



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**REPOTENCIACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DEL MOLINO DE  
MARTILLO EN EL LABORATORIO DE PROCESOS  
INDUSTRIALES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS.**

**Trabajo de titulación**

**Tipo:** Proyecto Técnico

Presentado para optar por el grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR:** MARÍA FERNANDA GUTIERREZ VILELA

**TUTOR:** ING. JOSÉ OMAR CABRERA ESCOBAR

Riobamba-Ecuador

2018

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal de Trabajo de titulación certifica que: El trabajo de investigación: Tipo técnico **Repotenciación y automatización del molino de martillo en el laboratorio de procesos industriales de la Facultad de Ciencias**, de responsabilidad de la señora María Fernanda Gutiérrez Vilela, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

FIRMA

FECHA

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL** \_\_\_\_\_

Ing. José Omar Cabrera Escobar

**DIRECTOR DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

\_\_\_\_\_

Ing. Cesar Puente Guijarro.

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

**©2018, María Fernanda Gutiérrez Vilela**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

## **DECLARACION DE AUTENTICIDAD**

Yo, María Fernanda Gutiérrez Vilela, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 23 de noviembre del 2018.

María Fernanda Gutiérrez Vilela

Cedula de Identidad: 080285758-1

Yo, María Fernanda Gutiérrez Vilela soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

María Fernanda Gutiérrez Vilela

## **DEDICATORIA**

Este esfuerzo personal quiero dedicarlo a cada uno de los miembros de mi familia que en todo instante han estado incondicionalmente para mí. Han sido ellos los que en el transcurso del tiempo han estado prestos a motivarme para cumplir con esta etapa de superación en el campo educativo.

Igualmente agradezco a mi esposo y a mis dos hijas Darlett y Ángela que han estado a mi lado en esta batalla como estudiante y con su apoyo y sus palabras de aliento me han orientado en la consecución de esta tesis.

María Fernanda.

## AGRADECIMIENTO

A Dios que me ha dado salud, fortaleza y perseverancia para culminar mi carrera universitaria. A mí adorada familia que siempre estuvo a mi lado motivándome y fortaleciendo el lazo familiar juntos logramos este nuevo esfuerzo profesional.

A mi esposo y mis dos princesas Darlett y Ángela con su amor incondicional hicieron real este trabajo.

A la ESPOCH y cada uno de los docentes de la escuela de ingeniería química que me entregaron sus conocimientos para culminar mi tesis.

A mi tutor Ing. José Cabrera que con sus conocimientos supo guiarme en este proyecto técnico.

María Fernanda.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	XIII
SUMMARY .....	XIV
<b>CAPITULO I</b>	
<b>1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>1</b>
1.1 Identificación del problema .....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	2
1.3 Línea base del proyecto .....	3
1.3.1 <i>Antecedentes del molino de martillo.....</i>	<i>3</i>
1.3.2 <i>Marco conceptual.....</i>	<i>4</i>
1.3.3. <i>Beneficiarios directos e indirectos .....</i>	<i>15</i>
<b>CAPITULO II .....</b>	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....</b>	<b>16</b>
2.1 General .....	16
2.2 Específicos .....	16
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>17</b>
<b>3 ESTUDIO TÉCNICO .....</b>	<b>17</b>
3.1 Localización del Proyecto.....	17
3.2 Ingeniería del Proyecto.....	18
3.2.1. <i>Tipo de estudio.....</i>	<i>18</i>
3.2.2. <i>Metodología .....</i>	<i>18</i>
3.2.3. <i>Métodos.....</i>	<i>18</i>
3.2.4. <i>Diagnóstico del molino de martillos .....</i>	<i>20</i>
3.2.5. <i>Repotenciación del molino de martillo .....</i>	<i>33</i>
3.2.6. <i>Automatización del molino de martillos .....</i>	<i>45</i>
3.3 Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria.....	54
3.3.1. <i>Requerimientos para la repotenciación del molino de martillos .....</i>	<i>54</i>
3.3.2. <i>Requerimientos para la automatización del molino de martillos .....</i>	<i>55</i>
3.4 Análisis de Costo/beneficio del proyecto.....	55
3.4.1. <i>Presupuesto .....</i>	<i>55</i>
3.4.2. <i>Análisis costo-beneficio.....</i>	<i>58</i>
3.5 Cronograma de ejecución del proyecto. ....	59

**ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS ..... 60**

**CONCLUSIONES..... 63**

**RECOMENDACIONES..... 65**

**BIBLIOGRAFIA**

**ANEXOS**

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Diagrama de molino de martillos.....	8
<b>Figura 2-1:</b> Molino de rodillos.....	10
<b>Figura 3-3:</b> Localización ESPOCH.....	17
<b>Figura 4-3:</b> Fusible y su simbología .....	49
<b>Figura 5-3:</b> Luces piloto y su simbología .....	50
<b>Figura 6-3:</b> Pulsador on/off y su simbología .....	50
<b>Figura 7-3:</b> Botón de paro de emergencia y su simbología .....	51
<b>Figura 8-3:</b> Relé térmico y su simbología.....	51
<b>Figura 9-3:</b> Bobina y su simbología.....	52
<b>Figura 10-3:</b> Temporizador y su simbología.....	52
<b>Figura 11-3:</b> Diagrama de control automatico on delay y off delay .....	53

## INDICE DE FOTOGRAFIAS

<b>Fotografía 1-3:</b> Molino de martillos antes de la repotenciación.....	21
<b>Fotografía 2-3:</b> Medición del diámetro del grano.....	21
<b>Fotografía 3-3:</b> Peso de la muestra.....	22
<b>Fotografía 4-3:</b> Puesta en funcionamiento del molino de martillos.....	22
<b>Fotografía 5-3:</b> Producto obtenido luego de molienda.....	23
<b>Fotografía 6-3:</b> Peso de cada tamiz.....	23
<b>Fotografía 7-3:</b> Tamizado del producto.....	24
<b>Fotografía 8-3:</b> Peso de tamiz con muestra.....	24
<b>Fotografía 9-3:</b> Estado molino de martillo en diagnostico.....	31
<b>Fotografía 10-3:</b> Componentes en estado de deterioro.....	32
<b>Fotografía 11-3:</b> Producto tamizado.....	33
<b>Fotografía 12-3:</b> Limpieza de componentes de equipo.....	33
<b>Fotografía 13-3:</b> Engrasado de los componentes del molino de martillos.....	34
<b>Fotografía 14-3:</b> Seguro para evitar la polución en cámara de trituración.....	34
<b>Fotografía 15-3:</b> Recipiente contenedor del producto.....	35
<b>Fotografía 16-3:</b> Molino de martillos repotenciado.....	36
<b>Fotografía 17-3:</b> Peso de la muestra para prueba de molino repotenciado.....	36
<b>Fotografía 18-3:</b> Producto obtenido luego de molienda repotenciada.....	37
<b>Fotografía 19-3:</b> Peso de cada tamiz molino repotenciado.....	37
<b>Fotografía 20-3:</b> Tamizado del producto molino repotenciado.....	38
<b>Fotografía 21-3:</b> Peso de tamiz con muestra molino repotenciado.....	38
<b>Fotografía 22-3:</b> Producto molido luego de repotenciación.....	45
<b>Fotografía 23-3:</b> Automatización del molino de martillos.....	48

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-3:</b> Clasificación de equipos de molienda .....	4
<b>Tabla 2-3:</b> Tipos de molinos .....	5
<b>Tabla 3-3:</b> Coordenadas geográficas de ESPOCH .....	17
<b>Tabla 5-3:</b> Materiales y equipos utilizados en la simulación .....	20
<b>Tabla 6-3:</b> Datos experimentales del Tamizado .....	25
<b>Tabla 7-3:</b> Datos adicionales de la Materia Prima .....	25
<b>Tabla 8-3:</b> Datos adicionales para Molienda y Tamizado .....	26
<b>Tabla 9-3:</b> Tabla cálculos diámetro de la molienda .....	27
<b>Tabla 10-3:</b> Resultados de cálculos de diagnóstico de molino de martillos.....	32
<b>Tabla 11-3:</b> Cantidad de alimentación para prueba de repotenciación.....	35
<b>Tabla 12-3:</b> Materiales y equipos utilizados en la repotenciación .....	36
<b>Tabla 13-3:</b> Datos experimentales de Molienda y Tamizado en molino repotenciado .....	39
<b>Tabla 14-3:</b> Datos experimentales del Tamizado en molino repotenciado .....	39
<b>Tabla 15-3:</b> Datos adicionales de la Materia Prima .....	39
<b>Tabla 16-3:</b> Datos adicionales para Molienda y Tamizado.....	40
<b>Tabla 17-3:</b> Tabla cálculos diámetro de la molienda repotenciado.....	41
<b>Tabla 18-3:</b> Resultados de repotenciación del molino de martillos .....	44
<b>Tabla 19-3:</b> Requerimientos para la repotenciación del molino de martillos.....	54
<b>Tabla 20-3:</b> Requerimientos para la automatización del molino de martillos .....	55
<b>Tabla 21-3:</b> Costos para la repotenciación del molino de martillos. ....	56
<b>Tabla 22-3:</b> Costos de materia prima e insumos .....	56
<b>Tabla 23-3:</b> Costo total de proyecto .....	57

## RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se realizó la repotenciación y automatización del molino de martillos que se encuentra en el Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Para poder reconocer las falencias del equipo que debían ser mejoradas, se realizó una inspección física inicial y una práctica de laboratorio, en la que se tomó como base de prueba una alimentación de 1000 g de frejol seco, por ser uno de los granos más duros. Los resultados de esta prueba evidenciaron que el rendimiento de la operación de molienda era imposible de obtener pues no existieron pesos en los tamices que corresponden a los hilos finos, además se reflejaron los problemas ocasionados por la falta de mantenimiento en sus componentes. Para la repotenciación del equipo se realizó un mantenimiento general mediante la limpieza, engrasado y alineación de los componentes del equipo. Para determinar las partes de la automatización se realizaron los cálculos correspondientes, que determinan la necesidad de colocar un sensor en la tolva de alimentación y un control de luz de malla que permita generar una ganancia, sin embargo los costos de implementación de la automatización completa resultan ser muy altos, por lo tanto se decidió implementar un temporizador, pulsadores on/off, luces pilotos, botón de paro de emergencia y una pantalla led. La validación del equipo se realizó luego de las mejoras aplicadas y en base a la misma técnica de laboratorio utilizada en la primera prueba de diagnóstico del equipo, en la cual se obtuvo resultados muy favorables, una vez realizada la repotenciación la eficiencia de la operación de molienda con granos de frejol es de 97,94%. Es recomendable realizar mantenimientos periódicos de acuerdo a la necesidad y uso del molino de martillos para evitar los daños causados por este factor.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <PROCESOS INDUSTRIALES>, <MOLINO DE MARTILLOS>, <REPOTENCIACIÓN>, <AUTOMATIZACIÓN>, <DIAGNOSTICO>.

## SUMMARY

In the current degree project, the repowering and automation of the mill of hammers that was in the Industrial Processes Lab of the Facultad de Ciencias from Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) were realized. In order to be able to recognize the shortcomings of the equipment that had to be improved, an initial physical inspection and a laboratory practice was carried out, in which a feeding of 1000 g of dry beans was taken as a test basis, as it is one of the hardest grains. The results of this test showed that the performance of the milling operation was impossible to obtain, since there were no weights in the sieves corresponding to the fine yarns, in addition the reflected problems caused by the lack of general maintenance by cleaning, greased were referenced and alignment of the team components. To determine the parts of the automation the corresponding calculations were made, which determined the need to place a sensor in the feed hopper and a mesh light control that allows to generate a profit, however the costs of implementation of the complete automation resulted be very high, therefore it was decided to implement a timer, on / off pushbuttons, pilot lights, emergency stop button and a led screen. The validation of the equipment was made after the improvements applied and based on the same laboratory technique used in the first diagnostic test of the equipment, in which very favourable results were obtained, once the repowering was made, the efficiency of the operation of grinding with beans is 97.94%. It is advisable to perform periodic maintenance according to the need and use of the hammer mill to avoid the damage caused by this factor.

Key words: <TECHNOLOGY AND SCIENCES OF ENGINEERING>, <HAMMER MILL>, <REPOWERING>, <AUTOMATION>, <DIAGNOSIS>, <INDUSTRIAL PROCESSES>.

## CAPITULO I

### 1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

#### 1.1 Identificación del problema

El molino de martillos es un equipo utilizado en procesos de molienda y trituración. Su uso abarca diferentes industrias para el procesamiento de diversos materiales con necesidades de un tipo de tamaño de partículas óptimo para realizar las operaciones que lo preceden de manera correcta, garantizando la eficiencia en el proceso. Básicamente el funcionamiento del molino de martillos es desintegrar y pulverizar la materia prima mediante impactos y fuerzas de rozamiento entre las partículas del mismo material.

En la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), se cuenta con varios tipos de molinos, ya que son fundamentales en la aplicación de la parte teórica impartida en las aulas con respecto a las operaciones unitarias más utilizadas en la industria, así mismo, tanto la carrera de Ingeniería Química como otras carreras pertenecientes a la misma institución, utilizan estos equipos con fines de investigación. El molino de martillos que existe actualmente en el Laboratorio de Procesos de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) cuenta con varias fallencias debido al paso del tiempo y la falta de mantenimiento del mismo.

Las principales consecuencias de los problemas que genera la utilización del actual molino de martillos, es la fuga de la materia prima ingresada para el procesamiento, además durante el proceso de molienda el motor se recalienta por atascamiento del material ingresado al proceso dando como resultado un producto con partículas no uniformes.

