



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO MIXTO DE MOLIENDA Y  
TAMIZADO PARA MATERIALES MINERALES”**

**TESIS DE GRADO**

**Previa la Obtención del Título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**MARICELA XIMENA SAMANIEGO TOAPANTA**

**EDWIN WLADIMIR ESTRADA YAMBAY**

**RIOBAMBA-ECUADOR**

**2012**

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradecemos en primer lugar a Dios, por iluminar y guiar nuestras vidas siendo nuestra fuerza constante para poder llegar a este nuestro mayor sueño y anhelo.*

*A nuestros Padres y Hermanos que con su apoyo incondicional nos brindaron su amor y comprensión en cada instante del día a día.*

*Expresamos nuestra gratitud a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a la Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química que nos ha permitido formarnos íntegramente para ser útiles a la sociedad.*

*De igual manera a todas y cada una de las personas que nos brindaron su amistad en el transcurso de nuestras vidas estudiantiles y en especial a lo largo del presente trabajo de investigación para realizarlo con entusiasmo y concluirlo con felicidad.*

*Por último, por su ayuda, aporte y entrega, dejamos nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Mario Villacrés, al Ing. José Usiña y al Ing. Danilo Estrada. Que con su experiencia y conocimiento dieron paso firme a la conclusión del presente trabajo.*

Dedico la presente tesis a mis padres, en especial a mi mami Olguita que con su amor, sacrificio y paciencia me supo extender siempre su mano para caminar juntas.

A mi querido esposo y amigo Wladimir y a mi gran amor Sofía, mis tesoros, a quienes Dios envió a llenar de alegría y dicha mis días dándome fuerzas para luchar paso a paso.

***Maricela***

Dedico la presente tesis a mis padres, Vicente y Mercedes, que con su amor y paciencia supieron extender siempre su mano para caminar juntos y llegar al más anhelado sueño de mi vida.

A mis queridos hermanos: Danilo, Yolanda y Clarita por su respaldo y apoyo incondicional en las buenas y en las malas durante toda mi formación profesional.

Y en especial a los seres más maravillosos que me regalo Dios, a mi esposa Maricela y mi chiquita SOFIA IVETH, que día a día me brindan fuerzas para seguir adelante. Las amo mucho.

***Wladimir***

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dra. Yolanda Díaz	.....	.....
<b>DECANA FAC. CIENCIAS</b>		
Ing. Mario Villacrés	.....	.....
<b>DIRECTOR ESC. ING. QUÍMICA</b>		
Ing. Mario Villacrés	.....	.....
<b>DIRECTOR DE TESIS</b>		
Ing. José Usiña	.....	.....
<b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		
Tec. Carlos Rodríguez	.....	.....
<b>DIRECTOR CENTRO DOCUMENT.</b>		

“Nosotros **MARICELA XIMENA SAMANIEGO TOAPANTA Y EDWIN WLADIMIR ESTRADA YAMBAY**, autores y ejecutores de la presente tesis nos responsabilizamos de los pensamientos, ideas y resultados expuestos en el presente trabajo de investigación; siendo la ESPOCH la dueña intelectual de la misma.”

## INDICE DE ABREVIATURAS

**W** = Potencia del Motor.

**K** = Constante del Molino.

$\phi_i$  = Diámetro de la partícula antes de la molienda.

$\phi_f$  = Diámetro de la partícula después de la molienda

**m**= ancho de malla

**L**= luz de malla

**d**= diámetro del hilo

$\Delta\theta$ = fracción másica

$\theta_n$ = fracción acumulada

**B**= La cantidad a analizar o producto bruto.

**A**= El cernido o acumulado.

**R**= La suma de todos los rechazos o retenidos del peso total de la muestra.

**P<sub>i</sub>**= peso inicial de la muestra en (Kg)

**V**= velocidad del molino (rpm)

**T**= tiempo de molienda (seg)

**P<sub>f</sub>**= peso final de la muestra después de la molienda (Kg)

**M<sub>p</sub>**= cantidad de muestra perdida en la molienda.

**% R** =porcentaje de rendimiento de molienda

**% Re** =porcentaje de rechazo

**%R<sub>A</sub>** = porcentaje de rechazo acumulado.

**%C<sub>A</sub>**= porcentaje de cernido acumulado.

**C<sub>p</sub>**= capacidad relativa

$\eta$  = factor de rendimiento

$X_1$  = es el tamaño medio inicial del producto de partida

$X_2$  = es el tamaño medio final del producto

$K$  = constante de Rittinger

$E$  = energía por unidad de masa en  $\frac{Hp \cdot h}{ton}$

$P$  = potencia en Hp

$w$  = velocidad rpm

$F$  = fuerza de impacto

$F_i$  = fuerza debido a la aceleración centrífuga.

$h$  = largo del martillo

$l$  = ancho del martillo

$r$  = radio del eje

$m$  = masa

$a$  = aceleración

## TABLA DE CONTENIDO

PORTADA

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ANEXOS

RESUMEN ..... i

SUMMARY ..... ii

INTRODUCCIÓN ..... iii

ANTECEDENTES ..... v

JUSTIFICACIÓN ..... vii

OBJETIVOS ..... ix

### **CAPITULO I**

1. MARCO TEÓRICO ..... 1

1.1. MINERALES..... 1

1.1.1. DEFINICIÓN..... 1

1.1.2. PROPIEDADES DE LOS MINERALES..... 1

1.1.2.1. “Dureza de un mineral ..... 1

1.1.2.2. Tenacidad o Cohesión..... 2

1.1.2.3. Fractura de un mineral ..... 2

1.1.2.4. Electricidad y magnetismo..... 2

1.1.3. CLASIFICACIÓN QUÍMICA ..... 3

1.1.4. LOS MINERALES Y LA INDUSTRIA ..... 4

1.1.4.1. INDUSTRIAS CONSUMIDORAS..... 5

1.1.4.2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO ..... 6

1.1.4.3. FELDESPATO (MATERIA PRIMA PARA LA SIMULACIÓN).....	6
1.1.4.3.1. DEFINICION.- .....	6
1.1.4.3.2. CARACTERÍSTICAS .....	7
1.1.4.3.3. TIPOS .....	7
1.1.4.3.4. APLICACIÓN: .....	8
1.2. REDUCCIÓN DE TAMAÑO .....	8
1.2.1. DESINTEGRACIÓN MECÁNICA DE SÓLIDOS .....	11
1.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO A MOLER QUE DETERMINAN LA SELECCIÓN DE LA MÁQUINA .....	11
1.2.1.1.2. Estructura mecánica de los productos de partida.....	13
1.2.1.1.3. Humedad.....	13
1.2.1.1.4. Sensibilidad a la temperatura de las materias de partida .....	14
1.2.1.2. MOLINO .....	14
1.2.1.2.2. PARTES PRINCIPALES DE UN MOLINO .....	14
1.2.1.2.3. TIPOS DE MOLINOS .....	16
1.2.1.2.3.1. “Molino de Bolas o cilindros .....	16
1.2.1.2.3.2. Molino de Martillos .....	16
1.2.1.2.3.3. Molino de Rodillo.....	18
1.2.1.3. MOLIENDA .....	19
1.2.1.3.1. Definición .....	19
1.2.1.3.2. OBJETIVOS DE LA MOLIENDA .....	19
1.2.1.3.3. TIPOS DE MOLIENDA.....	19
1.2.1.3.4. CLASIFICACIÓN DE LA MOLIENDA .....	20
1.2.2 LEYES DE DESINTEGRACIÓN.....	21
1.2.2.1 Teoría de Rittinger:.....	21
1.2.2.2 Ley de Bond.....	22
1.2.2.3 Ley de Kick.....	22
1.3. SEPARACIONES MECÁNICAS .....	24
1.3.1. TAMIZ.....	25
1.3.1.1. DEFINICIÓN.....	25
1.3.2. TAMIZADO .....	27
1.3.2.1 Definición .....	27

1.3.2.2. OBJETIVO .....	27
1.3.2.3. EQUIPOS INDUSTRIALES PARA EL TAMIZADO .....	28
1.3.2.3.1 Rastrillos .....	28
1.3.2.3.2 Tamices fijos.....	28
1.3.2.3.3. Tamices vibratorios.....	28
1.3.2.3.4. Tamices de vaivén .....	29
1.3.2.3.5. Serie de tamices Tyler.....	29
1.3.2.4. FRACCIÓN MÁSCA Y ACUMULATIVA .....	30
1.3.2.5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	31
1.3.2.5.1. Porcentaje de cernido.....	32
1.3.2.5.2. Porcentaje de retenido.....	33
1.3.2.5.3 Diámetro medio .....	33
1.3.2.5.4. DIAGRAMAS GRANULOMÉTRICOS .....	33
1.3.2.5.4.1. DIAGRAMA DISTRIBUTIVO O SECUENCIAL.....	34
1.3.2.5.4.2. DIAGRAMA ACUMULADO .....	34

## **CAPITULO II**

2. PARTE EXPERIMENTAL .....	35
2.1 MUESTREO.....	35
2.2 METODOLOGÍA .....	36
2.2.1 MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	36
2.2.2.1 Métodos .....	36
2.2.2.1.1 Inductivos.....	36
2.2.2.1.2 Deductivos .....	36
2.2.2.1.3 Experimental.....	37
2.2.2. TÉCNICAS .....	37
2.2.2.1 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE LA MOLIENDA .....	38
CÁLCULOS Y RESULTADOS .....	41
2.2.2.2. TAMIZADO .....	42

### **CAPITULO III**

3.- CÁLCULOS Y RESULTADOS .....	49
3.1 CÁLCULOS .....	49
3.1.1 Cálculo de la Capacidad del molino .....	49
3.1.2 Calculo de la Potencia del motor .....	50
3.1.3 VELOCIDAD .....	51
3.1.4 DETERMINACIÓN DE FUERZAS Y POTENCIAS .....	51
3.1.4.1 TORQUE .....	51
3.1.4.2 Análisis en el martillo .....	52
3.1.5 CONCEPTOS FUERZA CENTRIFUGA .....	53
3.2 DIMENSIONAMIENTO.....	56
3.2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO.....	57
3.2.2 TIPOLOGÍA DE LOS MATERIALES DEL EQUIPO .....	58
3.2.3 MÉTODO Y TIPO DE CONTROL DEL EQUIPO .....	59
3.3 REQUERIMIENTOS PRESUPUESTARIOS.....	60
3.3.1 ANÁLISIS DE COSTOS.....	60
3.3.1.1 RECURSOS MATERIALES .....	60
3.3.1.2 Recursos Humanos .....	61
3.3.1.3 Recursos Totales .....	61
3.4 RESULTADOS .....	62
3.4.1 RESULTADOS DE VALIDACIÓN DEL EQUIPO.....	62
3.5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	70

### **CAPITULO IV**

4.1 CONCLUSIONES .....	71
4.2 RECOMENDACIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA .....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

### Tabla

1.2.1.1.1-1 Dureza de los productos .....	12
1.2.1.1.1-1 Clasificación según el orden creciente con la Escala Moh.....	13
1.2.1.3.4-1 Clasificación De La Molienda.....	20
2.2.2.1-1 Datos Experimentales para la Determinación de Rendimiento de Molienda del Feldespato .....	40
2.2.2.1-2 Datos Experimentales de la Determinación de % de Rendimiento de Molienda .....	41
2.2.2.2-1 Resultados de tamizado del producto de molienda .....	45
2.2.2.2-2 Resultados de tamizado del producto de molienda de 1 Kg.....	45
2.2.2.2-3 Resultados de tamizado del producto de molienda de 1,5 Kg.....	45
2.2.2.2-4 Resultados de tamizado del producto de molienda de 2,0 Kg.....	45
2.2.2.2-5 Resultados de tamizado del producto de molienda de 2,5 Kg.....	46
2.2.2.2-6 Resultados de tamizado del producto de molienda de 3,0 Kg.....	46
2.2.2.2-7 Resultados de tamizado del producto de molienda de 3,5 Kg.....	46
2.2.2.2-8 Resultados de tamizado del producto de molienda de 4,0 Kg.....	47
2.2.2.1-11 Resultados de tamizado del producto de molienda de 4,5 Kg.....	47
3.3.1.1-1 RECURSOS MATERIALES .....	60
3.3.1.2-1 Recursos humanos .....	61
3.3.1.3-1 Recursos Humanos .....	61
3.4.1-1 Datos Experimentales del tamizado t= 2min.....	63
3.4.1-3 Datos Experimentales del tamizado t= 3min.....	65
3.4.1-4 Datos Experimentales del tamizado t= 4min.....	66
3.4.1-5 Datos Experimentales del tamizado t=2 min.....	67
3.4.1-6 Datos Experimentales del tamizado t=4 min.....	68
3.4.1-7 Datos Experimentales del tamizado t=4 min.....	69

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1-1 Mineral .....	1
Fig. 1.1.4.3.1-1 Feldespato .....	6
Fig. 1.2-1 Reducción de Tamaño .....	8
Fig. 1. 2-2 Reducción de Tamaño por Compresión .....	9
Fig. 1.2-3 Reducción de Tamaño por Impacto .....	9
Fig. 1.2-4 Reducción de Tamaño por Frotamiento .....	10
Fig. 1.2-5 Reducción de Tamaño por Cortado .....	10
Fig.1.2.1.2.1-1 Molino .....	14
Fig. 1.2.1.2.3.1-1 Molino de bolas .....	16
Fig. 1.2.1.2.3.2-1 Molino de Martillos.....	18
Fig. 1.3.1-1 Tamiz.....	25
Fig. 1.3.1-2 Separación en Fracciones de un Tamiz .....	26
Fig. 1.3.1-3 Componentes de un Tamiz .....	26
Fig. 1.3.2.3-1 Tamiz Fijo .....	28
Fig. 1.3.2.3-2 Tamiz Vibratorio .....	28
Fig. 1.3.2.3-3 Tamiz Vaivén. ....	29
Fig. 1.3.2.3-4 Serie de Tamices Tyler.....	29
Fig. 1.3.2.5-1 Tamiz en Cascada .....	32
Fig. 1.3.2.5.4-1 Diagrama Distributivo o Secuencial .....	34
Fig. 1.3.2.5.4-2 Diagrama Acumulado .....	34
Fig. 3.1.4.2-1 Diagrama cuerpo libre del martillo .....	53
Fig. 3.1.4.2-2 Dimensionamiento de la cámara de molienda .....	53
Figura 3.1.6-1 Dimensionamiento de los tamices.....	55
Figura 3.1.6-1 Sistema de tamizado.....	56
Fig 3.4.1-1(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min).....	63
Fig 3.4.1-1(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min adicionales) .....	63
Fig. 3.4.1-2(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=3 min).....	64
Fig. 3.4.1-2(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=3min adicionales) .....	64
Fig. 3.4.1-3(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min).....	65

Fig. 3.4.1-3(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min adicionales) .....	65
Fig. 3.4.1-4(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min).....	66
Fig. 3.4.1-4(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=4 min adicionales).....	66
Fig. 3.4.1-5(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=2 min).....	67
Fig. 3.4.1-5(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min adicionales) .....	67
Fig. 3.4.1-6(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min) .....	68
Fig. 3.4.1-6(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min adicionales) .....	69
Fig. 3.4.1-7(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min).....	69
Fig. 3.4.1-7(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min adicionales) .....	69

## INDICE DE ANEXOS

ACOTACIONES PARTE LATERAL DERECHA .....	79
ACOTACIONES PARTE FRONTAL .....	80
PARTES DEL EQUIPO MIXTO DE MOLIENDA Y TAMIZADO DE MINERALES .....	81
EQUIPO MIXTO DE MOLIENDA Y TAMIZADO PARA MINERALES .....	82
GUIA OPERATIVA PARA EL EQUIPO MIXTO DE MOLIENDA Y TAMIZADO.	83

## RESUMEN

El objetivo del trabajo de investigación fue diseñar y construir un equipo mixto de molienda y tamizado para materiales minerales que será utilizado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH como complemento de enseñanza aprendizaje en los estudiantes.

En el diseño del equipo primero se efectuó la simulación del proceso en el laboratorio para obtener datos e identificar variables, luego se procedió a ejecutar cálculos de ingeniería para su dimensionamiento. Tomando esto como referencia seleccionamos los principales elementos del equipo como son: cámara de molienda, martillos, un motor de inducción; para el proceso de tamizado se colocó tamices acoplados en cascada con Mesh # 6, 11 y 18.

El equipo tiene dimensiones de 35cm de ancho por 70cm de largo por 102.3cm de altura y además la estructura principal está fabricada en tubo cuadrado de acero.

Fue sometido a pruebas de funcionamiento obteniendo un rendimiento de 80% comprobándose que el equipo es eficiente para la trituración y tamizado de materiales minerales. Convirtiéndose en un equipo didáctico y práctico fundamental en el aprendizaje y desarrollo de la comunidad estudiantil de nuestra Facultad.

## SUMMARY

The objective of the research work was designing and constructing a mixed equipment of a mill and sieving for mineral materials which will be used at the Unit Operations Lab of the ESPOCH as a complement of the student teaching learning.

First, in the equipment design the process simulation was carried out at the lab to obtain data and identify variables; then the engineering calculi for its dimensioning were conducted. From this the main equipment elements such as the mill chamber, hammers and an induction motor were selected; for the sieving process mices matched in cascade with N° 6, 11 and 18 were placed.

The equipment has three dimensions 35cm wide x 70cm long x 102.3 cm high and the main structure is manufactured with steel square pipe.

It was subjected to functioning tests obtaining 80% yield finding out that the equipment is efficient for grinding and mineral material sieving. It has become a didactic and practical equipment fundamental in the student community learning and development at our Faculty.

## INTRODUCCIÓN

En las industrias químicas y minera requieren por lo general una adecuada preparación de la materia prima en la que suele intervenir el acondicionamiento del tamaño de sus partículas obtenidas por desintegración de formas mayores. Esto se consigue mediante unas máquinas que se llaman quebrantadores, trituradores y molinos. Los primeros reducen los tamaños grandes a medianos; los segundos se emplean para grados intermedios de subdivisión y los terceros para pulverización fina de los tamaños medios.

