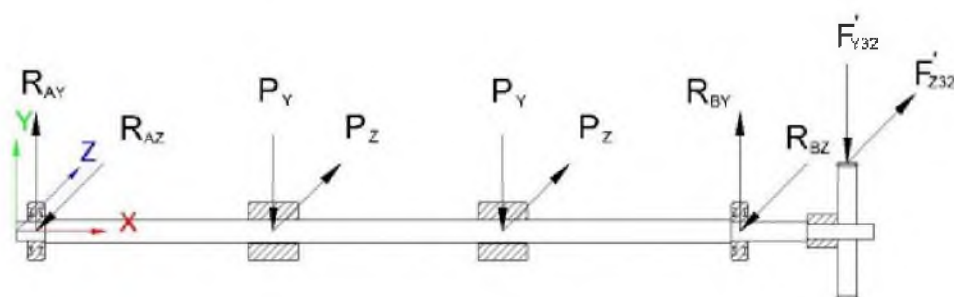
Posterior a la definición de las dimensiones longitudinales, se inicia con la elaboración de un diagrama de cuerpo libre del eje conductor, donde se establecen los ejes coordenados con los que se trabajará, las reacciones en los rodamientos y fuerzas que ejercen la transmisión de potencia y el tambor. Para especificar la carga que ejerce el tambor sobre el eje se utiliza un modelo en el cual el peso de la caliza, de las bolas y el tambor se conglomeran en el centro.

**Figura IV.3** Diagrama de cuerpo libre de la rueda sobre el eje conductor.



Fuente: (Dueñas & González, 2016).

**Figura IV.4** Diagrama de cuerpo libre del eje conductor.



Fuente: (Dueñas & González, 2016).

Donde  $F_{32}^1$  y  $F_{32}^2$  son las fuerzas tangencial y radial;  $F'_{z32}$  y  $F'_{y32}$  son los componentes de la fuerza resultante del sistema de transmisión de potencia; los elementos de la fuerza  $P$  producida por el peso que soporta el eje son denominados  $P_y$ ,  $P_z$ ; y los componentes de las fuerzas de reacción de los rodamientos sobre el eje conductor son  $R_{ay}$ ,  $R_{az}$ ,  $R_{by}$  y  $R_{bz}$ , respectivamente.

El peso de la carga,  $W$ , que soporta el eje, es la sumatoria de los pesos de los elementos moledores, la caliza y el tambor como se presenta en la siguiente expresión:

$$W = \text{peso de las bolas} + \text{peso de la caliza} + \text{peso del tambor} \quad \text{Ec. (IV.5)}$$

$$\text{Peso de las bolas} = 2.4 \text{ Kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 23.56 \text{ N}$$

$$\text{Peso de la caliza} = 1.5 \text{ Kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 14.72 \text{ N}$$

Para obtener el peso del tambor, utilizando tubos de PVC, cuya densidad se extrae de la Tabla IV.2  $\rho = 1240 \text{ Kg/m}^3$ ; se procede a estimar el volumen partiendo de la geometría sugerida por el software SolidWorks SP3 v2015 el cual es  $V_{\text{tambor}} \approx 7.49 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ . Se debe tener presente que el diámetro nominal del tubo es un poco menor al real y el cálculo se realiza con un diámetro interno aproximado de 172 mm y un espesor promedio de 7 mm.

$$\text{Diámetro de la tapa} = D + 2f \quad \text{Ec. (IV.6)}$$

En la ecuación IV.6, D es el diámetro interior del tambor y f es el espesor expresado en metro, entonces nos queda:

$$Diámetro\ de\ la\ tapa = 0.172 + 2(0.007)$$

$$Diámetro\ de\ la\ tapa = 0.186\ m$$

Con la geometría sugerida, se obtiene la longitud para la tapa trasera de 0.017 m aproximadamente; calculando el volumen para la tapa posterior y el tapón obtenemos:

$$V_{tapa} = \frac{\pi(0.186)^2(0.017)}{4} = 4.62 \times 10^{-4} m^3$$

$$V_{tapon} = 2 * \frac{\pi(0.124)^2(0.04)}{4} = 4.83 \times 10^{-4} m^3$$

$$V_{total} = V_{tapa} + V_{tapon} + V_{tambor}$$

$$V_{total} \approx 8.2 \times 10^{-3} m^3$$

Calculando la carga del tambor al reemplazar en la expresión IV.7 el volumen total, se obtiene:

$$W_{tambor} = V_{total} * \rho * gravedad \quad Ec. (IV.7)$$

$$W_{tambor} = 8.2 \times 10^{-3} (1240)(9.81)$$

$$W_{tambor} = 99.81\ N$$

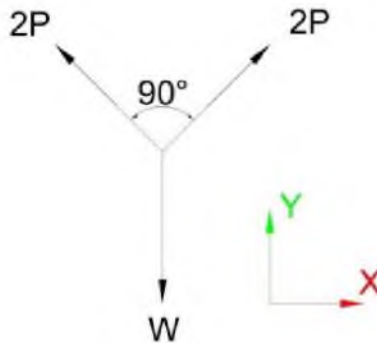
Así, el peso total sobre los ejes dado por la ecuación IV.5, nos da:

$$W = 23.56 + 14.73 + 99.81$$

$$W \approx 138.10\ N$$

Ya que se tienen 4 puntos de apoyo, 2 de cada lado y son consideradas como fuerzas puntuales P, como lo muestra la Figura IV.5; se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje Y para determinar dicha fuerza.

**Figura IV.5** Diagrama de cuerpo libre de la distribución de carga del tambor como partícula.



Fuente: (Dueñas & González, 2016).

$$\Sigma F_y = -W + 4P \cos 45 = 0 \quad \text{Ec. (IV.8)}$$

$$\Sigma F_y = -138.10 + 4P \cos 45 = 0$$

$$P = \frac{138.10}{4 \cos 45}$$

$$P = 48.82 \text{ N}$$

## IV.8 POTENCIA DE OPERACIÓN

La potencia requerida para realizar el movimiento correcto del sistema de transmisión desde el motor hasta el tambor, con una carga de 138.1 N viene dada la fórmula:

$$P = P_t + P_e \quad \text{Ec. (IV.9)}$$

$$P_e = 12.5H \quad \text{Ec. (IV.10)}$$

Donde:  $P_t$  es potencia de trituración, la potencia requerida en el eje se representa como  $P_e$ ;  $H$  es peso neto total de la carga.

Para determinar  $H$  se realiza una sumatoria de los pesos de cada elemento que compone el sistema de transmisión de potencia, como se detalla a continuación:



**Tabla IV.5** Elementos del sistema de transmisión de potencia.

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso (Kg)</b>	<b>Total (Kg)</b>
Tambor	1	$138.1 / 9.8 = 14.08$	14.08
Alerones	3	0.03	0.09
Eje	2	1	2
Total (H)			$16.17 = 0.018\text{Ton}$

Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

Utilizando la ecuación IV.10 obtenemos:

$$P_e = 12.5(0.018)$$

$$P_e = 0.22 \text{ cv} = 0.219 \text{ hp}$$

$$P = (0.025 * 1.34) + 0.219 = 0.25 \text{ Hp}$$

## IV.9 SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE TRACCIÓN

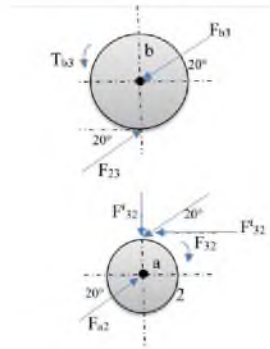
Los rodillos de tracción localizados en el centro del eje realizan dos funciones muy importantes: la primera, es que actúa como soporte para la carga de la molienda; y la segunda, es de transmitir la potencia desde el eje que se encuentra adaptado al motor hacia el tambor. En este prototipo se hace uso de goma para recauchar, el cual al ser un elastómero comercial brinda propiedades mecánicas como absorción de impacto debido a su flexibilidad, buena resistencia a esfuerzos y un coeficiente de fricción adecuado para el trabajo al cual se somete (Flowgasket, 2016).

Las bandas se colocarán sobre el tambor y las mismas no deben aumentar el diámetro externo del tambor más de 184.5 mm, ya que se presentaría un cambio significativo en las RPM requeridas. Por esta razón, las bandas deben tener un grosor de 1 mm como máximo, y un diámetro menor a 172 mm para obtener un buen ajuste agarre entre el tambor y la banda, y así evitar deslizamientos.

Bajo estas especificaciones y con la finalidad de adquirir un material económico y de fácil acceso en el mercado, se utilizará orines de vitón para fabricar las bandas de tracción.

#### IV.9.1 CÁLCULOS DE FUERZAS SOBRE EL EJE Y DIAGRAMAS DE MOMENTO

**Figura IV.6** Esquema de fuerzas en el eje.



Fuente: (Dueñas & González, 2016).

Se procede a determinar la carga transmitida, que es una carga tangencial, se continua con la evaluación de las fuerzas producidas por la transmisión de potencia, es indispensable hacer la selección y el cálculo inicial de los compotes usando la expresión IV.11.

$$F^{t_{32}} = W_t = \frac{60000H}{\pi dn} \quad \text{Ec. (IV.11)}$$

$$W_t = \frac{60000(25.3)}{\pi(20)(1750)}$$

$$W_t = 13.81 \text{ N}$$

En dicha expresión \$W\_t\$ es la carga transmitida en KN, \$H\$: potencia en watt, \$d\$: diámetro del engrane determinado en mm; y \$n\$ es la velocidad del engrane en rpm. Entonces, sobre el eje la fuerza radial que actúa, con \$20^\circ\$ como ángulo de presión, es:

$$F^{r_{32}} = F^{t_{32}} \tan 20$$

$$F^{r_{32}} = 5.03 N$$

Y la fuerza total de estos componentes es:

$$F_{32} = \sqrt{F^{t_{32}}{}^2 + F^{r_{32}}{}^2}$$

$$F_{32} = \sqrt{13.81^2 + 5.03^2}$$

$$F_{32} = 14.69 N$$

Asegurando la resistencia a la flexión de los dientes, se hace uso del criterio básico de resistencia a la flexión del método AGMA (Budynas & Nisbett, 2011), el cual decreta que el esfuerzo en el sistema métrico es:

$$\sigma = \frac{K_v W t}{F m Y} \quad \text{Ec. (IV.12)}$$

$$K_v = \frac{6.1 + v}{6.1} \quad \text{Ec. (IV.13)}$$

Donde:  $K_v$  es el factor dinámico,  $Y$  es el factor de forma de Lewis,  $v$  es la velocidad tangencial,  $\sigma$ : esfuerzo,  $F$  es el espesor de cara y  $m$  el módulo. Calculando la velocidad tangencial de rotación con  $d_p = 20$  mm y  $n = 1750$  rpm tenemos:

$$v = \frac{\pi d n}{60} \quad \text{Ec. (IV.14)}$$

$$v = \frac{\pi(0.02)(1750)}{60}$$

$$v = 1.83 \text{ m/s}$$

De esta forma, sustituyendo en la ecuación IV.14 el factor dinámico queda:

$$K_v = \frac{6.1 + 1.83}{6.1}$$

$$K_v = 1.3$$

El factor de forma de Lewis, Y, se extrae del anexo II, tabla 4; y es igual 0.322, para de esta manera hallar el esfuerzo queda en el eje con la expresión IV.12:

$$\sigma = \frac{1.3(16.3)}{15(1)(0.322)}$$

$$\sigma = 3.71 \text{ MPa}$$

A partir de este esfuerzo se elige acero inoxidable que posee una resistencia a la fluencia de  $S_y = 310 \text{ MPa}$ , adquiriendo un valor conveniente para el factor de seguridad:

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma} \quad \text{Ec. (IV.15)}$$

$$n_y = \frac{310}{3.71} = 83.39$$

Demostrando que el eje soportará adecuadamente las cargas aplicadas en él, ya que los factores de seguridad obtenidos son mayores a 2.