Por los problemas antes mencionados, la alimentación de la materia prima al equipo debe hacerse de a poco, generando pérdidas de tiempo y de la eficiencia del mismo. Sumado a esto no se cuenta con un sistema controlador de variables importantes como el tiempo y la velocidad o revoluciones por minuto de trabajo del molino.

## **1.2 Justificación del proyecto**

La utilización de los equipos del laboratorio, entre ellos el molino de martillos, son utilizados con fines educativos y de investigación, es por esta razón que la ejecución de este proyecto favorecerá, no solo a la carrera de Ingeniería Química, sino también a todas las carreras de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) que requieran su uso.

El molino de martillos es utilizado en la gran mayoría de los procesos industriales, desintegrando la materia prima en granos de un tamaño de partícula acorde para las operaciones siguientes del proceso que se esté realizando o estudiando, por ende, es importante que la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) cuente con un equipo funcional de este tipo para estos fines.

La implementación del proyecto técnico “Repotenciación y Automatización del Molino de Martillo en el Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias” se desea realizar un aporte importante para la experimentación en este equipo, mejorando su nivel de operatividad, y aumentando su porcentaje de eficiencia. Con la automatización se pretende mejorar la interacción equipo-operador haciendo su uso más fácil y seguro para quien lo opere.

## **1.3 Línea base del proyecto**

### ***1.3.1 Antecedentes del molino de martillo***

Básicamente el molino de martillo consta de un cilindro cuyo interior giran medios de molienda encargados de la reducción del tamaño de partícula de un material duro. El fin de la molienda es triturar el grano mediante el impacto y abrasión del mismo con ayuda de martillos que giran dentro del cilindro del molino.

Antes de existir la gran variedad de molinos se realizaba la molienda de los granos de manera manual aplicando la fuerza con majaderos y morteros o con ayuda de la presión entre dos piedras planas. La necesidad de encontrar una manera de disminuir el tamaño de las partículas de los granos recolectados en la agricultura es para la obtención de harina principalmente de trigo. Los primeros molinos se asume son los molinos hidráulicos y los molinos de tracción a sangre, que datan desde el siglo I a.C. (ALNICOLSA, 2000).

Gracias a la introducción de la molienda dentro de los procesos industriales es posible determinar conceptos útiles en la utilización y mejoramiento productivo, ya que la finalidad es lograr un tamaño de partícula menor la aplicación de la molienda no solo está orientada a reducir el tamaño físico espacial que ocupara el transporte que ocupara el transporte de un producto o insumo, al contrario la aplicación de la molienda ayuda a crear un tamaño de partícula uniforme al mismo tiempo aumenta el área de contacto lo que facilitara no solo mejores procesos productivos sino que garantizara el funcionamiento de los mismos.(Monsalvo Vázquez and Romero Sánchez, 2014)

Por lo mencionado anteriormente resulta lógica la aplicación de otro proceso u operación unitaria, debido a que en la molienda se obtiene diámetros de partícula en su mayoría uniformes pero es imposible obtener un diámetro regular o completo en todas las partículas es por ello que es indispensable evaluar la distribución del tamaño de la partícula bajo parámetros establecidos por la leyes de desintegración mecánica, de este modo la molienda y el tamizado serán imprescindibles para determinar la eficiencia de un molino.(Ibarz and Barbosa-Cánovas, 2015)

Según el tipo de molino que se utilice se obtendrán resultados diferentes en diámetros de partículas, así como dependiendo del material a moler se obtendrán diámetros de partículas diferentes, es decir los parámetros más importantes en la elección de un tipo de molino serán la dureza del material, la eficiencia del molino, el diámetro inicial de la partícula ya que es

indispensable en base a estos datos poder calcular la cantidad de trabajo útil necesaria que va realizar el molino.

Al identificar la cantidad de trabajo que va realizar un molino dentro de la operación o proceso el verdadero interés industrial será conocer la cantidad de energía necesaria que consumirá el molino para cumplir con su finalidad.(De Explotación *et al.*, 2012)

### 1.3.2 Marco conceptual

#### 1.3.2.1. Molienda

Un molino es una maquina encargada de triturar un material de tamaño de partícula mayor a uno deseado para las subsiguientes operaciones unitarias que abarcan el proceso que se esté realizando o estudiando (Cuadrado Moncayo & Rueda Castillo, 2009, pp. 9-10). Aunque existan para diversas utilidades, entre ellas mover agua y producir electricidad, los más utilizados para desintegración de partículas en el ámbito industrial son los molinos de martillos.

**Tabla 1-3:** Clasificación de equipos de molienda

TIPO DE MOLIENDA	CARACTERISTICAS DE OPERACION	CONSUMO DE ENERGIA	DISTRIBUCION DE TAMAÑOS
<b>MOLIENDA CIRCUITO CERRADO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No realiza gran esfuerzo en reducción de tamaños.</li> <li>• Reduce el tiempo de residencia de las partículas del molino.</li> <li>• Realizado en molino de bolas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado, producto de alta calidad.</li> <li>• Alto consumo de potencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Productos finos muy homogéneos.</li> <li>• Entran partículas gruesas, se reciclan varias veces obteniendo partículas finas.</li> </ul>
<b>MOLIENDA CIRCUITO ABIERTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de residencia corto.</li> <li>• Partículas grandes, pasan más rápido.</li> <li>• Partículas grandes, se quedan grandes.</li> <li>• Tiempo de residencia en el molino.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo consumo de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplia distribución de tamaño.</li> <li>• Homogeneidad.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se mueve a favor de la gravedad.</li> </ul>		
<b>MOLIENDA SOFOCADA EN EXCESO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utiliza en partículas finas.</li> <li>• El producto permanece adentro hasta que la partícula cumpla el tamaño requerido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto consumo de energía en comparación del circuito abierto</li> <li>• Bajo consumo de energía en comparación con el circuito cerrado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay distribución de tamaños, ya que es una molienda excesiva para partículas, obteniendo partículas muy finas.</li> </ul>

**Fuente:** Gutiérrez Elsa, 2016. <https://es.slideshare.net/FanychanCosplayer/reduccion-de-tamao>

**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### 1.3.2.2. Tipos de Molinos

Durante la historia del proceso de molienda se han utilizado variedad de máquinas molidoras dependiendo del uso y la necesidad para la cual se lo quiera dar, en la siguiente tabla se describen los tipos de molinos existentes:

**Tabla 2-3:** Tipos de molinos

TIPO DE MOLINO	FUERZA INVOLUCRADA	VARIABLES	CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO	ELEMENTOS MOLIENTES	APLICACIONES
MOLINO DE MARTILLOS	-De impacto y cizalla.	-Velocidad de operación. -Número de martillos. -Velocidad de alimentación. -Tamaño de grano y criba.	-Uso general. -Plato de ruptura -Control de humedad para evitar aglomeraciones	-Martillos: Fijos, colgantes, dentados, lisos y afilados.	-Sólidos cristalinos duros. -Productos fibrosos. -Ejemplo: Pimienta, especias, azúcares.
MOLINO DE DISCOS	-De cizalla.	-Separación entre los discos.	-Reducción de sólidos.	-Discos de cizalla.	-Ejemplo: Pimienta, alginatos,

		-Velocidad de alimentación. -Mayor fuerza de cizallamiento.	-Masa nixtamalización. -Productos blandos cristalinos.	-Estiradas y de dientes.	papika, verduras deshidratadas.
MOLINO DE RODILLOS	-De compresión y cizalla.	-Velocidad de rotación de los rodillos. -Velocidad de alimentación. -Distancia de separación entre rodillos (Angulo de atrape).	-Dos o más rodillos de acero giran uno hacia otro.	-Rodillos: Lisos, estriados o corrugados.	-Molienda fina. -Molienda intermedia. -Ejemplo: Cascara de cacahuates, almidones, entre otras.
MOLINO DE BOLAS	-De impacto, cizalla y centrifuga.	-Velocidad de operación. -Tiempo de molienda. -Velocidad de alimentación.	-Molino giratorio, vibratorio. -Bolas grandes es igual fuerza de impacto. -Bolas pequeñas es igual fuerzas de cizalla.	-Bolas de acero, cerámica o piedras.	• Molienda fina y ultra fina para alimentos duros y abrasivos. • Ejemplo: Colorantes
TRITURADORA RAS	-De impacto, cizalla y centrifuga.	• Longitud, diámetro de rodillos. • Velocidad de rotación.	• Quebrantador es. • Plato estacionario. • Mandíbulas giratorias.		• Partículas finas.

**Fuente:** Gutiérrez Elsa, 2016. <https://es.slideshare.net/FanychanCosplayer/reduccion-de-tamao>

**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Actualmente existen variedad de molinos utilizados para diversas funciones en distintas áreas de la industria, pero los más conocidos y utilizados se describen a continuación:

## **Molino de Viento**

El uso del molino de viento data desde la era cristiana (siglo XII) utilizado inicialmente en las ciudades persas. Con el paso del tiempo se fue adaptando a básicamente una torre con una parte giratoria que consta de aspas oblicuas que miden entre 3 y 9 m. La utilización de este tipo de molino se basa en la transformación del viento en energía utilizable, donde los granos son triturados por piedras conectadas a un sistema de engranaje que gira de acuerdo a las aspas accionadas por el viento (Cuadrado Moncayo & Rueda Castillo, 2009, p. 11).

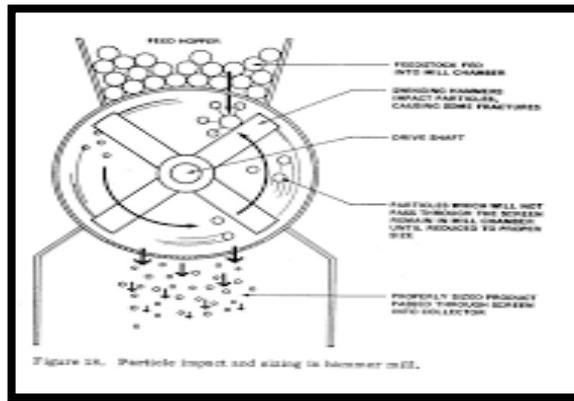
## **Molino de Martillos**

A lo largo de la historia el ser humano siempre ha buscado innovar en la construcción de equipos, voluntaria e involuntariamente, por la misma razón el primer molino de martillos se desarrolló a partir de la machacada a mano con ayuda de un material de piedra en forma de mortero. Como todo equipo con el tiempo ha sufrido cambios y actualizaciones en sus componentes donde la piedra se ha cambiado por una serie de martillos de metal. (Rafael *et al.*, 2009)

Una de las grandes ventajas de este molino, es que en el sistema de molienda es totalmente cerrado impidiendo que el polvo de molienda (harina) no se pierda, como en la antigüedad ocurría con mucha frecuencia este problema con este tipo de diseños de molienda.

Este tipo de molino es muy utilizado en la industria minera, en la industria alimenticia es aplicable en la obtención de harinas de: Maíz, arroz, trigo, soya, pan rallado y cualquier otro producto seco. Así como también en la producción de: Canto rodado, cartón, plásticos y otro cualquier material sólido.

### **➤ Principio de funcionamiento de un molino de martillos**



**Figura 1-1:** Diagrama de molino de martillos  
**Fuente:** Bermeo Diana, 2009.

Un punto fundamental en el diseño de este tipo de molinos es el tipo material, del cual van a ser construidos los elementos mecánicos que serán parte del molino, ya que debe soportar elevados esfuerzos, a los que se encuentran sometido el molido. Un principio fundamental en el funcionamiento del molino de martillos es la fuerza presente en el sistema que es la fuerza centrífuga, la misma que se determina en base a la velocidad angular y radio de giro del molino.

El principio de funcionamiento de un molino de martillos no es complejo y se explica de la siguiente manera:

- Inicia por la boca superior (tolva) por la misma se va dar el ingreso el producto a ser molido, posteriormente por acción de la gravedad cae al interior de la cámara de desintegración.
- El eje en el interior del equipo gira a gran velocidad y por presencia de la fuerza centrífuga los martillos se posicionan perpendicularmente en posición de trabajo.
- Los martillos golpean el producto que se encuentra en el interior del molino, chocando contra la cámara de desintegración, y nuevamente es golpeado por los martillos, esto ocurre sucesivamente hasta que el producto alcance su tamaño mínimo.
- El material molido sale a través de orificios ubicados abajo del molino.
- Y por último pasa por una criba y tamizado para separar la granulometría adquirida

(Bermeo Martínez, 2009, p. 18).

Un ejemplo muy claro ocurre en el grano de maíz, donde el grano absorbe la energía potencial del martillo.

### ➤ **Transmisiones en los molinos de martillos**

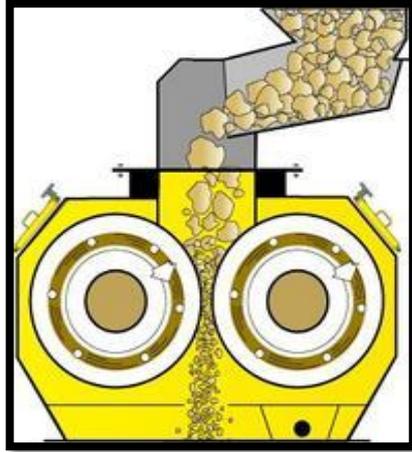
En la mayoría de equipos de molienda de martillo se debe contar con una transmisión que facilitara el trabajo enviado desde una fuente creadora de potencia, durante muchos años se usó como transmisiones para los molinos que deducían el uso de la fuerza humana como la energía del viento, de animales e incluso de la energía generada por el agua de ríos, pero estas no ayudaban a crear una buena eficiencia, por esta necesidad nacieron las primeras transmisiones mecánicas, por bandas, engranajes o cadenas.