Es importante la reducción de tamaños porque a menor tamaño mayor desarrollo superficial del producto, y esta superficie sí que es una característica decisiva en la mayor parte de las aplicaciones de los sólidos. Si se trata de que hayan de reaccionar, el proceso se inicia por su superficie, luego la velocidad de reacción será proporcional al desarrollo de dicha superficie, si se trata de los recubrimientos de superficies de otros materiales como es el caso de los pigmentos utilizados para preparar pinturas.

En la carrera de ingeniería química para poder diseñar y construir un equipo de reducción de tamaño se conoce las leyes por las cuales se rige el fenómeno de desintegración, en especial por lo que se refiere a la energía necesaria para llevarlo a cabo. Las características de los productos producidos. Los tipos de máquinas que se pueden emplear y el campo específico a que cada tipo puede aplicarse.

En su estudio se podrá observar que esta operación es quizá la menos científica de la Ingeniería Química, pues tanto los conceptos que se utilizan en la práctica como la selección los aparatos para un fin determinado se basan en observaciones o deducciones empíricas en su mayor parte.

EL objetivo de la tamización o tamizado es separar las distintas fracciones que componen un sólido granular o pulverulento, por el diferente tamaño de sus partículas utilizando para ello los tamices. En principio se puede considerar como tamiz toda superficie agujereada, siendo necesario para que se efectúe dicha operación un movimiento relativo, para con ello dar oportunidad a las partículas del sólido a que coincidan con las aberturas del tamiz y que pasen a través de estas las de menor tamaño.

La tamización es una operación de gran importancia en la industria química. Los productos cristalizados no salen en general, al mercado más que después de haber sido tamizados, ya que el tamaño de los cristales dependen muchas de sus propiedades utilitarias.

## ANTECEDENTES

Desde los comienzos de la civilización el hombre se ha beneficiado de los distintos tipos de cereales, minerales y un sin número de materias primas, por lo cual debía utilizar un método de tratamiento para hacer de estas un bien utilizable. Probablemente el método de molturación más primitivo haya sido el empleo de dos piedras, más o menos duras, planas y pulidas, entre las que se machacaban los cereales hasta conseguir una harina con la suficiente finura, para ser asimilada por el organismo.

En Asturias, el molino de mano de ruedas circulares de piedra, primera evolución de los molinos neolíticos, aparece por primera vez durante el periodo de la romanización. Su funcionamiento consistía simplemente en hacer girar la piedra superior sobre la inferior, accionándola manualmente con una palanca dispuesta de forma lateral, el grano se iba alimentando por un agujero que llevaba la rueda superior.

En la antigüedad al no tener fuentes de energía eléctrica y fuentes fósiles de combustible eran muy utilizados los molinos movidos por el viento. En el siglo VII d.C. ya se utilizaban molinos elementales en Persia (hoy, Irán) para el riego y para moler el grano. En estos primeros molinos la rueda que sujetaba las aspas era horizontal y estaba soportada sobre un eje vertical. Estas máquinas no resultaban demasiado eficaces, pero aún así se extendieron por China y el Oriente Próximo.

El molino de torre se desarrolló en Francia a lo largo del siglo XIV. Consistía en una torre de piedra coronada por una estructura rotativa de madera que soportaba el eje del molino y la maquinaria superior del mismo. Estos primeros ejemplares tenían una serie de características comunes. De la parte superior del molino sobresalía un eje horizontal. De este eje partían de cuatro a ocho aspas, con una longitud entre 3 y 9 metros. Las

vigas de madera se cubrían con telas o planchas de madera. La energía generada por el giro del eje se transmitía, a través de un sistema de engranajes, a la maquinaria del molino emplazada en la base de la estructura.

Además de emplearse para el riego y moler el grano, los molinos construidos entre los siglos XV y XIX tenían otras aplicaciones, como el bombeo de agua en tierras bajo el nivel del mar, aserradores de madera, fábricas de papel, prensado de semillas para producir aceite, así como para triturar todo tipo de materiales. En el siglo XIX se llegaron a construir unos 9.000 molinos en Holanda.

En lo referente a la tamización eran muy utilizadas desde la antigüedad por el hombre primitivo ya que generalmente después de moler el grano necesitaba obtener un producto uniforme para sus respectivas necesidades haciéndose imprescindible cernirlas aunque no muy exacto pero ya eran utilizadas. Una vez molido el grano (de cualquier cereal) y reducido a harina, se utilizaba el cernedor. Era un cilindro con varias secciones de malla de cedazo, cada una con un tamaño de paso distinto, que se hacía girar mientras la harina pasaba por su interior, dejando pasar cada sección harina de mejor a peor calidad (más fina a más gruesa) y finalmente el salvado, que es la cascarilla del grano molida.

## JUSTIFICACIÓN

Los minerales constituyen en la actualidad materias primas utilizadas por multitud de industrias y la base de innumerables productos de consumo cotidiano, los cuales en función de sus características físicas principalmente se utilizan directamente o con un tratamiento previo. Por ejemplo, se consideran minerales industriales las arenas silíceas destinadas a la fabricación de vidrio, las arcillas rojas empleadas en la industria cerámica, el caolín utilizado como aditivo en la industria del papel, la caliza explotada para fabricación de cal y de cemento, los fosfatos de los fertilizantes, el talco, el yeso, productos refractarios como la magnesia, conservantes como la sal e incluso el diamante utilizado en herramientas de corte.

Generalmente no hay minerales industriales que se puedan vender tal cual salen de la mina. Lo normal es que deban ser sometidos a uno o varios tratamientos previos, hasta conseguir un producto que pueda ser utilizado comercialmente. Los sistemas de tratamiento más habituales se refieren al tamaño de grano, a la pureza del mineral y al grado de humedad final que precisa el producto. Dado que en muchos casos el mineral está compactado o litificado en origen, el primer tratamiento a realizar consiste en moler, triturar o desterronar, según los casos, y clasificar en la granulometría adecuada.

Es por eso que las industrias de Proceso Químico enfrentan cada vez mayores exigencias, en cuanto al ahorro de energía, conservación de recursos valiosos, mejoramiento de la productividad y desempeño ambiental. En tiempos en que la competencia puede encontrarse a la vuelta de la esquina los laboratorios de Operaciones Unitarias se están inclinando hacia tecnologías de procesamiento avanzado y automatización para estar a la vanguardia y permanencia de ellos.

Como futuros profesionales de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con conocimientos claves acerca de los procesos físicos de separación, hemos visto la necesidad imperiosa de la realización del presente estudio de investigación.

Como base primordial del sector productivo de la ciudad y del país, el análisis realizado nace con la finalidad de la construcción de un equipo mixto de molienda y tamizado que cumpla con las especificaciones técnicas óptimas para la molienda y tamización de minerales, basándonos en juicios adquiridos como Ingenieros Químicos en el dimensionamiento y construcción de equipos.

En este contexto, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, la Facultad de Ciencias con su escuela de Ingeniería Química mediante la implementación de equipos diseñados y construidos por proyectos de investigación tal es el caso del presente documento, busca impulsar el área de Operaciones Unitarias, de aquí el equipo mixto de molienda y tamización diseñados impondrá la pauta para tener la facilidad de un prototipo a nivel de laboratorio que ayude a los estudiantes de la Facultad y la comunidad en general a una mejor visualización del respectivo proceso de separación que abarca un sin número de utilidades.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

- Realizar el diseño y construcción de un equipo mixto de molienda y tamizado para materiales minerales.

### **ESPECÍFICOS**

- Identificar las variables del proceso que participan en la operación unitaria de molienda y tamizado.
- Efectuar los cálculos de ingeniería que permitirán el diseño del molino y tamizadora de minerales.
- Realizar el dimensionamiento de las partes estructurales del equipo mixto de molienda y tamizado.
- Ejecutar el ensamble y armado del equipo.
- Verificar la implementación y el funcionamiento.

**CAPITULO I**  
**MARCO**  
**TEÓRICO**

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. MINERALES

**1.1.1. DEFINICIÓN.**-“Son aquellas sustancia sólidas, naturales, homogéneas, de origen inorgánico, de composición química definida (pero variable dentro de ciertos límites).



**Figura 1.1.1-1 Mineral**

Todo mineral debe reunir tres cualidades que son:

- ✓ Unidad material.
- ✓ Origen natural.
- ✓ Pertenecer a la parte solida de la corteza terrestre. **“(1)”**

### 1.1.2. PROPIEDADES DE LOS MINERALES

**1.1.2.1. “Dureza de un mineral:** La dureza de un mineral es la resistencia que presenta a ser rayado. Un mineral posee una dureza mayor que otro, cuando el primero es capaz de rayar al segundo.

**1.1.2.2. Tenacidad o Cohesión:** La tenacidad o cohesión es el mayor o menor grado de resistencia que ofrece un mineral a la rotura, deformación, aplastamiento, curvatura o pulverización.

**1.1.2.3. Fractura de un mineral:** Cuando un mineral se rompe lo puede de diversas formas:

- ✓ **Exfoliación.-** Significa que el mineral se puede separar por superficies planas y paralelas a las caras reales. **Ej.** Mica, galena, fluorita y yeso.
- ✓ **Laminar o fibrosa.-** Cuando presenta una superficie irregular en forma de astillas o fibras. **Ej.** Actinolita.
- ✓ **Concoidea.-** La fractura presenta una superficie lisa y de suave curva **Ej.** Silex y obsidiana.
- ✓ **Ganchuda.-** Cuando se produce una superficie tosca o irregular, con bordes agudos y dentados. **Ej.** Magnetita y cobre nativo.
- ✓ **Lisa.-** Es la que presenta una superficie regular.
- ✓ **Terrosa.-** Es la que se fractura dejando una superficie con aspecto granuloso o pulverulento.

**1.1.2.4. Electricidad y magnetismo:** Muchos minerales conducen bien la electricidad (conductores), mientras que se oponen a su paso (aislantes). Unos pocos la conducen medianamente (semiconductores). Gracias a estos últimos se han desarrollado semiconductores que permiten al ser humano conseguir un alto nivel tecnológico. **“(2)”**

### 1.1.3. CLASIFICACIÓN QUÍMICA

“La clasificación química divide los minerales en grupos según sus compuestos químicos. Cualquier mineral conocido puede ser integrado dentro de estos grupos, pues la práctica totalidad de ellos incluyen algunos de estos compuestos.

- ✓ **Elementos nativos:** Son los que se encuentran en la naturaleza en estado libre, puro o nativo, sin combinar o formar compuestos químicos. Ejemplos: oro, plata, azufre, diamante.
- ✓ **Sulfuros: compuestos:** De diversos minerales combinados con el azufre. Ejemplos: pirita, galena, blenda, cinabrio.
- ✓ **Sulfosales:** Minerales compuestos de plomo, plata y cobre combinados con azufre y algún otro mineral como el arsénico, bismuto o antimonio. Ej. pirargirita, proustita.
- ✓ **Óxidos:** Producto de la combinación del oxígeno con un elemento. Ej. oligisto, corindón, casiterita, bauxita.
- ✓ **Haluros:** Compuestos de un halógeno con otro elemento, como el cloro, flúor, yodo o bromo. Ej. sal común, halita.
- ✓ **Carbonatos:** Sales derivadas de la combinación del ácido carbónico y un metal. Ej. calcita, azurita, mármol, malaquita.
- ✓ **Nitratos:** Sales derivadas del ácido nítrico. Ej. nitrato sódico (o de Chile), salitre o nitrato potásico.

- ✓ **Boratos:** Constituidos por sales minerales o ésteres del ácido bórico. **Ej.** bórax, rasorita.
- ✓ **Fosfatos, arseniatos y vanadatos:** Sales o ésteres del ácido fosfórico, arsénico y vanadio. **Ej.** apatita, turquesa, piromorfita.
- ✓ **Sulfatos:** Sales o ésteres del ácido sulfúrico. Ejemplos: yeso, anhidrita, barita.
- ✓ **Cromatos, volframatos y molibdatos:** Compuestos de cromo, molibdeno o wolframio. **Ej.** wolframita, crocoita.
- ✓ **Silicatos:** Sales de ácido silícico, los compuestos fundamentales de la litosfera, formando el 95% de la corteza terrestre. **Ej.** sílice, feldespato, mica, cuarzo, piroxeno, talco, arcilla.
- ✓ **Minerales radioactivos:** Compuestos de elementos emisores de radiación. **Ej.** uraninita, torianita, torita.”(3)

#### 1.1.4. LOS MINERALES Y LA INDUSTRIA

“Los minerales industriales son aquellos que, en función de sus características físicas principalmente, se utilizan en la fabricación de productos, ya sea directamente o con un tratamiento previo. Conviene aclarar además que no son minerales de los que se extraigan metales como único fin, ni se aprovechan en función de su contenido energético, ni tienen normalmente valor estético u ornamental, ni son áridos que se utilicen en la construcción o en la obra pública.

#### **1.1.4.1. INDUSTRIAS CONSUMIDORAS**

La industria utiliza los minerales industriales de tres maneras posibles:

- ✓ Como componente mayoritario de los productos.
- ✓ Como componente minoritario o secundario (cargas, aditivos, etc.), aportando características específicas como dureza, color, fundencia.
- ✓ Como sustancia que interviene en el proceso industrial pero que no entra a formar parte del producto.

Veamos algunos ejemplos de industrias donde se utiliza los minerales:

- ✓ Cerámica
- ✓ Vidrio
- ✓ Industria Química
- ✓ Cemento, cal y yeso
- ✓ Abonos y fertilizantes
- ✓ Papel
- ✓ Industria metalúrgica
- ✓ Sector termoeléctrico

#### **1.1.4.2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO**

Prácticamente no hay minerales industriales que se puedan vender tal cual salen de la mina. Lo normal es que deban ser sometidos a uno o varios tratamientos previos, hasta conseguir un producto que pueda ser utilizado comercialmente. Dado que en muchos casos el mineral está compactado en origen, el primer tratamiento a realizar consiste en moler, triturar o desterronar, según los casos, y clasificar en la granulometría adecuada.

En este tratamiento se utiliza maquinaria muy variada: machacadoras de mandíbulas, trituradoras de martillos, clasificadoras mecánicas (cribas), trómeles, ciclones, etc.”(4)

#### **1.1.4.3. FELDESPATO (MATERIA PRIMA PARA LA SIMULACIÓN)**

**1.1.4.3.1. DEFINICION.-** “Los feldespatos son un grupo de minerales tectosilicatos constituyentes fundamentalmente de las rocas ígneas aunque pueden encontrarse en cualquier otro tipo de roca. Los feldespatos corresponden a los silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio, o mezclas de estas bases. Todos los feldespatos son minerales duros, de peso específico comprendido entre 2,5 y 2,75.



**Fig. 1.1.4.3.1-1 Feldespato**

#### 1.1.4.3.2. CARACTERÍSTICAS

- Su estructura consiste en una base de silicio ( $\text{Si}^{4+}$ ) en la que una parte ha sido sustituida, isomórficamente, por aluminio. Al desequilibrarse las cargas se compensan con cationes metálicos ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ).
- Pueden ser monoclinicos o triclinicos.
- Son de color blanco, de brillo vítreo o bien de colores muy claros.
- Su origen es petrográfico, muy abundantes y formados a través de la consolidación de los magmas.
- Son muy alterables y se deterioran a través de un proceso llamado caolinización que se produce en ambientes húmedos y cargados de  $\text{CO}_2$ .

#### 1.1.4.3.3. TIPOS

Se dividen en los grupos siguientes:

- Feldespatos potásicos, que son monoclinicos, entre los que están: ortosa, hialofano y anortoclasa.
- Plagioclasas (feldespatos de calcio o sodio), que son triclinicos, entre los que están: albita, andesina, anortita, banalsita, bytownita, dmisteinbergita y labradorita.
- Otros feldespatos: buddingtonita (feldespato de amonio) y celsiana (feldespato de bario)

#### 1.1.4.3.4. APLICACIÓN:

Como material de fabricación de vidrio, el feldespatos también se utiliza como materia prima de la industria cerámica, esta parte tiene un 30% de la dosis completa. Otros feldespatos se utilizan en la industria química, abrasivos y la industria de los electrodos.”(5)

### 1.2. REDUCCIÓN DE TAMAÑO

“El término de reducción de tamaño se aplica a todos los procesos de disminución de las dimensiones de los trozos (granos) de los minerales mediante la destrucción de los mismos por la acción de una fuerza.”(6)

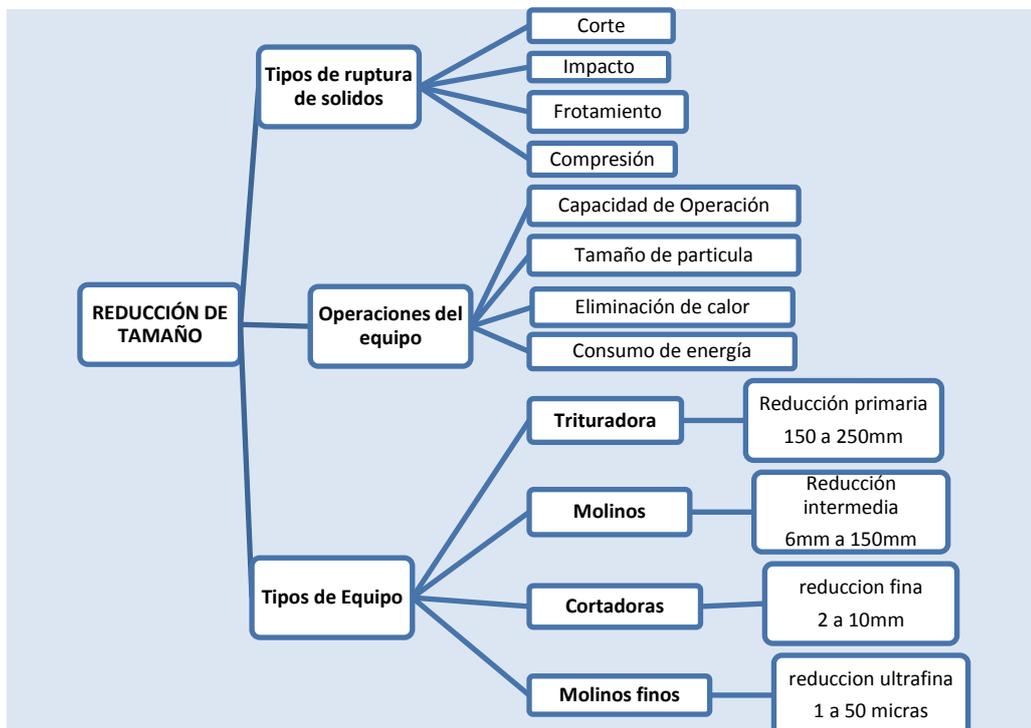
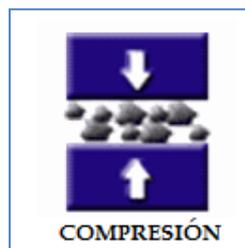


Fig. 1.2-1 Reducción de Tamaño

“La reducción de los sólidos se lo realiza de manera diferente pero comúnmente solo se emplean cuatro acciones mecánicas en las máquinas de reducción de tamaño, estas son las siguientes:

- ✓ **COMPRESIÓN.-** Es la acción mecánica que ejerce una fuerza exterior sobre un cuerpo reduciendo el volumen de este. **Ejemplo:** Una quebrantadora de mandíbulas.