Para hallar las componentes de la fuerza ejercida por los engranes, se separa la fuerza de reacción del peso del tambor en sus componentes sobre los ejes coordenados, de la siguiente forma:

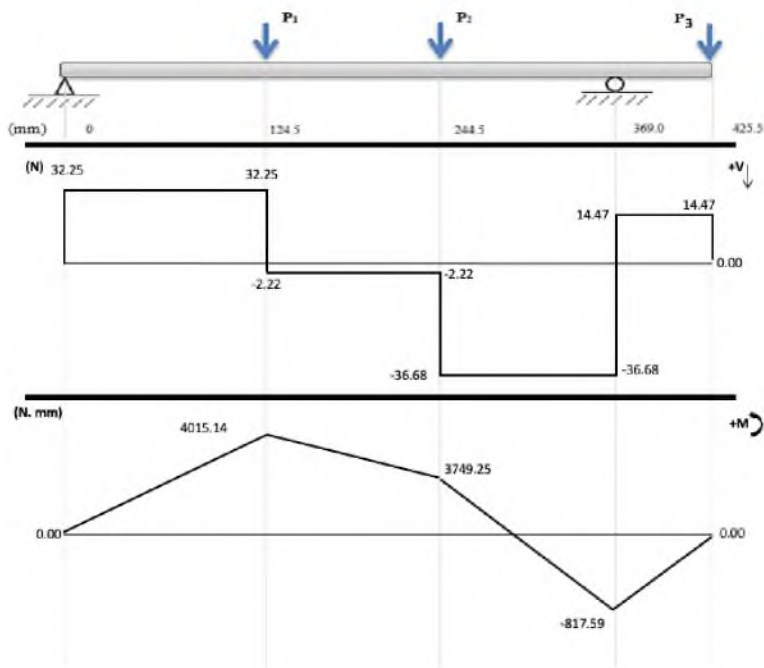
$$F'_{32} = \begin{cases} -F^r \sin 10^\circ - F^t \cos 10^\circ \\ F^r \cos 10^\circ - F^t \sin 10^\circ \end{cases} \quad \text{Ec. (IV.16)}$$

$$F'_{32} = \begin{cases} -5.03 \sin 10^\circ - 13.8 \cos 10^\circ \\ 5.03 \cos 10^\circ - 13.8 \sin 10^\circ \end{cases}$$

$$F'_{32} = \begin{cases} F'_{y32} \\ F'_{z32} \end{cases} = \begin{cases} -14.47 \\ 2.55 \end{cases}$$

La asignación de las fuerzas cortantes y momentos se visualizan en las imágenes IV.7 y IV.8, acompañadas de sus recuadros de equivalencias.

**Figura IV.7** Diagrama de momento en el plano X-Y



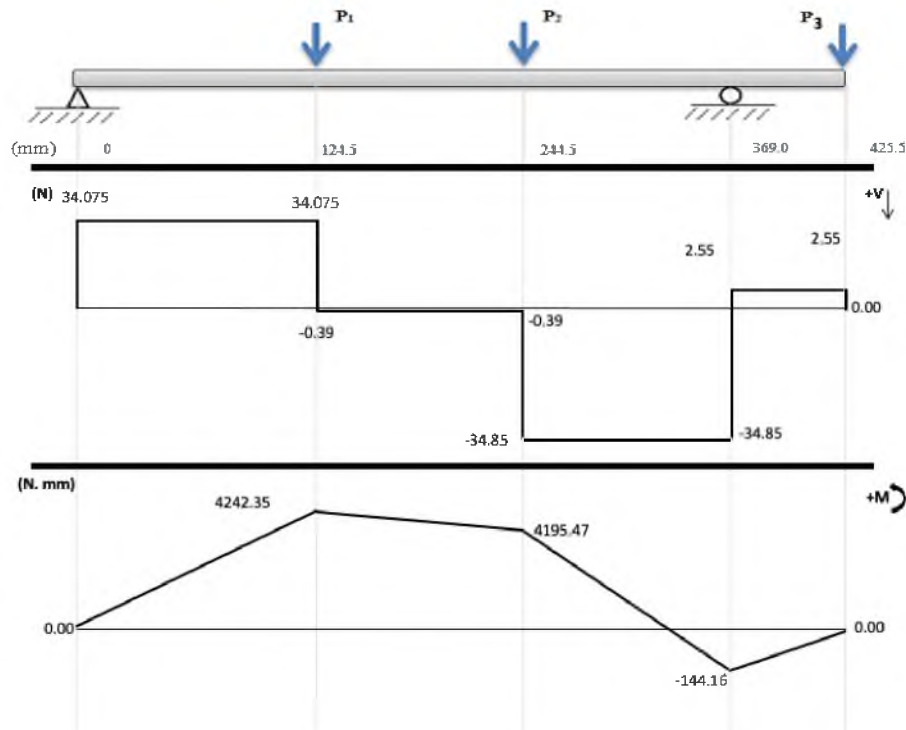
Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

**Tabla IV.6** Equivalencia entre los valores de la figura IV.7 y el diagrama de cuerpo libre del eje para el análisis del plano (X-Y).

Diagrama de cuerpo libre	Equivalencia	Valor
$P_y$	$P_1$	34.46 N
$P_y$	$P_2$	34.46 N
$F'_{y32}$	$P_3$	14.47 N
$R_{ay}$	$R_a$	51.15 N
$R_{by}$	$R_b$	32.25 N

Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

**Figura IV.8** Diagrama de momento en el plano X-Z



Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

**Tabla IV.7** Equivalencia entre los valores de la figura IV.8 y el diagrama de cuerpo libre del eje para el análisis del plano (X-Z).

Diagrama de cuerpo libre	Equivalencia	Valor
$P_z$	$P_1$	34.46 N
$P_z$	$P_2$	34.46 N
$F'_{z32}$	$P_3$	2.55 N
$R_{az}$	$R_a$	-34.07 N
$R_{bz}$	$R_b$	-37.408 N

Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

Por medio de los valores obtenidos, se disponen los puntos críticos que apunta el diagrama de cuerpo libre de la estructura y se acoplan los planos ortogonales como vectores, para determinar los momentos totales; por ejemplo, en el punto G, el Momento alternante es:

$$Ma = \sqrt{303.89^2 + 53.59^2} = 308.50 \text{ N.m} = 0.3085 \text{ N.m}$$

Teniendo en consideración que el torque del motor se transfiere hasta el primer rodillo de tracción del eje, con un módulo constante de:

$$T_m = F^{t_{32}} * d_G \quad \text{Ec. (IV.17)}$$

$$T_m = 13.82 (0.073)$$

$$T_m = 1.01 \text{ N.m}$$

Tomando  $Kt = 1.5$  y  $Kts = 1.7$ ; y suponiendo que  $Kt = Kf$  y  $Kts = Kfs$  (Dueñas & González, 2016). Se opta por acero inoxidable como el material a utilizar para la elaboración del eje, debido a su gran resistencia a la corrosión, presentación y durabilidad.

En base a este material se selecciona del anexo II, tabla 5, los valores de referencia de  $S_{ut} = 568 \text{ MPa}$  y  $S_y = 276 \text{ MPa}$ , para proceder a estimar el esfuerzo de fatiga  $S_e$ :

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \quad \text{Ec. (IV.18)}$$

$$S'_e = 0.5(568) = 284 \text{ MPa}$$

Posteriormente se determinan los factores de Marín que modifican el  $S'_e$ , utilizando las ecuaciones presentadas a continuación:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad \text{Ec. (IV.19)}$$

$$k_a = a S_{ut}^b \quad \text{Ec. (IV.20)}$$

$$k_b = \begin{cases} 0.879 d^{-0.107}, & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91 d^{-0.157}, & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ 1.24 d^{-0.107}, & 2.79 < d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51 d^{-0.157}, & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{Ec. (IV.21)}$$

$$k_c = f(x) = \begin{cases} 1, & \text{flexión} \\ 0.85, & \text{axial} \\ 0.9, & \text{torsión} \end{cases} \quad \text{Ec. (IV.22)}$$

$$k_d = \frac{S_t}{S_{rt}} \quad \text{Ec. (IV.23)}$$

$$k_e = 1 - 0.08z_a \quad \text{Ec. (IV.24)}$$

Donde los factores de modificación son:  $k_a$  para la condición superficial,  $k_b$  simboliza el cambio del tamaño,  $k_c$  infringe en la carga,  $k_d$  representa la corrección de la temperatura y  $k_e$  indica el factor de confiabilidad;  $S'_e$  es el límite de resistencia a la fatiga en la viga rotatoria y  $S_e$  es el límite de resistencia a la fatiga en el punto crítico.

Utilizando datos extraídos del anexo II, tabla 6 y 8, Calculamos cada factor:

$$k_a = 4.51(568)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.840$$

Para  $K_b$ , se espera que los diámetros sean cercanos a 10 mm, por lo que:

$$k_b = 1.24(10)^{-0.107} = 0.969$$

Cuando la torsión está combinada con otros esfuerzos, como la flexión,  $k_c = 1$  y la carga combinada se maneja usando el esfuerzo de Von Mises. Para la torsión pura, la energía de distorsión predice que  $k_c \text{ torsión} = 0.577$  (Dueñas & González, 2016). Con esta consideración y las tablas 7 y 8 del anexo II, se tiene que  $K_d = 1$  y  $K_e = 1$ .

Así, el límite de resistencia a la fatiga es:

$$S_e = 0.840(0.969)(1)(1)(1)(284)$$

$$S_e = 231 \text{ MPa}$$



Con los datos calculados y con un factor de seguridad de 2, se emplea el criterio de Soderberg de la fórmula 32, puesto que se quiere comprobar que el eje no superará el esfuerzo de fluencia; obteniendo con dicha expresión los diámetros mínimos de cada uno de los puntos críticos en el eje.

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[ 4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{yt}} \left[ 4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. (IV.25)}$$

Los cálculos para esta ecuación se llevaron a cabo mediante una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel 2018, en la tabla IV.8 se muestran los diámetros resultantes.

**Tabla IV.8** Diámetro mínimo en los puntos críticos del eje conductor.

<b>Punto</b>	<b>Posición en x</b>	<b>Ma (N.m)</b>	<b>Mm (N.m)</b>	<b>Ta (N.m)</b>	<b>Tm (N.m)</b>	<b>Diámetro mm</b>
G	404.5	0.308	0	0	1.19	5.247
H	364.5	0.83	0	0	1.19	5.786
I	244.5	5.63	0	0	1.19	4.62
J	124.5	5.84	0	0	1.19	4.06

Fuente: Almonte, Rodríguez. "Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña".

## IV.9.2 CÁLCULO Y SELECCIÓN DE COJINETES PARA LAS FLECHAS DISEÑADAS

Para el análisis de los cojinetes, se opta por laborar con rodamientos rígidos de bolas de una sola hilera, en los cuales se tienen los siguientes parámetros y condiciones de trabajo según las reacciones en el eje:

$$R_1 = \sqrt{A_y^2 + A_z^2} = \sqrt{51.15^2 + 34.08^2} = 61.46 \text{ N}$$

$$R_2 = \sqrt{B_y^2 + B_z^2} = \sqrt{32.25^2 + 37.41^2} = 49.39 \text{ N}$$

Partiendo del dato extraído en el anexo II, tabla 9, para  $L_D = 14$  Kh; se procede a realizar el cálculo con base a los aportes suministrados por el proveedor NSK, determinando así la carga de catálogo para rodamientos rígidos de bolas de una sola hilera, dada por la fórmula IV.26.

$$L_h = \frac{10^6}{600 n} \left( \frac{C}{P} \right)^3 = 500 f_h^3 \quad \text{Ec. (IV.26)}$$

Para la cual:  $L_h$  es la vida esperada del rodamiento en horas;  $f_h$  es el factor de vida de fatiga;  $C$  es la carga de catálogo;  $P$  es la carga del rodamiento y  $n$  es la velocidad en rpm.

Despejando a  $C$  de la ecuación IV.26 y sustituyendo los demás valores, teniendo en cuenta que  $L_D$  es equivalente a  $L_h$ , nos queda:

$$C = 39.72 \left( \frac{14000 * 600 * 410.48}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 600.1 \text{ kgf}$$

Como la carga es completamente radial,  $C$  se hace igual a  $C_r$  para lograr seleccionar el cojinete adecuado en el catálogo del proveedor. Según el diámetro interno y la disponibilidad en el mercado, las opciones a elegir son: 6000, 6200 y 6300.