Con el paso del tiempo poco a poco el proceso ha ido mejorando, haciendo más eficiente y más rentable el proceso de molienda, sino generando la disminución de consumo de energía, otorgando diseño de transmisiones directas que cuentan con un acoplamiento, permitiendo el aprovechamiento integro de la potencia de un motor conectado con el eje central del molino, facilitando el trabajo (Bermeo Martínez, 2009, pp. 18-19).

### **Molino de Rodillos**

El molino de rodillos se utiliza mayormente para la desintegración mecánica de granos de maíz, diferentes tipos de trigo, centeno, cebada, sorgo y malta. La utilización de los mismos dentro de la industria al igual que otros molinos es muy variada.

Su funcionamiento básicamente se basa en la trituración de los granos que pasan por medio de dos rodillos que giran en el mismo sentido y con velocidad constante, hasta completar la operación. Los rodillos comprimen el material, hasta lograr incluso obtener un producto en pulpa o polvo (Rodríguez, et al., 2014, p. 1).



**Figura 2-1:** Molino de rodillos

Fuente: Barrera, et al., 2015.

Existen diferentes tipos de rodillos para esta máquina, pues puede estar compuesta de rodillos lisos o corrugados, también existen los rodillos estriados de sierra para acompañar la trituración con una acción cortante. Generalmente los rodillos cuentan con un sistema de regulación de espacio entre los mismos para ajustar el tamaño de la partícula del material procesado.

Las industrias que más utilizan este tipo de molino son la agricultura como paso para obtener harinas o balanceados, además son muy utilizados también en la construcción para preparar la grava, pavimentar y construir, igualmente son usados en la desintegración de materia prima para la industria farmacéutica (Rodríguez, et al., 2014, p. 2).

### *1.3.2.3. Leyes de desintegración mecánica*

Los equipos anteriormente descritos son equipos destinados a la desintegración mecánica de algún tipo de materia, el mismo que debe contar con características básicas para que el proceso sea lo más eficiente posible: buena capacidad de alimentación, consumo de energía bajo y un tamaño de partícula único para todo el producto (Hinojosa Salazar, 2014, p. 22).

### **Ley de Rittinger**

La ley de Rittinger fue propuesta en el año de 1867 y está fundamentada en la proporcionalidad entre la desintegración de la materia y su nueva superficie creada a la salida de la máquina. El fin de la aplicación de esta ley en los métodos de desintegración mecánica es determinar que la eficacia de molienda es constante y para el molino y materia prima es totalmente independiente de los tamaños de partícula de la entrada y salida del proceso (McCabe, Smith and Harriott, 2007). Tomando

en cuenta las condiciones antes mencionadas, las constantes que intervienen en la ley de Rittinger se unen en una sola expresando la misma como:

$$E = \frac{P}{m} = K_r \left( \frac{1}{D_{pp}} - \frac{1}{D_{pa}} \right)$$

Dónde:

E= Energía requerida por unidad de masa (kW-h/ton)

Kr= Constante de Rittinger

Dpp= Diámetro medio de las partículas del producto (mm)

Dpa= Diámetro medio de las partículas alimentadas (mm)

La ley de Rittinger tiene limitaciones al momento de ser aplicada, ya que es aplicable para rangos entre 50 y 0.05 mm (Hinojosa Salazar, 2014, p. 23).

### Ley de Bond

Otro de los métodos más aplicados para calcular la energía necesaria en la operación de molienda es la ley de Bond. Este método es uno de los más acercados a la realidad en los cálculos experimentales obtenidos en la molienda. La ley de Bond fue propuesta en el año de 1952 por Fred C. Bond y establece que el trabajo que se requiere para obtener partículas de un tamaño determinado ( $D_p$ ) a partir de una cierta alimentación con un tamaño considerable es proporcional a la raíz cuadrada de la superficie a volumen del producto (Hinojosa Salazar, 2014, p. 23):

$$E = \frac{P}{m} = K_b \left[ \frac{1}{\sqrt{D_{pp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_p}} \right]$$

Dónde:

$$K_b = \sqrt{100 \times 10^{-3} W_i} = 0.3162 W_i$$

Remplazando:

$$E = \frac{P}{m} = 0.3162 W_i \left[ \frac{1}{\sqrt{D_{pp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_p}} \right]$$

Dónde:

$K_b$ = Constante de Bond

$E$ = Energía requerida por unidad de masa (kW-h/ton)

$W_i$ = Energía total que se necesita para reducir una alimentación muy grande hasta un tamaño que el 80 % del material pase por un tamiz de 100  $\mu\text{m}$

$D_{pp}$ = Diámetro medio de las partículas del producto (mm)

$D_{pa}$ = Diámetro medio de las partículas alimentadas (mm)

El cálculo de la resistencia de un material al momento de ser triturado propuesto por Bond, se convirtió en el método principal para la caracterización de circuitos convencionales de molienda y actualmente se considera la base para el dimensionamiento de nuevas unidades en esta operación (Marchense García, 2004, pp. 15-21).

#### *1.3.2.4. Tamizado*

El tamizado es una operación unitaria que se encarga de la separación de una alimentación con partículas de diferentes tamaños que se obtiene a partir de procesos industriales o de la naturaleza en sí. Los sólidos son colocados en la superficie del tamiz de mayor tamaño para que los finos puedan pasar a través de ellos hasta la luz de malla adecuada y cualquiera o todas las fracciones pueden ser consideradas producto.

La alimentación de la mezcla de partículas al ser separadas por diferentes tamices son llamadas fracciones clasificadas por tamaños, las mismas que se conocen por su tamaño máximo y mínimo. El objetivo de aplicar esta operación unitaria a nivel industrial es básicamente para preparar un material al tamaño de partícula adecuado para el proceso subsiguiente de cada equipo en el que intervienen, ya que para algunos procesos se toma en cuenta como variable el tamaño de partícula, al correr el riesgo de existir una obstrucción por el tamaño muy grande o al ser muy fino se pierda por arrastre neumático (Hedenzfr, 2009, pp. 2-12).

### **Tipos de tamizados**

Existen dos tipos de tamizados, los mismos que se describen a continuación:

#### ➤ **Tamizado por vía seca**

El tamizado realizado por vía seca se realiza a materiales que presentan humedad natural en mínima cantidad o que han sido secadas previamente.

#### ➤ **Tamizado por vía húmeda**

Por otro lado el tamizado por vía húmeda se efectúa acompañado de la adición de un líquido al material que ingresa a la operación, para que el líquido añadido lleve las partículas más finas a través de las diferentes luces de malla utilizada en la torre del tamiz (Hedenzfr, 2009, pp. 9-12).

Comparando los dos tipos de tamizado el tamizado mediante la vía húmeda es más eficiente, pero no es conveniente ya que posteriormente se debe realizar un secado para poder obtener el producto. Por esta razón la utilización de la operación por vía seca es la más común y rentable.

#### **Tamices industriales**

Existen diferentes tamices que se utilizan en el ámbito industrial, pero la mayoría son de tela metálica, de seda o plástico, también utilizan barras y placas metálicas con perforaciones, que van desde 1  $\mu\text{m}$ . La gran parte de los procesos de tamizados se realizan aplicando la gravedad, aunque actualmente se fuerza las partículas a través de un tamiz con ayuda de un cepillo o fuerza centrífuga (Hedenzfr, 2009, p. 12).

Los equipos de tamizado se clasifican según el movimiento de la superficie tamizante, por ende se separan en tamices fijos y móvil. Para los tamices fijos se utilizan parrillas o barras estacionarias y telas metálicas estacionarias, en cambio los tamices móviles se clasifican en vibratorios, oscilantes, de vaivén y rotativos (Hedenzfr, 2009, p. 24).

Los tamices fijos separan generalmente partículas de tamaño mucho mayor y cuentan con una inclinación óptima para que pase todo el sólido por la misma.

- **Tamices fijos de parrillas estacionarias:** los mismos cuentan con barras de 50 hasta 200 mm.
- **Tamices fijos de tela metálica estacionaria:** su separación de malla va desde 12 hasta 100 mm.

Los tamices móviles, en cambio, el material alimentado se mueve de cierto modo a causa de la inercia, y del cual se diferencian sus tipos. Estos tamices son utilizados generalmente para separar grandes cantidades de sólidos y puede contener más de un tamiz en serie con diferente luz de malla (Hedenzfr, 2009, pp. 14-18).

### **Eficiencia de un tamiz**

La eficiencia del proceso de tamizado se determina tomando en cuenta el éxito en la separación exacta de los sólidos en la alimentación. Según la parte operativa la eficiencia se calcula con la cantidad de producto y la alimentación. En la que se debe cumplir que  $B=C+R$ , tomando en cuenta que B es la cantidad de alimentación, C es el producto y R la suma de los rechazos (Bermejo, s.f., pp. 7-8).

Conociendo estos datos se puede obtener varios índices granulométricos de importancia como:

- **Índice de cernido ( $I_C$ ):** cálculo que se realiza para obtener la fracción de finos.

$$I_C = \frac{C}{B} * 100$$

- **Índice de rechazo ( $I_R$ ):** Calculo de los gruesos retenidos en los tamices.

$$I_R = \frac{R}{B} * 100$$

Dónde:

$$I_C + I_R = 100$$

Estos cálculos son obtenidos para el método de separación por medio de tamizado en cascada, el mismo que es usualmente utilizado.

De aquí parte la eficiencia de los finos calculada mediante la siguiente formula:

$$E_f = I_C * \frac{F_C}{F_A}$$

Dónde:

$E_f$ = Eficiencia de finos

$I_c$ = Índice de finos

$F_c$ = Finos en el producto

$F_A$ = Finos en la alimentación

### ***1.3.3. Beneficiarios directos e indirectos***

#### ***1.3.3.1. Beneficiarios Directos***

Los beneficiarios directos de este proyecto serán los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Química y de otras carreras afines de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), para la aplicación de la parte teórica a nivel de laboratorio, ayudando al entendimiento del mismo en los estudiantes.

#### ***1.3.3.2. Beneficiarios Indirectos***

Los beneficiarios indirectos con la aplicación de este proyecto serán los Tesistas e Investigadores que necesiten de este equipo para cumplir los objetivos propuestos.

## **CAPITULO II**

### **2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

#### **2.1 General**

Repotenciar y automatizar el molino de martillo del Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias.

#### **2.2 Específicos**

- Diagnosticar la eficiencia general del molino de martillo.
- Identificar las alternativas de la repotenciación del molino de martillo.
- Designar la alternativa sustentando la viabilidad técnica y económica de la repotenciación y automatización del molino de martillos
- Validar la mejora del molino de martillo a través del funcionamiento del equipo.

## CAPITULO III

### 3 ESTUDIO TÉCNICO

#### 3.1 Localización del Proyecto

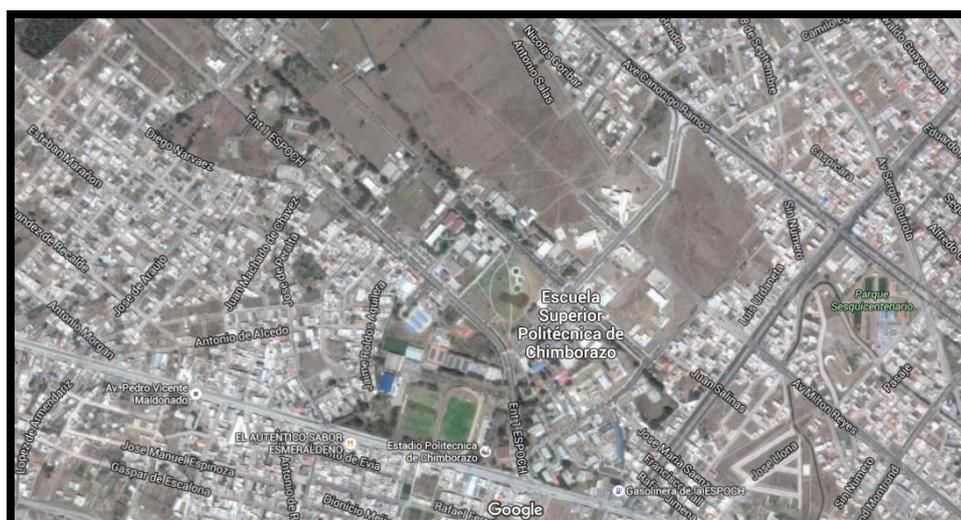
El proyecto será implementado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la Facultad de Ciencias, Carrera de Ingeniería Química, laboratorio de Procesos Industriales el mismo que está ubicado específicamente en la Panamericana Sur km 1 1/2 , en la ciudad de Riobamba – Ecuador.

**Tabla 3-3:** Coordenadas geográficas de ESPOCH

<b>Limites ESPOCH</b>	Al Norte, limita con el barrio 24 de Mayo y la Av. Canónigo Ramos. Al sur, limita con la Av. Pedro Vicente Maldonado y el Barrio de los Maestros. Al este, limita con la Av. 11 de Noviembre, Al Oeste limita con la Av. By Pass
<b>Rango altitudinal</b>	2754 m.s.n.m
<b>Clima</b>	Temperatura Promedio 21°C

FUENTE: Instituto Nacional de Estadística y Censos

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez



**Figura 3-3:** Localización ESPOCH

Fuente: Google maps, 2018.