**Fig. 1. 2-2 Reducción de Tamaño por Compresión**

- ✓ **IMPACTO.-** Es el choque de un material contra otro. **Ejemplo:** Molino de martillos.



**Fig. 1.2-3 Reducción de Tamaño por Impacto**

- ✓ **FROTAMIENTO DE CIZALLA.-** Es la acción de pasar muchas veces un material sobre otro con fuerza. **Ejemplo:** Molino de frotamiento.



**Fig. 1.2-4 Reducción de Tamaño por Frotamiento**

- ✓ **CORTADO.**- Es la acción de filo de una herramienta que corta y taja.

**Ejemplo:** Cortadora de cuchillas giratorias.



**Fig. 1.2-5 Reducción de Tamaño por Cortado**

Los fines de la reducción de tamaño son muy importantes en la industria por las siguientes razones:

- ✓ Facilita la extracción de un constituyente deseado que se encuentre dentro de la estructura del sólido.
- ✓ Se pueden obtener partículas de tamaño determinado cumpliendo con un requerimiento específico del alimento, como ejemplo la azúcar para helados, preparación de especias y refinado del chocolate.

- ✓ Aumento de la relación superficie-volumen incrementando, la velocidad de calentamiento o de enfriamiento, la velocidad de extracción de un soluto deseado, etc.
- ✓ Si el tamaño de partículas de los productos mezclarse es homogéneo y de tamaño más pequeño que el original, la mezcla se realiza más fácil y rápido, como sucede en la producción de formulaciones, sopas empaquetadas, mezclas dulces, entre otros.”(7)

### **1.2.1. DESINTEGRACIÓN MECÁNICA DE SÓLIDOS**

“Desde el punto de vista de la Ingeniería Química, es esencial conocer:

- ✓ Las leyes por las que se rige el fenómeno de desintegración, en especial por lo que se refiere a la energía necesaria para llevarlo a cabo.
- ✓ Las características de los productos producidos
- ✓ Los tipos de máquinas que se pueden emplear y el campo específico a que cada tipo puede aplicarse.”(8)

#### **1.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO A MOLER QUE DETERMINAN LA SELECCIÓN DE LA MÁQUINA**

“Para la selección de la maquina es necesario conocer las características de los productos de partida como son los siguientes aspectos:

**1.2.1.1.1. Dureza de los productos.**- Es importante para la selección de los aparatos de trituración. En este caso se necesitaría más energía y los tiempos de residencia en la zona de acción son mayores.

La dureza de un mineral se mide por medio de la escala de Moh; el cual es un criterio de su resistencia de la trituración. Se trata de una de las indicaciones más acertadas del carácter abrasivo del mineral, factor que determina el desgaste de los medios de molienda. La clasificación de la dureza está basada en el esfuerzo de compresión de cubos de una pulgada para valores

**Tabla 1.2.1.1.1-1 Dureza de los productos**

<b>VALORES (lb/pulg<sup>2</sup>)</b>	<b>MATERIALES</b>
<10000	muy suave
Entre 10000 - 15000	suaves
Entre 15000 - 20000	medios
Entre 20000 - 25000	duros
Entre 25000 - 30000	Muy duros

La clasificación según el orden creciente de dureza con la escala de Moh es la siguiente:

**TABLA 1.2.1.1.1-1 Clasificación según el orden creciente con la Escala Moh**

MATERIALES	DUREZA
1.- Talco	SUAVE
Tortas de filtros prensa	
Ceras	
2.- Yeso	
Sal de rocas	
Sales cristalinas en general	
Carbón suave	
3.- Calcita	
Mármol	
Cal suave	
Tiza	
Azufre	
4.- Fluorita	
Fosfato suave	
Caliza	
5.- Fosfato duro	
Cal dura	
6.- Feldespato	
7.- Granito	DURA
Cuarzo	
8.- Topacio	
9.- Zafiro	
Esmeril	
10.- Diamante	

**Fuente:** BRITO, H. Texto Básico de Operaciones Unitarias I, Riobamba-Ecuador 2000.

**1.2.1.1.2. Estructura mecánica de los productos de partida:** Conocer la estructura mecánica de los productos de partida es necesario pues esto puede determinar la clase de fuerza que con más probabilidad efectuara la molienda.

**1.2.1.1.3. Humedad:** La presencia de agua puede facilitar o complicar la molienda. Si hay un exceso de humedad puede que el sistema se colapse y no deslice al formarse una pasta. Para la mayoría de las sustancias el contenido en humedad mayor de 2 o 3% puede producir el embotamiento del molino.

**1.2.1.1.4. Sensibilidad a la temperatura de las materias de partida:** En la zona de acción de un molino tiene lugar fricción entre las partículas. Es posible que la fuerza aplicada no rompa al mineral y éste vuelva a su forma desprendiendo energía en forma de calor. Por ello, los aparatos suelen ir refrigerados por qué no se puede permitir que los alimentos se calienten espontánea e indiscriminadamente.”(9)

## 1.2.1.2. MOLINO

**1.2.1.2.1 Concepto.-**“Un molino es un artefacto o máquina que sirve para moler. Por extensión el término molino se aplica vulgarmente a los mecanismos que utilizan la fuerza de viento, agua, animal o humana para mover otros artefactos, tales como una bomba hidráulica o un generador eléctrico.



**Fig.1.2.1.2.1-1 Molino**

## 1.2.1.2.2. PARTES PRINCIPALES DE UN MOLINO

Las piezas fundamentales de un molino son:

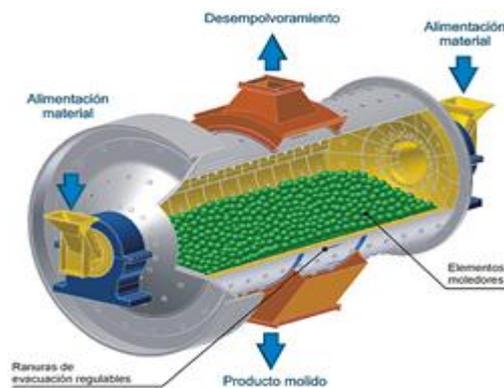
- ✓ **Cuerpo o casco del molino.-** El casco del molino está diseñado para soportar impactos y carga pesada, es la parte más grande de un molino y está construido de

placas de acero forjadas y soldadas. Tiene perforaciones para sacar los pernos que sostienen el revestimiento o forros.

- ✓ **Tolva de alimentación.-** Es el conducto para la entrada de carga impulsada por la cuchara de alimentación.
- ✓ **Chumaceras.-** Se comporta como soporte del molino y la vez la base sobre la que gira el molino
- ✓ **Piñón y catalina.-** Son los engranajes que sirven como mecanismo de transmisión de movimiento. El motor del molino acciona un contra-eje al que esta adosado el piñón, este es encargado de accionar la catalina la que proporciona movimiento al molino.
- ✓ **Chaquetas o revestimiento.-** Sirven de protección del casco del molino, resiste al impacto de la misma carga.
- ✓ **Cuerpos trituradores.-** Los cuerpos trituradores van a ser utilizados en los molinos cuya acción de rotación transmite a la carga de cuerpos moledores fuerzas de tal naturaleza que estos se desgastan por abrasión, impacto y en ciertas aplicaciones metalurgistas por corrosión.
- ✓ **Dispositivos de descarga.-** El sistema de descarga del mineral en los molinos es por el muñón de descarga o tolva de salida que es hueco y generalmente con nervaduras de espiral en el interior de la tolva de salida. El mineral, al salir del muñón de salida que es hueco, cae a través del tamiz. **“(10)”**

### 1.2.1.2.3. TIPOS DE MOLINOS

**1.2.1.2.3.1. “Molino de Bolas o cilindros:** Consiste en un cilindro de acero lleno hasta la mitad con bolas o cilindros de acero y para ejercer su efecto reductor se le aplica un lento movimiento rotacional.



**Fig. 1.2.1.2.3.1-1 Molino de bolas**

**1.2.1.2.3.2. Molino de Martillos:** Es una cámara cilíndrica cubierta con una plancha perforada de acero que en su interior tiene un rotor con una serie de vástagos pegados a su eje (martillos) que giran a gran velocidad. La fuerza principalmente utilizada es la de impacto al ser golpeado e impulsado contra la plancha de acero.

La alimentación entra por la parte superior de la coraza, se trocea y cae a través de una abertura situada en el fondo. En un molino de martillos, las partículas se rompen por una serie de martillos acoplados a un disco rotor. Una partícula de alimentación que entra en la zona de molienda no puede salir sin ser golpeada por los martillos, se rompe en pedazos, que se proyectan contra la placa yunque estacionario situado dentro de la

coraza, rompiéndose todavía en fragmentos más pequeños. Estos a su vez son pulverizados por los martillos y son impulsados a través de una rejilla o un tamiz que cubre la abertura de la descarga.

#### **1.2.1.2.3.2.1. Características:**

- ✓ Reducen de 60 a 240 Kg del sólido por kilowatt- hora de energía consumida.
- ✓ Estas máquinas reducen de 0.1 a 15 toneladas/ h a tamaños más finos que 200 mallas.

#### **1.2.1.2.3.2.2. Desventajas:**

- ✓ Baja eficiencia de energía en comparación con el molino de rodillos.
- ✓ Puede generar calor.
- ✓ Puede generar ruidos y emisiones de polvo.
- ✓ No hay uniformidad en el tamaño de partículas

#### **1.2.1.2.3.2.3 Usos:**

- ✓ Cerámica
- ✓ Molienda de minerales
- ✓ Recuperación de suelo
- ✓ Reciclaje industrial



**Fig. 1.2.1.2.3.2-1 Molino de Martillos**

**1.2.1.2.3.3. Molino de Rodillo:** Está constituido por dos o más rodillos de acero paralelos entre sí y girando concéntricos impulsando al alimento a pasar por el espacio entre ellos. La principal fuerza ejercida es la de compresión. “(11)



**Fig.1.2.1.2.3.3-1 Molino de Rodillos**

### **1.2.1.3. MOLIENDA**

**1.2.1.3.1. Definición.-** “Es una operación unitaria que consiste básicamente en la disminución o reducción de tamaños de sólidos generando unidades de menor masa a partir de trozos mayores por medio de la fractura, corte o quebrantamiento de los mismos, mediante la aplicación de presiones que ejercen las maquinarias

En el proceso de molienda partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaño a 10 - 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice. El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto y, por esta razón frecuentemente se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

#### **1.2.1.3.2. OBJETIVOS DE LA MOLIENDA**

- ✓ Producción de Cuerpos Sólidos con una determinada amplitud de tamaño granular o con superficies específicas.
- ✓ Separación por fractura de minerales o cristales de compuestos químicos asociados en estado sólido

#### **1.2.1.3.3. TIPOS DE MOLIENDA**

- ✓ Molienda Simple (Producto más manejable)
- ✓ Molienda Forzada (Máxima superficie posible)
- ✓ Molienda Condicionada (Menor cantidad de fino)

- ✓ Molienda Diferencial (Selección por tamaño)
- ✓ Molienda Formal (Forma del fragmento)
- ✓ Auto molienda (Fricción recíproca)
- ✓ Molienda Criógena (Frío)
- ✓ Molienda combinada (mezcla de operaciones)

#### 1.2.1.3.4. CLASIFICACIÓN DE LA MOLIENDA

La operación unitaria de molienda se clasifica de acuerdo a la siguiente tabla:”(12)

**TABLA 1.2.1.3.4-1 Clasificación De La Molienda**

PROCESO	TAMAÑO DE SALIDA
Molienda gruesa	$\leq 1 \text{ mm}$
Molienda fina	$100 \mu\text{m}$
Molienda ultra fina	$\leq 100 \mu\text{m}$

**Fuente:** Molienda: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3324/1/5846.pdf>

## 1.2.2 LEYES DE DESINTEGRACIÓN

### 1.2.2.1 Teoría de Rittinger:

"La consecuencia de la trituración de una materia es la aparición de nuevas superficies libres, y esto se consigue venciendo entre otras resistencias la fuerza de cohesión. Si la fractura crea nuevas superficies consumiendo energía el principio de conservación de esta obliga a admitir que exista una energía de superficie, consecuencia de la cual sería la fuerza de cohesión. La cantidad de energía contenida en la unidad de superficie es la energía si para una cantidad superficial específica Z. Si el resultado inmediato de la desintegración es liberar nuevas superficies. Resulta lógico enunciar que "El trabajo necesario para una desintegración sea proporcional al aumento de superficie producido". Siendo esta la Ley de Rittinger, matemáticamente es:

$$W = f(\phi) \quad \text{Ec: 1.2.2.1-1}$$

$$\frac{dW}{d\phi} = K \left( \frac{1}{\phi} \right) \quad \text{Ec: 1.2.2.1-2}$$

$$W = K \left[ \left( \frac{1}{\phi f} \right) - \left( \frac{1}{\phi i} \right) \right] \quad \text{Ec: 1.2.2.1-3}$$

**Dónde:**

W = Potencia del Motor.

K = Constante del Molino.

$\phi_i$  = Diámetro de la partícula antes de la desintegración.

$\phi_f$  = Diámetro de la partícula después de la desintegración"(13)

### 1.2.2.2 Ley de Bond:

"Bond propone un método para estimar la potencia requerida para la trituración y molienda basada en el rozamiento semi - teórico, y dice de manera compactada: El trabajo requerido para formar partículas de tamaño  $\phi_p$  a partir de alimentaciones muy grandes es proporcional a la raíz cuadrada de la relación superficie - volumen (sp/sv) del producto. Su ecuación es:

$$\frac{P}{\dot{m}} = \frac{Kb}{\phi_p} \quad \text{Ec: 1.2.2.2-1}$$

**Dónde:**

$P$  = potencia necesaria para desintegrar.

$\dot{m}$  = masa de material a desintegrar.

$Kb$  = contante que depende del tipo de máquina y del material a desintegrar.

$\phi_p$  = tamaño de la partícula.

### 1.2.2.3 Ley de Kick:

Según los trabajos de este autor, el trabajo físico necesario para la desintegración sería función logarítmica del cociente de los tamaños inicial y final:

$$W = B \log \frac{L_i}{L_f} \quad \text{Ec: 1.2.2.3-1}$$

**Dónde:**

W= índice de trabajo

B= contante que depende del tipo de máquina y del material a desintegrar.

$L_i$  =tamaño de la partícula antes de la desintegración.

$L_f$  = tamaño de la partícula después de la desintegración

Se puede enunciar diciendo **“Que el trabajo absorbido para producir cambios análogos en la configuración de dos cuerpos geoméricamente semejantes y de la misma materia varía con el volumen o la masa de esos cuerpos”**.

Según la Ley de Kick, se necesita la misma cantidad de energía para desintegrar una materia desde 1 a 0,5 cm que desde 0,5 a 0,25cm; que desde 0,01 a 0,005 cm y así sucesivamente.

La constante B depende del aparato, de la clase de materia que desintegra y aun de la forma en que se efectúa la operación.

Matemáticamente, las expresiones de las leyes de Rittinger y de Kick tienen parentesco.

En efecto: Como el trabajo necesario para la reducción de las dimensiones lineales de una partícula es tanto mayor cuanto mayor sea la reducción, supongamos que aquel sea función de una potencia, x, de L, entonces:

$$\frac{dw}{dL} = -k \left( \frac{1}{L^x} \right) \quad \text{Ec: 1.2.2.3-2}$$

Si  $x = 1$ , al integrar para el intervalo de tamaños  $L_1$  y  $L_2$  se obtiene la expresión de Kick:

$$w = k \log \left( \frac{L_1}{L_2} \right) \quad \text{Ec: 1.2.2.3-3}$$

Si  $x = 2$ , la integración conduce a la expresión de Rittinger:

$$w = k \left[ \left( \frac{1}{L_2} \right) - \left( \frac{1}{L_1} \right) \right] \quad \text{Ec 1.2.2.3-4}$$

En la realidad ocurre que la Ley de Rittinger se cumple mejor que la de Kick en los molinos finos; por el contrario esta última se adapta mejor a los hechos en la desintegración de partículas gruesas". (14)

### 1.3. SEPARACIONES MECÁNICAS

“Las separaciones es un método físico para separar mezclas. Consiste en hacer pasar una mezcla de partículas sólidas de diferentes tamaños por un tamiz. Las partículas de menor tamaño pasan por los poros del tamiz atravesándolo y las grandes quedan retenidas por el mismo.

La separación de materiales sólidos por su tamaño es importante para la producción de diferentes productos. Además de lo anterior, se utiliza para el análisis granulométrico de

los productos de los molinos para observar la eficiencia de éstos y para control de molienda de diversos productos o materias primas.”(15)

Existen dos métodos generales que son:

- ✓ El uso de una criba o tamiz, separador o membrana porosa que retiene un componente y permite que pase el otro.
- ✓ La utilización de diferencias de velocidades de sedimentación cuando las partículas o gotas se mueven a través de un gas o un líquido.