**Figura IV.9** Dimensiones y clasificaciones de carga para cojinetes de bolas de ranura profunda, de una sola hilera.

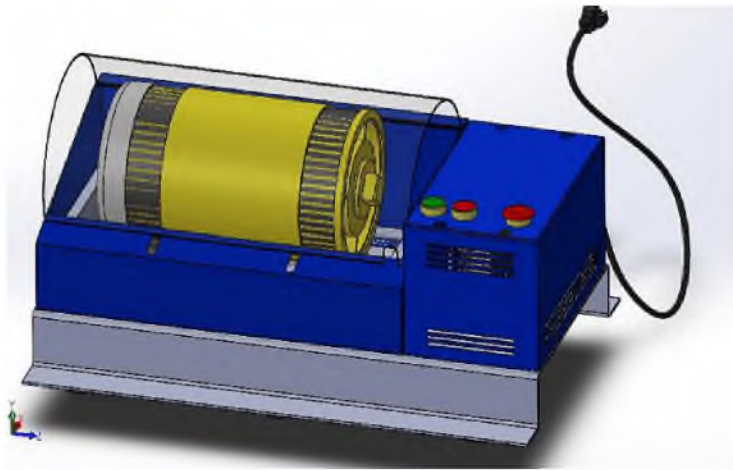
Dimensiones (mm)				Índices de Carga Básica (kgf)				Factor $f_0$	Velocidad Límite (rpm)			Números de Rodamiento			
d	D	B	r min.	$C_r$	$C_{or}$	$C_r$	$C_{or}$		Grasa		Aceite	Abierto	Blindado	Sellado	
								Abierto Z-ZZ	DU	Abierto Z					
10	19	5	0,3	1 720	840	175	86	14,8	34 000	24 000	40 000	6800	ZZ	VV	DD
	22	6	0,3	2 700	1 270	275	129	14,0	32 000	22 000	38 000	6900	ZZ	VV	DD
	26	8	0,3	4 550	1 970	465	201	12,4	30 000	22 000	36 000	6000	ZZ	VV	DDU
	30	9	0,6	5 100	2 390	520	244	13,2	24 000	18 000	30 000	6200	ZZ	VV	DDU
	30	9	0,6	5 350	2 390	—	—	13,2	28 000	18 000	34 000	6200 <sup>3</sup>	ZZ	VV	DDU
12	35	11	0,6	8 100	3 450	825	350	11,2	22 000	17 000	26 000	6300	ZZ	VV	DDU
	35	11	0,6	8 500	3 450	—	—	11,2	26 000	17 000	30 000	6300 <sup>3</sup>	ZZ	VV	DDU
12	21	5	0,3	1 920	1 040	195	106	15,3	32 000	20 000	38 000	6801	ZZ	VV	DD

Fuente: (NSK, 2018)

Se utilizará el rodamiento 6300 2RS C3 que son para ejes que se encuentran a la intemperie. Este rodamiento ofrece la seguridad de seleccionarlo por la facilidad de adquirirlo en el mercado y el bajo costo, el mismo cojinete se aplicará para ambos ejes.

Para la culminación de la etapa de diseño se toma como base el propuesto por Dueñas y Gonzales en 2016, presentado a en la figura IV.10.

**Figura IV.10 Diseño base de prototipo de molino de bolas a escala.**



Fuente: (Dueñas & González, 2016)

**SEGUNDA PARTE**  
**PROTOTIPO FÍSICO Y ENSAYOS**

## CAPÍTULO V COMPONENTES DEL PROTOTIPO

En las tablas que se muestran a continuación se presentan los elementos mecánicos y eléctricos que se utilizaron al momento de ensamblar el equipo, de igual modo se observa la ficha técnica del prototipo final.

**Tabla V.1** Partes mecánicas del equipo.

<b>Parte</b>	<b>Función</b>	<b>Material</b>
Placa de soporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sostener el peso del sistema de molienda.</li> <li>- Conservar la distancia entre el tambor y la base.</li> </ul>	Acero Inoxidable
Base	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soportar las cargas de todo el prototipo y evitar el contacto con el suelo.</li> <li>- Asegurar la unión de todos los componentes.</li> </ul>	Acero Inoxidable
Carcasa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restringir el acceso al interior del equipo.</li> <li>- Permitir el anclaje de ciertos componentes.</li> </ul>	Acero inoxidable
Cubierta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proporcionar de forma segura la visión del sistema de molienda.</li> </ul>	Acrílico Transparente
Rodillos de tracción	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transmitir potencia del eje al tambor.</li> </ul>	Caucho
Bandas de tracción	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asegurar la tracción entre los rodillos y el tambor.</li> </ul>	Orines de vinilo
Tapa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilitar la apertura y el cierre del tambor de manera práctica y hermética.</li> </ul>	PVC

Fuente: Almonte, Rodríguez. "Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña".

**Tabla V.2** Elementos eléctricos.

<b>Elemento</b>	<b>Función</b>	<b>Descripción</b>
Puente Rectificador	Transformar la corriente alterna en corriente continua, suministrando la electricidad en un sólo sentido.	10 amperios
Botón de servicio	Proporcionar el cierre del circuito y/o apertura al dispositivo.	Botón ON/OFF de color negro.
Parada de Emergencia con enclavamiento	Prever daños en el equipo o en operaciones en curso.	botón sobresaliente de la superficie de color rojo.
Relé	Conservar abiertos o cerrados los contactos de un circuito independiente.	Relé DC.
Fusible	Prevenir el riesgo de incendio en el motor por sobrecarga.	Del tipo encapsulado, de 5 A
Cables	Permitir el paso de la corriente desde un enchufe hasta el motor.	Un cable para neutro, uno de tierra y uno para tensión.
Enchufe	Permitir el enlace fijo y seguro al tomacorriente.	Polarizado
Transformador	Permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia.	Pasivo
Capacitor	Almacenar energía sustentando un campo eléctrico.	Bipolar
Bombillo de energía	Indica que el equipo está en funcionamiento	Bombillo de luz rojo
Temporizador	Marca el tiempo de operación y apaga el equipo.	Programable a 30 minutos

Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

El prototipo fue esquematizado utilizando el programa AutoCAD versión 2018, los planos constructivos se encuentran detallados en el Anexo V, figura 1.

**Tabla V.3** Ficha Técnica del molino de bolas semiautógeno.

<b>Partes</b>	<b>Descripción</b>
<b>Motor</b>	
Clase	2
Tipo	Eléctrico – Monofásico
Potencia (HP)	1/8 Hp
RPM	1750
Frecuencia (Hz)	60
Amperaje (Amp)	1.3
Voltaje (V-DC)	110 /115
Refrigeración	Por convección
<b>Dimensiones y masa del tambor</b>	
Longitud Total (cm)	44.7
Ancho total (cm)	17.8
Masa sin carga (Kg)	17
<b>Sistema de molienda</b>	
Tipo	Giratorio
Elementos moledores (tipo / mm)	Balines / ø (30.4, 23, 13)
RPM de trabajo	73
Rodamientos	6300 2RS C3
<b>Operación y seguridad</b>	
Encendido y Apagado	Botón
Parada de emergencia	Pulsador con enclavamiento
Fusible (Tipo/Amp)	Encapsulado interno/ 1.5
Cubierta	Semicilíndrica acrílica

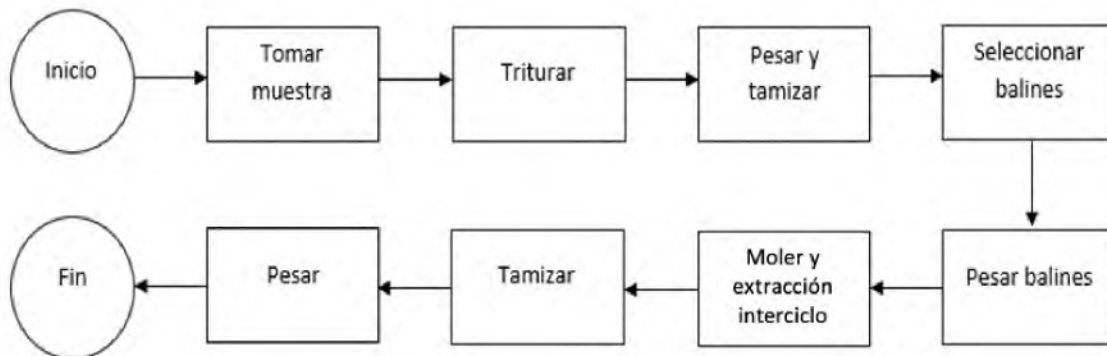
Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

## CAPÍTULO VI DISEÑO EXPERIMENTAL

Una vez concluido el proceso de construcción del equipo, inician los ensayos de funcionamiento. Se realizan cinco pruebas con aproximadamente 1 Kg de caliza seca. El primer ensayo corresponde a una molienda sin el paso previo de trituración; en el segundo, se realiza la operación sin adicionar cuerpos moledores y las tres pruebas restantes se ejecutan siguiendo la secuencia de operación que se observa en figura VI.1 y que se detallan más adelante, exceptuando una de ellas en la cual no se realizará extracción de producto interciclo.

Estos análisis se realizan para verificar el funcionamiento adecuado del prototipo y que los resultados obtenidos en el rango óptimo de operación concuerdan con el valor calculado.

**Figura VI.1** Diagrama de flujo de ensayos de molienda.



Adaptado de: (Dueñas & González, 2016).

- Toma de muestra: se selecciona una muestra de caliza de aproximadamente 5 Kg y se coloca en el envase de almacenaje.
- Triturado: se procesa la muestra para obtener un tamaño máximo de partícula de 20 mm.



- Pesado y tamizado: se mide la cantidad de carga de caliza por ensayo aproximadamente 1 Kg y los tamices vacíos. Posteriormente tamizar durante 5 minutos en las mallas # 60, 70, 140, 200 y el fondo.
- Selección de balines: los balines a utilizar son de 30.4, 23 y 13 mm de diámetro.
- Pesado de balines: delimitar la cantidad de elementos moledores, según la cantidad máxima calculada en la tabla IV.3.
- Molienda y extracción interciclo: se introduce la carga de caliza y de balines en el tambor y se procede con la operación de molienda en 3 ciclos de 20 minutos con recesos de 5 minutos. Al concluir cada ciclo se le extraerá el polvillo que se va produciendo en cada ciclo.

Nota: A una de las pruebas no se le realizará extracción de producto, sino que al terminar cada ciclo se efectuará el receso y posteriormente iniciar el siguiente ciclo.

- Tamizado: una vez concluido el proceso de molienda, se vierte el producto en una bandeja, se extraen los elementos moledores y se tamiza el material durante 10 minutos.
- Pesado: se pesa cada tamiz con el producto retenido.

## CAPÍTULO VII RESULTADOS

En la tabla VII.1, que se muestra a continuación, se perciben los datos arrojados al momento de ejecutar el diseño experimental. Donde M1 es el análisis de la muestra sin el tratamiento de trituración, M2 corresponde a la operación de reducción de tamaño sin el uso de cuerpos molidores, M3 y M4 son los resultados de la molienda con extracción de producto entre los ciclos y M5 es la prueba de molienda sin extracción de producto.