## **3.2 Ingeniería del Proyecto**

### ***3.2.1. Tipo de estudio***

La elaboración del proyecto Repotenciación y automatización del molino de martillos del Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias es un proyecto de tipo técnico, el cual ha sido realizado mediante la aplicación de métodos experimentales, inductivos y deductivos, para lograr realizar la correcta repotenciación y posteriormente una automatización adecuada para facilitar la utilización del mismo en el Laboratorio de Procesos Industriales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH).

### ***3.2.2. Metodología***

Para empezar con la elaboración de este proyecto se realizó primeramente la obtención de datos por medio de una práctica en el equipo a repotenciarse ubicado en el Laboratorio de Procesos Industriales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), para diagnosticar en primera instancia la eficiencia general del mismo. Tomando en cuenta que el equipo fue diseñado para la desintegración del material yeso y en su dimensionamiento, en el dimensionamiento de los autores del molino de martillos se evidenció que la luz de malla en la que es más retenido el material es la malla 212  $\mu\text{m}$ .

La obtención de datos se realizó siguiendo los pasos de la validación de los autores del diseño y construcción del equipo a repotenciarse (Vargas, Poma and Fernando, 2012) , tomando en cuenta una alimentación de 1000 g y 500 g para realizar la evaluación. El material con el que se trabajó para las pruebas de diagnóstico, repotenciación y validación fue el frejol, ya que este grano presenta una dureza de 6,708 N y un diámetro de 0,00895 m. (Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado. Decanato de Agronomía *et al.*, 2013)

### ***3.2.3. Métodos***

#### ***3.2.3.1. Método experimental***

El método experimental se aplica para el diagnóstico, pruebas de repotenciación y validación del equipo en la que se demuestra el estado anterior y luego de la repotenciación y automatización para la validación del mismo.

### *3.2.3.2. Método inductivo*

El método inductivo se aplica en este proyecto ya que luego de la experimentación se procede a determinar el conocimiento, estado del equipo y las posibles alternativas de mejorarlo, tomando en cuenta los datos obtenidos anteriormente.

### *3.2.3.3. Método deductivo*

El método deductivo nos ayuda a la obtención de toda la información necesaria para elegir el mejor método para la repotenciación del molino de martillos y aplicarlo para obtener los resultados esperados en los objetivos de este proyecto.

### 3.2.4. Diagnóstico del molino de martillos

El problema del molino de martillos es que tiene antecedentes de baja eficiencia debido a la falta de mantenimiento, el laboratorio de Procesos industriales requiere la repotenciación del equipo, debido a la baja eficiencia y la realización de prácticas estudiantiles por tal motivo se realizó el diagnóstico del molino en base a la técnica de laboratorio utilizada dentro del mismo.

Para diagnosticar el estado actual del molino de martillos se realizó una inspección física inicial y se siguió una técnica referenciada por los autores del diseño y construcción del equipo para evidenciar las falencias del mismo.

#### ➤ Materia prima

Para realizar la práctica de laboratorio aprobada y revisada por el responsable del laboratorio de procesos industriales, en donde se encuentra el equipo, se utilizó como sólido de alimentación el frejol seco ya que se trata de un grano con una dureza determinada y un diámetro uniforme. Se partió de una cantidad determinada de alimentación la cual fue 1000g.

#### ➤ Materiales de laboratorio

Los equipos y materiales de laboratorio usados en la prueba de diagnóstico se muestran a continuación:

**Tabla 4-3:** Materiales y equipos utilizados en la simulación

MATERIAL/EQUIPO	CANTIDAD
<b>Molino de martillos</b>	1
<b>Torre de tamices</b>	1
<b>Balanza técnica</b>	1
<b>Calibrador</b>	1

**Fuente:** Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### 3.2.4.1. Descripción del procedimiento

- Para realizar el diagnóstico del molino de martillos se realizó una inspección física, para observar el estado general del molino.



**Fotografía 1-3:** Molino de martillos antes de la repotenciación.  
Fuente: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Luego se tomó una muestra de 100 granos de frejol para medir el diámetro de los mismos con ayuda de un calibrador.



**Fotografía 2-3:** Medición del diámetro del grano  
Fuente: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Se pesó 1000 g de frejol, que es la muestra base para el estudio de todo el proceso de repotenciación y validación del equipo.



**Fotografía 3-3:** Peso de la muestra

Fuente: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Se procedió a realizar una limpieza del equipo antes de realizar la operación y se encendió el motor.
- Se colocó la muestra en la tolva de abastecimiento por separado y a una velocidad mínima de 1253 rpm (Vargas, Poma and Fernando, 2012) se alimentó el frejol para evitar la obstrucción de los martillos.



**Fotografía 4-3:** Puesta en funcionamiento del molino de martillos

Fuente: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Se procedió a cronometrar el tiempo de operación, desde que ingresa la materia prima hasta que salgan todas las partículas del producto.
- Antes de apagar el equipo se esperó un minuto hasta que todo el producto se descargue de la cámara.

- Al finalizar la operación se apaga el equipo y se extrajo el producto molido junto con el recipiente de descarga y se pesó el producto obtenido.



**Fotografía 5-3:** Producto obtenido luego de molienda  
**Fuente:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Para el tamizado se toma la torre de tamices y se pesa cada uno para obtener peso de producto retenido en cada uno al final.



**Fotografía 6-3:** Peso de cada tamiz  
**Fuente:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Luego a esto se alimentó el producto molido en el tamiz superior y se tamizó de 5 a 10 minutos.



**Fotografía 7-3:** Tamizado del producto  
**Fuente:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Para finalizar el proceso se pesó la masa retenida en cada tamiz, incluyendo los finos, evitando las pérdidas del producto.



**Fotografía 8-3:** Peso de tamiz con muestra  
**Fuente:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

#### 3.2.4.2. Datos obtenidos en el diagnóstico del equipo

##### Datos experimentales de Molienda y Tamizado

Muestra	$m_A$ (g)	$m_B$ (g)	t(min)
Frejol Seco	1000	747,6	1,45

**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Dónde:

$m_A$ = Masa de la muestra de la alimentación (g)

$m_B$ = Masa del producto molido (g)

t= Tiempo de operación (min)

En los datos de tamizado se consideró la luz de malla que va desde 425  $\mu\text{m}$  hasta 38  $\mu\text{m}$ , debido a que la comprobación de los datos para la repotenciación están relacionados con la tesis de diseño y construcción del molino de martillo, en el que se indica que la luz de malla seleccionada para el diseño y granulometría de molienda es de 212  $\mu\text{m}$ , por lo que se consideró dos tamices por encima del diseño y dos por debajo para evidenciar el estado actual del molino (Fernando *et al.*, 2012).

**Tabla 5-3:** Datos experimentales del Tamizado

Apertura de malla ( $\mu\text{m}$ )	$m_R(\text{g})$
425	651,9
300	63,4
212	90,1
150	55,7
106	27,0
53	63,9
38	13,3
Base	0

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Dónde:

$m_R$ = Masa del material retenido en cada tamiz (g)

Se consideró 1000 g de frejol seco ya que en la validación de la tesis de diseño y construcción del molino de martillo, se utiliza la misma cantidad de muestra, pero para un material diferente.

**Tabla 6-3:** Datos adicionales de la Materia Prima

Muestra	$\Theta_i (\text{m})$
Frejol molido	0,008905

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Dónde:

$\Theta_i (\text{m})$ = Diámetro inicial de la muestra de alimentación (m)

Se consideraron los siguientes datos de la potencia del motor y capacidad de diseño en base a la tesis de diseño y construcción de molino ya que estos no pueden o no serán cambiados en la repotenciación (Fernando *et al.*, 2012):

**Tabla 7-3:** Datos adicionales para Molienda y Tamizado

<b>Potencia del Motor (W)</b>	220
<b>Capacidad de diseño (Kg/s)</b>	0,0378

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### 3.2.4.3. Cálculos

#### **Cálculo de la energía requerida para la molienda**

##### ➤ **Cálculo del diámetro promedio del producto en la descarga**

Para determinar el diámetro promedio del producto se utiliza la fórmula que expresa la suma entre el diámetro de tamizado por el que pasan las partículas y el diámetro mínimo que retienen las mismas (McCabe, Smith and Harriott, 2007).

$$d_{tam} = \frac{d_{tam\ max} + d_{tam\ min}}{2}$$

Dónde:

$d_{tam}$  = diámetro aritmético del tamiz ( $\mu\text{m}$ )

$d_{tam\ max}$  = diámetro del tamiz por el que pasan las partículas ( $\mu\text{m}$ )

$d_{tam\ min}$  = diámetro del tamiz en el cual se retiene las partículas ( $\mu\text{m}$ )

Según la bibliografía de McCabe en su libro Operaciones Unitarias en Ingeniería Química el diámetro medio en masa de partículas de la muestra se calcula de la siguiente forma:

$$\bar{d}_w = \sum_{i=1}^N x_i d_{mpi}$$

Dónde:

$\bar{d}_w$  = diámetro medio en masa de partículas de la muestra ( $\mu\text{m}$ )

$X_i$  = fracción másica de las partículas del fragmento

$D_{mpi}$  = diámetro medio de las partículas del fragmento (i) ( $\mu\text{m}$ )

➤ **Cálculo del diámetro final de los granos de frejol**

Realizando el cálculo para cada una de las aberturas de luz de malla:

**Tabla 8-3:** Tabla cálculos diámetro de la molienda

<b>ETAPA: DESCARGA/DESPUES DE LA MOLIENDA</b>				
Apertura de malla ( $\mu\text{m}$ )	Tamaño medio de la partícula ( $d_{mp_i}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Masa retenida(g)	Fracción másica ( $x_i$ )	$X_i^n d_{mp_i}$ ( $\mu\text{m}$ )
<b>425</b>	362,5	651,93	0,6754	<b>244,8326</b>
<b>300</b>	256	63,38	0,065662	<b>16,80941</b>
<b>212</b>	181	90,13	0,093375	<b>16,90083</b>
<b>150</b>	128	55,7	0,057705	<b>7,386273</b>
<b>106</b>	79,5	26,95	0,02792	<b>2,219658</b>
<b>53</b>	45,5	63,9	0,0662	<b>3,012121</b>
<b>38</b>	19	13,26	0,013737	<b>0,26101</b>
$\Sigma$		<b>965,25</b>	<b>1</b>	<b>291,4219</b>

Fuente: Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018

➤ **Cálculo de la constante de Rittinger ( $K_R$ )**

Los datos para los siguientes cálculos son tomados en base al funcionamiento habitual del molino de martillo. No se toma en cuenta las necesidades de molienda de la operación ya que la repotenciación revelará cuales son o que alternativa se puede dar para la mejora del mismo.

El fin de la aplicación de esta ley en los métodos de desintegración mecánica es determinar la eficacia de molienda (Fernando *et al.*, 2012):

$$K_R = \frac{P}{\dot{m} \left[ \left( \frac{1}{\theta_f} \right) - \left( \frac{1}{\theta_i} \right) \right]}$$

Dónde:

$K_R$ = constante de Rittinger ( $m^3/s^2$ )

P = Potencia del motor para la molienda (W)

$\dot{m}$ =Capacidad de diseño para el molino (Kg/s)

$\theta_f$ =diámetro promedio de las partículas en la descarga (m)

$\theta_i$ = diámetro promedio de las partículas en la alimentación (m)

$$K_R = \frac{2200}{0,378 \left[ \left( \frac{1}{0,000425} \right) - \left( \frac{1}{0,00895} \right) \right]}$$

$$K_R = 25,97514$$

### ➤ Cálculo de la constante de Bond ( $K_B$ )

La ley de Bond se calcula para obtener la energía necesaria en la operación de molienda (Fernando *et al.*, 2012) y se utiliza la siguiente formula:

$$K_B = \frac{K_R}{0,5 \theta_i^{0,5}}$$

Dónde:

$K_B$ = constante de Bond ( $m^{5/2}/s^2$ )

$K_R$ = constante de Rittinger ( $m^3/s^2$ )

$\theta_i$ = diámetro promedio de las partículas en la alimentación (m)

$$K_B = \frac{25,97514}{0,5 * 0,00895^{0,5}}$$

$$K_B = 550,5172$$

### ➤ Cálculo de la Energía requerida

Obtenido la constante de Bond se utiliza la siguiente fórmula para obtener la energía requerida por el molino de martillos para desintegrar la materia:

$$E = \frac{K_B}{\sqrt{\theta_f}}$$

Dónde:

E= Energía requerida para la molturación (J/Kg)

$\theta_f$ =diámetro de la partícula después de la desintegración (m)

$$E = \frac{550,5172}{\sqrt{0,000425}}$$

$$E = 26704,01$$

### **Cálculo del grado de desintegración**

El grado de desintegración es el coeficiente de reducción que se obtiene en el molino de martillos máquinas de trituración y se define como la relación entre los tamaños máximos de las partículas a la entrada y salida de la máquina (McCabe, Smith and Harriott, 2007).

$$n = \frac{D_{ma}}{d_{ma}}$$

Dónde:

n= grado de desintegración

$D_{ma}$ = diámetro promedio de las partículas de la alimentación (m)

$d_{ma}$ = diámetro promedio de las partículas de la salida (m)

$$n = \frac{0,008905}{0,000425}$$

$$n = 20,95294$$

### **Cálculo de % de Finos**

No se tienen datos de molido fino, ya que a partir de la luz de malla 212  $\mu\text{m}$ , para la que fue diseñado el molino, no se encuentran pesos relevantes ni de importancia, gracias a que no se completa una granulometría para molienda óptima, ya que como se evidencia, la mayor parte del

peso está retenido en la luz de malla 425  $\mu\text{m}$ , la misma que no se considera como fino ni ultra fino en el rendimiento.