### 1.3.1. TAMIZ

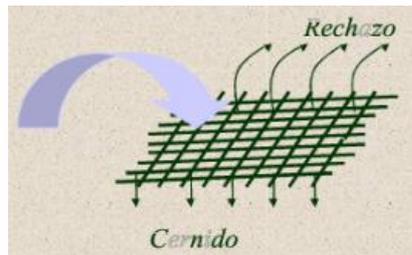
**1.3.1.1. DEFINICIÓN.-** “Un tamiz es una malla metálica constituida por barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde se hace pasar el compuesto solido previamente triturado o molido. Las aberturas que deja el tejido y, que en conjunto constituyen la superficie de tamizado, pueden ser de forma distinta, según la clase de tejido.



**Fig. 1.3.1-1 Tamiz**

Un solo tamiz puede realizar una separación en dos fracciones (rechazo y cernido). Se las llama fracciones no clasificadas, ya que aunque se conozca el límite superior o

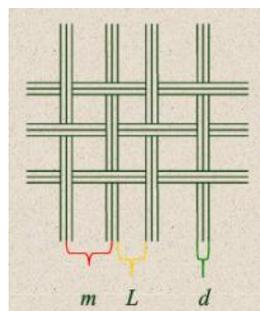
inferior de los tamaños de partícula de cada una de las fracciones, no se conoce el otro límite. El material que se hace pasar a través de una serie de tamices de diferentes tamaños se separa en fracciones clasificadas por tamaños, es decir, fracciones cuyas partículas se conocen por su tamaño máximo y mínimo.



**Fig. 1.3.1-2 Separación en Fracciones de un Tamiz**

Los elementos que componen un tamiz suponiendo que posee un hilo circular son los siguientes:

- ✓ Luz de malla (L)
- ✓ Diámetro del hilo (d)
- ✓ Ancho de malla (m)



**Fig. 1.3.1-3 Componentes de un Tamiz**

Para lo cual se tiene:  $m = L + d$

**Dónde:**

**m**= ancho de malla

**L**= luz de malla

**d**= diámetro del hilo

### **1.3.2. TAMIZADO**

**1.3.2.1 Definición.-** El tamizado es una operación unitaria o método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas, específicamente consiste en la separación de una mezcla de partículas de diferentes tamaños en dos o más fracciones, cada una de las cuales estará formado por partículas de tamaño más uniforme que la mezcla original.

#### **1.3.2.2. OBJETIVO**

- ✓ Separar las distintas fracciones que componen un sólido granulado o polvoriento por el diferente tamaño de sus partículas.

En la parte práctica la operación unitaria de tamizado es aplicado a nivel de:

- ✓ En el laboratorio para el análisis granulométrico
- ✓ Uso industrial de separar distintos tamaños de partículas, es decir, la desintegración mecánica de sólidos.

### 1.3.2.3. EQUIPOS INDUSTRIALES PARA EL TAMIZADO

**1.3.2.3.1 Rastrillos.-** Se utiliza mucho para tamizado de grandes tamaños, en especial los superiores a 2,5 cm.

**1.3.2.3.2 Tamices fijos.-** Se construyen con placas metálicas perforadas, así como también con tejidos metálicos que suelen disponerse en ángulo hasta de 60° sexagesimales con la horizontal.

Estos tamices se usan en las operaciones intermitentes de pequeña escala, tales como el cribado de la arena, grava o carbón, para lo cual se proyecta el material sobre el tamiz.



**Fig. 1.3.2.3-1 Tamiz Fijo**

**1.3.2.3.3. Tamices vibratorios.-** Se utilizan para grandes capacidades. El movimiento vibratorio se le comunica al tamiz por medio de levas, con una excéntrica y un volante desequilibrado o mediante un electroimán. El tamiz puede poseer una sola superficie tamizante o llevar dos o tres tamices en serie.



**Fig. 1.3.2.3-2 Tamiz Vibratorio**

**1.3.2.3.4. Tamices de vaivén.-** Este equipo está muy generalizado se usa mucho para el tamizado de productos químicos secos hasta el tamaño correspondiente a casi 30 mallas.



**Fig. 1.3.2.3-3 Tamiz Vaivén.**

**1.3.2.3.5. Serie de tamices Tyler.-** Esta es una serie de tamices estandarizados usados para la medición del tamaño y distribución de las partículas en un rango muy amplio de tamaño. Las aberturas son cuadradas y se identifican por un número que indica la cantidad de aberturas por pulgada cuadrada.

Matemáticamente nos queda:

1
2
3
$\dots$
$n-1$
n

$$D_{\rho n-1} = \sqrt{2D_{\rho n}}$$

**Fig. 1.3.2.3-4 Serie de Tamices Tyler**

#### 1.3.2.4. FRACCIÓN MÁSCICA Y ACUMULATIVA

La fracción másica y acumulativa son dos términos necesarios para poder definir y realizar los diferentes cálculos que se deben hacer en un análisis por tamizado (granulométrico) de partículas. La fracción másica se denota como  $\Delta\theta$ , representa la relación entre la cantidad de muestra en un tamiz y la cantidad total de la muestra; su fórmula es:

$$\Delta\theta = \frac{\text{masa del tamizado}}{\text{masa total}} \quad \text{Ec 1.3.2.4.1}$$

**Dónde:**

$\Delta\theta$ = fracción másica

La fracción acumulativa es la suma de las fracciones másicas por lo que:

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \Delta\theta_n \quad \text{Ec 1.3.2.4.2}$$

**Dónde:**

$\theta_n$ = fracción acumulada

$n$ = número de tamiz

$\Delta\theta$ = fracción másica en cada tamiz

### 1.3.2.5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

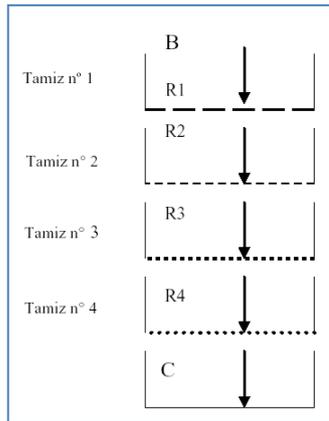
El análisis granulométrico tiene por objeto determinar en el laboratorio la composición por tamaño de un determinado molido, gránulos o pulverulento. Sus resultados suelen expresarse en las llamadas tablas o diagramas granulométricos.

De los distintos métodos existentes para realizar el análisis granulométrico, quizá el más utilizado sea la tamización con tamices acoplados en cascada. Para realizarlo se coloca un juego de tamices en cascada, es decir, ordenados de arriba abajo por orden decreciente de luz o abertura de malla. El producto a analizar se añade sobre el primer tamiz, es decir aquel de abertura de malla mayor y se somete a un movimiento vibratorio.

El producto a analizar o producto bruto, B, queda distribuido en diferentes fracciones según el tamaño de partícula denominándose:

- ✓ **RETENIDO:** Producto que queda sobre el tamiz
  
- ✓ **CERNIDO:** Producto que atraviesa el tamiz

En una tamización en cascada el cernido de un tamiz constituye la alimentación del siguiente, por lo tanto se obtienen tantos retenidos como tamices constituyan la cascada y un solo cernido, constituido por el producto que atraviesa las mallas del último tamiz o tamiz de abertura de malla más pequeña.



**Fig. 1.3.2.5-1 Tamiz en Cascada**

Teóricamente se debe cumplir que:

$$\mathbf{B = A + R}$$

Siendo:

**B**= La cantidad a analizar o producto bruto.

**A**= El cernido o acumulado.

**R**= La suma de todos los rechazos o retenidos del peso total de la muestra.

Conociendo los datos de cada una de las fracciones retenidas en los diferentes tamices se puede establecer unas series de índices de gran interés en análisis granulométrico por tamización:

**1.3.2.5.1. Porcentaje de cernido.-** Es el producto que atraviesa el tamiz y se define como la diferencia entre 100 y % de retenido acumulado:

$$\%*cernido* = 100 - \%*Retenido Acumulado*$$

### 1.3.2.5.2. Porcentaje de retenido.

Del peso total de la muestra

$$\% \textit{Retenido} = \frac{\textit{Peso del material retenido en el tamiz}}{\textit{Peso total de la muestra}} * 100$$

Siendo:  $\% \textit{cernido} + \% \textit{Acumulado} = 100$

**1.3.2.5.3 Diámetro medio.-** De las partículas retenidas entre dos tamices consecutivos, se expresa como la media aritmética de la abertura de la malla ( $I_1$ ) de las mismas:

$$D_2 = I_1 + I_2 / 2$$

$$D_2 = I_2 + I_3 / 2$$

**Donde:**

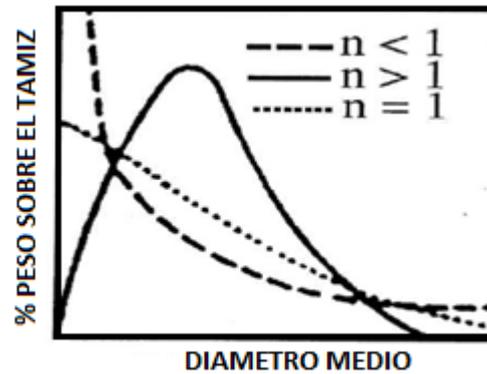
$D_2$ = diámetro medio

$I_1$ = media aritmética de la abertura de la malla

### 1.3.2.5.4. DIAGRAMAS GRANULOMÉTRICOS

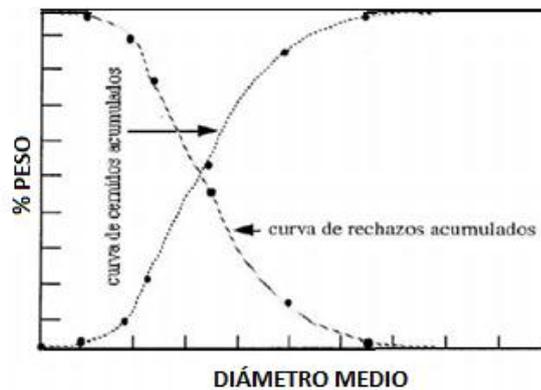
Es frecuente expresar los resultados del análisis granulométrico representándolos gráficamente. Los más utilizados son el Distributivo o Secuencial y el Acumulado.

**1.3.2.5.4.1. DIAGRAMA DISTRIBUTIVO O SECUENCIAL.-** Se obtiene representado en un eje de coordenadas los porcentajes que quedan retenidos en cada tamiz, frente a los diámetros medios.



**Fig. 1.3.2.5.4-1 Diagrama Distributivo o Secuencial**

**1.3.2.5.4.2. DIAGRAMA ACUMULADO.-** Pueden referirse a rechazos o a cernidos y se obtienen representando los porcentajes acumulados frente al diámetro medio de las partículas.”(16)



**Fig. 1.3.2.5.4-2 Diagrama Acumulado**

**CAPITULO II**  
**PARTE**  
**EXPERIMENTAL**

## **CAPITULO II**

### **2. PARTE EXPERIMENTAL**

Para el diseño del equipo mixto de molienda y tamizado a nivel de laboratorio ha sido necesario realizar una simulación del proceso utilizando un molino de martillos tipo MTL-13ZS-4, 220/380 V, 20.7/12 A, 55Kw, 1445 rpm, 50 Hz, para identificar las diferentes variables que intervienen en el proceso y realizar los cálculos de ingeniería.

La molienda y tamizado es una operación básica que se realiza en diferentes procesos industriales y también las pruebas correspondientes al proceso práctico enseñanza aprendizaje.

#### **2.1 MUESTREO**

Para llevar a cabo la simulación de operación unitaria de molienda y tamizado se realizó la colecta del mineral feldespató de una manera cuidadosa, aplicando criterios básicos en cuanto al grado de alteración y dimensiones de la muestra, estos minerales son utilizados a nivel industrial en la fabricación de cerámicas y techos de fibra-cemento respectivamente.

El feldespató se pudo obtener de la mina ubicada por Yaruquies a temperatura ambiente, para tener datos precisos se redujo el tamaño de los minerales a un diámetro de 3cm, el tamaño de la muestra es importante, ya que este deberá ser representativo del volumen de roca que se desea estudiar.

## **2.2 METODOLOGÍA**

### **2.2.1 MÉTODOS Y TÉCNICAS**

#### **2.2.2.1 Métodos**

El estudio de este proyecto de investigación tiene un carácter explicativo y experimental de tal forma que permita responder los distintos fenómenos a analizarse durante el proceso de molienda de minerales y su posterior tamizado para la construcción de la curva granulométrica. El método a utilizarse es una guía de procedimientos, producto de la reflexión, que provee pautas lógicas generales para desarrollar y coordinar operaciones destinadas a la consecución de objetivos intelectuales o materiales del modo más eficaz posible.

Entre los métodos a utilizarse se tiene:

**2.2.2.1.1 Inductivos.-** Involucra aquellos procedimientos que van de lo simple a lo compuesto, es decir, de las partes al todo, se caracterizan porque tienen una síntesis. Y consiste en:

Recopilar varios datos como dureza del mineral a moler, potencia necesaria para la molienda y así emplearlos en el diseño más apropiado del molino, yendo así de lo particular a lo general, de los hechos individuales a las generalizaciones.

**2.2.2.1.2 Deductivos.-** Están basados en la descomposición del todo en sus partes va de lo general a lo particular y se caracteriza porque contiene un análisis. Parte de generalizaciones ya establecidas, de reglas, leyes o principios para resolver problemas

particulares o efectuar demostraciones con algunos ejemplos; así en nuestro caso es el proceso de tamizado el cual permite dividir la descarga del mineral molido en varias fracciones para elaborar la curva granulométrica respectiva.

**2.2.2.1.3 Experimental.-**Aplica la observación de fenómenos, que en primer momento es sensorial. Con el pensamiento abstracto se elabora la hipótesis y se diseña el experimento con el fin de reproducir el objeto de estudio, controlando el fenómeno para probar la validez de la hipótesis.

- **Observación Científica.-** Es el propio de las ciencias descriptivas. Es la observación de una parte limitada del universo o población que constituye la muestra. Anotación de lo observable, posterior ordenamiento, tabulación y selección de los datos obtenidos, para quedarse con los más representativos.
- **Método de la medición.-** A partir del cual surge todo el complejo empírico-estadístico. Con lo cual se podrá determinar la relación entre el tiempo y la velocidad del proceso de molienda y tamizado y así el rendimiento del mismo.

## 2.2.2. TÉCNICAS

Se utilizaran ciertas técnicas para la recolección de información como las siguientes:

- ✓ Observación
- ✓ Simulaciones

### **2.2.2.1 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE LA MOLIENDA**

#### **MOLIENDA**

El objetivo de la molienda es producir pequeñas partículas a partir de otras más grandes.

#### **EQUIPO A UTILIZAR**

- Molino de martillos tipo MTL-13ZS-4.
- Tamizador con malla número 850um, 212um, 106um, 38um y cubierta.
- Balanza semi-analítica con sensibilidad de hasta 0.1 gr.
- Cronómetro.

#### **MATERIAL A UTILIZAR**

- Recipientes de plástico para la recolección del material molido.
- Fundas plásticas para la clasificación del material tamizado.
- Cinta adhesiva para la identificación de las fundas, así como para el sellado del molino.

- Limpiador húmedo.
- Brocha pequeña para la limpieza del equipo y sus alrededores.
- Feldespato

**PROCEDIMIENTO:**

- El mineral se encuentra con un tamaño muy grande para ingresar a la tolva por tal razón se debe reducir con una herramienta manual.
- Colocar la tabla de retención de la alimentación para evitar que la muestra penetre directamente al molino.
- Pesar diferentes muestras de feldespato :

<b>Pi (Kg)</b>
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4,5

**Dónde:**

**Pi**= peso inicial de la muestra en (Kg)

- Verter la muestra en la tolva de alimentación y verificar que el molino esté sellado.
- Conectar el molino al flujo de corriente eléctrica.
- Encender el molino presionando el botón verde de encendido.

- Colocar el recipiente en la parte baja del molino para recibir el producto ya molido.
- Retirar la tabla de retención de alimentación para permitir que la muestra se desplace hacia el área de molienda.
- Verificar que la alimentación se esté realizando en forma adecuada. En caso de que exista alguna obstrucción, empujar la alimentación con la regla de madera.
- Durante la operación de molienda, medir con el cronómetro el tiempo de molienda.
- Después de que la muestra ha sido molida totalmente, se debe pesar el producto, a fin de determinar las pérdidas por operación en el molino.
- Desconectar el molino de la alimentación eléctrica.
- Limpiar el molino, utilizando la brocha y el paño húmedo.

**Tabla 2.2.2.1-1 Datos Experimentales para la Determinación de Rendimiento de Molienda del Feldespato**

Pi (Kg)	V (rpm)	t (s)	Pf (Kg)	Mp (Kg)
0,5	1445	33,44	0,3	0,2
1	1445	40,69	0,75	0,25
1,5	1445	50,97	1,2	0,3
2	1445	59,22	1,7	0,3
2,5	1445	68,5	2,15	0,35
3	1445	70,41	2,6	0,4
3,5	1445	83,4	3	0,5
4,5	1445	95,47	3,8	0,7

**Dónde:**

**P<sub>i</sub>** = peso inicial de la muestra (Kg)

**V**= velocidad del molino (rpm)

**T**= tiempo de molienda (s)

**P<sub>f</sub>**= peso final de la muestra después de la molienda (Kg)

**M<sub>p</sub>**= cantidad de muestra perdida en la molienda

## CÁLCULOS Y RESULTADOS

### CÁLCULOS ESPECIFICOS

➤ **Cálculo del rendimiento de molienda**

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{P_i}{P_f} \times 100$$

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{0.5}{0.3} \times 100 = 60\%$$

## RESULTADOS

**Tabla 2.2.2.1-2 Datos Experimentales de la Determinación de % de Rendimiento de Molienda**

Pi (Kg)	Pf (Kg)	% R
0,5	0,3	60
1	0,75	75
1,5	1,2	80
2	1,7	85
2,5	2,15	86
3	2,6	86,7
3,5	3	85,7
4,5	3,8	84

Fuente: Tesistas

**Dónde:**

**P<sub>i</sub>** = peso inicial de la muestra (Kg)

**P<sub>f</sub>** = peso final de la muestra después de la molienda (Kg)

**% R** = porcentaje de rendimiento de molienda

### **2.2.2.2. TAMIZADO**

#### **Objetivo**

Separar la muestra que se obtuvo de la molienda con el uso de una torre de tamices y según un análisis determinar que tamices van en el equipo de diseño.