**Tabla VII.1** Resultado de ensayos del diseño experimental.

	<b>Especificación</b>	<b>M1 (g)</b>	<b>M2 (g)</b>	<b>M3 (g)</b>	<b>M4 (g)</b>	<b>M5 (g)</b>
Peso inicial	g	1,000.12	1,000.28	1,000.09	1,000.52	1,000.31
Peso post molienda	g	997.89	998.72	998.46	998.21	999.3
Análisis granulométrico						
Malla 60	250 $\mu\text{m}$	0.7	0.35	9.7	10.36	1.55
Malla 70	212 $\mu\text{m}$	1.23	0.49	15.27	14.74	1.02
Malla 140	106 $\mu\text{m}$	44.82	25.08	41.66	41.37	61.82
Malla 200	75 $\mu\text{m}$	17	9.28	18.49	18.35	12.16
Fondo	0 $\mu\text{m}$	29.59	16.47	70.1	70.04	35.06

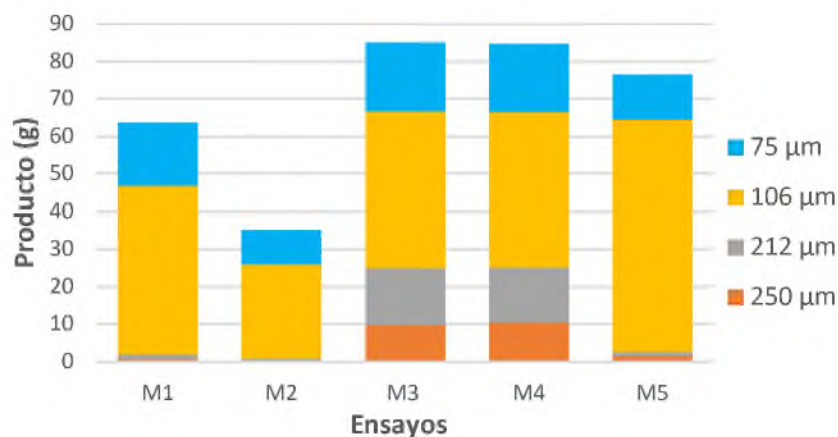
Fuente: Almonte, Rodríguez. "Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña".

## CAPÍTULO VIII ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla VII.1 se denota una diferencia de aproximadamente 1.84 g entre el peso inicial de las muestras y el peso luego de la molienda, resaltando que el proceso presenta una pérdida de material en promedio de 0.18%, a causa de adhesión en las paredes del molino, en los cuerpos moledores y utensilios empleados para extraer el producto.

Como se observa en la tabla VII.1 y en la figura VIII.1, la menor reducción de tamaño se produce en el ensayo M2, debido a que la molienda se realiza en forma autógena, es decir, sin cuerpos moledores, produciendo una disminución en la recuperación del producto en un 33% con respecto a la prueba M3, en la cual se determina la mayor obtención.

**Figura VIII.1** Tamaño de las partículas retenidas en las diferentes mallas.



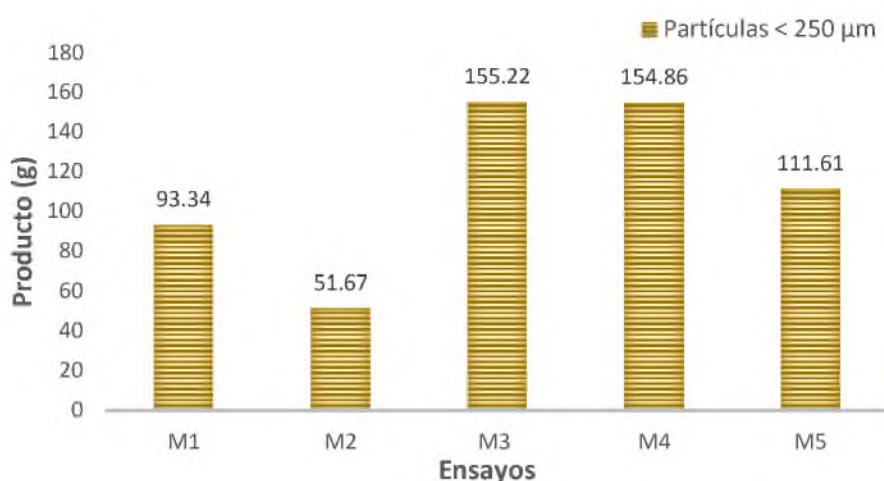
Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

En este gráfico se puede observar que la mayor cantidad de partículas producidas durante la operación de molienda se encuentra en la malla #140 con apertura de 106 micras. El estudio M5 adquiere la proporción superior para este tamaño con 61.82 g de caliza molida según la tabla VII.1.

Una diferencia perceptible se contempla en el ensayo M1 de la figura VIII.2, donde existe una disminución de 61.88 g en la cantidad total del producto en comparación con M3.

Esto ocurre por la ausencia de trituración previa al ingresar la caliza en el molino, siendo estas partículas de mayor tamaño y peso que los cuerpos moledores, provocando una disminución considerable en la eficiencia de la operación de 155.22 a 51.67 g/h y proporcionando una fractura de material de forma autógena, con mayor desgaste en los balines.

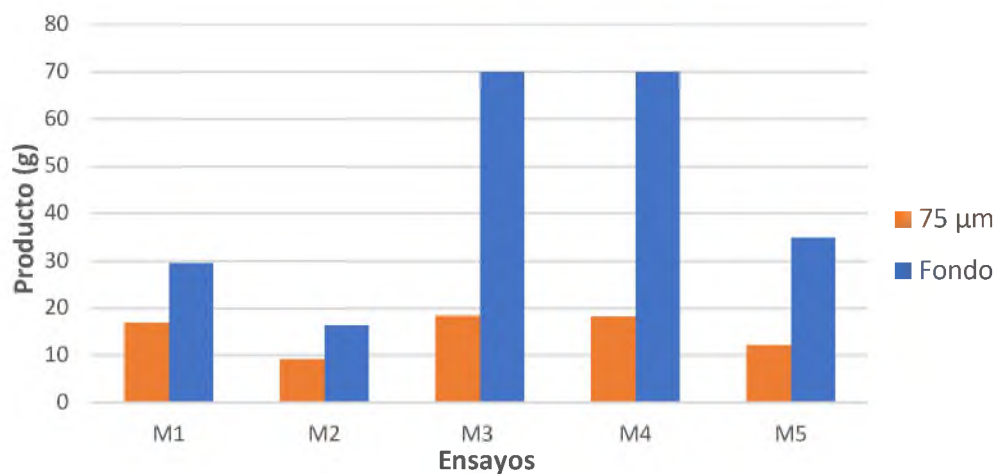
**Figura VIII.2** Cantidad de producto menor a 250  $\mu\text{m}$ .



Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

En la Figura VIII.2 se aprecia una depreciación de M5 al contrastar con las pruebas M3 y M4, dicha desigualdad se produce porque durante el proceso de molienda en M3 y M4, se extrajo el producto menor a 250 micras al culminar cada ciclo, mientras que, en M5 fue llevado a cabo de forma continua, originando que el producto no extraído se conglomerara en el interior del tambor, disminuyendo la superficie de contacto material-cuerpo molidor y material-tambor al crear una capa que amortigua el impacto.

**Figura VIII.3** Cantidad de partículas menor a 75 $\mu$ m.



Fuente: Almonte, Rodríguez. “Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña”.

La figura VIII.3 presenta la cantidad de material que obtuvo el tamaño de 75 micras, donde los ensayos M3 y M4 se posicionan con la mayor porción de producto en esta malla, con un promedio de 18.42 g. Asimismo, se resalta en la ilustración el peso de las partículas retenidas en el fondo de aproximadamente 70.075 g, indicando que el proceso de molienda emite partículas menores al tamaño que se había vislumbrado en un inicio.

**TERCERA PARTE**  
**CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO IX CONCLUSIÓN

Al realizar un análisis exhaustivo sobre los diferentes tipos de molinos de bolas, se definió el molino de tambor como el idóneo para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II, puesto que satisface los parámetros de costos de mantenimiento, prolongación de vida útil y modelamiento práctico.

Asimismo, en el estudio se puntualizan los parámetros óptimos de trabajo para el dispositivo, iniciando con la carga en la entrada de 1 kg de material con tamaño máximo de 20 mm, efectuando la reducción por vía seca o húmeda en 1 hora, a una velocidad de 73 rpm y con una potencia de operación de 0.44 Hp.

Se diseña un prototipo con dimensiones de 71 cm de longitud, 38.2 cm de ancho y 29.4 cm de alto; constituido mecánicamente por un motor de  $\frac{1}{2}$  Hp, dos ejes con rodillos de tracción y un tambor con 0.31 m de largo y 0.172 m de diámetro, adaptado a bandas de tracción. El ejemplar construido posee la capacidad de producir 155.22 g/h de caliza pulverizada, obteniendo partículas con tamaños entre 75 y 250  $\mu\text{m}$  a partir de una alimentación de 1 Kg.

El equipo fabricado logra, para un material de entrada con tamaño de 20 mm, aproximadamente 100g más de producto que el modelo tomado como base de diseño, el cual obtiene solamente 60g/h de material pulverizado, a partir de una alimentación de 13 mm. Este impacto positivo se debe a la adaptación de los tres alerones dentro del tambor, aumentando el movimiento de cascada y la superficie de impacto.

Por último, se elabora un manual de uso y uno de prácticas didácticas para guiar la operación y facilitar el aprendizaje, de igual forma, complementar y robustecer la parte teórica de la asignatura, debido a que el ejemplar permite operar con otros materiales que posean un índice de trabajo menor al de la caliza como son: arcilla, carbón activado, yeso, sal, entre otros.

## **CAPÍTULO X RECOMENDACIONES**

Se propone añadir al prototipo elaborado una trituradora o chancadora, con la finalidad de fracturar el material para producir trozos con tamaños aproximados de 20 mm, dimensión que concierne al tamaño máximo en la alimentación, sustituyendo de esta forma el paso previo de trituración manual; y adicionar una malla en la salida del tambor, con el objetivo de que el equipo pueda pulverizar y tamizar de manera simultánea.

Dentro del plan de mejoras del laboratorio de Operaciones Unitarias II, en lo referente al estudio de las operaciones asociadas a la metalurgia, se recomienda la creación de un micro laboratorio que cuente con equipos para realizar secado, electrólisis, pirólisis, floculación y lixiviación, como etapas subsecuentes a la molienda.

Para finalizar, es de suma importancia la investigación de aleaciones mecánicas partiendo del prototipo propuesto, con el propósito de robustecer la metodología de enseñanza dentro del laboratorio, afianzar el conocimiento de los estudiantes y contribuir con el desarrollo de nuevos estudios.



**CUARTA PARTE**

**REFERENCIAS**

## REFERENCIAS

- Alcántara Valladares, J. (2008). *Diseño práctico de un molino de bolas*. Mexico: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y.
- Andrea Blanco, E. (2014). *Open course ware*. (U. d. Cantabria, Ed.) Recuperado el 7 de Febrero de 2021, de Tecnología Metalúrgica: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8.\\_molienda.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8._molienda.pdf)
- Angulo García, F. X. (2005). *Molino pendular 8000Kg/h*. Barcelona: Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales de Barcelona.
- Austin, L., & Concha, F. (1994). *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. CYTED.
- Barbosa, G., & Ortega, E. (2005). *FOOD POWDERS. Physical Properties, Processing, and Functionality*. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Bolaños, V. E. (2006). *Diseño de un molino de bolas de baja energía*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Bond, F. C. (1961). *Crushing and grinding calculations*. Milwaukee: Allis-Chalmers Manufacturing Co.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2011). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Novena edición*. México: Mc Graw Hill. Obtenido de <http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias%20pagina%20nuevas/elementoMaquina/material/libroCabecera.pdf>
- Bustillo Revuelta, M., & Calvo Sorando, J. P. (2001). *Rocas industriales. Tipología, aplicaciones en la construcción y empresas del sector*. Madrid: Universidad de Salamanca.
- Cabezas Casco, 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 técnica de ambato*. Ecuador: Universidad técnica de ambato.
- CANIMOLT. (Septiembre de 2008). *Historia de la Molienda*. Obtenido de CANIMOLT, Cámara Nacional de la Industria Molinera:

<https://sites.google.com/a/canimolt.org/beta/trigo/historia-de-la-molienda#:~:text=Para%20facilitar%20la%20trituraci%C3%B3n%20del,piedra%20redonda%20de%20gran%20peso.>

Cementos Tudela Veguín S.A. (2015). *Cementos Tudela Veguín*. Obtenido de Cal micronizada: <http://www.cementostudelaveguin.com/iniciativa5.php>

Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (5 de Marzo de 2010). *Curso Promotores de Ahorro y Eficiencia de Energía Eléctrica, Tema Motores Eléctricos. Ahorro de energía eléctrica mediante motores eléctricos de inducción de alta eficiencia*. Obtenido de CNEE:

[http://www.cnee.gov.gt/eficienciaenergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20\(AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n\).pdf](http://www.cnee.gov.gt/eficienciaenergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20(AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n).pdf)

Condori, D. C. (2015). *Diseño de un molino de bolas para la corporación minera ANANEA S.A.* Perú: Universidad Nacional del Altiplano.