El cálculo del porcentaje de finos se determina mediante la siguiente fórmula propuesta según fuentes bibliográficas donde toman como base la masa retenida en las mallas con abertura menor para la que está diseñada el equipo (Fernando *et al.*, 2012).

$$F = \frac{c}{b} * 100$$

Dónde:

F= Porcentaje de finos (%)

c= Masa de la muestra inicial (g)

b= Masa de finos del tamizado (g)

$$F = \frac{978,69}{0} * 100$$

$$F = 0$$

### **Cálculo del Rendimiento**

#### **➤ Cálculo de la masa del producto neto**

Para determinar el rendimiento de la operación de triturado se calcula en primer lugar la masa del producto neto (Casarin, 2012) con la formula siguiente:

$$M = M_{PB} - M_F$$

Dónde:

M= Masa del producto neto (g)

M<sub>PB</sub>= Masa del producto bruto (g)

M<sub>F</sub>= Masa de finos del tamizado (g)

$$M = 978,69 - 0$$

$$M = 978,69$$

### **Cálculo del rendimiento del molino**

La fórmula que determina el rendimiento de molienda está dada por la relación entre la masa total de producto obtenido en la molienda y la masa total de los tamices, ya que como no existen pesos de finos en la molienda y tamizaje, no se puede utilizar los datos de estas luces de malla y, por ende, no se puede encontrar una eficiencia de molienda.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{978,69}{965,3} * 100$$

#### *3.2.4.4. Resultados:*

En la inspección física inicial realizada al molino de martillos, el estado general del mismo reveló que el equipo genera demasiada polución en la cámara donde se encuentran los martillos que se encargan de la trituración. También se observó que los martillos del molino no se encuentran afilados ni centrados en el eje.



**Fotografía 9-3:** Estado molino de martillo en diagnostico  
Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Muchas de las falencias del equipo se producen por la falta de mantenimiento de todos los componentes, ya que ninguno estuvo engrasado, entre los que presentaron inconsistencias están los rodamientos, los engranajes, los martillos y el eje.



**Fotografía 10-3: Componentes en estado de deterioro**

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Con relación a las condiciones eléctricas, presentó una evidente deficiencia para el molino de martillo, además el equipo no cuenta con una automatización que incluye un medidor de frecuencia, un cronometro y un medidor de amperaje o voltaje con el que funciona el motor del equipo.

A continuación se muestra una tabla que evidencia los resultados obtenido a partir de los cálculos realizados anteriormente, en el mismo se muestra que la energía requerida para desintegrar los granos es de 26704,01 J/Kg, y el grado de desintegración es de 20,95294.

**Tabla 9-3: Resultados de cálculos de diagnóstico de molino de martillos**

E (J/Kg)	N(es adimecional)	% F	% R	t (min)
26704,01	20,95294	0	0	1.45

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Se evidenció que el molino de martillo no cumple con una granulometría óptima, pues no se encuentran pesos relevantes de perdida, ya que no se genera polución por la falta de eficiencia en la molienda.

En el proceso de tamizado, a partir del tamiz de luz de malla 212 no se obtuvo pesos significativos, ya que el material retenido se dio mayormente en la luz de malla 425, por lo tanto no se obtuvo un porcentaje de finos. Y debido a que no existen pesos de finos en la molienda y tamizaje, no se puede encontrar una eficiencia de la molienda.



**Fotografía 11-3:** Producto tamizado  
**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### **3.2.5. Repotenciación del molino de martillo**

Luego de realizar el diagnóstico del molino de martillos y tomando en cuenta todas las fallas que presentó, se realizó la repotenciación mejorando las condiciones de operación del mismo.

Las mejoras que incluyen la repotenciación que se le dio al molino de martillos constan primeramente de la limpieza de todos los componentes del equipo, para eliminar todo rastro de óxido y suciedad.



**Fotografía 12-3:** Limpieza de componentes de equipo  
**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

También se afiló los martillos para aumentar el rendimiento de la operación con respecto a la trituración y obtención de luz de malla.

Se liberó de fricción engrasando los engranajes, el eje, los rodamientos y las bases de los martillos, además se centró el eje que mueve los martillos para que se facilite el proceso de molienda del material.



**Fotografía 13-3:** Engrasado de los componentes del molino de martillos  
**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Se consideró colocar un empaque en la cámara de trituración para evitar que exista polución fuera de la misma, y así lograr mayor hermeticidad sin generación de perdidas mayores en la operación.



**Fotografía 14-3:** Seguro para evitar la polución en cámara de trituración  
**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Por último se colocó un recipiente en la base del tubo justo al diámetro de la base del desemboque del producto para contenerlo sin generar pérdidas en el producto.



**Fotografía 15-3:** Recipiente contenedor del producto  
**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Para comprobar que la repotenciación se ha llevado a cabo de manera correcta se realizó una prueba de laboratorio, siguiendo la misma técnica de laboratorio seguida para el diagnóstico y poder comparar los cambios en el proceso de operación del equipo.

➤ Materia prima

Como en el diagnóstico el equipo se utilizó como sólido de alimentación el frejol y se partió de una cantidad determinada de alimentación como se muestra:

**Tabla 10-3:** Cantidad de alimentación para prueba de repotenciación.

DIAGNÓSTICO	ALIMENTACIÓN	CANTIDAD
PRUEBA	Frejol	1000 g

**Fuente:** Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.  
**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

➤ Materiales de laboratorio

Los equipos y materiales de laboratorio usados en la prueba de repotenciación se muestran a continuación:

**Tabla 11-3:** Materiales y equipos utilizados en la repotenciación

MATERIAL/EQUIPO	CANTIDAD
<b>Molino de martillos</b>	1
<b>Torre de tamices</b>	1
<b>Balanza técnica</b>	1
<b>Calibrador</b>	1

**Fuente:** Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### 3.2.5.1. Descripción del procedimiento

En la prueba para comprobar la repotenciación del equipo se realizó una prueba de laboratorio utilizando el mismo grano y en la misma cantidad siguiendo los mismos pasos:



**Fotografía 16-3:** Molino de martillos repotenciado.  
**Fuente:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Se pesó 1000 g de frejol seco, peso utilizado en la prueba de diagnóstico.



**Fotografía 17-3:** Peso de la muestra para prueba de molino repotenciado  
**Fuente:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Se procedió a realizar una limpieza del equipo antes de realizar la operación y se encendió el motor.
- Se colocó la muestra en la tolva de abastecimiento por separado y a una velocidad mínima se alimentó el frejol para evitar la obstrucción de los martillos.
- Se procedió a cronometrar el tiempo de operación, desde que ingresa la materia prima hasta que salgan todas las partículas del producto.
- Antes de apagar el equipo se esperó un minuto hasta que todo el producto se descargue de la cámara.
- Al finalizar la operación se apaga el equipo y se extrajo el producto molido junto con el recipiente de descarga y se pesó el producto obtenido.



**Fotografía 18-3:** Producto obtenido luego de molienda repotenciada  
Fuente: María Fernanda Gutiérrez, 2018

- Para el tamizado se toma la torre de tamices y se pesa cada uno para obtener peso de producto retenido en cada uno al final.



**Fotografía 19-3:** Peso de cada tamiz molino repotenciado  
Fuente: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Luego a esto se alimentó el producto molido en el tamiz superior y se tamizó de 5 a 10 minutos.



**Fotografía 20-3:** Tamizado del producto molino repotenciado  
**Fuente:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

- Para finalizar el proceso se pesó la masa retenida en cada tamiz, incluyendo los finos, evitando las pérdidas del producto.



**Fotografía 21-3:** Peso de tamiz con muestra molino repotenciado  
**Fuente:** María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### 3.2.5.2. Datos obtenidos en la repotenciación

**Tabla 12-3:** Datos experimentales de Molienda y Tamizado en molino repotenciado

Muestra	$m_A$ (g)	$m_B$ (g)	t(min)
Frejol Seco	1000	747,6	2,49

Fuente: Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Dónde:

$m_A$ = Masa de la muestra de la alimentación (g)

$m_B$ = Masa del producto molido (g)

t= Tiempo de operación (min)

**Tabla 13-3:** Datos experimentales del Tamizado en molino repotenciado

Apertura de malla ( $\mu\text{m}$ )	$m_R$ (g)
425	136,1
300	66,9
212	59,7
150	50,5
106	121,0
53	219,4
38	15,4
Base	0,0

Fuente: Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Dónde:

$m_R$ = Masa del material retenido en cada tamiz (g)

**Tabla 14-3:** Datos adicionales de la Materia Prima

Muestra	$\Theta_i$ (m)
Frejol molido	0,008905

Fuente: Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Dónde:

$\Theta_i$  (m)= Diámetro inicial de la muestra de alimentación (m)

**Tabla 15-3:** Datos adicionales para Molienda y Tamizado

Potencia del Motor (W)	220
Capacidad de diseño (Kg/s)	0,0378

Fuente: Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### 3.2.5.3. Cálculos

Para los cálculos de la parte repotenciada se utilizaron las mismas fórmulas de la prueba de molienda en la repotenciación para su debida comparación.

#### Cálculo de la energía requerida para la molienda

- Cálculo del diámetro promedio del producto en la descarga

$$d_{tam} = \frac{d_{tam\ max} + d_{tam\ min}}{2}$$

Dónde:

$d_{tam}$ =diámetro aritmético del tamiz ( $\mu\text{m}$ )

$d_{tam\ max}$ =diámetro del tamiz por el que pasan las partículas ( $\mu\text{m}$ )

$d_{tam\ min}$ =diámetro del tamiz en el cual se retiene las partículas ( $\mu\text{m}$ )

$$\bar{d}_w = \sum_{i=1}^N x_i d_{mpi}$$

Dónde:

$\bar{d}_w$ =diámetro medio en masa de partículas de la muestra ( $\mu\text{m}$ )

$X_i$ =fracción másica de las partículas del fragmento

$D_{mpi}$ =diámetro medio de las partículas del fragmento (i) ( $\mu\text{m}$ )

➤ **Cálculo del diámetro final de los granos de frejol**

**Tabla 16-3:** Tabla cálculos diámetro de la molienda repotenciado

<b>ETAPA: DESCARGA/DESPUES DE LA MOLIENDA</b>				
Apertura de malla (μm)	Tamaño medio de la partícula (dmp <sub>i</sub> ) (μm)	Masa retenida(g)	Fracción másica (x <sub>i</sub> )	X <sub>i</sub> <sup>n</sup> dmp <sub>i</sub> (μm)
<b>425</b>	362,5	136,1	0,203	<b>73,74</b>
<b>300</b>	256	66,9	0,10	<b>25,6</b>
<b>212</b>	181	59,7	0,089	<b>16,15</b>
<b>150</b>	128	50,5	0,075	<b>9,66</b>
<b>106</b>	79,5	121,0	0,180	<b>14,37</b>
<b>53</b>	45,5	219,4	0,327	<b>14,92</b>
<b>38</b>	19	15,4	0,023	<b>0,43</b>
	Σ	<b>669</b>	<b>1</b>	<b>154,89</b>

Fuente: Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018

➤ **Cálculo de la constante de Rittinger (K<sub>R</sub>)**

$$K_R = \frac{P}{\dot{m} \left[ \left( \frac{1}{\theta_f} \right) - \left( \frac{1}{\theta_i} \right) \right]}$$

Dónde:

K<sub>R</sub>= constante de Rittinger (m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>)

P = Potencia del motor para la molienda (W)

ṁ=Capacidad de diseño para el molino (Kg/s)

θ<sub>f</sub>=diámetro promedio de las partículas en la descarga (m)

θ<sub>i</sub>= diámetro promedio de las partículas en la alimentación (m)

$$K_R = \frac{2200}{0,378 \left[ \left( \frac{1}{0,000053} \right) - \left( \frac{1}{0,00895} \right) \right]}$$

$$K_R = 3,10$$

➤ **Cálculo de la constante de Bond ( $K_B$ )**

$$K_B = \frac{K_R}{0,5 \theta_i^{0,5}}$$

Dónde:

$K_B$ = constante de Bond ( $m^{5/2}/s^2$ )

$K_R$ = constante de Rittinger ( $m^3/s^2$ )

$\theta_i$ = diámetro promedio de las partículas en la alimentación (m)

$$K_B = \frac{3,10}{0,5 * 0,00895^{0,5}}$$

$$K_B = 65,7676$$

➤ **Cálculo de la Energía requerida**

$$E = \frac{K_B}{\sqrt{\theta_f}}$$

Dónde:

$E$ = Energía requerida para la molturación (J/Kg)

$\theta_f$ =diámetro de la partícula después de la desintegración (m)

$$E = \frac{65,76764681}{\sqrt{0,000053}}$$

$$E = 9033,88$$

**Cálculo del grado de desintegración**

$$n = \frac{D_{ma}}{d_{ma}}$$

Dónde:

$n$ = grado de desintegración

$D_{ma}$ = diámetro promedio de las partículas de la alimentación (m)

$d_{ma}$ = diámetro promedio de las partículas de la salida (m)

$$n = \frac{0,008905}{0,000053}$$

$$n = 168,018$$

### **Cálculo de % de Finos**

$$F = \frac{c}{b} * 100$$

Dónde:

$F$ = Porcentaje de finos (%)

$c$ = Masa de la muestra inicial (g)

$b$ = Masa de finos del tamizado (g)

$$F = \frac{15,4}{747,6} * 100$$

$$F = 2,059$$

### **Cálculo del Rendimiento**

#### **➤ Cálculo de la masa del producto neto**

$$M = M_{PB} - M_F$$

Dónde:

$M$ = Masa del producto neto (g)

$M_{PB}$ = Masa del producto bruto (g)

$M_F$ = Masa de finos del tamizado (g)

$$M = 747,6 - 15,4$$

$$M = 732,2$$

➤ **Cálculo del rendimiento del molino**

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{732,2}{747,6} * 100$$

$$\% \text{ Rendimiento} = 97,94\%$$

3.2.5.4. *Resultados de repotenciación*

El molino de martillos reveló que luego de la oportuna repotenciación aplicada con la limpieza de todos los componentes, la alineación del eje, afilado de los martillos, etc. Se obtuvo una mayor eficiencia en la operación de molienda y tamizado. Lo que corrobora esta afirmación se muestra en la siguiente tabla donde el grado de desintegración es mayor (168,018) con respecto a la prueba antes de la repotenciación y el rendimiento general del equipo es de 97,94%. Comparando con la prueba de diagnóstico realizada anteriormente, se pudo obtener un rendimiento adecuado para la molienda, ya que antes no se obtuvo un % de finos para la obtención de una eficiencia.