#### **Procedimiento**

- Trasladar el producto hasta el lugar en donde se encuentra el tamizador.
- Armar la batería de tamices a utilizar.
- Verter el producto molido en el tamizador.
- Colocar la barra para sostener la batería de tamices.
- Especificar la operación del tamizador para que dure 5 minutos.
- Conectar el tamizador a la corriente eléctrica. Durante la operación de tamizado es necesario que se controle el tamizador para que no se desarme la batería.
- Después de que se terminó la operación, verter el contenido de cada tamiz en la funda de plástico previamente taradas e identificadas con el número de tamiz.

- Repetir la operación en el tamizador hasta que toda la muestra haya sido molida totalmente.
- Pesar la funda con el producto ya tamizado.
- Desconectar el tamizador y limpiar tanto el equipo como los tamices utilizados.

## CÁLCULOS

⇒ Calculo porcentaje de rechazo

$$\% \text{ Rechazo} = \frac{\text{Pesoretenido}(g)}{\text{Pesototaldelamuestra}(g)} \times 100$$

$$\% R = \frac{73,22}{250} \times 100$$

$$\% R = 29,3$$

$$\% R = \frac{88,02}{250} \times 100$$

$$\% R = 35,2$$

$$\% R = \frac{35,56}{250} \times 100$$

$$\% R = 14,2$$

$$\% R = \frac{44,66}{250} \times 100$$

$$\% R = 17,9$$

⇒ Calculo de porcentaje de rechazo acumulado

$$\% R_A = \% R_{A_{n-1}} + \% R$$

$$\% R_A = 0 + 29,3$$

$$\% R_{A_1} = 29,3$$

$$\% R_{A_2} = 29,3 + 35,2$$

$$\% R_{A_2} = 64,5$$

$$\% R_{A_3} = 64,5 + 14,2$$

$$\% R_{A_3} = 78,7$$

$$\% R_{A_4} = 78,7 + 17,9$$

$$\% R_{A_4} = 96,6$$

⇒ Cálculo de porcentaje de cernido acumulado

$$\% C_A = 100 - \% R_A$$

$$\% C_{A_1} = 100 - 29,3$$

$$\% C_{A_1} = 70,7$$

$$\% C_{A_2} = 100 - 64,5$$

$$\% C_{A_2} = 35,5$$

$$\% C_{A_3} = 100 - 78,7$$

$$\% C_{A_3} = 21,3$$

$$\% C_{A_4} = 100 - 96,6$$

$$\% C_{A_4} = 3,4$$

**Tabla 2.2.2.2-1 Resultados de tamizado del producto de molienda**

Pi (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO(g)	% Re	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
250	850	73,22	29,3	29,3	70,7
	212	88,02	35,2	64,5	35,5
	106	35,56	14,2	78,7	21,3
	38	44,66	17,9	96,6	3,4
	Cernido	2,94	1,2	97,8	2,2
<b>PERDIDAS</b>		5,6	2,2	100	...

Fuente: Tesistas

**Dónde:**

Pi = peso inicial de la muestra (Kg)

% Re = porcentaje de rechazo

%R<sub>A</sub> = porcentaje de rechazo acumulado.

%C<sub>A</sub> = porcentaje de cernido acumulado.

**Tabla 2.2.2.2-2 Resultados de tamizado del producto de molienda de 1 Kg**

Pi (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO(g)	% R	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
250	850	65,48	26,2	26,2	73,8
	212	103,34	41,3	67,5	32,5
	106	53,48	21,4	88,9	11,1
	38	21,1	8,4	97,3	2,7
	<b>Cernido</b>	0,3	0,1	97,4	2,6
<b>PERDIDAS</b>		6,3	2,5	100	...

Fuente: Tesistas

**Tabla 2.2.2.2-3 Resultados de tamizado del producto de molienda de 1,5 Kg**

Pi (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO(g)	% R	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
250	850	54	21,6	21,6	78,4
	212	95,16	38,1	59,7	40,3
	106	60,12	24,0	83,7	16,3
	38	35,6	14,2	97,9	2,1
	Cernido	1,84	0,74	98,64	1,36
<b>PERDIDAS</b>		3,28	1,36	100	...

Fuente: tesistas

**Tabla 2.2.2.2-4 Resultados de tamizado del producto de molienda de 2,0 Kg**

Pi (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO(g)	% R	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
--------	------------	------------------	-----	-----------------	-----------------

250	850	42,7	17,1	17,1	82,9
	212	103,8	41,5	58,6	41,4
	106	63,3	25,3	83,9	16,1
	38	36,4	14,6	98,5	1,5
	Cernido	0,4	0,16	98,66	1,34
<b>PERDIDAS</b>		3,6	1,34	100	...

Fuente: Tesistas

**Tabla 2.2.2.2-5 Resultados de tamizado del producto de molienda de 2,5 Kg**

Pi (g)	MALLA ( $\mu\text{m}$ )	PESO RETENIDO(g)	% R	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
250	850	44,88	17,1	17,1	82,9
	212	125,34	41,5	58,6	41,4
	106	55,64	25,3	83,9	16,1
	38	20,2	14,6	98,5	1,5
	Cernido	0,36	0,16	98,66	1,34
<b>PERDIDAS</b>		3,62	1,34	100	...

Fuente: Tesistas

**Tabla 2.2.2.2-6 Resultados de tamizado del producto de molienda de 3,0 Kg**

Pi (g)	MALLA ( $\mu\text{m}$ )	PESO RETENIDO(g)	% R	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
250	850	44,88	18,0	18,1	81,9
	212	125,34	50,1	68,2	31,8
	106	55,64	22,3	90,5	9,5
	38	20,2	8,1	98,1	1,9
	Cernido	0,36	0,1	98,7	1,3
<b>PERDIDAS</b>		3,3	1,3	100	...

Fuente: Tesistas

**Tabla 2.2.2.2-7 Resultados de tamizado del producto de molienda de 3,5 Kg**

Pi (g)	MALLA ( $\mu\text{m}$ )	PESO RETENIDO(g)	% R	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
250	850	43,52	17,4	17,4	82,6
	212	120,24	48,1	65,5	34,5
	106	65,9	26,4	91,9	8,1
	38	19,56	7,8	99,7	0,3
	Cernido	0,36	0,1	99,8	0,2
<b>PERDIDAS</b>		0,42	0,2	100	...

Fuente: Tesistas

**Tabla 2.2.2.2-8 Resultados de tamizado del producto de molienda de 4,0 Kg**

Pi (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO(g)	% R	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
250	850	44,12	17,6	17,6	82,4
	212	108,28	43,3	60,9	39,1
	106	67,22	26,9	87,8	12,2
	38	24,86	9,9	97,7	2,3
	Cernido	0,36	0,1	97,8	2,2
<b>PERDIDAS</b>		5,46	2,2	100	...

Fuente: Tesistas

**Tabla 2.2.2.1-11 Resultados de tamizado del producto de molienda de 4,5 Kg**

Pi (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO(g)	% R	%R <sub>A</sub>	%C <sub>A</sub>
250	850	52,96	21,2	21,2	78,8
	212	131,66	52,7	73,9	26,1
	106	48,64	19,5	93,4	6,6
	38	13,2	5,3	98,7	1,3
	Cernido	0,36	0,1	98,8	1,2
<b>PERDIDAS</b>		3,1	1,2	100	...

Fuente: Tesistas

## DIAGNÓSTICO

En la simulación experimental de molienda y tamizado en un molino de martillos, se obtuvieron datos, los cuales nos ayudaron a identificar las variables operativas del molino.

Llamamos variables o parámetros de operación a todo lo que se puede controlar; existen muchas en molienda las más importantes que pudimos identificar y que nos servirán de guía para el diseño y construcción del equipo son:

En la Tabla 2.2.2.2-1 podemos observar que el tiempo de molienda tiene una relación proporcional, es decir a mayor alimentación mayor tiempo de molienda. La Alimentación o Carga de Mineral debe ser controlada a medida que avanza el proceso para evitar alguna obstrucción y por ende pérdida de tiempo.

La permanencia o tiempo de molienda del mineral dentro del molino determina el grado de finura de las partículas liberadas. El grado de finura está en relación directa con el tiempo de permanencia en el interior del molino, a mayor tiempo mayor finura pero la cantidad de mineral tratado disminuirá si es demasiado prolongado.

**Velocidad de Operación del Molino**, cuando la velocidad es mayor el tiempo de molienda será menos, la velocidad del molino fue de 1445rpm constante.

- La molienda se logra con eficiencia cuando el molino es operado con tamaño de alimentación uniforme, en la simulación el tamaño promedio fue de 3cm de diámetro aproximadamente.
- En el proceso de tamizado la variable significativa es el tiempo, mientras más tiempo se mantenga en movimiento los tamices, el porcentaje de cernido en cada tamiz es representativo, el tiempo que se determinó en la simulación fue de 4min.

# **CAPÍTULO III**

## **CÁLCULOS Y**

### **RESULTADOS**

### 3.- CÁLCULOS Y RESULTADOS

#### 3.1 CÁLCULOS

##### 3.1.1 Cálculo de la Capacidad del molino

Para calcular la capacidad del molino se utiliza la siguiente ecuación:

$$Cp = \frac{Cp_r}{\eta}$$

**Dónde:**

**Cp<sub>r</sub>**= capacidad relativa

$\eta$  = factor de rendimiento teórico para molino de martillos.

Si reemplazamos los datos obtenemos:

**Cp<sub>r</sub>** = 10Kg

$\eta$  = 0,90 Factor de rendimiento experimental para molino de martillos.

$$Cp = \frac{10 \frac{Kg}{h}}{0,9}$$

$$Cp = 11,11 \left[ \frac{Kg}{h} \right]$$

$$Cp = 0,185 \text{ Kg/ min}$$

### 3.1.2 Cálculo de la Potencia del motor

$$\frac{dE}{dx} = \frac{k}{x^n}$$

**Integrando**

$$E = k \ln \frac{x_1}{x_2}$$

**Dónde:**

$X_1$ = es el tamaño medio inicial del producto de partida

$X_2$ = es el tamaño medio final del producto

$K$ = constante de Rittinger

$E$ = energía por unidad de masa, necesaria para producir esta nueva superficie,

midiéndose en  $\frac{Hp.h}{ton}$

Kich en 1895 dijo q  $n=1$

Si:

$$h = 0,45 \frac{Hp.h.cm}{ton}$$

[Se determinó experimentando con un  
molino de similares características]

$$\text{Si } \begin{matrix} x_1 = 2,5 \\ x_2 = 0,01 \end{matrix}$$

$$E = 0,45 \frac{Hp.h}{ton} \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right) = 0,45 \frac{Hp.h}{ton} \left[ \frac{1}{0,01} - \frac{1}{2,5} \right]$$

$$E = 44,82 \frac{Hp \cdot h}{ton}$$

$$P = E * Cp$$

$$P = 44,82 \frac{Hp \cdot h}{ton} \times 11,11 \frac{Kg}{h} \left( \frac{1 ton}{1000 Kg} \right)$$

$$P = 0,49 Hp$$

Se selecciona **P= 0,5 Hp**

### 3.1.3 VELOCIDAD

La velocidad recomendada para sistemas de molienda es:

$$w = 3600 [r.p.m]$$

### 3.1.4 DETERMINACIÓN DE FUERZAS Y POTENCIAS

#### 3.1.4.1 TORQUE

$$P = \tau * w$$

**Si la potencia es:**

$$P = 0,5Hp \quad \therefore \quad P = 372,85 \frac{N.m}{s}$$

$$w = 3600r.p.m$$

$$w = 3600 \frac{rev}{min} \left[ \frac{2\pi rad}{1 rev} \right] \left[ \frac{1 min}{60s} \right]$$

$$w = 376,99 \frac{1}{s}$$

**Si despejamos**

$$\tau = \frac{P}{w}$$

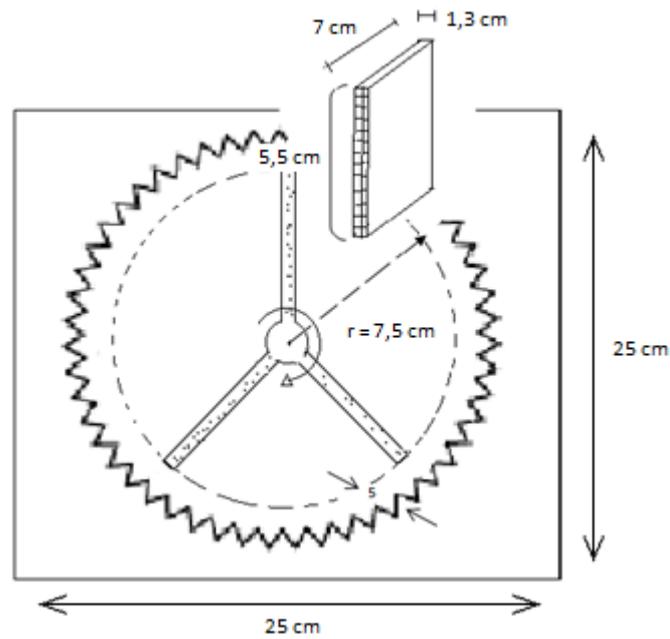
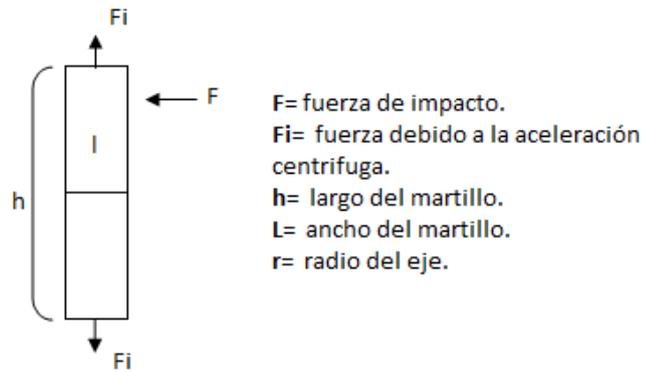
$$\tau = \frac{372,85 \frac{N.m}{s}}{376,99 \left[ \frac{1}{s} \right]}$$

$$\tau = 0,98 [N.m]$$

### 3.1.4.2 Análisis en el martillo

Fuerza de impacto empieza a transmitirse por el martillo continua con el eje del martillo, disco y finalmente en el eje principal.

**Fig. 3.1.4.2-1 Diagrama cuerpo libre del martillo**



**Fig. 3.1.4.2-2 Dimensionamiento de la cámara de molienda**

### 3.1.5 CONCEPTOS FUERZA CENTRIFUGA

$$f_i = m.a \quad \text{Ec 3.1.5.1}$$

$$a = w^2.r' \quad \text{Ec 3.1.5.2}$$

**m**= masa

**a**= aceleración

$$f_i = m \cdot \omega^2 \cdot r'$$

$$f_i = \delta \cdot V \cdot \omega^2 \cdot r'$$

$$\delta = \frac{m}{V} \quad \therefore \quad m = \delta \cdot V$$

$$A = 13 \times 70 [m \times m^2]$$

$$A = 910 [m \times m^2]$$

$$V = 13m \times 70m \times 55m$$

$$V = 5005 \times 10^{-5} (m^3)$$

**Datos:**

$$\delta_{acero} = 7840 \left[ \frac{Kg}{m^2} \right]$$

$$\omega = 3600 r.p.m = 377 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

$$r = 75^\circ$$

Reemplazando datos en la ecuación:

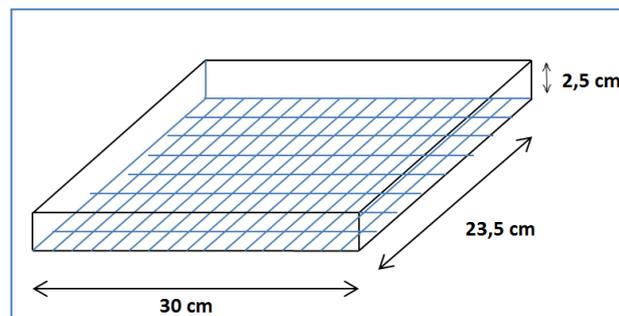
$$f_i = \delta \cdot \nabla \cdot \omega^2 \cdot r'$$

$$f_i = 7840 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 5005 \times 10^{-5} [m^3] \times 377^2 \left[ \frac{rad^2}{s^2} \right] \times \frac{50}{1000} [m]$$

$$f_i = 2700 [N]$$

### 3.1.6 CÁLCULOS PARA EL SISTEMA DE TAMIZAJE

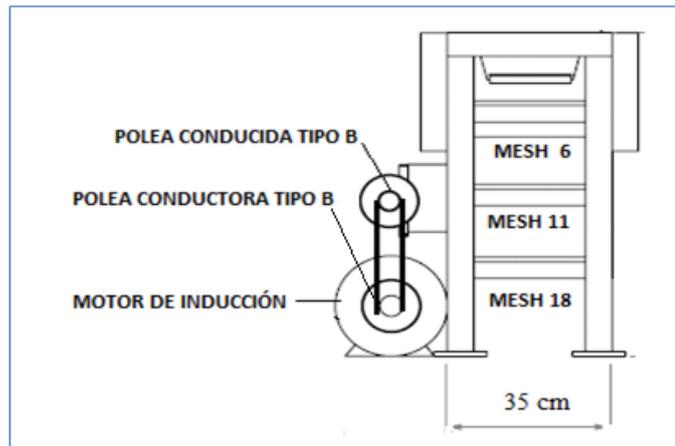
Para iniciar con el diseño del sistema del tamizador vamos a considerarlas las medidas de las bandejas que sostiene a las mallas:



**Figura 3.1.6-1 Dimensionamiento de los tamices**

El sistema tendrá la forma de una cajonera donde las mallas se podrán desmontar para poder extraer el producto retenido para su posterior análisis granulométrico.