Coordinación General de Minería. (2013). *Perfil de mercado de la Caliza* (Vol. [https://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/informacionSectorial/minero/pm\\_caliza\\_1013.pdf](https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_caliza_1013.pdf)). México: Dirección General de Desarrollo Minero. Obtenido de Perfil del Mercado de la caliza: [https://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/informacionSectorial/minero/pm\\_caliza\\_1013.pdf](https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_caliza_1013.pdf)

Davis, J. (2001). *ASM Specialty Handbook Carbon and Alloy Steels*. ASM International.

De Miguel, E., Arranz, J. C., Alberruche, E., & Canteli, P. (2002). *Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Duda, W. (1997). *Manual Tecnológico del cemento*. Barcelona: Editores técnicos Asociados S.A .

Dueñas, J. D., & González, V. E. (2016). *Diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el laboratorio de catálisis de la Universidad de Córdoba*. Córdoba: Universidad de Córdoba.

FAG. (2000). *Rodamientos FAG, Catálogo WL 41 520/3 SB*. Rodamientos FAG.

Flowgasket. (2016). *Proveedor de refacciones y servicio a intercambiadores de calor*. Recuperado el 21 de Marzo de 2021, de Flowgasket:

<http://flowgasket.com/especificaciones-tecnicas/propiedades-tecnicas-material-neopreno-cr/>

- Gamboa Montalvo, J. (2017). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad para el molino de bolas Kurimoto 8' x 6' en la unidad minera Catalina Huanca*. Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Glencore technology . (2 de Mayo de 2013). *IsaMill™*. Obtenido de IsaMill™ breaking the boundaries: <https://www.isamill.com/es/isamill-advantages/Paginas/Accurate-Scale-Up.aspx>
- Grueso, J. M., & Herrera, D. F. (2005). *Diseño y construcción de un molino de bolas de alta energía y alta capacidad*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Guerrero, C. J. (2001). *Rocas calizas: Formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas en la Mixteca Oaxaqueña*. aplicaciones, distribución y perspectivas en la Mixteca Oaxaqueña: Universidad Tecnológica de la Mixteca. Obtenido de <http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo1t14R.pdf>
- Hernández, C. (5 de Diciembre de 2014). *Laboratorio de Preparación Mecánica de Minerales. Ingeniería Civil Metalúrgica*. Obtenido de Academia. edu: [https://www.academia.edu/12074130/MOLIENDA\\_EN\\_SECO\\_Y\\_H%C3%9AMEDO?email\\_work\\_card=view-paper](https://www.academia.edu/12074130/MOLIENDA_EN_SECO_Y_H%C3%9AMEDO?email_work_card=view-paper)
- Hinojosa, J. H. (2017). *Diseño y simulación de un Molino de bolas horizontal de 15 ton/h aplicada a una planta concentradora mediante el uso de Software CAD especializado*. Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Hori, J. J. (2014). *Diseño de Elementos de Máquinas. Transmisión por Fcjas en V*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. EDUNI.
- Ibarz, A., & Barbosa, G. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería en Alimentos*. España: Mundi-Prensa. Obtenido de Definición de operaciones unitarias.
- Industrias. (14 de Julio de 2017). *Slideshare*. doi:72.02-92.02
- Jensen, C., Hesel, J., & Short, D. (2008). *Dibujo y Diseño en Ingeniería, Sexta Edición*. México: Mc Graw Hill.
- Klein, C., & Hurlbut, C. (1998). *Manual de Mineralogía, cuarta edición*. España: Editorial Reverté.

- Maldonado, Y. (30 de Diciembre de 2019). *GEOLOGÍAWEB*. Obtenido de Caliza o piedra caliza: Propiedades y usos: <https://geologiaweb.com/rocas-sedimentarias/caliza/>
- Martínez, P. (2011). *Universidad politécnica de Cartagena, Curso: Tecnología Mineralúrgica*. Obtenido de Procesamiento de materiales: <http://www.ocw.bib.upct.es>
- MEM, M. (1 de Diciembre de 2019). *Producción minera dominicana*. Obtenido de EITI-RD; Inicio de la transparencia de las industrias extractivas República dominicana: <https://eitird.mem.gob.do/informe-eiti-rd/produccion-y-exportacion/produccion-minera-dominicana/>
- METALSERVICE. (2016). *Características aceros especiales*. Obtenido de metal-service.net: <http://www.metal-service.net/pdf/CARACTERISTIQUES%20ACERS.pdf>
- Michaud, D. (6 de Julio de 2016). *Molino a Bolas -Uso y Funcionamiento*. Obtenido de 911 Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/molino-a-bolas/>
- Minera Tintaya. (2012). *Manual de Operación Planta Concentradora*. Perú: Minera Tintaya.
- Montalvo Moya, D. (2013). *Diseño de un reductor de velocidad para el accionamiento de una máquina de roto moldeo*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mosher, J., & Tague, C. (2001). *Conduct and precision cf bond grindability testing. Minerals Engineering*. USA: MacPherson Consultants Ltd.
- NSK. (2018). *INTEC, Suministros Industriales*. Obtenido de Catálogo de rodamientos NSK: [https://suministroidtec.com/catalogos/2019/nsk/NSK\\_catalogo\\_rodamientos\\_2018.pdf](https://suministroidtec.com/catalogos/2019/nsk/NSK_catalogo_rodamientos_2018.pdf)
- Ortíz, C. E. (2020). *Molienda de bolas en húmedo y en seco con eje excéntrico externo*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- PAVCO. (2016). *Catálogo técnico de tubosistemas sanitarios. Producción y comercialización de productos para conducción y control de fluidos, geo sintéticos y pisos para la construcción*. Colombia: PAVCO.
- Plasticbages Industrial, S. (2014). *Fabricación y comercialización de plásticos. PVC*. Obtenido de Plasticbages Industrial, S.L: <http://www.plasticbages.com/caracteristicaspvc.html>

- SBM, S. M. (2014). *tritadoras Shibang*. Shanghai, China: SBM Shibang Machinery Co. Obtenido de Shibang machines: <http://www.shibangmachines.com/trituradoras>
- Shanghai Xuanshi Machinery Co. (2014). *Fabricante profesional de la minería y la construcción*. Shanghai-China: Shanghai Xuanshi Machinery Co. Obtenido de <https://www.globalsources.com/si/AS/Shanghai-Xuanshi/6008831852291/Homepage.htm>
- Suarez, B. (2012). *Policloruro de Vinilo, Informe de Laboratorio*. Argentina: Facultad de Químicas e Ingeniería, Universidad Católica de Argentina U.C.A.
- TERRALIA. (2018). *Terralia, información agrícola*. Obtenido de Calcio 50%P Caliza agrícola: [https://www.terralia.com/productos\\_e\\_insumos\\_para\\_agricultura\\_ecologica/view\\_composition?composition\\_id=10216](https://www.terralia.com/productos_e_insumos_para_agricultura_ecologica/view_composition?composition_id=10216)
- Universidad Politécnica de Cartagena. (2014). *Operaciones de preparación, reducción de tamaño, Molienda I*. Recuperado el 12 de Marzo de 2021, de OCW UPCT: [https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5547/mod\\_resource/content/1/Tema\\_4\\_-\\_Molienda\\_I\\_.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5547/mod_resource/content/1/Tema_4_-_Molienda_I_.pdf)
- Wordpress. (Junio de 2014). *Molinos de bolas*. Recuperado el 8 de Febrero de 2021, de Molinos De Bolas Para Minería: <https://molinosdebolas.wordpress.com/molinos-de-bolas-para-mineria/>

**QUINTA PARTE**  
**ANEXOS**

## ANEXO I GLOSARIO

**Abrasión:** Acción de quitar o arrancar algo mediante fricción.

**Conminución:** indica la reducción de tamaño de un material de dimensiones de partícula promedio a un tamaño de partícula inclusive más pequeño, mediante de trituración, chancado, molienda y otros.

**Extrusión:** es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada.

**Lixiviación:** es una operación unitaria que consiste en la separación de una o varias sustancias contenidas en una matriz sólida, mediante el uso de disolventes líquidos.

**Matriz:** se refiere a los componentes de una muestra que no sea el analito de interés.

**Módulo:** En física, El módulo de un vector es un número que coincide con la longitud del vector en la representación gráfica.

**Molturabilidad:** Grado de fuerza que se le debe imprimir a un material para causar su rotura.

**Monomineral:** rocas que tienen un único mineral.

**Pulvimetalurgia:** proceso de fabricación de objetos metálicos que, partiendo de polvos finos y tras su compactación para darles una forma determinada, se calientan en una atmósfera controlada para la obtención de la pieza.

**Rocas carbonáticas:** rocas compuestas principalmente por minerales de carbonato cálcico o de otros carbonatos.



**ANEXO II**  
**TABLAS**

**TABLA 1. ÍNDICES DE TRABAJO DE MOLIENDA DE BOND**

<b>Material</b>	<b>Peso esp.</b>	<b>Índice de trabajo (Wi)</b>
Bauxita	2.38	9.45
Clinker	3.09	13.49
Arcilla	2.23	7.10
Carbón	1.63	9.37
Caliza	2.68	10.18
Magnesita	5.22	16.80
Yeso natural	2.69	8.16

Fuente: (Duda, 1997)

**TABLA 2. FACTORES DE SERVICIO PARA TRANSMISIÓN POR CORREA V**

<b>Factores de servicio</b>		
	<b>Clase 1</b>	<b>Clase 2</b>
Máquinas movidas		
Agitadores de líquidos	1.1	1.2
Batidoras en la industria papelera	1.3	1.5
Bombas centrífugas	1.1	1.2
Bombas reciprocantes	1.3	1.5
Chancadoras de mandíbula, de rodillos giratorios	1.4	1.6
Elevadores de cangilones	1.3	1.5
Líneas de ejes (ejes de transmisión)	1.2	1.3
Molino de barras, de bolas, de tubos	1.4	1.6
Pulverizadores	1.3	1.5
Molinos de martillos	1.3	1.5

Fuente: (Hori, 2014).

Existen dos clases de factores de servicios si tomamos como referencia la tabla que se muestra a continuación:

Los de Clase 1 corresponden a máquinas motrices como:

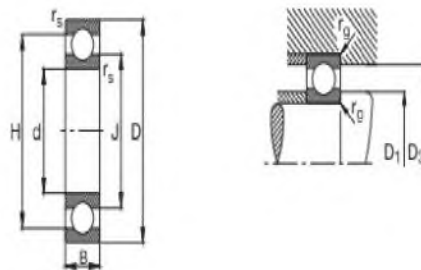
- Motores eléctricos de corriente alterna de torque de arranque normal y jaula de ardilla.
- Motores eléctricos síncronos.
- Motores eléctricos de corriente continua con bobinado en derivación.
- Motores de combustión interna multi-cilíndricos.

Los de Clase 2 corresponden a máquinas motrices tales como:

- Motores eléctricos de alto par de arranque, de deslizamiento alto y de bobinado en serie.
- Motores de corriente continua con bobinado en serie.
- Motores de combustión interna mono-cilíndricos.
- Transmisiones accionadas a través de líneas de ejes y embragues

### TABLA 3. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS SEGÚN EL DIÁMETRO DE LOS CUERPOS MOLEDORES

Rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera



<b>Rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera (mm)</b>							
Db	d	D	B	r <sub>s</sub>	H	J	Rodamiento FAG
≤ 13 mm	140	210	22	1.1	186.6	164.8	16028
≈ 23 mm	260	400	44	3	351.2	310	16052
≈ 30.4 mm	280	240	44	3	330.2	23.4	16056M

Fuente: (FAG, 2000).