**Tabla 17-3:** Resultados de repotenciación del molino de martillos

E (J/Kg)	n	% F	% R	t (min)
<b>9033,88</b>	168,018	2,05	97,94	2,49

**Fuente:** Laboratorio de Procesos Industriales, ESPOCH.

**Realizado por:** María Fernanda Gutiérrez, 2018

Gracias a la mejora en el equipo, se generó mayor polución por la finura de molienda del grano utilizado y por ende se evidenció mejoras con respecto a la luz de malla para la que fue diseñado el equipo en primera instancia (212 µm), ya que en ésta se retuvo la mayor cantidad de producto.



**Fotografía 22-3:** Producto molido luego de repotenciación  
Fuente: María Fernanda Gutiérrez, 2018

### 3.2.6. *Automatización del molino de martillos*

En la inspección física inicial que se le dio al molino de martillos se observó que no existe una automatización del mismo. Se realizaron los cálculos necesarios para determinar en base al balance de masa del proceso que se da en la trituration del material utilizado.

#### 3.2.6.1. *Cálculos de automatización*

##### **Obtención de $\tau$ en el proceso**

En el estado dinámico se representa de esta forma:

$$E - S = A$$
$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = \dot{m}_a$$

Dónde:

$\dot{m}_e$  = Flujo másico de entrada en estado dinámico

$\dot{m}_s$  = Flujo másico de salida en estado dinámico

En el estado estacionario se representa de la siguiente manera:

$$\bar{m}_e - \bar{m}_s = 0$$

Dónde:

$\bar{m}_e$  = Flujo másico de entrada en estado estacionario

$\bar{m}_s$  = Flujo másico de salida en estado estacionario

$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = \dot{m}_a \qquad \dot{m}_a = A\rho \frac{dH}{dt}$$

Al linealizar ambos términos:

$$\dot{m}_e(t) - \dot{m}_s(t) = A\rho \frac{dH(t)}{dt}$$

Igualando

$$M_e(t) - M_s(t) = A\rho \frac{dH(t)}{dt}$$

Se toma en cuenta que el tau es igual a la relación de una constante y una constante igual:

$$\tau = \frac{\text{cte}}{\text{cte igual}}$$

$$\frac{M_e(t)}{A\rho} - \frac{M_s(t)}{A\rho} = \frac{A\rho}{A\rho} \frac{dH(t)}{dt}$$

$$K = \frac{1}{A\rho}$$

Reemplazando:

$$K M_e(t) - K M_s(t) = \tau \frac{dH(t)}{dt}$$

Aplicando la derivada y la transformada de Laplace:

$$K M_e(s) - K M_s(s) = \tau_s + s H_s$$

$$\tau_s = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

$$K(M_e(s) - M_s(s)) = (\tau_s + 1) H(s)$$

$$\frac{H(s)}{M_e(s)} = \frac{K}{\tau_s + 1} \quad ; \quad \frac{H(s)}{H_s(s)} = \frac{K}{\tau_s + 1}$$

$$\frac{H(s)}{M_e(s)} = \frac{K}{\tau_s + 1}$$

$$K = \frac{1}{A\rho}$$

Se calcula primeramente el área para obtener el valor de la constante, considerando un cilindro la cámara de trituración, el área se calcula mediante la siguiente formula:

$$A = 2\pi rh + 2\pi r^2$$

Datos:

$$\emptyset \text{ cámara} = 0,3 \text{ m}$$

$$h \text{ cámara} = 0,205 \text{ m}$$

$$\rho_{\text{frijol}} = 850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$A = 2\pi(0,15 \text{ m})(0,205 \text{ m}) + 2\pi(0,15 \text{ m})^2$$

$$A = 0,3345 \text{ m}^2$$

$$K = \frac{1}{0,3345 \text{ m}^2 \times 850 \text{ Kg}}$$

$$K = 3,52 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{Kg}}$$

Obtenido el valor de la constante se reemplaza en el despeje del  $\tau$ :

$$\tau_s + 1 = \frac{K(M_e(s))}{H(s)}$$

$$\tau_s = \frac{K(M_e(s))}{H(s)} - 1$$

$$\tau = \frac{3,52 \times 10^{-3} \frac{m}{Kg} \times 1Kg}{0,205 m(s)} - 1$$

$$\tau = -0,983 \text{ seg}$$

### 3.2.6.2. Resultados de automatización

El análisis de la automatización revela que el tau obtenido es muy bajo para realizar una automatización completa con respecto a los sensores de la alimentación, pues el equipo es utilizado mayormente en prácticas de laboratorio donde la alimentación no supera los 1000 g.

Además la automatización efectiva del equipo sugiere la implementación de un sensor para la alimentación automática del producto en la tolva, pero el tiempo de operación con el que se trabaja en cada práctica no es significativo, por ende, no se considera factible la puesta de ese componente para realizar una automatización completa. Por el contrario se ha predispuesto la colocación de un temporizador, tres luces pilotos, un lector digital del voltaje y amperaje, pulsadores de prendido y apagado y un botón de paro de emergencia.



**Fotografía 23-3:** Automatización del molino de martillos  
Fuente: María Fernanda Gutiérrez, 2018

## Funcionamiento del control automatico del molino de martillos

El control automático implementado en el molino de martillo funciona en base al proceso de operación del temporizador y el motor, para reflejar en el panel del control los datos obtenidos en el funcionamiento.

Los componentes utilizados en la mejora del equipo con respecto al control automático del proceso se describen brevemente a continuación:

### ➤ Fusible

El fusible es un dispositivo que tiene como parte un soporte adecuado y una lámina de metal con un punto de fusión bajo, que se intercala en un punto de la instalación eléctrica realizada en el equipo para fundirse cuando supere la intensidad de corriente, misma que puede afectar el funcionamiento de los conductores de la instalación del molino, que puede llevar a la incineración o daño de otros elementos. Dentro de la presente investigación se optó por utilizar un fusible de tipo cartucho dentro del cual se encuentra un conductor intercambiable asegurando la capacidad requerida para el equipo, además este tipo de fusible cuenta con un hilo de cobre que se rompe cuando exista cambios de voltaje en los conductores asegurando al equipo contra posibles danos eléctricos.



**Figura 4-3:** Fusible y su simbología

**Fuente:** <http://www.ferreteriaelpalo.es/familias/material-electrico-2?pagina=12&vista=cuadrícula&orden=2>

### ➤ Luz piloto

El fin de la luz piloto es controlar el buen funcionamiento del molino de martillos, se tomó en cuenta tres luces piloto una verde para avisar que está encendido el equipo, amarillo si el proceso está realizándose y el rojo si existe un paro de emergencia. Por ello la luz piloto instalada en la

repotenciación son de tipo led con un voltaje de operación de 220 V dentro del circuito cerrado del tablero de control eléctrico.



**Figura 5-3:** Luces piloto y su simbología  
Fuente: <http://www.reensa.com/productos-y-marcas>

### ➤ Pulsador

Para el equipo se dispuso colocar un pulsador que contenga uno de paro y uno de marcha, para permitir el paso de la corriente eléctrica y así mismo interrumpirlo cuando lo requiera. Básicamente un interruptor es un operador eléctrico, que abre o cierra un circuito según la necesidad. El pulsador implementado en la repotenciación es de acción momentánea con un voltaje de 220 V, una resistencia al contacto de 50 ohmios y un tipo de contactos 1NO + 1NC obedeciendo el encendido y apagado en cada contacto respectivamente.



**Figura 6-3:** Pulsador on/off y su simbología  
Fuente: <http://www.reensa.com/productos-y-marcas>

### ➤ Paro de emergencia

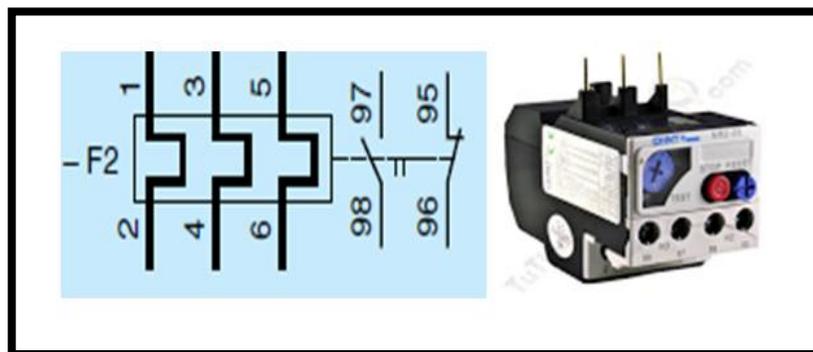
El botón de paro de emergencia se considera ya que según la norma ISO, el objetivo de poner el botón mencionado es para prevenir situaciones de peligro que puedan afectar a los operadores en cierto proceso, además de evitar daños en el equipo.



**Figura 7-3:** Botón de paro de emergencia y su simbología  
Fuente: <http://www.reensa.com/productos-y-marcas>

➤ **Contactos principales y auxiliares del relé térmico**

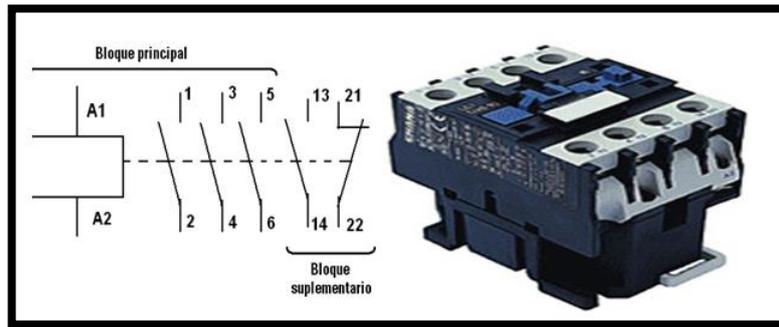
El objetivo de los relés térmicos es la protección de los motores contra las sobrecargas débiles y prolongadas. Se los puede usar en corriente alterna o continua y garantiza que existe una optimización y mayor durabilidad del motor, también evita las paradas imprevistos y garantiza volver a arrancar con rapidez y con condiciones de seguridad adecuadas.



**Figura 8-3:** Relé térmico y su simbología  
Fuente: <http://www.reensa.com/productos-y-marcas>

➤ **Bobina y contactos principales, auxiliares del contactor**

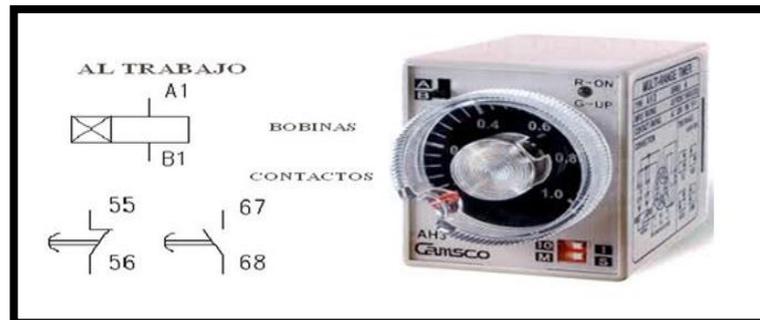
Los contactores establecen o interrumpen el paso de la corriente eléctrica, apenas se empieza a dar tensión a la bobina.