EL sistema que va hacer vibrar al sistema de tamizado consta de una leva excéntrica, sistema de transmisión polea-banda y motor trifásico de ½ HP. Los tamices son de malla metálica con número de Mesh 6, 11, 18 con abertura de 3327, 1530, 945(micrones) respectivamente.



**Figura 3.1.6-1 Sistema de tamizado**

### 3.2 DIMENSIONAMIENTO

Una vez realizados los cálculos se procede a la construcción del equipo de molienda y tamizado, además se realizan las respectivas pruebas para asegurar su funcionamiento, se resuelve construir un equipo mixto de molienda y tamizado para el feldespato utilizado en el campo de la cerámica con una capacidad de 0,18 Kg en un tiempo de 1 minuto debido a que este equipo se utilizara en el laboratorio con pequeñas cantidades.

La potencia necesaria para el equipo según los análisis y el cálculo realizado es de 0,5Hp. La velocidad para sistemas de molienda es 1590 rpm pero el equipo va disponer de un variador de velocidades. La fuerza calculada para el sistema de molienda es de 2,96 N.m.

Los martillos son el alma de la máquina, su construcción depende del tamaño final de las partículas, deben tener una buena resistencia al desgaste por abrasión y fricción, el largo del matillo es de 7cm y 5,5 cm de ancho con un espesor de 1,3 cm.

La altura total del equipo será de 102,3 cm y 35cm de ancho, 70 cm de largo.

### 3.2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
<b>MOLINO</b>		
Capacidad	0,18	Kg/min
Potencia del accionador	0,5	Hp
Velocidad	1590	r.p.m
Fuerza	2,96	N.m
Largo del martillo	7	cm
Ancho del martillo	5,5	cm
Radio del eje	75	°
Fuerza centrifuga	2700	N
<b>TAMIZADORA</b>		
Largo	30	cm
Ancho	23,5	cm
Altura de bandeja	2,5	Cm
Mallas # 6	3327	µm
Malla # 11	1530	µm
Malla # 18	945	µm
<b>TABLERO DE CONTROL</b>		
Altura	60	cm
Largo	40	cm
Ancho	20	cm
Breaker molino/ tamizadora		
Breaker de control		

Portafusiles dobles		
Timer	1-10	Minutos
Contactador de variador		
Variador de frecuencia	Marca Siemens SIMATIC G110	1Hp

Fuente: Tesistas

### 3.2.2 TIPOLOGÍA DE LOS MATERIALES DEL EQUIPO

PARTES DEL EQUIPO	MATERIAL
<b>MOLINO</b>	
Estructura principal	Tubo cuadrado de 50x50x3 de acero laminado en caliente, proceso de soldadura SMAW, electrodo E6011 y E7018.
Carcaza	Acero laminado en caliente de ¾" de espesor, unido por soldadura proceso SMAW. Electrodo E7018.
Cámara de molienda	Acero para cementación, E410, con tratamiento térmico para máxima dureza superficial.
Martillos rotativos	Acero Croni DF2 de máxima dureza superficial
Puerta de seguridad	Acero laminado en caliente de ¾" de espesor
Tolva de ingreso	Acero laminado en caliente de 2 mm de espesor, proceso de soldadura SMAW E6011.

Tolva de salida	Acero laminado en caliente de 2 mm de espesor, proceso de soldadura SMAW.
<b>TAMIZADORA</b>	
Estructura principal	Tubo cuadrado de 38x38x1,5 mm de acero laminado en caliente.
Cajones	Ángulos prefabricados de 1,5 mm de espesor, proceso de soldadura SMAW, E6011.
Mallas de filtrado	Mallas de acero al carbono, Mesh 6, 11,18
Eje de excéntrica	Eje de transmisión 1020 de 1 ½” de diámetro
Excéntrica	Eje de transmisión de 90 mm de diámetro, excéntrica al 5,5 %.
Chumaceras	Chumaceras de piso de 1 ½” de diámetro.
Poleas y banda	tipo B de 2 ½” de diámetro, banda B21

### 3.2.1 MÉTODO Y TIPO DE CONTROL DEL EQUIPO

El sistema de control para el equipo va ser el encargado de sincronizar los sistemas y hacer que estos converjan hacia la realización y terminación del proceso. Este debe ser de fácil adquisición en el mercado, fácil manejo y lo más económico posible.

Para el equipo de molienda y tamizado se hará uso de un Tablero Fuerza-Control de 600x400x200, con breaker de fuerza molino/tamizadora y breaker de control, portafusibles dobles, timer, contactor de variador, variador de frecuencia de 1Hp, marca Siemens SIMATIC G110.

Para el control operacional de las variables de proceso en lo referente a la velocidad de molienda se instaló un variador de velocidad con un rango de 1 a 100 Hz manipulable desde la parte externa del tablero mediante el seleccionador.

Para la variación de tiempo se instaló un timer con rango de 1 a 10 minutos con el cual se ajusta el tiempo que se va a realizar la molienda y el tamizado.

### 3.3 REQUERIMIENTOS PRESUPUESTARIOS

#### 3.3.1 ANÁLISIS DE COSTOS

##### 3.3.1.1 RECURSOS MATERIALES

**Tabla 3.3.1.1-1 RECURSOS MATERIALES**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>cantidad</b>	<b>Precio unidad</b>	<b>TOTAL ( \$)</b>
Tubo cuadrado	1	20	20
Tubo cuadrado 50	1	30	30
Eje e 405	1	150	150
Maquinado	1	200	200
Oxicortes	1	65	65
Tornos	1	20	20
Motor 1/2 hp	1	125	125
Poleas	1	35	35
Mallas	1	2,5	2,5
Maquinada excéntrica	1	180	180
Material excéntrica	1	135	135
Empaques, seguros, pernos	1	100	100
Material eléctrico	1	740	740
Pernos negros 3/8	4	5	20
Bisagra molino	1	30	30
Discos corte negros 4 1/2"	2	2,5	5
Electrodos 6011	10	0,4	4

Discos corte negros 4 1/2"	2	2,5	5
Electrodos 6011	10	0,4	4
Pintura	1	32	32
Lija	4	0,8	3,2
Cortinas termo fil	1	35	35
Fuente: Tesistas		<b>TOTAL</b>	<b>1940,7</b>

### 3.3.1.2 Recursos Humanos

**Tabla 3.3.1.2-1 Recursos humanos**

<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>COSTO (dólares)</b>
Mano de obra para la construcción del equipo	500
Mano de obra para la conexión del sistema eléctrico	60
<b>TOTAL</b>	<b>560</b>

Fuente: Tesistas

### 3.3.1.3 Recursos Totales

**Tabla 3.3.1.3-1 Recursos Humanos**

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO (dólares)</b>	<b>VALOR TOTAL (dólares)</b>
Gasto de transporte			100
Internet y comunicación	200 horas	0,80 ctvs. la hora	160
Material bibliográfico	1 libro	50	50
Hojas de papel bond	2000	0,01	20
Impresiones	1000	0,05	50

Copias	1500	0,02	30
Presentación del informe final			200
Recursos humanos			560
Recursos materiales			<b>1940,7</b>
		<b>TOTAL</b>	<b>3110.7</b>

### 3.4 RESULTADOS

#### 3.4.1 RESULTADOS DE VALIDACIÓN DEL EQUIPO

Al terminar la construcción del equipo se ejecutan pruebas de funcionamiento para la validación del Equipo Mixto de Molienda y Tamizado, las cuales se realizaron variando la alimentación del mineral, tiempo y velocidad de molienda usando como muestra el feldespató el cual tiene una dureza intermedia 6 según la escala de Moh.

El producto obtenido de la molienda se lo deja caer a la tamizadora la cual está conformada de 3 tamices de diferentes aberturas acopladas en cascada en orden decreciente y una bandeja recolectora, este se somete a movimientos vibratorios durante diferentes tiempos como se indica en las tablas.

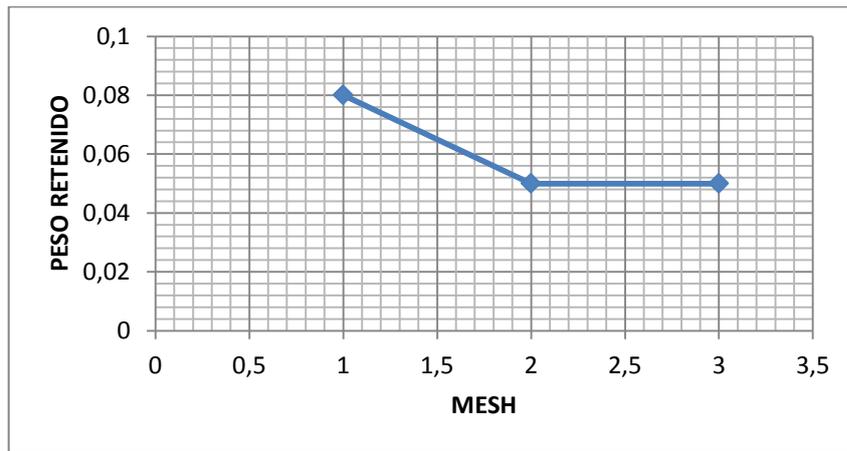
Para comprobar que a mayor tiempo de molienda mayor porcentaje de finos el producto retenido de cada tamiz se lo pesa y se lo vuelve a moler adicionalmente el mismo tiempo.

Como la tamización se realiza en cascada se obtiene tantos rechazos como tamices constituye la cascada y un solo cernido constituido por producto que atraviesa la última malla de la tamizadora.

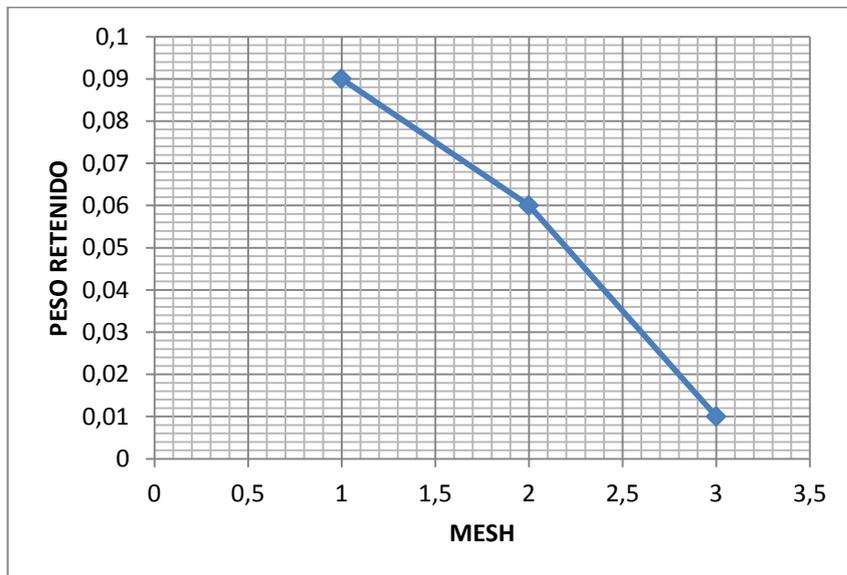
**Tabla 3.4.1-1 Datos Experimentales del tamizado t= 2min**

Alimentación= 0,5kg		V= 5 0Hz		t= 2min		
tamiz	R (kg)	% R	%R <sub>A</sub>	R (3min +)	% R	%R <sub>A</sub>
3	0,05	10	10	0,01	2	2
2	0,075	15	25	0,06	12	14
1	0,1	20	45	0,12	24	38
cernido	0,15	30	75	0,185	37	75

Fuente: Tesistas



**Fig 3.4.1-1(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min)**

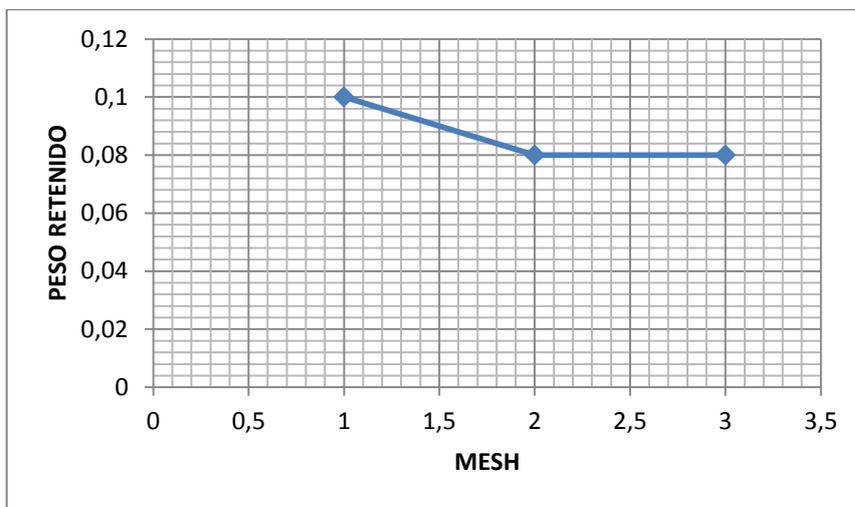


**Fig 3.4.1-1(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min adicionales)**

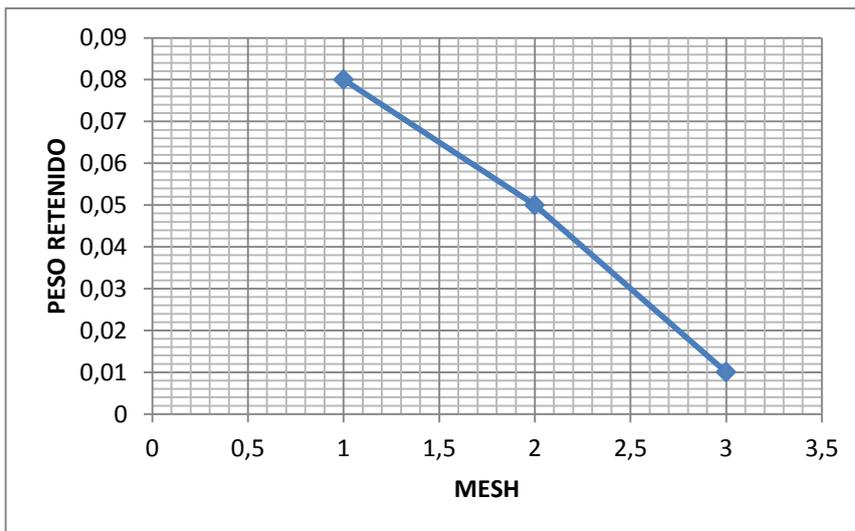
**Tabla 3.4.1-2 Datos Experimentales del tamizado t= 3min**

Alimentación= 0,5kg		V= 5 0Hz		t= 3min		
tamiz	R (kg)	% R	%R <sub>A</sub>	Re (3min +)	% R	%R <sub>A</sub>
3	0,08	16	16	0,01	2	2
2	0,08	16	32	0,05	10	12
1	0,1	20	52	0,08	16	28
cernido	0,15	30	82	0,27	54	82

Fuente: Tesistas



**Fig. 3.4.1-2(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=3 min)**

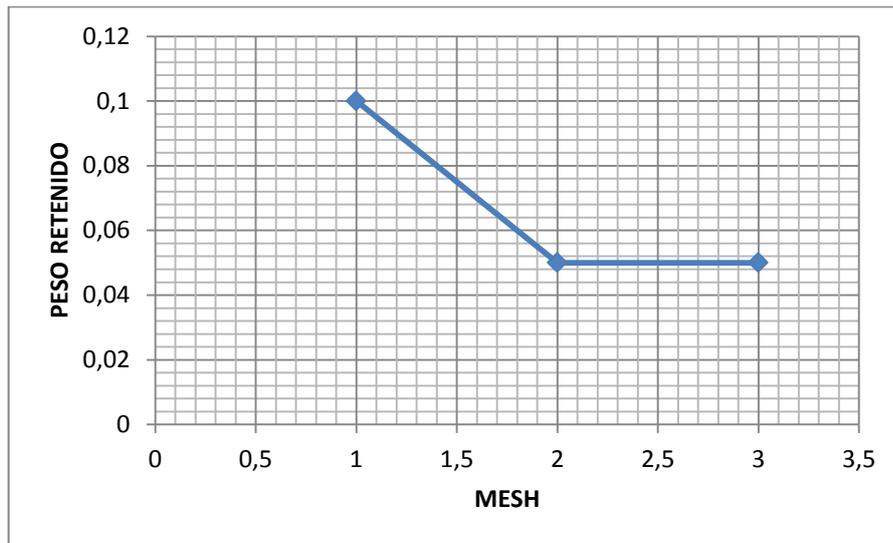


**Fig. 3.4.1-2(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=3min adicionales)**

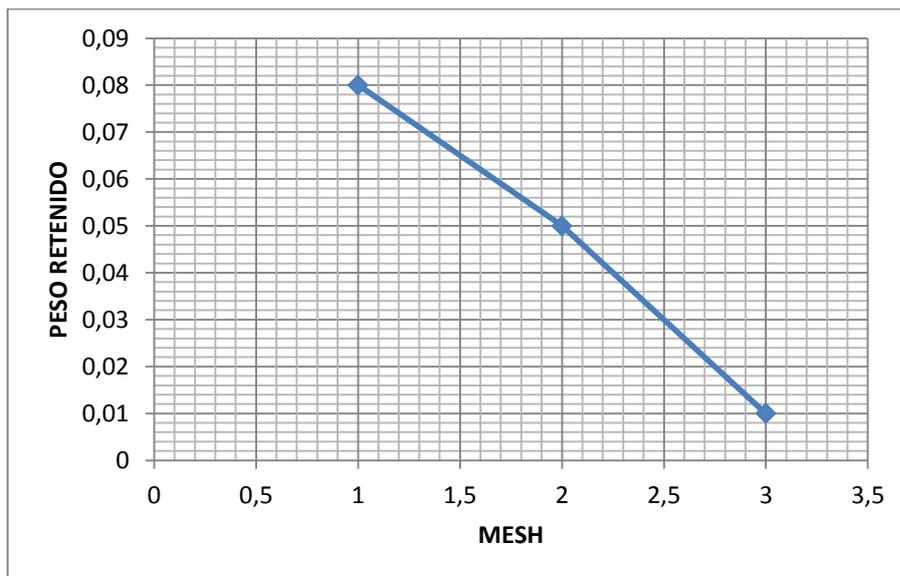
**Tabla 3.4.1-3 Datos Experimentales del tamizado t= 3min**