**TABLA 4. VALORES DEL FACTOR DE FORMA DE LEWIS Y PARA UN ÁNGULO NORMAL DE PRESIÓN DE 20°**

Número de dientes	Y	Número de dientes	Y
12	0.245	28	0.353
13	0.261	30	0.359
14	0.277	34	0.371
15	0.290	38	0.384
16	0.296	43	0.397
17	0.303	50	0.409
18	0.309	60	0.422
19	0.314	75	0.435
20	0.322	100	0.447
21	0.328	150	0.460
22	0.331	300	0.472
24	0.337	400	0.480
26	0.346	Cremallera	0.485

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).

**TABLA 5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE TENSIÓN EN METALES**

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)				Resistencia a la deformación, exponente $m$	Resistencia a la fractura $\sigma_f$
			Fluencia $S_y$ MPa (kpsi)	Última $S_u$ MPa (kpsi)	A la fractura, $\sigma_u$ MPa (kpsi)	Coefficiente $\sigma_0$ MPa (kpsi)		
1018	Acero	Recocido	220 [32.0]	341 [49.5]	628 [91.1] <sup>f</sup>	620 [90.0]	0.25	1.05
1144	Acero	Recocido	358 [52.0]	646 [93.7]	898 [130] <sup>f</sup>	992 [144]	0.14	0.49
1212	Acero	HR	193 [28.0]	424 [61.5]	729 [106] <sup>g</sup>	758 [110]	0.24	0.85
1045	Acero	TyR 600°F	1 520 [220]	1 580 [230]	2 380 [345]	1 880 [273] <sup>f</sup>	0.041	0.81
4142	Acero	TyR 600°F	1 720 [250]	1 930 [210]	2 340 [340]	1 760 [255] <sup>f</sup>	0.048	0.43
303	Acero Inoxidable	Recocido	241 [35.0]	601 [87.3]	1 520 [221] <sup>f</sup>	1 410 [205]	0.51	1.16
304	Acero Inoxidable	Recocido	276 [40.0]	568 [82.4]	1 600 [233] <sup>f</sup>	1 270 [185]	0.45	1.67
2011	Aleación de aluminio	T6	169 [24.5]	324 [47.0]	325 [47.2] <sup>i</sup>	620 [90]	0.28	0.10
2024	Aleación de aluminio	T4	296 [43.0]	446 [64.8]	533 [77.3] <sup>i</sup>	689 [100]	0.15	0.18
7075	Aleación de aluminio	T6	542 [78.6]	593 [86.0]	706 [102] <sup>i</sup>	882 [128]	0.13	0.18

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).

**TABLA 6. PARÁMETROS DEL FACTOR DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL**

Acabado superficial	Factor $a$		Exponente $b$
	$S_{utr}$ kpsi	$S_{utr}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).

**TABLA 7. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN EN LA RESISTENCIA A LA TENSION DEL ACERO**

Temperatura, °C	$S_T/S_{RT}$	Temperatura, °F	$S_T/S_{RT}$
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).

Donde:  $S_T$  es resistencia a la tensión a la temperatura de operación y  $S_{RT}$  la resistencia a la tensión a temperatura ambiente;  $0.099 \leq \sigma \leq 0.110$ .

**TABLA 8. FACTORES DE CONFIABILIDAD  $k_e$**

Confiabilidad, %	Variación de transformación $z_\alpha$	Factor de confiabilidad $k_e$
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).

**TABLA 9. RECOMENDACIONES DE VIDA DE COJINETES**

<b>Tipo de aplicación</b>	<b>Vida, kh</b>
Instrumentos y aparatos de uso poco frecuente	Hasta 0.5
Motores de aeronaves	0.5-2
Máquinas de operación corta o intermitente, donde la interrupción del servicio resulta de poca importancia	4-8
Máquinas de servicio intermitente donde una operación confiable es de gran importancia	8-14
Máquinas para servicio de 8 h, que no siempre se usan completamente	14-20
Máquinas para servicio de 8 h, que se utilizan plenamente	20-30
Máquinas para servicio continuo las 24 h	50-60
Máquinas para un servicio continuo de 24 h, donde la confiabilidad es de suma importancia	100-200

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2011).

**TABLA 10. PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MOLINO DE BOLAS**

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
Coupling 6"	1	695.00	695.00
Reducción 6" x 4"	1	650.00	650.00
Tapón registro 4"	1	350.00	350.00
Tubo PVC 6"	1	1,000.00	1,000.00
Tapón hembra 6"	1	695.00	695.00
Rodamiento	4	350.00	1,400.00
Barra S5 Ø 5/8	2	550.00	1,100.00
Mecanización muñeco	1	700.00	700.00
Plancha de acero inoxidable ¾x4x24"	1	1,400.00	1,400.00
Mecanización de aluminio	1	2,500.00	2,500.00
Mecanización PVC	1	1,250.00	1,250.00

Fuente: Almonte, Rodríguez. "Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña".

Continuación **TABLA 10. PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MOLINO DE BOLAS**

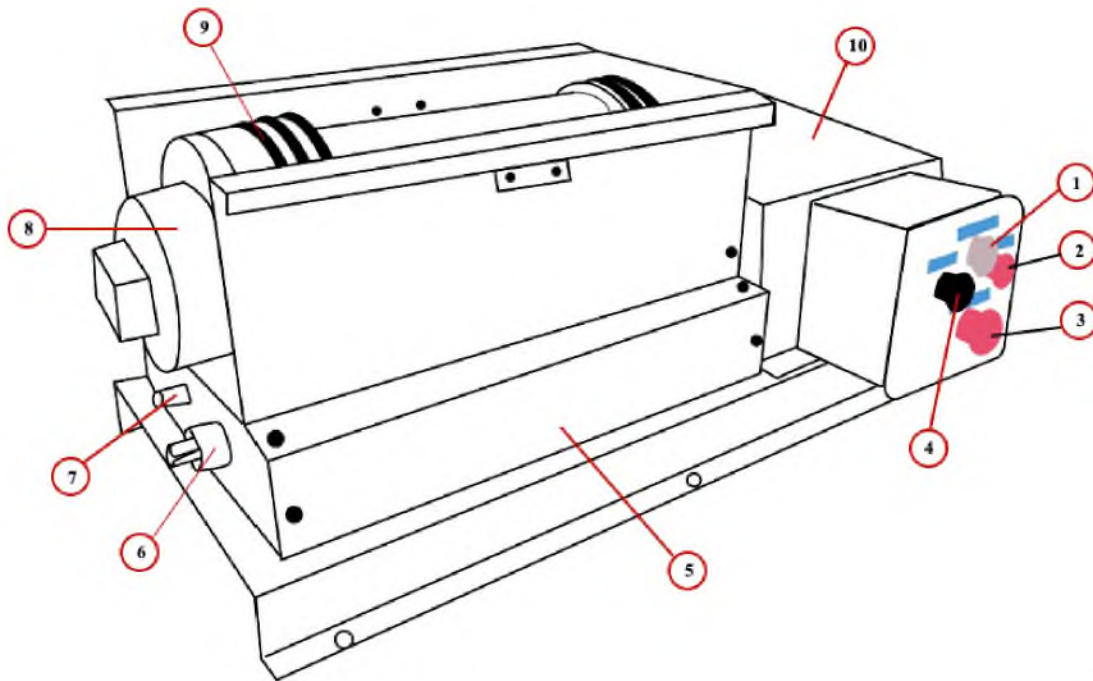
<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
Motor 0.5 Hp	1	2,000.00	2,000.00
Casquillos de forma para ejes	4	315.00	1,260.00
Coupling separadores de aluminio	2	600.00	1,200.00
Soldadura	1	2,000.00	2,000.00
Banco, dobleces, corte, cubre falta	1	3,500.00	3,500.00
Transformador	1	1,000.00	1,000.00
Rectificador	1	1,000.00	1,000.00
Capacitor	1	1,000.00	1,000.00
Caja central con selector	1	1,000.00	500.00
Luz piloto	1	100.00	100.00
Botón de servicio	1	150.00	150.00
Botón de emergencia	1	150.00	150.00
Temporizador	1	200.00	200.00
Cables eléctricos	4	400.00	400.00
Balines Ø 30.4 mm	5	580.00	2,900.00
Balines Ø 23 mm	40	135.00	5,400.00
Balines Ø 13 mm	70	85.00	5,950.00
Mano de obra	1	10,000.00	10,000.00
Combustible	1	3,500.00	3,500.00
		<b>Total</b>	<b>53,950.00</b>

Fuente: Almonte, Rodríguez. "Diseño y construcción de un molino de bolas semiautógeno para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña".



**ANEXO III**  
**MANUAL DE USO**

## Componentes del molino de bolas.



1. Temporizador
2. Energía
3. Emergencia
4. Servicio
5. Carcasa
6. Eje conductor
7. Eje conducido
8. Tambor
9. Bandas de tracción
10. Almacén de motor

## Precauciones de seguridad.

- Utilizar gafas de seguridad, delantal, guantes, mascarilla y protectores auditivos.

- Limpiar con una escobilla el tambor del molino antes y después de la molienda en seco, en caso de ser molienda húmeda, lavar el interior del tambor con agua a presión. No se debe lavar el cilindro por fuera, para evitar mojar las bandas de tracción.
- Colocar siempre el protector de seguridad antes de realizar la molienda.

### **Instrucciones de Funcionamiento.**

Antes de iniciar la molienda:

- Ubicar el equipo sobre un lugar firme, relativamente plano que no produzca desnivel en el equipo.
- Para un buen funcionamiento del equipo, se aconseja que en el área donde se va a realizar la molienda, la temperatura ronde por debajo de los 22°C.
- Retirar la cubierta de seguridad que cubre el tambor.
- Extraer el tambor y retirar la tapa girándola en sentido contrario a las manecillas del reloj.
- Validar que el tambor se encuentra limpio y en buen estado. En caso de presentar alguna avería, proceder con el cambio de cilindro.
- Introducir 1Kg del material a pulverizar, con tamaños de terrones  $\leq 20$  mm.
- Agregar los elementos molidores según las siguientes cantidades: 0.6725 Kg de bolas con un  $\varnothing = 30.4$  mm; 1.076 Kg de balines con un  $\varnothing = 23$  mm; y 0.941.5 Kg de bolas con un  $\varnothing = 13$  mm.

- Cerrar el tambor el tambor, agitar ligeramente de forma manual el tambor y colocar sobre los rodillos de tracción dentro del equipo, asegurándose de que los mismos se encuentran en contacto con las bandas del cilindro.
- Cerrar la cubierta de seguridad.

#### Accionamiento del molino:

- Conecte el equipo a un enchufe.
- Desenclavar el pulsador “parada de emergencia”, girándolo en sentido horario, con el fin de cerrar el circuito.
- Accione el interruptor de servicio hacia derecha, botón negro.

#### Durante el proceso de molienda:

- Si desea tomar una muestra del proceso para monitoreo presione el botón “emergencia”, proceda a realizar del acápite a) los pasos 3 y 4.

Nota: al accionar el botón de emergencia, el temporizador para automáticamente, al desanclar el botón (semigiro hacia la derecha), el temporizador continuará el conteo. Si se apaga el equipo se reiniciará el tiempo desde cero.

- Después de obtener la muestra, ejecute del acápite a) las etapas 8 y 9 y del b) los pasos 2 y 3.

#### Culminación de molienda

- El ciclo de molienda está previsto para un tiempo de 30 minutos, transcurrido este lapso, apagar el equipo accionando el pulsador SERVICIO, de color negro.

- Esperar hasta que el equipo se estabilice y posteriormente abrir la cubierta de seguridad.
- Extraer el tambor, colocar en forma vertical con la tapa hacia arriba, y transcurridos 5 minutos proceder a destapararlo. Esto permite reducir las pérdidas del material.
- En un recipiente verter el contenido y con ayuda de una escobilla separar y limpiar los cuerpos moledores.
- Limpiar el tambor.

#### **Recomendaciones para funcionamiento adecuado y mantenimiento del equipo.**

- Cuando el equipo no esté en funcionamiento mantener en un área seca, libre de humedad, para evitar corrosión.
- En caso de sufrir un deterioro de los rodamientos exteriores o los balines cambiarlos por otro de la misma especificación.
- Cambiar los rodamientos y otras partes del motor según las especificaciones del fabricante.
- No introducir las manos u objetos extraños en la cámara de molienda si el equipo se encuentra en funcionamiento.
- Mantener la compuerta de seguridad siempre abajo.
- No encender la máquina si la superficie está en desnivel.