**Figura 9-3:** Bobina y su simbología  
Fuente: <http://www.reensa.com/productos-y-marcas>

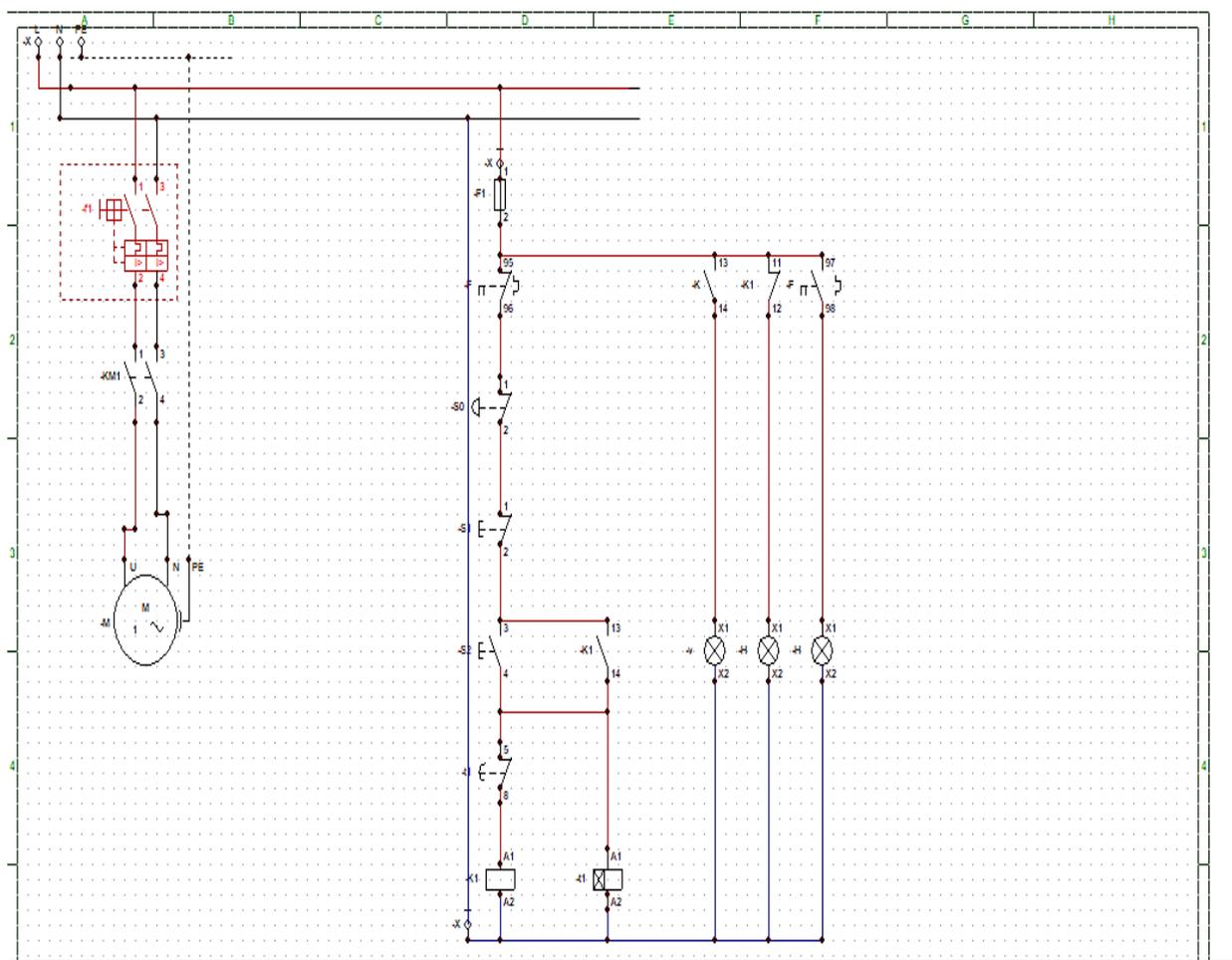
➤ **Bobina y contactos del temporizador**

El temporizador es un dispositivo que se puede programar para medir un tiempo determinado. Los primeros temporizadores de la historia fueron los relojes de arena, que luego fueron reemplazados por relojes convencionales y dispositivos electrónicos. Al llegar al tiempo programado se hace saltar una alarma en modo de aviso para saber cuándo haya acabado el tiempo.



**Figura 10-3:** Temporizador y su simbología  
Fuente: <http://www.reensa.com/productos-y-marcas>

Si se observa la ilustración 1-3, se puede tener una idea del funcionamiento de la parte del control automático, pues al alimentar el circuito, la corriente va a circular comenzado por el f1 fusible en serie con el contacto auxiliar del relé térmico F1, pulsador de emergencia S0, pulsador de paro S1 que están conectados en serie. No terminara su recorrido mientras no se pulse el pulsador de marcha S2.



30, Y=330 (131) 3

**Figura 11-3:** Diagrama de control automático on delay y off delay

Fuente: Programa CADe SIMU, 2018.

Al pulsar S2 (3-4) se energizará, auto sosteniéndose con contacto auxiliar del contactor K1 (13-14) y al mismo tiempo alimenta la bobina de temporizador T1 (A1-A2) y su contacto de activación cerrado T1 (5-8) alimentara la bobina del contactor K1 (A1-A2) y se alimenta también la luz piloto verde que es señal de funcionamiento del molino.

Si se llega a presionar el pulsador de paro S1 (1-2) se desconectara todos los contactos del temporizador y contactor, dando señal por la luz piloto de color amarillo que el circuito está apagado, pero el circuito quedará listo para otra activación por el pulsador de marcha S2 (3-4) porque solo se interrumpió el paso de corriente pero S1 volverá a su misma posición para seguir maniobrando. Si se pulsa el paro de emergencia S0 (1-2) desconectaremos todo los contactos todo el sistema y quedando abierto para que no se puede volver a energizar.

Si ocurre una sobre carga o un circuito en el motor del equipo el contacto de relé térmico sentirá la anomalía y se abrirá permitiendo que interrumpir el paso de corriente a los demás elementos quedando la luz piloto roja encendida en señal de que hubo un problema en el motor.

### 3.3 Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria

La tecnología requerida en la repotenciación y automatización del molino de martillos se obtuvo luego de la inspección física inicial y la primera practica de laboratorio de diagnóstico explicada anteriormente y lo utilizado para la mejora del equipo se muestra en las siguientes tablas:

#### 3.3.1. Requerimientos para la repotenciación del molino de martillos.

**Tabla 18-3:** Requerimientos para la repotenciación del molino de martillos.

<b>SISTEMA / COMPONENTE</b>	<b>TECNOLOGÍA/EQUIPO /MAQUINARIA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Eje de los martillos</b>	Engrasado	Para el mantenimiento de los diferentes componentes que forma parte del molino de martillo, se realizó un engrasado de cada uno con el engrasador WD-40.
<b>Cuchillas del martillo</b>	Afilado	El afilado de las cuchillas se realizó con ayuda de un esmeril cuando se realizó el desmontaje del equipo.
<b>Evitar polución</b>	Recubrimiento de cámara de triturado	Para evitar la polución dentro de la cámara de trituración se colocó un empaque de caucho para evitar pérdidas de producto en la operación
<b>Retención del producto</b>	Recipiente de acero	Se realizó un recipiente cilíndrico acorde al diámetro de la boca de salida del producto para contener el mismo y evitar pérdidas con respecto a su recepción.

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### 3.3.2. Requerimientos para la automatización del molino de martillos

**Tabla 19-3:** Requerimientos para la automatización del molino de martillos

<b>SISTEMA / COMPONENTE</b>	<b>TECNOLOGÍA/EQUIP O/MAQUINARIA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Control de tiempo</b>	Cronómetro	
<b>Encendido/apagado</b>	Pulsador encendido/parado	Se dispuso colocar un pulsador que contenga uno de paro y uno de marcha, para permitir el paso de la corriente eléctrica y así mismo interrumpirlo cuando lo requiera.
<b>Lector digital de operación del equipo</b>	Pantalla digital	La pantalla refleja los valores de voltaje amperios y frecuencia.
<b>Paro de emergencia</b>	Botón de paro de emergencia	El objetivo de poner el botón mencionado es para prevenir situaciones de peligro que puedan afectar a los operadores en cierto proceso, además de evitar daños en el equipo.
<b>Indicadores de operación</b>	Luces piloto	Son tres luces de color rojo, verde y amarillo para tener la idea del estado funcional del equipo.

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

## 3.4 Análisis de Costo/beneficio del proyecto

### 3.4.1. Presupuesto

A continuación se muestra los costos debidamente especificados de los componentes utilizados en la repotenciación y automatización del molino de martillo:

**Tabla 20-3: Costos para la repotenciación del molino de martillos.**

<b>COSTOS PARA LA REPOTENCIACIÓN DEL MOLINO DE MARTILLOS</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>MATERIALES</b>			
Engrasador WD-40	1	\$7,50	\$7,50
Plancha de acero	1	\$20,00	\$20,00
Saca oxido W20	1	\$8,00	\$8,00
<b>Subtotal</b>			<b>\$35,50</b>
<b>MANO DE OBRA</b>			
Afilado de cuchillas y rectificación del eje	1	\$20,00	\$20,00
Contenedor para producto	1	\$40,00	\$40,00
Mantenimiento y montaje-desmontaje	1	\$120,00	\$120,00
<b>Subtotal</b>			<b>\$180,00</b>
<b>TOTAL</b>			<b>\$215,50</b>

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

Para el costo de la automatización se tomó en cuenta todos los materiales y la mano de obra utilizado en la misma, como se detalla a continuación:

**Tabla 21-3: Costos de materia prima e insumos**

<b>COSTOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL MOLINO DE MARTILLOS</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>MATERIALES</b>			
Contactador	1	\$50,00	\$50,00
Relé térmico	1	\$40,00	\$40,00
Pulsador de paro	1	\$5,00	\$5,00
Pulsador de marcha	1	\$5,00	\$5,00
Pulsador de emergencia	1	\$3,00	\$3,00
Porta fusible	1	\$10,00	\$10,00
Fusible	1	\$2,50	\$2,50
Temporizador	1	\$30,00	\$30,00

Base de temporizador	1	\$10,00	\$10,00
Riel dic	1	\$5,00	\$5,00
Pantalla de medida de voltaje, amperios y frecuencia.	1	\$190,00	\$190,00
Cable #22	1	\$5,00	\$5,00
Cable #10	1	\$3,00	\$3,00
Enchufe	1	\$4,50	\$4,50
Tornillos	1	\$2,00	\$2,00
Borneras	1	\$10,00	\$10,00
Breque de un polo	1	\$8,00	\$8,00
Tairas bases adhesivas	1	\$5,00	\$5,00
Caja	1	\$50,00	\$50,00
<b>Subtotal</b>			<b>\$438,00</b>
<b>MANO DE OBRA</b>			
Mano de obra	1	\$200	\$200
<b>Subtotal</b>			<b>\$200</b>
<b>TOTAL</b>			<b>\$638,00</b>

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

El costo total invertido en la realización de este proyecto de titulación se ilustra en la siguiente tabla, la misma que indica que el costo total de inversión es de \$853,50:

**Tabla 22-3:** Costo total de proyecto

COSTOS TOTAL DE REPOTENCIACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DEL MOLINO DE MARTILLOS	
DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL
Repotenciación	\$215,50
Automatización	\$638,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$853,50</b>

Realizado por: María Fernanda Gutiérrez, 2018.

### ***3.4.2. Análisis costo-beneficio***

En cuestión de costos revela que la repotenciación y la automatización realizada en este trabajo de titulación dieron un valor de \$853,50, demostrando que a pesar que los molinos de martillo para granos comerciales rodean entre los \$500,00-\$600,00 estos no son automatizados y por ende la automatización completa no es factible realizar, porque generaría gastos elevados a comparación de los molinos dichos anteriormente. Si la automatización realizada en el equipo salió en \$638,00, el aumento del sensor de la alimentación y la tolva saldría en un valor mucho mayor, además que se necesitaría calibrar el sensor en base a la luz de malla del tamiz contenida en el equipo para obtener una ganancia y una respuesta automática en el sistema.

### 3.5 Cronograma de ejecución del proyecto.

Las actividades realizadas en la ejecución y elaboración del proyecto están descritas en el siguiente cronograma que está dividido en varios meses desde la recopilación de información hasta la culminación del proyecto.

ACTIVIDAD	TIEMPO																							
	1° mes				2° mes				3° mes				4° mes				5° mes				6° mes			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión bibliográfica	█																							
Elaboración anteproyecto	█																							
Presentación y aprobación anteproyecto		█	█																					
Diagnóstico del molino de martillos				█																				
Repotenciación del molino de martillos					█	█																		
Prueba de la repotenciación del molino de martillos							█																	
Automatización del molino de martillos								█	█	█	█													
Prueba de Validación del equipo automatizado												█	█											
Elaboración de borrador de tesis														█	█	█								
Corrección borrador de tesis																	█	█						
Tipiado del trabajo final																				█	█	█		
Empastado y presentación del trabajo final																					█			
Auditoría académica																							█	
Defensa del trabajo																								█

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El molino de martillos que se encuentra en el laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), presentaba problemas a nivel de operación y por ende una eficiencia baja en la trituración del material.

Tomando en cuenta los antecedentes de baja eficiencia de operación en prácticas anteriores realizadas a nivel estudiantil se realizó primero una inspección física inicial y una prueba para determinar el diagnóstico del molino, siguiendo una técnica propuesta por los autores del diseño y construcción del molino de martillos del cual se basó la realización de este trabajo de titulación y el mismo que fue revisado y aprobado por el encargado de dicho laboratorio. El grano utilizado para las pruebas del equipo fue el frejol ya que con respecto a otros granos es más duro y su forma es más simétrica, por ende si la repotenciación funciona con este grano, funciona con mayor efectividad en otros materiales más suaves.

La inspección física inicial al molino de martillos reveló que la falta de mantenimiento en el equipo desde la construcción ha repercutido de manera importante en el funcionamiento y rendimiento del mismo, afirmación que se corrobora en la primera práctica realizada para el diagnóstico. Para la obtención de datos de la prueba realizada en el diagnóstico del molino de martillos, se empezó con la toma del diámetro de un promedio de granos y se pesó 1000 gr para utilizar en la alimentación de la operación de molienda, ya que este peso fue el utilizado por los autores del diseño y construcción para validar el equipo. Seguido a esto se encendió el molino y se ingresó el grano a la tolva de alimentación abriendo de a poco la compuerta para evitar que el eje se atore con una sobrealimentación. A penas se empezó con la alimentación en la cámara de trituración se cronometró el tiempo que se tardó en triturar todo el grano, dando un minuto adicional para que salga todo el producto. Se pesó el producto molido y se ingresó a una torre de tamiz con abertura que va desde 425  $\mu\text{m}$  hasta 38  $\mu\text{m}$ , se tamizó por 5-10 minutos y finalmente se pesó el producto retenido en cada tamiz.

Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el rendimiento de la operación de molienda, para lo cual se toma en cuenta el porcentaje de finos obtenidos en la operación. La prueba realizada en el diagnóstico del molino reveló que no existe un porcentaje de finos ya que a partir de la luz de malla 212  $\mu\text{m}$  no hubo el paso significativo del producto y por ende no se pudo obtener una eficiencia de molienda, pues todo el producto molido se retuvo mayormente en la primera luz de malla de la torre de tamices.

Con los resultados del diagnóstico y la inspección física inicial del equipo se pudo identificar sus fallencias y analizar la mejor manera para la repotenciación del mismo, pues presentaba fugas en la

cámara de trituración donde se producía polución y por ende pérdidas en el proceso, además el eje central de las cuchillas estaba desalineado y se presentaron inconsistencias en los rodamientos, los engranajes, los martillos y el eje por no estar engrasados. Con relación a las condiciones eléctricas, presentó una evidente deficiencia y se evidenció que el equipo no cuenta con una automatización adecuada.

Para la repotenciación del equipo se desmontó todas las piezas del equipo y se realizó una limpieza exhaustiva del óxido contenido en las piezas encargadas de toda la operación, luego se alineó el eje principal de los molinos y se afilo las cuchillas en un esmeril para obtener mejores resultados. Además se dispuso colocar un empaque en las uniones de la cámara de trituración para evitar las pérdidas producidas por la fuga de la polución generada por el material en la trituración. Finalmente para el montaje del equipo se engrasó todos los componentes contenidos en el equipo.

Realizada la repotenciación se hizo nuevamente una práctica en el laboratorio de Procesos Industriales siguiendo los mismos pasos realizados en la primera prueba para el diagnóstico del equipo, la misma que reveló que la repotenciación realizada fue efectiva. Los resultados obtenidos en los cálculos realizados en la segunda prueba con el equipo repotenciado revela que la eficiencia mejora notablemente, pues se obtuvo que la energía requerida para la trituración es de 9033,88 J/Kg y el rendimiento general de la operación es de 97,94%, pues la repotenciación evita que exista pérdidas por la polución generada en la molienda, además el eje ya centrado y las cuchillas afiladas, mejoran considerablemente la eficiencia con respecto a la primera prueba realizada anteriormente.

Al comprobar que la repotenciación fue adecuada para mejorar la eficiencia de la operación en el equipo, se procedió a la automatización, para ello se realizaron los cálculos correspondientes que revelan un  $\tau = -0,983$  seg, puesto que el valor no puede ser negativo se evidencia que al no contar con un sensor que controle la alimentación, no se puede obtener una ganancia efectiva en la operación.

Sin embargo la automatización realizada en el equipo incluye la adaptación de un temporizador, un pulsador de encendido y apagado, tres luces piloto para conocer el estado de funcionamiento del equipo y una pantalla que revela la frecuencia, amperaje y voltaje durante el proceso de molienda. La decisión de no adicionar un sensor en la tolva de alimentación y que controle la luz de malla para garantizar una operación totalmente independiente, es porque el funcionamiento del equipo es mayormente para el ámbito estudiantil con operaciones que no superan los 10 minutos, con una alimentación pequeña y con granos no tan duros. Además que el costo de implementación de la

automatización supera los \$600,00, no sería factible invertir en estos componentes para el uso no tan extenso que se le da al molino de martillos.

Los costos totales de la repotenciación y automatización implementada en el molino de martillos fue de \$853,50, valor que si se compara con molinos de granos comerciales es alto, se debe considerar que el molino de este trabajo de titulación cuenta con una luz de malla conocida dentro de su estructura y está parcialmente automatizado, además el uso que se le da es muy variado en el sector de la aplicación práctica de la parte teórica obtenida de las aulas de la ESPOCH.

## CONCLUSIONES

- El diagnóstico del molino de martillos se realizó en primer lugar con ayuda de una inspección física inicial y una práctica de laboratorio propuesta por los autores del diseño y construcción del equipo, la misma que reveló que no es posible calcular una eficiencia de la operación ya que no existió un porcentaje de finos, los mismos que se consideran por debajo de la luz de malla 212  $\mu\text{m}$ , ya que ésta es la luz de malla para la que fue diseñada el equipo, pues la mayor cantidad del producto se retuvo en la malla 425 $\mu\text{m}$ , además se observó que el equipo no contaba con el debido mantenimiento en sus componente y el eje de las cuchillas no estaba centrado, igualmente se determinó fugas de material por las uniones de la cámara de triturado y por último se evidencio que las instalaciones eléctricas eran deficientes.
- Para identificar las alternativas adecuadas en la repotenciación del molino de martillos, se basó en los resultados del diagnóstico inicial que se realizó en base al diseño del mismo, pues se debió mejorar y reemplazar las conexiones eléctricas, también se dio mantenimiento en todos los componentes del equipo y corregir ciertos desperfectos aplicando el desmontaje, limpieza y afilado de las cuchillas, limpieza también de los demás componentes como engranajes y eje y considerar la automatización del mismo de acuerdo a las necesidades para las cuales es utilizado el molino de martillos. Adicional a esto se sumó a la repotenciación un recipiente acorde a la boca de salida del producto del equipo para la recolección del mismo.
- La repotenciación aplicada en el molino de martillo fue elegida de acuerdo a las falencias descubiertas en la prueba de diagnóstico, tomando en cuenta la viabilidad en la mejora del equipo y también la viabilidad económica, pues la repotenciación tuvo un costo de \$215,50, valor no muy alto si se compara con el costo de un molino de martillos comercial utilizado para granos que varía entre los \$500 y \$600, sin automatización y sin una luz de malla conocida. Con respecto a la automatización se concluye que luego de realizar los cálculos correspondientes, es necesario adicionar a la automatización implementada un sensor que controle la alimentación desde la tolva y se designe su funcionamiento con respecto a la luz de malla para la cual fue diseñado, aun así se determinó que no es factible tanto de forma técnica como económica, pues el equipo es utilizado básicamente para pruebas aplicadas al ámbito estudiantil donde la alimentación no es considerable y el tiempo no supera los 10 min de operación. El costo de la automatización realizada en el molino de martillos asciende los \$653,50 y si se decidía implementar el sensor para la tolva el costo sería mayor y por ende tampoco factible en este sentido. La automatización

realizada incluye un cronometro, tres luces piloto que muestran el estado actual de operación del equipo, también un pulsador de encendido y apagado, un botón de paro de emergencia y una pantalla que muestra la frecuencia, amperaje y voltaje del motor durante el proceso.

- La validación del molino de martillos se realizó luego de las mejoras aplicadas en el mismo y se realizó en base a la misma técnica de laboratorio utilizada en la primera prueba de diagnóstico del equipo. A diferencia de los resultados del diagnóstico realizado en primera instancia, al implementarse las consideraciones para el mismo se obtuvo resultados muy favorables, ya que actualmente la eficiencia de la operación de molienda con granos de frejol es de 97,94%, ya que no existen pérdidas de producto por polución generada dentro de la cámara, y el grado de desintegración es mayor (168,018) con respecto al estado inicial del equipo (20,95294).

## **RECOMENDACIONES**

- Realizar mantenimientos periódicos de acuerdo a la necesidad y uso del molino de martillos para evitar los daños causados por este factor.
- Leer el manual de funcionamiento del equipo antes de utilizar o dejar que el responsable del laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, donde se encuentra el equipo, sea el encargado de su manejo.
- Antes y después de la utilización del molino de martillos es recomendable realizar una limpieza en las partes del equipo para evitar cálculos erróneos en la práctica.
- Dejar entrar los granos en la alimentación por partes pequeñas para evitar el atascamiento del eje al momento de la operación.

## BIBLIOGRAFIA

**Acosta, G. M. & López, L. A.** *Diseño, construcción y automatización de un molino y mezcladora para el producto ferti producción de la empresa Tecni Organic.* [en línea]. Quito-Ecuador. ESPE, 2013, [Consulta: 3 Mayo 2018]. Disponible en: [http://www.academia.edu/10170391/Calculo\\_de\\_potencia\\_de\\_un\\_molino](http://www.academia.edu/10170391/Calculo_de_potencia_de_un_molino)

**Alcoinsa.** *Molino de martillo.* [en línea]. 2000. [Consulta: 20 septiembre 2018]. Disponible en: <http://taninos.tripod.com/molinosmartillo.htm> (Accessed: 18 April 2018).

**Alnicolsa.** *Molino de martillo* [en línea], 2000, [Consulta: 20 septiembre 2018]. Disponible en: <http://taninos.tripod.com/molinosmartillo.htm>

**Bahamon, M. and Alfreddy, M.** *Automatizacion de maquina procesadora de harina de maíz y arroz.* [en línea], Quito-Ecuador: ESPE. 2011. [Consulta: 20 septiembre 2018]. Disponible en: <http://repository.uniminuto.edu:8080/xmlui/handle/10656/1185>

**Bermejo, M.,** *Separación de Partículas,* Madrid-España: Universidad de Valencia, 2003.

**Bermeo Martínez, D.C.** *Diseño y construcción de un molino de martillos trituradora de granos para granjas avícolas.* Quito-Ecuador: ESPE, 2009.

**Calero, R.** *Fundamentos de Mecanismos y Máquinas para ingenieros,* Madrid-España, 1999 pp. 112.

**Casarin, E.** *Elementos de Ingeniería Química UNIVERSIDAD DE OVIEDO.* [en línea]. 5ta edn.. Madrid-España: Edited by Aguilar. (2012). [Consulta: 13 Noviembre 2018]. Disponible en: [http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/12877/1/TD\\_Beatriz Alvarez Rodriguez.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/12877/1/TD_Beatriz%20Alvarez%20Rodriguez.pdf)

**Cesarin, E.** *Elementos de Ingeniería Química.* 5ta Edicion: Madrid-España. Aguilar. 2012.

**Cuadrado Moncayo, I.R & Rueda Castillo, J.L.** *Diseño y construcción de un molino de martillo.* Quito-Ecuador: Universidad San Francisco de Quito, 2009.

**Guayllas, Fernando, L. et al.** *Diseño y construcción de un molino de martillos con tamiz intercambiable, para pulverizar yeso crudo* [en línea], 2012, . [Consulta: 7 Junio 2018]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2029/1/96T00171.pdf>

**Hedenzfr, A.** *Separación de Sólidos por Tamizado*, Lima-Perú: s.n. 2009.

**Hinojosa Salazar, N.** *Ejemplos de cálculo de tamaño final de grano molido, conociendo la potencia del motor y las dimensiones iniciales del sólido.* [En línea] 2014. [Consulta: 3 Mayo 2018]. Disponible en: [http://www.academia.edu/10170391/Calculo\\_de\\_potencia\\_de\\_un\\_molino](http://www.academia.edu/10170391/Calculo_de_potencia_de_un_molino)

**Ibarz, A. & Barbosa-Cánovas, G. V.** *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos.* Mundi-Prensa. 2015.

**McCabe, W., Smith, J. and Harriott, P.** *Operaciones unitarias en ingeniería química.* Séptima. México: Edited by M. G. Hill.. 2007

**Marchense García, A.** *Consumo de Energía en Operaciones de Conminución de Minerales,* Minería, 322 (1), 2004, pp 15-21.

**Martínez, D. B.** *Diseño y construcción de un molino de martillos triturador de granos para granjas avícolas.* [en línea]. Quito-Ecuador: ESPE. 2014. [Consulta: 13 Noviembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8299>

**McCabe, W., Smith, J. & Harriott, P.** *Operaciones unitarias en ingeniería química.* Séptima Edición. Mexico-Mexico: M.G. Hill. 2007.

**Monsalvo, R. & Romero, M. del R.** *Balance de materia y energía : procesos industriales.* Larousse: Grupo Editorial Patria. 2014

**Mott, R.** *Diseño de elementos de Maquinas.* 4ta Ed. México-Mexico: Pearson Educación.2006 pp. 45-67.

**Cuadrado, Rafael, I. et al.** *Universidad san francisco de quito diseño y construcción de un molino de martillos.* [en línea]. 2009. [Consulta: 13 Noviembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1126/1/91259.pdf>

**Rodríguez, B.** *Tipos de molinos*, [En línea]. 2014. [Consulta: 3 Mayo 2018]. Disponible en: [http://www.academia.edu/10170391/Calculo\\_de\\_potencia\\_de\\_un\\_molino](http://www.academia.edu/10170391/Calculo_de_potencia_de_un_molino)

**Shigley, Joseph. Edward; Mischke C. R.** *Diseño e Ingeniería Mecánica*, 5ta, ed. México-México: McGraw-HILL. 2001 pp. 883.

**UCLA. Decanato de Agronomía, O. et al.** *Bioagro., Bioagro. Universidad Centroccidental 'Lisandro Alvarado'* [en línea]. 2013. [Consulta: 13 Noviembre 2018]. Disponible en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-33612013000300002](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612013000300002)

**Vargas, J. M., Poma, G. & Fernando, L.** *Diseño y Construcción de un Molino de Martillos con Tamiz Intercambiable para Pulverizar Yeso Crudo*. [en línea]. 2012. [Consulta: 10 Junio 2018]. Disponible en: Available at: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/2029>