Alimentación= 0,5kg      V= 75Hz      t= 2min						
tamiz	R (kg)	% R	%R <sub>A</sub>	R (3min +)	% R	%R <sub>A</sub>
3	0,05	10	10	0,01	2	2
2	0,05	10	20	0,05	10	12
1	0,1	20	40	0,08	16	28
cernido	0,22	44	84	0,275	55	83

Fuente: Tesistas



**Fig. 3.4.1-3(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min)**

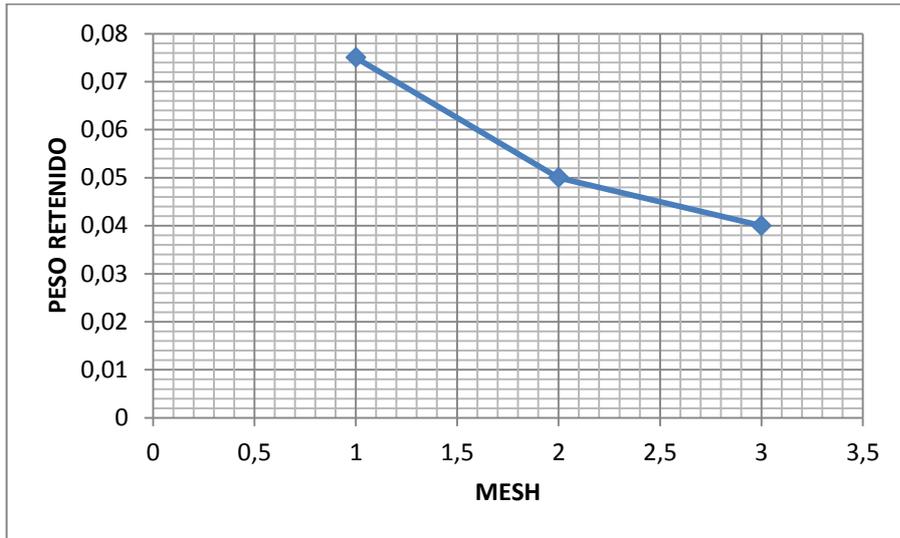


**Fig. 3.4.1-3(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min adicionales)**

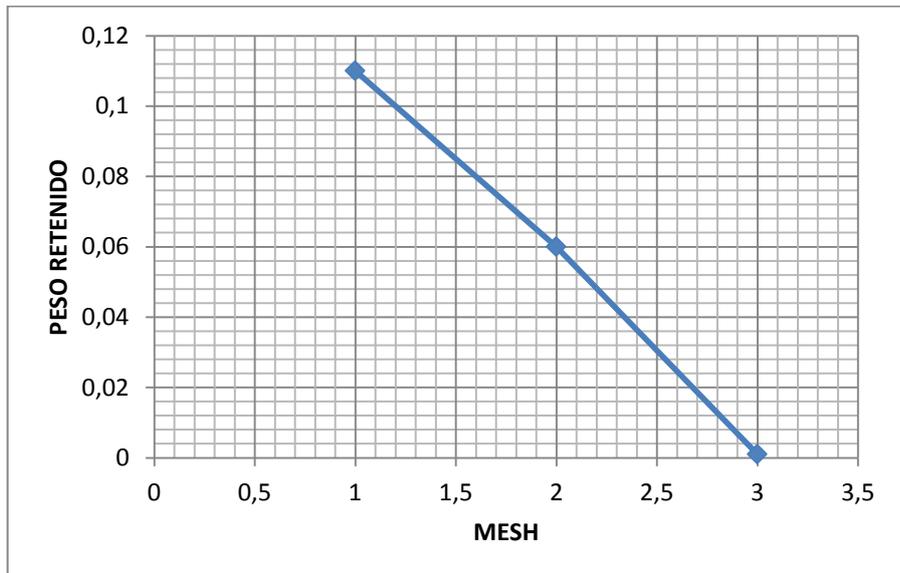
**Tabla 3.4.1-4 Datos Experimentales del tamizado t= 4min**

Alimentación= 0,5kg		V= 75 Hz		t= 4min		
tamiz	R (kg)	% R	%R <sub>A</sub>	Re (4min +)	% R	%R <sub>A</sub>
3	0,04	18	18	0,001	0,2	0,2
2	0,05	10	28	0,03	6	6,2
1	0,075	15	43	0,11	22	28,2
cernido	0,21	42	85	0,35	70	98,

Fuente: Tesistas



**Fig. 3.4.1-4(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min)**

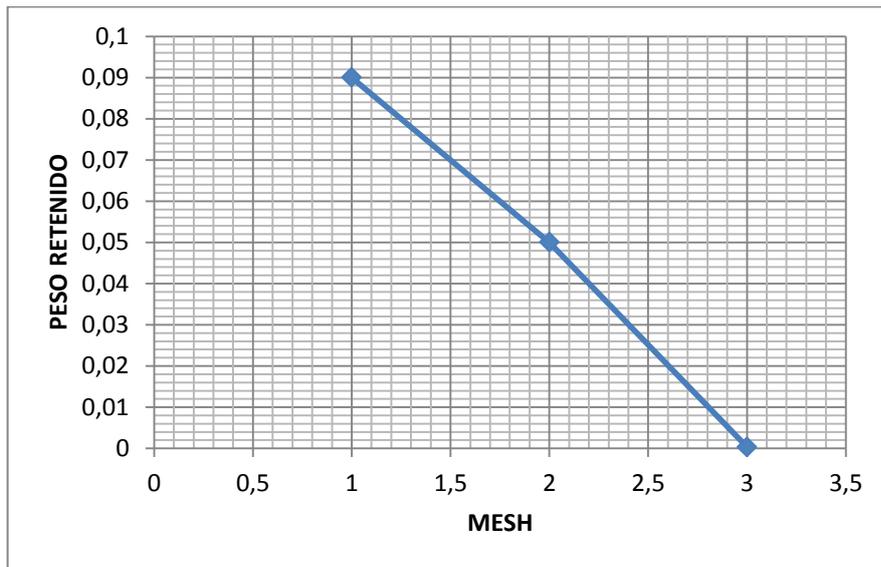


**Fig. 3.4.1-4(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=4 min adicionales)**

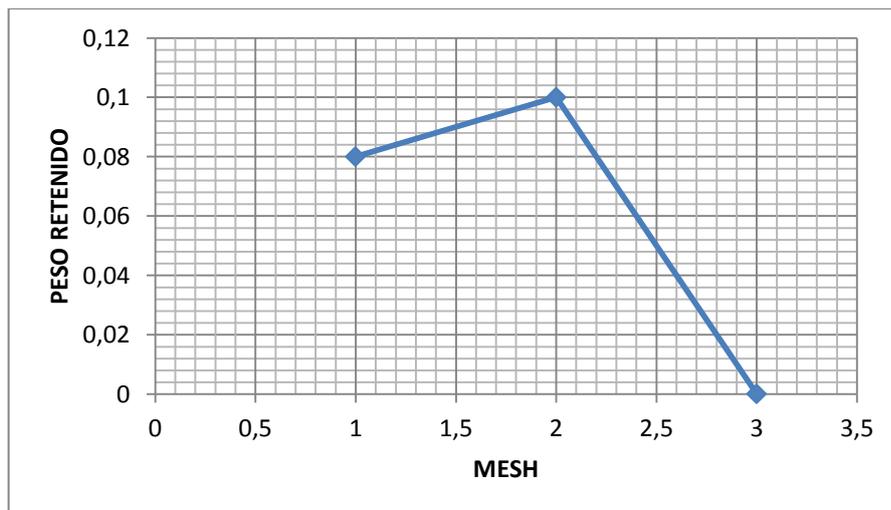
**Tabla 3.4.1-5 Datos Experimentales del tamizado t=2 min**

Alimentación= 0,5kg		V= 100Hz		t= 2min		
tamiz	R (kg)	% R	%R <sub>A</sub>	R (3min +)	% R	%R <sub>A</sub>
3	0,0003	0,15	0,15	1E-04	0,02	0,02
2	0,08	16	16,15	0,06	12	12,02
1	0,09	18	34,15	0,06	12	24,02
cernido	0,25	50	84,15	0,3	60	84,02

Fuente: Tesistas



**Fig. 3.4.1-5(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=2 min)**

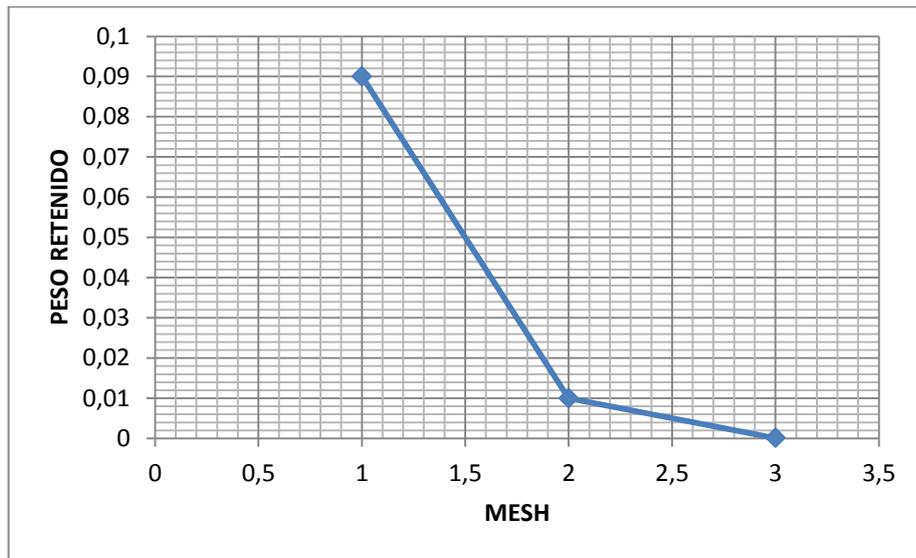


**Fig. 3.4.1-5(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=2min adicionales)**

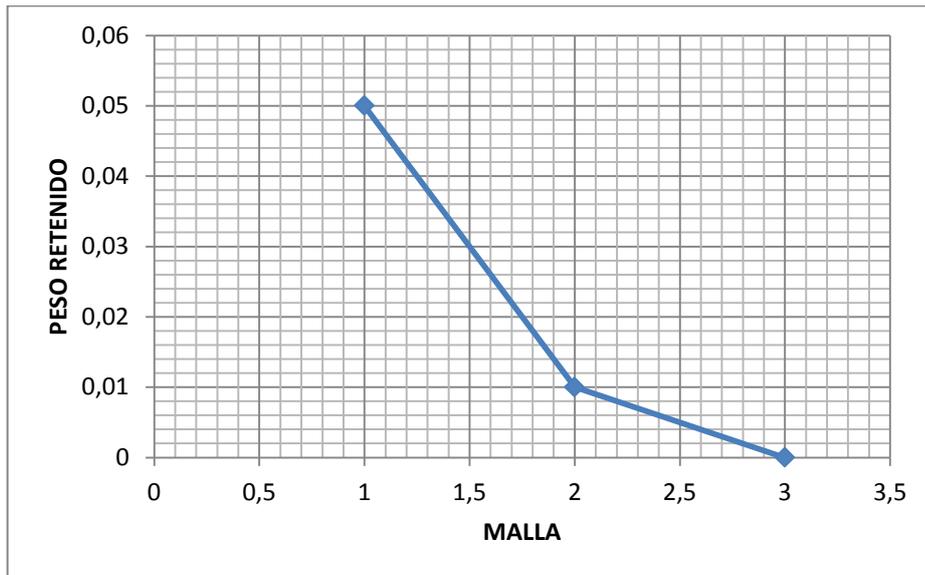
**Tabla 3.4.1-6 Datos Experimentales del tamizado t=4 min**

Alimentación= 0,75kg      V= 100Hz      t= 4min						
tamiz	R (kg)	% R	%R <sub>A</sub>	R (4min +)	% R	%R <sub>A</sub>
3	1E-04	0,013	0,013	0	0	0
2	0,05	6,6	6,613	0,01	1,3	1,3
1	0,1	13	20	0,05	6,6	7,9
cernido	0,4	53,3	73,3	0,48	64	71,9

Fuente: Tesistas



**Fig. 3.4.1-6(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min)**

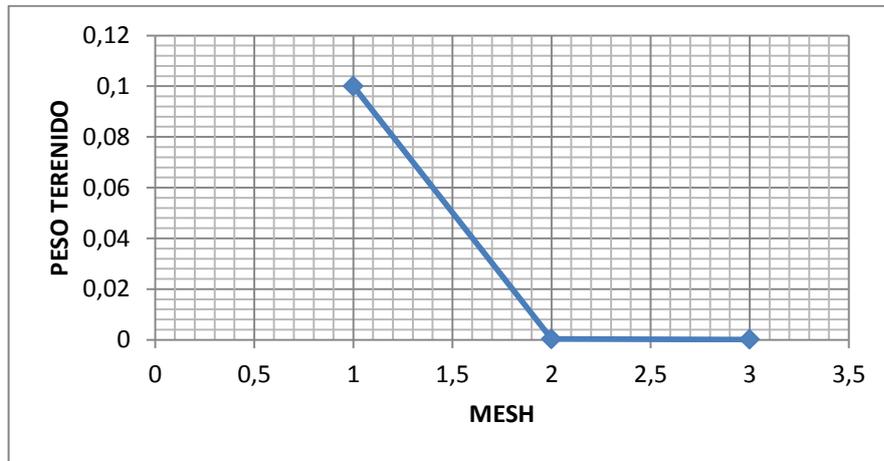


**Fig. 3.4.1-6(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min adicionales)**

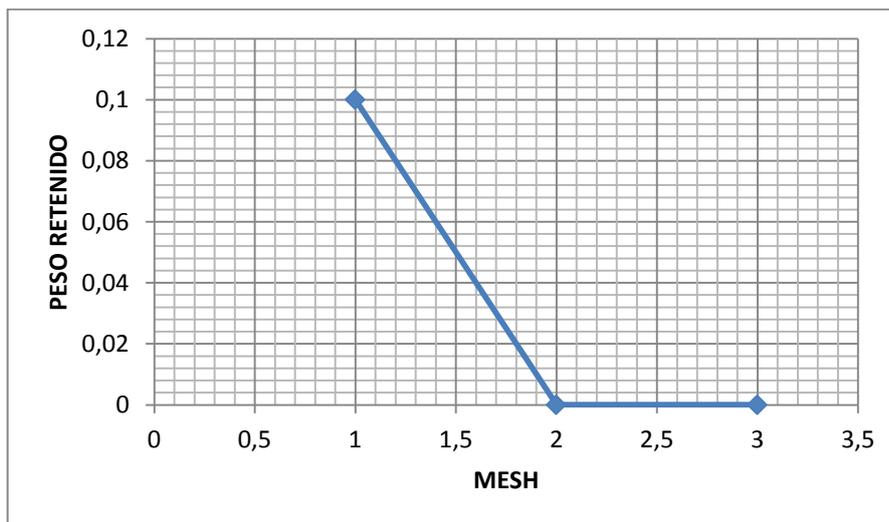
**Tabla 3.4.1-7 Datos Experimentales del tamizado t=4 min**

Alimentación= 0,75kg      V= 100Hz      t= 4min						
tamiz	R (kg)	% R	%R <sub>A</sub>	R (4min +)	% R	%R <sub>A</sub>
3	1E-04	0,013	0,013	1E-05	0	0
2	0,0075	1	1,013	2E-05	0	0
1	0,1	13,3	14,3	0,075	10	10
cernido	0,5	66,6	81	0,53	70	80

Fuente: Tesistas



**Fig. 3.4.1-7(a) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min)**



**Fig. 3.4.1-7(b) MESH vs PESO RETENIDO (t=4min adicionales)**

### 3.5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- En las gráficas correspondientes al análisis, se ubicó en las abscisas al peso acumulado y en las ordenadas el número de malla, que posteriormente nos servir para observar el comportamiento de la masa en cada tamiz; además de poder identificar la cantidad de masa que se puede acumular teniendo un determinado diámetro de partícula.
- En la figuras 3.4.1-1(a) a la Fig. 3.4.1-7(a) podemos observar que la acumulación del producto se retienen en las malla 2 y 1.
- Al volver a moler el producto durante un tiempo adicional se genera una mayor cantidad de finos representados en la última bandeja. De acuerdo a las figuras 3.4.1-1(b) a la Fig. 3.4.1-7(b)
- El tener la posibilidad de hacer las gráficas de fracción másica vs diámetro de partícula, es de suma importancia cuando se está haciendo el análisis de una muestra, ya que facilita la comprensión de los resultados y da una mejor visualización de lo que le está sucediendo a la muestra cuando es pasada por las diferentes mallas.

**CAPÍTULO IV**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## 4.1 CONCLUSIONES

- De la operación de simulación de molienda se identificó variables puntuales como: la velocidad, tiempo, alimentación. Estas variables son las que condicionan la operación de molienda.
- EL diseño del equipo mixto de molienda y tamizado corresponde a un molino de martillos sencillo pero robusto de batidora en cruz suspendida, de fácil acceso y limpieza. La máquina estándar es de hierro de fundición. La tamizadora consta de 3 tamices y una bandeja final para recoger el cernido, los tamices están ubicados en forma de cascada de mayor a menor abertura.
- El sistema de molienda y tamizado opera en las siguientes condiciones:

### **Molienda:**

El tiempo puede variar de 1 a 10 minutos.

La frecuencia varía de 1 a 100Hz máx.

La velocidad varía de 26,5 rpm a 2650 rpm.

### **Tamizado:**

El tiempo puede variar igual de 1 a 10 minutos.

La frecuencia varía de 1 a 13 Hz máx.