- Si ocurre algún accidente o se percibe un ruido y/o comportamiento extraño en el prototipo, accionar de forma inmediata el botón de parada de emergencia.
- No exceder el tiempo de molienda. Si se necesita más tiempo o material pulverizado, al concluir el primer lapso deje el equipo 10 minutos en reposo, acondicionar e iniciar un nuevo ciclo de molienda.
- No exceder las cantidades de material a pulverizar o de cuerpos moledores.

**ANEXO IV MANUAL**  
**DE PRÁCTICAS**

## **Manual de prácticas del laboratorio de Operaciones Unitarias II.**

Una operación unitaria se definirse como la parte de un proceso o un equipo, en el cual se integran materias primas e insumos y ocurre una acción específica, son actividades básicas que forman parte del proceso.

Sería prácticamente imposible estudiar el número casi infinito de procesos químicos que se llevan a cabo en la industria diariamente, si no hubiera un punto en común a todos ellos. Afortunadamente esta conexión existe. Cualquier proceso que se puede diseñar consta de una serie de operaciones físicas y químicas que en algunos casos son específicas del proceso considerado, pero en otros, son operaciones comunes e iguales para varios procesos (Ibarz & Barbosa, 2005).

Este Manual está desarrollado con prácticas didácticas y de soporte a las contenidas en el programa de Operaciones Unitarias II, orientadas al uso de reactivos y equipos pertenecientes al laboratorio de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña. Con este ejemplar se pretende que el alumno pueda comprobar los principios teóricos, de una forma experimental, y al mismo tiempo adquirir destrezas en las técnicas de laboratorio y el uso de los equipos.

### **Normas generales del laboratorio.**

Antes de iniciar las prácticas:

- La asistencia al laboratorio es obligatoria.
- Se deben seguir las normas generales de los laboratorios.
- No colocar mochilas, libros u otros objetos sobre las mesetas de trabajo. Cuanto más despejado este el área, con mayor facilidad se llevará a cabo el experimento y habrá menos riesgos de exposición a peligros.



- Es obligatorio el uso de bata en el laboratorio y el uso de zapatos cerrados.
- En todo momento se deben cumplir las orientaciones del profesor. No se debe iniciar la práctica sin haber recibido las instrucciones necesarias.
- Es indispensable leer y preparar el manual antes de iniciar, realizar los cálculos antes de ejecutar el ensayo y estudiar los fundamentos teóricos.
- Verificar que poseen todo el material requerido y en perfecto estado de conservación y limpieza. Notificar cualquier irregularidad al profesor.
- Está prohibido fumar dentro del laboratorio, así como ingerir alimentos y bebidas.

Durante la ejecución:

- No se debe ingerir ninguna sustancia y evitar el contacto con la piel. Se debe actuar con la mayor precaución al trabajar con sustancias inflamables, tóxicas o corrosivas.
- Notificar cualquier incidente, quemadura o corte, al docente.
- El manejo de productos sólidos se debe realizar con ayuda de una espátula y para transvasar sustancias líquidas hacer uso de una varilla de vidrio, cuando sea necesario.
- Para evitar contaminación, está prohibido retornar al frasco los restos de productos no utilizados.

- Al emplear vidrio o plástico quebradizo en un ensayo, evitar los golpes y cambios bruscos de temperatura. Se debe comunicar al profesor encargado si se rompe algún equipo.
- Los remanentes sólidos deben desecharse en los cestos de basura, nunca en el fregadero. Los residuos metálicos deben almacenarse en un recipiente especial; los líquidos y disolventes orgánicos, se vierten en un recipiente, para su posterior eliminación.

Al concluir la práctica:

- El área de trabajo, la cristalería y los equipos deben quedar limpios y ordenados, también se deben apagar y desenchufar los dispositivos.
- Entregar para su corrección el reporte de la práctica realizada.
- Hasta que el instructor no de su aprobación no se considerará concluida la práctica.

## Laboratorio de Operaciones unitarias II.

### Práctica No 1. Molienda y tamizado

Fecha: \_\_\_\_\_

Sección: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_

Matrícula: \_\_\_\_\_

#### **Introducción**

La molienda es una operación unitaria, que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra, por medios mecánicos, hasta el tamaño deseado. Los métodos de reducción más empleados en las máquinas de molienda son compresión, impacto, frotamiento de cizalla y cortado.

El fraccionamiento del material es realizado en dos etapas: La primera, consiste en fraccionar sólidos de gran tamaño. Para ello se utilizan los trituradores o molinos primarios. Los más utilizados son: el de martillo, muy común en la industria cementera, y el de mandíbulas. La segunda etapa sirve para reducir el tamaño con más control, manejándose tamaños intermedios y finos. Para esta etapa el molino más empleado en la industria es el molino de bolas (Condori, 2015).

#### **Objetivo**

- Aprender el manejo del molino de bolas y del uso de tamices.
- Realizar un análisis granulométrico.

#### **Equipos y materiales**

- Molino de bolas
- Gafas
- Sistema de tamizado ( #10, 20, 40,
- Protección auditiva

- 60, 80, 100, 150, 200 y fondo)
- Balanza analítica
- Triturador
- Espátula
- Caliza
- Guantes
- Envase
- Cronómetro
- Bata de laboratorio

## Procedimiento

Determinación de la distribución del tamaño de partícula de la alimentación.

- Toma de muestra: se selecciona una muestra de aproximadamente 1 Kg de caliza y se coloca en el envase de almacenaje.
- Triturar: se procesa la muestra para obtener un tamaño máximo de partícula de 20 mm.
- Pesar y tamizar: se pesan 800 g de caliza y los tamices vacíos. Posteriormente tamizar durante 5 minutos.
- Seleccionar balines: los balines a utilizar son de 30.4, 23 y 13 mm de diámetro.

<b>Diámetro</b>	<b>Peso</b>
13 mm	827 g
23 mm	960 g
30.4 mm	600 g

Carga al molino y proceso de molienda

- Cargar todos los sólidos obtenidos en el proceso de tamizado en el molino de bolas, Cerrar el molino y poner en operación. Ver manual de uso.

- Realice la molienda durante 10 minutos.

Determinación de la distribución del tamaño de partícula del producto

- Tamizar: una vez concluido el ciclo de molienda, se toma una muestra de 300g aproximadamente y se tamiza el material durante 7 minutos.
- Pesar: se pesa cada tamiz con el producto retenido.

Repetir las etapas de carga al molino y proceso de molienda y Determinación de la distribución del tamaño de partícula del producto cinco veces.

**Datos**

Número tamiz	Peso vacío	Peso alimentación	Peso P1	Peso P2	Peso P3	Peso P4	Peso P5
10							
20							
40							
60							
80							
100							
150							
200							
Fondo							

**Cálculos**

**Discusión**

**Conclusión**

## Laboratorio de Operaciones unitarias II.

### Práctica No 2. índice de trabajo

Fecha: \_\_\_\_\_

Sección: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_

Matrícula: \_\_\_\_\_

#### **Introducción**

El índice de Bond ha sido definido como el parámetro de la reducción de tamaño a dimensional, que expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda. Este índice se ha empleado en la industria desde finales de la década del pasado siglo XX (Mosher & Tague, 2001).

El índice de trabajo de bond es válido para molinos de bolas que trabajen por vía húmeda. Para molienda vía seca el valor de  $W_i$  se ha de multiplicar por 1.30 (Duda, 1997).

El índice de Bond se define a partir de la formulación de la tercera ley de la fragmentación, la cual plantea:

$$W_i = \frac{44.5}{p_1^{0.23} Gpb^{0.82} \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

Donde:  $W_i$  es el índice de trabajo de Bond en kW-h por tonelada corta,  $P_1$  es la malla de corte en micras (#100),  $Gpb$  es el índice de moliendabilidad,  $P_{80}$  es el 80% pasante en el producto, y  $F_{80}$  es el 80% pasante en la alimentación inicial.

El índice de moliendabilidad del molino corresponde al promedio en gramos por revolución de los ciclos de operación, donde se obtiene un  $p_1$  constante, y se calcula:

$$Gbp = \frac{\psi_{(p1)} - \psi_{F(p1)}W}{100r^*}$$

Siendo  $\psi_{(p1)}$  el porcentaje del material en el molino que tiene un tamaño menor que  $p_1$  después de  $r_1$  revoluciones;  $\psi_{F(p1)}$  el porcentaje menor que la malla de separación  $p_1$  en la alimentación fresca al molino;  $W$  es la masa total de mineral cargado al molino y  $r^*$  es el número de revoluciones necesarias para obtener la carga circulante de 350% (Bond, 1961) (Austin & Concha, 1994).

Para el primer ciclo se toma como base la velocidad a 70 rpm y para obtener el número de revoluciones en los ciclos subsecuentes se utiliza la siguiente expresión:

$$r_2 = r_1 \frac{100}{\frac{3.5}{\psi_{(p1)}}}$$

### Objetivos

- Determinar el índice del trabajo de Bond ( $W_i$ ) de la caliza.
- Determinar la eficiencia del molino de bolas.

### Equipos y materiales

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| - Molino de bolas  | - Triturador o martillo |
| - Sistema de tamizado (malla # 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150 y 200) | - Tacómetro             |
| - Balanza analítica  | - Cronómetro            |
| - Espátula   | - Guantes               |
| - Caliza   | - Bata de laboratorio   |
| - Probeta de 1000 cc   | - Gafas                 |
|  | - Protección auditiva   |

## **Procedimiento**

- Tomar una muestra de 1 Kg de caliza y triturar de tal forma que el producto chancado pase 100% por la malla #10 (20 mm).
- Homogenizar, tamizar y pesar el mineral triturado.
- Pesar una probeta de 1000 cc, llenarla con 700 cc del material previamente tamizado, dar pequeños golpes para que el material se asiente y se llenen los huecos; pesar el mineral con la probeta.
- Introducir los 700 cc en el molino de bolas, realizar la molienda ajustando el equipo para operar a una velocidad de 70 rpm y que el tambor gire 100 vueltas en el primer ciclo.
- Los balines a utilizar serán de 13, 23 y 30.4 mm de diámetro y una cantidad de 827, 960 y 600 g respectivamente.
- Después del primer ciclo de molienda, extraer el mineral, cernir durante 10 minutos y pesar cada tamiz con el producto retenido. Retornar al molino todo el material de los tamices 10, 20, 40, 60, 80 y 100.
- Realizar dos ciclos de molienda adicionales y seguir el mismo proceso que en el paso 5.

## **Datos**

Peso de los 700 cc:

Rpm ciclo 2:

Rpm ciclo 3:



No. tamiz	Ciclo 1 (g)	Ciclo 2 (g)	Ciclo 3 (g)
10			
20			
40			
60			
80			
100			
150			
200			
Fondo			

**Cálculos**

**Discusión**

**Conclusión**

Laboratorio de Operaciones unitarias II.  
Práctica No 3. Molienda por vía húmeda y seca

Fecha: \_\_\_\_\_

Sección: \_\_\_\_\_

Nombre: \_\_\_\_\_

Matrícula: \_\_\_\_\_

### **Introducción**

La molienda es la última etapa del proceso de conminución para la reducción del tamaño de partículas. La fragmentación de las partículas se consigue por medio de la combinación de fuerzas de compresión, impacto y abrasión.

La rotura del mineral se realiza en el interior de unos equipos cilíndricos rotarios de acero que se conocen con el nombre de molinos de rodamiento de carga o simplemente molinos. Estos llevan en su interior una mezcla de mineral a fragmentar junto con cuerpos molturadores o moledores que pueden ser barras, bolas o incluso fragmentos gruesos del propio mineral.

La molienda se puede realizar por vía seca o por vía húmeda:

- Vía seca: molienda de materiales prácticamente secos, 2% de agua, o con una determinada humedad, <30% de agua.
- Vía húmeda: molienda de materiales que forman una pulpa, de 30 -300% de agua (Hernández, 2014).

Factores que determinan el tipo de molienda:

- El tipo de etapa siguiente, húmeda o seca.
- La disponibilidad de agua.
- Espacio, uso bombas, tubos, entre otros.