- Al realizar las pruebas de validación del equipo mixto de molienda y tamizado, se determinó la capacidad del molino que es de 0,18 Kg/min, a una frecuencia de 100 Hz y tiempo de molienda 8 minutos se obtienen mayor cantidad de material fino 0,5 kg.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Antes de encender el equipo verificar que la fuente de energía sea de 220v monofásica.
- No manipular el tablero de control del variador de velocidad ya que se puede desconfigurar los parámetros ya establecidos para el funcionamiento óptimo del dispositivo.
- El mineral tiene que estar seco ya que si esta húmedo se puede adherir a las paredes de la cámara de molienda haciendo deficiente el proceso de molienda y tamizado.
- No manipular las conexiones eléctricas de los motores tanto del molino como de la tamizadora.
- El tamaño del mineral debe ser máximo de 2 cm de diámetro para evitar que se detenga el proceso por sobre alimentación al molino.
- Si se llega a producir un atascamiento del molino, por sobre alimentación del material a moler inmediatamente apagar el equipo del tablero de control y a continuación realizar la limpieza en el interior del molino verificando siempre que todos los mandos externos del tablero se encuentre apagados.
- Antes de iniciar la molienda verificar que la puerta del molino se encuentre bien cerrada para evitar pérdidas innecesarias del producto.
- Para la velocidad de tamizado se recomienda ajustarla máximo a 12Hz ya que al pasar este rango se generan fuertes vibraciones en el equipo.
- Sacar las bandejas con el material cernido con cuidado para evitar pérdidas del producto retenido en cada malla y así obtener datos más exactos para su posterior análisis.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **GENERAL:**

1. MCCABE, W. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 6ª.ed. México: Mc Graw Hill, 2002.
2. BRITO, H. Texto Básico de Operaciones Unitarias I. 1ª.ed. Riobamba, 2000.
3. VIAN, A. Elementos de Ingeniería Química. 2ª.ed. Madrid: Aguilar, 2001
4. PERRY, J. Manual del Ingeniero Químico. 3ª.ed. México: Mc Graw Hill, 1974.
5. FOUST, A. Principios de Operaciones Unitarias. 6ª.ed. México: Cecsca, 1997.
6. GEANKOPLIS, J. Procesos de transporte y Operaciones Unitarias. México: Continental, 1982.
7. FONT, M. Atlas de Mineralogía. España: Jover, 1988.
8. LYE, K. Los Minerales y Rocas. España: Fontalba, 1990.
9. KELLY, E. Introducción al Procesamiento de Minerales. México: Limusa, 1990.

### **ESPECÍFICA:**

10. MCCABE, W. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 6ª.ed. México: Mc Graw Hill, 2002. pp. 1029-1035
11. BRITO, H. Texto Básico de Operaciones Unitarias I. 1ª.ed. Riobamba, 2000. pp. 31-42
12. GEANKOPLIS, J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México: Continental, 1982. pp. 152

13. PERRY, J. Manual del Ingeniero Químico. 3<sup>a</sup>.ed. México: Mc Graw Hill, 1974. pp. 552
14. VIAN, A. Elementos de Ingeniería Química. 2<sup>a</sup>.ed. Madrid: Aguilar, 2001. pp. 287-337

### **CITAS BIBLIOGRÁFICAS:**

- (1) MINERALES: conceptos

<http://es.wikipedia.org/wiki/Mineral>

2011-02-25

- (2) MINERALES: propiedades

<http://www.astromia.com/tierraluna/propmineral.htm>

2011-03-01

- (3) MINERALES: clasificación

<http://www.astromia.com/tierraluna/tipomineral.htm>

2011-03-20

- (4) MINERALES: tipos de minerales industriales

<http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/rocas>

[industriales/contenidos/minerales\\_industriales\\_cyl.pdf](http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/rocas/industriales/contenidos/minerales_industriales_cyl.pdf)

2011-03-22

- (5) FELDESPATO: propiedades, características

<http://es.wikipedia.org/wiki/Feldespatos>

2011-04-12

- (6) MCCABE, W. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 6<sup>a</sup>.e.d. México:

Mc. Graw Hill, 2002. pp. 1029

- (7) OPERACIONES UNITARIAS: Reducción de tamaño de sólidos, generalidades  
<http://eqyherramientas.blogspot.com/2009/04/operaciones-unitarias-la-reduccion-de.html>  
2011-04-14
- (8) BRITO, H. Texto Básico de Operaciones Unitarias I. 1ª.ed. Riobamba, 2000.
- (9) OPERACIONES UNITARIAS: Trituración y molienda de minerales  
<http://es.scribd.com/doc/57599554/operaciones-unitarias-trituracion-y-molienda>  
2011-04-14
- (10) MOLIENDA: Generalidades  
<http://www.alipso.com/monografias/molienda/>  
2011-04-16
- (11) TRITURACIÓN Y MOLIENDA: Dispositivos de molienda y trituración  
<http://es.scribd.com/doc/57599554/operaciones-unitarias-trituracion-y-molienda>  
2011-04-20
- (12) TESIS: Molino de martillos  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3324/1/5846.pdf>  
2011-04-20
- (13) BRITO, H. Texto Básico de Operaciones Unitarias I. 1ª.ed. Riobamba, 2000.
- (14) BRITO, H. Texto Básico de Operaciones Unitarias I. 1ª.ed. Riobamba, 2000.

(15) OPERACIONES UNITARIAS: tamizado

<http://industrias-alimentarias.blogspot.com/2009/04/operaciones-unitarias-el-tamizado.html>

2011-04-21

(16) MONOGRAFÍAS: análisis de laboratorio de molienda y tamizado

<http://www.monografias.com/trabajos55/analisis-volumetrico/analisis-volumetrico2.shtml>

2011-04-22

(17) TESIS: Diseño y construcción de un equipo mixto de tamizado y secado

<http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/254/1/96T00121.pdf>

2011-04-22

#### **INTERNET:**

➤ Minerales: conceptos

<http://es.wikipedia.org/wiki/Mineral>

2011-02-25

➤ Minerales: propiedades

<http://www.astromia.com/tierraluna/propmineral.htm>

2011-03-01

- **Minerales: clasificación**

<http://www.astromia.com/tierraluna/tipomineral.htm>

2011-03-20

- **Minerales: tipos de minerales industriales**

[http://ocw.usal.es/cienciasexperimentales/rocasindustriales/contenidos/minerales\\_industriales\\_cyl.pdf](http://ocw.usal.es/cienciasexperimentales/rocasindustriales/contenidos/minerales_industriales_cyl.pdf)

2011-03-22

- **Feldespatos: propiedades, características**

<http://es.wikipedia.org/wiki/Feldespatos>

2011-04-12

- **Operaciones Unitarias: Reducción de tamaño de sólidos, generalidades**

<http://eqherramientas.blogspot.com/2009/04/operaciones-unitarias-la-reduccion-de.html>

2011-04-14

- **OPERACIONES UNITARIAS: Trituración y molienda de minerales**

<http://es.scribd.com/doc/57599554/operaciones-unitarias-trituracion-y-molienda>

2011-04-14

- **Molienda: generalidades**

<http://www.alipso.com/monografias/molienda/>

2011-04-16

- Tesis: Micronización de caliza en un molino de bolas:

<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3324/1/5846.pdf>

2011-04-20

- Tamizado: Generalidades

<http://industrias-alimentarias.blogspot.com/2009/04/operaciones-unitarias-el-tamizado.html>

2011-04-21

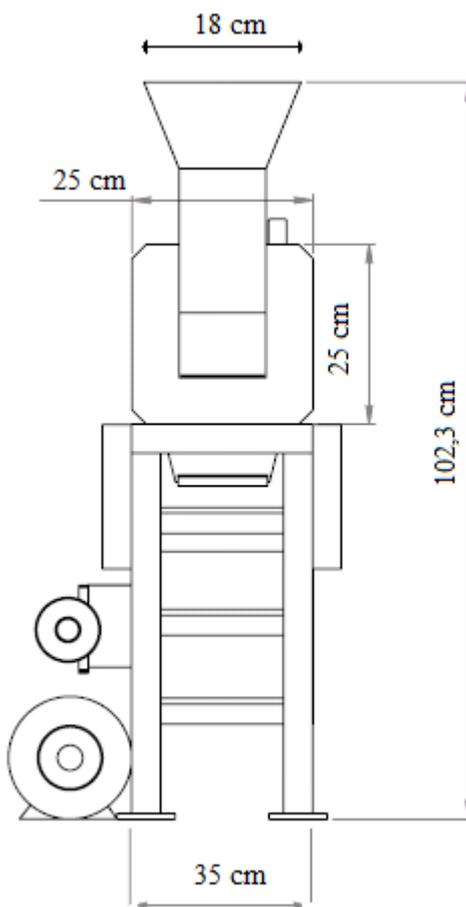
- Tesis: Diseño y construcción de un equipo mixto de Tamizado y Secado para la separación de esporas de hongos del amaranto y su uso como bioplaguicida:

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/254/1/96T00121.pdf>

2011-04-22

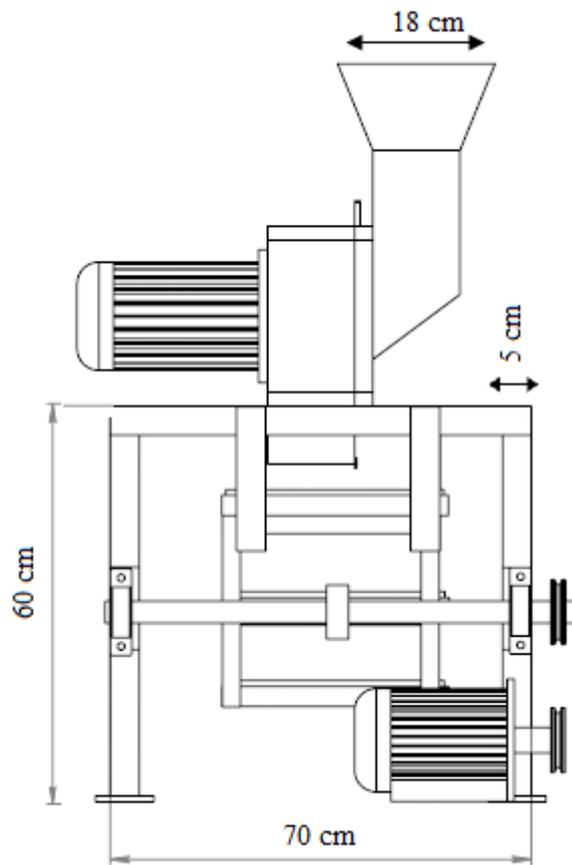
# **ANEXOS**

## ANEXO I



<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA</b>		<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b> Edwin Wladimir Estrada Yambay Maricela Ximena Samaniego Toapanta	<b>TEMA:</b>		
	<input type="checkbox"/>	Certificado	<input type="checkbox"/>	Por Calificar	Parte Lateral Derecha Del Equipo	
	<input type="checkbox"/>	Por aprobar	<input type="checkbox"/>	Por eliminar	<b>LAMINA</b>	<b>ESCALA</b>
	<input type="checkbox"/>	Aprobado	<input type="checkbox"/>	Por informar	1:2	18/11/11

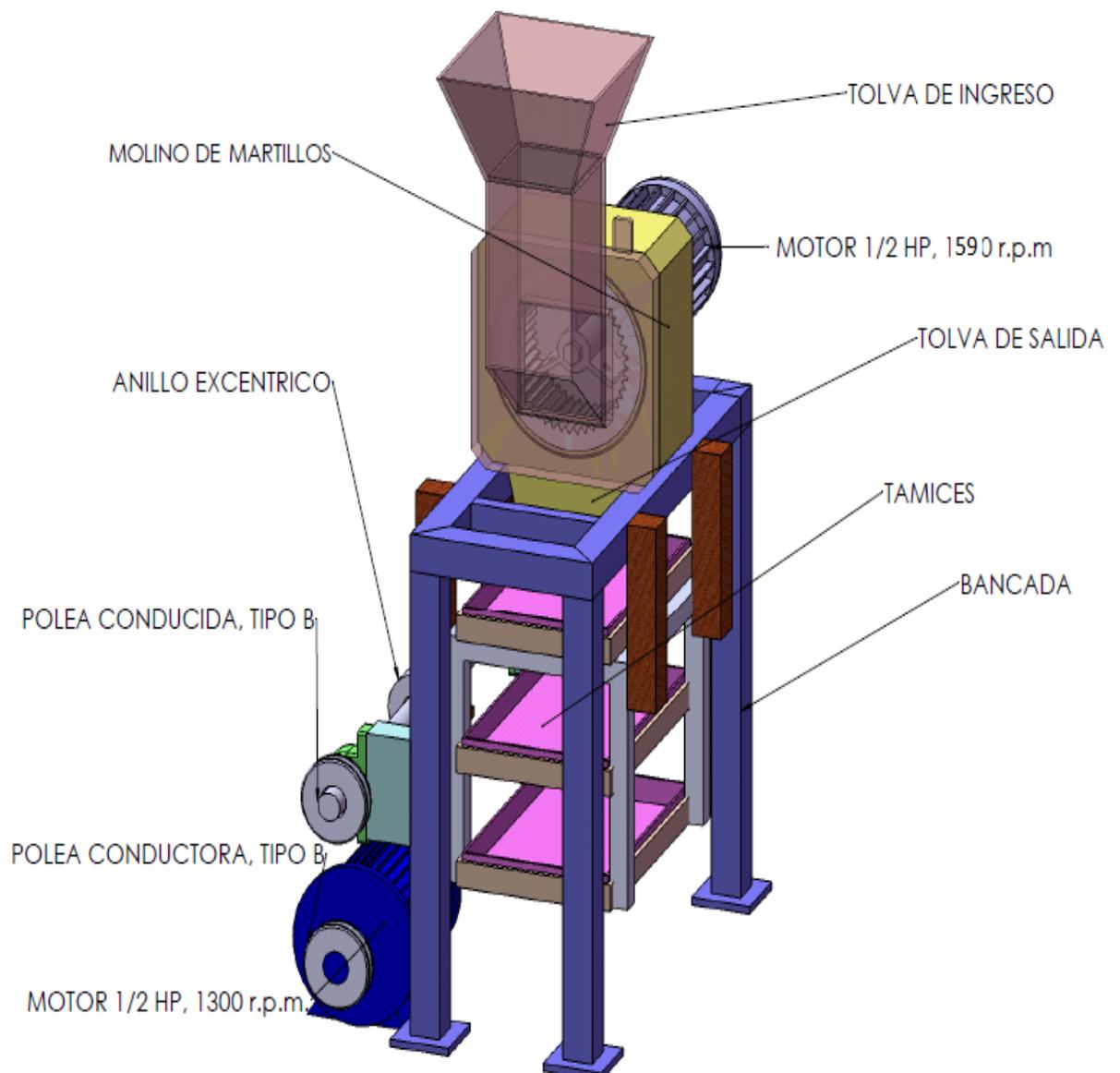
## ANEXO II



<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA</b>		<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b> Edwin Wladimir Estrada Yambay Maricela Ximena Samaniego Toapanta	<b>TEMA:</b>			
				Parte Frontal Del Equipo			
				<b>LAMINA</b>	<b>ESCALA</b>	<b>FECHA</b>	
				2:2		18/11/11	

### ANEXO III

### PARTES DEL EQUIPO MIXTO DE MOLIENDA Y TAMIZADO DE MINERALES



## ANEXO IV

### EQUIPO MIXTO DE MOLIENDA Y TAMIZADO PARA MINERALES



## ANEXO V

### GUIA OPERATIVA PARA EL EQUIPO MIXTO DE MOLIENDA Y TAMIZADO

Pasos Operativos	Gráficos de guía
<p>Antes de empezar a utilizar el equipo debemos seguir algunas instrucciones básicas para el mejor desempeño del mismo.</p> <p><b>1.-</b> Asegurar que los breakers del tablero de control se encuentren en <b>OFF</b>.</p>	 <p>Panel de control eléctrico con tres breakers y un timer. Los breakers están etiquetados como 'BREAKER MOLINO/TAMIZADORA', 'BREAKER CONTROL' y 'TIMER'. El panel tiene un fondo naranja y cables de colores conectados a los terminales.</p>
<p><b>2.-</b> Verificar que el selector externo de encendido se encuentre en la posición <b>OFF</b>.</p>	 <p>Selector de encendido con una perilla negra. Las etiquetas 'ENCENDIDO', 'OFF' y 'ON' están visibles. La perilla está girada hacia la posición 'OFF'.</p>
<p><b>3.-</b> El selector molino/tamizadora debe estar en posición 2 o en la mitad.</p>	 <p>Selector de molino/tamizadora con una perilla negra. Las etiquetas 'MOLINO', 'OFF' y 'TAMIZADOR' están visibles. La perilla está girada hacia la posición 'MOLINO'.</p>

**4.-** conectar a una fuente de energía de 220v monofásica



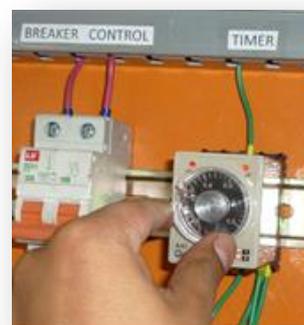
**5.-** Alzar los breakers molino / tamizadora y el breakers de control.



**6.-** Cargar la muestra del mineral en la tolva de alimentación.



**7.-** Elegir el tiempo de molienda en el time.



**8.-** Colocar el selector en la posición (1) molino.



**9.-** Seleccionar la velocidad de molienda en el variador siemens.



**10.-** Poner en marcha el equipo **ON**.



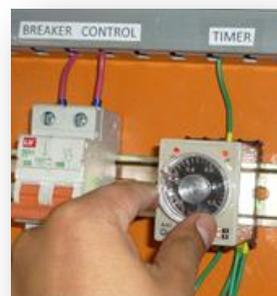
**11.-** Esperar el tiempo de molienda y el equipo automáticamente se detiene. Apagar (colocar el selector en posición OFF).



**12.-** Abrir la compuerta de salida del molino para que el producto caiga en el tamizador.



**13.-** Elegir el tiempo de tamizaje en el time.



**14.-** Colocar el selector en la posición (3) tamizador



**15.-** Seleccionar la velocidad de tamizaje en el variador siemens (se recomienda máximo 12 Hz.)



**16.-** Esperar el tiempo de tamizaje y automáticamente se detiene el equipo.



**17.-** Sacar cuidadosamente cada tamiz.



**18.-** Pesar el acumulado que quedo en cada malla y en recolector de cernido.