- Uso de captadores de polvos y temperatura.
- Naturaleza del material a moler.

## Objetivo

Determinar y comparar el rendimiento de la operación de molienda por vía húmeda y por vía seca.

## Equipos y materiales

- Molino de bolas
- Sistema de tamizado
- Balanza
- Triturador
- Espátula
- Caliza
- Lona plástica
- Rodillo
- Protección auditiva
- Guantes
- Bata de laboratorio
- Gafas

## Procedimiento

- Tomar 4 alícuotas menor a 1 Kg del mineral, previamente trituradas, con granulometría  $< 20$  mm.
- Utilizar 2 muestras para la molienda seca y dos por vía húmeda, con un porcentaje de sólidos de 67%.
- La carga de bolas que se utilizará para ambos procesos será:

<b>Diámetro</b>	<b>Peso</b>
13 mm	827 g
23 mm	960 g
30 mm	600 g

- Moler durante 30 minutos.
- Posterior a la molienda húmeda, limpiar las bolas y el interior del molino con mucho cuidado, luego secar y filtrar del producto.

**Nota:** luego de realizar el secado, esparcir el producto en una lona plástica, con ayuda de una espátula y un rodillo, mover el material para lograr separar las partículas y homogeneizar.

- Tamizar y realizar un análisis granulométrico al producto resultante.

### Datos

	Molienda seca		Molienda húmeda	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
No. malla	Retenido (g)	Retenido (g)	Retenido (g)	Retenido (g)
16				
30				
50				
70				
100				
140				
200				
Fondo				
Total				

### Cálculos

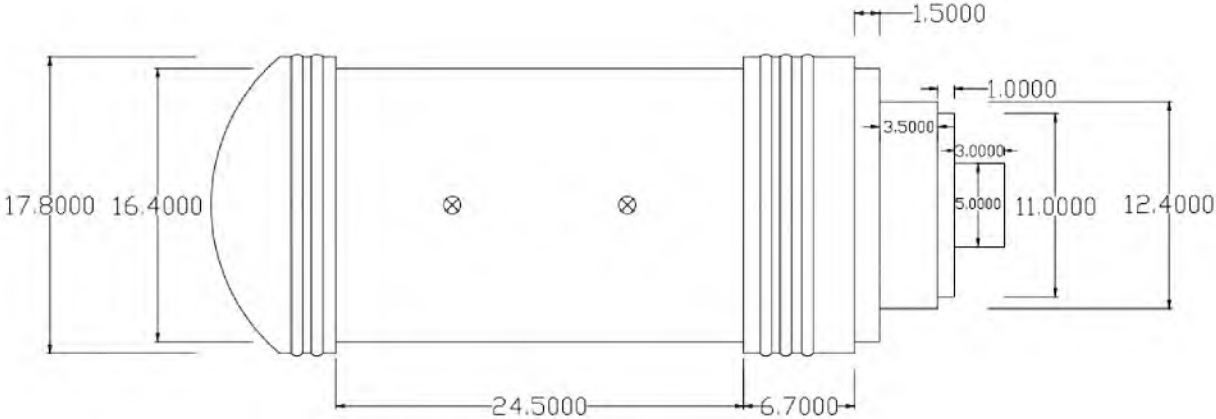
**Discusión**

**Conclusión**

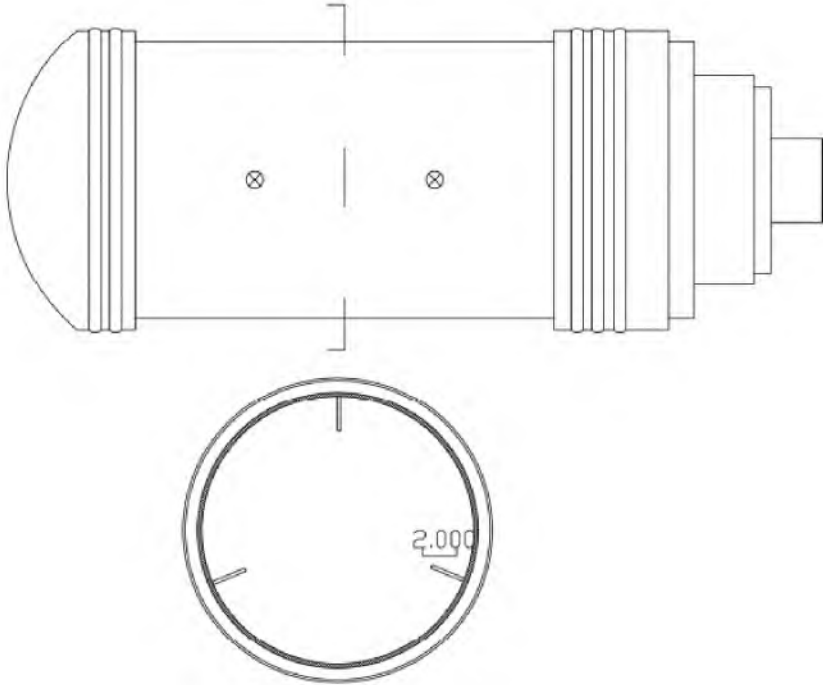
**ANEXO V**  
**FIGURAS**

**FIGURA 1. PLANO ESTRUCTURAL DEL MOLINO DE BOLAS**

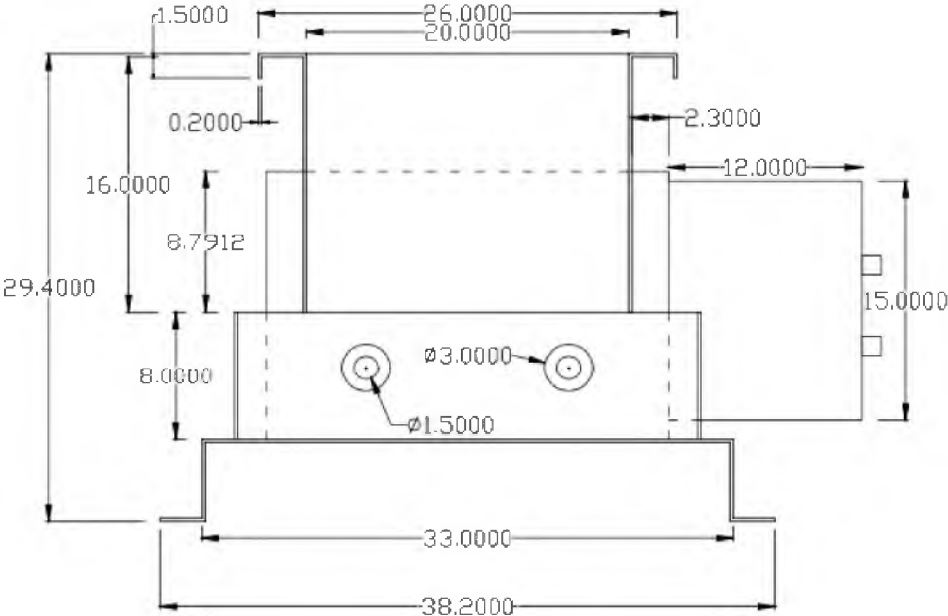
Vista lateral del tambor.



Corte interior tambor.



Vista frontal de la carcasa.



Vista en planta de la carcasa.

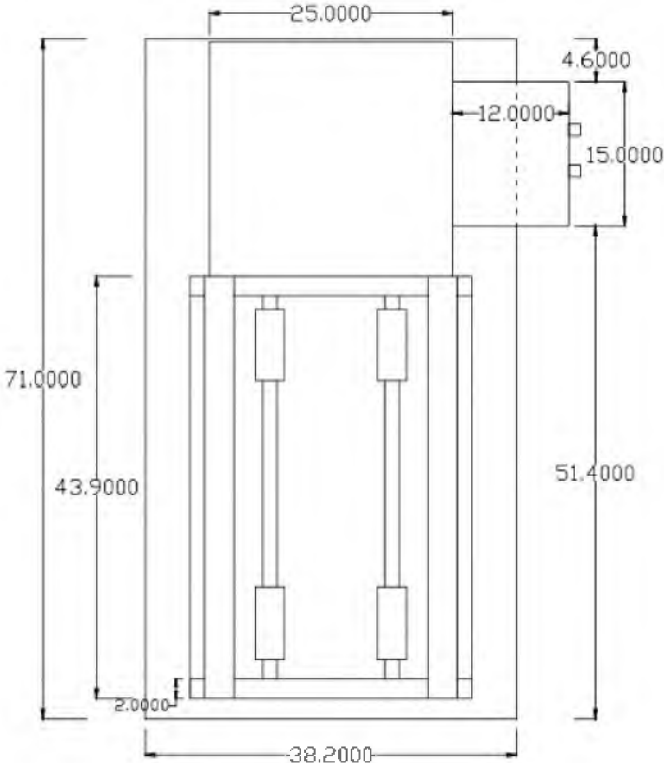
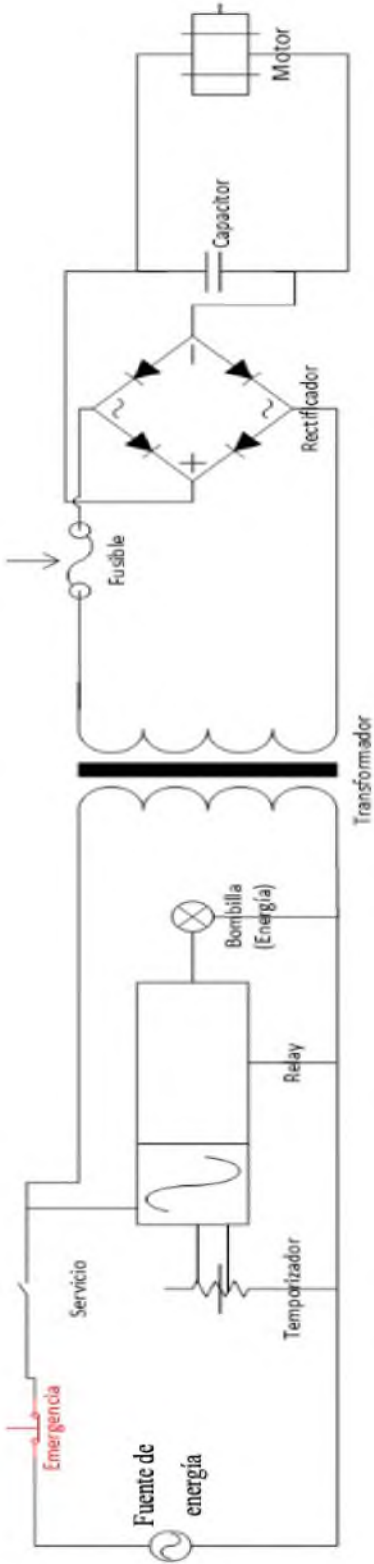




FIGURA 2. PLANO ELÉCTRICO DEL MOLINO DE BOLAS



**FIGURA 3. SELECCIÓN DE PARTÍCULAS MENORES A 20 mm PARA PRUEBAS M2, M3, M4 Y M5**



**FIGURA 4. COMPARACIÓN PARTÍCULAS TRITURADAS Y SIN TRITURAR, PRUEBA M1**



**FIGURA 5. PESAJE DE BALINES Y TAMICES VACÍOS**



**FIGURA 6. LLENADO DE MOLINO Y PUESTA EN MARCHA**



**FIGURA 7. RESULTADO POSTMOLIENDA DE PRUEBAS M3, M5 Y M1 RESPECTIVAMENTE**



**FIGURA 8. RESULTADO POST MOLIENDA DE ARCILLA**



Se obtuvo 456 g de producto menor a 250  $\mu\text{m}$ .



HOJA DE EVALUACIÓN

SUSTENTANTES

---

**Estefanía Almonte Gómez**

---

**Yudith Rodríguez Jesús**

ASESORES

---

Ing. Doris Peña Calderón

**Asesora**

---

Ing. Ramón Perez Romero

**Asesor**

JURADOS

---

**Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Calificación:** \_\_\_\_\_

**Fecha:** \_\_\_\_\_

---

**Ing. Doris Peña Calderón**  
**Directora Escuela de Química**